

國立臺灣大學工學院環境工程學研究所



碩士論文

Graduate Institute of Environmental Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

建立考量 ESG 的關鍵物料評估模型：

以儲能單元為例

Developing an Assessment Model for Critical Materials

Based on ESG : A Case Study of Energy Storage Units

曾子維

Tzu-Wei Tseng

指導教授：馬鴻文 教授

Advisor: Hwong-Wen Ma, Ph.D

中華民國 112 年 6 月

June 2023

國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書



建立考量 ESG 的關鍵物料評估模型：以儲能單元為例

Developing an Assessment Model for Critical Materials

Based on ESG : A Case Study of Energy Storage Units

本論文係曾子維君(學號 R10541210)在國立臺灣大學環境工程學研究所完成之碩(博)士學位論文，於民國 112 年 6 月 21 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

論文審查委員：

馬鴻文

馬鴻文博士  
國立台灣大學環境工程學研究所教授

李公哲

李公哲博士  
國立台灣大學環境工程學研究所名譽及兼任教授

黃建中

黃建中博士  
國立成功大學智慧半導體及永續製造學院  
兼任助理教授

指導教授：

馬鴻文

所長：

席鈞正

## 誌謝



在短短兩年內要完成論文和眾多課業真不是件簡單的事情，非常感激一路上有許多人給予幫助和鼓勵，才能達成這個目標。首先，最要感謝的是偉大的太太鄧海莉，兼顧工作之餘也照顧好兩個孩子翊喬、翊誠，一直以來給我最無私的支持、當我最堅強的後盾。謝謝家人的栽培和照顧，讓我能無後顧之憂地朝著目標前進。

能夠完成這篇論文，特別感謝指導教授馬鴻文老師，很幸運能做這個很有意思的題目，在討論中老師總是給予精闢的指引和啟發，除了研究之外，老師也很關心我們的身心和生活，非常感謝老師對於學生的著想。謝謝李公哲老師和黃建中老師不辭辛勞地擔任口試委員；謝謝李老師提供了寶貴的建議，也謝謝老師總是關心我們有沒有在課程中學到東西；謝謝黃老師對於儲能這個變化快速的產業分享了最新的資訊。感謝進輝學長、Sky、Yvonne 兩位吳博士在百忙之中撥出時間費心幫忙，在討論中總是讓我收穫許多，讓這份研究更貼近業界的視角和需求，還要謝謝您們、建中學長、愷均和詩哲協助發放問卷，也謝謝幫忙填寫問卷的業界先進們，沒有您們的參與，這份研究就無法順利完成，也希望這份研究能對產業有一點點的幫助。

感謝馬老師研究室的成員：謝謝秀靜學姊、培群學長和智凱學長研究上的提點、謝謝睿安的交流與分享、謝謝瑜玉於計畫和研究上的大力幫忙。謝謝浩維總是被我諮詢、和我討論各種想法和問題；謝謝依琳教我生命週期評估的相關知識和軟體使用；謝謝梓恩分享環工領域的學識和微積分、借我流體力學參考書，也謝謝你們分享攝影技巧。謝謝研究室學弟妹黃微、晨境、紀均、家怡、佳儀，妳們都很棒！祝你們接下來研究順利、認識你們真好！

感謝環工所尊敬的老師們，我會謹記老師們的指導與教誨，這兩年來幾乎所有老師的課都上過了，見識到了老師們的不同作風，都是我借鏡與效法的典

範。感謝環工所和其他一起修課的優秀同學們，由於不是環工領域出身，有時也會對此感到惶恐不安，多虧有了同學們的幫助與分享，解答我許多課業問題、幫助我學習環工的專業知識、通過課程的考驗。感謝碩一時一起到長榮大學參加大環盃壘球賽的學長姊和同學們，為碩士生活留下了不同的精采回憶。

感謝商研所的恩師黃崇興老師，老師當年的鼓勵與教誨至今依然記憶猶新，老師常說要將課堂所學的學識應用於實務中，這篇論文正是運用了企業永續和環境規劃與管理課程中所學，我迄今仍努力實踐老師的教誨。感謝過去在臺大醫院工作時葉啓娟醫師與同仁們的指導與照顧，讓我學習做事的心細與嚴謹，待人的真誠與溫暖，這幾年做醫學教育研究的歷程是非常珍貴的，至今仍深深影響著我。希望您們都好。

感謝相伴的朋友們，謝謝逸鴻、衍諭、教勛、冠冠、立人、凱迪、孟河、阿業、子亭...等朋友們，生活不是只有研究和工作的，謝謝你們陪我聊天分享生活。還要感謝成功大聯盟的球友夥伴們，每個禮拜的棒球賽是最快樂的運動時光，很開心在這裡能夠放下日常壓力、好好享受比賽的樂趣，希望大家一起打到一百歲。

再次希望藉著這個機會，將我心裡的感謝傳達給你們！最後也謝謝當初決定重回校園的自己，才会有這段豐富、精彩的旅程，請務必發揮這難得的所學，創造更多價值與影響力。

## 中文摘要



隨著人口增加與經濟發展，物料需求的快速增長考驗著供應鏈的彈性，同時也對環境和社會帶來衝擊，因此企業需要建立一套方法來挑選出對企業治理、環境及社會影響極大的關鍵物料，提升企業實現永續發展的能力。

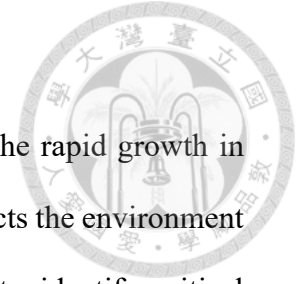
本研究以模糊層級分析法為主軸，透過文獻回顧及問卷進行指標篩選與權重分析，建立了以企業為導向、考量 ESG 的關鍵物料評估模型。環境面向包括生命週期評估的三個終點指標：人體健康、生態系統以及資源耗用；社會面向包括武裝衝突、童工、遵守勞工權利、生活環境、工作環境以及強迫勞役六個指標；治理面向包括物料成本、未來市場需求、國家生產集中度、替代性、回收性以及現階段市場需求六個指標。

為了驗證模型的適用性，我們運用此模型評估儲能單元中鋰電池其金屬成分的關鍵性，結果顯示銅是 ESG 整體關鍵性最高的物料，其環境面向的關鍵性也是最高；鋰是 ESG 整體關鍵性次高，其治理面向的關鍵性遠高於其他物料；鈷是社會面向關鍵性最高的物料。隨後驗證管理策略中的回收方法對於減輕物料關鍵性的效果，結果顯示火法冶金法能夠顯著地降低銅於環境面向及 ESG 整體的關鍵性，但火法冶金法和濕法冶金法皆難以有效降低鋰的關鍵性。

本研究所開發的關鍵物料評估模型具備 ESG 視角，且易於操作、使用量化指標、方便視覺化呈現，能夠協助企業找出關鍵物料，判別其關鍵性熱點，及早規劃管理策略，減少 ESG 所衍生的風險，並創造提升 ESG 評級的機會，發展企業永續競爭力。

**關鍵詞：** 關鍵物料、ESG、儲能單元、鋰電池、回收

## Abstract



With the increasing population and economic development, the rapid growth in material demand tests the flexibility of supply chains and also impacts the environment and society. Therefore, companies need to establish a method to identify critical materials that have significant impacts on corporate governance, environment, and society to enhance their ability to achieve sustainable development.

This study applied the fuzzy analytic hierarchy process and utilizes literature review and questionnaire for indicator selection and weight analysis to establish an assessment model for critical materials considering the enterprise-oriented and ESG (Environmental, Social, and Governance). The environmental dimension includes three endpoint indicators of life cycle assessment: human health, ecosystem quality, and resource depletion. The social dimension includes six indicators: armed conflicts, child labor, compliance with labor rights, living environment, working environment, and forced labor. The governance dimension includes six indicators: material cost, future market demand, country concentration of production, substitutability, recyclability, and current market demand.

To demonstrate the applicability of the model, we applied this model to assess the criticality of metal components in lithium batteries within energy storage units. The results showed that copper is the material with the highest overall ESG criticality, and it also has the highest environmental criticality. Lithium ranks second in overall ESG criticality, with significantly higher governance criticality compared to other materials. Cobalt has the highest social criticality. Subsequently, we verified the effectiveness of recycling methods in mitigating material criticality. The results indicated that pyrometallurgical methods can significantly reduce the environmental and overall ESG criticality of copper. However, both pyrometallurgical and hydrometallurgical methods

are ineffective in reducing the criticality of lithium.

The critical material assessment model developed in this study, has an ESG perspective, is user-friendly, employs quantitative indicators, and facilitates visual presentation. It can assist companies in identifying critical materials, determining their critical hotspots, planning management strategies in advance. Therefore, it can help companies reduce ESG-related risks, create opportunities to enhance ESG ratings, and develop sustainable competitiveness.

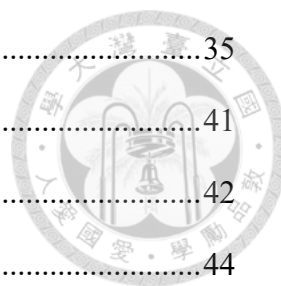
**Keywords: critical material, ESG, energy storage unit, lithium battery, recycling**

# 目錄



誌謝.....	i
中文摘要.....	iii
Abstract.....	iv
圖目錄.....	viii
表目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究架構.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 關鍵物料.....	5
2.1.1 關鍵物料之定義.....	5
2.1.2 企業導向關鍵物料評估模型之相關研究.....	6
2.2 ESG.....	18
2.2.1 ESG 之起源.....	18
2.2.2 ESG 之概念與定義.....	19
2.2.3 ESG 之評級標準.....	20
2.3 儲能單元.....	22
2.3.1 儲能需求之發展.....	22
2.3.2 儲能單元類型之趨勢.....	24
2.3.3 國內電池產業概述.....	26
2.3.4 儲能單元管理策略.....	28
第三章 研究方法.....	33
3.1 研究流程.....	33
3.2 傳統層級分析法(AHP).....	34
3.2.1 傳統層級分析法(AHP)之介紹.....	34

3.2.2 傳統層級分析法(AHP)之應用流程.....	35
3.2.3 傳統層級分析法(AHP)之優缺點.....	41
3.3 模糊層級分析法(FAHP).....	42
3.4 評估模型之指標整理.....	44
3.5 問卷設計及調查對象.....	46
3.5.1 篩選指標之第一次問卷.....	46
3.5.2 分析權重之第二次問卷.....	48
3.6 各指標評分方法之建立.....	48
3.7 生命週期評估.....	54
第四章 結果與討論.....	56
4.1 關鍵物料評估模型.....	56
4.1.1 指標篩選.....	56
4.1.2 權重分析.....	58
4.1.3 模型結構.....	62
4.2 儲能單元案例探討.....	63
4.2.1 環境面向分析.....	63
4.2.2 社會面向分析.....	66
4.2.3 治理面向分析.....	70
4.2.4 ESG 整體關鍵性分析.....	76
4.2.5 關鍵性熱點分析.....	77
4.3 儲能單元關鍵物料之管理策略評估.....	79
4.4 討論.....	83
第五章 結論與建議.....	85
參考文獻.....	88
附錄.....	98

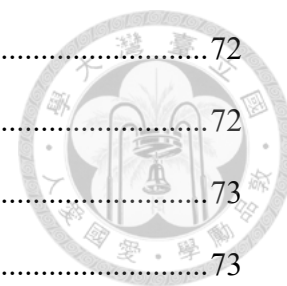


## 圖目錄



圖 1.1 研究架構圖 .....	4
圖 2.1 電池產業鏈.....	27
圖 2.2 火法冶金處理流程 .....	29
圖 2.3 濕法冶金處理流程 .....	30
圖 2.4 直接回收處理流程 .....	30
圖 3.1 研究流程圖.....	33
圖 3.2 AHP 層級結構例示 .....	34
圖 3.3 AHP 方法分析的流程圖 .....	40
圖 3.4 三角模糊數.....	43
圖 3.5 模糊評價矩陣中兩個三角數之間的隸屬函數.....	43
圖 3.6 生命週期評估的架構.....	54
圖 4.1 關鍵物料了解程度之統計圖 .....	56
圖 4.2 社會面向之權重分析盒鬚圖 .....	60
圖 4.3 治理面向之權重分析盒鬚圖 .....	61
圖 4.4 關鍵物料評估模型之結構圖.....	62
圖 4.5 對於生產鋰電池進行生命週期評估的系統邊界簡圖 .....	64
圖 4.6 生產 1 公斤鋰電池的投入產出圖 .....	64
圖 4.7 儲能單元物料之環境面向關鍵性.....	65
圖 4.8 儲能單元物料之武裝衝突指標關鍵性.....	67
圖 4.9 儲能單元物料之童工指標關鍵性.....	68
圖 4.10 儲能單元物料之強迫勞役指標關鍵性.....	68
圖 4.11 儲能單元物料之遵守勞工權利、生活環境和工作環境指標關鍵性 .....	69
圖 4.12 儲能單元物料之社會面向關鍵性.....	70
圖 4.13 儲能單元物料之物料成本指標關鍵性.....	71

圖 4.14 儲能單元物料之未來市場需求指標關鍵性.....	72
圖 4.15 儲能單元物料之現階段市場需求指標關鍵性.....	72
圖 4.16 儲能單元物料之國家生產集中度指標關鍵性.....	73
圖 4.17 儲能單元物料之替代性指標關鍵性.....	73
圖 4.18 儲能單元物料回收性指標關鍵性.....	74
圖 4.19 儲能單元物料之治理面向關鍵性.....	75
圖 4.20 儲能單元物料之 ESG 整體關鍵性.....	76
圖 4.21 銅之關鍵性熱點分析圖.....	77
圖 4.22 回收方法對於銅的關鍵性影響.....	81
圖 4.23 回收方法對於銅的環境面向關鍵性影響.....	81
圖 4.24 回收方法對於鋰的關鍵性影響.....	82



## 表目錄



表 2.1 企業導向關鍵物料評估文獻列表 .....	10
表 2.2 ESG 主要指標的代表意義 .....	19
表 2.3 市場上主要的電池類型之比較 .....	25
表 2.4 各種鋰電池組件的金屬需求 .....	26
表 2.5 鋰電池各部位材料可能造成之污染 .....	28
表 2.6 鋰電池回收方法之優劣比較與挑戰 .....	31
表 3.1 AHP 評估尺度 .....	36
表 3.2 隨機指標表 .....	39
表 3.3 AHP 優缺點之整理表 .....	41
表 3.4 語意變數轉換表 .....	43
表 3.5 指標與文獻引用次數之整理 .....	45
表 3.6 線上問卷進行成對比較的調整 .....	48
表 3.7 關鍵性評分方法整理表 .....	51
表 4.1 社會面向指標之重要性評分 .....	57
表 4.2 治理面向指標之綜合評量 .....	57
表 4.3 第二次問卷之一致性檢定結果 .....	59
表 4.4 社會面向之權重分析整理表 .....	59
表 4.5 治理面向之權重分析整理表 .....	61
表 4.6 人體健康指標之分數轉換範例 .....	66
表 4.7 物料的關鍵性熱點與風險機會分析 .....	78
表 4.8 回收方法之參數整理 .....	80

# 第一章 緒論




## 1.1 研究緣起

物料在人類科技和經濟的發展上扮演著重要的角色，是企業生產產品的命脈。隨著人口增長，全球對於原物料的需求也持續地增加，在二十世紀的一百年間，用於生產商品和技術的原物料之開採和使用增加了十九倍，並預期未來在 2050 年時全球的資源開採量將較 2000 年時增加三倍(Graedel et al., 2012; Gunn, 2014; Krausmann et al., 2017)。在資源有限的限制下，物料需求的快速增長考驗著供應鏈的彈性，同時也對環境和社會帶來衝擊，因此企業需要建立一套方法來挑選出對企業承擔如供應斷鏈等風險極大、策略及經濟影響極大，以及對於環境及社會衝擊極大的關鍵物料，以降低營運風險並提升企業永續發展的能力。

目前國際間對於公司層級的關鍵物料篩選方法已有相當程度的探討，其中供應鏈中斷是討論物料關鍵性時最主要關注的重要因素，供應鏈中斷可能會導致企業生產能力下降、市場地位受損、客戶流失等危害，若對於企業影響極大的關鍵物料供應中斷的持續時間越長，企業將可能會承受更大的風險和損失。因此，企業需要對關鍵物料供應風險進行風險評估和管理，以確保其承受供應中斷的能力，並保護其生產和業務的穩定性。藉由辨別物料的關鍵性，企業能夠了解資源在供應鏈的風險以及供應短缺的潛在影響，能夠協助企業對其供應鏈進行風險評估，以減輕或避免供應中斷的影響。

物料對企業策略及經濟上具有相當程度的重要性，是企業生產過程中不可少的資源，其供應的穩定性會直接影響到企業的生產和運營。物料的品質、種類、供應穩定性等因素，會影響產品的品質、價格和交貨能力，進而塑造企業的市場競爭力。此外，物料是企業成本重要的一部分，若物料價格上漲或供應受限，企業的成本將上升，進而對企業的經濟規劃造成不利影響。因此，企業需要對物料進行全面的控制和管理，將其納入公司治理的體系中。透過瞭解物料的關鍵程度，有助於企業對眾多物料進行更有效率的管理。



除了供應鏈的風險之外，物料對於環境及社會的影響也逐漸受到重視。在物料的開採和加工等過程中會導致自然資源和能源的消耗，可能會產生污染進而影響人體健康和生態環境，也可能會對當地的居民、勞工和生活環境帶來影響。因此，企業需要辨別對於環境和社會帶來重大影響的物料，以加強該物料的環境和社會管理，減少物料生產過程中的環境污染和資源消耗，保障當地社區和勞工的權益，增強企業的永續發展能力和品牌價值。

隨著永續發展的意識興起，企業紛紛面臨 ESG 的挑戰，投資者與利害關係人將從環境（E，environment）、社會（S，social）和公司治理（G，governance）三個面向來衡量一間企業經營的成效。越來越多公司開始從永續發展的角度來發展策略，同時也受到來自客戶或對手的壓力，迫使企業開始考量如何改善產品生命週期中環境和社會層面之永續性。ESG 也對物料管理造成影響，環境方面可以促使公司更加重視物料的再利用和回收，以減少對自然資源的需求；社會方面可以促使公司對其物料的供應鏈進行更嚴格的監管，以確保員工和供應商的權益得到保障。治理方面可以促使公司更加透明和負責任，以應對與物料供應鏈相關的風險和挑戰。

現有的研究對於關鍵物料的篩選大多是從供應鏈的角度進行評估，僅有少數納入環境因素進行分析，有考量社會層面的文獻非常稀少，且尚未有從 ESG 角度來綜合考量關鍵物料的評估作法。因此，本研究希望建立一套考量 ESG 的關鍵物料評估模型：考量環境和社會面向，並整合供應鏈管理和企業策略及經濟規劃於公司治理面向，以此篩選出對企業 ESG 產生重大影響之物料，希望能幫助企業鑑別其物料管理之潛在熱點、風險與機會，協助企業及早對其關鍵物料擬定管理策略，並提升企業永續發展之能力及 ESG 評級之表現。

本研究最後將以因能源轉型趨勢而前景可期的儲能單元為例，試著篩選其影響重大的關鍵物料，接著探討主要的管理策略是否能有效降低其關鍵性，以驗證此關鍵物料評估模型有助於企業發展永續策略的適用性。



## 1.2 研究目的

本研究的目的為：

1. 建立以企業為導向、考量 ESG 的關鍵物料評估模型。
2. 評估儲能單元中金屬成分的關鍵性。
3. 評估管理策略對於儲能單元中關鍵物料的關鍵性減輕效果。

希望能建立一套兼顧環境、社會與治理之關鍵物料評估方法，協助企業挑選出影響重大的物料，有助於企業對其物料訂定管理的優先順序、規劃對應之管理策略、減少營運風險並提高資源效率，以因應所面對的永續挑戰。

## 1.3 研究架構

本研究架構如圖 1.1 所示，首先在第一章提及研究緣起與目的，接著於第二章的 2.1 節介紹何謂關鍵物料，統整目前對於企業導向之關鍵物料評估模型所使用的方法和指標。2.2 節將回顧 ESG 之起源、概念與評分方法。而後於 2.3 節整理儲能單元之發展與趨勢，以及介紹對於儲能單元之主要管理策略。第三章將說明本研究的關鍵物料評估模型之建構方法學，並對於模糊層級分析法有進一步的介紹。第四章結果與討論的部分將先介紹所建立的關鍵物料評估模型，接著以儲能單元為案例進行分析，並對於儲能單元之管理策略進行評估。最後經綜合評估後於第五章總結本研究的結論，並提供相關的建議。

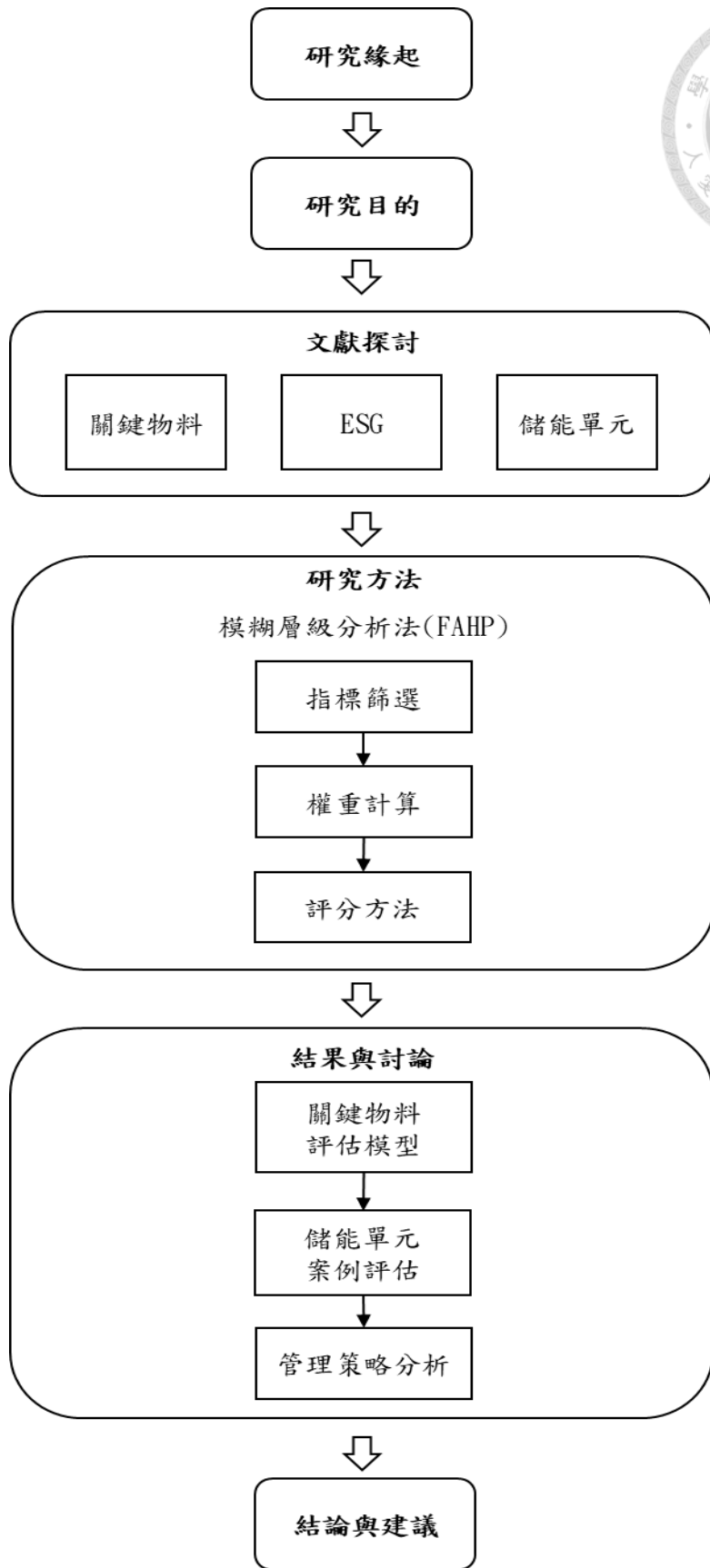


圖 1.1 研究架構圖

## 第二章 文獻回顧



### 2.1 關鍵物料

#### 2.1.1 關鍵物料之定義

對於關鍵物料至今仍難以提出精準的定義，主要是由於以下兩個因素：眾多研究所使用的定義和評估方法各有不同，以及研究中給出的定義含糊不清 (Erdmann & Graedel, 2011; Frenzel et al., 2017; Glöser et al., 2015)。我們可以先從幾個比較有代表性的定義來增進對於關鍵物料的認識：國家研究委員會於 2008 年提出的報告 *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy* 對於關鍵性的定義為使用和可用性的重要性 (Graedel et al., 2012; NRC, 2008)；*Critical Metals Handbook* 書中對於關鍵性的定義為最重要的質量、狀態或程度 (Gunn, 2014)。較多的文獻則是以矩陣或多個指標的形式來描述關鍵性。

不論對於定義是如何多變，消費者對於供應中斷的脆弱性以及發生供應中斷的可能性是被廣泛認為對於識別關鍵物料非常重要的兩個面向 (Erdmann & Graedel, 2011; Frenzel et al., 2017; Graedel & Reck, 2016; NRC, 2008)。隨著淨零碳排的目標設定和永續發展的趨勢，近期也有文獻開始加入環境和社會的面向來探討物料的關鍵程度 (Apple, 2019; Kolotzek et al., 2018)。

關鍵物料的運用範圍非常廣泛，可以被運用於全球、國家、公司這三種不同規模的組織層級。Graedel 等人 (2012) 曾依上述三種組織層級的特性，如時間尺度、科技變化的重要性、地緣政治的重要性等，提供不同的指標組成來量化金屬的關鍵性，可做為全球、國家和公司利害關係者進行風險評估的參考依據。關鍵物料的方法可根據使用者的需求靈活調整具體指標，並按使用者認為合適的方式進行加權，以達成最符合使用者需求及組織層級狀況的評估。

本研究將專注於公司層級的關鍵物料評估方法，Griffin (2019) 等認為對於公司層級而言，關鍵材料著重於供應中斷和經濟或策略上的重要性，以利公司訂定明確的應急計劃和角色規劃來應對供應中斷的狀況。綜合上述文獻回顧，

本研究中對於關鍵物料的定義為「對企業策略及經濟影響極大、承擔如供應斷鏈等風險極大，以及對於環境及社會衝擊極大的物料」，以此描述增進本研究相關對象對於關鍵物料定義的了解程度，以確立對於命題認知的一致性，避免定義不清所帶來的發散狀況。

### 2.1.2 企業導向關鍵物料評估模型之相關研究

為了建構適用於企業的關鍵物料評估模型，本研究蒐集、瀏覽並分析國外公司層級關鍵物料的相關文獻，並參考企業提出的研究報告，以期能瞭解企業角度所重視的物料衡量標準。以下將先依發表時序先後回顧與公司層級關鍵物料相關的文獻，可以從中學習對於關鍵物料的評估方法、評估方法如何建立、評估方法所需的指標和資料來源、評估方法的應用案例等，接著再進行整理與總結。

Duclos 等(2010)認為隨著未來全球對於資源的競爭加劇，供應鏈將面臨壓力，公司必須知道短缺可能會造成的影響並據此進行規劃。此研究開發了以原料短缺對公司的影響及供應與價格的風險為兩個維度的關鍵性矩陣，以五種等級來衡量各個指標的風險程度，最後以奇異公司的渦輪產品為案例，篩選出鍊為其關鍵性高的金屬，需要製定計劃來穩定其供應或盡量減少其使用。

Graedel 等(2012)創建了一種由供應風險、環境影響和供應限制的脆弱性這三個維度所組成的綜合方法來量化元素週期表中金屬的關鍵性，其中供應風險因時間尺度而異，供應限制的脆弱性會因全球、國家和公司等組織級別而異。此關鍵性評估方法是美國國家研究委員會模板的加強版，希望能幫助企業、國家和全球利益相關者進行風險評估，並為資源利用和戰略決策提供參考。

Bensch 等(2015)以技術導向的中小企業為目標，建立了關鍵物料的永續性評估決策支持系統。研究者認為原料消耗方面的永續性是資源效率之重要前提，因此開發一個概念性的決策和資訊系統模型，考量了經濟和生態兩個維度，並從文獻研究中挑選出經濟維度的 27 個候選指標，藉由五位跨學科專家對於

指標相關性進行評分，最後確定 11 個指標作為篩選指標；生態維度則是依據生命週期影響評估的影響。此系統根據產品的原料成分進行評估，並以電容器的鈹和錳金屬進行示範。

Helbig 等(2016)回顧了 16 個關與物料脆弱度的文獻，從這些文獻整理的 18 個指標中篩選出 6 個常用指標並對其詳細討論，並以銅和稀土釷的數據收集與評估結果為例說明。

Lapko 等(2016)探討不同行業和歐盟製造公司如何看待物料的關鍵性，並提出許多如何減輕關鍵性的對策。結果指出所考慮的關鍵因素和採用的緩解策略與文獻相比較為受限、供應鏈內部和之間的公司存在著相互依賴的關係。如果要對工業系統產生可行的影響，則應將其納入物料的關鍵性評估。

Hallstedt 與 Isaksson(2017)提出一種早期產品開發方法，從可用性和永續的角度評估物料的關鍵性。因在早期產品開發階段便決定在產品中使用什麼材料，對後續製造、維護和報廢有著決定性影響。該方法在三階段的過程中表徵和分析合金的關鍵性，希望能支持產品設計團隊在設計早期階段選擇所使用的材料，並已經過航空製造公司的評估與驗證。

Kolotzek 等(2018)考量永續性的三個維度：供應風險、環境影響和社會影響，運用關鍵性分析、生命週期影響評估、社會生命週期評估、層次分析法和敏感度分析，建立了以公司為導向的原物料評估模型。以選擇電容器技術的決策支持作為案例研究，對於鋁、鈮和鈹進行分析以驗證評估模型對決策支持的適用性及其對公司識別原料供應鏈中潛在熱點的好處。

Knobloch 等(2018)將關鍵性評估中的脆弱性分為敏感性、暴露於供應中斷風險和適應能力的組成，有助於在各個組織級別明確區分和分配標準，以便更好地解釋結果。研究將所提出的脆弱性評估方法應用於汽車產業，結果發現鈹、鎢、鈳和鎳和鎳被評估為汽車中產業最脆弱的金屬。

