

## 本月專題

### 淺談最終消費跨部門耦合(Sector Coupling)之氫能應用

邱凡珩<sup>1</sup>

#### 摘要

在各國努力達成巴黎協定減量目標，以及全球風能與太陽能等變動型再生能源(Variable Renewable Energy, VRE；以下簡稱 VRE)<sup>2</sup>發電占比提高、VRE 成本呈下降等趨勢下，跨部門耦合(Sector Coupling)被視為可促進最終消費部門間能源系統整合，並為最具成本效益方式協助達成部門脫碳的策略之一。跨部門耦合係藉由 VRE 轉化成各式能源，來減少各部門對化石燃料使用的一種能源系統重塑。本文初步觀察跨部門耦合策略在 VRE 占比提高後所扮演的角色與目的，而其中多數部門耦合技術仍處於研發階段。這些政策與能源市場的設計，可供我國在再生能源發展不同階段上的參考評估方向。

#### 一、前言

根據國際再生能源總署(International Renewable Energy Agency, IRENA) 2018 年報告指出，若要達成巴黎協定(Paris Agreement) 2050 年全球平均溫度升幅控制在工業革命前 2°C 之內的目標，則需要積極提升再生能源在電力部門占比，且太陽光電和風力發電<sup>3</sup>須供應其中 60%以上的電力。

此外，圖 1 「2015 年全球各部門能源消費之二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放」

<sup>1</sup>財團法人台灣綜合研究院 副研究員。

<sup>2</sup>此變動型再生能源是指太陽光電和風力發電。

<sup>3</sup>太陽光電和風力發電(Variable Renewable Energy, VRE；以下簡稱 VRE)具間歇特性，亦即會出現生產過剩，或瞬間減少、甚至瞬間驟降到零的情況，嚴重時會影響供電穩定性。

顯示，電力部門、運輸部門、以及工業部門能源消費之 CO<sub>2</sub> 排放比例最高，分別是 38%、22%、和 19%。隨著全球再生能源在電力部門比重逐年增加，電力部門可藉此來逐步改善排放問題；但是由於運輸、和工業部門仍相對依賴化石燃料，因此除了積極推動這 2 部門電氣化之外，其餘無法電氣化部分(運輸部門約占 8%和工業部門約 19%)，可透過再生能源生產的氫氣來解決，例如工業部門用氫氣替代化石燃料的使用。

上述電力、運輸、和工業部門能源系統的脫碳(decarbonising)模式，即為「跨部門耦合(Sector Coupling)」。跨部門耦合概念為針對最終消費部門電氣化，提高其再生能源的使用比例，同時強化其平衡 VRE 供需差距，提升電力系統彈性的功能；並且透過「電轉氣(Power to Gas, P2G)」技術整合電力和天然氣的供應。本文將最終消費跨部門耦合區分為直接電氣化和間接電氣化等 2 種類型來做說明：(1)能源需求的直接電氣化，即直接將再生能源從電力部門引向最終能源消費部門，如建築供熱。(2)間接電氣化，例如透過 P2G 技術產生能源載體，亦即利用再生能源電力轉化為氫氣，將氫氣提予工業部門替代其化石燃料的使用，或者以能源載體型態發揮儲能功能。國外許多研究顯示，跨部門耦合可降低能源轉型的成本。跨部門耦合概念如圖 2 所示。

