

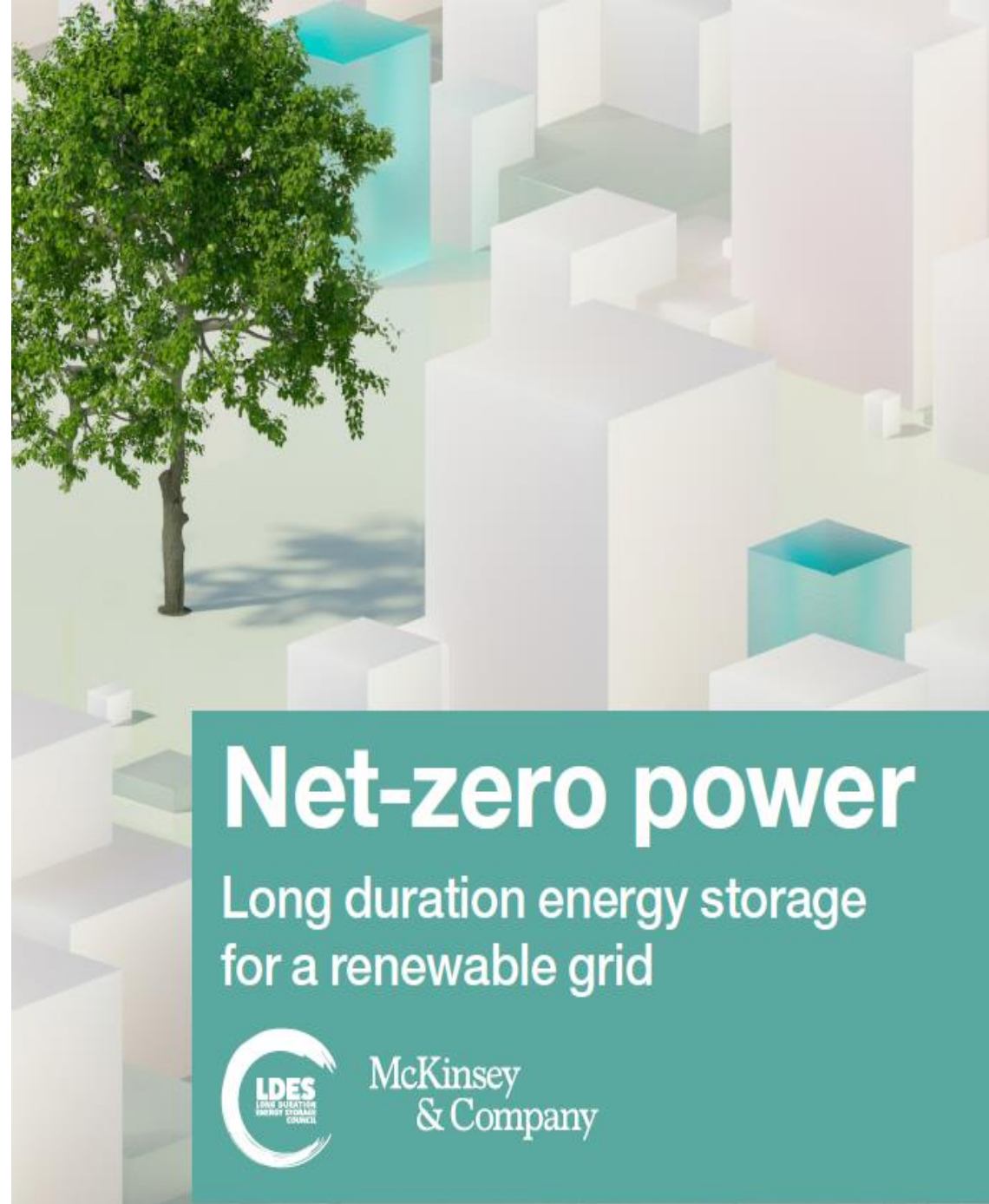
# 工業技術研究院

Industrial Technology  
Research Institute

## 零碳電力下長時儲能 (LDES)角色與重要性初探

郭瑾璋

111.08.10



## Net-zero power

Long duration energy storage  
for a renewable grid



McKinsey  
& Company

# 長時儲能委員會

◆ 長時儲能委員會由儲能技術提供商、能源公司、投資業等CEO所構成的全球性組織，2021年於COP26大會上成立，主要是致力於全球範圍內部署長時儲能系統，以最低的社會成本加速能源系統達到淨零。

## Technology providers



## Anchors

### Industry and services customers



### Capital providers



### Equipment manufacturers



### Low-carbon energy system integrators & developers



## Key principles of the LDES Council

-  CEO-led
-  Global
-  Fact-based
-  For societal benefit
-  All types of energy storage, not just electrochemical

# 長時儲能定義

- ◆ 美國能源部(US DOE)：「Energy Earthshots」倡議，針對長時儲能定義為一次可以存儲超過 10 小時的儲能技術-可協助提供低成本、可靠、無碳的電網。

Long duration energy storage systems – defined as technologies that can store energy for more than 10 hours at a time – are a critical component of a low-cost, reliable, carbon-free electric grid. |

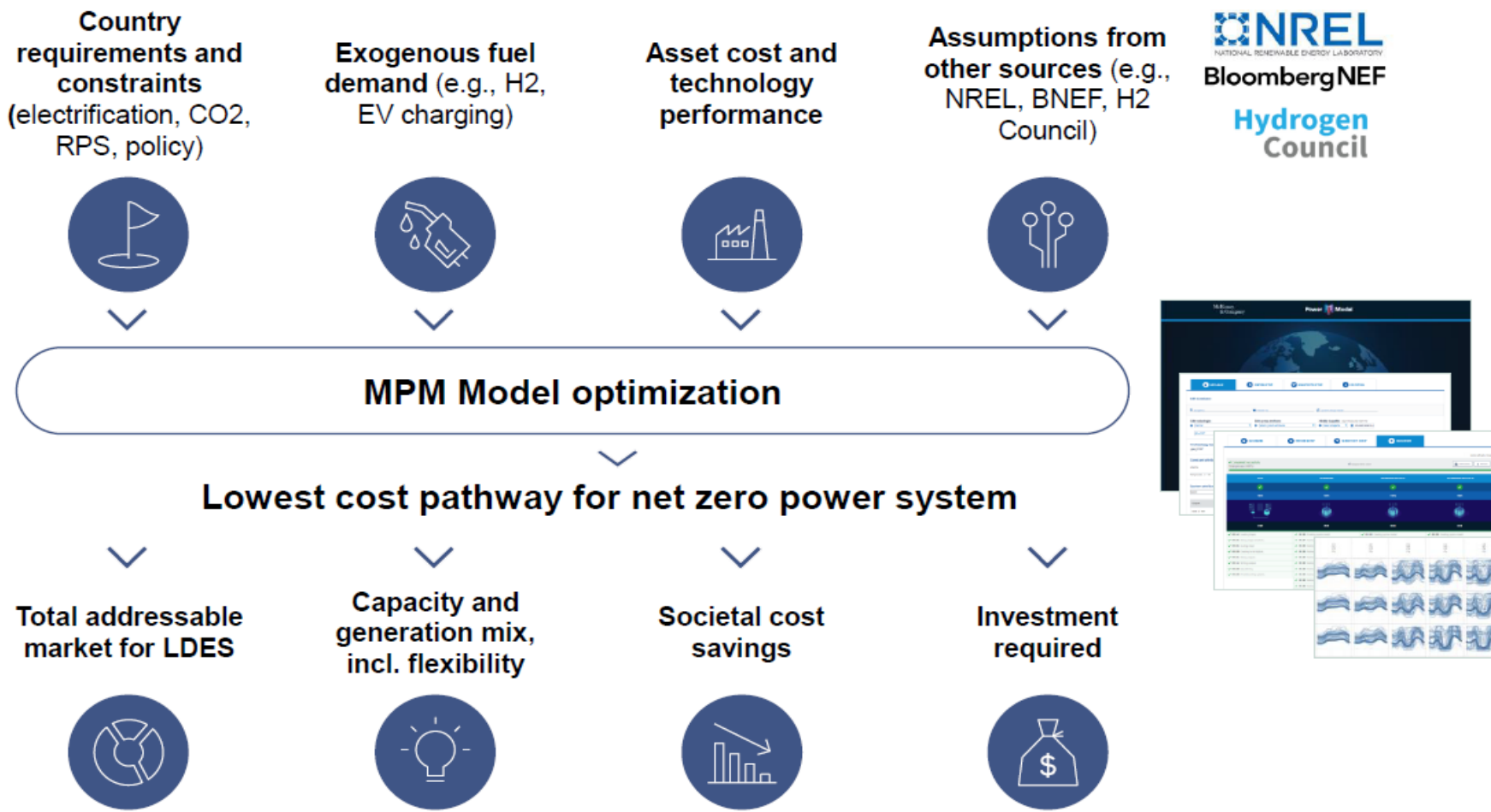
- ◆ 美國再生能源實驗室(NREL, 2021)：認為定義長時儲能的時長存在挑戰，因其涉及持續時間與應用。如若需以持續時間定義，建議使用 ARPA-E 的 10-100 小時。

