

綠氫： 平衡之要



擴大氫能 的規模 同時保持 電網穩定 及可控的成本

序言

Mika Kulju, 丹佛斯集團傳動事業部總裁

全球氣候變遷的討論度日益熱烈。氫能作為一種新興能源載體，除了引發各界激烈的討論與爭議外，也是全球各地媒體熱議的話題。雖然有些人積極推崇這種「奇跡燃料」，但也有人提出警告並稱之為代價高昂的雙面刃，將無法擺脫對化石燃料的依賴。

為了因應氣候變遷，企業正積極尋求實踐永續的應對之道，但在時間緊迫，問題又錯綜複雜的情況下，若倡議者希望尋找靈丹妙藥，也不難理解。同樣地，我們不難理解為何關於氫氣效能的爭議使其成為綠色轉型中最熱門的話題之一。

但單一的解決方案和兩極分化的辯論讓我們無法實現淨零排放。綠氫將在擺脫化石燃料的轉型中發揮關鍵作用。目前，氫氣的使用仍集中在傳統應用領域，我們必須在重工業和長途運輸等難以減排的行業中加速氫能應用。好消息是，我們已經掌握了降低綠氫生產成本所需的技術。

正如我們在丹佛斯《影響力系列白皮書》第四期所述，為了將全球平均升溫控制在1.5°C以內，我們必須採用再生能源技術取代化石燃料技術。歷經多年反覆辯論無果後，這個事實最終在阿拉伯聯合大公國杜拜舉辦

的第28屆聯合國氣候變遷大會(COP28)上得到認可。198個締約方同意"逐步淘汰所有化石燃料，使全球能夠在2050年前實現淨零排放。"¹

關鍵在於，擺脫化石燃料的歷史性決議意味著，**我們必須放棄傳統技術和系統，改用充分電氣化的能源系統。**

COP28消息令人十分鼓舞，儘管能效、電氣化以及採用再生能源的作用頗大，卻只能讓我們達成部分的淨零目標。若要補上能源轉型的最後一塊拼圖，需要依靠可替代的低碳燃料，讓最難減排的產業實現脫碳目標。要應對這個挑戰，氫能是關鍵。

低碳氫能是實現脫碳的重要途徑。當再生能源發電供過於求時，用於儲存多餘電力。同樣地，如果使用再生能源製氫，氫能可以間接使農業、航空、航運、重工等產業提前數十年實現電氣化目標。

儘管綠氫的應用前景看好，但市場對再生能源的需求量也很大。事實上，到2050年，氫氣生產將需要目前總用電量的一半以上。^{2、3、4、5}

因此，**在不耗盡資金或影響能源網絡的情況下，就必須高效地生產氫氣並且明智地使用它。**這包括將現有的灰氫生產設施改造為綠氫所用。

在本文中，我們提出平衡且系統化的氫能發展方式。我們提出了一套原則，使政治家和其他關鍵決策者能夠有效地擴大氫氣生產規模，且避免再生能源生產或者財務失控的風險。透過降低整體能耗、高效製氫、聰明用氫，我們可以幫助當前全球高碳排產業和製程實現減排目標。

氫能也不是萬靈丹，如同其他環境優化技術一樣，我們需要一個全面且具成本效益的發展路徑。然而，毫無疑問地，氫能將會在綠色轉型中發揮關鍵作用。我們已經掌握了快速、經濟高效、永續的氫能技術。現在需要做的，就是停止爭論和糾結，開始擁抱未來機遇。

「綠氫將在擺脫化石燃料的轉型中發揮關鍵作用。好消息是，我們已經已經擁有了降低綠氫生產成本所需要的技術。」

《影響力系列白皮書》第五冊採納了可靠來源的證據和資料，闡述了氫能在未來能源體系中的定位。

本文討論氫能和製氫時使用的術語與國際標準或法規有所不同。目前，不論電網上的電力來自於何種能源，電解產氫皆被視為「綠色」能源。利用再生能源電力進行電解製氫，其術語各異。但在本手冊中，我們將利用再生能源電力進行電解產氫的氫稱為「綠氫」，其碳強度趨近於零。本手冊將遵循國際能源署^{6、7} 和歐盟⁸ 對於透過再生能源電解產氫和配套技術的化石燃料(天然氣和煤氣化)的製氫定義，在個別論述中將其稱之為「低排放氫能」。這些術語包括「藍氫」和「綠氫」在文獻中被廣泛使用，但沒有標準定義。

特別感謝 *Mathias Berg Rosendal* (DTU管理學院能源經濟與建模專業博士生) 為本文初稿提供寶貴意見和建議。

本文僅代表丹佛斯表達的觀點。其完整性和準確性不應歸責於任何外部審稿人員或相關機構。

丹佛斯《影響力系列白皮書》第五冊由丹佛斯集團傳播與公共事務分析團隊撰寫。

如有任何問題或建議，請聯繫丹佛斯集團傳播與公共事務分析團隊負責人 Sara Vad Sørensen: sara.sorensen@danfoss.com。

只有兩分鐘？

綠氫關鍵要點



首先需實現電氣化、減少能源需求

綠氫設備能耗大、成本高昂，而製氫所需的再生能源，並不是免費資源。在推動氫能源應用之前，我們必須實施所有可行的電氣化和能效措施。**提高能效是最經濟的淨零之道。**



高效製氫

到2050年，製氫能耗將超過目前電力總需求的一半^{9、10、11、12}。因此，如果我們要限制能源浪費，提高電氫轉換效率至關重要。此外，製氫時間也很重要。如在電網中有餘裕(且廉價)的再生能源時製氫，就可以降低電網成本和壓力。最後，製氫地點也很重要。通過將電解廠設置在現有或規劃中的區域能源系統附近，我們可以將多餘的熱能重新用於加熱水、住宅和其他建築物，而不是讓能源白白浪費。同時，電解廠還必須規劃在鄰近水源清潔度較高的位置，同時又不危及其他用途如飲用和農業的用水。



智慧用氫

雖然氫能供應預計會大幅增加，但其高耗能的生產過程意味著它將是一種稀缺且昂貴的資源。因此，**因此，我們必須明智而謹慎地使用氫能。**只要設備和製程能夠電氣化，就應直接電氣化。氫能目前仍主要於傳統產業。我們必須針對重工業、長途運輸等難以減排的產業加快速擴大氫能使用。

氫能釋要

何謂氫能？

氫是宇宙中最常見的化學元素。雖然無色無臭無味，卻是構成所有維持人類生命的主要物質，包括我們喝的水、溫暖我們的太陽，甚至於人體本身。但是，儘管氫經常被稱之為「宇宙的基本構成要素」，卻很少以自由狀態（氣態）的形式出現。實際上，在這種狀態下，其具備能讓源系統深度脫碳的力量。

為何需要氫能？

除了其宇宙意義外，氫在地球上發揮著重大作用。首先，作為高效能量載體，氫可以儲存能量。第二，氫可以燃燒或轉化為電燃料（e-fuel），這是一種不使用石化燃料生產的合成燃料，可以作為甲醇或煤油等傳統石化燃料的低排放替代品。如果生產和消費得當，它們對環境的影響微乎其微，因此在推動綠色轉型方面具有很大潛力。

鋼鐵、水泥、長途航空等產業的能源強度非常高。實現這些產業電氣化並使用可再生能源為其供電仍然遙遙無期，面對氣候危機的緊迫性，我們必須探索所有可能的機會。在高強度、高溫作業的直接電氣化技術尚未開發完成的階段，通過綠氫進行間接電氣化是啟動脫碳之旅的良好催化劑。由於綠氫燃燒不排放溫室氣體，氫能在這些產業是替代化石燃料的可行方案，如果使用得當且有節制，可有力地推動這些產業脫碳。

如果氫氣是透過再生電力生產的，也被稱為綠氫，它也可以作為穩定未來再生電力電網的關鍵工具。再生能源的生產和需求是波動的，而且這些波動往往不一致。若在陽光明媚或風力充足時，但我們並未使用電燈和烤箱，這時政府需支付巨額停產補償費用給能源供應商，這可能會耗費巨額資金（詳見第15頁「歐盟和英國能源系統靈活性」案例）。但如果我們轉而利用這些過剩的能源來生產氫氣，無論是用於儲能還是直接作為燃料，我們就可以避免削減成本和電網中斷，同時促進有利可圖且高效的氫氣經濟。

正如我們所見，氫能有許多優點。但恐難成為解決氣候危機的靈丹妙藥，這是一個錯誤的希望。如下文所述，提高能效、直接電氣化以及透過高成本效益方式推廣綠氫應用對於達到全球氣候目標至關重要。

氫能各不相同

製氫有多種方式。但是，目前尚未有公認的標準能夠根據不同的製氫方式來為氫能分類。因此，難以界定每種製氫方式的碳排放量。下圖中描述了四種常見的製氫方式。其他型式的氫氣生產如白氫、藍綠氫或紫氫等並不常見，或尚處於開發的早期階段，所以不在本文討論之列。

H₂ 綠氫

綠氫是透過電解水方式生產的，過程中電能將水分解成氫氣和氧氣。只有當電力來自於再生能源時，才能稱作「綠氫」¹³。每公斤綠氫生產，碳排放量約在0.5-6.6公斤之間^{14,15}，是未來低排放氫能最有前景的來源之一。

H₂ 灰氫

使用化石燃料如天然氣、煤炭生產，灰氫通常透過蒸汽甲烷重整或煤氣化製程製備。由於每公斤氫氣生產會排放10-26公斤的二氧化碳當量，因此灰色氫氣並非綠色轉型的理想選擇。生產灰氫會排放大量的二氧化碳，佔目前全球氫氣產量的95%。每公斤氫氣生產會排放10-26公斤的二氧化碳排放量¹⁶，因此灰氫並非綠色轉型最理想的選擇¹⁷。

H₂ 藍氫

藍氫生產方式與灰氫相同，但結合碳捕獲與封存(CCS)。在最佳情況下，碳捕獲率可達85-95%，剩餘的5-15%會被排放¹⁸。藍氫被視為是低碳排氫能，每公斤藍氫生產會產生1.5-6.3公斤碳排放量¹⁹，相比之下，並非最潔淨的能源選擇。

H₂ 粉氫

與綠氫一樣，粉氫透過電解水生產而成，但利用的是核電。每公斤粉氫生產的碳排放量最低約0.1-0.3公斤²⁰。然而，核電備受爭議，容易引發多重政治考量。

電解水製程： 通往綠氫之路

傳統的製氫方式幾乎需用到化石燃料，造成大量碳排放，佔目前全球製氫總量的絕大部分。儘管有其他低碳排的製氫方式，但目前僅佔全球產量的0.1%。²¹最可行的低碳排製程是電解水製氫。

電解水，通常簡稱為「電解」，利用電能作用將水(H₂O)分解為氫氣(H₂)和氧氣(O₂)。氧氣可以釋放到空氣中，也可以捕獲後用於其他用途；而氫氣則可以儲存起來，用於工業製程，或生產化肥、燃料、熱能、電力等用途。採用再生電力電解製氫(即綠氫)，可以將氫作為最終產品，替代傳統燃料，實現脫碳目標。

氫能是許多國家氣候戰略中的關鍵要素。為實現《巴黎協定》目標，在2030年前，電解能力就要超過500GW。然而，根據目前規劃的項目，到2030年，電解槽的產能只能達到170-365GW²²。這意味著我們必須大幅提高氫氣產量，或者尋求提高能源效率的措施來降低需求。**鑒於製氫成本高昂、資源密集，最經濟的策略是首先盡可能的實施電氣化和能效措施，然後用氫能滿足剩餘(降低後的)需求。**

雖然目前電解成本高昂，但國際再生能源機構(IRENA)指出，透過降低電解槽成本，可降低高達八成的長期投資成本²³。因此，儘早投資高效的電解技術有助於降低生命週期成本。我們將在下一章節探討現有技術如何能降低綠氫的生產成本。