Griffin 等(2019)回顧 42 項關鍵性研究，將結果運用於開發一個企業層級

的矩陣，包含了三類風險：設計及產品概念的可行性、生產和盈利能力，並包含四個關鍵業務功能：財務、採購、營銷和生產，此研究對於公司層級的關鍵物料建立了供應管理和減輕關鍵性的架構。

Kim 等(2019)的研究主要關注物料關鍵性評估中各項指標的相對權重。關鍵性評估的指標權重因評估目的和利益相關者而異，該權重對於評估結果也有重大影響。此研究應用模糊層次分析法(FAHP)來確保評估韓國物料關鍵性的合理權重。結果顯示：與先前的方法相比，可以觀察到關鍵性的顯著變化。關於權重和關鍵性差異的結果和討論有助於制定減輕物料關鍵性的政策。

蘋果公司(Apple Inc.)於 2019 年提出物料影響概況報告，自全球視野評估物料其供應鏈、環境及社會的影響來判斷是否關鍵，目的是探討哪些物料應優先採用百分之百回收及可再生的供應鏈。蘋果公司也已經宣布將在 2025 年前於電池中使用 100% 回收鈷(Apple, 2023)。

Bongartz 等(2021)進行多維度的關鍵性評估，以評估德國在供應安全、經濟脆弱性和環境影響方面可能產生的風險影響，並以電動車和儲能系統為評估案例，根據兩種不同的電池市場情景，評估了到 2050 年德國鋰離子電池的累積金屬總需求。研究發現供應瓶頸是如意料之中的鋰、鎳和鈷，對於幾種緩解策略的評估顯示顯著降低風險的嚴重性是可行的，這需要有效的支持計劃和法規，以確保有效率地實施措施，例如開發新型電池概念、提高生產中的材料效率以及建立有效的回收流程。

表 2.1 整理了上述文獻評估關鍵物料方法之建構方法、評估維度及其指標，以及所應用的案例分析及其關鍵物料。透過這個表格我們可以看出一些企業層級對於關鍵物料評估方法的演變趨勢和現象：在早期 2010 年與 2012 年分別是依據及改良美國國家研究委員會所發展的方法，後來開始參考文獻及專家意見來選擇指標，也出現依文獻中出現次數挑選指標的作法。對於關鍵物料的評估，大多是透過數個評估維度，各個維度又包含數個指標，因此相當適合

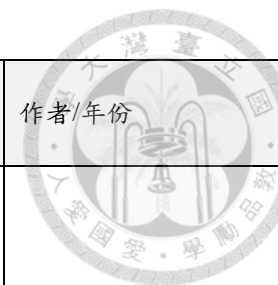


利用層級分析法和模糊層級分析法來分析各個指標的權重。此外，我們可以看出供應風險對於判斷關鍵程度上扮演著相當重要的角色，每篇文獻在探討關鍵性時都會討論供應鏈的衝擊；環境方面的影響在 2012 年的文獻即被納入考慮，並於本研究進行指標參考的 12 篇文獻中有 8 篇考量到物料對於環境的衝擊；社會面向的指標首度於 2016 年被提出，之後幾乎每年探討關鍵物料的文獻都會提到社會面向的影響，可見物料的社會影響日趨重要。關鍵物料的應用非常廣泛，自傳統製造渦輪、汽車、航空，至電子產品、電動車和儲能產業都能探討其關鍵物料。最後，回顧文獻也發現目前對於關鍵物料的分析僅限於金屬物料，推測是因其稀缺性與重要性，使之容易對供應、環境與社會層面產生影響，故具備分析金屬物料關鍵程度之必要性。

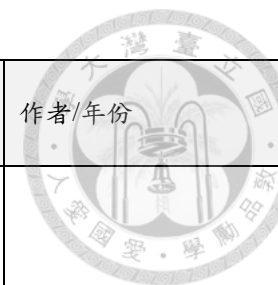


表 2.1 企業導向關鍵物料評估文獻列表

標題	評估方法之建構方法	評估維度	評估指標	案例應用/關鍵物料、 其他評估物料	作者/年份
Design in an era of constrained resources	依據國家研究委員會 發展的方法	原料短缺對公 司的影響	全球供應之佔比	奇異公司的渦輪/鍊	(Duclos et al., 2010)
			對於收入之影響		
			替代的能力		
			經歷成本增加的能力		
		供應與價格的 風險	地球地殼的含量		
			採購和地緣政治風險		
			聯合生產風險		
			需求風險		
			歷史價格彈性		
			市場替代性		
Methodology of metal criticality determination	改良國家研究委員會 的方法	重要性	受影響收入之百分比	無	(Graedel et al., 2012)
			經歷成本增加的能力		
			對於公司策略之重要性		
		替代性	替代之表現		
			替代之可能性		
			環境影響比值		
			價格比值		
		創新能力	公司創新		



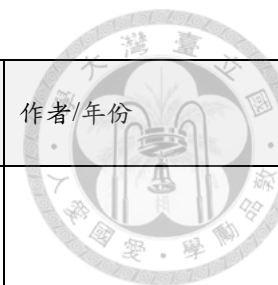
標題	評估方法之建構方法	評估維度	評估指標	案例應用/關鍵物料、其他評估物料	作者/年份
Decision Support System for the Sustainability Assessment of Critical Raw Materials in SMEs	自文獻選擇指標、專家意見、層級分析法	經濟	政治風險:政治穩定度、政策潛力、規範	電容器/鈮、錳	(Bensch et al., 2015)
			供應減少風險:靜態儲存量、靜態資源量、回收率		
			集中風險:國家生產集中度、公司生產集中度		
			需求增加風險:伴生金屬比例、未來需求、替代性		
		生態	人體健康:人類毒性、氣候變遷對人類健康影響、電離輻射、臭氧消耗、微粒組成、光化學氧化物組成		
			生態系統品質:農地佔用、氣候變遷對生態系統影響、淡水之生態毒性、淡水之優養化、海水之生態毒性、都市用地佔用、陸地生態毒性、陸地酸化、自然土地改造		
How to evaluate raw material vulnerability - An overview	依文獻中出現次數挑選指標	脆弱度	替代性	鈹、銅	(Helbig et al., 2016)
			產品價值		
			未來需求		
			策略重要性		
			物料價值		
			使用分佈		



標題	評估方法之建構方法	評估維度	評估指標	案例應用/關鍵物料、其他評估物料	作者/年份
The business perspective on materials criticality: Evidence from manufacturers	整理文獻中的指標	關鍵性	經濟重要性	無	(Lapko et al., 2016)
			對價格波動的敏感性		
			價格上漲和波動		
			需求增長		
			材料的競爭需求		
			難以替代		
			難以創新		
			生產國的不穩定性		
			國家生產集中度極高		
			公司生產集中度極高		
			難以回收		
			地質因素而難以取得		
			需長時間進行產能拓展		
			新資源勘探時缺乏投資		
			產量與產能有限		
缺乏股票交易、生產商和製造商					
作為副產物/聯合生產					
社會與環境限制					
對健康和生態系造成傷害					
Material criticality	整理文獻中的指標	可用性風險	資源豐富度	航空製造公司/合金	(Hallstedt & Isaksson,

標題	評估方法之建構方法	評估維度	評估指標	案例應用/關鍵物料、其他評估物料	作者/年份		
assessment in early phases of sustainable product development			聯合生產	Haynes 188、In 718、Haynes 282、Haynes 230	2017)		
			壟斷供應				
			來源國的政治穩定				
			可回收性				
			環境規範:政策決定、立法				
		可替代性					
永續性風險	社會指標:衝突要素、磷含量						
			汙染因素:人為產量與自然產量之對比				
A company-oriented model for the assessment of raw material supply risks, environmental impact and social implications	自文獻整理指標出現次數、專家意見、層級分析法	供應風險	集中風險:國家生產集中度、公司生產集中度	電容器/鈹、鋁、鈦	(Kolotzek et al., 2018)		
			需求增加風險:伴生金屬比例、未來需求、替代性				
			政治風險:政治穩定度、政策潛力、規範				
			供應減少風險:靜態儲存量、靜態資源量、回收率				
		環境	生態系統品質:農地佔用、氣候變遷對生態系統影響、淡水之生態毒性、淡水之優養化、海水之生態毒性、都市用地佔用、陸地生態毒性、陸地酸化、自然土地改造				
			人體健康:人類毒性、氣候變遷對人類健康				

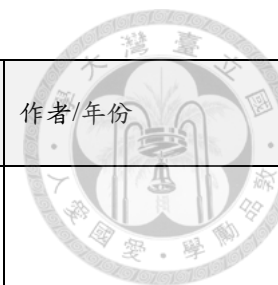





標題	評估方法之建構方法	評估維度	評估指標	案例應用/關鍵物料、其他評估物料	作者/年份
			影響、電離輻射、臭氧消耗、微粒組成、光化學氧化物組成		
		社會	當地社區:獲取非物質資源、獲取物質資源、社區參與、文化遺產、離家和遷移、本地就業、尊重原住民權利、安全健康的生活條件、安全生活條件		
			社會:貪汙、避免及減輕武裝衝突		
			勞工:童工、平等機會/歧視、公平的薪水、強制勞役、結社自由與談判、健康和安全、工作時間		
From criticality to vulnerability of resource supply: The case of the automobile industry	自文獻整理指標出現次數	敏感性	與全球原物料生產相比之汽車產業物料需求或消耗	汽車產業/銻、鎢、鈹、鈦、鎳、鎳...等金屬	(Knobloch et al., 2018)
			與平均汽車重量相比之物料重量百分比		
		暴露於供應中斷風險	視情況而定的全球原物料生產之國家生產集中度		
			全球原物料生產之公司生產集中度		
			金屬之副產物		
適應能力	對於乘用車的需求和競爭性或新興技術的未來物料需求				
			替代性:替代表現、替代品的潛在供應中斷		

標題	評估方法之建構方法	評估維度	評估指標	案例應用/關鍵物料、其他評估物料	作者/年份
			風險、價格比例、環境比例		
			可回收性:全球報廢汽車之終期回收率		
A framework for firm-level critical material supply management and mitigation	整理文獻中的指標	獲利能力	收入	無	(Griffin et al., 2019)
			價格波動		
			價格彈性		
			替代性		
		設計及產品概念的可行性	總物料成本的物料占比		
			供應風險		
			部門市場佔有率		
			物料使用		
		生產	毛利率		
			存貨變異率		
			供應商可靠性		
			生產效率		
Raw material criticality assessment with weighted indicators: An application of fuzzy analytic hierarchy process	整理文獻中的指標、專家意見、模糊層級分析法	供應	供應風險: 國家生產集中度、國家風險、消耗時間、副產物依賴性	韓國戰略儲備計劃/重稀土元素、鋁、銅、鎳、鋅...等金屬	(Kim et al., 2019)
			脆弱度: 回收性、可替代性、庫存量、自給率		
		經濟	經濟風險: 經濟重要性、未來需求、礦產價格波動		





標題	評估方法之建構方法	評估維度	評估指標	案例應用/關鍵物料、其他評估物料	作者/年份
Material Impact Profiles	整理文獻中的指標	供應鏈衝擊	伴生性	消費電子產品/鈷、鋁、銅、稀土元素 (鈹、鐳、鎢) ...等	(Apple, 2019)
			生產集中度		
			儲備分佈		
			終期時全球回收率		
			替代性		
			生產國的政治穩定		
			儲備國的政治穩定		
		環境衝擊	地球化學污染		
			化學品使用		
			生命週期指標		
			特定回收性		
		社會衝擊	手工採礦的比例		
			強制勞役		
			童工		
			貪汙		
衝突關係					
Multidimensional criticality assessment of metal requirements for lithium-ion batteries in	採用文獻的模型與指標	供應風險	地理、技術、經濟: 儲備消耗時間、伴生金屬、資源消耗時間	電動車和儲能系統/鈷、鋰、鎳、錳...等金屬	(Bongartz et al., 2021)
社會及法規: 政治潛力指標、人類發展指標					
地緣政治: 全球治理指標、全球供應集中度					

標題	評估方法之建構方法	評估維度	評估指標	案例應用/關鍵物料、 其他評估物料	作者/年份
electric vehicles and stationary storage applications in Germany by 2050		供應風險脆弱度	重要性: 國家經濟重要度、人口利用百分比		
			替代性: 替代品表現、替代品可用性、環境影響比例、淨進口依賴比例		
			易感性: 淨進口依賴度、全球創新指標		
		環境影響	ReCiPe 終點: 人體健康危害、生物多樣性危害		

## 2.2 ESG

### 2.2.1 ESG 之起源

雖然 ESG 是近十年來才被大量關注的議題，但 ESG 並不是一個新的概念，其起源可以追溯至 2004 年，當時聯合國秘書長 Kofi Annan 曾邀請全球 55 家領先金融機構將 ESG 原則融入其對於金融市場的投資實務與企業決策中。此舉導致了「全球契約」(Global Compact)在「Who Cares Wins」報告的發布中明確納入了 ESG 這個術語。因此，ESG 並不是最近才普及的全新概念。ESG 被認為是企業生存能力的核心要素，應該在營運中被廣泛、全面地納入，並在投資決策中予以特別考量(Lehmen, 2021)。

ESG 可以追溯到社會責任投資(Socially Responsible Investment, SRI)的概念，SRI 則是因應企業社會責任(Corporate Social Responsibility, CSR)的觀念所發展出來的投資理念。英國學家 Oliver Sheldon 在 1923 年於其所著的管理哲學提到了類似 CSR 的想法：企業需要依靠整個社會的進步和完善制度，才能建立一個運作順暢的自由市場，從中賺取利潤，而不能單靠本身的實力。因此，若企業希望實現長期的經營與獲利，就應該將資源投入到勞工權益、環境永續、慈善捐助等方面回饋社會，而不只是遵循股東利益極大化。企業的決策應該考慮到所有利益相關人(stakeholders)的權益，而不僅有股東而已(林宜諄, 2008)。

CSR 這一概念被正式提出是在 1995 年，當時聯合國秘書長 Kofi Annan 在社會發展領導人會議上提出了建立「全球契約」(Global Compact)的想法，這個契約旨在整合歐盟的相關機構，並積極倡導企業與非政府組織共同合作，尤其是大型跨國企業採取減少全球化負面影響的行動，這被認為是 CSR 概念的發展起源。聯合國於 2000 年通過了「千禧年發展目標」，以及 2015 年通過的加強版「永續發展目標」，為各國政府和企業提供更全面的規範以實現社會責任，以上便是 ESG 概念的發展背景(戴成真, 2022)。



### 2.2.2 ESG 之概念與定義

ESG 是永續投資的一種投資策略，對於公司營運的標準和評分指標包含 Environmental(環境)、Social(社會)、Governance(公司治理)三大領域，ESG 旨在將社會、環境效益與財務收益相結合，以連結投資者對於社會、道德、生態和經濟的關注(Brzeszczyński & McIntosh, 2014)。下表 2.2 列出 ESG 的三個主要指標所分別對應的概念。

表 2.2 ESG 主要指標的代表意義(Li et al., 2021)

指標	要素
Environmental(環境)	可能對財務表現或償付能力產生積極或消極影響的環境事務，包含溫室氣體排放、能源消耗、用水、廢棄物管理等與環境相關的要素。
Social(社會)	可能對財務表現或償付能力產生積極或消極影響的社會事務，包含童工、強迫勞役、工作環境的健康與安全等與社會相關的要素。
Governance(公司治理)	可能對財務表現或償付能力產生積極或消極影響的公司治理事務，包括董事會的結構、透明與揭露、利害關係人的權利等與公司治理相關的要素。

符合 ESG 標準的企業通常會為永續發展做出貢獻，並為環境、社會、經濟帶來正面的影響，同時努力履行企業社會責任，除了股東利益外，公司還有責任對社會與環境作出貢獻，以實現永續發展。若企業具有此種責任感，除了能贏得市場的認同，還能有利於投資人長期持有股票，穩定公司的市場波動(Lo & Sheu, 2007; Škare & Golja, 2012)。

ESG 用以衡量公司的社會責任得分，被視為評估一間公司是否永續經營的重要指標，投資人在做出投資決策時也會納入 ESG 做為一個重要考量。有社會責任意識的投資人可以藉著這些指標篩選投資機會，並對社會和環境產生

好的影響(Jain et al., 2019; Vives et al., 2012)。

### 2.2.3 ESG 之評級標準


過去，企業在 ESG 方面的表現往往比財務數據更難以量化，因為 ESG 包含更多複雜的問題和方向，很難透過財務報告向公眾全面披露訊息。對於一般投資人而言，要對企業的 ESG 表現進行全面評估並不容易(戴成真, 2022)。現在越來越多企業不僅公布自己的營收、成本等財務數據，也需要公布非財務數據，特別是 CSR 報告，這種趨勢導致許多評級機構將 CSR 表現指標納入他們的評級標準之中(Avetisyan et al., 2017)。而 ESG 報告能向投資者提供更加全面的整合訊息，因此若有一個公正的第三方可以幫助企業進行 ESG 評分，反映出該企業的 ESG 風險或表現，那將有助於投資人在做決策時有更加全面性的判斷標準(Taylor et al., 2018)。

ESG 評級公司(ESG ratings firms)會向市場參與者(包括投資者、分析師和企業經理)提供關於企業與非投資者的利益相關資訊。他們透過篩選海量數據，提取有關環境、社會、公司治理表現和風險的各種訊息。投資者依賴這些訊息做出投資決策，而企業則使用評級來獲得第三方對其永續發展措施品質的回饋(Larcker et al., 2022)。

ESG 評級的目的是為市場參與者提供關於企業在環境、社會和公司治理上的品質，以及可能由社會或環境因素所引起的風險程度。MSCI 評級方式為定義每一個產業在 ESG 三面向下的主要衡量指標，依此計算出評級水準，以衡量一間公司是否有能力管理 ESG 的風險與機會，能成為投資者決策的重要指標(Larcker et al., 2022)。

關於 ESG 評級的行業，目前存在著數十家評級機構。這些公司的背景並不相同，許多公司是從不同的背景專業領域進入 ESG 評級業務(Larcker et al., 2022)。其中 MSCI 所建立的評級機制是國內基金所追蹤的績效指標，故本篇將對其進行進一步的探討：MSCI 是隸屬於明晟集團旗下的 ESG 研究和分析





工具供應商，它的 ESG 研究涵蓋了全球約 8,500 家企業。MSCI 的評分標準主要分為三大面向，包含環境、社會和治理，為了測量此三個面向的表現，又再細分為 10 個主題和 35 個關鍵指標，根據產業領域給予每個指標不同的權重，最後計算分數得出 ESG 評級。MSCI 的 ESG 評級方式為 AAA~CCC 的七點量表制，評級由高至低，分別為 AAA、AA（前兩者代表「領先」）、A、BBB、BB（此三者代表「平均」）和 B、CCC（此兩者代表「落後」）。

結合前面對於關鍵物料的文獻探討，我們可以看出物料對於供應鏈、環境與社會層面的影響，因此藉由辨別關鍵物料，並進一步規劃策略加以妥善管理，將有機會提升企業的 ESG 評級，例如優化原物料採購、避免有爭議的採購、揭露關鍵物料以彰顯其商業倫理。



## 2.3 儲能單元

### 2.3.1 儲能需求之發展

2016 年 171 個國家於聯合國總部簽署巴黎協定(Paris Agreement)以阻遏全球暖化的現象，其整體目標是希望能將全球平均氣溫的提升幅度控制在較工業化前高出  $2^{\circ}\text{C}$  以內，並致力於將氣溫的提升幅度限制在較工業化前高出  $1.5^{\circ}\text{C}$  之內。世界各國也因此提出多元的減碳方案和市場，其中將能源運用由傳統的化石燃料能源轉換為可再生與低碳能源的「能源轉型」是核心的課題之一。2022 年聯合國氣候變遷大會(COP27)所發布的 COP27 決議更首度提出加速可再生能源部署的呼籲(Agreement, 2015; Alayza et al., 2022)。

臺灣的能源依賴程度很高，政府資料顯示 98% 的能源需仰賴進口，且因島國地理因素而難以從其他國家獲得電力支援。因此，藉由推動能源轉型可以提高臺灣能源自主性和多元化，並減少對於進口能源的依賴，同時也有助於達成減碳目標，降低碳排放量。為了落實能源轉型政策，經濟部訂定了 2025 年再生能源發電占總發電量 20% 的目標。然而，再生能源發電所具有的間歇特性可能會產生供電不穩定的風險，為了解決使用再生能源所可能產生的問題，儲能系統的規劃將會是主要的解決方案之一(中華民國經濟部, 2021; 王鈞銘、邱炳焱、許湘琴、劉致峻, 2019; 行政院, 2023)。

為了促進儲能設施的設置，行政院於 2016 年通過「綠能科技產業創新推動方案」，以「創能、儲能、節能、系統整合」為主軸推動產業發展；2019 年 5 月修定再生能源發展條例第十一條增加「儲能設備得基於示範目的，於一定期間內，給予相關獎勵」；111 年 9 月修正發布「儲能系統結合太陽光電發電設備中華民國 101 度競標及容量分配作業要點」，現有得標廠商具 70.6 MW 之儲能系統容量，未來於 113 年預期將累計設置達 500 MW。在國發會 2030 淨零排放路徑的規劃中，儲能系統於 2025 年的目標值為 1,500 MW，包含 PV 業者自建的發電端 500MW、電網端 1000MW(台電公司自建 160MW 與透過台電

電力交易平台採購的 840MW)，未來於 2030 年時總量有望提高至 5,500 MW(包括 PV 發電端的 2500MW 以及電網端的 3000MW)。期望透過儲能產業的發展，使再生能源成為穩定的電力來源，從而實現政府能源轉型的目標(王鈞鎔、邱炳嶽、許湘琴、劉致峻, 2019; 行政院, 2023; 經濟部, 2022)。

除了能源轉型趨勢所帶來的儲能需求，電動車市場的蓬勃成長也帶動了儲能產業的發展。根據國際能源署(International Energy Agency, IEA)的報告指出，2021 年電動車銷量為 660 萬，佔了全球汽車市場的 9%，是 2019 年時電動車市占率的四倍；2021 年全球路上有超過 1650 萬輛電動車，在短短三年內增長了兩倍；2021 年全球電動車最大的市場在中國，其銷量約為 330 萬，較前一年增長了一倍以上；中國和歐洲佔了全球電動車銷量的 85%以上，美國的銷量是 63 萬，約為全球電動車銷量的 10%。2021 年全球電池需求為 340GWh，是 2020 年電池需求的兩倍多。在考量全球各國既有的因應氣候變遷措施及政策之既定政策情境(stated policies scenario, STEPS)預測中，2030 年時全球電池需求將達到 2200GWh；在假設全球各國淨零排放承諾皆有如期完整實現的承諾目標情境(announced pledges scenario, APS)預測中，2030 年時電動汽車將佔全球銷售車輛的 30%以上，屆時全球電池需求將達到 3500GWh(Bibra et al., 2022)。

全球知名的管理顧問公司麥肯錫公司(McKinsey & Company)預測 2030 年時全球對於鋰離子電池的需求將由 2022 年的約 700 GWh 增加至 4700 GWh，其中用於電動汽車 (EV) 等移動應用的電池需求約有 4300 GWh，佔了電池需求的絕大部分。移動性成長的趨勢來自於淨零排放目標等永續發展規範、消費者對於環保技術的需求增加、以及前 15 家原始設備製造商(OEM)中的 13 家宣布禁止使用內燃機汽車(ICE)並實現新的減排目標(Fleischmann et al., 2023)。



### 2.3.2 儲能單元類型之趨勢

鋰電池是現代最重要的儲能單元，由於其較高的能量密度和環保特性，逐漸取代了傳統的鉛酸電池、鎳鎘電池和鎳氫電池。鋰離子電池主要由正極、負極、隔離膜和電解質四個元件組成，透過離子在電解質中往電極的移動來達成放電與充電的功能。其中影響鋰電池性能和成本的關鍵因素是正極材料，其活性、鋰離子分布等因素是影響鋰電池性能與電容量限制的主要因素，目前商用的正極材料可依晶體結構分為三類：層狀結構、尖晶石結構和橄欖石結構，其代表性材料分別為鋰鈷氧化物、鋰錳氧化物和磷酸鋰鐵。此外，運用過渡金屬嵌鋰氧化物複合材料的三元系列電池能夠結合多種材料優勢，滿足市場需求 (蔡淑儀 et al., 2019)。

目前市場上主要的電池為三元系鋰電池之鋰鈷鎳錳電池(NMC)和鋰鈷鎳鋁電池(NCA)以及磷酸鋰鐵電池(LFP)，其比較整理如表 2.3，目前國內大型企業集團如台泥、台塑、鴻海等皆紛紛加入投資佈局(Baum et al., 2022; 楊絡懸, 2022)。

三元系鋰電池之鋰鈷鎳錳電池(NMC)和鋰鈷鎳鋁電池(NCA)在 2021 年占了 85% 電動車電池需求，因其高能量密度優勢而具有近期市場的主導地位，並具有短時間輸出高功率的特性，適合應用於 3C 產品、電動工具車、賽車、空中飛行器等高階設備，然而較高的鎳含量則需要更複雜和需控制的生產過程(Bibra et al., 2022; 楊絡懸, 2022)。鋰鈷鎳錳電池可依其鎳、錳和鈷的組成比例分為 NMC111(鎳:錳:鈷=1:1:1)、NMC532(鎳:錳:鈷=5:3:2)、NMC622(鎳:錳:鈷=6:2:2)、NMC811(鎳:錳:鈷=8:1:1)，目前鋰鈷鎳錳電池市佔率之百分比依次為 45%、30%、20% 以及 5%(Karabelli et al., 2020)。

磷酸鋰鐵電池(LFP)的市佔率近年出現了復甦的現象，從 2020 年的 7% 市佔率成長至 2021 年的 15%，並預期銷量在未來幾年將有大幅成長，能源顧問公司 Wood Mackenzie 預測磷酸鋰鐵電池的市佔率將在 2028 年超過三元系鋰

鈷鎳錳電池，並在 2030 年成長到 30%以上(Mackenzie, 2020)。磷酸鋰鐵電池的競爭優勢之一是它不含高價的鈷或鎳，而是使用低成本的鐵和磷所產生的成本優勢。此外，其組成物質更穩定更安全，具有更低的著火風險和更長的循環壽命，適合密集使用和頻繁充電，可應用於小型儲能系統和電動自行車、電動巴士等平價車款。磷酸鋰鐵電池面對的挑戰在於回收階段，其低成本的物質組成也意味著較低的回收價值，需透過直接回收的方式、監管機制介入干預或找尋替代的商業模式來進行回收處理(Bibra et al., 2022; 楊絡懸, 2022)。

表 2.3 市場上主要的電池類型之比較(Baum et al., 2022; 楊絡懸, 2022)

電池類型	三元系鋰鈷鎳錳電池(NMC)	三元系鋰鈷鎳鋁電池(NCA)	磷酸鋰鐵電池(LFP)
正極成份	$\text{LiCo}_x\text{Mn}_y\text{Ni}_{1-x-y}\text{O}_2$	$\text{LiAl}_x\text{Co}_y\text{Ni}_{1-x-y}\text{O}_2$	$\text{LiFePO}_4$
能量密度, Wh/kg	592-740	740	544
材料價格, \$(kWh)	40-50	39	32
電池價格, \$(kWh)	145-230	199	222
特色	能量密度高、重量輕 續航力長，充電效率高 短時間內輸出極端功率		安全性高 循環壽命長 材料環保、成本低
應用	電動工具車、電動跑車、賽車、電動飛機、空中飛行器、大型重機等高階設備。		電動自行車、電動巴士等平價車款。

賴俊諾(2017)的研究指出鋰電池中正極部分約占總重量之 35.0%、負極部分占約 24.0%、塑膠隔離膜占約 12.0%、金屬外殼占約 14.7%、其餘外包裝等殘留物占約 14.4%；正極材料中主要的金屬比重：鈷占 76.4%、鋰占 12.3%、錳占 6.34%、鎳占 4.55%、鋁占 0.296%、銅占 0.199%；正極材料中主要的金屬含量：

鈷為 695.4 mg/g、鋰為 111.6 mg/g、錳為 57.7 mg/g、鎳為 41.4 mg/g、鋁為 2.70 mg/g、銅為 1.82 mg/g，其他金屬僅占微量部分。

Bongartz 等(2021)彙整眾多文獻數據後取其平均值，整理出各種鋰電池每度電的金屬重量需求(kg/kWh)，如表 2.4 所示。

表 2.4 各種鋰電池組件的金屬需求(kg/kWh)

金屬	組件	NMC111	NMC532	NMC622	NMC811	NCA	LFP
鋰	正極	0.16	0.14	0.13	0.11	0.14	0.12
	電解液	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
鋁	正極	-	-	-	-	0.03	-
	集電器	0.46	0.46	0.46	0.46	0.44	0.47
	電池殼	0.24	0.24	0.24	0.24	0.21	0.24
錳	正極	0.37	0.35	0.20	0.09	-	-
鐵	正極	-	-	-	-	-	0.88
鈷	正極	0.40	0.23	0.21	0.09	0.16	-
鎳	正極	0.39	0.59	0.63	0.75	0.79	-
銅	集電器	0.83	0.83	0.83	0.83	0.84	0.88

### 2.3.3 國內電池產業概述

國內電池產業鏈可區分為上游的原料與零件組、中游的電池芯與模組以及下游的電源系統與應用(台灣電池協會, 2023)，分類整理如圖 2.1。

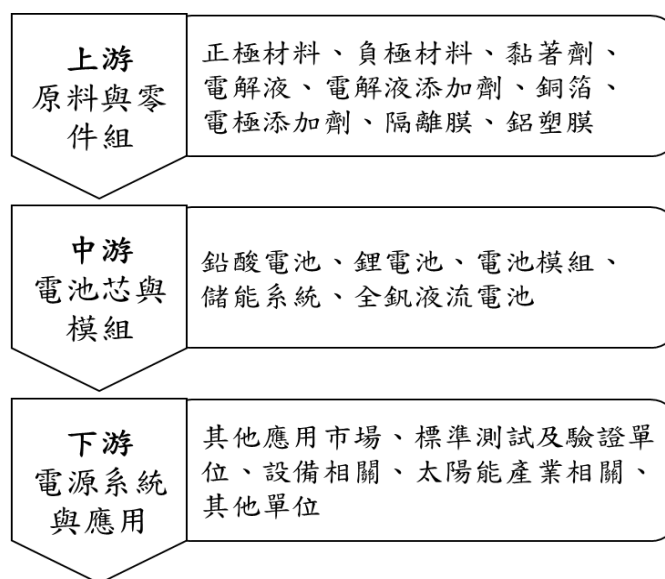


圖 2.1 電池產業鏈(台灣電池協會, 2023)

