



2021

2050



中央研究院  
ACADEMIA SINICA

# 邁向淨零 2.0 X 轉型加速行

廖俊智 院長

# 從那裡跌倒，那裡爬起來

- 我們排了多少碳？**287百萬公噸**二氧化碳當量 (Mt CO<sub>2</sub>e)
- 我們用了多少電？**2800億度 (KWh)**
- 我們用了多少能源？**85百萬公秉油當量 + 22百萬公秉**

↓ 假設55% 發電效率

**4888億度電**

# 量的概念, 超級比一比

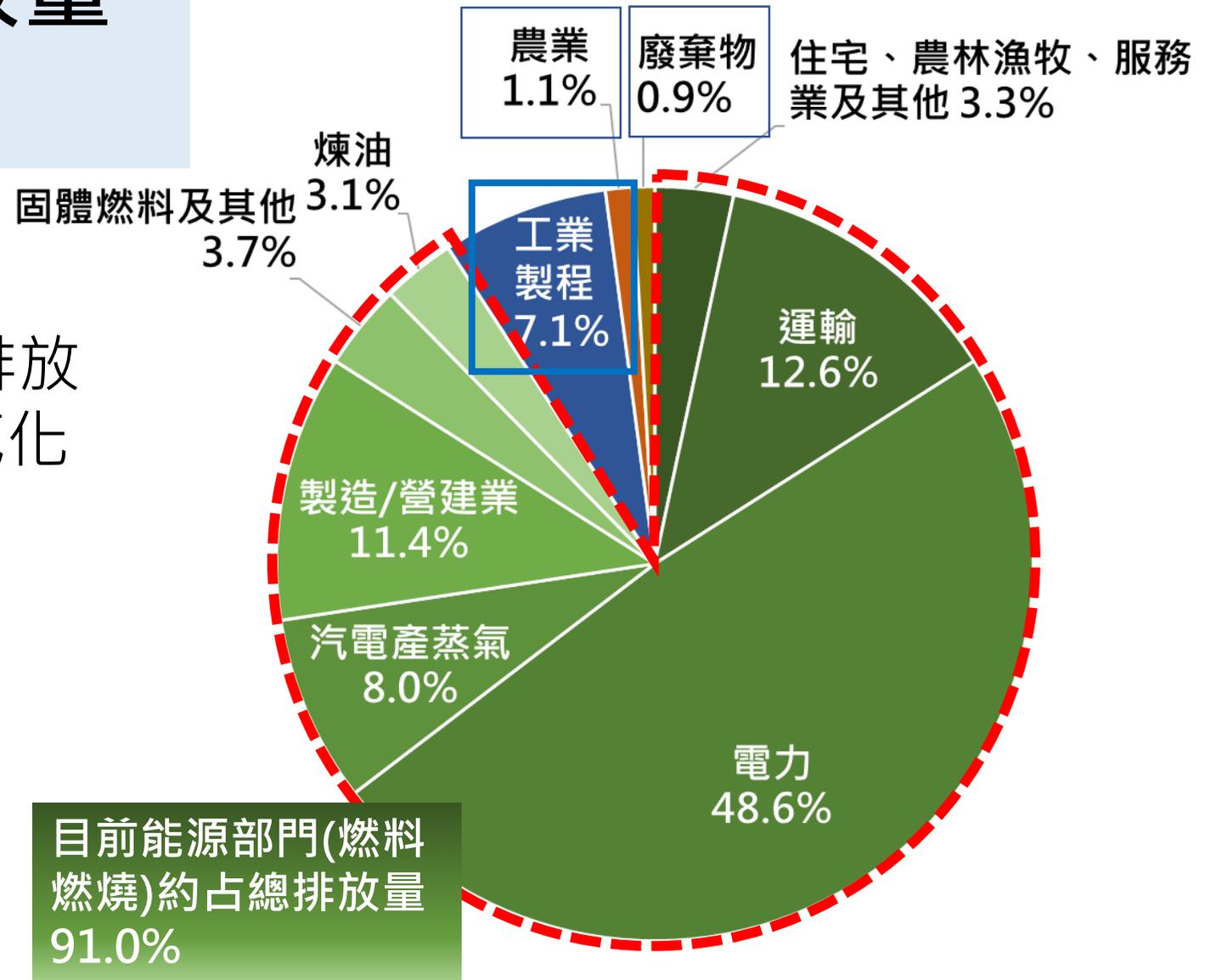
- 臺灣2019排放 287 Mt CO<sub>2</sub> , 其中含碳**78 Mt**
- 臺灣**水泥**年產量2020年**1,179萬公噸 (11.79 Mt)**
- 臺灣**乙烯**產能2020年**400.5萬噸 (4 Mt)**
- 臺灣 2011年**木材**需求量約為527萬立方公尺 (**3.8 Mt**) , 進口量則約526萬立方公尺。國內的木材自給率則不到1% (**0.03Mt**) 。
- 臺灣**稻米**年產量約**127 萬公噸 (1.27Mt)**

→先排碳, 再捕碳, 再利用→量遠小於排碳量

→須從零碳能源著手

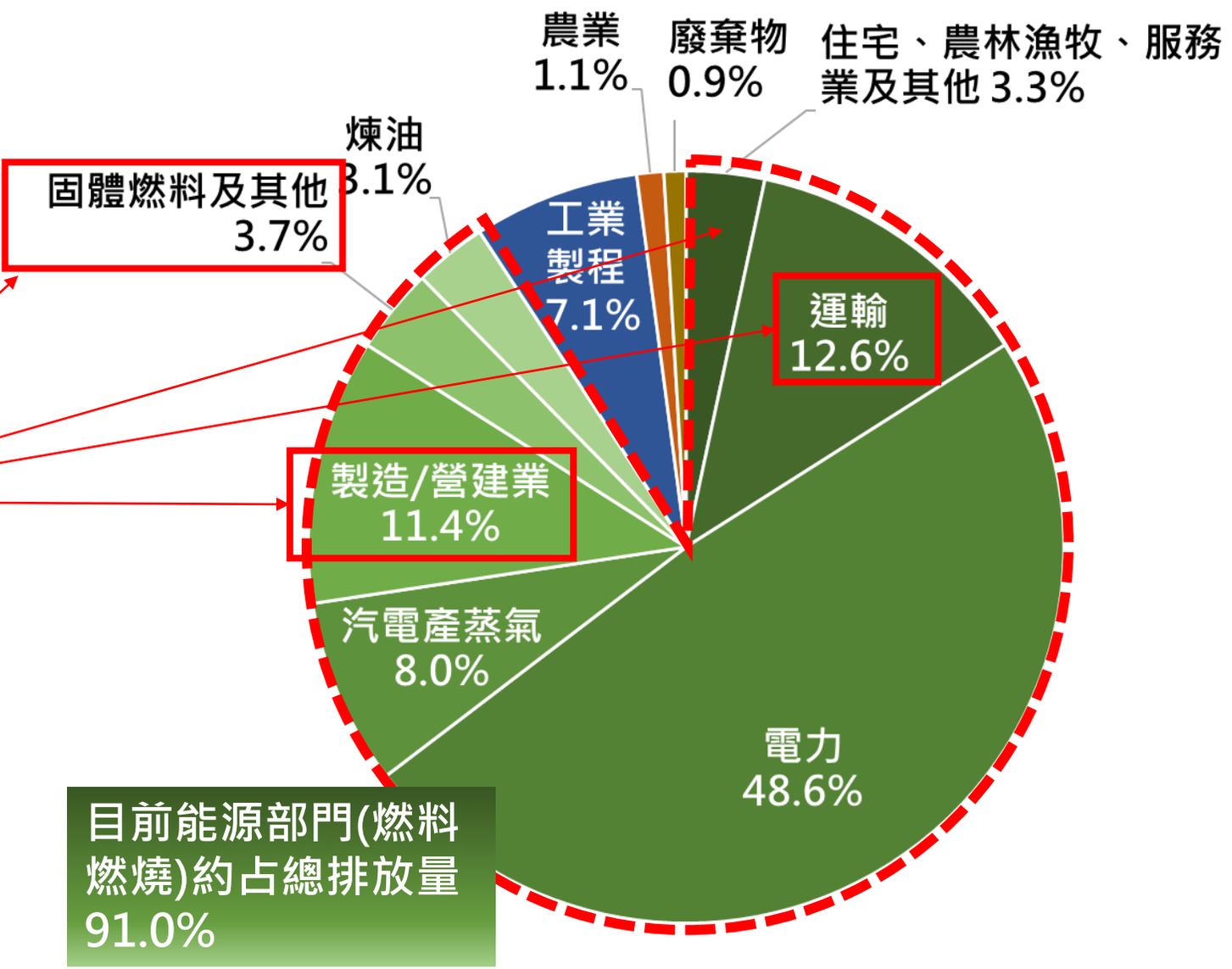
# 臺灣溫室氣體排放量 部門別(2019)

