

# 中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高中組 生活與應用科學科

佳作

040818

淺層地熱之研究與低溫史特林發動機之應用

學校名稱：臺北市立萬芳高級中學

作者： 高二 梅珍鳳 職二 梅佳龍	指導老師： 邱家媛 廖耿舜
-------------------------	---------------------

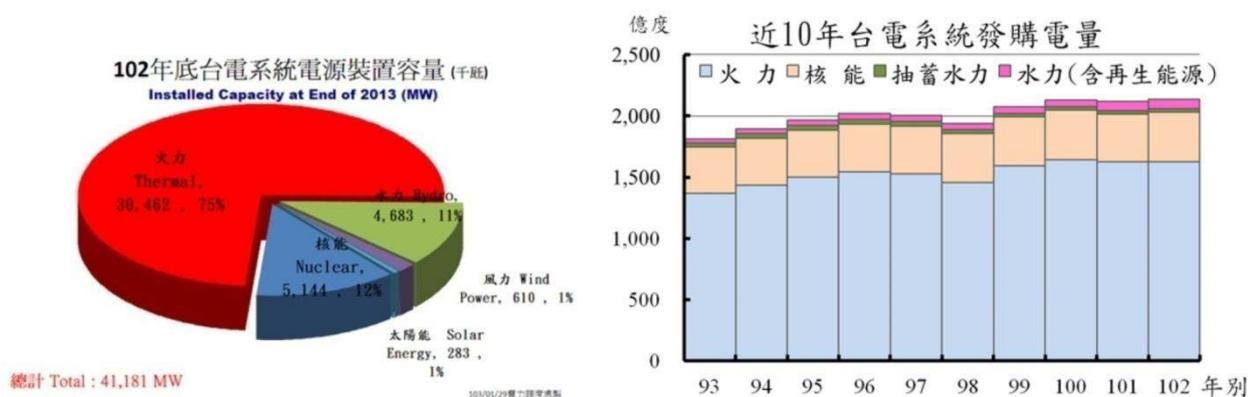
關鍵詞：地熱發電、史特林發動機

## 摘要

我們以  $\gamma$  構型史特林引擎為基礎，結合自由活塞的結構，再加上線性發電模組，設計出一台可在溫泉環境中發電的地熱發電機，因製作精度不良且材料選擇錯誤，第一代原型機模型僅運轉1分鐘即損毀，不過已足以證明其理論與方向正確性，針對第一代原型機的缺失，我們著手製作第二代改良型，將引擎分為熱交換模組與動力模組2部分，解決溫差造成水凝結的問題，我們並將它命名為**分離式  $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎**，最後我們以實驗證明「淺層地熱發電」的可行性，為綠色能源提供另一種選項。

### 壹、研究動機：

在核能與火力發電飽受普世價值唾棄的現今，替代能源的研究已成顯學，其中較常見的風力與太陽能發電，因持續性的問題以及成本的因素，尚有若干瓶頸有待突破，以至於在整體的發電占比僅約 2%，如（圖 1）、（表 1），因此，尋找可靠的綠色能源便是現階段應用科學之重點議題。



(圖 1)

(表 1)

以上資料來自：[http://www.taipower.com.tw/content/new\\_info/new\\_info-b12.aspx?LinkID=6](http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-b12.aspx?LinkID=6)

每年冬季，我們全家總是會到溫泉區享受泡湯之樂，某些地區溫泉水溫較高，若不加以降溫甚至會造成燙傷，這些高溫的泉水終年不息地自地下流出，將地層深處的熱能帶往人間，只可惜我們沒有好好利用，故這些珍貴的熱能逸散在大氣中，若能將其收集轉成電能，必將是很好的綠色能源，但是我們也了解將熱能轉換成機械能的機器都是靠工作流體(working fluid)來驅動，當熱能進入工作流體之後，透過工作流體之運作，轉換成動能與電能，為了使這些工作流體有足夠的動能，故工作溫度通常在 $100^{\circ}\text{C}$ 以上，液態的溫泉水是不可能達到這樣的溫度，因此，利用地熱溫泉來發電地構想始終無法有進一步的實踐。在一次校外研習中，我們

接觸到史特林引擎(Stirling Engine)，讓人驚訝的是它某些構型的工作溫度可在100°C以下，可以用溫泉水的溫度來驅動，符合我們的期待，在南一版-高三物理上冊 1-3中，我們也學到了有關熱力學的知識，但是進一步研究後，傳統史特林引擎與其他熱機(heat engine) 一樣，具有連桿、曲軸與飛輪等活動結構，無法在溫泉的環境中長期運轉，因此，我們便更新了史特林引擎部分結構，期能打造出一台針對溫泉環境量身訂作的史特林引擎，為綠色能源提供一個新的選項。

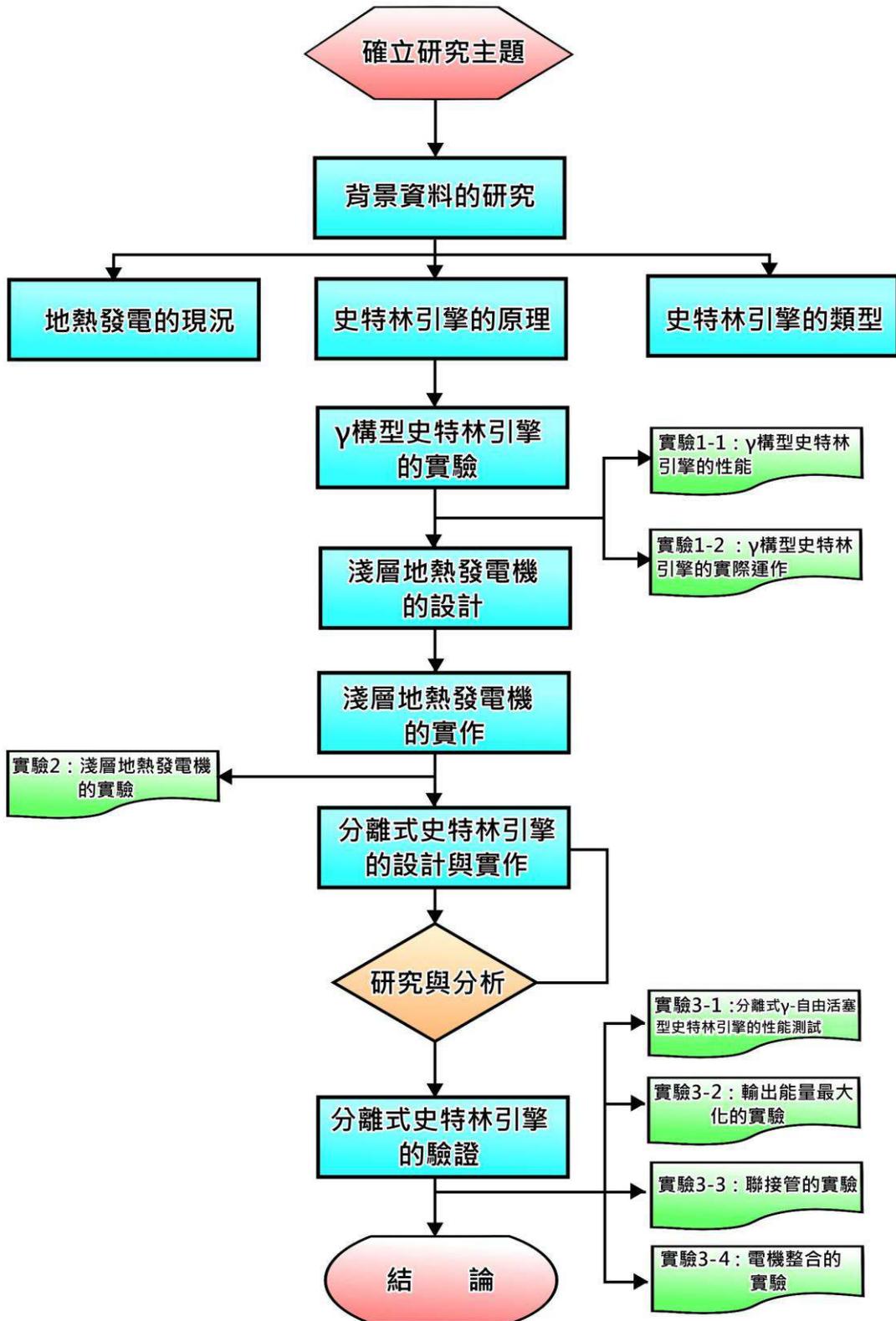
## 貳、研究目的：

- 一、地熱發電現況的研究。
- 二、了解史特林引擎工作原理及發展沿革。
- 三、設計可在溫泉環境中發電的地熱發電機。
- 四、製作模型證明溫泉地熱發電機的可行性。

