

國立交通大學

交通運輸研究所

碩 士 論 文

核能發電之綠色供應鏈營運管理模式研究

A study of green supply chain on operational model
for nuclear power generation



研 究 生：鍾耀章

指導教授：許鉅秉 教授

中 華 民 國 九 十 四 年 六 月

核能發電之綠色供應鏈營運管理模式研究

A study of green supply chain on operational model
for nuclear power generation

研 究 生：鍾耀章

Student：Yao-Chang Chung

指導教授：許鉅秉 教授

Advisor：Dr. Jiuh-Biing Sheu

國立交通大學

交通運輸研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Traffic and Transportation

College of Management

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

in

Traffic and transportation

June 2005

Taipei, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年六月

核能發電之綠色供應鏈營運管理模式研究

學生：鍾耀章

指導教授：許鉅秉

國立交通大學交通運輸研究所

摘要

根據國際能源會之報導指出，累積至 2002 年全球之核廢料已有 11000 公噸。而已現今核廢料之處理技術，雖然已有方法能減少核廢料之產生，但其汙染影響程度仍無法克服。以全世界核能發電廠最多的國家：美國為例；境內有超過 130 個以上的核廢料處理廠，更有 1 億人生活在 100 公里內的範圍內。因此，若這些核廢料處理廠無法妥善保存核廢料時，其發生事故的影響層面可說是相當長久且巨大的。

以風險觀點來看，現今採用核能發電之考量因素是否完善，仍無明確指標可參考。因此，本研究將綠色供應鏈之環保概念加入核能發電供應鏈模式中，使模式不僅考量核能發電之正向發電效益，亦能將逆向供應鏈部份的核廢料作業成本與風險概念一併納入。而在模式內容部份，由於發電作業常屬於中長期規劃，且不同團體對風險值的認定均不相同，故研究將核能發電作業構建成一多階多目標的綠色供應鏈模式，並期望站在客觀角度來審慎評估核能發電之最適營運模式。

由研究結果顯示，核能發電效益再加入風險值觀念後，造成核能發電效益大大降低，使得核能發電由原本的基載電力型態轉變為支援性的發電方式，亦即火力與水力等主要電力供給不足時，才由核能發電進行供電作業。而上述亦證實核能發電風險值會影響整體核能發電績效。因此本研究建議未來在進行效益評估時應將其納入考量之中。另一方面，藉由敏感度的數據分析可得知，核能發電廠與環保利益團體所存在的風險價值觀差異極大，故現今大眾會對核能發電議題產生衝突的原因即在於此。

關鍵字：核能發電、能源效益、風險、綠色供應鏈

A study of green supply chain on operational model for nuclear power generation

Student : Yao-Chang Chung

Advisor : Dr. Jiuh-Biing Sheu

Institute of Traffic and Transportation
National Chiao Tung University

Abstract

According to International Energy Agency reports, they have indicated that there are more than 10,000 tons of nuclear wastes in the world until 2002. Although many technologies can reduce the quantity of nuclear waste, the polluted effect of nuclear waste is still not to be solved. For example, there are more than 130 treatment plants of nuclear waste in America, and one hundred million people living near by treatment plants. Consequently, if these treatment plants are unable to storage nuclear wastes properly, the effect of accident is very vast and permanent.

From the risk point of view, adopting nuclear power generation is no explicit guideline for the reference. Hence, this research will join the concept of the green supply chain in the operational model, and make the model consider about not only the profit of generating electric power in the right logistic, but also the operation cost and the risk of the nuclear power generation in the reverse logistic. Because the generating electric power operation belongs to a long-medium plan and different groups have different presumed on risk, our model is a multi-layer and multi-objective green supply chain model, and hope that it can be an objective law to evaluate the operation and management of the nuclear power generation.

After adding the concept of risk into the nuclear power generation operations, the benefit of the nuclear power generation is diminished materially and the operation of the nuclear power generation becomes a supporter in the power industry. Hence, this result of the research confirms that the risk of nuclear power generation will affect the benefit of the integer power industry, and we suggest that the concept of the risk will join the factor of the evaluation in the future. Besides, according to the sensitivity analysis, we know that the concept of risk is very different between the nuclear power plant and the group of environmental protection. This is the reason that there are so many conflicts about the subject of nuclear power generation in our society.

Keywords : nuclear power generation, the effect of energy, risk, green supply chain

誌謝

記得在論文口試當天的早上，媽媽在我的書桌上留了一張紙條，上面寫著：「小章，媽媽在求學之路中沒辦法給你太多實質的幫助，僅能在此用心祝福你口試順利。」當天我看到這張紙條，內心真是感到萬分窩心。現在我能大聲對媽媽說：媽，我畢業了。非常感謝妳在我過去的生活中，無論是物質上或精神上均給我相當大的支持，而能讓我無憂無慮順利完成各階段的求學生涯，包括這次的碩士班生活。

除了我的媽媽，學生在兩年撰寫論文的期間亦受到許多師長，與同學朋友的幫忙與鼓勵。其中指導教授 許鉅秉老師更是在學生有任何迷惑時均給予協助，讓學生在研究之路上走的更是順利，也從老師身上學到許多待人處世的道理。而在口試的 Q&A 中，亦感謝林正章老師與顏上堯老師亦不吝指教，使本篇論文更加完備。也謝謝交大北交研的所有老師與所辦的洪小姐與柳小姐給予學生課業上的指導和生活上的幫助。

學生在兩年研究生活中亦結交了許多好同學與好朋友，許家班的成員（都計專業的偉爺，數學超強的孟釗與勇 A，籃球之神阿 Jor，搞笑與救災之王明安），感謝你們在研究生活之路上能帶領我一同成長，沒有你們就沒有今天的核能小章。班上其他的同學，木蘭、t 姐、孟慧、大炮等等一大堆好同學，也要謝謝你們給我這麼一個美好的研究生回憶。

從小到大的死黨，粉圓王子家豪、住我家隔壁的阿傑、中士漢宗、一弓志、Yes、詹帆等，也謝謝你陪我度過許多歡樂時光。大家一起打撲克聊天之趣事，我一定不會忘記的。對了哦，琪慧啊我怎麼會忘記你咧，也謝謝你的體諒與包容，陪我度過一整個研

究生活。

未來的路還很遙遠，學生會再次朝著自己的目標前進。在此學生僅能抱著相當感激的心來謝謝大家，希望大家未來能事事順心如意。

目錄

| | |
|-------------------------|-----|
| 中文摘要 | I |
| 英文摘要 | II |
| 誌謝 | III |
| 目錄 | IV |
| 圖目錄 | VI |
| 表目錄 | VII |
| 第一章 緒論 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 研究動機 | 2 |
| 1.3 研究目的 | 2 |
| 1.4 研究方法 | 3 |
| 1.5 研究範圍 | 3 |
| 1.6 研究步驟 | 5 |
| 第二章 相關文獻回顧 | 7 |
| 2.1 核能發電介紹 | 7 |
| 2.1.1 核能發電歷史 | 7 |
| 2.1.2 核能發電之特殊規範 | 8 |
| 2.1.3 輻射防護原則 | 11 |
| 2.1.4 世界核能概況 | 11 |
| 2.1.5 核能發電處理相關文獻 | 13 |
| 2.2 綠色供應鏈營運模式 | 16 |
| 2.2.1 綠色供應鏈之發展 | 16 |
| 2.2.2 綠色供應鏈相關文獻回顧 | 19 |
| 2.3 風險評估模式之相關研究 | 20 |
| 2.3.1 風險評估與管理介紹 | 20 |
| 2.3.2 物流風險相關文獻回顧 | 22 |
| 2.4 多目標數學規劃 | 25 |
| 2.4.1 數學規劃 | 25 |
| 2.4.2 多目標規劃 | 26 |
| 2.5 綜合評析 | 27 |
| 第三章 核能發電作業流程 | 29 |
| 3.1 正向物流作業 | 29 |
| 3.1.1 原料製造 | 29 |
| 3.1.2 燃料採購策略 | 30 |
| 3.1.3 核能發電 | 30 |
| 3.1.4 配電系統 | 31 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 3.2 逆向物流作業 | 32 |
| 3.2.1 高放射性核廢料 | 32 |
| 3.2.2 低放射性核廢料 | 33 |
| 3.3 核能發電作業事故 | 35 |
| 3.3.1 車諾比事件 | 35 |
| 3.3.2 三哩島事件 | 36 |
| 3.4 研究通路之構建 | 36 |
| 第四章 綠色供應鏈最適模式之構建 | 39 |
| 4.1 收入與成本項 | 39 |
| 4.2 模式建構 | 39 |
| 4.3 核能發電作業流程模式 | 40 |
| 4.4 物流風險作業模式 | 47 |
| 4.4.1 運輸風險成本模式(RTC) | 48 |
| 4.4.2 處理風險成本模式(RWC) | 49 |
| 4.4.3 最終處置風險成本(RDC) | 49 |
| 第五章 案例探討 | 51 |
| 5.1 案例背景描述 | 51 |
| 5.2 案例資料 | 52 |
| 5.3 演算流程與結果分析 | 59 |
| 5.3.1 核能發電供應鏈作業模式求解結果 | 59 |
| 5.3.2 核能發電綠色供應鏈模式求解結果 | 61 |
| 第六章 敏感度分析 | 69 |
| 6.1 目標式權重敏感度 | 69 |
| 6.1.1 情境討論一 | 70 |
| 6.1.2 情境討論二 | 71 |
| 6.2 電力需求量敏感度分析 | 73 |
| 6.2.1 發電量敏感度分析—一年期分析 | 74 |
| 6.2.2 發電量敏感度分析—夏季/非夏季分析 | 75 |
| 6.3 京都議定書之影響情境 | 76 |
| 6.3.1 基年與目標年之二氧化碳計算量 | 78 |
| 6.3.2 解決方案 1—購買森林綠地 | 79 |
| 6.3.3 解決方案 2—購買碳排放權 | 80 |
| 6.3.4 小結 | 83 |
| 第七章 結論與建議 | 84 |
| 7.1 結論 | 84 |
| 7.2 建議 | 86 |
| 附錄 資料來源 | 88 |

圖目錄

| | | |
|-------|----------------------------|----|
| 圖 1.1 | 研究範圍示意圖 | 4 |
| 圖 1.2 | 研究流程圖 | 6 |
| 圖 2.1 | 1998 全球核電廠分佈圖 | 7 |
| 圖 2.2 | 核燃料循環模式與回收流程圖 | 8 |
| 圖 2.3 | 綠色供應鏈架構圖 | 18 |
| 圖 2.4 | 美國風險評估模式 | 21 |
| 圖 3.1 | 2000 年全世界原料鈾生產狀況 | 29 |
| 圖 3.2 | 高放射核廢料衰敗圖 | 33 |
| 圖 3.3 | 低放射性核廢料衰敗圖 | 34 |
| 圖 3.4 | 核廢料處理流程圖 | 35 |
| 圖 3.5 | 綠色供應鏈通路流程圖 | 37 |
| 圖 3.6 | 核能發電綠色供應鏈通路架構圖 | 38 |
| 圖 4.1 | 核能發電綠色供應鏈成本架構圖 | 39 |
| 圖 4.2 | 運輸風險模式示意圖 | 48 |
| 圖 4.3 | 最終處置風險模式示意圖 | 49 |
| 圖 5.1 | 求解比較圖 | 59 |
| 圖 5.2 | 各種發電型態之電力供應圖 | 60 |
| 圖 5.3 | 發電量圖(加入風險值) | 64 |
| 圖 5.4 | 發電時階次數圖 | 65 |
| 圖 5.5 | 核一廠成本項目圖 | 67 |
| 圖 5.6 | 核二廠成本項目圖 | 67 |
| 圖 5.7 | 核三廠成本項目圖 | 68 |
| 圖 6.1 | 不同目標式權重之發電時階次數圖(一) | 70 |
| 圖 6.2 | 不同目標式權重之發電時階次數圖(二) | 71 |
| 圖 6.3 | 不同權重情形下的核能發電量與總利潤變化圖 | 73 |
| 圖 6.4 | 電力需求量下限敏感度分析圖 | 76 |
| 圖 6.5 | 不同解決方案之比較圖 | 82 |

表目錄

| | | |
|--------|------------------------------|----|
| 表 2.1 | 核能發電之文獻整理 | 15 |
| 表 2.2 | 風險相關定義 | 20 |
| 表 2.3 | 風險模式之文獻整理 | 24 |
| 表 3.1 | 核能事故對照表 | 36 |
| 表 5.1 | 台電公司各核能電廠簡介 | 51 |
| 表 5.2 | 發電成本表 | 52 |
| 表 5.3 | 各核能機組大修與啟動成本表 | 53 |
| 表 5.4 | 台灣核能發電大修時程表 | 53 |
| 表 5.5 | 2002 至 2004 年台灣月尖峰負載量 | 54 |
| 表 5.6 | 2002 至 2004 年台灣電力基礎需求量 | 55 |
| 表 5.7 | 生產設備裝置容量表 | 55 |
| 表 5.8 | 核廢料成本項目表 | 57 |
| 表 5.9 | 風險機率表 | 58 |
| 表 5.10 | 目標式初步試算表 | 61 |
| 表 5.11 | 目標值數據表 | 62 |
| 表 5.12 | 發電變數表(加入核能發電風險值) | 63 |
| 表 5.13 | 核能機組統計時階表 | 65 |
| 表 5.14 | 風險成本表 | 66 |
| 表 6.1 | 目標式權重敏感度分析表(一) | 69 |
| 表 6.2 | 目標式權重敏感度分析表(二) | 72 |
| 表 6.3 | 電力需求量下限敏感度分析表(a) | 74 |
| 表 6.3 | 電力需求量下限敏感度分析表(b) | 75 |
| 表 6.4 | 民國 79 年各種發電型態之發電量 | 79 |
| 表 6.5 | 目標值數據表(解決方案 1) | 79 |
| 表 6.6 | 採用解決方案 1 之火力發電細部項目 | 80 |
| 表 6.7 | 目標值數據表(解決方案 2) | 81 |
| 表 6.8 | 採用解決方案 2 之火力發電細部項目 | 82 |

第一章 緒論

1.1 研究背景

自十八世紀發明了發電原理後，科學家便開始努力尋找能夠推動導線旋轉的動力，希望能發展出具有持久與大量的發電方式來造福人類。而根據邱靜玉，陳妍蓓(2000)研究指出目前世界大部分的能源來自石油（39.5%）、煤炭（24.2%）、天然氣（22.1%）、水力發電（6.9%）和核能發電（6.3%）。雖然石油和煤炭仍是主要的能源來源，但其市場佔有率從十年前就已經開始減少。在此同時，天然氣和核能的佔有率則呈現穩定成長的狀態，而這樣的趨勢會因天然氣與鈾能源使用上的優勢繼續維持下去。由此可知，核能發電已成為未來能源發電之主要來源之一。但核能發電所產生的放射性廢棄物則一直為人所詬病。因此，本研究主要即在探討核能發電效益與風險之相關影響。以目前評估標準來評估核能發電對於人類影響究竟是好是壞仍無定論，而其中反核與擁核人士持有不同的說法。

反核人士的論點在於，核能發電所產生的核廢料與核能發電廠(nuclear power plant：簡稱 NPP)之公共安全問題依然存在，這是不容懷疑的。且根據統計資料顯示，2000 年全球已擁有 400 座以上的核能發電廠，每天產生將近 30 公噸的有毒核廢料，雖然至目前為止已發展出各種核能減廢策略與技術，但部份技術距離實際實行階段仍有一大段距離。以台灣減廢發展為例：在低強度廢料之減廢上雖然已能降低八成體積，但在高強度廢料處理上，仍無適當處理技術。且過去已產生的核廢料對於社會與民眾的影響程度少則百年多則千年，而長期累積下來對於人體或環境所造成的衝擊相當龐大。

擁核人士則認為，由核能工業的蓬勃發展與新式反應器逐漸發展成型可發現目前核能發電相較其他發電方式更具有安全性與發電效率等優勢。依照現今核能發展之技術，藉由核能發電僅會產生 20 立方公尺體積的固體廢棄物，而其他發電方式的固體廢棄物則遠超過這個數字。而以意外發生機率來看，核能發電發生意外的機率極低，相較於其他重大意外發生之機率可說是微乎其微。另一方面，根據世界能源協會（WEC）的統計資料指出，在 1970 到 1992 年間，全球僅有 2 次重大核能事故(三哩島與車諾比事件)，其中只有 31 人死亡；而相較於同期間，卻有超過千人以上分別死於火力、天然氣，與水力發電所造成的事故，由此可知核能發電具有相當的安全性。且目前世界核能研究中已開始實驗「快滋生反應器」之運用，透過快滋生反應器可將部份高放射性廢料再次轉為可用核燃料，如此可大大減少放射性廢料量，更加達到減廢與減量的目標。

在面對各方論點時，目前仍無完善的標準或作業流程來消除核能發電在人民心中的疑慮。且透過先進核能技術所能達成減廢減量之目標相對於整體核能供應鏈作業能產生多少效益目前亦無法得知。因此，將減廢減量與重視風險課題的綠色供應鏈概念納入核能發電營運模式，並且在汙染與能源取得上做一取捨，實為核能發電中一項重要的課題。

1.2 研究動機

由於核能發電可用較少的原料來獲得較大的電力，因此世界上許多國家均積極建置核能發電廠來進行發電作業。但伴隨著核能發電的使用，有害廢棄物與污染源與日累積，而其中核廢料的處理與處置一直都是公認的嚴重問題。雖然世界各國已積極努力發展減廢與處理技術，希望能使核廢料之產生降至最低，但仍無法解決核廢料污染之影響。以台灣 3 座核電廠為例，運轉 30 年所累積之高強度核廢料就有 9 千噸，而低強度核廢料也有 90 萬桶之多。以此對照全世界超過 400 座的核電廠，其核廢料問題可看出已相當嚴重。由此可知，核能發電的放射性廢料處理方式是否夠環保夠安全，或人民是否有足夠能力來應變放射性廢料所造成的影響，均是核能發電的綠色供應鏈議題之一。

廣義綠色供應鏈即泛指產品或供應鏈作業流程中需加入與環保有關的管理方式，例如：綠色設計、減廢減量、回收再製、原料的環保性等等。但從已往核能發電效益大多以營運與處理成本為考量來看，在面對核廢料之污染性時，大多以發生機率極低，故較少納入考量因素之中。因此在現今環保意識抬頭之下，過去針對核能發電之效益評估可能會讓人有所疑問。

單純以核能發電之供應鏈效益來看，理應是發電量越高越能有經濟上之效益。但兼顧到回收體系時即可看出，核能發電的廢料回收並不是單純的逆物流活動。在各項作業程序（例如：運輸，儲存，與處理作業）中，核廢料可能會面臨高外部風險成本的情形發生。因此，如何將核能發電產業藉由加入風險概念處理來構建一個完整的綠色供應鏈，且使整體環境效益更加提升是一項重要的課題。

一般來說，傳統型態之供應鏈所追求的目標大多是以成本最小或收益最大。但在綠色供應鏈中加入以回收再利用與風險的觀念時，供應鏈的作業流程將更為複雜，且整體目標亦可能會有所變動。因此，站在綠色供應鏈角度來看核能發電之營運模式時，本研究探討的核能發電之綠色供應鏈最適營運模式，將會朝向下列重點目標的作業項目：

- 整體利潤最適化
- 考量污染風險的承擔能力

藉由上述目標的影響來使核能發電在綠色供應鏈中，能以效益最適化且考量風險承擔能力的方式進行處理，期望達成最適營運之目的。

1.3 研究目的

由研究背景與動機可得知，核能發電的逆物流廢料處理作業與風險考量問題已成為世界各國未來必須執行的一項評估工作。以往的核電廠在進行發電量規劃時常只考量到核能發電前端作業的風險因素，使得發電量規劃忽略了廢料產生對環境所造成的風險，而此種規劃方式可能造成發電量規劃有高估之情形。而在未來核能技術中亦可能有廢料

再製料之情形發生，使得廢料在計算與處理量會與目前情形不大相同。

另一方面，在現今大家已對核廢料有所認知的情況下，核能發電廠除了開始要對核廢料進行回收的工作外，亦應重視在逆物流的活動中所產生的污染影響因素，與盡量避免污染物所造成社會成本的增加。

因此，本研究是以構建出一套完整的核能發電之綠色供應鏈最適營運模式為主。期望能使核能發電在發電量規劃中加入核廢料的污染影響概念，使得核能發電能考量污染風險與整體效益，藉此進行最適整體發電作業。本研究之目的可分為下列幾點：

- 收集現今核能發電處理的各項資料，以了解各項流程所可能產生的風險因素，並歸納整理出核能發電的綠色供應鏈作業流程。
- 透過國內外的文獻回顧，進而將核廢料處理的風險因素模式化。且透過風險模式之考量加強核能發電供應鏈作業對於環保問題的重視，並從中得到利基。
- 將風險因素與核能發電的綠色供應鏈流程做結合，構建出一個完整的綠色供應鏈之最適營運模式。
- 利用模式所計算與評估的結果，提供給世界各國相關單位或核能電廠做為營運與作業的參考依據。
- 期望以新的角度與思維，提供世界各國或相關單位有效之策略來解決所面臨的污染風險問題。



1.4 研究方法

本研究擬針對綠色供應鏈模式之核能發電產業，建立一整合正逆向物流之最適化營運模式。然而單以傳統供應鏈營運模式運用在核能發電時，由於核廢料回收過程中會產生有害廢棄物之影響。因此，若無考量污染風險因素之影響可能會造成營運模式偏向利益導向為主而喪失環境保護之觀念。本研究將引進風險量化之觀念，期望藉由風險量化後可用來表現出原本無法明確定義的風險概念。

由上述可知，本研究欲構建一完整的多目標之綠色供應鏈模式為基礎，並考量供應鏈之整體效益與污染的風險因素。藉此探討核能發電中之正逆向物流最適化營運情形。

1.5 研究範圍

本研究之範圍可分為作業面與時間面兩種。在作業面中，主要界定在核能發電正逆向物流活動之整合架構，並加入有關收入和支出的現金流。茲分述如下：

● 正向物流活動

正向物流活動即為從核原料（鈾）取得、核能發電，最後配電至最終顧客的各項活動。

- **逆向物流活動**

逆向物流活動即為核廢料回收作業。主要來源是核電廠經由核能發電過程所收集而得的有害廢棄物進行回收處理的程序。經由處理過程所得的部份元素物質可進行回收再製料，至於處理過程中所剩餘的有害核廢料則必需直接運至最終處理廠進行掩埋處理。

- **現金流**

本研究所討論之現金流為，與核能發電有關的供應鏈上各項物流活動之成本與收益項。

由時間面來看，核能發電之週期可分為三階段：興建期、營運期，與核廢料儲存期。其中興建期為核能發電廠從開始興建至興建完成之期間。營運期則為核能發電廠興建完成後至拆廠之期間，其中可細分為發電作業期間與核廢料前期處理期間兩種。而核廢料儲存期則為廢料在進行最終處置之時期，且由於核廢料因輻射強度與來源不同而有不同之處理方式，因此在核廢料儲存期方面，可再分為低強度核廢料儲存期與高強度核廢料儲存期兩種。而本研究之時間面則界定在核能電廠發電時期與核廢料儲存期兩方面。而興建期與營運末期拆廠活動的作業流與現金流則不在本研究範圍。下圖 1.1 則為本研究之研究範圍示意圖：

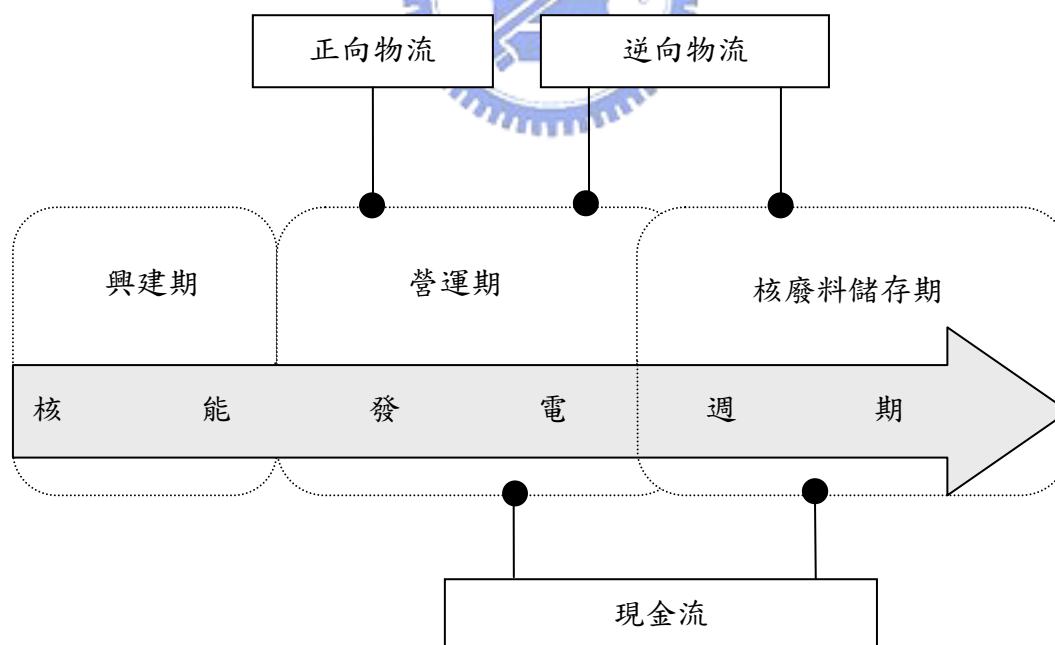


圖 1.1 研究範圍示意圖

資料來源：本研究整理

1.6 研究步驟

就本研究探討之綠色供應鏈最適營運模式，擬定研究步驟如下。而相關流程如圖 1.2 所示。

- **問題確認及研究範圍界定**

藉由研究背景來發現與確認問題及所需使用的方法與工具，如研究範圍與研究方法等，以進一步確定研究之方向與目標。

- **文獻回顧**

回顧國內外有關核能發電現況、核廢料處理流程、物流風險模式，與綠色供應鏈營運之相關文獻和發展課題，以此來做為模式構建的基礎。

- **研究方法**

藉由文獻回顧來構建出概念性供應鏈架構與方法論之採用。

- **最適營運模式構建**

主要是將風險因素模式化，並確認供應鏈模式中的各項參數，再將有關核能發電的物流作業限制與營運目標模式化。進而構建出核能發電的綠色供應鏈最適營運模式，並採用數學規劃來進行求解。

