

日立電子冷水器

Hitachi Electronic Water Cooler

細田 泰生* 佐藤 彰也* 小川 洋幸*
Taisei Hosoda Shōya Satō Hiroyuki Ogawa

内 容 梗 概

日立製作所は電子冷凍応用製品として電子冷蔵庫，電子冷水器をはじめ種々のものを研究している。電子冷水器は1960年9月に第1回試作品を内外他社に先がけて発表した。今回さらに性能を改善した電子冷水器の製作を行なった。本文はこの電子冷水器の理論の概要，構造および性能に関して報告したものである。

1. 緒 言

電子冷凍を応用した製品として最も一般に考えられているものは電子冷蔵庫であるが，また電力消費量が普通の電気冷蔵庫より多いことと，材料が高価であることのために，小形の電子冷蔵庫以外は商品化に時日を要すると考えられる。本文で詳細に述べるが，電子冷凍の場合は放熱されるものの温度と吸熱するものの温度との温度差が小さいと，性能が急激に良くなるという特性がある。日立製作所では冷凍機応用製品のひとつとして電気冷水機を製造・販売しているが，これを電子冷凍で行なった電子冷水器を考えると，高温側の冷却に水を使用することが可能であり，また冷却される飲料水も12°C程度まで冷却すればよいので，冷却素子の高温側と低温側の温度差が小さくなり，普通の電気冷水機と同程度の性能が得られることが期待でき，また材料消費量も少なくなると考えられる。電子冷水器は普通の電気冷水機と比較して，圧縮機，凝縮器などの容積をとるものがないので，全体を小形にすることができ，また種々の意匠のものを作ることができる。以上のような考えで，より実用性のある電子冷凍応用製品として電子冷水器の製作を行なった。

本文はこの電子冷水器について述べるのであるが，電子冷凍材料の研究については別の機会にゆずり，今回は電子冷水器の構造についてのみ述べることにする。

2. 基礎理論式

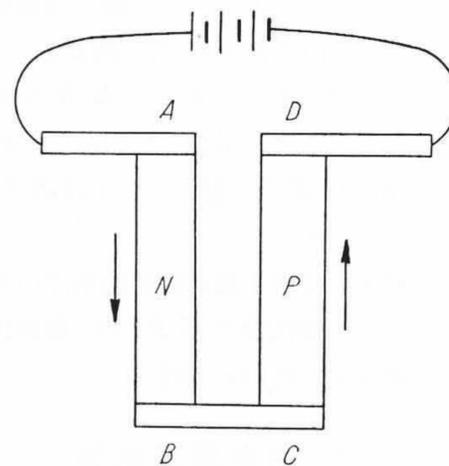
電子冷凍の基礎理論に関しては，種々の文献に発表されているので，ここでは本文の説明に必要な限度の理論式を述べるにとどめる。

第1図のようにP形とN形の半導体電子冷凍素子を組み合わせて直流電流を流した場合AおよびDで発熱が起り，BおよびCで吸熱が起る。この吸熱量および発熱量は(1)式および(2)式で求められる。

$$Q_c = L\theta \left(-\frac{\Delta T}{\theta} + 2\chi - \chi^2 \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_h = L\theta \left(-\frac{\Delta T}{\theta} + 2\chi + \chi^2 \right) \dots\dots\dots (2)$$

- ここに Q_c : 吸熱量 W
 Q_h : 発熱量 W
 $L = \lambda \frac{A}{l}$: 熱伝導係数 W/deg
 λ : 熱伝導率 W/(cm deg)
 l : 素子の長さ cm
 A : 素子の断面積 cm²
 $\theta = \frac{\eta^2 T_c^2}{2RL}$: 材料特性温度差 deg
 $R = \rho \frac{l}{A}$: 素子の電気抵抗 Ω



第1図 電子冷凍説明図

- η : 素子の単位温度差当たりの熱起電力 V/deg
 T_c : 素子の低温側の絶対温度 °K
 ΔT : 素子の高温側と低温側の温度差 deg
 ρ : 素子の比抵抗 Ωcm
 $\chi = \frac{IR}{\eta T_c}$: 比電流(電流と最大温度差をうる電流との比)
 I : 電流 A
 $\gamma = \frac{T_h}{T_c}$
 T_h : 素子の高温側の絶対温度 °K

成績係数は(3)式で求められる。

$$\phi = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} \dots\dots\dots (3)$$