電解水

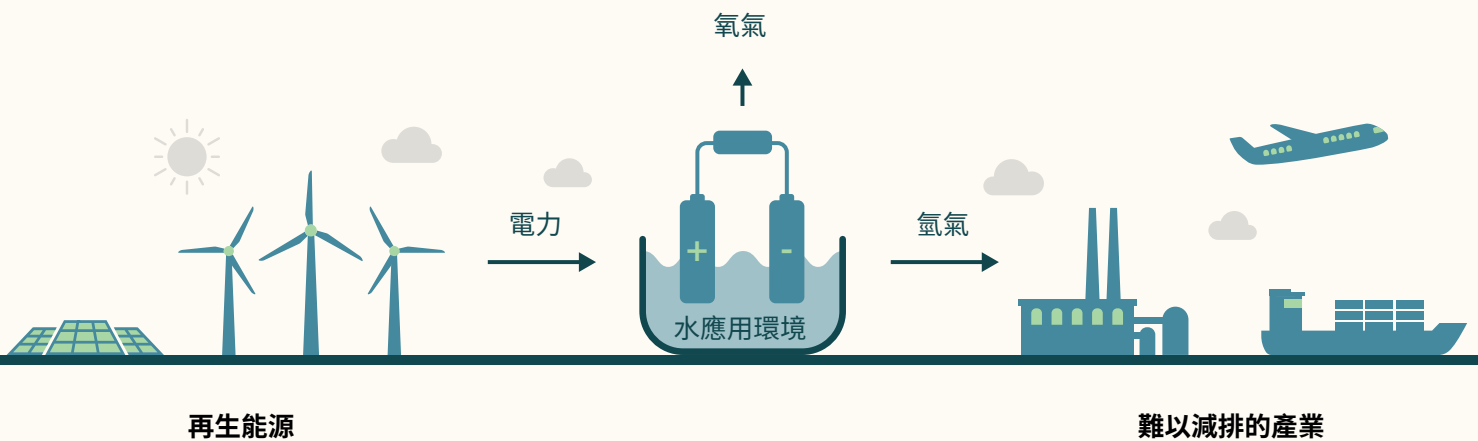


圖1:採用再生電力電解製備綠氫

我們已經擁有 降低綠氫生產 成本的必備技術

高效製氫

國際能源署(IEA)估計，在淨零碳排情境下，全球電解用電總需求將在2050年達到1.48萬TWh²⁴。這主要受到全球最大的能耗國家如美國、中國和歐盟雄心勃勃的戰略所驅動^{25、26、27}。因此，即使能夠實現能源系統各方面之能效最大化來減少氫能總需求，仍需要巨量電力才能足量製氫，實現淨零碳排目標。

如何避免製氫消耗過多再生能源，以致於壓垮能源系統呢？首先，要考慮有沒有比氫能更加經濟的替代方案，例如直接電氣化或者降低總體能源需求。其次，要儘量提高電解製程能效，最大程度減少電解所消耗的再生電力和水資源。在很多地方，二者都是關鍵的稀有資源，不能用來製氫，而需留作他用。

高效轉換

能量轉換既很簡單，又極其複雜。簡而言之，就是把能量從一種形式轉化為另一種形式，例如將風能轉換為電能、電能轉換為氫能，或者把天然氣轉換為熱能。然而在實踐中，成功的能量轉換堪稱工程學的壯舉。如果我們要實現能源系統脫碳，需通曉能量轉換的科學原理和作法。

每當能量形式改變，總會在轉換過程中損失一部分能量。大多數情況下，這種能量損失以熱量的形式出現(參見第17頁「製氫過程中餘熱的利用」)。這往往是因為能量轉換設備的低效所致。例如，為了讓汽車在街上行駛，就需要把電力、汽油等能源轉化為另一種形式(例如動能)。但部分原因是汽油發動機產生的餘熱較多，因此能效較低。實際上，汽油發動機的能量損失率平均為64-75%；相比之下，電動車僅為15-20%²⁸。

此時，電動車能夠更有效地轉換能源，從而使用更少的能源達到相同的結果。

這一類的熱力學基本原理也適用於製氫。的確，各種製氫方式的效率有高有低。當我們繼續在全球範圍內快速擴大氫氣生產規模時，通過最大限度地提高轉換效率來最大限度地減少能源損失將至關重要。目前，**電能轉化為氫能會產生大約30%的能量損失。²⁹ 但我們可以採取相關措施，利用現有技術將這種能量損失降至最低。**針對製氫方面，存在著一個完整的技術生態系統，例如用於冷卻和泵送的技術。在所有步驟中優先考慮能源效率可以產生重大影響，讓綠色轉型的速度更快、更便宜。

電解槽的效率對於降低生產成本和優化產量至關重要。新型電解槽設計可以透過內部冷卻功能顯著提高效率，這種設計的靈感來自於成熟且廣泛應用的熱交換器技術。為了使用氫氣，必須對其進行加壓。這是另一個需要大量能源的生產過程。在電解過程中同步加壓，而不是在氫氣離開電解槽後再進行額外的步驟，是實現高效綠氫生產的必要措施。在製氫製程中，這個環節的能耗也很大。通過使用高效的高壓泵對電解槽的核心模組（即水分解裝置）加壓，可以顯著提高電解效率。

在本文第11頁名為「高效穩定的交直流轉換」案例中，詳細探討了提高轉換效率的另一個關鍵步驟。

製氫用水

製氫需要大量用水。在水資源短缺的地區，如果規劃不當，製氫可能會加劇供水壓力。³⁰

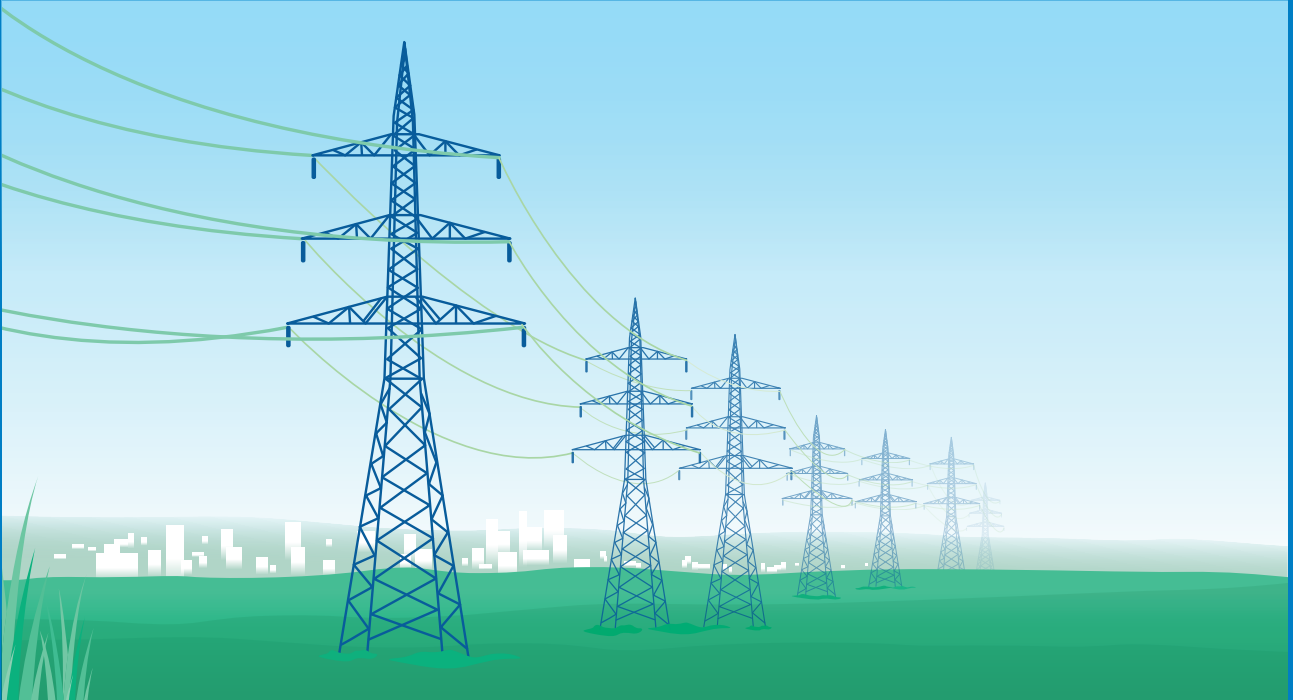
在灰氫的生產過程中，例如蒸汽產生和冷卻，需要消耗大量水資源；而藍氫生產則需要額外的冷卻水來進行碳捕獲與封存（CCS）。綠氫的生產過程是將水分解成氫氣和氧氣，同時也需要大量的冷卻水。儘管各種製氫技術皆需要用水，**但是綠氫用水量少於藍氫，且有時甚至少於灰氫。**實際上，生產每公斤氫氣，藍氫需消耗24-49公升的水，灰氫需消耗18-31升的水，綠氫需消耗18-22公升的水。³¹

儘管電解製氫所需的用水量比其他形式的氫氣生產更少，但當地的水資源短缺是個不容忽視的問題。這在經常遭受乾旱且淡水資源有限的地區尤其重要。由於電解槽冷卻可能會對當地水資源造成巨大壓力，因此在規劃氫氣生產時需考量當地的需求和資源可用性。然而，某些冷卻技術，例如乾式冷卻，可以作為減少氫氣生產過程中用水量的另一種方式。

透過精心規劃綠氫生產佈局與採用最先進的技術，可以緩解綠氫用水壓力並減少影響。例如，氫氣生產可與海水淡化和廢水處理設施相結合，供應生活用水。海水淡化需要能源，而未來電解氫的產量巨大，因此海水淡化的能源需求也不容小覷。淨化水源的方式有很多種。其中，使用高效的高壓泵能夠大幅節能。

為了最大限度地降低綠氫生產的成本、能耗和能源需求，我們必須設法最大限度地提高氫能產業鏈中每個環節的效率。

案例：高效穩定的交直流轉換



氫氣生產未來將會對電網產生巨大的需求。因此，我們必須確保盡可能高效地製氫，避免對電網造成不必要的干擾。綠氫是由電解槽產生的，電解槽利用電將水分解成氧氣和氫氣。所有電解槽皆使用直流電 (DC)，而電網是由交流電 (AC) 供電的。直流電存在於普通電池中，電流固定往同一個方向流動，而電網中的交流電則會週期性地改變方向。這意味著需要將電能從交流電轉換為直流電才能生產氫氣。低品質的交流/直流轉換器會干擾電網中的交流電，並且需要昂貴的補償設備來恢復電力品質。

在討論氫氣生產時，這種由低效轉換器引起的電網干擾是一個日益受到關注的問題。同樣，低效的轉換器也會向電解廠提供低品質的直流電。然而，目前市場上已經有更高效率的轉換器了。這些轉換器幾乎不會對電網造成任何干擾，因此不再需要補償設備，同時還能為電解廠提供更純淨的直流電源。更純淨的直流電源使整體製氫效率可提升約1%³²。這個幅度看似不大，然而，**未來氫氣電力需求的1%實際上可滿足倫敦近四年的用電需求**。³³ 此外，省去補償設備投資和維護成本，也可以抵銷部分先進轉換器的成本。有時，更好的設備可以簡化系統，還可以提高電網的彈性。

如要實現能源系統
脫碳，需掌握**能量**
轉換的科學原理
和作法。

發揮氫能靈活性 實現減排和降本

高效的氫氣生產不僅僅關乎我們如何生產，還關乎何時生產。讓我們設想一個未來：我們在再生電力充裕時製備氫能，以便在電力稀缺時將能源回饋給電網。這絕不是科學幻想：利用氫氣生產調劑餘缺，提升能源系統靈活性的解決方案已經存在，並且隨時可以實施。

我們在一天中使用能源的方式取決於自身的作息時間。在清晨時分，多數人還在夢鄉。但當我們清醒開始新的一天時，建築需要供水，瓦斯爐需要燃氣，家電需要用電。在中午能源需求下降之後，學校和工作終於結束，家人們回到家中，這是我們對能源最渴望的時候。晚餐準備好了，衣服洗好了，電影看完了，隨著白天變成黑夜，燈光也亮了起來。入夜，人們就寢休息，能源需求也降至谷底。

這是在一個相對發達的電網中，能源需求周而復始，如何循環的一個例子。然而，在一個以再生能源運行的未來能源系統中，能源的生產也有高峰和低谷（見圖2）。當人們在漫長的一天工作後醒來或回家時，電網的能源消耗高峰期與陽光明媚或狂風大作時並不會完全一致。