臺灣整體產業自 1970 年代的出口導向時期便奠定了深厚的製造組裝基礎，加上 1980 年新竹科學園區成立後所培育的電子產業豐沛人才與資源，使得臺灣的電池模組領域較原物料及電池芯領域更為蓬勃發展(王詠梅, 2020)。

工研院呂學隆於 2013 年的報告指出，臺灣廠商在電池模組組裝上於筆記型電腦和平板電腦市場具有國際領導地位，主要受到來自日韓電池芯廠商跨足電池模組組裝業務的競爭壓力，對於未來的產業發展建議擺脫現有的規模與價格競爭，改以產品開發的技術能力和應用端整合能力取勝。另外在材料與電池芯的出貨和銷售狀況仍有待發展，策略與動向上以針對未來鋰電池商機的增設新產能和市場拓展為主(呂學隆, 2013)。

王詠梅(2020)的研究訪問業界的資深先進，訪談結果發現臺灣因缺乏原物料且欠缺電化學高等教育，使得產業界的弱項在核心的電池芯製造，導致缺乏規格上的主導權。此外，面對電池回收再利用的國際趨勢，臺灣產業仍存在回收再利用的關鍵缺口，需要政府政策來帶動，產業也需要思考新的商業模式，跳脫製造思維，往應用端發展，自現有的商業模式延伸，考慮如何分工以發揮優勢、提升附加價值並創造競爭力(王詠梅, 2020)。



### 2.3.4 儲能單元管理策略

伴隨著電池產業的蓬勃發展和電池需求增長，未來也將產生大量電池廢棄物。國際能源署評估在 2019 年這一年所生產的電動汽車將產生 50 萬噸鋰電池廢棄物，到了 2040 年廢棄物總量可能高達 800 萬噸(Stone, 2021)。

透過推動電池回收再利用，可以減少對於礦物的需求、減緩礦物的儲備枯竭，並有助於確保安全、有彈性和永續的電動車供應鏈，國際能源署預期在 2030 年之後，回收再利用對於減緩礦產需求的貢獻至關重要(Bibra et al., 2022)。此外，廢棄鋰電池若沒有經過妥善處理將會對於人體和環境造成危害(如表 2.5)，如正極的鋰錳氧化物和鋰鈷氧化物等化合物氧化後所產生的重金屬污染、負極的碳材拆解過程產生的粉塵污染等。(Larsson et al., 2018; Y. Peng et al., 2020; 李洪枚 & 姜亢, 2004; 蔡明瞭 et al., 2013; 賴俊諾, 2017)。磷酸鋰鐵電池最主要的污染源是電解液，其化學物質  $\text{LiPF}_6$  和  $\text{LiBF}_4$  在水中容易分解為有毒氣體  $\text{PF}_5$  和  $\text{HF}$ (Q. S. Wang et al., 2007; Wiemers-Meyer et al., 2016)。有毒金屬會累積在環境中，透過生物累積和生物放大效應對生物造成傷害，磷進入水體也可能導致優養化現象。回收再利用有助於減少電池可能產生的毒性化學物質和污染(M. Wang et al., 2022)。

表 2.5 鋰電池各部位材料可能造成之污染(李洪枚 & 姜亢, 2004)

電池部位	潛在污染
正極材料	鋰和鈷等重金屬污染、環境 pH 上升
負極材料	粉塵污染、環境 pH 上升
電解質溶劑	醛、酮、酸等有機污染
電解質	氟污染
隔離膜	有機物污染
黏合劑	氟污染

目前超過三分之二的回收處理量能集中在中國，而歐洲和東亞便佔了大約90%的回收處理量能(Baum et al., 2022)。大多數電池回收公司都是獨立的回收商，但原始設備製造商、電池製造商、採礦商和加工商也開始進入市場。鋰離子電池回收的主要方法有以下三種：火法冶金(Pyrometallurgy)、濕法冶金(Hydrometallurgy)和直接回收(Direct recycling)(Bibra et al., 2022)。

火法冶金利用加熱將電池中使用的金屬氧化物轉化為金屬或金屬化合物以回收有價值的金屬。經過在拆解、切碎或壓碎等前處理過程後，電池可以直接放入高溫熔煉爐，無需分離陰極或陽極層。爐中在真空或惰性氣體的環境下進行加熱，將金屬氧化物轉化為混合金屬合金和含有鋰的礦渣，隨後再從冶煉過程中產生的金屬合金進行精煉以生產金屬，流程如圖 2.2 所示。火法冶金是一種簡單的技術，能夠適應各種電池，並且相對容易擴大規模，目前已在商業規模上使用。然而，火法冶金需要投入相當大的能量，而且在加熱過程中會釋放出有害氣體、造成二次污染，需要氣體淨化設備以避免有害氣體的排放影響(Baum et al., 2022; Harper et al., 2019; Jena et al., 2021; Mayyas et al., 2019; Raj et al., 2022; Vinayak et al., 2023)。

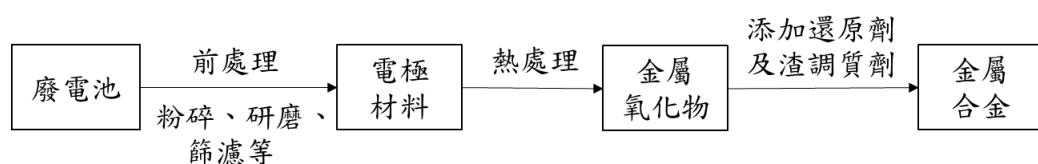


圖 2.2 火法冶金處理流程(Jena et al., 2021)

濕法冶金方法主要使用水溶液從電池中提取和分離有價值的金屬。電池先經過前處理、分離陰極材料，然後使用適當的試劑溶解或浸出，隨後使用化學沉澱、離子交換、溶劑萃取和電化學氧化還原等方式從水溶液中分離、提取和純化有價值的金屬(Baum et al., 2022; Raj et al., 2022; M. Wang et al., 2022)，流程如圖 2.3 所示。與火法冶金相比，濕法冶金因其輸入酸的量較少、廢棄物產生量少、金屬選擇性高和成本低而被認為更具永續性(Sethurajan et al., 2019)。濕

法冶金的缺點包含用水量的需求，以及對於其使用的化學品和排放的廢水所需要的處理措施(Mayyas et al., 2019; Vinayak et al., 2023)，另外也有研究指出濕法冶金過程會釋放大量的溫室氣體，估計每處理一公斤的回收電池會排放約 7 到 9 公斤的二氧化碳(Ciez & Whitacre, 2019)。

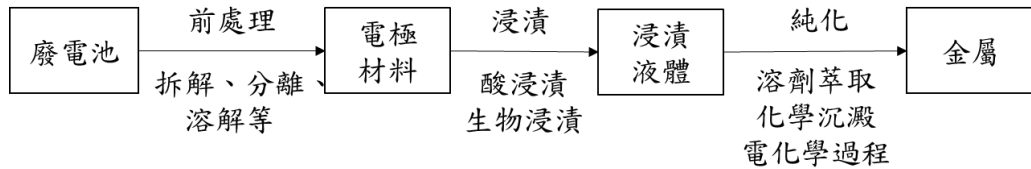


圖 2.3 濕法冶金處理流程(Jena et al., 2021)

直接回收不使用化學方法將電極分解、不需將材料溶解和提煉，而是保留其材料的晶體結構並再生陰極材料。直接回收先通過使用物理分離方法、磁分離和熱處理來分離電池，然後通過再鋰化或水熱過程修復回收的活性材料和缺陷。，流程如圖 2.4 所示。與火法冶金和濕法冶金相比，直接回收方法是較為簡單的回收方法，正極材料再生後可直接重複使用，它的排放量和二次污染也較少。然而，直接回收方法必須針對每種陰極進行客制處理，並且回收的陰極只能用於生產相同類型的電池，使用上較不靈活(Bibra et al., 2022; Jena et al., 2021; Montoya et al., 2022; Zhou et al., 2020)。

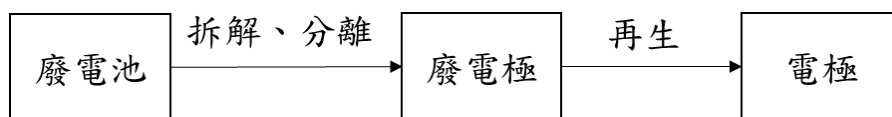



圖 2.4 直接回收處理流程(Zhou et al., 2020)

火法冶金、濕法冶金和直接回收的優缺點比較如表 2.6。目前大多數電池的回收是使用火法冶金和濕法冶金相結合的作法，因為它們非常適用於分類不良的電池原料，也適合用於回收昂貴的金屬，特別是鎳和鈷，此外還有銅和鋁。對於含有較少貴重金屬的磷酸鋰鐵電池而言，難以從回收鐵和磷獲利，因此適合直接回收的方法，或者需要藉由監控進行干預，或是找出替代的商業模式(Bibra et al., 2022)。

表 2.6 鋰電池回收方法之優劣比較與挑戰(Mayyas et al., 2019; Zhou et al., 2020)

	優點	缺點	挑戰
火法冶金	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 適用於任何電化學和配置</li> <li>▪ 不需要進行機械預處理</li> <li>▪ 操作簡單、流程短、效率高</li> <li>▪ 不需要區分電池類型；不要求輸入物的類別和尺寸</li> <li>▪ 金屬的回收率高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 需要進行空氣清潔，以避免有毒空氣排放</li> <li>▪ 能源密集；高能量消耗</li> <li>▪ 需要進一步精煉，從熔煉過程中產生的金屬合金中生產出元素金屬</li> <li>▪ 無法回收鋰和錳</li> <li>▪ 回收效率低</li> <li>▪ 廢氣較多，廢氣處理成本高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 降低能源消耗和污染排放</li> <li>▪ 降低環境風險</li> <li>▪ 良好地結合濕法冶金</li> </ul>
濕法冶金	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 適用於任何電化學和配置</li> <li>▪ 在分離和回收過程具有靈活性，可針對特定金屬進行處理</li> <li>▪ 高回收率</li> <li>▪ 產品純度高</li> <li>▪ 與火法冶金相比，能源效率高</li> <li>▪ 無較少廢氣排放</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 必須粉碎電池</li> <li>▪ 有更多廢水，需要回收或處置大量的過程排放物</li> <li>▪ 較長的過程時間</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 廢水處理</li> <li>▪ 優化過程</li> </ul>
直接回收	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 幾乎所有電池材料都可以回收利用</li> <li>▪ 較短的回收路線</li> <li>▪ 低能量消耗</li> <li>▪ 環境友好</li> <li>▪ 高回收率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 需要進行機械預處理和分離處理</li> <li>▪ 高操作和設備要求</li> <li>▪ 回收的材料性能可能不如原材料</li> <li>▪ 混合正極材料可能會降低回收產品的價值</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 降低回收成本</li> <li>▪ 降低對物品類別的要求</li> <li>▪ 進一步優化產品性能</li> </ul>



除了上述的回收方法，Gaustad 等人(2018)的研究通過文獻回顧與案例研究分析循環經濟策略對於降低關鍵物料風險的成效，提出了五種基於循環經濟的緩解策略：回收、再製造和再利用(Recycling, remanufacturing, and reuse)；收集(Collection)；精簡原則(Lean principles)；非物質化(Dematerialization)；多樣化(Diversity)。該研究結果顯示，實施這些策略可以降低風險；例如回收利用可以為關鍵物料提供內部來源。就及時製造而言，它既可能加劇供應問題，也有可能改善供應問題。除了降低風險之外，還存在其他可量化的次要效益，例如經濟面的節約、能源消耗的減少以及通過增強供應鏈監督來改善企業社會責任。

近年工研院的研究團隊在探討對於車用電池階梯式再利用的方式：將使用 5 至 6 年、電池健康狀態衰退到 80%以下，因而不適合應用於動力載具上的汰役電池，進行淘汰回收或轉作為其他如不斷電設備或儲能系統等用途。將舊電池在不同的場域階梯式再利用，需要更多的示範驗證來確認其安全性和技術可行性，也需要考量到在整個生命週期的各階段使用，並透過有效的管理政策來進行引導，以延長電池的使用壽命(黃建中 et al., 2019)。

## 第三章 研究方法



### 3.1 研究流程

本研究的主要目的是建立考量 ESG 的關鍵物料評估模型，並以此模型找出儲能單元的關鍵物料，最後根據其關鍵性提出管理策略並分析其成效。本研究參考眾多關於公司層級關鍵物料評估方法的文獻，決定以考量到決策模糊性的模糊層級分析法為主軸進行關鍵物料評估模型的建構：先透過文獻回顧及問卷方法篩選出指標，再經過模糊層級分析法的模糊數變換後得到各個指標的權重，並依據文獻與專家建議建立指標的評分方法。研究流程及步驟簡述如圖 3.1 所示：

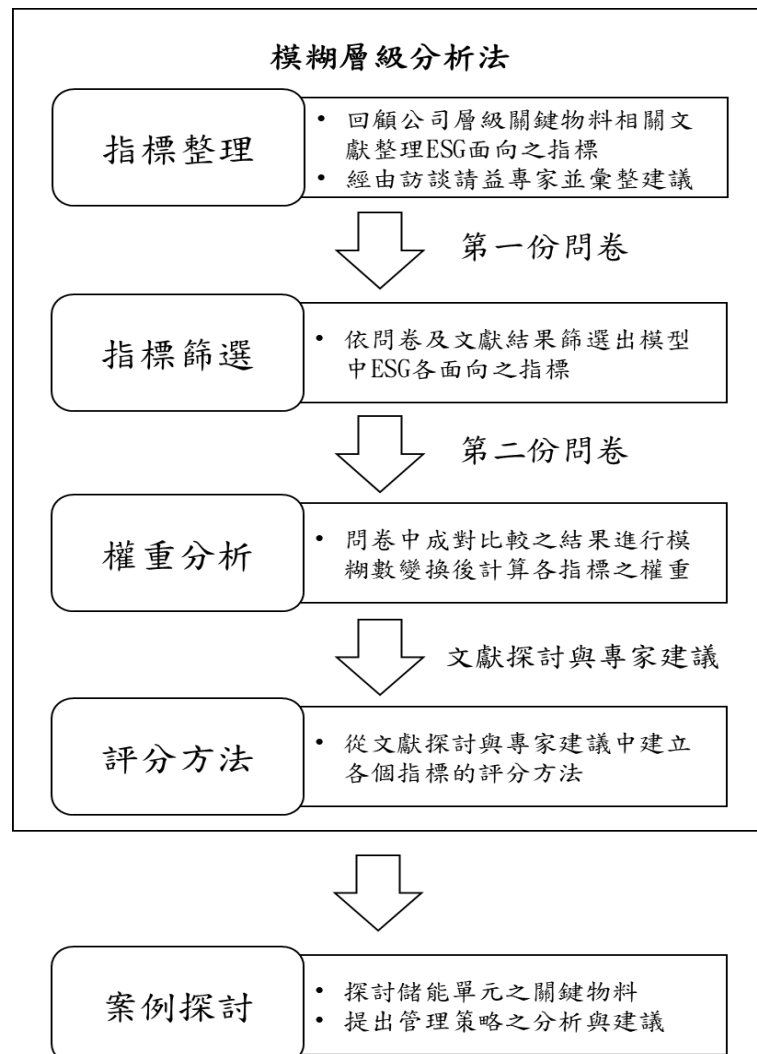


圖 3.1 研究流程圖



### 3.2 傳統層級分析法(AHP)

#### 3.2.1 傳統層級分析法(AHP)之介紹

層級分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)是多準則決策方法的其中一種方法，由匹茲堡大學教授 Thomas L. Saaty 於 1971 年發展出來，應用在具有多個評估準則和不確定性的複雜決策問題。AHP 能夠將複雜的問題系統化，由不同的層面分解層級，並透過量化的判斷加以評估，協助決策者獲得充分的資訊以評估方案，並減少決策風險(鄧振源, 2012)。

AHP 透過建構決策問題的層級結構(如圖 3.2)，以瞭解系統中不同層級、層級中各個要素的相互影響，以及整個系統的衝擊，但需注意層級內的要素不宜超過 7 個。接著對各層級之要素進行兩兩比較並整理為成對比較矩陣之形式，經運算得該矩陣的特徵向量，代表層級中某層次各要素之優先程度，再進一步求得特徵值，用於評定每個成對比較矩陣填答邏輯的一致性程度。如果一致性檢定不通過，則不採用該矩陣所計算出來的決策優先順序；如果通過一致性檢定，則可以採用以計算結果。使用這種方式來判斷決策方案相對重要性之優先順序，進而作為決策分析的參考權重，以幫助決策者進行重要性排序或選擇最佳方案(王儷涵, 2021; 鄧振源, 2012)。

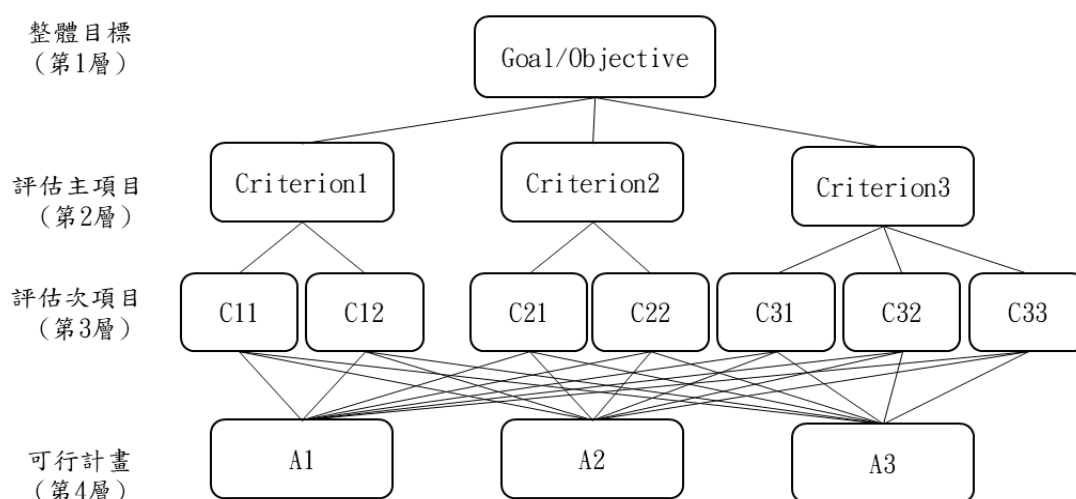


圖 3.2 AHP 層級結構例示(Russo & Camanho, 2015; 鄧振源, 2012)

### 3.2.2 傳統層級分析法(AHP)之應用流程



Saaty(2008)提出為了以組織化的方式產生優先順序，需要將決策分解為以下步驟：

1. 定義問題並決定所需知識的種類。
2. 從決策目標 (goal) 的頂部構建決策層次結構，然後是廣義目標 (objectives)，再通過中間級別 (後續元素所依賴的標準) 到最低級別 (通常是決策方案的組合)。
3. 構造一組成對比較矩陣。每個上層的元素用於比較緊鄰下層中的元素。
4. 使用從比較中獲得的優先次序來權衡緊接在下一級的優先次序。並對每個元素都這樣做。然後為下面級別中的每個元素添加其加權值並獲得其總體優先次序。繼續這個權衡和添加的過程，直到獲得最底層決策方案的最終優先次序。

鄧振源(2012)提出當應用 AHP 方法處理決策問題，且用問卷方式調查多數決策者或專家學者的偏好判斷時，建議的程序(詳如圖 3.3 所示)：

#### 步驟一：界定決策問題

依據決策問題納入可能會影響的要素。此時成立規劃小組以蒐集資訊並界定決策問題的範圍。

#### 步驟二：組成決策群體

依據決策問題的領域和複雜度，邀請相關的專家以成立決策群體，人數以 5 至 15 人較佳。

#### 步驟三：構建層級結構

將規劃小組整理的相關資訊，提供給決策群體參考，透過腦力激盪會議找出影響決策的系統要素，包括目標、層面及可行方案等。然後將要素之內涵或定義彙整後，再次透過決策群體會議使用腦力激盪法決定層級結構。另外也可以透過明示結構法或群體偏好整合

方法建構層級。

此外，在人們難以同時對七種以上事物進行比較的假設下，每一層級的要素不應超過七個。假若複雜的問題有  $n$  個要素，利用成對比較而獲得的比例尺度，總共需作  $n(n-1)/2$  個判斷；在最大要素個數為 7 個以下，則可進行合理的比較，同時可以保證其一致性。因此，有效的層級數可用  $n/7$  估計；如此的層級結構，可易進行有效的成對比較，且可獲得較佳的一致性。

#### 步驟四：設計問卷與調查

以每一層級要素在上一層級某一要素作為評估基準下，藉由成對比較的格式，以 1-9 的評估尺度(意義如表 3.1 所示)設計成問卷型式，且必須清楚描述每一個成對比較問題，以協助專家判斷。

在這裡之所以選擇 1-9 評估尺度的原因如下：Miller(1956)的研究指出人們的短期記憶對於保存和處理信息有一定的容量限制。他這個容量通常在七個左右，大約上下浮動兩個。Satty 採用最高限的 9，並對於 1-9 尺度的有效性透過實驗加以驗證，發現 1-9 尺度的誤差均方根和中位數絕對誤差最小，亦能提供較佳的一致性測試(Satty, 1980; 鄧振源, 2012)。

表 3.1 AHP 評估尺度(鄧振源, 2012)

評估尺度	定義	說明
1	同等重要 (Equal Importance)	兩方案的貢獻程度具同等重要性 等強 (Equally)
3	稍重要 (Weak Importance)	經驗與判斷稍微傾向喜好某一方案 稍強 (Moderately)
5	頗重要 (Essential Importance)	經驗與判斷強烈傾向喜好某一方案 頗強 (Strongly)
7	極重要 (Very Strong Importance)	實際顯示非常強烈傾向喜好某一方案 極強 (Very Strong)

9	絕對重要 (Absolute Importance)	有足夠證據肯定絕對喜好某一方案 絕強 (Extremely)
2、4、6、8	相鄰尺度之中間值 (Intermediate values)	須要折衷值時。

步驟五：檢定成對比較判斷與權重計算(王儷涵, 2021; 褚志鵬, 2009)

根據問卷結果可以得到許多成對比較矩陣，成對比較矩陣的建構說明如下：

將  $n$  個要素兩兩比較的結果置於成對比較矩陣  $A$  的上三角形，主對角線為要素自身與自身的比較，故為 1，而下三角形的數值為上三角形相對位置數值的倒數。即  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ，如式 3.1 所示：

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & a_{ij} \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & \cdots & 1/a_{ij} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{式 3.1}$$

接著可以依據各個成對比較矩陣的資料，進行特徵值和特徵向量的計算，以了解各層級要素之間的相對重要程度及權重關係。若資料一致的話，可將成對比較矩陣表示如式 3.2：

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{W_1} & \frac{W_1}{W_2} & \cdots & \cdots & \frac{W_1}{W_j} \\ \frac{W_2}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \cdots & \cdots & \frac{W_2}{W_j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \frac{W_i}{W_j} \\ \frac{W_j}{W_1} & \frac{W_j}{W_2} & \cdots & \frac{W_j}{W_i} & \frac{W_j}{W_n} \end{bmatrix} \quad \text{式 3.2}$$

$$\text{其中 } a_{ij} = \frac{W_i}{W_j}, \text{ 可得權重向量 } \tilde{W} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix}, i, j=1, 2, 3 \cdots n$$

$$\text{因 } a_{ij} \cdot \frac{W_j}{W_i} = \frac{W_i}{W_j} \cdot \frac{W_j}{W_i} = 1, \quad i, j=1, 2, 3 \cdots n \quad \text{式 3.3}$$



故  $\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot \frac{W_j}{W_i} = 1, \quad i, j=1, 2, 3 \dots n$  式 3.4

也可以表示為  $\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot W_j = n \cdot W_i, \quad i, j=1, 2, 3 \dots n$  式 3.5

若將成對比較矩陣 A 乘上權重向量  $\tilde{W}$ ，則會得到  $n\tilde{W}$  之值，

即式 3.6。

$$A \cdot \tilde{W} = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{W_1} & \frac{W_1}{W_2} & \dots & \dots & \frac{W_1}{W_j} \\ \frac{W_2}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \dots & \dots & \frac{W_2}{W_j} \\ \frac{W_3}{W_1} & \frac{W_3}{W_2} & \dots & \dots & \frac{W_3}{W_j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \frac{W_i}{W_j} \\ \frac{W_j}{W_1} & \frac{W_j}{W_2} & \dots & \frac{W_j}{W_i} & \frac{W_j}{W_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nW_1 \\ nW_2 \\ \vdots \\ nW_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = n \cdot \tilde{W}$$

式 3.6

由上式得知， $A \cdot \tilde{W} = n \cdot \tilde{W}$  可表示為： $(A - nI) \cdot \tilde{W} = 0$  式 3.7

步驟六：檢定一致性

由於層級與因素眾多，使得決策者在進行成對比較時要達成前後一致是相當困難的，故需要進行一致性檢定，並透過一致性指標 (Consistency Index, CI) 檢查決策者或專家的判斷是否滿足一致性，一致性指標的公式如式 3.8，Satty(1980)建議  $CI < 0.1$  最佳。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

式 3.8

根據 Oak Ridge National Laboratory 與 Wharton School 進行研究，由評估尺度 1-9 所產生的成對比較矩陣，在不同階數(Order)會產生不同的 CI 值，稱為隨機指標(Random Index, RI)，此研究中矩陣階數為 1~11 的 RI 值是以 500 個問卷樣本所求得的 CI 平均值；階數為 12~15 的 RI 值則是使用 100 個問卷樣本所求得的 CI 平均值，研究結果如表 3.2：

表 3.2 隨機指標表(鄧振源, 2012)

階數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.58

在相同階數的矩陣下，CI 值與 RI 值之比率，為一致性比率 (Consistency Ratio, CR)，即：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{式 3.9}$$

若  $CR < 0.1$  時，則矩陣的一致性令人滿意。若有成對比較矩陣不符合一致性時，表示專家的判斷有混淆的現象，則需請專家重新判斷直至符合一致性的要求為止。在實務上建議人員直接訪問專家，並當場檢定專家填答的一致性，使問卷都是有效的問卷。

除了單一評估基準下判斷矩陣外，也需檢定整體層級結構的一致性(Consistency Ratio of the Hoerarchy, CRH)，如果整個層級結構的一致性不符要求時，顯示層級要素間的關聯性有問題，必須重新進行層級要素的關聯分析。

#### 步驟七：整合專家偏好

當多位專家群體進行決策時，由於各個領域的專家其偏好不同，所得到成對比較的判斷值也會不同，最後所得到的權重也會不同，便需要進行專家偏好的整合，可區分為事前整合與事後整合，事前整合以幾何平均法與多數決法較佳；事後整合法以算數平均法應用較多。

#### 步驟八：決定最適計畫或方案

符合一致性的要求後，便可決定各層級要素在最終目標下的優勢權重。最後一層可行計畫或方案的優勢權重表示在整體層級所有要素考量之下的重要程度，優勢權重越大者，表示該計畫或方案越重要，藉此決定計畫或方案的優劣順序。

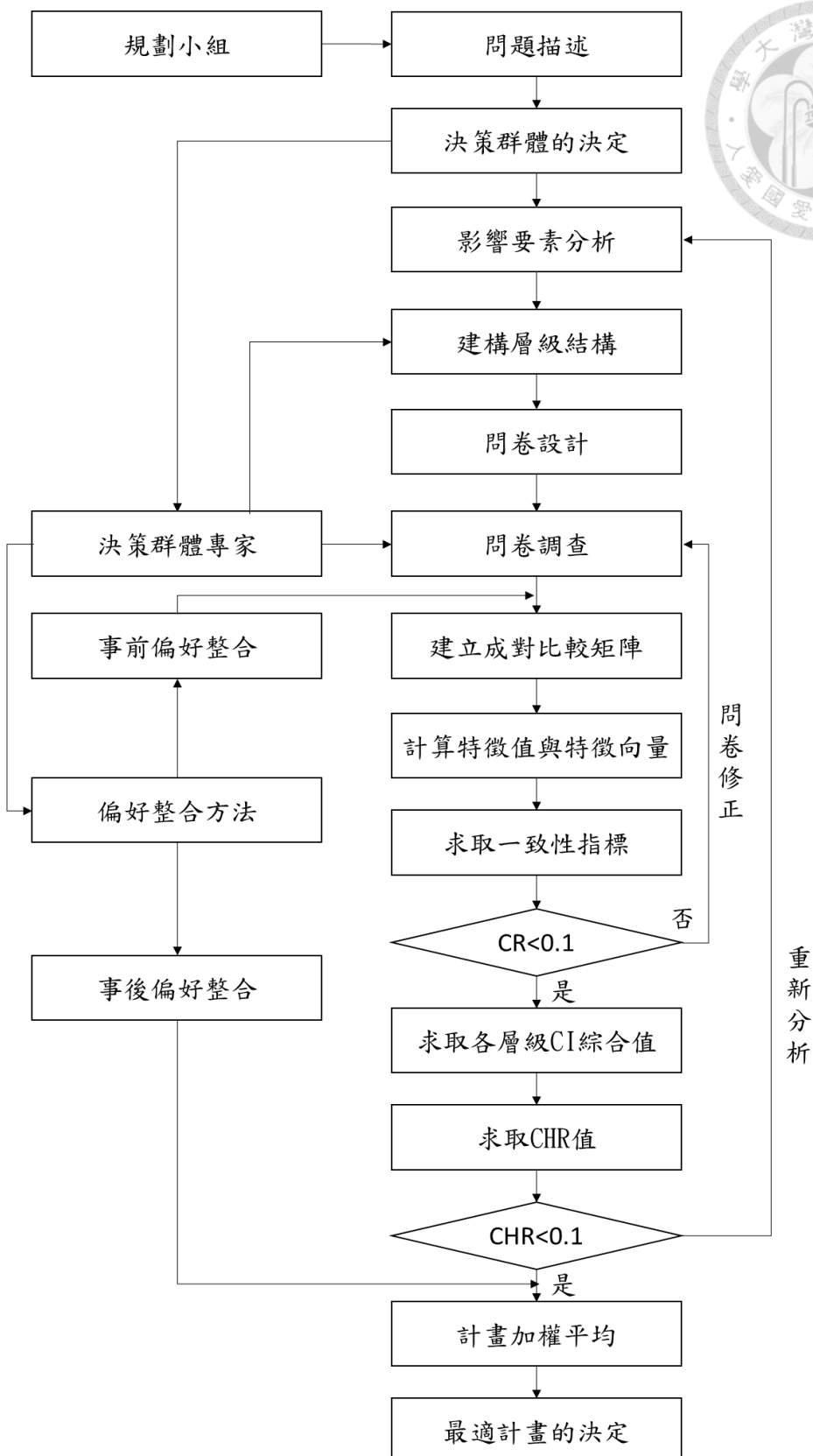


圖 3.3 AHP 方法分析的流程圖(鄧振源, 2012)