ここに ϕ : 成績係数
 γ は1に近い値であるので近似的に $\gamma=1$ とすると

$$\phi = -\frac{\Delta T}{\theta} \cdot \frac{1}{2\chi^2} + \frac{1}{\chi} - \frac{1}{2} \dots\dots\dots (4)$$

θ および ΔT が与えられた場合成績係数を最大にする比電流は次のとおりである。

$$\chi_m = \frac{\Delta T}{\theta} \dots\dots\dots (5)$$

ここに χ_m : 成績係数を最大にする比電流
 またこの場合の最大成績係数は次のとおりである。

$$\phi_{max} = \frac{1}{2} \left(\frac{\theta}{\Delta T} - 1 \right) \dots\dots\dots (6)$$

実際に水を冷却する場合には第2図に示すように，素子高温側および低温側に熱交換器を設ける。これら熱交換器の性能を熱貫流係数にて表わすことにする。

$$K_h = \frac{Q_h}{T_h - T_0} \dots\dots\dots (7)$$

$$K_c = \frac{Q_c}{T_i - T_c} \dots\dots\dots (8)$$

* 日立製作所栃木工場

ここに K_h : 高温側熱交換器熱貫流係数 W/deg
 K_c : 低温側熱交換器熱貫流係数 W/deg
 T_0 : 高温側冷却水入口温度 °K
 T_i : 低温側飲料水出口温度 °K

この場合の吸熱量および発熱量は(9)式および(10)式で表わされる。また電力消費量は(11)式で表わされる。

$$Q_c = \frac{L \left(\Delta T_m - \Delta T_0 - \frac{2\chi^2 L \theta}{K_h} \right)}{1 + \frac{L}{K_h} + \frac{L}{K_c}} \dots\dots\dots (9)$$

$$Q_h = Q_c + 2 L \theta \chi^2 \dots\dots\dots (10)$$

$$W = 2 L \theta \chi^2 \dots\dots\dots (11)$$

ここに

$\Delta T_m = \theta (2\chi - \chi^2)$: 吸熱量が0のときで比電流が χ のときの素子両端の温度差 deg

$\Delta T_0 = T_0 - T_i$: 冷却水入口温度と飲料水出口温度との温度差 deg

W : 電力消費量 W

上記の諸式の中で材料の性能を表わす値として θ なる値をとってきた。この値はこの材料を使った場合に得られる高温側と低温側の最大温度差である。前述したとおり θ は次式で表わされる。

$$\theta = \frac{\eta^2 T_c^2}{2 R L} \dots\dots\dots (12)$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$L = \lambda \frac{A}{l}$$

したがって

$$\theta = \frac{\eta^2 T_c^2}{2 \rho \lambda} \dots\dots\dots (13)$$

このように θ は低温側の温度 T_c によって異なるので材料固有の値ではない。よって材料固有の値として次式の性能指数なる値をとることにする。

$$Z = \frac{\eta^2}{\rho \lambda} \dots\dots\dots (14)$$

ここに Z : 性能指数 deg⁻¹
 性能指数を用いると θ は次式で表わされる。

$$\theta = \frac{Z T_c^2}{2} \dots\dots\dots (15)$$

3. 電子冷水器の構造

3.1 設計計算

(1) 冷却能力

冷却能力を次のように設定した。

飲料水入口温度: 25°C

飲料水出口温度: 12°C

冷却温度差: 13 deg

飲料水供給能力: 25 l/h

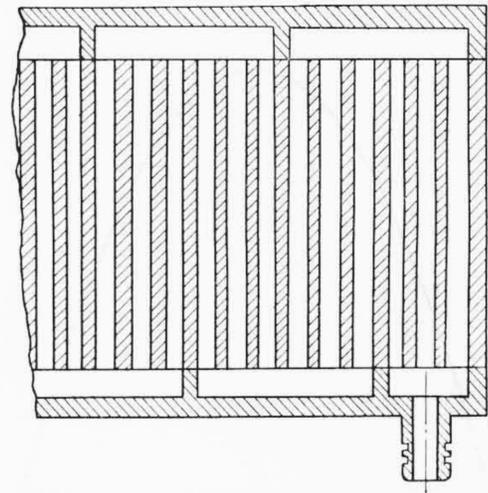
冷凍容量: 325 kcal/h=378 W

冷却水温度: 25°C

(2) 熱交換器性能

熱交換器としては第2図に示すような構造のものを採用することにした。

冷却水として水道水を用いる場合は圧力が低い場合も考えられるので熱交換器内の圧力損失が問題になる。流量 100 l/h 入口出口の圧力差を 0.5 kg/cm²とした場合、最も性能の良いものを実験



