

# 第二十一屆旺宏科學獎

## 創意說明書

參賽編號：SA21-032

作品名稱：離岸風力發電分析

姓名：姚雲龍

關鍵字：數學建模、風力

# 目錄

壹、摘要.....	1
貳、研究動機 .....	1
參、研究目的 .....	1
肆、建構模型 .....	1
<b>STEP ONE.....</b>	<b>1</b>
一、模型建構理念說明：.....	1
二、政府規劃發電裝置容量目標： .....	1
<b>STEP TWO.....</b>	<b>2</b>
一、模型建構理念說明:.....	2
(一) 裝置容量的建置時程:.....	2
(二) 風場架設時程.....	2
二、模型建構:.....	2
(一) 裝置容量的建置時程:前置工作 .....	2
(二) 風場架設時程:建構過程 .....	9
<b>STEP THREE.....</b>	<b>9</b>
一、模型建構理念說明： .....	9
(一) 風險評估.....	10
(二) 可行性評估.....	10
(三) 外部效益評估.....	10
(四) 動態策略規劃.....	10
二、模型建構過程與結果： .....	11
(一) 階段性目標陳述.....	11
(二) 風險評估.....	11
(三) 可行性評估.....	14

(四) 外部效益評估.....	14
(五) 動態策略規劃與最終評估：.....	15
<b>STEP FOUR .....</b>	<b>16</b>
<b>一、建構理論與模型設定:.....</b>	<b>16</b>
(一)超前派:.....	16
(二)穩健派:.....	16
<b>二、建構結果:.....</b>	<b>16</b>
(一)風險評估:.....	16
(二)可行性評估 .....	16
(三)外部效益:.....	17
伍、結論.....	17
陸、討論及應用 .....	18
柒、參考資料 .....	21
附錄、圖表.....	22
附錄、物理公式 .....	38

## 壹、摘要

本研究透過數學模型對台灣離岸風力發電提出了合理的分析與策略規劃。模型分為四個步驟。在首個步驟中分析政府提供資料，得出 2030 年的離岸風力發電目標。在步驟二中，利用建設時間、建設成本和年度預算建立出逆續推理模型，可由 2030 年發電目標回推每年的階段性發電目標。在步驟三中，利用風險評估、可行性評估、外部效益評估三種方式對步驟二所提出的目標做出分析並進行動態策略規劃。而在步驟四中，利用步驟三的方式對台灣現存的穩健派、超前派兩種離岸風力發電派系進行完整分析。

## 貳、研究動機

近年來，隨著綠色能源的重要性逐漸提升，為期十年以上的離岸風力發電計畫在民間漸漸有了支持的聲音，政府也對此有所回應。本研究欲利用政府與具公信力的資料數據為基礎，建立可信、合理的數學模型，對離岸風力發電計畫進行策略規劃，並評估分析其可行性、風險與效益。

## 參、研究目的

- 一、以數學方式表徵台灣政府 2030 年的離岸風電發展目標。
- 二、利用逆續推理建構離岸風電建置策略規劃的模型。
- 三、利用模型探討建置策略規劃中的風險、可行性與效益。
- 四、利用模型分別評估穩健派、超前派策略的風險、可行性與效益。

## 肆、建構模型

在本數學建模中，將此數學建模分為四個步驟，如下：

### STEP ONE

#### 一、模型建構理念說明：

假設目標是 2030 年台灣的離岸風電設備已經 100% 建置完成，並聯供電，且有能力外銷風電設備，預估的發電量數據需以國營事業單位及政府單位公布的為準，預估的風電設備帶動的產值需以政府單位、國營事業或經濟研究單位所預估的為準，排除任何支持者或反對者自行估算的數據。以**任何數學工具表徵這個目標，可以是常數也可以是變數**，但變數必須在政府單位、國營事業或經濟研究單位所預估的差異範圍內。

#### 二、政府規劃發電裝置容量目標：

經濟部工業局的簡報中顯示，在 2021 到 2025 期間，發電容量變化約以二次函數趨勢成長。在 2025 到 2030 年間，政府並未細部規劃，僅提出「一年釋放 1GW」之目標，因此在 2025 年後便以線性趨勢上升。以此評估離岸風電裝置容量在 2030 年時應該達到 10.3061GW，且所有設備為國產，有能力外銷。

(見圖表附錄一):資料來源：經濟部工業局

## STEP TWO

### 一、模型建構理念說明:

本研究中分為兩部分進行推理。包括 10GW 的裝置容量分配時程(意即每年蓋多少裝置，達成多少裝置容量)，和各風場內部的建造時程。

#### (一) 裝置容量的建置時程:

在此部分中，推理步驟如下：

1. 已知 2030 年時裝置容量必須達到 10GW，亦即 2030 年底(以 2031 計算)以前風力發電裝置必須建設完成且順利運轉。
2. 為了使 2030 年底(2031 開始)前裝置裝設完成，已知開始建設一個風場到建設完成需要  $n$  年，則 2031- $n$  年必須開始建設最後一批風場。
3. 已知 2031- $n$  年必須開始建設風場，利用 2031- $n$  年的預算可得知當年所能建置風場之容量。
4. 藉由(3)得知 2030 年當年可收穫的最大容量(假設為  $a$ GW)，則 2029 年結束(2030 開始)之前必須達到  $10-a$ GW。
5. 利用預算計算而得 2030- $n$  年前可建設多少容量，推算 2029 年當年可收穫多少容量，得到 2028 年結束以前需要多少容量，加上 2029 年和 2030 年所得容量後，可在 2031 年到達前湊足 10GW。
6. 重複步驟，反覆往前推算。

#### (二) 風場架設時程

此部分利用逆續推理得出每個風場的各項目建置時程，逆續推理過程如下。

1. 已經預訂在某年開始建設風場：
  - (1) 為了**建設風場**（以風力發電機下部結構等備料作業開始為「建設風場」開始之定義），必定需在建設前進行**工程發包**，而在發包之前必須先進行**招標**。
  - (2) 在進行招標和建設之前，必須先進行**地質鑽探與海域相關調查**。
2. 為了進行建設，必須先進行前置作業：
  - (1) 為了建設，必須進行**基本設計**（包括風機及下部結構、海上變電站、海底電纜、陸上機電設備）。
  - (2) 為了進行設計，需要先完成**風機型號的挑選及採購**。
  - (3) 為了挑選及採購，必須先取得政府的同意，因此要**申請籌設許可**。
  - (4) 為了擁有申請許可的權利，選定的地點必須經過**政府環境評估**。
3. 在建設風機的同時，為了在建設完成後能夠順利並網供電，必須在建設的同時**發展陸上機電站，海底電纜與海上變電站**。
  - (1) 為了**安裝**以上設施，必須進行**採購跟製作**。
  - (2) 為了採購與製作正確的設施，需要進行**細部設計及審查**。
  - (3) 為了能如期進行細部設計與審查，必須先將**工程發包**。
  - (4) 為了發包給各工程單位，則必須進行**招標**，在此之前要先**編擬招標文件**。

### 二、模型建構:

#### (一) 裝置容量的建置時程:前置工作

本研究中，在進行逆序推理時必須先得知在「風機順利運轉」的多少年前必

須「開始建設風機」，因此需要知道風場的「建造時間」，再利用「開始建設風機」當年的「預算」計算出每次能建設多少裝置容量的風機，而預算與裝置容量之間的關係受到建造「成本」的影響。因此，在前置工作中必須先得知風機的建造所需時間，建造當年的預算與建造風機的成本，才能進行模型建構。

另外，在本研究中，我們以「開始進行『風力發電機下部結構等備料作業』」作為開始「建設風場」之定義。

### (1) 建設時間：

我們使用 tracker 從參考資料的流程圖中找出建造風機每次所需時間約為 3 年又一季 (Q)，也就是 3.25 年。

### (2) 建設成本：

此部分中我們首先藉由台灣風力發電潛力場址的資料，得知每個風場的面積、離岸距離、風速。接著考慮了運輸成本和購買風機數量對於每台風機成本的影響以及各個風場所能排列的風機數量，得到每個風場所能裝設裝置容量及成本。藉此選擇風場並計算最終總成本。

以下為我們在此部分模型中所假設的因素：

一次蓋的台數(台)	n
離岸最近距離(km)	d
c 一台風機購買後運輸一公里所需總金額(新台幣)	164193337
$\alpha$ (常數，由參考資料分析而得)	0.005
$\beta$ (常數，由參考資料分析而得)	0.001

### ↑圖表附錄二:運輸成本和購買風機數量對於每台風機成本的影響

並製作其成本與數量圖型(見圖表附錄三)

已知每台風機所需成本與風機數量之關係會呈圖表附錄三呈現的趨勢。因此我們假設購買 n 台風機時，購買一台風機並運輸一公里的成本(新台幣)為：

$$f(n) = c \times e^{-\alpha n}$$

故購買 n 台風機時，購買風機並運輸一公里的成本(新台幣)為：

$$g(n) = n \times f(n) = n \times c \times e^{-\alpha n}$$

運輸成本與運輸距離之關係(見圖表附錄四)

我們令運輸成本為：

$$t(d) = d(1 - \beta d)$$

結合運輸成本和購買風機並運輸一公里的成本兩式，可得：

$$\begin{aligned} & \text{購買}n\text{台風機並運輸}d\text{公里成本}cost \\ & = g(n) \times t(d) = n \times c \times e^{-\alpha n} \times d(1 - \beta d) \end{aligned}$$

### (3) 選擇風場

本研究中，以台電離岸風電報告中 8MW 之風機為樣本，其參數討論如下表：

(見圖表附錄五)

此部分中我們將先討論風能通過風機後的衰減情形，利用其結果決定風機排列之間距。得知排列間距後便可得各潛力場址所能裝設之裝置容量。利用的結

果可得每個風場中每單位裝置容量(MW)所需成本，利用其選擇最佳風場。

### i 風能通過風機後的衰減情形

首先我們需要知道一台風機的發電效率，以下推導假設風機能全部接受風能，對氣流沒有任何阻力。而空氣流是連續的，不可壓縮的，葉片上的氣流是均勻的，氣流速度的方向不論在葉片前或流經葉片後都垂直葉片。我們設定參數如下表：

切入風速	$v_i(\text{m/s})$
切出風速	$v_f(\text{m/s})$
葉片截面積	$A(\text{km}^2)$
空氣密度	$\rho(\text{kg/m}^3)$

↑圖表附錄六:渴求風機上的風能、風質量、轉換效率等相關因素

接著，推導風能通過一個風機後所剩餘的能量：  
在葉片處單位時間通過之風質量為：

$$\Rightarrow \rho A \frac{v_i + v_f}{2} \quad (2.2.3.1)$$

為是理想風機，能量並無散失，損失的動能(J)會等於轉換的電能(J)，其關係：

$$P = \frac{dK}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (v_i^2 - v_f^2) = \frac{1}{4} \rho A (v_i^2 - v_f^2) (v_i + v_f) \quad (2.2.3.2)$$

又風能的公式為：

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_i^3 (\text{J}) \quad (2.2.3.3)$$

由貝茲定律可得知其轉換效率

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_f}{v_i} \right)^2 \right] \left( 1 + \frac{v_f}{v_i} \right) \leq 59\% \quad (2.2.3.4)$$

再根據科研院的數據顯示其轉換風能效率為 30~50%，取 40% 為中位數帶入 (2.2.3.4)

故轉換效率可表示為且現今的一台風機效率約為 40%：

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_f}{v_i} \right)^2 \right] \left( 1 + \frac{v_f}{v_i} \right) = 0.4 \quad (2.2.3.5)$$

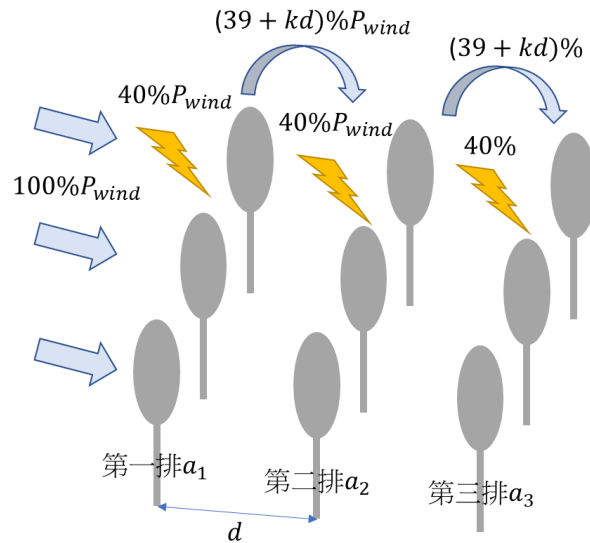
另外，由 (2.3.3.5) 可解得  $v_f$  和  $v_i$  之比值，同時可推算風能通過一個風機剩餘的風能：

$$\begin{aligned} \frac{v_f}{v_i} &= 0.734, \text{ 將其帶入 (2.2.3.3)} \\ \Rightarrow \frac{P_{\text{final\_wind}}}{P_{\text{initial\_wind}}} &= \left( \frac{v_f}{v_i} \right)^3 = 39\% \end{aligned} \quad (2.2.3.6)$$