NREL was not able to determine a single uniform definition for LDES to describe both duration and application and concludes it may not be possible to reconcile the two. The team suggests any use of the term LDES should be accompanied with a short qualitative description to clarify the intent of using the term. And if a duration *must* be used, the team recommends using ARPA-E’s definition of 10–100 hours but with the appropriate caveats.

- ◆ 長時儲能委員會、麥肯錫(2021)：任何具競爭性部署且可以經濟有效方式擴大規模，以維持數小數、跨日、甚至跨週的長時間儲能技術。

LDES is defined as any technology that can be deployed competitively to store energy for prolonged periods and that can be scaled up economically to sustain electricity provision, for multiple hours, days, or even weeks, and has the potential to significantly contribute to the decarbonization of the economy.

# 分析方法與資料



- MPM為長期容量擴充模型，用於分析電力達淨零路徑最小成本下的投資及營運決。
  - 模型時間解析度為小時，分析期程至少10年以上。分析
  - 僅考量大型電網，不包括中壓或配電網
- 資料INPUT是以LDES委員會成員提供至少10,000+儲能技術成本、效率等資料，交由第三方進行處理與分析
- 以積極情境、核心情境，分析LDES未來發展

註：MPM (McKinesy Power Model)

資料來源：McKinsey & Company (2022), Net-zero power : Long duration energy storage for a renewable grid – Introduction prior to panel.

# 目錄

壹 背景說明

貳 長時儲能技術特色與現況分析

參 未來電力系統彈性需求分析

肆 長時儲能的成本分析

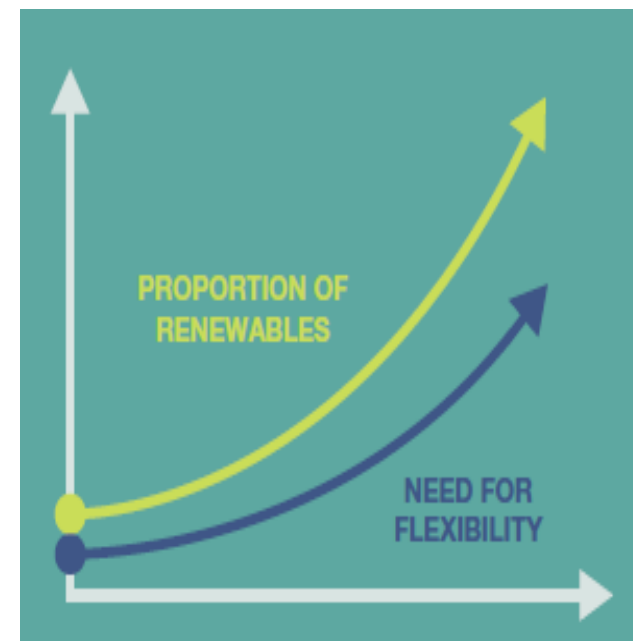
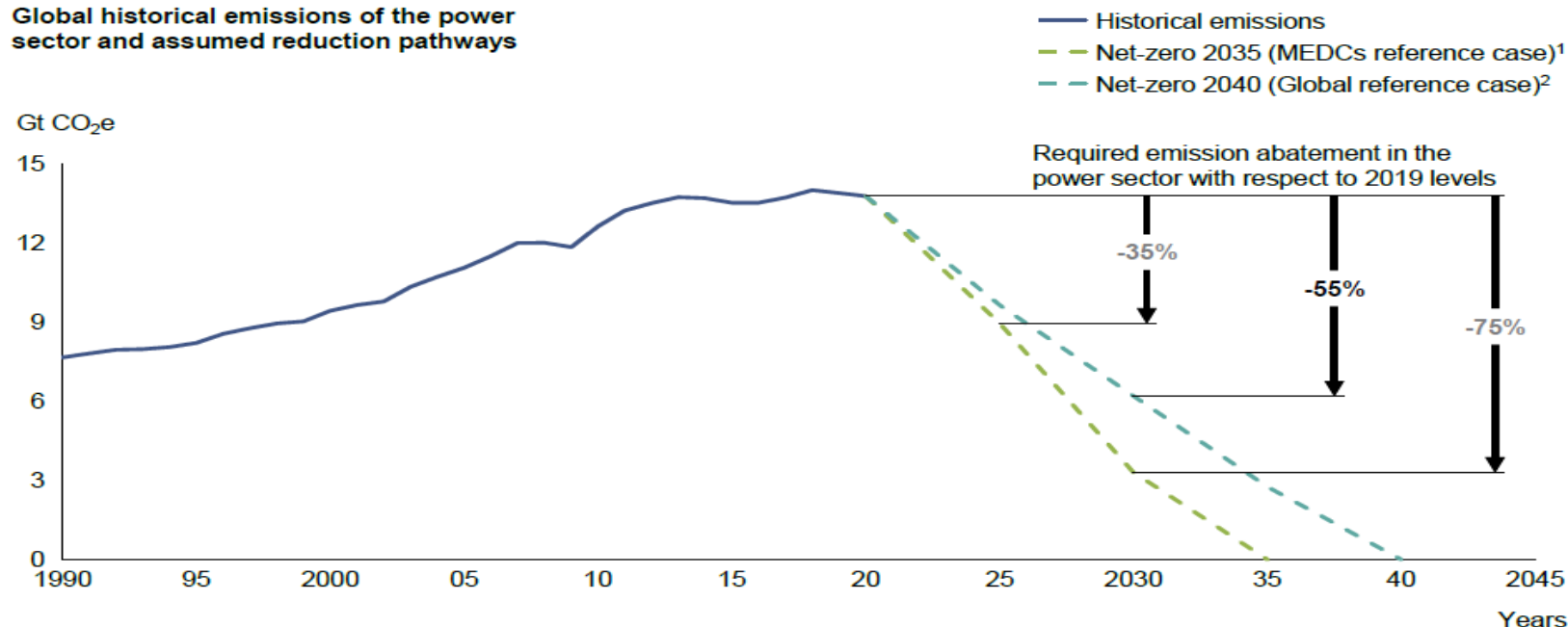
伍 長時儲能的發展挑戰及展望

# 壹、背景說明(1/4)

- ◆ 電力部門碳排放量占全球總排放量三分之一，且電氣化是達成淨零主要策略，預估電氣化將使的2050年電力消費增加三倍。
- ◆ IEA(2021)、麥肯錫(2021)均提出至2040年全球電力部門需實現零碳電力，以達成淨零目標。預估至2030年每年部署的PV與風力發電將超過1TW。
- ◆ 再生能源發電為未來主要發電來源(火力發電占總發電量比例降至10%或更少)，其發電間歇性對電網負面影響將愈發嚴重，淨零電力系統將需要導入更多時間跨度的彈性資源，以因應電力系統面臨的挑戰(如RE變動性、地域依賴性、極端氣候)。

