

主要國家戰略性關鍵物資供應鏈韌性保障 措施的實踐與啟示

汪震亞*

壹、前言

貳、關鍵礦物供應鏈發展趨勢

參、美國關鍵礦物保障措施

肆、歐盟關鍵礦物保障措施

伍、日本關鍵礦物保障措施

陸、結論

摘 要

本文中所指的「戰略性物資」是指在現代科技、工業和經濟中具有重要地位，且供應相對較有限的礦物資源，隨著數位轉型和綠色轉型趨勢的發展，這些礦物的需求也隨之增加，IEA 於 2021 年報告中指出，為實現 2050 年淨零排放目標，到 2040 年全球關鍵礦物需求將增至 2020 年的六倍。

然而，全球關鍵礦物供應鏈的集中性，以及近期俄烏戰爭凸顯的供應不穩定風險，引起了主要國家的關注。為了應對全球供應鏈的風險，許多國家近年來紛紛提出一系列確保關鍵礦產的措施。這些措施包括加大對關鍵礦物的探勘和開採投資，致力於研發回收再利用技術。此外，透過國際間的合作與政策協調，各國也力求確保關鍵礦物的供應穩定性，同時確保採礦活動符合環境和社會的可持續發展標準。

臺灣並未生產關鍵礦物，主要依賴進口其他國家精煉過的礦物產品，如果發生供應風險，將影響相關產業運作，故有必要參考美國、歐盟與日本等主要經濟體保障關鍵礦物供應之措施，透過建立多元化的供應鏈，以降低風險。同時，應鼓勵技術創新、制定環保與回收政策，並與國際間進行合作，確保關鍵礦物供應的可靠性。

*作者為經濟發展處專員。本文係筆者個人觀點，不代表國發會意見，若有疏漏之處當屬筆者之責。

**本文研究實證資料以2024年1月當時可取得的最新統計資料為準。

Practice and Implications of Resilience Assurance Measures in the Global Main Countries' Strategic Key Material Supply Chains:

Chen-Ya Wang

Specialist

Economic Research Department, NDC

Abstract

The term "strategic materials" in this paper refers to minerals that play a crucial role in modern technology, industry, and economy, with a relatively limited supply. As the demand for these minerals increases due to the trends of digital transformation and green transition, the International Energy Agency (IEA) reported in 2021 that the global demand for key minerals is projected to grow sixfold by 2040 to achieve the net-zero emissions target by 2050.

However, the concentration of global key mineral supply chains and the highlighted risks of supply instability, as demonstrated by the recent Russia-Ukraine conflict, have raised concerns among major nations. In response to the risks in global supply chains, many countries have proposed a series of measures to secure critical mineral resources. These measures include increased investments in the exploration and extraction of key minerals, as well as a commitment to developing recycling technologies. Furthermore, through international cooperation and policy coordination, countries strive to ensure the stability of the supply of critical minerals while ensuring that mining activities adhere to environmental and social sustainability standards.

Taiwan does not produce critical minerals and heavily relies on importing refined mineral products from other countries. In the event of supply risks, it would impact related industries. Therefore, it is necessary for Taiwan to reference measures taken by major economies such as the United States, the European

Union, and Japan to secure the supply of critical minerals. This involves establishing diversified supply chains to mitigate risks. Simultaneously, encouraging technological innovation, formulating environmental and recycling policies, and fostering international collaboration are essential to ensure the reliability of the supply of critical minerals.

壹、前言

本文中所指的「戰略性物資」是指在現代科技、工業和經濟中具有重要地位，且供應相對較有限的礦物資源，可應用在包括電子產品、綠色能源、電動車、醫療設備和國防工業等領域。一般來說，關鍵礦物包括鋰、鈷、鎳、鈦、鋁、銅、鎢、鉬和稀土元素(rare earth element)¹。隨著數位轉型和綠色轉型趨勢的發展，這些礦物的需求也隨之增加，因為相關產業在快速發展和創新。因此，美國、歐盟、日本和韓國等國家積極進行關鍵礦物的戰略儲備、供應和研發，並制定相應的政策措施²。

關鍵礦物供應被視為一個具有挑戰性的問題，主要有兩個原因。首先，與一般大宗商品相比，關鍵礦物的產量有限，且主要國家對環境保護和勞工權益等議題非常關注，限制了關鍵礦物的開發可能性，或使開發成本大幅增加。其次，這些礦物的產出和供應高度集中在少數國家和地區，這使得供應鏈容易受到地緣政治和產出國政策變化的影響。因此，主要國家正在持續努力確保自身關鍵產業的發展不會受制於地緣政治和供應變化的影響。這些國家意識到確保關鍵礦物供應的重要性，並致力於推動可持續的開發和利用，以及多元化供應來源的建立，以降低依賴程度並減輕供應風險。

近年來在美中貿易爭端不斷加劇、俄烏戰爭爆發與 COVID-19 大流行，引發人們對全球供應鏈不穩定的擔憂。全球政府與企業體認到生產基地與資源供應過度集中在單一地區的情況下，一旦發生供應鏈危機將嚴重衝擊產業與國家安全，進而催生出新的供應鏈邏輯，不再以成本節省為最重要的考量，轉而注重可靠性與穩定性，並追求供應來源多元化與生產基地靠近市場，因此供應鏈調整與轉型不只是單純的經濟課題，勢必要將政治納入考量。

本文的主要目的，是探討主要國家為了保障關鍵礦物供應鏈穩定性，在供應鏈多元化、國內開發與儲備、國際合作、技術創新等面向所做的努力，透過外國的經驗與做法給國內政策提供參考與借鑒，期望在制定相關政策與建立國際合作關係有所助益。

¹ 稀土元素由 17 個不同的元素組成，包含鐳(La)、鈾(Ce)、鐳(Pr)、釹(Nd)、鉕(Pm)、釷(Sm)、鈾(Eu)、釷(Gd)、鉕(Tb)、鐳(Dy)、釹(Ho)、鉕(Er)、鉕(Tm)、鉕(Yb)、鐳(Lu)等 15 種鐳系元素(lanthanides)，以及釷(Y)和鉕(Sc)等與鐳系元素具有相似性質的元素。

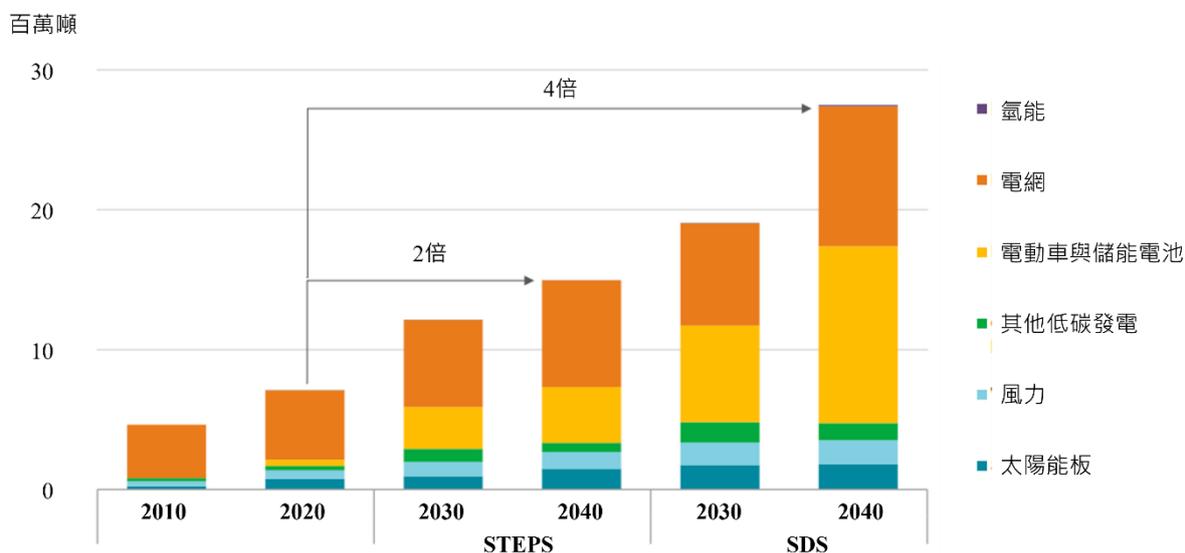
² 中技社(2013)，「臺灣稀有資源循環發展策略」，專題報告 2013-06。

貳、關鍵礦物供應鏈發展趨勢

一、關鍵礦物需求

全球對關鍵礦物的需求急劇增長，主要係由高科技產業迅速發展，及綠色轉型趨勢下為發展清潔能源所驅動。現代高科技產業對稀有金屬與特殊礦物有更為迫切的需求，以製造儲能電池、半導體、顯示器等設備；清潔能源產業則是為了應對氣候變遷與降低對傳統能源的依賴，在政策資源的支持下，推動太陽能、風力與氫能燃料電池等可再生能源的應用，隨著能源轉型的進展，關鍵礦物與能源之間的連繫將進一步增強。

IEA(2021) 預測，基於各國目前宣布的政策和措施為基礎的「承諾政策情境」(Stated Policies Scenario, STEPS) 中，2040 年礦物總需求會成長為 2020 年的 2 倍；若採用更積極的政策行動應對氣候變遷，實現真正的永續發展目標的「永續發展情境」(Sustainable Development Scenario, SDS) 則將成長 4 倍。其中，電動汽車與儲能電池，以及電力網路，將會是推動礦物需求成長的主要來源，至於風力、太陽能與其他低碳發電清潔能源，也發揮顯著作用 (詳見圖 1)。



說明 1：「承諾政策情境」(STEPS)是假設各國政府都能實現自身承諾的情境；「永續發展情境」(SDS)是實現全球能源系統的可持續性和減少溫室氣體排放的情境。

說明 2：本圖所示礦物包含鉻、銅、主要的電池金屬（鋰、鎳、鈷、錳和石墨）、鈾、白金族金屬、鋅、稀土元素等，但不包括鋼鐵和鋁。

資料來源：IEA(2021)。

圖 1 清潔能源礦物需求預測

了解各種技術的需求類型對於評估和規劃可持續礦物供應鏈至關重要，從表 1 可知，部分在地殼中含量相對較少，且分布不均勻的稀有金屬，在電動車與電池、風力、氫能等項目，扮演至關重要的角色。

表 1 各種綠色轉型科技所需礦物

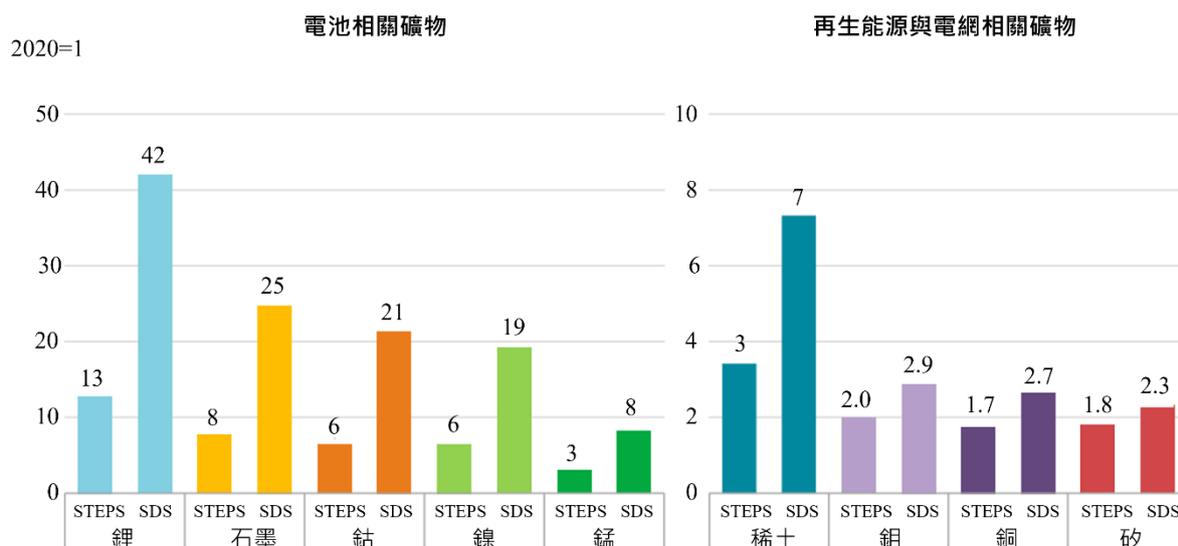
	銅	鈷*	鎳	鋰*	稀土*	鉻	鋅	鉑族*	鋁
太陽能板	●								●
風力	●		●		●	●	●		●
水力	●					●	●		●
集中式太陽能	●		●			●	●		●
生質能	●						●		●
地熱能			●			●			
核能	●		●			●			
電網	●								●
電動車與電池	●	●	●	●	●				●
氫能			●		●			●	●

