

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科

051903

原來地球也能發電！—地熱發電之效能探討

學校名稱：國立蘭陽女子高級中學

作者： 高二 吳若机	指導老師： 李協長
---------------	--------------

關鍵詞：史特林引擎、地熱溫泉發電

摘要

本研究探討不同的溫降對史特林引擎做功的差異，結果發現以1300毫升的熱水，從95°C降到91°C、90°C降到87°C、85°C降到83°C時，史特林引擎分別做了39.65、7.57、1.49焦耳的功。假設實驗室的數據能夠複製到實際大型的水體，則以宜蘭的仁澤溫泉每日抽取溫泉約20公噸來估算，若在其自然冷卻的過程中可以透過史特林引擎發電，當溫度從140°C降到90°C時，預計可發電23.2度，等於減少11.81公斤的二氧化碳排放量。本研究結果希望能讓讀者多了解利用熱質自然冷卻來產生電力，有助於改善我們的環境。

壹、研究動機

台灣的發電來源大約火力占79.2%、再生能源占6.0%，抽蓄水力占1.4%，核能占13.4%。火力發電燃燒後的廢氣會造成地球暖化更加嚴重，核能則具有一定的危險性。於是我們開始重視使用再生能源來發電，在再生能源中，地熱發電不受天候的影響，可提供穩定的能源，一向被視為最好的基載電力。本研究擬利用史特林引擎模擬地熱發電運轉模式，探討不同溫度的熱水可產生的發電效率，以進一步評估宜蘭縣仁澤溫泉在自然降溫過程具有的發電潛能。

貳、研究目的

- 一、探討史特林引擎的運轉功率。
- 二、探討不同溫度的熱水對史特林引擎做功之差異。
- 三、利用實驗室內史特林引擎的測試結果評估仁澤溫泉的發電潛能。

參、研究設備及器材

一、研究器材：

序號	器材名稱	數量	用途
1	史特林引擎	乙個	置於保溫瓶上轉動產生動能
2	保溫瓶(體積：1500毫升)	乙個	減少熱水散失
3	電熱水壺	乙個	加熱水溫
4	溫度計	乙支	量測水溫
5	燒杯	乙個	量測水的體積
6	手機	乙支	拍攝影像
7	電腦及相關軟體(Tracker、Visual Signal、Excel)	乙台	數據記錄、分析

二、研究裝置：

(一)架設方式：

把史特林引擎放在已裝滿1300毫升熱水的保溫瓶上方，將手機錄影機架設於可清楚錄到史特林引擎下方活塞的距離。



圖一：手機錄影機中的儀器畫面

肆、研究過程或方法

一、實驗步驟

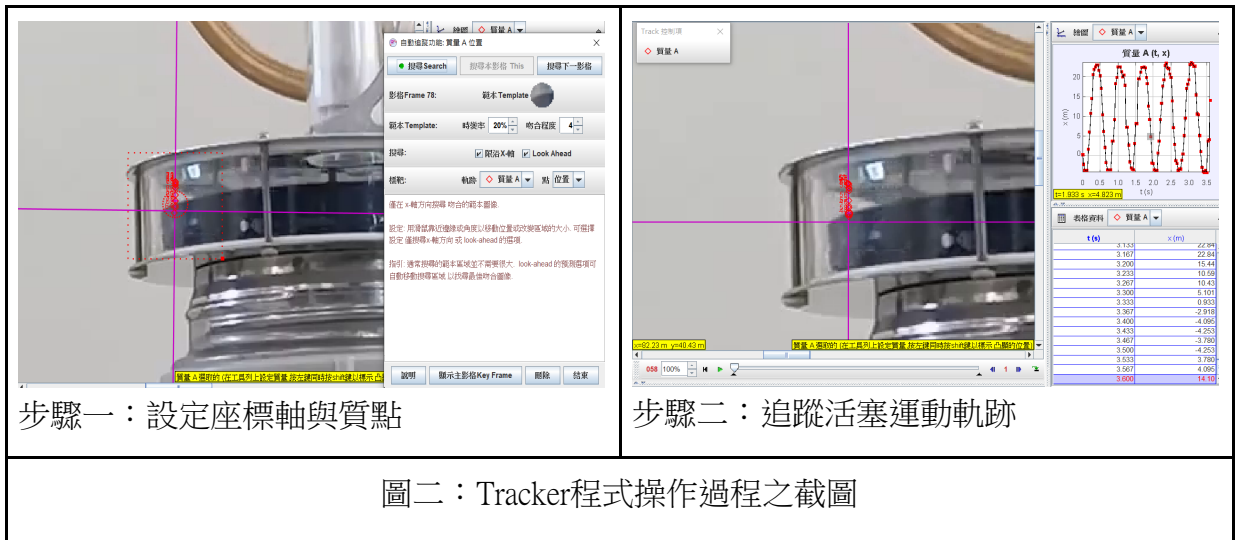
- (一)在容積1500毫升的保溫瓶中裝入1300毫升的熱水。
- (二)架設手機錄影以紀錄史特林引擎轉動之頻率。
- (三)以溫度計測量水溫，待水溫降至實驗變因所需之溫度。
- (四)將史特林引擎放於保溫瓶口處，待其熱機1分鐘^(註:)。
- (五)對史特林引擎施加一外力，使其開始轉動。
- (六)待史特林引擎停止轉動，測量保溫瓶中的溫度。
- (七)使用Tracker程式追蹤史特林引擎下方活塞的移動軌跡。
- (八)分析史特林引擎活塞的振幅與時間之數據，計算引擎輸出的總能量。

註:史特林引擎「熱機」之必要性:

由於史特林引擎是依靠底部和上方的溫差進行運作，若引擎底部的溫度不夠高，將無法使整個引擎順利運轉，我們經實驗觀測，約於一分鐘時引擎運轉功率最快速，故決定待機一分鐘，直到底部有足夠的溫度，才開始進行實驗。