## Power sector emission reduction pathways

Global historical emissions of the power sector and assumed reduction pathways

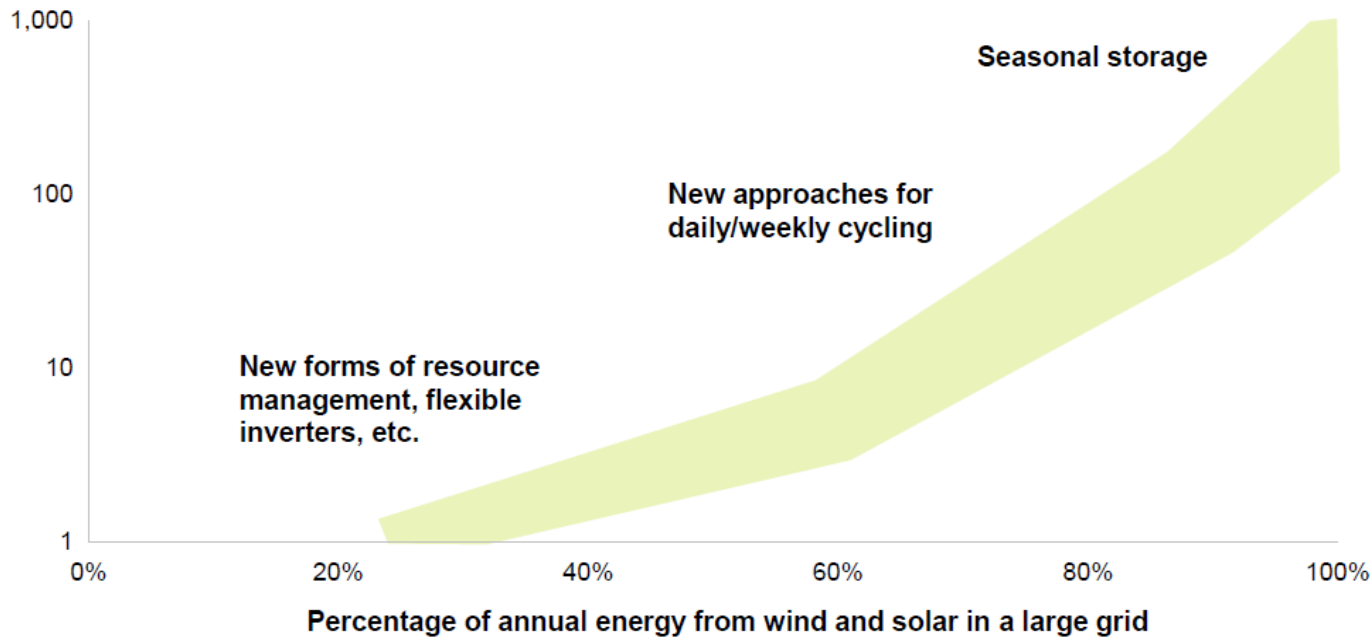


# 壹、背景說明(2/4)

- ◆ 隨著再生能源發電占比提昇，電力系統將面臨三個挑戰：電力供需失衡、輸電模式改變，及系統穩定性下降。
- ◆ 應對各項挑戰，需引進不同時間跨度的彈性資源(日內、跨日/跨週、季節性、極端氣候)，長時儲能憑藉長週期、大容量特性可發揮關鍵作用。

## Adoption curve of longer flexibility durations accelerates at 60-70% RE penetration

Storage duration, hours at rated power



## RES integration leads to new system challenges



### 電力供需失衡

- RE變動性與負載需求時段不吻合
- RE地理位置集中
- 極端氣候



### 輸電模式改變

- 再生能源潛力區域成為供電中心
- 消費者(prosumer)
- 電網新增/改建時間長、成本高



### 系統穩定性下降

- 系統慣性
- 虛功補償

# 壹、背景說明(3/4)

- ◆ 目前既有的解決方案包括：提供可調度的容量(如燃氣尖峰電力、抽蓄水力)、電網擴張(內部或跨區域互連)、饋電管理、棄電、短時儲能等。
- ◆ 已無法滿足電力系統不斷變化的需求，且存在各項問題，如燃氣尖峰電力因碳排放需加裝CCS，增加電廠的成本且需建置於具封存潛力場址處；電網擴張成本高且前置作業時間長；效率低等。
- ◆ 長時儲能具有不同應用場景之間切換疊加的高度靈活性，在電力系統發輸配用四個環節均有廣泛的應用空間。

**日內彈性**：涵蓋持續時間低於12小時的彈性需求，一般用於提供電網穩定服務、尖峰移轉。

**跨日、跨週的彈性**：解決再生能源造成的長時間不平衡問題，或傳輸限制造成潛在的斷電問題。

**跨季彈性**：太陽輻射、風速、溫度和降雨的自然變化，以及潛在的極端天氣事件。

Flexibility duration	Power system challenge	Dispatchable generation	Grid reinforcement	Curtailment or feed-in management	Li-ion batteries	LDES	Demand-side response
Intraday	Intermittent daily generation	✔		✔	✔	✔	✔
	Reduced grid stability	✔			✔	✔	⊘
Multiday, multiweek	Multi-day imbalances	✔	⊘	⊘	⊘	✔	
	Grid congestion	⊘	✔	✔	⊘	✔	
Seasonal duration	Seasonal unbalances	✔	✔			✔	
	Extreme weather events	✔				✔	

✔ Solution ⊘ Partial solution



# 壹、背景說明(4/4)

- ◆ **新型/前瞻LDES技術**：報告側重於**新型LDES技術**，但不包括**鋰離子電池儲能、氫能及傳統大型抽蓄水力**。



## 機械儲能

- 位能、動能、內能
- 抽蓄水力為目前全球最廣泛應用、技術最成熟的儲能技術，占全球總儲能容量的**95%**。
- 新型態的抽蓄儲能主要是在減少其對地理條件的要求

- 新型 PSH
- 重力儲能
- 壓縮空氣
- 液態壓縮空氣
- 液態CO<sub>2</sub>



## 電化學儲能

- 利用電化學反應來儲存能量

- 液流電池
- 全鈦液流電池
- 混合液流電池
- 金屬陽極電池



## 熱儲能

- 以熱能的形式存儲電能或熱能
- 在放電循環上，熱的傳遞是以流體形式，透過熱交換，推動渦輪機發電

- 顯熱 (如熔融鹽)
- 潛熱 (相變儲能)
- 熱化學



## 化學儲能

- 利用化學反應儲存能量

- 電轉為合成氣，再轉為電力
- 電轉為氫能，再轉為電力

## 貳、長時儲能技術特色與現況分析(1/3)

- 1.長時儲能技術與其他形式的儲能系統一樣，具備**可存、可放、可調度**之特性，被視為有效整合再生能源與分散式發電，並提供乾淨、可靠能源供給的重要工具。
- 2.相較其他形式儲能系統，新型長時儲能技術具有一些鮮明特點：

### **(1) 邊際儲能成本低(元/kWh)，且功率與儲能容量脫鉤**

- 長時儲能具較低儲能容量設置成本，且功率與儲能量脫鉤，因此在優化系統規模，及規模提昇成本具顯著優勢
- 長時儲能系統可長時間提供電力，並且通常不需要疊加多個服務來回收投資
- 長時儲能使用壽命長，大約30年才需進行重大升級，且即使高運轉下，容量衰退情形也不嚴重

### **(2) 與輸配電網升級和擴建相比，長時儲能前置時間(lead time)較短**

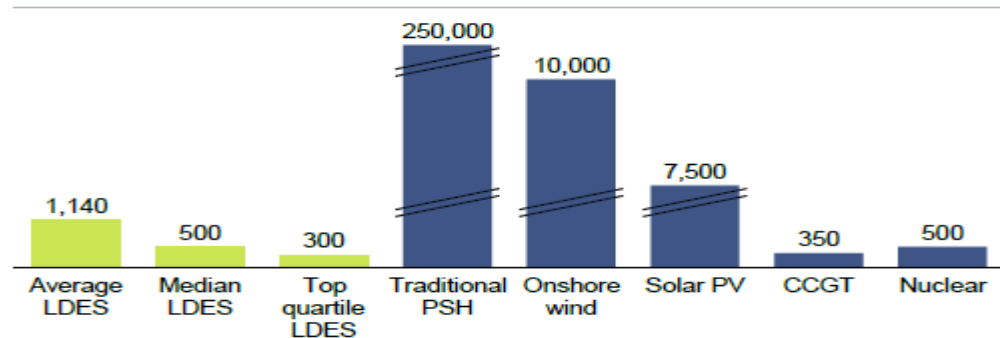
- 長時儲能技術平均建設時間為一年，且建置限制相對較少，與電網升級相比，許可要求更寬鬆
- **LDES**可增加電網利用率、虛擬電網容量，推遲電網升級的時間