## 參、研究設備與器材：

		
鋁板	玻璃注射器	海棉
		
壓克力管	彈簧	黏著劑
		
矽膠	PVC水管	線性發電模組

肆、研究過程或方法：



## 伍、研究的結果：

### 一、背景資料研究：

#### (一) 地熱發電的現況：

再生能源中，地熱發電具有供熱溫度與供應流量穩定的特性，供熱條件不隨氣候與時間產生變化，地熱發電的基本原理乃利用無止盡的地熱來加熱地下水，使其成為過熱蒸汽後，當作工作流體以推動渦輪機旋轉發電。換言之，即將地熱轉換為機械能，再將機械能轉換為電能；這種以蒸汽來旋轉渦輪的方式，和火力發電的原理是相同的。不過，火力發電推動渦輪機的工作流體必須靠燃燒重油或煤炭來維持，不但費時且過程中易造成污染；相反的，地熱發電等於把鍋爐和燃料都放在地下，只需將蒸汽取出便能夠達到發電的目的。對於做為工作流體的高溫地熱水，通常採「閃化蒸汽處理」，也就是讓它因壓力驟降而迅速汽化，緊接導入低壓蒸汽渦輪機產生動力以發電。工作流體若為乾而高溫的過熱蒸汽，可直接通入渦輪機，若同時含有水蒸氣和熱水，則須先藉「汽水分離裝置」將二者分離，待水蒸氣推轉渦輪機後凝結為熱水，如果熱水溫度仍高，則可經閃化處理再利用或另作他途。發電系統末端之冷凝水經適當控溫後排入河川，或回注地下以免地層下陷。地熱能源係屬自產型之替代能源，其經濟規模不但具備發展遠景，且擁有能源供應穩定、產量適合開發等優點，還能與其他能源相互結合應用，節省相當大比率的其他燃料消耗，達到高溫高效率的利用價值，但是地熱資源的開發，受環境先決條件之限制頗多，且開發過程中易造成環境污染，相對的其研究困難度也較大，因此即使在能源多仰賴國外進口的台灣，地熱發電還是較少被考慮，目前僅有宜蘭縣清水電廠較為成功，而其最主要的缺點如下：

- 1、初設成本高：開發初期的探勘、鑽井之費用極高，且所需相關技術之門檻皆極為嚴苛。
- 2、環境負荷大：挖鑿地熱井將破壞地表自然景觀並影響生態，對土地使用造成影響。
- 3、工安管理風險高：發電時之蒸汽中可能帶有毒性氣體，熱水中也可能溶有重金屬等有害物質，對環境將造成污染；若曝露量高，工作人員甚至有遭受危害之虞。
- 4、供應源位置掌握不易，且持續供應量之穩定度難以精確計算。
- 5、法令限制，例如：大屯火山群被列為國家公園，無法興建發電廠。

因此，我們認為利用已存在的地表溫泉，可避開上述的缺點，根據我們實地觀察，可採集溫泉地熱的地形如（圖 2）、（圖 3）



（圖 2）地表溫泉



（圖 3）噴氣孔

（圖 2）、（圖 3）中的 2 種地形為自然形成，故無破壞地表自然景觀並影響生態的問題，經實測得知，溫度可至 90°C 左右，如（圖 4），可直接加以應用，不需探勘、鑽井之費用，且所需相關技術之門檻皆極為簡單，成本低廉，且因這些地區大都已開放一般民眾觀光遊憩，故沒有毒物汙染的問題，安全無慮，因此，我們認為這是開發地熱理想的地區，因它們位於地表淺層，故以下我們簡稱為「淺層地熱」。



圖 4 說明：

本照片攝於台北是大屯山區某溫泉水源區，以電子溫度計插入導管中，測得溫泉水溫度為 90.2°C。

圖 4

雖然「淺層地熱」溫度可至 90°C 左右，但所產生的蒸氣壓依然無法推動渦輪進而產生電能，在一次校外研習中，我們接觸到**史特林引擎(Stirling Engine)**，讓人驚訝的是它某些構型的工作溫度可在 90°C 以下，可以用溫泉水的溫度來驅動，符合我們的期待，因此，我們就進一步的研究**史特林引擎**，希望能用「淺層地熱」產生電能。

## 二、史特林引擎(Stirling Engine)的原理：

熱機(heat engine)是一種可以進行一連串轉換而最終能回覆開始狀態的熱力學系統。這一流程被稱為一個循環，其中最著名的就是卡諾循環 (Carnot cycle)，而以其理論建構的卡諾熱機被視為熱效應最佳的熱機，其說明如 (圖5)、 (圖6)

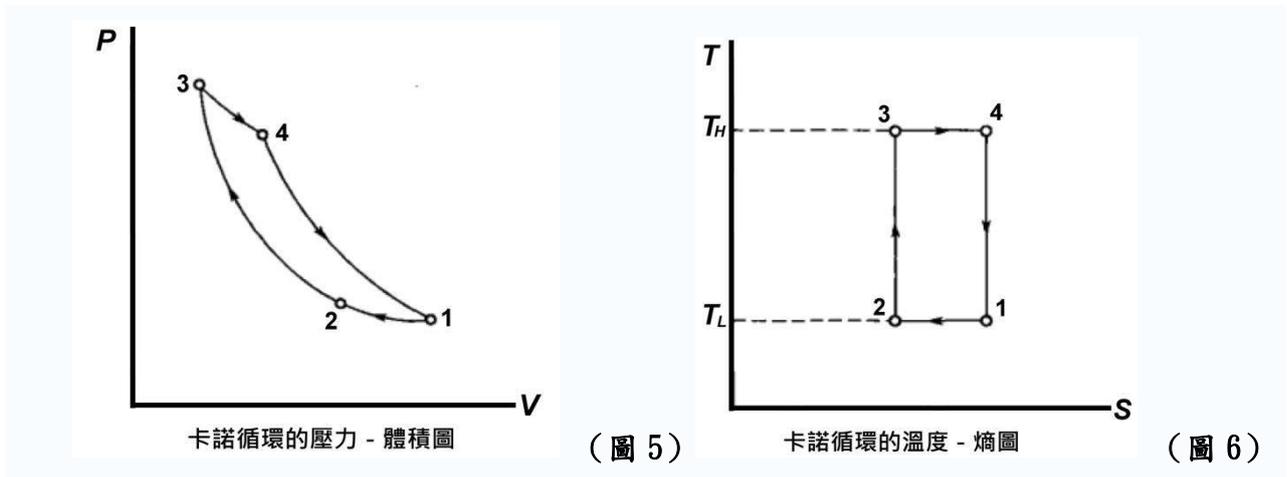


圖 5、圖 6 1→2，可逆等溫壓縮：循環開始時(點 1)，假設活塞外止點位置，此時工作容積最大，工質的溫度  $T_L$  和壓力均最小。令活塞向內止點方向運動，對工質進行壓縮。在該過程中，汽缸具有完全的導熱性，而且傳熱性為無限大，因此過程中溫度不變。該過程結束時(點 2)，壓力升高，但溫度仍維  $T_L$ 。

圖 5、圖 6 2→3，等熵(可逆絕熱)壓縮：活塞繼續向內止點方向運動，對工質進行壓縮，在該過程中，汽缸被絕對絕熱，不再進行導熱，因此過程中壓力和溫度都升高。在該過程結束時(點 3)，活塞到達內止點，此時工作容積最小，壓力最高，溫度升高到  $T_H$ 。

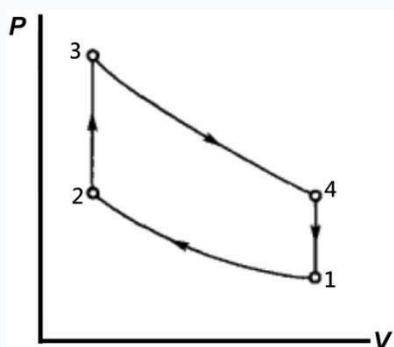
圖 5、圖 6 3→4，可逆等溫膨脹：工質開始膨脹，活推向外止點方向。在該過程中，汽缸又具有完全導熱性，而傳熱率為無限大，因此過程中壓力和溫度都下降。

圖 5、圖 6 4→1，等熵(可逆絕熱)膨脹：工質繼續膨脹，活塞繼續向外止點方向運動。在該過程中，汽缸又被絕對絕熱，不再進行導入，因此過程中壓力和溫度都下降。在該過程結束時回到循環起始位置(點 1)活塞到達外止點，工作容積達到最大，壓力降至最低，溫度降到  $T_L$