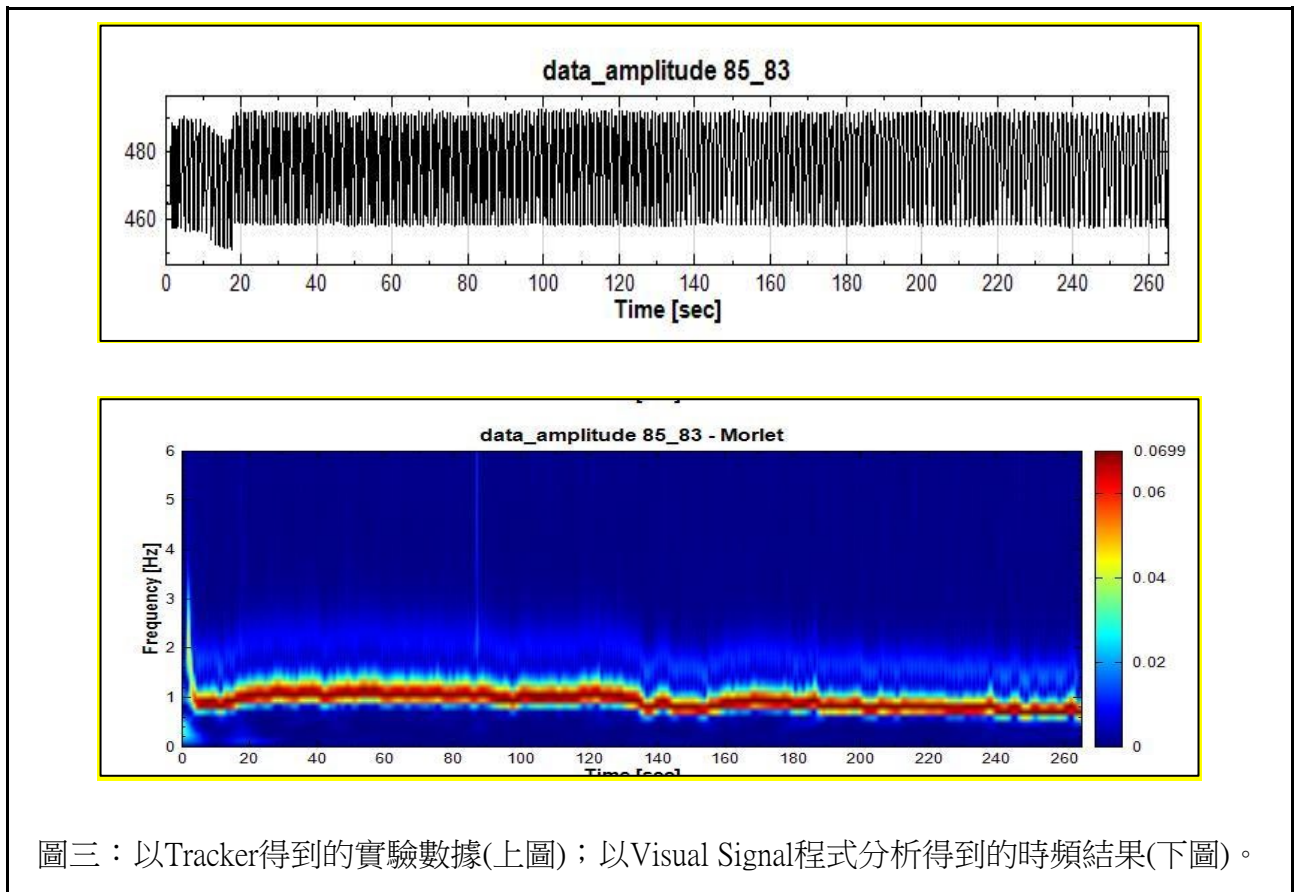
二、使用Tracker程式追蹤活塞運動軌跡

使用Tracker中的色塊追蹤，將位置定於能明顯分辨顏色的活塞上方，開啟程式內自動追蹤功能，以得到振幅(y軸)與時間(x軸)之關係。



三、輸出Tracker數據轉換成時頻圖

將Tracker中得到的振幅與時間之數據複製到Excel上，再由Visual Signal程式轉換成時頻圖。



四、實驗變因

(一)控制變因：

水的體積	1300毫升
熱機時間	1分鐘
史特林引擎轉動慣量	$0.000107 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

(二)操作變因：

初始溫度：95度、90度、85度

五、實驗原理

(一)史特林引擎轉動原理

於引擎活塞下方加熱，活塞下方空氣受熱後膨脹，推動活塞使其上升，活塞上升到接近最高點時空氣遇上方冷空氣又因收縮而使活塞下降，形成一活塞轉動周期。但因轉動時所受之摩擦力，以致轉動之頻率隨時間愈來愈小。

