

突破熱學實驗的障礙

高中組物理科第二名

台北市立建國高級中學

作者：黃國昌、柯天麒

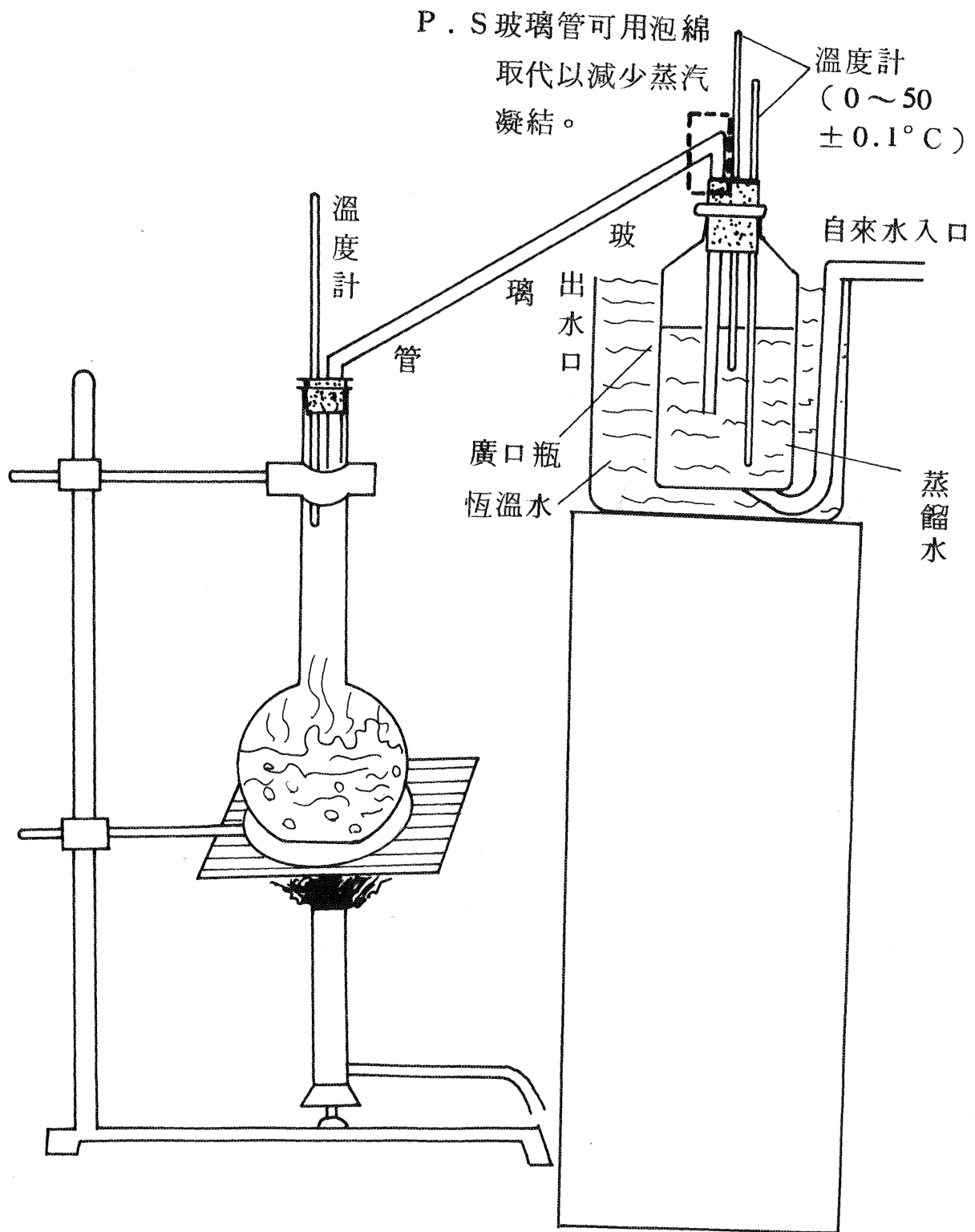
一、研究動機

在熱學實驗中，如求比熱、熔化熱等，普遍存在一個大問題——熱會散失。傳統方法是以隔熱材料來防止熱的散失。這種方法一方面無法完全隔熱，一方面普通學校無力購買這些昂貴的器材。因此我們自創實驗方式，在隔熱設備極差下，求出準確的實驗值。