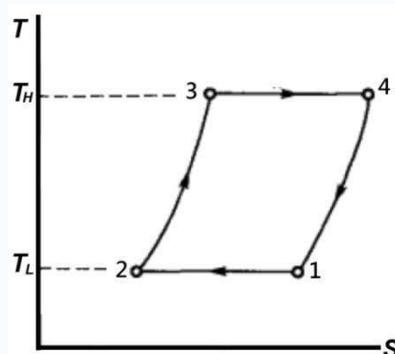
$$\text{因此卡諾循環的熱效率 } K = \frac{T_H - T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

其熱效率恆小於 1，熱效率和高溫和低溫的熱源有關，兩者溫差越大，效率越高。

然而，卡諾循環畢竟是一種理想狀況，在現實的世界中卡諾熱機並不存在，史特林循環與卡諾循環十分相似，其說明如（圖 7）、（圖 8）

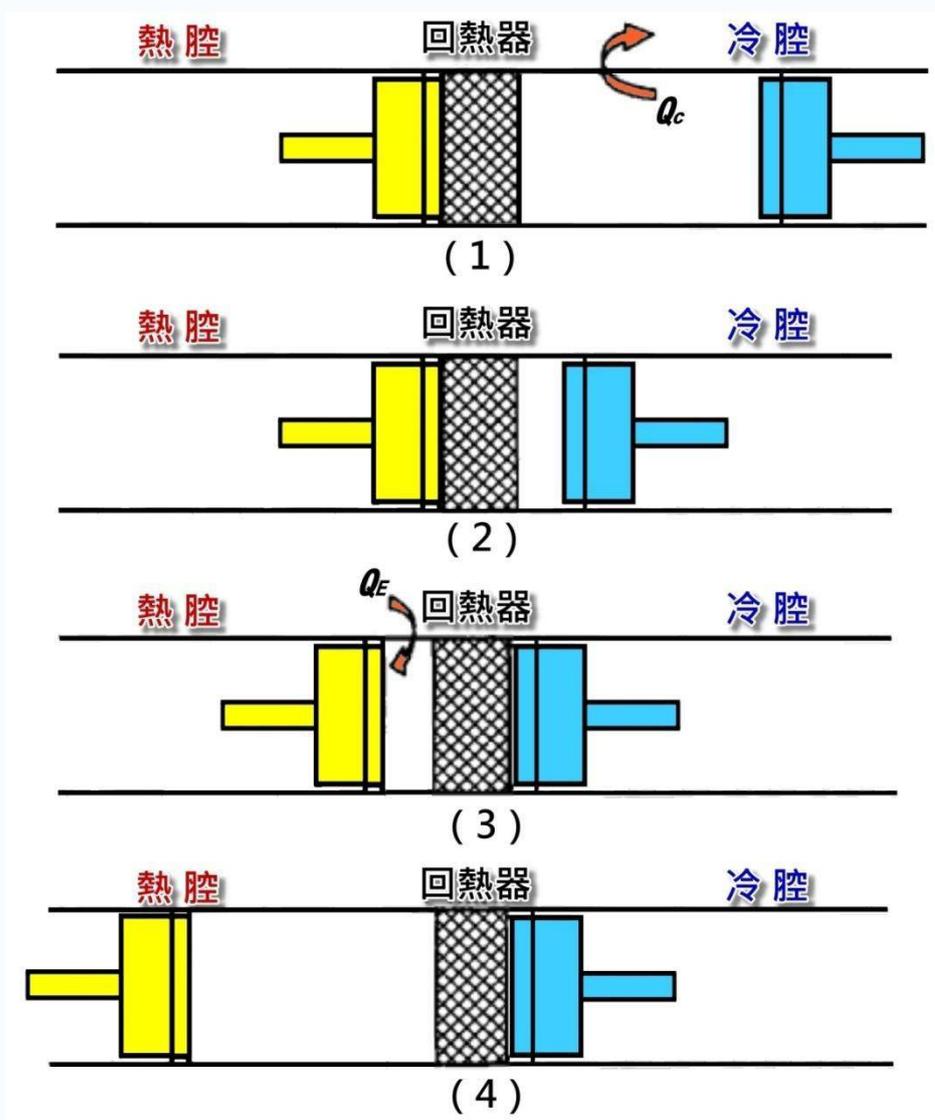


史特林循環的壓力 - 體積圖 (圖 7)



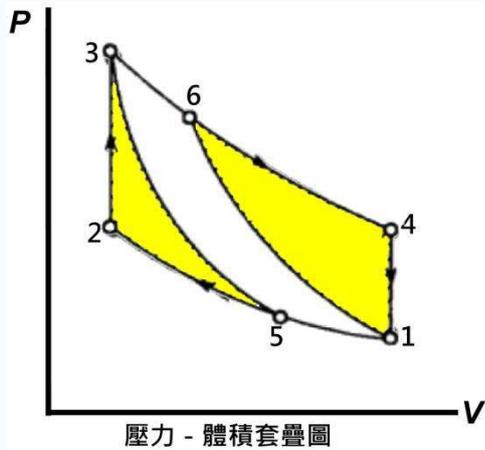
史特林循環的溫度 - 熵圖 (圖 8)

如果將（圖 7）、（圖 8）與史特林熱機工作示意圖相結合，則如（圖 9）

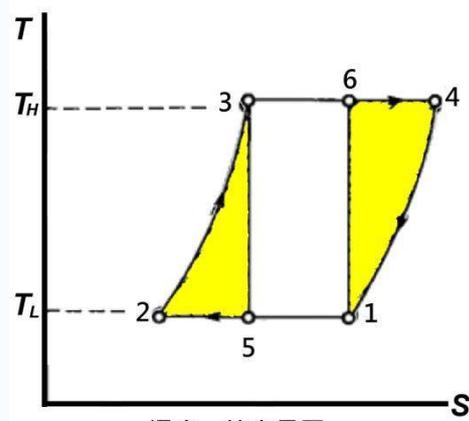


(圖 9)

在（圖9）中，冷腔會對系統外輸出熱能  $Q_c$ ，而熱腔也會對系統外取得熱能  $Q_B$ ，並非對系統外絕熱，如果將（圖5）、（圖6）與（圖7）、（圖8）套疊如（圖10）、（圖11）



（圖10）

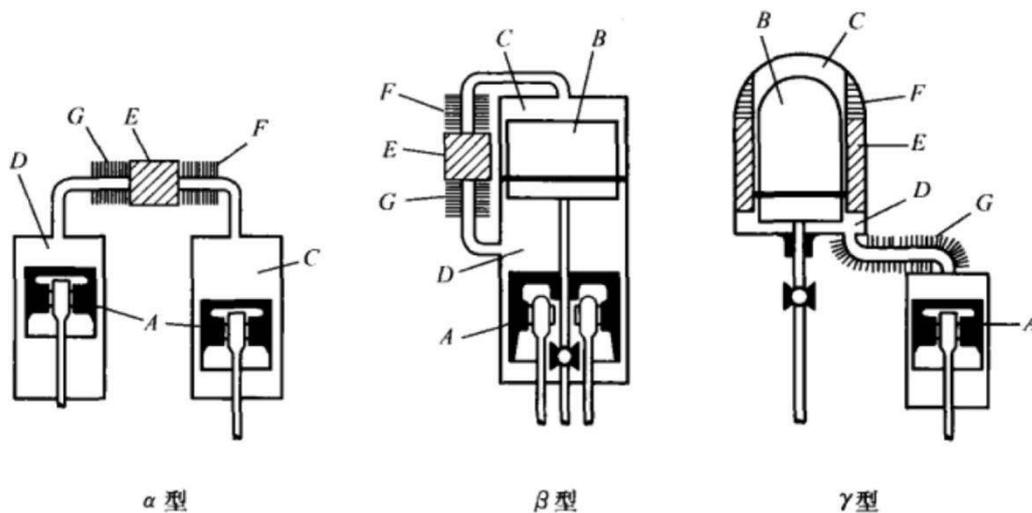


（圖11）

（圖8）、（圖9）中，1-2-3-4 代表**史特林循環**，1-5-3-6 代表**卡諾循環**，比較兩者的差異，卡諾循環由兩條絕熱線和兩條等溫線構成。在史特林引擎中工作流體的壓力－體積圖是由兩條等溫線和兩條等體積升降溫度線構成。換言之，史特林引擎循環以兩條等體積升降溫度線，取代卡諾循環的兩條絕熱線，比較封閉曲線內的面積，**史特林循環**明顯大於**卡諾循環**，因此，在壓力和工作容積相同的條件下，**史特林循環**所作的功會比**卡諾循環**大得多，但是就熱效率而言，**史特林循環**與**卡諾循環**相同，與高溫（ $T_H$ ）和低溫（ $T_L$ ）的熱源有關，兩者溫差越大，效率越高。