說明：●代表該礦產對於該技術具有高度重要性；●代表該礦產對於該技術有所關聯，但重要性略低。

*表示在地殼含量相對較少，且分布較不均勻的稀有金屬。

資料來源：IEA (2021)。

舉例而言，智慧型手機、筆記型電腦等消費性電子產品、可再生能源發電系統與電動車，需要鈷、鋰等礦物製作電池，因此鋰礦將會是需求成長最快的關鍵礦物，如果要實現可持續成長，到 2040 年需求量將超過 2020 年水準的 40 倍，並帶動鈷、鎳的使用。清潔能源發電礦物需求，主要受到礦物密集型風力發電系統所推動，讓經常被應用在風力渦輪機的稀土元素需求，有高達 7 倍的成長空間（詳見圖 2）。



資料來源：IEA (2021)。

圖 2 各項類礦物需求成長預測

(一) 儲能電池

發電量不穩定是可再生能源發電系統的一個共同特點，例如太陽能和風能系統的發電量會受到日照強度、風速等因素的影響，因此需要儲能電池捕捉與儲存多餘電力，並在電力需求超過供應時，釋放所儲存的能量，以確保穩定的能源供應。此外，儲能電池對電動車科技的重要性自不待言，電池的容量、充放電速度、安全性與使用壽命，直接影響消費者對電動車的接受程度，如何克服高生產成本，以及製作電池所需關鍵礦物的供應瓶頸，是電動車科技發展與普及的主要決定因素。

為了在體積較小、重量較輕的電池中儲存更多電力，能經受多次充電和放電循環而不過早衰竭，同時確保使用的安全性，需要採用高性能材料。儲能電池最主要使用的是鋰離子電池(Lithium-ion battery)，因其高能量密度、輕量化、較長的使用壽命和較低的存放時間能量損失，而受到廣泛應用。鋰離子電池根據正極材料的不同，可進一步細分為鋰鈷電池(LiCoO₂)、鋰鎳電池(LiNiO₂)、鋰錳電池(LiMn₂O₄)與磷酸鋰鐵電池(LiFePO₄)等類型，因此除了鋰之外，鈷與鎳也是生產儲能電池所必須，且供應相對有限的重要礦物。

其中，太陽能電池因為涉及把光能轉化為電能，而不僅止於蓄電與放電，因此相對於電動車電池需要使用額外的稀有礦物，例如薄膜型硒化鎘銦太陽能電池需要使用硒化鎘銦(CIGS)或硒化銦鎵(CIS)作為吸光層，其他類型太陽能電池使用二氧化鈦(TiO₂)作為光敏劑，所以常會需要硒、鎘、銦、鎵與鈦等材料，以製作光吸收能力與光電轉換效率，相對傳統矽太陽能電池更高的砷化鎵太陽能電池(Gallium Arsenide)與硒化鎘銦鎵太陽能電池(Cadmium Telluride/Copper Indium Gallium Selenide)。

(二) 永磁同步發電機

風力發電的原理是將風的動能轉為機械能，再將機械能轉為電能，最基本的風力發電機僅需鋼鐵、鋁、銅等常見金屬即可搭建完成，但是現存技術當中以永磁同步發電機(permanent magnet

synchronous generator)的性能最佳，相對於傳統風力發電機，具有更高的效率與更低的損耗，在當前風力發電機市場占據支配性地位 (Yaramasu, Dekka, Duran and Kouro, 2017)。

釹和鈷是永磁式同步發電機最重要的材料，用來製作稀土鈷磁鐵(rare earth-cobalt magnets)及釹鐵硼磁鐵(NdFeB)等常見的永久稀土磁鐵³，能提高發電機將機械能轉換成電能的效率，成為現階段被重視且廣泛應用的熱門材料。除了風力發電，部分電動車也採用能源轉換效率較高、體積小、重量輕的永磁同步發電機為驅動馬達。

(三) 氫能電池

氫能電池又稱燃料電池(fuel cells)，使用氫與氧等氣體進行化學反應轉化成電能，副產品為水，幾乎不產生碳排放，因此對淨零減排、降低對化石能源的依賴，以及減少空氣汙染有重要作用。這類電池主要用在燃料電池載具(FCEV)，其次在地處偏遠、無法連接到電網，但是需要長時間、連續且可靠電力供應的場所，也會選擇燃料電池當成主要或備用電源。燃料電池需要使用鉑、鈀、鈷、鎳等昂貴的鉑族金屬(Platinum Group Metals, PGMs)礦物作為催化劑，以促進電池內的電化學反應，加速氫氣解離與氧氣的還原反應，從而提高電池效能。然而，這些金屬相對稀有且昂貴，導致燃料電池的成本遠非一般民眾所能負荷，因此仍須設法尋求其他替代材料。

(四) 電子元件

在數位轉型的浪潮中，智慧型手機、電腦和筆記型電腦，以及各種消費性和生產性的電子設備和系統的需求迅速增長。這些設備都是由多種電子元件(electronic component)組裝而成，常見的電子元件包括晶片、電晶體、電容器、電感器、二極體、電阻器和集成電路等。由於這些電子元件在電路中扮演不同的角色，它們對於特殊且稀有的礦物的需求也呈現多樣化。例如，製造磁性材料需要鈷(Cobalt)、電容器需要鈦、顯示器需要銻、高溫電子元件需要鎢，以及某些特殊型號的陶瓷電容器需要鈾和釷等稀土元素。另外，鎳、

³ 資料來源：北美智權報，「綠能科技驅動優質稀土永磁需求 台灣業者瞄準商機」，2022年5月13日。

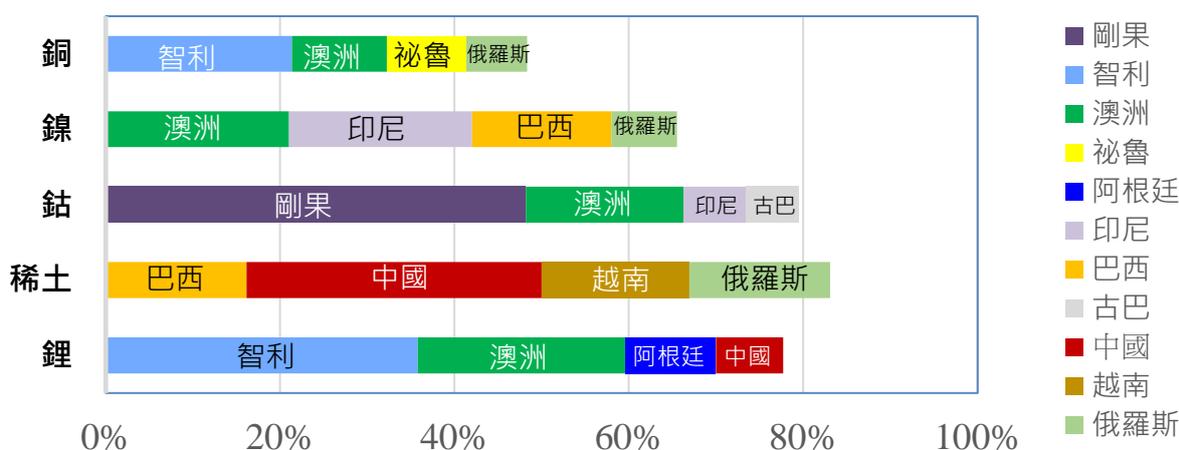
鍺和鉛也是先進半導體製程中相當重要的材料，可以讓半導體器件能夠實現更高的性能和更低的能耗。

(五) LED 照明

LED 可以更有效地將電能轉換成光能，而不會如傳統的白熾燈與螢光燈，把大部分能量轉化為熱能而浪費，可以顯著減少能源消耗，因此成為許多家庭與機構的首選照明方式。然而 LED 照明主要使用氮化鎵，當電流通過時轉換為藍光，並在磷光轉換 (phosphor conversion)，過程摻入額外成分，轉換成不同顏色的光。其中，常見的白光 LED 通常是使用相對容易取得的氧化鋁製成，但若要製成特定顏色的光，就需要取得較稀有的礦物，例如鎢、鎳、釷等稀土元素，分別可以將原始的藍光轉換成紅光、黃光與綠光。

二、關鍵礦物生產集中問題

在數位與綠色轉型趨勢中，許多礦物的需求都會顯著擴張。大部分資源在地殼中的含量相對較高，且分布較廣泛，像是銅、鎳、鉻、鋅、鋁和矽等。然而，根據美國地質調查局(2023)的研究，全球關鍵礦產的儲量過度集中於集權國家或新興市場國家，鈷、稀土及鋰有高達八成的儲量集中於4個國家境內，尤其是剛果擁有全球近半數的鈷儲量、中國稀土與智利鋰儲量占據全球的三分之一(詳見圖3)。



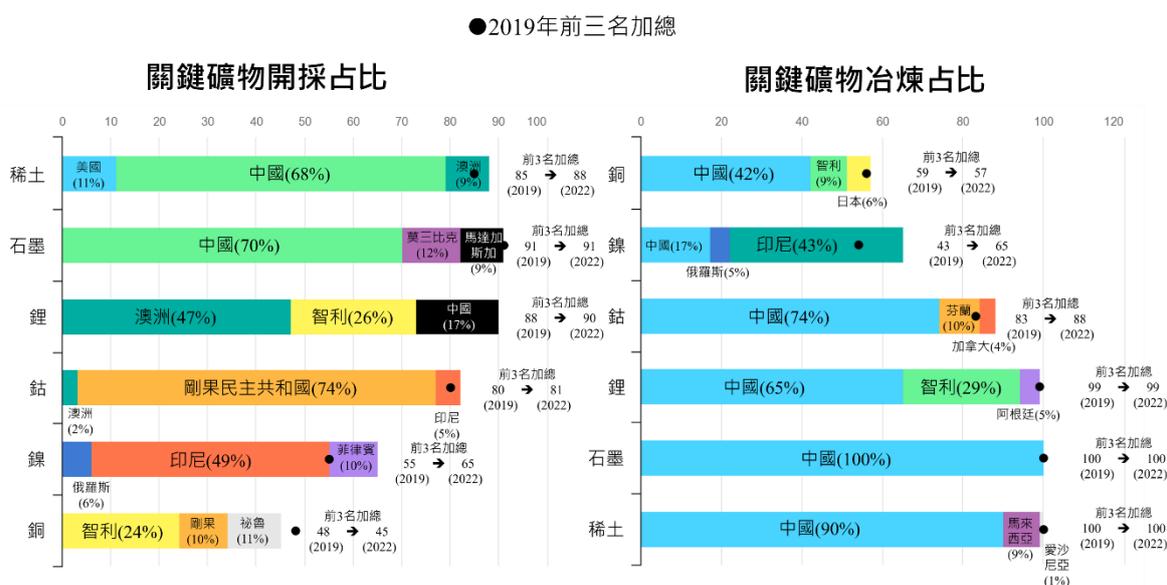
資料來源：USGS, Mineral Commodity Summaries 2023, Jan. 2023.

圖3 關鍵礦物各國儲量占比

此外，IEA(2023) 發現關鍵礦物的開採與冶煉，呈現更進一步集中的現象，鋰礦、鈷礦與稀土前三大開採國占比總和分別為 90%、81%與 88%，前三大冶煉比總和分別占 99%、88%與 100%，中國在前述礦物冶煉工程具有極為重要的地位，分別占比 65%、74%與 90%。

與關鍵礦物的儲備與開採分布相比，礦物冶煉在地理上過於集中的問題更加顯著，特別是中國占據短期內難以被取代的優勢地位，IEA 認為主要原因是既有的生產者，在供應鏈完善程度與勞工技能方面，存在一定的優勢，下游企業常將短期利潤置於供應鏈多樣化目標之上，並已與既有業者建立長期採購合約，為新進入者創造進入障礙，難以和既有礦業冶煉加工業者競爭。

考慮到全球產業供應鏈的複雜性，關鍵礦物儲存、開採與冶煉過於集中這個問題，可能產生一系列的風險與挑戰，且截至 2022 年多數關鍵礦物集中現象，較 2019 年進一步升高。



資料來源：IEA,“Critical Minerals Market Review 2023”, Jul. 2023.