第2図 熱交換器

によって求めた結果、熱交換器の面積は 500 cm²となり、高温側熱交換器熱貫流係数 K_h および低温側熱交換器熱貫流係数 K_c は次のようになった。

$$K_h = 166.5 \text{ W/deg}$$

$$K_c = 124.5 \text{ W/deg}$$

前述したように冷凍容量の計画値は 378W であるので低温側熱交換器による温度損失は 3°C である。飲料水出口温度は 12°C としたので素子低温側の温度は 9°C でなければならない。

(3) 材料性能

日立製作所においては数年前より電子冷凍用の熱電材料の研究を行っており、現在安定して生産できる材料性能は $Z = 2.25 \times 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$ であるので今回の製品には $Z = 2.25 \times 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$ のものを使用した。

前述したように素子の低温側の温度は 9°C (282°K) であるので(15)式を用いて θ を求めると $\theta = 90^\circ\text{C}$ となる。

(4) 近似性能計算

正確な性能計算は(9), (10), (11)式によって求めればよいのであるが、概略の数値を求めるには高温側熱交換器の熱貫流率を無限大として(5)および(6)式を用いて大体の値をまず求めるのが便利である。

冷却水温度は 25°C で素子低温側温度は 9°C であるので $\Delta T = 16^\circ\text{C}$, また $\theta = 90^\circ\text{C}$ であるので(5)式より $\chi_m = 0.177$ が得られる。

また(6)式より $\phi_{\max} = 2.31$ が得られる。冷凍容量は 378W であるので入力は 164W となる。(11)式より L を求めると $L = 29$ となる。