此結果將應用在風機排列策略上。

## ii 風機排列

為了簡化模型，我們將風機排列設定如下圖：



↑圖表附錄七:此為風機排列其風能轉換效率與距離相關示意圖

在此排列狀態中，風能會被風機前方的風機吸收約 40% 並消耗至原本的 39%，但是若風機間有適當的間隔距離  $d$ (km)，因為原本的會有一增益項  $(kd)\%$  補充消耗之能量(J)，其數學表徵如下：

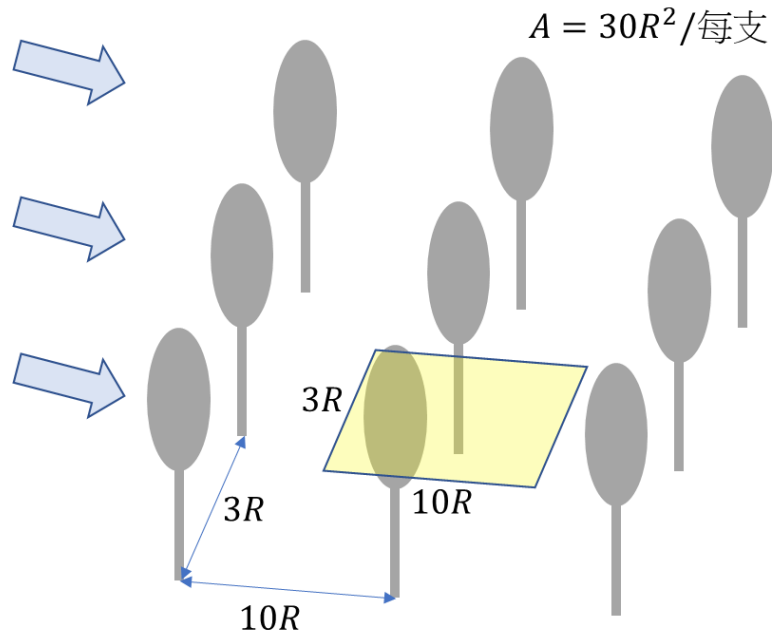
$$\begin{aligned}
 \text{第一排所吸收之能量 } a_1 &= 100\%P_{wind} \times 40\% \\
 \text{第二排所吸收之能量 } a_2 &= 100\%P_{wind} \times (39 + kd)\% \times 40\% \\
 \text{第三排所吸收之能量 } a_3 &= 100\%P_{wind} \times (39 + kd)\% \times (39 + kd)\% \times 40\% \\
 \text{第 } n \text{ 排所吸收之能量 } a_n &= 100\%P_{wind} \times [(39 + kd)\%]^{n-1} \times 40\% \\
 \Rightarrow a_1 &= 100\%P_{wind} \times 40\% \Rightarrow a_n = a_{n-1} \times (39 + kd)\%, n \in N \quad (2.2.3.7)
 \end{aligned}$$

為使風機接收效能最大化，兩排風機間距  $d$ (km) 是一個重要因素。由台灣離岸風力發電第二期計畫可行性研究中，我們利用其中數據分析出  $k$  值之參考：當風機間距為 10 倍葉片半徑，風速會因氣壓差回升至原速，由 (2.2.3.4) 得：

$$k = 36.5 \frac{1}{km}$$

故在本研究中設定兩風機間距為 1.67km，藉由其他報告指出並排風機之間的距離應為三倍葉片半徑，在本研究中為 0.501km，排列方法如下圖：





↑圖表附錄八:此為避免風機搶風的情況，探討距離和風機面積

由此部分可得知：

每支風機所需面積  $A$  為  $30R^2 = 0.836km^2$ 。

由們選用的 SG 8.0-167DD 的額定功率為 8MW，可得知一隻風機，在同一秒的時間的發電功率，帶入 (2.3.3.3) 可以推知欲達 8MW 最少需要的風速為(空氣密度為  $1.225kg/m^3$ )：

$$P = P_0 \times 40\% = \frac{1}{2} \rho A v_i^3 \times 40\% \geq 8 \times 10^6$$

$$v_i \geq 3.392m/s \quad (2.2.3.8)$$

以此速度為標準，我們首先篩選掉平均風速不達此速率的風場

### iii 篩選風場：

利用 i、i i 點所述方法，我們先排除風速不足以驅動風機的風場，並得出每個風場所裝設之裝置容量。接著利用點所述方法得出每台風機在任一風場所需之成本。利用計算每單位裝置容量 (MW) 所需之成本比值進行排序，以每單位裝置容量成本最低風場為佳。下表為本研究參考台灣潛力場址基本條件所計算得到之各風場篩選條件表格：(見圖表附錄九)

由以上條件判斷，我們選擇一到九名的風場進行建設，其總裝置容量可達約 10GW。

### iv 最終成本計算：

由上述方法可得成本如下：(見圖表附十)

可知最終成本約為一兆一千零八十億左右。

### (4)預算：

在此部分中我們假設每年獲得的金錢相同，但考慮到科技革新所造成的成本下降，每年所得金錢的等效價值會有所升高。

### i 考慮科技革新

我們利用求出回歸直線-判定係數( $R^2$  值為 0.997)的方式取得科技革新對於發電成本的下降的影響：每年成本會下降第一年成本的 1.8%。也就是每年金錢的實際等效價值為：

$$\text{真實所獲金額} \times \text{等效價值比值} = \text{實際等效價值}$$

(見圖表附錄十一)

二者都為隨時間造成每年成本下降之比值與每年同等金錢等效價值之比值。在本模型中將金錢等效價值之比值視為成本下降比值的倒數。

### ii 計算每年所得之等效價值預算

如下表十二：

總成本(總預算)：1,108,192,085,796 (元)		
年份	權重	分配預算(等價價值) 單位：億
2021	1.00	1496.2
2022	1.02	1526.1
2023	1.04	1556.0
2024	1.06	1585.9
2025	1.08	1615.8
2026	1.10	1645.8
2027	1.12	1675.7
2028	由(1)已知最後一組場建設須於 2027 年第四季開始，故 2028 年(含)以後皆不需建設新模組，故不分派預算。	
2029		
2030		
*註：每年實際分配金額為 149,618,095,655 元		

↑圖表附錄十二:成本年份表我們藉由建設成本所得之總成本，將之分配於每年，分配權重依據每年等效價值之比值。

### iii 建構過程與結果：

利用建模理念中所提及之逆續推理方法進行規劃。首先以下為所設定之參數：

x	年份(2021~2030)， *註:2021.00 為 2021 年第一季，2021.25 為第二季，以此類推。
c	建設風場所需時間(3.25 年)
b(n)	各個風場所需之成本，n 為第 n 名的風場，建造順序為第一名到第九名。
e(n)	各個風場所能收獲的裝置容量，n 為第 n 名的風場。
A(x)	當年能夠新增加的容量(GW)
B(x)	當年底前必須累積的容量(GW)
C(x)	為達成 (A) 而必須開始建設之年分
D(x)	當年預算(億元)
E(x)	預算所能建設之裝置容量(GW)

↑圖表附錄十三:數學建模的各式條件因素，如所需時間及容量金額等等。

模型推理如下：

(1) 得知 x 年年底前必須累積之裝置容量

$$B(x) = A(x) + B(x - 1)$$

已知 x 年年底以前必須累積到 B(x) 的裝置容量，因此必須較去年所必須累積的裝置容量 B(x-1) 新增 A(x) 的容量。

(2) 先得知 x 年時所能增加的容量需在何時開始興建：

$$C(x) = (x + 1) - c = x - 2.25$$

(3) 得知興建當年 (C(x)) 的預算(對照前置工作中的表格)：

$$D(C(x)) = D(x - 2.25)$$

(4) 得知 x-2.25 年能夠興建的風場 n：

$$D(x - 2.25) = b(n) + b(n - 1) + \dots$$

此步驟中假設會將預算全部花光在風場建設，因此在建設第 n 名的封場後若有餘錢，會假設在 x-3 年(當年的第一季)投資在 n-1 名的風場上，使得前一年可以有更多錢投資。舉例如下：

2027 年預算為 1496.2 億台幣，建設 n=9 名風場，所花費為 b(9)=901 億元，因此剩下經費 769 億，因此在 2027 年第一季將其投入 n=8 名風場。由於第八名風場 b(8)=1252 億元，因此在 2026 年第四季要投錢進入 n=8 名風場時只需要投入 b(8)-769 億元，並可以將多餘的錢投入更多其他風場，以此類推。

(5) 得知 x 年所能新增之容量：

$$E(x - 2.5) = e(n) + e(n - 1) \dots = A(x)$$

藉由知道能建造的風場 n，則能對照前置工作中的表格得知第 n 名風場所能收獲的發電容量，將所有建造風場中之裝置容量 e(n) 相加即可得 x-2.5 年時建造的裝置容量 E(x-2.5)，而其於 x 年年底時便能順利運轉，因此 x 年時能新增之容量 A(x) 可由此方法求出。

較需注意的是，當風場的建造並不是於 x-2.5 年時「開始」建造(如(3)中舉例的第八名風場)，而只有投資建造開始之後之工程，則該風場之裝置容量應歸算在前一年+2.25 年。

(6) 推理 x-1 年結束(x 年開始)前必須累積的裝置容量：

$$B(x - 1) = B(x) - A(x)$$

利用已知的 B(x) 和 A(x)，可以得出為了使 A(x)+B(x-1)=B(x)，B(x-1) 需要為多少。

(7) 重複(1)~(6)，直到 B(x)=0，也就是不需要在當年累積發電容量為止。

經由以上步驟，可得以下圖表十四：

年分 x	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
	當年能夠新增加的容量 (GW)	當年底前必須累積的容量 (GW)	為達成 (A) 而必須開始建設之年分	當年預算 (億元)	預算所能建設之裝置容量 (GW)
2030	0.54	10.00	2027 第四季	-	-
2029	1.12	9.46	2026 第四季	-	-
2028	2.32	8.34	2025 第四季	-	-
2027	1.17	6.02	2024 第四季	1496.2	0.54
2026	1.16	4.85	2023 第四季	1525.2	1.12
2025	1.21	3.69	2022 第四季	1554.1	2.32

2024	2.49	2.49	2021 第四季	1583.1	1.17
2023	0	0	-	1612.1	1.16
2022	0	0	-	1641.1	1.21
2021	0	0	-	1670.1	2.49

↑圖表附錄十四:此為將各種因素計算出來的結果，為了搭配後續的評估分析。以及(見圖表附錄圖十五)、(見圖表附錄十六)

## (二) 風場架設時程:建構過程

### (1) 逆續推理

由於建設風場的同時必須同時發展併網電路，建設風場和發展電網要同時進行，我們此部分分為兩部分來進行推理：

### (2) 建設風場

#### i 建設風場之離岸工程：

- (i) 若要建設風場完成，則必須完成風機的組裝與安裝。
- (ii) 若要完成組裝及安裝，則必須進行風機下部結構施工工程。
- (iii) 若要完成施工工程，則必須完成備料等前置作業

#### ii 前置作業：

在進行離岸工程之前，必須先完成前置作業：

- (i) 若要進行施工工程，則必須完成工程發包，才能有公司承包施工。
- (ii) 若要成功發包，則必須完成招標文件的編擬和結構細部設計。
- (iii) 若要進行設計及估價，則必須完成地質鑽探與海域相關調查。
- (iv) 若要進行調查等先遣作業，則必須完成基本設計，並且選定風機形式及採購，才能根據需求調查
- (v) 若要完成基本設計並選定峰積極採購，則必須先申請籌設許可。
- (vi) 若要申請許可，則該海域必須先通過環評審查。

### (3) 發展電網

- (i) 若要完成電網的發展，則必須完成設備的施工設置。
- (ii) 若要完成其施工工程，則必須完成細部設計及審查。
- (iii) 若要完成其審查，則必須先將工程發包。
- (iv) 若要將工程發包，則必須編擬招標文件。

### (4) 各工程所需時間

根據參考資料中的流程圖，我們分析得到各個工程所需要花的時間：

(見圖表附錄十七)

但由於許多工程能夠同時進行，也不會完全連續進行工程，因此各階段所費時間並不完全如上表疊加。經過對資料的分析，得到各階段施工所需時間為：

(見圖表附錄十八)

### (5) 建構結果

經由上述逆續推理與時間計算，可得下頁的時程安排甘特圖。

(見圖表附錄十九)

## STEP THREE

### 一、模型建構理念說明：

動態策略規劃是一種應付變化的策略規劃方式，故在本研究中先進行對於各階段目標的風險、可行性和效益評估，得知在達成目標的過程中將遭遇之「變化」，再由評估結果調整策略。

### (一) 風險評估

#### 1. 經濟環境變動所造成之風險：

在此部分，本建模考慮每年的物價上漲率、美金匯率(因資料來源顯示建設風場所費成本一部份以新台幣、一部分以美金進行交易)、借款利率之變化，以此近作為「經濟環境之變動」。接著利用敏感性分析討論物價上漲率、美金匯率、借款利率、估算誤差討論 $\pm 20\%$ 對成本的影響，做出變動金額的機率分布圖。

利用變動金額的機率分布圖，可以得知最有可能的經濟環境變動所造成之金額，藉由此變動金額量值判斷風險是否能夠吸收承擔。

#### 2. 自然環境造成之風險

本建模利用各項自然環境可能影響因素之發生可能性，藉由探討分析自然觀察所得之資訊以及各項事件之再現周期等數據，判斷自然環境所造成之風險；其中包括：雷擊、鳥類衝撞、極限風速，評估所造成之影響。