- **實例驗證**

利用現有的實務案例，就上述所構建模式，進行驗證並求解出最適營運模式的結果。

- **敏感度分析**

透過改變系統輸入參數進行敏感度分析，重新將模式運作，並檢查模式運作結果有何差異。

- **結論與建議**

總結本研究所得之成果做出結論，並對後續研究提出建議。



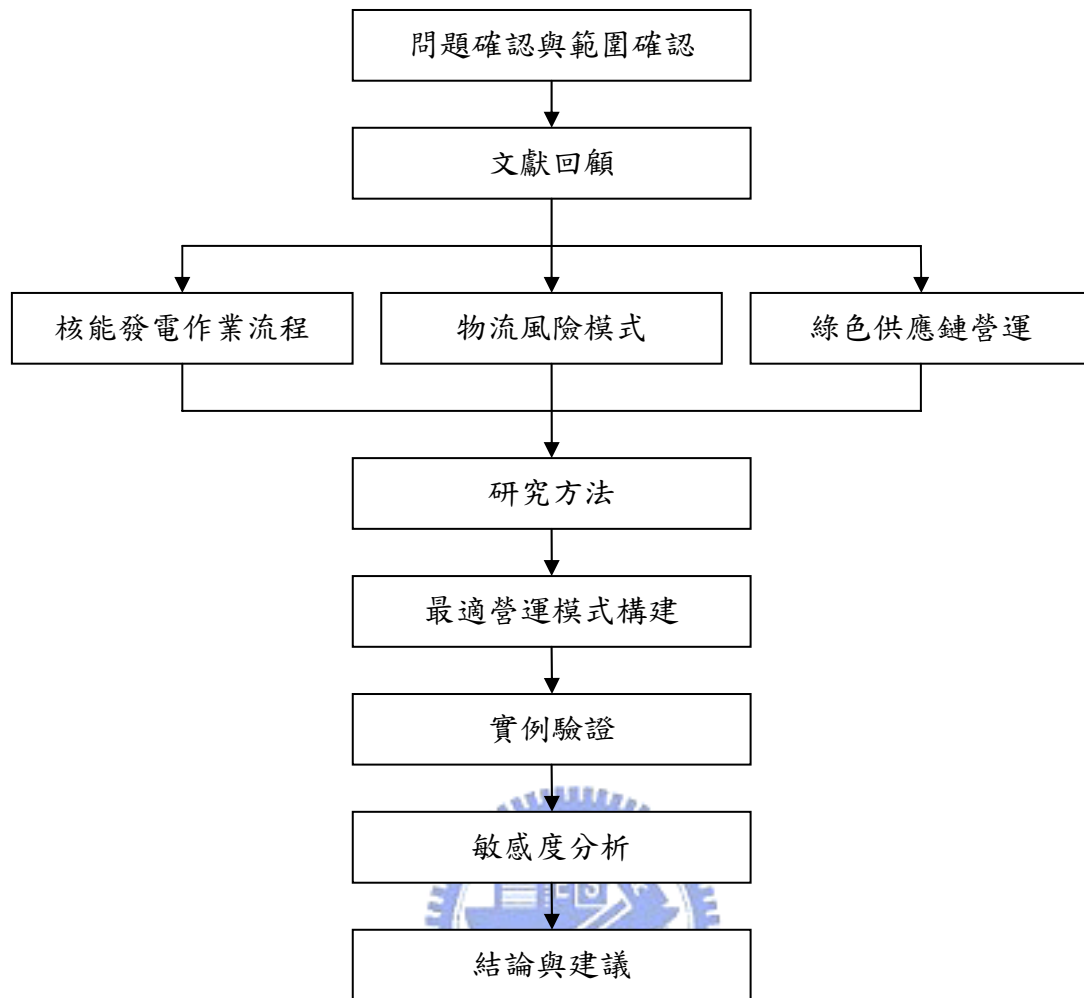


圖 1.2 研究流程圖

第二章 相關文獻回顧

2.1 核能發電介紹

該節將針對核能發電的技術發展、發電流程、特殊之作業處理程序，與相關文獻做介紹。

2.1.1 核能發電歷史

世界第一座商用核電廠是 1957 年在美國賓州開始運轉，第一部用以發電的核反應器是 1954 年蘇俄的 Obminsk APS。其後，英國亦完成了第一座氣冷式的反應器；而世界知名大廠西屋公司亦利用核子潛艇的反應器技術興建完成第一座容量為 60MWe 的商用壓水式反應器核電廠，該核電廠的容量已比世界第一座的商用核電廠大 12 倍。從此世界各國開始進入核能發電商業化的時代，且進行大規模的核電技術交流活動，而目前世界各國的核能技術已發展到能建造出 1000MWe 級以上的核能發電廠。下圖為 1998 年全球核能發電廠分佈。小點為營運中核能發電廠，大點則為鈾礦產地。



圖 2.1 1998 全球核電廠分佈圖

資料來源：新核家園美麗新世界網站

核能發電之作業流程最主要即是在於鈾原料的運輸、轉換、製程、回收處理等步驟。因此我們可藉由鈾原料的核燃料循環來看整體核能發電的流程。

根據王德義(2004)於核能發電淺談中提出，核燃料循環主要為天然鈾礦→原料鈾→轉化→鈾濃縮→核燃料製造→核燃料填入核反應器，發電→用過核燃料→再處理→產生之鈾可以直接製造燃料，及回收循環之鈾料，經轉化，濃縮，可再製成燃料，整個過程形成一封閉循環。而學者 Yamaji 等(1990)則應用核燃料循環模式與回收流程，構建出核能發電架構圖，如下圖 2.2 所示：

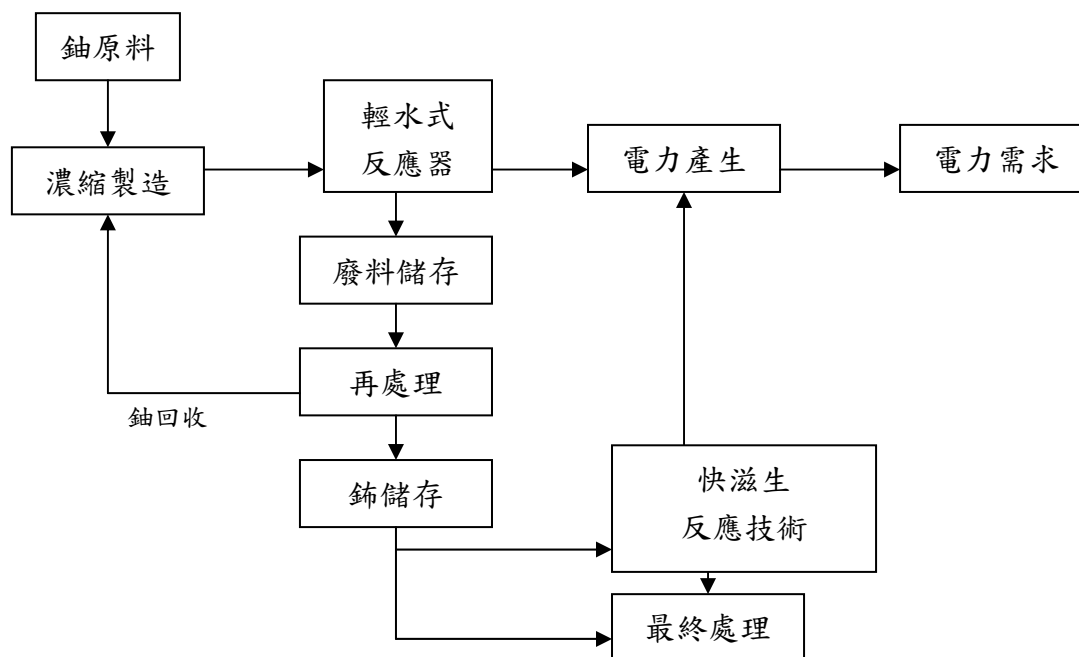


圖 2.2 核燃料循環模式與回收流程圖

資料來源：Yamaji(1990)

2.1.2 核能發電之特殊規範

由於核能發電的特殊性，因此核能發電有下列三種作業上特殊的規範：運輸作業、回收作業，與大修排程作業。且核能發電的原料與回收廢料是屬於高污染與輻射性的物質，因此在各項作業中均需要一些特殊的處理方式與作業流程。根據世界核能協會(WNA)對上述作業有做相關說明，其說明如下所述：

2.1.2.1 運輸作業

自 1971 年開始，全世界已運送超過 20,000 次的核能剩餘原料與高強度廢料，而這些旅程已超過 3 千萬公里以上。直到目前，全世界亦約有 430 座核電廠位於 32 個國家中，但鈾原料僅僅只有在少數幾個國家有礦產。因此，運輸作業對於核能發電來說是相當重要的一項作業流程。

在運送過程中，這些核能原物料的容器必需是相當堅固且安全的。一般來說，運輸作業可再細分為下列幾項作業，茲針對其特殊處理作業說明，如下所述：

(1)包裝處理

在包裝處理中，面對不同的核物質與核廢料時則需依照當時物質特性與環境情況來適用不同的包裝材料與包裝方式。

(2)輻射保護

由於核原料具有放射性，因此在運輸路線中必須確保無放射線暴露的條件。另外，在運送過程中也必須根據國際規範，且在包裝上需貼上標籤來警告或指示該物品為高危險之核原料。

(3)國際運輸規則

從 1961 年起，國際原子能協會(IAEA)已宣佈核物質的運輸安全規則。這些規則現今適用於 60 個國家、國際海運機構(IMO)、國際民航組織，與區域海運機構等。其目的是在達到保護環境與人民免於運輸路徑中受到放射性汙染。

(4)鈾原料之運送

在西歐，亞洲和美國，鈾燃料的運輸是採用非常普通的方法：貨車。一個普通型的卡車可裝載 6 噸輕水式核反應器所需要的原料。而前蘇聯的國家中，則經常使用鐵路運輸。鈾原料在面對洲際運輸則常採用海運，少部份則利用空運運送。

(5)低強度核廢料之運送

低強度核廢料之產生遍及整個核能發電週期，因此運送這些廢料的頻率相當的高。在安全性方面，運送這些廢料到最終處理廠相較高強度廢料是具有較高的安全性。在運送過程中雖然不需要太刻意保護，但適當的包裝仍是需要的。

另一方面，低強度廢料亦可運用鐵路、公路、海運，甚至是複合運輸。但一般核電廠對於自己所產生的低強度核廢料則多放置於本國之內。

(6)剩餘核燃料之運送

一般來說，剩餘核燃料與新核燃料的運送方式相同，但由於從核反應器把剩餘核燃料移出時會產生高輻射與高熱，因此需要將剩餘核燃料放置在水池中至少 5 個月時間，才可再進行運輸處理作業。



2.1.2.2 回收處理作業

在核能發電的循環作業中，回收處理是最被大家所質疑與討論的作業項目。原因在於藉由核能發電完所產生的核廢料與剩餘燃料其具有高輻射汙染之危險性存在，因此需要極高的回收處理技術，來降低或避免汙染風險所造成的結果與發生機率。一般來說，可依照核廢料的回收作業不同，分為下列幾項程序，茲針對其特殊處理作業說明，如下所述：

(1)剩餘燃料

剩餘燃料的產生是由核反應器發電完所剩餘的原料分裂碎片，通常這些碎片若無經過再處理作業，則無法再繼續使用。且各種型態的核反應器均會產生不相同的剩餘燃料。

(2)剩餘燃料的儲存

由於剩餘燃料從核反應器取出時會產生高輻射與高熱，因此必需先放置於水池之中，藉由水來掩蓋輻射線與吸收熱量，這項作業通常必須長達數個月至數年不等。

基於各國的環保政策，因此許多剩餘燃料必須進行集中化處理，並根據剩餘燃料的物質型態來判別是否可進行再處理或直接進行最終處理作業。

(3)再處理作業

通常剩餘燃料中約有 95%的鈾 238、1%的鈾 235、1%的鈾，與 3%的分裂碎片。而

且剩餘燃料的再處理作業流程中，主要是加強對於鈾和鈾原料的回收處理，使其能再成為核燃料。因此，透過再處理作業可大大減少核廢料產生問題。

(4)鈾和鈾的回收處理

一般來說，經由再回收的鈾原料與自然產生的鈾原料具有相同的發電效益，亦可透過轉換與濃縮技術來成為核能發電原料。而鈾原料則可直接與鈾混合再製成「混合氧化物」燃料，這種燃料可用來替代鈾 235 來進行核能發電之作業。

(5)剩餘燃料的處理

對於剩餘燃料的處理，目前許多國家亦進行研究來嘗試找出最適的解決方法與最終處理廠的設置問題。目前以美國能源局於 1983 年所決定的永久性最終處理廠擁有最適條件。美國對於最終處理廠的選址條件有下列五項評估因素：(a)離人口稠密的城市很遠，(b)氣候很乾燥且年度降雨量低於 6 英吋，(c)地下水源需低於貯藏所約海拔 800-1000 英尺，(d)沒有火山與地質斷層，(e)沒有地震紀錄。

(6)廢棄物

一般來說，可將核廢料依照來源不同分為兩類：第一為高強度廢料：該廢料來源為核能燃料棒，平均一隻燃料棒可使用期間為兩年；第二為低強度廢料：主要來源為員工平常因為操作而接觸放射性物質所產生的一般性廢棄物（如手套、衣服等物品）。

2.1.2.3 大修排程作業

根據張維仁(2001)所指出，由於核能發電之作業規劃需考量到需求滿足(unit commitment)與經濟配送(economic dispatch)兩項因素。其中需求滿足是指在規劃的時程點中，決定那些發電機具是處於發電狀態，而這必須考量到各系統設備的裝置容量以及發電設備之啟動與停機的經濟相關性。經濟配送則是決定如何有效率地調派可供電之發電設備以滿足可能產生的用電需求。也因此如何控制各項核能發電機具的大修排程作業來配合用電需求是核能發電廠流程作業相當重要的一環。

核能發電之大修排程內容主要可分為停機大修與燃料再裝填兩部份。一般來說，核能發電燃料週期為 12 至 18 個月。週期時期所代表燃料已耗盡，需進行填料作業(30 至 40 天)。在填料作業期間也會順便檢查反應爐設備及電廠發電附屬設備。因此在大修期間，發電模組則進入停機狀態並等待填料與檢查作業完成後，發電機組才進行再啟動作業。而由於核能發電之原料具有特殊性，故核能發電廠僅在大修排程前半年才會請原料供應商運送適當的燃料至儲存倉庫。至於核能發電廠願意存放燃料半年的時間，主要則是在避免燃料運送過程發生的意外事件，使得核能發電廠的大修排程無法順利進行之情況。

2.1.3 輻射防護原則

由於核能發電所產生之廢料具有放射性污染的危險性，因此在對於輻射防護上有些公認的基本原則是核能發電廠從設計到營運的輻射防護規劃與執行必需要遵守的。這些原則可區分為體外防護 TSD 三原則、體內防護 3D 原則、體內防護 2C 原則，以及一般的 2C2G 原則。翁寶山(1986)在輻射原理與輻射防護一文有簡要介紹，如下所示：

(1)TSD 原則

TSD 為輻射防護上最常被提到的三原則。T 表示時間(Time)，S 表示屏蔽(Shield)，D 表示距離(distance)。時間是指受曝露的時間儘可能縮短，凡任何涉及游離輻射的操作，事先要先做好充份準備，必要時需做模擬操作，以減少受曝露時間。屏蔽是指人和輻射源之間加一適當的屏蔽物體。距離是指人和輻射源之間，應保持適當的距離，或使用遙控方式來操作器具。

(2)3D 原則

三個 D 分別表示稀釋(dilute)、分散(disperse)、除汙(decontaminate)。稀釋是指將受放射性污染的水或空氣用非污染的水或空氣稀釋至可接受的程度，然後釋入水域或大氣。分散是指放射性污染物經由大氣或水域分散。除汙是指對受放射性污染的人體或物體必需進行清除污染的作業。

(3)2C 原則

二個 C 分別表示圍包(contain)與集中(Concentrate)。意即輻射源和污染物必需加以圍包和集中。而 2C 與 3D 原則同為體內輻射防護的原則，惟 2C 原則是積極的，而 3C 原則是較消極的。

(4)2C2G 原則

所謂 2C 是指圍阻(containment)與清潔(cleanliness)，而 2G 是指良好的整理維護(good house keeping)與良好的團隊精神(good teamwork)。圍阻是表示輻射源必需加以圍阻，尤其是非密封性的放射性物質，以避免污染擴大。而其他原則為一般作業要求。

2.1.4 世界核能概況

目前世界在運轉中的核能機組共有 443 部，建造中的有 26 部，主要配置在先進國家。在 2003 年，全世界核能發電量約佔總發電量之 17%，且目前核能發電仍是先進國家能源種類之一，平均機組運轉年數約 20 年。各國對於核能發電之情形，概述如下：

(1)美國

美國 2001 年發表能源政策，強調追求「永續、可靠、負擔得起」的能源，核能是必要選擇。目前運轉中核能機組有 104 部，雖然美國多年來未有新建的核能機組，但有幾項策略值得提及：1.機組延長壽命、2.調升反應爐功率，增加發電量、3.核能廢料處理政策。

(2)日本

目前運轉中的核能機組共有 52 部，興建中的有 4 部，規劃中 12 部，日本核能發電量約佔全國總發電量的 30%。另一方面，日本亦具有處理使用過核燃料技術的少數國家之一。其技術能力已可將一公噸核廢料提煉出 6~7 公斤的鈾元素。

(3)南韓

有鑑於南韓能源有 96% 依賴進口，再加上經濟與用電需求的成長。因此，南韓政府將規劃核能發電為主要電力供應方式。目前運轉中核電機組有 18 部，建造中 8 部，而有 2 部機正在規劃中，整體核能發電量約佔全國總發電量的 40%。

(4)法國

運轉中有 59 部，法國的核能發電量約佔全國總發電量的 78%，為全世界核能比率最高之國家，部分電力賣給鄰國。除了現有核能機組外，超級鳳凰號亦是法國主要研究型之核能機組，透過超級鳳凰號可使鈾元素再加以利用，即為「核燃料循環」，採用 1 公克鈾所產生的電力相當於 1 公噸的石油火力發電，相當具有發電效率，但鈾元素亦可發展成核子武器。如何利用鈾元素則為未來核能發電的重要考量因素。

(5)瑞士

有 5 部核能機組，提供約 40% 之全國電力，其餘之電力，由水力所供應；瑞士曾在 2003 年 5 月進行非核有關議題之公民投票，結果有 66% 民眾反對將現有核能機組停止運轉，而採用替代能源，只有 34% 民眾贊成。原因在於民眾體認到在溫室效應下，核能仍是唯一可利用的大型乾淨能源。

(6)芬蘭

有 4 部核能機組在運轉，提供約 27% 全國總電力。芬蘭於 2003 年 10 月決定興建一部大型的進步型歐洲核能機組，計劃於 2009 年開始運轉；芬蘭也是近年來第一個決定興建新核能機組的歐洲國家。

(7)德國

有 19 部正在運轉，提供約 28% 全國之電力。德國政府於 2000 年 6 月與德國 4 家核能電力公司達成協議，每一部核能機組在運轉 32 年後將永久關閉，但據報導，德國政府已感受到此政策執行的困難，因為找不到替代電力，其國家能源白皮書也說明，2010 年才能真正決定核能機組是否除役。

(8)比利時

有 7 部核能機組在運轉，核能發電的總裝置容量約佔全國所有電廠裝置容量總和之 40%；但核能電力則約佔全國電力之 55%，比利時政府已在 2002 年 12 月通過非核家園法案，決定現有的 7 部核能機組在運轉 40 年後停止運轉，而不再興建新的機組，第一部機組將在 2015 年進行除役拆廠，最後一部機組則將在 2025 年進行除役拆廠。據報導，比利時也將會面臨同樣困難，即能否找到核能機組停役之替代電力。

(9) 歐盟

於 2004 年 5 月因有十個新國家的加入，使得歐盟 25 個國家有 13 國擁有核能發電，機組數亦由 136 座增為 155 座。目前歐盟有 35% 來自核能發電，遠高於燃煤之 29% 及燃氣之 15%。有 4 個會員國採取廢核政策，惟亦有其他會員國如芬蘭及法國等國，仍有繼續擴展核電之企圖，至於廢核計劃，其替代能源如再生能源、能源效率提升或增加使用煤、天然氣等是否能有效填補廢核後之能源缺乏，及設法抑制 CO₂ 排放，仍有很大爭議。

(10) 中國

目前共有 10 部核能機組在運轉，提供約 1.4% 之全國電力；有二個核電站正在興建中。此外，中國在 2003 年規劃在未來 15 年增加 10 部核能機組，若非受限於財力及專業人力，中國的龐大核能發電計畫應會加快進行。

由上可知，雖然核能發電機組在社會環境中有許多反彈聲浪。但礙於新能源取得不易、排放二氧化碳的溫室效應問題，與能源使用效率問題等，許多國家仍維持一定的核能發電比例。而在面對放射性廢棄物時，雖然現今技術已可處理，但廢料處理廠的選址問題仍無法克服，使得放射性廢料問題遲遲無法解決。因此，如何在發電方式的「經濟性」與「環保性」中做取捨為大家所爭議的地方。

2.1.5 核能發電處理相關文獻

由於核能發電所產生之物質會對環境與人民生活造成相當大的影響，因此已有許多學者開始重視這個問題，並提出相關的核能發電研究，希望藉由探討各項核能發電議題，來檢視其對於環境與經濟之影響為何。相關學者所探討之議題，茲分述如下：

Margulies(2004)提出核能發電廠之設置最適化研究。研究中主要是依照核能發電所造成的環境風險來做評估指標。期望能計算出核能發電廠設置後，能滿足電力需求之條件與符合環境汙染準則的標準。學者所構建之模式為單一目標線性規劃模式，決策變數為核能發電廠數量。主要的環境風險是考量核能發電廠之附近居民人數與核能發電之意外事故死亡因子。研究中亦提出，不同的核能發電方式(例如：設置方式、內部設計、營運模式，與危害準備程度)均會影響上述因素的數值大小，因此一個完整的核電廠設置最適化應考量許多因素。研究最後是使用一個實例來進行模式求解。

Strupczewski(2003)在核能發電廠的事故風險一文中提出，核能發電廠安全目標是在於保護個人、社會，與環境免受到核能發電之影響，並進而確保核能發電的效益。研究主要採用歷史資料收集的方式來呈現出核能發電的安全性。該學者認為，根據許多歷史資料顯示因核能發電之死亡與影響人數遠低於其他發電方式，且核能發電具有較高的發電效益。因此，核能是未來能源的趨勢。

McKendall 等學者 (2005) 採用模擬退火法來處理核能發電廠在面對電力供應中斷時之動態資源配置問題(DSAP)。研究中所定義之資源為設備、零組件，與工具組。研究主要是透過這些資源之配置，來使電力供斷中斷期間之資源上能有最小調度成本，並使得電力能在最快時間內恢復供電。該研究的模式決策變數為 0-1 型態的資源指派變數與作業活動變數，透過變數求得來決定各項資源在各時階內所指派的位置與作業活動。研究中亦提出兩種模擬退火演算法來進行求解，最後再利用一實例來做模式驗證。

Cowing 等學者 (2004) 則對核能發電廠之生產力與安全性建構一動態模式。研究學者認為核能發電作業中，短期之生產與安全性之權衡問題常存在於營運作業問題中，且該問題亦會影響到核電廠之長期營運考量。因此，研究透過構建核能發電廠長期性的營運作業、事故影響，與供應中斷等問題，並採用長期動態模式來影響核電廠作業，使短期營運能權衡生產與安全性問題，長期營運則有最佳績效。研究在長期動態模式之中的狀態變數設定為核電廠之各項作業狀態，藉由控制這些狀態，以求得狀態變換次數與時間點最佳化。

Eeckhoudt 等學者 (2000) 提出核能發電之風險厭惡與外部成本之研究。學者認為核廢料之外部性會對社會與環境造成影響，但目前均只考量其金錢價值。在許多情形之下，社會對風險厭惡常與風險的平均金錢價值有所不同。因此研究提出，風險外部成本時加入處罰因子來重新計算，而主要方式則是採用期望效用法。研究最後則利用歐洲一座核能發電廠來重新計算其風險外部成本。期望透過重新計算的外部成本來使社會與核能發電營運單位能重視社會對於核廢料之厭惡問題。

學者 Percebois (2003) 提出核燃料循環之技術研究。研究中透過檢視核燃料之前期使用與使用後廢料之處理技術來重新對核能發電之效用做評估。研究學者提出目前核能發電之考量因素在於經濟、環境、技術，與政治四大問題。另外，在大家所重視的核廢料問題中，最重要的則是長期的管理問題。目前雖然有三種處理技術(回收循環處理、直接掩埋處理,與放置延遲處理)，但在某些特殊考量之下，並非各國家均能採用最適的處理方式來進行核廢料處理。因此，學者認為各國在採用核能發電時，應必需對上述情形有所認知，並且架構出合適之核能發電作業流程，以使社會之風險降至最低。

學者 Hawickhorst(1997)在研究中提出核能發電廠產生的放射性廢棄物之管理問題。該學者以德國為例敘述其核電廠對於放射性廢棄物的管理方式與成效。研究將放射性廢棄物分為兩大類：營運與退役所產生之廢棄物與核能發電流程之廢棄物。研究中亦提出藉由德國之有效管理，可使核能發電廠之放射性廢棄物達到減廢的目的。此可做為各國在管理放射性廢棄物之良好示範。

張維仁(2001)的研究中提出核能發電的電力需求日益嚴重，而有效的安排核能機組進行例行性的停機大修與燃料填充是重要的作業程序。該研究提出一大型的混合整數規劃模式，利用控制發電、大修，與啟動之 0-1 變數，來達到成本最小化的目標。研究中亦發展出有效的邏輯條件式來縮短求解時間，並採用台灣之核能電廠來做實例驗證。

表 2.1 核能發電之文獻整理

| 作者 | 研究範圍與內容 | 研究重點 |
|-----------------------------|--------------------|--|
| Timothy S. Margulies (2004) | 核能發電廠之選址問題 | <ul style="list-style-type: none"> ● 以風險最小為目標式 ● 風險考量因素分為：附近居民人數與核能發電之意外事故死亡因子 |
| A. Strupczewski (2003) | 核能發電廠事故風險之探討 | <ul style="list-style-type: none"> ● 以機率安全分析標準(PSAs)來評估核能發電廠之事故結果 ● 提出各種發電方式的比較圖表與數據來佐證核能發電的安全性 |
| Alan R. McKendall 等 (2005) | 核能發電廠發生供應中斷的資源配置問題 | <ul style="list-style-type: none"> ● 研究以核電廠在短暫電力供應中斷時，如何能利用有效資源配置與最小成本來恢復供電 ● 提出動態資源配置問題(DSAP)來代表短期電力中斷之情形；此有別於傳統之動態設施規劃 ● 研究是採用模擬退火法來進行求解，但結論仍提出是否可採用其他演算法可待後續研究 |
| Michelle M. Cowing 等 (2004) | 長期電力系統之生產與安全性的動態模式 | <ul style="list-style-type: none"> ● 研究提出短期之供應中斷問題會影響長期核能發電作業 ● 該研究認為電力供應中斷時，除了會導致生產中斷，也常造成安全性的問題 |
| L. Eeckhoudt 等 (2000) | 核能事件的風險外部成本計算 | <ul style="list-style-type: none"> ● 在風險外部成本中加入懲罰函數的概念 |
| J. Percebois (2003) | 核燃料週期之概念性介紹 | <ul style="list-style-type: none"> ● 核能發電原理介紹 ● 各種核能發電廠之作業特性 ● 現今核廢料之管理作業與風險因素探討 |
| W. Hawickhorst (1997) | 核能發電廠之核廢料管理 | <ul style="list-style-type: none"> ● 研究中提出核廢料之物流處理流程與分類方法 ● 核廢料的減廢技術介紹 |
| 張維仁 (2001) | 核能發電之大修排程計畫 | <ul style="list-style-type: none"> ● 透過彈性之大修排程來達到成本最小與滿足電力需求之目標 |

| | | |
|--|--|-----------------------------------|
| | | ● 研究提出大修與發電之數學模型 與邏輯條件式來解決規劃問題 |
|--|--|-----------------------------------|