(二)力矩與轉動慣量

1. 轉動慣量公式

$$I = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2$$

I：轉動慣量

m：質量

r：物體至轉動軸距離

2. 功率與力矩和角頻率的關係

$$P = \tau \omega$$

P：功率

τ ：力矩

ω ：角速度

3. 轉動運動中力矩與轉動慣量和角加速度的關係

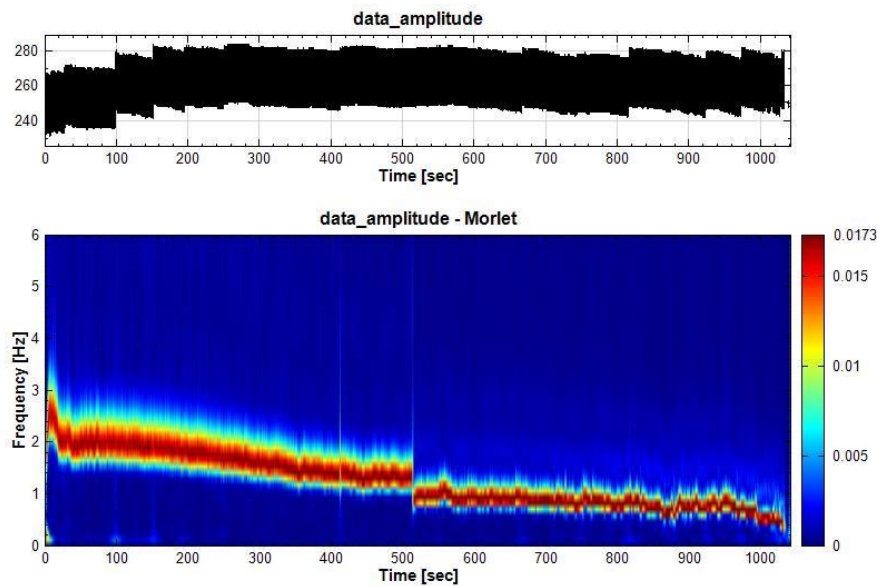
$$\sum \tau = I\alpha$$

τ : 力矩
I : 轉動慣量
 α : 角加速度

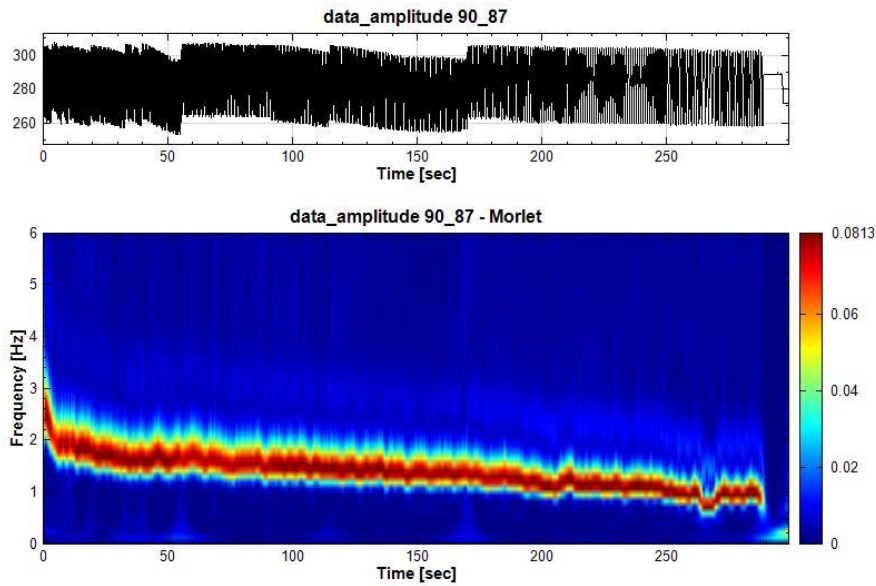
伍、研究結果

一、觀察並分析史特林引擎的轉動情形：

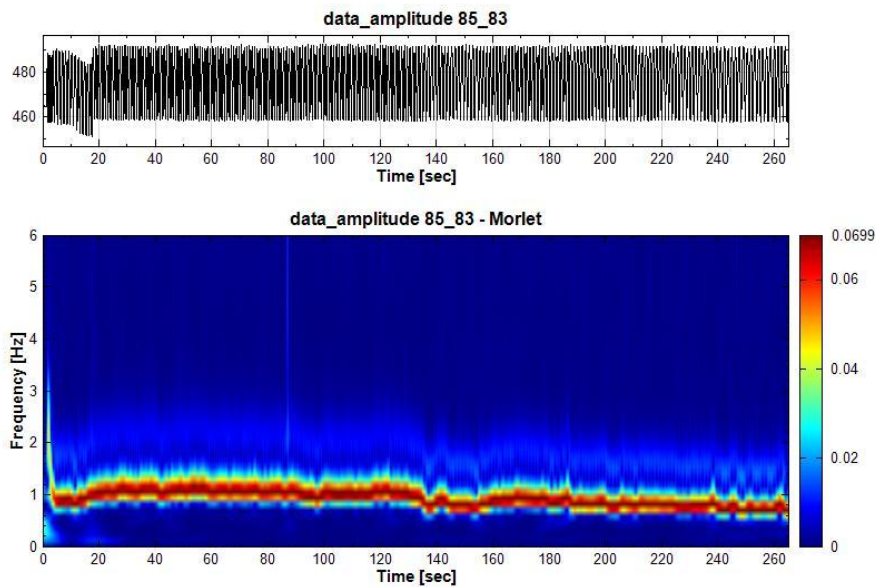
(一) 圖四為水溫95度至91度時的時頻圖，由圖中能觀察到頻率在一開始時介於2~3赫茲之間，頻率會隨時間增加而減少。約500秒處有出現明顯斷層，推測是由於Tracker程式未準確追蹤史特林引擎的移動軌跡，造成頻率出現斷層。



(二) 圖五為水溫90°C至87°C時的時頻，轉動時間為299秒，由圖中能觀察到頻率初時較高(約介於2~3赫茲之間)，由實驗數據之疏密程度能觀察到隨著時間越長，轉動頻率越低。



(三) 圖六為水溫85°C至83°C時的時頻，轉動時間為265秒，由圖中能觀察到前5秒的頻率較高，之後的頻率皆於約1赫茲的位置。



二、分析史特林引擎的運轉功率

(一)以變因一為例推算引擎能量公式：

步驟一：已知飛輪質量(m)為0.0669公斤，半徑(r)為0.04公尺，可得轉動慣量

$$I = mr^2 = 0.000107 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 \quad (\text{下方表格代號: A})$$

步驟二：初期角速度從0到2圈/秒約需0.5秒，可得角加速度

$$\alpha = \omega / t = (2 \pi f) / t = (2 \times 3.14 \times 2) / 0.5 = 25.12 \text{ rad/s}^2 \text{ (下方表格代號: B),}$$

推得轉動飛輪的扭力

$$\tau_1 = I \times \alpha = 0.000107 \times 25.12 = 0.00269 \text{ N}\cdot\text{m} \text{ (下方表格代號: D) }。$$

步驟三：飛輪停止前角速度從1到0圈/秒約需0.5秒，可得角加速度

$$\alpha = \omega / t = (2 \times 3.14 \times 1) / 0.5 = 12.56 \text{ rad/s}^2 \text{ (下方表格代號: C),}$$

推得摩擦力的扭力

$$\tau_2 = I \times \alpha = 0.000107 \times 12.56 = 0.00134 \text{ N}\cdot\text{m} \text{ (下方表格代號: E) }。$$

步驟四：引擎扭力 = 飛輪扭力 + 摩擦力扭力

$$\tau_3 = \tau_1 + \tau_2 = 0.00403 \text{ N}\cdot\text{m} \text{ (下方表格代號: F) }。$$

步驟五: 引擎平均角速度

$$\omega_{\text{avg}} = 2 \pi f = 2 \times 3.14 \times 1.5 = 9.42 \text{ (下方表格代號: G) }$$

由時頻圖可得:

變因一頻率為 1.5 次/秒，

變因二頻率為 1.5 次/秒，

變因三頻率為 1.0 次/秒。

步驟六: 史特林引擎的功率(P) = 引擎扭力×平均角速度

$$\begin{aligned} P &= \tau_3 \times \omega_{\text{avg}} \\ &= 0.00403 \times 9.42 \\ &= 0.038 \text{ J/s (下方表格代號: H) }。 \end{aligned}$$

步驟七: 引擎輸出的能量(W)= 功率(P) ×轉動時間(T)，

$$W = P \times T = 0.038 \times 1044 = 39.65 \text{ J (下方表格代號: J) }。$$

步驟八: 熱水釋放能量(H) = 水的質量(m) × 比熱(s) × 溫度變化(Δt)，

$$H = m \times s \times \Delta t = 1300 \times 1 \times (95 - 91) \times 4.18 = 21840 \text{ J (下方表格代號: K) }。$$

步驟九: (引擎輸出能量 ÷ 熱水釋放能量) × 100% = 熱轉換效率之百分比

$$(W \div H) \times 100\% = (39.65 \div 21840) \times 100\% = 0.182\% \text{ (下方表格代號: L) (表1) }。$$