圖 4 關鍵礦物各國開採與冶煉占比

為了說明關鍵礦物儲量分布不均的問題，以下分別對鋰礦、鈷礦、稀土元素與鉑族金屬的產出分配，做進一步的說明：

(一) 鋰礦

數位產品、再生能源電池與電動車，都對鋰礦有高度依賴性，

根據美國地質調查局(United States Geological Survey, USGS)統計，截至 2022 年全球鋰礦產量總計 130,000 噸，集中於澳洲、智利、中國、阿根廷與巴西 (詳見表 2、圖 5、圖 6)。絕大部分的鋰礦開採來自於智利的阿塔卡馬鹽灘(Atacama Salt Flats)的鋰鹽，以及澳洲的西澳州與北領地的鋰輝石精礦(spodumene concentrate)硬岩礦床，中國則主導冶煉加工過程。

近年來，由於鋰的需求不斷增加，中國逐漸提高國內鋰採礦能力，尤其是江西省宜春市為產量最高的礦區，一度占全球總供應量的 10%，但 2023 年因為涉嫌違規與破壞環境，遭到政府勒令停產整頓⁴。這顯示出，鋰礦的開採可能對當地環境產生影響，包括土地使用、水資源消耗和污染等問題，進而引起當地政府實施更嚴格的監督與管理，對鋰礦供應帶來挑戰。

表 2 鋰金屬礦主要生產國

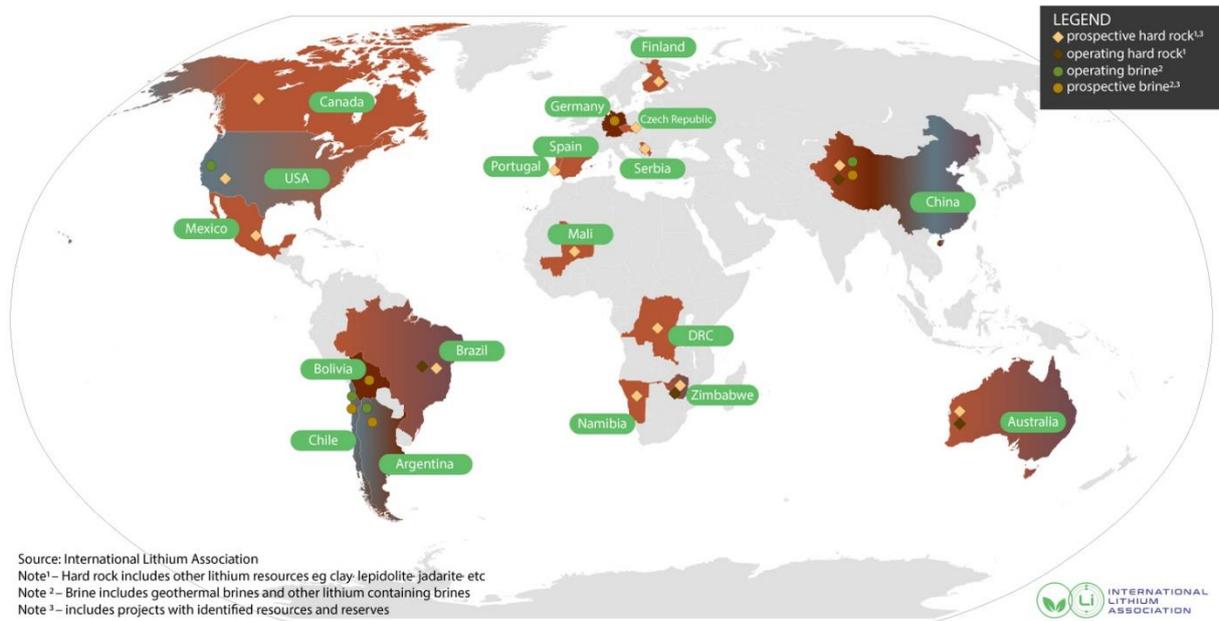
單位：噸

產地	產出	儲量
澳洲	61,000	6,200,000
智利	39,000	9,300,000
中國	19,000	2,000,000
阿根廷	6,200	2,700,000
巴西	2,200	250,000
辛巴威	800	310,000
葡萄牙	600	60,000
加拿大	500	930,000
全球	130,000	26,000,000

說明：本表均為對 2022 年的估計數值。

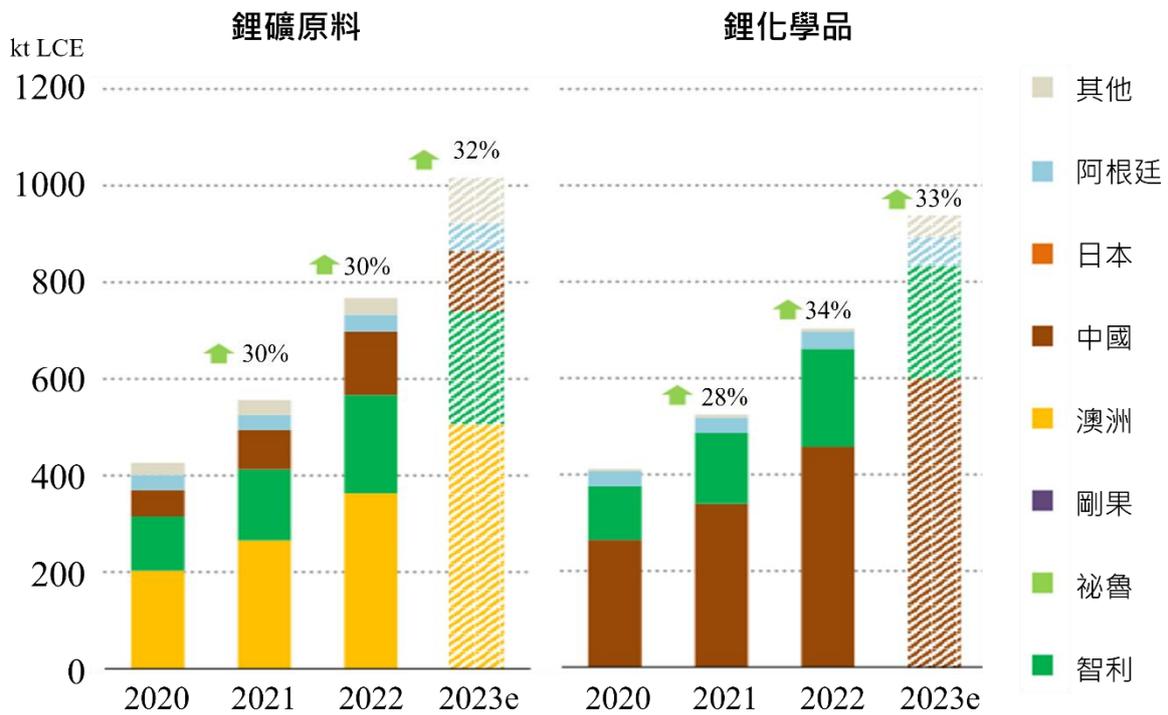
資料來源：美國地質調查局(United States Geological Survey, USGS)。

⁴ Mining.com, China lithium probe shuts down a tenth of global supply, Feb. 27, 2023.



資料來源：國際鋰學會(International Lithium Association)。

圖 5 鋰金屬礦儲量分布圖



說明：kt LCE 是一種用於衡量鋰的單位，即千噸鋰碳酸鹽當量(Lithium Carbonate Equivalent)。
 資料來源：IEA, "Critical Minerals Market Review 2023", Jul. 2023。

圖 6 鋰金屬礦生產量趨勢

(二) 鈷礦

鈷礦是銅或鎳的副產品，在自然界中常與銅和鎳一同存在於礦石中，但是只有特殊的地質條件才能產生鈷礦，且開採與提煉過程需要專門的設備與技術，符合條件的國家不多，因此鈷礦產出地理分布遠不如銅和鎳一般廣泛⁵。

其中，剛果民主共和國是最大的蘊藏國與產出國，產量占全球近 7 成，遠遠高於印尼、俄羅斯與澳洲等其他同樣生產鈷礦的國家(詳見表 3、圖 7、圖 8)，鈷礦也構成剛果經濟支柱。但是剛果鈷礦的供應存在巨大隱患，例如社會衝突與不安定的政治環境可能干擾生產活動與對外貿易，惡劣的勞動與環保條件也常引發主要國家內部抵制聲浪^{6,7}。

根據 IEA(2023)的報告，2022 年中國在全球精煉鈷礦產量占有超過 75%的份額。這顯示中國在鈷的提取、精煉和供應方面處於領先地位。剛果目前擁有 19 座鈷礦廠，其中有 15 座由中國企業持有或資助。同時，洛陽鉬業從自由港麥克莫蘭銅金公司 (Freeport-McMoRan Inc)併購剛果的基桑富鈷礦 (Kisanfu Cobalt Deposit)，這是全球純度最高、儲量最大的未開發鈷礦之一，凸顯出中國在鈷供應鏈中的強大地位和影響力。

印尼目前鈷礦產量雖遠不及剛果，但擁有全球最大的鎳礦儲量，2023 年 3 月福特汽車、淡水河谷印尼公司 (PT Vale Indonesia) 及中國華友鈷業達成協議，將對波馬拉 (Pomalaa) 礦區高壓浸酸 (HPAL) 項目進行股權投資⁸，藉由引進 HPAL 技術，可以透過硫酸從印尼豐富的鎳礦提取出硫酸鎳與硫酸鈷，同時提高兩種金屬的產量，預料將在鎳與鈷的國際市場扮演更關鍵的角色。

⁵ 鈷發展協會 (Cobalt Development Institute) 網站 (<http://www.thecdi.com/>)。

⁶ The Economist, Governments have identified commodities essential to economic and military security, the Economist, Mar 31, 2021.

⁷ The Economist, How the world depends on small cobalt miners, the Economist, Jul. 5, 2022.

⁸ <https://www.ft.com/content/fced1dc2-e0df-4d92-b240-7652968a49cc>

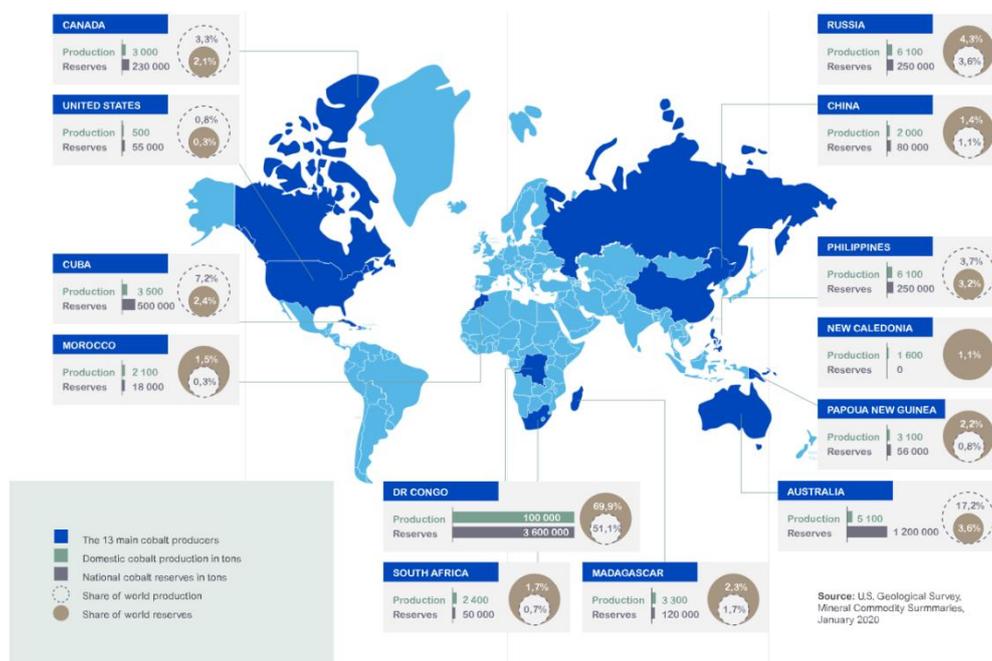
表 3 鈷金屬礦主要生產國

單位：噸

產地	產量	儲量
剛果民主共和國	130,000	4,000,000
印尼	10,000	600,000
俄羅斯	8,900	250,000
澳洲	5,900	1,500,000
加拿大	3,900	220,000
古巴	3,800	500,000
菲律賓	3,800	260,000
馬達加斯加	3,000	100,000
巴布亞紐幾內亞	3,000	47,000
土耳其	2,700	36,000
摩洛哥	2,300	13,000
中國	2,200	140,000
美國	800	69,000
全球	190,000	8,300,000