### 三、史特林引擎(Stirling Engine)的類型：

史特林引擎是蘇格蘭牧師史特林(Robert Stirling)於西元1816年所發明，至今已擁有兩百年歷史了，期間經過多次的改良，演生出多種不同的構型，如(圖12)



A-活塞 B-移氣胴體 C-熱腔 D-冷腔 E-回熱器 F-加熱器 G-冷卻器 圖12

本圖摘自自：史特靈發動機技術 金東寒 著 哈爾濱大學出版社 2009.3

各種構型的差異與功能在國內外相關著作中已有詳盡之討論，因此我們不再贅述，經過分析與比較後，我們得知目前實用化的史特林引擎，通常會以太陽能或天然氣為熱源，高溫 ( $T_H$ ) 值可達 $700^{\circ}\text{C}$ 以上，而「淺層地熱」的溫度大在 $80$ 至 $95^{\circ}\text{C}$ 之間，只能驅動某些特殊設計的史特林引擎，其中最典型的的就是加大熱腔與移氣胴體的 $\gamma$ 構型史特林引擎，如(圖13)、(圖14)

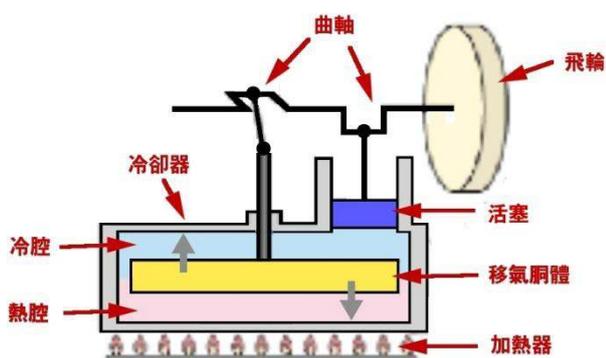


圖13  $\gamma$ 構型工作原理示意圖



圖14  $\gamma$ 構型實物模型

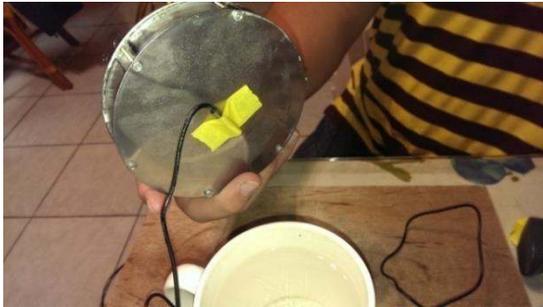
$\gamma$ 構型史特林引擎將原本的活塞改用一移氣胴體代替，使冷熱氣體在同一腔體內進行冷熱的交替，以減少高與低溫度控制的困難度，故可以在溫差較低的情形下運作，因此，在以下的研究，我們將以 $\gamma$ 構型史特林引擎為主。

#### 四、 $\gamma$ 構型史特林引擎的實驗：

##### (一) 實驗1-1： $\gamma$ 構型史特林引擎的性能測試

實驗目的：尋找  $\gamma$  構型史特林引擎運作的最低溫度。

實驗方法：



1、將溫度計感應器黏貼於引擎底部



2、測量引擎上部溫度



3、將引擎置於溫度約90°C之熱水上



4、啟動史特林引擎



5、每隔1分鐘紀錄1次引擎上部、底部的溫度及轉速，直到停止轉動為止



實驗結果： 1、引擎上部溫度簡稱 (TL)，引擎底部溫度簡稱 (TH)，單位為：°C。

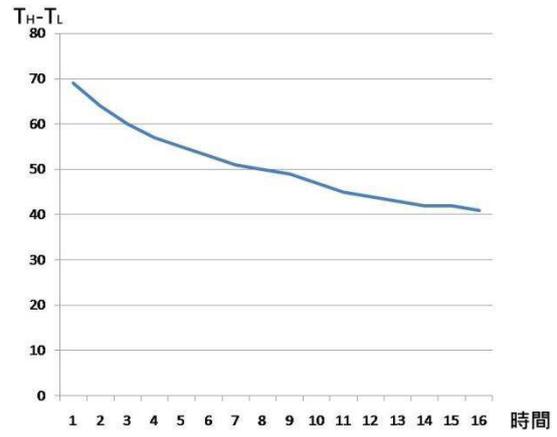
2、紀錄之時間單位為：分鐘

3、引擎轉速單位為：圈數-每分鐘簡稱 (rpm)。

4、紀錄之數據如：(表2)、(圖15)、(表3)、(圖16)

時間	T <sub>H</sub> -T <sub>L</sub>	時間	T <sub>H</sub> -T <sub>L</sub>
1	69	9	49
2	64	10	47
3	60	11	45
4	57	12	44
5	55	13	43
6	53	14	42
7	51	15	42
8	50	16	41

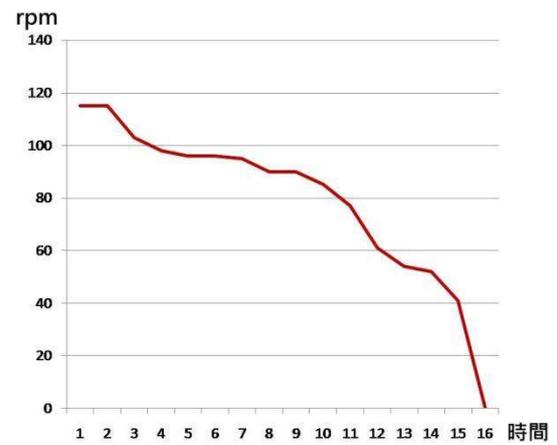
(表2)



(圖15)

時間	rpm	時間	rpm
1	115	9	90
2	115	10	85
3	103	11	77
4	98	12	61
5	96	13	54
6	96	14	52
7	95	15	41
8	90	16	0

(表3)

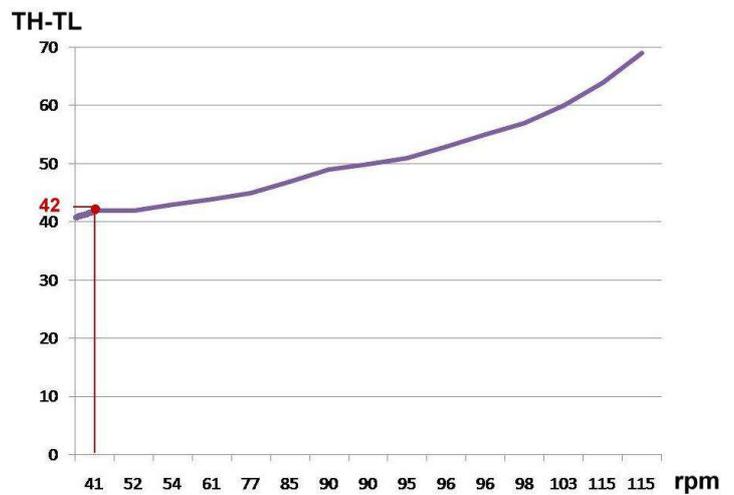


(圖16)

綜合 (表2)、(表3) 的數據，則可得 (T<sub>H</sub>-T<sub>L</sub>) 與 (rpm) 的對應關係如 (表4)、(圖17)

T <sub>H</sub> -T <sub>L</sub>	rpm	T <sub>H</sub> -T <sub>L</sub>	rpm
69	115	49	90
64	115	47	85
60	103	45	77
57	98	44	61
55	96	43	54
53	96	42	52
51	95	42	41
50	90	41	0

(表4)



(圖17)

(圖17) 中 (T<sub>H</sub>-T<sub>L</sub>) 低於42°C以下，史特林引擎已接近停止轉動，因此，我們將它視為無效

區，因此我們得知 ( $T_H - T_L$ ) 臨界值大約在 $42^{\circ}\text{C}$ 左右，故  $\gamma$  構型史特林引擎加熱面與冷卻面必須要保持 $42^{\circ}\text{C}$ 以上的溫度差才可有效運轉，且輸出的動能溫度差呈正相關。「淺層地熱」溫度可至 $90^{\circ}\text{C}$ 左右，而即使在炎熱的夏季，氣溫也在 $40^{\circ}\text{C}$ 以下，因此依實驗1-1的結論，「淺層地熱」足以驅動  $\gamma$  構型的史特林引擎。

