

IEA 全球能源部門 2050 淨零排放路徑

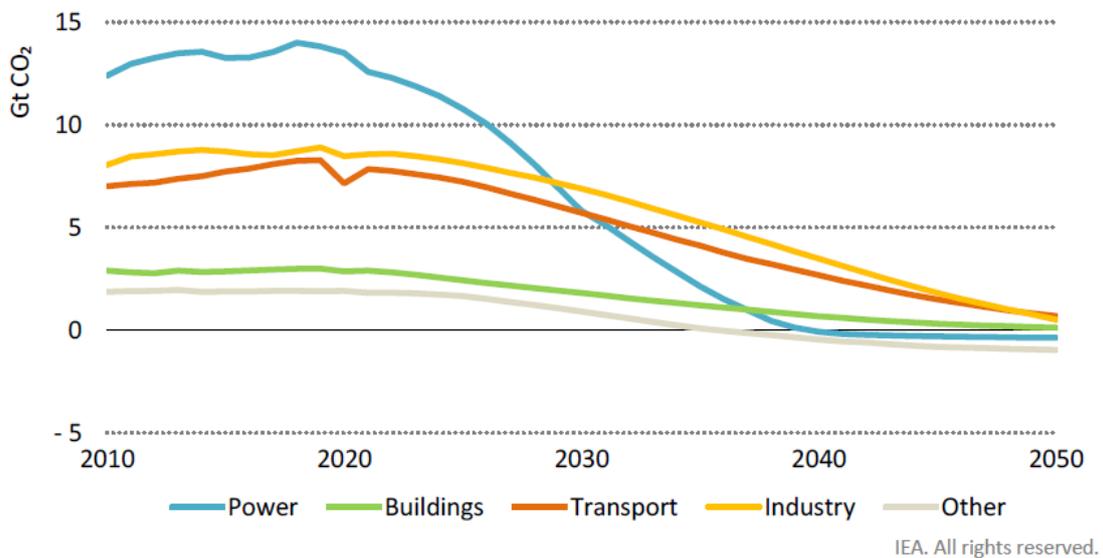
(Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector)

2021 年 5 月 18 日

三、部門別 2050 淨零排放路徑

(一)引言

2050 年的 NZE 情境涉及全球能源轉型，其速度和範圍都是前所未見。本章著眼於主要部門別的改變方式以及具體挑戰和機會。涵蓋了能源供給(含化石燃料與低排放燃料)、電力部門及三個最終消費部門-工業，運輸和建築部門。對於每個部門提出達成 NZE 情境下所需要的關鍵技術和基礎設施里程碑。此外，亦討論了需要哪些關鍵的政策決策以及何時才能實現這些里程碑。



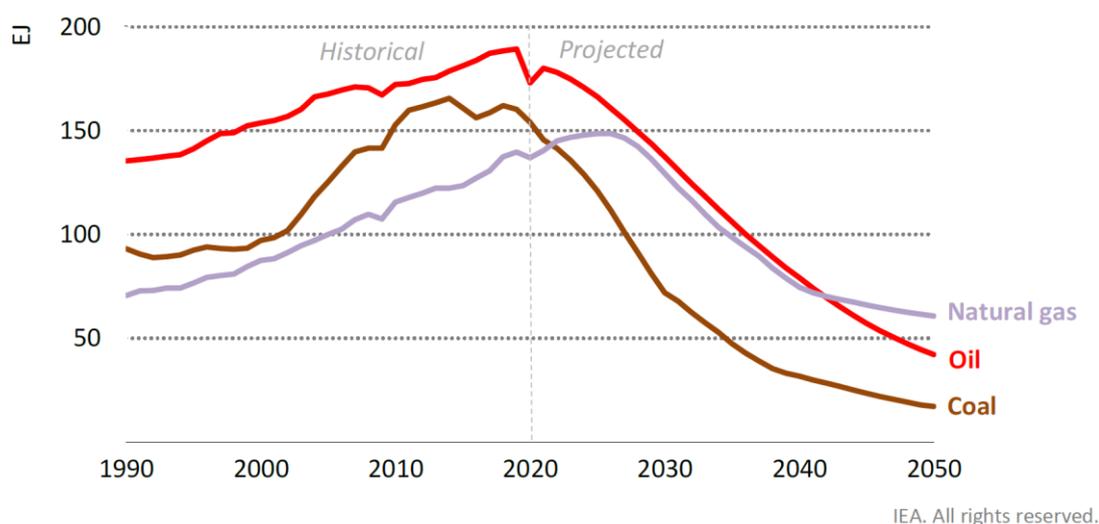
資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

圖 1、部門別排放路徑

(二)化石燃料供給

煤炭使用量持續下降，從 2020 年的 5250 百萬公噸煤當量(million tonnes of coal equivalent, Mtce)，到 2030 年的 2500 百萬公噸煤當量，到 2050 年再度下降

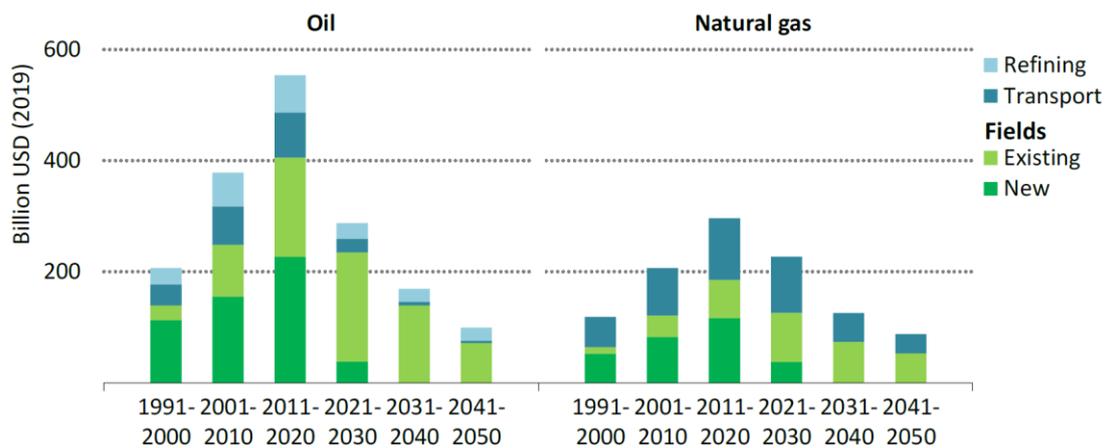
到少於 600 百萬公噸煤當量。雖然 CCUS 的發展持續增加，但 2050 年煤炭使用量已經比 2020 年使用量減少 90% 了。石油需求不再回到 2019 年的高峰點，從 2020 年每天 88 百萬桶(million barrels per day, mb/d)，到 2030 年的 72 百萬桶，到 2050 年 24 百萬桶。從 2020 到 2050 年降低了 75%。天然氣則是從 2020 年的低點回彈，到 2020 年代中期達到 4.3 兆立方公尺(billion cubic metres, bcm)，2030 年就降至 3.7 兆立方公尺，2050 年為 1.75 兆立方公尺。到 2050 年天然氣使用量降到 2020 年的 55%。



資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

圖 2、NZE 情境煤油氣產量預估

在 NZE 情境，石油與天然氣生產從 2020 年到 2031 年投資金額每年約 3500 億美元，這數字很接近 2020 年投資金額，但比過去 5 年的平均量低 30%。NZE 情境假設未來至 2050 年的投資是用於維持已經營運的油氣田，2030 年後，每年平均投資金額約 1700 億美元。



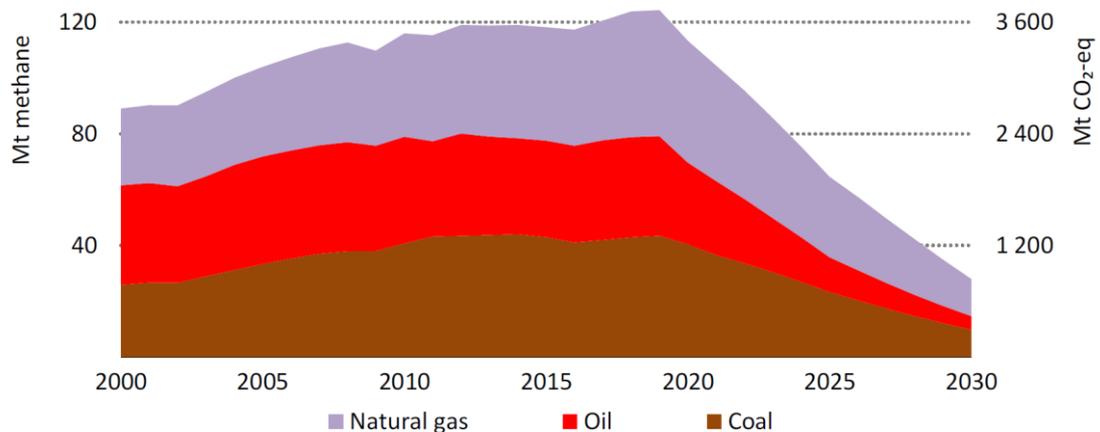
IEA. All rights reserved.

資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

圖 3、NZE 情境油氣投資金額預估

NZE 情境下煤油氣排放量快速下降。目前石油生產的溫室氣體排放密集度約低於 100 公克 CO₂ 當量/桶，若碳價加入化石燃料生產，將提高成本，變得不具有生產經濟效益。如 2030 年當 CO₂ 價格為每噸為 100 美元，按目前的平均排放密度，這將使每桶生產成本增加 10 美元。

甲烷排放約占煤炭和天然氣供應鏈排放的 60%，約占石油供應鏈排放的 35%。化石燃料甲烷排在 NZE 情境到 2030 年已經降低 75%，相當於 25 億噸 CO₂ 當量。其中三分之一是因為化石燃料使用量下降，但更多是因為減排措施與技術大量使用。



IEA. All rights reserved.

資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

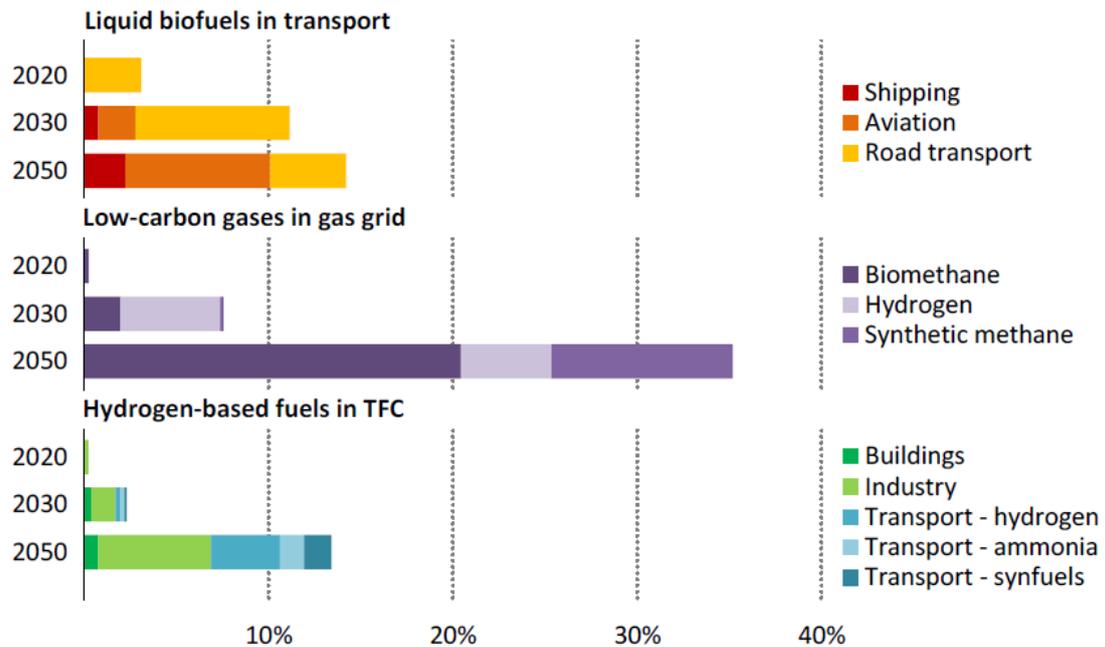
圖 4、NZE 情境煤油氣的甲烷排放預估量

可降低排放密集度的行動包括不再使用直接燃燒方式、固定排放源使用 CCUS、煤油氣上游生產過程的電氣化(通常使用離網的再生能源發電)。NZE 情境目標對於煤油氣上游產業與從業者帶來衝擊，但也帶來機會。例如煤炭開採量雖急劇下降，但是能源轉型所需的其他金屬礦物的開採量會增長非常快速，因此，採礦業的專業知識很可能會受到高度重視。石油和天然氣行業可在大規模開發潔淨能源技術上發揮關鍵作用，例如 CCUS，氫能，生質能和離岸風能。因為要大規模發展技術並降低成本取決於大規模的工程和項目管理能力與經驗，這些都是大型石油和天然氣公司所具備的能力。

(三)低排放燃料供給

1.淨零排放能源使用趨勢

要達成淨零排放是需要低排放燃料才有可能達成，不可能只靠電力就能滿足。這類情況會出現在長途運輸(卡車，航空和運輸)以及重工業的供熱和原料供應(feedstock)。某些低排放燃料可以與即有的基礎設施和設備共用，幾乎不需要對設備或車輛進行任何改裝。目前低排放燃料僅占全球最終能源需求的 1%，NZE 情境下到 2050 年將增加到 20%。液態生質燃料占全球運輸能源需求在 2020 年僅有 4%，到 2050 年將增加到 14%。到 2050 年，氫能燃料可進一步滿足運輸能源需求的 28%。低碳排放氣體燃料(如生質甲烷，合成甲烷和氫氣)到 2050 年將滿足全球管線天然氣需求的 35%，而目前此占比趨近於 0。全球氫能相關燃料在最終能源使用占比將達到 13%。氫和氨可作為電力系統的低排放來源，在 2050 年預估占總發電量的 2%，使得電力部門成為帶動氫需求的重要驅動力。



IEA. All rights reserved.