二、研究器材

(一)凝結熱實驗：

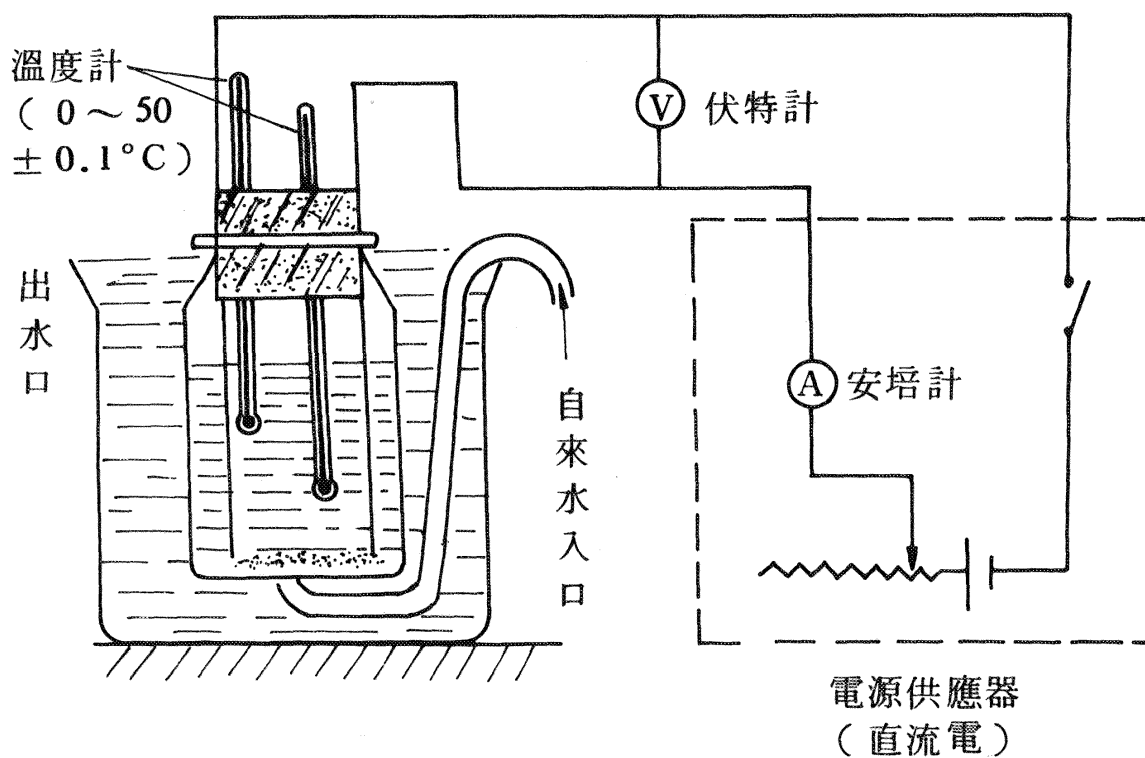
1. 燒杯 (100 ml)
2. 廣口杯 (500 ml)
3. 水管 (中 $\frac{1}{4}$ " \times 1 m)
4. 水銀溫度計 (0 ~ 50 \pm 0.1 $^{\circ}$ C)
5. 鐵架



圖一

(二)電功率實驗：

1. 使用與凝結熱同一個廣口瓶與燒杯及溫度計。
2. 電源供應器 ($0 \sim 5 \text{ A}$, $0 \sim 30 \text{ V}$)。
3. 鎳鉻絲 (110 V , 1000 W 裁成一半)。
4. 伏特計 $0 \sim 30 \text{ V}$ 。
5. 電源線 (紅銅線) 。



圖二

三、研究方法和過程

- (一)以冷卻定律導出散熱率。
- (二)利用散熱率可求出實驗過程中熱散失量。

實驗一：求水的汽化熱

(一)方法：

- 1.基本設備與傳統的相同，另在收集水蒸氣的廣口瓶外加裝一個恒溫水的裝置（裝廣口瓶放置於燒杯中，以橡皮管彎曲成蝸殼狀置於廣口瓶下，使水流成漩渦狀不斷流出）迅速且均勻地將熱量帶走，使燒杯內水溫維持恒溫。
- 2.將水煮沸後一段時間，開始收集水蒸氣，並記錄其溫度變化，當水溫不再升高，停止收集水蒸氣，開始記錄其溫度下降之變化量。

(二)過程：

- 1.水蒸氣進入時，每隔 1 分鐘水溫上升值列表：

$$\Delta T = T_t - T_0 \quad \text{註：} T_0 = \text{恒溫水的溫度} = 13.2^\circ\text{C}$$

(表一)

時(間分 t)	水(溫°C T)	內溫 外差 水 ΔT
0	13.2	
1	17.2	4.0
2	22.2	9.0
3	27.0	13.8
4	30.8	17.6
5	34.0	20.8
6	36.8	23.6
7	39.0	25.8
8	41.2	28.0
9	42.4	29.2
10.	43.8	30.6

時(間分 t)	水(溫°C T)	內溫 外差 水 ΔT
11.	45.0	31.8
12.	45.9	32.7
13.	46.6	33.4
14.	47.2	34.0
15.	47.6	34.4
16.	47.8	34.6
17.	48.0	34.8
18.	48.1	34.9
19.	48.1	34.9
20.	48.1	34.9

2. 冷卻時，每隔 1 分鐘水溫下降的值列表：

恒溫水的溫度 $T_0 = 13.2^\circ\text{C}$

時間 (分) t	水溫 (度) T	每分鐘溫度下 降 (度/分) $T_{t-1} - T_t$	內外水的平均 溫差 (度) $T - T_0 =$ $\frac{T_{t-1} + T_t}{2} - T_0$	(度—分/度) $(T - T_0) \times$ $\frac{1}{T_{t-1} - T_t}$
0	46.5			
1	41.9	4.6	31.0	6.9
2	38.0	3.9	26.75	6.9
3	34.8	3.2	23.2	7.2
4	32.0	2.8	20.2	7.2
5	29.6	2.4	17.6	7.3
6	27.5	2.1	15.35	7.3
7	25.7	1.8	13.4	7.4
8	24.1	1.6	11.7	7.3
9	22.7	1.4	10.2	7.3
10	21.5	1.2	8.9	7.4
11	20.45	1.05	7.78	7.4
12	19.5	0.95	6.78	7.5
13	18.8	0.7	5.95	8.5
14	18.15	0.6	5.23	8.0
15	17.5	0.6	4.63	7.7
16	17.0	0.5	4.05	8.1
17	16.6	0.4	3.6	9
18	16.2	0.4	3.2	8

(表二)

(三)實驗分析：

1.由表二得知：

$$(T-T_0) \times \frac{1}{T_{t-1}-T_t} \doteq 7.3 \text{ (常數)} \dots\dots \langle \text{公式一} \rangle$$

◎此常數略有誤差原因

(1)測量值上的誤差。

(2)主因當時水溫與溫度計讀出的水溫略有時差，時差原因是溫度計和水溫尚未達熱平衡。

2.第七分鐘內：

散熱率 = 廣口瓶吸收熱量 + (水 + 水蒸氣) 放出之熱量

$$\Delta h = M_0 S_0 \frac{(T_{t-1} - T_t)}{2} + MS(T_{t-1} - T_t) \dots\dots \langle \text{公式二} \rangle$$