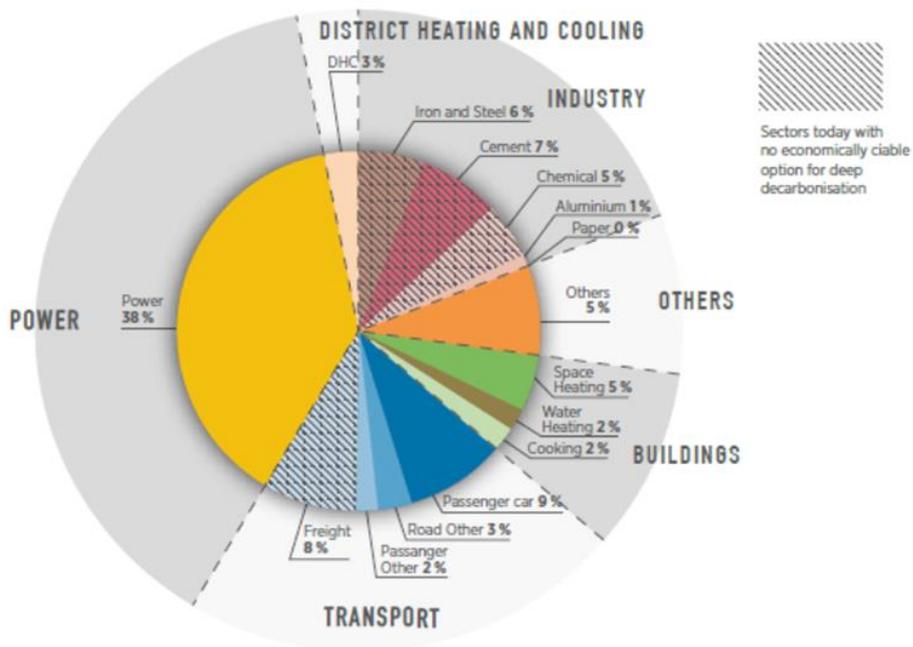


圖 1、2015 年全球能源相關 CO<sub>2</sub> 排放量(按行業別)

