

研究報告

區塊鏈於碳交易制度之應用

邱祈榮¹、許庭瑋^{2*}

【摘要】從1997年簽署的京都議定書到2015年的巴黎協議，再到現今的淨零排放，「減碳」逐漸廣為人知，各國政府與企業紛紛提出明確的減碳目標。而除了增加碳匯、研發減碳技術、課徵碳稅等，一種更為經濟的減碳方式便是碳交易。然而現存碳交易制度普遍存在著問題，例如非法行為、交易成本過高所造成的市場效率低落等等。區塊鏈作為一個革新的資料儲存技術，擁有不可竄改、可追溯、資訊透明、安全、去中心化等特性，因而具有改善碳交易制度現存問題的潛力。本文透過文獻回顧，整理了現行碳交易制度存在的問題，以及如何對其做區塊鏈上的設計與運用，並呈現實際案例，討論應用後之改善、挑戰與展望，並針對臺灣碳資產管理之可能性作簡易之評估，以供臺灣未來碳定價之決策參考，並期許未來在臺灣有更多區塊鏈應用相關之可行性研究，包括規範與法律面、區塊鏈設計面與實際多維度應用。

【關鍵詞】碳交易、碳排放、碳抵換、碳資產、碳匯、區塊鏈

¹ 國立台灣大學森林環境暨資源學系。

School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University.

^{2*} 國立台灣大學森林環境暨資源學系學士生，通訊作者。

College, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University. Corresponding author.

E-mail:hanbo07131370@gmail.com.

Research paper

**APPLICATION OF BLOCKCHAIN IN EMISSION TRADING
SYSTEM**

Chyi-Rong Chiou¹ Ting-Wei Xu^{2*}

【Abstract】 From the Kyoto Protocol in 1997 to the Paris Agreement in 2015 then Net Zero Emissions today, carbon reduction has become widely known. Governments and companies around the world have put forward clear carbon reduction targets. In addition to increasing carbon sinks, developing carbon reduction technologies, and levying carbon taxes, a more economical way to reduce carbon is carbon trading. However, the existing emission trading systems (ETS) generally have problems such as fraud, low market efficiency caused by high transaction costs, etc. As an innovative data storage technology, blockchain has the characteristics of immutability, traceability, information transparency, security, and decentralization, and therefore has the potential to improve the existing problems of the ETS. Through literature review, this paper sorts out the problems existing in the current carbon trading system, and how to design and apply it on the blockchain, presents practical cases, discusses improvements, challenges and prospects after application, and make a simple assessment of the possibility of carbon asset managing by blockchain in Taiwan which made for Taiwan's future carbon pricing decision-making reference, and it is hoped that there will be more feasibility studies related to blockchain applications in Taiwan in the future.

【Keywords】 carbon trading, carbon emissions, carbon offsets, carbon assets, carbon sinks, blockchain

I、前言

從1997年簽署的京都議定書到2015年眾所矚目的巴黎協議，再到現今的淨零(net zero)排放，各式各樣的氣候行動遍地開花，也讓「減碳」逐漸廣為人知，各國政府與企業紛紛提出明確的減碳目標。結至2020年底已有127個國家、823座城市、101個地區與1541家企業對2050淨零目標做出承諾。歐盟執委會(European Commission, EC)在2019年便提出要在2050年使歐洲成爲第一個氣候中和的大陸，於2021年7月生效的《歐洲氣候法》(European Climate Law)具體承諾了2030年前歐盟的溫室氣體淨排放要比1990年減少55%，並於同年7月14日進一步提出了名爲「調適55」(fit for 55)，內含12項政策措施的氣候變遷計畫。2020年1月，微軟(Microsoft)宣布2030年前要實現碳負排放(carbon negative)，同年7月蘋果電腦(Apple)宣布公司全面包括商業活動、商品產銷鏈要在2030年前達到碳中和(carbon neutral)。

要達成上述的各種氣候行動目標，需要對碳排放(carbon emission)做出實際作爲。除了增加碳匯、研發減碳技術、課徵碳稅等，一種更爲經濟的方式便是碳交易。根據國際碳行動伙伴組織(International Carbon Action Partnership, ICAP)最新發布的《2021年度全球碳排放權市場進展報告》，目前全球已建成24個碳交易系統，覆蓋全球16%碳排放量，22個國家和地區正在考慮或積極開發碳交易系統(ICAP, 2021)。然而現存碳交易制度普遍存在非法行爲、交易成本過高所造成的市場效率低落等問題。區塊鏈(blockchain)作爲一個革新的資料儲存技術，擁有不可竄改、可追溯、資訊透明、安全、去中心化等特性，因而具有改善碳交易制度

現存問題的潛力。本研究透過文獻回顧來歸納和整理區塊鏈技術在碳交易制度的應用設計以及實際案例，了解其如何改善現行碳交易制度之問題、可能面臨之挑戰與未來展望。

II、研究問題

(I) 碳交易

1. 碳交易制度介紹

碳交易市場包括利用總量管制之碳排放權交易(Emissions Trading Schemes, ETS)和發行碳權(carbon credit)的碳抵換(carbon offset)的機制，旨在利用市場機制來達成減碳目標。

排放交易(Emissions Trading)爲一市場導向的環境政策工具，其建立在總量管制(cap)之前提下，透過對污染權之產權界定與市場機制，利用排放權之自由交易，以最具經濟效益的方式達到減少碳排放外部性之目的。其運作過程爲：今一國家訂定一排放總量(cap)，並核發排放配額(emission allowance)給眾多被管制企業，每年受管制之企業都要繳回這些配額，繳回同時會檢核該企業之排放當量，確保其與配額相同；而對於部分碳排放當量高的企業來說，相較於研發減碳技術的成本，企業可以透過在碳交易市場中購買其他受管制之公司多出來的排放配額來繳納，如此便能降低減碳成本，而當配額市場價格高於企業減排成本時，這些企業將能從減排和出售配額中獲得利潤，是爲能源、環境和經濟之三贏。

碳抵換機制(carbon offset)是爲透過減碳專案計算出「預計減量額度」，經過

認證機關認證後，成為流通於市場之廣義「碳權」(carbon credit)。這些減碳額度分為兩類，一種是經由政府認證，例如台灣環保署推行數年之碳抵換專案；另一種則是「自願性」之市場，由第三方認證機構認證，流通於企業之間，作為企業承諾減碳或碳中和之用。通常碳抵換專案產生的碳權不會成為前述總量管制碳交易機制內可供交易之「排放額度」，但在特殊情況下，也就是經過政府核可，便可以成為與排放單位相抵的排放額度。

2. 碳交易制度現存問題

全球現行之碳交易市場多因缺乏資訊透明度(transparency)、可追溯性(traceability)和強而有力的監督(oversight)，導致碳交易市場之參與成本高、非法行為橫行，以及高昂的行政成本，進而使碳交易市場的可信度和效率降低。以下將分段闡述碳交易制度現存之問題。