◎ M_0 ：廣口瓶質量(克) $\Rightarrow M_0 = 267.2$ (克)

◎ S_0 ：廣口瓶比熱(卡/克·度) $\Rightarrow S_0 = 0.21$ (卡/克·度)

◎ $\frac{T_{t-1} - T_t}{2}$ ：廣口瓶溫度平均改變率(度/分)

解說：時間(t-1)廣口瓶平均溫度 - 時間(t)廣口瓶平均

$$\text{溫度} = \frac{T_{t-1} + T_0}{2} - \frac{T_t + T_0}{2} = \frac{T_{t-1} - T_t}{2}$$

◎ M ：(水 + 水蒸氣)總質量 $\Rightarrow M = 367.8$ 克

◎ S ：水的比熱(卡/克·度) $\Rightarrow S = 1.0$ (卡/克·度)

◎ $T_{t-1} - T_t$ ：水溫改變率(度/分)

3.由(表二)第六分鐘內，當內外平均溫差為 15.35°C 時，散熱率

$$\begin{aligned} \Delta h &= 267.2 \times 0.21 \times \frac{(29.6 - 27.5)}{2} + 367.8 \times 1 \times (29.6 - 27.5) \\ &= 831.30 \end{aligned}$$

4.由 $\langle \text{公式一} \rangle$ 知：

$T - T_0$ 與 $T_{t-1} - T_t$ 成正比

註：內外水溫差愈大，則溫度改變率愈大。

由 $\langle \text{公式二} \rangle$ 知：

Δh 與 $T_{t-1} - T_t$ 成正比

$\therefore \Delta h$ 與 $T - T_0$ 成正比……〈公式三〉

註：內外水溫差愈大，則散熱率愈大。

(1) 由關係曲線知熱總散失量 (ΔH) 陰暗部分的面積

($\Delta H = 28350$ 卡)

(2) 關係曲線圖中 18 分後水溫不再增加，是由於：

熱散失量 = 水蒸氣進入之熱量

5. 求凝結熱：

水蒸氣放熱 = 水吸熱 + 廣口瓶吸熱 + 熱散失量

$$\Delta M_2 X + M_2 S (T_f - T) = M_1 S (T - T_0) + M_0 S_0 \frac{(T - T_0)}{2} + \Delta H$$

◎ M_2 ：水蒸氣質量 (克) $\Rightarrow M_2 = 67.8$ (克)

◎ S ：水的比熱 (卡/克·度) $\Rightarrow S \doteq 1$ (卡/克·度)

◎ T_f ：水蒸氣溫度 ($^{\circ}\text{C}$) $\Rightarrow T_f = 95.0^{\circ}\text{C}$

◎ T ：末溫 ($^{\circ}\text{C}$) $\Rightarrow T = 48.1^{\circ}\text{C}$

◎ M_1 ：水的質量 (克) $\Rightarrow M_1 = 300$ (克)

◎ T_0 ：冷水初溫 ($^{\circ}\text{C}$) $\Rightarrow T_0 = 13.2^{\circ}\text{C}$

◎ M_0 ：廣口瓶的質量 (克) $\Rightarrow M_0 = 267.2$ (克)

◎ S_0 ：玻璃比熱 (卡/克·度) $\Rightarrow S_0 \doteq 0.21$ (卡/克·度)

◎ ΔH ：熱散失量 (卡) $\Rightarrow \Delta H = 28350$ 卡

求凝結熱 X (卡/克)

$$67.8 X + 67.8 \times 1 \times (95 - 48.1)$$

$$= 300 \times 1 \times (48.1 - 13.2) + 267.2 \times 0.21 \times \frac{(48.1 - 13.2)}{2}$$

$$+ 28350$$

$$\text{得 } X = 540.2 \text{ (卡/克)}$$

(四) 討論：

1. 由實驗值凝結熱 $X = 540.2$ (卡/克) 知，此實驗值非常接近當沸點為 95.0°C 時實際值的凝結熱 (541.2 卡/克)。

2. 本實驗有一尚未克服的困難——散熱面積的不同。如實驗冷卻時

，廣口瓶內水之質量為 367.8（克），平均散熱面積較進入水蒸氣時的質量由 300（克）增加至 367.8（克）要大，所以進入水蒸氣時，每分鐘散失熱量應略小於冷卻時每分鐘散失的熱量。