資料來源：本研究整理

2.2 綠色供應鏈營運模式

2.2.1 綠色供應鏈之發展

由於現今經濟快速發展而導致部份資源已有耗盡的危機，因此綠色生產等作業開始受到大家的重視，而在供應鏈的活動中亦有相同的情形。過去傳統供應鏈甚至是需求鏈所考量到的作業範圍僅止於原料採購、生產、配銷到顧客手中等作業，而較無考量顧客端的逆向回收作業，亦即從顧客端所產生的物品並無運用最適當的回收方式進行處理，而造成資源的浪費。因此，整合正逆向供應鏈的作業開始有了一個新名詞：綠色供應鏈。

綠色供應鏈泛指是要求供應商在產品與環境相關的管理，亦即將環保原則納入供應商管理機制中，其目的是讓產品或作業流程更具有環保概念，提升市場的競爭力。在作法上，有些企業提出以環境為訴求的採購方案、績效，或評估過程，讓所有或大部分的供應商遵循。而另一些企業則研訂對環境有害物質的種類並列出清單，要求供應商使用的原料、包裝或污染排放中不得含有清單所列物資。

目前大家所熟知的綠色供應鏈案例即為歐盟所提出的綠色產品標準。許多歐盟先進國家在體認到環境保護對於人類的重要性後，便積極開始將過去藉由道德勸說的環保概念加以立法，並開始設定時程與執行成果。最受人注意的是廢電機電子設備指令指令（Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE）及「電機電子設備限用有害物質指令」（Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment, RoHS）等。歐盟於 2002 年 11 月通過 WEEE 及 RoHS 指令，並於 2003 年 2 月 13 日正式公告 10 大類電機電子設備之回收標準，並要求 2006 年 7 月 1 日 10 大類電機電子設備中不得含有鉛（Lead）、鎘（Cadmium）、汞（Mercury）、六價鉻（Hexavalent chromium）、溴化耐燃劑（Polybrominated biphenyls, PBB；Polybrominated diphenyl ethers, PBDE）等六種物質。隨著指令的正式公布，各項電機電子產品中含有上述六種禁用物質及其化合物的電子產品均必須使用替代材質來代替被管制的材質。因此，綠色供應鏈議題開始被供應鏈各成員所重視且必須接受。

誠如上述，綠色供應鏈最重要的目標即是在平衡作業績效與環境議題之間的考量。在綠色供應鏈中，企業所扮演的角色為透過建立長期的買賣關係與改善作業或生產系統來使能源使用降低且汙染減少。結合學者 Nagel(2000)與 Sarkis(2003)所提出的研究，其列出完整綠色供應鏈應包含那些項目：

- (1)建立一個由顧客到供應鏈的策略導向規劃，其中必須包含供應鏈整體的環境品質評估
- (2)藉由管理者的領導能力與洞察力來先做內部的作業趨動，再導入上述的策略導向規劃

- (3)在供應鏈中需建立起對環境汙染的重視、改善方法，與回收體系
- (4)加入成本效益觀面
- (5)需體認顧客與供應商之間的關係，並建立一個由上到下的永續性溝通平台，來增加雙方的互動
- (6)生態設計：開始重視產品原料，構成要素，與生產流程

對於供應鏈或企業來看，做好綠色供應鏈並不只是會減少對環境的影響，本身亦可享受到利益，可分為本身利益與社會利益兩方面：

在本身利益面中：

- (1)供應的安全性：為了能持續的供應，企業必須先了解如何滿足顧客的需求。而在這之間供應商會有環境汙染的風險，此時若無綠色供應鏈的概念與作業時，企業可能會遭受到被控告的情形，而有罰款或喪失顧客的問題。
- (2)成本節省：透過綠色供應鏈的執行，企業可減少資源的浪費與能源的節省，使生產與營運成本降低，並可提升生產力與產品品質。
- (3)培養創新的觀念：藉由供應商知識與技術的累積，公司能開始發展新產品與服務來提升競爭力。且採用綠色供應鏈裡的科技技術也能讓公司解決環保汙染的問題。
- (4)員工的積極性：由於採用綠色供應鏈會改善生產流程使其較無汙染問題，因此員工能更安心工作。



在社會利益面中：

- (1)檢舉風險：企業若無做好汙染防治時，可能會有被舉發的問題。此時企業會喪失民眾對自己的信心與市場地位。因此，企業可將部份風險的責任成本轉嫁給消費者，使消費者與企業能共同分擔風險責任。
- (2)企業責任：這相當於企業的核心義務。企業必須透過綠色供應鏈來使生產作業，儲存作業，與處理廢棄物來達到安全的零汙染環境。
- (3)競爭地位：在風險檢舉中亦提到，企業若無法對供應鏈所造成的環境影響有所改善時，企業將會面臨競爭地位受到動搖的危機。反觀，若能做好綠色供應鏈時，企業即會被民眾所認同，進而提升競爭力並增加市場佔有率。

由此可知，建立一個完整的綠色供應鏈是供應鏈發展的必要過程。學者 Sarkis(1995)構建出一套完整的綠色供應鏈環境影響與物流作業的相關架構圖，如下圖所示：

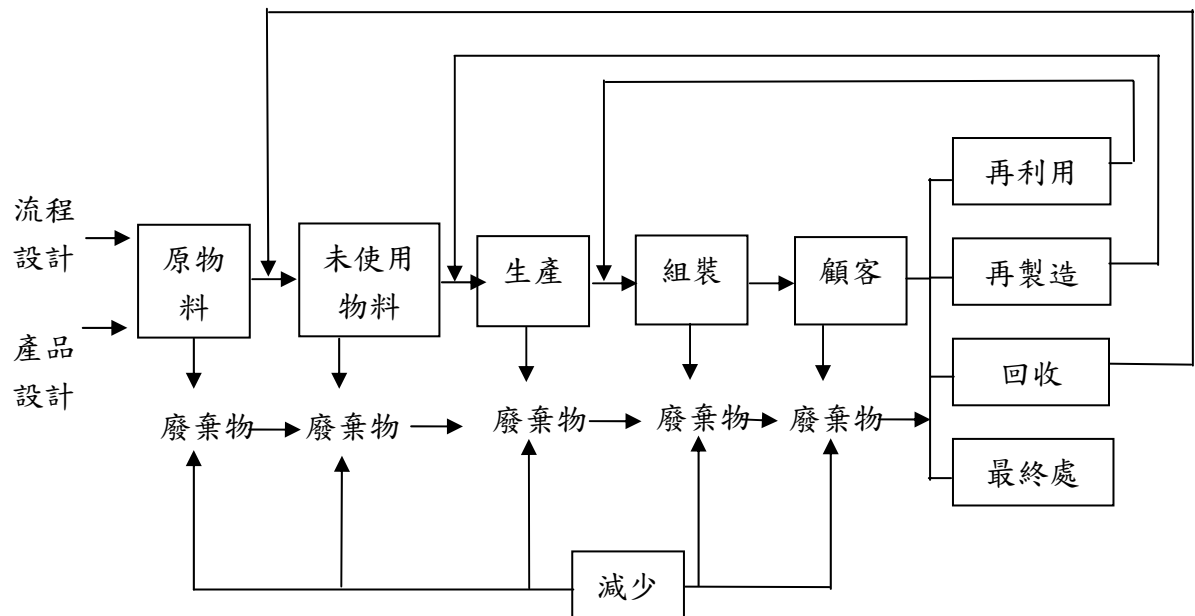


圖 2.3 綠色供應鏈架構圖

資料來源：Sarkis(1995)

透過上圖可清楚了解，顧客端所產生的物質可經過再利用、再製造、回收，與最終處理，且採用前三種處理方式所產生的物質均可再回饋至供應鏈的流程，以減少資源浪費的情形。茲對於再利用、再製造、回收，與最終處理作業進行介紹：

(1)再利用：

再利用是一以復原產品至可再使用為目的的一種流程。學者 Kroon 與 Vrijens 曾在荷蘭設計一個封閉式的物流網路，標的物為可重複使用的運輸容器，在這系統內容器在配送廠站、寄件人、收件人、收集廠站內流動。而物流服務提供者則需對於保管、配送、收集空容器負責，並由寄件人處配送貨品至收件人處。而此個案焦點即在於物流服務提供者上，目的在決定出在一配送系統內需要多少容器的數量、容器放置站與找出運送合適的價格。

該問題是利用 MILP(mixed integer linear programming)混合整數線性規劃來架構，其類似“無產能限制”廠區選址模式，且利用啟發式演算法求解，問題目標式包含運輸成本與物流中心內保有容器的固定成本。

(2)再製造

再製造包含轉換至產品組成元件的過程，但要求許多方面的工作，並常要求徹底的拆卸產品。主要焦點在附加價值的復原(在產品上使用再生的原物料)，取代物料零件的復原(將再製造的退貨品轉變成新產品)。

(3)回收

回收是一種作業流程，是將產品透過分解過程還原至最基本的要素(如：原物料)，然後再繼續使用。

(4)最終處理

透過上述三種逆物流流程後，所剩下無法再進行回收之物品，最後僅能透過焚化或掩埋等作業進行之處理作業，稱之為最終處理。

2.2.2 綠色供應鏈相關文獻回顧

Shih(2001)提出電子物品的逆物流回收系統規劃，主要是使用混合目標規劃模式來解決回收設施的設點最適化與逆物流系統的構建。該學者亦在研究中提出各種回收設施的設置限制與所需考量的問題，例如：收集廠的容量守恆限制，與各種處理廠的處理類形限制等。研究中亦指出，台灣的電子物品回收最大的問題還是在於回收獎勵金的設定，獎勵金越多當然會讓回收率上升而使回收系統的績效增加，但政府亦無法漫無上限的增加回收獎勵金，使得回收獎勵金的設定不易。因此，該研究只能透過不同的情境分析來找出，在何種情形下的回收率最高，而產生最適化情形。

胡峻嘉(2001)提出資訊科技產業的整合物流管理之研究。研究中主要是考量資訊科技產業的正逆向物流作業之整合模式，且利用多目標數學規劃來進行求解，該學者所建構的多目標式分別為，正向供應鏈最大化與逆向供應鏈最大化。而模式的重大特點，即在於考慮各目標式之間的利益衝突，以便於管理者來進行整合物流系統的作業。而研究中，透過敏感度分析亦可以清楚地知道回收處理費的合理範圍與在不同的目標式權重下回收率應如何反應與調整才能達到最適化的情形。

Fleischmann 等學者(2000)利用討論與整理的方式對產品逆向回收問題提出其特性與相關整理。研究中提出(1)逆向回收流程的各種作業成員與其特性，(2)正向與逆向物流的作業差異，(3)正逆向物流在營運模式上的不同之處，(4)逆向物流的基本考量因素(回收物品特性、供應鏈特性、回收資源特性)，(5)逆向物流的網路型態。學者期望透過這些資訊的分析與整理可讓後續研究者對於逆向物流能有更深一層的認知，以便建構出最適的逆物流營運模式。

Georgiadis 等學者(2004)，在研究中提出採用產品回收策略對於環境因素所造成的影響評估。研究是利用動態系統的方式，並將整體架構分為質化與量化兩方面。透過質化分析先構建出一個完整的正逆向供應鏈因果影響架構圖，再延續該架構圖做量化方面的求解與敏感度分析，最後再採用環境保護政策指標來表示對於環境因素的影響評估因子。研究中另一特點即是動態系統與質化分析的結合，該兩者結合會使得整個系統在不同的時期會追求該時期的最適化行為，且各時限的結果亦會影響到下一時階的活動與參數，最後達到整體系統最適化。而該研究最大限制即在於，模式構建中逆向物流均為無產能限制，此項設定可能會影響逆向回收體系中的存貨會有無限增加的可能性。

2.3 風險評估模式之相關研究

2.3.1 風險評估與管理介紹

現今許多人都對危害(Hazard)與風險(Risk)這兩個名詞的定義有所混淆。根據經濟部工業局對於其定義為：所謂危害就是「具潛在性特性，會造成人員死亡、職業性傷害、職業病；或可能造成重大財產損失、生產停頓；或對附近社區和居民構成傷害、不適或恐慌的物質、設備或操作」。而風險則是「對於一個會造成人員傷害或經濟損失的危害事件之量度；包括潛在危害發生的可能性與該事件發生後的嚴重性兩項因素，它是兩者相乘後的綜合性指標」。根據美國國家科學委員會對風險所做定義為：除了考量災害發生的強度外，也必需對不良結果所發生的機率做評估。下表則為其他學者對風險所做的定義：

表 2.2 風險相關定義

| 學者 | 定義 |
|---|--|
| Kanlan & Garrick, 1981 | 事件發生機率×事外事故的大小 |
| Sandman | 風險＝災害＋危害 危害＝風險特性 |
| Edmund Penning-Rowsell & John Handmer, 1990 | (1)統計概念與意外事件發生的機率 (2)包含損害的類型或潛在的損害，其程度和機率 (3)強度社會上權力的分配及成本利益的分析 |
| Smith et al., 1978 W. David Conn | 威脅本質及發生的可能性 |
| Vlek, Kuper & Boer, 1985 | 六個正式的風險定義 (1)損失的機率 (2)可信的損失大小 (3)期望的損失(可能損失機率 X 損失的大小) (4)各種可能相關出象的期望值所形成之機率分配的變異數 (5)半變異數 (6)期望值與所有可能出象的變異數 |

資料來源：陳碧珍 1996

而社會風險概念即指每年因各類型意外而喪生人口總數，通常可以表示為：某一事件發生後喪生的人數乘上該事件每年發生的次數。大部份人類對於常發生之輕微損傷小

意外的災難容忍度遠大於非常不可能出現之嚴重損傷的事故。亦即人們較能接受常發生的交通小事故，而無法接受類似飛機失事所造成的意外災害。由此可知，人們在風險模式中的機率次數與後果程度，較重視風險發生所產生的結果。

在風險的評估中，常用到風險綜合性指標來做為評估。而該綜合性指標可分為定性風險描述、半定量風險描述與量化風險等方式；前兩者屬於相對性的風險比較，後者則為絕對的量化風險。

在風險評估方面，由對象與目的之不同可分為安全風險、健康風險、生態與環境風險及財務風險等。而透過上述的各種風險綜合性指標，可針對不同的風險來進一步做評估作業。

在風險管理方面，所謂風險管理即是針對風險評估出來之結果與改善建議，並透過系統化之體系、決策過程與執行之落實與追蹤考核等程序，以達到保護員工、社會大眾、環境及避免公司商業中斷損失的目的。基本上風險管理是在強調危害控制技術和管理知識整合。全世界工業先進國家開始對工業安全投以高度的重視後，風險管理即成一項世界性的潮流。

下圖為美國對於風險管理所繪製的架構圖，其過程簡單的描述為先對製程實施有效的危害鑑認與辨識，找出重大潛在危害源後，利用系統化的安全評估與管理技術，計算或估計危害狀況發生的可能性及發生後的嚴重性，進而提出最有效的管理控制(強化製程安全管理制度)及工程改善方案，以便達到一最低合理風險的管理目標。

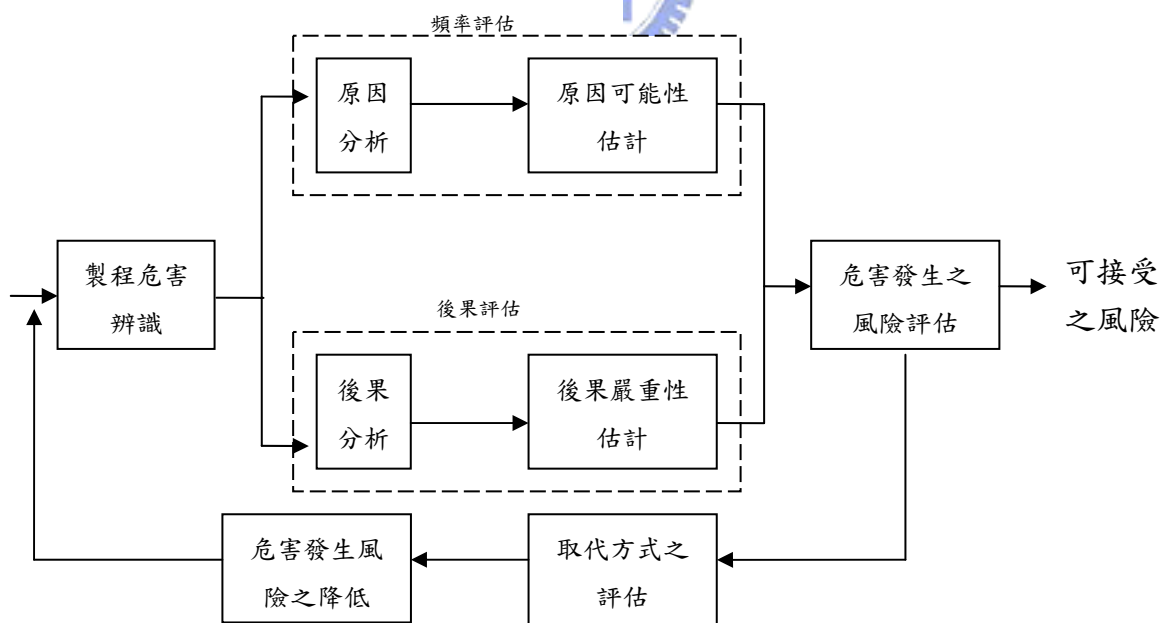


圖 2.4 美國風險評估模式

資料來源：經濟部工業局

2.3.2 物流風險相關文獻回顧

現今工業發展的社會中，許多城市正享受著發展快速所獲得的利益，但無形中也造成了許多對環境生態的汙染。而這些汙染均為長期性的，有些可能一直無法消除而對人類產生無可消去的傷害。其中有害廢棄物或汙染源更是造成環境破壞與危害人類健康的原兇。許多廠商更為了貪圖一己之利在製造或物流作業中造成汙染。因此，過去許多學者已重視到此問題並將汙染的風險因素模式化加入廠商的營運模式，藉此提醒或建議廠商應考量到汙染的重要性。相關學者所建構的營運作業模式茲分述如下。

Giannikos (1998) 利用多目標數學規劃並加入風險模式的考量來解決處理廠設點與繞徑的問題。其中目標式所考量的因素為：(1)總營運成本最小化，(2)前期總風險最小化，(3)城市間的適當配送風險，(4)處理廠間的有害廢棄物的最適配送。作者構建一個多目標規劃模式，決策變數設定為 0-1 變數（有害廢棄物配送路徑的選擇），目標式即是上述的四個考量因素。作者最後設計一個小型的問題進行模式的求解。

Zografos 與 Androutsopoulos (2004) 提出一篇研究，主要在構建一個啟發式演算法來解決有害廢棄物的配送問題。作者認為一般的配送問題主要是在解決繞徑和排程問題。而有害廢棄物的配送問題又加入了汙染風險的考量，且風險因素是由風險發生的可能性與所影響的結果所組成。因此，作者利用上述考量並配合原有的供應鏈模式構建出一個多目標數學規劃來解決該問題。目標式為成本最小化與風險最小化，設定方式是採用權重法計算，決策變數設定為 0-1 變數（配送路線的選擇）。最後，透過所構建的數學規劃模式採用“插入演算法”來進行求解。

Nema 等學者 (1999) 針對區域型的有害廢棄物管理系統提出一改善研究。研究中主要在探討有害廢棄物管理系統的回收廠收集作業、處理廠設點問題、回收廠到處理廠的指派問題，與運輸問題。該研究的目標仍有考量將風險因素加入模式中，並構建一個多目標數學規劃來求解。其中較特別之處為，該研究之有害廢棄物設定為多種型態且不可共同處理。因此，在運輸與處理過程中，可能會產生無法共配與共同處理的情形。該研究之決策變數有下列三項：(1)運輸路徑的配送量(2)處理廠的設點選擇(3)處理廠能容納的處理量。作者最後設計一個小型的問題進行模式的求解。

何家豪 (2003) 提出有關廢棄物共配研究，主要在處理有害廢棄物在逆向物流中如何聯合處理之營運模式。研究者將有害廢棄物之逆向物流做一完整性的說明並提出其概念性架構，且認為若各家廠商的多種有害廢棄物若處理與配送型態可相容時，即可進行共同處理達到逆向供應鏈之最適化目的。該研究之決策變數可分為：有害廢棄物的配送量、處理量，與回收量。並利用台灣一科學園區來做實例之驗證。該研究之特點即在於模式中考量存貨與風險特性，為一完整的有害廢棄物供應鏈營運模式，而非傳統運輸問題。將存貨與風險特性加入模式中，會使得各期影響變數增多，雖然會使運算變得複雜，但也更符合實際情形。

Bubbico 等學者 (1998) 利用量化風險分析的概念來評估道路運輸中產生乙烯氧化物的風險。研究中將風險分為個別風險與社會風險兩種：個別風險定義為會間接影響風險安全性的間接事件；社會風險則定義為影響人民的有害性作業。針對上述兩種風險，學者亦分別構建適合的量化模式，並採用歷史資料來進行模擬，以求得結論。研究中發現：(1)利用市區道路運送有害物質的風險發生機率最高，而國道則機率最低。(2)人口密度高的地區發生意件事件的機率易較高。(3)在風險降低的策略中，採用降低影響結果的策略與降低發生機率的策略具有相同的效果。最後研究中的提出，雖然會影響有害物質在運送中發生風險的因素有很多是無法控制的，但企業與政府相關單位必須從其他可控制的因素中找出最佳的控制因素，並透過有效的管理方法，進而影響並降低風險結果。

Eleftherios(2001)利用數學規劃方式來求解如何利用海運來運送石油的最適化策略。研究中提到，由於海運常發生船舶碰撞、溢出，與原油爆炸等危險。因此，利用海運來運送石油時需考量到發生事件的風險因素。而學者則利用上述觀念構建出一多目標數學規劃，其目標式則為運輸成本最小化與外部風險成本(此指石油溢出風險)最小化。研究最後利用墨西哥灣的海運網路來進行實例模擬，進而得出最適航運路線。

學者 Erkut 與 Verter(1995)提出有害物料運送風險的評估架構方法。研究中提出雖然目前對於有害物料運送上已有相當完善處理方式，但仍無法完全避免事故的發生，且事故發生通常伴隨著無法控制的後果。因此在運送過程中，仍需合理的考量運輸風險。這篇研究的目的即在於構建出運輸風險的評估方式與提供政策決策者管理方向。作者提出該研究中所提出的模式可能較適用於小範圍運輸，模式中風險機率為每公里所發生的交通事故機率，而結果設定為事故發生後所影響地區的人口數。而跨地區的運送風險模式部份中，加入各地區的人口密度可使模式更加完整。最後，作者利用兩個實際運送案例來計算各運送路線的風險值，以提供決策者資訊。

學者 Erkut 與 Ingolfsson(2005)針對有害物料之運送風險計算方式提出回顧與新模式之概念。研究中提出以往運輸風險評估可分為傳統法、人口暴露法、事故機率法、察覺風險法、平均變異數法、無害法、最小最大法，與情境法等。而這些模式中，許多方法在計算過程中會違反「有害物料運輸風險原則」；該原則包括：路徑評估單調原則與屬性單調原則兩種。因此，作者在該研究中提出三種運輸評估模式以避免違反風險原則。研究最後則採用一案例來進行模式求解。

表 2.3 風險模式之文獻整理

| 作者 | 決策變數 | 風險評估方式 | 求解法 |
|--|---|--|---------------------------------------|
| Ioannis Giannikos (1998) | 有害廢棄物 配送路徑的 選擇 (0-1 變數) | 各路徑之有害廢棄物的運送風險評估值 | 多目標數學 規劃求解 |
| Zografos , Androutsopoulos (2004) | 配送路線的 選擇 (0-1 變數) | 風險值=個人風險機率×人數 個人風險機率=路徑風險發生機率×有 害物質發生機率×事故影響程度×事 故造成的死亡結果 | 多目標數學 規劃，並採用 插入演算法 進行求解 |
| Arvind K. Nema , S.K. Gupta (1999) | (1)運輸路徑 的配送量 (2)處理廠的 設點選擇 (3)處理廠能 容納的處理 量 | 風險=發生可能性*事件發生結果 風險模式=運輸風險+處置風險 運輸風險=廢棄物數量×廢棄物風險發 生機率×運輸路線風險機率×事 件影響程度 處置風險=廢棄物數量×廢棄物風險發 生機率×處理廠 k 技術所發生風 險機率×處理廠 k 技術風險發生 的影響程度 | 多目標數學 規劃求解 |
| 何家豪 (2003) | 有害廢棄物 的配送量、處 理量，與回收 量 | 風險=總儲存風險+總處理風險+總運 輸風險 總儲存風險=固液態有害廢棄物之暴露 風險與儲存風險 總處理風險=固液態有害廢棄物之處理 風險 總運輸風險=固液態有害廢棄物、可回 收再利用廢棄物，與最終處置廢 棄物之運輸風險加總 風險成本計算則為各種物流風險乘上一 風險貨幣轉換因子 | 多目標數學 規劃，並使用 Lingo6.0 來進 行求解 |
| Bubbico 等 (1998) | 無 | 風險=發生可能性×事件發生結果 個別風險：由每年產生的旅次、每公里 事故發生機率、路徑長度，與設施 發生風險的機率所組成 | 藉由收集歷 史資料，並利 用模擬軟體 來進行求解 |

| | | | |
|---------------------------------------|------------|---|----------------------------------|
| | | 社會風險：由不同事故與事故發生的結果所組成 | |
| Eleftherios T. Iakovou (2001) | 運輸路徑的選擇 | 考量在不同運具與不同運送路徑之下，運送一單位的物品可能發生的外部風險成本 | 多目標數學規劃求解 |
| Erhan Erkut, Vedat Verter (1995) | 有害物料之運輸風險值 | 社會風險＝事故發生機率 x 影響地區的人口數 x 門檻值 x($\pi/2$) | 歷史資料收集與分析 |
| Erhan Erkut, Armann Ingolfsson (2005) | 有害物料之運輸風險值 | 模式一： 運輸風險＝(1-事故發生機率) ⁿ⁻¹ x 事故發生機率 x 事故發生結果 模式二： 運輸風險＝(1-exp(事故發生機率)) ⁿ⁻¹ x(exp(事故發生機率))x 事故發生結果 模式三： 運輸風險＝模式二／(1-事件機率) | 採用歷史資料，並採用 Excel 與 Matlab 軟體進行求解 |

資料來源：本研究整理

2.4 多目標數學規劃

2.4.1 數學規劃

典型數學規劃可分為三項基本要素：即方案、限制與準則。一般而言，數學規劃問題的方案可用未知變數來描述，而這些變數亦可用適當的數學函數組合來描述限制條件及準則，亦即透過完整的數學模式來描述變數、限制式，與目標式之間的關聯性。而數學規劃決策有下列的五項步驟：(1)問題定義，(2)模式建立，(3)模式求解，(4)模式驗證，(5)模式導入。根據上述五步驟即可對一個複雜的問題，進行有系統且能符合實際情形的求解作業。

