

2018 年世界能源展望(2017~2040)

—電力系統的靈活性將是電力部門轉型的重點

張素美

國家能源發展策略規劃及決策支援能量建構計畫

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

能源系統的三大關鍵支柱：可負擔性、可靠性以及可持續性密切相關，且不斷發展演變。目前此三大關鍵支柱仍存在明顯缺陷，因此在制定能源政策時需採取整合性政策，需考量每一方面及三者之間的平衡，以期減緩氣候變化和空氣污染問題，以及確保普遍獲得能源等目標。當今的能源轉型是複雜、不平衡、且多元速度的進程，這個過程面臨著滿足不斷成長的能源服務需求的壓力。透過 2018 年世界能源展望 (WEO 2018) 在各項關鍵主題的分析包括：正進行轉型的電力部門中，電力系統的適應性與供電可靠性；能效的潛力；電力部門的減排；天然氣基礎設施在實現長期能源和環境目標方面的作用；潔淨能源技術及傳統的供應要素投資的不足；區域一體化和國際合作的效益；以及實現現代能源的普遍性與可及性等的分析。新政策情境衡量了世界上許多國家正在取得的實際進展，以及全球在普遍獲取能源、潔淨空氣、減少排放等領域的不足之處。此外，快速、低成本的能源轉型，需要加速對更潔淨、更智慧、更高效的能源技術的投資，但政策制定者也需確保所有能源供應的關鍵要素都能保持穩固可靠。政府制定的政策框架將影響著能效提高和技術創新的步伐，並在形塑能源行業未來發展方向上發揮關鍵作用。

關鍵字：能源展望、可持續性、靈活性

一、前言

全球的能源系統正在轉變。能源系統的三大關鍵支柱：可負擔性、可靠性以及可持續性密切相關，且不斷發展演變。目前此三大關鍵支柱仍存在明顯缺陷，因此在制定能源政策時需採取整合性政策，需考量每一方面及三者之間的平衡，以期可實現限制全球升溫與巴黎協議一致、解決空氣污染問題、及確保普遍獲得能源等目標。

2018 年世界能源展望(World Energy Outlook 2018, WEO 2018)除了仍將探討需求、供應、最終用途部門、效率、排放、貿易和投資外，2018 年的展望將焦點放在電力部分，探討目前正值劇烈轉變的電力行業將如何透過靈活性來滿足人們的需求。

WEO 2018 仍藉由三種情境：當前政策情境、新政策情境(主要情境)、以及永續發展情境，來探究能源系統未來的各種可能性、能源系統中不同要素之間如何互動、以及實現這些可能性的推動力。

二、世界能源展望重點摘要

(一) 全球能源系統的變革

全球的能源需求正從已開發國家轉移到開發中國家。在新政策情境中，2017 年至 2040 年間全球初級能源需求成長超過 25%。如果不提高能源效率，其成長率將是原來的 2 倍。美國能源需求仍處於目前的水準，日本和歐盟的需求則在下降。印度的能源需求到 2040 年將增加 1 倍以上，成為全球成長的最大單一來源。中國大陸的能源消費量仍持續成長，但成長率僅為 2000 年至 2017 年的 1/5。

能源消費向亞洲遷移的深刻變革在各類燃料、技術和能源投資方面都有所體現。亞洲佔據了全球石油消費成長的 80%以上，天然氣消費成長的 50%，風電和太陽光電成長的 60%，以及煤炭和核電成長的 100%以上（其他地區總體呈負成長）。

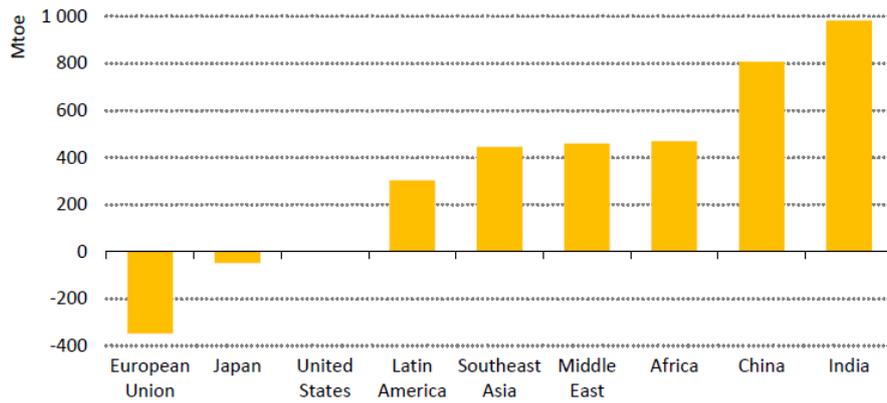


圖 1、新政策情境下初級能源總需求(區域別)變化量(2017~2040)[1]