註：將會使實驗值增大。

3. 當時的水溫及讀出的水溫略有時差。

註：將會使實驗值減小。

4. 總免不了混入水滴所引起的誤差。

註：將會使實驗值減小。

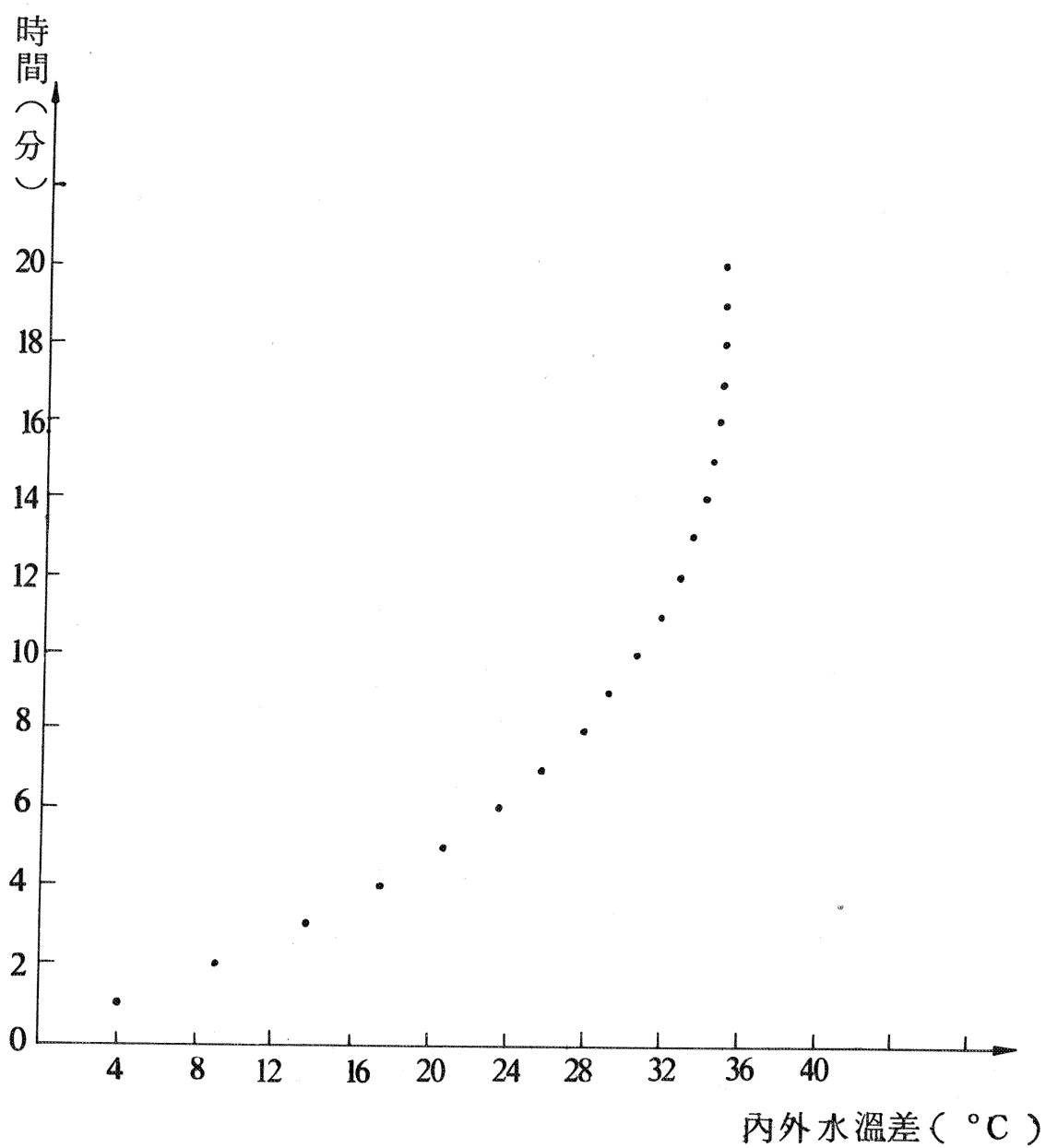
5. 測量值上的誤差。

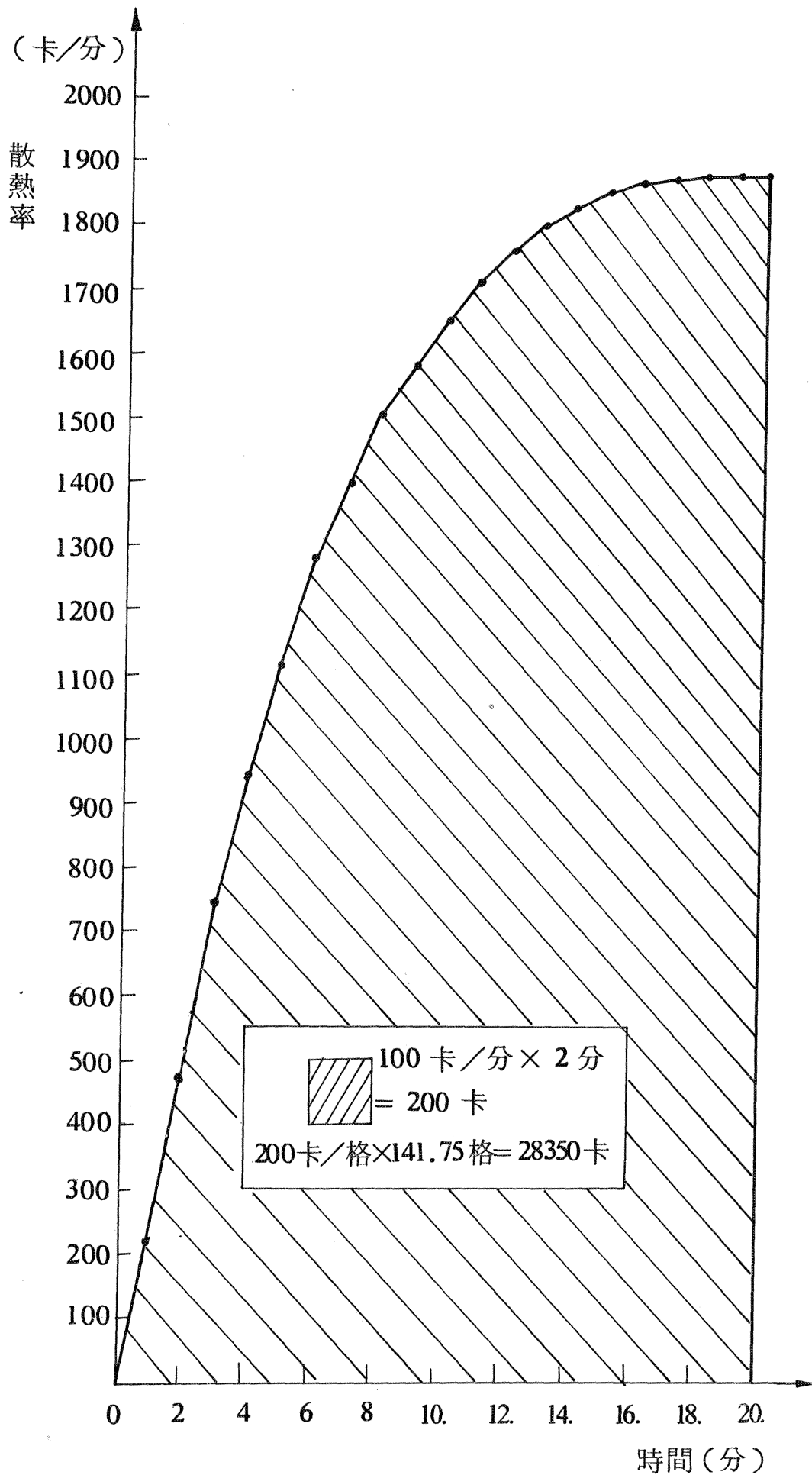
6. 在冷卻過程中，內外溫差（ ΔT ）以 $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 最為準確。