另外，由於目標數量的不同也可將數學規劃分為單目標與多目標兩種；而依變數型態的不同亦可分為線性規劃、非線性規劃、動態規劃、整數規劃，與最佳化控制幾項。一般線性規劃基本式如下：

$$\begin{aligned}
 &Max Z = cx \\
 &subject \ to \ Ax \leq b \\
 &x \geq 0
 \end{aligned}$$

其中 x 為決策變數，c 為向量，A 代表投入與產出間的關聯性，b 則為各項資源限

制條件。在目標式中，除了 max 最大化之外，亦可用 min 最小化做為模式目標式。而在物流供應鏈的問題中，大多以成本最小化或利潤最大化來做為模式所追求的目標。

2.4.2 多目標規劃

多目標規劃首先是由學者 Zeleny 於 1982 年中指出單目標規劃中並無所謂的決策，因為決策已內含在目標函數的參數模式中。因此目標函數參數一經決定後，決策者只能對模型所求得之解接受或拒絕。有鑑於此，多目標規劃開始快速發展。透過多目標規劃可解決單目標中決策者僅能接受或拒絕的缺點。

多目標規劃主要是透過數理規劃的方法以求得決策的替選方案。然而多目標規劃中的替選方案常是無限多個且為連續性的情形，亦即多目標規劃適用於僅知目標式與限制式條件，但未知替選方案之情形。另外，透過多目標規劃可在決策過程中同時考慮多個決策目標的數學規劃，其注重各項目目標函數中的權衡得失，與如何使決策者能在未知替選方案時能有效地找尋有用的非劣解或適當的妥協解。學者許志義(2003)在多目標決策一書中提出多目標規劃一般式，如下所述：

假設模式中有 n 個變數、 m 個限制式與 K 個目標：

$$\max \quad Z(X_1, X_2, \dots, X_n) = [Z_1(X_1, X_2, \dots, X_n), Z_2(X_1, X_2, \dots, X_n), \dots, Z_K(X_1, X_2, \dots, X_n)]$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq b_i, \quad i=1, 2, \dots, m$$

$$X_j \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, n$$

$Z(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 為目標函數

Z_1, Z_2, \dots, Z_K 為 K 個單一目標

X_j 為變數

a_{ij} 為變數係數

b_j 為各項資源限制

一般來說，多目標規劃可廣義區分為下列三種：

- (1) 無偏好多目標規劃：決策者無需提供任何主觀之偏好資訊，唯一要求即是接受規劃者提供的結果。可使用權重法、限制法、NISE 法，與多目標簡潔法求解。
- (2) 有偏好多目標規劃：在分析實際問題前，決策者需事先提供偏好資訊，因此所求的解為決策者個人的偏好解。可使用模糊規劃法、效用函數法，與妥協規劃法進行求解。
- (3) 互動多目標規劃：此為基於決策者對問題之認知或理解程度，且受限於決策情況與所處環境之影響。因此，決策者僅能提供局部性的偏好資訊，且在進行反覆運算過程後，逐漸求得一滿意解。可使用互動權動柴比雪夫法、逐步法，與季高林法進行求解。

由於本研究所探討之問題點是屬於決策者在之前無需對各項目目標式提供偏好資訊，因此為第一種之無偏好多目標規劃。以下僅對無偏好多目標規劃之求解法進行探討。

(1) 權重法

最早由 Zadeh 於 1963 年所提出。該方法是將各目標式分別賦予一權重值，把目標式乘上權重值再進行各目標式的相加，使得多目標規劃問題轉換成單目標規劃。由於理念與作業方式簡單明確，因此廣為學界所應用。

雖然藉由單目標規劃問題之求解可得一最適值，但此最適值對於原多目標規劃問題僅是一非劣解。若變動目標式的權重值時，即可能得到不同的非劣解。另外，權重法計算簡單但也有其兩項缺點：第一是僅適用於凸集合之情形；第二是權重決定不易。此為研究學者採用權重法計算時，所需注意之處。

(2) 限制法

限制法最早由 Marglin 於 1975 年所提出。該方法是限制其他目標在某特定之上下限值而最適化某一單目標，亦即藉由限制其他目標進而求一系的單目標最適解。而限制法有下列特點：求解結果僅為近似非劣解集合，且在某些限制下可能會產生無解情形，但限制法可應用於可行區間為凸集合或凹集合之情形。

(3) NISE 法

NISE 法全名為非劣解估計法，是由 Cohoh 於 1978 年所提出，是一種藉由有效逼近非劣解集合，再估計非劣解集合的各點相連之線性集合來代表整個非劣解集合的方法。該方法有三個限制之處：第一是模式需為線性目標規劃；第二是非劣解之可行區間必須為凸集合；第三是只適用於二維目標空間的決策問題。若模式違反上述任一限制時，NISE 法即無法對該問題進行求解。

(4) 多目標簡潔法

多目標簡潔法為單目標簡潔法的延伸，主要是起源由 Philip 在 1972 年和 Zeleny 在 1974 年先後提出相似之概念而來。求解方式是由一個角點移至鄰近的角點，直到發現所有非劣解而停止，而透過多目標簡潔法所求得之解為真正非劣解集合。但由於該方法需求出所有非劣解才可停止，因此會產生耗時與成本過高的缺點。

2.5 綜合評析

由上述各項相關研究中可得知，藉由綠色供應鏈之型態來進行核能發電之模式構建有幾項處理問題與特點：

(1) 多目標數學模式之建構

由於風險因素與原物流作業的目標式(成本最小化，利潤最大化)均有所衝突。因此，若需要在物流模式中加入風險因素的考量時，多數學者均採用多目標數學規劃以平衡模式中的各項目標式，使得整體綠色供應鏈達到最適化情境。

(2) 風險模式

在物流領域中，風險模式的構建大部份均採用一般風險學中的計算概念，即：風險

值＝發生可能性×事件發生結果。另外，透過該公式能明確的量化出物流作業的風險數值。唯在於事件發生結果的認定方面，不同學者可能會有不同的認定標準，此為模式困難之處。

(3) 目標式權重

此為多目標數學規劃求解中最重要的一項因素。在各項研究中由於研究對象與範圍的不同，因此有許多不同的方式來決定目標式的權重。因此在該研究領域中，尚無一權重決定的準則或求解方式來供使用。後續研究僅能透過對研究對象和範圍的了解來設定合適的權重，使模式能達到最適化。

(4) 國際環境問題

藉由核能發電會產生高污染性核廢料，且目前僅有法國等先進國家具有處理技術，但礙於各國家對於維護本國環境為由，而有不少國家雖然有許多核廢料處理問題，但仍無法得到幫助，造成部份核廢料無法得到有效的回收處理。

(5) 相關研究內容

目前國內外有關核能發電之研究課題多半在討論核廢料之風險評估指標、核能發電的未來發展性，與核廢料處理等問題。較少研究在探討核能之最適發電量，或採用綠色供應鏈角度來看整體核能發電的營運模式問題。



第三章 核能發電作業流程

核能發電供應鏈作業流程可分為正向物流與逆向物流兩方面。其中正向物流包括從原料採礦、原料製造、燃料採購、發電，與配電等過程，而逆向物流則包括經由發電所產生的廢棄物回收、處理、運送、儲存等作業。在此依據翁寶山(2001)於台灣核能史話一書與其他相關資料，對作業內容敘述如下：

3.1 正向物流作業

3.1.1 原料製造

世界上之鈾礦產地主要分布在加拿大、澳大利亞、南非、那密比亞、美國、法國、尼日，與加彭等國，其中以澳大利亞的蘊藏量最豐富，而加拿大則為最大生產國家。而鈾礦除了發電功能外，亦為重要戰略物資，故鈾礦之買賣須接受國際原子能總署之監督與生產國政府法律或政策的規定。

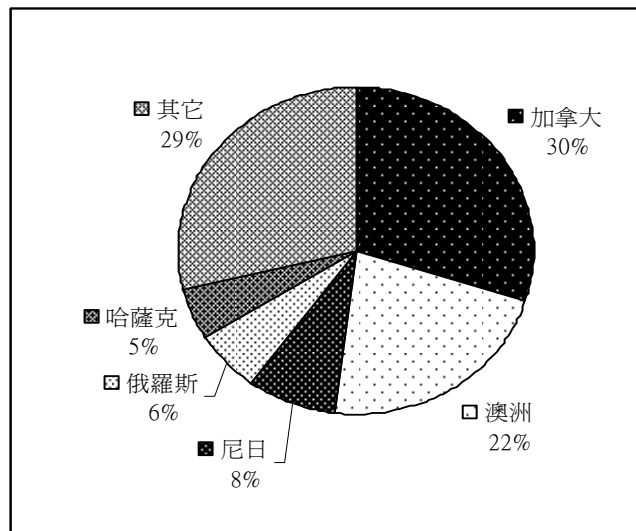


圖 3.1 2000 年全世界原料鈾生產狀況

資料來源：王德義(2004)

核能發電之鈾原料主要成份為八氧化三鈾(U_3O_8)，俗稱為黃餅。而鈾原料主要是經由採集鈾礦、精煉轉換而得的燃料產物。一般來說，製成鈾原料後仍需做濃縮程序，將 U_3O_8 轉化為六氟化鈾(UF_6)，透過該流程將鈾 235 含量由 0.7% 提升至 2~5% 之間，並送至燃料元件製造廠製成小圓柱體的燃料丸，再經由排列成燃料棒，最後組成燃料元件，即為核能發電廠所需的核燃料。在鈾原料濃縮轉化的過程中，轉化廠商必須負責儲存核能發電廠所有的原料鈾庫存，等待核能發電廠需要時，才進行運送作業。至於鈾原料採購之前置時間已由美國原子能委員會於 1973 年向各國的電力公司提出「長期固定承諾型」合約。在合約中，核能發電廠須於交貨前八年確定濃縮服務需要量，以便制定濃縮服務生產排程，且在核能發電廠需換料的前半年即可運至該國。

3.1.2 燃料採購策略

核燃料之供應安全亦為核能發電成功的主要因素之一。一般來說，燃料採購可分為兩項基本策略：分散策略與庫存策略。

- 分散策略：在各項核燃料採購作業可行與有利的前提下，執行分散鈾原料來源的策略，包含生產國家的分散與供應國家的分散。採分散策略目的在於找尋一個以上穩定可靠的供應來源，以增加供應上不至匱乏的安全性。
- 庫存策略：採庫存策略有兩項優點：一、在國際局勢動盪與核燃料運送受阻時，採用庫存策略可維持核能發電廠於一定期間內能夠持續運轉供電。二、庫存鈾原料可於鈾源難尋或供鈾合約發生問題時，確保轉化、濃縮與製造的流程不致中斷。

3.1.3 核能發電

核能發電的原理和水力、火力發電廠有同樣的共通點，即設法使渦輪機(turbine)轉動並帶動發電機切割磁場，最後將機械能轉變為產生電能。其中主要的不同點在於推動渦輪機所用的動力來源。水力電廠以大量的急速流動水(例如由水壩或瀑布引出)直接推動渦輪機，而核能電廠與火力電廠則利用大量高溫、高壓之水蒸氣推動渦輪機，核能發電廠主要是靠核分裂所釋放出的能量，而火力電廠則是靠燃燒煤炭、石油或天然氣等化石燃料以產生蒸汽。

核能發電利用鈾燃料進行核分裂連鎖反應所產生的熱，將水加熱成高溫高壓，核反應所放出的熱量較燃燒化石燃料所放出的能量要高很多，相差約百萬倍(1 公克鈾 235 可釋放的能量大於 3 噸的煤)，比較起來核能發電所以需要的燃料體積比火力電廠少相當多。另一方面核能發電所使用的鈾 235 純度只約佔 3%~4%，其餘皆為無法產生核分裂的鈾 238。

一般來說核能發電廠主要核心即為「核反應器」。核反應器主要則包含下列幾項設備：

- 核心：主要在儲存核燃料，並具有調節劑的功能。透過核心可減緩中子分裂速度。
- 反應控制棒：是種會吸收中子的原料做成的棒，分佈在燃料棒間，長度和燃料棒差不多。控制棒插在爐心時，能吸收中子，而使連鎖反應停止。相反的，如果將控制棒抽出時，反應爐的功率就會增加。
- 冷卻劑：主要功用在排除與發散蒸汽機所產生的熱能。可以用來做冷卻劑的有普通的水(輕水)、重水、液態金屬鈉和氬氣等。輕水式電廠使用的是與緩和劑一樣的材料，也就是一般的水。
- 熱能系統：水在鍋爐中加熱變成蒸汽，再利用蒸汽的力量推動汽機，以帶動發電機發電。

在核能發電廠類別方面，藉由核燃料型式、調節劑、冷卻劑、控制棒及爐內熱能的使用方法與種類的不同，可將核能發電廠分為下列四種型態：

- (1) 氣體－石墨反應器：在該反應器中，石墨是一種好的調節劑，其不用吸附太多中子，即可達到減緩作用。且氣體－石墨反應器是採用天然鈾為燃料，而冷卻劑則採用二氧化碳，其優點為便宜。
- (2) 水反應器(輕水式或重水式)：以重水為調節劑，重水或輕水為冷卻劑。在調節劑類別中，重水屬較知名型態，但其缺點是價格昂貴。在燃料方面，則採用濃縮鈾做為核燃料。
- (3) 輕水式反應器：可分為壓水式反應器(Pressurized water reactor, PWR)及沸水式反應器(Boiling water reactor, BWR)兩種。輕水式反應器優點在於調節劑與冷卻劑價格較便宜，缺點則在於調節劑會吸收許多中子而較不具效率。此亦使得輕水式反應器所採用的核燃料必須為濃縮鈾(包含 3%~4%的鈾 235)。而輕水式反應器為目前世界上普遍採用的反應器類型。
- (4) 快滋生反應器(Fast breeder reactor, FBR)：快滋生反應器不需具備調節劑。在核燃料方面，除了濃縮鈾之外，亦可採用混合燃料，其主要成份為：鈾 239(20%)與鈾 238(80%)。而鈾較鈾 235 更具有利用性，其原因為：鈾可產生更多中子來促進核分裂連鎖反應，且能使鈾 238 轉為鈾 239。另一方面鈾的來源可由用過核燃料中取得，若再加入鈾 235 可再成為壓水式反應器之燃料，因此鈾 239 不再成為廢料而是一種燃料。而快滋生反應器可使鈾燃料利用率達到輕水式反應器的 60 倍。

目前最領先的快滋生反應器為法國「超級鳳凰號」(Super Phenix) 電廠，但此種反應器在技術上尚有部份地方待改進，且經濟性與可靠性仍無法與輕水式核電廠相抗衡。因此，在未來 FBR 核能電廠的計畫中，會提倡將燃料儲存、再處理、製作與組合及廢料處理等集中於核能電廠內進行，以提升經營與安全可靠的效益。

3.1.4 配電系統

一般來說可將配電系統分為：輸電、變電，與配電系統。根據台灣電力公司官方網站對其敘述如下：

- (1) 輸電系統：火力、核能電廠由於需要大量的海水(冷卻水)，多位在遠離都市的海濱，水力電廠則位在偏遠的山區。因此所發出來的電，需藉由輸電線路長距離的輸送到都市、工業區等使用。由於各地區的電力需求不同，且電廠的發電量未必能符合附近地區的用電需求，因此輸電線路架設成網狀分佈，以靈活調度電力。為了降低長距離傳送電力所造成的傳輸損失，將輸電電壓提高，可降低輸線電流，以減少線路損失。由於降低輸電電流，導線線徑可減小，重量減輕，可降低建設成本。
- (2) 變電系統：發電機所發出來的電壓，一般在 11KV 到 15KV 之間，在送到輸電系統前，利用電廠內的升壓變壓器將電壓升高為輸電線路電壓 345KV (千伏特)、161KV 或 69KV。當輸電線路到達負載中心(都市或工業區等)附近，設置超高壓或一次變電所將電壓降為 161KV 或 69KV，再輸送到位於負載中心的配電變電所或二次變電所，

把電壓降為配電電壓 11.4KV 或 22.8KV 再送到配電線路。其間若有供電電壓在 69KV 以上之用戶，則直接由本公司變電所輸送電力到用戶自備的變電所供用戶使用。

(3)配電系統：二次（或配電）變電所送出來的 11.4KV 或 22.8KV 電力，以架空或地下線路輸送到家庭或工廠前，再用電桿上變壓器或路邊的亭置式變壓器，將電壓降為一般家庭、商店、小工廠使用的 110 及 220 伏特，以接戶線引接到用戶的電表後供用戶使用。對於用電量較大的中小型工廠，則直接以 11.4KV 或 22.8KV 供電。

3.2 逆向物流作業

核能發電應用的另一重要問題即為後端處理，亦可稱為「逆向物流作業」。而所謂核能後端處理所指的是核能發電廠運轉時產生的低放射性廢料、除役後受放射性污染之設備，與使用過核燃料(高放射性核廢料)的處理問題。而其中又以低放射性(低強度)與高放射性(高強度)核廢料為大家所重視。其來源與處理方式如下所述：

3.2.1 高放射性核廢料

主要是由於鈾 235 發電所產生高放射性核廢料，僅約佔剩餘核燃料總量的 3%。且高放射性核廢料為液體狀，因此需透過安定成玻璃固化體，接著再以特殊的不銹鋼桶加以密封。

高放射性核廢料目前雖有「回收處理」及「直接處置」二種選擇。目前國際的做法，大多採用水池冷卻、乾式儲存、最終處置三階段處理。

- 水池冷卻：由於高放射性核廢料在進行發電程序後會產生高熱與高輻射，故需要以冷卻型式保存。該階段需 1 年以上時間。
- 乾式儲存：國際作法是在冷卻期間內開始建置乾式儲存設施，並將高放射性核廢料置於乾式儲存設施 40-70 年，以美國 Surry 核電廠為例，該電廠於 1986 年 12 月開始採用乾式貯存法來貯存用過燃料，該電廠將裝填用過燃料的護箱露天貯存於廠內，貯存護箱設有壓力監測裝置，過去 10 餘年來均安全無虞。
- 最終處理：經過前兩期儲存方式，最後階段則為深地層最終處理。目前最終處理少有國家開始執行，僅有美國對高放射性核廢料最終處置廠開始進行選址作業程序，且暫定於內華達州拉斯維加斯西北方 100 英哩左右的猶卡山下的地洞中，存放期為 10,000 年。

除了上述高放射性核廢料之處理特性外，高放射性核廢料具有衰敗特性，亦即放射性廢料會隨時間經過，而影響程度逐漸降低。世界經濟合作發展組織中的核能協會於 1996 年針對高放射性核廢料的衰敗期做一全盤實驗，其衰敗圖如下圖 3.2 所示：

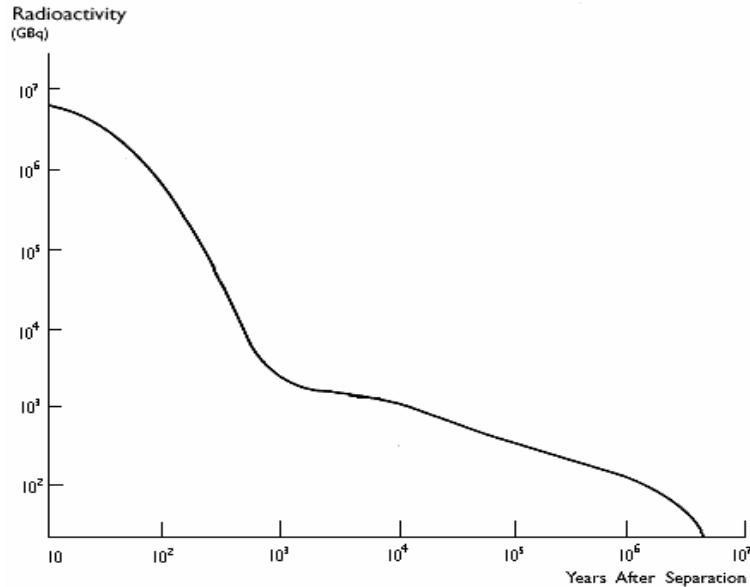


圖 3.2 高放射核廢料衰敗圖

註：該圖為 PWR 所產生之一噸高放射核廢料之衰敗情形

資料來源：OECD NEA，1996

3.2.2 低放射性核廢料

低放射性廢料主要是以核能設施操作之應用所產生之廢棄物為主，其放射性較低且核種衰變的時間亦較短。現今世界對低強度廢料的處理原則，是依照廢料的物理型態與化學特性來分類處理。氣體廢料通常以吸附、滯留及過濾等方式處理，並於合乎安全規定後排放。液體及固體廢料則經處理與安定化後，固化裝桶，以增加儲存的安全性。而依照處理流程來看，低強度廢料的處理流程可分為下列四項：廢料體積的減容、固化、運輸，與最終處理。

(1) 減容

在減容作業中會針對不同型態的低放射性廢料進行不同的減容方式，以縮小低放射性廢料的體積，並降低往後處理成本。而低放射性廢料可分為氣體、液體，與固體三種型態。茲分述如下：

- 氣體型態：廢料需經過濾器、活性碳床，與後過濾器等器材使氣體增加核廢料衰變機會，而使用過的器材則會吸附放射性而轉為固體放射性廢料。
- 液體型態：利用過濾與離子交換的技術，使放射性液體達到可排放標準。
- 固體型態：可燃性廢料採用焚化方式處理，廢料的體積可以減少 20 至 25 倍。對非燃性放射性廢料除了採用壓縮方式來減少其體積，將來亦可增設電漿焚化熔融設施來處理。採用電漿焚化熔融爐處理，可將廢料體積減少 2 倍到 10 倍，熔融所得的熔岩抗壓強度大於每平方公分 1,000 公斤。

(2) 固化

即將放射性廢料與較穩定的物質混合成為固體，再經過適當的包裝，以方便放射性廢料的運輸與貯存。

(3) 運輸

在低放射性廢料運輸中，可分為陸運與海運兩種方式。全程需受到國家主管機關之監控與處理。在運輸過程中則需將低放射性廢料置於特種貨櫃中，以減少事故發生所造成的影響。以台灣所採用特種貨櫃為例：長 4.68 公尺、寬 3.28 公尺、高 2.12 公尺。牆版及蓋厚為 3.8 公分，底板厚 2.5 公分，每一特種貨櫃可裝 48 個廢料桶。

而在海運碼頭方式，運送低放射性廢料亦有專屬碼頭與專屬船舶。在台灣則是「電光一號輪」進行海運作業。該輪全長 53 公尺，載重 650 公噸，可裝載特種貨櫃 12 只，一航次最多可運送廢料 576 桶。

(4) 最終處理

低放射性廢料最終處置大多採用長期放置處理方式，且最終處理廠之建築結構上是採用多重障壁之設計來阻滯放射性核種的遷移。目前美國、法國、日本、西班牙、瑞典、德國、英國、芬蘭，與南非等國皆採用此種方式處置低放射性廢料，且順利運轉中。

在低放射性核廢料中，亦具有與高放射性核廢料之衰敗特性。且因為低放射性核廢料所具有的放射性較低，因為衰敗期約為 300 年左右。其衰敗情形如下圖 3.3 所示：

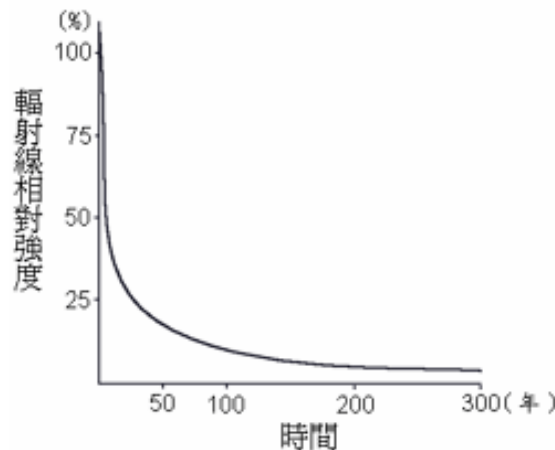


圖 3.3 低放射性核廢料衰敗圖

資料來源：清蔚園

根據上述高放射性與低放射性核廢料之處理流程，可將核能發電廠所產生的各種放射性廢料之處理情形繪製如下圖 3.4 所示。首先由核能發電廠所產生之廢料經過第一道分類手續：區分為剩餘核燃料與低放射性(低強度)核廢料。而在剩餘核燃料方面，若該國家有能力處理可回收燃料之回收作業時，則再進行剩餘核燃料分類作業；而無能力處理之國家，則將剩餘核燃料視為高放射性核廢料進行其處理流程。在低放射性核廢料方

面，則直接進行減容、固化，與最終處理的標準作業流程。下圖則為核廢料之處理流程圖：

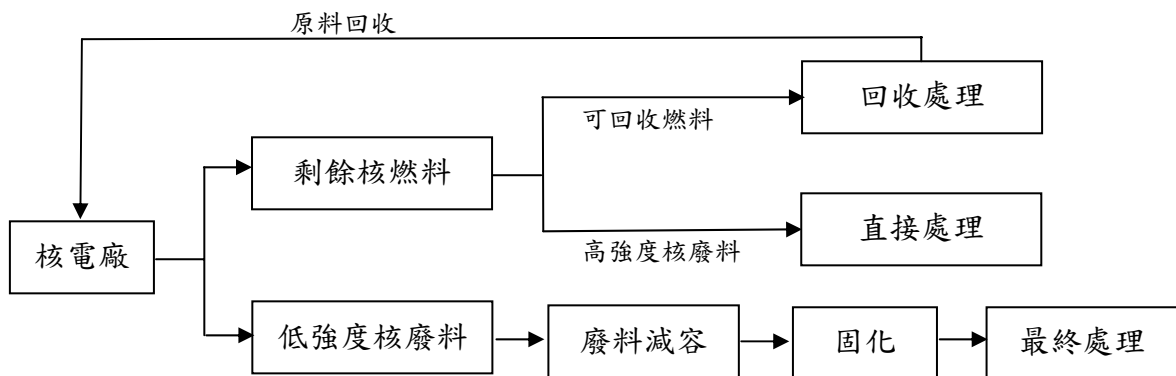


圖 3.4 核廢料處理流程圖

資料來源：本研究整理

依目前處理方式來看，雖然國際已有共通處理方式，但礙於國際核子保防限制與政治條件因素，使得部份國家無法進行回收處理作業，此點實為各國核廢料處理之難處。

3.3 核能發電作業事故

目前世界核能發電史中，由於作業疏忽所造成的重大災害有兩起，分別為：車諾比事件與三哩島事件。根據民間網站“清蔚園”科學教育館中對上述事件均有詳盡介紹，茲分述如下：

3.3.1 車諾比事件

車諾比事件之所以會發生的最根本原因在於本身反應器設計錯誤。該反應器是屬於「氣體—石墨反應器」。該反應器功率的反應度回饋係數在低功率時為正值。因而在低功率運轉時，會造成反應器會極度的不穩定，只要一點小干擾，功率很可能如脫韁野馬般的無法控制，且在短時間內迅速竄升，使反應器有解體的情形。因此在該型反應器的運轉規範中，嚴禁於低功率區域運轉。