新政策情境中的電力需求成長了 60%，是主要能源載具中成長最快的，其到 2040 年將占全球最終消費的 1/4。電力需求成長中近 90%來自於開發中的經濟體。在發電方面，再生能源成本下降，當地污染問題日益嚴重以及氣候相關目標將重塑全球電力結構。煤炭和再生能源互換位置：煤炭的占比從現在的約 40%下降到 2040 年的 1/4，而同期再生能源的比例從 1/4 成長到約 40%。隨著再生能源占比成長，對可靠電力供應的靈活性需求也在增加。為靈活調度電源，除火力發電和水力發電廠外，互連網、電池儲存和需量反應都發揮著越來越重要的作用。電力部門的轉型將需要對電力安全風險進行更廣泛地重新評估。

石油需求成長放緩，2017 年至 2040 年期間每天 1,150 萬桶的成長都發生在發展中經濟體。中東和印度的需求成長始終強勁，特別是卡車和石化原料。而中國大陸成為世界上最大的石油消費國，且到 2040 年將成為歷史上最大的石油淨進口國。新的傳統上游石油項目的投資不足將導致到 2020 年代價格飆升。頁岩革命持續撼動油氣供應，將使美國成為世界上最大的油氣生產國。在新政策情境中，至 2025 年，美國在全球油氣產量成長中的比重會達到一半以上（石油方面占近 75%，天然氣方面占 40%）。到 2025 年，全球近 1/5 的石油和 1/4 的天然氣產自美國。頁岩革命給嚴重依賴出口收入以支持國家發展的傳統油氣出口國帶來了更大的壓力。到 2040 年，隨著亞洲在全球油氣貿易中的比重從目前的約一半增至 2/3 以上，國際能源貿易將越來越多地從中東、俄羅斯、加拿大、巴西和美國流向亞洲。

(二) 電力系統調度須更靈活

WEO 2018 特別關注電力。電力是最終需求成長最快的因素，其在全球最終能源消費中的比重接近 20%，且還將進一步成長。在未來 25 年內，電力成長速度將遠遠超過能源消費。政策支持 and 技術成本降低使再生能源發電迅速成長，推動電力行業成為減排先鋒，但為了確保可靠供應，需要重新審視電力系統的設計方式和運行方式。

在新政策情境中，總體能源需求從 2017 年的 139.72 億噸油當量(13,972 Mtoe) 上升到 2040 年的 177 億噸油當量。電力需求每年成長 2.1%，是整體能源需求成長的 2 倍，滿足 2040 年總終端能源使用需求的 1/4。近 90% 的電力需求成長來自開發中經濟體，而已開發經濟體的需求略有上升，這是由於政策提升了移動機具和供熱系統的電氣化需求（圖 2）。工業用馬達占全球電力需求成長的 1/3，空調占近 1/5，電動車約占 10%。目前運輸部門占全球用電總量的不到 2%，其中鐵路約占運輸電力需求的 70%。鐵路和新地鐵進一步電氣化的政策，尤其是發展中經濟體的電氣化，可能會導致小幅成長。在新政策情境中，電動車是全球電力運輸需求增加的主要原因，到 2040 年推動這一方面成長將近 5 倍，並使整體運輸電力需求超過 1.85 兆度(1,850 TWh)。公路運輸的用電量超過鐵路，以年均 14% 的速度成長，成為 2030 年左右最大的交通電力需求來源。發展中經濟體占公路運輸用電量成長的 60%，僅中國大陸的部分就等於其他所有發達經濟體的總和。