### 3.2.3 傳統層級分析法(AHP)之優缺點

AHP 主要應用於從一組可行方案中選擇一個最能滿足標準的方案，或是用來判定層級要素的權重與優先順序。AHP 之優缺點整理如表 3.3。為了改善 AHP 方法的缺點，也有許多學者對於 AHP 進行方法學上的修改或是以 AHP 為基礎結合其他演算方法做改良，例如本研究所使用的模糊層級分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)。

表 3.3 AHP 優缺點之整理表(Oguztimur, 2023; 鄧振源, 2012)

優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"><li>• AHP 提供了簡單且非常靈活的模型。</li><li>• AHP 可以幫助決策者準確地做出判斷。</li><li>• 客觀或主觀的考慮、定量或定性的資訊在決策過程中起著重要作用。</li><li>• 可以在此方法中列出或構建有關任何主要焦點層級的詳細信息。通過這種方式，可以很容易地表示主要焦點或問題的概述。</li><li>• AHP 具有非常廣泛的用途。</li><li>• AHP 依賴於來自不同背景的專家的判斷；因此可以從不同方面評估問題。</li><li>• 決策者可以通過應用敏感性分析來分析最終決策的彈性。</li><li>• 可以衡量決策者判斷的一致性。</li><li>• 可以利用電腦軟體幫助決策者快速準確地應用層次分析法</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 判斷的感覺量模糊。</li><li>• 1-9 尺度過於細瑣。</li><li>• 歸一化的方法受到質疑。</li><li>• 獨立性的假設在實際計畫中較為困難。</li><li>• 即使對於一個小問題，計算需求也是相當巨大。</li><li>• AHP 只允許使用三角模糊數。</li><li>• 排名反轉的有效性仍在文獻中討論。</li><li>• AHP 具有主觀性的建模過程是 AHP 的一個限制。這意味著該方法不能保證決策絕對正確。</li><li>• 當層次結構中的層數增加時，配對比較的次數也隨之增加，在構建 AHP 模型時需要花費更多的時間和精力。</li></ul>

### 3.3 模糊層級分析法(FAHP)

傳統的層級分析法是一種功能強大的結構化方法，適用於組織和分析複雜的決策問題，然而現實中決策者的偏好和判斷經常存在模糊和矛盾之處，但層級分析法的明確值(crisp number)無法準確描述不完整資訊的情境，因而被認為缺少對於不確定情況的考量，因此有必要通過結合模糊理論(fuzzy theory)的模糊層級分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)來應對問題中的不確定性和模糊性，以達到更好的評估效果(Aliyev et al., 2020; Mahad et al., 2019)。

模糊理論是 Zadeh 教授在 1965 年發表的理論，為了探索可能用於處理現實世界中沒有精確定義事物類型的方法，於是將 0 和 1 兩個值擴展為[0,1]的區間連續值函數，稱之為隸屬函數(membership function)，以此表示中間沒有明確的概念，這是一種使用明確而嚴謹的數學方法來描述模糊現象的理論(Zadeh, 1965; 楊敏生, 1994)。

Van Laarhoven 與 Pedrycz 於 1983 年提出了模糊層級分析法，將模糊理論和層級分析法結合，透過三角模糊數來表示兩要素間的相對重要程度，先為決策標準找出模糊權重，其次再為每個決策標準下的方案找到模糊權重。透過這些結果的適當組合，可以獲得方案的模糊分數以及敏感性，於是決策者能夠使用這些模糊分數來選擇方案(van Laarhoven & Pedrycz, 1983)。

三角模糊數(triangular fuzzy numbers)是解決不確定性環境下決策問題的有效方法，透過最小值、最可能值和最大值來表示模糊的判斷。Sun 等(2019)將三角模糊數表示如式 3.10，其中參數  $l$  表示最小值，參數  $u$  表示最可能的值，參數  $m$  表示最大值，圖 3.4 顯示了三角模糊數的隸屬函數。建立模糊評估矩陣之後，其中的兩個三角模糊數  $P_1=(l_1, m_1, u_1)$  和  $P_2=(l_2, m_2, u_2)$  可以表示如圖 3.5(G. Peng et al., 2021)。

$$P = (l, u, m) \quad \text{式 3.10}$$

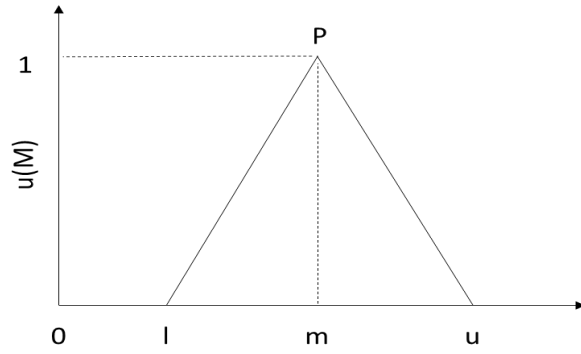


圖 3.4 三角模糊數(G. Peng et al., 2021)

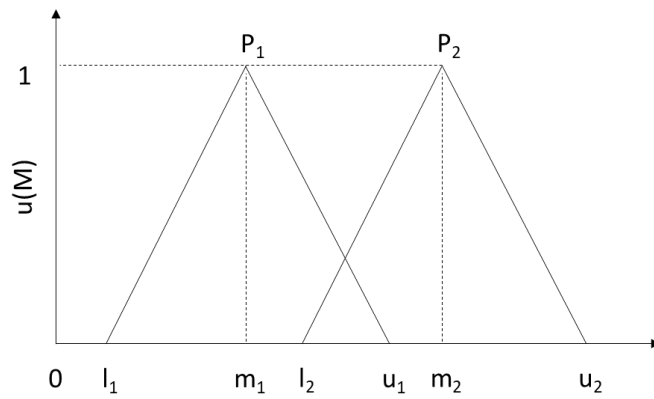


圖 3.5 模糊評價矩陣中兩個三角數之間的隸屬函數(G. Peng et al., 2021)

模糊層級分析法的執行程序與傳統的層級分析法相當相似，在確認專家判斷滿足一致性後，將成對比較矩陣的數值依表 3.4 轉換為模糊數(Kannan et al., 2013)，接著以 Buckley(1985)所提出的模糊幾何平均法(Fuzzy Geometric Mean, FGM)來計算模糊權重。

表 3.4 語意變數轉換表(Kannan et al., 2013)

語意變數	評估值	模糊數
極強(Extremely strong)	9	(9,9,9)
中間(Intermediate)	8	(7,8,9)
非常強(Very strong)	7	(6,7,8)

中間(Intermediate)	6	(5,6,7)
強(Strong)	5	(4,5,6)
中間(Intermediate)	4	(3,4,5)
中等強(Moderately strong)	3	(2,3,4)
中間(Intermediate)	2	(1,2,3)
同等重要(Equally strong)	1	(1,1,1)

模糊層級分析法的計算步驟如下(Buckley, 1985; Mathew, 2018)：

1. 由式 3.11 計算每一排的模糊幾何平均值：

$$\tilde{r}_i = (\prod_{j=1}^m a_{ij})^{1/m} \quad \text{式 3.11}$$

2. 以式 3.12 為計算基礎，由式 3.13 計算每一排的模糊權重：

$$\widetilde{A}_1 \otimes \widetilde{A}_2 = (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 * l_2, m_1 * m_2, u_1 * u_2) \quad \text{式 3.12}$$

$$\widetilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad \text{式 3.13}$$

3. 由式 3.14 計算每一要素的權重：

$$w_i = \left( \frac{l+m+u}{3} \right) \quad \text{式 3.14}$$

4. 由式 3.15 將權重標準化：

$$w'_i = \left( \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad \text{式 3.15}$$

### 3.4 評估模型之指標整理

Graedel 等人認為(2012)對關鍵性進行適當的綜合評估涉及整合來自廣泛不同專業的資訊和數據來源，例如來自技術、經濟、人類行為、專家評估等來源。因此本研究透過博覽眾多文獻整理與公司層級關鍵物料相關的指標，並計算其引用的頻率：談及環境面向指標的文獻有 8 篇，共有 24 種指標，其中使用 ReCiPe

方法計算的人體健康和生態系統指標被引用最多次，各有 6 次；談及社會面向指標的文獻有 4 篇，共有 21 種指標，其中衝突、貪汙、童工和強制勞役的指標被引用最多次，各有 2 次；談及治理面向指標的文獻有 12 篇，共有 57 種指標，引用次數較多的是替代性與回收性，分別有 12 次及 8 次。引用次數較多的指標會進行第一次問卷的指標篩選，被納入的指標與其被文獻引用次數之整理如表 3.5 所示：

表 3.5 指標與文獻引用次數之整理

面向 (提及之 文獻 數)	指標	Duclos et al. (2008)	Gradel et al. (2012)	Bensch et al. (2015)	Helbig et al. (2016)	Lapko et al. (2016)	Hallstedt and Isaksson (2017)	Kolotzek et al. (2018)	Knobloch et al. (2018)	Griffin et al. (2019)	Kim et al. (2019)	Bongartz et al. (2021)	APPLE Inc. (2019)	Total
(8)	環境 人體健康		V	V		V		V		V		V		6
	生態系統		V	V		V		V		V		V		6
(4)	社會 衝突因素						V						V	2
	童工							V					V	2
	強制勞役							V					V	2
	貪汙							V					V	2
	生活環境							V						1
	工作環境							V						1
	工作時數							V						1
(12)	治理 替代性	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	12
	回收性			V	V	V	V	V	V		V		V	8

面向 (提及之 文獻數)	指標	Duclos et al. (2008)	Graedel et al. (2012)	Bensch et al. (2015)	Helbig et al. (2016)	Lapko et al. (2016)	Hallstedt and Isaksson (2017)	Kolotzek et al. (2018)	Knobloch et al. (2018)	Griffin et al. (2019)	Kim et al. (2019)	Bongartz et al. (2021)	APPLE Inc. (2019)	Total
	國家生產集中度			V		V		V	V		V		V	6
	國家政治穩定度			V			V	V	V		V		V	6
	創新能力		V		V	V			V			V		5
	公司生產集中度			V	V	V		V	V					5
	未來需求變化			V		V			V		V			4
	現在供需平衡				V			V	V					3
	對於收入之影響	V	V						V					3

### 3.5 問卷設計及調查對象

本研究共發放兩次問卷以蒐集關鍵物料評估模型之建構資料，問卷發放的管道為電子郵件與通訊軟體群組，對象為儲能產業相關的專家與高階主管，因其對於儲能領域的專業能力以及熟悉公司對於 ESG 永續發展的看法，能夠協助本研究獲得業界視角的寶貴見解。以下將對於兩次問卷進行說明：

#### 3.5.1 篩選指標之第一次問卷

由於從未有從 ESG 角度來探討關鍵物料的評估作法、文獻中從公司層級

評估關鍵物料的方法也各有不同，至今尚未有統一的、較具公信力的評估方式。因此，為了更能反映出企業視角的見解並貼近企業真實的需求，本研究希望透過邀請儲能領域專家填寫問卷的方式來篩選出構成關鍵物料評估模型的指標，與專家進行三次會議進行討論與調整後的問卷如附件一所示。

問卷的第一部份是關於基本資料與公司治理的部份，首先請填答者填寫公司的類型是屬於上游、中游或是下游類型的公司。因為物料未必是填答者會直接聯想到的目標，為了避免討論目標的混淆，於是先詢問公司相關之儲能單元以及選擇這些儲能單元產品所考量的關鍵因素，接著再詢問對於上述儲能單元中所使用的物料(如鋰、鈷…等)認為重要的關鍵因素，隨後詢問假如公司未來轉換產品將選擇的儲能單元以及所考量的關鍵因素、未來轉換上述儲能單元中所使用的物料認為重要的關鍵因素。在這裡依專家建議採用勾選方式讓填答者選擇重要的大方向及其細項，並將文獻中關於治理的指標以較直覺、口語化的敘述呈現，此外也加入了專家建議的關鍵因素。

問卷的第二部份則是描述了本研究所整理的關鍵物料定義：對企業策略及經濟影響極大、承擔如供應斷鏈等風險極大，以及對於環境及社會衝擊極大的物料，並詢問對於關鍵物料定義的了解程度，使填答者更清楚問卷所希望探討的主題。

第三部份開始請填答者對於影響社會層面的指標給予重要性評分，採用 1-5 的尺度：由 1 表示非常不重要至 5 為非常重要。問題包括文獻中關於社會層面的指標，也納入了專家建議重要的社會層面指標，共有十題及一題簡答建議其他關於社會重要的因素。

本研究對於環境層面預期將採用生命週期影響評估的人體健康和生態環境，因此在本問卷僅詢問是否有無其他關於環境重要因素的建議。問卷的最後以詢問任何其他的想法或建議作結。



### 3.5.2 分析權重之第二次問卷

第二次問卷則是對於第一次問卷所篩選出的指標進行相對重要性的成對比較，以進行模糊層級分析的權重分析。然而，比較量尺受到了線上問卷格式的限制，只能將原先的評估尺度數值進行調整(如表 3.6)，並以滑桿的方式填答。為了讓填答者瞭解如何進行，在各個部份都會先對於面向(社會、治理)和各個指標進行描述、清楚說明數值所代表的重要程度意義、解釋負數在這裡不代表負面意涵，並提出三個比較的範例作為填答時的參考。問卷如附件二所示。

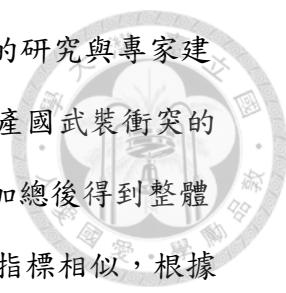
表 3.6 線上問卷進行成對比較的調整

指標 A	極度 重要	非常 重要	重要	稍微 重要	同等 重要	稍微 重要	重要	非常 重要	極度 重要	指標 B
評估 尺度	9	7	5	3	1	3	5	7	9	評估 尺度
調整 數值	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	調整 數值

### 3.6 各指標評分方法之建立

完成篩選指標與分析權重後，本研究從文獻探討與專家建議中確立各項指標的評分方法：

環境面向指標的評分方法依據 Bensch 等人(2015)研究的作法，採用生命週期影響評估中 ReCiPe Endpoint 之方法，並選用 Ecoinvent 資料庫的資料進行分析。分析完成後可以找出物質的三種終點：人體健康、生態系統、資源耗用的損害評估，將不同區間的損害評估數值加總後即為該物質整體的損害評估數值，若損害評估數值越高，則表示對於環境的衝擊越大，關鍵程度越高，企業需特地留意該物質。



社會面向指標的評分方法主要是參考 Kolotzek 等人(2018)的研究與專家建議的做法。武裝衝突指標的評分是根據文獻與資料給予各個生產國武裝衝突的評分:0 分為無衝突資訊、100 分為武裝衝突，再乘上生產比例加總後得到整體的衝突指標分數。童工指標及強迫勞役指標的評分方法與衝突指標相似，根據文獻與資料顯示若有童工或強迫勞動的狀況則給予分數，乘上各國生產比例加總後得到整體的分數。遵守勞工權利、生活環境和工作環境三個指標的量化資料分別採用永續發展報告(Sustainable Development Report)裡 SDG8「勞工基本權利得到有效保障評分」、SDG3「全民健康覆蓋 (UHC)指數」以及 SDG8「致命工傷事故評分」，經過適當轉換，再乘上各國生產比例加總後可以得到這些指標的關鍵性評分。社會面向指標反映著該物質生產國的社會狀況，若容易出現衝突、有使用童工或強迫勞役現象、不遵守勞工權利、生活環境和工作環境惡劣，除了本身社會動盪造成的供應風險，這些社會議題也容易引起國際關注，可能會帶來進一步的供應規範與限制，並對企業的名聲產生不良影響。

治理面向指標的評分方法則是參照各項指標的來源文獻。物料成本指標所採用的量化數據為「物料所需量\*物料單位成本/電池總成本」，代表該物料對於電池所佔有的成本比例，若佔有的成本比例越高，當物料成本遇到波動時所帶來的影響越大，可能導致更高的售價，進而影響消費者的選擇和市場競爭力，因此物料成本比例較高的金屬具有較高的關鍵性。未來市場需求及現階段市場需求指標的量化數據其分母為全球生產量、分子分別為 2030 年預期之市場需求以及現階段市場需求，主要是探討供給面對於需求面的承擔能力。國家生產集中度指標表示當金屬生產過於集中於單一國家所可能產生的供應風險，越集中於單一國家則風險越高、關鍵程度越高，因此計算最大該金屬生產國佔全球產量的比例。替代性則是依據文獻中該物質功能能否被其他物質所替代的程度給予替代性的評分。回收性指標的評分方法是依據終期回收率的表現，指的是產品壽命結束後可回歸到產品循環中再利用的比例。若終期回收率較低時表

示能進行再利用的可能性較低，會影響到企業對於物料的取得性，也會影響地球的原物料資源儲備，因此關鍵性較高。

各項指標的評分方法整理如表 3.7 所示，部分不是經由 0 至 100 量尺來評分的指標，例如環境面向的指標、社會面向的工作環境指標、治理面向的物料成本等指標，則會經過將目標金屬中的最大值視為 100、最小值(通常是 0)視為 0，以此為基準進行相對性的線性轉換，將各項指標皆一致轉換為 0 至 100 的評分量尺。

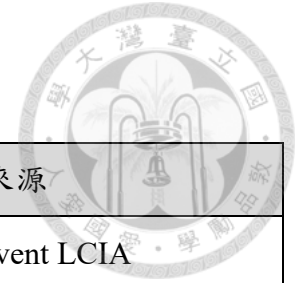


表 3.7 關鍵性評分方法整理表

面向	指標	指標描述	評分方法	指標與計算依據	數據來源
環境	人體健康	生命週期中該物質對於人體健康造成之影響	ReCiPe Endpoint Human Health LCIA	(Bensch et al., 2015)	Ecoinvent LCIA Database
	生態系統	生命週期中該物質對於生態系統造成之影響	ReCiPe Endpoint Ecosystem Quality LCIA	(Bensch et al., 2015)	Ecoinvent LCIA Database
	資源耗用	生命週期中該物質對於資源耗用造成之影響	ReCiPe Endpoint Resource depletion LCIA	專家建議	Ecoinvent LCIA Database
社會	武裝衝突	開採國家中為了該物料而產生衝突	$\Sigma(\text{國家生產比例} * \text{衝突評分})$	專家建議	(AFP, 2023; EJAtlas, 2023; Kapesa et al., 2015; Katz-Lavigne, 2019; Prause, 2020)
	童工	在開採或加工物料等過程中使用童工	$\Sigma(\text{國家生產比例} * \text{童工評分})$	(Kolotzek et al., 2018)、專家建議	(DOS, 2019; ILAB, 2022; O'Driscoll, 2017)
	遵守勞工	物料生產國家遵守勞工	$\Sigma(\text{國家生產比例} * \text{SDG8}^{\text{f}} \text{勞工基本權})$	專家建議	(Sachs et al., 2022)

	權利	權利(如超時等較廣泛的權利範疇)的程度	利得到有效保障」評分)		
	生活環境	物料生產國家安全和健康的生活環境	$\Sigma$ (國家生產比例*SDG3「全民健康覆蓋 (UHC)服務指數」)	(Kolotzek et al., 2018)、專家建議	(Sachs et al., 2022)
	工作環境	物料生產國家安全和健康的工作環境	$\Sigma$ (國家生產比例*SDG8「致命工傷事故」評分)	(Kolotzek et al., 2018)、專家建議	(Sachs et al., 2022)
	強迫勞役	在開採或加工物料等過程中，強迫勞役開採或加工	$\Sigma$ (國家生產比例*強迫勞役評分)	(Kolotzek et al., 2018)、專家建議	(DOS, 2019; FREEDOM, 2020; ILAB, 2022; Normile, 2021; Swanson & Buckley, 2022)
治理	物料成本	物料之開採、製造或加工、研發等整體成本考量	物料所需量*物料單位成本/電池總成本	(Griffin et al., 2019)	(Bongartz et al., 2021; DOE, 2023; Tradingeconomics, 2023)
	未來市場需求	物料未來經技術變化等因素所預期的市場需求	2030年之市場需求/2022年之全球生產量	(Bensch et al., 2015)	(IAI, 2022; IEA, 2021; MCA, 2021; PRNewswire,

					2023; USGS, 2023)
國家生產集中度	物料集中於特定國家生產的斷鏈風險	最大國家生產量/全球生產量	(Bensch et al., 2015)	(USGS, 2023)	
替代性	物料於產品效能的功能性能否被其他物料替代	$\Sigma(\text{應用部位之比例} * \text{替代表現})$	(Graedel et al., 2012)	(Bongartz et al., 2021)	
回收性	物料能被回收再利用之比例	終期回收率(end of life recycling rate, EOL-RR)	(Graedel et al., 2011)	(IEA, 2022; UNEP, 2011)	
現階段市場需求	物料現在之市場需求量	現階段市場需求/現階段全球生產量	(Knobloch et al., 2018)	(IAI, 2022; IEA, 2021; MCA, 2021; PRNewswire, 2023; USGS, 2023)	

### 3.7 生命週期評估

生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)是一種廣泛被接受的標準方法，用於評估產品或系統在其生命週期，從原材料提取到報廢處理的過程中對於環境的影響(ISO, 2006a; Julio et al., 2022)。國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO) 對於生命週期評估制定了一系列標準：ISO14040 提供在評估產品、服務或活動的環境影響時應該遵循的通用原則；ISO 14044 則提供了更具體的詳細技術規範。當中提及生命週期評估的架構(如圖 3.6 所示)，可以分為以下四個階段：目的與範疇界定、盤查分析、衝擊評估及闡釋(ISO, 2006a, 2006b)。

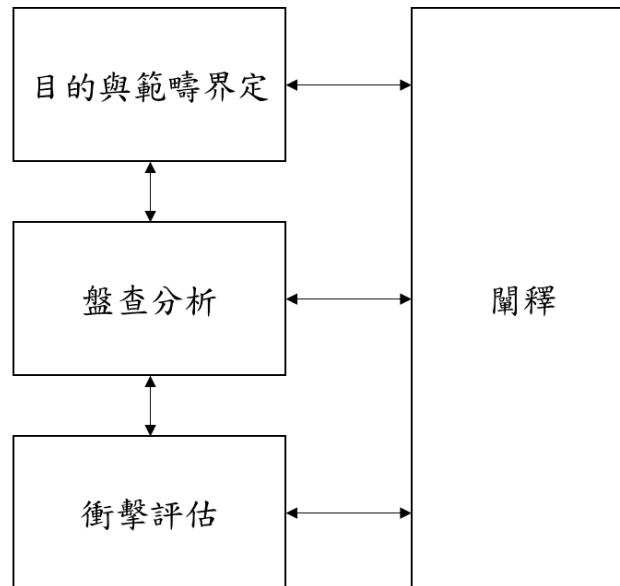


圖 3.6 生命週期評估的架構(ISO, 2006a)

首先，在目的與範疇界定(Goal and Scope Definition)的階段，需先釐清執行生命週期評估的目的、確定目標和範圍，界定要評估的產品、服務或活動的邊界和功能單位。在盤查分析(Inventory Analysis)的階段，先依據前一階段所設定之目的與範疇進行資料與數據的收集，接著依據功能單位，將各個單元的數值轉換成相同單位並進行標準化。在衝擊評估(Impact Assessment)的階段，開始

透過分類 (Classification)、特徵化(Characterization) 與評價(Valuation)等三個步驟，利用環境科學的知識和模型將生命週期盤查之結果轉化為對環境的影響。在闡釋(Interpretation)的階段則是綜合前三個階段的結果進行解釋，以回答當初所設定的目標並提出建議(Michael et al., 2018; 盧怡靜 & 呂穎彬, 2014)。

生命週期評估的一個主要優勢在於其考量生命週期的整體視角和涵蓋範圍廣泛的環境問題，能夠比較由數百個過程組成的產品系統所產生的環境影響，並涉及在不同時間與地點發生的各種資源使用和排放。此外，生命週期評估以科學為基礎所產生的量化數據有助於用來比較不同過程和產品系統的環境影響。生命週期評估也有著一些限制，包含建模的複雜性、對於資料的需求、建構的簡化會造成不確定性並影響結果的準確性，生命週期評估適合用來進行兩兩比較其高下，但卻難以對於單獨的結果談論其是否達到足夠好的程度(Michael et al., 2018)。

生命週期評估已被廣泛運用於各個產品及服務，其中也包含對於評估鋰電池生產、使用和回收對於環境影響的研究。Arshad 等人(2022) 對於 80 篇運用生命週期評估於鋰電池的相關研究進行了系統性回顧，對這些研究的分析、結果和比較進行了概述，並考慮了鋰電池和下一代電池的環境解釋關鍵參數之重要性。Yudhistira 等人(2022)對於不同的儲能單元利用生命週期評估進行比較，結果顯示在觀察到的環境影響類別中，鋰離子電池對環境的影響小於鉛酸電池，鎳鈷鋁電池在分析的鋰離子電池中於應對氣候變化和資源利用方面的表現最佳。

## 第四章 結果與討論



### 4.1 關鍵物料評估模型

#### 4.1.1 指標篩選

篩選指標之第一次問卷於四週內共收集 28 筆資料，其中大部份填答者是屬於電池供應鏈中的中下游廠商，目前公司相關之儲能單元最多的是磷酸鋰鐵電池、其次是三元系鋰鈷鎳錳電池、第三是三元系鋰鈷鎳鋁電池，未來若有機會轉換製造或使用其他儲能單元時，最多填答者仍選擇磷酸鋰鐵電池、次多選擇的選項是尚無規劃。在提供對於關鍵物料的定義：「依據相關文獻的描述，關鍵物料指的是對企業策略及經濟影響極大、承擔如供應斷鏈等風險極大，以及對於環境及社會衝擊極大的物料(如鋰、鈷…等)。」之後，約有 85%的填答者選擇稍微了解以上的程度、過半的填答者認為對於關鍵物料的定義已非常了解(如圖 4.1)。

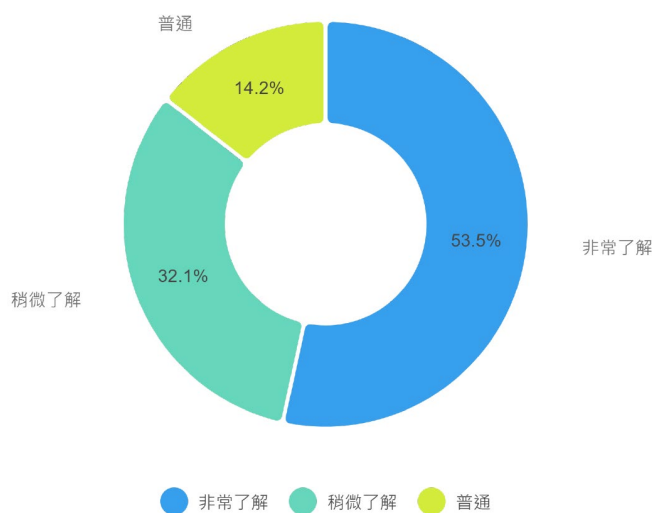


圖 4.1 關鍵物料了解程度之統計圖

環境面向將參考文獻而採用生命週期影響評估的終點(end-point)之人體健康和生態環境指標。此外，由於治理面向未提及資源稀缺的部份，但在文獻中也數度被提起，故依專家建議納入生命週期影響評估的資源耗用指標。因此，本研究關鍵物料評估模型之環境面向將由生命週期影響評估的三個終點指標：

人體健康、生態環境及資源耗用所構成。

社會面向則是依據問卷中的重要性評分(1 為非常不重要至 5 為非常重要)選擇前六高分的指標(如表 4.1)，分別為童工、武裝衝突、強迫勞役、遵守勞工權利、工作環境以及生活環境。



表 4.1 社會面向指標之重要性評分

選擇	指標	平均分數
V	童工	4.86
V	武裝衝突	4.82
V	強迫勞役	4.75
V	遵守勞工權利	4.61
V	工作環境	4.46
V	生活環境	4.43
	貪汙	4.29
	社會推廣	4.25
	薪資	4.11
	工時	3.96

治理面向的指標篩選結合了問卷與文獻探討之結果(如表 4.2)，首先統計問卷裡對於現在公司相關儲能單元其物料，填答者認為重要關鍵因素的勾選次數，加上未來公司轉換儲能單元時物料關鍵因素的勾選次數，將所得到的合計勾選次數進行排序。接著參考文獻的引用次數，納入問卷結果普通但文獻引用次數多的回收性。經過綜合考量與指標整理後，治理面向將選擇未來市場需求、現階段市場需求、物料成本、替代性、國家生產集中度以及回收性此六個指標。

表 4.2 治理面向指標之綜合評量

選擇	指標	問卷			文獻
		現在	未來	合計	引用次數(/12)
V	市場因素之未來市場需求變化	15	9	24	4
V	市場因素之現階段市場需求多寡	11	4	15	NA

V	成本因素之開採成本	7	5	12	NA
V	企業策略因素之 物料於產品效能的功能性難以被其他物料替代	7	4	11	12
	成本因素之製造或加工成本	6	3	9	NA
V	供應鏈因素之物料集中於特定國家生產的斷鏈風險	5	4	9	6
	成本因素之設備成本	4	3	7	NA
	成本因素之研發成本	4	3	7	NA
	企業策略因素之企業具創新能力以因應物料供應鏈的限制	4	3	7	5
V	回收因素之物料能被回收再利用之比例	4	3	7	8
	企業策略因素之企業願意揭露物料資訊(如產地、開採方式)以順應永續趨勢	6	0	6	NA
	供應鏈因素之物料集中於特定公司生產的斷鏈風險	5	1	6	5
	回收因素之法規對於物料的回收規範	4	2	6	NA
	供應鏈因素之物料生產國家政治不穩定的斷鏈風險	3	3	6	6