### (二) 可行性評估

可行性研究(feasibility study)為一檢驗系統，決定一個計畫是否值得被進一步投資處理。在本研究中分為四項探討：

1. 操作可行性：判斷專案在完成後是否能被有效利用。

2. 技術可行性：開發、購買、安裝，或運轉所需的技術資源。

本研究將達成目標之技術可行性納入考量。我們認為此可行性與科技革新程度呈正相關。因此，參考第二步所述及之「因科技革新而受影響之每單位裝置容量所費成本變化」，作為可行性的基準。

3. 經濟可行性：指專案的預計效益與成本之間的關係。

經濟可行性指出預計效益與成本之間之關聯，因此本研究利用「益本比」之模型探討其經濟可能性。

在此部分「效益」包括「容量效益」及「能源效益」，其價值以最新替代火力計畫(燃氣複循環機組)之建廠成本估計。容量效益是指可穩定之發電量所代表的經濟價值，能源效益則指尖峰和離峰時波動的電所代表的經濟價值。

### (三) 外部效益評估

外部效益包括帶動產值、就業效果、勞動報酬效果和綠能效果。其中綠能效果以減碳所減少的外部成本做為標準。在本建模中將利用台電、經濟部等國家網站提供之資料將其轉換為等效新台幣進行量化評估。

### (四) 動態策略規劃

進行動態規劃時，我們將針對下一小節(三、模型建構過程與結果之(一)階段性目標陳述)中的每梯次目標進行上述三大方向的評估，並結合 step two 中的逆續推理結果，依據評估結果調整有問題的目標並進行動態策略的年度排程。

其中因每個風場的建設又皆分為三個階段(第一階段為前置工作、第二階段為建設電網離岸工程、第三階段為建設電網)，本建模只將第二、三階段定義為的「建造離岸風電」，故預算安排由 2021 年(第一名風場開始第二階段製造)開始，對於益本比(經濟可行性)的評估也由此開始。針對第一階段的作業，因

其多為文書、探勘等作業，因此不探討益本比（文書、探勘成本難以估算，也無法產生直接利益）。

## 二、模型建構過程與結果：

### （一）階段性目標陳述

此部分將同一年份開始規劃建造之風場視為同一個梯次，每梯次裝置容量目標已由先前的逆續推理得出，如下表所示：（見圖表附錄表二十）

因風場內部建造第一階段多為探勘、文書審查等步驟，故在後續探討益本比等評估時以第二、三階段為主。

### （二）風險評估

#### 1. 經濟環境變動所造成之風險

首先，參數設定如下表：

物價上漲率	0.67%
美金匯率	29.44
借款利率	1.75%
年份	x

↑圖表附錄二十一：考慮到環境及時間的影響，將這些因素納入

各個風場所需投入成本如下表（建設年分依前述定義，由第二階段建造工程開始計算）：（見圖表附錄二十二）

接著利用以下公式計算考慮不同因素時的總成本（每次計算一個因素）：

#### （1）考慮物價上漲率：

$$\text{總成本} = \Sigma \text{單一風機價錢} \times (1 + \text{物價上漲率})^{x-2021}$$

#### （2）考慮美金匯率：

參考台電離岸風電第二期報告 8MW 方案，其中有一部分資金是美金，其餘是台幣，可得出總成本。

$$\text{總成本} = \text{台幣部分} + \text{美金部分} \times \text{美金匯率}$$

#### （3）考慮借款利率：

本策略採用分 10 年付款按複利計算，且每年還錢的數目皆一樣。

$$\text{借錢經過十年之成本} = \Sigma \text{單一風機價錢} \times (1 + \text{借款利率})^{10}$$

$$\text{每年還}c\text{元經過}10\text{年生利息後之價格} = \frac{c((1 + \text{借款利率})^{10} - 1)}{(1 - \text{借款利率}) - 1}$$

兩者應相等，因此：

$$\Sigma \text{單一風機價錢} \times (1 + \text{借款利率})^{10} = \frac{c((1 + \text{借款利率})^{10} - 1)}{(1 - \text{借款利率}) - 1}$$

可得還 10 年每年還 c 元之值。

#### （4）敏感性分析：

利用敏感性分析討論物價上漲率、美金匯率、借款利率、估算誤差討論 ±20% 對花費價格的影響。參數如下：

花費價格				
	較小值-20%	中庸值 0%	較大值 20%	敏感指數
物價上漲率	112.40	112.82	113.21	0.017
美金匯率	104.60	110.82	117.04	0.281
借款	124.87	128.66	132.58	0.152
估算誤差	88.66	110.82	132.98	1

↑見圖表附錄二十三:考慮到時間金錢變動性等問題，設置相關參數

計算敏感指數計算方法如下：

$$\text{敏感指數} = \frac{(\text{花費價格較大值} - \text{花費價格中庸值})}{\text{花費價格中庸值} \times 20\%}$$

可得下表：(見圖表附錄二十四)

附註:權重算法=該因素敏感指數/∑各個敏感指數

知道權重後，我們可以做進一步的分析，去算需要付出金額和機率的關係，算法如下：

$$f(x) = \sum \text{權重} \times \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \text{花費價格之中庸值})^2}{2\sigma^2}}$$

$$\sigma = \frac{(\text{較大值} - \text{較小值})}{3}$$

可得以下變動機率分布圖：

↓見圖表附錄二十五:(橫軸：千萬元 縱軸：機率)

由圖表附錄二十五看出，經濟環境造成之變動金額約 1.1 億元時機率最高，為每年預算的千分之一以下，故經濟環境造成之風險經評估為可承受之風險。

## 2. 自然環境造成之風險

### (1) 雷擊

離岸風力發電機遭遇雷擊的風險可以用此式表示

$$Nd = Ng \times Ad \times Cd \times 10^{-6}$$

其中，Nd 為風力發電機組直接遭到雷擊年平均次數；Ng 為年平均落雷密度；Ad 為直接雷擊風力發電機組等效收集面積；Cd 為環境因素，設平坦地型=1，山區地型=2。

離岸風力場若直接雷擊風力發電機組，等效收集面積 Ad 取 3 倍風力發電機組高度 h 計算，即

$$Ad = \pi \times (3h)^2 = 9\pi h^2$$

若在平坦地形中其 Cd=1，則遭雷擊年平均次數可簡化如下：

$$Nd = Ng \times 9\pi h^2 \times 10^{-6}$$

其中，h：風力發電機組高度(含葉片，單位：公尺)。若採風力機組含葉片高度約 100 公尺估算，每台風力發電機組直接遭到雷擊機率約為 1.98~4.80%。

台電公司目前於台灣地區完成一套雷擊對地閃絡觀測系統(Total Lightning Detection System, TLDS)及 LLS 監測台灣地區落雷資訊，包括落雷發生時間、

經緯度、雷峰值電流及雷極性等，下圖為「年平均落雷密度圖」，本離岸風場區域年平均落雷密度約為 0.17~0.07 次/平方公里。故可得知，不論是以理論值估算抑或以近年中台灣實際紀錄，風力發電機因雷擊事故而被破壞的機率都極低。若發生雷擊事故，破壞的機體數量也不至於劇烈影響總發電量。

(見圖表附錄二十六)

### (2) 鳥類

目前本計畫離岸風場區域海上調查所記錄到海鳥大多貼近海面飛行，且觀測高度紀錄顯示均在距海平面 5 公尺至 20 公尺間，其中大洋性鳥類數量相對較少，其飛行高度約在 10~20 公尺間，至於燕鷗類則相對較多，其飛行高度相對較低，約在 5~10 公尺間，而本計畫擬採用之風機，其葉片旋轉下緣高度為距離海平面以上 28 公尺。依上述，以鳥類飛行高度低於葉片旋轉下緣高度的海平面 28 公尺，再加上其具有主動迴避行為，據此判斷大部分鳥類即使進入運作中的離岸風場，其受到風機撞擊致死的危險性應該不高。

(見圖表附錄二十七)

### (3) 極限風速

臺灣的天氣型態多數在颱風行經臺灣時會出現強風速，因此將利用歷史颱風侵臺時刻時期的風速資料進行臺灣地區重現期達 50 年的極限風速的推估，推估方法同樣參考了 WASP 的推估方法，用以推估臺灣未來即將架設離岸風力發電機的位置的極限風速值，以了解該位置需要承受的耐風等級，而此推估結果將可作為未來離岸風電開發業者一個重要的參考數據。

目前國外在架設離岸風力發電機的業者用於評估風場時所使用的評估軟體，它的推估方程為：

$$U_T = \alpha \ln T + \beta$$

係數的計算方式為：

$$\alpha = (2b_1 - \underline{U}^{max})/2 \ln$$

$$\beta = \underline{U}^{max} - \alpha \gamma_E$$

$$\gamma_E \approx 0.577215665$$

$$b_1 = (1/n) \times \sum_{i=1}^n [(i-1) \times U_i^{max}] / (n-1)$$

$$\underline{U}^{max} = U_n^{max}$$

其中各項參數為：

$U_i^{max}$	年度風速最大值
$\underline{U}^{max}$	年度風速平均( $U_n^{max} Mean$ )
n	年數
$\alpha$	尺度係數
$\beta$	位置係數
$U_T$	風速
T	重現期(年)
$\gamma_E$	0.577215665

↑圖表附錄二十八:推估極限風速的各項數據參數

而不同高度(z 公尺)的風速  $V_z$  可根據冪次公式(Power Law)計算：



$$\frac{V_z}{V_{10}} = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha ; \text{其中 } \alpha \text{ 為尺度常數 } 0.12。$$

### (三) 可行性評估

1. **操作可行性**：由於每個步驟皆是由逆續推理而來，皆有關建必要性，因此操作可行性通過考量。
2. **技術可行性**：在本研究中在逆續推理階段即將科技革新納入考量而編列等校性預算，故已具有此方面之可行性和動態性。
3. **經濟可行性**：

在此部分我們利用「益本比」探討此計畫的經濟可行性。益本比算法為：

$$\text{益本比} = \frac{\text{一年發電所產出之效益}(k)}{\text{總投資成本}(k)}$$

其中總投資成本為使當年度所有風機順利運行發電所需投資之成本，可被表示為：

$$\text{總投資成本} = \text{借款利息} + \text{折舊} + \text{稅捐} + \text{運維費}$$

各項資料如下表：

項目	計算方式
借款利息	歷年累加總投資費用 × 利率
折舊	歷年累加總投資費用 × 折舊率
稅捐	年總發電量 × 稅率
運維費	為一常數

#### ↑ 圖表附錄二十九：總投資成本算法

而一年發電所產出之效益包括能量效益與容量效益，計算方式如下，下列之常數項為參考火力燃氣廠之資料以及能源局發電裝置容量及發電量所得：

$$\text{容量效益} = \frac{\text{淨尖峰能力}(MW) \times 3160.58(\text{元}/\text{千瓦})}{1000(\text{千瓦})}$$

$$\text{能量效益} = \text{年發電量}(kWh) \times 2.235(\text{元}/\text{度}) \times 1000(\text{千瓦})$$

另外，根據台電的定義，淨尖峰能力為理論發電能力的 85%。利用以上方法，我們可相加得各梯次完成時當年度之總效益並計算得累計益本比如下表：

(見圖表附錄三十)

其中第一階段多為調查、探勘、文書工作等，因難以表現其直接效益和成本，故在建模中沒有進行評估。另外需注意因每次挪用的預算包括維護已完成結構的費用，故益本比為各階段完工後當年度及過去加總的效益和成本之本質。

(見圖表附錄三十一)表現了以年度為單位計算累加的益本比，因完全建設完時才会有收益，故益本比從 2025 年起才大於零。此分析結果顯示此計畫之經濟效益評估結果較低(相較於火力發電)，因其發電成本仍高於燃氣複循環之發電成本。但因圖中只顯示到 2030，機組剛開始運作，往後風力發電機組僅需維護成本跟稅捐，又可產出與 2030 同等效益的電力，故益本比(也如附錄圖十四所表現)會有上揚的趨勢，判斷在日後會逐漸開始獲利，具有經濟可行性。

### (四) 外部效益評估

(見圖表附錄三十二)顯示每百萬投資在離岸風電上所能獲得的效益(資料來

源：經濟部網站)：

由附錄表十九所得之資料，得知每在離岸風電中投入一百萬元，則可以獲得四百二十一萬元的產值、創造零點六九個工作機會，並創造五十九萬的勞動報酬成果。因此，利用計算「10GW 裝置容量離岸風電裝置所需投入之成本」，可以得出其所創造出的附加價值：

$$\text{產值效果(百萬元)} = \text{投入成本(百萬元)} \times 4.21$$

$$\text{就業效果(人)} = \text{投入成本(百萬元)} \times 0.69$$

$$\text{勞動報酬效果(百萬)} = \text{投入成本(百萬元)} \times 0.51$$

另外，對於每種污染物，參考美國學者將各污染物量化為金錢成本，下表即是參考學者之數據所撰：

	懸浮微粒	氮氧化物	非甲烷碳氫化合物	一氧化碳	二氧化碳
都市	3.9595157	0.656826	0.656826	0.000476	0.367442
郊區	0.1657216	0.008762	0.008762	0.003429	0.000381

