

熱電変換素子と中温度用太陽集熱器を用いた
熱・電気エネルギー供給システムのエネルギー解析ENERGY ANALYSES ON THE ENERGY SUPPLYING SYSTEM
USING ISEC COLLECTORS AND THERMOELECTRIC GENERATORS田代智子*¹ 鈴木研夫*¹ 田中忠良*²
Tomoko TASHIRO Akio SUZUKI Tadayoshi TANAKA小林繁雄*³ 堀米孝*¹
Shigeo KOBAYASHI Takashi HORIGOME

Abstract

The energy analyses on an energy supplying system using an ISEC(Integrated Stationary Evacuated Concentrator) collector and a thermoelectric generator were reported. For this system, the relation between insolation intensity and the number of thermoelectric elements has not been specified. In this paper, the exergy concept is used for the energy analyses, and the relation is clarified. A Bi-Te compound is supposed as a thermoelectric material, and the solar collector is operated under the exergetic optimum operating condition. The analyses are made under the condition of changing the insolation intensity and the temperature of cold junction. The major output of this system is heat. However, according to increase of solar radiation intensity, the conversion efficiency of the thermoelectric element increases. The number of the thermoelectric elements gets small when insolation intensity and the temperature difference between hot and cold junctions are large. The total area of thermoelectric elements is about 0.01 m² for a unit collector area.

Key words: CPC, ISEC collectors, thermoelectric generators, Bi-Te compound, exergy concept, electric and heat supply systems

1. はじめに

太陽エネルギーの利用形態は、光利用、熱利用とに分けることができる。また供給形態においては、太陽光発電・電気供給、熱供給、および昼光供給とに分けることが可能である。

熱利用に用いられる集熱器は、集熱温度の上昇に従って集熱板からの熱損失も増加し、集熱効率は低下していく。一般に市販されている平板型集熱器は低温度(約 80℃ 以下)集熱器であるため、100℃ 付近

かそれ以上の集熱は、効率が非常に悪くて適さない。集熱温度として 200℃ 以上を目標とした集熱システムでは、追尾型集光系が用いられているが、150℃ 程度の中温度集熱の場合には、コスト的にみても追尾系を採用することには無理がある。しかし近年、非結像型集光器を用いた集熱器も開発され、コストに見合った中温度集熱も可能になりつつある。これは、複合放物面型集光系(CPC: Compound Parabolic Concentrator)を用いた固定式の集熱器であり、ISEC(Integrated Stationary Evacuated Concentrator)集熱器と呼ばれる。

また、古くからエネルギー変換方法の一つとして知られている熱電変換素子の利用は、それが持つ効果の

原稿受付 平成5年9月3日

1 会員, 東京農工大学工学部

2 会員, 電子技術総合研究所

3 非会員, 東京農工大学工学部

着目の仕方により、電源、冷暖房とに大別できる。

本研究は、電源としての熱電素子に注目し、I S E C 集熱器と熱電変換素子を用いた熱電併給可能なエネルギーシステムを提案した。I S E C 集熱器で得られるエネルギーを、熱電素子を用いることで無駄なく有効に利用しようとするものである。本システムは機械的信頼性が高く、かつ保守の容易さなどの点から、孤島などの遠隔地やインフラ整備の遅れが問題となっている開発途上国などでの、独立型エネルギー供給システムのオプション技術の一つとして有効であると考えられる。

そこで本論文では、システムの電気および熱出力を対象としたシステムのエネルギー解析を行った。また、得られた結果と熱電併給システムの一つである太陽電池を用いた光熱ハイブリッドシステムの結果との比較も行った。

さらにエクセルギー概念による集熱器の最適運転条件を用いて、より詳細な解析を行った。

2. システムの構成および条件

本システムは図1に示すように、システムの入力エネルギーである日射を集熱する I S E C 集熱器、熱エネルギーを電気エネルギーに変換する 熱電変換素子、出力としての 電力負荷 および 熱負荷 で構成されている。