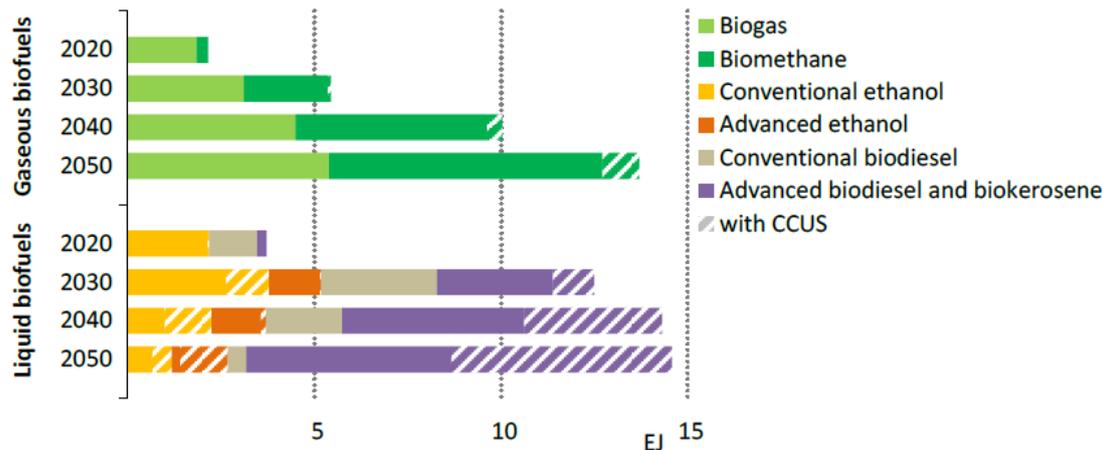
資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

圖 5、NZE 情境低排放燃料供給部門別數據

2. 生質能

生質能在 NZE 情境供給快速增長，液態生質燃料到 2050 年增加近四倍，沼氣增加了六倍。目前運輸所使用的液態生質燃料有 7% 是傳統農作物生產的(如甘蔗，玉米和大豆)。這些農作物直接與糧食生產耕地競爭，而限制了擴大產量的範圍。因此，NZE 情境生質能的增長主要來自於先進的原料，如廢棄物以及在不適合種植糧食作物的土地上種植能源作物。使用木質纖維的先進液體生質燃料生產技術在未來十年迅速擴展，占液體生質燃料從 2020 年的不到 1% 躍升至 2030 年的近 45% 和 2050 年的 90%。

沼氣的供應量甚至超過了液態生質燃料。注入天然氣輸送管線的比例從 2020 年的不到 1% 擴大到 2050 年的近 20%，對於降低管線天然氣碳排密集度有重大貢獻。生質甲烷主要是透過糞便等農業殘留物或城市廢棄物的厭氧消化產生，這可避免甲烷排放。但由於這些料源分散很廣，需要建置更多管線或收集點。沼氣與生質甲烷可以作為潔淨烹飪的燃料與發電之用。



IEA. All rights reserved.

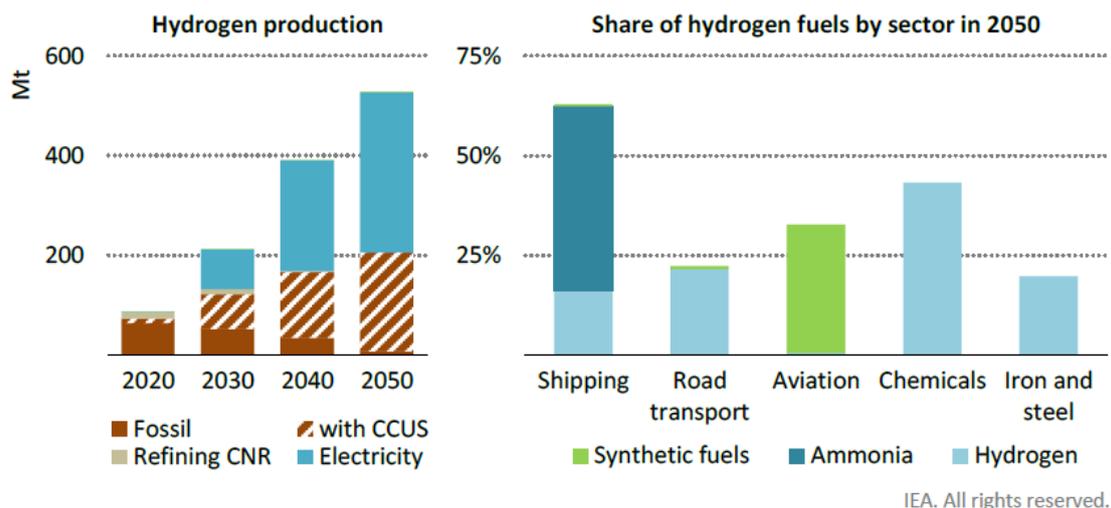
資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

圖 6、NZE 情境技術別生質燃料產量

3. 氫能與相關燃料

現今能源行業中的氫氣使用主要限於煉油以及化學工業中氨與甲醇的生產。2020 年全球氫氣需求約為 9000 萬噸，主要來自化石燃料(主要是天然氣)，排放的二氧化碳接近 900 噸。為了達成 NZE 情境目標，所需的氫氣量和氫氣的生產都跟現況有很大的不同。到 2050 年，需求將增加近六倍，達到 530 百萬公噸，其中一半用於重工業(主要是鋼鐵和化學產業)和運輸部門。有 30% 是轉化為其他與氫相關的燃料，主要有氨(用於運輸和電力部門)、合成煤油(用於航空)和參配管路天然氣的合成甲烷。有 17% 用於燃氣發電廠，用以平衡太陽能發電和風力發電量等變動性再生能源發電量的增加，並提供跨季節性儲能之用。總體來看，到 2050 年氫能與相關燃料占全球最終能源需求的 13%。

2050 年氫氣生產幾乎完全基於低碳技術，如電解占全球產量的 60% 以上，天然氣和 CCUS 佔近 40%。預估 2030 年全球電解槽容量將達到 850GW，到 2050 年將達到 3600GW，遠高於現在的 0.3GW。電解使用的電力在 2050 年約 15 兆度電，占總發電量的 20%，其中 95% 來自再生能源、3% 來自核電，2% 來自搭配 CCUS 的火力發電。到 2050 年，透過 CCUS 生產氫能所用的天然氣量為 925 兆立方公尺，約占全球天然氣需求量的 50%，捕獲的二氧化碳量為 1.8 Gt。



資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

圖 7、NZE 情境氫能與相關燃料產量

擴大技術部署和相關製造能力對於降低成本至關重要。NZE 情境在 2050 年以搭配 CCUS 的天然氣的產氫成本約 1-2 美元/公斤，其中天然氣成本約占 15-55%。透過規模經濟與學習效果可以讓 2030 年成本較 2020 年下降 60%。而電解製氫因電力占總生產成本的 50-85%(取決於電力來源和地區)，因此要降低生產成本就是要降低低碳電力的成本。以再生能源電力的平均成本從目前的 3.5-7.5 美元/公斤下降到 2030 年的 1.5-3.5 美元/公斤，2050 年的 1-2.5 美元/公斤，與前述天然氣搭配 CCUS 的成本差異不大。

4.關鍵里程碑

針對低排放燃料提出至 2050 年需要達成的重要里程碑，如下圖所示。如現代化生質能占比到 2030 年需達到 45%，生質能生產過程所捕獲二氧化碳要在 2030 年達到 150 百萬噸等時間點與相對的數量。

Sector	2020	2030	2050
Bioenergy			
Share of modern biofuels in modern bioenergy (excluding conversion losses)	20%	45%	48%
Advanced liquid biofuels (mboe/d)	0.1	2.7	6.2
Share of biomethane in total gas networks	<1%	2%	20%
CO ₂ captured and stored from biofuels production (Mt CO ₂)	1	150	625
Hydrogen			
Production (Mt H ₂)	87	212	528
<i>of which: low-carbon</i> (Mt H ₂)	9	150	520
Electrolyser capacity (GW)	<1	850	3 585
Electricity demand for hydrogen-related production (TWh)	1	3 850	14 500
CO ₂ captured from hydrogen production (Mt CO ₂)	135	680	1 800
Number of export terminals at ports for hydrogen and ammonia trade	0	60	150

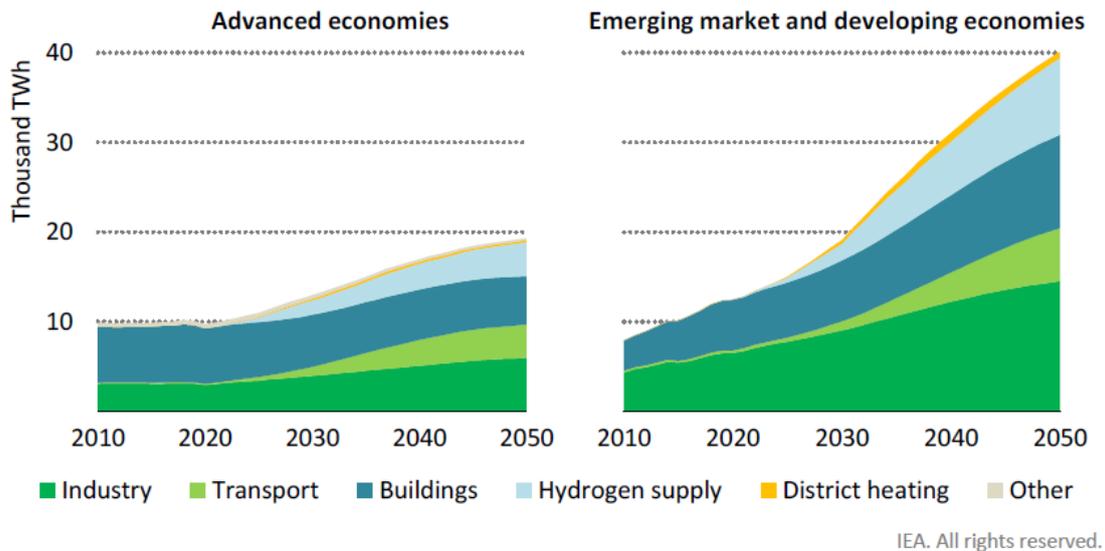
資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

圖 8、低排放燃料目標與里程碑

(四)電力部門

1.淨零排放下的能源與排放趨勢

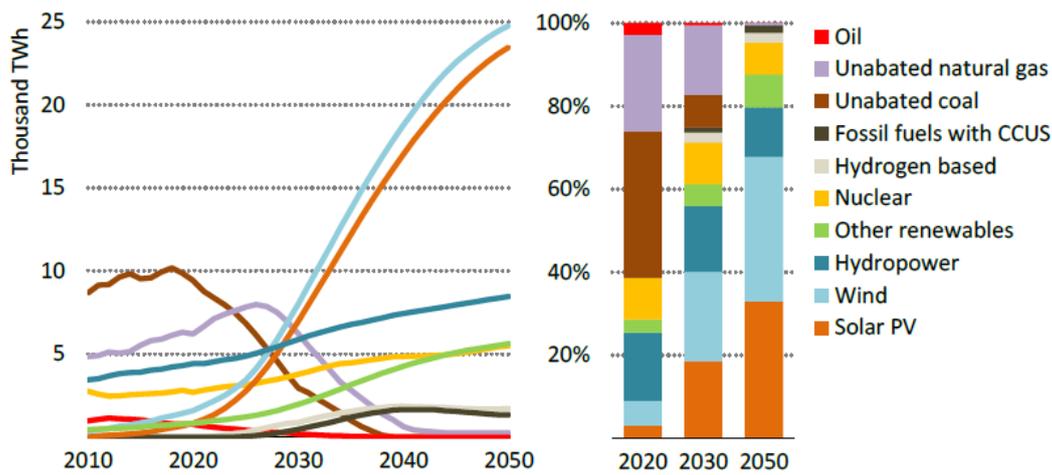
NZE 情境的電力需求顯著增加，這是因為經濟活動增加、最終消費部門的快速電氣化及電解製氫所造成，除此之外，發電端也發生了很大的轉變。2020 年全球電力需求為 23 兆度電，過去十年的年均成長率為 2.3%。到 2050 年增加至 60 兆度電，年均成長率為 3.2%。2050 年新興與發展中經濟體的電力需求占全球電力需求增長的 75%。在人口增加，收入和生活水準提高以及與脫碳有關的新需求推動下，到 2030 年電力需求將增加 50%，到 2050 年將增加三倍。已開發經濟體的電力需求在經歷了長達十年的停滯之後也開始增加，在 2020 年至 2050 年之間幾乎翻倍，主因為最終消費部門電氣化和製氫所至導致的結果。



資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

圖 9、部門別與不同經濟發展階段國家的電力需求

電力部門的轉型對於 2050 年淨零排放至關重要。發電所排放的二氧化碳是目前的最大來源，占能源相關排放總量的 36%。2020 年全球發電所排放的 CO₂ 排放總量為 12.3 Gt，其中燃煤發電為 9.1 Gt，燃氣電廠為 2.7 Gt，燃油電廠為 0.6 Gt。再生能源對於電力部門脫碳的貢獻最大，NZE 情境預估到 2030 年全球再生能源發電量增加接近三倍，到 2050 年則增加八倍。這樣的增長速度讓再生能源發電量占總發電量比例從 2020 年的 29% 提高到 2030 年的 60% 以上，到 2050 年則將近 90%。太陽能與風力發電將在 2030 年之前成為全球主要的電力來源，到 2050 年發電量將超過 23 兆度電，相當於 2020 年全球發電量的九成。在 2020 年代後期將太陽能與風力發電搭配電池儲能系統，可提高電力系統的靈活性並保持電力安全是非常常見的方式。在加上需量反應滿足短期靈活性的需求，透過水力發電或氫氣則可提供幾天內甚至整個季節的電力調度。水力發電是目前最大的低碳電力來源，在 NZE 情境中亦是穩定增加，到 2050 年預估將增加一倍。利用生質能發電(生質能專燒電廠或通過天然氣管線輸送的生質甲烷)到 2030 年將增加一倍，到 2050 年將增加近五倍。



IEA. All rights reserved.