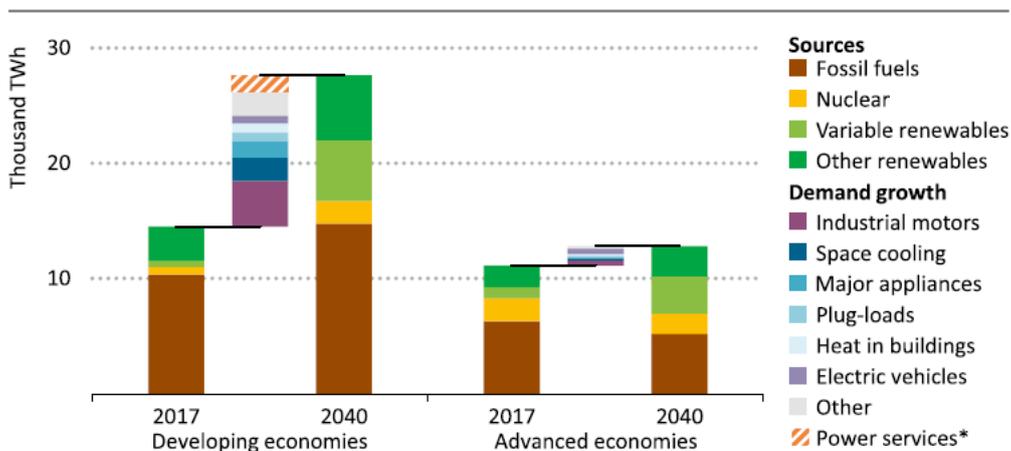


圖 2、新政策情境下 2017~2040 年終端電力使用需求成長及發電結構[1]

在新政策情境下，到 2040 年全球電力結構中，燃煤發電仍停滯在目前的水準，但仍然是最大電力來源，已開發的經濟體的減少被發展中國家特別是亞洲的擴張所抵消。天然氣、風能、太陽能和其他能源各占全球電力供應成長的 1/4 左右。天然氣在發電中的占比穩定在 22% 左右，而煤炭從 38% 下降到 26%。變動性再生能源(VRE)從 2017 年的 6% 上升到 2040 年的 20% 以上(表 1)。核能提供了整個展望期間的 1/10，但重心將在 2030 年由美國轉移到中國大陸。全球電廠部署(裝機量)亦快速變化，到 2020 年代中期，燃氣發電容量將超越煤炭。太陽光電將在 2025 年超越風電，到 2030 年左右超過水電，2040 年前超越煤電(圖 3)。從最近的投資決策和政策顯示，近 150 個國家的目標是增加再生能源在電力中的使用。太陽光電和風力發電是政策支持的主要焦點。離岸風電有望獲得更多支持，中國大陸、台灣、歐盟、日本和美國均設定目標，並預期進一步降低成本。2015 年燃煤發電容量增加可能已經達到頂峰。電池存儲成本將迅速下降，挑戰石油和天然氣廠，並提高再生能源電廠的獲利能力。到 2040 年電池存儲容量將達到 2,200 億瓦 (220 GW)，相當於印度目前的煤電容量。