單位:元/克

#### ↑圖表附錄三十三:污染物量量化之成本

可得每克二氧化碳所代表之成本。藉由台電的資料(見下表)可知風力發電 1490 百萬度則能省七百九十八千公噸之二氧化碳排放量。利用上述資料則可得離岸風電之減碳效益。

每發電量 (百萬度)	節能			減碳	
	燃油 (千公秉)	燃煤 (千公噸)	燃氣 (千公噸)	減排量 (千公噸)	造林效益 (千公頃)
1490	372	551	246	798	71

#### ↑圖表附錄三十四:發電量與綠能價值的相關效益

$$= \frac{\text{發電量(百萬度)}}{1490(\text{百萬度})} \times 7.98 \times 10^{11}(\text{克}) \times \text{每克二氧化碳價值} 0.000381(\text{元})$$

綜合上述，可得離岸風電外部附加價值如下表：(見圖表附錄三十五)

#### (五) 動態策略規劃與最終評估：

在此部分，我們將(一)中所進行的階段性目標結合(二)~(四)中的各項評估，進行動態策略規劃。在此動態規劃中，我們以時間順序(每年)作為區分，並針

對每年的策略進行評估。其中 2015 為(二)中所指的「第一梯次」中的風場建設第一階段開始時間，2016 為(二)中所指的「第二梯次」中風場的第一階段開始時間……以此類推，由於第一階段(前置工作)為文書及探勘工作，根據本建模的定義，不算在「建設」，真正的建設在 2021 的第一梯次第二階段開始時開始。(見圖表附錄三十六)

## STEP FOUR

### 一、建構理論與模型設定:

針對網上超前派與穩健派的各自主張，重複 STEP THREE 之建模方法，分別對其目標進行策略評估，如：可行性、風險、效益，雖然引用各自主張的策略，但電量、設備等產值，仍以政府、國營企業及相關國內外企業公告數值為依據。對兩派的設定如下：

#### (一)超前派:

1. 目標定為政府公佈之 2030 年完成之 10GW 風機容量
2. 躉購費率均為 5.7 元
3. 風機型號統一為 Siemens Gamesa SG 8.0-167DD8MW
4. 策略為於 2021 年 Q1(計畫開始)時,已完成目標風機(1250 台 SG8.0-167DD 8MW)
5. 為與穩健派比較,於 2030 年計算 2030 年(含)以前之效益

#### (二)穩健派:

參考本研究中由逆續推理所得之策略

### 二、建構結果:

#### (一)風險評估:

##### 1. 經濟變動所造成之風險:

在此部分,本建模考慮每年的物價上漲率、美金匯率(因資料來源顯示建設風場所費成本一部份以新台幣,一部分以美金進行交易)、借款利率之變化,以此作為「經濟環境之變動」。接著利用敏感性分析討論物價上漲率、美金匯率,借款利率、估算誤差討論 $\pm 20\%$ 對成本的影響,做出變動金額的機率分布圖。利用變動金額的機率分布圖,可以得知最有可能的經濟環境變動所造成之金額,藉由此變動金額量值判斷風險是否能夠吸收承擔。(同 STEP THREE 中所使用的方法)

(見圖表附錄三十七)為穩健派變動金額機率分布圖，橫軸:變動金額(千萬元)縱軸:(機率):

(見圖表附錄三十八)為超前派變動金額機率分布圖，橫軸:變動金額(千萬元)縱軸:(機率):

由此可知穩健派與超前派所會遭遇的最有可能經濟環境變動風險金額皆為 1-1.3 億左右,皆在可以吸收承擔的範圍。

##### 2. 自然風險:

由步驟三已知各項風險對於離岸風電之影響皆微乎其微。故對兩派主張幾乎無影響。

#### (二)可行性評估

### 1.基本比

(見圖表附錄三十九)為兩派逐年累計動態益本比(橫軸:年分 縱軸:比值):

上圖為兩者之逐年益本比比較,由上圖可看出,超前派原先因迅速建置風機 並開始運轉,及時獲得利潤而擁有較高的益本比,但因折舊、維運費等問題,益本比反而逐年下降。相反的,穩健派一邊發電一邊建置新的風電設施益本比有逐年上升的趨勢,故評估穩健派在此經濟可行性評估項目上優於超前派。

### 2. 還款可行性

(見圖表附錄四十)為兩派之逐年還款總額比(橫軸:年分 縱軸:新台幣):

在本模型中設定單台風機之還錢時間均為其借款後 10 年付清,利率為 1.75%,超前派的策略為一次借所有所需之金額,並利用複利的方式逐年還款穩健派則分析該年建造多少支用機,並藉此計算出該年須償還多少債務。由上圖可知雖然穩健派整體債務較多,但每年需還款項少於超前派。在還款可行性上超前派與穩健派各有利弊。

### 3.現值因子

(見圖表附錄四十一)為兩派之現值因子(橫軸:年分 縱軸:現值風機台數):

現值因子代表物品,經歷每期利率折現後,相當於當下的多少價值,也就是現值。考慮風提的折舊率和運維指數,並參考政府於 2018 的計畫,利用現值因子的評估,考慮風機於逐年的現值因子,並考慮全部風機的當下價值。由上圖可看出超前派於 2030 前價值較高,當 2030 以後則是穩健派較高。故以長遠角度,此項目中穩健派的經濟可行性較高。

### (三)外部效益:

(見圖表附錄四十二)為兩派之外部效益價值(橫軸:年分 縱軸:效益(百萬元))

在外部效益部分,本建模考慮風機逐年帶來的外部效益變化,其中包含產值效果、勞動報酬效果和綠能效果,計算方式與 STEP THREE 相同。由上圖可看出超前派因為較早開始發電,較早擁有發電減碳的外部效益,故一開始的外部效益較穩健派高,但在穩健派完成建設後兩者相同。

## 伍、結論

### 一、STEP ONE

根據 STEP ONE 可得知,台灣在 2021 到 2025 期間,裝置容量變化約以二次函數趨勢成長。在 2025 到 2030 年間,政府並未細部規劃,僅提出「一年多釋放 1GW」之目標,因此在 2025 年後便以線性趨勢上升。以此評估離岸風電裝置容量在 2030 年時應該達到 10.3061GW,且所有設備為國產,有能力外銷。

### 二、STEP TWO

根據 STEP TWO，想達到 STOP ONE 的 2030 年 10GW 發電目標所需的裝置容量時程我們考慮了時間、成本及預算等因素做出建模，得到最適合的風場，並選出的最佳風場 1-9 名以便達成 10GW 的發電目標，並得出各風場的建造所需時間，並由建造風場的成本推算每年的分配預算，最後將各風場的建造所需時間拆成三階段作成時程甘特圖，其目的為更好了解風場建設時間。

### 三、STEP THREE

根據 STEP THREE，從 2021 到 2030 年逆續推倒的過程中，探討每個階段的目標裝置容量，並由風險評估、可行性評估及外部效益評估以及動態策略規劃評估，四種方式統整每個目標。由本研究提出的模型有部分可承擔風險，而且具有相當的可行性，雖在現階段經濟評估上益本比較低，但有極大的外部效益。

### 四、STEP FOUR

根據 STEP FOUR 根據風險評估、可行性評估以及外部效益等三種方式分析。由風險評估可發現二者的變動風險皆在 1~1.3 億左右，兩者在風險評估層面皆不會有太大的優劣之分。由可行性評估中的益本比及現值因子，可以發現超前派在短時間有高的益本比和現值因子，隨後根據時間會因維修等費用逐漸下降，而當時間拉長時，穩健派的效益比則會逐漸上升，因此在時間長遠的情況下是穩健派優超前派。由外部效益可以得知超前派和穩健派的外部效益雖然在 2030 年皆相同，但由於超前派提前發電因此擁有減碳的外部效益，以整體 2021~2030 年來說，超前派是勝於穩健派。

## 陸、討論及應用

### (一)提高風能發電效率

依照工研院的轉換效率為 30~50% 的風能轉換成電能，在現金風電轉換過程必會有尾流效應，為了提高發電效率，是否改變其風機排列距離以及改變其風機的角度，有助於轉換效率的提升？

#### i. 尾流轉向:

在風速為中等風速的前提下，可以增加風場年平均風速的發電量約 7~13%，而在低等風速的情況下轉換效率甚至高達 47%，並將夜間所選定的風可變性降低 72%。有助於改善風電廠的穩定性並降低成本和提高效率。他的做法主要是調整風機和葉片的角度，使尾流具有偏移效應，不會干擾到後方順風的渦輪機，雖然減少正向風向該有的產量，但也有效減少了尾流所帶來的發電損失。

而這項技術還可配合不同風速設定模型預測控制 (Model predictive control) 這個系統，該控制系統透過軸向誘導係數 (induction factors) 和偏航誤差控制 (yaw misalignment)，風力渦輪機的功率產生是其偏航偏差角以及上游渦輪機的偏航偏差的函數，表示尾流偏轉。我們開發了一種分析公式來預測風力渦輪機發電量與大氣條件和迎風渦輪機的偏航偏差決策的函數關係。透過的提升線模型捕獲尾流轉向。而尾流轉向的幅度和風速和風向是互相垂直的函數，最後以此函數模型來驗證結果。

## ii.風機排列:

當風機規模越大且以集群形式排列時，例如我在 step 2 中所使用的九宮格風機排列模型，它們的性能會相互影響，並且相對於風機被廣泛分離時的能量還要來的少。因此為了避免降低其轉換效率，我認為應該考慮到空間及時間的相關因素，在空間方面我們必須回到最原始的貝茲極限的轉換效率出發，除了切入風速以外，風能否持續，當一部分的能量被風機吸收轉換成電能之後，空氣的動能能否適時獲得補充，也是需要考慮的重要因素。動能的補充有兩個來源，一個來自於水平方向上氣壓梯度所產生的空氣流動，另外一個則來自垂直方向上風速梯度造成向下傳遞的動能。可以想見，對於大範圍的風場而言，其發電能力將會受到向下傳遞動能補充速率的限制，而這個上限可以透過一個功率密度的指標來量化，當數值越高，代表單位面積的理論發電能力越強。因此我認為要考慮的參數有：壓力梯度利以及地轉參數，有人為此作了一個相關的模型，通過使用天氣和研究預測模型運行一組理想化的大氣模擬來描述對這些空間和時間尺度的控制最終找出最適合的風機相隔距離，最後透過功率密度及風電尾流判斷其價值效益。

## (二)擴大風場面積、尺度

目前雖有許多陸上以及近岸地區的風場投入運作，但這些區域的風速受限於地表和空氣之間的摩擦力，發電能力也跟著遭到限制，隨著風力發電的發展，科學家開始將目光投向廣闊的海洋。數據指出，在中緯度地區開放海域的平均風速要比陸地上的風速高出七成，高風速雖然標誌著豐沛的風力能源，但我們仍須以我在上述風機排列所講到的風能是否可持續受到補充做為參考，才能判斷是否為良好的風場。

在北半球中，大西洋的中緯度地區可能正潛藏著龐大風力，有科學家們便以這個區域為主體進行研究。首先以大西洋中緯度地區作為海上風場的代表，另外以美國中部堪薩斯州作為陸域風場的代表，在風機密度相同的假設下，比較相同面積大小的區域下，這兩個不同地理位置風場的理論發電表現。研究結果顯示，無論是功率密度或者是總發電量，大洋中的風場都有較好的數值，在最佳的情況下，其功率密度甚至可以達到陸域風場的三倍之多，這個數據顯示大西洋中緯度區域的確擁有豐富且可持續的風力資源。

然而當人們像要往外擴張風場時必須要考慮下列幾點因素：季節風電、儲能運輸至電網、海水溫度、環境改變，因此勢必要仔細思考。

## (三)建模完善

我認為我這項建模缺少了容量係數這項可以發電設備的穩定性，平均年度容量因數越高越穩定可以作為對當地天氣條件與發電評估的重要指標。計算方式：設備全年總發電量 ÷ (裝置容量 × 全年時數)，此係數可以讓我更有效地看出天氣、氣候條件對發電狀況之影響。網上我所翻閱的資料顯示風力發電的容量因數季節差異較大，例如 2019 年容量因數最低的月份是 6 月為 13%，但在 11 月，其容量因數可達 50%，若將陸域及離岸風力發電分開計算，離岸風電的容量因數在冬季將達 70% 以上，冬天其發電容量因數的占比我認為是由於在冬

季其高壓梯度，因此大於夏天的發電量。雖然政府規定若離岸風電滿發時數達4200小時，政府會啟動成本迴避機制，降低躉購費率，而滿發4200小時換算成年平均容量因數約為48%，但我仍認為判斷每個季節的發電量以及考慮維修保養等，更可以達到高效的產能，並可考慮我所提及的效益成本問題，使之更為完善。

依照目前科技革新以及目前的所提倡的碳中和、零碳排、甚至負碳排的情況下，台灣目前雖仍以火力為主要發電，但再生能源的發展趨勢勢必會逐漸增加占比。2020年，風能佔全球發電量的6.1%，隨著更多可再生能源被用於限制二氧化碳排放和隨之而來的全球平均氣溫升高，預計這一數字將大幅增長。在一些能源轉型情景下，到2050年，風能將提供超過三分之一的全球能源需求，這表明未來風電場的規模可能會遠遠超出當前的安裝規模。因此雖然政府當前仍以每年增加1GW為目標，但我相信隨著時間的發展政府的開發容量會逐年升高占比，可能1.5GW、2GW甚至更高，但此模型仍是可推估其變化成本效益。