資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

圖 10、NZE 情境燃料別發電量與占比

核電對於達成 NZE 情境目標亦有重大貢獻，至 2030 年核能發電量穩定成長 40%，2050 年將增加一倍，但佔比會低於 10%。核能發電在 2030 年代初期達到高峰，每年約增加 30GW，是過去十年的五倍。在已開發國家則是尋求核電廠延役，因為是具有成本效益的低碳電力來源之一，而從 2021 年到 2035 年，新增核電廠平均每年將增加 4.5GW，特別是小型模組化核電廠。但已開發國家的核能發電佔比卻從 2020 年的 18% 下降到 2050 年的 10%。新增核電裝置容量有三分之二是由新興與發展中經濟體所建造，主要是大型核電廠，到 2050 年增加了三倍。導致新興與發展中經濟體的核能發電佔比從 2020 年的 5% 提高到 2050 年的 7%。

藉由改造燃煤和燃氣電廠搭配 CCUS 或氫能燃料，可使充分利用現有資產作為過渡之用，同時減少排放並維持電力安全。最適合搭配 CCUS 的會是在大型、剛蓋好的電廠，並且有足夠的空間來增設捕獲設備，以及在方便儲存 CO₂ 或使用需求的位置。符合前述描述的電廠多在中國的燃煤電廠與美國的燃氣電廠。雖然這類電廠所能提供的發電量只有總發電量的 2%，但在此期間，改造後的電廠總共吸收了 15 Gt 的 CO₂ 排放量。

電力部門率先實現淨零排放，主因為成本低廉、獲得了廣泛的政策支持以及再生能源發電技術的成熟。太陽能發電獨占鰲頭，是大多數市場上最便宜的新能源，並有 130 多個國家/地區提供政策支持。陸域風力也是具有市場競爭力的低成本技術，也有政策支持，並可迅速擴大規模，可與太陽能發電相互抗衡，但在

某些地區仍面臨著公眾的反對以及複雜的許可辦理程序。近年來，離岸風電技術發展迅速，部署有望在短期內加速。目前離岸風力為固定式安裝，但從 2030 年左右開始，浮動式風力發電技術將逐漸成熟，可釋放離岸風力發電的潛力，對減碳做出重大貢獻。水力發電、生質能及地熱技術是公認的成熟且具備靈活性的再生能源。集中式太陽能 and 海洋能還不能算是很成熟的發電技術，但是從長遠來看，創新是此類技術對於淨零排放的貢獻。

2. 關鍵里程碑

提出電力部門至 2050 年需要達成的重要里程碑，如下圖所示。重要里程碑如以開發國家電力必須在 2035 年脫碳，新興與發展中國家則是在 2040 年脫碳。基礎設施則包括電池儲能系統必須要在 2030 年與 2050 年分別達到 590 與 3100GW。

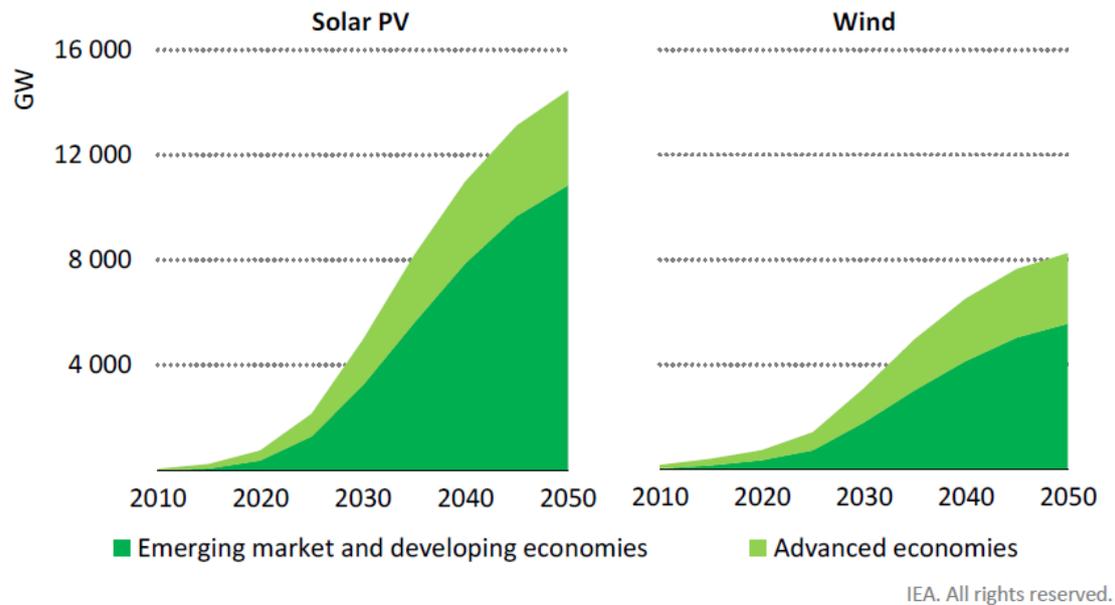
Category			
Decarbonisation of electricity sector	<ul style="list-style-type: none"> Advanced economies in aggregate: 2035. Emerging market and developing economies: 2040. 		
Hydrogen-based fuels	<ul style="list-style-type: none"> Start retrofitting coal-fired power plants to co-fire with ammonia and gas turbines to co-fire with hydrogen by 2025. 		
Unabated fossil fuel	<ul style="list-style-type: none"> Phase out all subcritical coal-fired power plants by 2030 (870 GW existing plants and 14 GW under construction). Phase out all unabated coal-fired plants by 2040. Phase out large oil-fired power plants in the 2030s. Unabated natural gas-fired generation peaks by 2030 and is 90% lower by 2040. 		
Category	2020	2030	2050
Total electricity generation (TWh)	26 800	37 300	71 200
Renewables			
Installed capacity (GW)	2 990	10 300	26 600
Share in total generation	29%	61%	88%
Share of solar PV and wind in total generation	9%	40%	68%
Carbon capture, utilisation and storage (CCUS) generation (TWh)			
Coal and gas plants equipped with CCUS	4	460	1 330
Bioenergy plants with CCUS	0	130	840
Hydrogen and ammonia			
Average blending in global coal-fired generation (without CCUS)	0%	3%	100%
Average blending in global gas-fired generation (without CCUS)	0%	9%	85%
Unabated fossil fuels			
Share of unabated coal in total electricity generation	35%	8%	0.0%
Share of unabated natural gas in total electricity generation	23%	17%	0.4%
Nuclear power			
Average annual capacity additions (GW)	2016-20	2021-30	2031-50
	7	17	24
Infrastructure			
Electricity networks investment in USD billion (2019)	260	820	800
Substations capacity (GVA)	55 900	113 000	290 400
Battery storage (GW)	18	590	3 100
Public EV charging (GW)	46	1 780	12 400

資料來源：IEA(2021), NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR.

圖 11、電力部門轉型目標與里程碑

NZE 情境透過增加所有可行低排放燃料與技術別的發電裝置容量來促成電力部門轉型。2030 年全球再生能源發電裝置容量增加兩倍以上，2050 年預估增加九倍。這意味著從 2030 年到 2050 年平均每年增加 600GW 的太陽能發電和每年 340GW 的風力發電裝置容量(含汰舊換新)。離岸風力發電隨著時間也會越來越重要，占所有新增風力裝置量比例從 2020 年的 7% 增加到 20%。

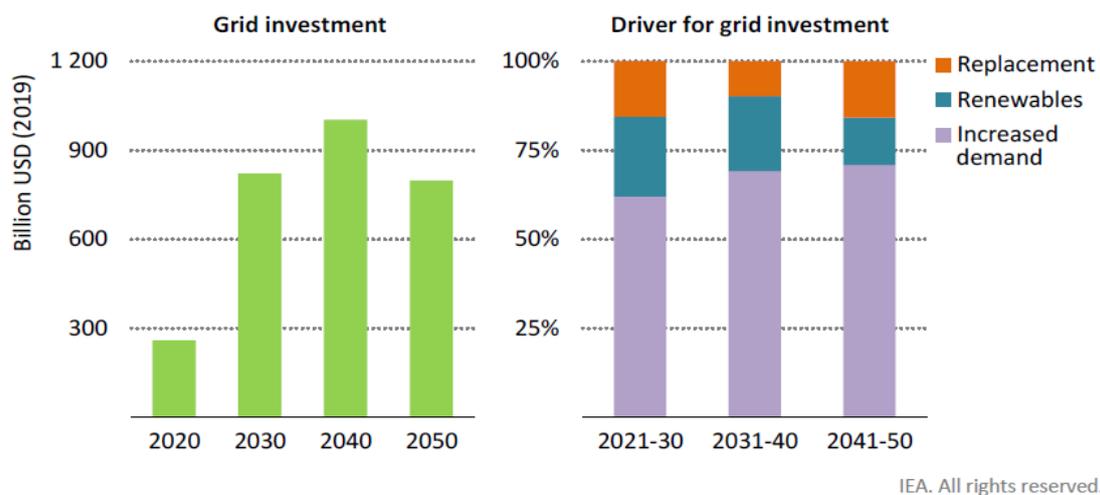
電網投資對於實現電力部門轉型至關重要。耗時 130 年的全球電網建設需要在 2040 年前將總長度增加一倍以上，到 2050 年要再增加 25%。2030 年電網總投資需要增加到 8200 億美元，到 2040 年增加到 1 兆美元，然後在電力脫碳與再生能源增長趨緩後回跌。而在 2050 年投資需求主要在替換老化的網路基礎設施。



IEA. All rights reserved.

資料來源：IEA(2021), Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector.

圖 12、NZE 情境太陽能與風力發電裝置量

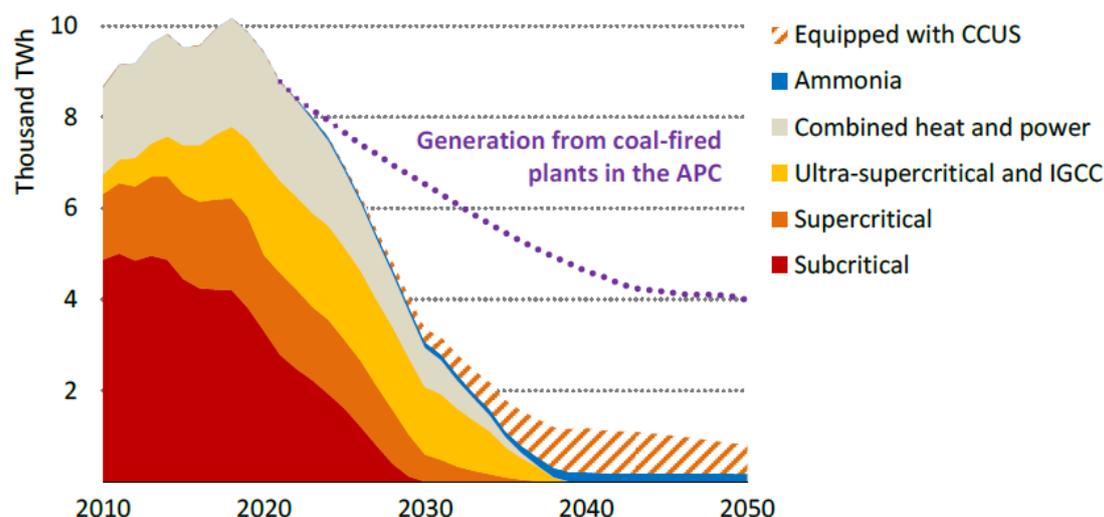


IEA. All rights reserved.

資料來源：IEA(2021), Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector.

圖 13、NZE 情境全球電網投資金額

如果政府要達成 NZE 情境目標的 2050 年淨零排放，將面臨電力部門的幾項關鍵決定，尤其是既有電廠使用方式。改造既有燃煤與燃氣電廠為 CCUS 或是混燒氫能燃料，是政府必須在 2030 年前決定並支持的首要工作。而對於其他化石燃料發電廠，則是必須走向淘汰一途。除非進行改造，否則燃煤電廠應在 2040 年前完全淘汰。這將需要關閉 870GW 的現有亞臨界燃煤發電電廠(佔所有發電裝置容量的 11%)。到 2040 年所有大型燃油電廠都應逐步淘汰。到 2050 年燃氣發電仍將是電力配比的重要組成部分，但仍需要政府的大力支持，確保 CCUS 得以大規模部署。



IEA. All rights reserved.

說明：APC=Announced Pledges Case，APC 情境假設所有提出淨零排放目標的國家皆達成目標。

資料來源：IEA(2021), Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector.

圖 14、不同技術別燃煤電廠發電量

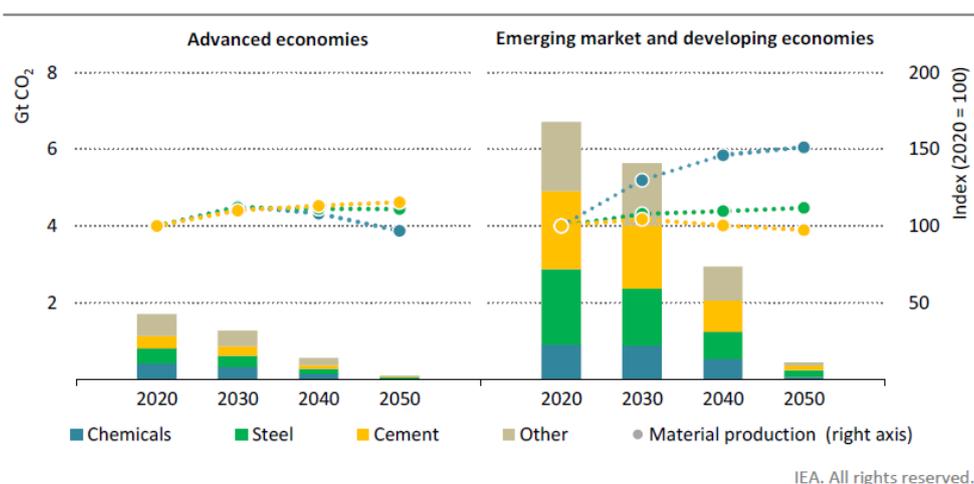
(五) 工業

淨零情境評估工業於 2030 年需要減少 20%排放、2050 年則要降低 90%排放。重工業在 2050 年要減少整體 60%排放，需依賴目前仍未商業化的減量技術(氫或使用 CCUS)。2030 年後所有新的工業設備需採用近零排放技術，也就是說 2030 年起，全球每個月有 10 座新與既有重工業廠要裝設 CCUS、建置 3 座新的氫基工廠及增加 2GW 電解槽產能。

1. 淨零情境下能源與排放趨勢

2020 年全球工業碳排達 84 億噸，其中 70% 排放來自三大重工業：化學、鋼鐵及水泥業。過去 20 年，因全球經濟成長與人口擴增，鋼鐵需求成長 2.1 倍、水泥需求成長 2.4 倍及塑膠(化學產業主要產品)需求成長 1.9 倍。未來藉由材料循環再利用可抑低前述產品需求，但為滿足再生能源發電設備與運輸設備(主要是電動車)的發展需求，IEA 預估 2050 年鋼鐵需求較 2020 年增加 12%，初級化學品需求增加 30%，水泥產品則持平(如圖 15)。前述產品在未來要如何近(淨)零生產將是重大挑戰。

Figure 3.15 ▶ Global CO₂ emissions from industry by sub-sector in the NZE



The majority of residual emissions in industry in 2050 come from heavy industries in emerging market and developing economies

Note: Other includes the production of aluminium, paper, other non-metallic minerals and other non-ferrous metals, and a series of light industries.