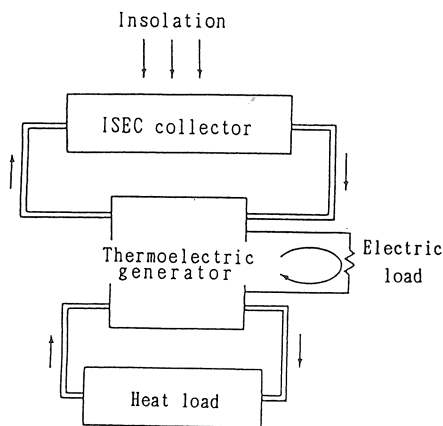


図1 システム構成図

集熱器と熱電素子は熱媒体の流れにより熱的に接続されている。集熱器により集熱された熱が素子部の高温接合部を加熱する際、低温接合部との温度差により

熱電素子は熱起電力を生じ、素子と電氣的に接続された電力負荷では電力が供給される。また、熱電素子から低温接合部を通して放出される熱は、熱電素子と熱的に接続された熱負荷より供給される。

本論文のエネルギー解析では、以下の仮定を行った。

- (a) システムは定常状態である。
- (b) 配管での熱損失は無視する。
- (c) 集熱器はエクセルギー的最適運転条件にある。
- (d) 素子部に接続されている電力負荷の抵抗は素子部の全内部抵抗と等しく、出力最大条件を満たしている。

3. 解析式

集熱器からの単位集熱面積当たりの熱出力 q_{col} [W/m^2] は、光学的効率 η_{opt} 、全熱損失係数 u [W/m^2K]、集熱板温度 T_{col} [K]、外気温度 T_a [K] として、

$$q_{col} = \eta_{opt} I - u (T_{col} - T_a) \quad (1)$$

と書ける。集熱器の集熱効率 η_{col} は(1)式の両辺を日射量 I [W/m^2] で除することで求められる。

本システムでは先の仮定より、集熱器からのエネルギー出力は損失なく電気エネルギーおよび熱エネルギーとして供給されるので、システム効率 η_{sys} は集熱効率 η_{col} と一致する：

$$\eta_{sys} = \eta_{col} = \eta_{opt} - u \left(\frac{T_{col} - T_a}{I} \right) \quad (2)$$

次に熱電素子のエネルギー収支を考える。熱電変換素子は、p型とn型の半導体が対を形成したものを基本単位としている。

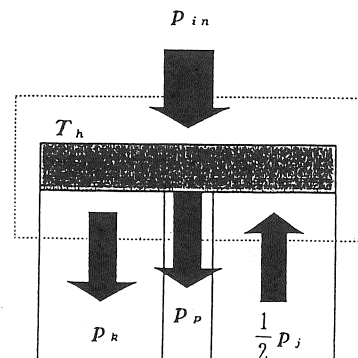


図2 1対素子の高温接合部でのエネルギーバランス

熱電素子の高温接合部でのエネルギーバランス (図 2) は、高温接合部に流入する熱を P_{in} [W], ペルチェ発熱を P_p [W], 伝導熱を P_k [W], ジュール熱を P_j [W] として、

$$P_{in} - P_p - P_k + \frac{1}{2} P_j = 0 \quad (3)$$

となる⁽¹⁾。

$p-n$ 1 対の熱電素子について、 P_p , P_k , P_j はそれぞれ、

$$\begin{aligned} P_p &= \alpha i T_h \\ P_k &= K (T_h - T_c) \\ P_j &= i^2 r \end{aligned}$$