能源供給和使用時間的錯配是未來能源系統面臨的主要挑戰之一。目前，即使在能源結構中再生能源佔比較高的國家，化石燃料仍被作為高峰時段的剩餘能源，這意味著我們在這些時期排放的二氧化碳，遠遠超過必要水平。同樣，我們每年要向再生能源供應商支付數億美元，讓他們在風能或太陽能過剩時停止生產。³⁴然而，透過提高靈活性，到2030年就可以讓這種損失減少25%³⁵，製氫在這方面大有可為。

氫能是提高靈活性的利器

在一個我們既不能透過化石燃料滿足高峰需求，又不能支付再生能源生產者限產的世界裡，我們必須找到新的方式來更提高能源使用的靈活性。在再生能源供電有餘裕時生產綠氫，是實現這一目標的最佳途徑之一。

我們必須在再生能源供過於求時製氫。中午，陽光最為充足，但能耗相對較低。為了平衡曲線和避免棄電，可以把過剩的再生電力輸送至電解廠用於製氫。

同樣地，如果電力需求增長超過預期，電解槽可以以驚人的速度做出反應，並暫時減產或停產。此外，從季節性來看，儘管再生能源生產高峰是夏天，但冬季的用電量更大。然而，我們可以將夏季將夏天生產未使用的再生電力以氫能形式儲存起來，在冬天電力供不應求時，這些儲備就可以被轉化回電力。然而，由於電力-氫氣-電力的轉換總返效率為18-42%³⁶，我們不應該將氫氣作為發電的標準燃料。

我們生產氫氣的時間安排確實可以決定能否以永續的方式快速擴大其規模，而不會給再生能源生產帶來不必要的壓力。

能源供需嚴重錯配

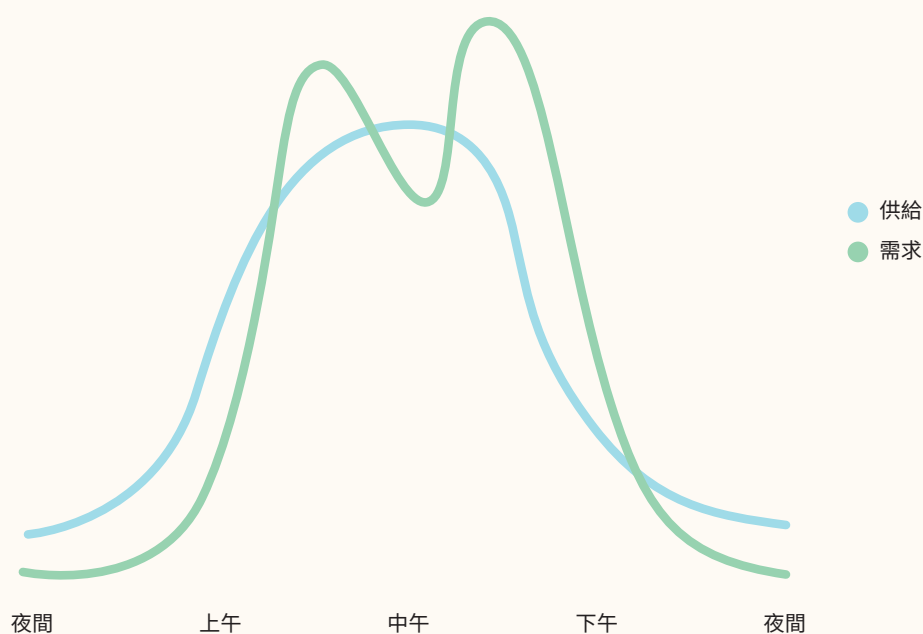
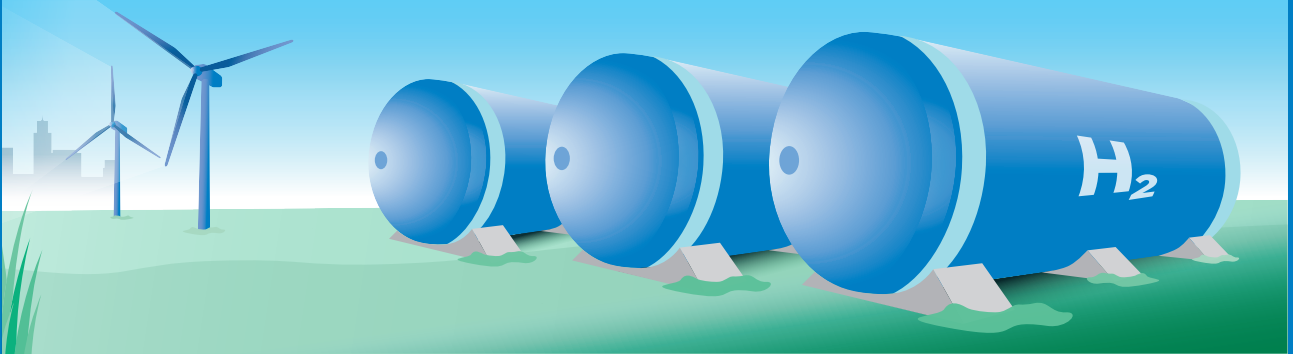


圖2: 透過在再生能源供於求的時段 (例如深夜和中午時分) 生產綠氫，我們可以避免棄電成本的發生，甚至可以在需求高峰期將氫氣作為低碳排的替代燃料。

案例：歐盟和英國的 能源系統靈活性



丹佛斯委託進行了一項研究，分析歐盟和英國批發能源市場需求端靈活性的潛力。³⁷研究發現，**如果積極並切合實際的推廣，可以創造可觀的社會和環境效益，並降低消費者的能源支出。**由於該分析沒有考慮到配電網和內部電網所節省的投資成本，以及向系統營運商出售配套服務的潛在收入，因此實際的潛力可能更大。

在分析中，**在歐洲和英國邁向靈活穩定能源系統的過程中，製氫將會是最大的平衡槓桿。**當再生電力供過於求時，既浪費了必要的資源，又可能危及電網的穩定，這時就可以啟動氫氣生產，進而以氫儲能，穩定電網運行。

在最近的能源危機中，英國和歐盟分別撥款1030億歐元和6810億歐元³⁸。面對能源危機，還有一個解決方案可以提高應對能源危機的能力：整個歐盟和英國可以推廣需求端的靈活性措施。此舉將大幅降低政府巨額補貼的需求，並為社會和消費者節省開支。**到2030年和2050年，整個歐盟和英國消費者可以分別平均節約電費7%和10%。**

靈活性也是逐步淘汰化石燃料發電的重要工具。到2030年，天然氣的年發電量可以大幅減少106TWh，約為2022年歐盟用於天然氣發電總量的五分之一。³⁹同樣地，**到2030年，歐盟和英國每年可以減少4000萬噸二氧化碳排放量，超過2021年丹麥國內的碳排放總量。**⁴⁰此外，**到2030年和2050年，歐盟和英國每年可節省的社會成本分別為105億歐元和155億歐元**，這在很大程度上包括了需求端靈活性的建設成本。2050年節省的費用中，有一部分將來自於電纜投資，預計這一項投資將減少21%。

這項研究乃基於歐盟和英國在不同場景和靈活性程度下採用需求端靈活性解決方案。更多詳情，可參考《影響力系列白皮書》第四冊「能源效率2.0：打造未來能源系統。」⁴¹

案例：氫氣作為 季節性儲能

正如每天的電力生產都有峰值一樣，季節性變化也存在。在高緯度地區，冬天需為住宅供暖；在中低緯度地區，夏天對製冷的需求會更高。同樣地，在高緯度地區，夏季生產的再生電力會更多，而冬天對電力的需求最大，這之間存在差距。

為了彌補這個缺口，我們必須考慮長期儲能方案。考量電池的成本以及容量會隨著時間而衰減，並非是有效的解決方案。長期來看，氫儲能被證明是一種更好的選擇，由於其儲能容量大，而且隨著時間的推移，能量損失非常小，單位電量成本也很低。

通過將低碳排電力轉化為氫氣，則可以氫儲電。從鹽穴到儲罐，可以採用多種可行方式儲氫。⁴² 這讓氫能成為季節性能源平衡的理想選擇。⁴³ 在排水的同時，可以發

揮鹽濃度高的優勢，透過反滲透過程發電，為了將氫氣儲存在鹽穴中，必須將鹽水從鹽穴中排出，這有助於提高氫能生產過程整體效率。

此外，目前的天然氣管道可以轉化為運輸氫氣⁴⁴。透過這種方式，可以遠距離輸送多餘的低排放電力，實現異地供能，從而建立一個相似於目前天然氣市場的氫氣市場。氫氣儲存有許多潛在用途，但對於短期儲存來說，它不像電池等其他形式那樣高效。

在電力峰值期，氫氣可能是一種經濟性與永續性選擇，因為只需要少量氫能，就可以滿足一年的調峰需求^{45、46}。現階段氫儲能成本較高，但預計未來隨著技術的發展，價格會下降。^{47、48}

長期儲能

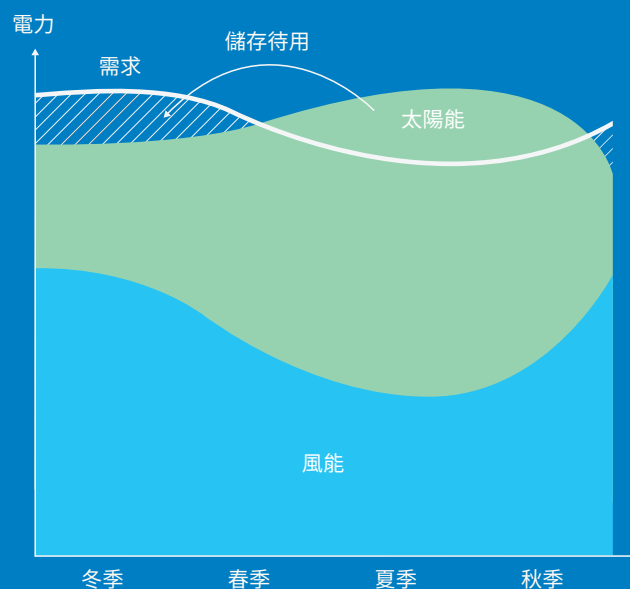


圖3: 氫氣作為季節性能源儲存的槓桿

製氫過程中 餘熱的利用

再生能源並非取之不盡、用之不竭。然而，在一個完全電氣化的能源系統中，對再生電力的需求將是巨大的。因此，需充分利用各產業中所有的可用能源，尤其是餘熱。在能源系統的各環節中，都有餘熱排放和能源浪費這種餘熱是能源效率的**沉睡巨人**，有巨大的潛力，如能有效地回收利用，可以替代大量的寶貴能源，如化石燃料和電力，從而節省資金並減少溫室氣體排放。

戰略性地開展產業耦合，是最有效的餘熱利用方式。所謂產業耦合，就是要將不同產業結合起來，以更高效、更永續的方式協同合作。產業整合摒棄各自為政，旨在促成跨產業互補，減少浪費，提升系統整體效能。它還有助於透過更多的餘熱利用等替代能源來減輕電網的壓力。

無論是綠氫、藍氫還是灰氫，大規模製氫都會產生大量餘熱（詳見第19頁案例「製氫過程中產生的餘熱」）。在本章節中，我們將探討氫氣和其他主要來源的餘熱在區域和全球範圍內減少碳排放的潛力。

餘熱的全球潛力

機器時運行就會產生熱量。想想你冰箱後面的熱量就能理解。全球各城市的超市、資料中心、污水處理廠、地鐵站和水電解設施等更大規模的設施也是如此。到**2030年，全球高達 53%的能源投入將以餘熱的形式被浪費掉**。⁴⁹此外，如果我們回收餘熱，可有效減緩氣候變遷。事實上，如果我們充分發揮餘熱的理論潛力，可使全球碳排放量減少10-19%。⁵⁰

「在我們的能源系統中，能量無處不在以熱量的形式浪費到大氣中。這種餘熱是提升能源效率的沉睡巨人。」

在能源系統中，供暖是最大的能源用途之一。在歐洲，供暖每年佔每年總能耗的50%以上，多數仍舊依靠化石燃料供暖，其中近一半來自天然氣。⁵¹ 同時，歐洲所有城市都有豐富的餘熱資源可以利用。在歐盟，每年約有2860 TWh的餘熱可供利用，其中大部分可以重複利用。⁵² 為了更直觀地說明這個數字，它幾乎相當於歐盟住宅和服務業建築對供暖和熱水的總能源需求，歐盟27國加上英國每年的需求量約為3180 TWh。⁵³

在某些國家，餘熱潛力與供熱總需求不相上下。⁵⁴ 例如，荷蘭餘熱每年高達156 TWh，⁵⁵ 而熱水和空間供暖需求每年只有152 TWh⁵⁶。在世界其他地區，情況也大致如此。例如，從中國北方工業來看，僅在供暖季

節，餘熱約為813 TWh。⁵⁷ 試想一下，全中國各行各業總共會產生多少餘熱!