# 貳、長時儲能技術特色與現況分析(2/3)

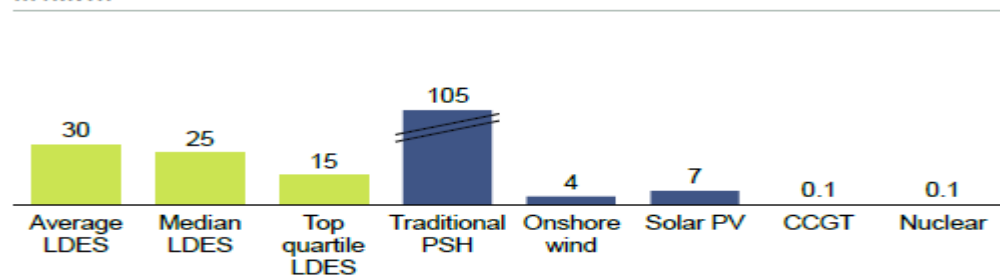
## (3) 具有廣泛可部署性與擴展性

- 大多數新型LDES幾乎沒有地理位置要求，且單位裝置需求面積較小。有些長時儲能技術甚至可以建置在地下、或因風險小可非常靠近人口稠密區。
- 多數LDES技術具模組化架構(modular architecture)，允許系統建置初期採用較短存續時間或較小的電力容量，後續再根據需求擴大規模。
- 部分長時儲能技術依賴既有供應鏈，且大部分是使用全球儲量豐富的材料，不依賴稀有元素。

Unit footprint  
m<sup>2</sup>/MW



Unit footprint  
m<sup>2</sup>/MWh

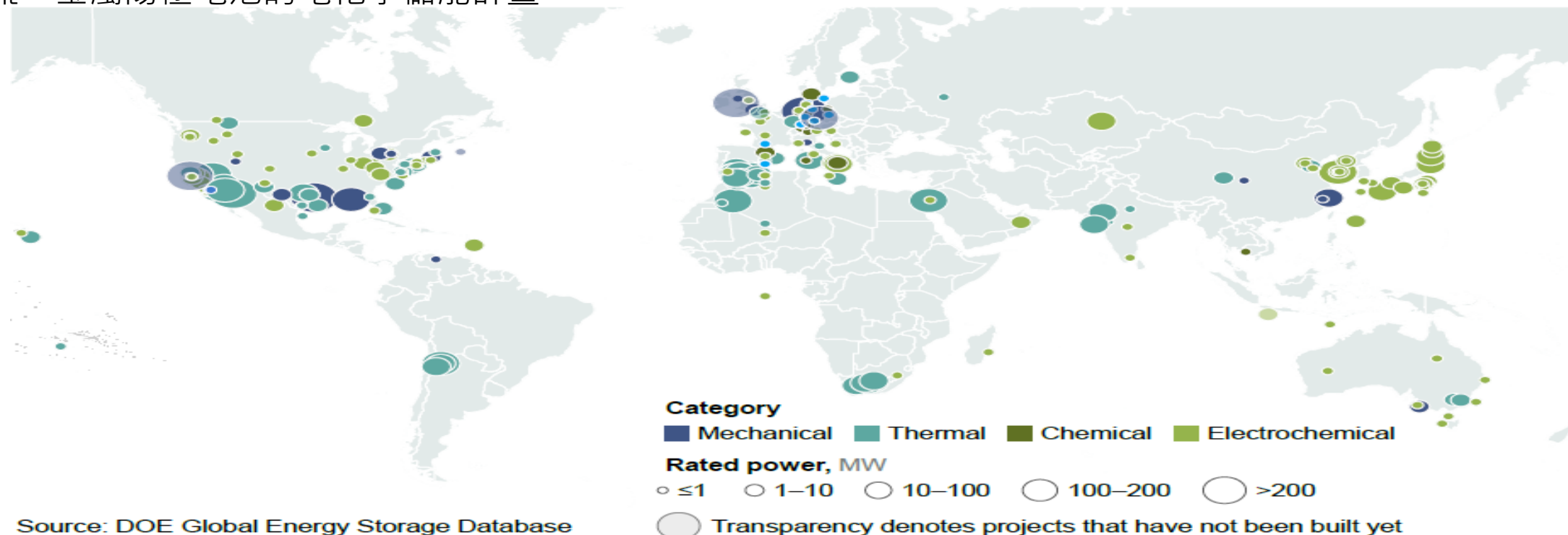


Energy storage form	Technology	Market readiness	Max deployment size, MW	Max nominal duration, Hours	Average RTE <sup>1</sup> %
Mechanical	Novel pumped hydro (PSH)	Commercial	10–100	0–15	50–80
	Gravity-based	Pilot	20–1,000	0–15	70–90
	Compressed air (CAES)	Commercial	200–500	6–24	40–70
	Liquid air (LAES)	Pilot (commercial announced)	50–100	10–25	40–70
	Liquid CO <sub>2</sub>	Pilot	10–500	4–24	70–80
Thermal	Sensible heat (eg, molten salts, rock material, concrete)	R&D/pilot	10–500	200	55–90
	Latent heat (eg, aluminum alloy)	Commercial	10–100	25–100	20–50
	Thermochemical heat (eg, zeolites, silica gel)	R&D	na	na	na
Chemical	Power-to-gas-(incl. hydrogen, syngas)-to-power	Pilot (commercial announced)	10–100	500–1,000	40–70
Electrochemical	Aqueous electrolyte flow batteries	Pilot/commercial	10–100	25–100	50–80
	Metal anode batteries	R&D/pilot	10–100	50–200	40–70
	Hybrid flow battery, with liquid electrolyte and metal anode	Commercial	>100	25–50	55–75

1. Power-to-power only. RTEs of systems discharging other forms of energies such as heat can be significantly higher.

## 貳、長時儲能技術特色與現況分析(3/3)

- ◆ 全球宣示的長時儲能計畫超過260個(不包括抽蓄儲能)，總裝置量為5GW(65GWh)。
- ◆ 以裝置量來看，主要是以**熱儲能為主**(占全球宣示的長時儲能容量60%)、**傳統CAES占第二大**(占全球長時儲能容量30%)，最大裝置量平均為80MW。以計畫項目來看，最多的是**液流電池儲能計畫**，超過**100個**，平均容量約4MW。
- ◆ 以國家發展來看，LDES最主要發展國家為**美國、西班牙、德國**。美國約占全球LDES容量的30%，儲能容量平均分布在機械儲能、熱儲能及電化學儲能計畫。在亞洲方面，主要發展國家為**日本及中國**，已宣示超過30個液流、金屬陽極電池的電化學儲能計畫。