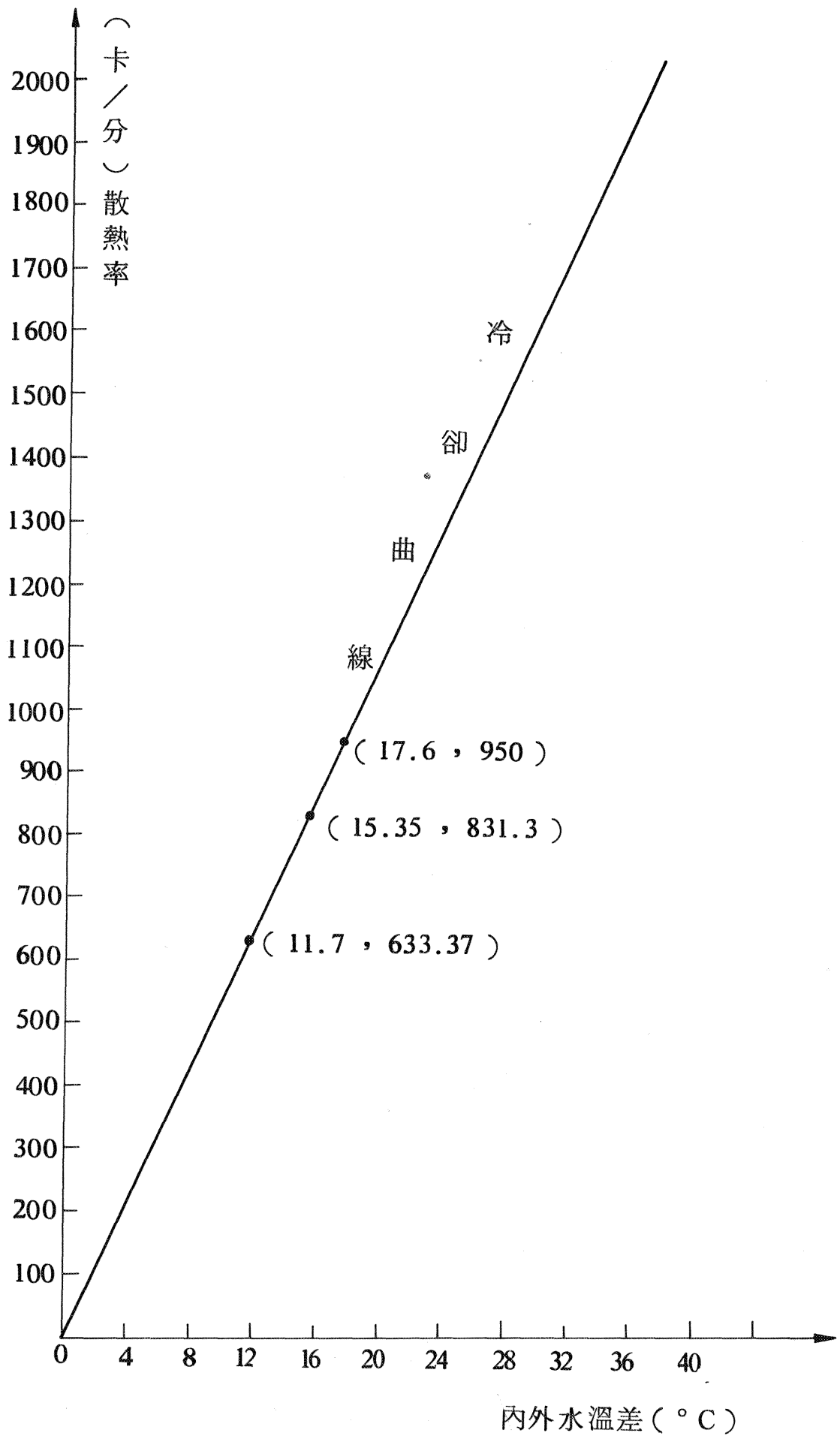
(1) 若內外溫差（ ΔT ）太小，則每分鐘溫度變化（ $T_{t-1} - T_t$ ）* 太小，溫度不易讀取。