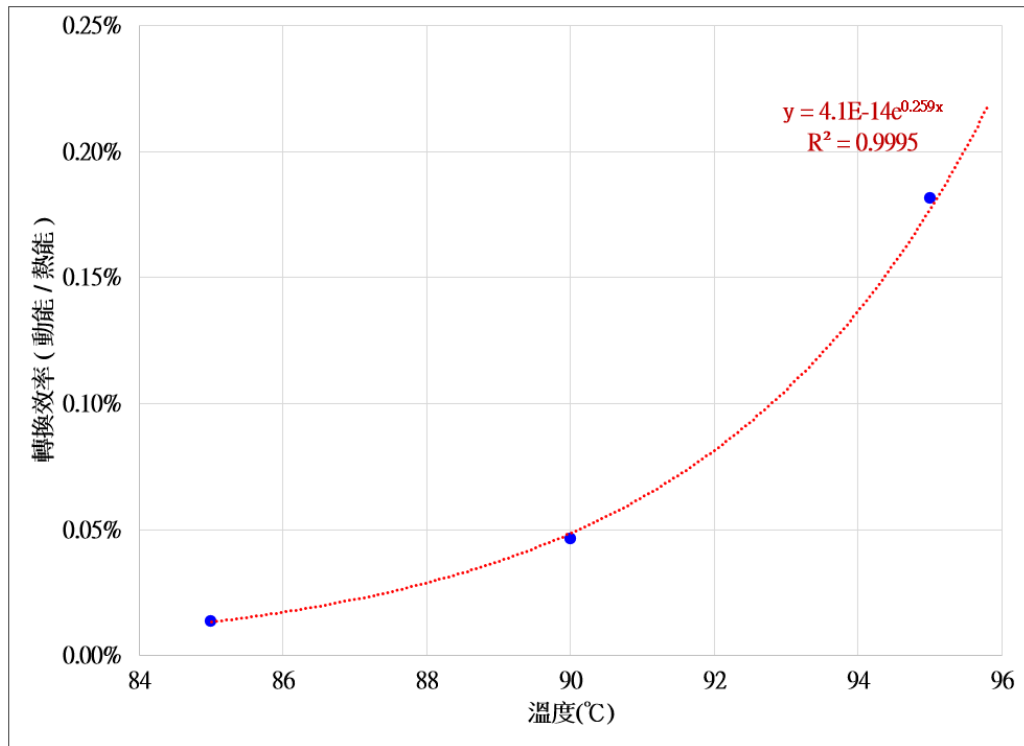
(二)以上述計算步驟類推變因二及變因三，可得下表之結果：

表1：各種變因之參數和所得的熱轉換效率

代號		變因一 (95°C-91°C)	變因二 (90°C-87°C)	變因三 (85°C-81°C)
(A)	轉動慣量	0.000107		
(B)	飛輪角加速度	25.12	12.56	2.09
(C)	摩擦力角加速度	12.56	12.56	6.28
(D)=(A)×(B)	飛輪扭力	0.00269	0.00134	0.00022
(E)=(A)×(C)	摩擦力扭力	0.001344	0.001344	0.000672
(F)=(D)+(E)	引擎扭力	0.00403	0.00269	0.00090
(G)	引擎平均角速度	9.42	9.42	6.28
(H)=(F)×(G)	引擎功率	0.0380	0.0253	0.0056
(I)	轉動時間	1044	299	265
(J)=(H)×(I)	引擎輸出能量	39.65	7.57	1.49
(K)	熱能	21840	16380	10920
(L)=(J)/(K)	引擎輸出能量/熱能	0.182%	0.046%	0.014%

陸、討論

- 一、各個實驗中水溫只降了3~4°C，飛輪即停止轉動，顯示整個引擎系統具有極大的摩擦力，當引擎功率小於摩擦力功率，飛輪即停止運轉，因此，我們在計算引擎輸出的能量時，同時計算飛輪和摩擦力做的功。
- 二、理論上溫度越低熱轉換效率越小，實驗一~三，初始水溫分別為95°C、90°C、85°C，實驗結果飛輪轉動的時間分別1044、299和265秒，飛輪轉動的時間越短表示熱轉換效率越小，實驗結果符合理論預期。
- 三、實驗結果實驗一~三，在不同的溫降過程中，熱轉換效率分別為0.182%、0.046%、0.014% (表1)，熱轉換效率與初始水溫的關係，以理論的指數線型 $y=4.1E-14e^{0.259x}$ (y為轉換效率，x為初始水溫)最能描述該關係曲線(圖七)，顯示熱轉換效率並非隨溫度呈線性變化，溫度越高，熱轉換效率會呈指數增加。



圖七：實驗一～三之熱轉換效率

四、比較過去的文獻，史特林引擎熱能轉換效率主要與溫度、引擎內的氣壓、流體種類有關，不同的研究結果，溫度500°C時，轉換效率可達26%(Sripakagorn et al, 2011)，溫度150°C時，轉換效率只有5.6%(Kropiwnicki and Furmanek, 2020)，不過，當引擎內的氣壓提高時，轉換效率可再增加。原型的史特林引擎經最佳化設計後，在300-400°C，轉換效率可增加到18% (Sowale et al., 2018)。本研究使用小型的史特林引擎，引擎扭力易受摩擦力之大小影響，推測其為熱轉換效率低的原因

溫度(°C)	轉換效率(%)	文獻
500	26	Sripakagorn et al, 2011
390	18	Sowale et al., 2018
200	15	Lane and Beale, 1999
150	5.6	Kropiwnicki and Furmanek, 2020
95	0.182	本研究
90	0.046	本研究
85	0.014	本研究

五、宜蘭縣大同鄉仁澤溫泉之溫泉源頭為140°C，由本實驗結果估計其熱轉換效率約2%。該溫泉每日取用約20公噸，若能將其自然降溫的熱能轉換成電能，以140°C降至90°C的條件，估計每日可產生能量約 $20 \times 10^3 \times 4.18 \times 10^3 \times (140-90) \times 2\% = 83.6 \times 10^6 \text{ J}$ ，約23.2度電。

柒、結論

由本研究中得知若初始水溫越低，則史特林引擎的熱轉換效率呈指數型減少，且從實驗結果中推估宜蘭縣大同鄉仁澤溫泉之溫泉其自然降溫可每日產生約23.2度電，減少11.81公斤的二氧化碳排放。本實驗中使用小型的史特林引擎，摩擦力之大小容易影響其扭力，故最大的轉換效率僅約略等於0.18%。

台灣目前使用地熱發電共有27處，主要發電潛能區分別位於大屯山、清水、土場、廬山、知本、金崙與瑞穗等7處，總發電潛能約為989MW。世界能源危機以來，不僅國內大力發展地熱發電，國外利用地熱發電的例子也非常普遍。以美國地熱發電功率為例：2020年底美國總發電功率達3714MW；又以各國統計至2020年底為例：地熱發電總裝機容量達15608兆瓦。以上數據顯示地熱發電能有效運用天然資源，使其能達到再生的目的。

捌、未來展望

與其他史特林引擎熱能轉換效率的研究比較結果，本實驗因史特林引擎的摩擦力太大，因此轉換效率小很多，未來應加強在如何降低摩擦力的研究。此外，除了估計宜蘭縣大同鄉仁澤溫泉的發電量外，也可以進一步收集全台的溫泉資料，以評估全台所有溫泉的自然降溫大該可以產生多少電量。