(1) 高昂交易成本

由於碳交易市場普遍缺乏資訊透明度，造成資訊不對稱、公平性缺乏、交易成本與門檻增高，最終導致市場流動性不佳。以歐盟碳交易制度(European Emissions Trading Scheme, EU ETS)之交易網絡為例，由於缺乏中央交易機構，歐洲碳市場的交易行為多為場外交易(OTC transactions)，加上工業業者(industrial actors)通常無法掌握市場相關信息的資源，因此需要尋求金融中介(financial intermediaries)或當地組織(local networks)來進行碳排放權交易，進而添加了額外、不必要的成本，降低市場效率，而這與碳交易有效率、低成本地降低溫室氣體的初衷有所出入(Karpf et al., 2018)。以具有一定規模的澳洲自願性碳抵換(voluntary carbon

offset scheme)碳市場為例，由於碳權品質和交易對手聲譽訊息的缺乏，以及投資跟價格信號(investment and price signals)的扭曲，在2017年，澳洲碳市場74%的碳抵換項目(offset projects)是由仲介機構申請成功，而其中又主要由兩家仲介機構控制55%的碳抵換項目，歸因於交易與認證訊息大部分皆由仲介機構持有，因此他們可以校正碳抵換項目並以較高的價格反向售出(Climate Change Authority, 2021；Hartmann and Thomas, 2020)。

(2) 非法行為橫行

由於跨國交易、法律、市場、科技等因素，碳交易市場中的詐欺行為多樣化而難以全面查獲，造成市場合法性、信任度的降低，進而對碳權價格產生影響，降低市場效率。以歐盟碳交易制度為例，有研究顯示，每發生一件會計詐欺(accounting fraud)案件，就有其他一至兩起案件沒有被發現(Dyck et al., 2013)。而詐欺行為造成的實際損失遠大於表面看到的直接損失，其中隱含了碳交易市場合法性降低的損失；信任雖為不成文的交易保障，卻可以視為評估市場效率與的標準(Akerlof, 1978)。有研究估計歐盟碳交易市場在2008-2010年間逃漏增值稅(VAT)的非法行為對碳權價格的影響，結果顯示該類非法行為導致碳權價格下降了1/4(Frunza, 2013)。

Mandaroux et al. (2021)將歐盟碳交易市場常見的非法行為分為四大類，分別為販售無中生有或屬於他人的碳權(carbon credits)、詐欺稅款(tax fraud)、網路犯罪、利用監管不力實施金融犯罪，以及其他類的犯罪行為，包括重複量測並謊報碳權數量、針對環境面以及金融面的錯誤和誤導性的碳交易市場投資建議、證券詐欺(securities fraud)、轉移定價(transfer pricing)、洗錢、竊取個資和盜用身分。

「販售無中生有或屬於他人的碳權」這類犯罪具有無形性(intangible)，在過去往往無法被發現。這類犯罪行為中大多數為「重複計算」(double counting)，即一人將其擁有的碳權同時販售給多個人，或者仗著其碳排放權利(emission right)來謊報更高的碳排放量以獲取更多的認證碳排放量(verified emissions) (Mandaroux et al., 2021)。

「詐欺稅款」與增值稅(Value Added Tax, VAT)最為相關，被稱作「增值稅旋轉木馬手法」(VAT carousel fraud)，通常發生在跨國交易上，交易者利用碳權易轉移、歐盟之地緣特性來逃漏稅(Mandaroux et al., 2021)。該類非法行為的過程如下：A在國家1賣了碳權給在國家2的B，而因為是歐盟跨國交易所以B不用多付增值稅的錢，如今B將該碳權轉賣給國家2的C，並且C支付了加上國家2內增值稅的金額給B，B理應將此增值稅上繳政府，但B卻在這時消失了(Interpol, 2013)。歐盟為此在2010提出了反向稽徵機制(reverse charge mechanism)來防範此類非法行為，但因為該機制並無強制其所有會員國都要採用，漏洞依然存在(Schütz et al., 2015)。

「網路犯罪」是為駭入他人帳號、電腦以竊取碳權(carbon credits)的行為，由於碳交易市場缺乏安全的註冊過程以及各項法律安全標準，導致交易中存在很大的風險。2010-2011年間，歐盟境內國家共計340萬的碳權被偷走，並且只有36%的碳權被還回來，由於碳權無法退貨，以及無法追蹤被偷走的碳權後續使用的足跡，加上未來網路發展潛在的安全風險，即使歐盟執委會為了減少網路犯罪在2012年將歐盟各國現有的登記處整合成一個登記處，種種不確定性依然使網路犯罪存在一定程度的威脅性(Mandaroux et al., 2021；Nield and Pereira, 2016)。

「利用監管不力實施金融犯罪」是為利用不同國家規範之差異來鑽法律漏洞的行為，犯罪者喜歡在規範比較鬆的國家進行交易，藉由跨國交易來降低被查獲的機率。即使歐盟試圖在EU ETS的第三階段(2013至2020年)強化中央監管力，由於歐盟中央的規定非強制性，各國還是會有標準不一、監管不力的情況(European Commission, 2016；Mandaroux et al., 2021)。

(3) 行政效率不佳

碳交易系統的行政程序涵蓋了使用者的身分註冊、碳排放配額發放、交易處理、各個環節之認證申報，即MRV(measurement, reporting, verification)，其過程涉及到較眾多繁複的行政程序，往往會產生時間、人力成本的負擔。

以澳洲碳抵換交易市場為例，Hartmann and Thomas (2020)提到，澳洲目前之MRV (measurement, reporting, verification, MRV)行政程序耗時並高度依賴仲介機構，增加了人事和交易成本，且仲介機構官僚式(bureaucratic)的報告過程使澳洲之碳抵換項目從核實到實際發行需花費大約六周的時間，造成碳抵換項目申請的效率降低，進而導致市場流動性不佳，降低市場效率。一項針對歐盟碳交易制度與航空業的研究也建議歐盟管理機構增加資訊透明度和簡化MRV(measurement, reporting, verification)之程序以促進效率(Efthymiou and Papatheodorou, 2019)。

(II) 區塊鏈

區塊鏈較廣為人知的第一個應用是比特幣(Bitcoin)。比特幣是在一個對現存權威機構失去交易信任的景況下被創造出來的，Nakamoto (2008)藉由密碼學來增加交易信任，建造一個開源、去中心化的交易系統，讓無限個匿名方能夠在沒有中央、仲介者的情況下，私下進行安

全的交易，比特幣也因此被認為是和黃金一樣具備抗通膨能力的資產。

區塊鏈(blockchain)是一個以分散式帳本技術(Distributed Ledger Technology, DLT)為基礎，由資料區塊串聯而成的大帳本，也就是大資料庫。此資料庫有以下特點:不可竄改性、可追溯性、安全性、去中心化與自治性、匿名性、透明度與開源性。