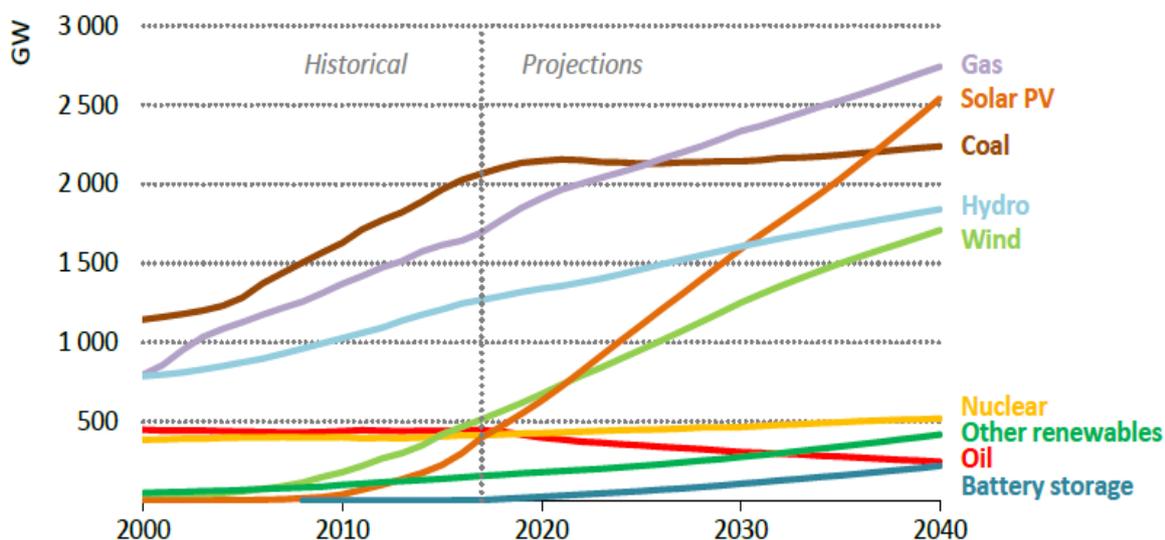


圖 3、新政策情境下全球電力裝置容量(來源別)[1]

表 1、新政策情境下之發電量與裝置量結構[1]

	Electricity generation (TWh)							Shares (%)		CAAGR (%)
	2000	2016	2017e	2025	2030	2035	2040	2017e	2040	2017e-40
Total generation	15 441	24 919	25 679	30 253	33 510	36 919	40 443	100	100	2.0
Coal	6 001	9 575	9 858	9 896	10 016	10 172	10 335	38	26	0.2
Oil	1 212	926	940	763	676	597	527	4	1	-2.5
Gas	2 747	5 781	5 855	6 829	7 517	8 265	9 071	23	22	1.9
Nuclear	2 591	2 605	2 637	3 089	3 253	3 520	3 726	10	9	1.5
Renewables	2 868	5 997	6 351	9 645	12 017	14 333	16 753	25	41	4.3
Hydro	2 618	4 049	4 109	4 821	5 330	5 774	6 179	16	15	1.8
Bioenergy	164	569	623	890	1 057	1 238	1 427	2	4	3.7
Wind	31	957	1 085	2 304	3 157	3 960	4 690	4	12	6.6
Geothermal	52	82	87	129	190	261	343	0	1	6.1
Solar PV	1	328	435	1 463	2 197	2 935	3 839	2	9	9.9
CSP	1	10	11	34	75	138	222	0	1	14.0
Marine	1	1	1	3	12	27	52	0	0	18.2

	Power generation capacity (GW)						Shares (%)		CAAGR (%)
	2016	2017e	2025	2030	2035	2040	2017e	2040	2017e-40
Total capacity	6 690	6 961	8 845	10 073	11 244	12 466	100	100	2.6
Coal	2 025	2 067	2 130	2 143	2 184	2 238	30	18	0.3
Oil	446	447	350	307	278	246	6	2	-2.6
Gas	1 644	1 695	2 113	2 334	2 526	2 740	24	22	2.1
Nuclear	413	413	448	464	495	518	6	4	1.0
Renewables	2 159	2 337	3 744	4 718	5 600	6 504	34	52	4.6
Hydro	1 244	1 270	1 462	1 604	1 728	1 839	18	15	1.6
Bioenergy	129	136	186	216	247	278	2	2	3.2
Wind	467	515	953	1 250	1 498	1 707	7	14	5.4
Geothermal	13	14	20	29	39	51	0	0	5.8
Solar PV	300	398	1 109	1 589	2 033	2 540	6	20	8.4
CSP	5	5	13	25	44	68	0	1	12.1
Marine	1	1	1	5	11	21	0	0	17.3

隨著需求變化和再生能源占比的增加，電力系統的靈活性需求亦隨著增加。到 2040 年，電池存儲成本迅速下降，電池與燃氣調峰電廠在因應短時供需波動方面的競爭日益激烈。然而，傳統電廠依然是保持系統靈活性的主力，新的電網互聯、儲電和需量反應技術等亦起支撐作用。在新政策情境中，某些地區對靈活性的需求急劇增加，如墨西哥、印度、及一些歐洲國家。

在重塑電力供應結構方面，透過政府政策廣泛支持再生能源和一些限制煤炭使用的措施以及市場力量將有助於低碳技術的擴張。WEO 2018 引入了一項新的評價指標，即價值調整後的均化發電成本(value-adjusted levelised cost of electricity, VALCOE)。VALCOE 是以 LCOE 為基礎，將該技