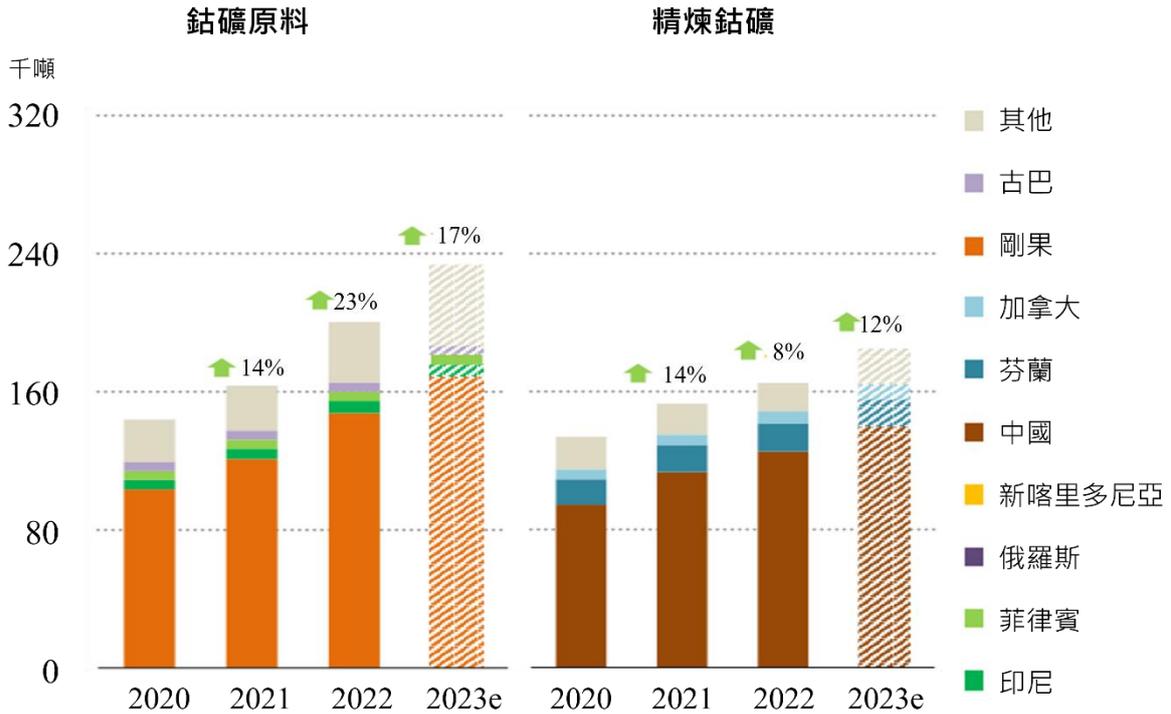
說明：本表均為對 2022 年的估計數值。

資料來源：美國地質調查局(United States Geological Survey, USGS)。



資料來源：鈷發展協會 (Cobalt Development Institute)。

圖 7 鈷金屬礦儲量分布圖



資料來源：IEA, “Critical Minerals Market Review 2023”, Jul. 2023。

圖 8 鈷金屬礦生產量趨勢

(三) 稀土元素

中國長期以來在全球稀土產業中居主導地位，儲量雖只占當前全球已知儲量約三分之一，卻有 70% 的生產份額及 90% 的加工比例(詳見表 4、圖 9)，且尚有從緬甸進口礦石進行加工，以因應生產配額的短缺⁹。雖然稀土的分布不如其名稱一般稀少，如美國、澳洲、俄羅斯、巴西等國家皆有豐富的儲量，但由於生產與提取過程涉及土壤和水源污染等環境議題，因此實際產出通常較低。

2010 年中國與日本因釣魚台領土爭議期間，以減少環境污染與資源保護名義暫停對日本的稀土出口，隨後設定稀土出口配額政策，造成國際稀土市場供應不穩定與價格波動¹⁰。儘管世界貿易組織(WTO)於 2014 年裁定稀土出口配額違反國際貿易法以後，2015

⁹ Dipanjan Roy Chaudhury, “Myanmar emerges as key source of rare earth minerals for China,” The Economic Times, Jul. 17, 2022。

¹⁰ Simon Evenett and Johannes Fritz, “Revisiting the China–Japan Rare Earths dispute of 2010,” Jul. 19, 2023, VoxEU - CEPR。

年宣布結束對大部分稀土產品的出口配額，僅保留少數特定品種的出口配額限制¹¹，鑒於稀土對高科技產業的重要性，許多國家積極尋求對策，尋求多元化供應來源，及加快開發自己的稀土生產能力。

2021 年中國鋁業、中國五礦、贛州稀土，並引入中國鋼研科技、有研科技等兩家稀土科技研發型企業，共同組建中國稀土集團有限公司¹²，並於 2022 年連續 5 年提高稀土採礦配額至 21 萬噸¹³，彰顯政府對強化稀土產業控制力的企圖。美國 MP Materials 公司 2017 年在廢棄的 Mountain Pass 礦場重新開採稀土，預計 2024 年將投資 7 億美元完善相關設施，並獲得美國國防部約 3,500 萬美元的援助¹⁴，以及日本商社雙日與日本石油天然氣及金屬礦產資源機構 (JOGMEC) 將採購澳洲萊納斯(Lynas)即將開始生產的重稀土¹⁵。

表 4 稀土金屬礦主要生產國

單位：噸

產地	產量	儲量
中國	210,000	44,000,000
美國	43,000	2,300,000
澳洲	18,000	4,200,000
緬甸	12,000	N.A.
泰國	7,100	N.A.
越南	4,300	280,000
印度	2,900	6,900,000
俄羅斯	2,600	21,000,000
馬達加斯加	960	N.A.
巴西	80	21,000,000
全球	300,000	130,000,000

說明：本表均為對 2022 年的估計數值。

資料來源：美國地質調查局(United States Geological Survey, USGS)。

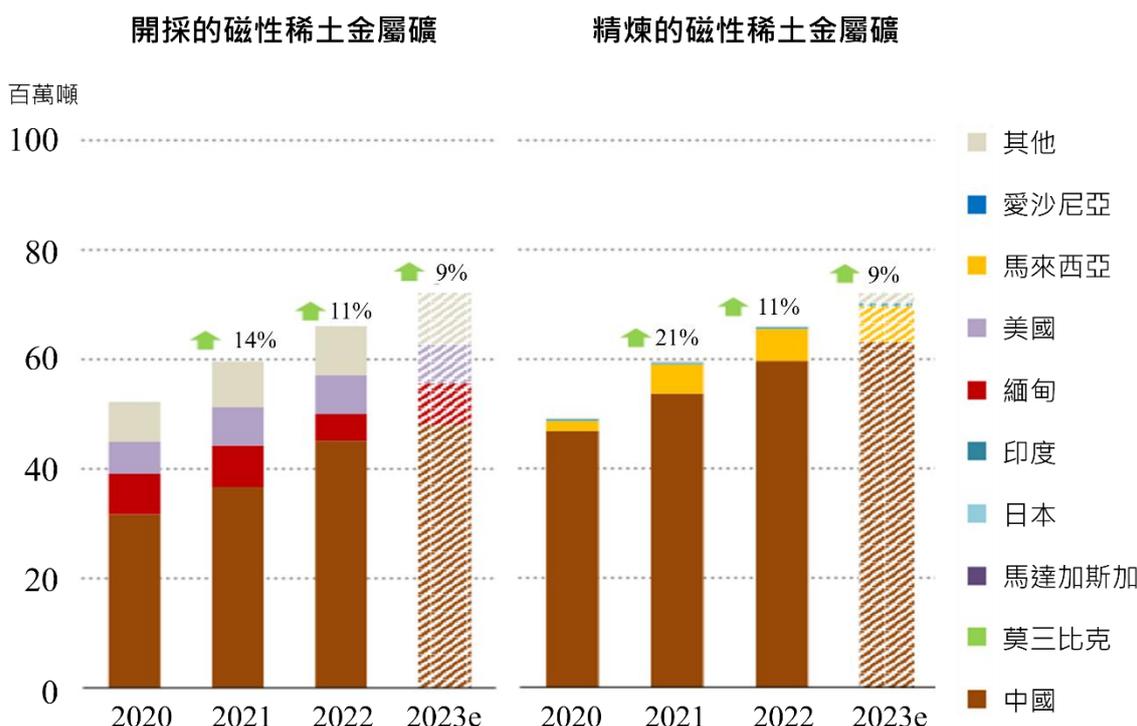
¹¹ David Stanway, “China abolishes rare earth export quotas: state media,” Jan. 5, 2015.

¹² Tom Daly, “Minmetals confirms China rare earths merger, creating new giant”, Reuters, Dec. 22, 2021.

¹³ Global Times, “China hikes rare-earth quota by nearly 20% amid rising demand,” Mar. 24, 2023.

¹⁴ U. S. Department of Defense, “DoD Awards \$35 Million to MP Materials to Build U.S. Heavy Rare Earth Separation Capacity,” Feb. 22, 2022.

¹⁵ JOMGEC, “Securing Supply of Heavy Rare Earths to Japan with Additional Investment to Lynas,” Mar. 7, 2023.



資料來源：IEA, “Critical Minerals Market Review 2023”, Jul. 2023。

圖 9 磁性稀土金屬礦生產量趨勢

(四) 鉑族金屬

鉑族金屬主要包括鈀、鉑、銻、銻、銻和鐵，其中鈀和鉑在汽車產業中具有特別重要的地位，因為它們被廣泛用於催化轉換器，能夠減少汽車引擎排放的有害氣體，並且也常用於燃料電池等應用。根據美國地質調查局(USGS)，南非、俄羅斯和辛巴威擁有全球最豐富的鉑族金屬礦藏(詳見表 5)，特別是南非布希維爾德雜岩(Bushveld Complex)。南非擁有超過全球已證實的鉑族金屬儲量的90%，在全球鉑族金屬供應佔主導地位，也帶給汽車與燃料電池產業巨大風險，如2014年曾爆發持續5個月的鉑礦工人罷工事件¹⁶。

根據Miningintelligence，俄羅斯諾里爾斯克(Norilisk)礦區是全球最有價值的礦山，鈀與鎳是主要產出¹⁷，每年供應全球40%鈀金產量，因此俄烏戰爭期間全球對俄羅斯發起制裁措施，致全球鈀金

¹⁶ <https://www.businessinsider.com/south-africa-strike-boosts-platinum-prices-opens-opportunity-for-american-producer-2014-6>

¹⁷ <https://www.miningintelligence.com/top-10-most-valuable-mines-2022/>

價格飆漲，進而打擊汽車產業供應鏈¹⁸，南非 Mogalakwena 礦區做為世界第二大鈹礦開採地，是具有潛力的替代來源，惟基礎建設不足與罷工頻傳問題仍有待解決。

表 5 鉑族金屬礦主要生產國

單位：噸稀土氧化物 (REO) 當量

產地	鈹金產量	鉑金儲量	鉑族金屬礦儲量
南非	80,000	140,000	63,000,000
俄羅斯	88,000	20,000	5,500,000
辛巴威	12,000	15,000	1,200,000
美國	11,000	3,300	900,000
加拿大	15,000	6,000	310,000
全球	210,000	190,000	70,000,000

說明：本表均為對 2022 年的估計數值。

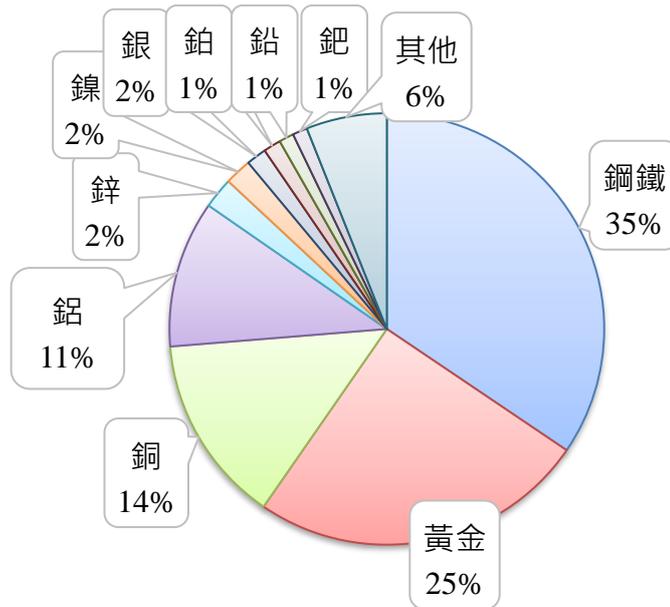
資料來源：美國地質調查局 (United States Geological Survey, USGS)。

三、關鍵礦物貿易型態

Kowalski and Legendre (2023) 在 OECD 貿易政策報告指出，2017 至 2019 年全球關鍵原物料出口值當中，鋼鐵、黃金、銅、鋁、鋅、鎳、銀、鉑、鉛與鈹等排名前 10 的關鍵金屬，合計共占 94%；與 2007 至 2009 年相比，鋰雖然在貿易額當中占比較小，但卻是成長幅度最大的項目 (438%)，而錳、石墨、鈷、鈦、鉛、稀土元素、砷與鋅的成長亦高於平均水準(詳見圖 10、圖 11)。