除了本身反應器設計不良外，車諾比災變的另一項原因為：運轉人員的不當操作。運轉人員為了在既定時程內完成實驗，完全不管運轉規範的安全限制，強行在低功率下運轉反應器，並且大量抽出控制棒，使得功率反應度的正回饋現象更為嚴重，最終闖下滔天大禍。

在車諾比爾災變之後，對反應器基本設計有所了解的核能專家，根據專業知識研判，一致認為類似車諾比爾的事故不可能發生在目前普遍使用的輕水式反應器上。

3.3.2 三哩島事件

三哩島核能電廠所使用的反應器為壓水式反應器。而該事件主要原因在於：反應爐爐心發生熔毀情形。而在該事件中讓人所慶幸的是，在核發防護的深度防禦概念中，作為最後一道防線的圍阻體可確實發揮其功能，將爐心熔毀後所釋出的放射性物質包封住，不讓它排到外界環境中，避免造成環境的衝擊和民眾的輻射傷害。

在三哩島事件中，由於運轉人員面對事故發生的第一時間，無法做出適當處理而造成往後無法挽救的後果。也讓大家重新重視核能運轉人員在面對事件發生時的臨場應變能力、電廠控制室人機介面、與電力公司間運轉經驗相互交流的必要性。

下表為車諾比事件與三哩島事件之比較表：

表 3.1 核能事故對照表

| | 車諾比事件 | 三哩島事件 | 現今常用反應器 |
|---------|---|---|---|
| 反應器型態 | 氣體－石墨反應器 | 壓水式反應器 | 輕水式反應器 |
| 事故發生原因 | <ul style="list-style-type: none"> ● 反應器設計不良 ● 運轉人員操作不當 | <ul style="list-style-type: none"> ● 反應爐爐心容毀 ● 運轉人員臨場應變能力不足 | <ul style="list-style-type: none"> ● 爐心熔毀事故機率約在每年萬分之一 |
| 事故所產生後果 | <ul style="list-style-type: none"> ● 大量放射性物質外洩 ● 總面積 4300km² 的高劑量區被劃定為「禁制區」 ● 710 萬居住在核電廠週圍的民眾受影響 ● 約 32 人因該事故死亡 | <ul style="list-style-type: none"> ● 電廠周圍 8 公里的學童與孕婦撤離 | <ul style="list-style-type: none"> ● 若發生爐心熔毀，事件中至少有一人在一年內因輻射傷害而死亡的機率，約為每年百萬分之一 ● 疏散計畫區半徑： 台灣為 5 公里 美國為 16 公里 日本為 8~10 公里 芬蘭為 20 公里 前蘇聯為 30 公里 |

資料來源：清蔚園，自行整理

3.4 研究通路之構建

由於學者 Sarkis(1995)所提出之綠色供應鏈架構圖是建立在各項物流作業與環保觀念之影響程度上，若再將各物流成員之特性考慮入內時，則可繪製出一基本的綠色供應鏈之通路流程，如圖 3.5 所示。由供應商、零件製造、產品製造、配送，最後至顧客手中為前端物流的部份；當產品或零件在顧客手中需退貨時，則進入逆向物流系統部份。

在逆物流中，首先需先由顧客手中收集所有退貨的產品，再進行處理階段。在收集與處理兩階段內，若退貨品真的不堪再利用時，則進行退貨品的廢棄物處理。退貨品在再配送流程內經檢驗後，將退貨品分為再利用、再製造與回收。判定為再利用的退產品進入供應商系統，再製造的進入零件製造系統，再使用的則進入產品製造或配送系統內。

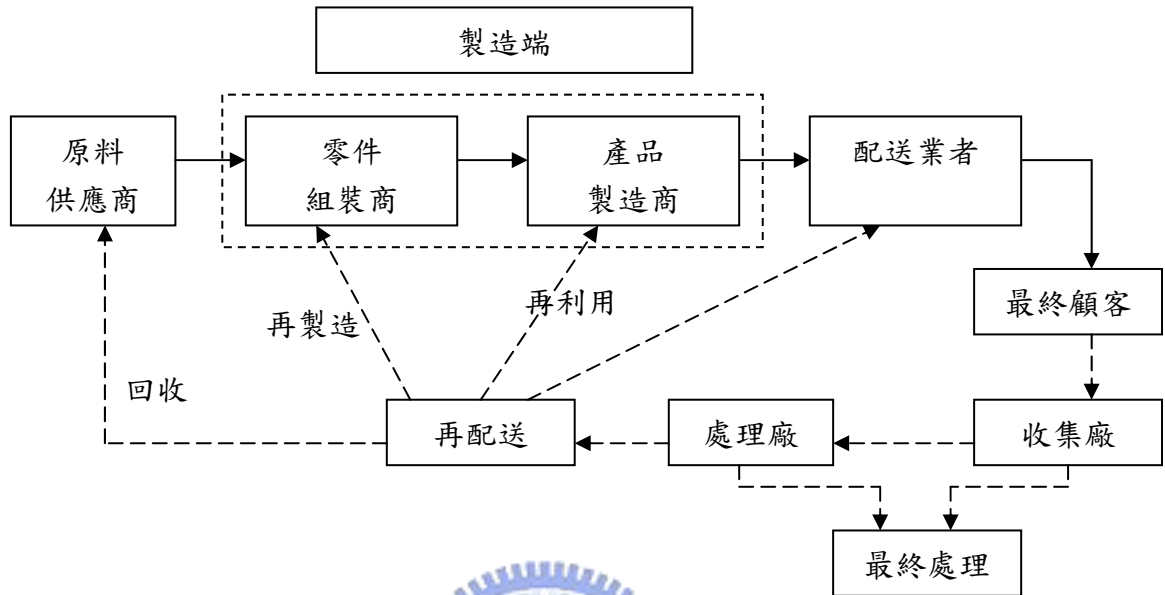


圖 3.5 綠色供應鏈通路流程圖

資料來源：本研究整理

然而本研究所探討為核能發電之供應鏈流程，由於其作業流程的特殊性，故依照圖 3.5 與核能發電之流程，整體綠色供應鏈中僅有原料供應商、製造商、電力需求端，與最終處理廠商，而無成品儲存的倉儲廠商。因此，本研究將核能發電之綠色供應鏈通路架構簡化為：多階綠色供應鏈通路流程，其架構如圖 3.6 所示。

而各階層通路成員介紹：

原料供應商：主要是提供核能發電所需之鈾原料，與可回收剩餘燃料的再製料作業。

核電廠(核能發電作業流程)：向原料供應商處購買鈾原料，並將鈾置於核反應器內進行發電作業。其中鈾原料受國際合約規範與預防運送中出現延遲問題，因此鈾原料會在核電廠進行大修排程前六個月時運至核電廠進行存放。發電過程中所產生的核廢料或剩餘物質則依照不同的物質特性來進行個別處理。對於低強度核廢料則進行減容與固化處理，再置於最終處理廠。而高強度廢料(包含剩餘燃料)則必需先進行廠內水池儲存與分類作業，再進行回收作業，可回收之廢料則可再運至原料端進行再製燃料作業，而不可回收廢料則必須運送至最終處理廠。

電力需求端：即一般民眾、公司，與工廠等需要電力的單位，藉由得到電力供應後，再付給核能發電廠電費。

最終處理廠：主要則在掩埋處理，可分為高強度最終處理廠與低強度最終處理廠兩種。

在高強度處理廠中主要是處理由核能發電所產生之不可回收廢料。由於該廢料均具有高污染風險，因此需要有完善的處理與深層掩埋技術才可使污染風險降至最低。

至於低強度最終處理廠則是處理一般低強度廢料的掩埋作業。

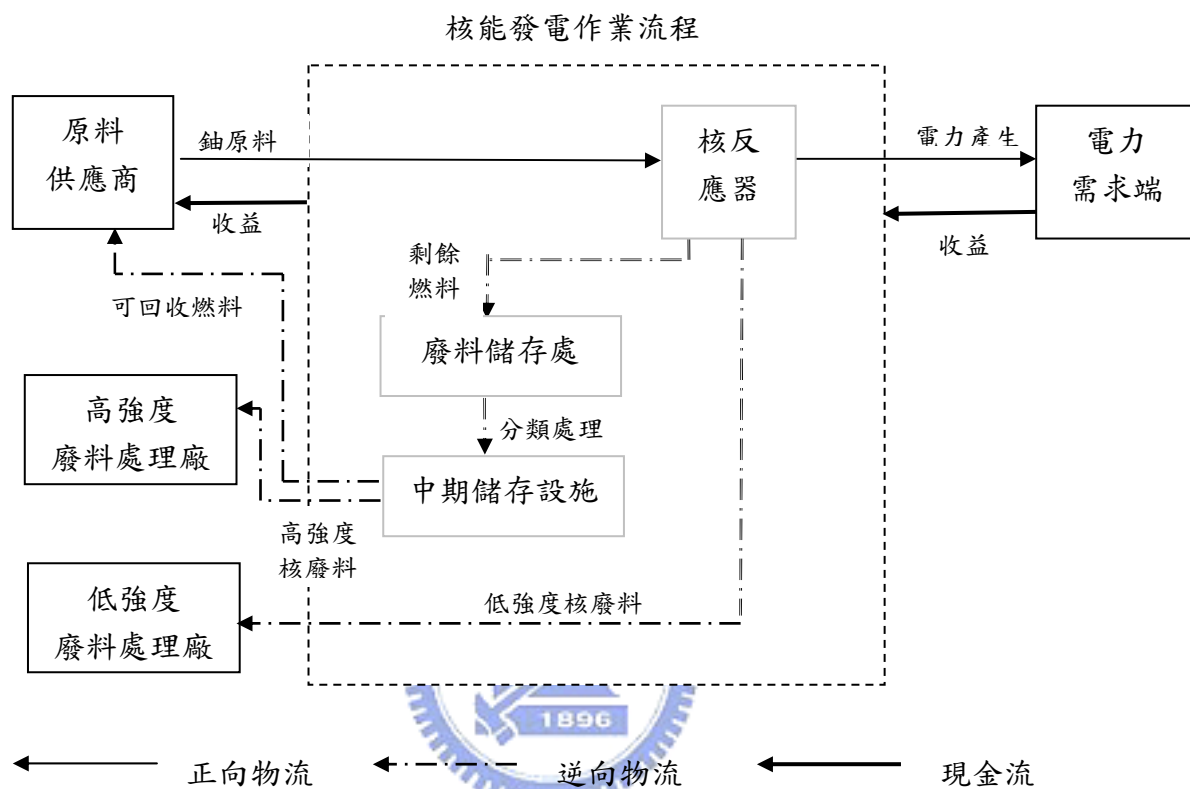


圖 3.6 核能發電綠色供應鏈通路架構圖

資料來源：本研究整理

第四章 綠色供應鏈最適模式之構建

4.1 收入與成本項

本模式將核能發電綠色供應鏈模式加入收入與支出項概念。其中，核能發電廠之供應鏈收入主要來自於正向供應鏈的電費收入與剩餘燃料再製所獲得收益。而在支出方面，主要可分為物流成本與風險成本兩種，茲如下圖所示：

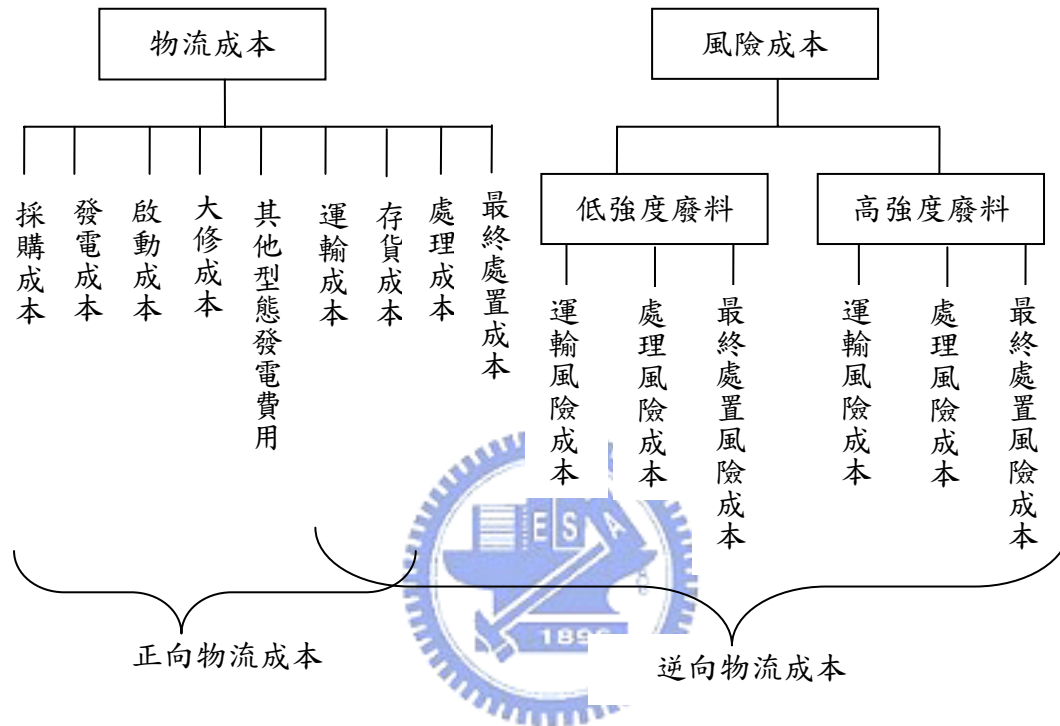


圖 4.1 核能發電綠色供應鏈成本架構圖

資料來源：本研究整理

4.2 模式建構

模式基本假設

1. 模式以中長期電廠規劃為主，因此短期暫時性的電力供應中斷(outage)問題在本模式中並無加以考量。
2. 核能發電之彈性大修排程屬於發電的特殊問題之一，且目前仍無此政策。故本模式僅依照現有情況，將大修排程、核燃料週期，與採購前置時間設為已知，無考量彈性大修排程問題。
3. 雖然快滋生反應器技術(FBR)有較高的發電效率，但目前仍無法做商業化運轉，故模式中無考量 FBR 技術。
4. 本研究之核能發電不考量新設廠問題，即以現有廠房與營運計畫進行核能發電作業

與最終處理作業。

5. 由於核能發電廠與核廢料處理廠在建造初期即需考量發電量對於水池最大容量與核廢料最大儲存量之相關性。因此，研究將模式視為無容量限制問題。

4.3 核能發電作業流程模式

本研究依照模式基本假設與圖 3.6 之作業流程架構，將核能發電作業流程構建為一多階多目標數學規劃模式進行求解。模式目標式部份可分為正向供應鏈與逆向供應鏈兩項，其中正向供應鏈目標式 Z_1 是追求利潤最大化；而逆向供應鏈目標式 Z_2 則在追求成本最小化。分別設立目標式原因在於：1.正向供應鏈中若發電量越大時，雖然會產生正向收益，但亦會影響到逆向供應鏈的成本增加。2.正向供應鏈目標式之決策者為電力營運單位，而逆向供應鏈目標式之決策者則為環保利益團體。而環保利益團體之論點即在於訴說核能發電所造成的廢料影響程度是無法估計的。且當風險發生時，民眾與社會將無法承擔其後果。因此環保利益團體希望核能作業風險值與逆向作業成本越低越好。

另一方面，研究主要是針對核能發電之中長期發電規劃，主目標式則希望在總利潤最大情形下求算出最適發電量。在限制式方面，可分為生產需求限制條件式、發電與大修排程限制條件式、核廢料物流作業風險限制條件，與 0-1 變數條件式四種。模式內容如下所示：

$$\text{主目標式: } \text{Max } \Omega = W_1 Z_1 - W_2 Z_2 \quad (4.1)$$

其中 Z_1 與 Z_2 為經由標準化後之數值，標準化公式如公式(3.2)與(3.3)所示：

$$Z_1 = \frac{Z'_1 - Z_{1\min}}{Z_{1\max} - Z_{1\min}} \quad (4.2)$$

$$Z_2 = \frac{Z'_2 - Z_{2\min}}{Z_{2\max} - Z_{2\min}} \quad (4.3)$$

Z_{\min} 表示該目標式之最小值

Z_{\max} 表示該目標式之最大值

本研究將模式進行目標式標準化，主要是考慮逆向供應鏈與正向供應鏈之立基點不同。正向供應鏈除了核能發電外，亦有考量到其他發電型態之情形，而逆向供應鏈之項目僅有考量核能發電之廢料成本與風險成本。因此，藉由將兩目標式標準化，即能表現出正逆向供應鏈之相同立基點。而公式(4.2)與(4.3)中之 $Z_{1\max}$ 、 $Z_{1\min}$ 、 $Z_{2\max}$ 、 $Z_{2\min}$ 四項之數據則由 lingo 軟體先進行初步試算而得。其中試算方式以 $Z_{1\max}$ 為例，即單考量目標式 Z'_1 並配合模式限制式，其所求得目標式最大化則為 $Z_{1\max}$ 。其他三項以此類推。

目標式一：正向供應鏈目標式(Max Z_1)：

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I Q_t^i R_i G_t^i + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J X_t^j R_t - \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I Q_t^i GC_{mc} G_t^i + \sum_{t=1}^T Q_t^i (IC_t + PC_t + TC_t) \right) \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I AC_t W_t^i + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I V_t^i SC_t^i - \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J XC_t^j X_t^j + \theta (MOX \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I U_t^i \alpha (1 - \beta) \right)) \end{aligned} \quad (4.4)$$

(4.4)式代表各項發電機組包含核能、火力，與水力發電於各期所獲得之電費收益加上剩餘燃料再製所獲得的總收益減去各項成本(包含採購、運輸、大修、存貨、啟動，與各種發電方式之發電成本)之數值。另外，因發電單位仍需以營利做為其企業營運的支援，故本研究對於目標式一仍以利潤最大化之求解目標。

目標式二：逆向供應鏈目標式(Min Z_2)：

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T Q_t^i * \alpha (LRTC_t + LRWC_t + LRDC_t) + (LRRTC^c + LRRWC_y^c + LRRDC^c) + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T Q_t^i DWC_t \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T MOX (Q_t^i WIC_t + Q_t^i (1 - \beta) (SFTC_t + SFWC_t)) \\ & + Q_t^i \beta (HRTC_t + HRDC_t) + (HRRTC^c + HRRDC^c) \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T NMOX (Q_t^i (HRTC_t + HRWC_t + HRDC_t) + (HRRTC^c + HRRWC_y^c + HRRDC^c)) \end{aligned} \quad (4.5)$$

(4.5)式為核能發電逆向物流所產生之低強度核廢料、高強度核廢料各項成本，與營運所需負擔的拆廠成本。而在各項核廢料成本項目中，由於部份核廢料具有放射性汙染，因此加入物流風險外部成本項，其中包含運輸風險(RTC)、處理風險(RWC)，與最終處置風險(RDC)。另外，針對核廢料目前雖然已有回收技術，但礙於國際政治與環境聲浪之影響下，部份國家無該項回收技術或無法運至可回收處理之國家，因此本模式加入 MOX 與 NMOX 之環境變數來區分該電廠是否有採用回收處理技術。

生產與需求限制條件

$$DQ_t^i \leq Q_t^i \leq UQ_t^i \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, I \quad \forall t = 1, 2, 3, \dots, T \quad (4.6)$$

(4.6)為各核能發電機組之發電量的上下限制。

$$Q_t^i \leq Limit \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, I \quad \forall t = 1, 2, 3, \dots, T \quad (4.7)$$

(4.7)為政府限制核能發電機組的限制條件。

$$UD_t \geq \sum_{i=1}^I Q_t^i + \sum_{j=1}^J X_t^j \geq D_t \quad \forall t=1,2,3,\dots,T \quad (4.8)$$

(4.8)為核能發電量與其他型態發電量需滿足市場最低需求量或政府政策所規劃的供電量(D_t)，但總發電量不能大於市場最大需求量(UD_t)之限制條件。設定該條件式以避免無限制發電而產生浪費。

$$X_t^j \leq Limit^j \quad \forall j=1,2,3,\dots,J \quad \forall t=1,2,3,\dots,T \quad (4.9)$$

(4.9)為其他發電型態之發電量限制條件。

發電與大修排程限制條件

$$G_t^i + W_t^i \leq 1 \quad \forall i=1,2,3,\dots,I \quad \forall t=1,2,3,\dots,T \quad (4.10)$$

(4.10)是發電變數與大修變數的互斥限制；亦即發電變數與大修變數無法同時發生。

$$V_t^i + W_t^i \leq 1 \quad \forall i=1,2,3,\dots,I \quad \forall t=1,2,3,\dots,T \quad (4.11)$$

(4.11)為產生大修變數與啟動變數之互斥限制。

$$V_t^i \geq G_t^i - G_{t-1}^i \quad \forall i=1,2,3,\dots,I \quad \forall t=1,2,3,\dots,T \quad (4.12)$$

(4.12)為轉換限制式；即用來控制當表示連續兩期的發電變數由 0 變為 1 時，此時核能機組開始運轉必須強迫啟動變數為 1。

$$W_t^i \text{ and } W_{t+1}^i = \begin{cases} 1 & \text{if } W_t^i \text{ and } W_{t+1}^i \text{ 為大修日期，且 } \sum_{\varphi=t-L}^{t-1} G_{\varphi}^i > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4.13)$$

(4.13)為大修時階判斷限制式。在此已知核能大修期為連續兩時階(兩個月)，因此當 W_t^i and W_{t+1}^i 為大修日期，且 $\sum_{\varphi=t-L}^{t-1} G_{\varphi}^i > 0$ 時，則代表 i 核能機組於該核能發電週

期有進行發電作業則 t 與 t+1 時階需進行大修作業。藉由該式表現出核能發電進行大修時所需負擔之大修成本。由於(4.13)為概念性模式，因此需改寫為數學規劃型態，其公式如下所示。

$$\begin{cases} \sum_{\varphi=t-L}^{t-1} G_{\varphi}^i - O_e = 0 & (4.13-1) \\ W_t^i + W_{t+1}^i - 2A = 0 & (4.13-2) \\ O_e \leq M * A & (4.13-3) \end{cases}$$

核廢料物流作業風險限制條件

$$LRRTC^z = \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^{i-1} (1 - p_j^A) p_i^A * POP_i * 2\lambda_m * C \right) * \left(\left[\frac{\sum_{t=1}^T U_t^z * L\alpha}{LRCAR} \right] + 1 \right) & \text{if } \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z U_t^z \neq 0 \\ 0 & \text{if } \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z U_t^z = 0 \end{cases} \quad \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad (4.14)$$

$$HRRTC^z = \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^{i-1} (1 - p_j^A) p_i^A * POP_i * 2\lambda_m * C \right) * \left(\left[\frac{\sum_{t=1}^T U_t^z * H\alpha}{HRCAR} \right] + 1 \right) & \text{if } \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z U_t^z \neq 0 \\ 0 & \text{if } \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z U_t^z = 0 \end{cases} \quad \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad (4.15)$$

(4.14)與(4.15)表示低放射性與高放射性核廢料之運輸風險成本。其中表示，z 廠之核廢料在總研究時階內，若有進行核能發電作業則需負擔運輸風險成本。且成本計算方式為單趟運輸風險成本乘上總運送趟數。物流風險成本模式內容於 4.2.4 節介紹。因研究對象並無核廢料運輸行為，故本研究未對該項進行改寫作業。

$$LRRWC_y^z = \begin{cases} p_i^B * POP_i * \lambda_m^2 \pi * C & \text{if } \sum_{y=1}^Y \sum_{z=1}^Z U_y^z \neq 0 \\ 0 & \text{if } \sum_{y=1}^Y \sum_{z=1}^Z U_y^z = 0 \end{cases} \quad \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad \forall y = 1, 2, 3, \dots, Y \quad (4.16)$$

$$HRRWC_y^z = \begin{cases} p_i^B * POP_i * \lambda_m^2 \pi * C & \text{if } \sum_{y=1}^Y \sum_{z=1}^Z U_y^z \neq 0 \\ 0 & \text{if } \sum_{y=1}^Y \sum_{z=1}^Z U_y^z = 0 \end{cases} \quad \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad \forall y = 1, 2, 3, \dots, Y \quad (4.17)$$

(4.16)與(4.17)表示低放射性與高放射性核廢料之處理風險成本。因放射性廢料處理均以年處理為單位計算，因此本研究以每年放射性核廢料處理廠做為計算基準。其中 y=1 表示研究年期第一期(t=1~12)，以此類推。物流風險成本模式內容於 4.4 節介紹。由於(4.16)與(4.17)為概念性模式，因此需改寫為數學規劃型態，其公式如下所示。

$$\begin{cases} LRRWC_y^z = (p_i^B * POP_i * \lambda_m^2 \pi * C) * B_y^z & \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad \forall y = 1, 2, 3, \dots, Y & (4.16-1) \\ HRRWC_y^z = (p_i^B * POP_i * \lambda_m^2 \pi * C) * B_y^z & \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad \forall y = 1, 2, 3, \dots, Y & (4.17-1) \\ \sum_{y=1}^Y \sum_{z=1}^Z U_y^z \leq M * B_y^z & \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad \forall y = 1, 2, 3, \dots, Y & (4.1617) \end{cases}$$

$$LRRDC^z = \begin{cases} \sum_{d=1}^D p_i^C * POP_i * \lambda_m^2 \pi * \delta_m^d * C & \text{if } \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z U_t^z \neq 0 \\ 0 & \text{if } \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z U_t^z = 0 \end{cases} \quad \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad (4.18)$$

$$HRRDC^z = \begin{cases} \sum_{d=1}^D p_i^C * POP_i * \lambda_m^2 \pi * \delta_m^d * C & \text{if } \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z U_t^z \neq 0 \\ 0 & \text{if } \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z U_t^z = 0 \end{cases} \quad \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad (4.19)$$

(4.18)~(4.19)表示當 z 核能發電廠之總發電量大於 0 時，則會產生最終處理風險成本。物流風險成本模式內容於 4.4 節介紹。由於(4.18)與(4.19)為概念性模式，因此需改寫為數學規劃型態，其公式如下所示。

$$\left\{ \begin{array}{ll} LRRDC^z = \left(\sum_{d=1}^D p_i^C * POP_i * \lambda_m^2 \pi * \delta_m^d * C \right) * C^z & \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad (4.18-1) \\ HRRDC^z = \left(\sum_{d=1}^D p_i^C * POP_i * \lambda_m^2 \pi * \delta_m^d * C \right) * C^z & \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad (4.19-1) \\ \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z U_t^z \leq M * C^z & \forall z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad (4.1819) \end{array} \right.$$