綜上所述，本研究根據問卷與文獻探討之結果，篩選出關鍵物料評估模型環境、社會與治理三個面向各自的指標，接下來將經由兩兩比對及模糊層級分析法找出各個指標之權重占比。

#### 4.1.2 權重分析

分析權重之第二次問卷於六週內共收集 18 筆資料，填答者的組成與第一次問卷相似，大多是電池供應鏈中的中下游廠商，公司相關之儲能單元以磷酸鋰鐵電池為大宗。在進行模糊層級分析法的權重分析之前，需先檢測資料是否具有一致性，一致性檢定以一致性比率(Consistency Ratio, CR) 為判斷基準，當  $CR \leq 0.1$  時可判斷為具有一致性的有效資料，才能使用該資料來計算權重值。此次問卷的一致性檢定結果如表 4.3 所示，於社會及治理面向分別

有 5 筆及 6 筆有效資料，滿足鄧振源(2012)提到樣本數大於五筆的建議，本研究將運用這些有效資料進行社會及治理面向的指標權重分析。



表 4.3 第二次問卷之一致性檢定結果

面向	總資料數	有效資料	有效率
社會	18	5	27.78%
治理	18	6	33.33%

環境面向的指標權重採用 Kolotzek (2018)的作法，對於各個指標均等分配權重，表示人們難以評斷環境面向指標的高低，人體健康、生態環境及資源耗用都是相當重要的環境影響。

社會面向根據 5 筆有效資料的權重分析結果如表 4.4 及圖 4.2 所示，權重由高至低的排序依序為武裝衝突(權重:0.210)、童工(0.180)、遵守勞工權利(0.172)、生活環境(0.153)、工作環境(0.145)以及強迫勞役(0.140)。由表 4.4 可以看出經由兩兩比對的權重分析結果與第一次問卷的重要性評分略有不同：在第一次問卷重要性排序第一名的童工指標在權重排序上為第二名、在第一次問卷重要性排序第二名的武裝衝突指標在權重排序上攀升為第一、在第一次問卷重要性排序第三名的強迫勞役指標在權重排序上位居第六名。圖 4.2 的盒鬚圖顯示武裝衝突指標具有較高的最高值而拉高其平均，而強迫勞役指標的最高值較低故其平均值落後於其他指標。

表 4.4 社會面向之權重分析整理表

權重排序	指標	權重	第一次問卷之排序	第一次問卷之評分
1	武裝衝突	0.210	2	4.82
2	童工	0.180	1	4.86
3	遵守勞工權利	0.172	4	4.61

4	生活環境	0.153	6	4.43
5	工作環境	0.145	5	4.46
6	強迫勞役	0.140	3	4.75

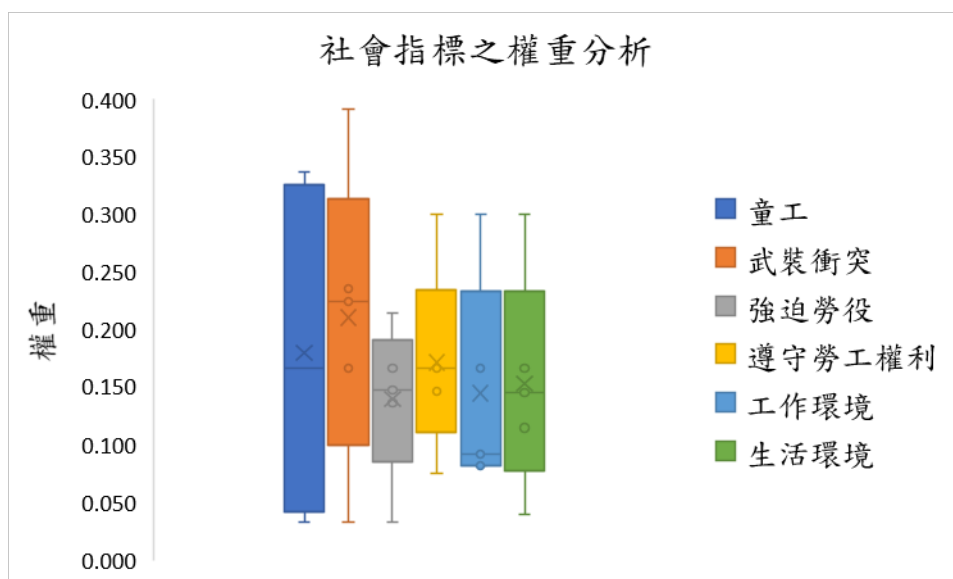
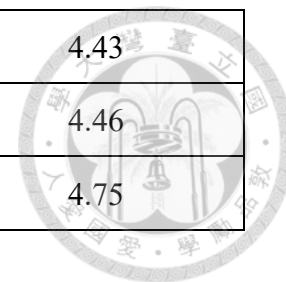


圖 4.2 社會面向之權重分析盒鬚圖

治理面向根據 6 筆有效資料的權重分析結果如表 4.5 及圖 4.3 所示，權重由高至低的排序依序為物料成本(權重:0.201)、未來市場需求(0.196)、國家生產集中度(0.175)、替代性(0.168)、回收性(0.153)及現階段市場需求(0.107)。由表 4.5 可以看出經由兩兩比對的權重分析結果與第一次問卷時請填答者選擇關鍵因素之勾選次數排序略有不同：在第一次問卷排序第一名的未來市場需求在權重排序上為第二名、在第一次問卷排序第三名的物料成本在權重排序上攀升至第一名、在第一次問卷排序第二名的現階段市場需求在權重排序上跌落至第六名。圖 4.3 的盒鬚圖顯示物料成本指標的上四分位數較其他指標高以致有較高的平均值，未來市場需求指標具有遠高出其他指標的最高值，現階段市場需求指標的最高值與上四分位數皆低於其他指標，因此計算出的平均權重也遠低於其他指標。

表 4.5 治理面向之權重分析整理表

權重排序	指標	權重	第一次問卷之排序	第一次問卷之關鍵因素勾選次數
1	物料成本	0.201	3	12
2	未來市場需求	0.196	1	24
3	國家生產集中度	0.175	5	9
4	替代性	0.168	4	11
5	回收性	0.153	6	7
6	現階段市場需求	0.107	2	15

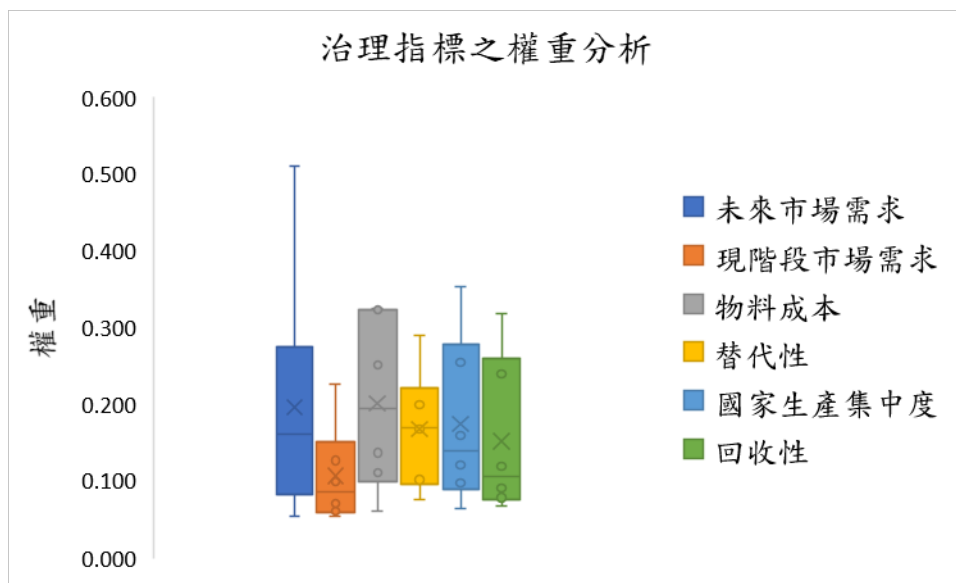


圖 4.3 治理面向之權重分析盒鬚圖

### 4.1.3 模型結構

經由文獻回顧與兩次問卷調查，我們可以進行指標篩選與權重分析以發展考量 ESG 的關鍵物料評估模型，其模型結構如圖 4.4 所示，顯示出 ESG 面向及其所屬的指標與各個指標權重，在這裡 ESG 三個大面向也是採用均等的權重，各個指標將以 0 至 100 的量化數據呈現其關鍵性。透過這個模型，企業可以篩選出對於公司影響重大的關鍵物料，並協助企業提前規劃管理策略以降低營運風險。接下來將以前景看好的儲能單元為對象示範模型之應用。

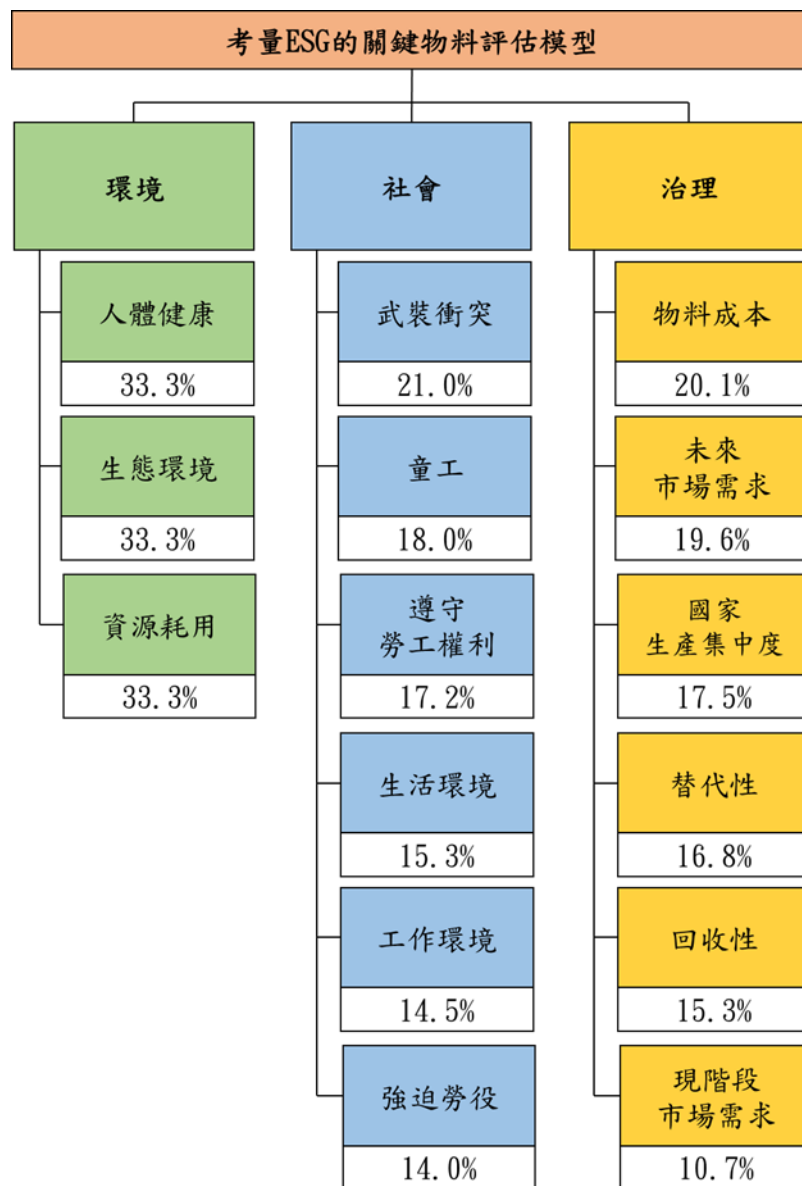


圖 4.4 關鍵物料評估模型之結構圖

## 4.2 儲能單元案例探討

能源轉型及電動車市場帶來龐大的儲能需求，也帶動著儲能單元所需礦物原料的需求成長。例如鋰金屬在永續發展情境中其需求量將由 2020 年的七萬四千公噸成長至 2030 年的四十六萬一千公噸、2040 年更將增長至一百一十六萬一千公噸，未來的需求量預期將遠遠超出現在八萬兩千公噸的年產量，若未預先準備好因應對策，企業將面對供不應求的營運風險(Bibra et al., 2022)。此外，隨著環境保護與社會公平正義意識的抬頭，企業不僅要提升自身的營運績效表現，也需正視在開採或加工原料過程中所產生的環境與社會衝擊。因此，儲能相關企業需要透過本研究所開發的關鍵物料評估模型，從環境、社會、治理面向綜合評估，篩選出對於儲能單元的關鍵物料，以協助企業規劃有效的永續發展策略。

基於文獻及現有資料庫的資源，本研究將依據 Bongartz 等人(2021)的研究所提出構成鋰電池之主要物料：鋁(Al)、鈷(Co)、銅(Cu)、鐵(Fe)、鋰(Li)、錳(Mn)以及鎳(Ni)這七種物料進行分析，分析過程中會考量這些物料與鋰電池之關聯，例如鋰電池每度電的金屬重量需求，並運用關鍵物料評估模型來篩選出對於環境、社會、治理面向最具關鍵性的物料。

### 4.2.1 環境面向分析

環境面向由生命週期影響評估的三個終點指標：人體健康、生態環境及資源耗用所構成。本研究使用 SimaPro 9.4 版本的軟體、選定 Ecoinvent 3 資料庫，採用 ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.07 之方法，對於生產 2.1 kWh 鋰電池進行生命週期評估，以探討鋰電池的生命週期中各種金屬所產生的環境衝擊。

根據資料庫及資料參考文獻，此次生命週期評估的系統邊界如圖 4.5 所示，從產業鏈上游原料與零件的製備開始，至生產與組裝電池，最後到廢棄的階段(Notter et al., 2010)。功能單位是 1 公斤的 2.1 kWh 鋰電池，內部的 14 個單體電池、一個鋼箱、一個電池管理系統和電纜都被考慮在內。生產 1 公斤鋰電池的相關投入產出如圖 4.6 所示，輸入面包括物質資源和電能，產出包括目

標的 1 公斤鋰電池與廢棄鋰電池。

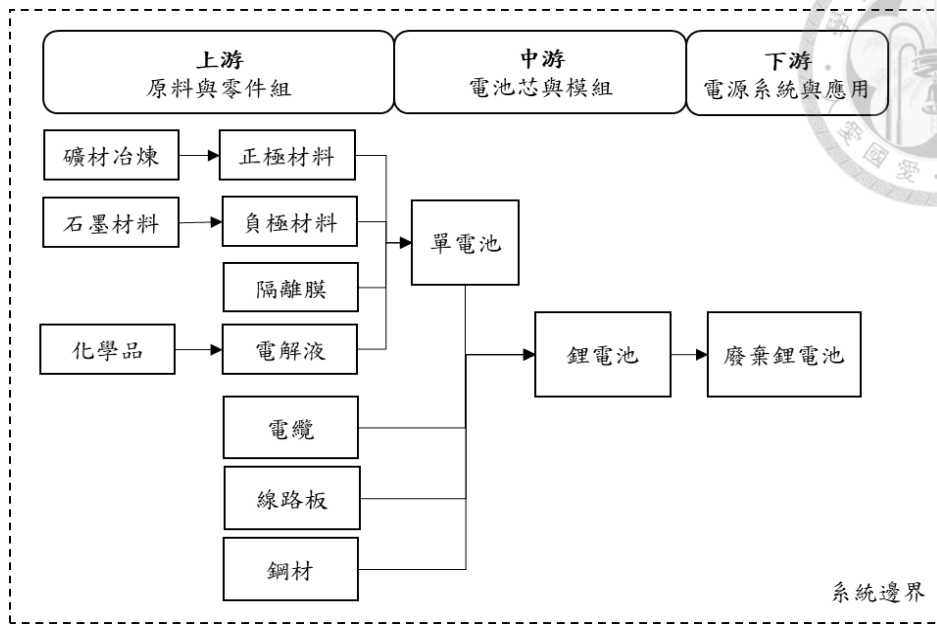


圖 4.5 對於生產鋰電池進行生命週期評估的系統邊界簡圖

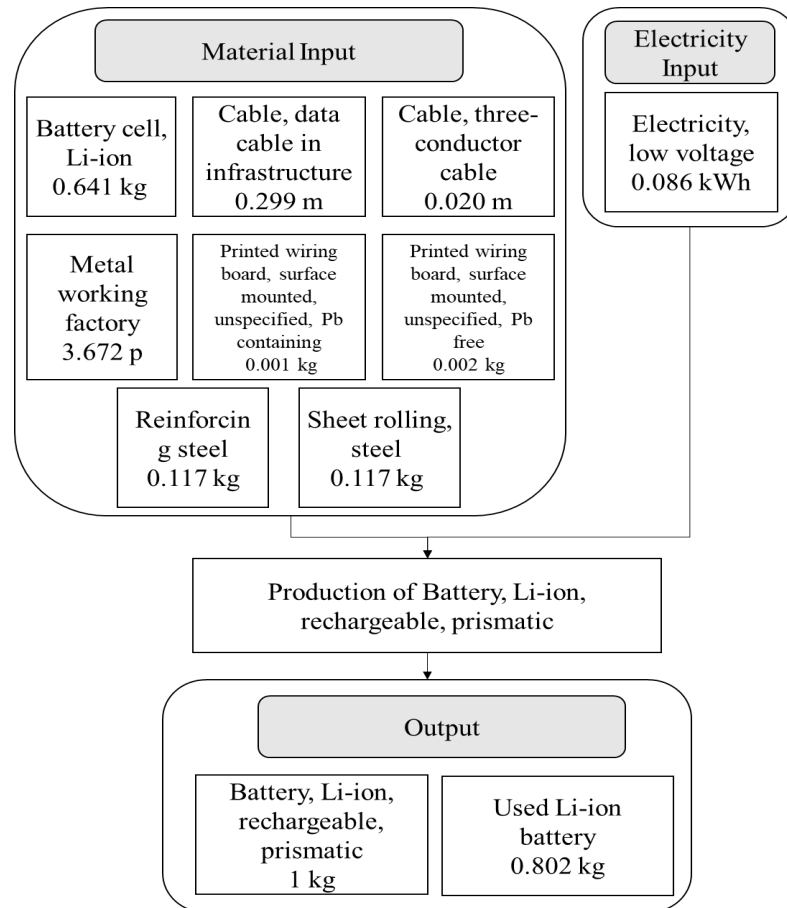


圖 4.6 生產 1 公斤鋰電池的投入產出圖

本研究使用 SimaPro 運算 1 公斤 2.1 kWh 鋰電池的生產過程，計算完成後可以在清單中的指標欄選擇損壞評估，接著在類型欄可以選擇三種終點指標，然後便可在下方欄位找出各種物質在不同區間的環境影響數據，將不同區間的數值加總後即為該物質整體的環境影響數值。隨後參考文獻的轉換方法，調整後將沒有數值視為 0、金屬類別中最大的數值視為 100，以此原則進行指標 0 至 100 尺度的轉換，下方表 4.6 為人體健康指標之分數轉換範例。

環境面向的分析結果如圖 4.7 所示，可以看出鎳對於人體健康有極大的影響，主要來自對於人體的致癌毒性，長期吸入會增加肺癌、鼻腔癌與鼻竇癌的致癌風險；銅對於生態環境和資源耗用方面有最高的影響，分別來自於冶煉銅精礦所產生的陸地生態毒性和礦產資源稀缺之要素，也因此讓銅金屬於整體環境面向上具有最高的關鍵性。

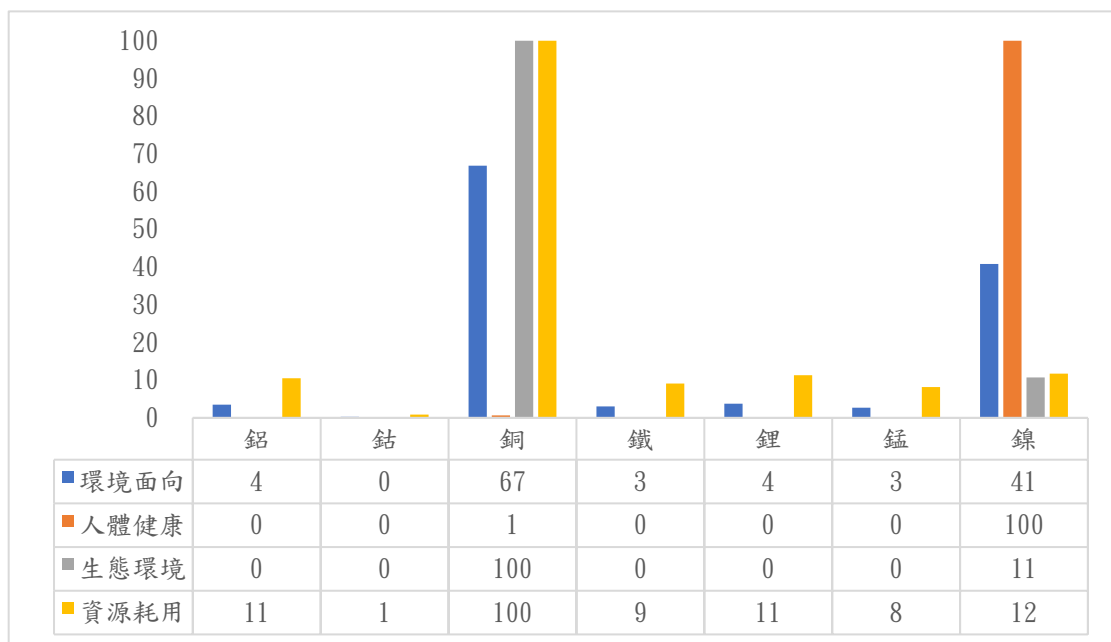


圖 4.7 儲能單元物料之環境面向關鍵性

表 4.6 人體健康指標之分數轉換範例

	鋁	鈷	銅	鐵	鋰	錳	鎳
影響數據	0	0	2.37E-09	0	0	0	2.87E-07
關鍵性評分	0	0	1	0	0	0	100

#### 4.2.2 社會面向分析

社會面向的指標與權重包括武裝衝突(權重:0.210)、童工(0.180)、遵守勞工權利(0.172)、生活環境(0.153)、工作環境(0.145)以及強迫勞役(0.140)。

武裝衝突指標來自於衝突礦產(Conflict Metal)的企業永續議題，由於剛果與周邊國家的武裝部隊經常利用含有錫、鎢、鈹和金的礦物當作經濟來源，為了爭奪礦產資源，因而導致武裝衝突及人權侵害。因此美國證券交易委員會通過「Dodd-Frank 衝突礦產」法案，要求美國公司若產品中使用上述礦物，則需調查供應商並公佈相關資訊。經濟合作暨發展組織(Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD)更延伸將存在著武裝衝突、廣泛的暴力或其他對人造成傷害風險的地區定義為受衝突影響和高風險地區(Conflict Affected and High-Risk Areas, CAHRA)。台灣許多公司的永續報告書中也承諾避免在受衝突影響和高風險地區採購助長武裝衝突或侵犯人權行為的礦物。此指標透過文獻以及 Environmental Justice Atlas EJAtlas 提供的 Mining conflicts in Latin America 圖資資料，給予礦產生產國家對於特定金屬的衝突評分:0 分為無衝突資訊、100 分為武裝衝突，再乘上生產比例加總後得到整體的衝突指標分數。武裝衝突指標的分析結果如圖 4.8 所示，鈷受到主要生產國－剛果民主共和國的衝突影響而關鍵性最高；銅則是因為剛果民主共和國和拉丁美洲國家的衝突影響而第二高分。

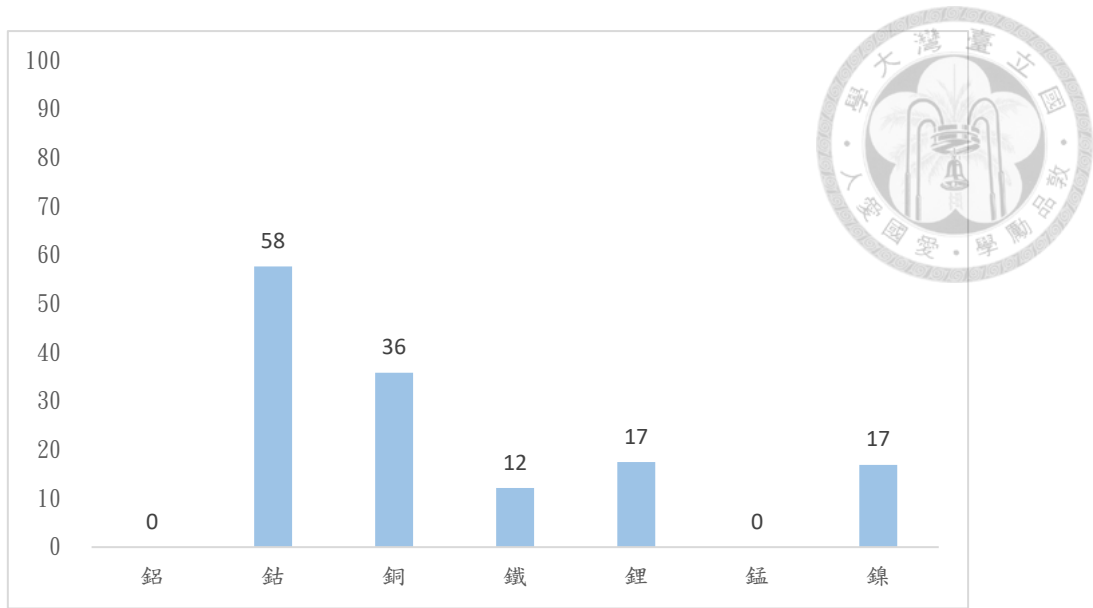


圖 4.8 儲能單元物料之武裝衝突指標關鍵性

童工指標及強迫勞役指標主要的參考資料是來自美國勞動部的「童工或強迫勞動生產的商品清單(List of Goods Produced by Child Labor or Forced Labor)」，當中載明了各個國家對於特定商品是否有使用童工或強迫勞動的情形，再輔以文獻資料進行評估，與衝突指標的計算方式相似，若有童工或強迫勞動的狀況則給予 100 分，乘上各國生產比例加總後得到整體的分數。童工指標的分析結果如圖 4.9，對於金屬商品使用童工的資料極少，僅有剛果民主共和國有資料指出開採鈷和銅有使用童工，因此只有鈷和銅具有童工指標之關鍵性評分。強迫勞役指標的分析結果如圖 4.10 所示，分數主要來自剛果民主共和國，另外也來自中國大陸疑似對於新疆維吾爾民族施行強迫勞動的聯合國報告，因此強迫勞役指標的分數鈷最高、鋁次之，其他金屬也出現些許分數。

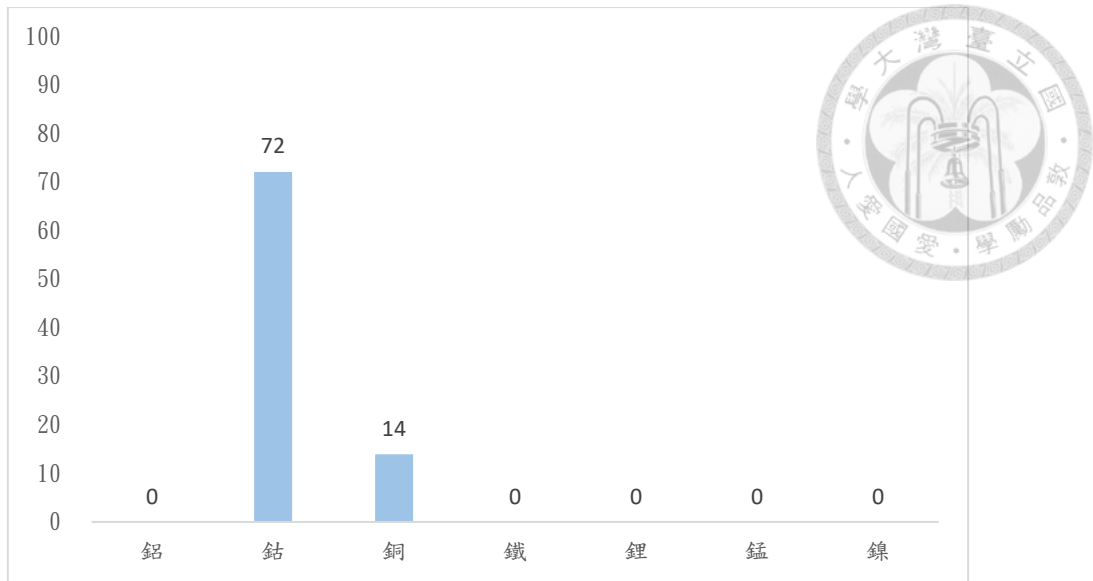


圖 4.9 儲能單元物料之童工指標關鍵性

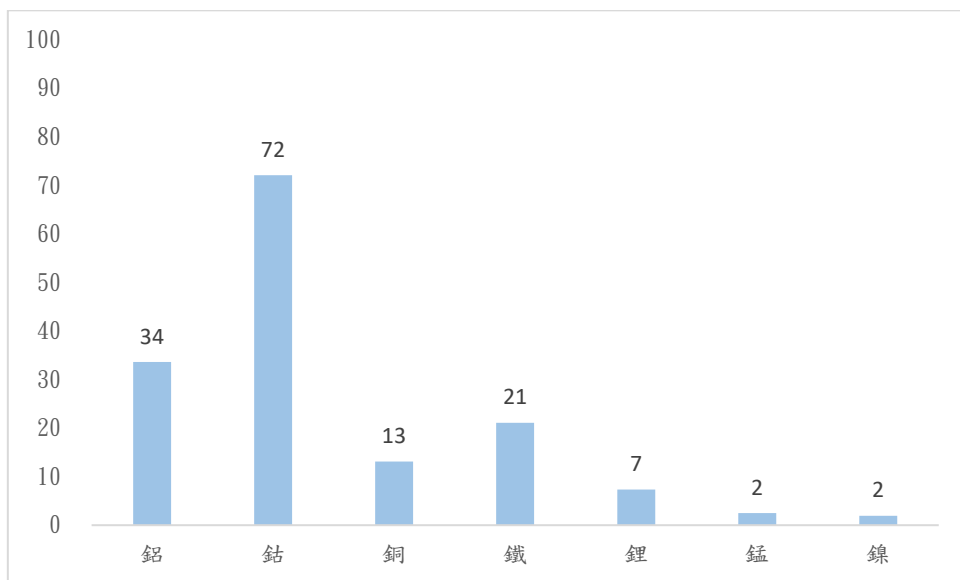


圖 4.10 儲能單元物料之強迫勞役指標關鍵性

遵守勞工權利、生活環境和工作環境三個指標的量化資料分別採用永續發展報告(Sustainable Development Report)裡 SDG8「勞工基本權利得到有效保障評分」、SDG3「全民健康覆蓋 (UHC)指數」以及 SDG8「致命工傷事故評分」。在報告中對於世界各國永續發展目標的評估指數有非常詳盡的紀錄，本研究蒐集各個生產國之數據、經過適當轉換，再乘上各國生產比例加總後可以得到整體的關鍵性分數。分析結果如圖 4.11 所示，鋁在遵守勞工權利指標有最高的關鍵性，因為主要生產國中國大陸於勞工基本權利得到有效保障