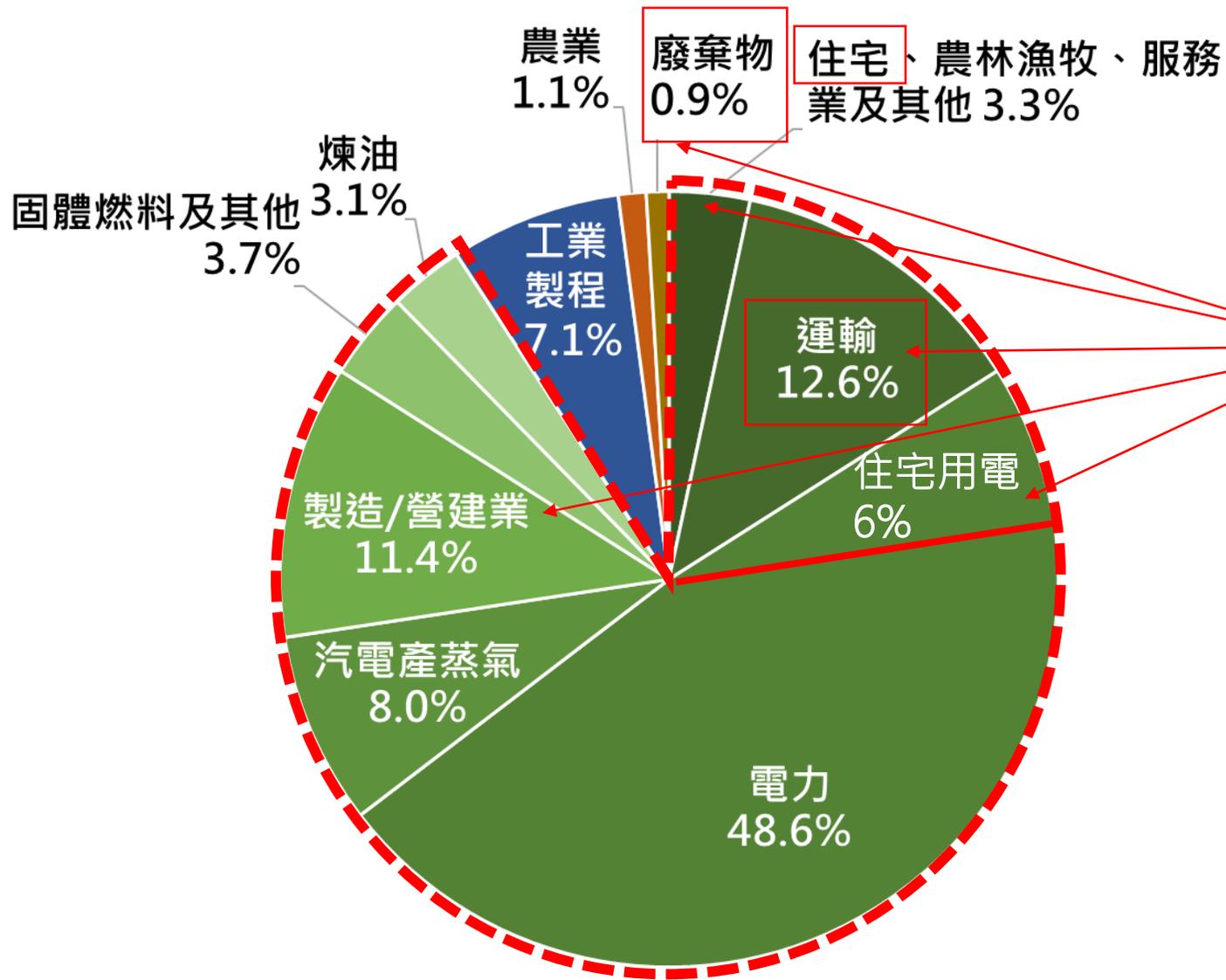
- 我國2019年溫室氣體總排放量：**287.06**百萬公噸二氧化碳當量 (Mt CO<sub>2</sub>e)。
- 能源部門占**91%**。
- 發電占**48.6%**。



# 工業界減碳

效率化  
去碳化  
電氣化

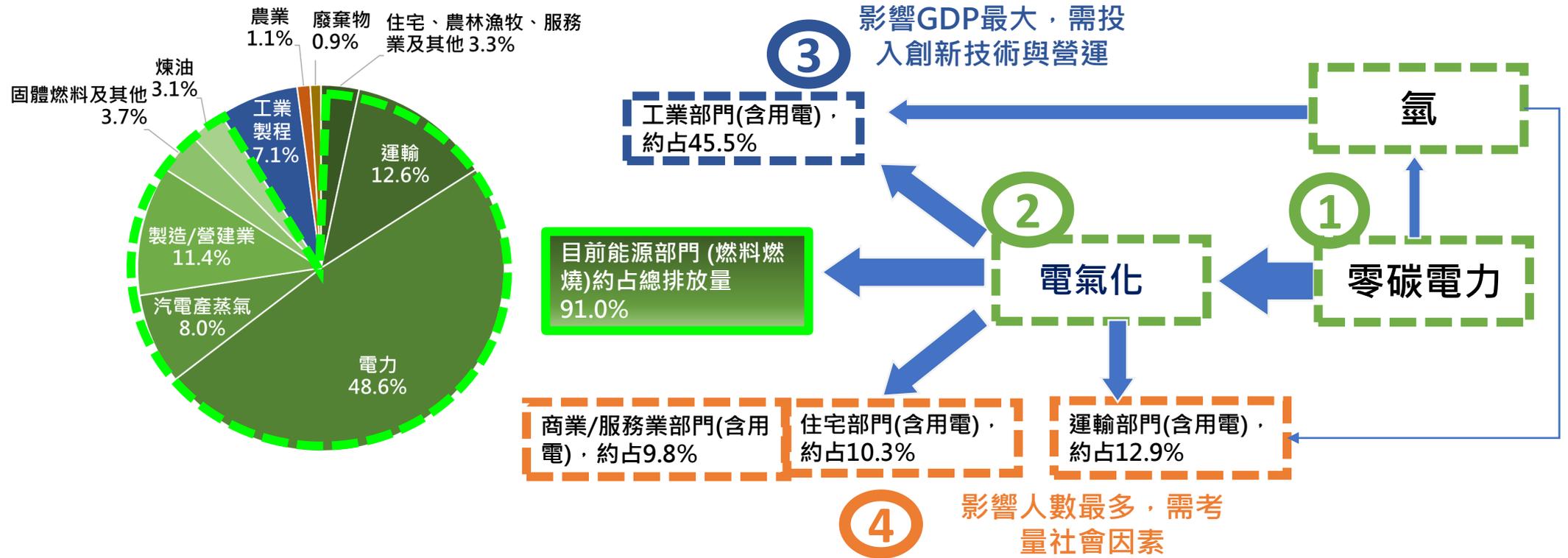




**日常生活中減碳**  
 節能、回收、循環使用

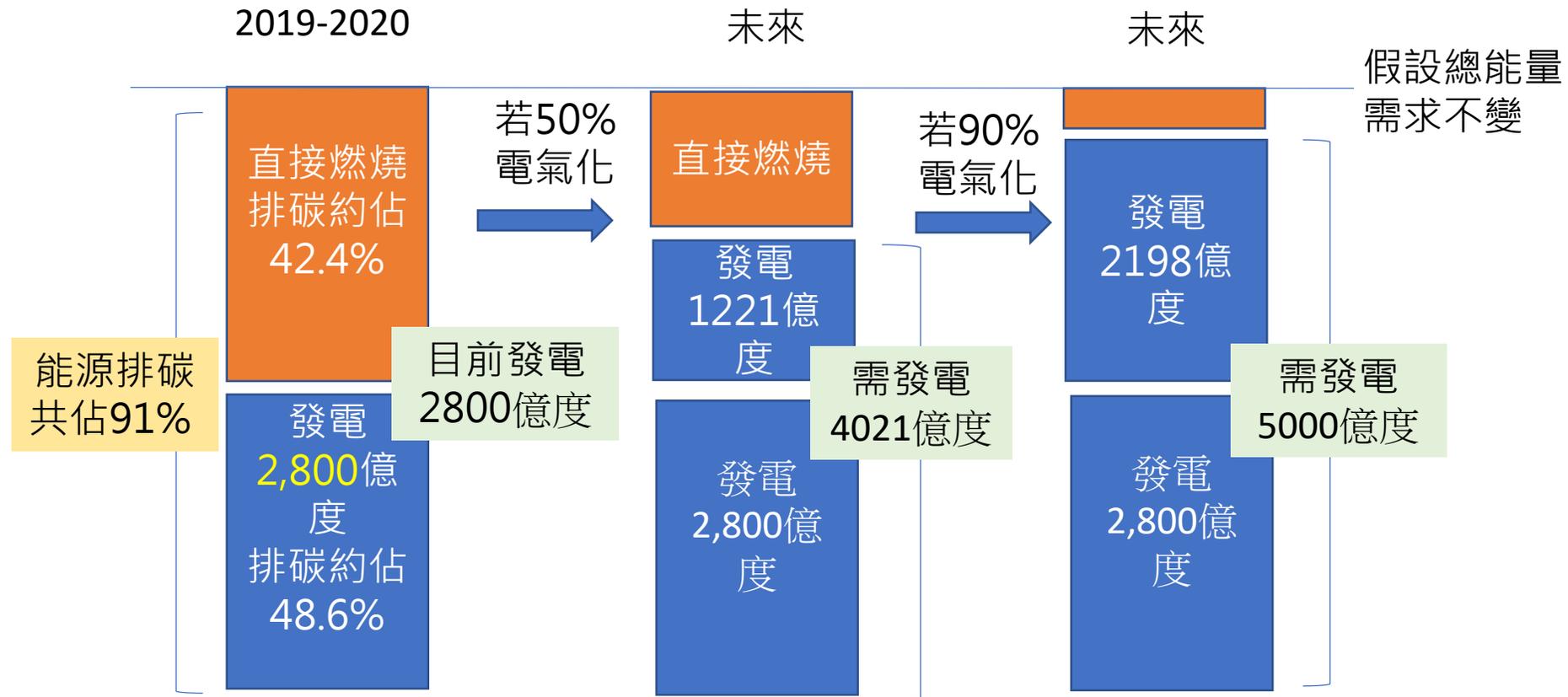
# 我國主要排放源與減碳重點

我國2019溫室氣體總排放量：287 Mton



資料來源：環保署(2021)。2021年國家溫室氣體排放清冊報告  
經濟部2021年3月。製造部門2050淨零排放路徑方向性評估報告。  
行政院淨零排放專案工作組4月1日會議簡報。