1. 不可竄改性

區塊鏈之資料庫只能追加，即只能添加資訊而不能修改和刪除，且每個資料區塊都透過密碼學加密並和下一個區塊串聯，因此新的區塊都會有上個區塊的數位指紋(hash)，當有人竄改了其中一個區塊的資料，指紋也會跟著變動，並影響到下個區塊，如此一來，僅僅一個變動就會眾所皆知，此特點是為區塊鏈之不可竄改性。

2. 可追溯性

由於每筆被輸入的資料塊都會被蓋上時間戳記(time stamp)，因此紀錄都可以被追溯。

3. 安全性

為了向資料庫讀取或寫入區塊，用戶必須有正確的成對加密密鑰，分別為資料庫的公鑰和一定數量的參與者握有的私鑰，這確保了資料庫在信息安全前提下的可讀性和可修改性，是為區塊鏈之安全性。

4. 去中心化與自治性

區塊鏈資料庫是由節點(node)來負責維護大資料庫的單位，節點可以分散於世界各地，形成一個節點網，每個節點都有一份大資料庫(大帳本)，只要有新的資料塊輸入大帳本，所有節點都會同時被告知，進而同步更新大帳本的資料，沒有任何一

個節點會單獨擁有此大帳本，此為區塊鏈之去中心化特性；前述之所有節點共同更新大帳本的動作，需要在所有節點都認同的共識機制之下進行，此為區塊鏈之自治性。

5. 匿名性

而上述之節點和交易參與者之身分是無須公開的，因為區塊鏈中所有的動作都是遵循固定的共識機制，因此在數據的交互上是不需信任的，此為區塊鏈之匿名性。

6. 透明度和開源性

除了交易參與者的私有信息是被加密的，區塊鏈之所有數據對所有人都是公開的，任何人皆可查詢區塊鏈的數據和開發相關應用，具有透明度(transparency)和開源性(open)。

III、研究方法

區塊鏈與碳交易有顯而易見的共通性:區塊鏈是一個去中心化的數據庫(database)，而碳交易的本質為分析、儲存、交易、管理碳排放的數據。換句話說，區塊鏈的本質是資料庫(data)，而碳交易的運作是建立在資料庫的數據使用，因此可以應用區塊鏈技術來改善上述之碳交易現存問題(Pan et al., 2019)。舉例來說，由於區塊鏈資料庫具有透明度，可以改善碳交易市場因缺乏透明度導致的資訊不對稱；而區塊鏈之不可竄改性可以有效地防止諸如竄改碳權額度、重複交易等詐欺行為。圖1為碳交易制度現行問題與區塊鏈特性之關聯互補圖，展示了上述區塊鏈技術特性可以帶給碳交易制度現行對應問題之改善。

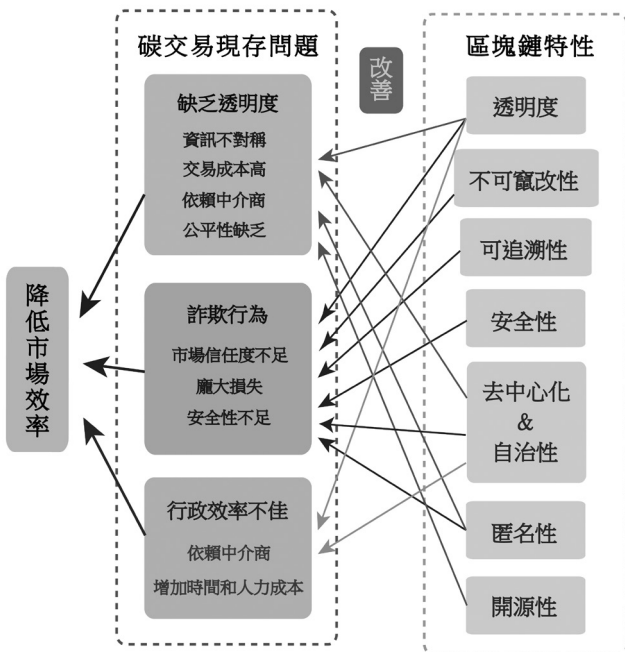


圖1 碳交易制度現行問題與區塊鏈特性之關聯改善圖

Fig.1 A association graph of problems of ETS and blockchain features.

以下將闡述Hartmann and Thomas (2020)、Mandaroux et al. (2021)兩篇文獻分別對澳洲、歐盟碳交易制度提出之以區塊鏈技術為基礎的碳交易制度設計，並介紹兩個現行實際案例，分別是Climate Ledger Initiative (CLI)和Energy Blockchain Labs。

(I) 區塊鏈應用之設計

應用區塊鏈技術之碳交易制度必須依據各個國家的實際狀況來挑選最適合的技術組合，因為各國之政府、市場規模與行政層級等細項皆有所不同，不存在適用於所有國家的設計方法。

以Mandaroux et al. (2021) 和Hartmann and Thomas (2020)分別對歐盟碳交易制度、澳洲碳抵換市場的研究為例，前者使用Acharya and Yerrapati (2019)提出的應用DLT(分散式帳本技術)五階層架構(圖3)以及自行提出之「身分層」來數位化歐盟既有的碳交易流程監控系統，European Transaction Log (EUTL)，期望透過數

位化EUTL來增加透明度、加強監管力、減少犯罪行為和降低MRV成本。後者使用Xu et al. (2017)的區塊鏈應用設計流程系統(圖2)來進行澳洲碳交易市場的區塊鏈設計，其最主要想解決的問題為缺乏透明度與行政效率低落，並以最小幅度地變動行政法規為設計框架，探討四種區塊鏈應用模型之特點，最終形成澳洲的區塊鏈應用模型(表1)。兩研究所引用之Acharya and Yerrapati (2019) (圖3)和Xu et al. (2017) (圖2)兩種設計架構有其異同之處。兩者在區塊鏈技術的考慮與選擇面向上相似，如節點設置、共識機制等；而兩者相異之處在於圖2多了一個「詢問機構是否要去中心化」的步驟，圖3則是聚焦在應用DLT技術的架構，也就是圖2區塊鏈配置(blockchain configuration)的部分。