と表される。ここで、 α [V/K]:ゼーベック係数, i [A]:電流, K [W/K]:相当熱伝導率, T_h [K]:高温接合部温度, T_c [K]:低温接合部温度, r [Ω]:内部抵抗である。従って、1 対当たりの高温接合部での吸熱量 P_{in} は、

$$P_{in} = \alpha T_h i + K (T_h - T_c) - \frac{1}{2} i^2 r \quad (4)$$

と書ける。

N 対の素子が直列に接続されている時、素子の電極間に生じる起電力は、

$$V = N \{ \alpha (T_h - T_c) - r i \} \quad (5)$$

と表される。一方、電力負荷の抵抗を R [Ω] とすると、そこでの電位降下は $V = R i$ なので、結局 N 対素子と電力負荷からなる回路に流れる電流は、

$$i = \frac{\alpha (T_h - T_c)}{r (1 + m)} \quad (6)$$

と表すことができる。ただし、 m は外部抵抗 R と熱電素子の全内部抵抗 Nr の比 $m = R / Nr$ である。先の仮定(d)は、 $m=1$ を意味しており、この時最大電気出力は

$$P_{el \max} = \frac{N \alpha^2 (T_h - T_c)^2}{4r} \quad (7)$$

となる。

ここで、素子 1 対当たりの電気抵抗率を ρ [Ωm], 熱伝導率を k [W/mK], 加/放熱面面積を S [m^2], 熱伝導方向長さを l [m] として、内部抵抗 r , 相当熱伝導率 K がそれぞれ $r = \rho \frac{l}{S}$, $K = k \frac{S}{l}$ であることよ

り N 対の熱電素子に流入した熱に対する素子からの電気出力の比 η_{el} は、素子の熱電変換効率は(4), (7)式を用いて、

$$\eta_{el} = \frac{\frac{\alpha^2 (T_h - T_c)}{4\rho}}{\frac{\alpha^2 T_h}{2\rho} + k - \frac{\alpha^2 (T_h - T_c)}{8\rho}} \quad (8)$$

として求められる。また素子からの熱出力 P_{th} [W] は、素子に流入する熱から電気出力分を差し引いたものに等しく、流入熱に対する熱出力の比 η_{th} は、 P_{th} を素子入力で割ることで得られる。従って、

$$\eta_{th} = \frac{P_{in} - P_{el}}{P_{in}} = 1 - \eta_{el} \quad (9)$$

より求められる。(8), (9)式で注目すべきことはシステム出力の効率が素子の対数に依存していないことである。

素子部が N 対の熱電素子より形成されている場合の仮定条件(b)より、 $q_{col} = N P_{in}$ が成り立つ。従って素子の対数 N は、(1), (4)式をこれに代入し、

$$N = \frac{\eta_{opt} I - u (T_{col} - T_a)}{\frac{S}{l} \left\{ \frac{\alpha^2 T_h dT}{2\rho} + k dT - \frac{\alpha^2 dT^2}{8\rho} \right\}} \quad (10)$$

となる。ただし、 $dT = T_h - T_c$ である。

(10)式において、外気温度や集熱器の特性値、熱電素子の物性値、素子の低温接合部温度が決まっていれば、 N は I と T_{col} ($=T_h$) [K] により求められるが、 I と T_{col} の関係が一意的でなければ、 N を一義的に決定することはできない。

ここで、日射と集熱器の集熱温度の関係を求めるために、エクセルギーの概念を用いる。集熱器のエクセルギー出力は集熱器温度が、

$$T_{col} = \sqrt{\Theta T_a} \quad (11)$$

となった時、近似的に最大となる⁽²⁾。 Θ は上限温度と呼ばれ、熱媒体を流さないときの集熱板の最高到達温度である。(1)式で $q_{col} = 0$ とおけば、

$$\Theta = \frac{\eta_{opt} I}{u} + T_a \quad (12)$$

となる。

最適運転条件にある集熱器の出力 $q_{col \ opt}$ は、

$$q_{col \ opt} = u \sqrt{\Theta} (\sqrt{\Theta} - \sqrt{T_a}) \quad (13)$$

となる⁽²⁾。

この時、熱電素子の対数 N は、

$$N = \frac{u\sqrt{\Theta}(\sqrt{\Theta} - \sqrt{T_a})}{\frac{s}{l} \left\{ \frac{\alpha^2 T_h d T}{2\rho} + k d T - \frac{\alpha^2 d T^2}{8\rho} \right\}} \quad (14)$$