玖、參考資料及其他

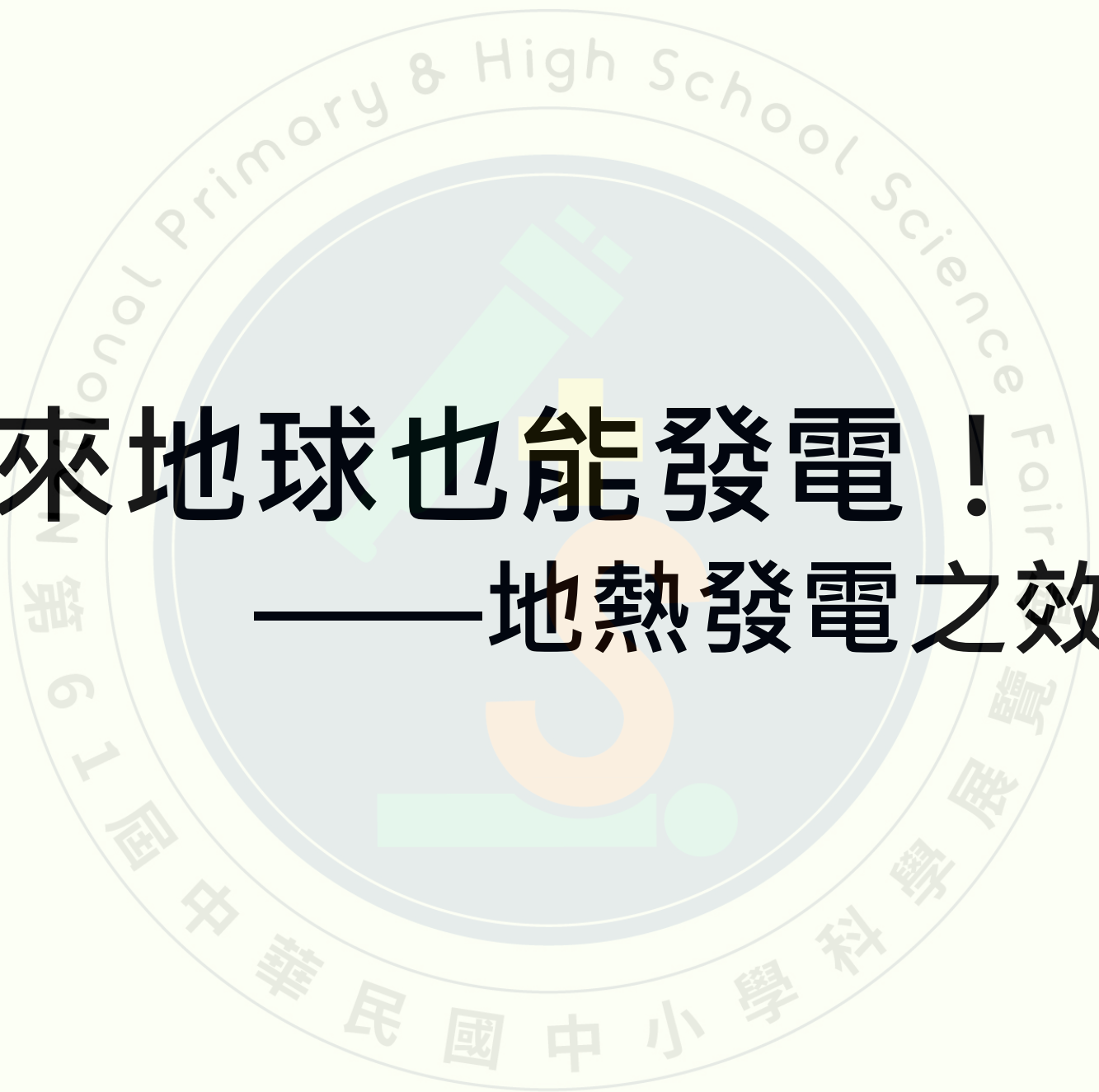
- Lane, N.; Beale, W. A biomass-fired 1 kWe Stirling engine generator and its applications in South Africa. In Proceedings of the 9th International Stirling Engine Conference, Johannesburg, South Africa, 2 - 4 June 1999.
- Sowale, A.; Kolios, A.J.; Fidalgo, B.; Somorin, T.; Parker, A.; Williams, L.; Collins, M.; McAdam, E.; Tyrrel, S. Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in an energy recovery system. *Energy Convers. Manag.* 2018, 165, 528 - 540.
- Sripakagorn, A.; Srikam, C. Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine. *Renew. Energy* 2011, 36, 1728 - 1733.
- Kropiwnicki, J.; Furmanek M, A theoretical and experimental study of moderate temperature alfa type stirling engines, *Energies*, 2020, 13, 1622; doi:10.3390/en13071622
- Alexander Richter.(2021).ThinkGeoEnergy's Top 10 Geothermal Countries 2020 - installed power generation capacity (MWe). Abstract retrieved Jan 7,2021, from <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2020-installed-power-generation-capacity-mwe/%20>
- 台灣電力公司(2004)。歷年發購電量占比。檢自<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=212&cid=120&cchk=f3a1b1e0-03e5-45fa-b72e-b28c5cb94f37> (Feb 17,2021)

【評語】 051903

研究主題符合環境教育與潔淨能源之探究精神，能運用免費軟體將觀察現象數據化，在應用能量轉換的觀念透過評估地熱發電效率，展現學以致用的精神。唯只有三組試驗，完成指數回歸曲線，試驗數量不足。三點也可以利用線性回歸，指數曲線並非唯一回歸方式。另外利用實驗結果 95° ，外延法去推估 140° 的能量轉換，有極高不確定性。要考慮 140° 的溫泉水還要有壓力的問題，在大氣環境下水溫應不會是 140° 。實驗次數明顯不足，以少數實驗結果要推論應用較缺說服力。實驗設計與真實情境之差異與對實際應用之限制宜有分析與說明。下面幾點建議供作品改進之參考：

1. 三個溫度變因，分別為不同溫度，且下降幅度不同(95~91、90~87、85~83)，溫度越高，降溫幅度越大，供給出的能量不同，試驗飛輪轉動時間不同，同時有多項變數在其中，若要考慮不同溫度，還要精準控制其他項目。
2. 仁澤溫泉的水溫不可能達到 140°C ，不知此數據來源為何？採用數據前應先確定是否有誤？
3. 實驗數據只有三個太少了，且沒有交代每個變因實驗經測量多少次而得的.應探討數據的誤差範圍。
4. 結論第二段不是本實驗數據能得到的結果，結論不宜直接引用文獻的資料。