圖2之設計過程探討了碳交易制度之各個角色，套用在澳洲碳抵換市場即包括政府機關、監管機關、提出碳抵換項目者、中介機構等；而圖2中的權威機構去中心化是為針對現行體制的詳細作業流程，套用在澳洲碳抵換市場即為碳抵換項目和交易資訊、碳權發配和更新、碳抵換項目合約、許可權限、碳權認證等等；存儲和計算(storage and computation)是為針對上述流程產出之所有資料存放的位置和計算方式之設定，對澳洲碳抵換市場來說即為交易系統內所有資料儲存、碳權的產生和發配計算等；區塊鏈的配置(blockchain configuration)則針對建造新區塊鏈與否、區塊鏈種類選擇、資料結構、共識協議等進行設定；而其他設計決策包括匿名性與否、誘因(獎勵措施)、實際部屬等。Hartmann and Thomas (2020)依照圖2之流程設計出之澳洲碳抵換市場之區塊鏈設計結果呈現於表1，並對應比較其餘四種區塊鏈應用參考模型，分別為網絡型(Networked

Carbon)、工業4.0(Industry 4.0)、科技行動自由主義(Technolibertarian)、自主碳抵換(Voluntary Offset)模型。

「網絡型」碳交易市場的主要特點為分散於全球各地的碳交易市場彼此透過區塊鏈技術形成一個全球性的交易網絡，具部份去中心化 (partially decentralized) 的特色；「工業4.0」為區塊鏈技術帶來的自動與數位化，透過智能裝置 (smart devices) 來進行過往人力需求高的MRV程序，抑或加入新的交易元素如公司名譽和貿易限制等應用；「科技行動自由主義」強調區塊鏈技術帶來的隱私和安全性，具有匿名性、透明開源和去中心化的特性，例如比特幣；「自主碳抵換」大多指在以太坊(Ethereum)這個平台上運用智能合約來執行碳抵換項目和建立分布式自治組織(Decentralized Autonomous Organizations, DAOs)(Buterin, 2013 ; Hartmann and Thomas, 2020)。

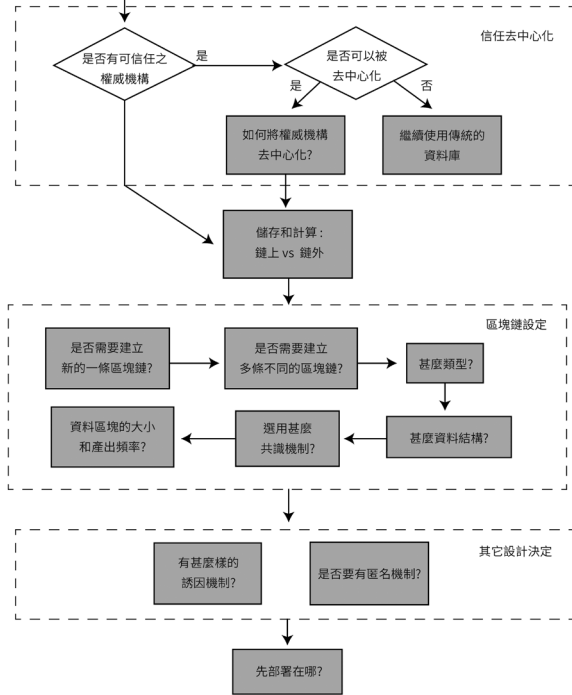


圖2 應用區塊鏈於系統之設計流程(Xu et al., 2017)。

Fig.2 Design process for blockchain-based systems (Xu et al., 2017).

設計流程	設計決定	網絡型碳交易	工業4.0	科技行動自由主義	自主碳抵換	澳洲碳交易
去中心化	去中心化程度	部份去中心化	部份去中心化	部份去中心化	部份去中心化	部份去中心化
	需要許可?	是	是	否	是	是
	需要驗證者?	沒定義	是，特別指定單一驗證	定義	是，特別指定	是，特別指定
存儲、計算決定	資料物件	沒定義	沒定義	沒定義	沒定義	鏈上
	物件集結	沒定義	沒定義	沒定義	沒定義	鏈上
	計算	鏈上智能合約	鏈上交易合約	鏈上交易合約	鏈上智能合約	鏈上智能合約
區塊鏈設定	新的區塊鏈?	是	是	是	是	是
	多條區塊鏈?	是	否	否	否	否
	區塊鏈種類	私人	私人	公有	私人	私人
	共識機制	沒定義	Proof-of authority	Proof-of-work	Proof-of-work	Proof-of-authority
	共識機制設定	Default	Default	資料塊產生頻率從10分降到2.5分	Default	Demand driven
	資料結構	Blockchain	Blockchain	Blockchain	Blockchain	Blockchain
其他設計決定	匿名性	沒定義	公開	匿名	公開	公開
	激勵措施	無	無	沒定義	無	無
	實際建置	沒定義	多鏈	沒定義	以太坊	澳洲政府決定

表1澳洲碳交易市場之設計推薦表(Hartmann and Thomas, 2020)

Table1 Recommended Australian Carbon Market Blockchain Design (Hartmann and Thomas, 2020)

針對歐盟現行之EUTL系統，Mandaroux et al. (2021) 參考了Acharya and Yerrapati (2019)之架構呈現應用DLT五階層(圖3)，以及自行提出之「身分層」來進行數位化的設計。圖3之五階層由下往上分別為硬體層(hardware layer)、數據層(data layer)、節點網絡層(network layer)、共識機制層(consensus layer)和使用者端應用層(application and presentation layer)。硬體層為節點(node)網的建置動作，此步驟需決定節點網的特性，例如為了同時兼顧透明度和節點之間的處理效率，只讓部分節點擁有完整的帳本；數據層為區塊鏈種類的決定，其大致上可區分為公有(public)、私有(private)和混合(hybrid)區塊鏈三種，越趨近於公有鏈則越「去中心化」，混合鏈則是居中，在Mandaroux et al. (2021)提出之DLT應用架構中(圖3)，建議採用可能較為符合EU ETS需求的聯盟鏈；節點網絡層為交易方式的決定，多數能源相關交易都選擇應用對等式網絡(peer-to-peer, P2P)；共識機制層在DLT應用中最為重要，因其扮演著維護和規範節點網絡秩序和運作的角色，常見的共識機制算法有工作量證明(Proof of Work, PoW)、權益證明(Proof of Stake, PoS)、股份授權證明(Delegated Proof of Stake, DPoS)和拜占庭容錯算法(Byzantine Fault Tolerant, BFT)等，在效率與安全性上，每個共識機制都有其優缺點，需詳加權衡其利弊，在Mandaroux et al. (2021)提出的DLT應用架構下，選用了拜占庭容錯協議作為其共識機制，因其對系統中的節點具有一定程度的容錯性；使用者端應用層關注最終使用者之介面設計和實行，Mandaroux et al. (2021)提出的DLT應用架構下，特別著重於實際安裝智能裝置、交易操作平台的完善等(Andoni, 2019；Mandaroux et al., 2021)。除了圖3之五階層，Mandaroux et al.