#### (四)安裝方式以及台灣現況展望

目前台灣的離岸風電皆採用固定式基座的風機，也就是每一支風機的水下基礎都是透過打樁固定在海床上，不僅水深受到限制，選址多設置在距岸不遠的海域，也衍生出與航道、漁業的衝突。而打樁產生的噪音，更是讓台灣西部鯨豚類產生威脅；眼看大規模的離岸風電開發即將展開，不少環保團體沉重呼籲，綠色能源不該成為扼殺海洋生態的兇手。

而現今有兩種大方向安裝方式，一種為固定式(深至50公尺)另一種則為浮動式(深至50~200公尺)，最大差異是在於水下基座安裝方式一個固定在海床，另一個則是利用拋錨原理放於海床在透過纜線連接。另外水深高度也決定其成本，因此若我們想要擴大我們的風場，以便獲取去更多資源那麼浮動式式一個好選擇而現今的困難處有：

##### i. 成本問題

浮式風機成本現階段仍較固定式風機昂貴，還有技術和後勤的挑戰待克服，仍需創新的技術突破，才有機會再往深海發展。浮式風機的部件都設計為可移動式，而移動產生的磨損將限縮他們的壽命，尤其是繫纜、電纜等部件，可能受金屬疲勞、腐蝕、衝力和惡劣海象影響，特別容易故障。

##### ii. 技術問題

台灣大學工程科學及海洋工程學系教授馬開東指出，目前常見的浮動平台之中，以「半潛式」技術最為成熟，無疑是最適合台灣設置的浮動式平台。然而，馬開東指出，台灣儘管造船工業很強，自主打造浮台沒有太大問題，但國內欠缺繫泊與錨定相關的海洋工程產業，可說是「零經驗」。除了缺少工程經驗，硬體設備也有不足之處。目前全球第一座浮動式位於英格蘭，也才在2017年才運轉，案例稀少和成本、技術仍在摸索，因此台灣目前仍採取固定式。目前經濟部能源局，正詢問業者的意願，才展開第三階段的浮動式範案。

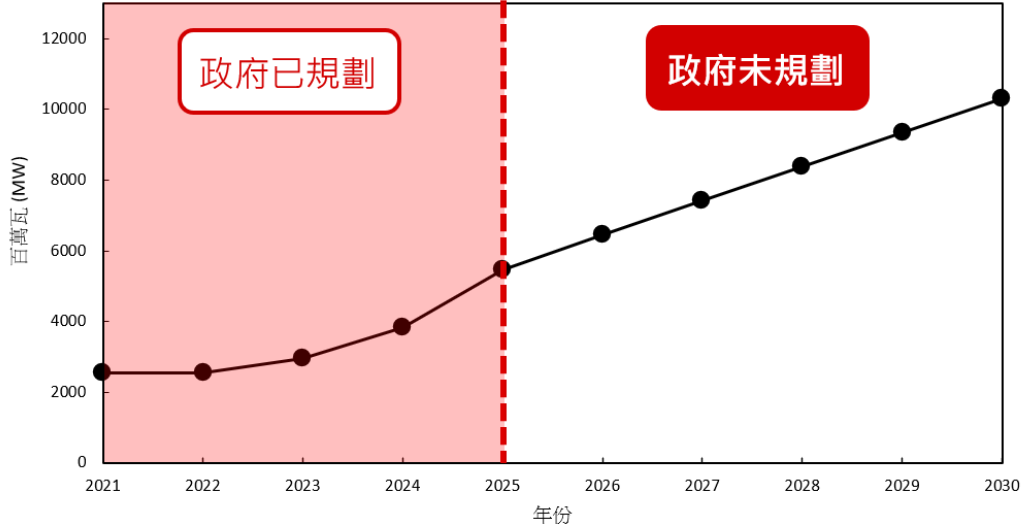
## 柒、參考資料

1. [離岸風力發電第二期計畫 可行性研究](#) (1)2-104、7-63 雷擊機率及圖形
  - (2).燃氣複循環發電機組成本數據參考 105 年大潭電廠增建燃氣複循環機組發電計畫規劃值。
  - (3).天然氣價格上漲率依據 105 年 12 月本公司燃料處提供 105~134 年長期燃料價格預測值。
  - (4).繳交再生能源基金數據係依據經濟部公告 106 年度電業及自用發電設備設置者繳交再生能源發展基金費率。
2. [極限風速參考:臺灣網格化極限風速推估](#)
3. [再生能源之相關成本分析](#) 201611291709
4. [The Cost of Wind Energy](#)
5. 附件一：潛力場址劃設排除範圍 - 經濟部能源局
6. [備用容量之說明](#)(台電)
7. [離岸風電潛力島 從他國經驗探討臺灣離岸風電發展空間](#)
8. [國內離岸風電發展與進程](#) <https://www.cimme.org.tw/images/Publications/3-seminar/107/107-seminar-3-compressed.pdf>
9. [風力發電 4 年推動計畫](#)(經濟部能源局)
10. [拜訪丹麥、瑞典 ECA 同業洽談離岸風力發電發展及風險探討報告](#)
11. [研究報告下載-運輸經濟-理論與實務](#) - 交通部運輸研究所
12. [2017 年全球離岸發電容量](#)
13. [6 Global-cumulative-Offshore-Wind-capacity-in-2017 - Renewable Energy and Environmental Sustainability in India](#)
14. [機率統計入門](#)
15. [臺灣能源期刊第 1 卷第 2 期 離岸風電技術的策略群組與技術發展動向之研究](#)
16. [Download the CRMF 2016 Evidence log - Cost Reduction ...](#)
17. [風能評估技術應用與發展現況](#)
18. [台灣風場風能評估方法分析](#) 新能源施工處
19. [第六章 經濟效益評估](#)(新竹縣政府)
20. [全球風力發電技術研發趨勢](#)-工研院
21. [使用 WindFarmer 模擬風場](#)
22. [用\(Total Lightning Detection System, TLDS\)及 LLS 落雷觀測系統推算落雷平均密度 P. 62](#) <https://hdl.handle.net/11296/6hwftv>
23. [https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2103875118#sec-4](#)
24. [Wind farm power optimization through wake steering | PNAS](#)
25. [Modelling yawed wind turbine wakes: a lifting line approach | Journal of Fluid Mechanics | Cambridge Core](#)
26. [Steering wind power in a new direction | Stanford News](#)
27. [Fine particulate matter damages and value added in the US economy | PNAS](#)
28. [Climate change and health costs of air emissions from biofuels and gasoline | PNAS](#)
29. [離岸風電區塊開發招商容量每年提高至 1.5GW 導入產業關聯彈性機制](#)
30. [風擅長用基本公式@ blog](#)
31. [貝茲定律\(Betz' Law\)--風力發電機的效率極限](#)
32. [透過尾流轉向技術，讓風機彼此「攜手合作」提高整體風場發電量| TechNews](#)
33. [台灣海峽的綠金寶藏能否成真](#) <https://event.gvm.com.tw/windpower/>

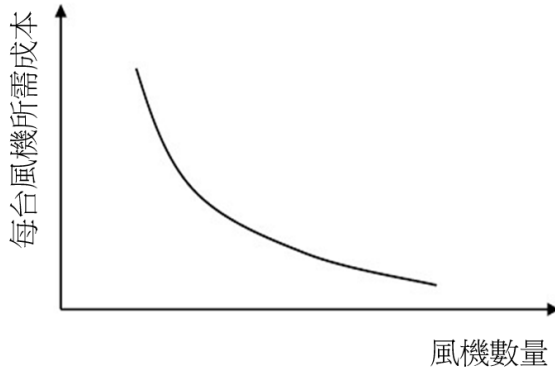


## 附錄、圖表

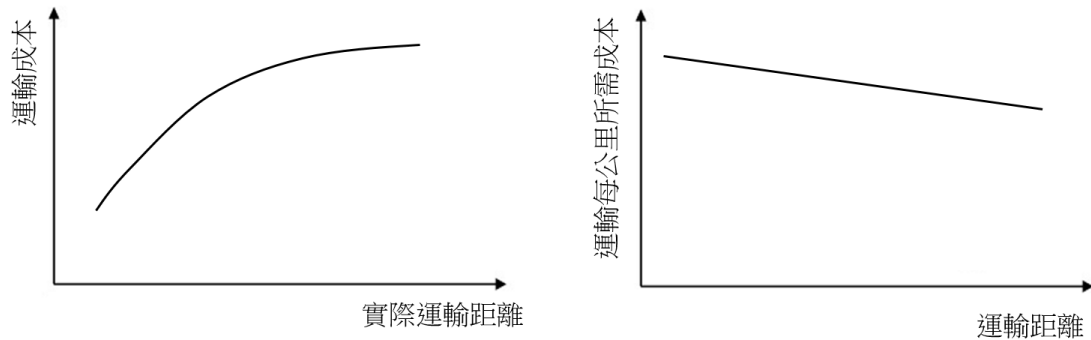
1.(圖表一):此為政府發電裝置容量目標，隨時間成長之圖形



2.(圖表三):此為風機數量與每台風機成本關係圖，成本遞減隨時間逐漸減少之函數



3.(圖表四):左邊為一個部分二次函數開口向下的成本距離關係圖，而右邊的圖形則是將左圖與圖表三相乘再乘以風機數量所得的成本與距離圖形



4.(圖表五):為了控制模型的穩定性，以方便討論，以 8MW 風機為樣本

型號	SG 8.0-167DD
額定功率	8MW
設計風區等級	Ib/S
葉片半徑	167m

5.(圖表九):將台灣電力淺力場址的風場舉出，並計算其風機數量、裝置容量以及所需成本等

排名	名稱	面積 (平方公里)	平均風速 (公尺)	離岸最近 距離 (公里)	風機 數量	裝置容 量(MW)	所需成 本(億)
第一名	彰化縣 1_8	131.1	8.7	50.3	157	1255	1286
第二名	彰化縣 1_3	128.6	8.8	62.1	154	1231	1264
第三名	彰化縣 1_6	126.3	8.8	50.1	151	1209	1275
第四名	彰化縣 1_1	120.7	8.9	49.9	144	1155	1260
第五名	彰化縣 1_9	122.5	8.6	36.8	147	1172	1283
第六名	彰化縣 1_2	122	8.8	35.1	146	1167	1281
第七名	彰化縣 1_7	120.4	8.7	35.7	144	1152	1278
第八名	彰化縣 1_4	117.4	8.8	48.5	140	1123	1254
第九名	彰化縣 5	118.6	8.3	5.7	142	1135	1312
第十名	雲林縣 1_1	117.8	8	3.7	141	1127	1305
第十一名	彰化縣 1_5	111.8	8.8	34.7	134	1070	1251
第十二名	彰化縣 3_2	112.6	8.6	20.3	135	1078	1272
第十三名	台中市 2	112.5	8.7	15.7	135	1077	1278
第十四名	雲林縣 1_2	114.3	7.9	4.3	137	1094	1299
第十五名	彰化縣 3_1	109.7	8.7	19.3	131	1050	1263
第十六名	彰化縣 2_2	100.5	8.5	37	120	962	1200
第十七名	彰化縣 6_2	98.3	8.1	14.2	118	941	1217
第十八名	彰化縣 4_2	93.3	8.3	21.8	112	893	1181
第十九名	彰化縣 6_1	92.7	8.2	14.1	111	887	1187
第二十名	雲林縣 1_3	93.2	7.7	8.2	111	892	1197
第二十一名	彰化縣 3_4	88.6	8.5	23.3	106	848	1152
第二十二名	彰化縣 6_3	89.9	7.9	7.5	108	860	1179
第二十三名	彰化縣 2_1	85.2	8.7	34.8	102	815	1117
第二十四名	彰化縣 4_1	86.2	8.4	24.8	103	825	1135
第二十五名	彰化縣 3_3	86.7	8.6	21.5	104	830	1142
第二十六名	桃園市	50.2	8	0.2	60	480	841
第二十七名	台中市 1	36.8	8.2	3.8	44	352	665
第二十八名	苗栗縣 1	34.7	8.4	4.7	42	332	635
第二十九名	新竹市	31.6	8.3	2.2	38	302	590

第三十名	新北市	26.2	7.9	1.1	31	251	506
第三十一名	新竹縣	22.2	8	0.4	27	212	439
第三十二名	苗栗縣 2	20.8	8.3	1.6	25	199	415
第三十三名	台南市	57.3	6.6	0.7	69	548	919
第三十四名	高雄市 1	38.8	5.5	0.2	46	371	696
第三十五名	高雄市 2	32.5	5.3	1.8	39	311	604
第三十六名	屏東縣	32.5	4	0.5	39	311	605

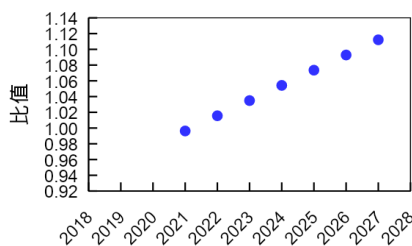
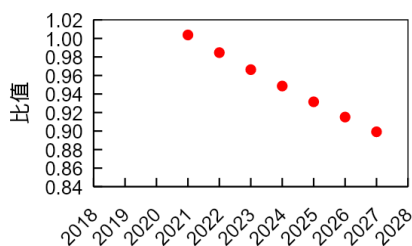
6.(圖表十):為達到此原訂 10GW 之目標，將所需裝置容量搭配風場計算所需成本