# 要解決碳排問題，主要方向為能源電氣化， 同時全力發展零碳電力

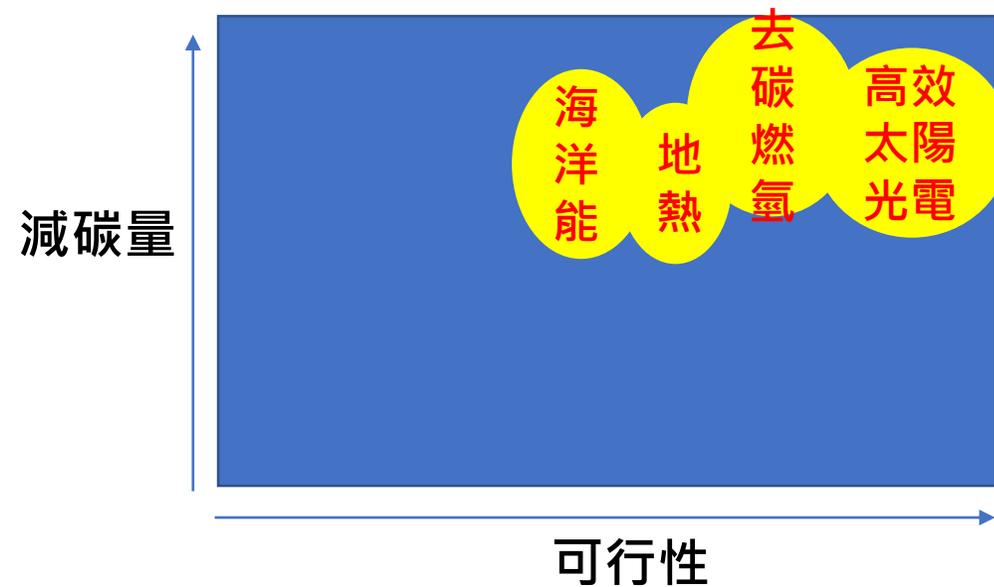
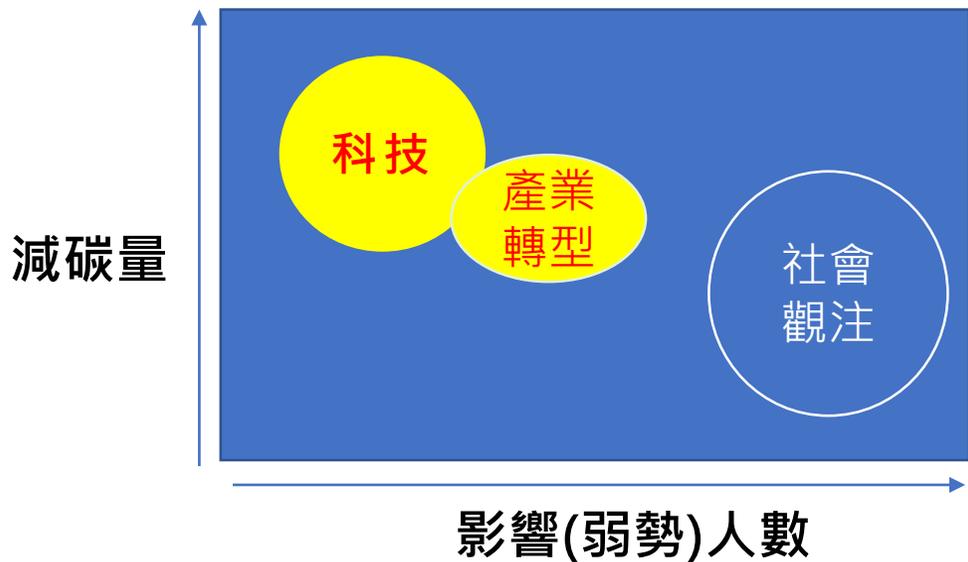


(假設直接燃燒和發電效率相當)

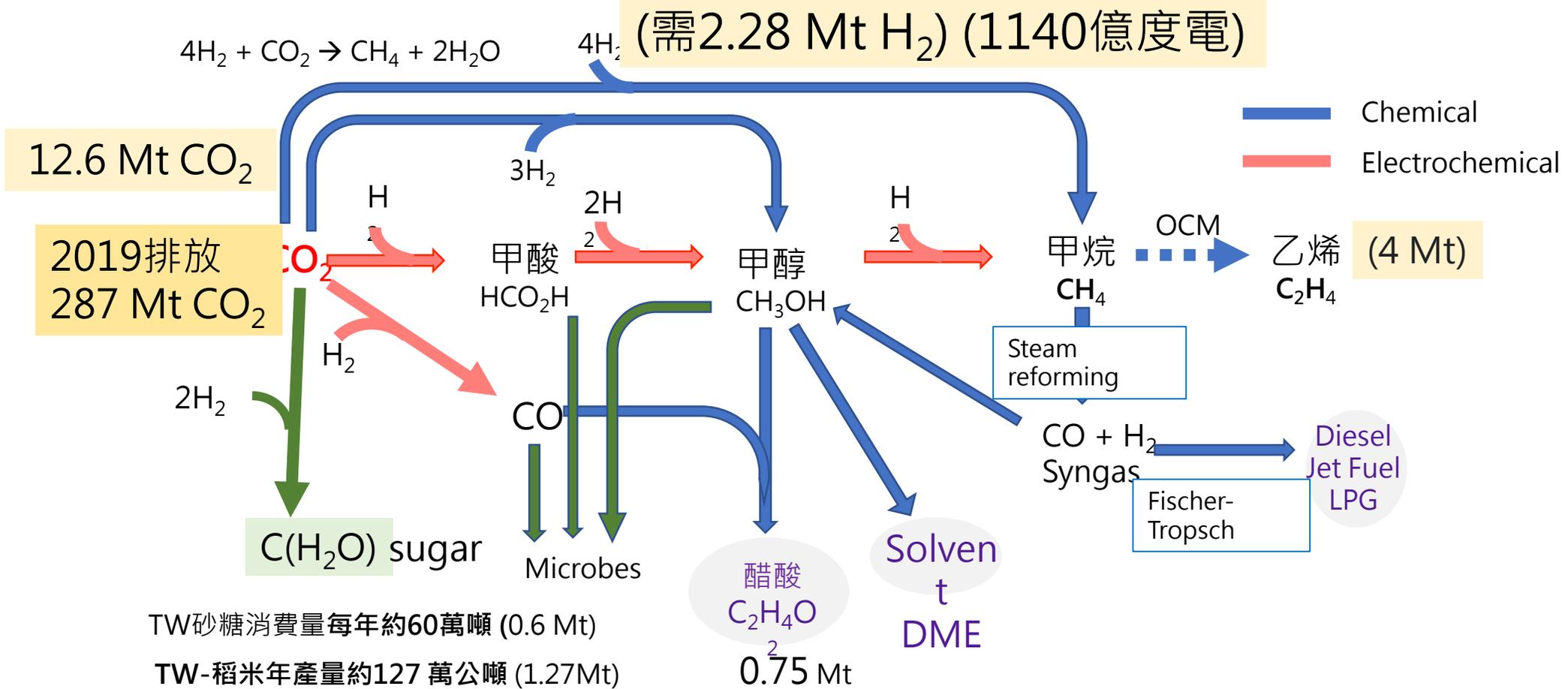
# 優先順序

- 影響(弱勢)人數少，減碳量大
- 產業轉型
- 影響(弱勢)人數多，減碳量少

- 可行性高，減碳量大
- 自產
- 技術可輸出



# 臺灣2019排放 287 Mt CO<sub>2</sub> : 能量與質量的挑戰 - 能量那裡來? 質量那裡去?



→ 須從零碳能源著手

# 綠電 / 零碳電力那裡來?

## 自產

- 太陽能
- 風能
- 地熱
- 海洋能
- 生質能

## 進口

- 天然氣發電 → 碳捕獲，封存
- 天然氣 → 蒸氣重組產氫發電 → 碳捕獲，封存
- 天然氣 → 去碳燃氫發電 → 準綠電
- 進口綠氫
- 進口綠氨
- 進口生質原料
- 進口核燃料 → 處理核廢料

儘速推動

高效太陽光電、去碳燃氫、地熱、海洋能、生質碳匯

擴大推動

風力發電、新興生質能、電力系統配套  
(電網、儲能)、社會與經濟措施

持續推動

傳統生質能、水力發電、傳統碳捕捉利用  
及封存 (CCUS)、自然碳匯(農林)