## (二) 實驗1-2： $\gamma$ 構型史特林引擎的實際運作

實驗目的：檢視  $\gamma$  構型史特林引擎在「淺層地熱」環境中的實際運作。

實驗方法：



將  $\gamma$  構型史特林引擎的模型置於 (圖4) 溫泉導管上，檢視史特林引擎的運作

實驗結果：



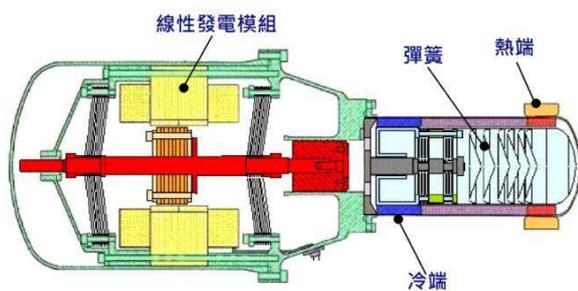
史特林引擎的模型確實可順利運轉，但是硫磺卻會大量沉積在連桿、曲軸與飛輪等活動結構上，使引擎無法長期運轉，因此，我們認為  $\gamma$  構型史特林引擎不可用於符合需求。

## 五、淺層地熱發電機的設計：

由實驗1-1與1-2的結論，我們得知設計一款適用於淺層地熱發電的史特林引擎，我們必須考慮下列條件：

- 1、驅動的溫度在90°C之下。
- 2、溫泉的環境中具有富含硫磺的蒸氣，易產生硫磺沉積，並且有些溫泉水呈酸性，會腐蝕金屬零件，故本型史特林引擎必須要有抵抗這些不利條件的能力。
- 3、因淺層地熱能量密度較低，為使其具經濟效益，故發電機組構造必須盡量簡化，降低製造與維修成本。

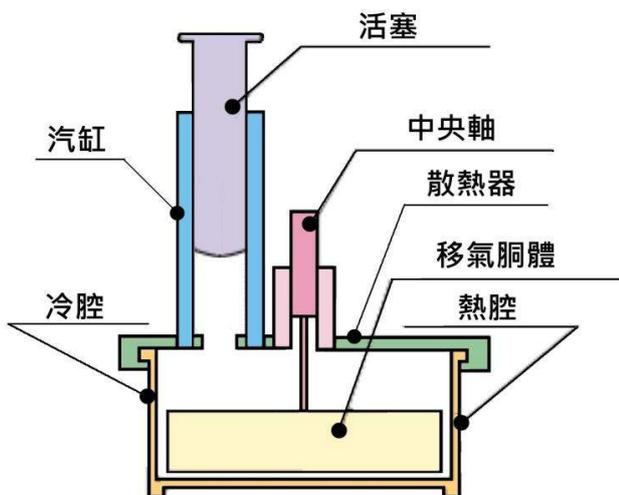
$\gamma$  構型史特林引擎能符合驅動溫度的要求，但是為了使活塞與移氣胴體能正確運作，故必須靠連桿、曲軸與飛輪等活動結構產生相位差來推動，而這些結構卻無法在溫泉的環境中長期



資料來源: tallbloke.wordpress.com

(圖18) NASA 自由活塞型史特靈引擎

美國太空總署 (NASA) 更成功研發了核燃料的自由活塞史特林引擎，如：(圖18)，探測離太陽1.5 天文單位之外，因陽光強度減弱，一般太陽能電池的發電量不敷使用的深太空。自



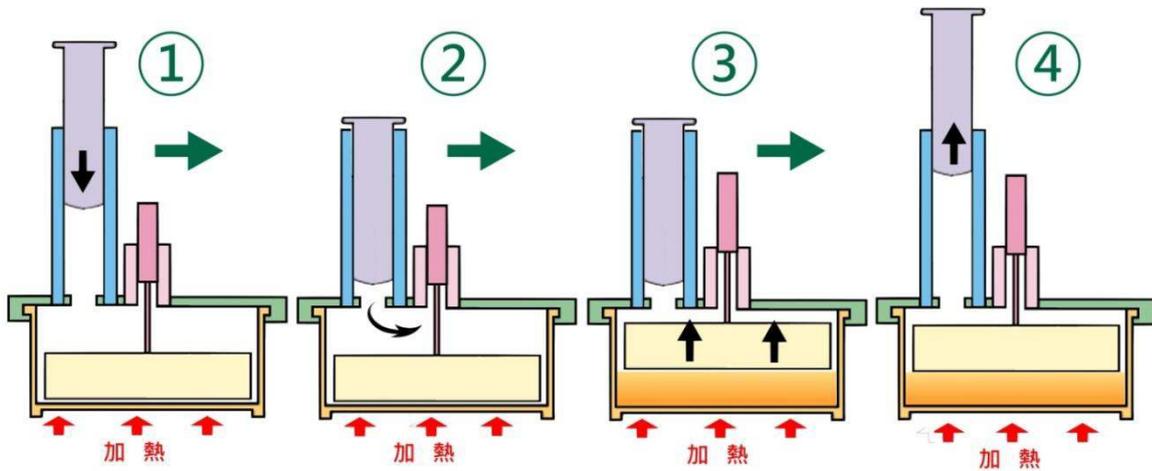
(圖19)

運轉，因此，我們必須改變史特林引擎部分結構，1960年，Beale 發明了自由活塞(free-piston)型史特靈引擎，利用壓縮氣室及彈簧元件提供能量儲存，而取代了曲柄、配重塊、及飛輪等結構，因此潤滑容易、機構簡單。

自由活塞型史特靈引擎還有另外一項優點，它的整體系統是封閉且氣密的，並且沒有連桿、曲軸與飛輪等活動結構，如果使用抗酸蝕材質來製造外殼，就可以在溫泉的環境中運轉。自由活塞型史特靈引擎是一種微型且緊緻化的設計，因此，會採用較高的工作溫度，使工作流體有足夠的動能來推動活塞，以「淺層地熱」

的溫度是不可能讓它有效運作，因此，我們必須結合  $\gamma$  構型史特林引擎的部分結構，其設計

之構想如（圖19），工作原理如（圖20）



（圖20）

工作原理說明如下：

1-2：活塞因重力導引向下墜落，將汽缸內的空氣壓縮至冷、熱腔中。

2-3：冷、熱腔增加的壓力將中央軸往上推，聯動移氣胴體一併往上運動，且將上層冷腔中的空氣驅趕至下層熱腔中加熱。

3-4：冷腔內的空氣溫度較汽缸內的空氣高，故膨脹而將活塞往上推。

4-1：冷腔內的空氣因散熱器熱交換使空氣溫度降低，空氣開始收縮，且因重力導引，活塞與中央軸、移氣胴體一併向下墜落，下層熱腔中被加溫的空氣也被移氣胴體驅趕至上層冷腔中。

以上4個過程不斷循環將使活塞產生上、下的往復運動，為了與傳統  $\gamma$  構型史特林引擎有所區別，我們將它命名為  $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎。