的評分較低；鈷在生活環境指標有最高的關鍵性，因為主要生產國剛果民主共和國的全民健康覆蓋指數較低；鋰在工作環境指標有最高的關鍵性，因為主要生產國澳大利亞致命工傷事故出現的頻率較高。

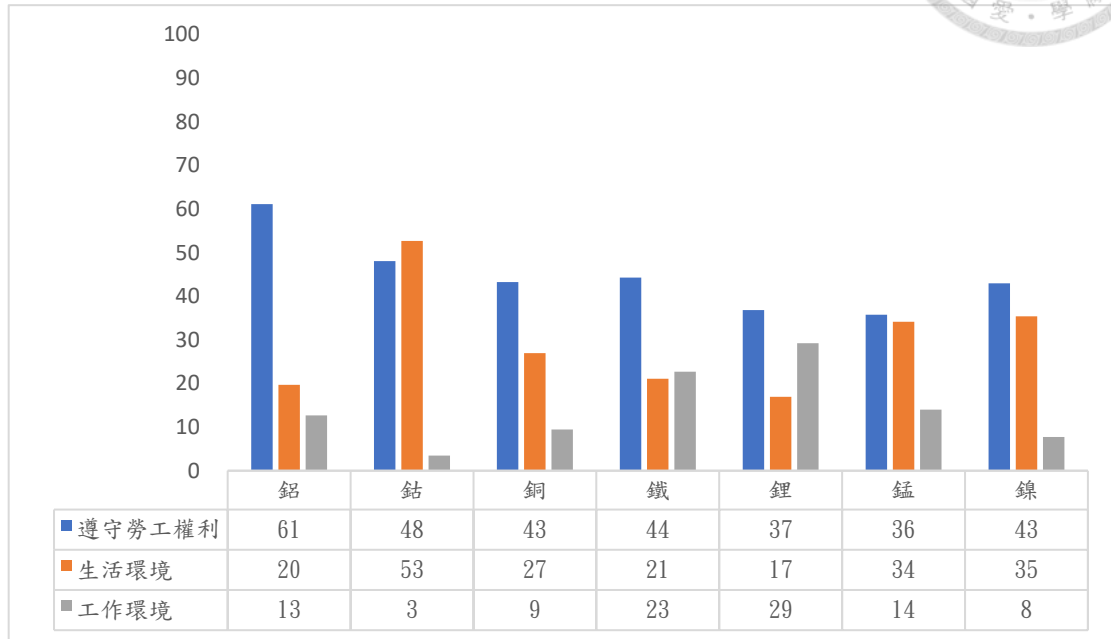


圖 4.11 儲能單元物料之遵守勞工權利、生活環境和工作環境指標關鍵性

綜合上述六個社會面向的指標關鍵性，乘上權重進行加權分析，可以得到各個金屬整體社會面向的關鍵性評分(如圖 4.12)，可以看出鈷的社會面向關鍵性明顯高出其他金屬一倍以上，而其他金屬的關鍵性評分沒有太大的差異，主要原因是因為鈷的主要生產國—剛果民主共和國的社會狀況，使其在武裝衝突、童工、強迫勞役和生活環境四個指標都有著最高的關鍵性評分。

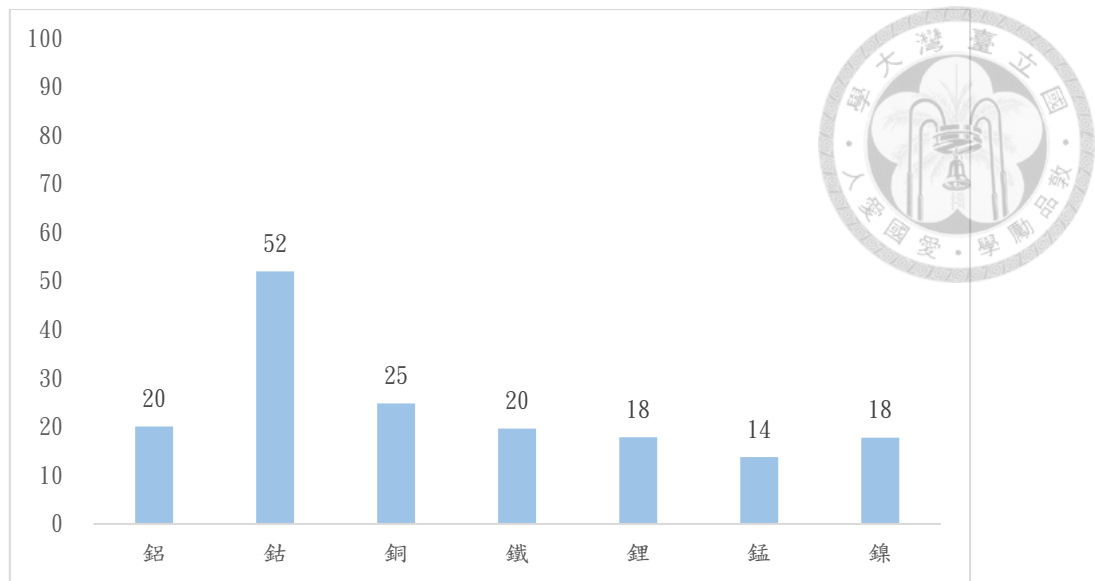


圖 4.12 儲能單元物料之社會面向關鍵性

#### 4.2.3 治理面向分析

治理面向的指標與權重包括物料成本(權重: 0.201)、未來市場需求(0.196)、國家生產集中度(0.175)、替代性(0.168)、回收性(0.153)及現階段市場需求(0.107)。

物料成本指標所採用的量化數據為「物料所需量\*物料單位成本/電池總成本」，代表該物料對於電池所佔有的成本比例，若佔有的成本比例越高，當物料成本遇到波動時所帶來的影響越大，因此物料成本比例較高的金屬具有較高的關鍵性。將最大的佔有成本比例數值視為 100，經過 0 至 100 尺度的轉換後，物料成本指標的分析結果如圖 4.13 所示，可以看出鋰的物料成本關鍵性遠遠大於其他金屬，原因是鋰的單位成本相對於其他金屬來說非常高。

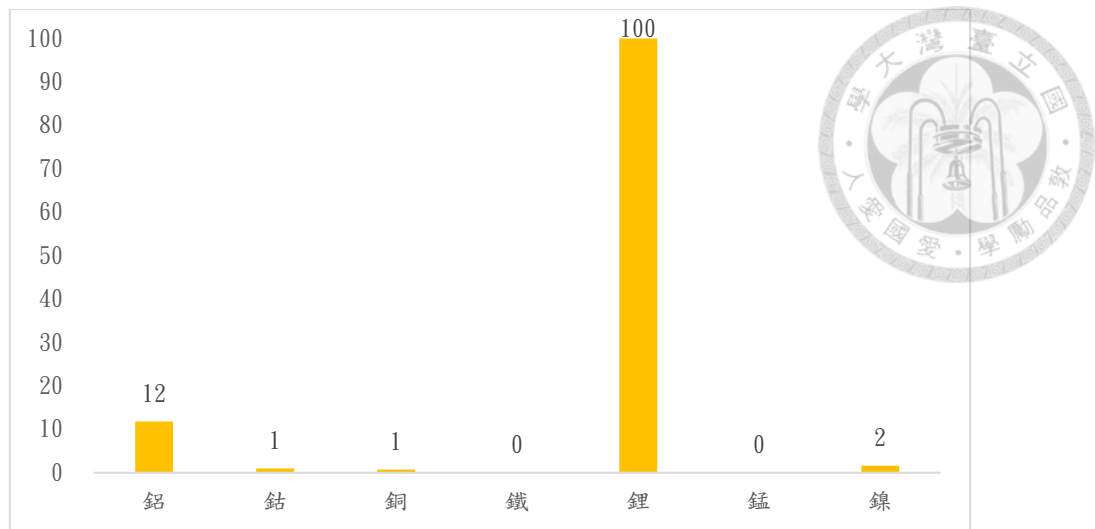


圖 4.13 儲能單元物料之物料成本指標關鍵性

未來市場需求及現階段市場需求指標的量化數據其分母為全球生產量、分子分別為 2030 年預期之市場需求以及現階段市場需求，主要是探討供給面對於需求面的承擔能力。若此比值越大，表示需求越大於供給，供給面越不容易滿足需求面，則供應風險越高，此金屬的關鍵程度越高。將最大的比值視為 100，經過 0 至 100 尺度的轉換後，未來市場需求及現階段市場需求指標的分析結果如圖 4.14 與圖 4.15 所示。綜合兩項指標的結果顯示，現階段市場需求以鋁、銅和錳較為關鍵，在未來將會轉變為鋰最為關鍵，企業須特別留意鋰的供應產能能否跟上需求增長。

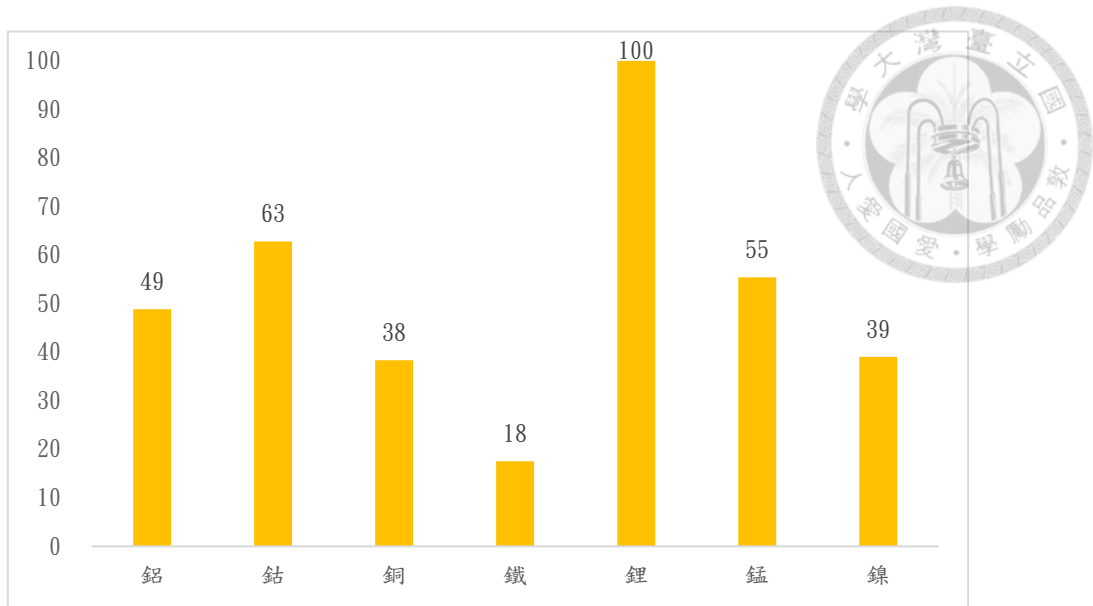


圖 4.14 儲能單元物料之未來市場需求指標關鍵性

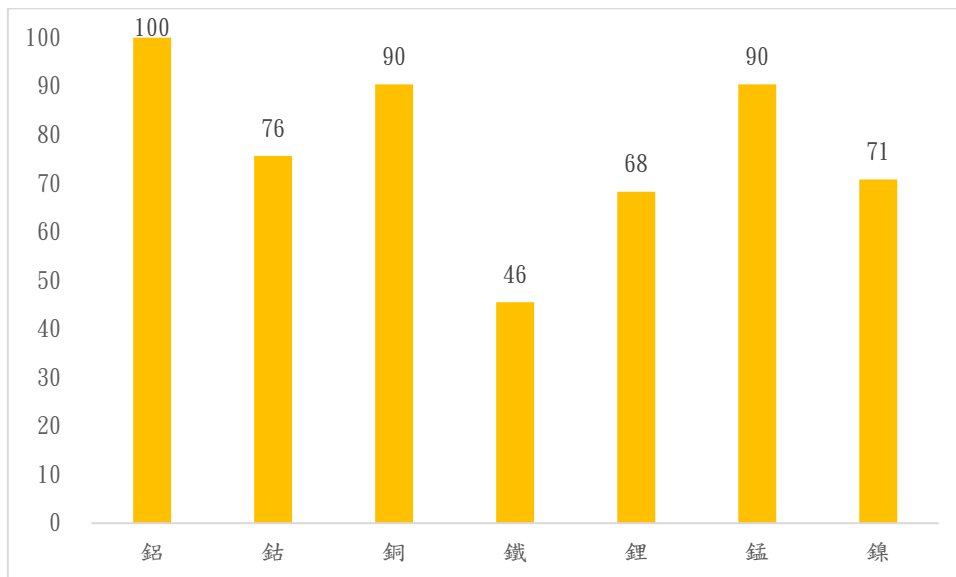


圖 4.15 儲能單元物料之現階段市場需求指標關鍵性

國家生產集中度指標表示當金屬生產過於集中於單一國家所可能產生的供應風險，越集中於單一國家則風險越高、關鍵程度越高，因此計算最大該金屬生產國佔全球產量的比例。將最大的比例視為 100，經過 0 至 100 尺度的轉換後，國家生產集中度指標的分析結果如圖 4.16: 68.42%產量集中於剛果民主共和國的鈷關鍵性最高，其次是 57.97%產量集中於中國的鋁。

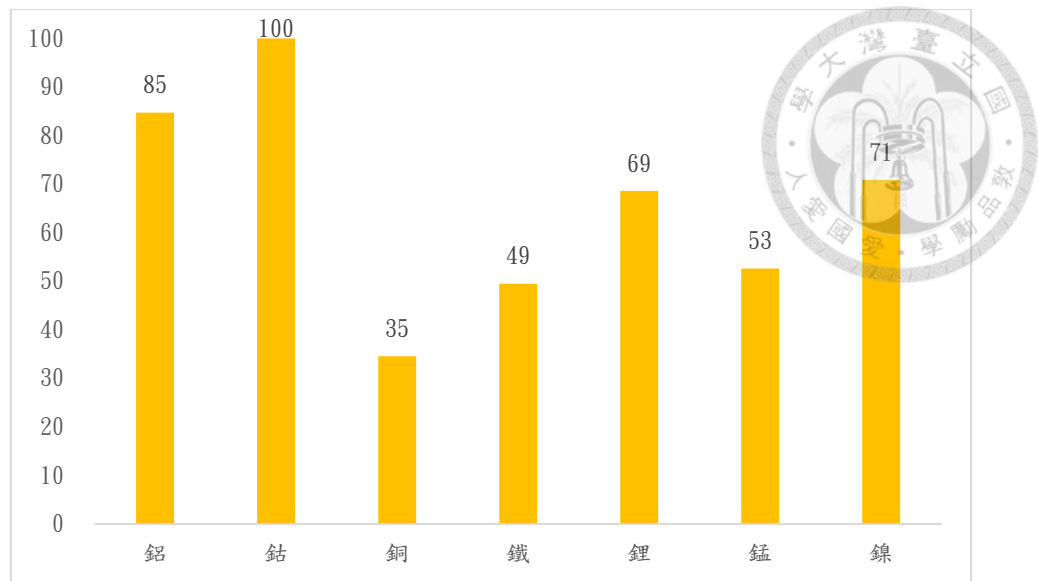


圖 4.16 儲能單元物料之國家生產集中度指標關鍵性

替代性指的是該金屬提供的功能性能否被其他物料取代，若越不容易被取代則關鍵性越高。本研究採用 Bongartz 等人(2021)的研究資料，該資料對於金屬於電池功能的替代性上有詳盡的分析介紹，並依照組成比例和替代表現給予替代性的評分。由於目前鐵、鋰、錳和鎳於電池的功能性尚無其他物料能夠取代，因此這些金屬之替代性指標關鍵性為最高的 100 分(如圖 4.17)。

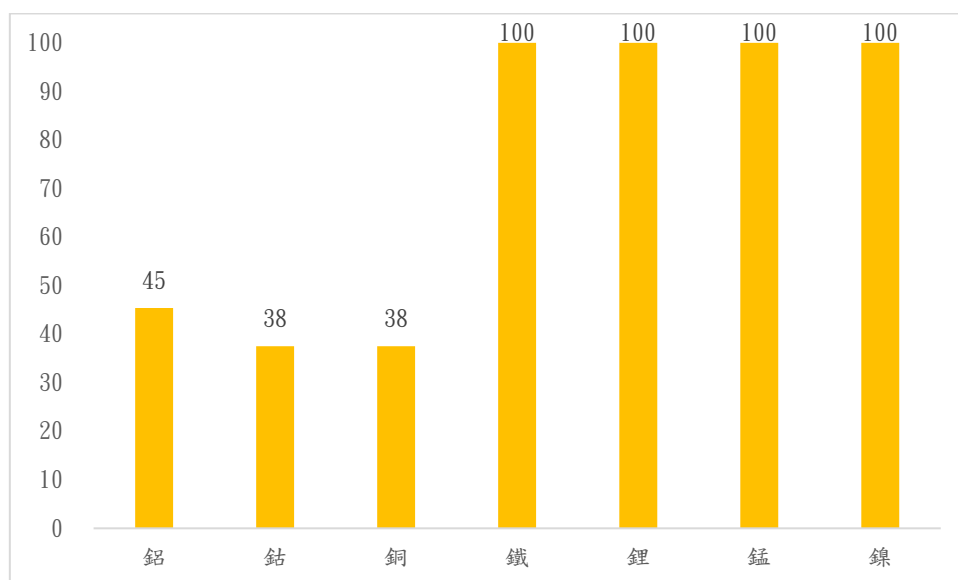


圖 4.17 儲能單元物料之替代性指標關鍵性

回收性指標的量化數據參考文獻而依據終期回收率(End-of-life recycling rate, EOL RR)的表現，終期回收率指的是產品壽命結束後可回歸到產品循環中再利用的比例。若終期回收率較低時表示能進行再利用的可能性較低，會影響到企業對於物料的取得性，因此關鍵性較高。經反向轉換後的分析結果如圖 4.18，可以看出目前終期回收率僅有 0.5%的鋰具最高之回收性指標關鍵性。

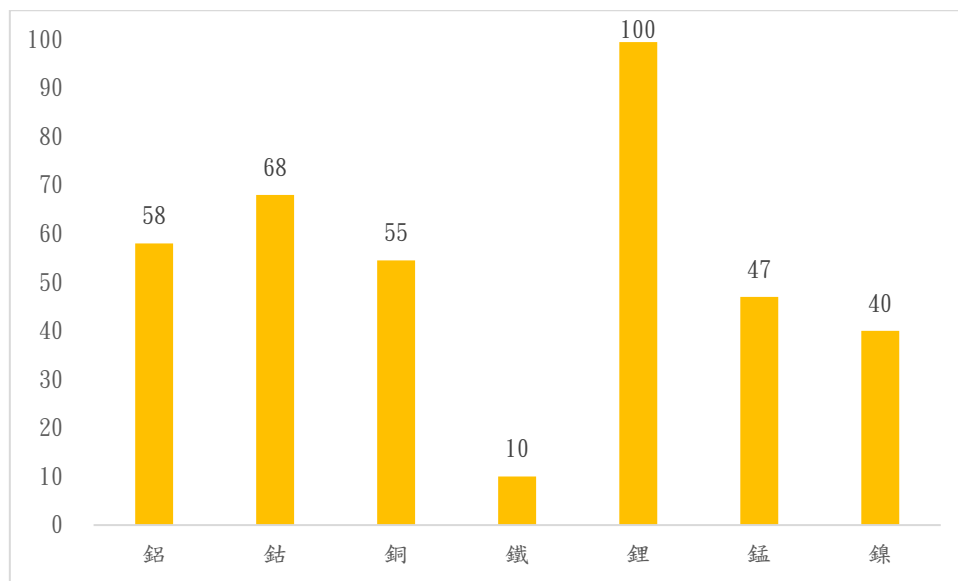


圖 4.18 儲能單元物料回收性指標關鍵性

綜合上述六個治理面向的指標關鍵性，乘上權重進行加權分析，可以得到各個金屬整體治理面向的關鍵性評分(如圖 4.19)，可以看出鋰的治理面向關鍵性遠遠高出其他金屬，主要原因是因為鋰的金屬特性及市場潛力使其於物料成本指標、未來市場需求指標、替代性指標及回收性指標之關鍵性皆為最高。

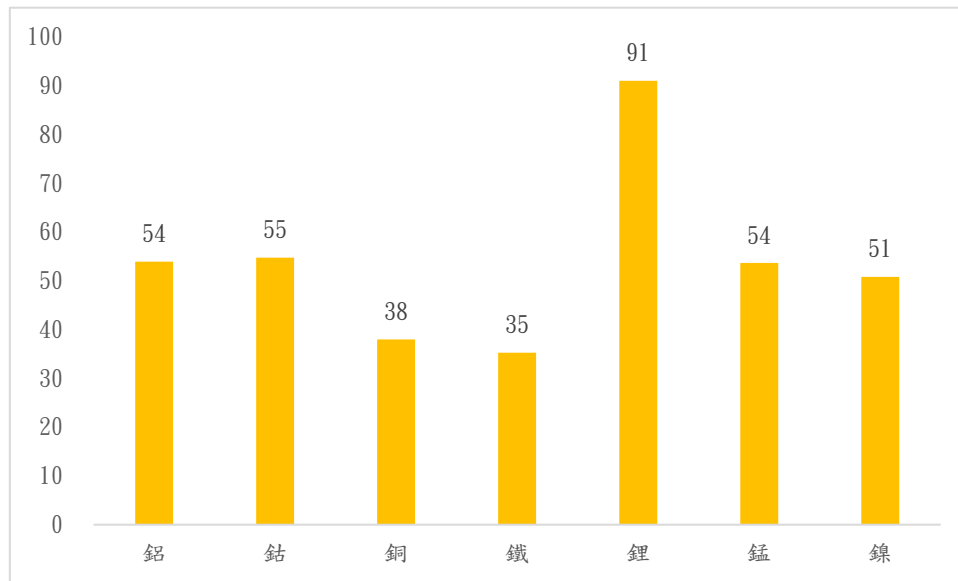


圖 4.19 儲能單元物料之治理面向關鍵性

#### 4.2.4 ESG 整體關鍵性分析

結合前面環境、社會和治理面向的關鍵性分析，可以得到 ESG 整體關鍵性的分析結果(如圖 4.20)，結果顯示對於儲能單元來說 ESG 整體關鍵性前三高的金屬依序為銅、鋰和鈷。關鍵程度最高的銅，其關鍵性來自環境面向的最高評分與社會面向的次高分；關鍵程度次高的鋰，其關鍵性來自治理面向遠高於其他金屬的極高分。

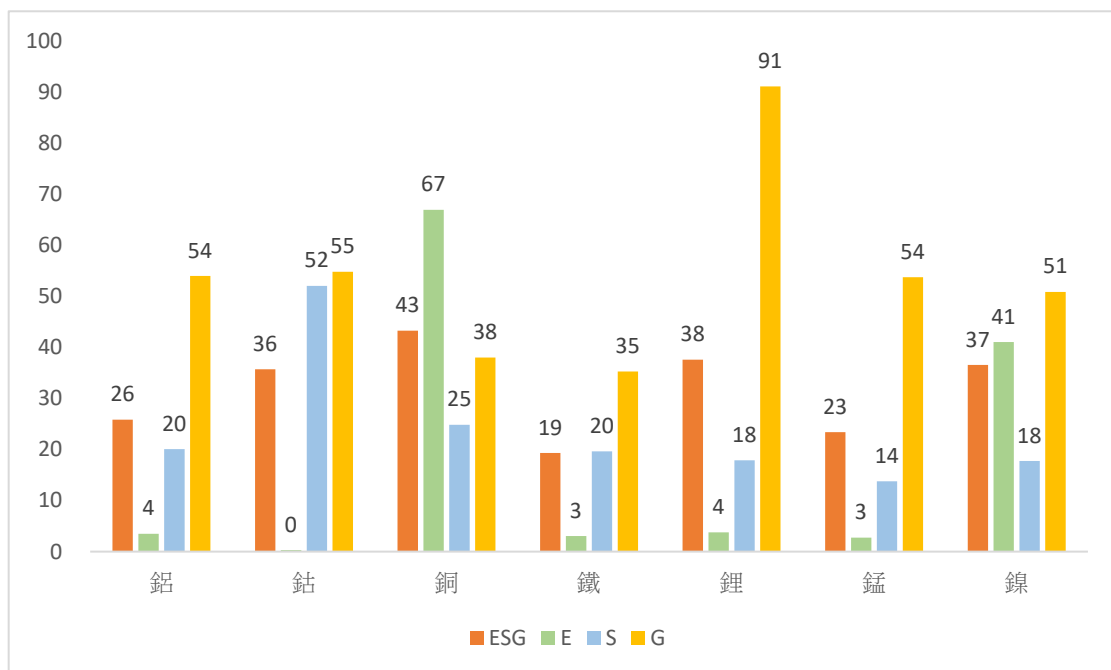


圖 4.20 儲能單元物料之 ESG 整體關鍵性

#### 4.2.5 關鍵性熱點分析

最後，我們可以經由關鍵物料評估模型的分析結果，整理出物料關鍵性高的熱點所在，以 ESG 整體關鍵性最高的銅為例，透過圖 4.21 的熱點分析圖，可以看出其關鍵性主要來自環境面向的生態系統和資源耗用指標、治理面向的現階段市場需求關鍵性也很高。需要注意的是，這裡的關鍵性數值是以各個指標中這些目標物料的最大值為 100，以此為基準進行相對性的比較值。經由熱點分析，我們可以進一步從中辨識風險及其原因，並探索可能的發展機會，為公司增加競爭力、創造長期價值。各個物料的關鍵性熱點與風險機會分析整理如表 4.7 所示。

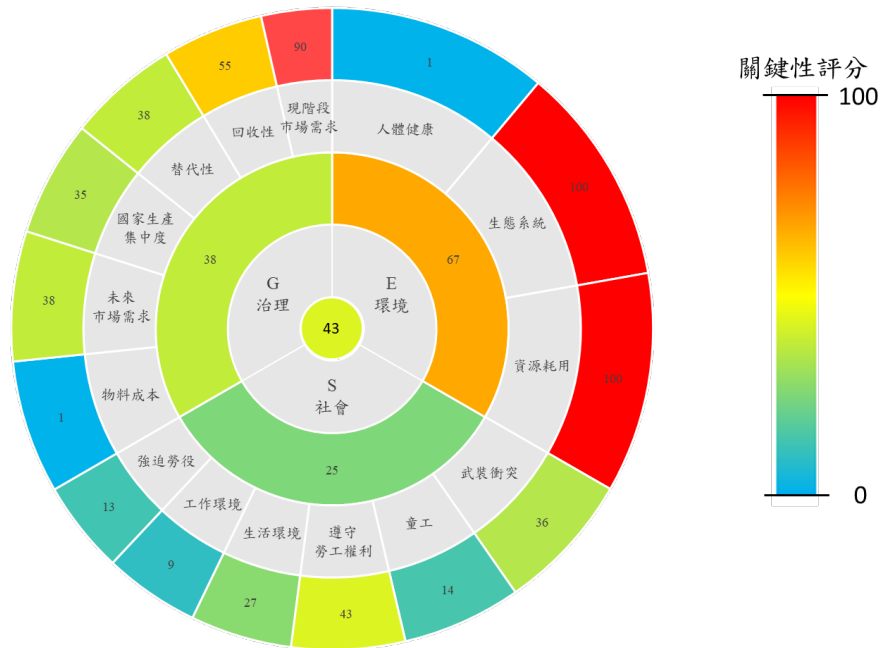


圖 4.21 銅之關鍵性熱點分析圖



表 4.7 物料的關鍵性熱點與風險機會分析

物料	關鍵性熱點	風險	機會
鋁	勞工權利、現階段市場需求	最大生產國中國的勞工權利問題、現階段市場需求過高	國際日漸重視中國的人權問題、發展循環經濟策略分擔市場需求
鈷	武裝衝突、童工、生活環境、強迫勞役、國家生產集中度	最大生產國剛果的社會問題，加上生產過於集中於這個國家，將會讓潛在的供應風險問題更加嚴重	積極處理剛果的社會問題將有效降低鈷的關鍵性
銅	生態系統、資源耗用、現階段市場需求	冶煉銅精礦所產生的毒性、現階段市場需求會加速礦產資源耗用問題	透過回收技術能降低環境衝擊並分擔市場需求
鐵	替代性	鐵於負極的功能性尚難以替代	鼓勵研發新型的材料替代方案
鋰	物料成本、未來市場需求、替代性、回收性	高成本及隨著儲能產業發展的高需求，鋰於電極和電解液的功能尚難以替代、低回收率的問題難以突破	鼓勵研發安全、低風險的回收方案，加強開發鋰電池以外的電池類型
錳	替代性、現階段市場需求	錳於負極的功能性尚難以替代、現階段市場需求過高	發展循環經濟策略分擔市場需求，減少對原料的需求，延長資源的使用壽命
鎳	人體健康、替代性	鎳於負極的功能性尚難以替代，會讓人體健康風險的問題更加嚴重	鼓勵研發新型的材料替代方案，產品設計上減少對於鎳的需求