作品簡報



原來地球也能發電！

——地熱發電之效能探討

作品編號：051903

摘要

本研究探討不同的溫降對史特林引擎做功的差異，結果發現以1300毫升的熱水，從95°C降到91°C、90°C降到87°C、85°C降到83°C時，史特林引擎分別做了39.65、7.57、1.49焦耳的功。假設實驗室的數據能夠複製到實際大型的水體，則以宜蘭的仁澤溫泉每日抽取溫泉約20公噸來估算，若在其自然冷卻的過程中可以透過史特林引擎發電，當溫度從140°C降到90°C時，預計可發電23.2度，等於減少11.81公斤的二氧化碳排放量。本研究結果希望能讓讀者多了解利用熱質自然冷卻來產生電力，有助於改善我們的環境。

動機

台灣的發電來源大約火力占79.2%、再生能源占6.0%，抽蓄水力占1.4%，核能占13.4%。火力發電燃燒後的廢氣會造成地球暖化更加嚴重，核能則具有一定的危險性。於是我們開始重視使用再生能源來發電，在再生能源中，地熱發電不受天候的影響，可提供穩定的能源，一向被視為最好的基載電力。本研究擬利用史特林引擎模擬地熱發電運轉模式，探討不同溫度的熱水可產生的發電效率，以進一步評估宜蘭縣仁澤溫泉在自然降溫過程具有的發電潛能。

研究目的

- 一、探討史特林引擎的運轉功率。
- 二、探討不同溫度的水對史特林引擎做功之差異。
- 三、利用實驗室內史特林引擎的測試結果評估仁澤溫泉的發電潛能。

研究器材與設備

研究器材

史特林引擎、保溫瓶(體積:1500mL)、電熱水壺、溫度計、燒杯、電腦軟體(Tracker、Visual Signal、Excel)

研究裝置架設方式

把史特林引擎放在已裝滿1300毫升熱水的保溫瓶上方，將手機錄影機架設於可清楚錄到史特林引擎下方活塞的距離。(如左圖)



研究過程或方法

一、實驗步驟

- (一)在容積1500mL的保溫瓶中裝入1300mL的熱水
- (二)架設手機錄影以紀錄史特林引擎轉動之頻率
- (三)以溫度計測量水溫，待水溫降至實驗變因所需之溫度
- (四)將史特林引擎放於保溫瓶口處，待其熱機1分鐘(註:)
- (五)對史特林引擎施加一外力，使其開始轉動
- (六)待史特林引擎停止轉動，測量保溫瓶中的溫度
- (七)使用Tracker程式追蹤史特林引擎下方活塞的移動軌跡
- (八)分析史特林引擎活塞的振幅與時間之數據，計算引擎輸出的總能量

註:史特林引擎「熱機」之必要性：

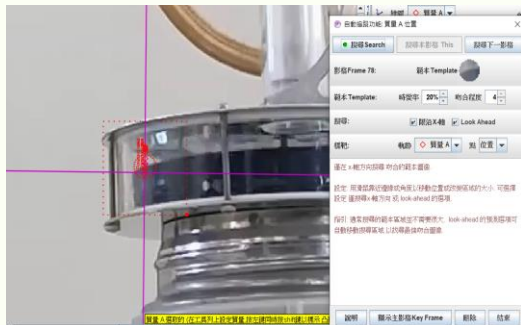
由於史特林引擎是依靠底部和上方的溫差進行運作，若引擎底部的溫度不夠高，將無法使整個引擎順利運轉，我們經實驗觀測，約於一分鐘時引擎運轉功率最快速，故決定待機一分鐘，直到底部有足夠的溫度，才開始進行實驗。

二、使用Tracker程式追蹤活塞運動軌跡

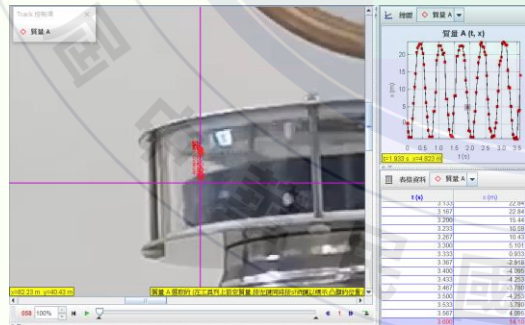
利用色塊追蹤，將位置定於能明顯分辨顏色的活塞上方，開啟程式內自動追蹤功能，以得到振幅(y軸)與時間(x軸)之關係。

三、輸出Tracker數據轉換成時頻圖

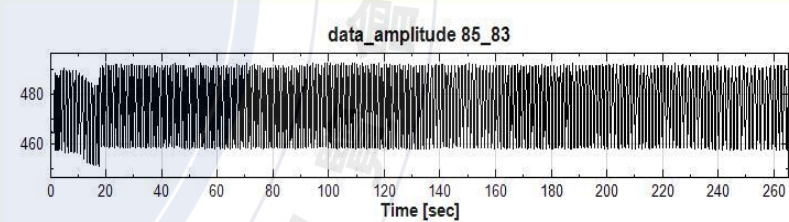
將Tracker中得到的振幅與時間之數據複製到Excel上，再由Visual Signal程式轉換成時頻圖。



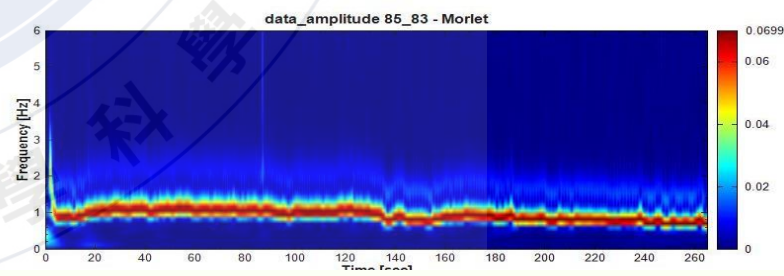
步驟一：設定座標軸與質點



步驟二：追蹤活塞運動軌跡



上圖為以Tracker得到的實驗數據



上圖為以Visual Signal程式分析得到的時頻結果

四、實驗變因

控制變因：

水的體積	1300毫升
熱機時間	1分鐘
史特林引擎轉動慣量	0.000107 kg×m ²

操作變因：

初始溫度：95度、90度、85度

五、實驗原理

(一)史特林引擎轉動原理

於引擎活塞下方加熱，活塞下方空氣受熱後膨脹，推動活塞使其上升，活塞上升到接近最高點時空氣遇上方冷空氣又因收縮而使活塞下降，形成一活塞轉動周期。但因轉動時所受之摩擦力，以致轉動之頻率隨時間愈來愈小。