で求めることができる。

4. 結果と考察

計算に当たり、熱電素子はビスマス・テルル系の材料とし、I S E C集熱器としては江東電気(株)製の集熱器(図3)を想定した⁽³⁾。集熱器に関する係数、および熱電素子の物性値、形状は以下の値を用いた。

a. 集熱器⁽³⁾

光学的効率: 0.6

全熱損失係数: $1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$

b. 熱電変換素子

ゼーベック係数⁽⁴⁾: $393 \text{ } \mu\text{V/K}$

熱伝導率⁽⁴⁾: 3.23 W/mK

電気抵抗率⁽⁴⁾: $1.896 \times 10^{-5} \text{ } \Omega\text{m}$

素子熱伝導方向長さ⁽⁵⁾: $1 \times 10^{-3} \text{ m}$

素子加/放熱面積⁽⁵⁾: $2 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

4.1 エネルギー解析

エネルギー解析では、日射量 I を 600, 800, 1000 W/m^2 とした。外気温度については、既に報告されている他のシステムとの比較を行うために条件を等しくし、 $T_a = 288 \text{ K}$ とした。集熱板の温度 T_{col} は、集熱器効率因子がほぼ 1 に等しいため、集熱器の入口と出口

温度の平均として考えた。

熱電変換素子の変換効率の計算において、仮定(b)より素子の高温接合部温度 T_h は T_{col} に等しいとしたが、低温接合部温度 T_c は比較的低温利用を想定して 333, 353, 373 K の3つの温度とした。

以上の仮定での計算結果を図4に示す。横軸には集熱板温度と外気温度の差を日射で割った値をとり、縦軸に効率をとった。実線はシステム全体の効率 η_{sys} を表している。 T_{col} が外気温度 T_a に近い部分での効率は約 60% を示すが、集熱温度の上昇と共に直線的に低下する。実線の途中から分岐している点線は、システムの熱出力の効率を示している。3本の点線は上から T_c が 373, 353, 333 K の結果であり、集熱温度の上昇に従いシステム効率との差が広がっていくが、この差は熱電素子からの電気出力の増加によるものである。

以上の計算より、本システムは集熱温度が低い領域では熱供給が大部分を占め、高温になるにつれて、電気供給が多くなる特徴を持つ電熱ハイブリッド供給システム(E-H)であることがわかる。

比較のために、集熱器と太陽電池からなる光熱ハイブリッドシステム(L-H)のシステム効率と、集熱効率を一点鎖線で図4に示した⁽⁶⁾。二つの曲線の差は、光熱システムの電気変換効率を表している。この光熱システムは、外気温度付近のシステム効率は高いが、高温になるに従いその低下は著しい。また、高温になると太陽電池の効率が低下するために電気出力の占める割合が小さくなる傾向がある。一方、本システムでは逆に高温になればなるほど、電気占める比率が高