術對能源、容量和靈活性價值的估算結合起來，為發電技術提供了新的競爭力指標(圖 4)。根據估算結果顯示，太陽光電和風力發電的競爭力在許多市場中已接近傳統來源。包括核電在內的低碳技術到 2030 年的幾年中繼續變得更具競爭力，在大多數情況下縮小了與新的燃煤和燃氣發電廠之間的差距。隨著成本的下降，變動式再生能源(VRE)與儲存的配對成為一種具吸引力的選擇。(表 2)

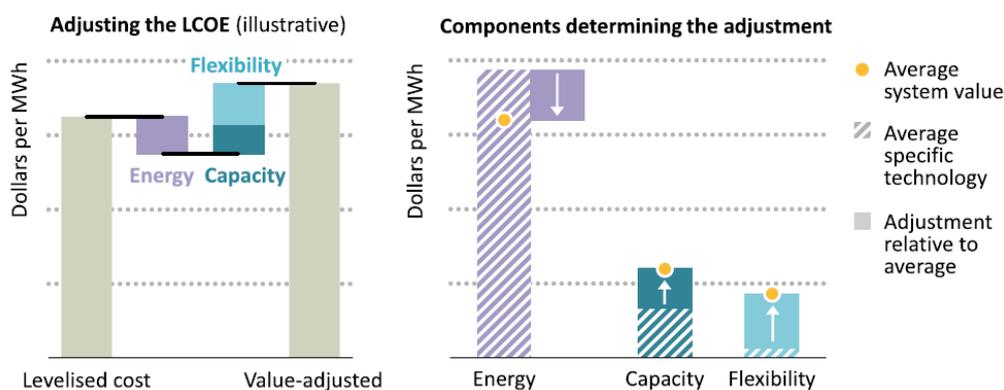


圖 4、價值調整後的均化發電成本示意圖[1]

表 2、新政策情境下特定區域的發電技術成本[1]

		Capital costs (\$/kW)		Capacity factor (%)		Fuel and O&M (\$/MWh)		LCOE (\$/MWh)		VALCOE (\$/MWh)	
		2017	2040	2017	2040	2017	2040	2017	2040	2017	2040
United States	Nuclear	5 000	4 500	90	90	30	30	105	100	105	100
	Coal	2 100	2 100	60	60	30	35	75	75	75	75
	Gas CCGT	1 000	1 000	50	50	30	40	50	65	45	60
	Solar PV	1 560	860	20	23	10	5	105	50	105	55
	Wind onshore	1 620	1 480	42	44	10	10	60	50	70	60
	Wind offshore	4 720	2 960	45	49	40	25	180	105	190	115
European Union	Nuclear	6 600	4 500	75	75	35	35	150	110	150	110
	Coal	2 000	2 000	40	40	45	45	120	145	105	120
	Gas CCGT	1 000	1 000	40	40	55	75	90	120	80	95
	Solar PV	1 300	760	12	13	20	15	160	85	165	105
	Wind onshore	1 820	1 700	28	30	20	15	100	90	105	105
	Wind offshore	4 260	2 820	50	55	35	25	150	90	160	105
China	Nuclear	2 320	2 500	75	75	25	25	60	65	60	65
	Coal	800	800	70	70	35	30	50	70	50	65
	Gas CCGT	560	560	50	50	70	90	85	115	80	105
	Solar PV	1 120	640	17	19	10	10	90	45	90	65
	Wind onshore	1 200	1 180	25	27	15	15	70	65	70	70
	Wind offshore	4 120	2 740	46	50	35	25	145	90	150	95
India	Nuclear	2 800	2 800	80	80	30	30	70	70	70	70
	Coal	1 200	1 200	60	60	35	35	60	55	60	50
	Gas CCGT	700	700	50	50	80	90	95	105	90	80
	Solar PV	1 120	620	19	22	10	10	80	40	80	65
	Wind onshore	1 080	1 040	25	30	10	10	60	50	65	55
	Wind offshore	3 320	2 220	40	44	40	25	155	95	160	100

在新政策情境中，儘管到 2040 年電力需求成長 60%，但發電產生的全球二氧化碳（CO₂）排放量仍保持在目前的水準，反映出燃料結構的變化和效率的提高。且由於發電組合的變化以及擴大管道污染控制技術法規的使用而使得污染顯著降低，二氧化硫（SO₂）減少 1/2，氮氧化物（NO_x）減少 1/4，細顆粒物（PM_{2.5}）減少近 40%。由於再生能源的增加正在改變全球電力供應，並成為環境挑戰的核心，此將促使電力部門吸引超過了石油和天然氣的總和的投資。