(二)力矩與轉動慣量

1. 轉動慣量公式

$$I = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2$$

I：轉動慣量

M：質量

r：物體至轉動軸距離

2. 功率與力矩和角頻率的關係

$$P = \tau \omega$$

P：功率

τ ：力矩

ω ：角速度

3. 轉動力矩與轉動慣量和角加速度的關係

$$\sum \tau = I \alpha$$

τ ：力矩

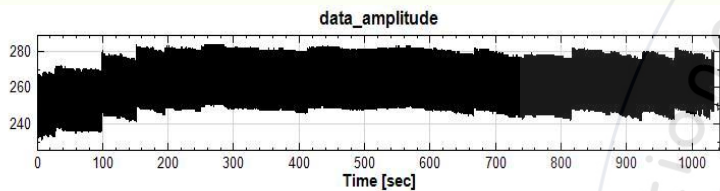
I：轉動慣量

α ：角加速度

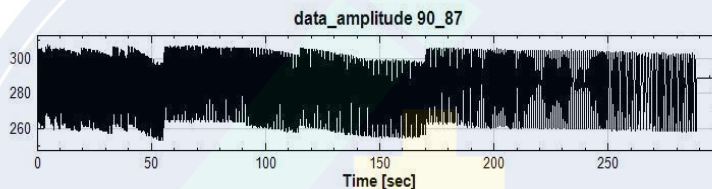
研究結果

一、觀察並分析史特林引擎的轉動情形

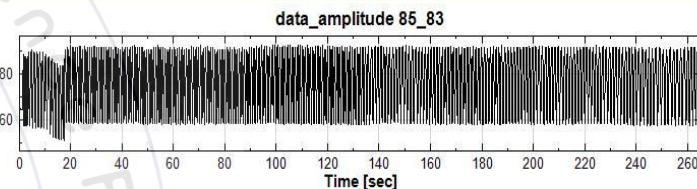
(一) 實驗數據



上圖為水溫95度至91度時的實驗數據

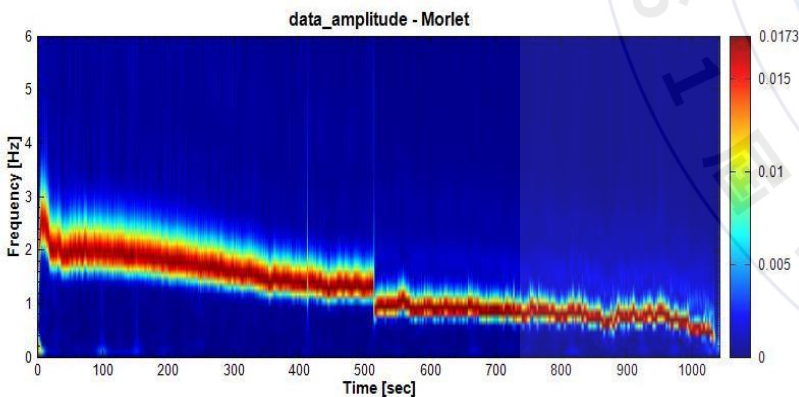


上圖為水溫90°C至87°C時的實驗數據

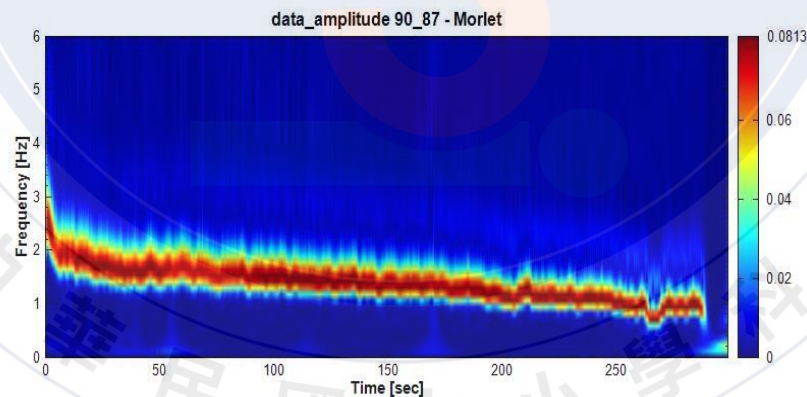


上圖為水溫85°C至83°C時的實驗數據

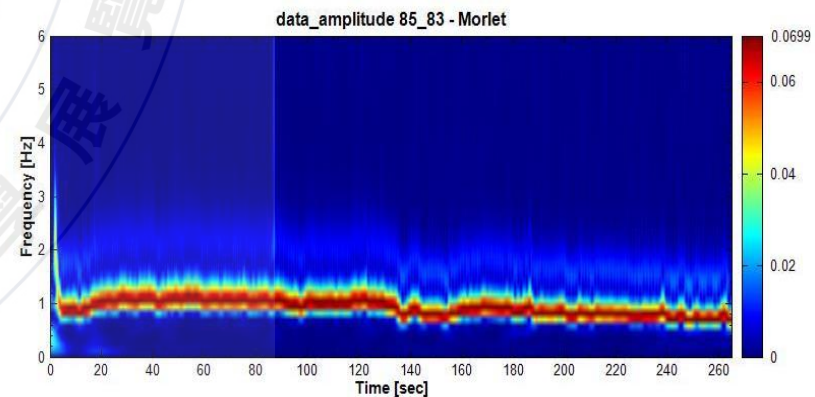
(一) 時頻圖



上圖為水溫95度至91度時的時頻圖



上圖為水溫90°C至87°C時的時頻圖



上圖為水溫85°C至83°C時的時頻圖

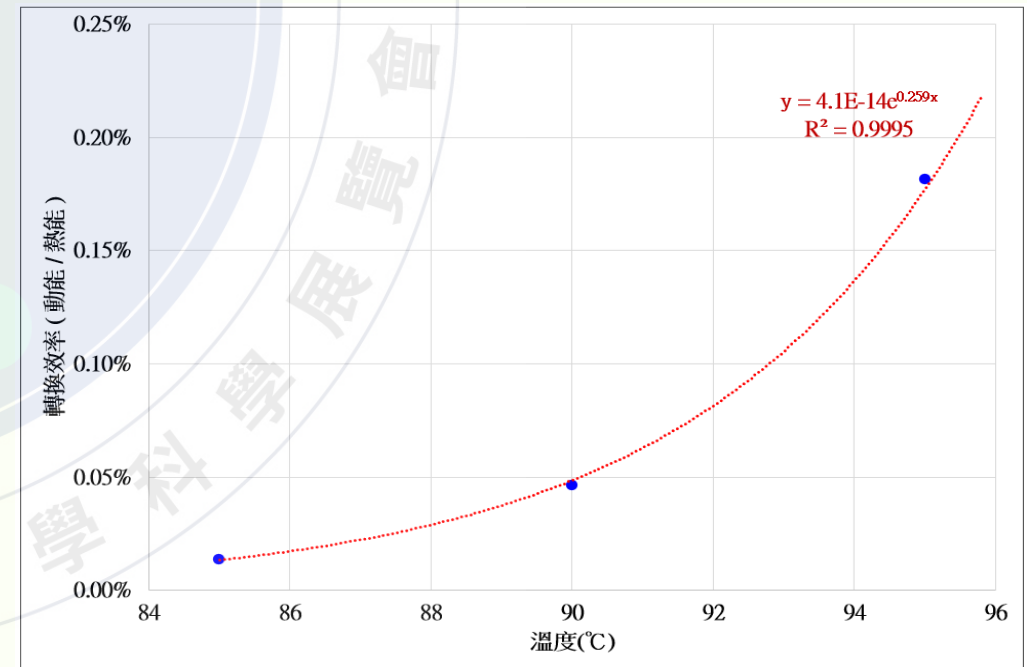
二、分析史特林引擎的運轉功率

下表為各種變因之參數和所得的熱轉換效率：

代號		變因一 (95°C ~ 91°C)	變因二 (90°C ~ 87°C)	變因三 (85°C ~ 81°C)
(A)	轉動慣量	0.000107		
(B)	飛輪角加速度	25.12	12.56	2.09
(C)	摩擦力角加速度	12.56	12.56	6.28
(D)=(A)×(B)	飛輪扭力	0.00269	0.00134	0.00022
(E)=(A)×(C)	摩擦力扭力	0.001344	0.001344	0.000672
(F)=(D)+(E)	引擎扭力	0.00403	0.00269	0.00090
(G)	引擎平均角速度	9.42	9.42	6.28
(H)=(F)×(G)	引擎功率	0.0380	0.0253	0.0056
(I)	轉動時間	1044	299	265
(J)=(H)×(I)	引擎輸出能量	39.65	7.57	1.49
(K)	熱能	21840	16380	10920
(L)=(J)/(K)	引擎輸出能量/熱能	0.182%	0.046%	0.014%

討論

- 一、各個實驗中水溫只降了3~4°C，飛輪即停止轉動，顯示**整個引擎系統具有極大的摩擦力**，當引擎功率小於摩擦力功率，飛輪即停止運轉。因此，我們在計算引擎輸出的能量時，同時計算飛輪和摩擦力做的功。
- 二、理論上溫度越低熱轉換效率越小，在實驗一至三，初始水溫分別為95°C、90°C、85°C，實驗結果飛輪轉動的時間分別1044、299和265秒，**飛輪轉動的時間越短表示熱轉換效率越小**。
- 三、在不同的溫降過程中，熱轉換效率分別為0.182%、0.046%、0.014%，熱轉換效率與初始水溫的關係，以理論的指數線型 $y=4.1E-14e^{0.259x}$ (y為轉換效率，x為初始水溫)最能描述該關係曲線，顯示熱轉換效率並非隨溫度呈線性變化，溫度越高，**熱轉換效率會呈指數增加**。



四、比較過去的文獻，史特林引擎熱能轉換效率主要與溫度、引擎內的氣壓、流體種類有關，不同的研究結果，溫度500°C時，轉換效率可達26%(Sripakagorn et al, 2011)，溫度150°C時，轉換效率只有5.6%(Kropiwnicki and Furmanek, 2020)，不過，當引擎內的氣壓提高時，轉換效率可再增加。原型的史特林引擎經最佳化設計後，在300-400°C，轉換效率可增加到18% (Sowale et al., 2018)。本研究使用小型的史特林引擎，引擎扭力易受摩擦力之大小影響，推測其為熱轉換效率低的原因。

五、宜蘭縣大同鄉仁澤溫泉之溫泉源頭為140°C，由本實驗結果估計其熱轉換效率約2%。該溫泉每日取用約20公噸，若能將其自然降溫的熱能轉換成電能，以140°C降至 90°C的條件，估計每日可產生能量