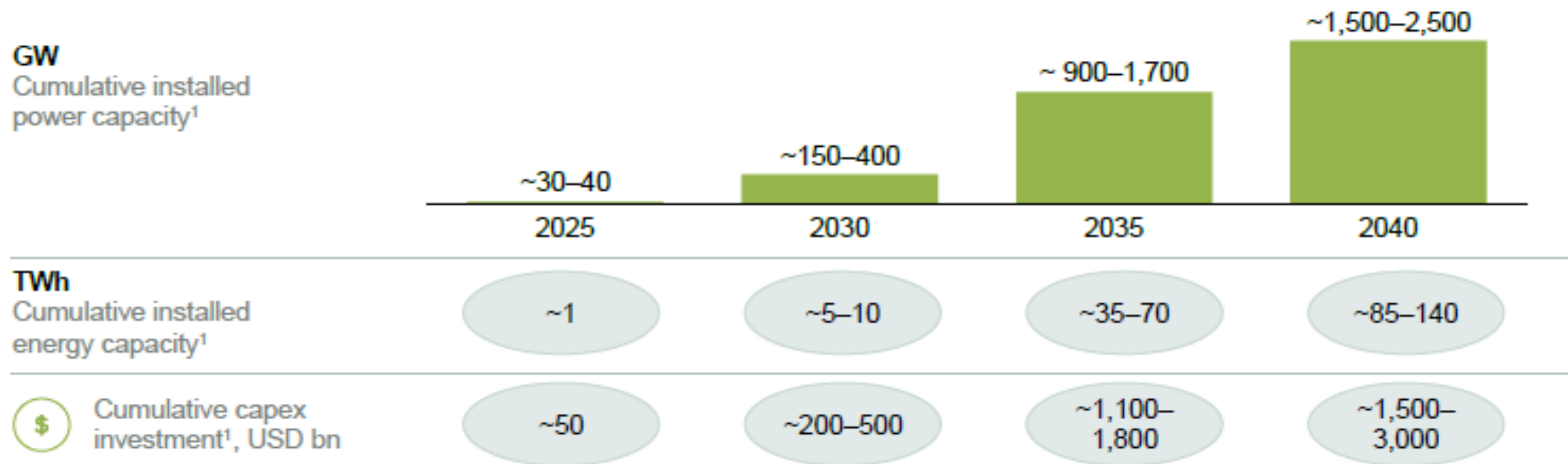


Source: DOE Global Energy Storage Database

# 參、未來電力系統彈性需求分析(1/5)

- ◆ 淨零情境下，LDES 2040年潛在市場(TAM)規模將達**1.5-2.5TW**，以實現淨零電力系統所需的彈性，為目前全球總儲能容量**8~15倍**，其中**能源移轉、容量提供和輸配電優化服務**為主要佈建項目。
- ◆ 2025年，全球預估投資500億美元部署足夠的試點與商業化儲能電廠，2040年累計投資金將達1.5兆到3兆美元，相當全球每**2到4年**對輸配電網路的投資。

## LDES total addressable market and cumulative capex investment by year



1. Range is LDES central scenario and LDES progressive scenario.






# 參、未來電力系統彈性需求分析(2/5)

## ◆ 長時儲能可在並網與離網應用中創造價值，主要五個價值創造部分為

### (1) 能源移轉、容量提供和輸配電網優化

- 長時儲能預期在大型電力系統具獨特的雙重作用，除可避免使用氫渦輪機作為尖峰容量，同時可提供日內或跨日(多日)的充放電需求(能源移轉)。此外，藉由輔助、延期或替代投資較高的輸電網路，為冗長的輸配電建設提供具成本有效的替代方案
- 為LDES最大的潛在應用市場，占2040年佈建的80~90%
- LDES創造價值包括減少電網建置成本、容量提供報酬、棄電減少帶來的效益、排碳成本減少等

xx T&D optimization value    xx Value/spend measures

2040				
Cumulative LDES				
Value created by LDES	Installed power capacity GW	Installed energy capacity TWh	Cumulative value creation USD bn	Annual LDES capex spend USD bn
 Energy shifting, capacity provision, and T&D optimization	~1,300-2,300	~80-135	~470 <sup>1</sup> ~300-650 <sup>2</sup>	~175-215
 Optimization of energy for industry with remote or unreliable grids	~110	4	~120	~4-5
 Isolated island grids	~90-100	3	~30-35	~10
 Firming for PPAs	~40	2	~5-10	<1
 Stability services provision (inertia)	0	0	~5-10 <sup>3</sup>	na <sup>4</sup>
<b>Total</b>	<b>~1,500-2,500</b>	<b>~85-140</b>	<b>~950-1,300</b>	<b>~190-230</b>

# 參、未來電力系統彈性需求分析(3/5)

## ◆ 長時儲能可在並網與離網應用中創造價值，主要五個價值創造部分為

### (2)協助位於偏遠區域或不可靠電網工業用電大戶能源使用優化

- LDES對在地再生能源使用及確保連續供電(如連續生產線)至關重要，如大型離網用戶(像礦業、軍事基地)、在電網可靠性低的工業用戶(如經濟條件較差的化工廠、鋼鐵廠)
- LDES創造價值為減少化石燃料消耗、增加營運能夠正常運行的時間，替代火力發電備用容量

### (3)孤島獨立電網優化

- LDES可協助提供離網或微電網設備 (包括島上電力系統)穩定且安全的電力，且可最大限度減少對柴油發電及化石能源的依賴
- 潛在價值來自減少化石燃料與碳排放所省下的成本

### (4)保障再生能源購電協議(PPA)

- 長時儲能可讓具特定基本負載要求的購電協議獲取額外的溢價，使企業實際由再生能源供電的比例增加近100%，同時為電網營運提供彈性
- 價值主要來自於再生能源憑證與排碳額度所省下來的成本，且可降低營運成本、降低化石燃料價格波動與碳排放成本影響，並實現企業環境目標。

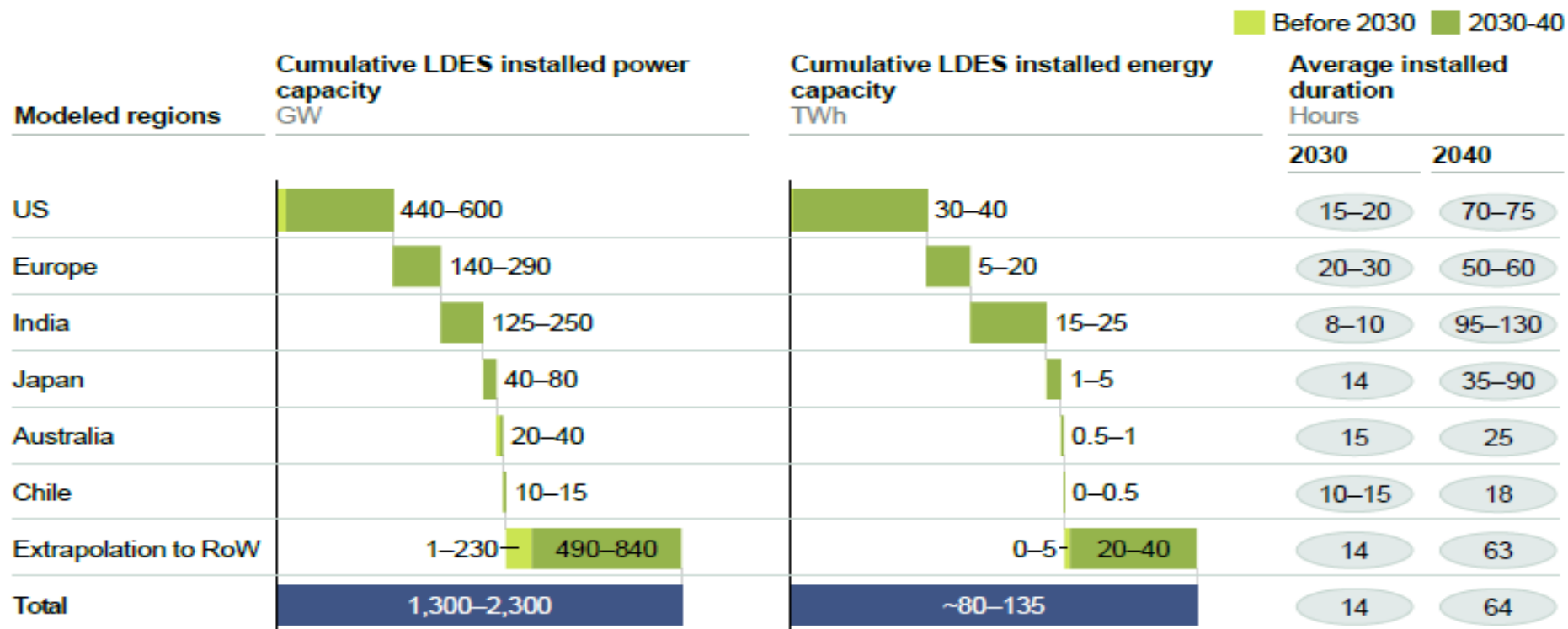
### (5)提供穩定服務

- LDES技術為維持電網穩定可提供廣泛的輔助服務(具體服務因技術而異)，如提供慣性
- 長時儲能技術可從慣性中獲取價值，並可與其他有償服務進行疊加，如容量提供

# 參、未來電力系統彈性需求分析(4/5)

- ◆ 再生能源增加與電氣化將導致所有市場增加對長時儲能系統的需求。美國對長時儲能需求最大，主要原因是美國跨國的輸電網絡連結有限，長時儲能將有助於減少棄電和電網擁塞，同時提高輸電效率。
- ◆ 歐洲與日本因受2035-2040年尖峰容量需求的影響，預估建置平均持續時間超過50小時的LDES；針對再生能源資源豐富且PV普及率高的地區，如澳洲、智利等，主要需求較短期的儲能。