除了餘熱

正如我們可以使用綠氫生產過程中的熱能和水 (參第10 頁)，而且電解過程中產生的多餘氧氣也可以重覆利用。例如，通過戰略規劃和產業耦合，可將氧氣用於污水處理設施、醫療用途或工業中，以提高熔爐和燃燒過程的能源效率。透過這種方式，我們可以充分利用製氫能源，同時限制寶貴資源的浪費。

案例：製氫過程中產生的餘熱

隨著電解技術的發展，對氫氣生產的電力需求將會很大，而且只會繼續增加(見圖4)。然而，電解會浪費大量的熱能，我們可以讓這些熱量消失在大氣中，也可以利用這些熱量來為我們的家庭、辦公室和熱水供應系統供暖。

只有明智地規劃氫氣生產，才能利用這些餘熱潛力。例如，電解廠應該臨近基礎設施，以便與區域供熱網或工業區等熱能用戶連接。事實上，目前已經切實可行。某些正在進行的專案很快就能透過區域能源系統將電解廠產生的餘熱用於住宅供暖。^{58、59}

有幾個因素會影響實際可以利用的餘熱。例如，要充分發揮餘熱潛力，就要大規模建設區域能源系統。此外，雖在各地都有熱能需求，但卻未必皆相同。然而，從電解過程中回收餘熱潛力的理論是如此巨大，以至於在規劃全球未來的能源基礎設施時，如果不考慮這一點，將是一個嚴重的政策錯誤。

在全球範圍內，如果氫氣生產設施鄰近合適的區域能源系統，理論上我們可以在2050年從氫氣電解中回收 1917 TWh的熱量，並將其重新分配作為區域供暖。

為了更直觀地說明這一點，**1917TWh的熱能相當於目前全球煤炭供暖的80%以上，是最大的熱源**。僅在歐盟，到2030年就可以回收約114 TWh的餘熱，可滿足目前德國供暖需求的兩倍之多。中國在2060年有望回收的餘熱約440-636 TWh，相當於2021年中國總製熱量的27-39%。⁶⁰

拉丁美洲的電解氫產量到2030年可達到600萬噸，其中45%產自於智利。智利需將142 TWh的電力用於電解製氫，可從中回收的餘熱約31 TWh。智利已將區域能源納入未來規劃。某份路線圖顯示了到2050年，智利40%的供熱需求可透過區域供熱來滿足，並將餘熱納入其中。⁶¹

當然，這些潛力主要來自於理論。實際潛能取決於諸多因素，例如當地的供熱需求、與區域能源系統的距離以及未來電解效率。然而，這些潛能也顯示出如果能在能源系統的長期規劃中將區域能源和餘熱納入量，則可為實現升溫控制在1.5°C之氣候目標做出重大貢獻。

製氫將在2050年成為用電需求最高的產業

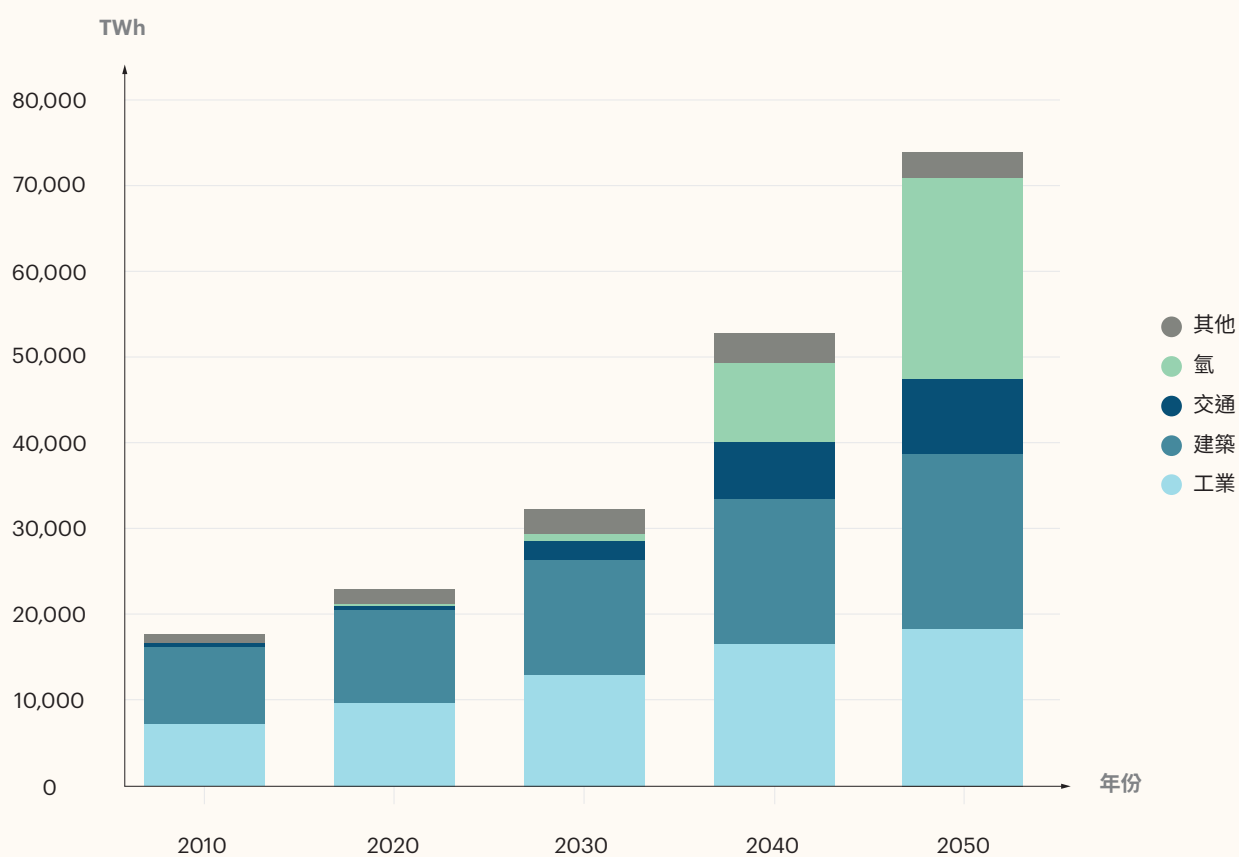


圖4: 彭博新能源財經淨零情景中的全球電力需求來源。⁶²

案例：美國推動「清潔氫」 會成為錯失的機會嗎？

拜登政府在2023年10月宣佈斥資70億美元，在七個「區域清潔氫中心」進行70億美元的公共投資，以加速發展美國國內低成本清潔氫市場。⁶³ 作為規模達1.2兆美元的法案的一部分，這些清潔氫中心旨在投資美國各地的基礎設施，目的是幫助難以脫碳的產業和工業製程（即重型運輸以及化工、鋼鐵和水泥製造）減少碳排放量。美國能源部聲稱，這些中心每年將為終端使用者減少近2500萬公噸的二氧化碳排放量。⁶⁴

這七個中心每年將生產近300萬公噸的「清潔氫」，白宮將其定義為源自再生能源、核能、生物質或天然氣的氫，並利用碳捕獲和封存技術來處理相關的碳排放問題。⁶⁵

在撥付給這些中心的70億美元當中，約三分之二與電解製氫相關，其餘的三分之一將支持其他形式的氫生產。

假設電解製氫佔三分之二，那麼美國每年電解用電量將會達到111 TWh。大量的熱能將被浪費，實際上，24 TWh的餘熱可在區域能源系統中重複利用，這是我們今天就可以做到的事情。2022年，美國使用了106 TWh的煤炭、石油和天然氣來製熱。這意味著電解產生的餘熱回收理論潛力相當於美國利用化石燃料製熱的20%以上⁶⁶

將餘熱整合到能源系統的潛力非常可觀。例如，只要電解廠和大規模氫網絡建設規劃得當，區域供熱網路和產業集群就很適合發展餘熱重覆利用。事實上，住宅和商業低溫供熱需求⁶⁷與清潔氫中心選址之間存在著很大的交集。在加州、賓夕法尼亞州、伊利諾州、明尼蘇達州、俄亥俄州和密西根等地方尤其如此。這些州擁有龐大的區域能源網路，為芝加哥、底特律等全美規模最大、能源強度最高的城市提供服務。

雖然全國各地並非一整年都需要供暖，但透過區域能源網路，餘熱可以為全年熱水供應和季節性供暖做出貢獻，從而大幅減少化石燃料在供熱方面的使用。此外，除了減少碳排放之外，**餘熱重覆利用也可以降低成本**。將每一單位餘熱整合至區域供熱網路中，意味著業主需要透過化石燃料取得能源也隨之減少了一單位。換言之，我們已經為餘熱支付成本，但目前我們只是任由餘熱（和鈔票）蒸發到空氣中，隨風而逝。

當然，只有優先選擇鄰近區域能源網路和其他主要熱能消耗來源（如工業集群）的情況下，才能發揮擬議的區域型清潔氫中心餘熱之潛力。為了避免錯失減少碳排放和節省資金的機會，政界人士和其他主要決策者必須將餘熱視為清潔氫的革新理念，無論是美國還是其他國家。

美國清潔氫中心

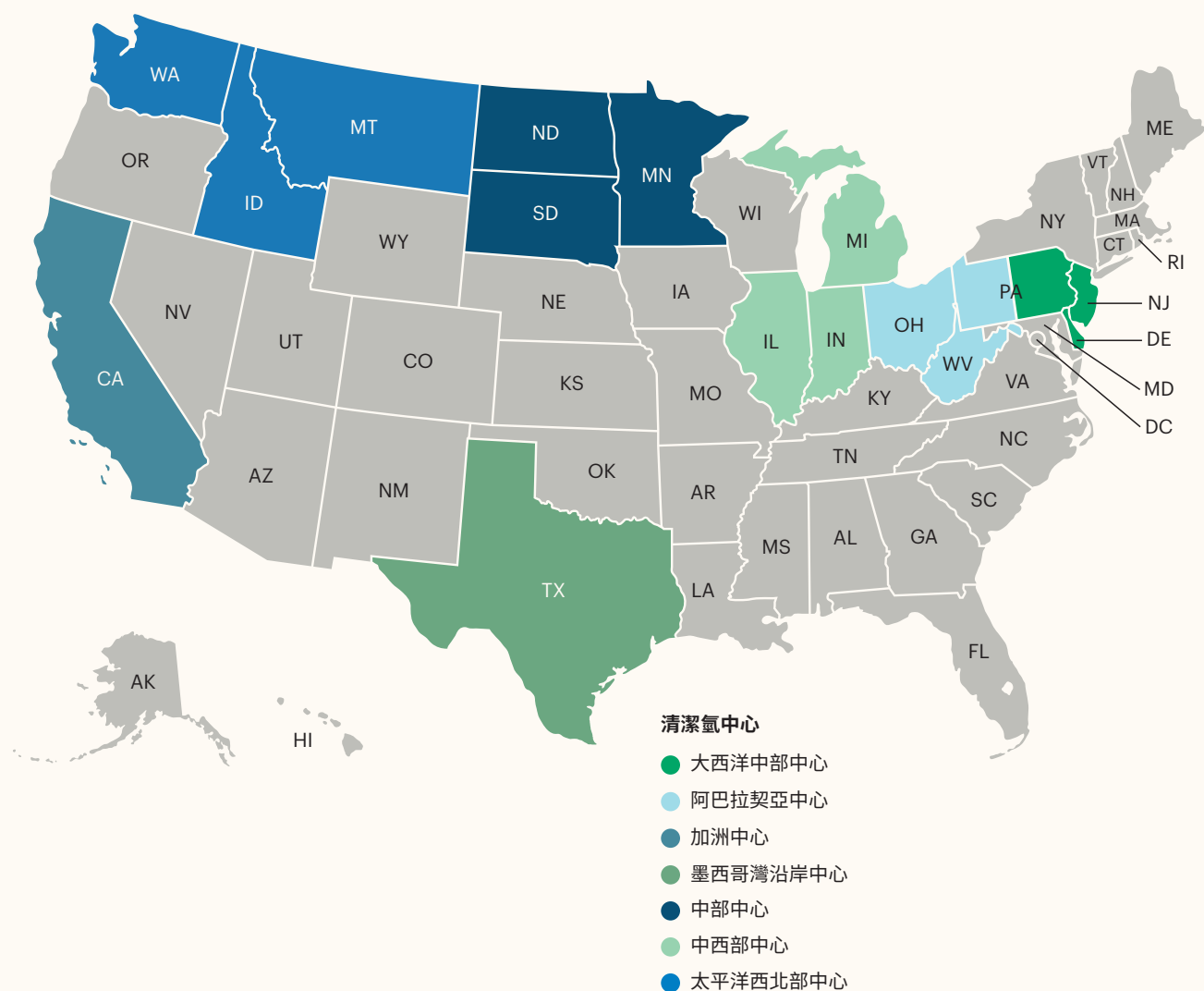


圖5: 在全美各地新建七個清潔氫中心，將大幅提高美國國內的氫氣產量。如果規劃得當，這些中心產生的巨量餘熱可以作為區域供熱網絡和工業中心的低碳排熱源。

明智地用氫

氫作為能源載體，效能強，用途廣。但是，高效能未必代表高效率。事實上，綠氫生產成本高昂，而且大規模生產時需要大量的再生電力。在電解過程中又會損失能量。在我們需要將氫能轉化回電能，或進一步轉化為其他形式的低碳排燃料的情況下，會損失更多的能量。氫能將在能源系統脫碳進程中發揮關鍵作用，但必須將其視為一種昂貴且有限的資源。