(5) 性能計算

(9), (10), (11)式を用いて性能計算を行なうに当たり、前提となる数値は次のとおりである。

$$\Delta T_0 = 13 \text{ deg}$$

$$\theta = 90 \text{ deg}$$

$$K_h = 166.5 \text{ W/deg}$$

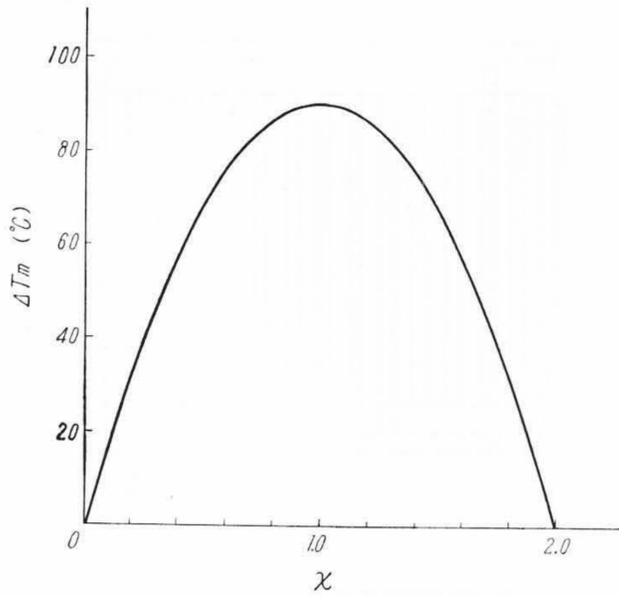
$$K_c = 124.5 \text{ W/deg}$$

$\Delta T_m = \theta (2\chi - \chi^2)$ より χ と ΔT_m の関係を求めたものが第3図である。

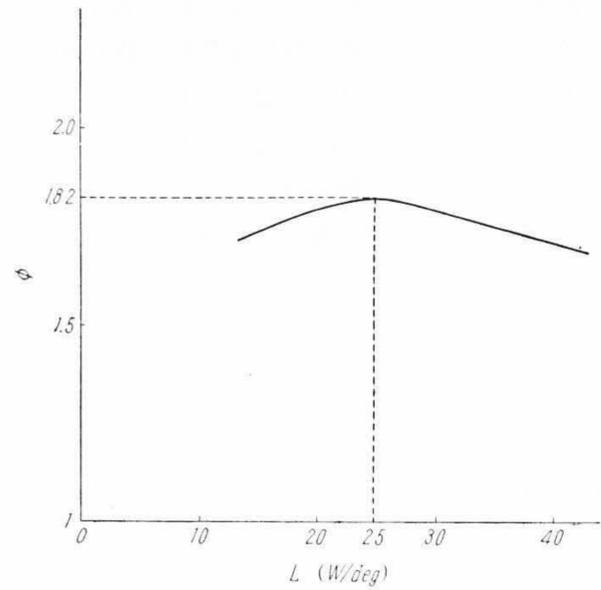
(9)式より Q_c と L と χ の関係を求めたものが第4図である。

(11)式より入力と L と χ の関係を求めたものが第5図である。

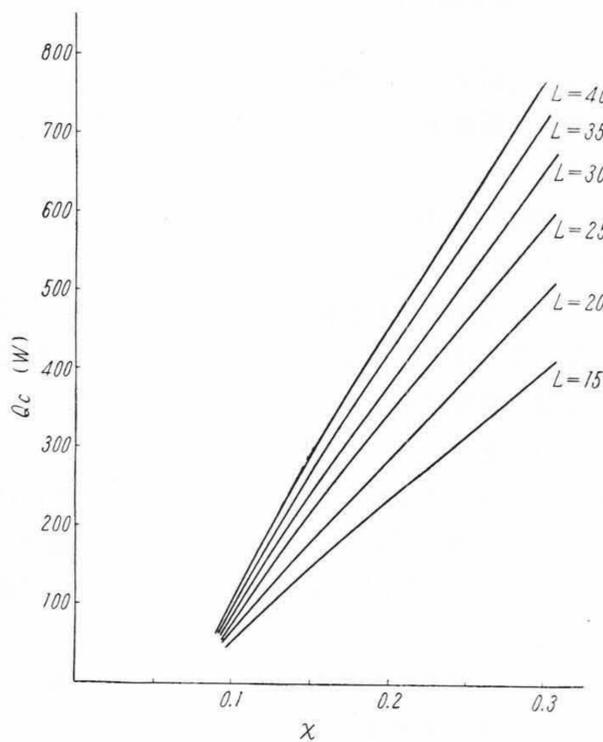
第4図で $Q_c = 378\text{W}$ の場合の L と χ の関係を求め、そのおのおの場合の入力を第5図より求め、成績係数 ϕ と L の関係を求めたものが第6図である。



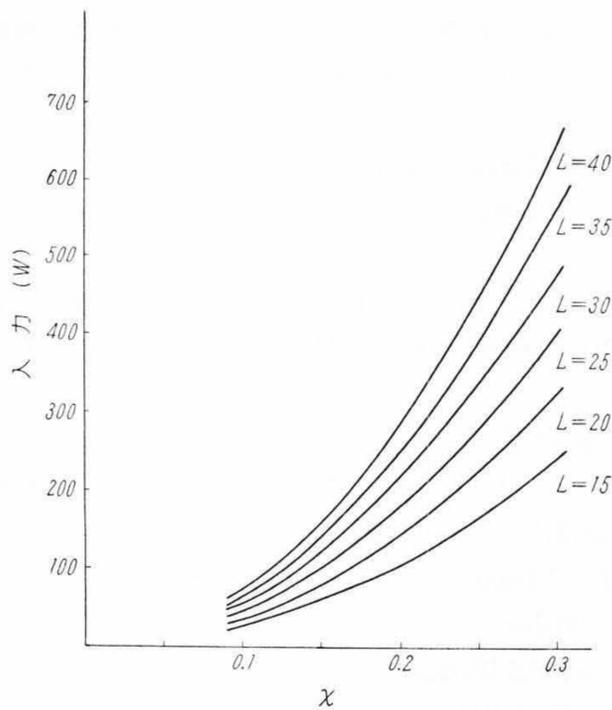
第 3 図 χ と ΔT_m の関係 ($\theta=90^\circ\text{C}$ の場合)