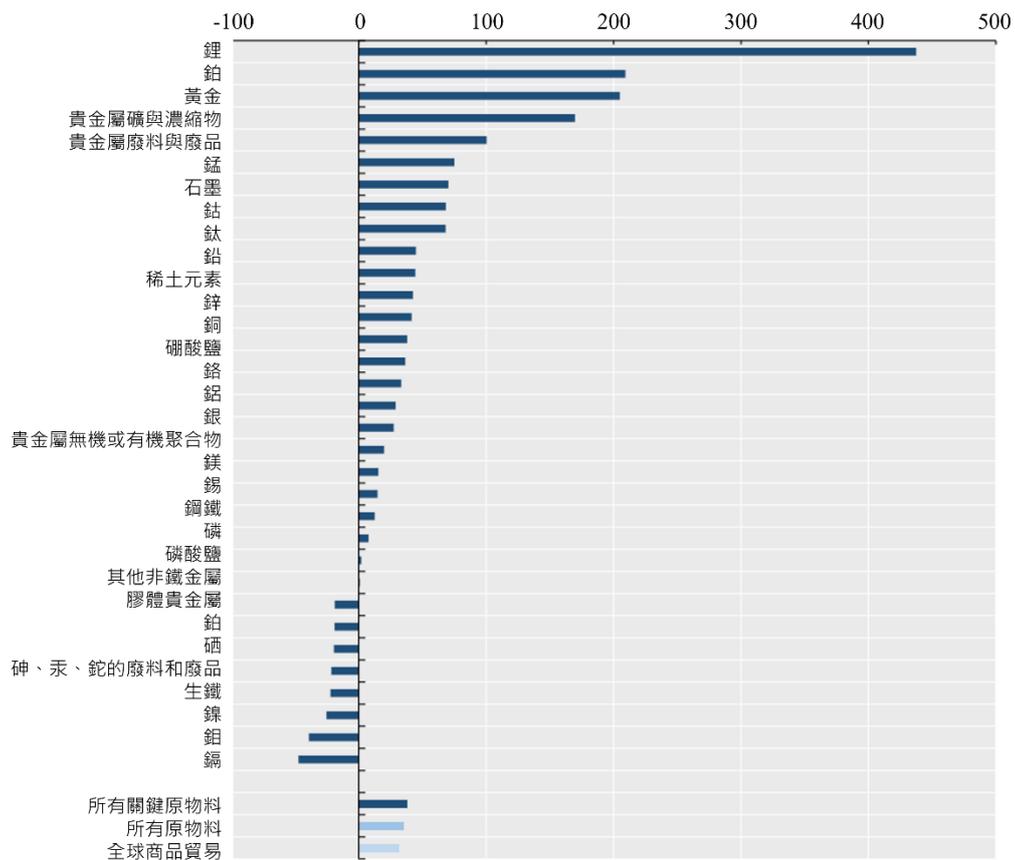
從各種關鍵礦物及其加工產品的出口分布來看，不同國家在領先的項目存在相當大的變化，因為關鍵礦物並非理論上可以在任何地方進行生產的產品，而是深受資源稟賦的影響，例如智利、土耳其與剛果分別擁有重要的鋰、硼酸鹽和鈷儲備，因而是這些材料的最大出口國。此外，經濟規模、技術與政策也在決定特定國家在該產品出口地位扮演重要角色，例如中國在包含鋰在內的 6 種產品當中，出現在前 3 名列表中，美國、德國與日本則分別在 2 種關鍵礦物成為前 3 名出口國 (詳見圖 12)。

¹⁸ <https://www.barrons.com/articles/russia-sanctions-palladium-prices-51646263033>



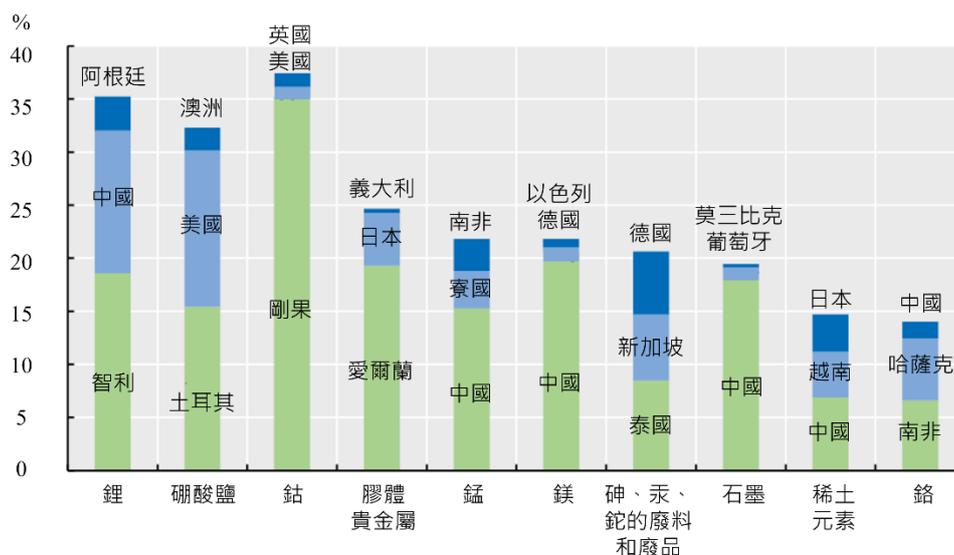
資料來源：Kowalski and Legendre (2023)。

圖 10 2017-2019 年關鍵礦物全球貿易額占比



資料來源：Kowalski and Legendre (2023)。

圖 11 2017-2019 年關鍵礦物全球貿易額相對 2007-2009 年成長率(%)

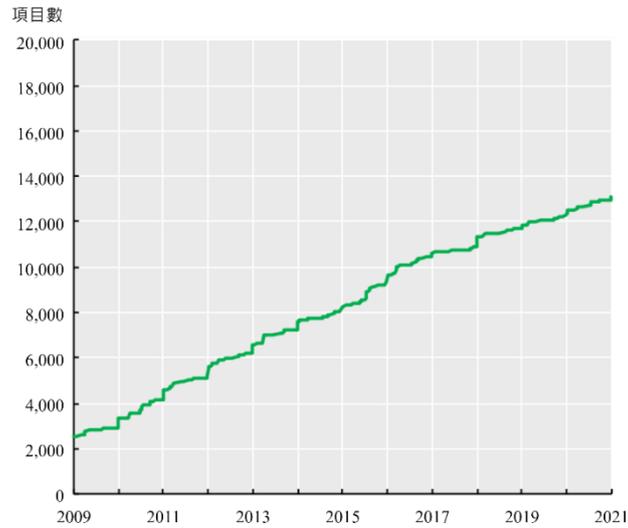


資料來源：Kowalski and Legendre (2023)。

圖 12 2017-2019 年前十項關鍵礦物及其產品前三大出口國的出口份額

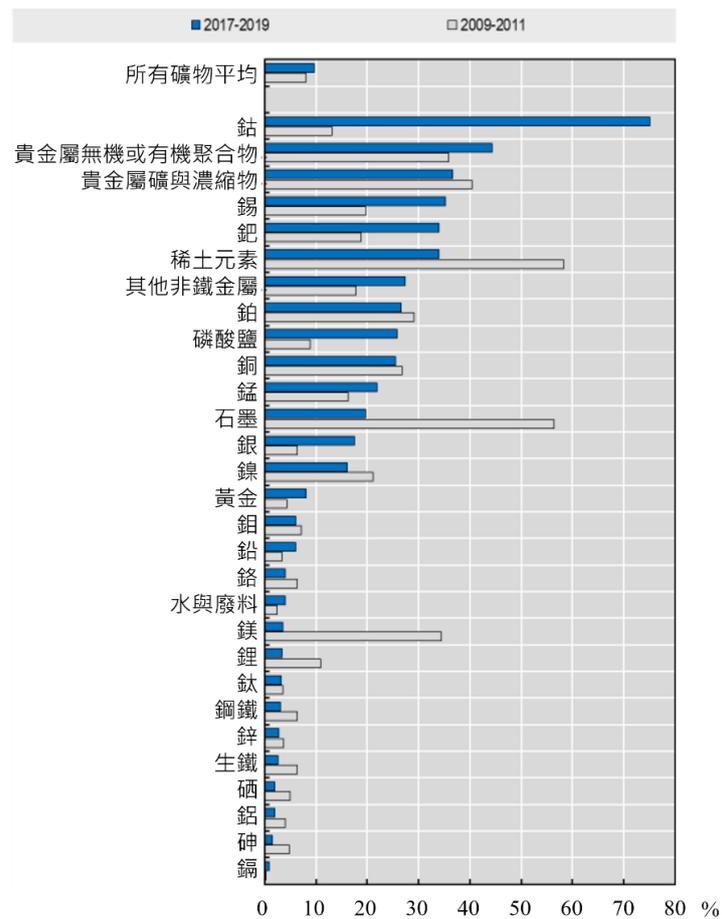
雖然整體來說，關鍵礦物的貿易集中度並沒有特別高，與整體原物料平均水準相仿，但是最值得關注的議題是雙邊的依賴性，亦即特定進口國的某些關鍵礦物，更加依賴特定的供應國，導致意料外的政策變化、地緣政治局勢緊張，或其他災害所引發的供應鏈中斷，影響更為嚴重 (Kowalski and Legendre, 2023)。尤其是關鍵礦物在產業供應鏈中處於上游地位，意味著當它們的供應受到干擾時，會放大對下游環節的衝擊幅度，此即 Forrester (1961) 於 *Industrial Dynamics* 中提出的「牛鞭效應」(bullwhip effect)，有時會被視為支持國家干預的理由。

OECD 資料庫中的工業原物料出口限制清單當中，2009 年至 2020 年間關鍵原物料出口限制措施，從 2,518 項成長至 13,102 項，即分析期內成長超過 5 倍 (詳見圖 13)。在新增的限制措施當中，出口稅是分析期內增加最大的措施類型，占比 38%，其次是出口許可要求，占比 22%。OECD (2023) 指出，從國家別來看，中國對關鍵原物料出口限制措施增加了 9 倍，並在 2020 年成為限制最多的國家，印度、俄羅斯與阿根廷成長速度也高於全球水準；從產品別來看，全球關鍵原物料出口總值約 10% 面臨至少一項出口限制措施，其中以鈷、貴金屬礦及其化合物與濃縮物、錫、鈮與稀土金屬，份額超過了 30% (詳見圖 14)。



資料來源：Kowalski and Legendre (2023)。

圖 13 2009-2021 年關鍵礦物出口限制數量



資料來源：Kowalski and Legendre (2023)。

圖 14 全球面臨至少一項出口限制的關鍵礦物占出口比重

四、供應鏈脆弱性因素

由於新興產業與技術，以及清潔能源與環保相關領域的發展，全球對關鍵礦物的需求成長速度日益提高，引發人們對供應可靠性的疑慮，因此全世界應及早準備相應的應對措施，而非僅僅依賴短期解決方案。此外，與其他大宗商品資源相比，關鍵礦物面臨一些比較獨特的問題，相對更容易發生供應不穩定與價格波動現象，說明如下：

(一)項目開發時間較長

根據 IEA (2021)，關鍵礦物項目從發現資源到首次生產需時超過 16 年，這意味著礦產的開發必須設法預見市場需求的增加，及早進行開發，如果出現供應不足才著手啟動新的礦產開發項目，必將導致市場供需失衡、價格波動與相關產業中斷。因此，供應商必須高度重視市場需求調查與趨勢分析，根據預測結果及早進行開發和生產計劃，國際社會也應加強協作，促進資訊交流，掌握礦產資源的分布、開發與利用情形，維護全球礦產市場的穩定運作。

(二)資源品質下降

隨著經濟發展與人口成長，世界各國對關鍵礦產資源的需求日益增加，惟 IEA (2021) 發現多種礦產品質持續下降，對資源開採與利用帶來嚴峻的挑戰。例如，低品質礦石需要投入更多能源才能提取所需礦產資源，除了對生產成本造成壓力，同時也加劇了溫室氣體排放問題。此外，低品質礦石在提取同樣多的礦產資源的同時，會產生較多的廢棄物與汙染，進一步危害生態環境。

(三)環境與社會監管漸趨嚴格

關鍵礦產資源的生產與加工，如果管理不善，可能會對當地社區造成嚴重的危害，包括水源汙染、土地破壞、生態系失衡與勞工權益侵害等。儘管關鍵礦物主要產地，不乏法規監管相對寬鬆的國家，讓礦產企業得以忽略資源的開採和加工過程，對環境和社會的負面影響，並專注於提高生產效率，惟隨著主要國家消費者對企業的社會責任愈來愈關注，礦產企業與當地政府也必須加強合作，讓

人力資源開發

- 加強採礦工程、地質學以及其他與核心礦物開採和製造相關的領域的教育
- 通過促進材料科學、計算機科學和礦物科學的跨學科合作，實現礦物供應行業的現代化
- 通過確保足夠的人力資本，進行人事和管理改革，支持在聯邦土地上的關鍵礦產的勘探和開發
- 促進與主要礦產利益相關者和公眾的持續互動