Total addressable market by modeled markets






# 參、未來電力系統彈性需求分析(5/5)

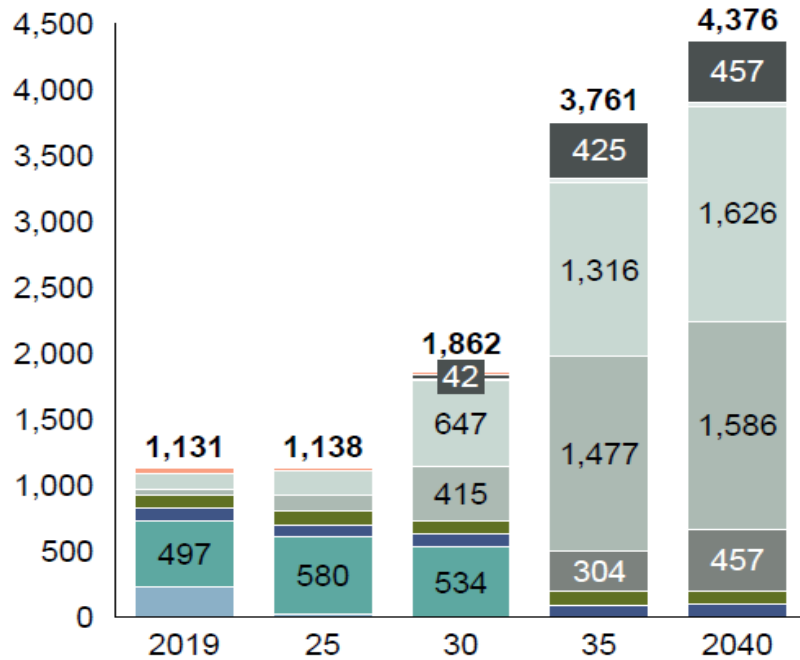
- ◆ 倘若LDES成本發展趨勢如預期，LDES將在國家發電容量結構中占有一定的比例(large share)，以美國為例，LDES在2040年將儲存總能源消費約10~15%，取代部分鋰離子與氫渦輪機的容量，並比這兩項技術占更高的比例。

(%) LDES share of new flexible capacity<sup>5</sup>

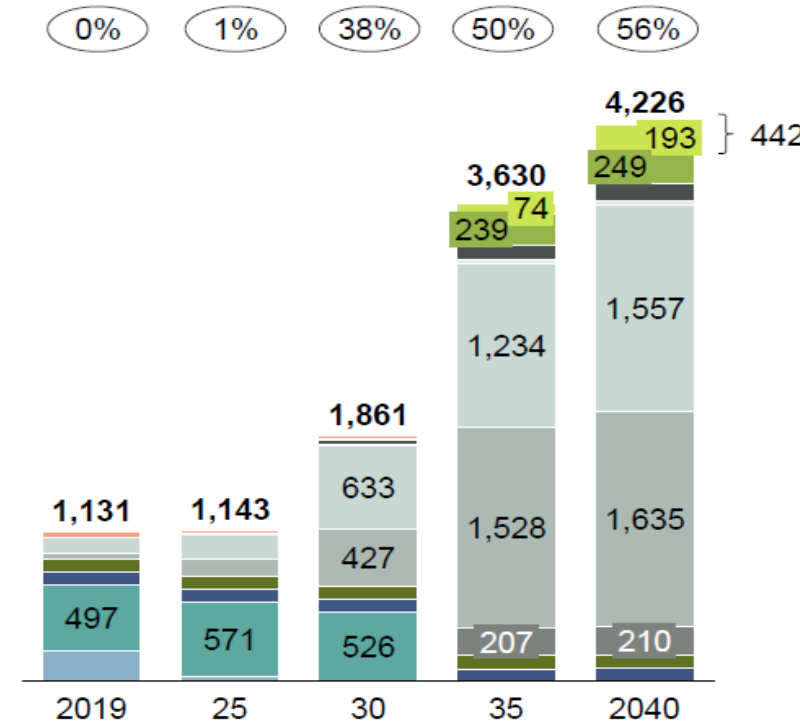
Others LDES 8-24h LDES 24+h Li-ion battery Wind Offshore Wind Onshore Solar H2 Turbines Hydro Nuclear Gas Coal

 Capacity mix, GW

## No LDES



## With LDES (Central scenario)



## Insights

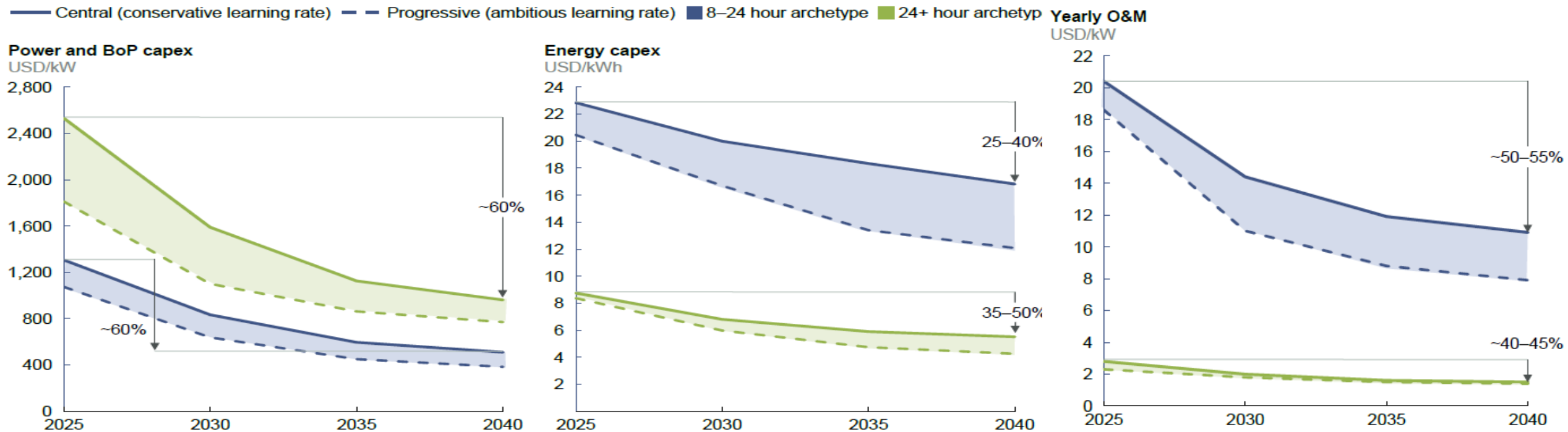
LDES archetypes expected to play major role within "new flexible capacity" (i.e. Li-ion, H2 turbines, LDES)