(2021)還提出了新的「身分層」(identity layer)，該身分層主要利用錨定每個參與者的身分之去中心化身分認證(Decentralized Identifiers, DIDs)和錨定每個碳排放的可驗證數位憑證(Verifiable Credentials, VCs)來驗證身分並回報碳排放權相關資料，並透過安裝於被管制單位的智能電表(smart meter)追蹤排放狀況，利用區塊鏈防竄改、自動化追蹤等特性來增加安全性，並在有效確保碳交易參與者身分資料之真實性同時幫助MRV(measurement, reporting, verification, MRV)之過程簡化，降低其行政成本。



圖3 以Acharya and Yerrapati (2019)提出之架構為基礎之DLT應用模型(Mandaroux et al., 2021)。

Fig.3 Distributed Ledger Technology application model designed on the basic of classical five-layer DLT structure of Acharya and Yerrapati (2019)(Mandaroux et al., 2021).

(II) 實際應用案例

1. Climate Ledger Initiative

CLI於2016年創立，立基於區塊鏈、物聯網、人工智能(Artificial Intelligence, AI)和遙測等技術。CLI的目標是透過區塊鏈技術來革新氣候變遷之調適和金融環境，以促進巴黎協議(Paris Agreement)、可持續

性發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)的氣候行動(CLI, 2018)。CLI為一試點計畫，用來監測和回報墨西哥2018年試行的碳交易制度過程中的碳排放量，即MRV。此試點計畫期望能解決碳排放許可拍賣的重複計算、缺乏透明度問題，以及碳交易系統內高成本、多欺詐的問題，該計畫從2020開始試運行3年後正式實施(MIEN and GIZ, 2019；Nkechi, 2020)。

CLI使用以太坊(Ethereum)的平台來建立監測系統，該平台結合了中心化和去中心化的特點。碳交易制度從總量管制至配額發放、認證抵換額度，到收回額度、驗證排放當量，分別對應到區塊鏈之資料紀錄、帳號管理、智能合約；首先，許可配額(allowances)的總量定值設定後，發放排放額度、認證碳抵換(offset)額度和管理交易者帳號之程序是由具便利優勢的中心化交易層(Transaction Layer)執行，而上述之排放配額、經認證之碳抵換額度、排放當量都可化作區塊鏈上之「代幣」(tokens)來做實際之交易，而代幣之產生、發放和註銷則是在經許可、去中心化之區塊鏈層(Blockchain/Settlement Layer)自動進行；當配額額度、抵換額度要和排放當量相互抵消時(即收回額度動作)，中心化之交易層內相對應的單位數量代幣會做上「已預訂」的記號，並從平台上註銷，確保配額數量、抵換額度數量、碳排單位三者加總等於區塊鏈層代幣流通之數量(MIEN and GIZ, 2019；Nkechi, 2020)。

2. Energy Blockchain Labs

Energy Blockchain Labs創立於2016年，為一以IBM區塊鏈(IBM Blockchain)技術為

基礎的碳資產(carbon asset)平台，也是世界上第一個以區塊鏈技術作為基礎的綠色資產(green asset)管理平台。Energy Blockchain Labs由IBM與北京政府合作，創立目的為降低中國全國性碳交易市場30%的運作成本，並使企業能夠有效率地達到政府訂定的減碳目標。高碳排的被管制單位可以透過此平台監控他們自身的碳排放，並且購買其他單位多餘的碳排放許可配額或碳抵換額度(Andoni, 2019)。

Energy Blockchain Labs記錄了交易業者的能源產生和消耗，並且將其造成的環境影響量化呈現，並透過智能合約來計算業者須減少的排放當量，業者可以輕易地追蹤他們的碳足跡，進而掌握買賣碳資產的時機(Nkechi, 2020)。此外，管理機關也可以透過該平台監控、檢查所有參與者的碳排放與是否合乎總量管制規範，智能合約促進了交易網絡內相互合作的可能，成為了所有利益相關者的橋樑，包括受管制碳排單位、政府、交易所和認證單位，幫助資料上的互通性，更提升了碳資產研發效率，因研發碳資產在過去是一個複雜、動輒數月、需要多方團體參與的過程。

IV、結果與討論

(I) 應用區塊鏈之改善

碳交易制度建立之初衷為有效率、低成本地降低溫室氣體，透過碳排放之資產化，使其於金融市場流通，帶來投資金流，形成減碳的正向循環；而影響碳市場效率的決定性因素有信任度、安全性、流通性、交易成本和行政效率等，而這些因素與透明度的有無、監管力

道、非法行為多寡、對仲介機構的依賴程度和行政程序繁簡有所關聯。應用區塊鏈技術能夠改善透明度不足、監管不力、非法行為橫行、高度依賴仲介和行政成本高昂等問題，進而提升碳交易市場之效率。在效率好的市場，均衡價格即反映貨品應有的價值，而此理想價格會對應碳社會成本(Social Cost of Carbon, SCC)並進而減少外部性(Mandaroux et al., 2021)。

1. 加強監管和減少非法行為

Karpoff (2020)基於Klein and Leffler (1981)的市場角色行為理論模型，試圖預測數位化對金融市場犯罪行為的影響，該理論模型的理想狀況是：在實際利率(real interest)夠低、高品質商品的供給價格彈性(price elasticity)足夠的最佳條件下，一個公司會傾向不去做違法行為(Klein and Leffler, 1981；Karpoff, 2020)。價格彈性(price elasticity)又稱供需價格彈性，為需求或供給變化量與價格變動量的比值。以供給價格彈性為例，若是供給價格彈性大，代表今天若是商品價格變動1個單位，供給便會變動大於1個單位。一般來說，若是生產商品需要投資的費用較小，或是供給者能夠更容易地取得資金，那麼供給價格彈性便會較大。而Karpoff (2020)的研究顯示數位化所降低的信息獲取、交易成本，會使值得信賴的公司更廣為人知，因此能更容易地籌集資金去提供高品質的商品，進而提高該類商品的供給價格彈性，長時間下來能使不肖廠商減少的可能性增加(Klein and Leffler, 1981；Karpoff, 2020)。

而由於區塊鏈技術的應用可以降低碳交易市場的資訊獲取、交易成本，可以間接地提升碳市場商品之價格彈性；此外，

區塊鏈技術帶來的透明度和可追溯性也會使得部分犯罪行為更難達成，兩者都使碳市場之犯罪行為有減少的可能性(Mandaroux et al., 2021)。回顧研究問題所述之四類非法行為，因每筆紀錄在區塊鏈上之碳權資料都無法竄改且被緊密追蹤，「無中生有的碳權」不可能進入市場，重複計算(double counting)的非法行為也會因為更安全的認證和追蹤而減少。透過有身分認證的數位錢包和不可竄改的交易紀錄，逃漏增值稅務者的身分和交易得以被掌握，最終可大幅降低未查獲案件之數量。藉由區塊鏈之共識協議的選擇，例如容錯率高的拜占庭容錯協議(BFT)，可以有效預防網路駭客的迫害，將資訊洩漏的可能性最小化(Jhavar, 2017)。而上述種種犯罪行為的減少皆可增加交易參與者對碳交易市場的信任。