資料來源：IRENA2017(a)。

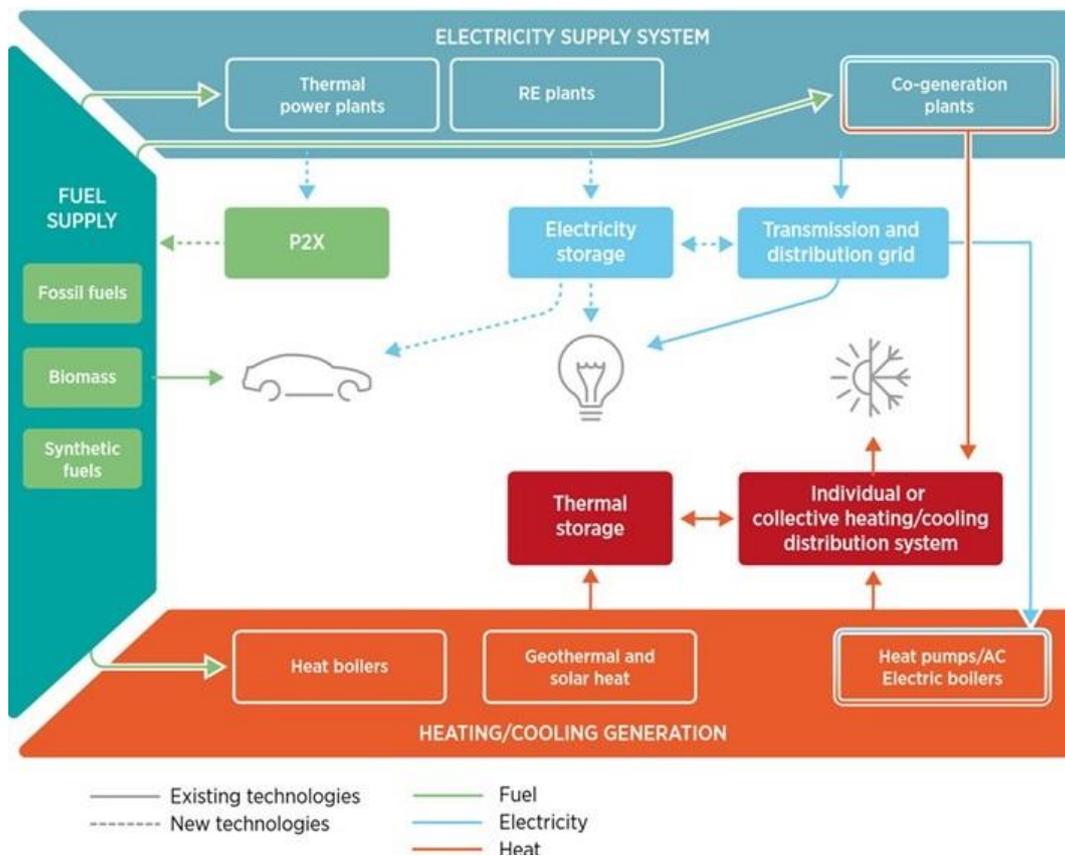


圖 2、跨部門耦合

資料來源：IRENA(2018)。

## 二、跨部門耦合與最終能源消費部門脫碳

圖 1 顯示各部門目前可透過直接電氣化脫碳的潛力比例(無網底部分)，例如在建築部門(供熱)可用電熱泵替代化石燃料爐設備；在運輸部門，推動電動車和氫燃料汽車。但工業和運輸大貨車部分，因為主要採用化石燃料，尚無法直接電氣化，則可以透過由再生能源電力生產的能源載體(如氫氣)取代部門中化石燃料的使用(即 P2G 的間接電氣化模式)，實現部門脫碳。各部門脫碳模式分述如下。

### (一)建築部門(供熱部分)

許多國家正推動供熱電力以再生能源為主要來源，或將產自再生能源的氫氣輸入天然氣輸送管線供暖，來減少因天然氣消費而產生的排放。

**1.熱泵電氣化：**多數國家建築供熱是以化石燃料為主要來源，來自天然氣、石油、煤炭、或透過生質燃料(主要是木材)，顯示供暖是二氧化碳排放重要影響因素之一。而熱泵是一種吸收大自然中的熱能或廢熱，將熱能用於加熱的設備，屬於再生能源利用技術的一種，在應用上不會受到日夜與天候的影響。因此由推動家戶裝置熱泵，可減少加熱所產生的碳排放。此外，還可以藉由再生能源電力驅動的熱泵來儲能，亦即在太陽光電與風力發電過剩時，將多餘電力轉成熱能儲存以供日後使用。

**2.供暖電氣化：**利用再生能源電力產生的氫氣，依不同比例<sup>4</sup>引入天然氣輸送管線取代其中部分的天然氣，來減少建築部門供暖設備因使用天然氣而造成的相關排放，並實現建築供暖的間接電氣化。由於氫氣可以使用現有的天然氣基礎設施，可

<sup>4</sup>氫氣與天然氣的混和比例，依據各國天然氣管線乘載量而有所不同，目前仍在進一步研究。

避免相關管路建設升級或擴建費用，目前歐盟國家如比利時、丹麥、德國、荷蘭已開始推動。長期來看，國外研究指出<sup>5</sup>在天然氣管輸送管線引入氫氣，被認為是一種能夠儲存大量再生能源的方式，未來有望藉此模式儲存大量再生能源電力，來平衡如太陽能充足的夏季和供暖能源需求最高的冬季之間的供需差距。

## (二)交通部門

運輸部門仍然很大程度上依賴化石燃料，因為化石燃料易於運輸和儲存。使用低碳電力是減少該部門溫室氣體排放的選擇之一，其解決方式包括推動「燃料替代」和「低碳電力」。前者是透過法令要求能源供應商及交通運具，使用的燃料需要有一定比例來自再生能源或生質燃料；後者是試圖把再生能源從電力部門導向運輸部門如電動車的推動。

- 1.陸運：**近年來正在發展的燃料電池車(Fuel Cell Vehicle, FCEV)，以使用再生能源生產的氫氣作為燃料的發展最被看好，因為它具有續航力佳和低污染等特性。而相較於一般電動車(EV)充電時間冗長，氫燃料電池車的能源補給(加氫)時間相對較短，因此被視為未來最具潛力取代傳統汽車的產品之一。
- 2.航空與海運：**在航空方面，目前已有航空公司採用生質燃料飛行的案例，但由於生質燃料價格比化石燃料高出許多，並且受限於農作土地，要達到足以影響航空業減排的規模，需要極多土地來種植可轉化成生質燃料的農作物，因此長遠來看並不可行。此外，還有由利用再生能源生產的液態燃料(如液化氫)來替代化石燃料的研究，但其相關技術仍待更進一步研發。在海運方面，一般蓄電電池已開始應用於短程運輸(例如輪渡)，

---

<sup>5</sup> IRENA(2018)。

而氫燃料電池的應用還處於示範階段。在長程運輸部分，由於再生能源生產的氫燃料電池續航力較一般電池佳，因此應會較一般電池更適合應用於長途運輸，後續有待觀察這方面的進展。