要在2050年滿足低碳排氫能需求將需要巨額投資。⁶⁸ 但是，在未來我們實際需要多少氫能呢？歐盟計畫在2030年時自產和進口的氫氣合計約666 TWh，全部透過低碳排來源來生產。⁶⁹ 這相當於140座核電站的能源產量。⁷⁰ 一項研究指出，**歐盟可以透過能源效率和電氣化，同時大規模推廣太陽能、風能、區域供熱和高效熱泵，將氫需求減至116 TWh (不到原來的五分之一)**。⁷¹ 即便如此，在2030年達到減氫 (116 TWh) 仍然是一項雄心勃勃的目標，這將需要非常多的電力，

將對電網的穩定性和安全性構成挑戰。投資需求也是巨大的。因此，**要實現具備成本效益的轉型，就要考慮氫能在哪些領域能夠創造最大的潛在收益**。正如本文第7頁所述，目前不到1%的氫能是採用電解法生產綠氫。現有生產設施的脫碳至關重要，灰氫生產設施應開始轉向綠氫生產，善用現有的氫氣基礎設施。現有生產設備脫碳是當務之急。需要改造灰氫製備裝置，使之能夠轉產綠氫，並繼續利用現有氫能基礎設施。

生產綠氫非常耗能，我們將需要大量的電力來實現這個目標。這意味著我們必須將氫能作為最後的手段，用於難以脫碳的行業，如遠洋運輸、國際航空以及鋼鐵和水泥生產。許多國家正在考慮採用氫能發電或供熱。用氫能滿足峰值需求固然不錯，但將氫氣作為常規電源或熱源之效率則很低。對於主要用途，還有許多更好的替代方案，如再生能源和熱泵。氫能是一種稀缺資源，應當慎用。

要實現具成本
效益的轉型，
就要考慮氫能
在哪些領域
能夠創造最大
的潛在效益。

正確使用氫能

使用氫能的方式有高效和低效之分。空間供熱就是低效使用氫能的例子。⁷² 如果利用海上風電低碳製氫來為英國住宅供暖，需要385 GW的裝機容量才能生產出足夠的氫氣來為英國供暖。然而，預計未來十年全球海上風機容量僅增加380 GW。⁷³ 但如果我們改用熱泵和區域能源為英國供暖，我們需要的裝機容量就會少很多。如果使用熱泵，我們僅需67 GW的海上風電場裝機容量，如果我們採用區域供暖為人口更密集的地區供熱，電力需求甚至更少。如此一來，利用周圍建築和製程產生的餘熱為當地住宅供暖也就更容易。用氫能供熱，海上風電場需佔用5.2萬平方公里海域。

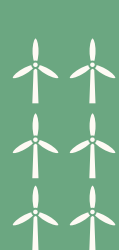
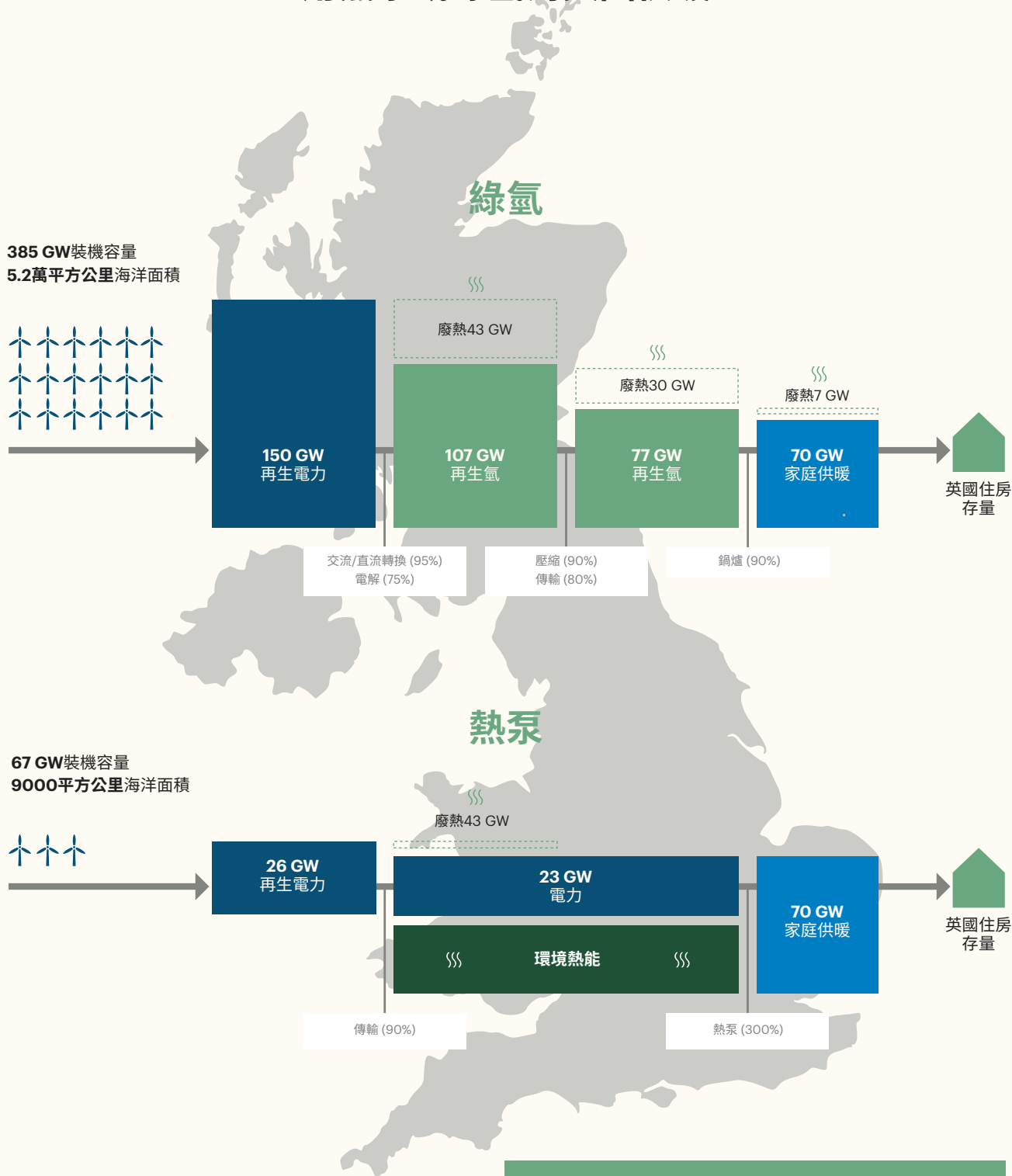
如果改用熱泵，海上風電場只需要9000平方公里。從本質上講，從氫能改為熱泵，僅需六分之一的電力就可以讓英國人溫暖過冬⁷⁴。若結合熱泵與區域能源，需要的電力甚至更少。

所幸，由於2025年後新建住宅禁止安裝鍋爐。⁷⁵ 關於是否在英國使用氫能為住宅供暖的辯論已有定論。然而，仍有很多國家，特別是在歐洲，^{76、77} 對於這個問題的討論仍然非常熱烈。從科學的觀點來看，熱泵和區域能源是更有效的解決方案，應被視為未來住宅供暖邁向脫碳的主要方式。⁷⁸

在下述案例中，我們將深入探討氫能為何是明智的選擇，例如生產幾乎零碳排的燃料，以及氫能如何成為食品業脫碳的重要利器。

「即使電解水產能的增長速度與風能和太陽能一樣快，綠氫供應在短期內仍然稀少，從長期來看也是不確定的。」⁷⁹

用熱泵或綠氫為英國供暖



與熱泵 相比，

使用氫能為空間供暖所需的
海上風電裝機容量是其6倍

圖6: 來源: 氫科學聯盟 (Hydrogen Science Coalition)⁸⁰

案例：電子燃料 (E-fueling) 的未來



在尚未能高效實現電氣化的領域，我們至少可以進行脫碳。例如，鋼鐵與水泥生產需要極高的溫度。事實上，高到電爐尚無法有效達到。高溫製程電氣化雖然在技術上已有所進展，但這些技術目前尚未大規模應用，讓我們除了化石燃料之外幾乎別無選擇。同樣地，在航空、遠洋航運等行業，電動馬達實際上可以產生足夠的動力，但其所需的電池過於笨重，太佔空間，不切實際。在這兩種情況下，氫能是我們邁向脫碳的最佳選擇。

氫能可以轉化為替代燃料，例如電子氨、電子煤油和電子甲醇，然後，這些燃料可以用於需要高溫或長途運輸的行業或製程。此外，雖然仍在開發中，但氫氣可以用

於燃料電池。在燃料電池中，氫氣與氧氣混合並在此過程中釋放能量。採用燃料電池，船舶、飛機和長途運輸貨車不再依賴化石燃料。

在轉換過程的每個步驟中，都會有能量損失。例如，以電製氫時，能量損失約為30%。⁸¹ 然後將氫能轉為其他形式等可靈活使用的能源(例如電子燃料)時，會產生額外的能量損失。在轉換過程的每個步驟中，都會有能量損失。但是，到2050年時，絕大多數電力會來自再生能源，如果用其製氫，是這些能源密集型產業脫碳的可行路徑。然而在不久之前，這些產業的脫碳還被視為白日夢。

案例：以低排放氨實現農業脫碳



農業碳排放佔全球總排放量的12%⁸²，而且預計在未來十年內還會繼續增加。⁸³ 考量作物和畜牧業的碳排放強度都很大，農業是最難實現脫碳的行業之一。其中部分原因來自於化肥生產。氨是化肥必需的營養物質，目前70%的氨用於化肥生產。沒有氨，作物就不能生長。然而，氨產量佔全球二氧化碳排放量的1.3%，以及全球最終能耗的2%。⁸⁴

到2040年，化肥用氨需求將接近翻番，而氨的總需求將增加一倍以上。⁸⁵ 儘管需求不斷增加，但氨生產的排放量必須減少95%。⁸⁶ **透用氫氣實現制氨產業的脫碳，可能是實現糧食生產脫碳最有效的手段之一，可以在不打破現有農業生產流程的情況下實現脫碳。**⁸⁷

目前的氨製程是將天然氣分解為氫氣和二氧化碳，然後在高溫高壓下讓氫與大氣中的氮相結合，業界將此稱為哈伯法。⁸⁸ 這種方法會排放大量的溫室氣體，因為它會把二氧化碳排入大氣。因此這是一個溫室氣體排放非常密集的過程。每生產1噸氨，就會排放1.6-2.6噸二氧化碳^{89,90,91}。未來，氨生產所需的氫氣和電力可由再生能源提供，從而大幅降低氨的氣候足跡。⁹² 國際能源署認為，若要實現《巴黎協定》的氣候目標，氨生產中約有三分之一的溫室氣體減排必須來自於電解氫。⁹³