0-1 變數限制條件

$$MOX + NMOX = 1 \quad (4.20)$$

(4.20)為核能發電廠是否採用混合燃料之限制式。

$$G_t^i, W_t^i, V_t^i, MOX, NMOX, A, B_y^z, C^z \in (0, 1) \quad (4.21)$$

(4.21)則表示啟動變數、大修變數、發電變數、混合燃料變數為 0-1 變數的條件限制式。

$$Q_t^i \geq 0 \quad (4.22)$$

(4.22)則表示核能發電量應為大於或等於零之數值。

變數定義：

| 決策變數 | 定義 |
|-----------|---|
| Q_t^i | 第 t 期，發電機組 i 之發電量 |
| U_t^i | 第 t 期，發電機組 i 之原料使用量 |
| X_t^j | 第 t 期，j 型發電型態之發電量 |
| G_t^i | 發電變數 $\begin{cases} =1 & \text{第 t 期，發電機組 i 為發電狀態} \\ =0 & \text{第 t 期，發電機組 i 為不發電狀態} \end{cases}$ |
| V_t^i | 啟動變數 $\begin{cases} =1 & \text{第 t 期，發電機組 i 開始啟動} \\ =0 & \text{其他} \end{cases}$ |
| 一般變數 | 定義 |
| W_t^i | 大修變數 $\begin{cases} =1 & \text{第 t 期，發電機組 i 為大修狀態} \\ =0 & \text{其他} \end{cases}$ |
| W_1 | 正向供應鏈之權重值 |
| W_2 | 逆向供應鏈之權重值 |
| T | 核能發電作業總期數 $t=1,2,3,\dots,T$ |
| y | 研究年期 $y=1,2,3,\dots,Y$ |
| Z | 核能發電廠 $z=1,2,3,\dots,Z$ |
| A | 大修時階判斷限制式中介 0-1 變數 |
| B_y^z | 放廢料廢料處理風險限制式中介 0-1 變數 |
| I | 總核能電廠發電機組 $i=1,2,3,\dots,I$ |
| J | 水火電力廠發電型態 $j=1$ 為火力發電， $j=2$ 為水力發電 |
| L | 核能燃料使用週期長度 |
| M | 設定為一極大正數 |
| O_e | 大修時階判斷限制式中介變數 |
| UD_t | 第 t 期，月尖峰負載發電量 |
| D_t | 第 t 期，最低發電需求量 |
| R_t | 第 t 期，單位電費收入 |
| GC_{mc} | 核能發電單位發電成本 |
| TC_t | 第 t 期，單位原料運輸成本 |

| | |
|------------|-----------------------------------|
| PC_t | 第 t 期，單位原料之採購成本 |
| AC_t | 第 t 期，固定大修成本 |
| IC_t | 第 t 期，單位原料之固定存貨成本 |
| SC_t | 第 t 期，固定啟動成本 |
| XC_t^j | 第 t 期，j 發電型態之單位發電成本 |
| $LRTC_t$ | 第 t 期，低強度廢料之單位運輸成本 |
| $LRRTC^z$ | 核能發電第 z 廠，低強度廢料之運輸風險外部成本 |
| $LRWC_t$ | 第 t 期，低強度廢料之單位處理成本 |
| $LRWC_y^z$ | 第 y 研究年期，核能發電第 z 廠，低強度廢料之處理風險外部成本 |
| $LRDC_t$ | 第 t 期，低強度廢料之單位最終處置成本 |
| $LRDC^z$ | 核能發電第 z 廠，低強度廢料之最終處置風險外部成本 |
| WIC_t | 第 t 期，剩餘燃料之水池存放成本 |
| DWC_t | 第 t 期，核能發電量每度所需提撥之運轉基金 |
| $SFWC_t$ | 第 t 期，可回收燃料之處理成本 |
| $SFTC_t$ | 第 t 期，可回收燃料之運送成本 |
| $HRTC_t$ | 高強度廢料之單位運輸成本 |
| $HRRTC^z$ | 核能發電第 z 廠，高強度廢料之運輸風險外部成本 |
| $HRWC_t$ | 第 t 期，高強度廢料之單位處理成本 |
| $HRWC_y^z$ | 第 y 研究年期，核能發電第 z 廠，高強度廢料之處理風險外部成本 |
| $HRDC_t$ | 第 t 期，高強度廢料之單位最終處置成本 |
| $HRDC^z$ | 核能發電第 z 廠，高強度廢料之最終處置風險外部成本 |
| $Limit$ | 政府之核能發電量限制 |
| $Limit^j$ | 其他發電型態之發電量上限限制 |
| $L\alpha$ | 核能發電原料使用量轉換低放射性核廢料因子 |
| $H\alpha$ | 核能發電原料使用量轉換高放射性核廢料因子 |
| LRCAR | 裝載低放射性核廢料車輛之最大容量限制 |
| HRCAR | 裝載高放射性核廢料車輛之最大容量限制 |
| α | 核能發電量轉換低放射性核廢料因子 |
| β | 剩餘燃料中，高強度廢料所占比例 |
| θ | 用過核燃料單位再製收益 |
| UQ_t^i | 核能發電量上限 |
| DQ_t^i | 核能發電量下限 |

| | |
|-------------|---|
| <i>MOX</i> | 核電廠採用混合燃料之變數 $\begin{cases} =1 & \text{核電廠可採用 MOX 燃料} \\ =0 & \text{核電廠無採用 MOX 燃料} \end{cases}$ |
| <i>NMOX</i> | 核電廠未採用混合燃料之變數 $\begin{cases} =1 & \text{核電廠無採用 MOX 燃料} \\ =0 & \text{核電廠可採用 MOX 燃料} \end{cases}$ |

4.4 物流風險作業模式

由圖 4.1 可看出核能發電之物流風險，依照物質不同可分為低強度與高強度廢料兩種，而各項廢料依照作業型態不同可分為運輸風險、處理風險，與最終處置風險三種。

本研究之風險模式主要是由學者 Erkut 所提出之風險概念所延伸。該學者所提出風險值應為發生機率與發生結果之乘積。且學者 Erkut 將運輸風險機率計算概念設定為每公里計算可能發生風險的機率，而發生結果則以影響範圍中的人口數為標的。其公式如下所示：

$$TR = \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^{i-1} (1 - p_j) p_i C_i \quad (4.23)$$

$$C_i = POP_i * \lambda_m * \pi / 2 \quad (4.24)$$

TR：總運輸風險值

P_j ：j 區中發生風險的機率

P_i ：i 區中發生風險的機率

C_i ：i 區中發生風險所造成之影響值

POP_i ：i 區之人口密度

λ_m ：m 物質發生事故所影響之門檻範圍

n：總路徑長度(單位：公里) $n=1,2,3,\dots,n$

藉由上述公式可計算出在某一條運輸路徑中的總運輸風險值，其計算概念相較於將全段路以單一風險機率值表示而更為精準。且在發生結果方面，式中採用人們所關心的影響人口數為標的較能反應出人民所認知的風險結果。因此，本研究之風險模式即依據公式(4.23)與(4.24)為基礎，並加入生命價值成本觀念，將風險值轉化為金錢成本。而透過轉化為金錢成本後，即可與核能發電作業模式進行合併計算工作。

本研究之核能發電作業風險模式主要是依照不同作業型態做區分。可分為運輸、處理，與最終處置風險三種。而在各作業中，低強度廢料與高強度廢料會有不同情形發生，因此在各模式的參數中，即可區別出低強度廢料與高強度廢料的不同。三種物流風險之模式如下所示：

4.4.1 運輸風險成本模式(RTC)

$$RTC = \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^{i-1} (1 - p_j^A) p_i^A * POP_i * 2\lambda_m * C \quad (4.25)$$

P_j^A, P_i^A ：為運輸過程中每公里所發生事故之機率

POP_i ：人口密度（單位：平方公里）

λ_m ：m 物質發生事故所影響之門檻範圍（單位：公里）

C：生命價值成本（單元：元／人）

n：總路徑長度(單位：公里) $n=1,2,3,\dots,n$

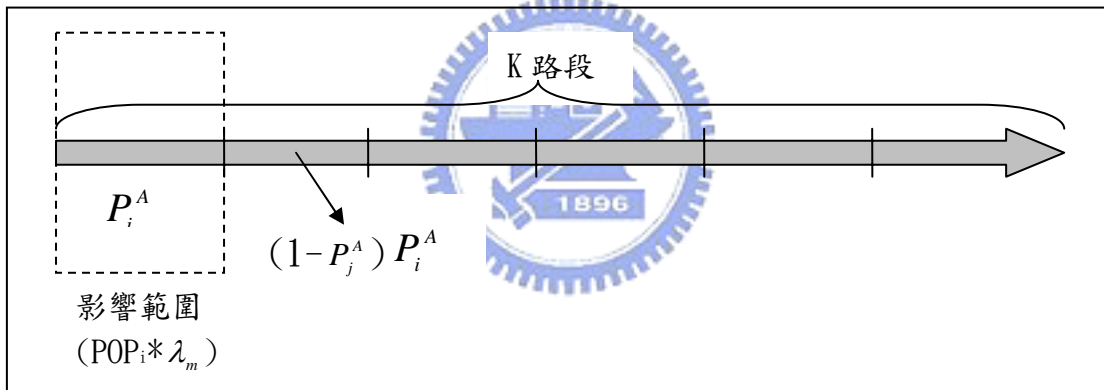


圖 4.2 運輸風險模式示意圖

資料來源：自行整理

由上述模式與示意圖可看出模式主要概念在於運輸風險值是由每公里所發生機率之加總而得，且每公里所發生的機率值不會相同。例如：在第一公里時，所發生機率為 P_i^A ，而第二公里所發生機率則為 $(1 - P_j^A) P_i^A$ 。原因在於，依照路段上運具連續經過每公里所發生之機率會受到之前機率所影響。因此每公里之機率均需經過計算再予以加總。而在影響範圍方面，單位配合每公里所發生之機率，而將影響範圍設為長條狀，以涵蓋在一公里中所發生之影響範圍。

另一方面，在運輸風險中低強度廢料與高強度廢料主要差異在於影響之門檻範圍。原因在於兩種強度的核廢料之放射性影響範圍不同。而在相同單位數量情形下，高強度核廢料的影響範圍較低強度核廢料來的大。

4.4.2 處理風險成本模式(RWC)

核能發電之處理風險為核廢料在進行回收、分類、減容，與固化等作業時所可能發生事故之風險程度。由於研究中個別核廢料影響範圍參數取得不易，且在作業方面來說，核廢料均在廠房中進行處理，故本研究將處理風險值定義為每年核廢料處理廠事故風險，而該處理風險成本則視為固定成本，若處理廠有進行核廢料處理時，則需負擔該成本；若無進行處理則無需負擔。

一般來說，低強度核廢料與高強度核廢料處理廠風險的機率值約為相同，其差異之處在於事故發生後所影響的範圍（ λ_m ）。如同運輸風險，高強度核廢料發生事故後所造成的影響範圍較低強度核廢料大。

在處理風險模式中，由於處理過程屬於間斷情形，且每次的核廢料處理均為獨立事件。因此，本研究之處理風險的事故發生機率模式採用單一風險值，而非連續概念的計算模式。其模式如下所示：

$$RWC = p_i^B * POP_i * \lambda_m^2 \pi * C \quad (4.26)$$

P_i^A ：為處理核廢料所發生之風險機率值

上述(4.26)式中未定義變數之定義與模式(4.25)相同

4.4.3 最終處置風險成本(RDC)

所謂最終處置風險為高強度或低強度廢料在最終儲存廠進行存放過程中發生意外事故之風險，其概念相當於處理風險成本，亦為固定成本概念。另一方面，核廢料最終處置風險特性在於其存放期間長與具有衰敗特性。一般來說，高強度廢料存放期相當長，而低強度廢料存放期亦有三百年之久。且在存放期中，由於核廢料具有衰敗特性，因此高強度與低強度廢料之輻射影響會隨時間變化而逐漸衰減，其衰敗曲線如圖 3.2 與 3.3 所示。下圖 4.3 則為衰敗影響範圍圖，圖中可看出核廢料之輻射影響會隨時間逐減減弱，因此影響範圍會隨著縮小。

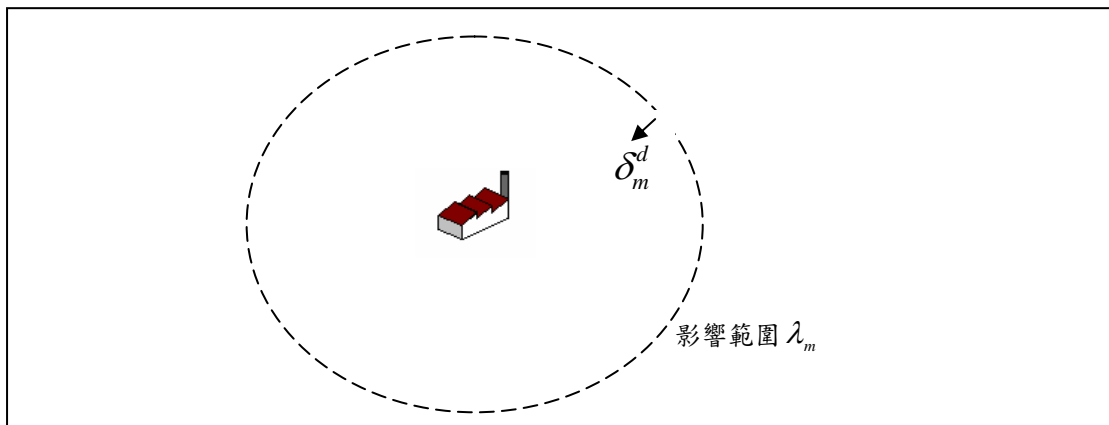


圖 4.3 最終處置風險模式示意圖

資料來源：自行整理

在最終處置風險模式中，因將每年存放情形視為間斷情形，故本研究在最終處置風險的事故發生機率上，亦採用單一風險值，而非連續概念的計算模式。其模式如下所示：

$$RDC = \sum_{d=1}^D p_i^C * POP_i * \lambda_m^2 \pi * \delta_m^d * C \quad (4.27)$$

P_i^C ：為核廢料最終處置所發生之風險機率值

δ_m^d ：m 物質之衰敗係數

D：核能廢料存放期限 d=1,2,3,...,D

上述(4.27)式中未定義變數之定義與模式(4.25)相同



第五章 案例探討

根據本研究第四章所構建的核能發電供應鏈模式以核能發電為主要研究對象，並將水力與火力發電視為其它變數，用已配合模式發展。本章將用一案例來說明求解過程，並藉由模式結果來驗證模式正確性。本研究模式主要是採用 Lingo 軟體來執行模式，作為本研究求解的工具。

5.1 案例背景描述

本研究案例是採用台灣電力公司之三座核能發電廠為案例研究對象。在民國 63 年及 69 年，世界歷經兩次石油危機之衝擊，而造成國際能源之緊張情勢。為因應石油危機後之能源情勢，我國政府能源政策由「火主水從」改採「發電來源多元化政策」。在台灣核能發電史上於民國 74 年先後完成三所核能發電廠，共六部機，裝置容量達 514.4 萬瓩，約為當時系統裝置容量的三分之一，如表 5.1 所示。另一方面繼續引進大容量高效率的火力機組，並將若干燃油機組改為燃煤，大幅減少對燃油之需求。在民國 74 年時，裝置容量達 1,597 萬瓩，為民國 63 年之 3.7 倍，發電量 525.6 億度，為 63 年之 2.6 倍，電力系統因核能電廠的加入而進入「能源多元化」時期。

表 5.1 台電公司各核能電廠簡介

| 廠址 | 核一廠 | 核二廠 | 核三廠 | 合計 |
|---------------|---|---|---|------------|
| | 台北縣石門鄉 | 台北縣萬里鄉 | 屏東縣恆春鎮 | |
| 主要設備型式及廠家 | 反應器： 沸水式(美國 奇異公司) 汽輪發電機： 美國西屋公司 | 反應器： 沸水式(美國 奇異公司) 汽輪發電機： 美國西屋公司 | 反應器： 壓水式(美國 奇異公司) 汽輪發電機： 美國西屋公司 | |
| 裝置容量 (機組數) | 63 萬 6 千瓩 (2 座機組) | 98 萬 5 千瓩 (2 座機組) | 95 萬 1 千瓩 (2 座機組) | 514 萬 4 千瓩 |

資料來源：林德福(1999)

研究中假設核一廠($z=1$)一號機為($i=1$)，二號機為($i=2$)；核二廠($z=2$)一號機為($i=3$)，二號機為($i=4$)；核三廠($z=3$)一號機為($i=5$)，二號機為($i=6$)；而將火力發電與水力發電均視為單一個體，火力發電為($j=1$)；水力發電為($j=2$)。

在核燃料循環方面，由於國際情勢限制核廢料不得運出本國進行處理與台灣尚無核燃料回收技術之情形，故本研究在逆向供應鏈中將 NMOX 變數設為 1，而 MOX 變數即為 0。即案例研究中，不考慮核燃料回收流程，所有用過核燃料均視為高放射性廢棄物。

5.2 案例資料

本研究案例採用台灣電力公司核能發電民國 91 至 93 年之營運資料。研究時間單位定義為一個月，總期數 T 即為 36 期。發電成本參數係根據台灣電力公司 92 年度發電成本項目中可得知，核能發電成本中 16% 為燃料成本。其中核一、核二廠為沸水式反應器，其燃料成本項目比例如下：原料鈾採購費用約占 30%，原料鈾轉化及濃縮費用約占 44.5%，核燃料束製造費用約占 25%，運輸費用約占 0.5%。核三廠為壓水式反應器，燃料成本項目比例如下：原料鈾採購費用約占 30%，原料鈾轉化及濃縮費用約占 44.4%，核燃料束製造費用約占 25%，運輸費用約占 0.6%。另一方面，依照核子反應器“熱能轉換成電能”效率，即能算出每公克鈾燃料之發電量。因此根據台灣電力公司所提供之轉換效率假設值為 34%，則理論上一公克天然鈾全部分裂所產生的電能約為 1.96×10^8 焦耳（約為 54.4 度電）。依上述數據乘上核安處所公佈之三座核能發電廠之總發電成本，可求出各核能電廠之燃料成本與發電成本，如下表 5.2 所示。而在發電收益方面，本研究根據台灣電力公司基隆營業處非官方營業網所提供資料而粗略估算在夏季月份時單位電價每度為 1.99 元，而非夏季月份之單位電價則為每度 1.75 元。

表 5.2 發電成本表

| | 燃料成本 | | 燃料運輸成本 | | 發電成本 (元/度) | 總發電成本 (元/度) |
|----------|----------|--------|----------|---------|---------------|----------------|
| | (元/度) | (元/克) | (元/度) | (元/克) | | |
| 核一廠 | 0.101888 | 5.5423 | 0.000512 | 0.0279 | 0.5376 | 0.64 |
| 核二廠 | 0.109848 | 5.976 | 0.000552 | 0.03 | 0.5796 | 0.69 |
| 核三廠 | 0.09552 | 5.1963 | 0.00048 | 0.02611 | 0.504 | 0.6 |
| 火力 發電 | -- | -- | -- | -- | -- | 0.86 |
| 水力 發電 | -- | -- | -- | -- | -- | 2.3 |

資料來源：自行整理

在啟動與大修成本方面則參考張惟仁(2001)之核能發電大修排程研究中所採用之計算方法。該研究中將啟動成本視為單位時間的固定成本，而固定成本計算為每一核能機組的每度電固定成本數據乘以裝置容量及單位時間，即得出啟動成本。在大修成本方面，因核能發電營運資料無每次大修成本依據，故一處罰成本概念來代表，即假設在大修期間內無法供電而由其他發電設備提供，而大修成本即為該大修期間內其他發電設備之發電成本，其他發電設備則以每度電 1.2887 元為基準值計算。資料如表 5.3 所示。

表 5.3 各核能機組大修與啟動成本表

| | 啟動成本(仟元/次) | 大修成本(仟元/次) |
|--------|------------|------------|
| 核一廠一號機 | 247,186 | 885,182 |
| 二號機 | 191,502 | 885,182 |
| 核二廠一號機 | 435,520 | 1,370,919 |
| 二號機 | 438,994 | 1,370,919 |
| 核三廠一號機 | 519,582 | 1,323,598 |
| 二號機 | 438,214 | 1,323,598 |

資料來源：張維仁(2001)、自行整理

而在大修期之決定方面，由台灣目前核能發電現況可知，每次大修期間約為 45 天，若有其他檢修作業時則時間會再加長。因此，在配合本研究之時間單位為以月計算時，假設每次核能發電之大修期間為二個月(60 天)。在核燃料週期方面，則依據台電民國 91 至 93 年之大修排程加以修正，如下表 5.4 所示。由表中即可得知目前台電核能發電之完整燃料週期(L)為 18 個月，其中亦包含大修期間 2 個月，故實際燃料週期之發電時間約為 16 個月。

表 5.4 台灣核能發電大修時程表

| 91 年 | 1 月 | 2 月 | 3 月 | 4 月 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 | 12 月 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| 1 | | | | | | | | | | 0 | 0 | |
| 2 | | | 0 | 0 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | 0 | 0 |
| 5 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | 0 | 0 | | | | | | |
| 92 年 | 1 月 | 2 月 | 3 月 | 4 月 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 | 12 月 |
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | 0 | 0 | | |
| 3 | | | 0 | 0 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | 0 | 0 | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | 0 | 0 |
| 93 年 | 1 月 | 2 月 | 3 月 | 4 月 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 | 12 月 |
| 1 | | | | 0 | 0 | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|---|---|--|---|---|---|---|
| 2 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | 0 | 0 | | |
| 4 | | | | | | 0 | 0 | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | 0 | 0 |
| 6 | | | | | | | | | | | | |

註 1：0 則表示該機組在該月份為大修期間，表示為不發電狀態

註 2：表格中的 1,2,...,6 為三座核能電廠之發電機組

資料來源：自行整理

因本研究之案例採用民國 91 至 93 年之台灣核能發電情形，且核能發電仍在台灣電力供應之占有一定比例，因此在模式限制中即加入該期間內台灣整體電力市場之情形，以符合實際之電力供給與需求市場。下表 5.5 則為民國 91 至 93 年台灣月尖峰負載表。在電力基礎需求量方面，由於無實際數據，因此本研究以台灣目前核能、火力，與水力發電之供給量做為每月基礎需求量參數，而目前上述三項發電型態占台灣電力之 80%，即以月尖峰負載量乘上 80% 做為每月之基礎電力需求量，如表 5.6 所示。

表 5.5 2002 至 2004 年台灣月尖峰負載量 (單位:瓩)

| 月 別 | 民國 91 年 | 民國 92 年 | 民國 93 年 |
|---------|------------|------------|------------|
| 1 月 | 20,328,700 | 20,387,300 | 22,122,700 |
| 2 月 | 19,619,800 | 21,121,200 | 22,127,000 |
| 3 月 | 20,842,900 | 21,475,700 | 23,004,500 |
| 4 月 | 23,481,200 | 23,679,500 | 25,220,500 |
| 5 月 | 23,853,000 | 25,043,200 | 27,110,200 |
| 6 月 | 27,116,500 | 26,245,000 | 28,794,800 |
| 7 月 | 26,523,100 | 28,593,700 | 28,808,700 |
| 8 月 | 26,925,200 | 28,060,800 | 28,807,700 |
| 9 月 | 24,979,700 | 27,225,600 | 29,034,300 |
| 10 月 | 23,837,000 | 25,292,200 | 25,934,700 |
| 11 月 | 21,840,400 | 23,671,600 | 24,697,800 |
| 12 月 | 21,908,400 | 22,191,900 | 23,529,900 |
| 年最高負載 | 27,116,500 | 28,593,700 | 29,034,300 |
| (月、日、時) | (6.25.15) | (7.22.14) | (9.3.15) |

註：該資料為台電公司所有，不可直接引用。若需引用請直接向台電公司詢問

資料來源：台灣電力公司電力調度處

表 5.6 2002 至 2004 年台灣電力基礎需求量 (單位:瓩)

| 月 別 | 民國 91 年 | 民國 92 年 | 民國 93 年 |
|-------|------------|------------|------------|
| 1 月 | 16,262,960 | 16,309,840 | 17,698,160 |
| 2 月 | 15,695,840 | 16,896,960 | 17,701,600 |
| 3 月 | 16,674,320 | 17,180,560 | 18,403,600 |
| 4 月 | 18,784,960 | 18,943,600 | 20,176,400 |
| 5 月 | 19,082,400 | 20,034,560 | 21,688,160 |
| 6 月 | 21,693,200 | 20,996,000 | 23,035,840 |
| 7 月 | 21,218,480 | 22,874,960 | 23,046,960 |
| 8 月 | 21,540,160 | 22,448,640 | 23,046,160 |
| 9 月 | 19,983,760 | 21,780,480 | 23,227,440 |
| 10 月 | 19,069,600 | 20,233,760 | 20,747,760 |
| 11 月 | 17,472,320 | 18,937,280 | 19,758,240 |
| 12 月 | 17,526,720 | 17,753,520 | 18,823,920 |
| 年最高負載 | 21,693,200 | 22,874,960 | 23,227,440 |

註：該資料為台電公司所有，不可直接引用。若需引用請直接向台電公司詢問

資料來源：台灣電力公司電力調度處

在設備裝置容量(發電量限制)方面，則依照台灣電力公司網站上所提供之 94 年 1 月資料做為模式依據。其資料整理如表 5.7 所示，由表中可得知，核電廠裝置容量約為每月 514.4 萬瓩，而火力發電則為 1,772.3 萬瓩，水力發電為 413.1 萬瓩。

表 5.7 生產設備裝置容量表

| | 94 年 1 月(千瓩) | 構成比(%) | 較上年同期成長(%) |
|------|--------------|--------|------------|
| 火力發電 | 17,723 | 65.6 | -0.9 |
| 水力發電 | 4,131 | 15.3 | 0.0 |
| 核能發電 | | 19.1 | 0.0 |
| 核一廠 | 636*2 | 4.73 | 0.0 |
| 核二廠 | 985*2 | 7.33 | 0.0 |
| 核三廠 | 951*2 | 7.05 | 0.0 |
| 合計 | 26,998 | 100 | -0.9 |

資料來源：台灣電力公司

在放射性核廢料成本參數方面，參數設定如下所述：

低放射性核廢料方面，本研究將該項目成本分為運輸、處理與最終處置三項。而依照台灣目前核能發電後端營運所估計之低放射性廢料總處理成本約為每度電 0.017 元。而以民國 93 年所產生之低放射性核廢料 664 桶為基準，而該年的低放射性廢料提撥金約為 644,980,000 元，即每桶低放射性廢料總成本約為 97 萬 1 千元。而其中運輸、處理與最終處置細項成本，因資料取得不易故無法得知。在案例中，即以低放射性核廢料每桶總成本做為參數。

在高放射性核廢料方面，本研究將高放射性核廢料(用過核燃料)之成本項目分為運輸、貯存與最終處置成本。依照目前核能後端營運總費用之估算並無各種物流作業之細項成本，因此本研究以台灣目前之核能後端營運基金資料做為參數之參考依據。而核能後端營運基金之成本項目資料如下所示：「我國核能後端營運計畫以最為完備的瑞典當作參考模式，並配合我國國情以運轉中六部核能機組為計算基礎，假設核能後端營運工作若全部於 76 年執行，約需 1,152 億元，其中用過核燃料之運輸、貯存及最終處置佔 60%，拆廠(使土地資源能再度供開發利用)與拆廠廢料之最終處置佔 30%，以及運轉廢料之最終處置佔 10%。若核能後端營運工作全部於民國 89 年執行，則須考慮物價調整因素後，將原估算之總費用換算至民國 89 年幣值，合計約須新台幣 1,650 億元。」