(2) 若內外溫差（ ΔT ）太大，則恒溫水溫度將受影響。

7. 做實驗前宜試使水滴由玻璃管滴下。若有水滴情形時，需在導管外包紮絕對材料。（如圖一所框之處）







實驗二：利用焦耳定律證明此實驗準確性

(一)方法：

1. 恒溫水裝置同實驗一。
2. 以電源供應器加熱廣口瓶內的水，計算電功率是否和水吸收的熱與熱散失量之和相等。以此證明自創實驗方式之準確度。

(二)過程：

當電源打開，每隔 1 分鐘水溫測量值列表：

$\Delta T = T_t - T_0$ 註： $T_0 =$ 恒溫水溫度 = 13.2 °C 電壓 = 28 V 電流 I = 4.9 A								
時(間分 t)	水(溫°C T_t)	內溫 外差 水 ΔT	時(間分 t)	水(溫°C T_t)	內溫 外差 水 ΔT	時(間分 t)	水(溫°C T_t)	內溫 外差 水 ΔT
0	13.2							
1	17.8	4.6	11	41.5	28.3	21	47.7	34.5
2	21.9	8.7	12	42.5	29.3	22	48.1	34.9
3	25.4	12.2	13	43.4	30.2	23	48.4	35.2
4	28.5	15.3	14	44.2	31.0	24	48.7	35.5
5	31.2	18.0	15	44.9	31.7	25	49.0	35.8
6	33.5	20.3	16	45.5	32.3	26	49.2	36.0
7	35.6	22.4	17	46.0	32.8	27	49.4	36.2
8	37.4	24.2	18	46.5	33.3	28	49.5	36.3
9	38.9	25.7	19	46.9	33.7	29	49.5	36.3
10	40.3	27.1	20	47.3	34.1	30	49.5	36.3

(表三)

註：由於使用的容器及內裝水量相同，所以內外水溫差(°C)與散熱率(卡/分)的關係圖應相同。

(三)證明：

電熱能 = 水吸熱 + 廣口瓶吸熱 + 鎳鉻絲吸熱 + 熱散失量

⊙ I 電流(安培) $\Rightarrow I = 4.9$ (A)

⊙ E 電壓(伏特) $\Rightarrow E = 28.0$ (V)

- ⊙ t : 加熱時間 (分) $\Rightarrow t = 30$ (分)
- ⊙ M_1 : 水的質量 (克) $\Rightarrow M_1 = 367.8$ (克)
- ⊙ S_1 : 水的比熱 (卡/克·度) $\Rightarrow S_1 = 1$ (卡/克·度)
- ⊙ T : 水的末溫 ($^{\circ}\text{C}$) $\Rightarrow T = 49.6$ ($^{\circ}\text{C}$)
- ⊙ T_0 : 水的初溫 ($^{\circ}\text{C}$) $\Rightarrow T_0 = 13.2$ ($^{\circ}\text{C}$)
- ⊙ M_0 : 廣口瓶質量 (克) $\Rightarrow M_0 = 267.2$ (克)
- ⊙ S_0 : 玻璃比熱 (卡/克·度) $\Rightarrow S_0 = 0.21$ (卡/克·度)
- ⊙ M_2 : 鎳鉻絲的質量 (克) $\Rightarrow M_2 = 8.6$ (克)
- ⊙ S_2 : 鎳鉻絲的比熱 (卡/克·度) $\Rightarrow S_2 = 0.107$ (卡/克·度)
- ⊙ ΔH : 熱散失量 (卡) $\Rightarrow \Delta H = 44600$ (卡)

$$\begin{aligned}
 1. \text{電熱能} &= 0.2389 \times 60 \text{ IV}t \\
 &= 0.2389 \times 60 \times 4.9 \times 28 \times 30 \\
 &= 58998.7 \text{ (卡)}
 \end{aligned}$$

2. 水吸熱 + 廣口瓶吸熱 + 鎳鉻絲吸熱 + 熱散失量

$$\begin{aligned}
 &= M_1 S_1 (T - T_0) + M_0 S_0 \frac{(T - T_0)}{2} + M_2 S_2 (T - T_0) + \Delta H \\
 &= 367.8 \times 1 \times (49.6 - 13.2) + 267.2 \times 0.21 \times \frac{(49.6 - 13.2)}{2} \\
 &\quad + 8.6 \times (49.6 - 13.2) + 44600 = 59042.7 \text{ (卡)}
 \end{aligned}$$