（三） 須加速全球減排步伐

與能源相關的二氧化碳（CO₂）排放量在 2017 年持續三年後恢復成長。在新政策情境中，從現在到 2040 年能源相關的二氧化碳排放呈緩慢上升趨勢，遠遠跟不上科學界認為的應對氣候變化所需的減排步伐。要實現全球排放早日達到高峰，單靠各國履行“巴黎協定”做出的國家減排承諾還是不足。根據預測顯示的排放趨勢，全球尚未能很好地處理能源利用帶來的環境後果。

過往在討論能源轉換時，常忽略了石油和天然氣在提取、加工和運輸時對環境的影響，WEO 2018 則首次對全球供應所有石油和天然氣資源的溫室氣體排放進行全面評估。目前，石油和天然氣業務的間接溫室氣體（GHG）排放總量約為 52 億噸 CO₂ 當量，占能源部門溫室氣體排放總量的 15%。為促使能源部門在短期內減少排放，同時有助於實現其他發展目標，國際能源總署(IEA)在 2015 年世界能源展望特別報告中首次提出的“橋接情境(Bridge Scenario)”中提出五項零淨成本的關鍵措施，並已經取得進展。依據展望分析顯示，若對關鍵減排措施採取進一步行動將可以扭轉全球排放成長趨勢，於近期達到排放峰值。這些關鍵措施中目前只有增加對再生能源投資的項目是在既定的軌道上；此外，尚有足夠的空間進行額外的成本效益行動，以減少石油和天然氣部門的甲烷排放；還有逐步淘汰效率最低的燃煤發電形式，以及減少化石燃料補貼和提高能源效率(圖 5)。同時，若強化這些措施與其他發展目標的協同作用，包括減少空氣污染等，將可以加強這些措施的實施，以進一步實現永續發展情境的目標。

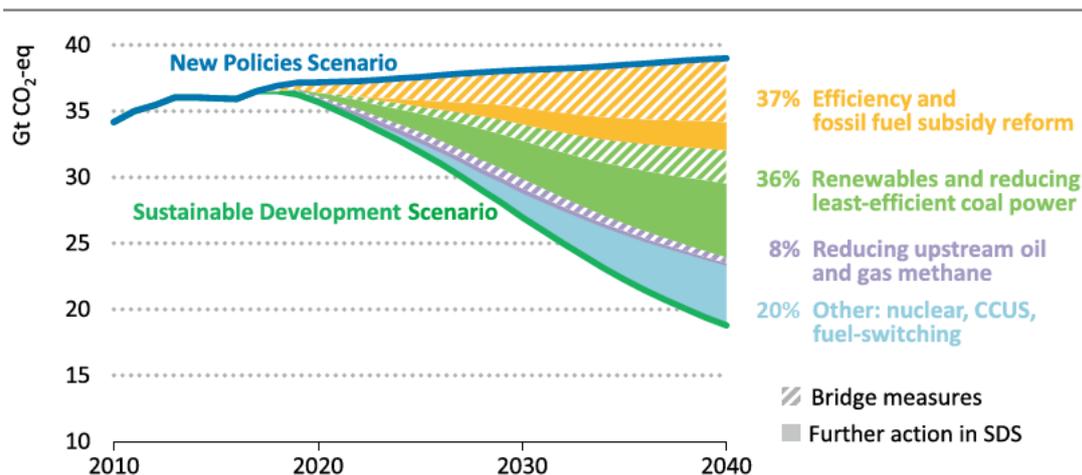


圖 5、達成永續發展情境之 CO₂ 及甲烷減排措施[1]