點對點的交易網絡能夠杜絕市場陰謀行為，由於節點與交易者皆可匿名，交易者之間能夠公平競爭，而管理機構可以掌握部分使用者的真實身分以即實時交易資料，包括交易量、碳排放量、綠色憑證(green certificates)的生產量，達到監管的作用，甚至可以利用這些數據來當作政策與規定方面參考(Mandaroux et al., 2021)。

2. 降低交易成本與增加行政效率

透過區塊鏈技術，碳交易制度中之註冊發放、交易處理、認證申報三種系統的資料皆可按照產生時間被整合在一個公開、透明的「大帳本」之上，此帳本甚至可以涵蓋系統間之搜尋、調用與細微修改紀錄，使得公有及私有平台得以無縫接軌，節省了維護成本，且透過共識協議的訂定，交易參與者必須遵守共同的交易規

範，也就不再需要仲介者與交易所來維持流程之一致性，進而提升透明度、行政效率與降低交易成本(Pan et al., 2019 ; Zhou et al. 2018)

過往仲介機構在高交易成本的環境之下透過聚合小碳抵換項目來創造規模經濟，但在運用區塊鏈技術後此優勢便不復存在，因為區塊鏈提供之市場透明度可以降低交易者進入市場的門檻，使他們更易掌握交易機會與投資信號，不再需要仲介機構媒合，例如：中小企業將經驗證之減排量(Certification Emission Reduction, CER)作為綠色資產，提供碳權給市場，而市場其他參與者透過瀏覽公開資料找到該中小企業之碳抵換項目，並調閱此碳抵換項目之詳細資料、該企業之名聲與信譽，最終直接與其進行點對點交易(Hartmann and Thomas, 2020 ; Mandaroux et al., 2021)。前述Energy Blockchain Labs之案例，該碳資產管理平台之模式將使交易場域的各利害關係人(投資者、政府、能源業者、受管制業者等)更有相互合作的可能，因為資訊之透明度提升有助於交易場域的信任度積累，智能合約的存在也使得交易動作更為簡便，且更具多方公信力。

藉由區塊鏈之智能合約，使MRV、碳抵換項目和交易認證等過程自動化地執行，進而提高行政效率、降低人事和審計成本。以澳洲為例，應用區塊鏈技術後，碳抵換項目之智能合約能夠自動化地蒐集和回報資料，並自動生成已認證之碳權，使原先需要六周左右才能完成的認證週期大幅縮短，隨著金錢、時間成本的降低，碳抵換項目申請頻率得以增加，進而增

加項目的現金流，促進市場流動性，最終使市場效率增加(Hartmann and Thomas, 2020)。

(II) 區塊鏈應用之挑戰

應用區塊鏈技術於碳交易制度的考量、設計除了技術面外，還包括規範與法律面、區塊鏈設計面和其他。

1. 規範(regulation)與法律(legislation)面

應用區塊鏈技術無論在體制上、人事上抑或權責上都會對現有碳交易制度產生相當大的影響，因此專業組織(professional organizations)、服務提供商(services providers)和管理機構(regulatory authorities)必須相互合作，多方考量實際在現有體制上佈署的可行性和擴充規範、法律的必要性，例如：在交易系統中凡是涉及智慧財產權等法律面相關的所有商品，都應該對其仲介服務供應商(intermediary server providers)進行法律方面相關的約束限制(Mandaroux et al., 2021)。

在監控的簡化與自動化之前，需要對授權和職責進行釐清，例如：管理機關是否要實時地監控碳排放量、審計回報的時間頻率是否需要調整、管理單位是否要授予上位者(長官)敏感訊息的閱讀權限等，而授權交易參與者與否之規定、糾正參與者之機制也必須釐清和建立(European Securities and Markets Authority, 2017 ; Mandaroux et al., 2021)。

應用區塊鏈技術的碳交易制度依然存在安全性問題，包括數據的安全、資訊(IT)安全(密碼學與金鑰管理)、數據來源與真實性、數據隱私和可用性，在與安全相關規範的設計上需要多加考量，例如：為

了安全性的增強，研擬對保全人員的獎勵系統(Azouvi et al., 2018 ; Mandaroux et al., 2021)。

2. 區塊鏈設計面

在區塊鏈技術設計面會面臨的主要挑戰為數位化的困難、效率與安全性的權衡、隱私與透明度的權衡、收支平衡分析、可持續性的權衡等。

現行的碳交易系統數位化需要運用跨學科的標準(interdisciplinary criteria)，並考慮新舊系統之整合可行性，達到一個通用標準，例如：沿用已積累一定程度信任的舊制度，採用新方法來執行成本較高的MRV等(European Securities and Markets Authority, 2017 ; Mandaroux et al., 2021)。此外，區塊鏈與共識機制的挑選，皆與實際的運用、客製化程度、效率(可擴展性)、流通性和可操作性高度相關，企業、社會的隱私需求也必須與透明度相互權衡(Richardson and Xu, 2020)。

除了區塊鏈技術組合的選擇，也要針對設計總體之支出做收支分析，例如：智能合約帶來的益處要超過或打平其最初的建置、發展新合約、過渡現有合約、合約發起人員教育的成本(Hartmann and Thomas, 2020)。由於區塊鏈技術本質為資料儲存，因此會對資料區塊儲存空間有持續性的需求，加上消耗大量能源的共識機制、系統維護的運作，使可持續性問題顯得更為重要和艱鉅(Mandaroux et al., 2021)。Giungato et al. (2017)對區塊鏈技術可持續性分析之研究提到，若區塊鏈技術是社會的驅動力，那麼這些問題也終將被區塊鏈技術解決。

3. 其他

除了上述提及之挑戰，應用區塊鏈技術尚需考量觀念普及率、硬體設置限制和仲介者的重新定義等問題。就算區塊鏈技術已發展成熟，若是政府官員、企業擁有者對其不熟悉，甚至排斥，那麼再好的技術都無其用武之地，甚至使其正當性難以建立。此外，區塊鏈技術需要高網路覆蓋率和廣泛設置之基礎設施以應付計算力需求，但在跨國網絡例如歐盟，其所有會員國和參與交易之被管制單位不見得都能觸及到大頻寬(high bandwidth)和完整設施(Mandaroux et al., 2021)。

在傳統碳交易市場中，仲介者扮演著宣傳碳交易市場、挖掘新碳抵換項目、提供建議給項目提出者的角色，若被區塊鏈技術取代，這些服務可能會不像過去那麼蓬勃，因此需衡量其角色原先帶來的價值，並將之重新定義，例如：本文提到的實際案例CLI，即使其大部分運作都在區塊鏈上執行，但還是需要仲介商幫忙維持、確保系統運作之穩定性(Hartmann and Thomas, 2020 ; MIEN and GIZ, 2019)。