圖 15、淨零情境下工業部門排放趨勢

重工業碳排放於 2030 年需要減少 20% 排放、2050 年則要降低 93% 排放。優化設備操作效率、採取最佳可行技術、提升材料效率等是達成 2050 年淨零目標的重要技術與措施。圖 16 呈現，其中可貢獻 60% 減量的技術與措施，目前還在發展階段(大型原型與示範)。如氫與 CCUS 潔淨技術可滿足重工業高溫熱需求，也減少製程排放，此兩項技術可幫助重工業 2050 年減量 50%。

Figure 3.16 ▶ Global CO₂ emissions in heavy industry and reductions by mitigation measure and technology maturity category in the NZE

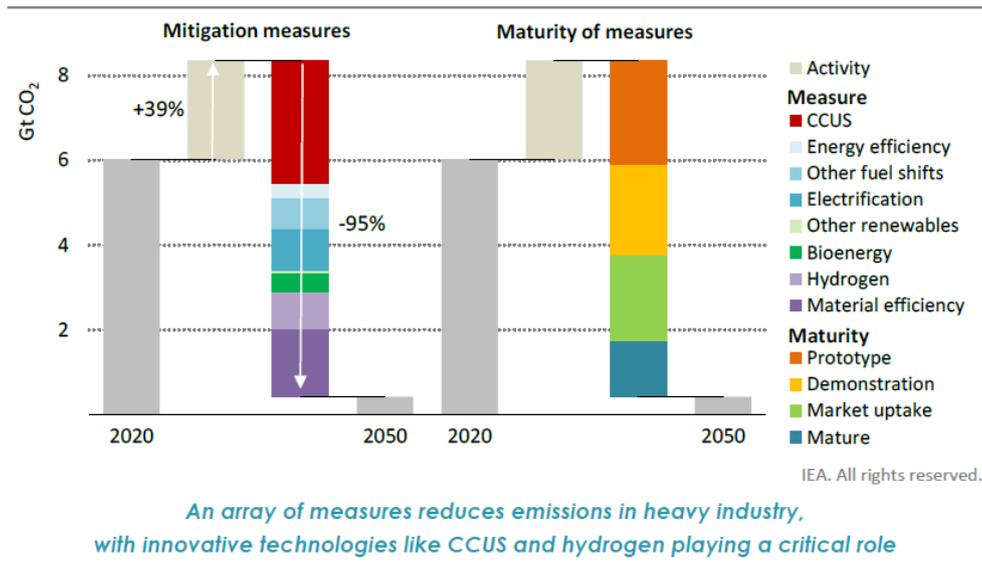


圖 16、淨零情境下重工業部門排放趨勢與技術成熟度

相對於其他部門，除高溫熱需求與製程排放，重工業還有二個減量困難的原因。第一，工業產品全球競爭激烈，產業為保有利潤空間，較不願意採用較昂貴的減量技術。所以，需要國際通力合作，且有良好的技術移轉。第二，重工業是資本密集，且其設備使用年限長，這會拖慢產業採用創新技術的速度。IEA 認為策略性、立即地投資創新技術，可以大幅度減少提早汰換設備。

工業部門的能源結構發生根本變化。化石燃料占比從 2020 年 70% 降到 2050 年 30%，電力占比則從 20% 增加到 45% (其中，15% 電力用來生產氫氣)，生質能占比 2050 年為 15%。

(1) 化學業

淨零情境中，化學業排放從 2020 年的 13 億噸下降到 2030 年的 12 億噸和 2050 年的約 6,500 萬噸。化學業的能源使用逐漸降低化石燃料占比，從 2020 年 83% (主要是石油和天然氣)，降到 2030 年 76%、2050 年 61%。到 2050 年，油品仍然是化學業的主要燃料。

根據淨零情境評估，全球化學業 2030 年碳減量，其中 80% 減量是目前市場上可用技術所貢獻的，包括塑料回收和再利用、更有效地利用氮肥 (這可減少初級化學品需求)、採取提高能源效率的措施。到 2030 年以後，減量需要依賴化學

製程改進，但這些技術尚在研發中，包括某些 CCUS 應用以及直接由變動性再生電力產製電解氫。

(2) 鋼鐵業

淨零情境中，鋼鐵業全球碳排放量，從 2020 年 24 億噸下降到 2030 年 18 億噸、2050 年 2 億噸。鋼鐵業的能源使用大量降低化石燃料占比，從 2020 年的 85%，下降到 2050 年約 30%。鋼鐵業於 2050 年仍使用一定量的煤(主要是其作為化學還原劑)，但已與 CCUS 結合使用。

淨零情境觀察到鋼鐵業從煤炭到電力的重大轉型。到 2050 年，電力和其他非化石燃料占該產業最終能源需求近 70% (2020 年僅 15%)。該轉變是由廢鋼電弧爐(EAF)、氫基等技術驅動的直接還原鐵(DRI)設施、鐵礦石電解和輔助設備的電氣化。煤的能源使用占比從 2020 年 75% 下降到 2050 年 22%，其中 90% 與 CCUS 結合使用。

根據淨零情境評估，全球鋼鐵業 2030 年碳減量，其中 85% 減量是目前市場上可用技術所貢獻，包括材料和能效措施、使用廢鋼進行生產 (所需能源僅占初級鋼鐵能耗的十分之一，主要是隨著更多產品達使用年限，廢鋼供應量增加)。2030 年以後，減量貢獻大部分來自使用正在開發的技術，如氫基 DRI 和鐵礦石電解、創新的冶煉還原。

(3) 水泥業

目前生產一噸水泥平均會產生 0.6 噸 CO₂，其中 2/3 是原料投入產生的製程排放；1/3 是燃料燃燒，主要來自煤炭和一些石油焦，提供 90% 熱能需求。若能增加替代材料摻配比率(代替熟料，熟料是活性成分和排放量最大的成分)，降低水泥需求及提升能源效率，可以讓全球水泥業 2030 年較 2020 年減少 40% 排放。藉由替代材料使用，2020 年平均熟料比率 0.71，2030 年下降至 0.65，2050 年持續降到 0.57。到 2050 年，石灰石和煅燒粘土是主要替代材料。由於技術可實現的最低熟料比率為 0.5，還需要採取其他措施來實現更大程度的減排。

根據淨零情境，全球水泥業 2030 年以後，大部分的減排量都依賴目前正在研發的技術，如 CCUS (可貢獻 2050 年 55% 減排量)。在許多達成淨零的方案中，化石燃料燃燒排放加裝 CCUS 應用，比起零排放技術，是相對成本有效(cost-effective)。到 2050 年，水泥生產中將不再使用煤炭，屆時熱能需求，由天然氣提供 40% (目前 15%)，生物能和再生廢棄物提供 35% (目前 5%)，氫氣與再生能源。

直接電氣化提供 15%，其餘熱能則由石油產品和不可再生廢物提供。水泥窯電氣化，目前處於原型階段，在 2040 年後才開始小規模部署。從 2040 年代開始，氫開始滿足 10% 水泥窯熱能需求。摻配替代材料的創新型水泥限制或避免製程排放，甚至能夠在固化過程中捕獲二氧化碳，但其技術仍處於開發的早期階段。

2. 重要里程碑與決策點

淨零情境中，2030 年起工業所有新增設備均採用近零排放技術。新興市場和發展中國家在未來幾年將增加和汰換許多重工業設備，他們期望已開發國家提供財政支持。2030 年到 2050 年，全球每個月需要 10 座新與既有重工業廠裝設 CCUS、建置 3 座新的氫基工廠及新增 2GW 電解槽產能。到 2050 年，幾乎所有重工業生產設施採用近零排放技術。這個挑戰應是可以實現的。因為，相比之下，從 2000 年到 2015 年，中國平均一個月就建造約 12 座重工業廠。

政府必須果斷採取行動，以實現淨零情境設想的規模和步伐，重工業實現潔淨能源轉型。在未來兩年內，已開發國家需要做出決定，為關鍵的近零排放工業技術提供研發資金，並減輕大規模示範技術的投資風險。這將導致針對不同地區的每種技術至少開展兩個或三個商業示範項目，並在 2020 年代中期實現商業化。國際協作將有助於更好地利用資源，並防止資金缺口。

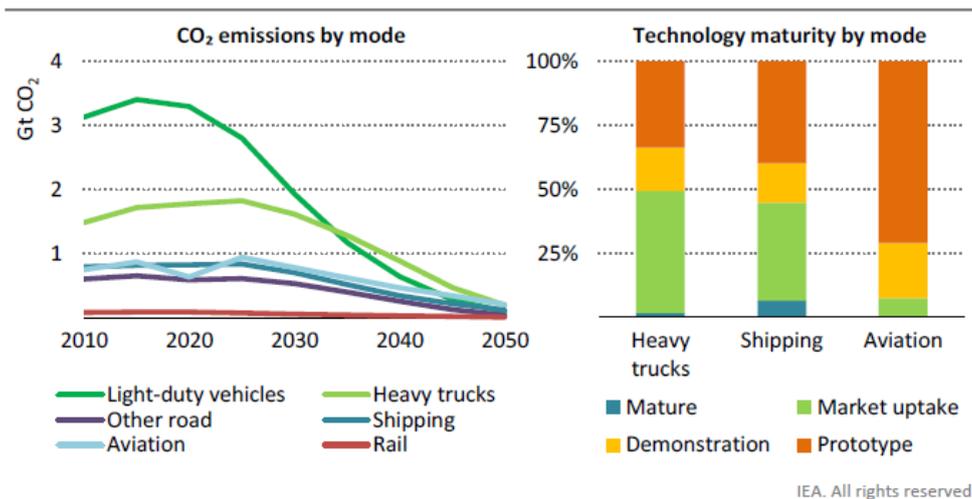
淨零戰略必須以特定政策為基礎。到 2025 年，所有國家都應建立長期的 CO₂ 減排政策框架，以確保下一輪產能增加投資將採用近零排放技術。也就是說，各國政府對近零排放技術大規模部署需及早做出決策。已開發國家需在 2024 年前制定戰略，新興市場和發展中國家則需在 2026 年前提出。這些戰略需要包括制定具體計劃，為 CCUS、氫氣開發必要的基礎設施並為其提供資金，以及用於氫氣生產的清潔發電，所需的基礎設施建設亦應盡快開始(因建設時間長)。各國政府一開始亦可以採取如碳稅、排放交易制度、優惠融資等措施，激勵產業投資與布署低碳與淨零技術。

輛和行為改變有助於減少長途運輸的排放，但航空和航運在 2050 年仍會產生 3.3 億噸排放，這表示航空和航運低碳化仍充滿挑戰。

1. 淨零情境下能源與排放趨勢

2020 年全球運輸碳排達 70 億噸，淨零情境評估於 2030 年排放會降低到 55 億噸，2050 年更是減少到 7 億噸(較 2020 年減少 90%) (如圖 17)。由於技術成熟度存在顯著差異，這影響了不同運輸方式的減碳速度。二輪或三輪車輛於 2040 年幾乎已無排放；小客車、小貨車及鐵道則於 2040 年後期幾乎已無排放；來自重型貨車、航空及航運的排放，僅管於 2020 年至 2050 年間，每年平均減少 6%，但在 2050 年仍排放 5 億噸 CO₂。這表示長程運輸的減量技術仍在研發中，且未來十年內都難以大規模商業化。

Figure 3.21 ▶ Global CO₂ transport emissions by mode and share of emissions reductions to 2050 by technology maturity in the NZE



Passenger cars can make use of low-emissions technologies on the market, but major advances are needed for heavy trucks, shipping and aviation to reduce their emissions

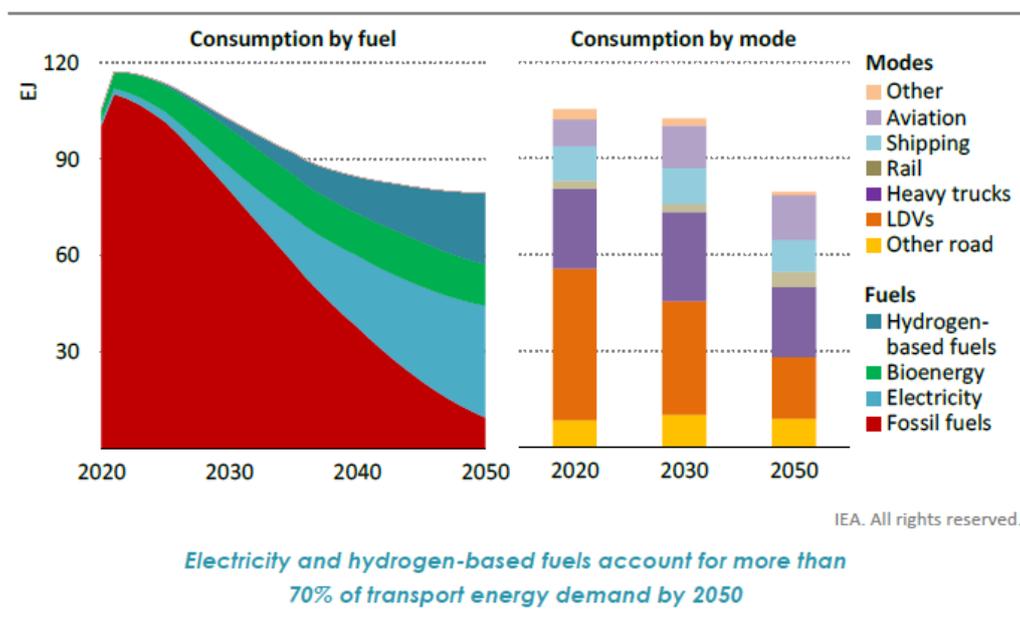
Notes: Other road = two/three wheelers and buses. Shipping and aviation include both domestic and international operations. See Box 2.4 for details on the maturity categories.