完善資源開發行政法規

- 與土地管理局(BLM)和林務局(USFS)合作，以保護對礦產資源的使用權
- 徹底審查限制聯邦礦產資產勘探和開發的區域
- 審查現有的聯邦土地基礎設施和管理計劃，以了解對礦產勘探和開發的影響
- 採用礦產資源開發模式來跟踪許可要求和時間表
- 評估國家環境政策法(NEPA)和其他法規，以迅速處理礦產項目許可證申請流程
- 改進清潔水法下的許可程序
- 進行河流和港口法案的評估
- 審查法規，並考慮立法以促進主要海洋礦產的開發
- 將高優先級礦產項目作為《修復美國地面運輸法案》(FAST)法案第41章，與以加速聯邦政府對基礎建設項目進行環境審查和許可批准為目的之第13807號行政命令「基礎建設」定義的一部分

擴大核心礦物研發

- 制定研發戰略以加強供應鏈科技能力
- 增加美國私營企業對創新的投資，並促進聯邦資助的科學技術的技術轉讓



提高對美國主要礦產資源的知識

- 利用主要礦產供應和消費數據，制定指標，以解決特定產品的戰略漏洞
- 評估主要礦產資源，鼓勵使用二手和非傳統資源的方法
- 改進美國領土的地球物理、地質、地形和水深測繪
- 提高地球物理、地質、地形和測深數據的可搜索性、可訪問性和實用性

加強核心礦產供應鏈和國防工業的基礎

- 瞭解並支持關鍵礦產業和相關供應鏈
- 善用主要礦產利益相關者的專業知識
- 發展、擴展、現代化和維護核心礦產下游生產能力和供應鏈的響應能力
- 加強國家國防戰略(NDS)計劃，以迅速應對緊急情況下的軍事和基本需求

加強關鍵礦產的國際貿易與合作

- 加強與夥伴國的國際交流，分享最佳實踐，並尋找貿易和合作機會
- 通過貿易與投資確保核心礦產供應，同時不損害美國工業和國家利益

資料來源：U.S. Department of Commerce (2019)，自行整理繪圖。

圖 15 美國商務部關鍵礦物戰略報告主要內容

二、第 13953 號行政命令

考量美中貿易爭端、地緣政治競爭愈演愈烈，以及 COVID-19 疫情爆發，關鍵礦物供應障礙可能對美國經濟利益與國家安全構成威脅，美前總統川普於 2020 年 9 月 30 日發布第 13953 號行政命令²³，指示內政部加速礦區開發，支持國內礦業和加工產業。能源部於 2021 年 1 月發布《美國能源部支援國內關鍵礦物和材料供應鏈戰略》，詳見圖 16。

²³ 本行政命令全名為《應對國內供應鏈的威脅：減少對外國對手關鍵礦物的依賴，並支持國內採礦和加工產業》(Executive Order 13953, Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain From Reliance on Critical Minerals From Foreign Adversaries and Supporting the Domestic Mining and Processing Industries)，連結：<https://www.federalregister.gov/documents/2020/10/05/2020-22064/addressing-the-threat-to-the-domestic-supply-chain-from-reliance-on-critical-minerals-from-foreign>

與國際合作夥伴和盟友，
以及其他聯邦機構協調合
作，多元化全球供應鏈，
確保可持續採礦和加工
的最佳實踐得以採用

- 擴大國際交流，活躍多邊論壇
- 跨部會協調
- 與國際夥伴合作建立全球行業標準

建立長期的礦物和材料創
新生態系統，培育新能力，
以應對未來的關鍵礦物和
材料供應鏈挑戰

- 開發強大的重要性分析工具
- 改進和振興關鍵礦產和材料礦藏測繪
- 培養重點礦產材料相關人才



推動科學創新，並開發技
術，確保關鍵礦物和材料
供應鏈具有韌性和安全性，
獨立於來自外國對手的資
源和加工

- 協調正在進行的研發活動和能力
- 制定正在調整的研發路線圖
- 通過公私合作夥伴關係確定未來的研發機會
- 確定與政府機構和國際合作夥伴在研發方面的潛在合作機會

促進和支持民間部門採用
和建立可持續的國內關鍵
礦物和材料供應鏈的能力

- 調整正在進行的技術轉換和交流活動與能力
- 開發未來提高採用率和能力的機會
- 主要利益相關者的參與和支持
- 啟動技術轉移機制

資料來源：U.S. Department of Energy (2021)。

圖 16 美國能源部關鍵礦物供應鏈戰略目標

三、第 14017 號行政命令

美國總統拜登於 2021 年 2 月發布第 14017 號行政命令²⁴，指示針對高度倚賴境外少數國家供應，且對國防與未來高端產業發展密切相關的半導體與先進封裝、大容量電池、關鍵礦物與材料、藥品與具醫療效用的基本成份等關鍵供應鏈進行全面審查，以找出問題癥結並研提改進策略。國防部做為核心礦產的主管機關，於 2021 年 6 月提出 7 點建議：

1. 為關鍵的礦產密集型產業制定新的可持續性標準：制定關鍵礦物與材料的可持續性標準，包含環境、反腐敗、勞工健康與安全、與當地居民協商等，特別是落實於政府採購。

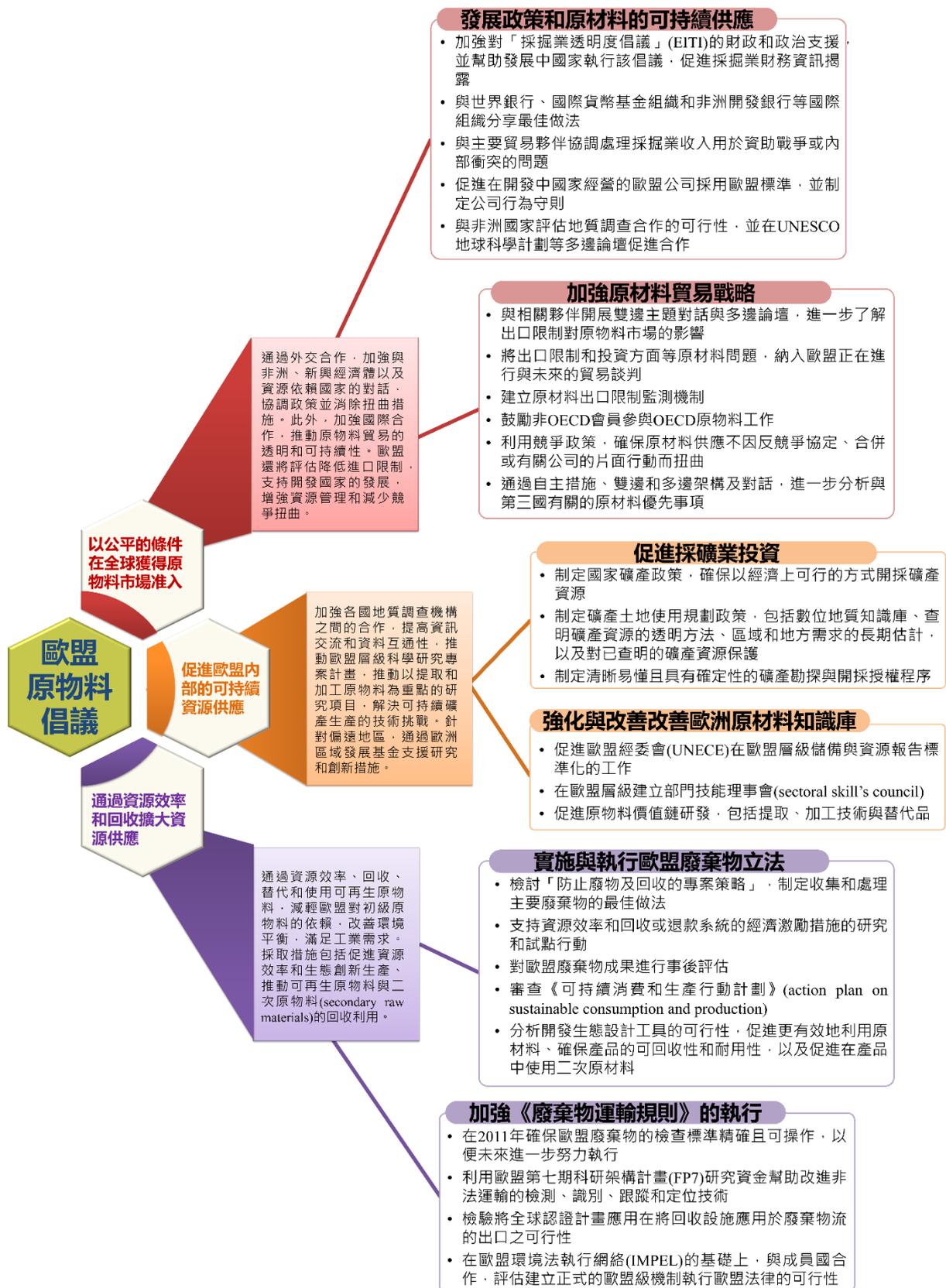
²⁴ 本行政命令全名為《美國供應鏈行政命令》(Executive Order 14017, Executive Order on America's Supply Chains)，連結：<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/02/24/executive-order-on-americas-supply-chains/>

2. **擴大可持續的國內生產和加工能力**：鼓勵在與當地社區協商並在遵守環境和勞工標準的前提下，於國內生產、加工和回收戰略礦物。戰略礦物回收方面，制定全國性電動汽車電池回收標準，鼓勵各產業採用與產品設計相關的認證標準，以便於電子產品的回收。
3. **部署《國防生產法》(DPA)相關計畫**：提供補貼、貸款與採購等經濟激勵措施，促進民間對戰略核心礦產的投資，尋求與民間部門建立聯盟或公私部門夥伴關係的機會。
4. **加強產業合作，擴大生產**：召集政府－產業工作組(government industry working group)，尋找擴大核心礦產國內生產的機會，並尋求建立財團或公私合作夥伴關係的機會。
5. **促進政府範圍內的研發以支持可持續生產和培養技術人才**：需要優先推動從實驗室過渡到市場的研發支持政策，而不是基礎研究，建議通過研發、教育和人力資源開發之間的互動，以提高效率。
6. **擴大儲備**：立法推動國防儲備計畫現代化，在未來年度防禦計畫(FYDP)為國防儲備(NDS)爭取不低於 10 億美元的撥款，授予 NDS 購買戰略核心礦產的權利，未達 5,000 萬美元的採購無須國會授權，平時可出借庫存材料以緩解和平時期供應鏈中斷風險²⁵。
7. **加強與盟友和夥伴的合作以提高全球供應鏈的透明度**
 - (1) **與貿易夥伴及新興市場共同確保可靠的供應並改善治理**：強調以可持續價值觀為基礎，與海外生產商展開合作，透過「能源資源治理倡議」(ERGI)²⁶與「採掘業透明度倡議」(EITI)²⁷等合作網絡，支持盟友和合作夥伴實現可持續生產的能力，使貿易成為促進社

²⁵ 美國總統拜登於同年 10 月 31 日簽署第 14050 號行政命令《美國供應鏈行政命令》(Executive Order 14017, Executive Order on America's Supply Chains)，授予國防部根據國防目的採購與釋出戰略與關鍵原物料的權限，連結：<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/02/24/executive-order-on-americas-supply-chains/>

²⁶ 「能源資源治理倡議」(Energy Resource Governance Initiative, ERGI)是美國國務院能源資源局(Bureau of Energy Resources, ENR)於 2019 年 6 月 11 日發布的國際倡議，旨在建立讓各國政府、利益關係者與國際組織參與，促進全球礦產資源領域的良好治理與可持續發展的合作平台，包含美國、加拿大、巴西、澳洲、波札那、秘魯、阿根廷、剛果民主共和國、納米比亞、菲律賓和尚比亞等 11 國。

²⁷ 「採掘業透明度倡議」(Extractive Industries' Transparency Initiative, EITI)是英國前首相布萊爾於南非約翰尼斯堡可持續發展問題世界首腦峰會時提出，目的是通過促使政府、企業和公民社會共同合作，定期公開披露有關採礦業的各種數據，提高全球採礦業領域的透明度和負責任經營。



資料來源：1. European Commission (2008), Raw Materials Initiative.
2. European Commission (2011), Tackling the Challenges in Commodity Markets and on Raw Materials.