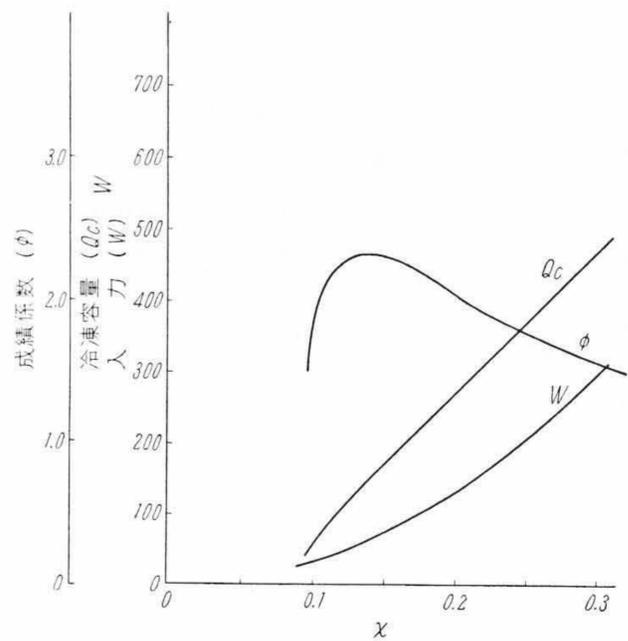
第 6 図 L と ϕ の 関 係



第 4 図 Q_c と L と χ の 関 係



第 5 図 入力と L と χ の 関 係



第 7 図 χ と 冷 凍 容 量, 入 力, 成 績 係 数 の 関 係 (熱起電力による損失の補正を行なわない場合)

$L = \lambda \frac{A}{l}$ であるので、これより l が求められるのであるが加工の面を考え計算値に近い適当な値をとる。この点を考慮し今回の製品は $L = 18.2 \text{ W/deg}$ とした。

$L = 18.2 \text{ W/deg}$ の場合の冷凍容量 Q_c , 入力 W , 成績係数 ϕ と χ の関係を求めると第 7 図のようになる。

(6) 熱起電力による損失の補正

以上の計算は高温側と低温側間に生ずる熱起電力に抗して電流を流すことによって生ずる損失を無視して行なわれた。ここでその損失に対する補正を行なう。

熱起電力による高温側発熱量の増加分は次式で表わされる。

$$W_\eta = 2L\theta(\gamma - 1)\chi \dots\dots\dots (16)$$

ここに W_η : 熱起電力による全損失 W

$$\gamma = \frac{T_h}{T_c}$$

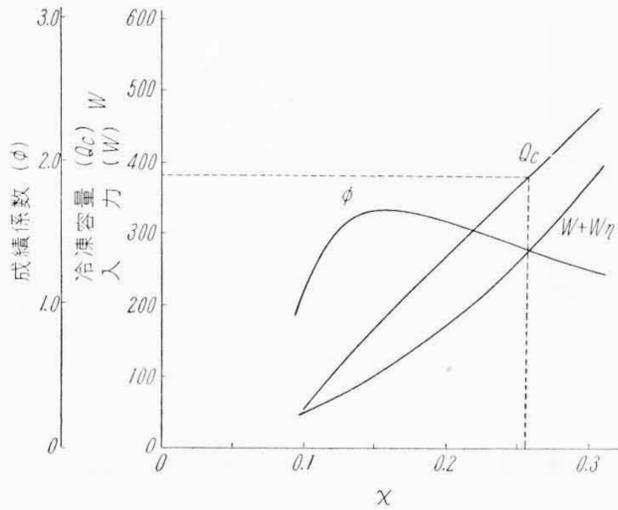
W_η は入力の増大となって現われる。

W_η は高温側で放熱されるのでこれによって T_h が上昇するのであるが、これによる誤差はわずかであるので無視することにする。この補正をした冷凍容量, 入力, 成績係数と χ の関係を求めた結果を第 8 図に示す。

冷凍容量 378W の場合の入力は 275W, 成績係数は 1.37, χ は 0.255 である。

この結果より ϕ が最大となる L の値は 25 でありその場合の ϕ の値は 1.82 である。

断面積 A としては熱交換器の面積をとるのがよいのであるが組立の関係で、熱交換器の面積の 70% とする。さらに加工の際の寸法を考え断面積を 342 cm^2 とすることにした。前述したように



第8図 χ と冷凍容量, 入力, 成績係数の関係 (熱起電力による損失の補正を行なった場合)

3.2 冷水器の構造

3.2.1 冷却素子構造

(1) 素子断面積比

P形とN形の素子の諸特性がまったく同一の場合は両素子の断面積は同一で良いのであるが, 諸特性が異なる場合は両素子の断面積比は次式のようにしなければならない。

$$\frac{A_P}{A_N} = \sqrt{\frac{\rho_P \lambda_N}{\rho_N \lambda_P}} \dots\dots\dots (17)$$