圖 17、淨零情境下運輸部門排放趨勢

除提升運具效率，運輸部門低碳化將要仰賴運輸模式轉換(如以大眾運輸代替開車)、以及讓大眾可以有效率地轉換運輸模式(如民眾有效轉乘公車、鐵道、捷運)。如圖 18 呈現，運具採用低碳技術也相當重要，像是運具電氣化(包括燃料電池車)，難以電氣化的運具則使用低碳燃料(如生質燃油或氫基燃料)。雖然目前的運輸部門仍嚴重倚賴石油產品，2020 年石油產品在能源消費占比超過 90%。淨零情境下，石油產品占比在 2030 年將低於 75%，2050 年約 10%。到 2040 年，

電力在運輸部門能源消費占比接近 45%，成為主要燃料，其次是氫(28%)和生質能(16%)。

Figure 3.22 ▶ Global transport final consumption by fuel type and mode in the NZE



Note: LDVs = Light-duty vehicles; Other road = two/three wheelers and buses.

圖 18、淨零情境下運輸部門能源消費結構與運輸模式種類

(1)公路運輸

運具電氣化扮演重要關鍵。電池成本在十年內應可降低 90%，之後電動車銷售會比近 5 年平均增加 40%。重型貨車因需要較大型的電池，充電時間長、行駛里程長限制其電動化的速度。目前重型卡車可採用減碳策略，為使用生質柴油，在淨零情境中，2030 年後重型卡車逐漸電氣化和使用氫燃料，這需要開始布建基礎設施，降低相關成本(如降低電池成本、提高電池能源密度、降低氫的生產與運儲成本)。

(2)航空

2010 年到 2019 年航空旅運需求平均每年增長 6%，淨零情境假定 2020 年到 2050 年每年僅增長 3%。IEA 認為藉由各國政策可抑制未來旅運需求成長速度，如向航空客運課稅，可促使民眾減少搭乘飛機，轉而搭乘高速鐵路。航空運輸要減排相當困難。IEA 評估 2035 年開始有電動飛機和氫能發機，但因航空運輸需要較高的能量密度和里程考量，2050 年電動飛機和氫能發機的燃料占比仍不到 2%。

不過，若 2050 年生質燃料占比提高到 45%，合成燃料占比提高到 30%，藉改善燃料使用結構減少航空運輸排放。IEA 還認為航班操作效率改善、機身和發動機的燃油效率技術提升也可以減少碳排。

(3)航運

2020 年航運排放 8.3 億噸 CO₂，約占全球能源排放 2.5%。由於市場上缺代可用的低碳技術，且船舶壽命長(通常 25-35 年)，航運是淨零情境中最難實現淨零排放的運輸方式之一。IEA 評估到 2050 年航運排放 1.2 億噸 CO₂ (2020 年後平均每年下降 6%)。短期內，可以透過操作效率抑制燃油消費，中長期則需轉向消費低碳燃料(如生質燃料、氫或氨)。其中，IEA 認為氨是未來可以大規模使用的燃料，為長程航運關鍵減碳來源。氨和氫是未來 30 年達成淨零目標的重要的燃料，2050 年提供航運能源消費 60%，其次為生質燃料(占比 20%)。

(4)軌道

軌道是所有運輸方式中最具能源使用效率與碳密集度最低的。2020 年軌道能源消費中，石油產品占比 55%，未來轉向電氣化，軌道將達到淨零排放。到 2050 年，電力占比超過 90%，其他主要由氫氣滿足。

2.重要里程碑與決策點

電氣化是公路和軌道部門減少排放的主要選擇，該技術已商業化，隨著電動汽車充電基礎設施的完備，可以立即加速電氣化。難以減少排放重型貨車、航運及航空部門，需要的減量技術目前處於原型和示範階段，需要在下一個十年中大規模推廣，並開發相關基礎設施(如加氫站)。

運輸部門的低碳轉型路徑，需要各國政府在下一個十年通力合作。各國政府在未來 5 年要取消化石燃料補貼，鼓勵民眾使用低碳運具。2025 年前，各國政府需要訂定明確的運輸技術研發策略，優先開發低碳技術，尤其是電池技術應是要立即優先開發。政府亦明確訂定內燃機車輛的禁售年度，提供產業訊號，讓產業可以即時因應。

表 2、運輸部門重要里程碑

Table 3.4 ▶ Key milestones in transforming the global transport sector

Category			
Road transport	<ul style="list-style-type: none"> • 2035: no new passenger internal combustion engine car sales globally 		
Aviation and shipping	<ul style="list-style-type: none"> • Implementation of strict carbon emissions intensity reduction targets as soon as possible. 		
Category	2020	2030	2050
Road transport			
Share of PHEV, BEV and FCEV in sales: cars	5%	64%	100%
two/three-wheelers	40%	85%	100%
bus	3%	60%	100%
vans	0%	72%	100%
heavy trucks	0%	30%	99%
Biofuel blending in oil products	5%	13%	41%
Rail			
Share of electricity and hydrogen in total energy consumption	43%	65%	96%
Activity increase due to modal shift (index 2020=100)	100	100	130
Aviation			
Synthetic hydrogen-based fuels share in total aviation energy consumption	0%	2%	33%
Biofuels share in total aviation energy consumption	0%	16%	45%
Avoided demand from behaviour measures (index 2020=100)	0	20	38
Shipping			
Share in total shipping energy consumption: Ammonia	0%	8%	46%
Hydrogen	0%	2%	17%
Bioenergy	0%	7%	21%
Infrastructure			
EV public charging (million units)	1.3	40	200
Hydrogen refuelling units	540	18 000	90 000
Share of electrified rail lines	34%	47%	65%

Note: PHEV = plug-in hybrid electric vehicles; BEV = battery electric vehicles; FCEV = fuel cell electric vehicles.

為因應電動車大規模上路，2050 年前各國政府應該布建完整的充電基礎設施，確保充電設備企業能永續經營。各國政府亦應提供配套的法規、金融、技術支持智慧電網布建，讓電動車可以協助電網穩定、提高變動性再生能源供應。

重型貨車部門，電動大貨車才剛商業化，燃料電池大貨車預估在未來 5 年可以商業化。政府短期內應該和製造商合作，加速電動/燃料電池大貨車商業化速度。對航空和航運部門來說，其設備使用年限長，然各國政府最慢應於 2025 年前確認其低碳技術發展策略，以及需要國際合作共同開發低碳技術。

(七) 建築

淨零情境評估建築部門 2030 年排放量下降 40%，2050 年下降 95% 以上。2030 年，全球既有建築存量約 20% 進行翻新，所有新建築物均符合零碳排放標準。先進國家到 2025 年，市場銷售的用電器具超過 80% 是最有效率的機型，全球則是到 2030 年代中期以後。2025 年以後，全球市場已無銷售化石燃料鍋爐 (除了與氫氣混用的鍋爐)，以及，熱泵銷售量增加快速。到 2050 年，電力提供建築能耗 66% (2020 年為 33%)。2050 年供暖用天然氣用量將下降 98%。

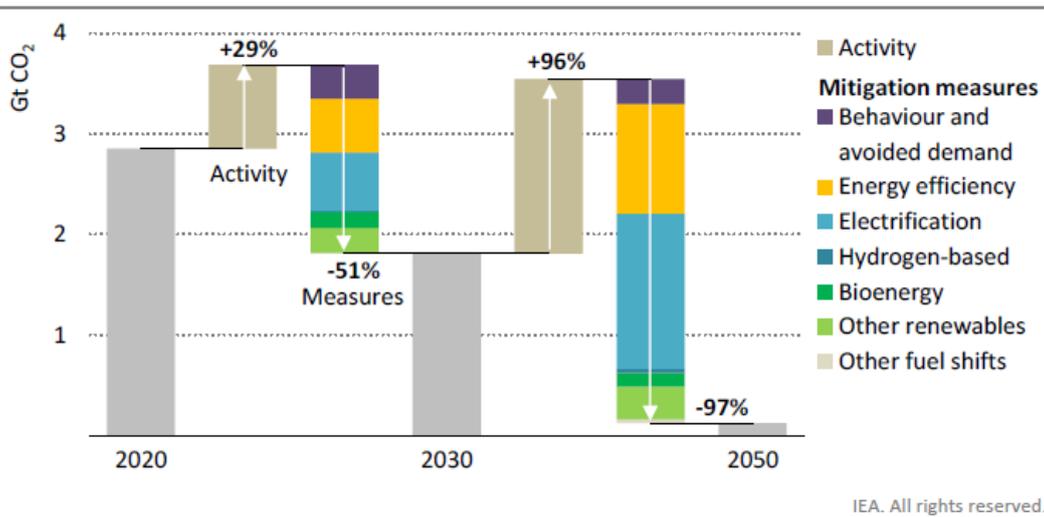
1. 淨零情境下能源與排放趨勢

IEA 推估 2050 年全球建築部門樓板面積較 2020 年增加 75%，其中 80% 來自新興市場與開發中國家。建築物內用能設備也會持續增長，淨零情境評估全球空調設備 2030 年較 2020 年增加 6.5 億台，2050 年再增加 20 億台。儘管需求增加，但建築部門整體碳排放從 2020 年 30 億噸，2050 年降低 1.2 億噸 (較 2020 年減 97%) (如圖 19)。

淨零情境中，建築部門去碳化主要依賴能源效率與電氣化程度。建築部門大多減量技術目前都可在市場上取得，包括新與既有建築的外殼改善、熱泵、高效率用電器具與設備、具材料效率的建築設計等。數位化和智能管理更有效率使用能源，降低排放。還有像提高冷氣設定溫度、降低暖氣溫度、這些行為改變可以立即減量又不需花費額外成本。

建築部門快速移轉到零碳技術，讓化石燃料的能源消費占比於 2030 年降低 30%，2050 年更降至 2%。建築部門電氣化程度則從 2020 年 33% 上升到 2030 年 50%，2050 年更增加到 66% (如圖 20 呈現)。

Figure 3.27 ▶ Global direct CO₂ emissions reductions by mitigation measure in buildings in the NZE

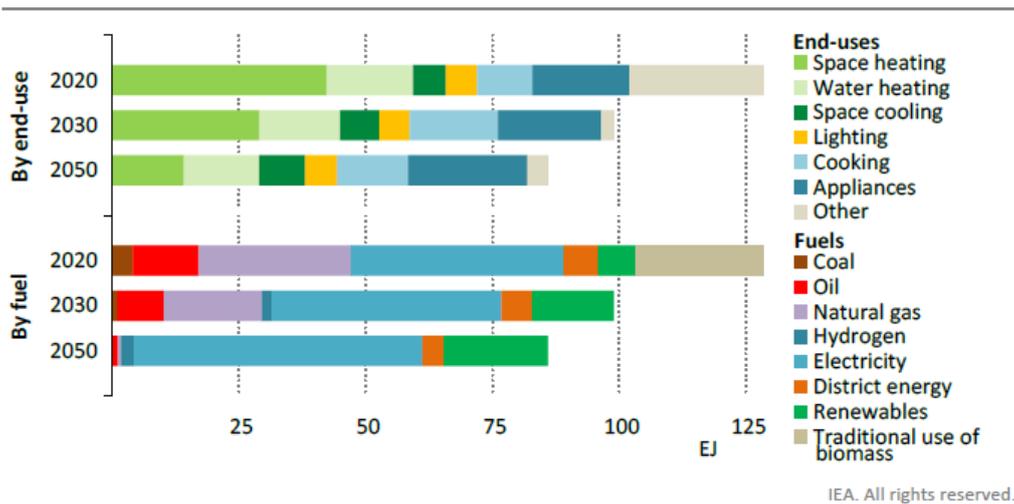


IEA. All rights reserved.

Electrification and energy efficiency account for nearly 70% of buildings-related emissions reductions through to 2050, followed by solar thermal, bioenergy and behaviour

圖 19、淨零情境下建築部門排放趨勢

Figure 3.28 ▶ Global final energy consumption by fuel and end-use application in buildings in the NZE



IEA. All rights reserved.

Fossil fuel use in the buildings sector declines by 96% and space heating energy needs by two-thirds to 2050, thanks mainly to energy efficiency gains

Note: Other includes desalination and traditional use of solid biomass which is not allocated to a specific end-use.