(III) 應用區塊鏈於臺灣碳資產管理之可能性

臺灣目前推動的碳抵換專案最常使用之方法學為京都議定書規範之清潔發展機制(CDM)，以碳匯(carbon sink)為例，申請者先對欲執行專案的區域進行排放量評估，又稱為基礎排放或基線排放；接著評估執行專案後的排放量，也稱為專案排放；而基礎排放與專案排放之差額即為該該地區因專案所增加的碳匯當量，便可據此申請作為碳權使用；臺灣之森林碳權即由森林之碳匯專案而來，是經由機構認證之憑證，擁有者可憑此證來抵銷碳排放量，

多餘之碳權也可販賣給有需求之企業(柳婉郁、歐岱恩, 2022)。而在碳抵換專案轉換為碳權的過程, 針對碳抵換專案之監測、報告與驗證機制(MRV)步驟不可缺少, 在此, 便能應用區塊鏈之技術, 從碳盤查、查核到認證過程產生之資料整合為區塊鏈資料庫。以上述之森林碳匯為例, 森林碳權之認證程序中有4個主要角色, 為環保署、企業或林地地主(申請者)、顧問公司或碳管理公司(輔導團隊)、目前登記在案之7家查驗單位(柳婉郁、歐岱恩, 2022)。而森林碳權之MRV便是由前述之查驗單位來進行, 若能將各個環節數據化並建立成區塊鏈上之資料庫, 便可更進一步方便相關利害關係人員進行投資, 例如: 企業因資料庫更具透明度之碳匯專案資訊而增加對此類碳資產之信任; 森林地主可根據透明的企業資訊選擇具可信度之造林業者, 進而促進高品質的森林碳匯商品發展; 分散各地之小林地地主可透過共識機制確保信任, 並以智能合約來共同執行合作專案, 節省時間與金錢成本; 區塊鏈的技術也可以成為碳權專責交易所之基礎。而上述之顧問公司之中介角色, 可轉作為森林碳匯相關區塊鏈平台之技術輔導。若能建立像Energy Blockchain Labs之碳資產管理平台, 並額外發展出行動應用程式(apps), 甚至利用此平台與民間團體、企業合作推出多項優惠、經濟誘因措施, 增加碳權擁有者之減碳實感與動力, 還能為未來碳定價成熟後之總量管制碳交易制度鋪路。

臺灣於政治、經濟、文化、環境上都有其特殊性, 依據現階段環保署之立場, 碳交易涉及金流、會計與稅金等法律, 而金管會管轄金融市場, 會計與稅法相關歸屬其它財政機關, 環保署若推動碳交易需跨部會管理溝通; 此外, 臺灣之碳排放單位高度集中, 有流動性不

足之疑慮, 以及礙於歐盟碳邊境調整機制之時間壓迫、推動減排需要額外經費等因素, 決議先行推動碳費制度。

然而總量管制之碳交易制度與碳費最大之差別在於: 總量管制在配額得當的前提下, 可以明確的「減量」, 但碳費卻難以掌握其減碳成效(The World Bank, 2020)。此外, 碳交易之碳權現貨、期貨市場能使各方企業更清楚地視碳排放為資產, 納入公司之機會成本考量, 使碳資產成為企業的理財工具, 進而有發展綠色金融產業之可能(GIZ, 2021)。

考量臺灣的政治、法規面, 在應用區塊鏈技術上之相關行政細節、管制規範, 跨部會整合會是臺灣面臨的一大挑戰; 應用區塊鏈技術的詳細配置、基礎設施、用電需求也需多方考量與編列相關預算, 也需面臨政治生態之角力; 此外, 區塊鏈於臺灣在各領域政治與經濟面之應用尚需更多研究, 以及大眾對於區塊鏈知識之普及。綜上所述, 除了將區塊鏈技術運用於既有的監測、報告與驗證機制(MRV), 還可以逐步與民間業者、企業合作, 建立臺灣之碳資產管理平台, 並利用區塊鏈技術之優勢, 建立具透明度、自動化、公信力之紮實基礎, 為臺灣未來碳定價之成熟鋪路。

V、結論與展望

應用區塊鏈技術, 即分散式帳本技術(DLT), 能夠提高資訊透明度, 消除資訊不對稱和對仲介機構的依賴, 並因此降低交易成本與門檻, 增加公平性和市場效率, 達到碳交易制度降低社會性外部成本的初衷。由於區塊鏈之可追溯性、不可竄改性、安全性, 得以加強監管力道並減少非法行為, 進而提高市場信任

度。而區塊鏈之自動化與去中心化的特性，能夠提升行政效率、降低審計和維護成本。

應用區塊鏈技術需要考量多面向的因素，包括規範與法律面、區塊鏈設計面與其他。規範與法律面著重於交易制度內部責任歸屬、身分管制、安全性的詳細規範和跟法律的連結；區塊鏈設計面需著重在重要規格方面的選擇、隱私與效率的權衡、成本收益分析、新舊機制互通性等；其他則包括基礎技術建設的可行性、仲介機關的重新定義等。

應用區塊鏈技術於臺灣碳之產管理之可能性並非全無，但需循序漸進，由於台灣政經環境特殊，在跨部會的合作、立法與實行面尚需多方溝通協商，對於臺灣企業之碳排放盤查、碳抵換項目之監測等過程均可優先應用區塊鏈之技術，並逐步發展成以區塊鏈技術為基礎之碳資產管理平台並逐年擴充其功能，為臺灣未來之碳定價制度打下紮實基礎，更能銜接未來更多維度之區塊鏈應用。

應用區塊鏈技術於碳交易制度的未來展望包括：增加舊有制度無法附加的機制、提升碳交易制度之地域可擴展性、個人碳足跡的價值觀普及等。應用區塊鏈技術得以增加舊有制度無法附加的機制，例如：參與減碳的證明徽章等名譽、激勵措施；此外，有鑑於世界尚有一大部分的國家未有碳交易制度，使碳交易網絡受到地理限制，但藉由節點網絡的易拓展性，可以更有效率地在各國建立新的碳交易制度(Braden, 2019；Khaqqi et al., 2018；Mandaroux et al., 2021)。

產品從被生產出來到運送至消費者手上之過程所造成的碳排放，即碳足跡，不但沒有被京都議定書加入探討，民眾對其也缺乏意識，此狀況會導致社會中只有企業清楚碳足跡之重

要性。Pan et al. (2019)提到，區塊鏈技術在碳足跡方面的應用能提高大眾對減碳之重視，例如：中國有一名為「The Forest of Ants」之項目，透過計算用戶生活之碳足跡多寡，來和用戶互動或給予獎勵，例如：用戶透過火車旅行、網路訂票、線上繳水費等較低碳的方式，來蒐集虛擬的「能源」(energy)，當用戶累積足夠的能源，應用程式(App)中會長出一棵樹，而每長一棵樹，該平台便在現實中種下一棵樹，即透過互動性的獎勵模式來使大眾更熟悉與重視減碳。