ここに A_P : P形素子の断面積 cm^2

A_N : N形素子の断面積 cm^2

ρ_P : P形素子の比抵抗 Ωcm

ρ_N : N形素子の比抵抗 Ωcm

λ_P : P形素子の熱伝導率 W/cm deg

λ_N : N形素子の熱伝導率 W/cm deg

(17)式によって A_P/A_N を求めると 0.84 となる。

(2) 冷却器の性能

素子材を組み立てたものを冷却器と称することにする。冷却器の全抵抗は 5.88Ω であった。

前述したように $Z=2.25 \times 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$, $L=18.2 \text{ W/deg}$ である。 $Z=\eta^2/RL$ より η が求められる。最大温度差を生ずる電流 I_{opt} は次式で表わされる。

$$I_{\text{opt}} = \frac{\eta T_c}{R} \dots\dots\dots (18)$$

ここに I_{opt} : 最大温度差を生ずる電流 A

これより I_{opt} を求めると $I_{\text{opt}}=23.5\text{A}$ となる。

冷凍容量 378W の場合の χ は 0.255 であるので, この場合の電流は 6A となる。またこの場合の入力は 275W であるので電圧は 45.8V となる。

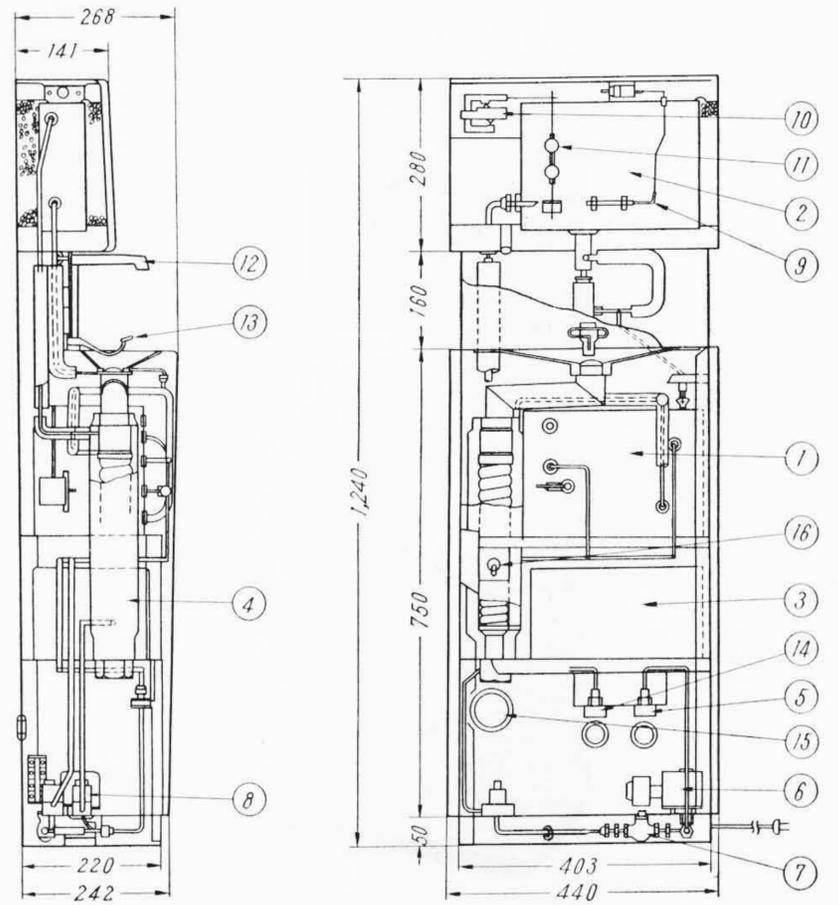
以上の結果を表にすると第1表のとおりである。

3.2.2 冷水器の構造

前記冷却器に水を流せば冷水が得られるのであるが, 実際を使用する場合連続に水を流すのは無駄であるので必要に応じて水を流すようにしなければならない。しかし水を停止させているときは電流も遮断するので熱交換器中の水の温度は上昇してくる。使

第1表 冷却ブロック設計仕様

性能指数 Z	$2.25 \times 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$	飲料水流量	25 l/h
全断面積	342 cm^2	冷凍容量	378W
熱伝導係数	18.2 W/deg	比電流	0.26
全抵抗	5.9Ω	電流	6 A
冷却水入口水温	25°C	電圧	45.8V
飲料水入口水温	25°C	入力	275W
飲料水出口水温	12°C	成績係数	1.4
冷却水流量	100 l/h		



- ① 冷却器
- ② ボトル
- ③ 整流器
- ④ プレクラ
- ⑤ 給水口 (1/2")
- ⑥ 電磁弁
- ⑦ 逆止弁
- ⑧ 流量調整弁
- ⑨ サーマスタット
- ⑩ マイクロスイッチ
- ⑪ フロート
- ⑫ 蛇口
- ⑬ 手動弁
- ⑭ 排水口 (1/2")
- ⑮ 排水口 (1 1/4")
- ⑯ 電源スイッチ