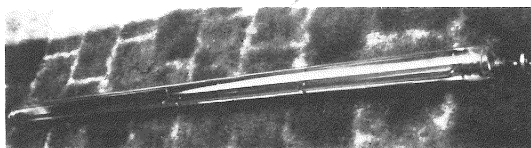


図 3.1 単管の外形

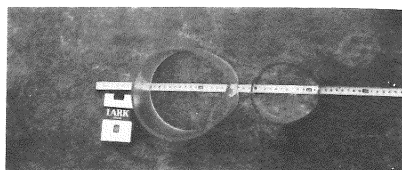


図 3.2 ガラス管の断面

図3 I S E C集熱器

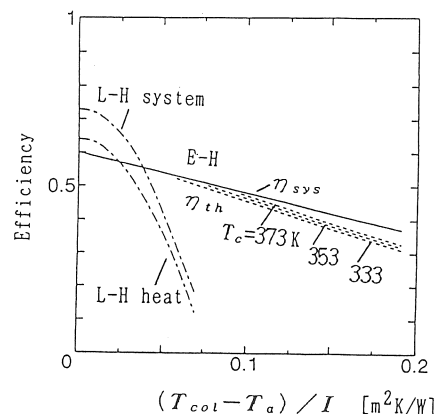


図4 システムの特性; E-H=電熱ハイブリッドシステム, L-H=光熱ハイブリッドシステム

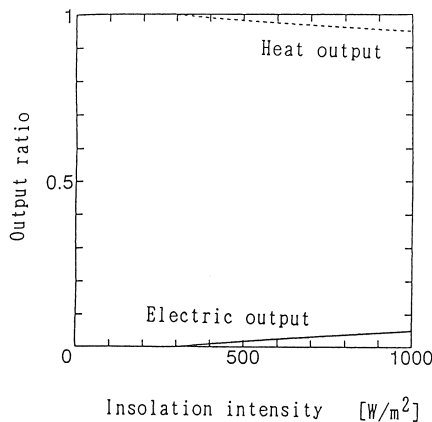


図5.2 素子入力に対する出力比

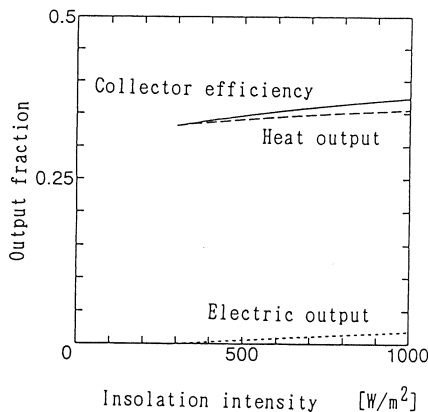


図5.1 日射に対する出力の割合

図5 日射が変化した場合

くなっており、光熱システムと比べた場合、高温度での運転に適したシステムであることがわかる。

4.2 エクセルギー概念を導入したエネルギー解析

4.2.1 日射量変化

熱電素子の低温側温度 T_c を一定とし、日射量を変化させた場合のシステムの特長変化を調べた。日射量 I は 0 から 1000 W/m^2 まで変化させた。また T_c は、熱供給温度として 353 K を仮定した。この温度は食品加工、スチーム供給などのプロセスヒート用熱源として利用可能である。

図5.1は、日射量 I に対する電気出力 P_{el} 、熱出力 P_{th} の割合を表している。システム出力は日射量の増加に従って上昇しており、日射量が 1000 W/m^2 の時のシステム効率率は 37.4% である。日本の年平均日射

800 W/m^2 でも約 36% となる。

図5.2は、熱電素子の高温接合部に流入する P_{in} に対する電気出力 P_{el} 、熱出力 P_{th} の比を表している。これより、熱電素子からの出力の大部分は熱であることがわかる。このことは、(3)式の素子のエネルギーバランスにおいて、吸熱量 P_{in} を 1 とした場合、熱出力に關係する熱伝導 P_k が 0.6 なのに対し、電気出力に關係するジュール熱 $\frac{1}{2} P_j$ は 0.01 程度であることに起因する。熱電変換効率率は、熱電素子への入力に対して数%の程度で、 1000 W/m^2 の日射量で 5% となっている。

以上のことから、 T_c が一定の場合、日射量の増加に従って、システムは出力、効率とも増加し、全出力に占める電気出力の割合も増加する。

4.2.2 低温接合部温度変化

日射量を一定とした際、熱電変換素子の冷却温度 T_c の変化に対してシステムがどのような特徴を持つのかを調べた。仮定条件(b)より、日射量が一定の場合、素子へ流入する熱も一定となる。従って、 T_c の変化は素子の出力変化に寄与することになる。 T_c は、工業的に需要のある温度域を考え 353 から 433 K まで変化させた。