VI、引用文獻

- 柳婉郁、歐岱恩 (2022) 看懂森林碳匯與碳權認證 綠電太難買不如種樹生碳權。豐年雜誌 72(4):8-13。
- Acharya, V., A. E. Yerrapati, N. Prakash (2019) Oracle Blockchain Quick Start Guide: A Practical Approach to Implementing Blockchain in Your Enterprise. Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK. ISBN 1789801303.
- Akerlof, G.A. (1978) The market for "lemons": Quality uncertainty and the market mechanism. *Uncertainty in Economics* 235:237-251.
- Al Kawasmi, E., E. Arnautovic, D. Svetinovic (2015) Bitcoin-Based Decentralized Carbon Emissions Trading Infrastructure Model. *Systems Engineering* 18(2):115-130.
- Andoni, M., V. Robu, D. Flynn, S. Abram, D. Geach, D. Jenkins, P. McCallum, A. Peacock (2019) Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of

- challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy* 100:143-174.
- Azouvi, S., A. Hicks, S. J. Murdoch (2018) *Incentives in Security Protocols*. Cambridge, UK, 19–21 March 2018. Springer: Cham, Switzerland. pp.132–141.
- Braden, S. (2019) *Blockchain for Mexican climate instruments: Emissions trading and MRV systems*. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). <https://www.giz.de/en/downloads/giz2019-en-blockchain-emissions.pdf>
- Buterin, V. (2013) *Ethereum*. <https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper>
- CLI (2018) *Navigating Blockchain and Climate Action. An Overview*. https://www.goldstandard.org/sites/default/files/documents/cli_report-january19.pdf
- Climate Change Authority (2017) *Review of the Emissions Reduction Fund*. <http://climatechangeauthority.gov.au/review-emissions-reduction-fund>
- Dyck, I.J., A. Morse, L. Zingales (2013) *How Pervasive is Corporate Fraud? Working Paper*; Rotman School of Management: Toronto, ON, Canada.
- Efthymiou, M., Papatheodorou, A. (2019) *EU Emissions Trading scheme in aviation: Policy analysis and suggestions*. *J. Clean. Prod.* 237, 117734.
- European Commission (2016) *EU ETS Handbook*. https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/ets_handbook_en.pdf
- European Commission (2020) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council: On a Pilot Regime for Market Infrastructures Based on Distributed Ledger Technology*. <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2020/EN/COM-2020-594-F1-EN-MAIN-PART-1.PDF>
- European Securities and Markets Authority (2017) *Report: The Distributed Ledger Technology Applied to Securities Markets*. https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/dlt_report_-_esma50-1121423017-285.pdf
- Frunza, M.-C. (2013) *Aftermath of the VAT fraud on carbon emissions markets*. *Journal of Financial Crime* 20:222-236.
- Giungato, P., R. Rana, A. Tarabella, C. Tricase (2017) *Current Trends in Sustainability of Bitcoins and Related Blockchain Technology Sustainability* 9, 2214.
- GIZ. (2021) *Global Carbon Market*. <https://www.giz.de/en/worldwide/42190.html>
- ICAP (2021) *Emissions Trading Worldwide: Status Report 2021*. Berlin: International Carbon Action Partnership. <https://icapcarbonaction.com/en/icap-status-report-2021>
- Interpol(2013) *Guide to Carbon Trading Crime*. <https://www.interpol.int/content/download/5172/file/Guideto%20Carbon%20Trading%20Crime.pdf>
- Jhavar, R., V. Piuri (2017) *Fault Tolerance and Resilience in Cloud Computing Environments*. In *Computer and Information Security Handbook 2017*.

- Morgan Kaufmann Publishers: Burlington, MA, USA, 2017; pp. 165–181.
- Karpf, A., A. Mandel, S. Battiston (2018) Price and network dynamics in the European carbon market. *Journal of Economic Behavior and Organization* 153:103-122.
- Karpoff, J.M. (2020) The future of financial fraud. *Journal of Corporate Finance* 101694, forthcoming.
- Khaqqi, K.N., J.J. Sikorski, K. Hadinoto, M. Kraft (2018) Incorporating seller/buyer reputation-based system in blockchain-enabled emission trading application. *Applied Energy* 209:8-19.
- Klein, B., K.B. Leffler (1981) The Role of Market Forces in Assuring Contractual Performance. *Journal of Political Economy* 89:615–641.
- MIEN and GIZ (2019) Blockchain for Mexican Climate Instruments: Emissions Trading and MRV Systems. <https://www.giz.de/en/downloads/giz2019-en-blockchain-emissions.pdf>
- Nakamoto, S. (2008) Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. [bitcoin.pdf](https://bitcoin.org/bitcoin.pdf)
- Nield, K., R. Pereira (2016) Financial crimes in the European carbon markets. In *Research Handbook on Emissions Trading*. Edward Elgar Publishing: Cheltenham, UK, 2016.
- Nkechi O. (2020) Blockchain Technology For Monitoring and Reporting of Carbon Emission Trading. A case study on its possible implementation in the Danish energy industry. https://projekter.aau.dk/projekter/files/360456376/20180731_NkechiOsuji_MasterThesis.pdf
- Pan Y., X. Zhang, Y. Wang, J. Yan, S. Zhou, G. Li, J. Bao (2019) Application of Blockchain in Carbon Trading. *Energy Procedia* 158:4286-4291.
- Richardson A., J. Xu (2020) Carbon Trading with Blockchain. In: Pardalos P., Kotsireas I., Guo Y., Knottenbelt W. (eds) *Mathematical Research for Blockchain Economy*. Springer Proceedings in Business and Economics. Springer, Cham.
- Schütz, T., Y. Andre, M. Vukovic (2015) Transaction Analysis-A mechanism to detect and prevent VAT-fraud in the European Emissions Trading System (EU ETS). In *EnviroInfo & ICT4S, Adjunct Proceedings*. Johannsen, V.K., Jensen, S., Wohlgemuth, V., Preist, C., Eriksson, E., Eds. University of Copenhagen: Copenhagen, Denmark.
- The World Bank. (2020) Pricing Carbon. <https://www.worldbank.org/en/programs/pricing-carbon>
- Xu, X., I. Weber, M. Staples, L. Zhu, J. Bosch, L. Bass, C. Pautasso, P. Rimba (2017) A Taxonomy of Blockchain-Based Systems for Architecture Design. *IEEE*.
- Zhou Y., J. Wu, C. Long (2018) Evaluation of peer-to-peer energy sharing mechanisms based on a multiagent simulation framework. *Applied Energy* 222:993-1022.