第9図 電子冷水器の構造

用する場合に水と電流を流しても最初は温かい水がでることになる。これを避けるためにボトルを設けボトル中に常に冷水を貯えておくようにする。水および電流を流した直後は温かい水がでるが, 全体の通電・通水時間に対しては無視できる程度の時間であり問題にならない。この方式を用いると, コップに給水する給水速度を増大させることができる。通水・通電の開始・停止はボトル内の水位によって制御されることにした。

ボトル中に冷水を貯蔵しておいても長時間使用しないとボトル中の水温が上昇してくる。ボトル内の水温が 14°C 以上になった場合には通電・通水を開始し冷水を供給するようにした。この場合ボトル中の水はオーバーフローするのであるが, この捨てられる水を有効に利用するためにその排水と飲料水供給水との熱交換器を設けた。ボトル内の水温が 12°C 以下になると通電・通水を停止する。

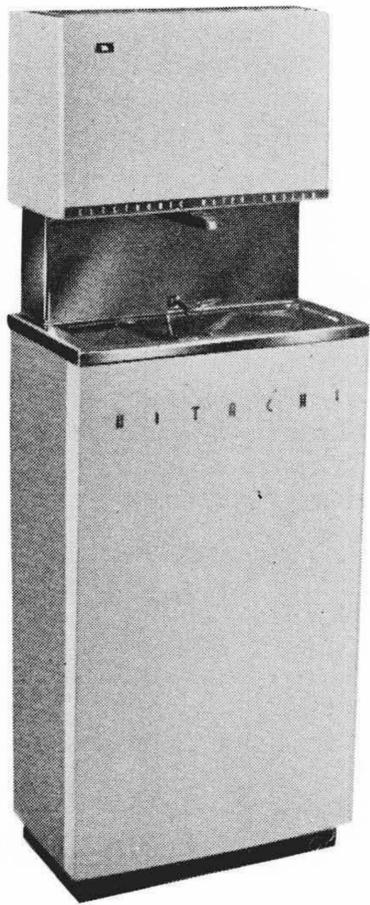
このような考えで設計製作した電子冷水器の構造を第9図に, 外観を第10図に示す。この冷水器の奥行は 268mm で, 電子冷凍を応用することによりこのように小形に設計することができたのである。ボトルの内容積は 4l である。

4. 電子冷水器の性能

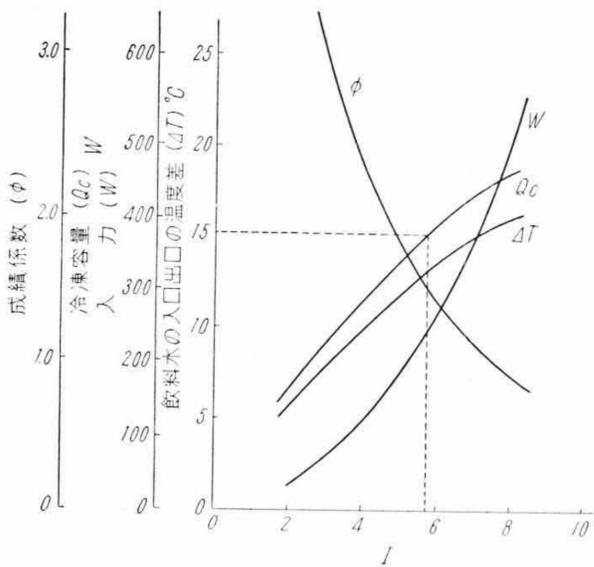
試作した電子冷水器について電流を種々変えて, 飲料水入口出口温度差, 冷凍容量, 入力, 成績係数を求めた結果を第11図に示す。

冷凍容量 378W の場合の諸性能については前に述べた理論計算値と実測性能値との比較結果を第2表に示す (冷凍容量が 378W 以外の場合については, 理論値は飲料水出口温度 12°C として行ない, 実測値は 12°C ではないので比較しても無意味である)。

成績係数について比較すると, 実測性能のほうが理論性能より約 10% よい。この理由は理論性能では素子の低温側温度を 9°C としているが実際では飲料水入口部分の温度が 9°C より高いためである。