Until 2030, existing gas limits LDES

By 2040, >50% of new flexible capacity might be LDES systems

# 肆、長時儲能的成本分析(1/5)

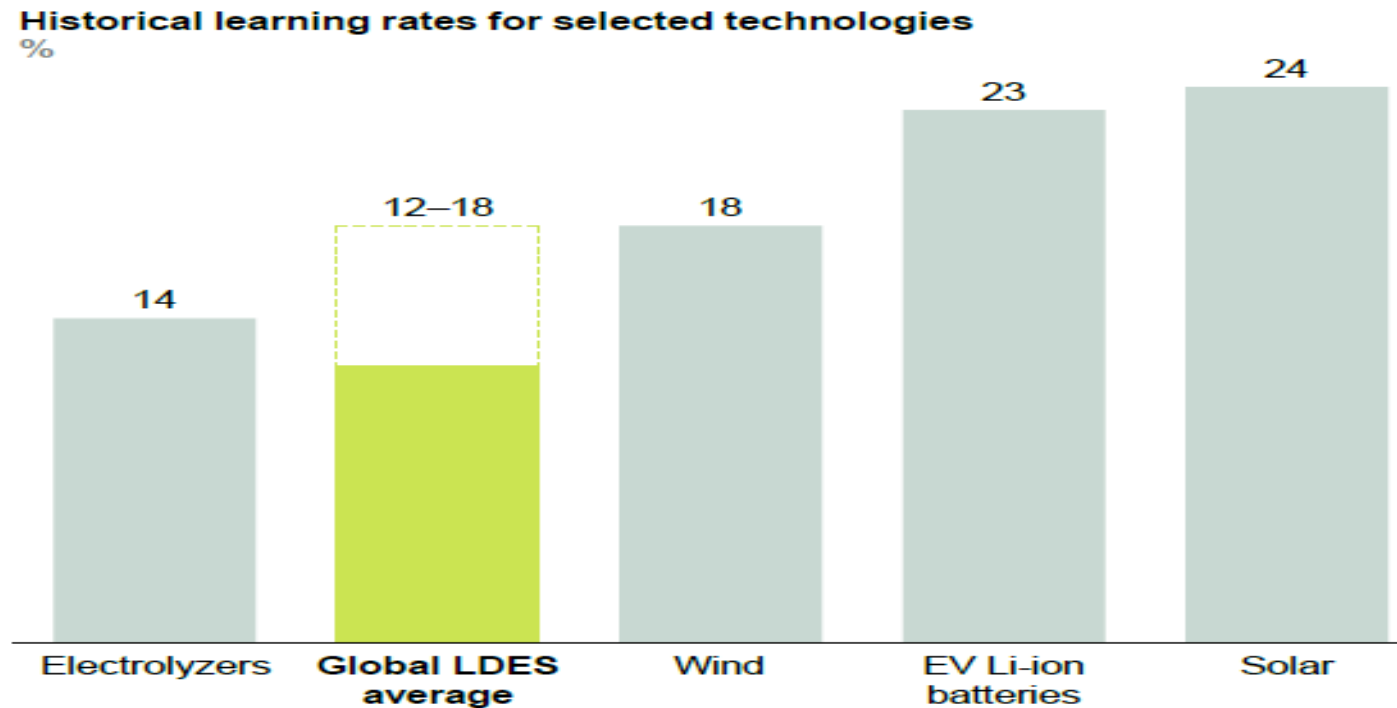
- ◆ 長時儲能成本與效能的關鍵參數為電力容量成本(美元/ kWh) , 儲能容量成本(美元/kWh) 、 運維(O&M) 成本 ( 美元/ kWh) , 及充放電效率(RTE)。
- ◆ LDES成本降低取決兩個因素：(1) 藉由增加產業佈建、供應商發展，及供應鏈學習來改善成本；(2) 製造進步與生產規模增加，使成本降低。
- ◆ 長時儲能電力容量設置成本(power and BoP capex)預估未來15年可下降**60%**，儲能容量下降40~50% 運維成本下降45~55%，充放電效率可提高10%~15%(材料科學的突破、系統設計調整)。



Source: LDES Council member technology benchmarking

# 肆、長時儲能的成本分析(2/5)

- ◆ LDES系統設置成本學習率與風電、光電、氫能等潔淨能源技術一致，全球LDES平均學習率為12-18%
- ◆ 不同長時儲能技術的潛在學習率因受使用的設備、材料成本、與對設置成本改善的敏感度而有所不同。電化學儲能等相對成熟的儲能技術，學習率低於平均水準(比平均水準低4~5個百分點)，而機械儲能或熱儲能等新型長時儲能技術則高於平均水準(分別高3個及5個百分點)。

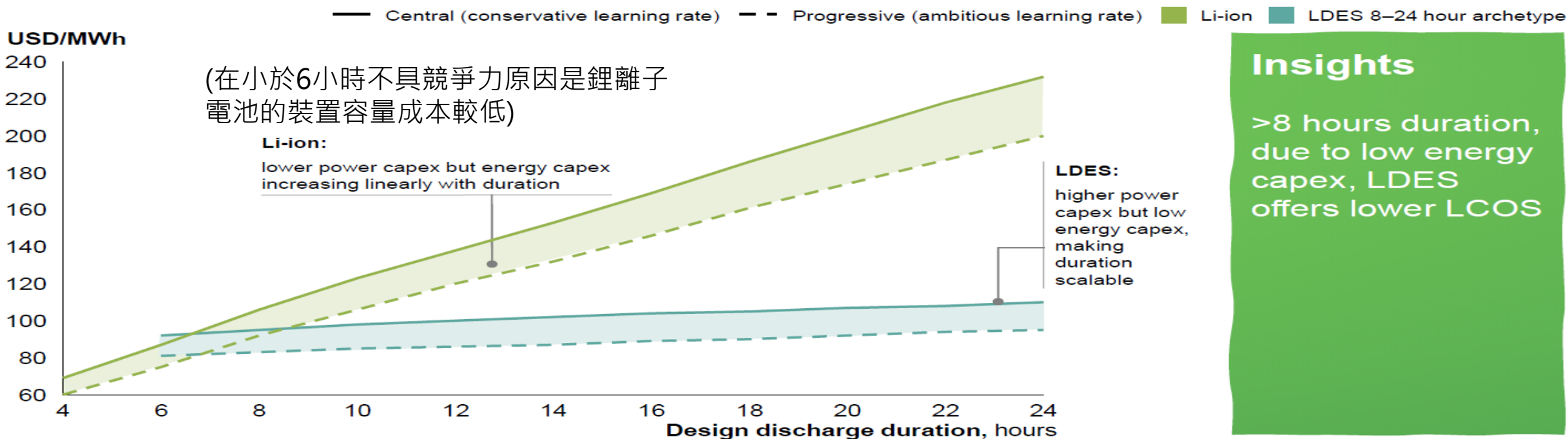


Source: LDES Council member technology benchmarking

# 肆、長時儲能的成本分析(3/5)

- ◆ 均化儲能成本(LCOS)是由**技術成本**而非系統成本角度，考慮影響儲能生命週期成本中所有技術與經濟因素，但未納入長時儲能對整個系統價值的貢獻。但**LCOS**仍可作為一個有效指標，用以評估長時儲能在不同持續時間解決方案上的成本競爭力。
- ◆ 與鋰離子電池儲能系統相比，長時儲能系統2030年在6小時以上的持續時間內具有均化儲能成本(LCOS)的競爭力，**在8-9小時以上更具明顯優勢**，長時儲能LCOS為80美元/MWh至95美元/MWh。

2030 energy storage LCOS competitiveness by duration for selected technologies (USD/MWh)



**Insights**

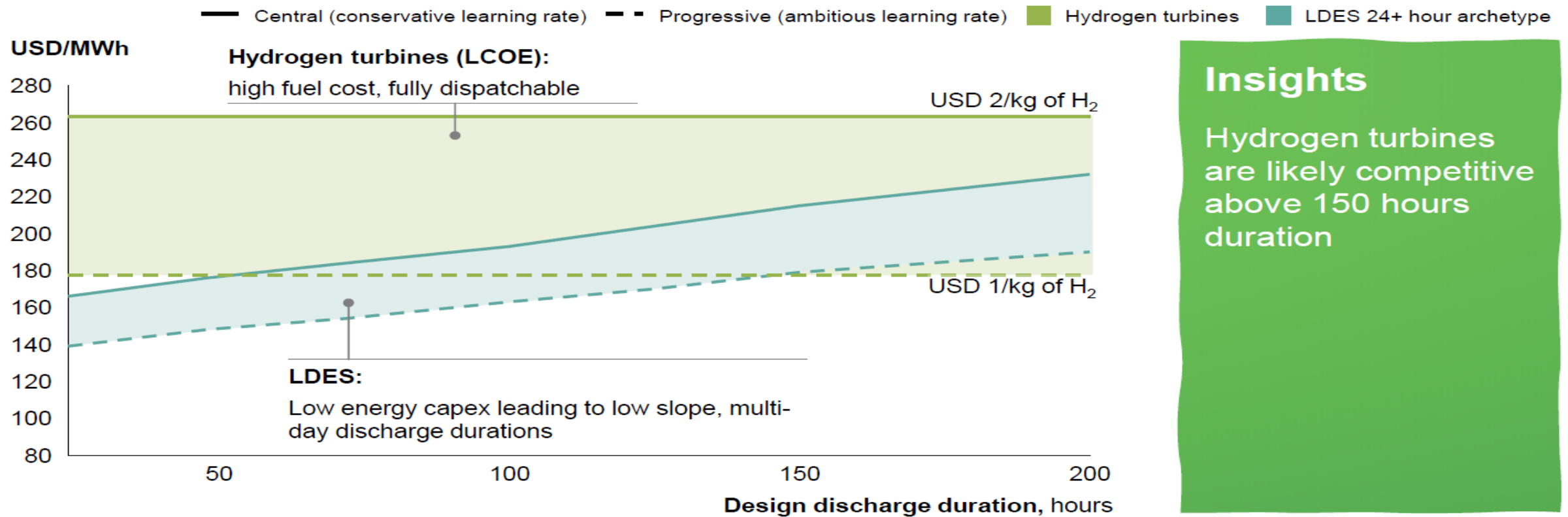
>8 hours duration, due to low energy capex, LDES offers lower LCOS

資料來源：McKinsey & Company (2022), Net-zero power : Long duration energy storage for a renewable grid – Introduction prior to panel.