$I = 800 \text{ W/m}^2$ の時の結果を図6に示す。

図6.1は T_c の変化に対する、素子への入力 P_{in} 、素子からの電気出力 P_{el} 、および熱出力 P_{th} を表したものである。日射が 800 W/m^2 での P_{in} は、単位集熱面積当たり約 290 W である。このうち熱として出力される量 P_{th} は、 270 W 以上であり、出力の大部分は熱である。しかし、 T_c が低いほど電気出力の比率が高くなる。

図6.2は日射量に対する出力の割合の T_c 依存性を示したものである。電気出力が最も大きいところでは、システム効率中の、電気出力の効率は 1.7% 、熱出力の効率は 35% となっている。この傾向は他の日射量に関しても同様である。

4.2.3 出力特性の違い

一般に、集熱器の集熱量は日射量が一定の場合、熱媒体の流量によってのみ変化する。流量が多ければ、低い集熱温度で多くの熱を得ることができる。一方、流量が少なければ高い集熱温度となるが、少量の熱しか得られない。

図7は、日射が 800 W/m^2 である時、集熱器の流量が最小から無限大に変化した場合の集熱量の変化と、熱電素子の変換効率の変化を示す。横軸は流量の代わ

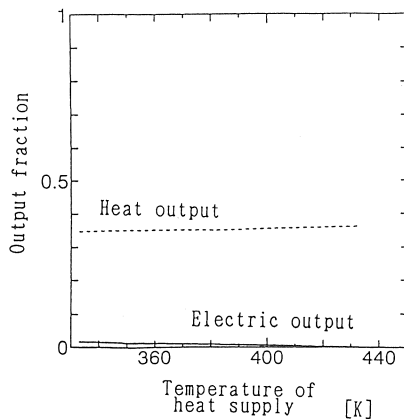


図6.2 日射量に対する出力の割合

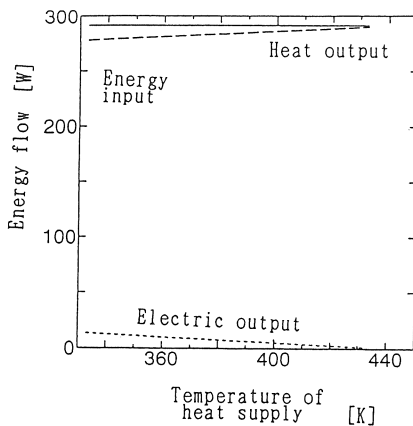


図6.1 素子部でのエネルギーバランス

図6 低温接合部温度が変化した場合

りに集熱板温度 $T_{col} (=T_h)$ をとった。これは、本計算においては、流量を用いる代わりにそれと対応する集熱温度を用いたためである。

集熱量は $T_{col}=T_a$ を最大として、集熱板温度の上昇に従い直線的に低下する。一方、熱電変換素子の効率は T_c が一定の場合、 T_h の増加にともなって大きくなる。

このような特徴をもった集熱器と熱電素子が組合わさってシステムを構成した場合、そこからの電気出力が流量（集熱温度）に対してどのように変化するかを計算した。素子の T_c は外気温度に等しく、日本の年平均気温である288 Kで一定とし、日射が600, 800, 1000 W/m^2 について行った。