圖 20、淨零情境下建築部門能源消費結構

(1)淨零建築

淨零情境要求建築部門逐步改善既有建築的能源效率、徹底擺脫化石燃料的使用。為實現此目標，2050 年前超過 85%的建築物需要遵守準淨零排放建築物能源標準(zero-carbon-ready building energy codes)。這表示 2030 年前，所有地區都必須導入強制性零碳建築能源標準，使所有新建築都達零碳排；現在建築物則需於 2050 年前完成翻新，以滿足零碳排建築能源標準。

2030 年時，已開發國家的翻新率將從每年不到 1%增長到每年約 2.5%：這表示每年約有 1,000 萬戶需要翻新。在新興市場和開發中國家中的建物壽命通常低於已開發國家，翻新率較低，到 2030 年每年約為 2%。也就是說，新興市場和開發中國家，到 2030 年平均每年要翻修 2,000 萬戶。為以最低的成本實現並最大程度地減少干擾，翻新需要全面而一次性。

(2)供暖與供冷

淨零情境中，新與既有建築物的外殼效能提升，是建築物減少冷暖供應能耗的重要因素，但冷暖供應的技術也做出重要貢獻。用天然氣供暖的房屋從目前近 30%，2050 年下降到不足 0.5%，而用電取暖的房屋從今天近 20%，上升到 2030 年的 35%和 2050 年約 55%。高效的電動熱泵將成為淨零情境供暖的主要技術選擇，全球每月安裝的熱泵從 150 萬台增加到 2030 年的 500 萬台，到 2050 年將達到 1000 萬台。

淨零情境於 2025 年以後，不再銷售新的煤炭和石油鍋爐。到 2030 年，燃氣鍋爐的銷售量將比 2020 年下降 40%以上，到 2050 年將下降 90%。到 2025 年，市場銷售的任何燃氣鍋爐都能夠燃燒 100%的氫氣，因此可以實現零碳排放。到 2030 年，分配給建築物的氣體中的低碳氣體(氫氣，生物甲烷，合成甲烷)占比從幾乎為零增加到 10%，到 2050 年增加到 75%以上。

符合準淨零排放建築物能源標準的建築不僅降低暖房需求，也降低對冷房需求，暖房與冷房需求是 2000 年以來建築物中增長最快的最終需求。冷房需求在 2020 年的能源消費量僅占建築部門的 5%。隨著民眾收入增加和氣候暖化，全球冷氣銷售量增加，未來幾十年冷房需求可能會強勁增長。淨零情境中，2050 年將有 60%家庭擁有空調設備(2020 年 35%)。高效能的建築外殼結構，包括生物氣候設計和保溫材料，可以減少建築冷房需求。淨零情境中，冷房的電力需求每年增長 1%，到 2050 年將達到 2.5 兆度。

(3)用電器具與照明

淨零情境假設積極的政策措施和技術進步，未來三十年，用電器具與照明的效率將大幅提高。到 2025 年已開發國家中銷售電器和空調設備，超過 80% 產品採用現今的最佳可行技術，到 2030 年代中期則是 100%；而在新興市場和開發中國家中，到 2050 年超過一半的產品採用現今的最佳可行技術。到 2025 年，所有地區 LED 燈泡銷售市占達 100%。

建築物電氣程度越來越高。淨零情境中，電力在建築部門能源消費占比從 2020 年 33%，上升到 2050 年 67%。許多建築物開始整合分散式發電設備(包括太陽光電設備、儲能電池和電動車充電器)，這樣的住宅建築數量從 2,500 萬戶增至 2.4 億戶。淨零情境中，智能控制系統會靈活用電，以適應在地再生能源發電，或為電力系統提供靈活服務，同時優化家用儲能電池和電動車充電功能，使家庭與電網互動。這些發展通過使再生能源更容易、更便宜地進入到電力系統，有助於提高電力供應的安全性並降低能源轉換的成本。

2.重要里程碑與決策點

全球政府需要近期明確制定建築部門減量政策，如用電器具與設備能源效率標準、建築外殼的能源使用標準、淘汰化石燃料、使用低碳氣體，加快翻新速度、提供財政誘因鼓勵對建築業能源轉型的投資。如果政策著重於使整個價值鏈脫碳，那麼決策將是最有效的。政府決策不僅要考慮建物本身，還要考慮可以為其提供能源的基礎設施與網絡，包括建築部門和城市規劃的作用。這樣的決定很可能帶來更廣泛的利益，特別是在減少燃料貧窮方面。

淨零情境要求各國政府要在 2025 年之前採取行動，以確保零碳建築在 2030 年之前成為全球新建築和改建的新規範。各國政府將需要找到建物能效提升(包括既有建物翻新、建造零碳建築)激勵方法，如建築能效證書，綠色租賃協議，綠色債券融資。

在淨零情境中，2025 年起，政府要禁售燃煤和燃油鍋爐，並確保新型燃氣鍋爐進入市場，此類新型燃氣鍋爐能夠 100% 投入氫氣使用。建築部門中，電氣化將是最節能，最具成本效益的低碳選擇，若能配合在地再生能源資源、結合智能管理，建立與擴大區域能源網絡將對去建築部門碳化很有幫助。

表 3、 建築部門重要里程碑

Table 3.5 ▸ Key milestones in transforming global buildings sector

Category			
New buildings	• From 2030: all new buildings are zero-carbon-ready.		
Existing buildings	• From 2030: 2.5% of buildings are retrofitted to be zero-carbon-ready each year.		
Category	2020	2030	2050
Buildings			
Share of existing buildings retrofitted to the zero-carbon-ready level	<1%	20%	>85%
Share of zero-carbon-ready new buildings construction	5%	100%	100%
Heating and cooling			
Stock of heat pumps (million units)	180	600	1 800
Million dwellings using solar thermal	250	400	1 200
Avoided residential energy demand from behaviour	n.a.	12%	14%
Appliances and lighting			
Appliances: unit energy consumption (index 2020=100)	100	75	60
Lighting: share of LED in sales	50%	100%	100%
Energy access			
Population with access to electricity (billion people)	7.0	8.5	9.7
Population with access to clean cooking (billion people)	5.1	8.5	9.7
Energy infrastructure in buildings			
Distributed solar PV generation (TWh)	320	2 200	7 500
EV private chargers (million units)	270	1 400	3 500

四、達成淨零排放對經濟、能源產業面、大眾、與政府意涵

(一)投資與融資

1. 達成 2050 淨零排放需對全球電力部門、能源基礎建設、以及需求端進行投資。其中以電力部門投資由 2016-2020 年平均 0.5 兆美元投資，提高至 2026-2030 年 1.6 兆美元。
2. 清潔能源年投資金額由現在的 0.29 兆美元，提高至 2030 年 0.88 兆元，其中包含對電網投資、公共電動車、充電措施、氫能添加站、能源進出口站、碳捕捉、以及 CO₂ 運輸管道與儲存設備等。對於再生能源投資年達 1.3 兆美元。2030 年後再生能源成本下降與基礎建設已在前期完工，2041-2050 年電力投資將降至約 1.2 兆美元。
3. 在需求端投資方面，持續投資電動車、碳捕捉運用與儲存技術、推廣氫能在產業與運輸部門使用，也提高建築物與家電效能。
4. 全球對化石能源供應年均投資從目前 5750 億美元，減少至 2050 年 110 億美元。其中上游化石能源產業要維持現有原油與天然氣生產。這表示 2050 年

仍然將使用化石能源，但會搭配碳捕捉與運用技術。對 2050 年低碳燃料(包含氫能燃料與生質能)投資金額達 1350 億美元，相較 2020 年增加 30 倍。

5. 2021-2050 年達成淨零排放，能源部門年均投資占 GDP 比率要比過去高 1%。而私人部門為投資主要驅動力，因此要從開發商、投資者、金融機構、以及政府部門共同合作。私人公司與投資者表達對清潔能源技術投資感興趣，但需要政策支持才能真正誘導私人投資。
6. 然而新興市場與發展中國家仍無誘因對能源計畫與工業設備進行融資。法規與政策改變可促進國際資本流入，以支持既有與新的潔淨能源技術發展。其中對於運輸與建築投資大量成長，對政策執行而言是個挑戰。在多數情況下，增加高效能器具或低碳運具投資成本可藉由較低的燃料成本回收成本，但低所得家庭與中小型企業仍然無法負擔相關投資成本。

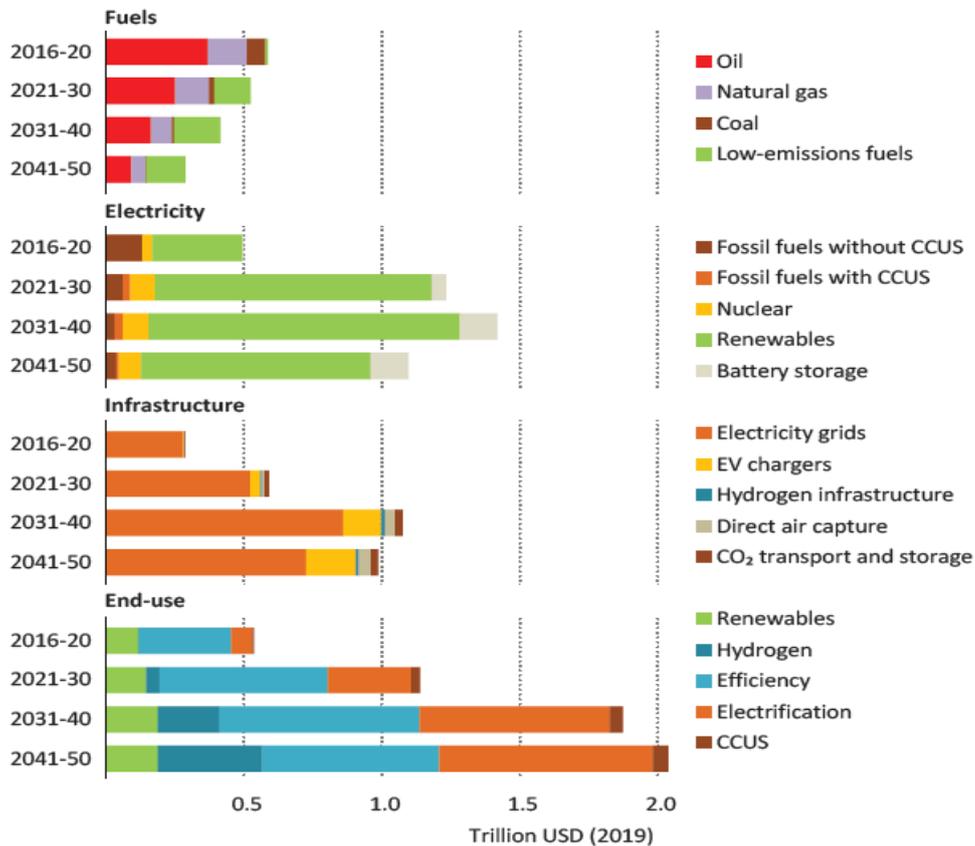


圖 21、全球對技術與能源年均投資

(二)經濟活動

私人與政府投資潔淨能源技術發展達成淨零排放，可創造就業與刺激產出。使得 2026-2030 年 GDP 成長比宣稱政策情境(Stated Policies Scenario, STEPS)高 0.5%。

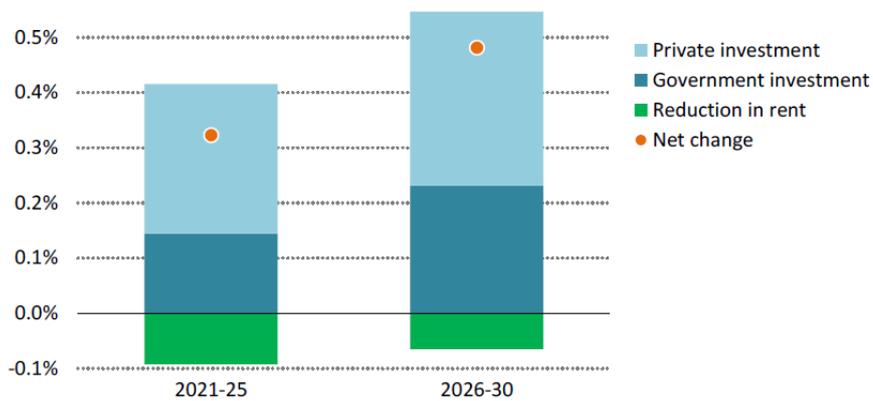


圖 22、全球能源投資對於年均 GDP 影響

(三)就業影響

1. 在淨零排放路徑上，潔淨能源新投資在 2030 年可創造 1400 萬工作機會。而購買更有效率電氣設備、電動車、房屋翻新、以及提高能源效率相關建設可再帶動 1600 萬工作機會。然而傳統化石能源部門將減少 500 萬工作機會。整體仍可讓能源部門增加 900 萬工作。

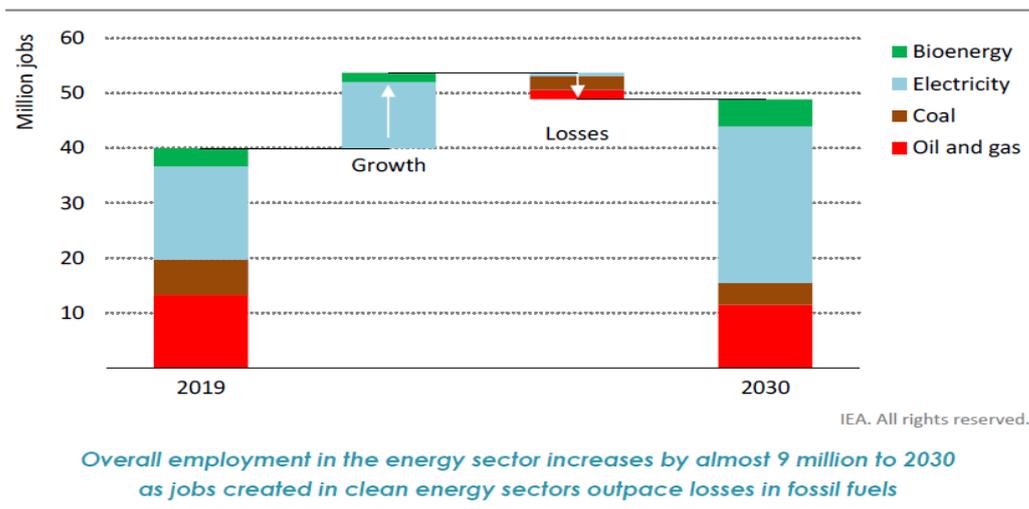


圖 23、全球能源部門就業變化

2. 3000 萬就業人口將在潔淨能源、能源效率、以及低碳技術進行生產。其中投資在電力、電網、電動車生產、以及能源效率等為主要就業創造部門。例

如風力與太陽能將產生目前 4 倍就業數量。其中 2/3 部門就業將是高技術能力人才。此外也將帶動零售商、金融、以及法律服務等就業需求。

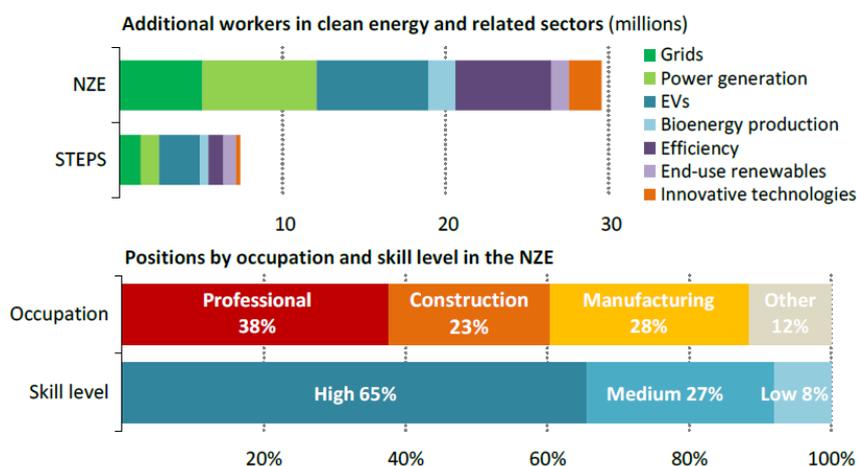


圖 24、淨零排放創造潔淨能源部門與相關部門就業

(四)能源產業影響

在淨零排放情境，原油與天然氣公司投資將逐漸減少。而 2021-2050 平均而言投資 6500 億美元於低碳技術，在 2030 年以前低碳技術比傳統原油與天然氣產業有競爭力，投資金額將超越傳統原油與天然氣公司。