### 4.3 儲能單元關鍵物料之管理策略評估

本節將針對上一節分析出來的主要關鍵物料：銅、鋰，以及社會面向關鍵性最高的鈷，提供管理策略的建議，並探討不同管理策略對於減輕關鍵性的成效。

首先我們回顧造成這些關鍵物料高關鍵性的原因：對於 ESG 整體關鍵性最高及環境面向關鍵性最高的銅，其關鍵性來自於冶煉銅精礦所產生的毒性和礦產資源稀缺；對於 ESG 整體關鍵性次高及治理面向關鍵性最高的鋰，因其金屬特性及市場潛力使之物料成本指標、未來市場需求指標、替代性指標及回收性指標關鍵性皆為最高；對於社會面向關鍵性最高的鈷，因其最大生產國的社會狀況，使其在武裝衝突、童工、強迫勞役和生活環境四個指標都有著最高的關鍵性評分。接下來我們將針對這些造成原因提出可能的管理策略以降低其關鍵性。

根據國際能源署及文獻的資料指出，回收(recycling)是推薦用來減輕物料關鍵性的管理策略之一：特別是對於銅而言，因為銅是少數可以重複回收而不損失任何性能的材料之一，回收可以減緩對於銅資源的消耗，保護寶貴的自然資源，也能降低對於環境的衝擊，節約能源並減少二氧化碳排放；鋰金屬雖然現在能夠再利用的終期回收率(end-of-life recycling rate)極低，但有研究指出透過回收方法已能從廢棄電池提取高比例的鋰，已具極高恢復率(recovery rate)，未來仍具有潛力透過回收方法來提升回收率，進而降低物料成本與未來市場需求，緩解需求面的壓力並避免遭遇供應面的瓶頸。美國已發布國家鋰電池藍圖(National Blueprint for Lithium Batteries)，闡述了在國內建立安全的電池材料和技術供應鏈的願景，希望能為整個供應鏈制定目標，為政策制定者、企業和投資者提供長期指導，其中也包括了廢棄關鍵材料回收的部分，可見回收對於儲能產業所扮演的重要角色(Bibra et al., 2022; Holland, 2020; ICA, 2021)。

接下來將針對兩種主要的回收方法：火法冶金(Pyrometallurgy)和濕法冶金(Hydrometallurgy)進行減輕關鍵性成效之探討。銅和鋰目前的終期回收率分別為45.5%和0.5%，文獻記載未來有潛力分別達到70%和4.9%。接著從文獻中找出

火法冶金和濕法冶金的恢復率，假設恢復率與終期回收率成比例關係、假設火法冶金和濕法冶金各自貢獻了一半的終期回收率，即可由現在的終期回收率推算兩種方法與終期回收率的比例關係，接著可由未來的終期回收率其成長幅度進而推算出兩種方法未來可能達到的終期回收率(如表 4.8)。藉著技術發展帶來的終期回收率上升，使得物料再利用的比例上升，有助於減少原物料的耗用，並降低開採與加工過程中所產生的環境汙染；隨著原物料需求的減少，也能降低童工和強迫勞役的情形；再生物料的增加，將造成未來對於原生物料的市場需求降低，儘管進行回收需要成本，但仍小於使用原生物料的成本，使得儲能單元物料成本會降低。本研究將新的參數以及相關影響帶入關鍵物料評估模型中，可以得到火法冶金和濕法冶金兩種回收方法減輕關鍵性的成效。

表 4.8 回收方法之參數整理

		銅	鋰	資料來源
現在的終期回收率 Current EOL-RR		45.5%	0.5%	(IEA, 2021)
未來可能達到的終期回收率 Potential EOL-RR		70%	4.9%	(Henckens, 2021; IEA, 2021)
火法 冶金法	恢復率 Recovery rate	90.7%	82.4%	(Sommerfeld et al., 2020)
	終期回收率 EOL-RR	81.7%	4.5%	本研究估算
濕法 冶金法	恢復率 Recovery rate	64.7%	98.8%	(Nayl et al., 2017)
	終期回收率 EOL-RR	58.3%	5.3%	本研究估算

回收方法對於銅的關鍵性影響如圖 4.22 所示，可以看出火法冶金法對於減輕銅的關鍵性有明顯的效果，整體 ESG 關鍵性評分從 43 分降至 20 分，降低了 53%。尤其是在環境面向有著顯著的降低(如圖 4.23)，環境面向關鍵性評分從 67 分降至 12 分，降低了 82%，對於生態系統和資源耗用指標評分皆從 100 分降至 18 分；此外，治理面向的回收性指標評分自 55 分降至 18 分、未來需求指標評分自 38 分降至 13 分。濕法冶金法也有著不錯的效果，整體 ESG 關鍵性評分從 43 分降至 28 分，降低了 35%，環境面向關鍵性評分從 67 分降至 28 分，降低了 58%。

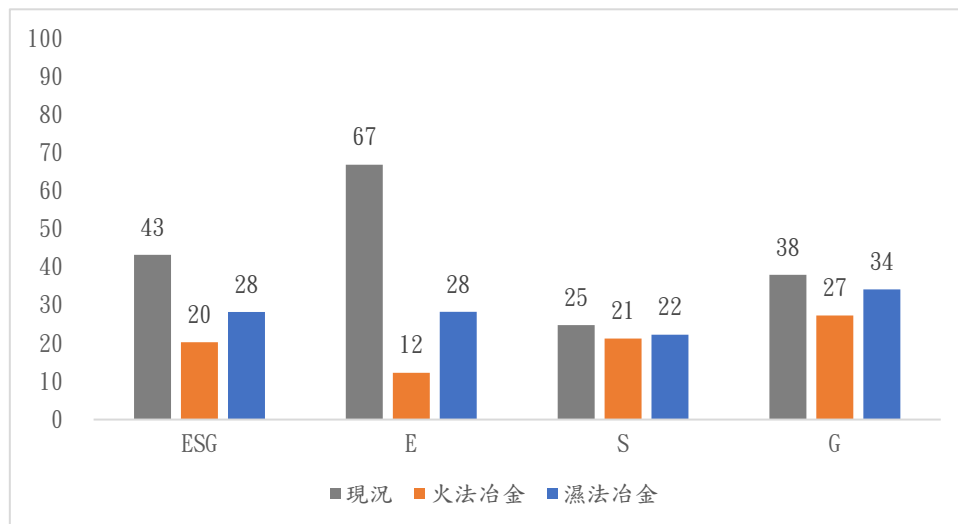


圖 4.22 回收方法對於銅的關鍵性影響

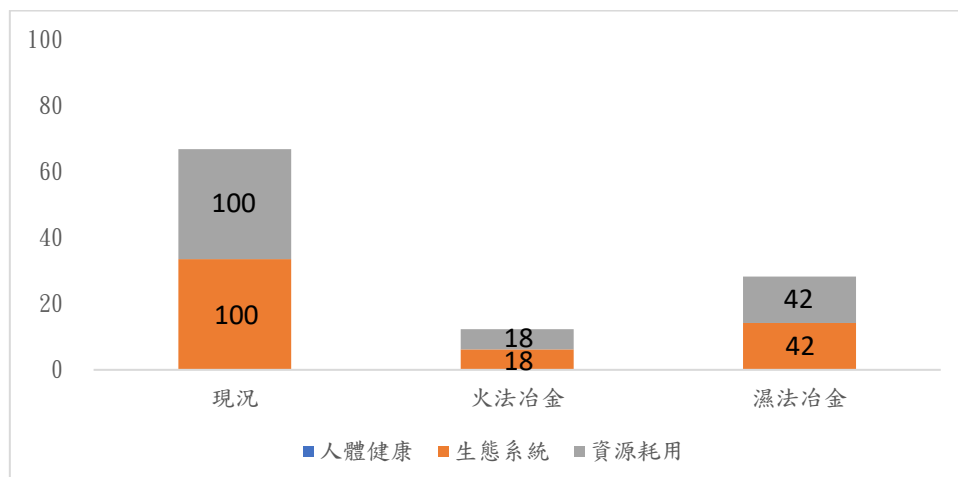


圖 4.23 回收方法對於銅的環境面向關鍵性影響

然而，兩種回收方法對於鋰的關鍵性影響皆不顯著(如圖 4.24)，整體 ESG 關鍵性評分皆只降低了 1 分，推測原因為未來可能達到的終期回收率太低，雖然已從現況的 0.5% 提升到 4.9%，提升了將近十倍，但仍難以達到降低關鍵性的水準。儘管回收技術已能從廢棄電池提取高比例的鋰，但鋰的高活性、可能產生激烈氧化反應而起火爆炸的特性，使得難以將提取的鋰回到再利用的循環中，需要未來發展出較安全、低風險的處理技術來利用恢復率與終期回收率間的空間。此外，金屬對於儲能單元的替代性也同樣有待未來技術創新進展而突破現況的限制。

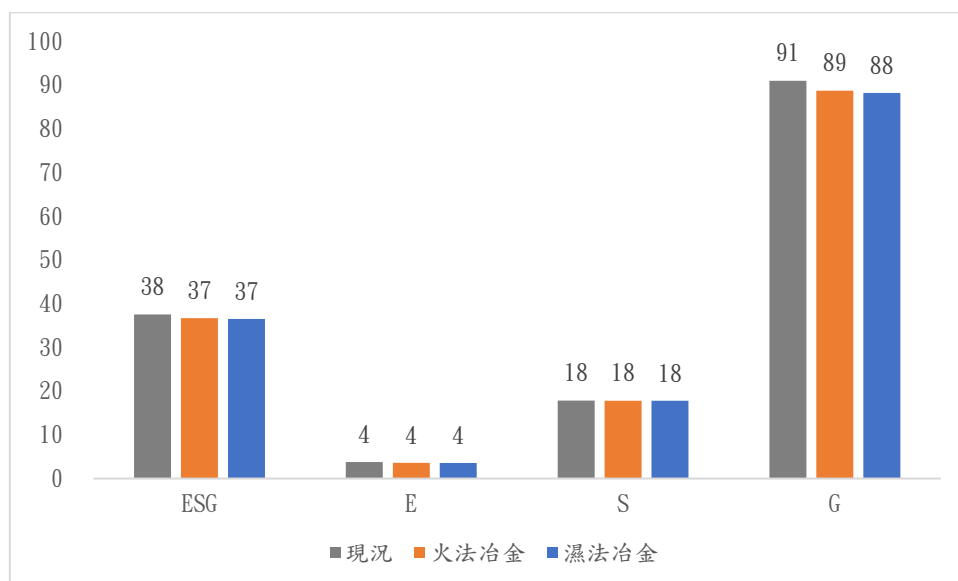


圖 4.24 回收方法對於鋰的關鍵性影響


至於社會面向關鍵性最高的鈷，其關鍵性高的原因是最大生產國—剛果民主共和國的社會狀況，使其在武裝衝突、童工、強迫勞役和生活環境都有著最高評分。為了改善剛果的社會狀況，需要國際組織、政策制定者、非政府組織、社區團體、企業和消費者之間的通力合作。鈷製成相關產品的使用者也有義務和責任確保產業是否安全、公平地採購和進行鈷的交易 (Cheruga et al., 2020)。

#### 4.4 討論

本節將對於模型建構、分析過程、分析結果三個層面進行討論：

本研究主要透過問卷調查的結果建構關鍵物料評估模型，而問卷填答者對於問卷結果影響十分重大，研究者盡可能的透過電子郵件與通訊軟體群組發放給儲能產業相關的專家與主管，但仍難以掌握填答對象對於 ESG 的理解以及對於公司永續發展策略的掌握程度；為了建立以企業為導向的評估模型，研究所招募的問卷填答者都是來自產業界，但也可能因此具有視野上的侷限性；此外，根據問卷結果顯示大部份填答者屬於電池供應鏈中的中下游廠商，較缺乏對於原物料較熟悉的上游廠商。第二次問卷通過一致性檢定的樣本數雖滿足文獻記載大於五筆的建議，但也僅是滿足最低的標準，若能蒐集到更多滿足一致性的樣本數會更好，另外也有填答者回饋在填寫第二次問卷中比較社會面向指標時覺得難以判斷。上述因素都有可能影響到問卷與模型建構的結果。

關鍵物料評估模型中的各個指標會以 0 分至 100 分的尺度呈現，對於原先沒有 0 至 100 相似評估分數的指標，本研究主要採取的作法是將最大值設定為 100 分，以此為標的進行相對的線性轉換，然而這種轉換方法會使差距較大的原始數值出現懸殊的關鍵性評分，例如人體健康和物料成本指標，若改用對數或曲線型的轉換方式能夠讓關鍵性評分的差異較小，或許能達到更合適的評估效果。資料的可信度是分析過程中另一個重要關鍵，本研究盡可能地採用來自文獻和國際組織等較具公信力的資料，但受限於可取得的公開資料，有些資料來自於單一國家對於世界各國的評析，其可信度便有待商榷；研究過程中也遇過對於相同議題有截然不同的論述，例如文獻中指出剛果有使用強迫勞役的情形，但也有資料談到剛果並沒有使用強迫勞役，如遇到此有爭議的狀況也只好採用較可信的資料；此外，像是童工或強迫勞役等具負面意義的資訊，可能因其定義不一而產生不同解讀、也可能出現粉飾太平的企圖，使得數據未必精準。



關於分析結果，本研究所提出的回收策略難以降低鋰的關鍵性，故需要提出其他方向的管理策略來改善此問題，例如從成本面、需求面來管理其關鍵程度，以避免可能遭遇到的營運風險；對於鋰金屬高恢復率卻低終期回收率的特性，這中間的巨大差距也是相當值得探討的潛在機會。最後，雖然研究結果顯示火法冶金法能夠有效降低銅金屬的整體關鍵性及環境面向的關鍵性，但是火法冶金法所產生的空氣汙染及高能耗問題並未歸納於金屬物質的環境影響，因此雖然帳面上金屬的環境影響變少了，但仍須審慎考量施行回收方法整體所產生的環境衝擊。

本研究建立了獨特的企業導向並考量 ESG 的關鍵物料評估模型，目前尚未有其他研究採用 ESG 來評估關鍵物料，可能原因在於治理面向與物料的關聯性。根據金融監督管理委員會的介紹，公司治理是指導及管理企業的機制，其原則包括確立有效公司治理架構之基礎、資訊揭露和透明等六項原則(金融監督管理委員會, 2020)。本研究所篩選出的六個治理面向指標：物料成本、未來市場需求、國家生產集中度、替代性、回收性及現階段市場需求，考量了成本、市場、供應、替代、回收等管理上的重要議題，能夠協助企業了解其產品所使用的原物料，有效加強物料管理，使企業善用資源。經由考量 ESG 的關鍵物料評估模型，能幫助企業以更廣闊的視角評估物料，藉此提升永續競爭力。

## 第五章 結論與建議

本研究以模糊層級分析法為主軸，經由文獻探討與兩階段的問卷調查進行指標篩選與權重分析，建立了獨特的企業導向並考量 ESG 的關鍵物料評估模型。此模型包含了環境、社會與治理三個面向：環境面向包括人體健康、生態系統與資源耗用三個指標；社會面向包括武裝衝突、童工、遵守勞工權利、生活環境、工作環境與強迫勞役六個指標；治理面向包括物料成本、未來市場需求、國家生產集中度、替代性、回收性與現階段市場需求六個指標。

為了驗證模型的適用性，我們運用此模型評估儲能單元中金屬成分的關鍵性，結果顯示銅是儲能單元中 ESG 整體關鍵性最高的物料，其環境面向也獲得了最高評分，其關鍵性主要來自於冶煉銅精礦所產生的毒性和礦產資源稀缺；ESG 整體關鍵性次高的鋰，其治理面向的關鍵程度遠高於其他物料，其關鍵性來自於物料成本、未來市場需求、替代性及回收性；社會面向的關鍵性最高的鈷，其關鍵性主要來自於其最大生產國的社會狀況，使其在武裝衝突、童工、強迫勞役和生活環境四個社會面向的指標都有最高的關鍵性。

接著我們可以針對這些造成高關鍵性的原因提出適當的管理策略，並評估管理策略對於關鍵物料的關鍵性減輕效果。對於銅和鋰環境面向與治理面向的關鍵性，回收是國際組織及文獻建議能夠減輕物料關鍵性的作法，我們的研究結果顯示：火法冶金法能夠顯著地降低銅於環境面向及 ESG 整體的關鍵性評分，但火法冶金法和濕法冶金法皆難以有效降低鋰的關鍵性評分，可能原因為鋰難以回收至產業鏈再利用的技術限制。至於鈷的社會面向關鍵性，則有賴於國際、政府與民間的共同合作以改善剛果的社會環境，大眾也須提升對於物料安全與公平採購的意識。

透過本次儲能單元的案例示範，展示出本研究所開發的關鍵物料評估模型易於操作、使用量化指標、方便視覺化呈現的特性。企業使用者可以很容易地輸入內部或公開資料以分析物料之關鍵性，分析成果能夠以量化及視覺化的方式呈現，

讓使用者及其利害關係人能夠清楚地明白物料於 ESG 面向的關鍵程度，也能深入剖析關鍵性的產生原因，從而對症下藥規劃對策因應問題。

企業通過評估模型找出關鍵物料，判別其關鍵性熱點，及早規劃管理策略，降低營運與供應鏈斷鏈的風險，確保供應穩定性，維持企業的競爭力。此外，也能避免因環境與社會議題所帶來的反響，減少 ESG 所衍生的風險。企業能經由對於關鍵原物料的管理，創造提升 ESG 評級的機會，吸引投資人目光。目前僅有少數企業在永續報告書中有提及關鍵物料，少數提及的報告書中對於關鍵物料的記載並不詳細，我們難以得知企業如何判斷其關鍵物料，應用本研究之成果，企業可以在永續報告書中充分揭露評估關鍵物料的篩選方法與結果，彰顯企業對於永續發展與關鍵原物料的重視，而非僅是宣傳上的漂綠作為，能夠堅實地塑造企業永續品牌。

台灣是個海島國家，且本身並不生產儲能單元所需之金屬，原物料與能源皆需仰賴進口，因此辨識關鍵物料對於供應鏈管理的幫助更顯得重要。台灣較少與原料直接相關的電池供應鏈上游廠商，期許能藉著這個機會讓中下游廠商從不同的角度來看待原物料，不再僅是以成本導向，而是從更全面的 ESG 角度來認識其產品所需的關鍵物料。

受限於生命週期評估的資料取得不易，本研究僅針對較大範疇的鋰電池進行案例示範，未來若資料庫建立的更為完整，或是公司能自行建構其產品的生命週期評估模型，則可以對於各類型的鋰電池進行分析，例如對三元系鋰電池和磷酸鋰鐵電池進行分析及比較。另外也能針對回收以外的循環經濟管理策略探討其效果，例如 Gaustad 等人(2018)所提出如收集、精簡原則、非物質化多樣化等基於循環經濟的緩解策略。本研究之關鍵物料評估模型可以嘗試應用在儲能單元之外的對象，也能針對不同的對象重新建構評估模型，以貼近不同產業的獨特需求，甚至 ESG 三大面向、環境面向也可以進行權重分析，環境面向的指標也未必只能採用生命週期評估的三個終點指標，可以依產業需求提出特別

值得關注的議題進行分析。最後，目前對於關鍵物料的研究僅針對金屬物料，然而企業對於物料管理的對象通常不只是金屬物料，未來對於關鍵物料的研究可以朝向非金屬物料發展，但非金屬物料的資料取得會更加複雜、更難以估算，因此會是一個十分艱鉅但值得的挑戰。

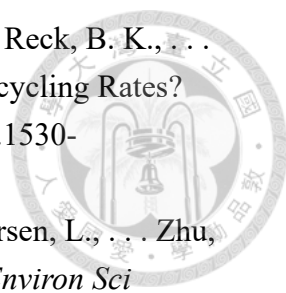


## 參考文獻



- AFP, A. F.-P. (2023). Indonesian farmers fight for their land in nickel mining boom. Retrieved from <https://www.france24.com/en/live-news/20230313-indonesian-farmers-fight-for-their-land-in-nickel-mining-boom>
- Agreement, P. (2015). *Paris agreement*. Paper presented at the Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Alayza, N., Bhandari, P., Burns, D., Cogswell, N., de Zoysa, K., Finch, M., . . . Langer, P. (2022). COP27: Key Takeaways and What's Next.
- Aliyev, R., Temizkan, H., & Aliyev, R. (2020). Fuzzy Analytic Hierarchy Process-Based Multi-Criteria Decision Making for Universities Ranking. *Symmetry*, *12*(8). doi:10.3390/sym12081351
- Apple. (2019). Material Impact Profiles. Retrieved from [https://www.apple.com/environment/pdf/Apple\\_Material\\_Impact\\_Profiles\\_April2019.pdf](https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_Material_Impact_Profiles_April2019.pdf)
- Apple. (2023). Apple will use 100 percent recycled cobalt in batteries by 2025. Retrieved from <https://www.apple.com/newsroom/2023/04/apple-will-use-100-percent-recycled-cobalt-in-batteries-by-2025/>
- Arshad, F., Lin, J., Manurkar, N., Fan, E., Ahmad, A., Tariq, M.-u.-N., . . . Li, L. (2022). Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries: A Critical Review. *Resources, Conservation and Recycling*, *180*. doi:10.1016/j.resconrec.2022.106164
- Avetisyan, E., Hockerts, K. J. B. S., & Environment, t. (2017). The consolidation of the ESG rating industry as an enactment of institutional retrogression. *26*(3), 316-330.
- Baum, Z. J., Bird, R. E., Yu, X., & Ma, J. (2022). Lithium-Ion Battery Recycling—Overview of Techniques and Trends. *ACS Energy Letters*, *7*(2), 712-719. doi:10.1021/acseenergylett.1c02602
- Bensch, S., Kolotzek, C., Helbig, C., Thorenz, A., & Tuma, A. (2015). *Decision support system for the sustainability assessment of critical raw materials in SMEs*. Paper presented at the 2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences.
- Bibra, E. M., Connelly, E., Dhir, S., Drtil, M., Henriot, P., Hwang, I., . . . Teter, J. (2022). Global EV outlook 2022: Securing supplies for an electric future.
- Bongartz, L., Shammugam, S., Gervais, E., & Schlegl, T. (2021). Multidimensional criticality assessment of metal requirements for lithium-ion batteries in electric vehicles and stationary storage applications in Germany by 2050. *Journal of*

- Cleaner Production*, 292. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126056
- Brzeszczyński, J., & McIntosh, G. J. J. o. b. e. (2014). Performance of portfolios composed of British SRI stocks. *120*, 335-362.
- Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233-247. doi:10.1016/0165-0114(85)90090-9
- Cheruga, B., Liron, R., & Canavera, M. (2020). Ensuring children's social protection in the Democratic Republic of the Congo: A case study of combating child labour in the copper-cobalt belt. 273.
- Ciez, R. E., & Whitacre, J. F. (2019). Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nature Sustainability*, 2(2), 148-156. doi:10.1038/s41893-019-0222-5
- DOE, U. S. D. o. E. (2023). Electric Vehicle Battery Pack Costs in 2022 Are Nearly 90% Lower than in 2008, according to DOE Estimates. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1272-january-9-2023-electric-vehicle-battery-pack-costs-2022-are-nearly>
- DOS, T. U. S. D. o. S. (2019). 2019 Trafficking in Persons Report.
- Duclos, S. J., Otto, J. P., & Konitzer, D. G. (2010). Design in an era of Constrained Resources. *Mechanical Engineering*, 132(09), 36-40. doi:10.1115/1.2010-Sep-3
- EJAtlas, E. J. A. (2023). Mining conflicts in Latin America. Retrieved from <https://ejatlas.org/featured/mining-latam>
- Erdmann, L., & Graedel, T. E. (2011). Criticality of non-fuel minerals: a review of major approaches and analyses. *Environ Sci Technol*, 45(18), 7620-7630. doi:10.1021/es200563g
- Fleischmann, J., Hanicke, M., Horetsky, E., Ibrahim, D., Jautelat, S., Linder, M., . . . van de Rijt, A. (2023). Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular.
- FREEDOM, d. f. (2020). Steel's tensile strength and low cost can have a high human cost. Retrieved from <https://www.designforfreedom.org/get-the-facts/steels-tensile-strength-and-low-cost-can-have-a-high-human-cost/>
- Frenzel, M., Kullik, J., Reuter, M. A., & Gutzmer, J. (2017). Raw material 'criticality'—sense or nonsense? *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(12). doi:10.1088/1361-6463/aa5b64
- Gaustad, G., Krystofik, M., Bustamante, M., & Badami, K. (2018). Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 24-33. doi:10.1016/j.resconrec.2017.08.002
- Glöser, S., Tercero Espinoza, L., Gandenberger, C., & Faulstich, M. (2015). Raw material criticality in the context of classical risk assessment. *Resources Policy*, 44, 35-46. doi:10.1016/j.resourpol.2014.12.003

- 
- Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., . . . Sonnemann, G. (2011). What Do We Know About Metal Recycling Rates? *Journal of Industrial Ecology*, *15*(3), 355-366. doi:10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x
- Graedel, T. E., Barr, R., Chandler, C., Chase, T., Choi, J., Christoffersen, L., . . . Zhu, C. (2012). Methodology of metal criticality determination. *Environ Sci Technol*, *46*(2), 1063-1070. doi:10.1021/es203534z
- Graedel, T. E., & Reck, B. K. (2016). Six Years of Criticality Assessments: What Have We Learned So Far? *Journal of Industrial Ecology*, *20*(4), 692-699. doi:10.1111/jiec.12305
- Griffin, G., Gaustad, G., & Badami, K. (2019). A framework for firm-level critical material supply management and mitigation. *Resources Policy*, *60*, 262-276. doi:10.1016/j.resourpol.2018.12.008
- Gunn, G. (2014). *Critical metals handbook*: John Wiley & Sons.
- Hallstedt, S. I., & Isaksson, O. (2017). Material criticality assessment in early phases of sustainable product development. *Journal of Cleaner Production*, *161*, 40-52. doi:10.1016/j.jclepro.2017.05.085
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., . . . Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, *575*(7781), 75-86. doi:10.1038/s41586-019-1682-5
- Helbig, C., Wietschel, L., Thorenz, A., & Tuma, A. (2016). How to evaluate raw material vulnerability - An overview. *Resources Policy*, *48*, 13-24. doi:10.1016/j.resourpol.2016.02.003
- Henckens, T. (2021). Scarce mineral resources: Extraction, consumption and limits of sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, *169*. doi:10.1016/j.resconrec.2021.105511
- Holland, M. (2020). Reducing the health risks of the copper, rare earth and cobalt industries: Transition to a circular low-carbon economy.
- IAI, I. A. I. (2022). *Report Reveals Global Aluminium Demand to Reach New Highs After Covid*. Retrieved from <https://international-aluminium.org/report-reveals-global-aluminium-demand-to-reach-new-highs-after-covid/>
- ICA, I. C. A. (2021). Copper Recycling. Retrieved from <https://copperalliance.org/resource/copper-recycling/>
- IEA, I. E. A. (2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions* (9264679944). Retrieved from <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- IEA, I. E. A. (2022). End-of-life recycling rates for selected metals. In. Paris: IEA.
- ILAB, T. B. o. I. L. A. (2022). *List of Goods Produced by Child Labor or Forced*

*Labor*. Retrieved from [https://www.dol.gov/agencies/ilab/reports/child-labor/list-of-goods?combine=&field\\_exp\\_exploitation\\_type\\_target\\_id\\_1=All&tid=All&field\\_exp\\_good\\_target\\_id=All&items\\_per\\_page=10&order=name&sort=asc&page=14](https://www.dol.gov/agencies/ilab/reports/child-labor/list-of-goods?combine=&field_exp_exploitation_type_target_id_1=All&tid=All&field_exp_good_target_id=All&items_per_page=10&order=name&sort=asc&page=14)



- ISO, I. O. f. S. (2006a). Environmental management: life cycle assessment: principles and framework. *14040*.
- ISO, I. O. f. S. (2006b). Environmental management: life cycle assessment: requirements and guidelines. *14044*.
- Jain, M., Sharma, G. D., & Srivastava, M. J. R. (2019). Can sustainable investment yield better financial returns: A comparative study of ESG indices and MSCI indices. *7*(1), 15.
- Jena, K. K., AlFantazi, A., & Mayyas, A. T. (2021). Comprehensive Review on Concept and Recycling Evolution of Lithium-Ion Batteries (LIBs). *Energy & Fuels*, *35*(22), 18257-18284. doi:10.1021/acs.energyfuels.1c02489
- Julio, A. A. V., Milessi, T. S., Ocampo Batlle, E. A., Silva Lora, E. E., Yepes Maya, D. M., & Escobar Palacio, J. C. (2022). Techno-economic and environmental potential of Renewable Diesel as complementation for diesel and biodiesel in Brazil: A comprehensive review and perspectives. *Journal of Cleaner Production*, *371*. doi:10.1016/j.jclepro.2022.133431
- Kannan, D., Khodaverdi, R., Olfat, L., Jafarian, A., & Diabat, A. (2013). Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multi-objective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain. *Journal of Cleaner Production*, *47*, 355-367. doi:10.1016/j.jclepro.2013.02.010
- Kapesa, R., Mwitwa, J., Chikumbi, D. C. J. S. A. P., & Studies, S. (2015). Social Conflict in the Context of the Development of New mining Concessions in Zambia. *4*(2), 41-62.
- Karabelli, D., Kiemel, S., Singh, S., Koller, J., Ehrenberger, S., Mieke, R., . . . Birke, K. P. (2020). Tackling xEV Battery Chemistry in View of Raw Material Supply Shortfalls. *Frontiers in Energy Research*, *8*. doi:10.3389/fenrg.2020.594857
- Katz-Lavigne, S. (2019). Artisanal copper mining and conflict at the intersection of property rights and corporate strategies in the Democratic Republic of Congo. *The Extractive Industries and Society*, *6*(2), 399-406. doi:10.1016/j.exis.2018.12.001
- Kim, J., Lee, J., Kim, B., & Kim, J. (2019). Raw material criticality assessment with weighted indicators: An application of fuzzy analytic hierarchy process.