排名	名稱	面積(平方公里)	平均風速(公尺)	離岸最近距離(公里)	台數	裝置容量(MW)	所需成本(億)
第一名	彰化縣 1_8	131.1	8.7	50.3	157	1255	1286
第二名	彰化縣 1_3	128.6	8.8	62.1	154	1231	1264
第三名	彰化縣 1_6	126.3	8.8	50.1	151	1209	1275
第四名	彰化縣 1_1	120.7	8.9	49.9	144	1155	1260
第五名	彰化縣 1_9	122.5	8.6	36.8	147	1172	1283
第六名	彰化縣 1_2	122	8.8	35.1	146	1167	1281
第七名	彰化縣 1_7	120.4	8.7	35.7	144	1152	1278
第八名	彰化縣 1_4	117.4	8.8	48.5	140	1123	1252
第九名	彰化縣 5	118.6	8.3	5.7	67	536	901
總和					1250	10000	11082

7.(圖表十一):計算其預算，將時間與成本和金錢效益做出相關關係圖形。

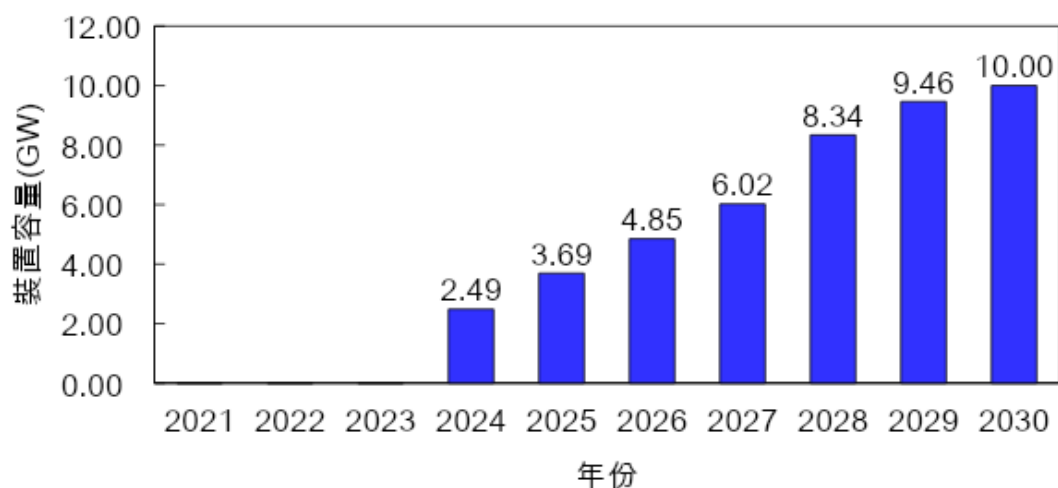
每年成本下降比值

每年同等金錢的等效價值之比值

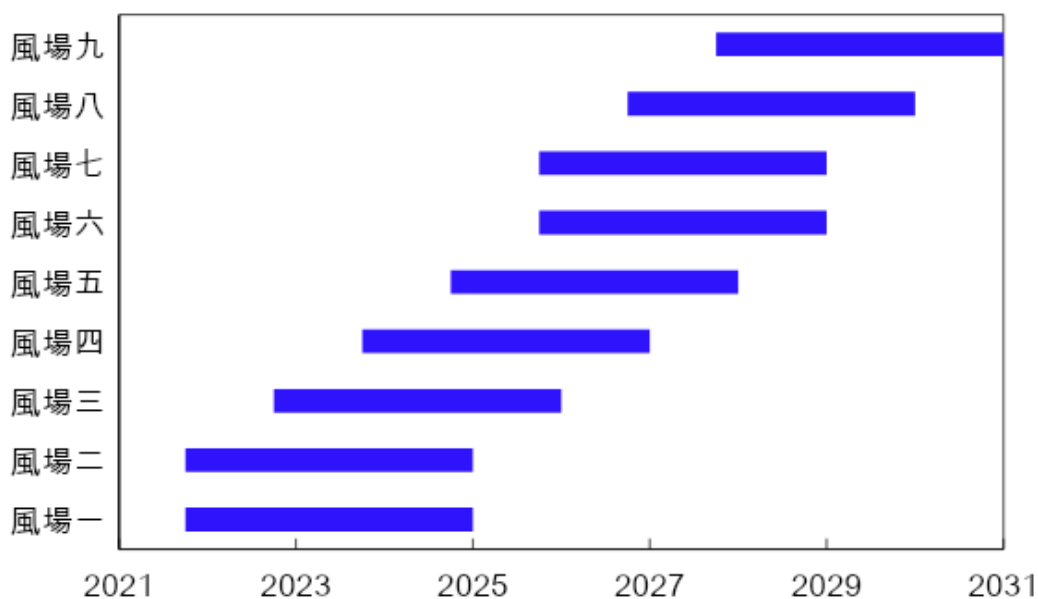


8.(圖表十五):此為每年的裝置容量與時間成長關係圖

每年累積容量



9.(圖表十六):由上述模型逆續推導公式，計算各個風場的建設排程時間  
逆續推理所得之離岸風場建設排程甘特圖



10.(圖表十七):根據上述流程圖介紹，將其分析探討各個工程所需時間

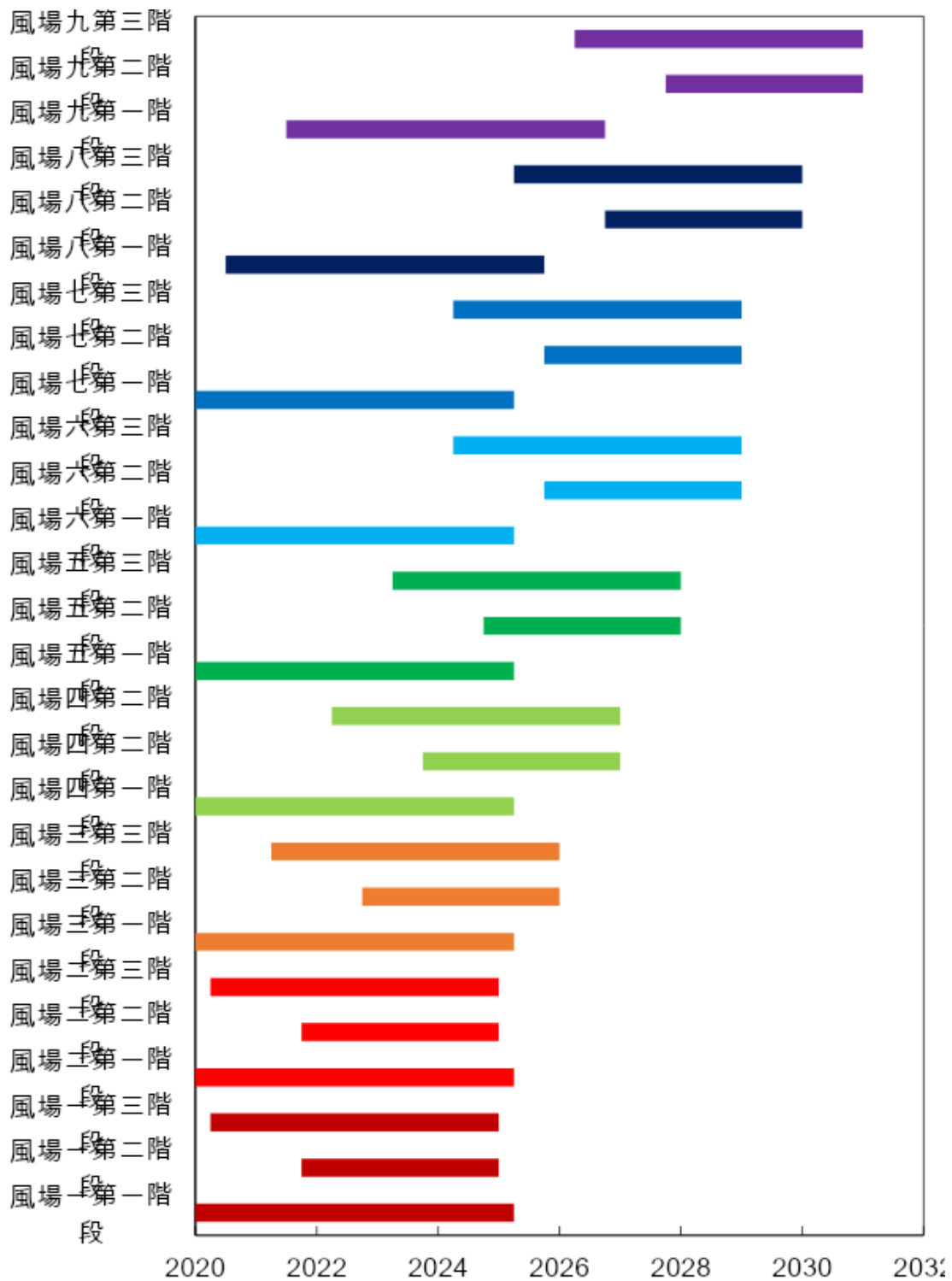
階段		工程項目	所需時間 (年)	
建設風場	前置作業	環評審查	1	
		申請籌設許可	1.5	
		風機形式選定及採購	0.5	
		基本設計	風機下部結構	0.5
			海上變電站	0.5
			海底電纜	0.5

		路上機電設備	0.5
		地質鑽探與海域相關調查	0.5
		風機下部結構細部設計及招標文件編擬	1.5
		工程發包(風機下部結構)	0.25
	建設風場 離岸工程	風機下部結構備料等前置作業	0.75
		風機下部結構製造	2
		風機下部結構施工一	0.5
		風機下部結構施工二	0.25
發展電網	建設電網	風機預先組裝及安裝	0.75
		海上變電站招標文件編擬	0.5
		海纜招標文件編擬	0.75
		路上機電設備招標文件編擬	0.5
		海上變電站統包工程發包	0.25
		海纜統包工程發包	0.25
		路上機電設備統包工程發包	0.25
		海纜細部設計及審查	1
		輸出海纜佈設施工	0.5
		陣列海纜佈設施工	0.25
		路上機電設備統包工程細部設計及審查	1
		路上機電設備統包工程施工	1.5
		海上變電站細部設計及審查	0.75
海上變電站採購、製造及安裝	2.25		

11.(圖表十八):由於許多工作可以同時進行,也可能會有中斷,因此各階段並非如上疊加,此為台電和經濟部以及離岸風電各計畫資料,得出數據

前置作業(第一階段)	5.25 年
離岸工程(第二階段) *即為(一)中的建造階段與時間	3.25 年
建設電網(第三階段) *與第一、第二階段同時進行	4.75 年

12.(圖表十九):經由上述模型推理的公式,推算其時程甘特圖。



18.(圖表二十):將圖表 15、16 以及 19 整理所得其執行時間與目標發電

建設梯次	建設風場	執行時間	目標(GW)	
第一梯次	第一名風場 第二名風場	第一階段	2015 第二季~ 2020 第三季	2.49
		第二階段	2021 第三季~	

			2024 第四季	
		第三階段	2020 第一季~ 2024 第四季	
第二梯次	第三名風場	第一階段	2016 第二季~ 2021 第三季	1.21
		第二階段	2022 第三季~ 2025 第四季	
		第三階段	2021 第一季~ 2025 第四季	
第三梯次	第四名風場	第一階段	2017 第二季~ 2022 第三季	1.16
		第二階段	2023 第三季~ 2026 第四季	
		第三階段	2022 第一季~ 2026 第四季	
第四梯次	第五名風場	第一階段	2018 第二季~ 2023 第三季	1.17
		第二階段	2024 第三季~ 2027 第四季	
		第三階段	2023 第一季~ 2027 第四季	
第五梯次	第六名風場 第七名風場	第一階段	2019 第二季~ 2024 第三季	2.32
		第二階段	2025 第三季~ 2028 第四季	
		第三階段	2024 第一季~ 2028 第四季	
第六梯次	第八名風場	第一階段	2020 第二季~ 2025 第三季	1.12
		第二階段	2026 第三季~ 2029 第四季	
		第三階段	2025 第一季~ 2029 第四季	
第七梯次	第九名風場	第一階段	2021 第二季~ 2026 第三季	0.54
		第二階段	2027 第三季~ 2030 第四季	
		第三階段	2026 第一季~ 2030 第四季	

20.(圖表二十二):依照建設年份從第二階段開始計算其所需成本

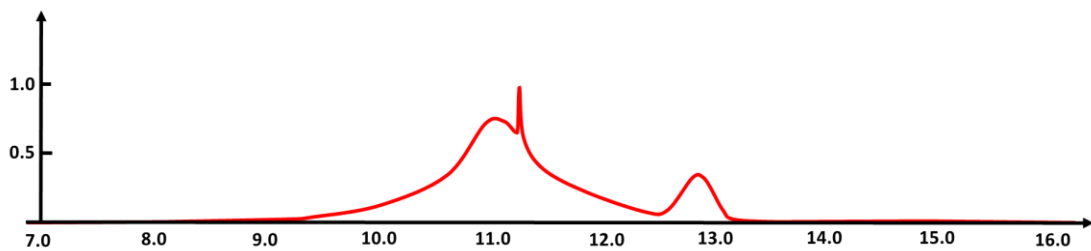
建設年分	風場名稱	所需成本(億)
2021	彰化縣 1_8	1286

2021	彰化縣 1_3	1264
2022	彰化縣 1_6	1275
2023	彰化縣 1_1	1260
2024	彰化縣 1_9	1283
2025	彰化縣 1_2	1283
2025	彰化縣 1_7	1278
2026	彰化縣 1_4	1252
2027	彰化縣 5	901