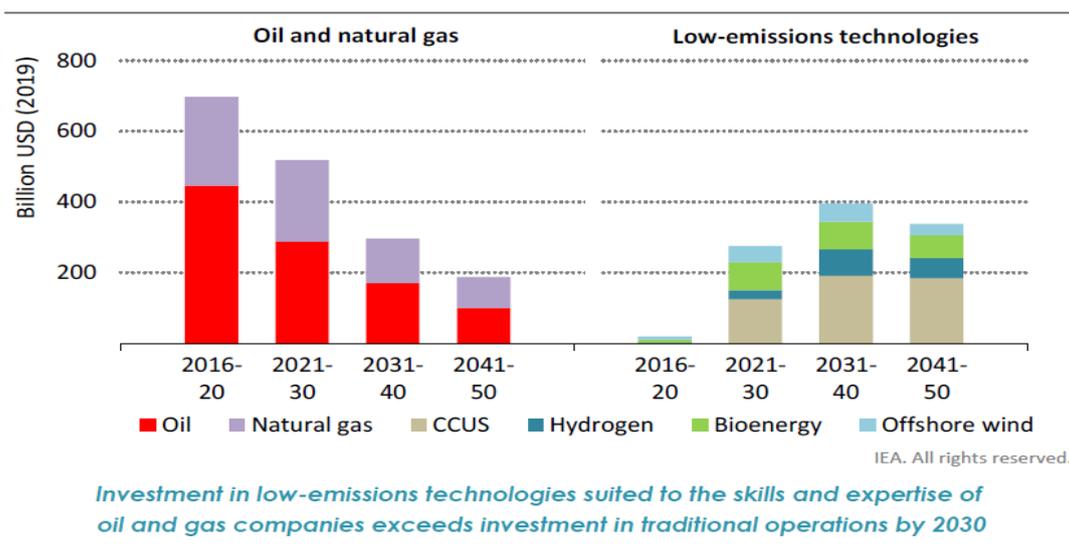


圖 25、天然氣與原油產業投資金額以及低碳技術投資

(五)煤炭產業影響

2050 年大約 470 百萬公噸煤當量(million tonnes of coal equivalent, Mtce)將要設置 CCUS，大約占整體煤炭需求 80%。對礦業而言，煤炭需求減少可透過其他礦產的增加來補足能源需求。因此在淨零排放情境下，全球對重要礦產(critical minerals)需求逐步增加。例如電池所使用的鋰礦產需求在 2030 年以前大幅增加。除此之外，製造電動車與風機葉片的稀土需求也大幅增加。礦產公司需要雇用高技術與經驗人才持續探勘礦產，才能讓價格保持在合理範圍。在 2040 年重要礦產業規模將與 2020 年煤炭業相當。

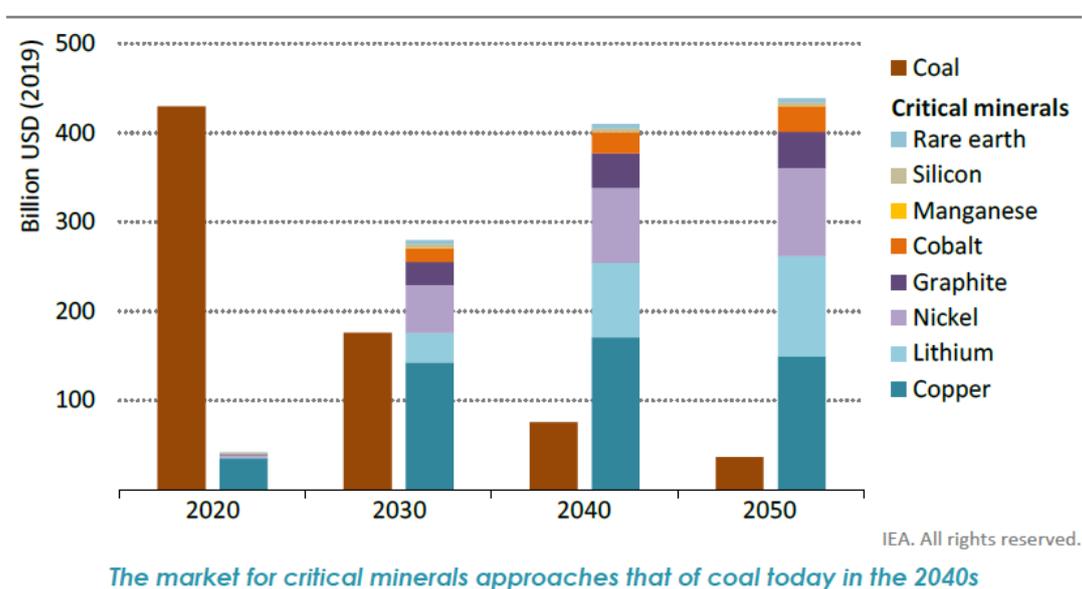
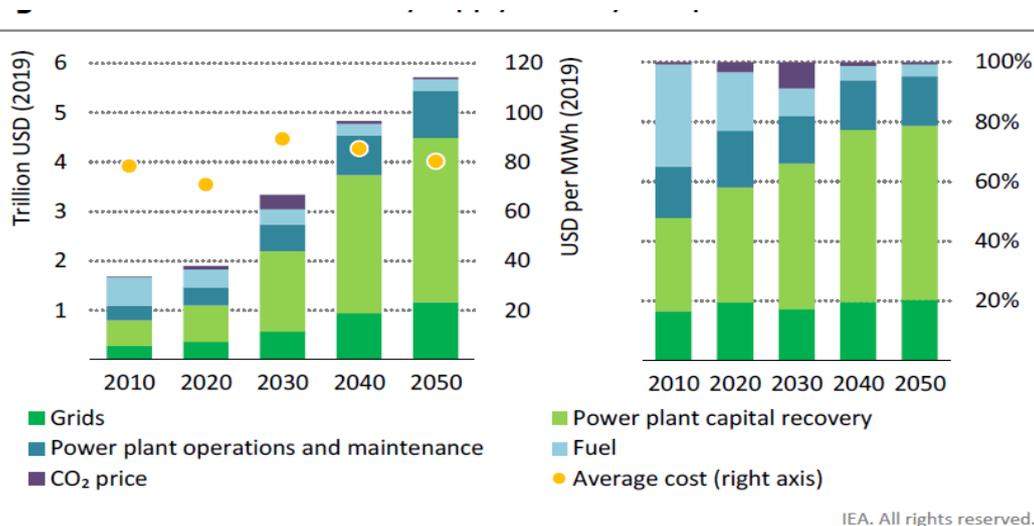


圖 26、煤炭與重要礦物價值比較

(六)電力

1. 淨零排放情境下，逐步增加電器使用並減少化石能源使用，並增加使用氫能，以支持經濟成長。隨能源需求逐步上升，電力供應成本自 2020 年到 2050 年提升 3 倍。
2. 電力供應業在未來會更加資本密集。主要是大量增加再生能源，並且需要更多電網與儲能設備。在 2020 年末期至 2030 年，既有的風力與太陽能需要汰舊換新。除此之外，新核電廠擴增也提高資本支出成本。隨電業提高資本密集度，需要避免新投資成本過高，並且確保足夠利潤來吸引投資所需資金。

- 電力需求增加將提高運維成本。電廠維護與操作成本在 2050 年將達 1 兆美元，大約是 2020 年 2.5 倍。2020 年化石能源發電約 1500 億美元，而再生能源也花費相同成本。2050 年主要靠太陽能光電與風力供應，使得再生能源運維成本達 7800 億美元。
- 隨著化石能源發電逐步減少，連帶使化石能源價格下滑。除此之外碳價格是針對化石能源排放所課徵，因此排碳成本也逐漸減少。在 2020 年化石能源與碳價格大約占總發電成本 1/3，到 2050 年只占 5%。
- 2020 年全球使用超過 2100 GW 的燃煤發電，其碳排放約占整體排放 30%。因此未來需要重新改造燃煤電廠可組裝 CCUS 技術，與生質能共同使用，並且在適當時機能停止使用燃煤發電。在淨零排放情境下，2030 年以前先進國家開始廢止使用燃煤發電，發展中與新興國家在 2040 年以前停止使用燃煤發電。因此燃煤電廠排放從 2020 年 9.8 GT，減少到 3 GT，2040 年只剩 0.1 GT。
- 隨著核能電廠使用年限逐漸上升，因此未來有許多核電廠需要除役。在未來 30 年核電廠除役比率會比過去十年高 60%。除役可能牽涉到好幾十年，依照反應爐大小，除役成本從數百萬美元到 10 億美元不等。



Electricity system costs triple to 2050, raising average supply costs modestly; the massive growth of renewables makes the industry more capital intensive

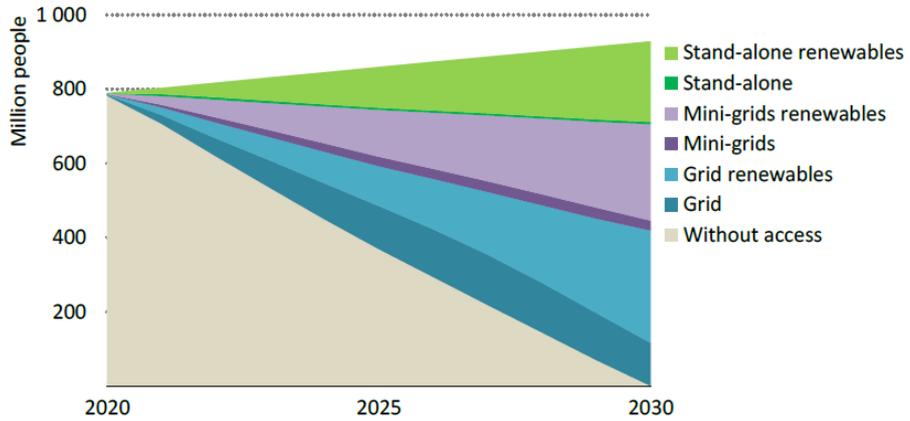
圖 27、全球淨零減碳電力供應成本趨勢

(七)工業能源消費

1. 2020 年 95%汽車與或貨車銷售，都是採用傳統燃油引擎。在淨零排放情境，2030 年 60%全球汽車銷售為電動車，2040 年 85%貨車為燃料電池或電動車。因此車廠要重新設計生產線，改變汽車設計以符合電池與燃料電池規格，並且調整生產線來最小化運具排放強度。
2. 在未來電動車銷售成為主流，因此需要積極建設電池、充電、以及低碳燃料基礎設施。其中 2030 年電池生產能力要達到 6.5 TWh，而 2020 年只有 0.2TWh 能力。若基礎建設延遲完工，將影響電動車與潔淨能源技術發展。
3. 對於航空與航運而言採用低碳燃料為減量關鍵因素。若採用氫能燃料或生質能作為航運燃料，只需要變更馬達與燃料系統，並不需要大幅改變船舶設計。而生質煤油或混合煤油可立即讓既有飛機使用。但要將基礎建設重新設計，以利使用這些低碳能源。
4. 在鋼鐵、水泥、以及化工業等，既有技術無法達成淨零減碳目標。必須透過政府推動風險分擔機制，以刺激產業開始運用既有資產進行零碳技術發展。國際合作可協助全球加快技術演進。而透過國內合作，可加速跨產業減碳技術發展，並透過規模經濟來拓展基礎建設，提供低碳能源供應。

(八)能源匱乏趨勢

1. 2020 年大約有 7.9 億人無法取得電力，主要居住在非洲撒哈拉以南地區與亞洲發展地區。26 億人無法取得清潔能源作為烹調：其中 35%是居住在非洲撒哈拉以南地區、25%居住在印尼、以及 15%居住在中國。
2. 45%電力匱乏的人在 2030 年可透過電網連結取得電力使用，而 30%可透過小型電網，以及 25%可透過獨立解決方案(stand-alone solution)。其中離網或小型電網的方式可使用 100%再生能源。分散式發電逐步利用太陽光電替換柴油發電。讓所有人能取得電力使用，但只增加 0.2%碳排。因此提高發展中國家與新興市場電力取得可提高電器使用並減少碳排放。



IEA. All rights reserved.