因此，以目前核能發電後端營運基金每度電提撥 0.17 元，並依照上述核能發電後端營運工作之百分比，可得出每度電之高放射性廢料之運輸、貯存與最終處置提撥基金為 0.102 元。再依照民國 93 年核能發電所需原料約為 697,426,470 公克，用過核燃料之後端提撥金為 3,869,880,000 元，即核能發電中每公克用過核燃料需負擔運輸、貯存及最終處置為 5.55 元。至於三項成本之細項，因台電公司無法提供確切數據，故本研究採用與我國使用相似反應器之國家「瑞典」的比例數據進行參數估算。依照瑞典核燃料公司(SKBF)之用過核燃料運輸、中期貯存與最終處置的比例約為 5：6：3，因此可求算出用過核燃料之每公克運輸成本約為 1.982 元，中期貯存成本約為 2.3786 元，最終處置成本約為 1.2514 元。

除高放射性與低放射性廢料外，由於核能發電在結束商轉後所進行拆廠而產生的運轉廢料亦包含在逆向供應鏈之成本項目中。台灣目前核電廠作法則是預先提撥該項成本，而在運轉廢料提撥金中，每度電需負擔 0.051 元。其整理表 5.8 如下所示。

表 5.8 核廢料成本項目表

| 成本項目 | 單位 |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 低放射性核廢料 (包含運輸、處理與最終處置成本) | 971,000 元/桶 (0.017 元/度) |
| 高放射性核廢料 | |
| 運輸成本 | 1.982 元/克 (0.03643 元/度) |
| 處理成本 | 2.3786 元/克 (0.04371 元/度) |
| 最終處置成本 | 1.2514 元/克 (0.02186 元/度) |
| 運轉廢料 | 0.051 元/度 |

資料來源：自行整理

在核能發電之物流風險中，主要影響因素為輻射影響範圍、風險發生機率、附近人口密度、生命價值成本，與放射性物質衰敗程度值幾項。茲分述如下：

● 輻射影響範圍

在核能作業流程中，若不幸發生核電廠外洩意外事故時，具有放射性之核廢料會立即影響附近居民。以學理來說，輻射影響範圍之安全距離為：放射性核廢料所散出之輻射劑量與距離平方成反比。在低放射性核廢料方面，核能影響範圍以目前台灣所公告之範圍為基準，並依照安全設計為考量，將輻射影響範圍設定為半徑 5 公里。在高放射性核廢料影響範圍中，則採用前蘇聯所使用之最高標準，即為半徑 30 公里做為依據。

在影響人口數方面，則以目前台灣核能發電廠所在位置(台北縣金山鄉、萬里鄉與屏東縣恆春鎮)之人口密度為基準。而依照國立台中女中 GIS 中心所提供資料顯示，該三區之人口密度約為每平方公里 301~1000 人。而本研究採保守估計，以每平方公里 1000 人做為人口密度基準值。另一方面，由於核廢料最終處置屬於長期性影響，因此會受人口成長率影響。故在人口成長方面，研究中採用行政院主計處所提供之人口統計年鑑資料進行查詢，並配合前述之人口密度基準值做調整。

● 風險機率

本研究將核能發電逆向物流風險分為運輸、處理，與最終處理風險三種。在運輸風險方面，由於台灣核能發電之核廢料現況存在著國際因素，而無法運出國外進行回收處

理，因此只會存在島內運輸。故本研究在運輸風險值中，則用道路風險值來代替運輸風險。根據美國對道路安全所做的研究指出，在公路運輸中每公里所發生事故機率為 10^{-6} 。在本研究中假設低強度與高強度廢料載具相同，均為公路運輸，故採用相同之風險機率值。而處理風險與最終處理廠風險方面，因台灣目前做法將高放射性核廢料進行存放，等待找尋到適當地點時，再進行搬移動作。低放射性核廢料則進行減容與固化等處理作業。而上述作業均於核能電廠中進行，故本研究中對於該兩項風險值採用核能電廠輻射外洩風險來做為事故發生機率。而有關核電廠輻射外洩風險則參考英國衛生部曾公佈過的機率值為每人每年約為 1/10,000,000。風險值如下表 5.9 所示：

表 5.9 風險機率表

| | 運輸風險 | 處理風險 | 最終處理廠風險 |
|-------|----------|-----------|-----------|
| 低強度廢料 | 0.000001 | 0.0000001 | 0.0000001 |
| 高強度廢料 | 0.000001 | 0.0000001 | 0.0000001 |

資料來源：自行整理

● 生命價值成本

在核能發電物流風險中，因民眾所關心之核能發電風險為電廠發生事故後對民眾之影響。故本研究所計算之各項物流風險即以各種物流作業所產生事故(運輸、處理，最終處置)而會影響多少民眾數為基準。並利用該參數「生命價值成本」將各項風險值轉換為成本單位，使模式在計算與分析上較容易。

生命價值成本參數方面，本研究是以美國對 911 事件所計算之生命價值成本為參考。在該事件中，美國賠償受害者每人 20 萬美元，折合台幣則約為 620 萬元整。

由上述參數(影響範圍、風險機率，與生命價值成本)代入本研究所建構之各項風險成本公式即可求出各項風險成本。

運輸風險成本方面，因台灣目前仍將低放射性與高放射性核廢料置於核能電廠中進行處理與貯存，故無法計算該項風險成本。

最終處理風險成本方面，藉由各項參數代入公式，並配合圖 3.2 與 3.2 之衰敗係數圖，即可求出每一座高放射性核廢料最終處置廠的風險成本約為 118,790,548 元;低放射性核廢料最終處置廠風險成本約為 1,625,735 元。而由於低放射性與高放射性最終處置風險長達 300 年與 3000 年，因此再加入折現值概念，以保守折現值 3.5% 估算，則高放射核廢料最終處置風險成本約為 37,868,960 元;低放射性核廢料最終處置風險成本約為 555,188 元。

處理風險成本方面，由於台灣目前做法仍將高放射性與低放射性核廢料均置於核能發電廠中進行處理，其風險值經由計算後可得知高放射性處理風險成本約為 1,752,740 元，而低放射性處理風險成本亦為 48,694 元。

5.3 演算流程與結果分析

本研究所建立之核能發電綠色供應鏈可分為兩大部份，一是核能發電供應鏈作業流程模式，另一個是核能發電風險值模式計算。

第一部份：核能發電供應鏈作業流程模式是將現今核能發電之供應鏈流程從原料生產至廢料回收之各項處理作業藉由數學規劃來表示，並藉由計算結果與核能發電現況做比較。

第二階段再加入核能發電風險值模式概念來求算核能發電之物流風險對於整體發電績效的影響程度。

5.3.1 核能發電供應鏈作業模式求解結果

本研究透過數學規劃軟體 lingo8.0 來進行模式求解。求解流程可分為兩階段，第一階段是與現況比較，第二階段則是綠色供應鏈核能發電作業模式。

在第一階段中，模式的決策變數共有 949 個，限制式 787 條，而正向供應鏈與逆向供應鏈之目標式權重設定為 0.5 與 0.5。演算結果可從電力供應市場與需求市場分別進行分析，如下圖 5.1 所示：

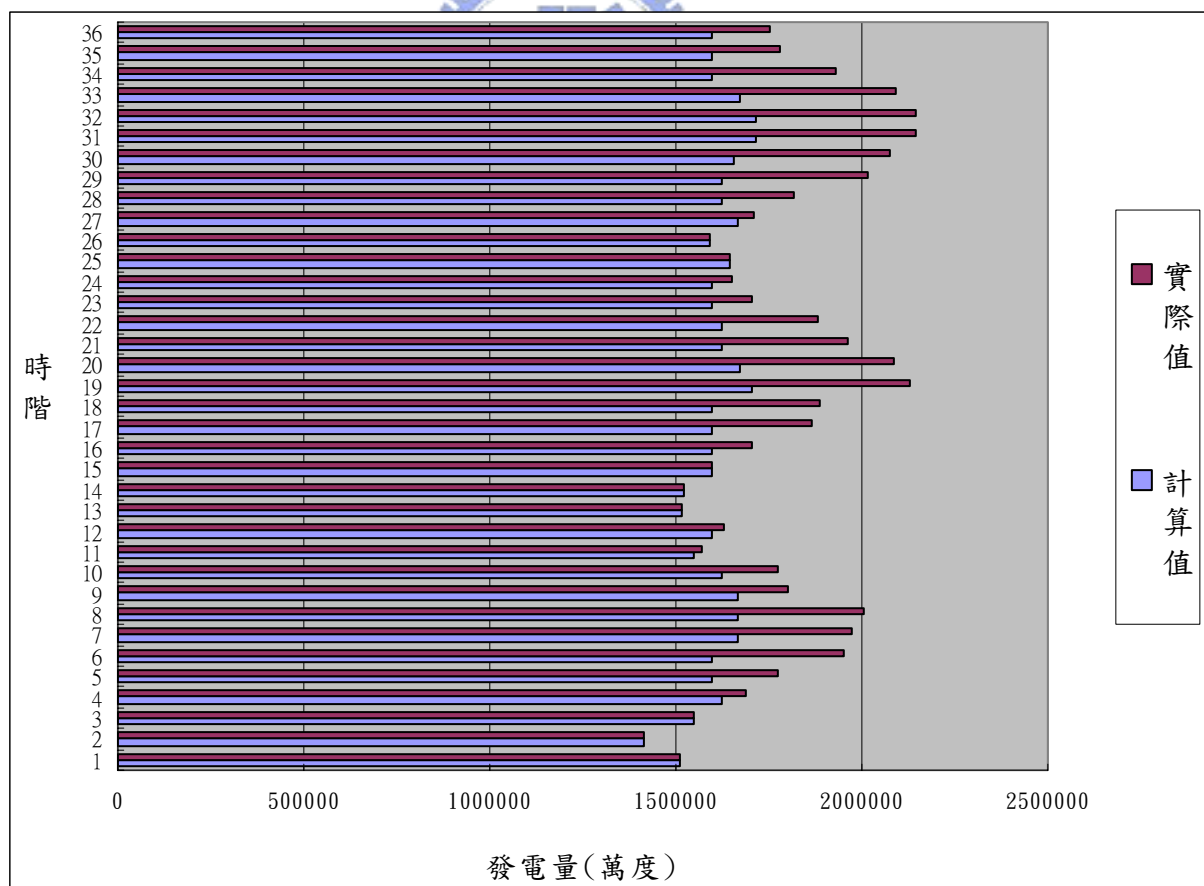


圖 5.1 求解比較圖

資料來源：自行整理

上圖 5.1 為電力供給與需求之比較圖，其縱座標月份 1~36 為三年共 36 個月，橫座標則為發電量。由上圖可知，由本模式之計算出之發電量與實際值在部份月份均有一段落差，其原因在於模式中所採用之火力發電、水力發電，與核能發電之總和發電量較實際市場電力需求量少，故僅無法運用上述三種發電型態來完全滿足市場需求量。而此情形也符合目前台灣電力政策：「電業自由化」情形。但由上圖可發現，目前市場中 80% 的需求電力仍由火力、水力，與核能發電提供。且台灣目前仍將上述三種發電型態被視為基載電力，藉以提供民眾大部份之電力需求。而剩餘 20% 則由其他發電方式或向民營電廠購入電力來提供。

而從市場需求實際值可看出，整體電力需求市場在過去三年有逐漸成長趨勢，而在 93 年 4 月至 12 月之電力需求成長更較 92 年同期成長明顯。由此可看出，透過火力、水力，與核能發電來支持台灣目前電力需求市場之情形已越來越吃緊，而火力、水力，與核能發電之供給量若無法因應增加時，則台灣電力供給市場勢必會重新洗牌。藉此，台灣政府則需極力開發新能源來滿足民眾之電力需求。

由圖 5.1 亦可知，台灣目前電力需求是由火力、水力，與核能發電三種型態供給 80% 的電力，但其中的發電結構是否與現況相同仍應進行討論。而本研究所計算出的各種發電型態電力供給量圖表，如圖 5.2 所示。

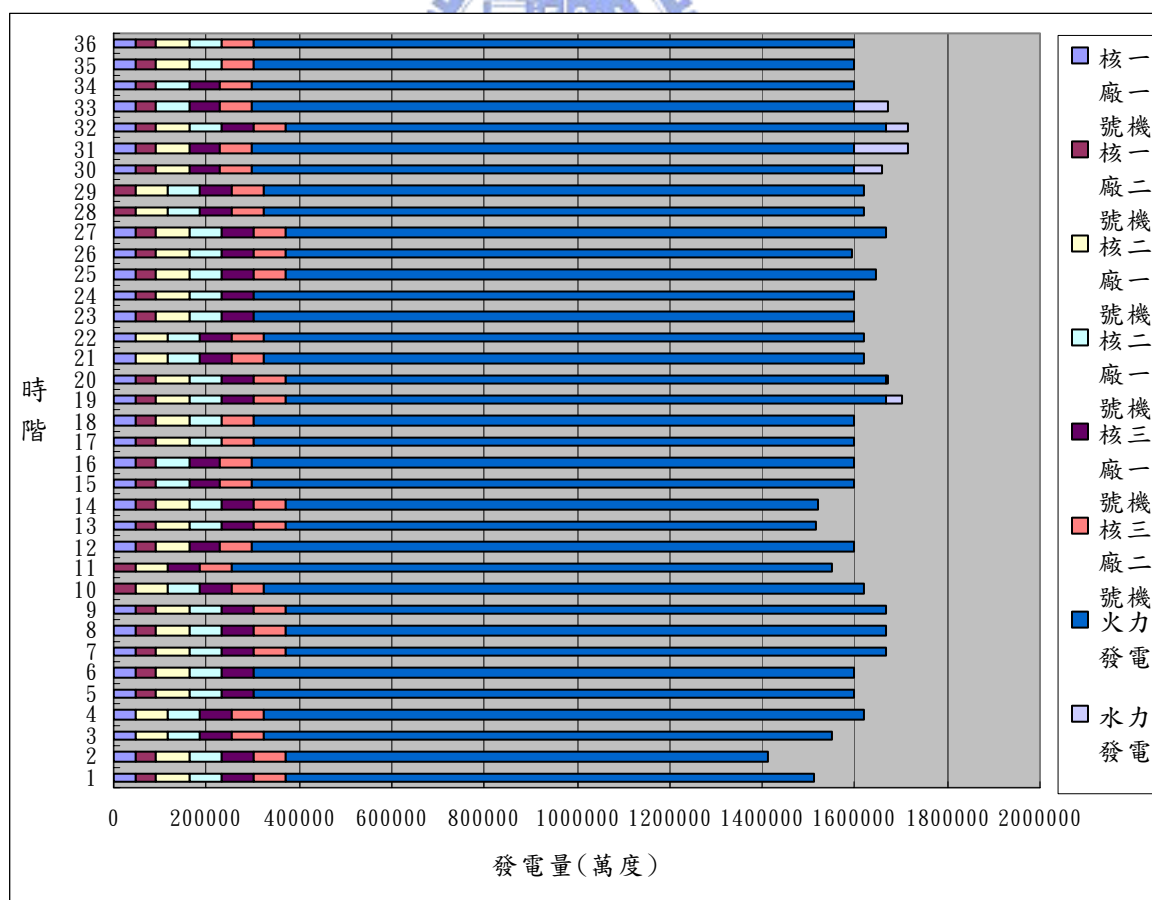


圖 5.2 各種發電型態之電力供應圖

資料來源：自行整理

由上圖可看出目前火力發電仍屬電力供給市場中之主要發電型態，而核能發電之發電量較火力發電少，原因在於各機組之裝置容量而有所限制。以台灣現況來說，三座核能發電廠共六部機組，其裝置容量僅有 514.4 萬瓩，而火力發電則有 1,772.3 萬瓩。由圖 5.3 可看出，各核能發電機組之發電量在整體電力供給中仍占有一定比例，其餘部份則由火力與水力發電供應，此情形與台灣目前發電情形相同。而在火力發電與水力發電兩種發電型態中，由於火力發電之裝置容量較大，且發電成本亦較水力發電便宜，故水力發電在本研究的模式結果中僅為輔助火力發電之發電量不足時，所進行臨時因應的發電型態。另一方面，以現今發電效益來看，水力發電目前仍無法成為主要的發電方式，此與研究結果相同。

而在核能發電的大修排程與發電型態中，雖然本研究已假設各核能發電廠的大修時程(W_t^i)，但在其它非大修時程中，模式仍允許發電變數(G_t^i)可為 0，即該時階內該核能機組不進行發電作業。由模式計算結果可看出，除了在該時階內為大修排程，否則均進行發電作業。而圖 5.2 亦可看出，各核能機組在發電狀態時，其發電量均為滿載現象，此亦顯示出核能發電在現今作業模式中仍為效益最高的發電型態。

由上述電力供給與需求面來看，本研究所建構之核能發電供應鏈作業模式與現況相比較差異不大。因此進行下一階段加入綠色供應鏈風險模式之求解。

5.3.2 核能發電綠色供應鏈模式求解結果

第二階段求解流程主要是在模式中加入作業風險概念與目標式之標準化作業。依前章節所述，本研究將核能作業風險分為運輸、處理，與最終處置三項風險，而由於台灣目前核能發電現況尚無運輸問題，故個案研究中無加入該項風險。在第二階段中，模式的決策變數共有 996 個，限制式 859 條，目標式權重設定與第一階段相同。而在標準化作業方面，則加入公式(4.1)~(4.3)之標準化公式進行求解計算。由初步運算得兩項目標式之最大值與最小值如下表 5.10 所示：

表 5.10 目標式初步試算表

| | 最大值 | 最小值 |
|----------|--------------|------------|
| 正向供應鏈目標式 | 448623900000 | 0 |
| 逆向供應鏈目標式 | -587782400 | -875432600 |

資料來源：自行整理

將表 5.10 之目標式初步試算結果代入模式進行標準化求解後，其求解結果分析如下所述。

- 目標值數據方面

藉由加入核能發電作業風險與標準化後所得到之決策變數數據，再代回正向供應鏈目標式(4.4)與逆向供應鏈目標式(4.5)後，可得兩目標式之目標值。目標值如下所示：

表 5.11 目標值數據表 單位：元

| | |
|----------|-----------------|
| 正向供應鏈總利潤 | 376,252,520,290 |
| 核能發電 | -6,367,970,569 |
| 火力發電 | 410,873,697,600 |
| 水力發電 | -28,253,206,740 |
| 逆向供應鏈總成本 | 1,131,736,443 |
| 作業總成本 | 1,003,853,961 |
| 風險總成本 | 127,882,482 |
| 營運總利潤 | 375,120,783,847 |

資料來源：自行整理

由上表 5.11 可知，核能發電在整體供應鏈作業中已為負值狀態。其原因在於核能發電過程中，多次的啟動係數造成固定成本項目的增加，且核能發電量亦不足以支付該項成本的結果。實際上應考量該項成本而考慮將核能發電機組大規模停機，或使其連續發電數個時階，已應付該項成本。

但在實際需求限制條件中，部份需求量過大的時階又需要核能發電的支援，因此使核能發電機組在啟動與停機作業中不停轉換，因此造成核能發電作業成本上的負擔。

- 發電變數方面

在發電變數方面，由於加入風險值概念與標準化過程後會造成核能發電總成本上升。而在成本收益面中，收益不變但成本上升會造成核能發電效益的降低。因此，加入風險值與標準化流程後，發電變數亦會有所變動。表 5.12 則為加入核能發電風險值後的發電變數表。

由表 5.12 可知，加入核能發電風險值與標準化後對核能發電週期產生相當大的影響。在部份核能機組的大修期間前後與非夏季月份可看出有許多停機不發電的情形產生。其原因在於每次核能發電停機再啟動時，必需負擔核能發電啟動成本，因此選擇在大修期前後不發電則可省下啟動成本。另一方面，非夏季月份電力需求量較不吃緊，故採用火力與水力發電即可因應當時需求。而以夏季與非夏季月份來看，在發電時階數量中，總共有 20 個時階，其中夏季月份即占 15 個時階，此顯示加入風險值後，礙於電力需求限制下，核能發電仍選擇在夏季月份進行發電狀態。

表 5.12 發電變數表(加入核能發電風險值)

| 發電變數 G | 1 月 | 2 月 | 3 月 | 4 月 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 | 12 月 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| 機組 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0* | 0* | 0 |
| 機組 2 | 0 | 0 | 0* | 0* | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 機組 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 機組 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0* | 0* |
| 機組 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 機組 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0* | 0* | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 發電變數 G | 1 月 | 2 月 | 3 月 | 4 月 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 | 12 月 |
| 機組 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 機組 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0* | 0* | 0 | 0 |
| 機組 3 | 0 | 0 | 0* | 0* | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 機組 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 機組 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0* | 0* | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 機組 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0* | 0* |
| 發電變數 G | 1 月 | 2 月 | 3 月 | 4 月 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 | 12 月 |
| 機組 1 | 0 | 0 | 0 | 0* | 0* | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 機組 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 機組 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0* | 0* | 0 | 0 |
| 機組 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0* | 0* | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 機組 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0* | 0* |
| 機組 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

註：1 代表發電，0 代表不發電，* 代表該時階為大修狀態

資料來源：自行整理

● 發電量方面

在發電量部份，由模式結果看出在核能發電進行發電作業的時階中，核能發電角色已轉變為補足火力與水力發電之不足的發電型態，即傾向於在電力需求量較大之時階中，核能發電才進行發電作業。在火力與水力發電方面，經由導入核能風險模式後，火力發電仍屬是基載發電量，以供應大部份之電力需求；而水力發電則轉變為發電量第二大的發電方式。且在部份電力需求量大之時階中，水力發電量之重要性越來越高，而此時水力發電效益已超過核能發電效益。由此可得知，經由導入風險值概念後的核能發電作業，使核能發電效益因需負擔潛在的風險成本，故發電效益降低，而僅能做為支援性的發電型態，無法成為基載電力。求解結果如下圖 5.3 所示：

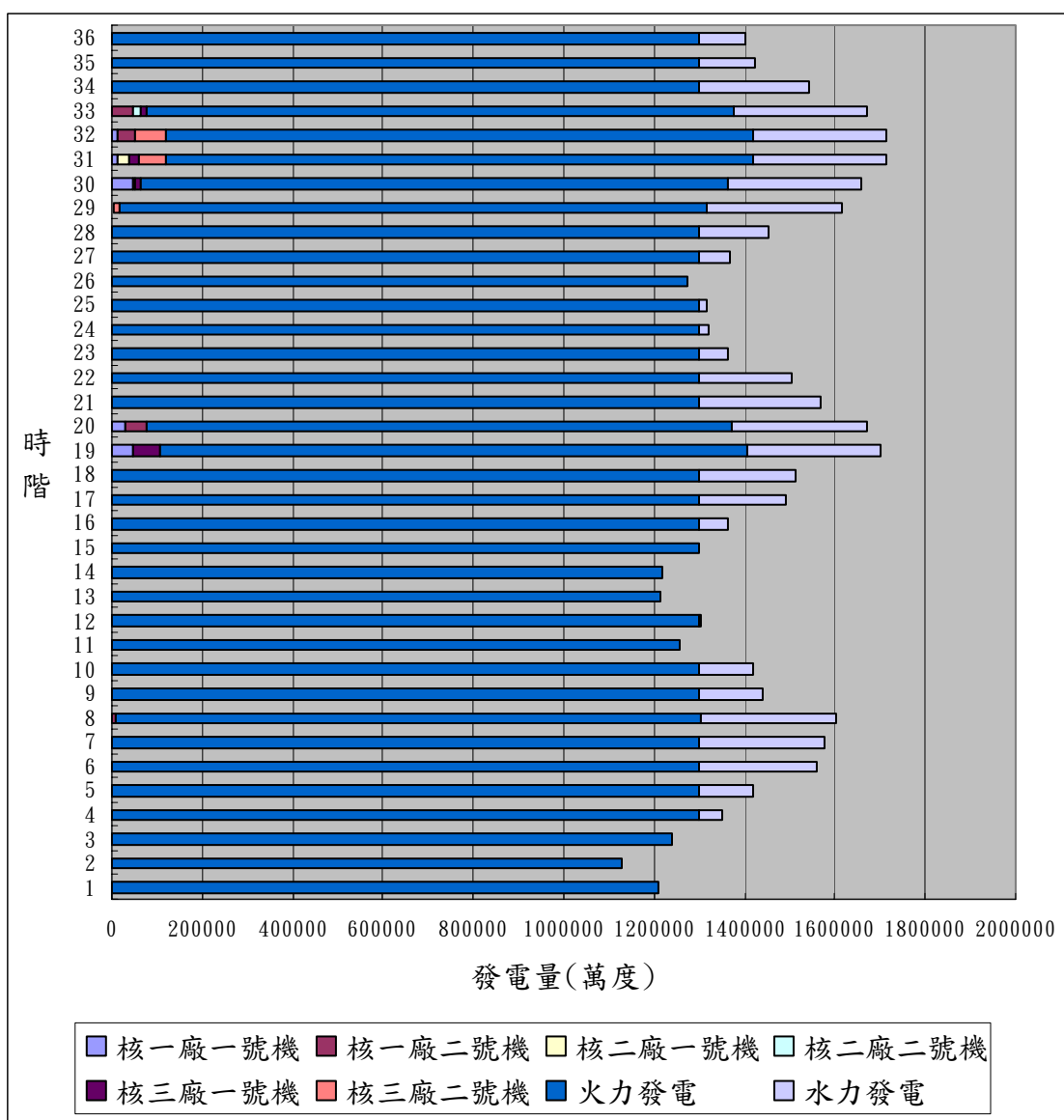


圖 5.3 發電量圖(加入風險值)

資料來源：自行整理

● 核能發電係數方面

在核能發電係數方面，加入核能發電作業風險模式與目標式標準化流程後，各項發電係數結果如表 5.13 所示。

而在發電時階方面，總發電時階由原本 182 階大幅降為只剩 20 階，降低幅度高達 90%。而停機時階方面，各核能發電機組的停機狀態(未包含因大修狀態而造成的停機作業)為核一廠共停機 54 次，核二號 61 次，核三廠 57 次。因此可判斷出，當核能發電成本有所增加時，整體核能發電作業以核一廠與核三廠較有效益，而核二廠則產生較多的停機時階。換句話說，核二廠為三座核能發電廠中較無發電效率，而核一與核三廠之發電效率則較高。在啟動時階方面，核一廠二號機需有較多次的啟動作業，原因在於該機組之發電時階均無連續，此種情形會造成啟動成本的增加與人力作業時間的花費。在實際作業方面，應避免該種情形發生而造成作業效率的下降。

表 5.13 核能機組統計時階表

| 機組 模式別 | | 核一廠 一號機 | 核一廠 二號機 | 核二廠 一號機 | 核二廠 二號機 | 核三廠 一號機 | 核三廠 二號機 |
|---------------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 停機 時階 | 未包含核能 發電風險模 式 | 0(次) | 0(次) | 0(次) | 0(次) | 0(次) | 0(次) |
| | 包含核能發 電風險模式 | 27(次) | 27(次) | 30(次) | 31(次) | 28(次) | 29(次) |
| 發電 總時 階 | 包含核能發 電風險模式 | 5 | 5 | 2 | 1 | 4 | 3 |
| 啟動 時階 | 包含核能發 電風險模式 | 2 | 4 | 2 | 1 | 2 | 2 |