密切追蹤

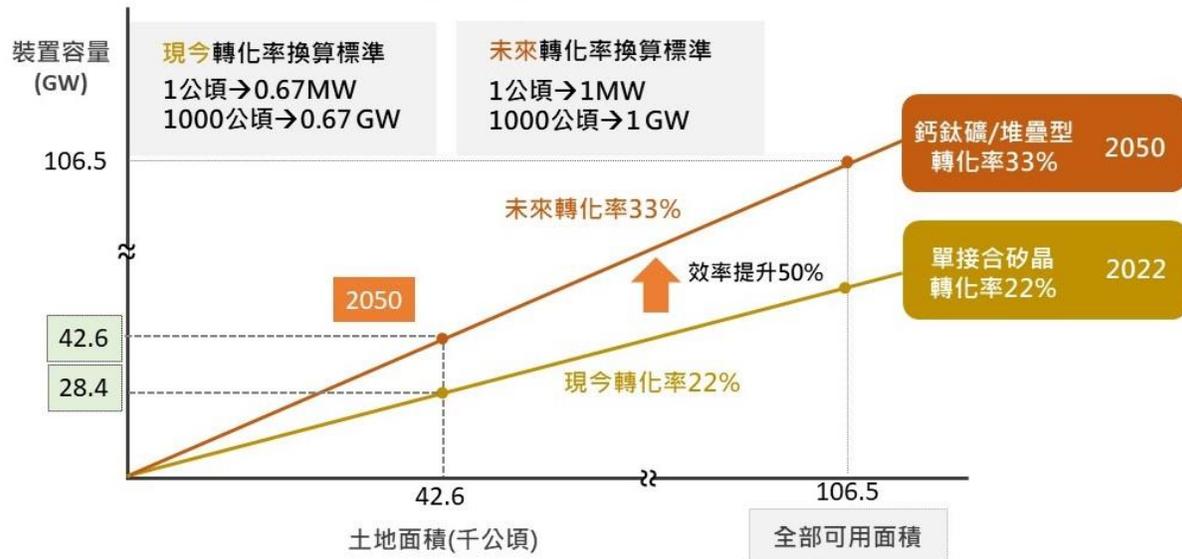
未來核技術、新興CCUS技術

註：

- **儘速推動**(技術尚未成熟且未廣泛推動，但若成功，淨零效益顯著，屬高風險高效益類)
- **擴大推動**(目前已有初步作為，可再增加投入加大力道)
- **持續推動**(方向正確，可依既有規劃持續推動)
- **密切追蹤**(技術在起步階段，但須關注未來發展)

### 提高效率：以科技換取土地

#### 地面型太陽光電



- 以使用40%的可用面積做為目標，裝置面積約可使用42.6千公頃，裝置容量將可達到28.41 GW
- 未來技術：轉化率提升50%，同樣土地面積，裝置容量將可達到42.6 GW

### 優勢及發展利基

- 下世代太陽能板**主要技術已現曙光**(鈣鈦礦、矽基多接面堆疊技術)
- 我國**具備製造能力**

### 既存限制及挑戰

- **高效低價技術**之規模化、商業化仍不易
- 國際競爭激烈

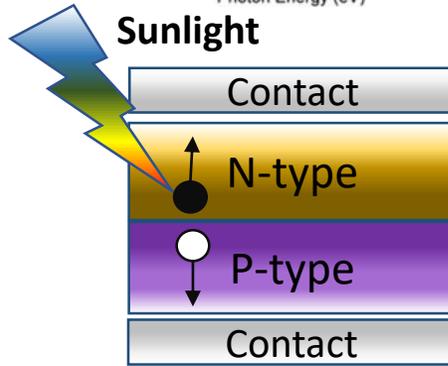
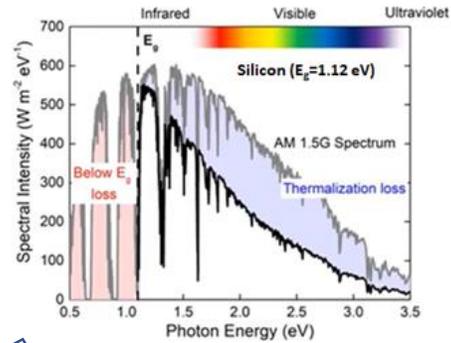
### 政策建議

- **投入研發高轉化效率太陽能模組技術**，如：鈣鈦礦及與矽基堆疊太陽能電池

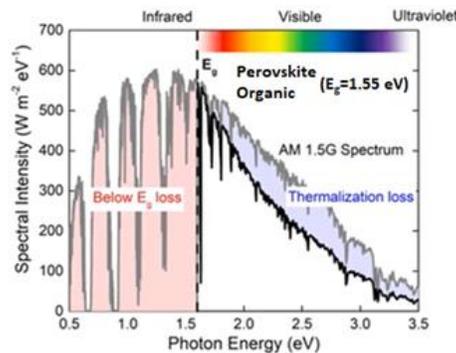
# 突破矽太陽能電池極限效率技術

## 疊層(多接)式太陽能電池

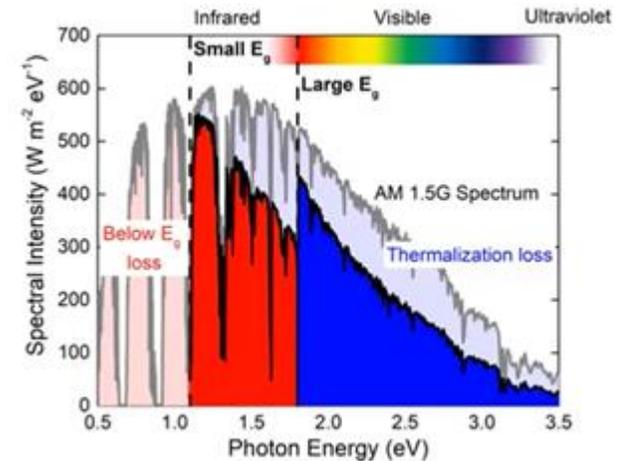
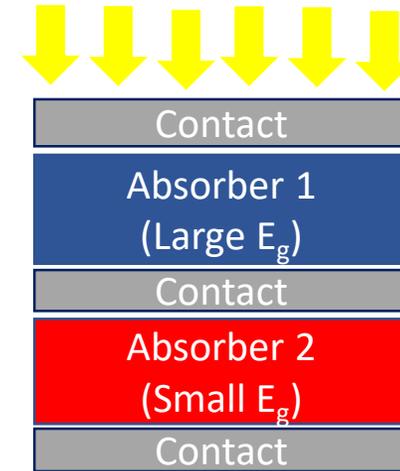
單接矽太陽能電池 (~24%)



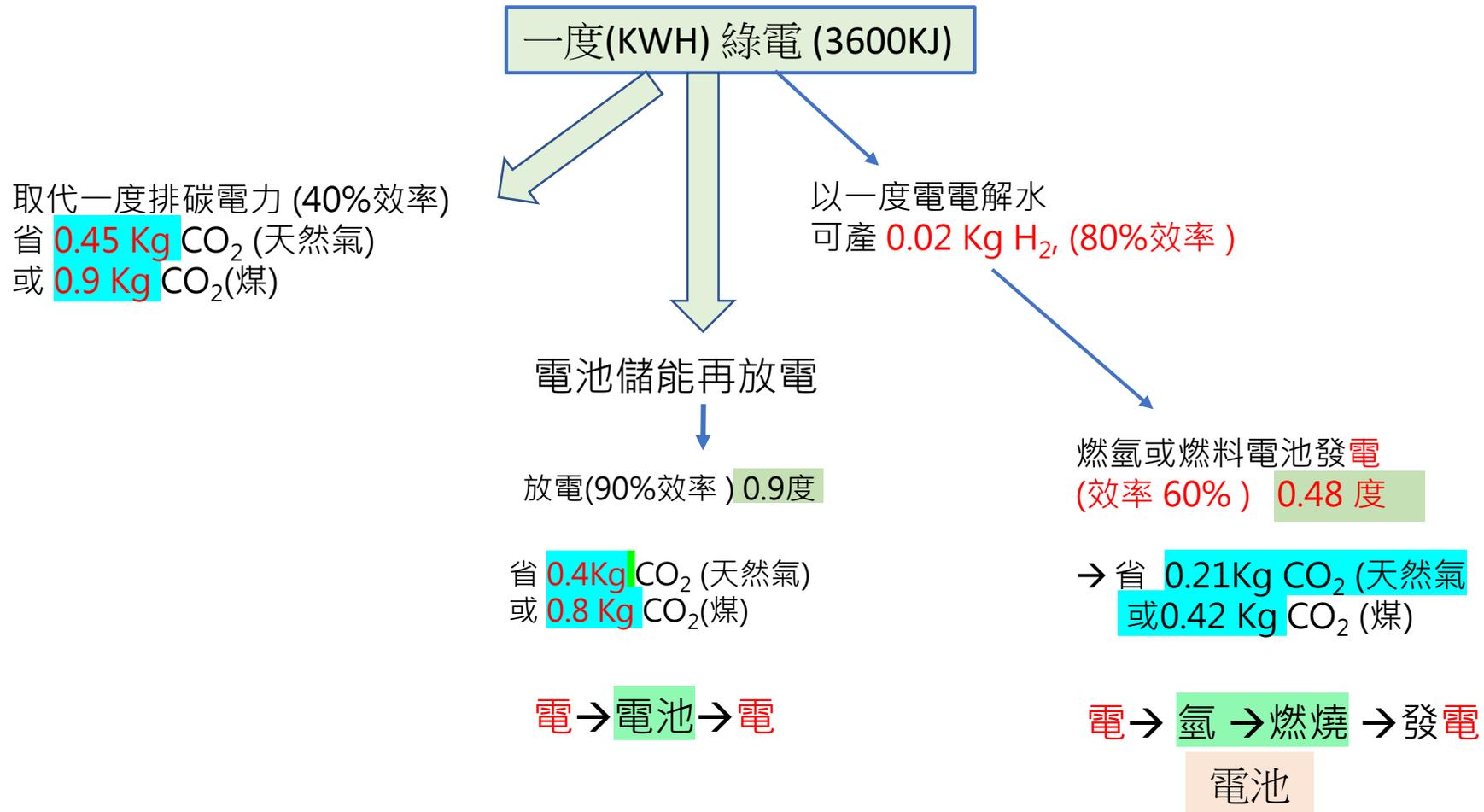
單接鈣鈦礦太陽能電池 (~18%)