More than 80% of people gaining access to electricity by 2030 are supplied renewable power and just over half via off-grid systems

圖 28、發展中國家與新興市場人民可取得電力數

3. 2020 年大約 540 萬未成年死於空氣汙染，主要分布於新興國家與發展中國家。主要暴露在室外空氣汙染，其餘是在室內呼吸受汙染空氣(主要使用傳統生質能)。在淨零排放情境下，包含 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等主要空汙排放大幅下滑。主要是大量廢止燃煤電廠與禁止產業使用煤炭。其中 NO_x 大幅減少 85%，主要是運輸部門增加電力與氫能使用。增加潔淨烹飪燃料使用與工業與運輸部門管制，可減少 90% 的 $\text{PM}_{2.5}$ 。每年大約可減少 2 百萬人死亡，其中 85% 是居住在發展供國家與新興市場。

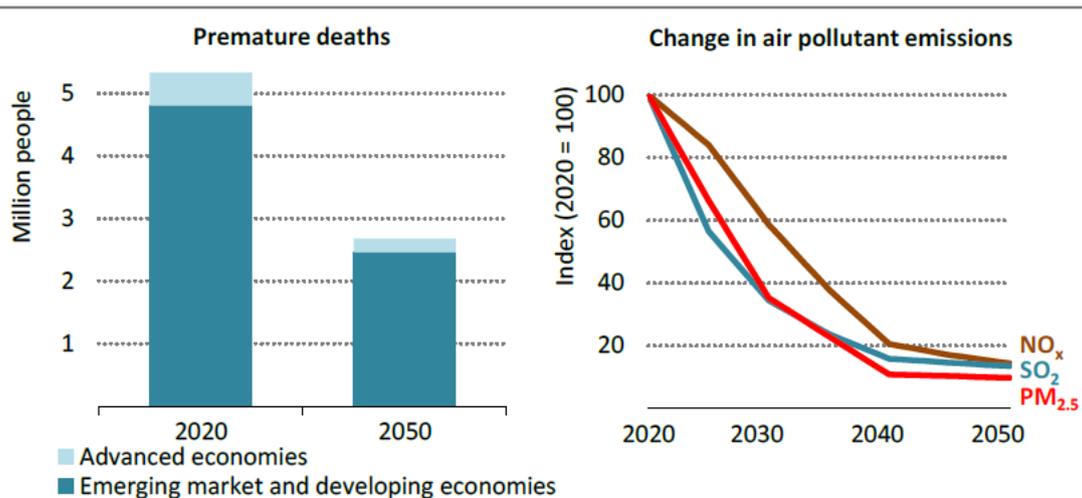
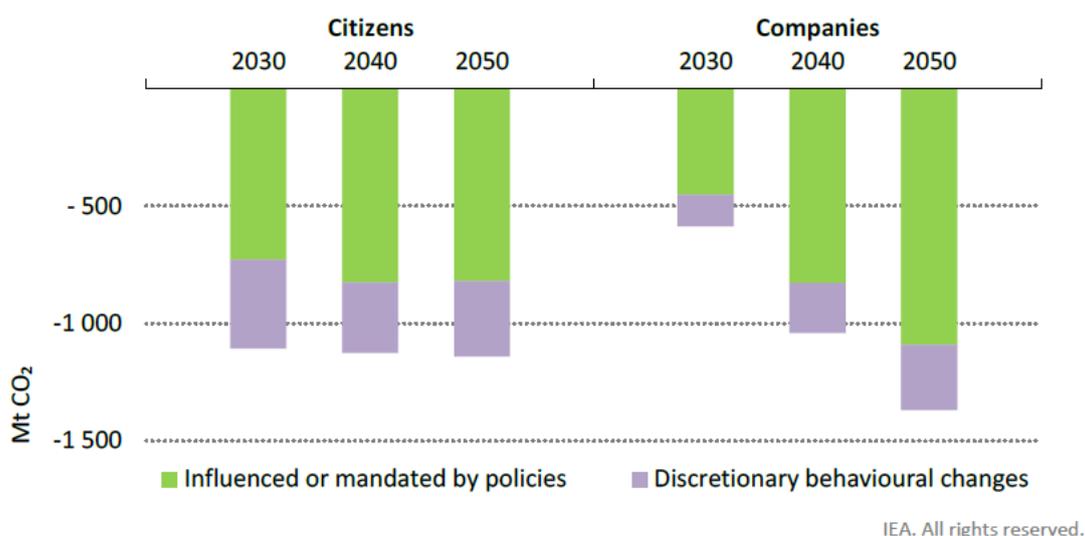


圖 29、全球成年人以前死亡率與空汙排放

(九)行為改變

1. 藉由政府投資、法規改變及政策施行，可促進大眾與產業行為改變。如果行為變化可以被合理化，將加速行為面的變化，並且讓政府提供具說服力的資訊讓大眾改變行為。
2. 2020-2050 年間，型為改變所減少排放量中，3/4 靠政策引導，主要包含禁止高汙染運具使用與降低車速上限。其餘 1/4 抑低排放為自主性的行為改變，包含提高產業與家戶能源意識，以減少家戶與辦公室的能源浪費。
3. 主要靠私部門主動進行陸運與家庭節能改變，並且降低商業建築物的能源需求，並且追求製造業的物質生產效率。除此之外，公司也可間接改變行為模式，例如獎勵在家辦公或者鼓勵員工採用公眾運輸。要達到淨零減碳，政府需要施行政策引導產業與消費者共同朝向正確的行為改變前進。



Three-quarters of the emissions saved by behavioural changes could be directly influenced or mandated by government policies

圖 30、自主與政策性行為改變所帶來減碳額度

(十)基礎建設

淨零排放情境下，大幅增加電力需求與再生能源發展，因此需要擴充現代化電網。若沒有電網支持，可能會讓淨零排放失敗收場。

1. 長途傳輸系統:最具有潛力的太陽光電與風能通常位於偏遠地區，因此須建立長途傳輸系統以支持再生能源發展。
2. 區域配送:家戶能源效率改善與普及化屋頂型太陽光電可透過區域配送系統，以避免棄電的情況。除此之外也需要讓電力配送更便利容易充電，以利電動車普及。
3. 建設電網變電站:太陽光電與風力擴增需要新的電網變電站支持，2030 年需要增加比目前規模多一倍。
4. 電動車充電:需要在工作場合、高速公路休息站、以及住家建設充電站以支持電動車發展。
5. 電網數位化:隨著大幅增加使用連網設備，數位化可讓電網使用更為彈性，也讓再生能源與需量反應更為效率。
6. 對能源基礎建設由 2016-2020 年均 2,900 億元，提高至 2025-2030 年均 8,800 億元。

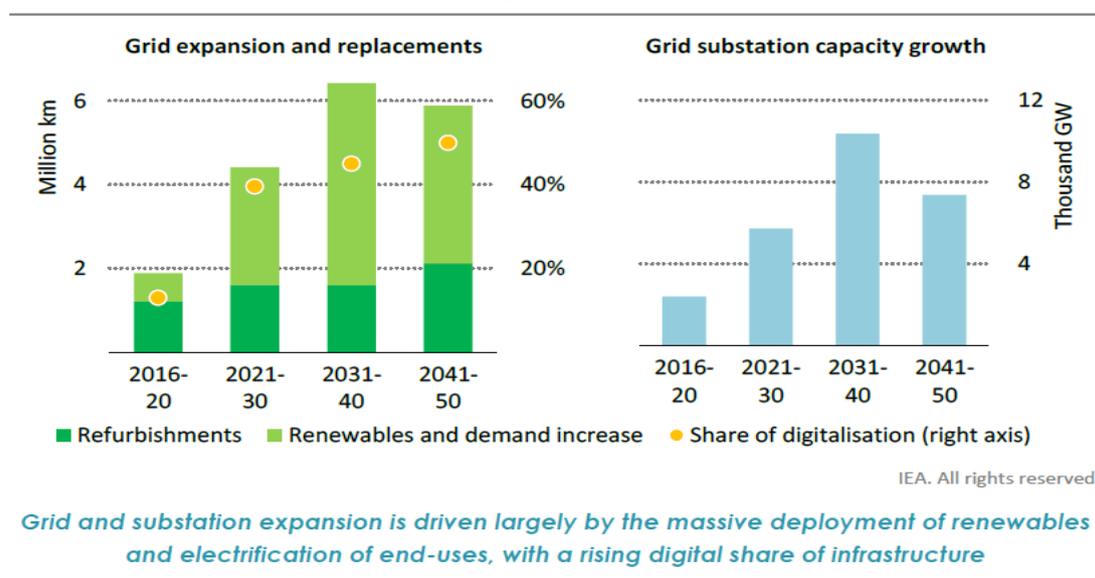
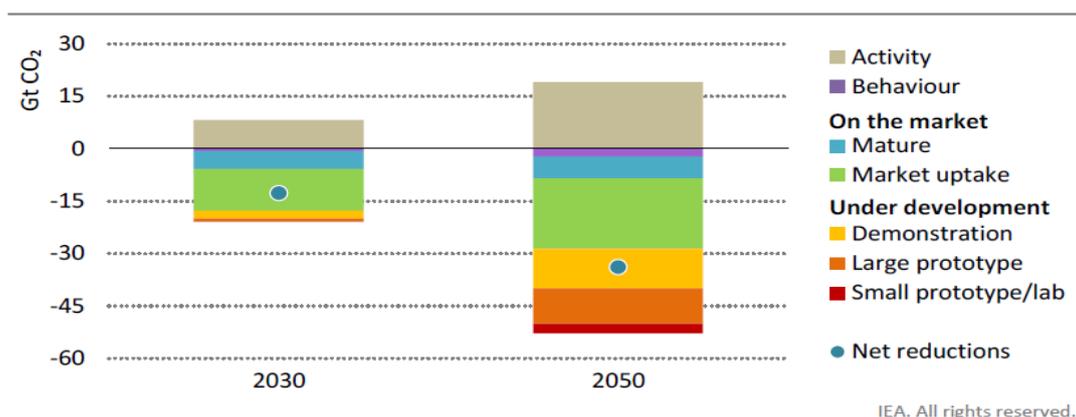


圖 31、淨零排放年均電網擴張，汰舊換新與變電所裝置量成長率

(十一)技術發展

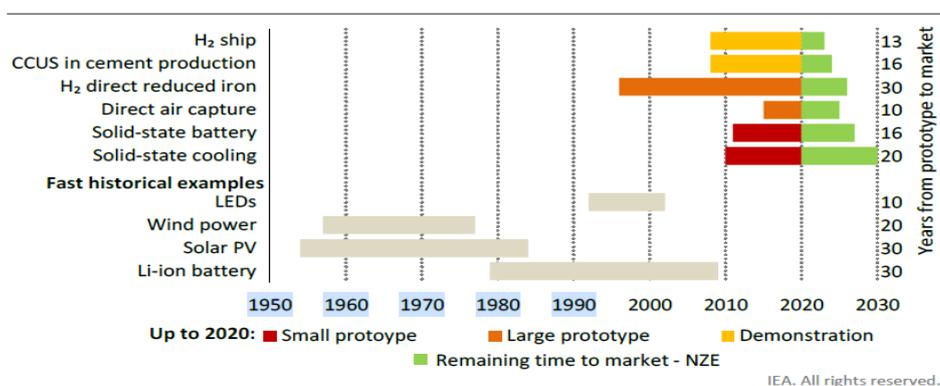
1. 要達成 2050 年淨零排放需要加速潔淨能源發展。既有技術發展可達成 2030 年減量目標。然而必須更加努力才能達成 2050 年目標。然而現今仍在發展的技術，需要再 2030 年後大幅被採用才可能達成淨零排放。2050 年大約 50% 減量技術，在目前仍是示範場或者原型階段。其中在重工業與長途運輸部門，這些原型技術占比最高。未來十年技術發展甚為關鍵，將影響是否能夠達成 2050 淨零排放目標。



While the emissions reductions in 2030 mostly rely on technologies on the market, those under development today account for almost half of the emissions reductions in 2050

圖 32、技術成熟度與淨零排放影響

2. 在淨零減碳情境下，發展潔淨能源技術時間要比既有技術發展歷程更為快速，並且大部分現在仍是未完成示範型技術，至少在 2030 年要達成市場化。這表示從原型技術出現到市場化的平均發展時間，要比過去既有技術發展加快 20%。水泥業 CCUS 與低碳氫燃料船運等這些目前仍在示範的技術，需要在未來 3-4 年內市場化。鋼鐵業氫能使用、直接大氣捕捉，以及其他大型原型技術希望能在未來 6 年市場化。其他小型原型技術，如固態電池等要在 9 年內市場化。



Technology development cycles are cut by around 20% from the fastest developments seen in the past

圖 33、從原型到市場化技術所需時間

3. 需要大量投資示範型計畫來加速技術發展。在淨零排放情境，2030 年需要投資 900 億元來完成各種示範型計畫，其中 250 億元需要靠政府來融資。這些計畫主要是協助需求端用電器具、CCUS、氫能、以及永續生質能。
4. 大眾資金也協助風險管理，並且讓私人技術研發可得到融資。政府對於能源類的技術投資占 GDP 比率從 1980 年 0.1%，下降至 2019 年 0.03%。因此私人資金募集對技術發展甚為重要。
5. 過去經驗顯示政府需要扮演重要角色，讓新技術能加速發展。政府可透過教育、投資研發、提供知識交流網絡、保護智慧財產權、以及利用採購方式來帶動設置量，並協助私人企業創新技術、投資基礎建設以及設置市場與金融管制法規。
6. 國際間技術合作也可加速淨零減碳技術發展。在技術草創期間不具備市場競爭力，因此需要由先進國將擔任領頭羊進行研發。例如美國國家實驗室對於太陽光電發展扮演重要角色。例如鋰電池最初在日本公立與私立研究中心所發展，而在美國成功研究市場化，最後在中國大陸開始大量製造。因此跨國的支持很重要。
7. 若設定技術發展目標，可解決潔淨能源部分挑戰。2030 年以前，政府的行動須專注於讓低碳技術市場化。例如傳統鋼鐵業使用氫能，大型運輸船開始使用低碳的氨，而電動卡車開始使用固態電池
8. 2030-2040 年著重於大規模發展低碳技術與基礎建設。過去實驗階段的原型技術已逐步商業化，例如水泥業開始將燃料使用轉為電力，並提高產品附加價值。
9. 2040-2050 年過去非常初期發展的技術開始被運用。過去在示範階段或大型原型技術在 2050 年變成市場主流，並可與傳統技術競爭。