若以潔淨和環保的方式生產的石油和天然氣可能比其他供應來源享有優勢，在本報告的永續發展情境中探討了一些可以完成任務的關鍵創新和技術，減少甲烷排放和消除放空燃燒是最經濟有效方法中的兩種。另外還包括電氣化，碳捕獲、利用和儲存，利用二氧化碳提高石油採收率，加大使用低碳電力開展油氣作業，以及把烴類轉化為氫氣（並配備碳捕集設施）等選項。部署這些技術可以產生重要的外溢效益。如果石油和天然氣行業能夠動員其豐富的知識、機構和資本資源來支持零碳技術的發展，將為能源轉型提供重要的推動力。在石油和天然氣供應鏈，一些企業在篩選計畫時已經使用了每噸二氧化碳 50 美元的碳價，此將在 2040 年減少超過 10 億噸二氧化碳排放；若結合甲烷排放量的減少，到 2040 年可以節省超過 25 億噸二氧化碳當量；這相當於印度目前的能源部門溫室氣體排放量。

(四) 政府政策將形塑能源行業未來發展方向

在所有情境中，石油和天然氣將在未來幾十年內繼續成為能源系統的一部分，並且可能不僅越來越多地關注其燃燒排放，而且還關注其供應鏈中的排放。政策制定者、工業界和消費者越來越意識到需要盡量減少石油和天然氣生產、加工和運輸的環境足跡，這為資源持有者提供了許多機會。

在這些領域採取行動的國家和企業可以合理地爭辯說這些資源應優先於高排放的選擇。因此，石油和天然氣行業必須盡可能積極主動地限制石油

和天然氣供應的環境影響，並使政策制定者認識到這是能源轉型的關鍵因素。政府制定的政策框架也影響著能效提高和技術創新的步伐，這使得政府的政策和工作重點在塑造能源行業未來發展方向上發揮關鍵作用。

三、 結論及建議

WEO 2018 最新的能源數據分析提供了關於全球能源系統變化速度和方向的混合訊號，包括：再生能源產生的電力現在占全球發電量的 1/4，太陽光電（PV）比以往更便宜；但也有跡象顯示，新太陽能產能的近期部署可能正在放緩。煤炭的消滅已被廣泛預測，消費量從 2015 年開始連續兩年下降，但在 2017 年反彈。能源效率是實現多種能源政策目標的有效方式，但新政策的流通和嚴格性似乎正在減弱。各國已表達了應對氣候變化的承諾，但與能源有關的二氧化碳（CO₂）排放量經過三年的持平，於 2017 年再次上升。這些訊號指出，當今的能源轉型是一個複雜、不平衡、多元速度的進程，在這個過程中，能源系統面臨著需滿足不斷成長的能源服務需求的壓力。新政策情境衡量了世界許多國家正在取得的實際進展，以及透過與永續發展情境進行比較，評估全球在某些擁有共同目標的領域(如確保普遍獲取能源、潔淨空氣及減少排放)之不足，並提示了政府未來政策應扮演的角色。

我國現正處於能源轉型期，面臨包括未來能源與電力需求不確定性高、再生能源推動面臨多元課題、天然氣接收站增建需時間及環境議題待克服、及近年備轉容量下降，如何維持電力供應穩定等種種嚴峻的挑戰。為因應這些挑戰，我國已於 2016 年提出能源轉型政策，並於 2018 年整合各部會完成我國「能源轉型白皮書」，提出能源轉型之短中長期願景，其中 2025 年的能源轉型將以大力發展風電及太陽光電等再生能源電力；核能發電將逐步降低，以實現非核家園；另在確保電力穩定、配套能源設施完成，及盡力減排減碳的前提下，將提高現行燃氣發電量占比並逐年降低燃煤發電為努力目標。

為了達成上述能源轉型的目標，政府已提出各類再生能源的發展規劃，提高低碳電力之占比。配合再生能源設置佈建儲能設備，以調度及穩定再生能源發電及需求，並投入區域儲能及滾動檢討儲能需求。同時，擴大天然氣使用並搭配再生能源使用以確保電力穩定供應。而為因應國際電氣化趨勢，政府亦已規劃國內汽、機車全面電動化之期程與目標，藉以降低碳排放並改善空污。另透過推動智慧電網與智慧電表興建，推動更具效益之時間電價及節能措施。政府亦可借鑑國外經驗並參酌國內現況，訂定發展優先次序，並進行先期相關技術佈建及定期滾動檢討修正，以穩健邁向低碳能源轉型。

四、參考資料

[1] IEA (2018), World Energy Outlook 2018, 2018/11/13.

[2] 2018 能源轉型白皮書(初稿)。經濟部，2018 年 11 月 13 日。