図8に結果を示す。横軸には集熱温度をとり、縦軸の電気出力は集熱器出力に素子の熱電変換効率を乗ず

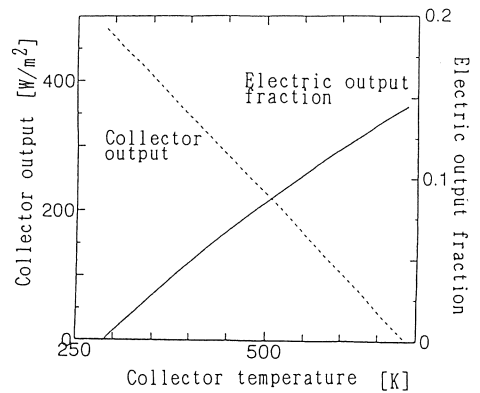


図7 流量変化に対する集熱量と熱電変換効率

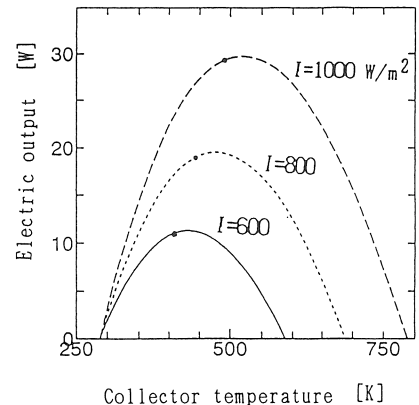


図8 流量の変化と熱電素子の電気出力

ることで求めた。どの日射についても電気出力がある温度でピークを持つことがわかる。これは、集熱温度が低いところでは集熱量は大きくても熱電変換効率 η_{ei} が小さいために、大きな電気出力 P_{ei} を得ることができない。また、高い集熱温度では熱電変換効率 η_{ei} は大きい、集熱量が小さいために大きな電気出力 P_{ei} を得ることができないので、結果として電気出力 P_{ei} は図のようなピークをもった曲線となる。

集熱器の出力をエクセルギー的に見た場合、エクセルギー出力は集熱板温度に対して図8と同様なピークをもった曲線となる。このピークにおける集熱板温度は(11)式より求められる⁽²⁾。図8の各線上にある黒点は、各日射での集熱器のエクセルギー出力が最大となる集熱板温度 T_{col} の位置である。熱電素子からの電気出力のピーク温度と比べ、エクセルギー出力のピー

ク温度の方が若干低温度側にずれている。これは、熱電変換素子の変換効率と理想変換効率であるカルノー効率との差を原因とするものである。

4.2.4 素子の必要対数

実際のシステムでは、素子を1対で用いることは少ない。通常は、大きい電位差を得るために素子を直列に接続する必要がある。このため、本システムで必要となる素子の対数について調べた。この計算においても日射が変化した場合と、熱負荷供給温度 T_c が変化した場合について計算を行った。なお日射や温度の設定は、4.2.1および4.2.2での計算と同様とした。また、一対の素子の大きさは先に述べた通りである。

図9は、日射の変化に対する結果である。縦軸は単位面積当たりの集熱量において、熱電素子からの電気出力が最大条件を満たすために必要となる素子の対数である。日射量が少ないほど多くの対数が必要とすることがわかる。日射量が 400 W/m^2 と 800 W/m^2 の場合では、必要な対数はそれぞれ約 2600 1/m^2 、約 1300 1/m^2 と、 400 W/m^2 の場合の方が2倍近く多い。また、 600 W/m^2 以上の日射量では、日射量変化に対する素子の対数の変化が小さいので、この領域では対数をほぼ一定に決めることができる。

図10は、 T_c を変化させた場合の結果である。日射量が一定であれば、 T_c の上昇に従って、必要な対数は増加する。また、素子の対数をほぼ一定に決定することのできる T_c の範囲は日射量が多い場合ほど大きくなっている。

以上より、日射量または T_c を変化させた場合、日射量 I と熱電素子接合部間の温度差 $T_h - T_c$ が大きければ大きいほど、必要となる対数は少なくて済むことがわかる。

システムの熱電素子部は通常いくつかの素子対が集合してモジュールを形成し、素子部の最小単位となる。ここで1モジュールを、

加/放熱面積: $9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

対数: 127 対

と想定し⁽⁶⁾、先に得られた結果をもとに素子部のモジュール数ならびに面積を求めた。

結果は図11に示す通りである。これは単位集熱面積当たりのモジュール面積である。モジュール面積は 0.01 m^2 程度となり、集熱面積 1 m^2 に比べ100分の1の大きさと非常に小さい。