目前，全球有近250個電解製氨項目正在籌備中。⁹⁴ 國際組織和政策制定者越來越意識到，綠氨是未來的一部分。⁹⁵

政策 建議



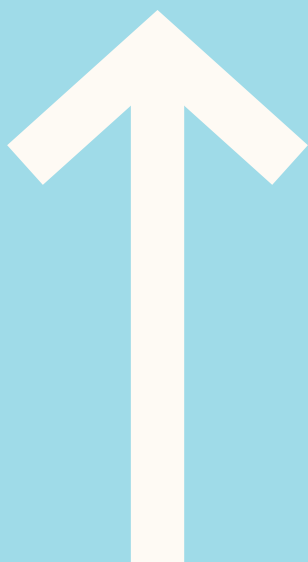
現在正是決策者為大規模推廣高效的氫能制定適合的監管規範和經濟框架的時候了。需要中央、地方政府及國家層面的公共支持，以解決監管障礙並改善實施計劃。此外，我們還需要促進更多的國際合作以及跨產業合作，實現協同增效。這些舉措也很可能推動綠氫創新、需求和增長背後的驅動力。

氫能有其複雜性，需要解決這些問題才能釋放氫能經濟的全部潛力。目前天然氣製氫仍是主流，全球採用再生電力，全球生產的氫能中只有不到1%是綠氫，即通過再生電力的水電解生產的（參閱第7頁）。為了實現《巴黎協定》制定的目標，需盡可能大幅度擴大綠氫佔比。可以從灰氫設備改造入手，使其轉為綠氫，並且善用現有氫能基礎設施。此外，氫氣的需求仍然主要集中在傳統用途，例如氨生產或煉油，而在鋼鐵製造或重型運輸等難以減排的行業的使用仍然非常有限。⁹⁶ 因此，氫氣在綠色轉型中仍是不成熟的技術。採取以下總體原則和政策措施，可以加快製氫產業向著具有成本效益的綠色製氫轉型。



總體政策原則

- **能源效率和電氣化先行。**雖然綠氫為向綠色經濟轉型打開大門，但重點應放在盡可能地讓能源系統直接電氣化。接下來，需要快速擴大綠氫規模，而非高碳排氫能的規模。
- **將氫能用於難以減排的產業。**對於尚未完全脫碳的行業而言，綠氫不失為實現減排脫碳、間接電氣化的方案，這包括重工業脫碳、利用氫實現農業脫碳、以及將綠氫用於電子燃料等。
- **氫氣發展必須與再生能源的發展齊頭並進。**電解需要電網大量供電，製氫不應讓電網不堪重負。發展製氫需有完整配套包含發展再生能源。
- **充分利用綠氫生產過程中所產生的餘熱。**電解製氫會損失大量熱能。如果對氫氣生產進行戰略性規劃，大部分餘熱可以重新用於區域供暖或微電網。
- **探索更多產業整合機會。**綠氫生產有巨大的電力需求、高耗水量及含有大量可用的餘熱。在建設前期，我們必須通盤考慮產業耦合。例如，缺水地區可以從海水淡化設施優化中受益，對於提供電解和飲用水所需的純淨水至關重要。





H₂

綠氫生產的獎勵補貼

- **透過研發補貼以提高綠色氫氣生產的可行性。**高昂的生產成本局限了電解槽設施的經濟可行性。如果電解槽成本下降，投資成本有望降低八成。(參閱第7頁)。降低關稅和制定稅收激勵措施，例如《降低通貨膨脹法案》中的綠氫稅收抵免至關重要 (IRA 清潔氫生產稅收抵免)。歐盟氫能銀行(EU Hydrogen Bank)等融資工具對於推動綠氫價值鏈投資方面發揮重要作用。在需求端方面，也應支持新應用領域的研發，例如將綠氫用於煉鋼或重型運輸。
- **強化投資者和客戶的付費意願。**以國家氫能戰略為依托，制定明確的目標，為投資者創造可預測性和穩定性。確保綠氫未來需求，尤其是難以減排的產業，是當前降低項目風險和鼓勵上游投資上游投資的關鍵。對於培育綠氫市場而言，提升長期可行性非常重要。
- **減稅降費，促進氫能發展。**破除限制整個綠色氫氣供應鏈貿易和投資的障礙。對電解槽和氫衍生物徵收關稅，會阻礙綠氫的推廣。為了增加綠氫需求，促進綠氫投資，應給予綠氫與其衍生物稅費之減免。逐步取消化石燃料補貼，可進而縮小灰氫、藍氫和綠氫之間的經濟差距。
- **通過基礎設施建設激勵氫能轉型。**在許多案例中，基礎設施將決定適用性。如果氫能基礎設施規劃建設力度不足，投資者和市場主體將難以預見綠氫的可行性。在某些情況下，改造現有的天然氣管路，使其能夠運輸氫氣是可行的。
- **優化政府採購策略以刺激綠氫的發展。**要求難以減排的產業履行政府合同，例如在新建築使用綠色鋼鐵，以及在長途航運使用電子燃料。
- **激勵對再生能源潛力豐富的發展中國家之投資。**許多發展中國家擁有大量的再生能源，因此，當他們獲得擴產所需的投資時，就能夠大量生產綠氫。除了透過出口刺激發展中國家的經濟外，還可以支持其他經濟體的氫氣進口需求。



高效製氫

- **推行高效製氫標準。**為了減少綠氫生產對再生能源的需求，應為製氫效率制定標準。例如，可以考慮制定法規，鼓勵使用高效電網轉換器，並淘汰低效的增壓方法和技術。
- **確保氫氣生產不會加劇日益嚴重的水資源短缺問題。**不論採取何種方式製氫，都需要大量用水。例如，傳統的高碳製氫，以及碳捕獲和封存 (CCS) 的生產方式，都需要大量的水用於蒸汽產生和冷卻。儘管電解產氫需要用水，但綠氫實際上是水密集程度最低的生產方法。精心規劃製氫過程、使用高效淡化技術，乃是關鍵所在。
- **將氫能作為提高靈活性的一種工具。**高效製氫既涉及製氫方式，也關乎製氫時間。在再生電力供過於求時製氫，能以氫儲電，滿足尖峰需求，從而加速淘汰化石燃料發電廠。發揮製氫的靈活性，有助於平衡和穩定電網，這意味著再生能源發電不必受到限制。



附錄： 電解水制氫產生的餘熱

在本案例研究中，我們將探討未來電解水制氫過程中可利用餘熱的理論潛力。所涉及的電解製氫技術包括鹼性電解 (AEC)、質子交換膜電解 (PEM) 和固體氧化物電解 (SOEC)。有關這些技術的技術說明，請參閱丹麥能源署發布的《再生燃料技術數據》。

AEC、PEM 和 SOEC 技術的加權投入產出

未來的電解製氫將採用鹼性電解法 (AEC)、質子交換膜 (PEM) 及固體氧化物電解 (SOEC) 等多項技術。表 A.1 列出了到 2030 年這些技術的分配情況，以及 AEC、PEM 和 SOEC 的推斷值以涵蓋其他技術。在推斷時，由於缺乏更精確的數據，AEC、PEM 和 SOEC 間的分配比例將擴展至「其他」技術。這種分佈取決於各種技術的進步和成本發展。最近，SOEC 技術最近取得了一些進展，⁹⁷ 成為一種效率更高、廢熱產生更少的技術。

表 A.1: 預計 2030 年 AEC、PEM、SOEC 和其他技術之間的分佈 (%)，以及當 AEC、PEM 和 SOEC 外推至其他技術時的分佈。

技術	AEC	PEM	SOEC	其他
2030 ^a	54%	23%	9%	14%
AEC、PEM 和 SOEC 外推 ^b	63%	27%	10%	-

^a 國際能源署 (2023) 《全球氫能回顧 2023》(Global Hydrogen Review 2023)。表 3.7: 根據已公佈的項目和《2050 年淨零排放情景》2021-2030 年，第 72 頁中依據地區和技術劃分電解槽製造能力。

^b AEC、PEM 和 SOEC 通過將其分佈擴展到其他技術來推斷。這是因為缺乏其他技術的效率、輸入和輸出的相關數據。

表 A.2 顯示了 2030 年、2040 年和 2050 年 AEC、PEM 和 SOEC 的能源輸入 (例如電力) 和輸出 (例如氫氣和熱能) 的估計值。加權平均值決定於表 A.1 中 AEC、PEM 和 SOEC 的推斷預期分配比例。對於 AEC、PEM 和 SOEC 的加權平均值反映，2030 年、2040 年和 2050 年的電力投入約為 98%。這是因為熱能也是 SOEC 的輸入。為了確定每單位電力投入用於區域供暖的可回收熱損失 (HL_{rec})，採用了以下公式計算。表 A.2 中列出了 HL_{rec} 加權平均值的 HL。

$$HL_{rec} [\text{電力投入百分比}] = \frac{\text{區域供暖可回收熱量} [\text{熱損失百分比}]}{\text{功率}_{in} [\text{總投入百分比}]} \cdot 100 \quad (1)$$

表 A.2: AEC、PEM、SOEC 的投入和產出以及從三者得出的加權平均值。

公式縮寫	100 兆瓦級鹼性電解製氫 (AEC) ^a			100 兆瓦級質子交換膜電解製氫 (PEMEC) ^a			100 兆瓦級固體氧化物電解製氫 (SOEC) ^a			100 兆瓦級 AEC、PEM 和 SOEC 製氫加權平均值 ^b			
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	
投入													
電力 (總投入百分比 [MWh / MWh])	功率 _{in}	100	100	100	100	100	100	80.5	81.4	81.4	98.0	98.1	98.1
熱量 (總投入百分比 [MWh / MWh])		0	0	0	0	0	0	19.5	18.6	18.6	2.0	1.9	1.9
產出													
產氫 (總投入百分比 [MWh / MWh])	H _{2,out}	62.2	65.3	69.9	58.5	61.6	66.4	69.6	70.5	72.5	61.9	64.8	69.2
ΔE 從 HHV 到 LHV (總投入電力百分比 [MWh / MWh]) ^c		12.6	13.2	14.1	12.0	12.7	13.7	16.0	16.3	16.8	12.8	13.4	14.3
熱損失 (總投入百分比 [MWh / MWh])		25.3	21.5	15.9	29.5	25.7	19.9	14.4	13.2	10.7	25.3	21.8	16.5
其中不可回收的熱損失 [熱損失百分比]		3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	14.4	13.2	10.7	4.2	4.0	3.8
其中可回收用於區域供暖的熱能 [熱損失百分比]		22.3	18.5	12.9	26.5	22.7	16.9	0	0	0	21.2	17.8	12.7
區域供暖可回收熱損失 (電力投入百分比 [MWh/MWh]) ^d	HL _{rec}										21.6	18.1	13.0

^a 來源: 丹麥能源署 (2024)。再生燃料技術資料 (Technology Data for Renewable Fuels)

^b 來源: 丹佛斯。AEC、PEM 和 SOEC 的投入和產出是根據 2030 年電解技術的外推預期分佈進行加權 (表 A.1)。由於缺乏資料，2030 年的分佈適用於 2040 年與 2050 年。

^c 丹麥能源署: HHV 電解槽效率可計算為每行之總和: 「從 HHV 到 LHV 的 ΔE」和「氫氣」。

^d 丹佛斯計算: 見公式 1。

2050 年電解製氫產生的餘熱潛力

國際能源署估計，到 2050 年，電解電力總需求將達到 14800 TWh。⁹⁹ 通過公式 1，我們發現 2050 年的 HL_{rec} 為 13%。這意味著，到 2050 年，每單位電力投入的 13% 可以作為區域供暖的餘熱回收利用。鑒於 2050 年的電解電力需求將達到 14800 TWh，理論上可以回收 1917 TWh 的餘熱，用於區域供暖。

2021 年，全球燃煤制熱總量為 8,022,699 TJ (2229 TWh)。¹⁰⁰ 1917 TWh 相當於全球燃煤製熱總量的 86%。

歐盟2030年電解餘熱

歐盟計畫2030年生產333 TWh的再生氫能。¹⁰¹ 歐盟指出，再生氫是通過電解產生的氫。¹⁰² 電解用電需求如下(Power_{dem} [TWh]):

$$Power_{dem} [TWh] = \frac{\text{電解製氫}[TWh]}{H_{2,out} [\text{總投入百分比}]} \cdot Power_{in} [\text{總投入百分比}] \quad (2)$$