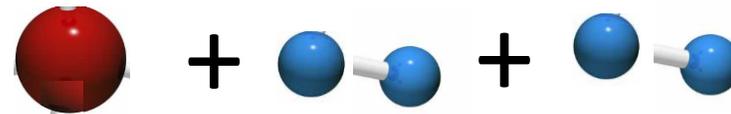
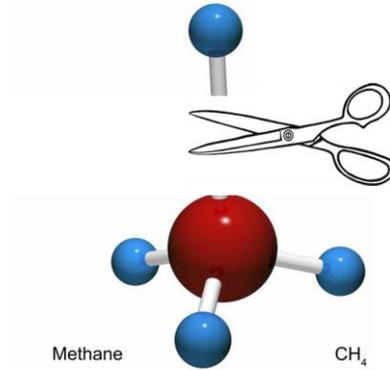
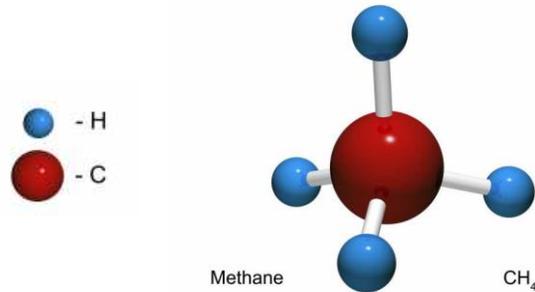
疊層式太陽能電池 (>30%)



# 一度(KWH) 綠電，該如何使用最減碳？



## 天然氣裂解 - 去碳燃氫



- 產出**氫**直接用於燃氣電廠
- 產出**固態碳**可儲存，填海造陸，做工業材料、或備用燃料。
- 與目前火力電廠相容

# 天然氣裂解



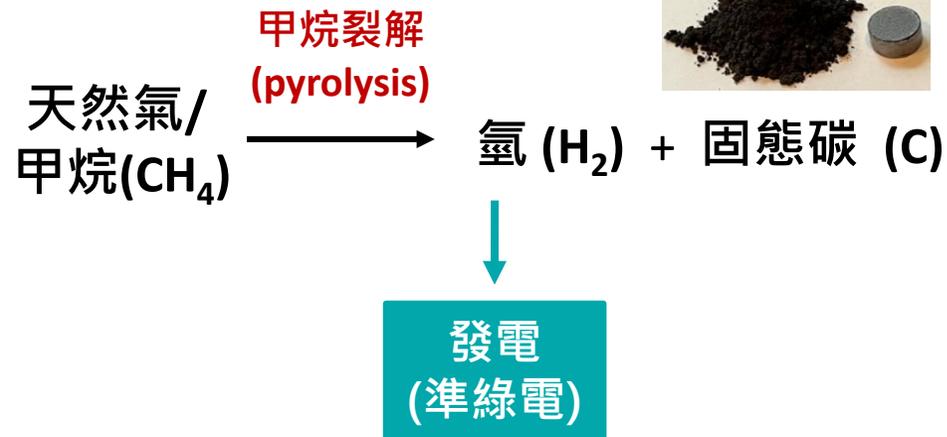
# 歐盟有條件納天然氣、核能為綠能

JUL 06, 2022

<https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-07-06/eu-lawmakers-remove-last-hurdle-for-gas-nuclear-as-green#:~:text=Gas%20projects%20replacing%20coal%20and,kilowatt%2Dhour%20over%2020%20years.>

- 天然氣替代燃煤，且每度電排二氧化碳  $< 270 \text{ g/KWh}$   
(2035 後  $< 100 \text{ g/KWh}$ ) → 暫時歸為綠電
- 要在2030 前獲建廠許可，且有計畫在2035年底前改為再生能源或低碳氣體。
- 在2045年獲建廠許可之核電廠、若能避免對環境及水資源之重大破壞，可歸為綠能。

## 何謂去碳燃氫？ 發電潛能？



- 此技術1噸天然氣約可發電3,700~4,300度(已考量熱裂解效率及氫氣燃燒發電效率)
- 假設將現有天然氣量皆全數進行去碳燃氫技術約可發700~850億度電，相當於目前25~30%的發電量(註：2019年全國發電量2,741億度電)

## 優勢及發展利基

- 將天然氣去碳，提供大量的、**穩定的無碳電力**
- 較**低碳、甚至零碳的製氫技術**，氫氣即產即用，無須氫氣運儲設施；另亦無需大幅更動**天然氣發電廠配置**
- 歐盟將大量減碳之天然氣所發電力暫列為**永續能源投資選項**，未來可能可成為「**準綠電**」來源
- 產生之**固態碳**可再利用為材料、建材、填海造陸，亦可在緊急時做為備用能源

## 既存限制及挑戰

- 此技術原料為非綠能來源之天然氣，且須**仰賴進口**，接收問題須解決
- 欲降低此技術碳足跡，**須降低天然氣開採及運送時之甲烷逸散**(生產端)
- 我國燃燒**發電設備與技術仍仰賴國際大廠**，人才及技術須迅速培養
- 固態碳雖較二氧化碳易儲存，但數量十分龐大，仍**須妥善處置**

## 政策建議

- 須**研發天然氣無氧裂解技術**，尤其在降低能耗、減碳效益、成本等關鍵點
- 短期以混氫發電降低碳排，長期以全氫發電提供無碳電力，故須引進或研發**混氫或燃氫發電**技術及設備(渦輪發電機、燃料電池)
- 研發**固態純碳之利用途徑**，如材料應用、填海造陸、封存，或備用燃料

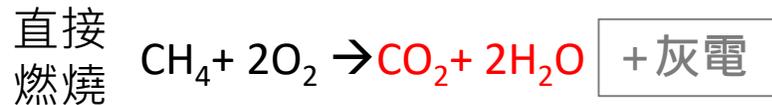
## 中研院初步測試技術可行性

- 成立團隊研發二種裂解方法
- 成功裂解氫氣和固態碳，目前技術成熟度(TRL) 3
- 後續將嘗試介接發電端，進行混氫發電測試
- 儘速放大技術規模測試



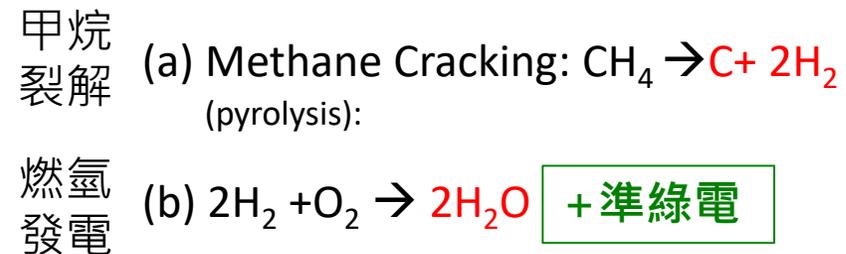
# 天然氣轉電力的技術方案：去碳燃氫發電

## 傳統燃氣發電



- ✓ 2021年我國總發電，燃(天然)氣占比：45%，未來上看~50%
- ✓ 天然氣主要成分為甲烷  $\text{CH}_4$
- ✓ 雖**穩定高效**，但**排碳**

## 新去碳燃氫發電



- ✓ 具規模之去碳電力選項
- ✓ 相較風電光電穩定
- ✓ **低碳**，甚至**零碳**

# 氫，是能量的載體 必須有能量的來源才能產氫

- 電 → 氫 → 燃燒 → 發電

=電池

- 電 → 氫 → 還原劑 → 煉鋼、石化業

# 水電解, 甲烷裂解 (去碳燃氫) 和甲烷蒸氣重組之比較

	電(裂)解水	裂解甲烷、去碳燃氫	甲烷蒸氣重組
原料	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O
需投入之 能量*	2H <sub>2</sub> O → O <sub>2</sub> + 2 H <sub>2</sub> 572 KJ	CH <sub>4</sub> → C(s) + 2H <sub>2</sub> 76 KJ	0.5CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O → 0.5CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> 126 KJ
氫燃燒產生之 能量*	2 H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> → 2H <sub>2</sub> O 572 KJ	2 H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> → 2H <sub>2</sub> O 572 KJ	2 H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> → 2H <sub>2</sub> O 572 KJ
能量淨利 *	572-572= 0 KJ	572-76= 496 KJ	572-126= 446 KJ
副產物		固態碳	二氧化碳
好處	產氫，長期儲能	產綠電，基載	產氫，技術成熟
缺點	無綠電淨利 須解決儲氫問題	依賴進口天然氣 技術待精進	依賴進口天然氣 仍須二氧化碳捕捉
*註: 為理論值，以2 mole H <sub>2</sub> 為基準。			

# 天然氣混氫發電目前技術

- 氫分子小、燃燒溫度高，發電機材料及管線需改進。
- 渦輪發電機，內燃機目前最高可混**10%氫**
- 預計2025-30年左右有全**氫渦輪發電機**
  
- 鍋爐燃燒問題較小，目前應可接受 **> 10%混氫**
- **燃料電池可以純氫發電**

# 去碳燃氫發電說明

P.S. 以電廠發電能耗效率50%為例

發電方式	化學反應式	每Mol淨能量輸出	每噸 CH4發電量
傳統燃氣發電	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 891 \text{ KJ}$	891 KJ	7700度灰電
去碳燃氫發電 100% conversion	$\text{CH}_4 + 75 \text{ KJ} \rightarrow \text{C} + 2 \text{H}_2$ , 裂解 耗能理論值為75 KJ/ mol  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 570 \text{ KJ}$	570-75=495 KJ	4300度綠電

碳燃燒值:  $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 396 \text{ KJ}$

實際能量輸出:

1. 目前設備耗能：為 100 KJ/mol，實際能量輸出 (495-100) KJ= 395 KJ/mol (→80% of 495 KJ)
2. 未來設備耗能應可降至：50 KJ/mol，實際能量輸出 (495-50) KJ= 445 KJ/mol (→90% of 495 KJ)