圖 17 歐盟《原物料倡議》三大支柱與政策建議

二、關鍵原物料行動方案

為實現《歐洲綠色新政》目標，在綠色轉型過程中將對鋰、鈷、稀土等特殊礦產衍生龐大需求，其供應是否穩定攸關轉型能否取得成功。因此歐盟在 2020 年 9 月 3 日頒布《關鍵原物料行動方案》³²，列出 30 種對經濟非常重要，且有高度供應風險的礦物³³，並提出發展具韌性的工業生態系統價值鏈、減少對一次性關鍵原物料的依賴、加強歐盟內部原物料供應，並促進原物料供應的多樣化等 10 項行動措施(詳見圖 18)。



說明：1. 歐洲原物料聯盟(European Raw Materials Alliance, ERMA) 旨在加強歐洲關鍵原物料合作，促進可持續供應鏈、創新技術和資源效益，由會員國企業、研究機構、投資者和非政府組織等組成。
 2. 歐盟永續活動分類標準(EU Taxonomy for Sustainable Activities) 成立於 2018 年，旨在確定經濟活動是否符合環境可持續標準，協助投資者實現環保投資，將資金引導至環境友好項目。
 3. 歐盟監管框架(EU regulatory framework)是用於指導和管理歐盟內部的不同領域和議題，包括環境保護、貿易、競爭、消費者權益、金融市場、數據隱私等，所制定的一系列法律、規定和政策，旨在確保歐盟成員國之間的一致性和協調性，確保歐盟市場的正常運作和公平競爭。

資料來源：1.European Commission (2008), Raw Materials Initiative.

2.European Commission (2011), Tackling the Challenges in Commodity Markets and on Raw Materials.

圖 18 歐盟《關鍵原物料行動方案》

³² https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1542

³³ 第 4 版關鍵礦物名單於 2020 年做為《關鍵原物料行動方案》的專門章節發布，包含銻、鉛、磷、重晶石、重稀土元素、鈦、鉍、輕稀土元素、矽金屬、鈹、鈮、鈿、硼酸鹽、鎂、鎢、鈷、天然石墨、鈾、焦煤、天然橡膠、鋁土礦、氟石、鈳、鋰、鎳、鉑族金屬、鈦、鋳、磷酸岩、鋇。

三、關鍵原物料法案(草案)

歐盟於 2023 年 3 月 16 日公布《關鍵原物料法(草案)》³⁴，除了定義 34 項「關鍵原物料(Critical Raw Materials)」清單³⁵之外，同時確認 16 項戰略原物料(Strategic Raw Materials)清單³⁶，還將透過具有約束性的法規，確保安全和可持續的關鍵原材料供應，在 2030 年前實現每年消費的關鍵原物料至少 10%來自境內開採、40%來自境內加工、15%來自回收再利用³⁷，以及來自單一國家供應不超過 65%的四大產業自主目標。

(一)內部行動

1. **建立安全且有韌性的關鍵原物料供應鏈**：經選定的戰略性計畫將能獲得融資支持，及更短的許可時間³⁸，以確保開發申請審核之透明性及可預測性。此外，要求會員國制定關鍵原物料之國家探勘計畫，以掌握歐盟境內關鍵原物料儲量。
2. **減輕供應風險**：監測關鍵原物料供應鏈，及在會員國間協調戰略性原物料儲備，部分大型企業必須對其戰略性原料進行審計與壓力測試。
3. **研究創新與技能投資**：設立「原物料學院」(Raw Materials Academy)以培育人才，並將由 Horizon Europe 計畫中撥出 5 億歐元經費投入關鍵原料相關的研究和創新。
4. **改善關鍵原物料的循環性與可持續性**：為了減輕關鍵原物料供應所帶來的負面影響，無論在歐盟或第三國內，都要促進勞工權利、人權與環境保護的改善。

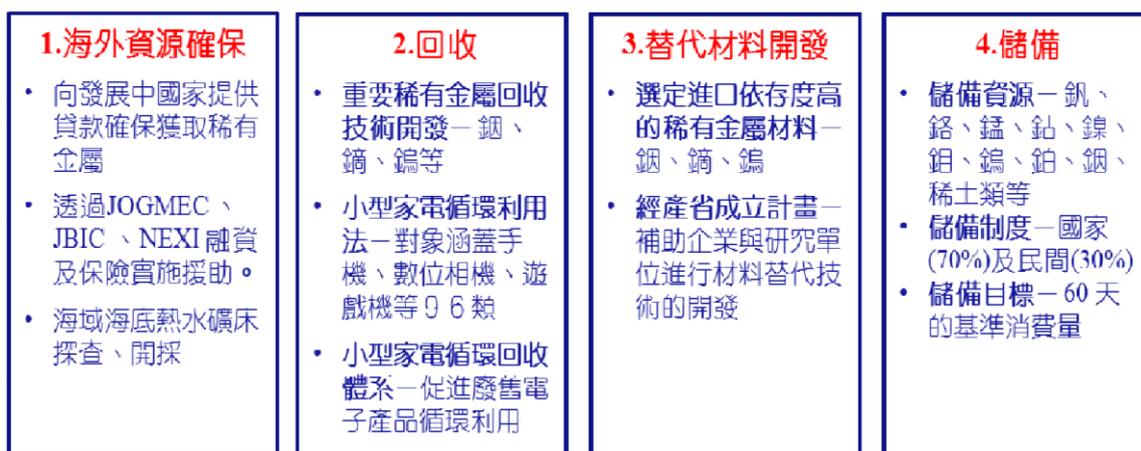
³⁴ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661

³⁵ 包含銻、銅、鋰、鈳、砷、長石、鎂、矽金屬、鋁/鋁土礦、氟石、錳、鋁、重晶石、鋁石、天然石墨、鈹、鈹、鍺、鎳（電池級）、鈦金屬、鈹、鉛、鈮、鎢、硼/硼酸鹽、氮、磷酸岩、鈾、鈷、重稀土元素、磷、焦炭、輕稀土元素、白金族金屬

³⁶ 包含鈹、鎵、錳（電池級）、磁鐵用稀土元素（鐳、鈷、鈾、鎳、釷、釷、和鈾）、硼（冶金級）、鍺、天然石墨（電池級）、矽金屬、鈷、鋰（電池級）、鎳（電池級）、鈦金屬、銅、鎂金屬、白金族金屬、鎢，2023 年 11 月 13 日的暫時協定增加鋁，成為 17 項。

³⁷ 2023 年 11 月 13 日達成暫時協議，將回收再利用比率目標由 15%提高至 25%，仍然有待歐盟執委會與歐洲議會正式通過 (<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/11/13/council-and-parliament-strike-provisional-deal-to-reinforce-the-supply-of-critical-raw-materials/>)

³⁸ 開採許可為 24 個月，加工及回收許可為 12 個月。



資料來源：中技社 (2013)。

圖 19 日本稀有金屬確保戰略之四項策略

(一)海外資源確保：針對海外礦產提供政府開發援助(ODA)工具⁴²，在礦山等必要的周邊基礎建設，積極運用日本優勢，採取與當地相互配合的支持措施，推動技術轉移、環境保護合作。此外，與石油天然氣及金屬礦產資源機構(JOGMEC)、國際協力銀行(JBIC)、日本貿易保險(NEXI)協同合作，穩定供給日本企業參與資源開發的風險資金，取得礦山權益。2008年3月日本制定「資源確保指針」，依據產出國的情況，支持日本企業取得不同礦產資源的開發權益或資源供應方案，包括一系列的合作舉措，如共同探勘、開發調查、融資、貿易保險等⁴³。

(二)回收：對於手機、數位相機等小型家電建立回收系統，或運用既有的系統推動回收工作，並研發促進稀有金屬回收與再利用的技術。後來日本於2013年4月1日起施行《廢舊小型電子產品等再資源化促進法》(使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律)⁴⁴，建立小型家電回收體系，民眾可以在回收點(リサイクル収集場)投遞廢棄物，回收點蒐集後運往循

⁴² 政府開發協助(Official Development Assistance, ODA)分為有償資金協力、無償資金協力與技術協力三種，有償資金協力は提供開發中國家低利且較長期的優惠貸款，無償資金協力は提供不需要返還的資金援助，技術協力は提供技術、專業知識、技術設備或技術培訓等形式的支援，幫助受援國提升技術水平、技能和生產能力。

⁴³ JOGMEC，2008，「安定供給に向けた、JOGMECの使命」，《JOGMEC News》，Vol. 14，頁4-5。

⁴⁴ <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=424AC0000000057>

環利用中心(再資源化センター),這些中心可以從廢舊家電等廢棄物中提煉稀有金屬,又有「都市礦山」之稱⁴⁵。

(三)替代材料開發:強化上下游、跨部門、跨領域的合作機制,促進利用奈米科技開發替代材料,經濟產業省於2009年提出「稀有金屬替代材料開發計畫」(希少金屬代替材料開發プロジェクト),旨在尋求替代稀有金屬的新材料,開發具有相當甚至更優越性能的替代材料,降低對稀有金屬的依賴。

(四)儲備:日本已於1983年創立儲備制度⁴⁶,建立60天基本消費量的儲備,其中石油天然氣及金屬礦產資源機構(JOGMEC)應儲備42天份、民間應儲備18天份。日本政府後於2006年委託新能源產業技術總合開發機構(NEDO)規劃篩選關鍵稀土元素,提出「新國家能源資源戰略規劃」,納入鉑、鈾與稀土⁴⁷。

二、新國際資源戰略

2020年3月,經濟產業省宣布「新國際資源戰略」,涵蓋能源穩定供給、能源效率、環境保護及安全性的「3E+S」原則,針對石油、天然氣、稀有金屬礦物的安全性以及氣候變遷議題提出對策。由於稀土元素在先進產業重要性逐漸升高、中國在供應端具有壟斷地位,故提出強化風險支援以及儲備制度改革方案,重點如下⁴⁸:

(一)根據不同的礦種制定戰略性資源獲取方案:根據各礦種面臨的獨特情況制定計畫,包括儲量多寡、資源分布情況、資源所在國家風險、需求預測、市場規模、日本持有產權狀況等,確保每個類別都能得到相應的解決方案

(二)促進供應來源多元化

1. 強化石油天然氣金屬礦物資源機構(JOGMEC)的風險資金供應功能,針對關鍵礦產之國內外投資提供貸款、擔保及投資

⁴⁵ <https://www.smfg.co.jp/sustainability/report/topics/detail084.html>

⁴⁶ 鎳、鉻、鉬、錳、鎢、鈷、釩等7種礦物

⁴⁷ 同註2。

⁴⁸ https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/pdf/20200226_report.pdf

資金，鼓勵企業參與金屬礦物資源上游的開發，從注重探勘項目轉向發展開發項目、獨立冶煉項目等方面，需要確保 JOGMEC 具備足夠的靈活性與能力，並將 JOGMEC 審查範圍限制在必要範圍之內，簡化與加速債務擔保項目的審查。

2. 隨著國際形勢的複雜化與社會經濟結構的變化，日本國會於 2022 年 5 月 18 日通過《經濟安全促進法》，日本政府於同年 12 月 20 日指定包含重要礦物在內的 11 個領域⁴⁹為經濟安保重要物資，將對穩定供應所需資本投資、儲備、研發等進行補助⁵⁰。

(三)重新審視儲備制度以強化安全性：綜合國家經濟、依賴性與需求等考量，政府以 60 天的國內標準消費量（部分礦產 30 天）為規範儲量，應對短期供應中斷。此外，讓 JOGMEC 參考石油儲備等方面的經驗，從靈活性與便利性等角度，可以考慮以借貸的形式對外釋出庫存。

(四)實現資源保障的國際合作：通過雙邊與多邊框架與資源豐富國家與加強關係，例如 2022 年 10 月 22 日與澳洲簽署《關鍵礦產合作協議》(Critical Minerals Partnership)，促進日本投資澳洲礦產，建立穩固的供應鏈，強化雙邊經濟與貿易合作；2023 年 3 月 28 日與美國簽署《美日關鍵礦產協定》(U.S.-Japan Critical Minerals Agreement)，加強電動車電池關鍵礦物供應鏈合作，避免對「鈷、石墨、鋰、錳、鎳」5 種重要礦物徵收出口關稅，並共享供應鏈資訊⁵¹。

(五)強化產業基礎：由於稀有金屬通常是基本金屬的副產品，為了穩定供應，應加強基本金屬產業與技術水準，充分發揮大學各資源領域系所優勢，建立產官學合作機制。

⁴⁹ 除了重要礦物以外的 10 個領域，分別為半導體、儲能電池、永久磁鐵、工業機械和機器人、航空器零件、雲端程式、天然氣、船舶零件、抗菌藥物和肥料。

⁵⁰ <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUA180QD0Y2A211C2000000/>

⁵¹ <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/us-japan-strike-trade-deal-electric-vehicle-battery-minerals-2023-03-28/>

陸、結論

一、主要國家戰略性物資供應鏈韌性保障措施綜整

主要國家戰略性物資供應鏈韌性保障措施，可歸納為「資源獲取管道多元化」、「科技能力與研發戰略」、「環境可持續性與社會責任」、「儲備制度」與「國際合作」五大策略，詳見表 6。

(一)資源獲取管道多元化

不同國家根據自身資源情況和需求制定不同的策略。豐富礦藏的國家通常加強內部探勘，簡化開發項目審核，提高自行開採礦物的誘因，但可能引發環保和民生爭議；一些國家透過對外投資取得海外礦產權益，雖能獲得更多資源控制權，但也面臨自然災害、政治不穩定等風險；進口原礦或加工過的礦石是多數國家主要對策，然而，在激烈的國際競爭中，分散供應來源的可靠性相對較低。