### (三)工業部門

化石能源(煤炭、石油和天然氣)在工業中扮演雙重角色，不僅可作為能源(如高位熱能)，又可作為工業製程過程的原料(如化學和塑料工業的石油和天然氣；鋼鐵生產的煤焦)。

- 1.鋼鐵：**鋼鐵生產商是主要的工業碳排放者。傳統上，生鐵和鋼鐵生產使用高爐中的煤焦作為能源和還原劑，以從礦石中提取鐵。而目前有鋼鐵廠開始使用氫氣作為能源和還原劑。
- 2.煉油化學工業：**氫氣在煉油和化學工業中可以替代石油或天然氣。
- 3.鋁生產和鋼鐵回收：**鋁生產和鋼鐵回收是大量電力使用產業，可透過在太陽光電和風力發電生產過剩時提高其用電需求量，對提高電網的穩定性做出貢獻。

## 三、應用跨部門耦合之前提條件與面臨之挑戰

(一)前提條件：隨 VRE 發電占比提高，須協調整合各部門能源系統，以提升電力系統彈性。

由於 VRE 發電多寡容易受到一天中的時間、季節和天氣的差異而變動，進而影響電力系統穩定性。因此可採用跨部門耦合策略，協調整合電力、建築、運輸和工業等各部門的能源系統，利用這些部門的儲能型式如蓄熱或電動車電池儲存，提供 VRE 供需間平衡的機會，以提升電力系統彈性。

## (二)面臨之挑戰

1. **氫氣生產成本高、效率低**：由於再生能源前期成本高於化石燃料成本，將進一步使得以再生能源電解製氫的生產成本過高。此外在 P2G 過程中，將會造成近 1/3 能源損失，如何有效降低其損失效率仍在研究發展階段，離有效使用氫氣尚有段距離。
2. **再生能源價格缺乏競爭力**：由於化石燃料價格並未確實反映其使用後所造成碳排放的外部性問題，使得相對於化石燃料價格，氫氣價格較高，再生能源難以與化石燃料競爭。
3. **氫氣混和天然氣比例有限**：天然氣管線僅可在一定比例內加入氫氣，影響使用率。目前德國在實驗室條件下，氫氣引入天然氣管線最多僅可達到 30%。

## 四、結語

跨部門耦合可在 VRE 產量達高峰時，將過多的 VRE 電力引入到最終消費部門轉化為能量儲存；並在電力供給不足時，將儲存能量轉變成電力因應。隨著國內 VRE 占比逐年提高，選擇一個適當處理 VRE 間歇性問題的策略益顯重要。針對未來若我國考量採取跨部門耦合策略來作為再生能源發展規劃方案之一，下列短、中長期考量的方向，可供作參考。

**(一)短期應先投入相關技術研究與創新發展**：實現各部門脫碳目標，必須採用一系列既有和創新的技術，建議在初期前置作業上，先行投入氫能源相關技術研究和創新發展，以使各方案在經濟上具可行性。

**(二)中長期應著重於相關基礎設施建構與擴大技術應用**

1. **擴大電力製氫的技術使用，以達成規模經濟效益：**將再生電力製氫技術，在現存管道設施無須大幅度興建前提下，盡可能的擴大 P2G 的技術使用規模，以達規模經濟效益，來降低生產成本。當規模大到一定基礎後，再衡量相關基礎設施擴建的必要性。
2. **考量將化石燃料價格反映其外部成本，使氫氣具價格競爭力：**考量氫氣價格過高，仍無法與汽油相競爭，若未來氫能利用為我國能源轉型規劃主要方向之一，建議國內化石燃料價格應納入化石燃料使用所造成的外部成本，使得化石能源使用成本增加，如此才有可能提高氫氣使用在價格上的競爭力。
3. **取得人民的共識與支持：**未來若想成功的推動氫能社會，居民的參與和共識是不可或缺的要素。因此建構居民參與建設氫能社會的機制，來求得公眾的廣泛支持是必要的。

## 參考文獻

1. European Parliament (2018), Energy Storage and Sector Coupling—Towards an Integrated, Decarbonised energy system.
2. IRENA (2017a), Accelerating the Energy Transition through Innovation , International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
3. IRENA (2018), Renewable Energy Policies in a Time of Transition, April.
4. IRENA (2018), Hydrogen from Renewable Power : Technology outlook for the energy transition, Sep.