六、淺層地熱發電機的實作：



鋁板加工



完成冷、熱腔上、下底板



以透明壓克力製作冷、熱腔體



以玻璃注射器製作汽缸，活塞，中央軸



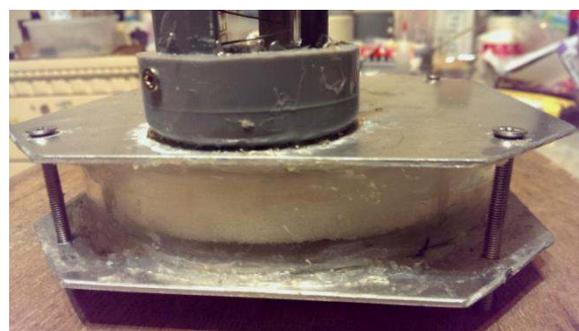
以透海棉製作移氣腔體



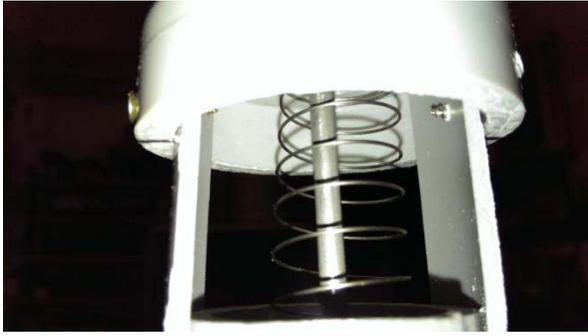
在汽缸及中央軸裝置彈簧



汽缸及中央軸完成



冷、熱腔體及移氣腔體完成



裝設活塞復進彈簧



裝設復進磁鐵



裝設線圈與整流線路



模型完成

### 七、實驗2：淺層地熱發電機的實驗：

實驗目的：操作並檢視淺層地熱發電機。

實驗方法：



1、模擬溫泉的溫度



2、測量引擎底部與上部的溫度



3、測量發電機的發電量



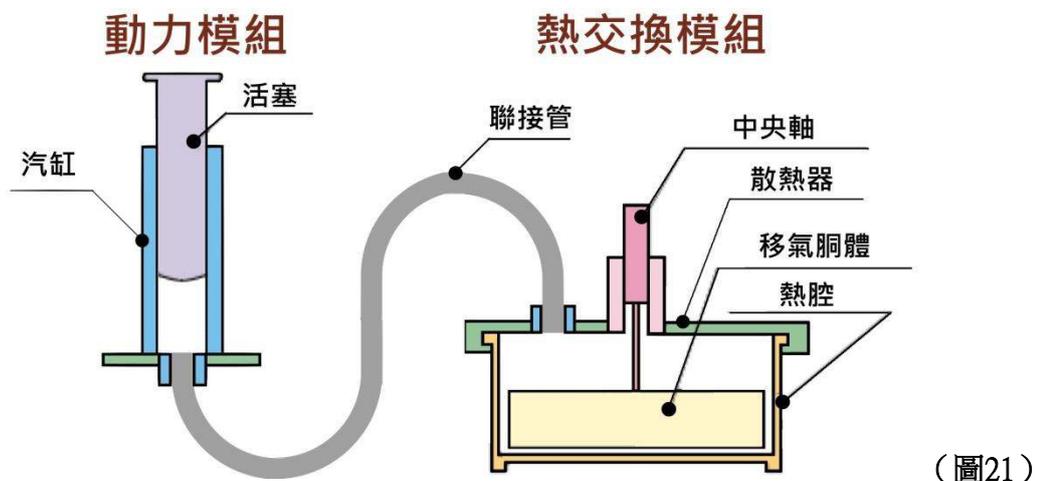
實驗結果：1、發電機僅運轉約1分鐘即因多項因素造成機體損壞而停止。

- 2、在機體損壞前測得最大電壓為1.9V。
- 3、機體損壞之因素經分析後如下：
  - (1) 汽缸固定不良，運轉時會水平晃動。
  - (2) 冷、熱腔與汽缸皆以矽膠補強氣密，當加熱到一定程度時，矽膠會變形使氣密失效。
  - (3) 製作精度不良，整體磨擦力過大。
  - (4) 熱腔中因空氣溫度較高，故**相對濕度 (Relative humidity)**較低，一但進入冷腔後，空氣溫度降低，故相對濕度提升，水凝結在汽缸內壁，造成活塞與汽缸的磨擦力劇增，使發動機停止運作。

雖然這次實驗並不成功，但是在發電機運轉的1分鐘裏，我們感受到「淺層地熱發電」的方向是正確的，針對第一代原型機的缺失，我們著手製作第二代改良型，以證明「淺層地熱發電」的可行性。

#### 八、分離式 $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎的設計與實作：

基於**實驗-2**的結果，我們得知第一代原型機的缺失，其中水凝結的問題較難解決，如果增加汽缸與活塞的間距，雖可降低凝結水帶來的磨擦力，但是缸壓與活塞的推力也會隨之降低，這並不是我們希望看到的結果，因此，我們變更了設計如（圖21）



(圖21) 中，我們將汽缸與機體分離並用軟管相連結，因此，發動機便分為**動力**與**熱交換**2

個模組，這種結構有下列的優點：

- (一)、**實驗-2**中水凝結的現象，將會發生在聯接管中，不會凝結在汽缸內壁，造成活塞與汽缸的磨擦力劇增。
- (二)、分離式設計，可依彈性調整安裝方式。
- (三)、模組化設計，如遇故障只需更換模組即可，維修更為簡易。

依據（圖21）的設計，我們實作的結果如（圖22）



（圖22）

在實作的過程中，我們發現了一些值得研究的問題，其說明如下：

- (一)、熱交換模組中的移氣胴體，以往復的上下運動移轉冷、熱腔的空氣，故移氣胴體的上、下止點應儘量靠近冷、熱腔的上下底，使冷、熱空氣移轉更完全，如（圖23）

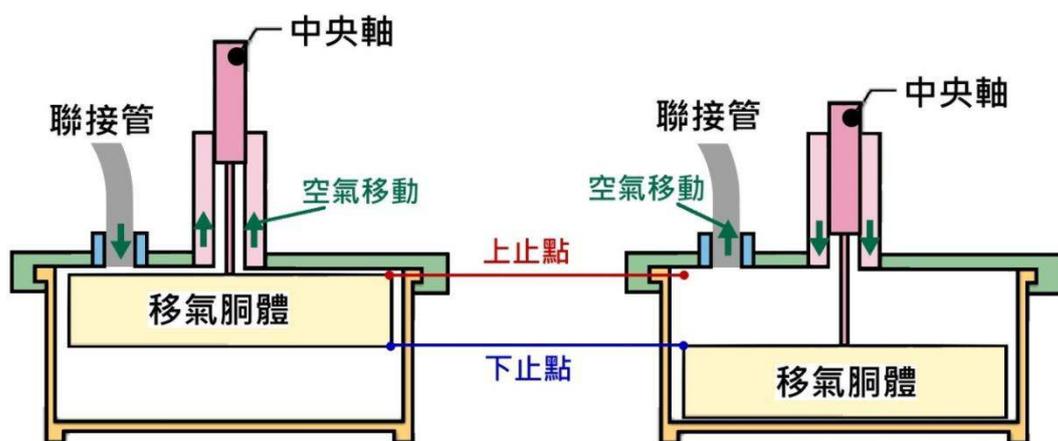


圖23

移氣胴體的往復運動是受中央軸的控制，而中央軸往上的推力則來自聯接管進氣，使腔體內壓力的增加，若以理想氣體方程式  $P V = n R T$  來看，如果腔體內已達成熱平衡，則  $T$  值就

不會改變，當聯接管進氣時， $n$  值會增加，我們將方程式假設為  $P_1 V_1 = n_1 R T$ ，當聯接管排氣時， $n$  值就會減少，我們將方程式假設為  $P_2 V_2 = n_2 R T$ ， $n_1 > n_2$ ，腔體內壓力在上、下止點時應與系統外的壓力平衡，即1大氣壓，故  $P_1 = P_2 = 1$ 大氣壓。

假設： $K = R T / P_1 = R T / P_2$  故  $V_1 = n_1 K$   $V_2 = n_2 K$  因  $n_1 > n_2$  故  $V_1 > V_2$

如果移氣胴體到達上止點，使中央軸往上增加的體積  $V_3 = V_1 - V_2$ ，則移氣胴體往復運動的上、下止點就可到達冷、熱腔的上下底，可使冷、熱空氣移轉更完全，體積  $V_3$  的大小則由聯接管進氣的量來控制，因考慮系統內有部分的空氣會被壓縮，故動力模組輸出至熱交換模組空氣的體積應大於  $V_1 - V_2$  的值，換言之，動力模組汽缸的容積會比中央軸大，至於其比例關係，在有關文獻資料中，我們找不到相關的研究資料，因此，我們將以實驗結果的經驗值來尋找汽缸與中央軸的適當比例。

(二)、聯接管進氣使中央軸產生往上的推力，但是中央軸與移氣胴體本身的質量也會產生阻力，為使中央軸的運作更為順暢，我們在中央軸的頂端裝設輔助彈簧，如(圖24)

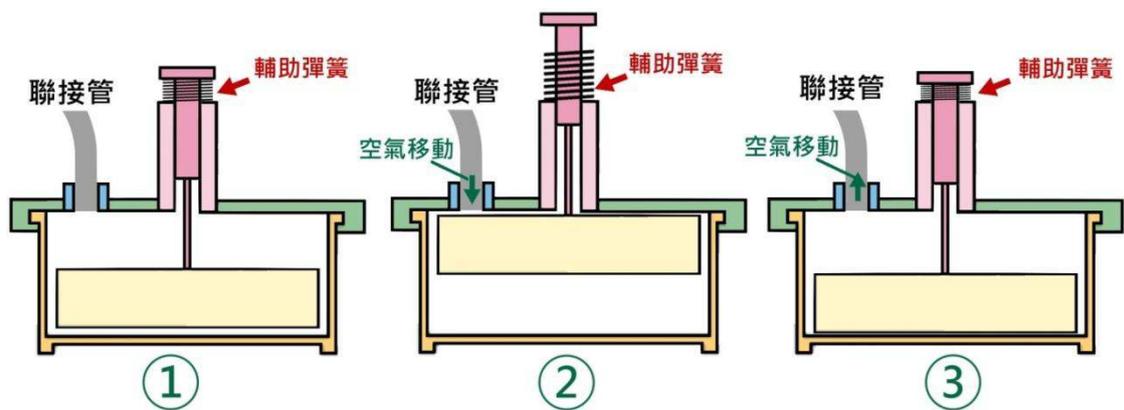


圖24

(圖25) 之說明如下：

- <1>、系統不受外力的自然平衡狀態，移氣胴體並未到達下止點，輔助彈簧支撐中央軸與移氣胴體全部質量，並使中央軸呈懸浮狀態。
- <2>、聯接管進氣使中央軸產生往上的推力，移氣胴體到達上止點，輔助彈簧完全伸張。
- <3>、聯接管進氣使中央軸產生往下，移氣胴體躍過自然平衡到達下止點，輔助彈簧受到壓縮，並儲存部分動能。
- <3>到<2> 聯接管進氣使中央軸產生往上，輔助彈簧釋放儲存的動能，協助移氣胴體