# 經濟效益概算：傳統發電 vs 去碳燃氫發電

發電方式	成本					收入			淨利	
	每噸天然氣發電量 <sup>1</sup>	每噸天然氣產碳黑量	每噸天然氣價格	天然氣發電 <sup>3,4</sup>	碳捕捉	總成本	售電	售碳黑 <sup>2</sup>		總收入
傳統燃燒天然氣發電	7,700度	0	9,459元	5,761元	6,860元	22,080元	20,790元 (2.7元/度)	0	20,790元	-1,290元
100%去碳燃氫發電	4,300度	0.75噸	9,459元	8,642元	0	18,101元	23,220元 (綠電: 5.4元/度)	7,500元	30,720元	12,619元

註  
解

1. 假設電廠發電能耗效率 50%
2. 副產品高純度碳粉，是高價值的工業原料，10 TWD/公斤
3. 發電成本估算：燃氣電廠 57.6 USD / 1000 度，燃氣電廠+碳捕捉成本後 87.3 USD / 1000 度
4. 假設去碳燃氫之天然氣發電成本為傳統燃燒天然氣發電的1.5倍
5. 天然氣成本以6 USD/mmbtu、1USD=30 TWD

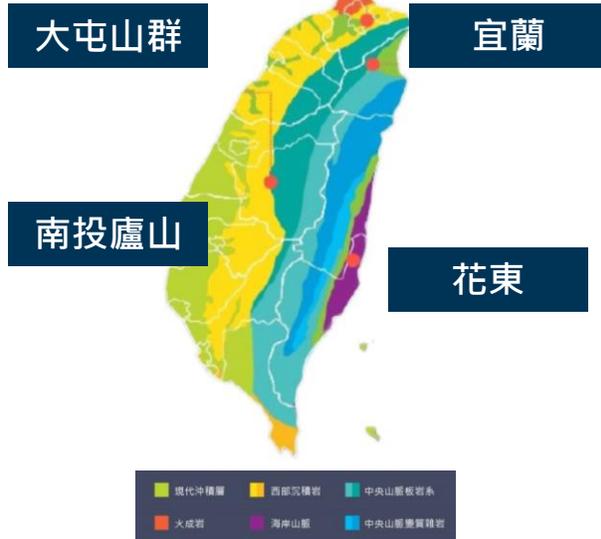
# 結論: 天然氣去碳燃氫為臺灣綠電的解決方案

1. 可減少二氧化碳排放，協助我國達到2050淨零排放政策目標。
2. 為一穩定基載電力來源，並將歸為綠電。
3. 副產品碳黑(粉)為重要工業原料，可獲益並藉此降低發電成本。

# 12.5 KW天然氣發電機與去碳燃氫反應爐並聯減碳10% 示範



### 地熱潛勢區域、發電潛能？



- 淺層約1GW，深層超過30GW
- 裝置容量有機會達8GW，發電量超過450億度

### 優勢及發展利基

- 自產、再生，且為基載電力(RE-100認可)，可提供大量的、穩定的無碳電力
- 臺灣地熱蘊藏豐富，深層地熱潛能高(深度>3km)
- 國際間紛紛投入**增強型及先進型地熱系統(EGS/AGS)**技術研發(註：Enhanced/Advanced Geothermal System, EGS)