21.(圖二十四):將圖表 23 以及敏感指數公式帶入所求權重

	敏感指數	權重
物價上漲率	0.0174257	0.012016
美金匯率	0.2807229	0.193568
借款	0.1521094	0.104884
估算誤差	1	0.689532

22.(圖二十五):依照金錢與機率函數，求出其變動機率圖形，探討可承受風險



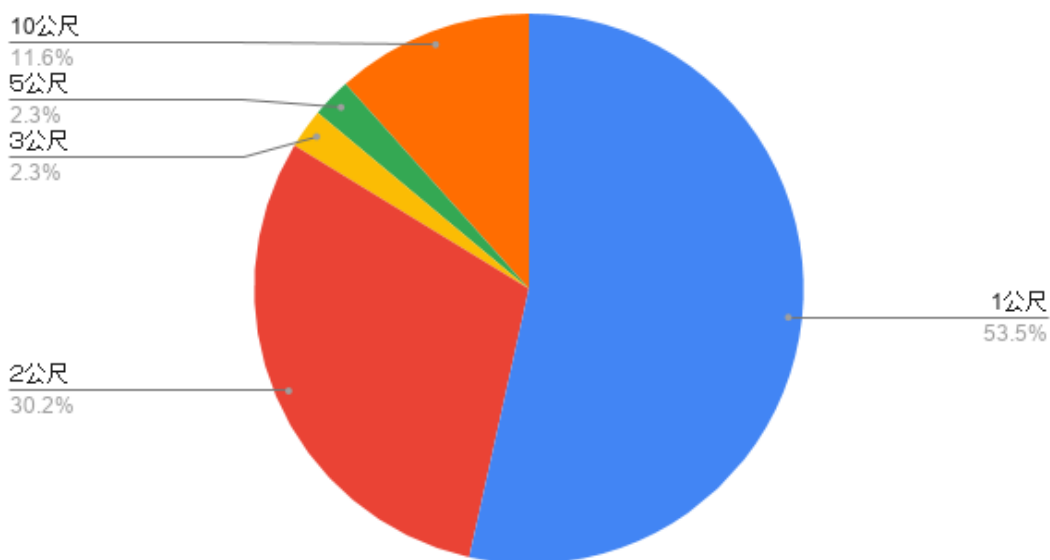
23.(圖表二十六):用 TLDS、LLS 資訊，分析離岸發電風場最多的中部是否因雷擊影響

0.26	0.13	0.15	0.08	0.12	0.11	0.09	0.07	0.06	0.14	0.2
0.22	0.09	0.09	0.16	0.16	0.07	0.11	0.09	0.11	0.12	0.16
0.09	0.17	0.09	0.09	0.12	0.08	0.12	0.07	0.15	0.04	0.17
0.08	0.1	0.09	0.07	0.17	0.09	0.08	0.09	0.1	0.05	0.11
0.07	0.04	0.11	0.06	0.05	0.05	0.16	0.13	0.07	0.03	0.15
0.21	0.17	0.13	0.12	0.08	0.15	0.11	0.06	0.07	0.11	0.31
0.13	0.13	0.19	0.12	0.07	0.15	0.11	0.17	0.11	0.15	0.29
0.15	0.11	0.18	0.39	0.13	0.37	0.39	0.24	0.18	0.27	0.14

24.(圖表二十七):調查海鳥飛行高度求其占比並分析是否影響風機運轉



鳥類飛行高度

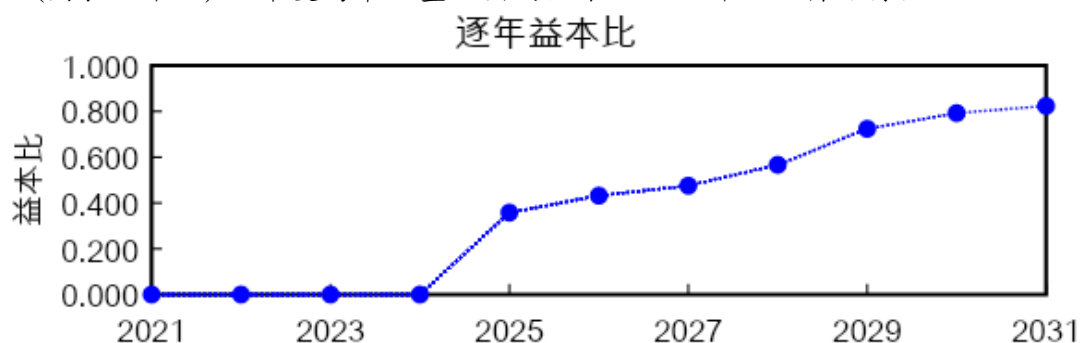


25.(圖表三十):依照總投資成本以及發電效益在搭配台電對徑尖峰能力算法求出其益本比

建設梯次	建設風場	執行時間		益本比(累計)
第一梯次	第一名風場 第二名風場	第一階段	2015 第二季~ 2020 第三季	0.358
		第二階段	2021 第三季~ 2024 第四季	
		第三階段	2020 第一季~ 2024 第四季	
第二梯次	第三名風場	第一階段	2016 第二季~ 2021 第三季	0.432
		第二階段	2022 第三季~ 2025 第四季	
		第三階段	2021 第一季~ 2025 第四季	
第三梯次	第四名風場	第一階段	2017 第二季~ 2022 第三季	0.475
		第二階段	2023 第三季~ 2026 第四季	
		第三階段	2022 第一季~ 2026 第四季	
第四梯次	第五名風場	第一階段	2018 第二季~ 2023 第三季	0.567
		第二階段	2024 第三季~ 2027 第四季	

		第三階段	2023 第一季~ 2027 第四季	
第五梯次	第六名風場 第七名風場	第一階段	2019 第二季~ 2024 第三季	0.724
		第二階段	2025 第三季~ 2028 第四季	
		第三階段	2024 第一季~ 2028 第四季	
第六梯次	第八名風場	第一階段	2020 第二季~ 2025 第三季	0.793
		第二階段	2026 第三季~ 2029 第四季	
		第三階段	2025 第一季~ 2029 第四季	
第七梯次	第九名風場	第一階段	2021 第二季~ 2026 第三季	0.824
		第二階段	2027 第三季~ 2030 第四季	
		第三階段	2026 第一季~ 2030 第四季	

26.(圖表三十一):以年度為單位疊加出的益本比，以評估經濟可行性



27.(圖表三十二):每百萬投資在離岸風電上所能獲得的效益(資料來源：經濟部網站)

產值效果 (百萬元)	就業效果 (就業人數)	勞動報酬成果 (百萬元)
4.21	0.69	0.51

28.(圖表三十五):離岸發電外部附加價值

每年實質預算皆為: 150174 (百萬元)				
階段	產值效果 (百萬元)	就業效果 (人)	勞動報酬效果 (百萬元)	累加綠能價值 (百萬元/年)
第一梯次	632231	103620	76589	2486
第二梯次	632231	103620	76589	3717

第三梯次	632231	103620	76589	4868
第四梯次	632231	103620	76589	6043
第五梯次	632231	103620	76589	8338
第六梯次	632231	103620	76589	9457
第七梯次	632231	103620	76589	9992
總和	4425620	725339	536120	累加以上並 每年疊加 9992百萬元

29.(圖表三十六):動態策略最終評估分析，依照 1~3 步驟求出

年分	動態策略與評估		
2015	梯次一：風場一第一階段、風場二第一階段開始		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	無	沒有建造費用，僅進行文書作業與探勘
	自然風險	可	探勘階段不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	無	沒有建造費用，僅進行文書作業及探勘
2016	梯次二：風場三第一階段開始		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	無	沒有建造費用，僅進行文書作業與探勘
	自然風險	可	探勘階段不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	無	沒有建造費用，僅進行文書作業及探勘
2017	梯次三：風場四第一階段開始		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	無	沒有建造費用，僅進行文書作業與探勘
	自然風險	可	探勘階段不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	無	沒有建造費用，僅進行文書作業及探勘
2018	梯次四：風場五第一階段開始		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	無	沒有建造費用，僅進行文書作業與探勘
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性

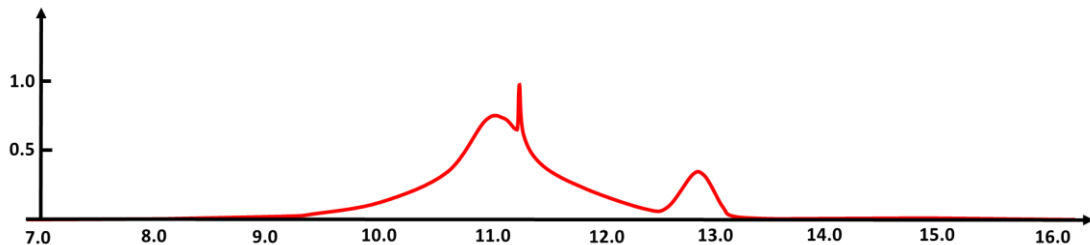
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	無	沒有建造費用，僅進行文書作業及探勘
	外部效益	無	沒有建造費用或工程，僅進行文書作業與探勘
2019	梯次五：風場六第一階段、風場七第一階段開始		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	無	沒有建造費用，僅進行文書作業與探勘
	自然風險	可	探勘階段不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	無	沒有建造費用，僅進行文書作業及探勘
	外部效益	無	沒有建造費用或工程，僅進行文書作業與探勘
2020	梯次六：風場八第一階段開始； 梯次一：風場一第三階段開始建造、風場二第三階段開始建造		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	可	經濟造成風險之最有可能影響金額小於梯次一之預算的千分之一
	自然風險	可	探勘、建設電網皆不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	可	此年度無收益，但梯次一之成果在 2025 年可達 0.358。
	外部效益	可	梯次一建造過程中可造成外部效益等效新台幣 7113 億元，就業效果 103620 人。
2021	梯次七：風場九第一階段開始； 梯次一：風場一第二階段開始建造、風場二第二階段開始建造 梯次二：風場三第三階段開始建造		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	可	經濟造成風險之最有可能影響金額小於本年度預算的千分之一
	自然風險	可	探勘、建設電網及風機皆不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	可	此年度無收益，但梯次一之成果在 2025 年可達 0.358、梯次二之成果在 2026 年可達 0.432（累積益本比）。
	外部效益	可	梯次一建造過程中可造成外部效益等效新台幣 7113 億元，就業效果 103620 人
2022	梯次二：風場三第二階段開始建造 梯次三：風場四第三階段開始建造		

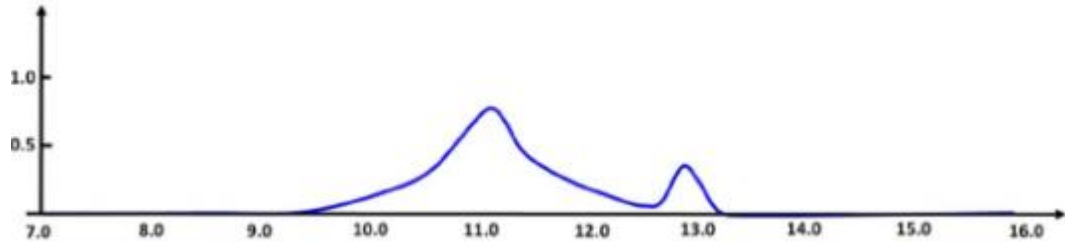
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	可	經濟造成風險之最有可能影響金額小於本年度預算的千分之一
	自然風險	可	建設電網及風機皆不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	可	此年度無收益，但梯次二之成果在 2026 年可達 0.432、梯次三成果在 2027 年可達 0.475。（累積益本比）。
	外部效益	可	梯次二建造過程中可造成外部效益等效新台幣 7125 億元，就業效果 103620 人
2023	梯次三:風場四第二階段開始建造 梯次四:風場五第三階段開始建造		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	可	經濟造成風險之最有可能影響金額小於本年度預算的千分之一
	自然風險	可	建設電網及風機皆不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	可	此年度無收益，但梯次三成果在 2027 年可達 0.475、梯次四之成果在 2028 年可達 0.567（累積益本比）。
	外部效益	可	梯次三建造過程中可造成外部效益等效新台幣 7137 億元，就業效果 103620 人。
2024	梯次四:風場五第二階段開始建造 梯次五:風場六第三階段開始建造、風場七第三階段開始建造		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	可	經濟造成風險之最有可能影響金額小於本年度預算的千分之一
	自然風險	可	建設電網及風機皆不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	可	此年度無收益，但梯次四之成果在 2028 年可達 0.567、梯次五之成果在 2029 年可達 0.724（累積益本比）。
	外部效益	可	梯次四建造過程中可造成外部效益等效新台幣 7148 億元，就業效果 103620 人。
2025	梯次一完成且開始運轉 梯次五:風場六第二階段開始建造、風場七第二階段開始建造 梯次六:風場八第三階段開始建造		