到達上止點。

由<3>到<2>，移氣胴體運動方向相反，故需要較大的作用力來克服慣性的阻力，當發動機效能逐漸降低，使中央軸往上的推力不足時，輔助彈簧釋放儲存的動能就扮演持續發動機運轉的重要關鍵。

(三)、動力模組的汽缸中也有輔助彈簧，其功能與熱交換模組的輔助彈簧相同，如(圖25)

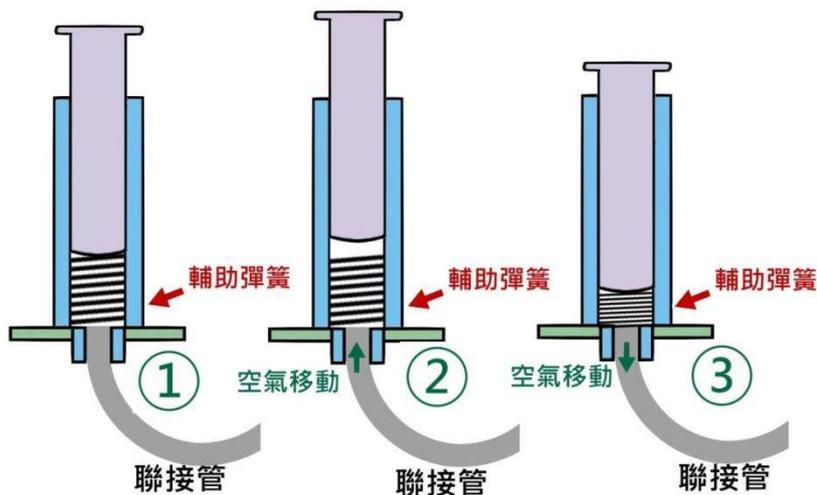


圖25

(圖25)之說明如下：

- <1>、不受外力自然平衡的狀態，活塞並未到達下止點，輔助彈簧支撐活塞質量，並使活塞呈懸浮狀態。
- <2>、活塞到達上止點，輔助彈簧完全伸張。
- <3>、活塞躍過自然平衡到達下止點，輔助彈簧受到壓縮，並儲存部分動能。

因動力模組為自由活塞，故沒有固定的上、下止點，運動行程長短則視聯接管進氣而定。

(四)、 $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎活塞上升的動力，來自於汽缸內熱空氣的膨脹，改為分離式後，空氣膨脹會改為在聯接管內發生，因此會產生下列的問題：

- 1、若聯接管材質太軟容易變形，則熱空氣膨脹的動能就無法傳遞到汽缸推動活塞，若材質太硬，則無法改變動力模組與熱交換模組的相對位置，失去彈性調整安裝方式的優點。
- 2、熱空氣膨脹發生在聯接管靠近熱交換模組端，如(圖26)

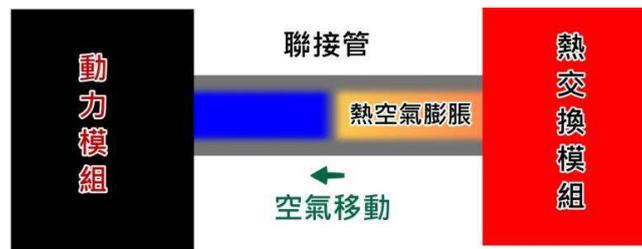


圖26

(圖26) 中聯接管靠近動力模組端常溫的空氣，被膨脹的熱空氣推入動力模組，因而推動活塞，若常溫的空氣越多，則表示慣性阻力越大，因此聯接管不宜太長，但若是太短，則實驗-2中發現的凝結水就會進入動力模組，造成活塞與汽缸的磨擦力劇增，在有關文獻資料中，我們找不到分離式 $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎的研究資料，因此，我們將以實驗結果的經驗值來尋找聯接管的適當長度。

(五)、發動機完成後，我們還需裝上發電裝置才算完整，因本發動機為上下往復運動，故必須使用線性發電裝置，而關於線性發電裝置的相關研究，並不是我們這次研究的重點，所以我們拆解手搖式電筒，取出堪用的零件，組裝成電機模組，如(圖27)、(圖28)

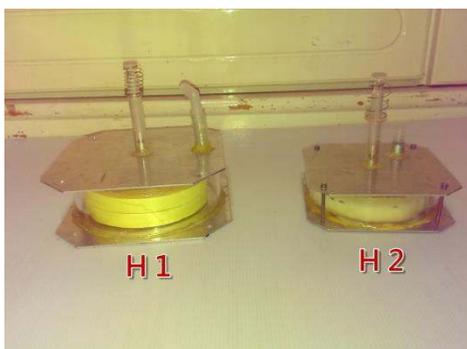


手搖式電筒 (圖27)



電機模組 (圖28)

經過實作程序，我們完成了熱交換模組2台，動力模組3台，如(圖29)、(圖30)



熱交換模組 (圖29)



動力模組 (圖30)

我們加以編號，熱交換模組為H1、H2，動力模組為P1、P2、P3，其規格如（表5）、（表6）

#### 熱交換模組

編號	腔體內徑	中央軸內徑	中央軸行程
H1	170mm	8mm	25mm
H2	140mm	8mm	20mm

（表5）

#### 動力模組

編號	汽缸內徑	活塞懸浮高度	活塞質量
P1	36mm	33mm	92g
P2	27mm	39mm	62g
P3	22mm	38mm	42g

（表6）

經交叉配對後可產生6種組合，我們將以實驗分析其差異，以尋求發動機輸出能量的最大化。

### 九、分離式 $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎的驗證

#### 實驗3-1：輸出能量最大化的實驗：

實驗目的：操作並檢視發動機不同組合輸出的能量。

實驗方法：

- （一）、將動力模組裝設尺規。
- （二）、溫度控制在85~90°C之間，模擬溫泉的溫度。
- （三）、依（表5）、（表6）配對6種組合，每種組合運轉120秒，每10秒記錄 1次活塞位移的高度，活塞位移的高度即為上、下止點行程的長度。
- （四）、將轉數計設定為記次模式，測量每種組合120秒運動次數。
- （五）、分別計算每種組合120秒活塞位移的平均高度，再乘以活塞質量、運動次數，求得每種組合120秒總輸出的能量。



動力模組裝設尺規



模擬溫泉的溫度



活塞位於下止點



活塞位於上止點



轉數計設定為記次模式



測量每種組合120秒運動次數

實驗結果：

(一)、動力模組單次運動輸出的能量=位能= $mgh$ ， $m$ 為活塞質量， $g$ 為重力加速度， $h$ 為活塞位移，如果再乘以120秒內運動總次數即為輸出的總能量。

(二)、實驗的數據如(表8)、(圖32)

配對方法	活塞質量 (單位：kg)	活塞平均位移 (單位：m)	120秒運動次數	輸出的總能量 (單位：焦耳J)
H1- P1	0.092	0.030	458	1.26
H1- P2	0.062	0.037	437	1.01
H1- P3	0.042	0.044	386	0.71
H2- P1	0.092	0.027	454	1.03
H2- P2	0.062	0.030	462	0.85
H2- P3	0.042	0.039	433	0.71

表8

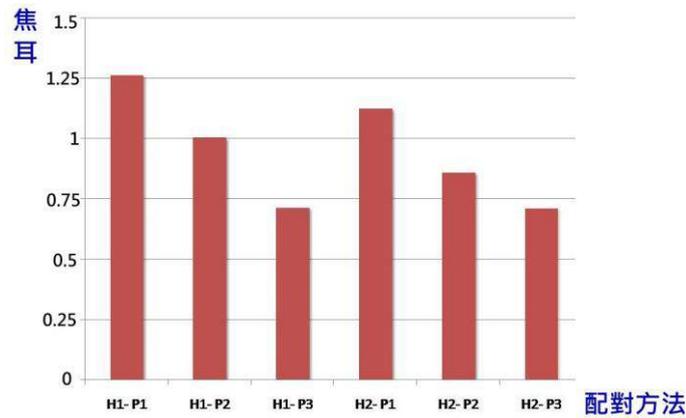


圖32

(三)、動力模組的動力來源，來自於熱交換模組中熱空氣的膨脹，由能量守恆的觀點來看，若熱交換模組相同，則動力模組的動力輸出也應該相同，但是(圖31)的數據中結果並非如此，分析(表6)中的數據，我們得知若熱交換模組相同，活塞質量越小，則平均位移越長，能量的損也越大，另外活塞位移越長，則單位時間內的運動次數越低，這代表活塞質量變小，移動的速度並沒有變快，這似乎與 $F=ma$ 的定律有所衝突，但是觀察活塞的運動，包含往上與往下，當活塞往下運動時，不論質量大小， $a$ 的值恆等於重力加速度，因此加速度不會變快，另外因質量變小，活塞到達下止點時動能也變小，因此，當活塞再次上升時，輔助彈簧的助力也降低，故小質量長行程的活塞，較不利於能量的輸出，將發動機大型化，可有效提高輸出的能量。