# 肆、長時儲能的成本分析(4/5)

- ◆ 作為尖峰容量應用上，長時儲能在連續放電持續時間小於150小時下，LCOS可與氫渦輪機競爭。
- ◆ 一些長時儲能已可如燃氣電廠般提供電網穩定，依據分析，假設作為尖峰容量設備的容量因數為15%，若利用率增加，長時儲能系統作為尖峰發電廠的潛力會降低。

2030 energy storage LCOS competitiveness by duration for selected technologies (USD/MWh)



資料來源：McKinsey & Company (2022), Net-zero power : Long duration energy storage for a renewable grid – Introduction prior to panel.

# 肆、長時儲能的成本分析(5/5)

## ◆ 設備利用率與平均充電成本是營運損益平衡的關鍵

- 均化儲能成本(LCOS)與設定的邊界條件具高度關聯(包括特定的市場條件、地理位置和最終應用), 從而影響技術競爭力
- 由於充放電效率的改進受到技術限制影響, 其對長時儲能競爭力和價值影響有限。電價和儲能利用率對LCOS的影響最大。

### Impacts on LCOS by ranging different input metrics, 2030

Parameter	8–24 hour archetype, 16 hours duration			24+ hour archetype, 100 hours duration		
	Range	LCOS impact 2030, USD/MWh	Sensitivity to 5% change %	Range	LCOS impact 2030, USD/MWh	Sensitivity to 5% change %
Prior to change		87			151	
Per energy capex USD/kWh	8–25	81   92	3	3–9	135   167	1
RTE %	90–40	71   140	6	75–25	110   268	4
Per power capex & BoP USD/kW	400–960	76   97	2	690–1,510	130   173	2
Opex USD/kWh	5–20	80   90	3	0.9–2.6	150   152	0
Electricity price USD/MWh	16–46	70   112	3	16–46	123   183	2
Utilization %	70–20	71   138	6	70–20	119   257	4

# 伍、長時儲能的發展挑戰及展望

## 1. 長時儲能對全球電力部門達到脫碳具關鍵角色

- 至2040年，部署長時儲能使再生能源變為可調度，並替代其他排碳的電廠，預估每年減少15到23億噸二氧化碳（約當今電力部門排放量10%~15%）。

## 2. 缺乏支援性市場可能會顯著地延遲長時儲能技術的部署

- 成本降低軌跡取決於改進的技術設計、製造能力的精簡和優化以及規模因素
- 快速的技術進步對於確保LDES快速採用至關重要
- 其他影響LDES部署包括對零碳電力路徑的規劃、碳定價、替代技術的發展與部署規劃

## 3. 到2040年實現最佳長時儲能容量部署將需要大量投資

- 使用長時儲能以最具成本效益的方式升級電力系統將需要大量私人投資，2040年全球需要1.5兆~3兆美元來實現累進的成本預測

## 4. 建構具體行動的支援性生態系統將有助市場迅速發展

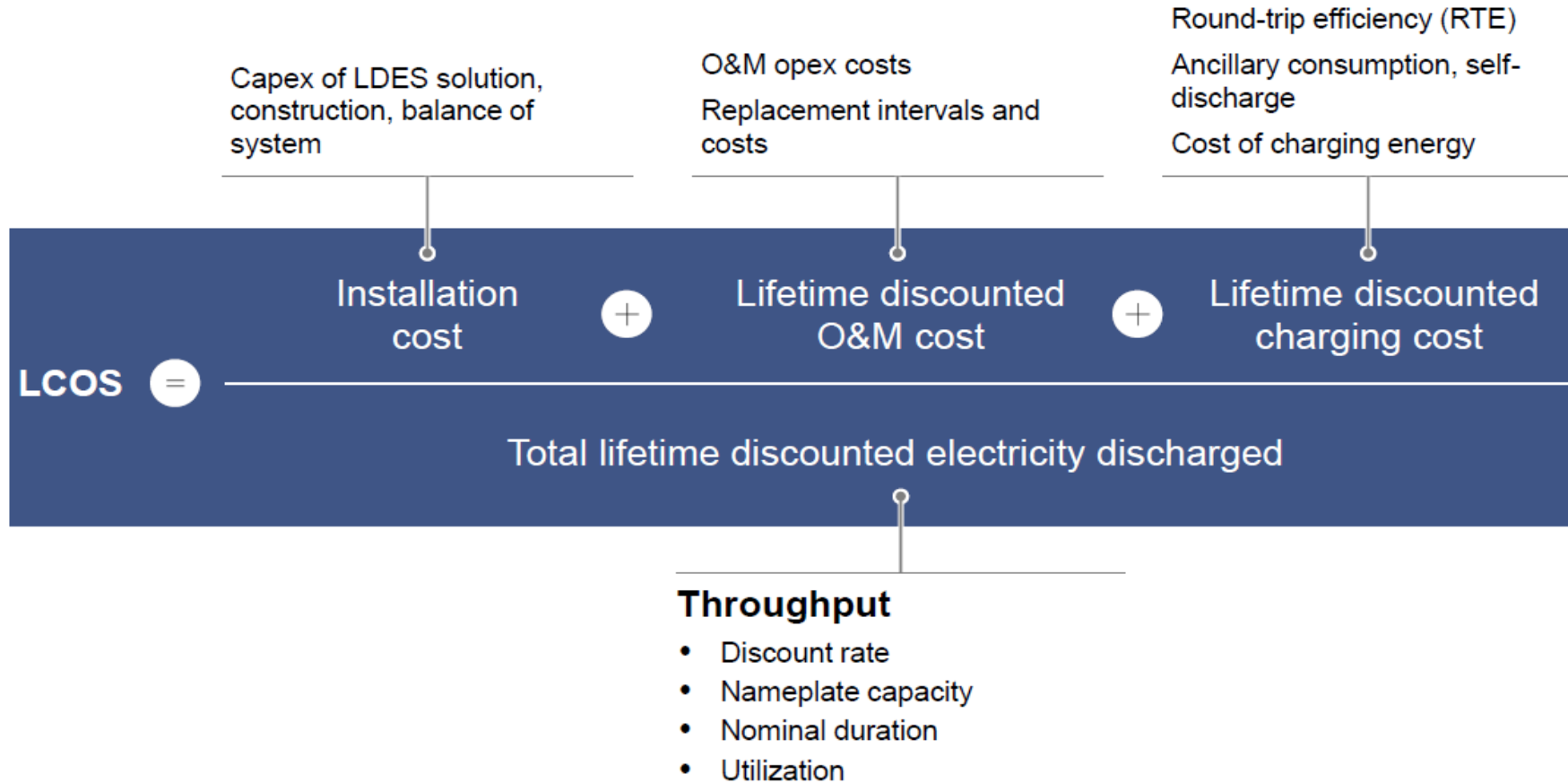
- 長期系統規劃，以鞏固投資者信心，吸引投資
- 協助前期部署與規模擴展，降低投資者進入門檻與風險
- 創造市場，以使投資者可實質獲取長時儲能價值(貨幣化)，確保儲能設備的投資回報



# 附件



# LCOS



## Insights

LCOS is comparable to LCOE and represents a tool for cost comparison of electricity storage

LCOS depends heavily on the operations of the system but allows a like-for-like comparison