(二)科技能力與研發戰略

強調透過技術變革解決問題，包括開發替代材料、提升效率、節約資源等，由政府長期高風險領域提供資金支持研發，促進產學合作，實現更大影響，提高國家在物資獲取和生產上的自主能力，從而減少對外部依賴，同時增加供應鏈的靈活性和持久性。

(三)環境可持續性與社會責任

儘管確保供應穩定是首要政策目標，主要國家仍然非常重視 ESG 原則，會審查探勘與開發地區的環境保護與勞動權益情況，確保企業切實遵守社會與環境規範，即使在海外進行開採，也必須以如同在國內開發一般嚴格的方式進行工作。

(四)儲備制度

建立適當的儲備規模，並實現政府與企業資訊共享，有助於確保關鍵物資供應鏈的穩定性。然而，庫存制度要順利實施，對於供應鏈透明度有較高的要求，如果供應鏈的真實情況無法準確披露，政府將無法根據數字做出正確決策，反而導致市場更加不穩定。

(五)國際合作

各主要國家均積極透過多邊和雙邊的合作架構，加強國際交流，了解其他國家的礦產資源和產能，有助於確保本國企業合法進入當地市場進行交易的權益，降低資源國採取貿易限制措施導致的供應鏈風險。

表 6 主要國家戰略性物資供應鏈韌性保障措施綜整

	美國	歐盟	日本
資源獲取管道多元化	<ul style="list-style-type: none"> ● 擴大國內生產與加工能力，特別是加強國土資源探勘與測繪 ● 透過貿易與投資確保核心礦產供應 	<p>提出 2030 年提高境內開採、境內加工、回收再利用比率，以及降低單一供應來源比率的四大可量化目標</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 利用 ODA 與企業海外投資，取得外國礦山權益 ● 建立完善的電子產品回收系統
科技能力與研發戰略	<ul style="list-style-type: none"> ● 加強相關學科人才教育與跨學科合作 ● 制定公私合作研發戰略，強調市場化導向 ● 鼓勵企業創新投資，促進聯邦技術轉讓 ● 開發分析工具 	<ul style="list-style-type: none"> ● 設立「原物料學院」培養人才 ● 利用 Horizon Europe 等歐盟層級科研計畫，撥款支持關鍵原物料相關的研發創新 	<ul style="list-style-type: none"> ● 開發替代稀有金屬的新材料 ● 加強大學基本金屬相關學科研究，建立產官學合作機制
環境可持續性與社會責任	<p>完善資源開發行政法規，制定可持續性生產標準</p>	<p>制定適用於礦業、開採與加工的可持續融資準則，即使在非歐盟國家也要遵守</p>	<p>依據現行國內環保與勞動等相關法規</p>
儲備制度	<p>授予國防儲備(NDS)購買戰略核心礦產與出借庫存的權限</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 在會員國之間協調戰略性原物料儲備 ● 大型企業須進行關鍵物資審計與壓力測試 	<ul style="list-style-type: none"> ● 將稀土等關鍵原物料納入礦物儲備制度 ● 強化JOGMEC的礦物儲備能力
國際合作	<ul style="list-style-type: none"> ● 以可持續價值觀為基礎加強與夥伴國的國際交流 ● 建立全球產業標準，確保供應鏈符合透明、人道與可持續發展原則 	<ul style="list-style-type: none"> ● 運用「全球門戶」戰略計畫，與新興市場及開發中國家建立夥伴關係，協助提升技術 ● 利用 WTO 機制打擊不公平貿易 	<p>通過雙邊與多邊框架與資源豐富國家與加強關係，特別是澳洲與美國</p>

資料來源：自行整理

二、對國內的啟示與建議

臺灣關鍵礦產主要仰賴進口，為確保關鍵礦產之供應無虞，可參採主要國家建立多元化供應鏈之相關作法，透過多元化的供應來源、技術創新、環保政策、國際合作以及產業基礎建設等方面來確保關鍵礦物的供應，以強化我國關鍵礦產之供應鏈韌性。

(一) 建立供應鏈風險評估機制

1. 建立關鍵原物料清單：根據臺灣的實際需求狀況制定一份關鍵原物料清單，列出對國家經濟和技術發展至關重要，但是高度依賴單一進口來源的關鍵礦產，以識別供應風險，這份清單並非針對所有礦產的全面性普查，而應結合地質、產業、經貿等領域專家組成專業團隊，根據重要產業實際需求盤點重要礦產，蒐集進口數據、供應鏈資訊、市場需求、國際價格波動等數據，列出出供應鏈存在單一進口來源情況的關鍵礦產清單，再針對列在清單上的礦種，積極尋找替代品與其他多元化供應來源。
2. 監測供應鏈風險：建立供應鏈監測系統，蒐集官方統計與企業供應鏈數據等資訊，引進人工智慧、機器學習等數據分析技術，定期評估供應風險，及早識別可能的供應中斷情況，例如特定供應國發生影響生產與運輸的大型天然災害、內部社會動盪與政治不穩定、或遭受國際制裁導致無法繼續從該國進口原料，提前做好風險應對措施。應用人工智慧與大數據科技，可以根據過去的資訊建立合理的風險指標體系，例如天然災害、社會動盪、地緣政治風險等，以選擇可靠的供應來源，以及在特殊事件發生時，通過網路公告、簡訊通知等各種途徑發送預警信號，讓相關部門能在風險事件發生時，快速有序地進行應對，降低對供應鏈的衝擊。
3. 建立應急儲備：指定主管機關或成立專門的委員會，評估不同種類關鍵礦物供應中斷的風險、供應中斷的經濟影響，以及產業間的連鎖反應，根據評估結果設定基本可維持消費日

數，確保在供應中斷的情況下，國家擁有足夠的儲備以維持基本的生產和消費需求。這個機制要能有效運作，必須和相關產業與企業深入協作，進行資訊分享、技術支援，以提高應變能力，並且根據新的風險評估與經濟變化進行相應調整。

(二)海外資源確保策略

1. 建立多元化的供應來源：加強與多個國家合作，確保關鍵礦物供應不集中在單一來源，建議可參考主要國家作法，協助國內產業進行上游關鍵礦產原料之海外策略性投資布局。
2. 建立長期供應合作關係：與來源國建立長期供應鏈安全的合作，以確保穩定的供應通道，確保供應鏈不會因為兩岸政治、經濟和國際關係的複雜互動而受到影響。
3. 國際合作：鑒於關鍵礦產在發展綠色產業具戰略重要性，各主要國家除透過雙邊協議加強合作外，美國與歐盟、英國等 9 國成立「礦產安全夥伴關係」，美國、德國等 7 國亦成立「永續關鍵礦物聯盟」，可與主要經濟體主導的合作平台成員加強聯繫，共同解決供應挑戰與共享供應鏈風險相關情報。

(三)制定科技研發戰略

1. 增加對關鍵礦物替代材料和技術的研究投資：建立專項基金資助關鍵礦物替代研究，以協助大學、研究機構與企業投入相關研究，提出創新解決方案，這些計畫應該注重實用性與商業化潛力，確保研究成果能真正應用於實際生產。
2. 建立產業科研聯盟：政府應集結學術界、產業界、研究機構等多方力量，組成產學研合作機制，配合資金支持、稅收優惠等激勵措施，加速研究成果商業化。

(四)回收和再利用

1. 普設 3C 電子產品回收站點：臺灣現行對於電子廢棄物的回收再利用政策，以《廢棄物清理法》為主，讓民眾將廢資訊物品回收後，讓回收業者經過拆解、分離與精煉，製成可再

利用的關鍵礦物。為了提高電子產品回收比率，應在社區中設置方便民眾回收電子廢棄物的回收站點，提供方便、易於辨識的設施，並給予回收業者投入技術與資源進行電子廢棄物的高效處理和資源回收的經濟激勵。

2. 強化教育訓練：現階段電子產品回收的主要障礙，係民眾可能為防止個資外洩，加上電子產品體積不大，傾向當成一般垃圾處理或閒置堆放，以致於關鍵礦物回收量偏低。對此，政府應進行教育宣導工作，增加民眾對資訊產品回收再利用的認知，提醒報廢回收前應採取的必要措施，並加強對回收業者的監管。

三、未來挑戰與展望

臺灣在許多高科技與綠色能源製造業扮演關鍵角色，包括電子、通信、能源、醫療、環保等領域所使用設備，都在全球市場占有一席之地，而這些產業所使用的設備和技術大多需要依賴鋰、鈷、稀土等關鍵礦物。雖然臺灣並不直接進口原礦，而是其他國家精煉後的相關製品，原礦開採與出口問題對臺灣的衝擊較為間接，但仍然面臨許多挑戰，包括供應鏈的不穩定性、依賴特定國家的供應風險、地緣政治因素的影響等。

首先，政策不確定性可能對供應鏈造成重要的影響，除了礦物開採、精煉與加工階段所在國家政府政策變化，可能對供應鏈運作與進口成本產生影響之外，兩岸關係也是必須考量在內的因素。儘管臺灣近年相當重視分散進出口對象，面對單一進口來源貿易限制措施衝擊較低，但若兩岸關係穩定，或可順利與其他國家展開合作，確保關鍵礦物供應穩定，也更有助於跨國企業進行長期戰略規劃與投資。

其次，永續發展已成為國際高度關注的指標議題，臺灣自 2021 年 4 月起便宣示 2050 淨零轉型，臺灣的再生能源在近年取得迅速推展，根據經濟部能源局《能源統計月報》，2023 年 6 月太陽光電與風力發電共設置 11,000MW 與 2,155MW，分別較上年同月成長 26.4%與 88.3%，配合國內再生能源建置，可預料鋰礦、鈷礦和稀土等金屬製作儲能系統與永磁材料需求將快速成長。

除本文所整理的美國、歐盟和日本的關鍵礦物保障措施外，其他一些重要國家也紛紛推出相關政策。例如，英國在 2022 年 7 月發布了《關鍵礦產策略》(critical-minerals strategy)⁵²，韓國則在 2023 年 2 月發布了《關鍵礦物保障戰略》(핵심광물 확보전략)⁵³。考慮到目前供應鏈對安全的重視程度高於成本效益，未來將能看到越來越多的國家以法規與政策力量確保關鍵礦物供應鏈，雖然有助於改善關鍵礦物相關供應鏈的穩定性，但也可能引發對有限供應的競爭，進而導致價格波動。因此，在建立全球多邊管理機制之前，應該謹慎應對未來關鍵礦物供需的變化。

⁵² <https://www.gov.uk/government/publications/uk-critical-mineral-strategy>

⁵³ https://www.kier.re.kr/resources/download/tpp/policy_230227_data.pdf

參考文獻

1. 中技社，2013，《臺灣稀有資源循環發展策略》，專題報告，2013-06，臺北市：財團法人中技社。
2. 中技社，2022，《稀土關鍵材料供應鏈危機下的衝擊與因應》，專題報告，2022-03，臺北市：財團法人中技社。
3. 經濟産業省，2011，《レアメタルのリサイクルに係る現状》，https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/haikibutsu_recycle/pdf/015_04_00.pdf。
4. European Commission, 2011, Tackling the Challenges in Commodity Markets and on Raw Materials, COM(2011) 25 final, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.
5. European Commission, 2020, Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability, COM(2020) 474 final, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.
6. European Commission, 2023, Establishing a Framework for Ensuring a Secure and Sustainable Supply of Critical Raw Materials and Amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020, COM(2023) 160 final, Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council.
7. IEA, 2021, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, *World Energy Outlook Special Report*, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
8. IEA, 2023, *Critical Minerals Market Review 2023*, <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>.
9. Kowalski, P. and C. Legendre, 2023, "Raw materials critical for the green transition: Production, international trade and export restrictions", *OECD Trade Policy Papers*, No. 269, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/c6bb598b-en>.

10. The White House, 2021, Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, and Fostering Broad-Based Growth, *100-Day Reviews under Executive 14017*, <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/06/100-day-supply-chain-review-report.pdf>
11. U.S. Department of Commerce, 2019, *A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals*, https://www.commerce.gov/sites/default/files/2020-01/Critical_Minerals_Strategy_Final.pdf
12. U.S. Department of Energy, 2021, *U.S. Department of Energy's Strategy To Support Domestic Critical Mineral And Material Supply Chains (Fy 2021–Fy 2031)*, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/01/f82/DOE%20Critical%20Minerals%20and%20Materials%20Strategy_0.pdf
13. Yaramasu, V, A. Dekka, M.J. Duran and S. Kouro, 2017, “Permanent Magnet Synchronous Generator-Based Wind Energy Conversion Systems: Survey on Power Converters and Controls,” *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, Vol. 11, (6), pp. 953-1149.