根據公式2，在2030年，歐盟Power_{dem} 將會達到527 TWh，在2030年，每單位電力投入可回收熱能HL_{rec} 為22%。這意味著理論上，2030年可以從歐盟電解製氫中回收114 TWh的餘熱。

在德國，2017年家庭和住宅建築供暖達51.5TWh¹⁰³。這意味著2030年歐盟電解產生的回收餘熱理論潛力足以滿足德國家庭和住宅建築的熱能需求近2.2倍。

2060年中國電解產氫的餘熱潛力

中國在2060年的氫氣產量將達到9000萬噸到1.3億噸之間，預計其中80%將是電解氫。¹⁰⁴ 依照氫含量為33.3 KWh/kg能量來計算，到2060年，中國電解製氫達到2400-3467 TWh。在缺乏更精確資料的情況下，我們假設2050製氫加權均值(表A.2)可以反映出中國在2060年的情況。按照公式2，我們可以得出2060年的Power_{dem}為2401-4912 TWh。

2050年的HL_{rec}為13%，這意味著到2050年，理論上電力投入的13%可以餘熱形式回收，用於區域供暖。將此應用於Power_{dem}得出，中國電解製氫餘熱將達到440-636 TWh。

表A.3列出了中國2021年各種能源的製熱量，以及電解可產生的餘熱理論潛力值。中國餘熱潛力可以滿足27-39%的燃煤製熱需求。

表A.3: 2021年中國各能源製熱量與電解製氫潛在可回收餘熱之比較。

2021年中國各能源製熱量 ¹⁰⁵							
	煤炭	石油	天然氣	生物燃料	廢棄物	總計	單位
	5,922,803	229,998	778,876	10,735	38,240	6,980,652	TJ
	1,645	64	216	3	11	1,939	TWh
2021年中國各能源製熱量相對於電解氫生產可回收餘熱的潛力 ^a							
最低	27	689	204	14,771	4,147	23	%
最高	39	996	294	21,336	5,990	33	%

^a 假設2060年中國電解氫生產的可回收過熱潛力為440至636 TWh電位。

2030年美國電解產氫的餘熱潛力

白宮提出了一項戰略，目標是到2030年每年生產300萬噸的清潔氫。他們宣布的投資中有三分之二將用於電解氫。¹⁰⁶ 國際能源署估計，到2030年，全球70%的氫將來自電解。¹⁰⁷ 在此基礎上，我們假設2030年生產的氫氣中有三分之二(即210萬噸)將是電解氫。

考慮到氫的能量含量為33.3 kWh/kg，² 我們可以得出美國電解氫的能量含量將為70 TWh。按照公式2，我們可以計算出電解製氫總電力需求為111TWh。按照公式1，我們可以計算出HL_{rec} 為22%，所以餘熱回收潛力為24 TWh。

2022年，美國使用106 TWh的煤炭、石油和天然氣來產生熱能(表A.4)。電解過程中可回收的潛在餘熱為24 TWh，相當於美國化石燃料製熱的22%。

表A.4: 2022年美國各能源製熱量與電解製氫潛在可回收餘熱的比較。

2022年美國各能源製熱量 ¹⁰⁸								
	煤炭	石油	天然氣	生物燃料	廢棄物	總計	煤炭、石油和天然氣	單位
	14,319	27,686	339,754	37,205	16,199	135,163	381,759	TJ
	4.0	7.7	94.4	10.3	4.5	120.9	106.0	TWh
2021年美國各能源製熱量餘熱回收潛力 ^a								
	589	305	25	227	521	19	22	%

^a 假設美國電解製氫餘熱回收潛力為24 TWh。

2030年智利電解餘熱潛力

2030年，拉美地區的電解製氫年產量可達600萬噸。其中45%(即270萬噸)可能來自於智利。¹⁰⁹ 按照氫的能量含量為33.3 KWh/kg來計算，我們可以得出，到2030年，智利電解氫的能量含量將達到90 TWh。按照公式2，我們可以得出2030年的Power_{dem}為142 TWh。2030年，每單位電力投入的可回收熱能HL_{rec} 為22%，這意味著理論上2030年智利電解製氫可回收31 TWh的餘熱。

智利已將區域能源納入其未來規劃，¹¹⁰ 根據一份路線圖顯示，到2050年，智利40%的供熱需求將透過區域供熱來滿足，而餘熱應納入其中¹¹¹。

關於理論潛力和可實現潛力的說明

餘熱的理論潛力不同於可實現潛力。在本案例中，我們的目標是證實所有餘熱利用條件達到最佳狀態時所能夠實現的潛力。以下是其中三個條件的例子:1) 首先必須有供暖需求，這個假設當然會隨著時間和地域的不同而變化; 2) 如果已經建立了區域供暖基礎設施，餘熱利用會更加簡單，但很多地方還需要新建區域供暖系統; 3) 還要考慮經濟因素。供電網路與區域供熱網路並不總是在鄰近地區，海上電解廠就是一例。

參考資料

1. COP28 (2023): COP28在杜拜達成加速氣候行動的歷史性共識
2. 國際能源署 (2022):《世界能源展望》(World Energy Outlook), 第136頁
3. 國際再生能源署 (IRENA) (日期不詳): 綠氫政策
4. 彭博新能源財經 (BloombergNEF) (2022):《新能源展望》(New Energy Outlook)
5. 德勤 (2023):《綠氫: 淨零之路的能源》(Green hydrogen: Energizing the path to net zero), 第13頁
6. 國際能源署 (2022):《世界能源展望》(World Energy Outlook), 第327頁
7. 國際能源署 (2023):《基於排放強度制定氫能定義》(Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity)
8. 歐盟委員會 (2020): 歐盟委員會致歐洲議會、理事會、歐洲經濟社會委員會和地區委員會信函: (COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS):《氣候中和 - 歐洲的氫戰略》(A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe), 第3-4頁
9. 國際能源署 (2022):《世界能源展望》(World Energy Outlook), 第136頁
10. IRENA (日期不詳): 綠氫政策
11. 彭博新能源財經 (BloombergNEF) (2022):《新能源展望》(New Energy Outlook)
12. 德勤 (2023):《綠氫: 淨零之路的能源》(Green hydrogen: Energizing the path to net zero), 第13頁
13. 國際再生能源署 (IRENA) (2020):《綠氫: 政策制定指南》(Green Hydrogen: A guide to policy making), 第8-9頁
14. 國際能源署 (2023):《全球氫能回顧》(Global Hydrogen Review), 第87-88頁
15. 哥本哈根氣候中心 (Copenhagen Climate Centre):《識別綠氫、低碳氫和再生氫之間的差異》(Identifying the differences in between green, low-carbon, and renewable hydrogen), 第10頁聯合國環境規劃署
16. 國際能源署 (2023):《全球氫能回顧》(Global Hydrogen Review), 第87-88頁
17. 國際再生能源署 (IRENA) (2020):《綠氫: 政策制定指南》(Green Hydrogen: A guide to policy making), 第8-9頁
18. 國際再生能源署 (IRENA) (2020):《綠氫: 政策制定指南》(Green Hydrogen: A guide to policy making), 第8-9頁
19. 國際能源署 (2023):《全球氫能回顧》(Global Hydrogen Review), 第87-88頁
20. 國際能源署 (2023):《全球氫能回顧》(Global Hydrogen Review), 第87-88頁
21. 國際能源署 (2023):《全球氫能回顧》(Global Hydrogen Review), 第68頁
22. 國際能源署 (2023):《電解槽, 電解槽追蹤》(Electrolysers, Tracking Electrolysers)
23. 國際再生能源署 (IRENA) (2023):《綠氫促進工業的永續發展》(Green Hydrogen for Sustainable Industrial Development), 第19頁
24. 國際能源署 (2022):《世界能源展望》(World Energy Outlook), 第136頁
25. 白宮 (2023):《拜登政府宣佈建立區域乾淨氫中心, 以推動清潔製造和就業》(Biden-Harris Administration Announces Regional Clean Hydrogen Hubs to Drive Clean Manufacturing and Jobs)
26. 國際能源署 (2022):《中國氫能碳捕捉、利用與封存的機遇 - 摘要》(Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China)。
27. 歐盟 (2022):《能源—氫能》(Energy - Hydrogen)
28. 美國能源部 (日期不詳):《能源往何處去: 電動車》(Where the Energy Goes: Electric Cars)
29. Buitendach等(2021):《紋波電流對質子交換膜電解水制氫效率的影響》(Effect of a ripple current on the efficiency of a PEM electrolyser. Results in Engineering), 第10卷, 1-13頁
30. Tonelli 等(2023):《利用風能和太陽能進行電解水制氫的全球土地和水資源限制》(Global land and water limits to electrolytic hydrogen production using wind and solar resources),《自然—通訊》第14期, 第5532號文章
31. 國際再生能源署 (IRENA) (2023):《製氫用水》(Water for hydrogen production)
32. 丹佛斯基於Buitendach 等估計(2021):《紋波電流對質子交換膜電解水制氫效率的影響》(Effect of a ripple current on the efficiency of a PEM electrolyser. Results in Engineering), 第10期, 1-13頁
33. 2018年倫敦建築和交通的年度電力消耗量為37.82 TWh (倫敦市長 (2022年) 倫敦年度能源使用量)。而我們在2050年所需的製氫用電量將達到14800 TWh (國際能源署 (2022):《世界能源展望》(World Energy Outlook), 第136頁14800 TWh的1%為148TWh。148 TWh/37.82 TWh = 3.8, 幾乎是2018年倫敦用電量的四倍。
34. 德國清潔能源通訊社 (Clean Energy Wire) (2021):《為穩定德國電網遏制更多再生能源》的報導 (More renewables curbed to stabilise German power Grid)
35. 國際能源署 (2023):《能源效率: 行動的十年》(Energy Efficiency: The Decade for Action), 第13頁
36. Sepulveda等(2021):《脫碳電力系統中長期儲能的設計空間》(The design space for long-duration energy storage in decarbonized power systems),《自然能源》(Nature Energy), 第506-516頁
37. Ea Energy Analyses (2023):《歐洲電力產業需求靈活性的價值》(Value of Demand Flexibility in the European Power Sector)
38. 路透社 (2023):《歐洲在能源危機上的支出接近8000億歐元》(Europe's spend on energy crisis nears 800 billion euros)
39. 歐盟在2022年的電力生產為2641 TWh, 其中19.6%或517 TWh來自天然氣。(歐盟(2023): 資訊圖 - 歐盟電力如何生產和銷售? (Infographic - How is EU electricity produced and sold?))
40. 聯合研究中心 (Joint Research Center) (2023): 消費足跡平台|EPLCA (Consumption Footprint Platform | EPLCA)。
41. 丹佛斯 (2023):《影響力系列白皮書》第四冊能源效率2.0:《打造未來能源系統》
42. Andersson等(2019):《大規模儲氫》(Large-scale storage of hydrogen)。《國際氫能期刊》(International Journal of Hydrogen Energy), 第44卷第23期第11901-11919頁
43. 科陸 (CLOUGLOBAL) (2023):《氫儲能的利弊: 值得投資嗎?》(Pros and Cons of Hydrogen Energy Storage: Is Worth the Investment?)
44. 丹麥國家電網公司 (Energinet) (2023):《丹麥和德國氫能市場評估報告》(Hydrogen Market Assessment Report for Denmark and Germany), 第12頁
45. 丹麥氣候變化理事會 (Klimarådet) (2023):《利用太陽能和風能確保電力供應》(Sikker elforsyning med sol og vind)