$$20 \times 10^3 \times 4.18 \times 10^3 \times (140 - 90) \times 2\% = 83.6 \times 10^6 \text{ J}，\text{約}23.2\text{度電。}$$

溫度(°C)	轉換效率(%)	文獻
500	26	Sripakagorn et al, 2011
390	18	Sowale et al., 2018
200	15	Lane and Beale, 1999
150	5.6	Kropiwnicki and Furmanek, 2020
95	0.109	本研究
90	0.028	本研究
85	0.008	本研究

結論

由本研究中得知若**初始水溫越低**，則史特林引擎的熱轉換效率呈指數型減少，且從實驗結果中推估宜蘭縣大同鄉仁澤溫泉之溫泉其自然降溫可**每日產生約23.2度電**，減少**11.81公斤的二氧化碳排放**。本實驗中使用小型的史特林引擎，摩擦力之大小容易影響其扭力，故**最大的轉換效率僅約略等於0.18%**。

台灣目前使用地熱發電共有27處，主要發電潛能區分別位於大屯山、清水、土場、廬山、知本、金崙與瑞穗等7處，總發電潛能約為**989MW**。世界能源危機以來，不僅國內大力發展地熱發電，國外利用地熱發電的例子也非常普遍。以美國地熱發電功率為例，2020年底前美國總發電功率達**3714MW**；又以各國統計至2020年底為例，地熱發電總裝機容量達**15608MW**。

以上數據顯示**地熱發電能有效運用天然資源，使其能達到再生的目的**。

未來展望

與其他史特林引擎熱能轉換效率的研究比較結果，本實驗因史特林引擎的摩擦力太大，因此轉換效率小很多，未來應加強在**如何降低摩擦力**的研究。此外，除了估計宜蘭縣大同鄉仁澤溫泉的發電量外，也可以進一步**收集全台的溫泉資料**，以評估全台所有溫泉的自然降溫大該可以產生多少電量。

參考資料

- [1] Lane, N.; Beale, W. A biomass-fired 1 kWe Stirling engine generator and its applications in South Africa. In Proceedings of the 9th International Stirling Engine Conference, Johannesburg, South Africa, 2–4 June 1999.
- [2] Sowale, A.; Kolios, A.J.; Fidalgo, B.; Somorin, T.; Parker, A.; Williams, L.; Collins, M.; McAdam, E.; Tyrrel, S. Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in an energy recovery system. *Energy Convers. Manag.* 2018, 165, 528–540.
- [3] Sripakagorn, A.; Srikam, C. Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine. *Renew. Energy* 2011, 36, 1728–1733.
- [4] Kropiwnicki, J.; Furmanek M, A theoretical and experimental study of moderate temperature alfa type stirling engines, *Energies*, 2020, 13, 1622; doi:10.3390/en13071622
- [5] Alexander Richter.(2021).ThinkGeoEnergy' s Top 10 Geothermal Countries 2020 – installed power generation capacity (MWe). Abstract retrieved (Jan 7,2021), from <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2020-installed-power-generation-capacity-mwe/%20>
- [6] 台灣電力公司(2004)。歷年發購電量占比。檢自<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=212&cid=120&cchk=f3a1b1e0-03e5-45fa-b72e-b28c5cb94f37> (Feb 17,2021)