集熱された熱を素子に伝えるためには、熱交換部が必要となる。このため、素子部の面積が集熱面積に対

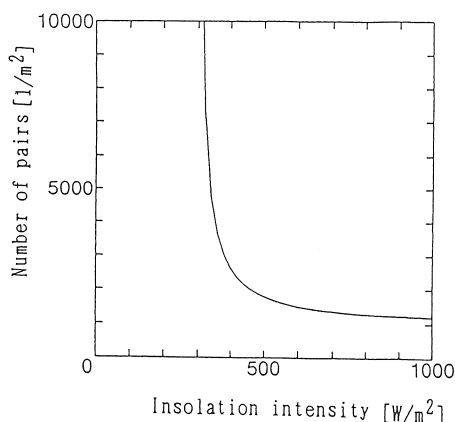


図9 素子対数変化の日射量依存性

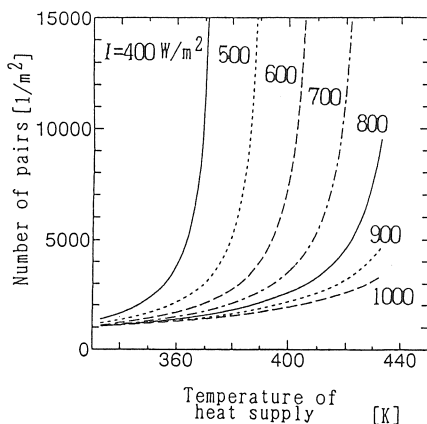


図10 低温接合部温度と対数

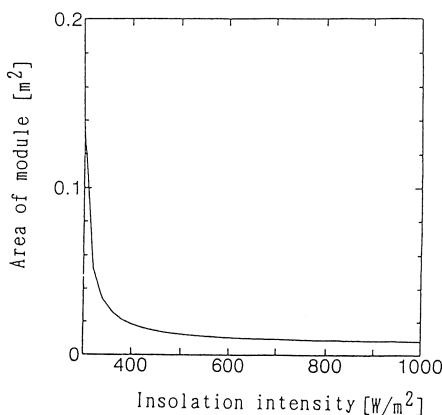


図11 日射量と素子モジュール面積

して小さいということで、小さい面積に損失がなるべく少なく熱を伝える熱交換の方法を検討する必要がある。

5. まとめ

熱電変換素子と I S E C 集熱器からなるエネルギー供給システムを提案し、そのエネルギー解析を行った。これにより得た知見をまとめると以下ようになる。

- (a) 本システムは、集熱温度の上昇と共に電気の供給が多くなる特徴をもった熱電ハイブリッド併給システムであり、中温度以上の温度領域で有効となる。
- (b) 本システムは熱電併給システムであるが、電気供給の占める割合は、日射量（すなわち高温接合部温度）の増加、および接合部間の温度差の増加に従い増加する。
- (c) 素子部が必要となる対数は、 600 W/m^2 以上の日射ではば一定となる。

そして、集熱面積に対し素子部の面積が小さいことによる熱交換方法の最適化や、実用化を考慮した上での需要側のエネルギー消費構造をマッチングしたシステム設計の方法に関する検討などが、今後の課題として挙げられる。

参考文献

- (1) 上村欣一・西田勲夫, 熱電半導体とその応用, 26-33, 日刊工業新聞社, 東京.
- (2) 鈴木研夫, コレクター最適運転条件の近似式, 日本太陽エネルギー学会第11回研究発表会講演論文集 (1985-12), 101.
- (3) 江東電気(株), 産業用等ソーラーシステム実用化技術開発資料, 1992.
- (4) 太田敏隆・梶川武信, 海洋温度差を利用した熱電発電実験, 電総研彙報, 第50巻, 第9・10号, 1986.
- (5) 阿部産業, 熱電素子基礎資料.
- (6) 門谷, 光熱ハイブリッドシステム, 太陽光発電システムシンポジウム予稿集(1990-5), 4-45.