46. Kountouris等 (2023):《統一歐洲氫能基礎設施規劃以支持氫氣快速擴產》(A unified European hydrogen infrastructure planning to support the rapid scale-up of hydrogen production), Research Square, 1, 第1-18頁。
47. Choudhury · Subhashree (2021):《飛輪儲能系統: 對技術、應用和未來前景的批判性綜述》(Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects),《電能系統國際交易雜誌》(Internal Transactions on Electrical Energy Systems), 第31卷第9期
48. 德勤 (2023):《綠氫: 淨零之路的能源》(Green hydrogen: Energizing the path to net zero), 第16頁
49. Firth等(2019):《全球廢熱量化及其環境影響》(Quantification of global waste heat and its environmental effects),《應用能源》期刊 (Applied Energy), 第235卷第1325頁
50. Firth等(2019):《全球廢熱量化及其環境影響》(Quantification of global waste heat and its environmental effects),《應用能源》期刊 (Applied Energy), 第235卷第1325頁
51. Euroheat & Power (2023):《DHC市場展望》(DHC Market Outlook), 第3頁
52. Connolly等 (2013):《歐洲熱能路線圖: 歐盟27國的第二次預研究》(Heat Roadmap Europe 2: Second Pre-Study for the EU27), 奧爾堡 (Aalborg) 大學發展與規劃系, 第54頁
53. Connolly等 (2013):《歐洲熱能路線圖2: 歐盟27國的第二次預研究》(Heat Roadmap Europe 2: Second Pre-Study for the EU27), 奧爾堡 (Aalborg) 大學發展與規劃系, 第54頁
54. 根據2015年《歐洲供暖路線圖4》(Heat Roadmap Europe 4)的資料, 住宅和服務業建築的供熱需求, 也稱為「低溫熱需求」, 此不包括工業供熱需求, 因為其所需的輸入溫度過高, 無法採用餘熱回收技術
55. 《歐洲熱能路線圖》(日期不詳):《泛歐熱能全圖》(Pan-European Thermal Atlas 4.3)
56. Moreno等(2022):《歐洲廢熱地圖》(The European Waste Heat Map), ReUseHeat項目—回收城市餘熱 (Recovery of Urban Excess Heat)
57. Luo等(2017):《中國北方低品位工業餘熱的潛力》(Mapping potentials of low- grade industrial waste heat in Northern China),《資源保護與循環利用》(Resources, Conservation and Recycling), 第125卷第 335-348頁
58. 經濟合作與發展組織 (TVIS) (2022): TVIS (2022): 丹麥首個PtX協定為額外1300戶家庭提供區域供暖 (Fjernvarme til 1300 husstande mere fra Danmarks første PtX-aftale)
59. 經濟合作與發展組織 (COWI) (2023):《Kassø PTX (電子甲醇) - 環境影響報告》(Kassø PTX (E-methanol) - Miljøkonsekvensrapport), 第24頁
60. 餘熱潛力估算方式請參閱本文《附錄: 電解餘熱》
61. 餘熱潛力估算方式請見本文《附錄: 電解餘熱》
62. 彭博新能源財經 (BloombergNEF) (2022):《新能源展望》(New Energy Outlook) 2022
63. 白宮 (2023):《拜登政府宣佈建立區域清潔氫中心, 以推動清潔製造和創造就業機會》(Biden-Harris Administration Announces Regional Clean Hydrogen Hubs to Drive Clean Manufacturing and Jobs)
64. 清潔能源示範辦公室 (Office of Clean Energy Demonstrations): 區域清潔氫能源中心補貼談判 (Regional Clean Hydrogen Hubs Selections for Award Negotiations)
65. 白宮 (2023):《拜登政府宣佈建立區域清潔氫中心, 以推動清潔製造和創造就業機會》(Biden-Harris Administration Announces Regional Clean Hydrogen Hubs to Drive Clean Manufacturing and Jobs)
66. 餘熱潛力估算方法請見本文《附錄: 電解餘熱》
67. Oh, H. & Beckers, K (2023):《美國低溫供暖和製冷需求的地理空間特徵》(Geospatial Characterization of Low Temperature Heating and Cooling Demand in the United States), 第3-8頁Golden, CO: 國家再生能源實驗室NREL/CP-5700-84708. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84708.pdf>
68. 到2030年, 我們將需要90Mt (10.79 EJ/900萬公斤) 氫氣。(國際能源署 (2022):《世界能源展望》(World Energy Outlook), 第136頁)。最低價為1.3-3.5美元/kg (國際能源署 (2021):《全球氫能回顧》(Global Hydrogen Review)摘要)。900億公斤氫氣 X 1.3-3.5 美元/公斤氫 = 1170-3150億美元投資需求
69. 歐盟委員會 (日期不詳): 氫能。假設氫的低熱值為33.3 kWh/kg。
70. 2017年, 美國R.S. Ginna核電站發電量為4,697,675 MWh或4,697 TWh。(美國地球科學協會 (American Geosciences Institute) (日期不詳):《一座典型的核電站能發多少電?》(How much electricity does a typical nuclear power plant generate?)。歐盟將計畫生產和進口總計666 TWh的氫氣。666 TWh/4.697 TWh = 142座R.S. Ginna等級核電站
71. Agora能源轉型智庫 (Agora Energiewende) (2023):《擺脫化石天然氣: 歐洲實現氣候中和的新途徑》(Breaking free from fossil gas: A new path to a climate-neutral Europe), 第11頁
72. 《氫能洞察》(Hydrogen Insight) (2023): 總共有37項獨立研究現在得出結論, 氫氣在家庭供暖方面不會發揮重要作用。
73. 全球風能理事會 (Global Wind Energy Council) (2023):《全球海上風電報告 (2023)》(Global Offshore Wind Report, 2023, 第2頁
74. 氫科學聯盟 (Hydrogen Science Coalition) (2022):《用氫供熱? 與熱泵的比較》(Hydrogen for heating? A comparison with heat pumps), (第一部分)
75. The Conversation (2023): 英國禁止在新建住宅中使用鍋爐, 排除了氫氣作為熱源的可能性
76. 路透社 (2023):《德國議會透過法律逐步淘汰天然氣和石油供熱》(German parliament passes law to phase out gas and oil heating)
77. Trade.gov.pl (2024):《波蘭氫能策略: 綠色未來》(Poland's Hydrogen Strategy: A Green Future), 波蘭經濟發展與技術部
78. 《氫能洞察》(Hydrogen Insight) (2023): 總共有37項獨立研究現在得出結論, 氫氣在家庭供暖方面不會發揮重要作用。
79. Odenweller等(2022):《擴大綠氫供應的概率可行性空間》(Probabilistic feasibility space of scaling up green hydrogen supply),《自然能源》第7期, 第854-865頁
80. 氫科學聯盟 (Hydrogen Science Coalition) (2022):《用氫供熱? 與熱泵的比較》(Hydrogen for heating? A comparison with heat pumps) (第一部分)
81. Buitendach等 (2021):《紋波電流對質子交換膜電解水制氫效率的影響》(Effect of a ripple current on the efficiency of a PEM electrolyser. Results in Engineering), 第10卷第1-13頁
82. 2020年, 包括土地利用和林業在內的全球排放量為47,513.2兆噸二氧化碳當量, 農業排放量為5,865.5兆噸二氧化碳當量, 佔全球排放量的12.3%。(氣候觀察 (Climate Watch) (日期不詳)。資料瀏覽器, 篩選條件: 資料來源: 氣候觀察、締約方和地區: 世界、產業:「農業」和「包括土地利用和林業在內的總計」, 氣體:「所有氣體」, 年份:「2020」)
83. 經濟合作與發展組織 (OECD) (2023): 產量增長將隨人口成長而減緩, 而地緣政治緊張局勢、氣候變化、動植物疾病以及關鍵農資價格波動構成了長期的不確定性。
84. 國際能源署 (2021):《氨技術路線圖》(Ammonia Technology Roadmap)
85. IRENA和AEA (2022):《創新展望: 再生氫》(Innovation Outlook: Renewable Ammonia), IRENA、阿布達比、氫能源協會、布魯克林, 第 15 頁
86. 國際能源署 (2021):《氨技術路線圖》(Ammonia Technology Roadmap), 第61頁
87. 麥肯錫公司 (2023):《從綠色氨到低碳食品》(From green ammonia to lower- carbon foods)
88. Yale Environment 360 (2022):《從化肥到燃料:「綠色」氫能解決氣候問題嗎?》(From Fertilizer to Fuel: Can 'Green' Ammonia Be a Climate Fix?)

89. Elshishini和Shadia (2024): 傳統蒸汽重整制氨產品碳足跡方法 - 案例研究。《歐洲永續發展研究期刊》, 第8卷, 第1期 (Product carbon footprint methodology for ammonia production by conventional steam reforming – A case study. European Journal of Sustainable Development Research)
90. Liu等 (2020): 《以再生資源和工業副產品制氨的生命週期能耗和溫室氣體排放》(Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from renewable resources and industrial by-products), 《綠色化學》, 2020年, 第22期, 第5751-5761頁
91. 國際能源署 (2021): 氨技術路線圖 (Ammonia Technology Roadmap)
92. Stocks等(2022): 《燃煤電廠共燃氨對全球排放的影響: 對日澳供應鏈的分析》(Global emissions implications from co-combusting ammonia in coal fired power stations: 日澳供應鏈分析, 《清潔生產期刊》, 第336卷。
93. 國際能源署 (2021): 《氨技術路線圖》(Ammonia Technology Roadmap), 第61頁
94. 國際能源署 (2023): 製氫和基礎設施專案資料庫 (Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database), 「製氫專案」資料庫經過篩選, 顯示出所有基於電解、以氨為最終用途與概念化, 以及正在進行的可行性研究或建設中的項目。
95. IRENA和AEA (2022): 《創新展望: 再生氫》(Innovation Outlook: Renewable Ammonia), 再生氫 第4.6章 《氫經濟展望》(Outlook for the ammonia economy), 第90頁
96. 國際能源署 (2023): 《能源系統—氫》(Energy System – Hydrogen)
97. Hauch, A.、R. Küngas、P. Blenow、A. B. Hansen、J. B. Hansen、B. V. Mathiesen和M. B. Mogensen: 《電解用固體氧化物電池技術的最新進展》(Recent Advances in Solid Oxide Cell Technology for Electrolysis), 《科學》第370期第6513號 (2020年10月9日): eaba6118. [https:// doi.org/10.1126/science.aba6118](https://doi.org/10.1126/science.aba6118).
98. 丹麥能源署 (2024): 《再生燃料技術資料》(Technology Data for Renewable Fuels) 能源載體生產和轉化資料表 (Data Sheets for energy carrier generation and conversion) 表格: 「86 AEC 100 MW」、 「86 PEMEC 100 MW」 和 「SOEC 100 MW」
99. 國際能源署 (2022): 《世界能源展望》(World Energy Outlook 2022), 第136頁
100. 國際能源署 (2023): 能源統計資料瀏覽器 (Energy Statistics Data Browser) 篩選條件: 能源主題: 電力和熱力, 指標: 按熱能來源、國家或地區: 世界
101. 歐盟 (2022): 《能源—氫能》(Energy – Hydrogen)
102. 歐盟 (2022): 歐盟法律詞彙表。編號: 52020DC0301 歐盟委員會致歐洲議會、理事會、歐洲經濟和社會委員會和地區委員會的信函: 氣候中和歐洲的氫戰略 (Communication from the commission to The European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of The Regions - A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe)
103. 聯邦統計局 (Statistisches Bundesamt) (2017): 《供熱總體平衡表》(Balance sheet of heat supply, total)
104. 國際能源署 (2022): 《中國制氫碳捕捉、利用與封存的機遇。》(Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China) 摘要
105. 國際能源署 (2023): 能源統計資料瀏覽器 (Energy Statistics Data Browser), 篩選條件: 能源主題: 電力和熱力, 指標: 按熱能來源、國家或地區: 中華人民共和國。
106. 白宮 (2023): 《拜登政府宣佈建立區域清潔氫中心, 以推動清潔製造和創造就業機會》(Biden-Harris Administration Announces Regional Clean Hydrogen Hubs to Drive Clean Manufacturing and Jobs)
107. 國際能源署 (2023): 《全球氫能回顧》(Global Hydrogen Review 2023), 第65頁
108. 國際能源署 (2023): 能源統計資料瀏覽器 (Energy Statistics Data Browser) 篩選條件: 能源主題: 電力和熱力, 指標: 按熱能來源、國家或地區: 美國。
109. 國際能源署 (2023): 《全球氫能回顧》(Global Hydrogen Review) 2023, 第66頁
110. 城市區域能源倡議 (District Energy in Cities Initiative) (日期不詳): 智利
111. Paardekooper等(2019): 《智利供熱路線圖: 量化清潔區域供暖和能源效率的潛力, 實現智利的長期能源願景》(Heat Roadmap Chile: Quantifying the potential of clean district heating and energy efficiency for a long-term energy vision for Chile) 摘要。奧爾堡大學發展與規劃系