### 既存限制及挑戰

- 初期鑽探投資風險高
- 鑽井探勘能量有限
- 現存法令政策限制，影響廠商大規模開發意願

### 政策建議

- 須發展**精細探勘技術**
- 須發展**取熱發電技術**
- **制定地熱專法**，以強化推動誘因，如獎勵國外專業鑽探團隊來臺

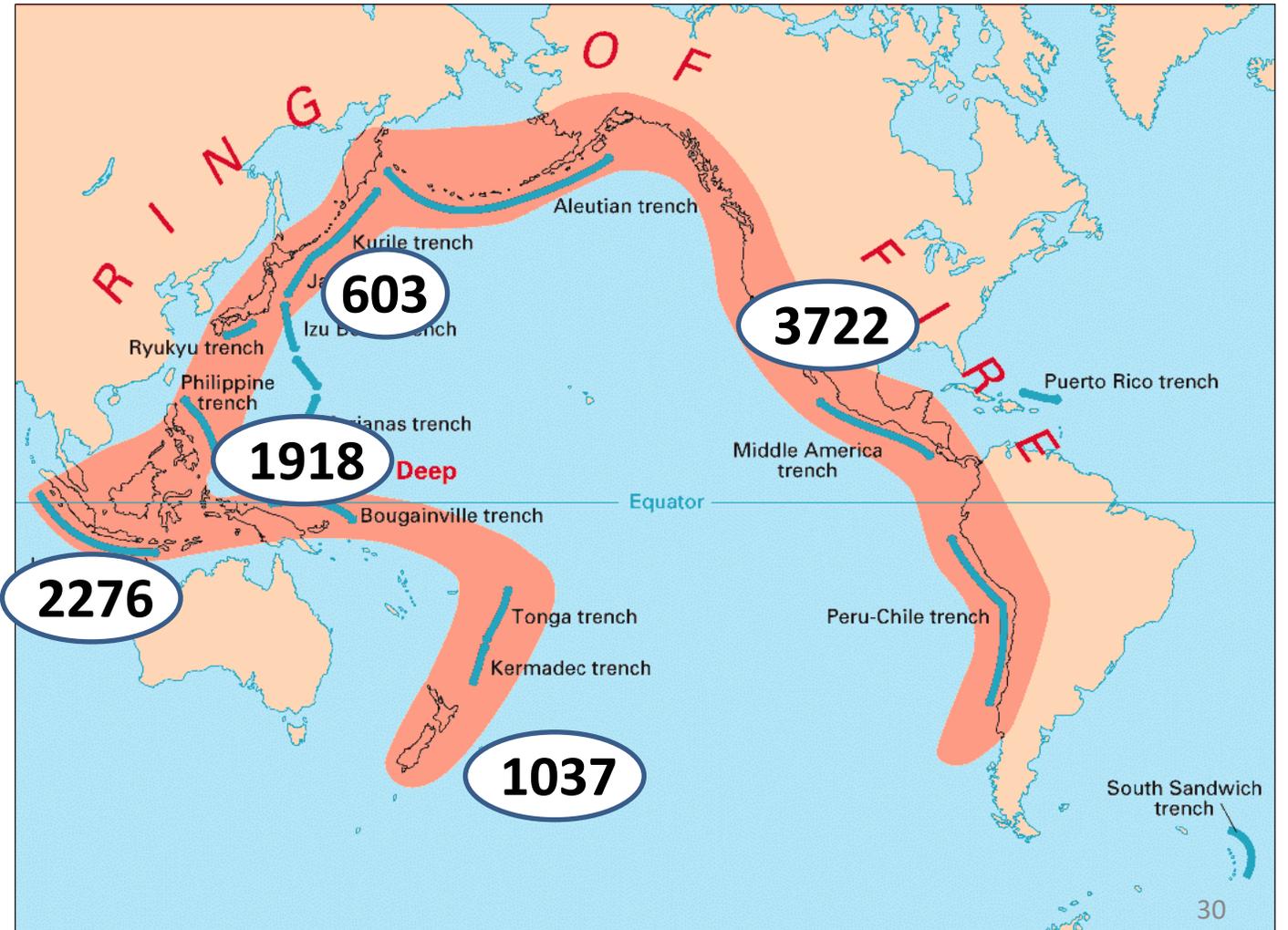
# 宜蘭地區地熱潛能探勘及精細場址調查

目前現況：台灣現僅有一座地熱發電廠（4MW）；  
遠不如鄰近太平洋火環的日本（603MW）及菲律賓（1918MW）

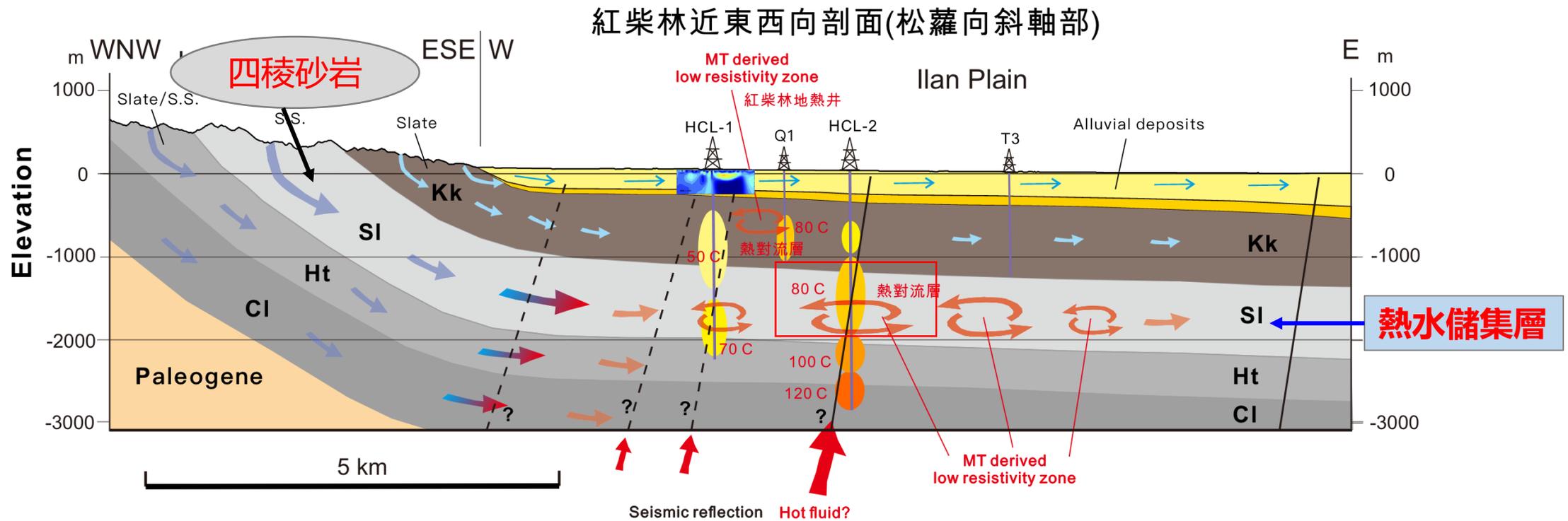
宜蘭清水地熱電廠



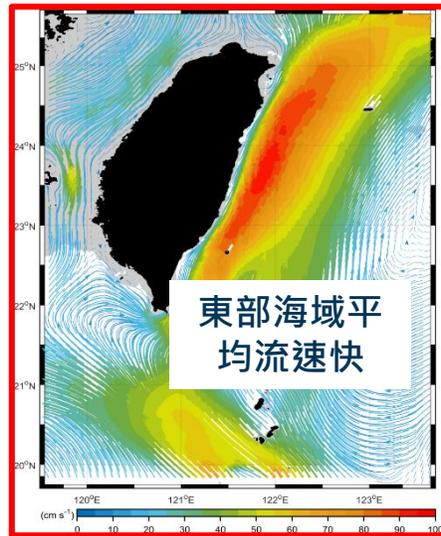
李建成  
中研院地熱研究團隊  
Nov 2022



# 地下地質探查：顯示紅柴林的「淺層熱水儲集層」集中在四稜砂岩中，1.5公里達80-100攝氏度



## 海洋能潛能區域、發電潛能？



- 海流超過4GW，溫差超過2GW
- 裝置容量超過3GW，發電量超過200億度

## 優勢及發展利基

- **自產、再生**，可提供大量的**無碳電力**
- 臺灣東岸水深，又為**黑潮流場最強最穩定**之海域，適合發展海流發電、溫差發電，條件優於鄰國(日本/菲律賓)
- 國際間紛紛投入**海洋能發電**技術研發，技術發展迅速

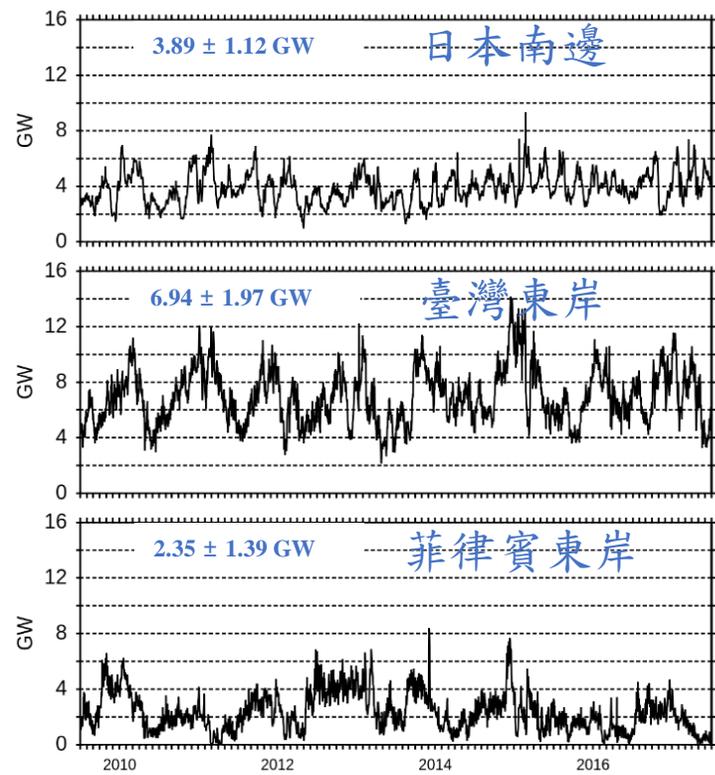
## 既存限制及挑戰

- 須**選擇合適場址**進行地質條件調查
- **渦輪發電機錨繫及電纜輸送技術**待開發
- **海事工程仍有挑戰**(深海、地震)

## 政策建議

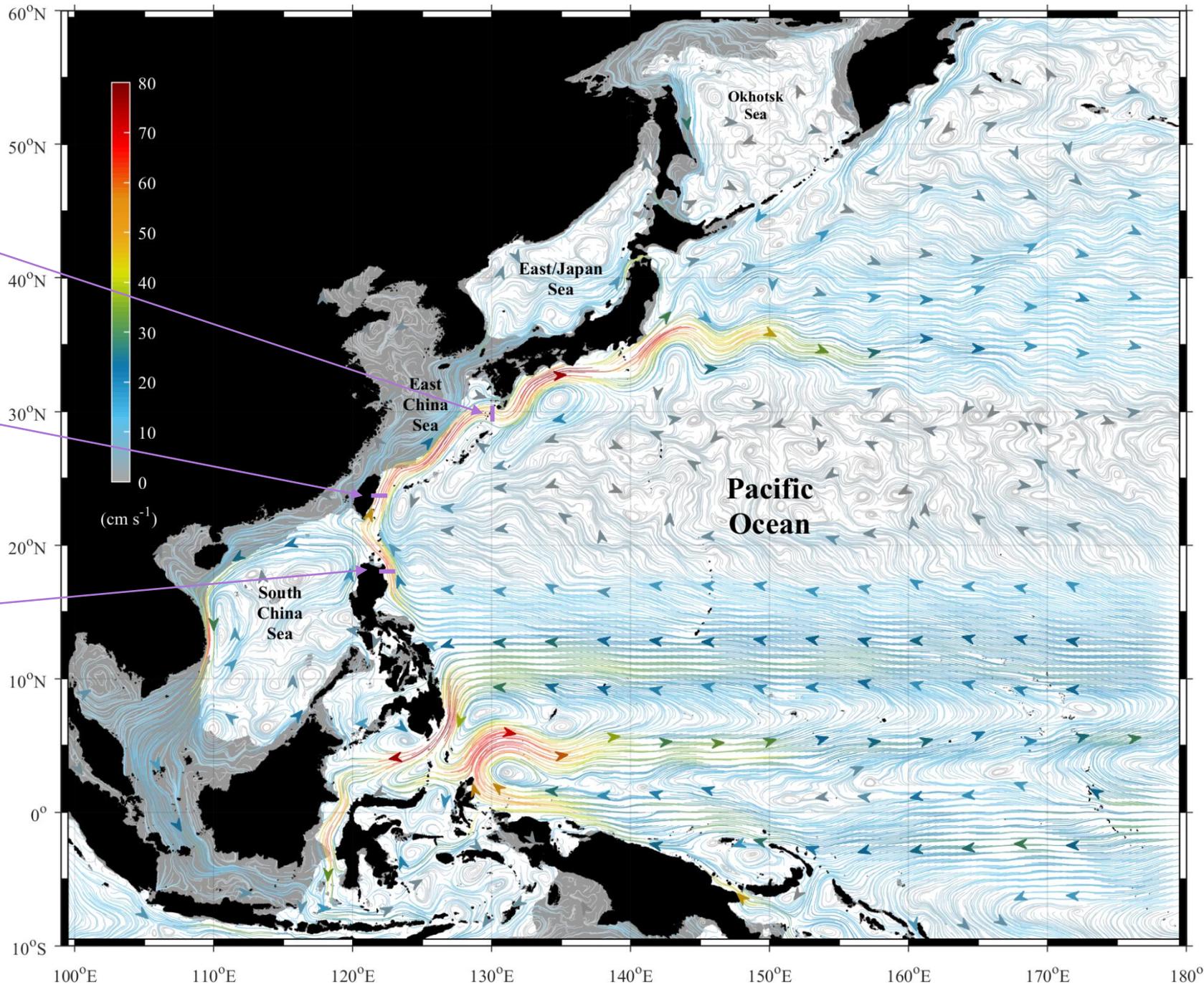
- 須進行海洋能潛能區位的**精細水文及地質調查與探勘**
- 須發展海洋**發電及電網併接技術**
- 須推動如碼頭空間規劃等之**基礎建設**以提高誘因