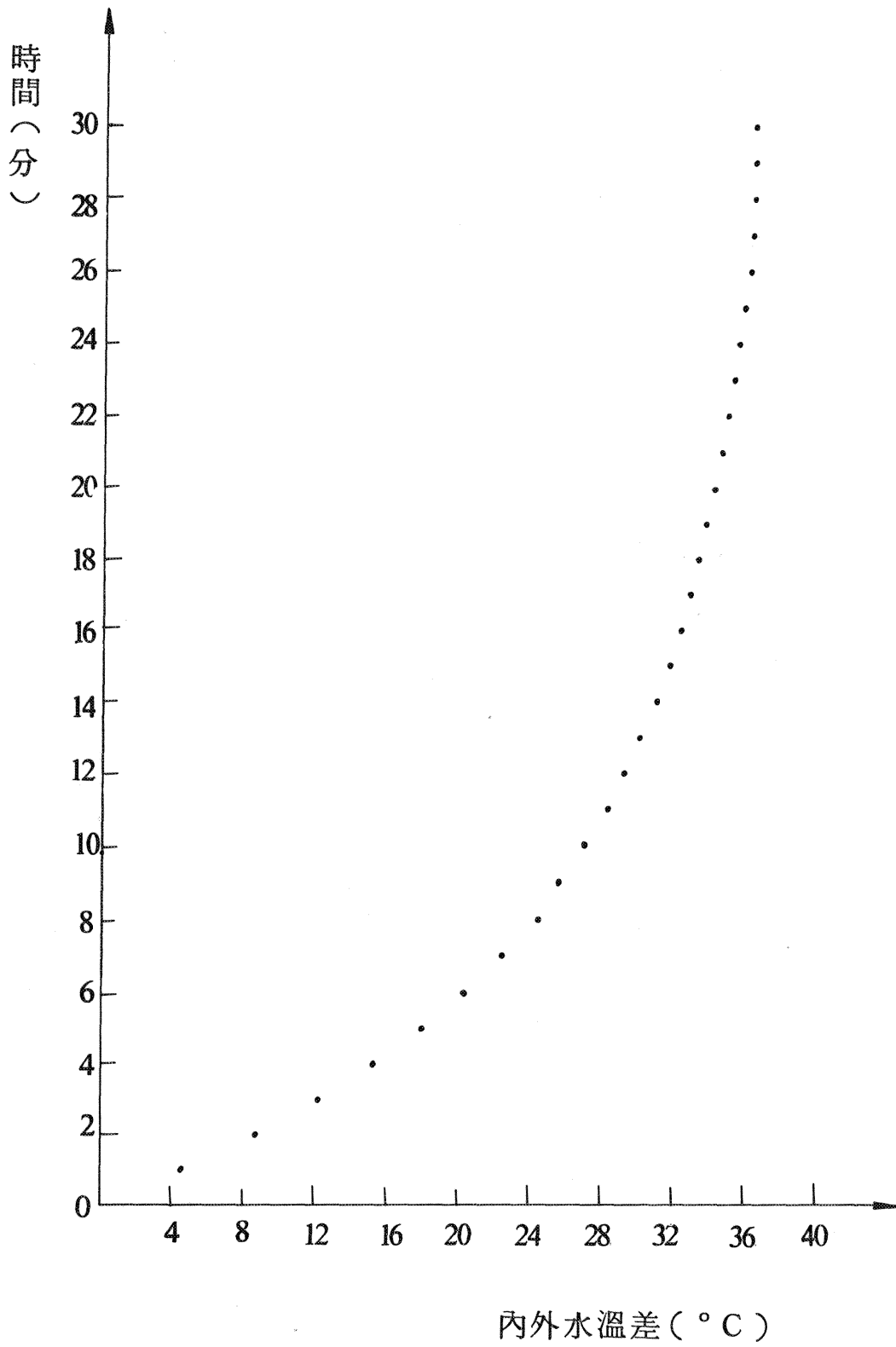
(四) 證明：當水溫達到 49.5°C 後溫度不再升高時

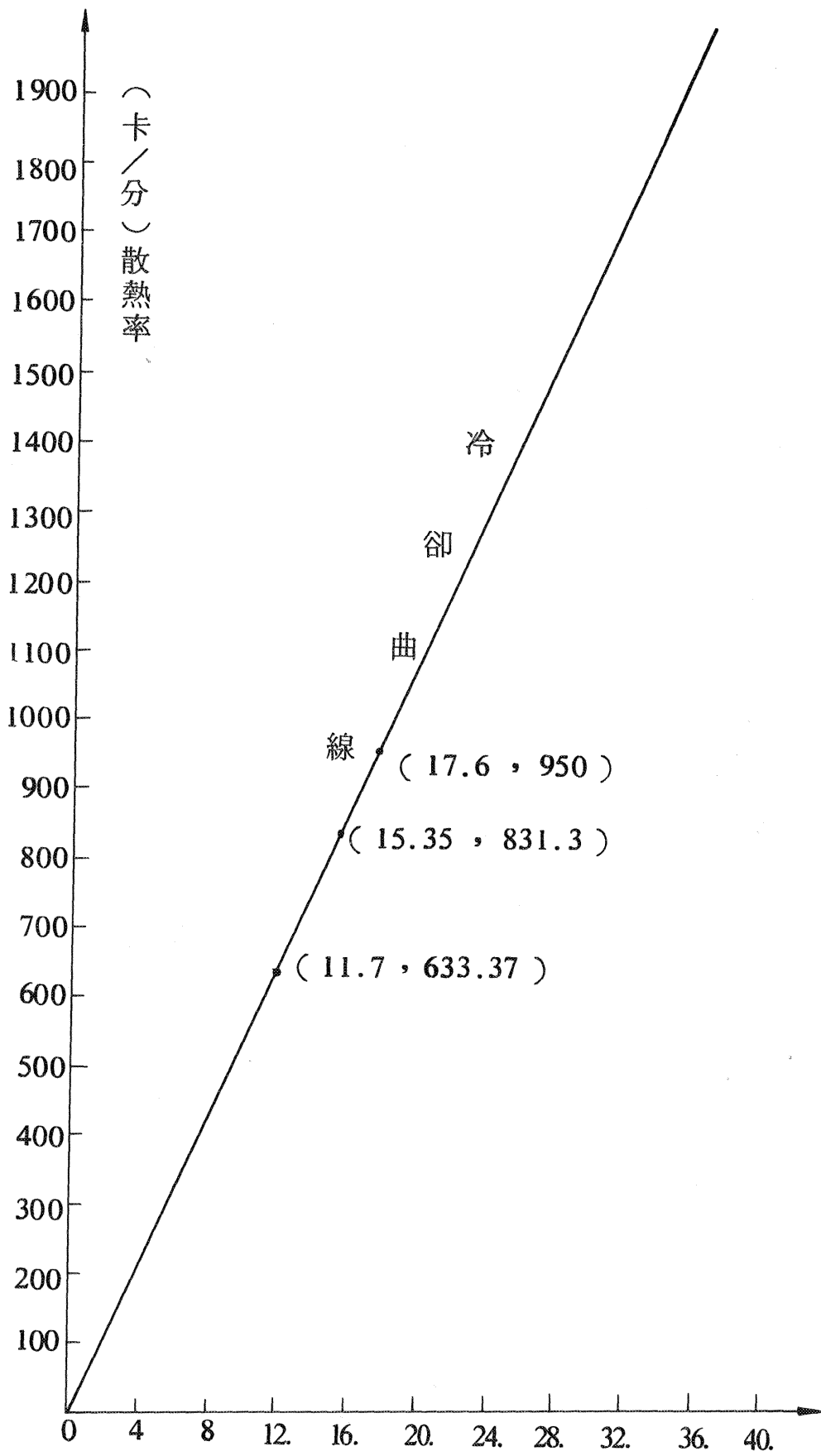
$$\text{散熱率 (卡/分)} = \text{加熱率 (卡/分)} = \text{電功率 (卡/分)}$$