### 實驗3-2：分離式 $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎的性能測試

實驗目的：尋找分離式 $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎運作的最低溫度。

實驗方法：比照【實驗1-1】的實驗方法。

實驗結果：1、引擎上部溫度簡稱( $T_L$ )，引擎底部溫度簡稱( $T_H$ )，單位為： $^{\circ}C$ 。

2、紀錄之時間單位為：分鐘

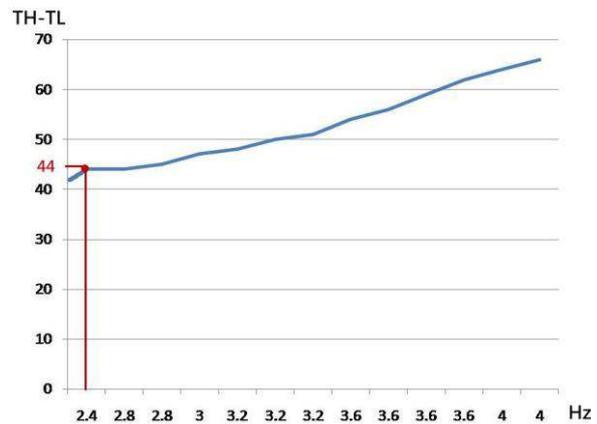
3、引擎運轉測量單位為：振動次數-每秒鐘簡稱(Hz)。

4、引擎運轉測量方法為每次記錄5秒內振動總次數，並將其除以5以求得每秒鐘平均振動次數(Hz)，測量間隔為每分鐘測量一次。

5、紀錄之數據如：(表7)、(圖31)

時間	$T_H - T_L$	Hz	時間	$T_H - T_L$	Hz
1	66	4	8	50	3.2
2	64	4	9	48	3.2
3	62	3.6	10	47	3.0
4	59	3.6	11	45	2.8
5	56	3.6	12	44	2.8
6	54	3.6	13	44	2.4
7	51	3.2	14	43	0

(表7)



(圖31)

(圖31) 中 ( $T_H - T_L$ ) 低於44°C以下，史特林引擎已接近停止轉動，因此，我們得知 ( $T_H - T_L$ ) 臨界值大約在44°C左右，故分離式  $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎加熱面與冷卻面必須要保持44°C以上的溫度差才可有效運轉，且輸出的動能溫度差呈正相關。「淺層地熱」溫度可至90°C左右，依本實驗的結論，「淺層地熱」足以驅動分離式  $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎。

### 實驗3-3：聯接管的實驗：

實驗目的：尋找聯接管適當的長度。

實驗說明：

- (一)、實驗-2中水凝結的現象，是因熱交換模組中熱空氣相對濕度 (Relative humidity) 較低，一但離開熱交換模組進入聯接管後，空氣溫度降低，相對濕度提升，故產生凝結水，因此，研究聯接管適當的長度的關鍵為熱交換模組。
- (二)、依據操作經驗，我們發現凝結現象發生在聯接管近熱交換模組處，如(圖33) 並會延伸一定的長度如(圖34)



圖33



圖34

(三)、由(圖23)我們得知，熱交換模組中熱空氣位於上、下止點之間，經計算後，熱交換模組H1熱空氣體積為 $209\text{cm}^3$ ，熱交換模組H2熱空氣體積為 $138\text{cm}^3$ ，依據操作經驗，我們發現熱交換模組H1凝結現象延伸長度為 $9.5\text{cm}$ ，熱交換模組H2凝結現象延伸長度為 $6.4\text{cm}$ ，聯接管的內徑為 $1.2\text{cm}$ ，因此，我們可推算出熱交換模組H1凝結現象延伸體積為 $56.2\text{cm}^3$ ，熱交換模組H2凝結現象延伸體積為 $38\text{cm}^3$ ，

$$\text{假設：} \quad \frac{\text{凝結現象延伸體積}}{\text{熱空氣體積}} = K$$

故H1的K值 = 0.018    H2的K值 = 0.023    取至小數點後2位並四捨五入，兩者皆為0.02，因此我們可推論聯接管的最小長度為：

$$\frac{\text{凝結現象延伸體積}}{\text{熱空氣體積}} = \frac{\text{聯接管截面積} \times \text{最小長度}}{\text{熱空氣體積}} = 0.02$$

$$\text{故聯接管的最小長度} = \frac{\text{熱空氣體積} \times 0.02}{\text{聯接管截面積}}$$

(四)、由(圖26)聯接管越長則慣性阻力越大，但是在(表7)、(圖31)中，我們又發現不利於能量的輸出還有其他變因，因此，聯接管的最大容許長度無法估算，我們只能說滿足最小長度後，聯接管越短越好。

#### 實驗3-4：電機整合的實驗：

實驗目的：測試分離式 $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎的發電能力。

實驗方法：裝設電機模組，啟動發動機並以電表測量，如(圖35)。



圖35

實驗結果：實測最大值為 $4\text{V}$ 。

我們使用的電機模組是一種線性發電機，影響其發電效能的變因包含：線圈繞線方法、圈數、磁鐵的磁通量等，而模組內尚有2極體、電容器等穩定電流的元件，因這些變因並非本次研究的主題，所以我們並未分析變因，使發電效能極大化，有關線性發電的研究，則待日後另闢專章再行討論。

## 陸、結論：

- 一、在背景資料研究中，我們得知**史特林循環**所作的功會比**卡諾循環**大得多，但是就熱效率而言，**史特林循環**與**卡諾循環**相同，與高溫（ $T_H$ ）和低溫（ $T_L$ ）的熱源有關，兩者溫差越大，效率越高，我們並確定以  $\gamma$  構型史特林引擎為研究主軸。
- 二、在實驗1中，我們得知  $\gamma$  構型史特林引擎加熱面與冷卻面必須要保持**45°C**以上的溫度差才可有效運轉，且輸出的動能溫度差呈正比。
- 三、在淺層地熱發電機的設計中，我們以  $\gamma$  構型史特林引擎為基礎，結合自由活塞的結構，再加上線性發電模組，設計出一台可在溫泉環境中發電的地熱發電機。
- 四、在實驗2中，雖然地熱發電機並未順利運作，但是針對第一代原型機的缺失，故我們著手製作第二代改良型，以證明「淺層地熱發電」的可行性。
- 五、為改善第一代原型機的缺失，我們變更了設計，並將它命名為**分離式  $\gamma$ -自由活塞型史特林引擎**，其主要的特徵為模組化設計，以軟管聯接管熱交換模組與動力模組，我們也發現了一些值得研究的問題，但是在有關文獻資料中，我們找不到相關的研究資料，因此，我們將以實驗結果的經驗值來尋找答案。
- 六、**實驗3-2**中我們操作並檢視發動機不同組合輸出的能量，得知小質量長行程的活塞，較不利於能量的輸出，將發動機大型化，可有效提高輸出的能量。
- 七、**實驗3-3**中我們建立聯接管最小長度的計算方式，**實驗3-3**我們實測發電最大值為**4V**，因線性發電機並非本次研究的主題，所以我們待日後另闢專章再行討論。

## 柒、參考資料：

- 一、金東寒（2009）史特靈發動機技術 中國 哈爾濱工業大學出版社
- 二、周鑑恆（2008）能源之星 -- 史特林引擎 物理雙月刊(卅卷四期) 363 - 376
- 三、曾玉泉（2006）極速引擎的魅力 - 史特靈引擎的介紹 生活科技教育月刊 三十九卷 第五期 116 - 139
- 四、網頁：[http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_Engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_Engine) 檢索時間 2015.01.09
- 五、網頁：[http://www.taipower.com.tw/content/new\\_info/new\\_info-b12.aspx?LinkID=6](http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-b12.aspx?LinkID=6)  
檢索時間 2014.11.23
- 六、南一版-普通高級中學選修物理上冊 台北市 南一書局 1-3/1-4/1-5

## 【評語】 040818

1. 主題針對能源短缺問題與溫度環境。
2. 對 r 行史特林引擎及線性發電模組已做多次測試與改良。
3. 宜有更明確、穩定之結果。