# 發電潛能隨時間之變化

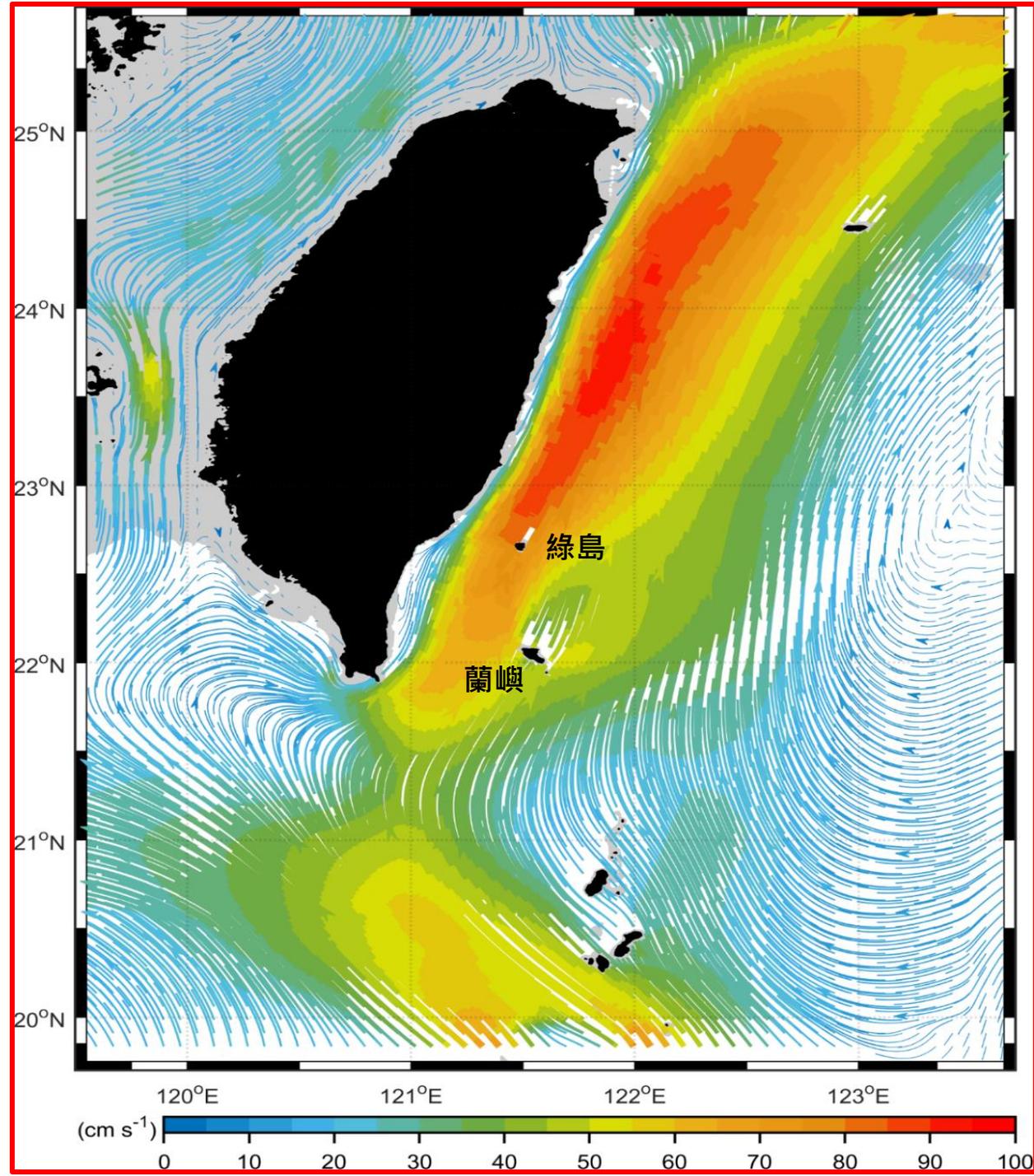


資料來源：環變中心海洋數值模式

- 臺灣東岸的黑潮流速.流向最穩定, 發電潛力為鄰近國家(日本、菲律賓)的1.5-2.5倍

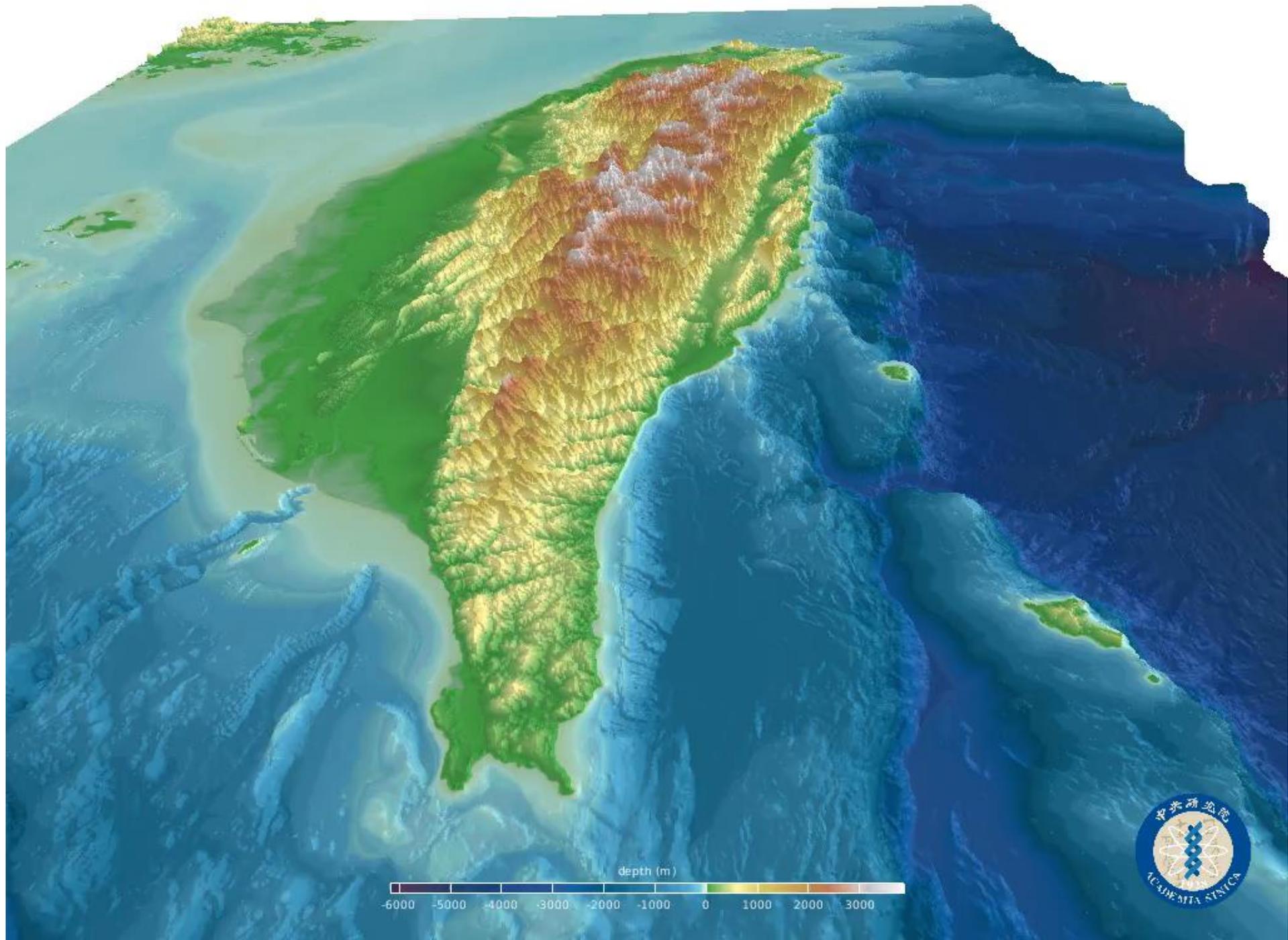


資料來源：ARGO drifter trajectories (全球浮標觀測資料)



	風力發電	黑潮發電
密度	1	800
運行效率	30~40%	50~70%
流速、流向	變動	穩定
渦輪機	商轉	試商轉





# 2019-2022黑潮發電實海試驗機組(20kW)

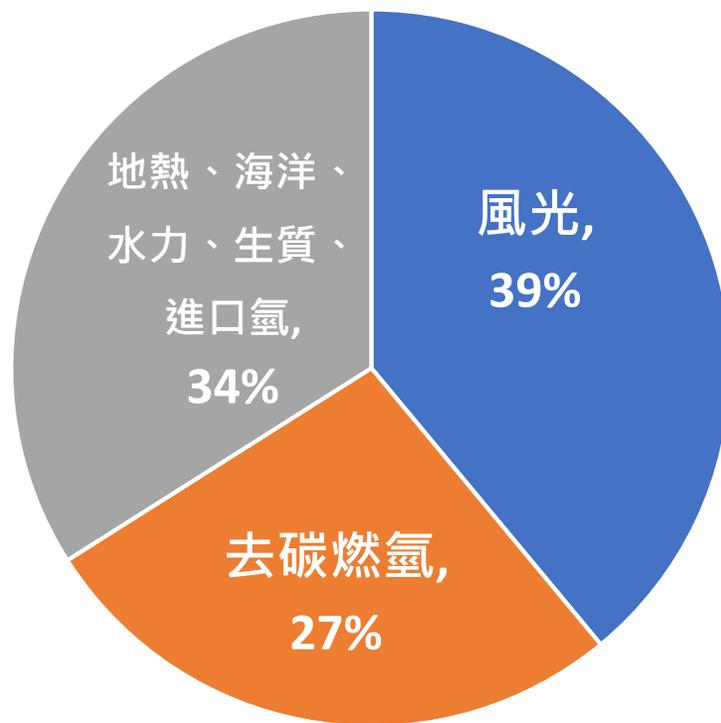


# 一個零碳、穩定的電力結構

## 電力需求

- 原有直接燃燒能源電氣化50~90%的情況下，電力需求便須**3,900~4,900**億度，此數值尚未考量其他社會經濟發展因素
- 若未來電力成長率增至2.5%以上(用電需求約為**5,876**億度)，則須要積極增加風力及太陽光電之裝置容量，加上配套儲能裝置，亦或是更積極的抑制電力需求

## 2050年發電占比



## 電力可供給量

- 本建議書初步估算我國可供給之無碳電力平均約為**5,865**億度
- 電力有三主力，既可分散風險，又有助於電網網定與社會接受度

- 各項淨零科技是淨零排放轉型關鍵，但「經濟與社會促成因素」更是不可或缺

## 經濟措施建議

- 儘速推動**碳稅費**之實施，同時養成**排碳付費**之觀念
- 完善收取碳稅費後之**資金有效運用與分配**機制
- 促使金融機構善盡**綠色責任**投融资
- 強化**循環經濟**法制環境與政策誘因
- 重新設計**電價**計算公式使電價合理化

## 社會措施建議

- 完善治理框架促成**公私協力**，將**零碳**永續理念紮根於**教育**，提升社會對**永續價值觀**的認同
- 建立**公民參與及社會溝通**機制，決策過程需納入社會需求與利害關係人意見
- 建立**公正轉型**機制與相應**資源配置**，照顧受轉型影響較巨的可能群體

# 全民如何支持減碳？

- 支持減碳科技研發
- 支持合理碳稅費
- 支持合理電價

感謝聆聽