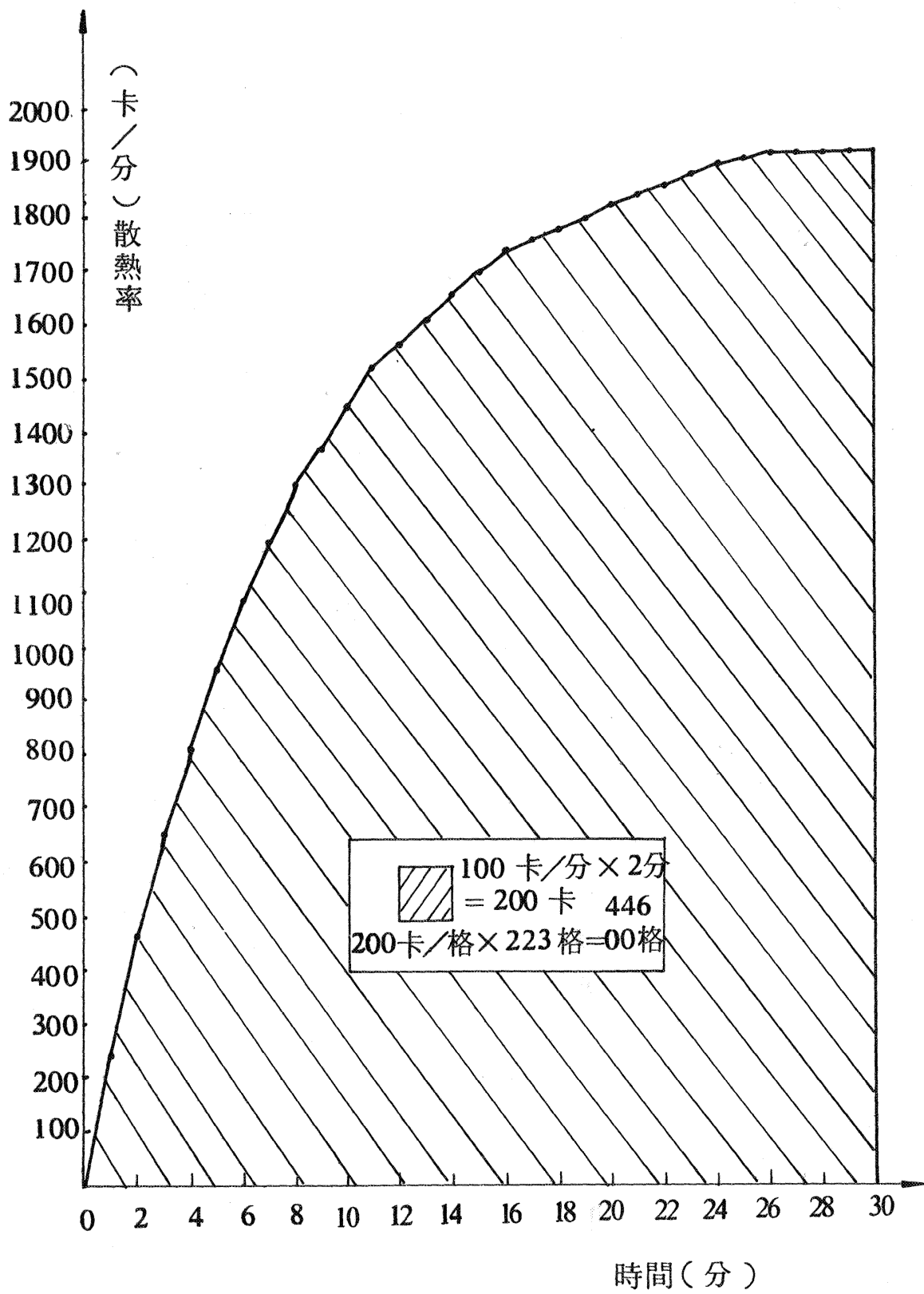
$$\begin{aligned}
 1. \text{電功率 (卡/分)} &= 0.2389 \times 60 \text{ IE} \\
 &= 0.2389 \times 60 \times 4.8 \times 28 \\
 &= 1966.6 \text{ (卡/分)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2. \text{散熱率 (卡/分)} &= \frac{831.30}{15.35} (T - T_0) \\
 &= \frac{831.30}{15.35} (49.5 - 13.2) \\
 &= 1965.654 \text{ (卡/分)}
 \end{aligned}$$

由以上數據證明：電功率 (卡/分) \doteq 散熱率 (卡/分)







四、結 論

- (一)在極差的絕熱設備下亦能得到極準確的實驗值。
- (二)傳統式的熱學實驗，若要得到較準確的實驗值，則必須高精度的絕熱設備，但也不能避免有某些程度上的熱散失。而本實驗僅須精度較佳的量測工具就可達到極準確的實驗值。
- (三)原理解說：
 - 1.以冷卻定律導出在不同溫度差下的散熱率。
 - 2.利用散熱率求出實驗過程中所散失的熱量。
 - 3.蒸氣放熱 = 容器內冷水吸熱 + 容器吸熱 + 熱散失量。
- (四)若此實驗能將控制變因做好，以精度高的量測工具，配合電腦記錄與計算，更能發揮高精確度的實驗值。或許能改寫熱學上的一些常數，這是我們未來共同的目標。

評 語

在熱學實驗中，因絕熱不佳所發生的熱損失是實驗誤差的最大來源。作者設法利用熱損失與溫差的固定關係，估算熱損失，將其納入考慮，可縮減此種誤差來源。設計的方法有創意，考慮亦甚周詳。