第10図 電子冷水器の外観



第11図 電流と冷凍容量、入力、成績係数、飲料水の入口出口の温度差の関係の実測値

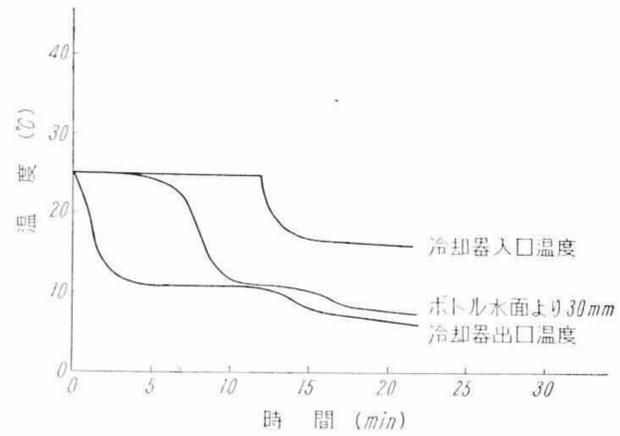
第2表 理論値と実測値の比較

	理論値	実測値
冷凍容量	378W	378W
入力	275W	248W
電流	6 A	5.75A
電圧	45.8V	43.2V
成績係数	1.37	1.52

実測性能のほうが性能がよいのであるから本文で述べたような方法で設計すれば良好な性能が得られることが明らかである。実際の製品は冷凍容量に余裕を持たせて、電圧50V、電流6.4A、入力320Wとした。この場合の冷凍容量は405W、成績係数は1.27である。

ボトル内が空の場合から運転を開始した場合の冷却性能を第12図に示す。これより明らかなようにボトル内の水温は11°Cである。またボトル内に水を充満させておき、onが14°C、offが12°Cである温度調節器をつけた場合は、運転時間が3.5分、停止時間が90分であり、運転率は3.7%となり、ボトル内の水温を保つておくのに必要な電力消費量は15Wであり問題にするほどではない。

この電子冷水器は連続に使用した場合は25 l/hの飲料水供給能力



第12図 運転時間と飲料水温度の関係

第3表 電子冷水器仕様

外法寸法	幅	440mm	冷却水流量	100 l/h
	奥行	268mm	冷凍容量	405W
	高さ	1,240mm	電流電圧	50V
ボトル内容積	4 l (自動給水式)		直流電流	6.4A
飲料水入口温度	25°C		入力	320W
飲料水出口温度	12~14°C		成績係数	1.27
飲料水補給量	25 l/h		素子性能指数	$2.25 \times 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$
飲料水流量	60 l/h		素子全断面積	342 cm ²

があるが、実際使用の場合には連続に飲用するような場合はほとんどまれであり、ある程度の間隔をおいて使用されるのが普通である。飲用を停止しているときでも冷却された飲料水はボトルに供給されるので、ボトル中には冷水が常に満たされているのが普通である。このようにボトル中に満水された状態で弁を開いた場合は60 l/hの割合でコップへ冷水が供給される。有効内容積100 ccのコップを使用する場合は水を受けている時間は6秒である。

電子冷水器の仕様を第3表に示す。

5. 結 言

日立製作所においては電子冷凍を応用した製品として電子冷蔵庫をはじめ種々のものの研究を行なっており、1960年9月に電子冷蔵庫および電子冷水器の発表展示を行なった。この電子冷水器は内外他社にさきがけて日立製作所が製作発表したものである。今回さらに性能を改善した電子冷水器を製作した。

冷却器の設計に当たっては素子材料性能が $Z=2.25 \times 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$ のものを使用した場合に25 l/hの水を25°Cから12°Cまで冷却するのに材料使用量および入力が最も少なくなるようにし、さらに加工の面も考慮して素子全断面積および素子長を決めた。すなわち素子全断面積を342 cm²、素子長を2 mmとした。理論性能と実測性能を比較したところ、実測成績係数と理論成績係数との誤差はわずかであり、実測性能のほうが理論性能より良かったので、本文で述べたような計算方式を用いて良いことが明らかになった。

今回製作した電子冷水器は内容積4 lのボトルを内蔵しているものであり、ボトルより飲用水をとり出さないときでもボトル内が満水になるように冷水の補給が行なわれているので、間欠的に使用する場合には60 l/hの割合で12°Cの飲料水を得ることができる。

この電子冷水器の実測性能は冷凍容量405W、電圧50V、電流6.4A、入力320W、成績係数1.27であった。ボトル内の水を低温に保持するための電力消費量は15Wであった。

電子冷水器は冷却器が非常に小形にできるので、自由な意匠のものが作られる。また圧縮機を使用していないので騒音や振動に悩まされることは皆無である。