- Resources Policy*, 60, 225-233. doi:10.1016/j.resourpol.2019.01.005
- Knobloch, V., Zimmermann, T., & Göbbling-Reisemann, S. (2018). From criticality to vulnerability of resource supply: The case of the automobile industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 272-282. doi:10.1016/j.resconrec.2018.05.027
- Kolotzek, C., Helbig, C., Thorenz, A., Reller, A., & Tuma, A. (2018). A company-oriented model for the assessment of raw material supply risks, environmental impact and social implications. *Journal of Cleaner Production*, 176, 566-580. doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.162
- Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Tanikawa, H., Fishman, T., . . . Haberl, H. (2017). Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 114(8), 1880-1885. doi:10.1073/pnas.1613773114
- Lapko, Y., Trucco, P., & Nuur, C. (2016). The business perspective on materials criticality: Evidence from manufacturers. *Resources Policy*, 50, 93-107. doi:10.1016/j.resourpol.2016.09.001
- Larcker, D. F., Pomorski, L., Tayan, B., & Watts, E. M. (2022). ESG ratings: A compass without direction.
- Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., & Mellander, B. E. (2018). Author Correction: Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Sci Rep*, 8(1), 5265. doi:10.1038/s41598-018-22957-8
- Lehmen, A. J. A. L. (2021). The rise of ESG Law: in search of lost time. 2.
- Li, T.-T., Wang, K., Sueyoshi, T., & Wang, D. D. J. S. (2021). ESG: Research progress and future prospects. *I3*(21), 11663.
- Lo, S. F., & Sheu, H. J. J. C. G. A. I. R. (2007). Is corporate sustainability a value-increasing strategy for business? , *I5*(2), 345-358.
- Mackenzie, W. (2020). LFP to overtake NMC as dominant stationary storage chemistry by 2030. *I7*, 2020.
- Mahad, N. F., Yusof, N., & Ismail, N. F. (2019). The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to solve multi-criteria decision making (MCDM) problems. *Journal of Physics: Conference Series*, 1358(1). doi:10.1088/1742-6596/1358/1/012081
- Mathew, M. (2018). Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) - Using Geometric Mean. Retrieved from [https://www.youtube.com/watch?v=5k3Wz1AfVWs&t=355s&ab\\_channel=ManojMathew](https://www.youtube.com/watch?v=5k3Wz1AfVWs&t=355s&ab_channel=ManojMathew)
- Mayyas, A., Steward, D., & Mann, M. (2019). The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries.

- Sustainable Materials and Technologies*, 19. doi:10.1016/j.susmat.2018.e00087
- MCA, M. C. o. A. (2021). *Commodity Demand Outlook 2030*. Retrieved from <https://minerals.org.au/wp-content/uploads/2022/12/Commodity-Outlook-2030.pdf>
- Michael, Z. H., Ralph, K. R., & Stig, I. O. (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. In: Springer.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *63*(2), 81.
- Montoya, A. T., Yang, Z., Dahl, E. U., Puppek, K. Z., Polzin, B., Dunlop, A., & Vaughey, J. T. (2022). Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Cathodes: A Multi-Stage Annealing Process to Recover the Pristine Structure and Performance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(40), 13319-13324. doi:10.1021/acssuschemeng.2c02643
- MSCI, M. S. C. I. (2023). ESG Ratings Key Issue Framework. Retrieved from <https://www.msci.com/our-solutions/esg-investing/esg-ratings/esg-ratings-key-issue-framework>
- Nayl, A. A., Elkhashab, R. A., Badawy, S. M., & El-Khateeb, M. A. (2017). Acid leaching of mixed spent Li-ion batteries. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3632-S3639. doi:10.1016/j.arabjc.2014.04.001
- Normile, D. (2021). Genetics papers from China face ethical scrutiny. In: American Association for the Advancement of Science.
- Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wager, P., Stamp, A., Zah, R., & Althaus, H. J. (2010). Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environ Sci Technol*, 44(17), 6550-6556. doi:10.1021/es903729a
- NRC, N. R. C. (2008). *Minerals, critical minerals, and the US economy*: National Academies Press.
- O'Driscoll, D. (2017). Overview of child labour in the artisanal and small-scale mining sector in Asia and Africa.
- Oguztimur, S. (2023). Why Fuzzy Analytic Hierarchy Process Approach For Transport Problems?
- Peng, G., Han, L., Liu, Z., Guo, Y., Yan, J., & Jia, X. (2021). An Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process in Risk Evaluation Model. *Front Psychol*, 12, 715003. doi:10.3389/fpsyg.2021.715003
- Peng, Y., Yang, L., Ju, X., Liao, B., Ye, K., Li, L., . . . Ni, Y. (2020). A comprehensive investigation on the thermal and toxic hazards of large format lithium-ion batteries with LiFePO<sub>4</sub> cathode. *J Hazard Mater*, 381, 120916. doi:10.1016/j.jhazmat.2019.120916
- Prause, L. (2020). Conflicts related to resources: The case of cobalt mining in the

- Democratic Republic of Congo. In *The material basis of energy transitions* (pp. 153-167): Elsevier.
- PRNewswire. (2023). Global Manganese Market to Reach 39.3 Million Metric Tons by 2030. Retrieved from <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-manganese-market-to-reach-39-3-million-metric-tons-by-2030--301768783.html>
- Raj, T., Chandrasekhar, K., Kumar, A. N., Sharma, P., Pandey, A., Jang, M., . . . Kim, S. H. (2022). Recycling of cathode material from spent lithium-ion batteries: Challenges and future perspectives. *J Hazard Mater*, 429, 128312. doi:10.1016/j.jhazmat.2022.128312
- Russo, R. d. F. S. M., & Camanho, R. (2015). Criteria in AHP: A Systematic Review of Literature. *Procedia Computer Science*, 55, 1123-1132. doi:10.1016/j.procs.2015.07.081
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1). doi:10.1504/ijssci.2008.017590
- Sachs, J., Kroll, C., Lafortune, G., Fuller, G., & Woelm, F. (2022). *Sustainable development report 2022*: Cambridge University Press.
- Satty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process, analytic hierarchy process. In: McGraw-Hill, New York, NY.
- Sethurajan, M., van Hullebusch, E. D., Fontana, D., Akcil, A., Deveci, H., Batinic, B., . . . Chmielarz, A. (2019). Recent advances on hydrometallurgical recovery of critical and precious elements from end of life electronic wastes - a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(3), 212-275. doi:10.1080/10643389.2018.1540760
- Škare, M., & Golja, T. J. E. r.-E. i. (2012). Corporate social responsibility and corporate financial performance—is there a link? (1), 215-242.
- Sommerfeld, M., Vonderstein, C., Dertmann, C., Klimko, J., Oráč, D., Miškufová, A., . . . Friedrich, B. (2020). A Combined Pyro- and Hydrometallurgical Approach to Recycle Pyrolyzed Lithium-Ion Battery Black Mass Part 1: Production of Lithium Concentrates in an Electric Arc Furnace. *Metals*, 10(8). doi:10.3390/met10081069
- Stone, M. J. N. G. (2021). As electric vehicles take off, we'll need to recycle their batteries. *19*.
- Sun, B., Tang, J., Yu, D., Song, Z., & Wang, P. (2019). Ecosystem health assessment: A PSR analysis combining AHP and FCE methods for Jiaozhou Bay, China1. *Ocean & Coastal Management*, 168, 41-50. doi:10.1016/j.ocecoaman.2018.10.026
- Swanson, A., & Buckley, C. (2022). Red Flags for Forced Labor Found in China's Car

Battery Supply Chain. Retrieved from

<https://www.nytimes.com/2022/06/20/business/economy/forced-labor-china-supply-chain.html>

- Taylor, J., Vithayathil, J., Yim, D. J. C. s. r., & management, e. (2018). Are corporate social responsibility (CSR) initiatives such as sustainable development and environmental policies value enhancing or window dressing? , 25(5), 971-980. *Tradingeconomics*. (2023). *Historical metal prices*. Retrieved from: <https://tradingeconomics.com/commodity/aluminum>
- UNEP, U. E. P. (2011). *Recycling Rates of Metals – A Status Report. A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel*. Retrieved from <https://www.resourcepanel.org/reports/recycling-rates-metals>
- USGS, U. S. G. S. (2023). *Mineral commodity summaries 2023*. Retrieved from <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023>
- van Laarhoven, P. J. M., & Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11(1-3), 229-241. doi:10.1016/s0165-0114(83)80082-7
- Vinayak, A. K., Xu, Z., Li, G., & Wang, X. (2023). Current Trends in Sourcing, Recycling, and Regeneration of Spent Lithium-Ion Batteries—A Review. *Renewables*, 1-22. doi:10.31635/renewables.023.202200008
- Vives, A., Wadhwa, B. J. J. o. S. F., & Investment. (2012). Sustainability indices in emerging markets: Impact on responsible practices and financial market development. 2(3-4), 318-337.
- Wang, M., Liu, K., Dutta, S., Alessi, D. S., Rinklebe, J., Ok, Y. S., & Tsang, D. C. W. (2022). Recycling of lithium iron phosphate batteries: Status, technologies, challenges, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163. doi:10.1016/j.rser.2022.112515
- Wang, Q. S., Sun, J. H., Chu, G. Q., Yao, X. L., & Chen, C. H. (2007). Effect of LiPF<sub>6</sub> on the thermal behaviors of four organic solvents for lithium ion batteries. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 89(1), 245-250. doi:10.1007/s10973-006-7534-1
- Wiemers-Meyer, S., Jeremias, S., Winter, M., & Nowak, S. (2016). Influence of Battery Cell Components and Water on the Thermal and Chemical Stability of LiPF<sub>6</sub> Based Lithium Ion Battery Electrolytes. *Electrochimica Acta*, 222, 1267-1271. doi:10.1016/j.electacta.2016.11.100
- Yudhistira, R., Khatiwada, D., & Sanchez, F. (2022). A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 358. doi:10.1016/j.jclepro.2022.131999
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.

doi:10.1016/s0019-9958(65)90241-x

Zhou, L. F., Yang, D., Du, T., Gong, H., & Luo, W. B. (2020). The Current Process for the Recycling of Spent Lithium Ion Batteries. *Front Chem*, 8, 578044.

doi:10.3389/fchem.2020.578044

中華民國經濟部. (2021). 推動能源轉型「展綠、增氣、減煤、非核」。 Retrieved from

[https://www.moea.gov.tw/MNS/populace/Policy/Policy.aspx?menu\\_id=32800&policy\\_id=9](https://www.moea.gov.tw/MNS/populace/Policy/Policy.aspx?menu_id=32800&policy_id=9)

王詠梅. (2020). 台灣鋰離子電池產業發展驅動力之研究. (碩士), 國立臺北科技大學, 臺北市.

王鈺鈞、邱炳嶽、許湘琴、劉致峻. (2019). 儲能產業在能源轉型趨勢下的機會與挑戰. *中技社專題報告*.

王儷涵. (2021). 基於生命週期與隨機 AHP 法評估坡地溪流整治工程之成效. (碩士), 國立臺灣大學, 台北市.

台灣電池協會. (2023). 產業鏈. Retrieved from

<http://www.taiwanbattery.org.tw/about/cluster>

行政院. (2023). 能源轉型，打造綠能科技島 — 綠能科技產業創新推動方案.

Retrieved from <https://www.ey.gov.tw/Page/5A8A0CB5B41DA11E/f381fa3b-711b-43c1-a043-50569a01d318>

呂學隆. (2013). 台灣鋰電池產業結構與發展現況.

李洪枚, & 姜亢. (2004). 廢舊鋰離子電池對環境污染的分析與對策. *上海環境科學*, 23(5), 201-230.

林宜諄. (2008). *企業社會責任入門手冊*. 臺北: 天下文化.

金融監督管理委員會. (2020). 公司治理簡介. Retrieved from <https://www.sfb.gov.tw/ch/home.jsp?id=882&parentpath=0%2C8>

黃建中, 太原麗子, 呂學隆, 林幸慧, 邱勝正, & 楊昌中. (2019). 電池檢測與階梯式再利用探討. Paper presented at the 能源科技產品暨檢測技術論文研討會.

楊敏生. (1994). 模糊理論簡介.

楊絡懸. (2022). 電動車起火難撲滅！「兩大電池陣營」安全大車拼：台泥、台塑、鴻海選邊站？. Retrieved from <https://tw.stock.yahoo.com/news/electric-car-battery-230026124.html>

經濟部. (2022). 臺灣 2050 淨零轉型「電力系統與儲能」關鍵戰略行動計畫 (核定本) Retrieved from

<https://ws.ndc.gov.tw/Download.ashx?u=LzAwMS9hZG1pbmlzdHJhdG9yLzEwL3JlbGZpbGUvMC8xNTAyOC8yZjlxMTI4Zi03ZDM1LTQ5NTU0OTY5Mi1lZTI4NjU5NzlmODIucGRm&n=MDRf6Zu75Yqb570757Wx6IiH5YSy6I096Zec6Y215oiw55Wl6KGM5YuV6KiI55WrKOaguOWumuacrCkucGRm&icon=.pdf>

- 褚志鵬.(2009). *層級分析法 (AHP) 理論與實作*: 才華有限實驗室.
- 蔡明瞭, 林民禾, 杜景順, & 劉文龍. (2013). 以電沉積法由廢鋰離子電池中回收有價金屬. Paper presented at the 綠色科技工程與應用研討會.
- 蔡淑儀, 黃柏源, 張立甫, & 方冠榮. (2019). 一日千「鋰」—動力鋰離子電池正極材料. *科學發展*, 564, 6-10.
- 鄧振源. (2012). *多準則決策分析: 方法與應用*: 鼎茂圖書.
- 盧怡靜, & 呂穎彬. (2014). ISO 14040 生命週期評估的下一步. *永續產業發展*, 66, 29-35.
- 賴俊諾. (2017). *廢鋰電池中金屬鈷回收技術開發*. (碩士論文), 國立中山大學, 高雄市.
- 戴成真. (2022). *公司績效和環境、社會與治理(ESG)之關聯性：疫情期間ESG的價值*. (碩士論文), 中信金融管理學院, 臺南市.



# 附錄



## 附件一 篩選指標之第一次問卷

### 建立由ESG為基礎的關鍵物料評估模型，以儲能單元為例之研究

敬愛的業界先進您好！

感謝您撥空填寫這份學術問卷！本問卷的目標是希望篩選出對於公司ESG(環境、社會及公司治理)重要的指標，以建立針對儲能單元的關鍵物料評估模型，希望能找出對於企業極具重要性的關鍵物料，協助企業因應未來將面對的永續挑戰。

您所填答的資料僅會作為學術研究使用，絕不會對外洩漏，亦不會用於其他用途，敬請安心填答。再次感謝您撥空協助，祝您事業順利、健康平安！

國立臺灣大學 環境工程學研究所  
指導教授：馬鴻文教授  
研究生：曾子維  
信箱：ziway7858@gmail.com

#### 第一部份 基本資料與公司治理

##### 1-1. 公司類型:(可複選) \*

複選

上游: 原料與零組件

中游: 電池芯

中游: 模組

下游: 電源系統

下游: 應用

其他

##### 1-2. 公司相關(製造或使用)之儲能單元: (可複選) \*

複選

三元系鋰鈷鎳錳電池 (NCM)

三元系鋰鈷鎳鋁電池 (NCA)

磷酸鋰鐵電池 (LFP)

鋰錳電池 (LMO)

鈦液流電池(VRF)

鎳氫電池 (NiMH)

鈉硫電池(NaS)

鋰硫電池 (LiS)

其他



1-3. 公司選擇製造或使用上述儲能單元產品所考量的關鍵因素: (可複選)

複選

成本因素之 物料成本

成本因素之 製造或加工成本

成本因素之 設備成本

成本因素之 研發成本

成本因素之 人力成本

成本因素之 物流成本

成本因素之 售後及維修成本

成本因素之 轉換生產或使用其他產品之成本

成本因素之 其他成本

市場因素之 銷售價格

市場因素之 市場規模

市場因素之 未來市場需求

市場因素之 其他考量

產品因素之 產品效能

產品因素之 技術成熟及穩定性

產品因素之 產品安全性

產品因素之 其他考量

供應鏈因素之 物料容易取得

供應鏈因素之 供給穩定

供應鏈因素之 其他考量

回收因素之 法規要求

回收因素之 回收帶來的利潤

回收因素之 其他考量

其他



1-4. 公司對於製造或使用上述儲能單元中所使用的物料(如鋰、鈷...等)認為重要的關鍵因素: (可複選)\*

複選

- 成本因素之 開採成本
- 成本因素之 製造或加工成本
- 成本因素之 設備成本
- 成本因素之 研發成本
- 成本因素之 物流成本
- 成本因素之 保存成本
- 成本因素之 物料集中於特定公司生產的低成本效益
- 成本因素之 其他成本
- 市場因素之 現階段市場需求多寡
- 市場因素之 未來市場需求變化
- 市場因素之 其他考量
- 企業策略因素之 物料於產品效能的功能性難以被其他物料替代
- 企業策略因素之 企業具創新能力以因應物料供應鏈的限制
- 企業策略因素之 企業願意揭露物料資訊(如產地、開採方式)以順應永續趨勢
- 企業策略因素之 其他考量
- 供應鏈因素之 物料集中於特定公司生產的斷鏈風險
- 供應鏈因素之 物料集中於特定國家生產的斷鏈風險
- 供應鏈因素之 物料生產國家政治不穩定的斷鏈風險
- 供應鏈因素之 其他考量
- 回收因素之 法規對於物料的回收規範
- 回收因素之 物料能被回收再利用之比例
- 回收因素之 回收帶來的利潤
- 回收因素之 其他考量
- 其他



1-5. 未來貴公司如有機會轉換製造或使用其他儲能單元時，可能選擇下述哪些產品：  
(可複選)\*

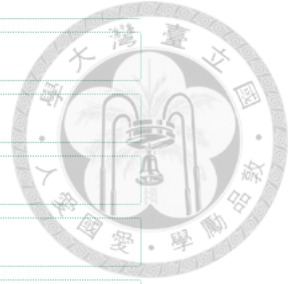
複選

<input type="checkbox"/> 三元系鋰鈷鎳錳電池 (NCM)	<input type="checkbox"/> 三元系鋰鈷鎳鋁電池 (NCA)
<input type="checkbox"/> 磷酸鋰鐵電池 (LFP)	<input type="checkbox"/> 鋰錳電池 (LMO)
<input type="checkbox"/> 鈦液流電池(VRF)	<input type="checkbox"/> 鎳氫電池 (NiMH)
<input type="checkbox"/> 鈉硫電池(NaS)	<input type="checkbox"/> 鋰硫電池 (LiS)
<input type="checkbox"/> 尚無規劃	<input type="checkbox"/> 其他

1-6. (承1-5)，貴公司選擇未來轉換製造或使用上述儲能單元產品所考量的關鍵因素：  
(可複選)(若尚無規劃可跳過此題)

複選

<input type="checkbox"/> 成本因素之 物料成本
<input type="checkbox"/> 成本因素之 製造或加工成本
<input type="checkbox"/> 成本因素之 設備成本
<input type="checkbox"/> 成本因素之 研發成本
<input type="checkbox"/> 成本因素之 人力成本
<input type="checkbox"/> 成本因素之 物流成本
<input type="checkbox"/> 成本因素之 售後及維修成本
<input type="checkbox"/> 成本因素之 轉換生產或使用其他產品之成本
<input type="checkbox"/> 成本因素之 其他成本
<input type="checkbox"/> 市場因素之 銷售價格
<input type="checkbox"/> 市場因素之 市場規模
<input type="checkbox"/> 市場因素之 未來市場需求
<input type="checkbox"/> 市場因素之 其他考量
<input type="checkbox"/> 產品因素之 產品效能
<input type="checkbox"/> 產品因素之 技術成熟及穩定性
<input type="checkbox"/> 產品因素之 產品安全性
<input type="checkbox"/> 產品因素之 其他考量
<input type="checkbox"/> 供應鏈因素之 物料容易取得



- 供應鏈因素之 供給穩定
- 供應鏈因素之 其他考量
- 回收因素之 法規要求
- 回收因素之 回收帶來的利潤
- 回收因素之 其他考量
- 其他

1-7. (承1-5)，貴公司對於**未來轉換**製造或使用上述儲能單元中所使用的物料(如鋰、鈷...等)認為重要的關鍵因素:(可複選)(若尚無規劃可跳過此題)

複選

- 成本因素之 開採成本
- 成本因素之 製造或加工成本
- 成本因素之 設備成本
- 成本因素之 研發成本
- 成本因素之 物流成本
- 成本因素之 保存成本
- 成本因素之 物料集中於特定公司生產的低成本效益
- 成本因素之 其他成本
- 市場因素之 現階段市場需求多寡
- 市場因素之 未來市場需求變化
- 市場因素之 其他考量
- 企業策略因素之 物料於產品效能的功能性難以被其他物料替代
- 企業策略因素之 企業具創新能力以因應物料供應鏈的限制
- 企業策略因素之 企業願意揭露物料資訊(如產地、開採方式)以順應永續趨勢
- 企業策略因素之 其他考量
- 供應鏈因素之 物料集中於特定公司生產的斷鏈風險
- 供應鏈因素之 物料集中於特定國家生產的斷鏈風險



供應鏈因素之 物料生產國家政治不穩定的斷鏈風險

供應鏈因素之 其他考量

回收因素之 法規對於物料的回收規範

回收因素之 物料能被回收再利用之比例

回收因素之 回收帶來的利潤

回收因素之 其他考量

其他

## 第二部份 關鍵物料

依據相關文獻的描述，關鍵物料指的是對企業策略及經濟影響極大、承擔如供應斷鏈等風險極大，以及對於環境及社會衝擊極大的物料(如鋰、鈷...等)。

2-1. 讀過上述描述後，您對於關鍵物料定義的了解程度: \*

非常不了解

稍微不了解

普通

稍微了解

非常了解

## 第三部份 關鍵物料評估模型指標-社會(S)部份

在開採或加工物料等過程中，亦可能對於社會造成衝擊影響。請您對於下列影響社會層面的指標給予重要性評分:

3-1. 開採國家中為了掌控物料資源而產生武裝衝突的情形(如剛果地區的礦區有武裝集團部署以爭奪資源)，對於企業的社會影響是重要的嗎? \*

非常不重要

稍微不重要

普通

稍微重要

非常重要

3-2. 在開採或加工物料等過程中使用童工的情形，對於企業的社會影響是重要的嗎? \*

非常不重要

稍微不重要

普通

稍微重要

非常重要

3-3. 在開採或加工物料等過程中，強迫勞役開採或加工的情形，對於企業的社會影響是重要的嗎? \*

非常不重要

稍微不重要

普通

稍微重要

非常重要

3-4. 物料生產國家遵守勞工權利的程度，對於企業的社會影響是重要的嗎? \*

非常不重要

稍微不重要

普通

稍微重要

非常重要



3-5. 物料生產國家的貪汙情形，對於企業的社會影響是重要的嗎？\*

- 非常不重要    稍微不重要    普通    稍微重要    非常重要

3-6. 物料生產國家安全和健康的生活環境，對於企業的社會影響是重要的嗎？\*

- 非常不重要    稍微不重要    普通    稍微重要    非常重要

3-7. 物料生產國家安全和健康的工作環境，對於企業的社會影響是重要的嗎？\*

- 非常不重要    稍微不重要    普通    稍微重要    非常重要

3-8. 物料生產國家的工作時數，對於企業的社會影響是重要的嗎？\*

- 非常不重要    稍微不重要    普通    稍微重要    非常重要

3-9. 物料生產國家的薪資狀況，對於企業的社會影響是重要的嗎？\*

- 非常不重要    稍微不重要    普通    稍微重要    非常重要

3-10. 物料相關的環境教育等社會推廣，對於企業的社會影響是重要的嗎？\*

- 非常不重要    稍微不重要    普通    稍微重要    非常重要

3-11.建議其他關於社會重要的因素:

請填入文字

---

#### 第四部份 關鍵物料評估模型指標-環境(E)部份

本研究將參考文獻中提及的做法，對物料進行生命週期評估，並採用ReCiPe評估方法，分析物料影響環境後對於人體健康和生態系統品質的衝擊，其中包含了氣候變遷、人體毒性、微粒形成、陸地及海洋影響等因素。

4-1.建議其他關於環境重要的因素:

請填入文字

---

#### 第五部份 其他

對於評估關鍵物料有任何想法或建議，請各位不吝分享賜教。

5-1.其他想法或建議:

請填入文字

---



## 附件二 分析權重之第二次問卷

### 建立由ESG為基礎的關鍵物料評估模型，以儲能單元為例之研究(第二階段)

敬愛的業界先進您好！

感謝您撥空填寫這份學術問卷！本問卷的目標是希望透過評估對於公司ESG(環境、社會及公司治理)指標的重要性，以瞭解各個指標的權重，建立針對儲能單元的關鍵物料評估模型，希望能找出對於企業極具重要性的關鍵物料，協助企業因應未來將面對的永續挑戰。

您所填答的資料僅會作為學術研究使用，絕不會對外洩漏，亦不會用於其他用途，敬請安心填答。再次感謝您撥空協助，祝您事業順利、健康平安！

國立臺灣大學 環境工程學研究所  
指導教授：馬鴻文教授  
研究生：曾子維  
信箱：ziway7858@gmail.com



#### 第一部份 基本資料

請問您是否填寫過上一份第一階段的問卷? (沒填寫過第一階段也可以填寫本問卷，謝謝您!)\*

是

否

公司類型:(可複選)\*

複選

上游: 原料與零組件

中游: 電池芯

中游: 模組

下游: 電源系統

下游: 應用

其他

公司相關(製造或使用)之儲能單元: (可複選)\*

複選

三元系鋰鈷鎳錳電池 (NCM)

三元系鋰鈷鎳鋁電池 (NCA)

磷酸鋰鐵電池 (LFP)

鋰錳電池 (LMO)

鈞液流電池(VRF)

鎳氫電池 (NiMH)

鈉硫電池(NaS)

鋰硫電池 (LiS)

其他



### 第二部份 社會(S)指標的重要性比較

在物料開採或加工等過程中，可能會對於社會造成衝擊影響。例如剛果及周遭國家為了礦藏資源及收益，礦區常有武裝集團部署並以暴力手段控制人民，嚴重影響社會安寧。

下方為根據上一份問卷結果所篩選出的六項社會面向的關鍵指標，請您對其進行兩兩比較其重要性，將可協助本研究進行指標的權重分析，謝謝!

指標	描述
童工	在開採或加工物料等過程中使用童工。
武裝衝突	開採國家中為了掌控物料資源而產生武裝衝突。
強迫勞役	在開採或加工物料等過程中，強迫勞役開採或加工。
遵守勞工權利	物料生產國家遵守勞工權利(如超時等較廣泛的權利範疇)的程度。
工作環境	物料生產國家安全和健康的工作環境。
生活環境	物料生產國家安全和健康的生活環境。

指標A <---> 指標B: 請您將指標A和B進行比較。

比較量尺:

數值	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	數值
指標A	極度重要	非常重要	重要	稍微重要	同樣重要	稍微重要	重要	非常重要	極度重要	指標B

註: 因線上問卷格式限制而出現負數表示，此處之負數沒有負面意思，請您依據上表的重要程度及相對應的數值填答下方問題，謝謝!

範例一:

若您認為指標A較B為極度重要，請將滑桿拉到"-8"處。

範例二:

若您認為指標B較A為重要與非常重要之間，請將滑桿拉到"5"處。

範例三:

若您認為指標A與B同樣重要，請將滑桿拉到"0"處。

童工<----->武裝衝突 \*

?



-8

8



童工<----->強迫勞役 \*

?



-8

童工<----->遵守勞工權利 \*

?



-8

8

童工<----->工作環境 \*

?



-8

8

童工<----->生活環境 \*

?



-8

8

武裝衝突<----->強迫勞役 \*

?



-8

8

武裝衝突<----->遵守勞工權利 \*

?



-8

8

武裝衝突<----->工作環境 \*

?



-8

8

武裝衝突<----->生活環境 \*

?



-8

8

強迫勞役<----->遵守勞工權利 \*

?



-8

8



強迫勞役<----->工作環境 \*

?



-8

強迫勞役<----->生活環境 \*

?



-8

8

遵守勞工權利<----->工作環境 \*

?



-8

8

遵守勞工權利<----->生活環境 \*

?



-8

8

工作環境<----->生活環境 \*

?



-8

8



### 第三部份 公司治理(G)指標的重要性比較

因應極端氣候變遷及全球化情勢，完善的公司治理及供應鏈管理更顯得重要。如中國曾因乾旱導致缺電，引起鋰金屬的供應斷鏈危機，使得鋰價上漲、電池成本增加。

下方為根據上一份問卷結果所篩選出的六項公司治理面向的關鍵指標，請您對其進行兩兩比較其重要性，將可協助本研究進行指標的權重分析，謝謝!



指標	描述
未來市場需求	物料未來經技術變化等因素所預期的市場需求。
現階段市場需求	物料現在之市場需求量。
物料成本	物料之開採、製造或加工、研發等整體成本考量。
替代性	物料於產品效能的功能性能否被其他物料替代。
國家生產集中度	物料集中於特定國家生產的斷鏈風險。
回收性	物料能被回收再利用之比例。

**指標A <---> 指標B:** 請您將指標A和B進行比較。

**比較量尺:**

數值	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	數值
指標A	極度重要	非常重要	重要	稍微重要	同樣重要	稍微重要	重要	非常重要	極度重要	指標B

註: 因線上問卷格式限制而出現負數表示, 此處之負數沒有負面意思, 請您依據上表的重要程度及相對應的數值填答下方問題, 謝謝!

**範例一:**

若您認為指標A較B為極度重要, 請將滑桿拉到"-8"處。

**範例二:**

若您認為指標B較A為重要與非常重要之間, 請將滑桿拉到"5"處。

**範例三:**

若您認為指標A與B同樣重要, 請將滑桿拉到"0"處。

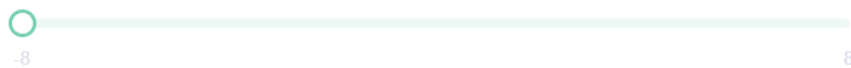
未來市場需求<----->現階段市場需求 \*

?



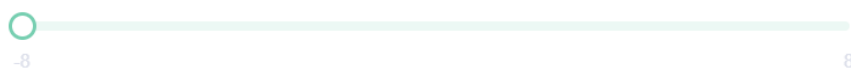
未來市場需求<----->物料成本 \*

?



未來市場需求<----->替代性 \*

?





未來市場需求<----->國家生產集中度 \*

?



未來市場需求<----->回收性 \*

?



現階段市場需求<----->物料成本 \*

?



現階段市場需求<----->替代性 \*

?



現階段市場需求<----->國家生產集中度 \*

?



現階段市場需求<----->回收性 \*

?



物料成本<----->替代性 \*

?



物料成本<----->國家生產集中度 \*

?





物料成本<----->回收性 \*

?



-8

替代性<----->國家生產集中度 \*

?



-8

8

替代性<----->回收性 \*

?



-8

8

國家生產集中度<----->回收性 \*

?



-8

8