	評估項目	結果	附註
	經濟風險	可	經濟造成風險之最有可能影響金額小於本年度預算的千分之一
	自然風險	可	建設電網及風機皆不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	可	此年度累積益本比為 0.358，且梯次五之成果在 2029 年可達 0.724、梯次六之成果在 2030 年可達 0.793。（累積益本比）。
	外部效益	可	梯次五建造過程中可造成外部效益等效新台幣 7171 億元，就業效果 103620 人。
2026	<p>梯次二完成且開始運轉</p> <p>梯次六:風場八第二階段開始建造</p> <p>梯次七:風場九第三階段開始建造</p>		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	可	經濟造成風險之最有可能影響金額小於本年度預算的千分之一
	自然風險	可	建設電網及風機皆不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	可	此年度累積益本比為 0.432，且梯次六之成果在 2030 年可達 0.793、梯次七之成果在 2031 年可達 0.824（累積益本比）。
	外部效益	可	梯次六建造過程中可造成外部效益等效新台幣 7182 億元，就業效果 103620 人。
2027	<p>梯次三完成且開始運轉</p> <p>梯次七:風場九第二階段開始建造</p>		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	可	經濟造成風險之最有可能影響金額小於本年度預算的千分之一
	自然風險	可	建設風機不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	可	此年度累積益本比為 0.475，梯次七之成果在 2031 年可達 0.824（累積益本比）。
	外部效益	可	梯次七建造過程中可造成外部效益等效新台幣 7188 億元，就業效果 103620 人。
2028	<p>梯次四完成且開始運轉</p>		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	可	經濟造成風險之最有可能影響金額小於本年度預算的千分之一

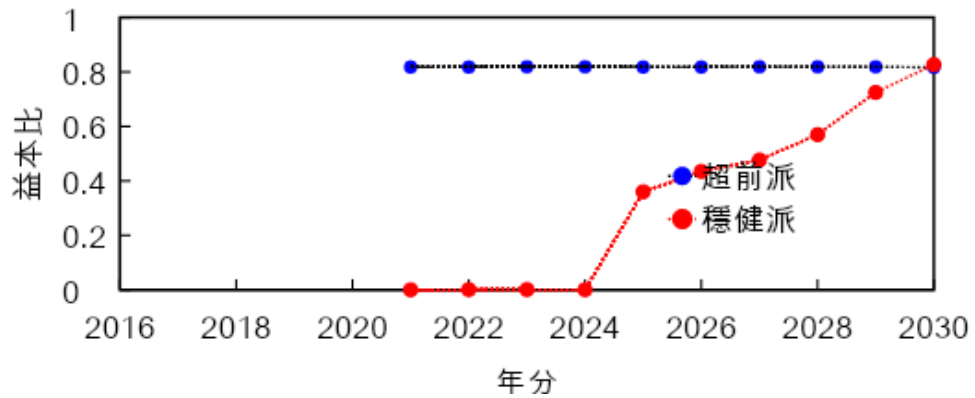
	自然風險	可	建設電網及風機皆不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	可	此年度累積益本比為 0.567
	外部效益	可	(梯次四建造過程產生之外部效益已說明過，不贅述，其餘梯次同理)
2029	梯次五完成且開始運轉		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	可	經濟造成風險之最有可能影響金額小於本年度預算的千分之一
	自然風險	可	建設電網及風機皆不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	可	此年度累積益本比為 0.724
	外部效益	可	無
2030	梯次六完成且開始運轉、梯次七完成於年底		
	評估項目	結果	附註
	經濟風險	可	經濟造成風險之最有可能影響金額小於本年度預算的千分之一
	自然風險	可	建設電網及風機皆不受雷擊、鳥類或風速影響
	操作可行性	可	依據逆續推理所得之策略，具必要性
	技術可行性	可	無
	經濟可行性	可	此年度累積益本比為 0.793，2031 梯次七也開始運轉後達 0.824。
	外部效益	可	除上述各階段之外部效益外，因減碳每年將增加 9992 百萬元外部效益

30.(圖表三十七、三十八):評估穩健派(紅)及超前派(藍)變動金額機率。橫軸:變動金額(千萬元)縱軸:(機率)

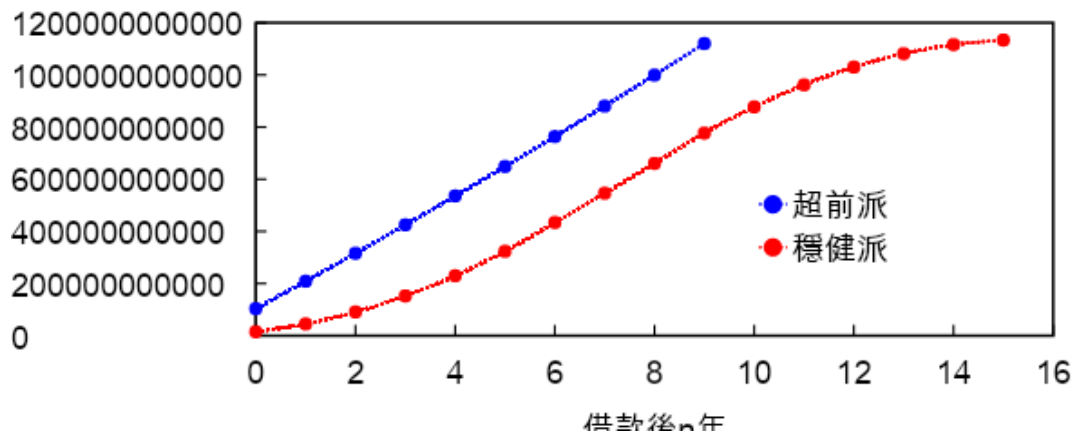




31.(圖表三十九):評估超前派和穩健派的逐年益本比(橫軸:年分 縱軸:比值)  
逐年累計動態益本比

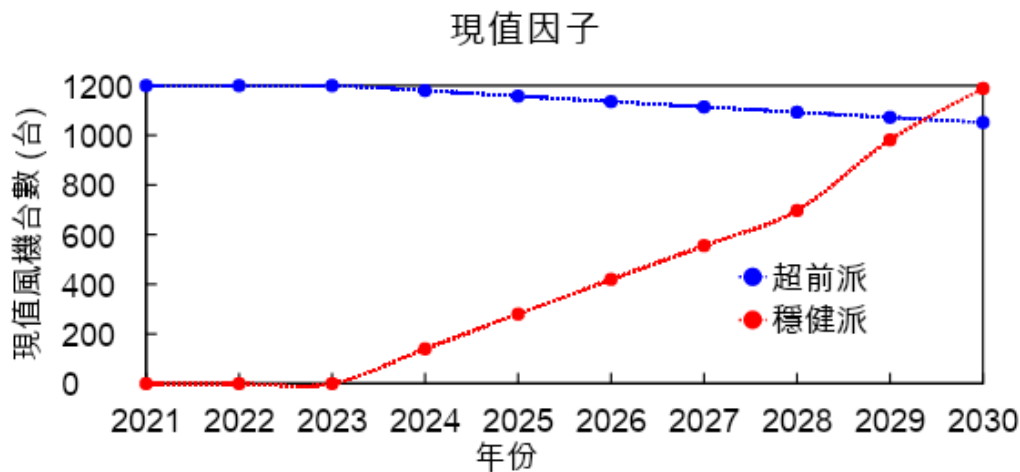


32.(圖表四十):評估超前派和穩健派的還款可還性(橫軸:年分 縱軸:新台幣)  
逐年還款總額

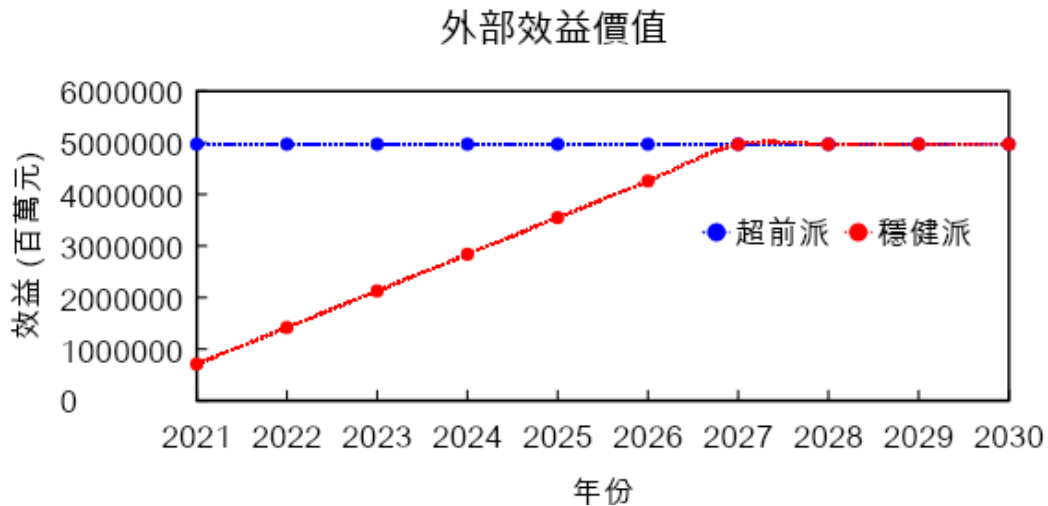


33.(圖表四十一):評估超前派和穩健派之現值(橫軸:年分 縱軸:現值風機台數)





34.(圖表四十二):評估超前派和穩健派之外部效益價值(橫軸:年分縱軸:效益(百萬元))



## 附錄、物理公式

### 一、風場計算(參考資料 17、19、30 及 31 點)

i. (2,2,3,1) ⇒ 葉片處單位時間通過之風質量，風質量原原應該為空氣密度乘以其體積變可求出其體積，但這邊要求單位時間因此我改成  $\rho A \frac{v_i + v_f}{2}$

ii. (2.2.3.2) ⇒ 假設理想風機，能量並無散失，損失的動能(J)會等於轉換的電能(J)，其關係： $P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (v_i^2 - v_f^2)$  將風質量帶入(2,2,3,1) ⇒  $\frac{1}{4} \rho A (v_i^2 - v_f^2) (v_i + v_f)$

iii. (2.2.3.3) ⇒  $P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_i^3$  (J) 風能公式

iv. (2.2.3.4) ⇒ 將(2,2,3,2)及(2,2,3,3)相除  
 $\Rightarrow \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_f}{v_i} \right)^2 \right] \left( 1 + \frac{v_f}{v_i} \right) \leq 59\%$

其 $\frac{P}{P_0}$ 導數可求其 $\frac{v_f}{v_i}$ 之值求得 $-1$ 或 $\frac{1}{3}$ (負不合)，帶入回原式(2.2.3.4)求出其效率值為 $\frac{16}{27}$ 約為59%，此效應便是貝茲定律(Betz' Law)

- v. (2.2.3.5)  $\Rightarrow$ 在將科研院的數據顯示其轉換風能效率為30~50%，取40%為中位數帶入(2.2.3.4) $\Rightarrow \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_f}{v_i} \right)^2 \right] \left( 1 + \frac{v_f}{v_i} \right) = 0.4$
- vi. (2.2.3.6)  $\Rightarrow$ 將(2.2.3.5)的 $\frac{v_f}{v_i}=0.734$ 帶入(2.2.3.3) $\Rightarrow \frac{P_{final\_wind}}{P_{initial\_wind}} = \left( \frac{v_f}{v_i} \right)^3 = 39\%$ 便可推算風能通過一個風機剩餘的風能:

## 二、風機排列(參考資料 23、32 點)

- i. (2.2.3.7)  $\Rightarrow$ 風能會被風機前方的風機吸收約40%並消耗至原本的39%，但若風機間有適當的間隔距離 $d$ (km)，因為原本的會有一增益項 $(kd)\%$ 補充消耗之能量(J) $\Rightarrow a_1 = 100\%P_{wind} \times 40\% \Rightarrow a_n = a_{n-1} \times (39 + kd)\%$ ,  $n \in N$  此公式來源於(2.2.3.6)剩餘風能、(2.3.3.5)轉換效率、以及變因兩風機距離以避免尾流效應
- ii. (2.2.3.8)  $\Rightarrow$ 透過(2.2.3.7)求出 $k$ 值並帶入本研究中設定兩風機間距為1.67km，藉由其他報告指出並排風機之間的距離應為三倍葉片半徑，在本研究中為0.501km，可得知其風機面積 $A = 0.836km^2$ ，最後依照原設定的8MW風機機型(2.3.3.3)可以推知欲達8MW最少需要的風速為，刪除不必要的風場

$$P = P_0 \times 40\% = \frac{1}{2} \rho A v_i^3 \times 40\% \geq 8 \times 10^6$$

$$v_i \geq 3.392m/s$$

## 三、極限風速(參考資料 2、20、25 及 26 點)

推估臺灣未來即將架設離岸風力發電機的位置的極限風速值

$$U_T = \alpha \ln T + \beta$$

係數的計算方式為： $\alpha = \frac{2b_1 - U^{max}}{2 \ln}$

$$\beta = \underline{U^{max}} - \alpha \gamma_E$$

$$\gamma_E \approx 0.577215665$$

$$b_1 = (1/n) \times \sum_{i=1}^n [(i-1) \times U_i^{max}] / (n-1)$$