資料來源：自行整理

而在另一方面來看，由發電時階與研究年期(民國 91~93 年)之影響可得知，每研究年期之發電時階均有小幅成長，在第一年時總發電時階為 1 階，第二年為 4 階，第三年則有 15 階(如圖 5.4 所示)。其主要原因在於每年的電力需求量均有小幅成長，但電力總供應量卻無增加，因此核能發電時階中呈現逐年成長現象。而由表可看出，研究年期第三年之火力與水力總發電量明顯不足供應電力之最低需求量，故許多時階均需要核能發電進行支援作業。

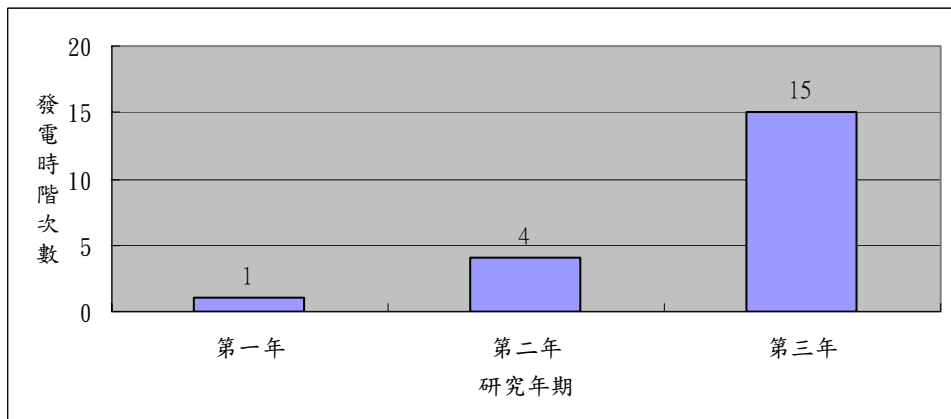


圖 5.4 發電時階次數圖

資料來源：自行整理

● 核能發電作業風險方面

在核能發電作業風險方面，研究中將處理風險界定為每座核電廠與處理廠所產生風險做為計算單位，即該座核電廠若在該年有發電作業時，即會產生核廢料處理風險。而在最終處置風險中，因為在核能發電中必定會產生低放射性與高放射性核廢料。故本研究以總時階中是否有發電作業來表示是否會產生核廢料，進而會衍生出該項風險。求解結果如下表 5.14 所示。

由表可看出，核二廠與核三廠在第 1 年均無發電作業，因此無產生任何放射性核廢料且風險值為零，而在其它時階中均有部份月份有發電作業，故會產生放射性核廢料且會衍生出風險問題。在最終處理風險方面，因總時階中仍有部份月份有進行核能發電作業，因此會產生高放射性與低放射性核廢料的最終處理作業，且造成該項作業風險的產生。

表 5.14 風險成本表

(單位：元)

| 處理風險 | | | | |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 廠別 廢料型態 | 年期 | 第一年 | 第二年 | 第三年 |
| | | | | |
| 低放射性核廢料 | 核一廠 | 48,694 | 48,694 | 48,694 |
| | 核二廠 | 0 | 48,694 | 48,694 |
| | 核三廠 | 0 | 48,694 | 48,694 |
| 高放射性核廢料 | 核一廠 | 1,752,740 | 1,752,740 | 1,752,740 |
| | 核二廠 | 0 | 1,752,740 | 1,752,740 |
| | 核三廠 | 0 | 1,752,740 | 1,752,740 |
| 最終處置風險 | | | | |
| 低放射性核廢料 | 555,188 | | | |
| 高放射性核廢料 | 37,868,960 | | | |

資料來源：自行整理

● 核能發電型態之成本組成

在成本項目方面，因不同核能發電廠有不同之單位成本與發電量，因此成本組成亦有所不同，而由成本組成項目中即可得知該電廠的各項成本與發電效益為何。首先是成本組成項目部份，由圖 5.5、5.6，與 5.7 可知，加入風險概念後，核電廠主要成本項目為啟動成本、發電成本、大修成本，與燃料成本四種。而在圖 5.7 核二廠成本項目圖中，由於核二在研究結果中發電量小，因此發電成本比例較其它兩座核電廠小，但仍在核二

廠成本項目比例中占 3.53% 左右。而在啟動成本與大修成本方面，由於其屬於固定成本項目，因此在研究結果所計算出發電量過低的情形下，啟動與大修成本即在成本項目比例中因此變大。由此可知，在核能發電量較低之情形下，如何減少核能機組的啟動與大修次數並能配合電力需求是核能發電廠規劃的重點之一。

而在風險成本方面，三座核能發電之放射性廢料風險成本均占整體成本有一定比例，三座核能發電廠均占 5% 左右，因此推斷核能發電風險成本在現有參數計算之下，其對整體核能發電績效可能影響不大，但仍會產生一定程度的影響。

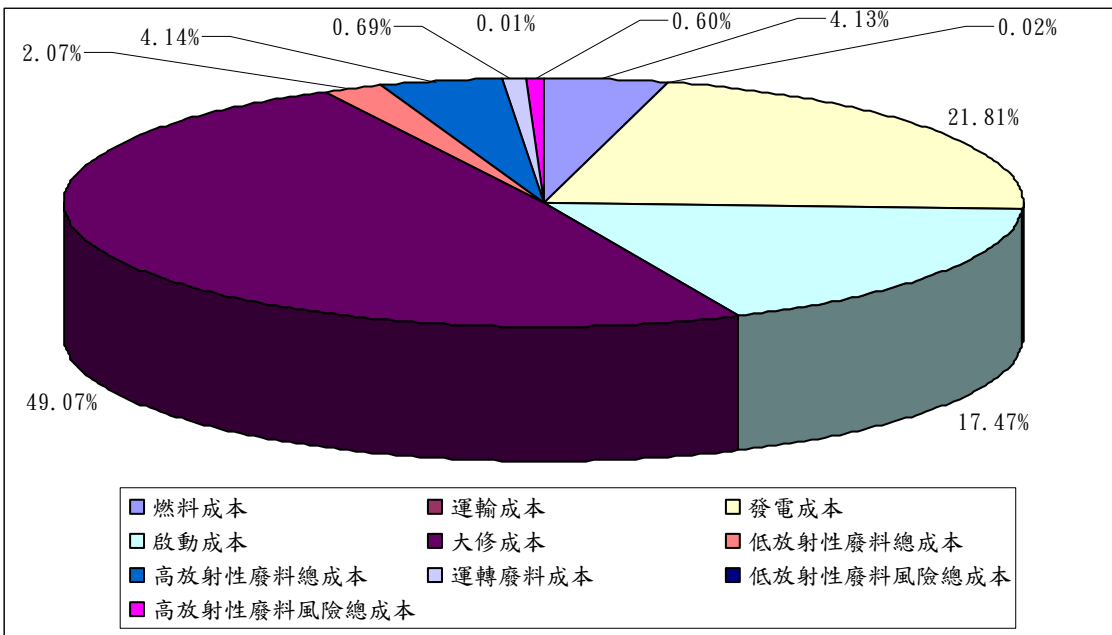


圖 5.5 核一廠成本項目圖

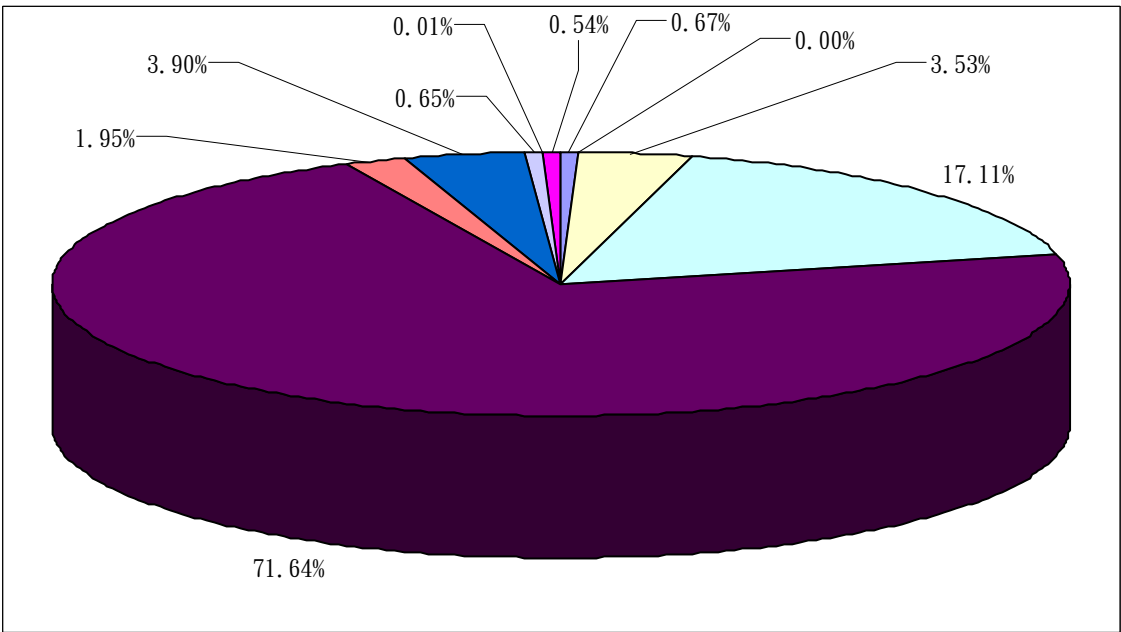


圖 5.6 核二廠成本項目圖

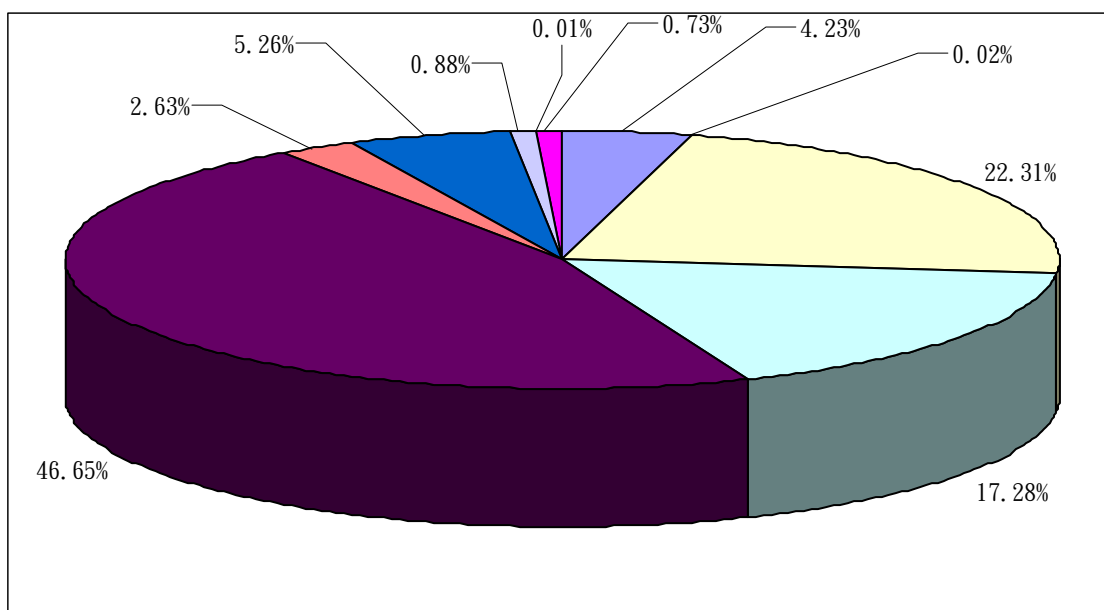


圖 5.7 核三廠成本項目圖

註：圖 5.6 與 5.7 之圖例與圖 5.5 相同

資料來源：自行整理



第六章 敏感度分析

在本研究中所建構之核能發電綠色供應鏈營運模式中，部份參數之變動可能會影響整體求解結果，因此採用敏感度分析對參數做細部調整，藉以觀察其變化情形。研究將針對目標式權重、電力需求限制式，與最近所公佈的京都議定書對發電型態之影響，三項因素來進行敏感度分析。

6.1 目標式權重敏感度

由於本研究在多目標求解過程中是採用權重法進行計算，因此給定不同權重或許會對目標式造成變動，亦或者不受到影響。而該項資訊需透過目標式權重敏感度進行再次求解才可得知變化情形。

研究中在權重部份初始設定為正向目標值($W_1 = 0.5$)，逆向目標值($W_2 = 0.5$)予以進行運算。在此部份，茲對各目標式之權重係數進行(± 0.1)至 1.0 即停止的敏感度分析。而上述敏感度可分為 11 種情境，茲敘述如下。

表 6.1 目標式權重敏感度分析表(一)

| | 0.0/1.0 | 0.1/0.9 | 0.2/0.8 | 0.3/0.7 |
|--------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 核能發電量 | 590502.318 | 590520.316 | 590502.325 | 590142.33 |
| 核能正向利潤 | -1363329946 | -8437587194 | -4891788078 | -13554593657 |
| 正向總利潤 | 3.6207E+11 | 3.74183E+11 | 3.77729E+11 | 3.69066E+11 |
| 逆向總成本 | 1048792767 | 1129965585 | 1091510853 | 1131124443 |
| 核能總利潤 | -2412122713 | -9567552779 | -5983298931 | -14685718100 |
| | 0.4/0.6 | 0.5/0.5 | 0.6/0.4 | 0.7/0.3 |
| 核能發電量 | 590502.324 | 590523.33 | 590502.32 | 590502.319 |
| 核能正向利潤 | -4087900582 | -6367970570 | -2748001947 | -8801267692 |
| 正向總利潤 | 3.78533E+11 | 3.76253E+11 | 3.84661E+11 | 3.78608E+11 |
| 逆向總成本 | 1133537867 | 1131736443 | 1091510841 | 1089709405 |
| 核能總利潤 | -5221438449 | -7499707013 | -3839512788 | -9890977098 |
| | 0.8/0.2 | 0.9/0.1 | 1.0/0.0 | |
| 核能發電量 | 590493.323 | 590501.62 | 6186932.83 | (單位：萬度) |
| 核能正向利潤 | 926879719.6 | -1363340840 | 52798805522 | (單位：元) |
| 正向總利潤 | 3.88336E+11 | 3.86046E+11 | 4.6547E+11 | (單位：元) |
| 逆向總成本 | 1047667099 | 1089709405 | 10649271161 | (單位：元) |
| 核能總利潤 | -120787380 | -2453050245 | 42149534361 | (單位：元) |

註：權重係數中前者為正向供應鏈權重係數，後者為逆向供應鏈權重係數

資料來源：自行整理

在進行目標式權重敏感度分析後可發現兩個目標式權重之各種組合，除了(1.0/0.0)之組合外，其它組合之核能發電量均在 590,000 左右。因此可將目標式權重敏感度分析分為兩部份進行討論，一是目標式權重在(0.9/0.1)到(0.0/1.0)之 10 種情境；二是目標式權重在(1.0/0.0)到(0.9/0.1)之情境，茲分述如下。

6.1.1 情境討論一

在該情境中，核能發電供應鏈模式在加入綠色供應鏈的風險值概念與標準化流程後，研究對權重進行敏感度調整仍無法影響核能發電量與整體供應鏈績效。會產生該種情形主要原因在於，雖然核能發電風險值在總成本中所占比例較少(詳見圖 5.6~5.8)，但在經過目標式標準化流程後，即反應出逆向供應鏈中作業成本與風險成本的重要性，且該項重要性遠超過正向供應鏈中核能發電所產生的利潤。而在核能發電總利潤方面，部份權重敏感度項目呈現負值原因在於該權重敏感度項目所求得之核能發電的作業上進行較多次的啟動作業，使得啟動成本過高導致核能發電利潤為負。因此實際營運為避免利潤為負的情形發生，在選擇核能發電時階時，應避免核能發電有過多啟動與停機作業。雖然整體核能發電並未受權重變動而影響，但仍需注意核能發電細部變數是否有產生變動。而核能發電細部變數可採用發電時階進行分析。

在核能發電之總發電時階中，主要分析對象可針對夏季非夏季月份之差異與研究年期(民國 91~93 年)之變動兩項目來進行分析。

在研究年期方面，由圖 6.1 可看出不同權重係數中，各年期之變化趨勢均相同，第三年發電次數最多，其次為第二年，而第一年最少。由此可看出，不同目標式權重仍對發電時階次數無影響。而在夏季與非夏季月份之差異方面如圖 6.2 所示，不同權重係數仍有相同情形，即在夏季月份時，需藉由核能發電來補足電力需求量之不足，而非夏季月份所需用到核能發電月份則較少。

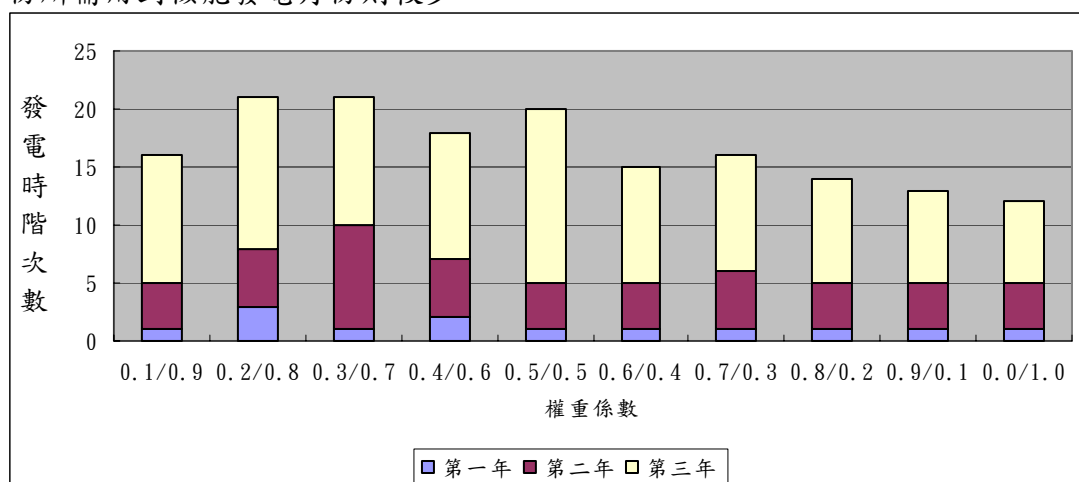


圖 6.1 不同目標式權重之發電時階次數圖(一)

資料來源：自行整理

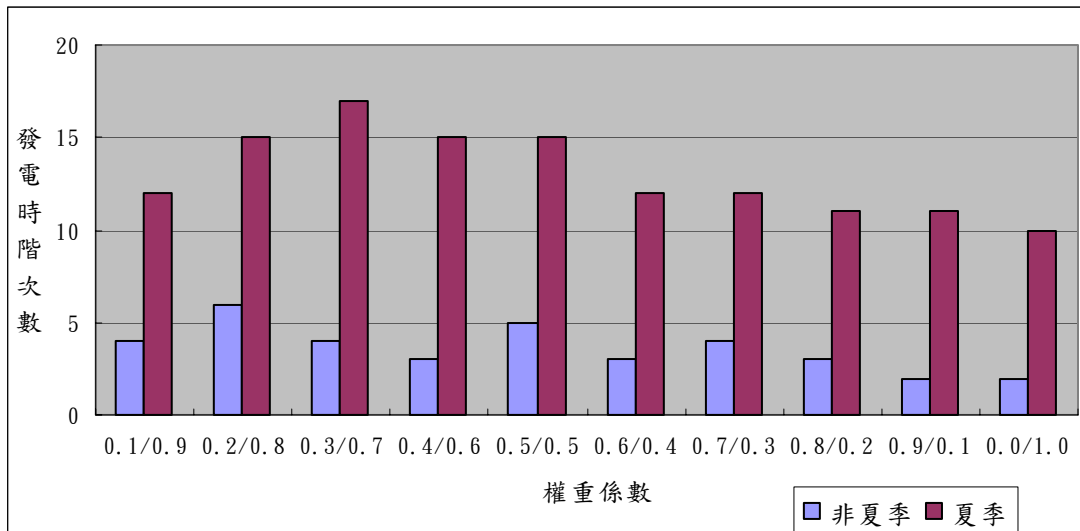


圖 6.2 不同目標式權重之發電時階次數圖(二)

資料來源：自行整理

由此可知，從整體核能發電量與各機組之發電時階來看，在上述 10 種不同權重之情境下，其對核能發電並無造成影響，且核能發電量(590,000 萬度)即為整體電力需求市場中，火力與水力發電提供電力後，仍需藉由核能發電來補足的部份。而該發電量大部份集中在第三年之夏季月份。

6.1.2 情境討論二

該討論主要是針對權重係數在 1.0/0.0 與 0.9/0.1 之間的變化情形，間距則採用 (± 0.01)。藉由設定間距後，可將權重係數再劃分為 11 種情形，如表 6.2 所示。由表 6.2 可看出，目標式權重係數從 1.0/0.0 變化至 0.97/0.03 的四種情形中，對核能發電整體績效均產生大幅影響，而從 0.96/0.04 開始之後的目標式權重變化即趨於平緩，且與情境討論一的情形相同，核能發電量均在 590,000 萬度左右。因此，目標式權重在 0.96/0.04 開始，研究中所界定之核能發電逆向供應鏈已大幅影響正向核能發電供應鏈之績效，使得正向供應鏈之核能發電量僅能發電 590,000 萬度來支援電力需求之不足。若核能發電量超過該值時，則會產生效益遞減情形發生。

而在核能發電總利潤方面，部份權重敏感度項目呈現負值原因在於該權重敏感度項目所求得之核能發電的作業上，進行較多次的啟動作業，而使得啟動成本過高導致核能發電利潤為負。實際營運為避免利潤為負的情形發生，在選擇核能發電時階時，應避免核能發電有過多啟動與停機作業。

表 6.2 目標式權重敏感度分析表(二)

| | 1.0/0.0 | 0.99/0.01 | 0.98/0.02 | 0.97/0.03 |
|--------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 核能發電量 | 6186932.83 | 2615214.66 | 749574.597 | 745530.253 |
| 核能正向利潤 | 85606870616 | 30439312692 | -1385667834 | -652480826.4 |
| 正向總利潤 | 4.98278E+11 | 4.30054E+11 | 3.86938E+11 | 3.88927E+11 |
| 逆向總成本 | 10649271161 | 4575548838 | 1402159297 | 1353256896 |
| 核能總利潤 | 74957599455 | 25863763854 | -2787827131 | -2005737723 |
| | 0.96/0.04 | 0.95/0.05 | 0.94/0.06 | 0.93/0.07 |
| 核能發電量 | 590505.319 | 590702.3 | 590502.32 | 590699.4 |
| 核能正向利潤 | -233271460.8 | -5.19E+09 | 927020080 | 9.3E+08 |
| 正向總利潤 | 3.87176E+11 | 3.82E+11 | 3.88336E+11 | 3.88E+11 |
| 逆向總成本 | 1089714508 | 1.13E+09 | 1047682394 | 1.05E+09 |
| 核能總利潤 | -1322985969 | -6.33E+09 | -120662314 | -1.2E+08 |
| | 0.92/0.08 | 0.91/0.09 | 0.9/0.1 | |
| 核能發電量 | 590502.3 | 590502.3 | 590501.62 | (單位：萬度) |
| 核能正向利潤 | -1.4E+09 | 1.45E+09 | 9003044398 | (單位：元) |
| 正向總利潤 | 3.86E+11 | 3.89E+11 | 3.96412E+11 | (單位：元) |
| 逆向總成本 | 1.05E+09 | 1.09E+09 | 1089709405 | (單位：元) |
| 核能總利潤 | -2.4E+09 | 3.61E+08 | 7913334993 | (單位：元) |

資料來源：自行整理

由上述可知，研究中所建構之核能發電綠色供應鏈模式在正向供應鏈目標值權重設定小於 0.96 且逆向供應鏈目標值權重小於 0.04 時，整體核能發電量僅以滿足最低需求為主，該現象表示核能發電已開始不具經濟效益，而轉變為支援性的發電型態。

而由圖 6.3 可得知，藉由目標式權重變化情形可將目標式權重分為兩區域：區域一為 1.0/0.0~0.96/0.04；區域二為 0.96/0.04~0.0/1.0。由區域大小可知，0.96/0.04~0.0/1.0 間的區域遠大於 1.0/0.0~0.96/0.04 間的區域。因此可判斷逆向供應鏈決策者(環保利益團體)與正向供應鏈決策者(核能發電單位)對核能發電之認知差異相當大。且在發電利潤方面，藉由模式所計算出核能發電利潤在區域一中平均利潤約為 240 億元，而區域二之平均利潤僅有 6 千萬元左右，兩者相差極大。透過上述可得知，由於正逆向決策者在區域認知差異與利潤差距過大的情形下，而造成現今『是否應採用核能發電?』已成為大家所爭論議題。

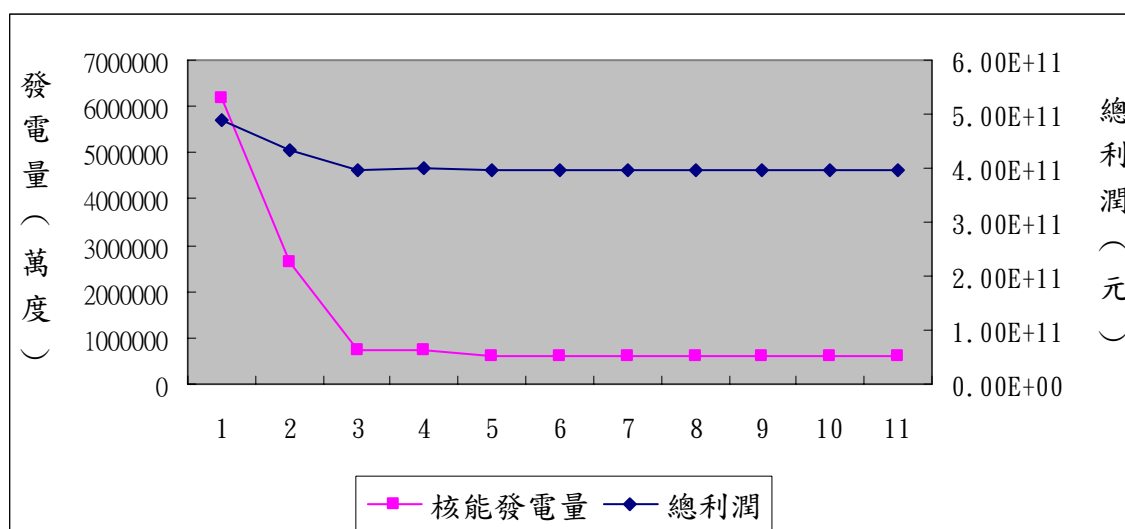


圖 6.3 不同權重情形下的核能發電量與總利潤變化圖

資料來源：自行整理

若以正逆向決策者角度來看目標式權重變化情形時，可將目標式權重值視為供應鏈決策者對核能發電的信心程度，此時 $0.96/0.04$ 即可解釋為正向供應鏈決策者(核能發電單位)對核能發電的安全信心程度高達 96% 以上，即認為核能發電是具有高度安全性的發電作業型態。反觀逆向供應鏈決策者(環保利益團體)則對核能發電相當不具信心，其信心水準低於 4%。在環保利益團體觀點認為，核能發電的逆向作業成本與風險值對整體核能發電效率影響相當大，並不像核能發電單位所說的不具太大影響。因此正逆向決策者對核能發電認知上存在著極大差異，而此與現況相符。

本研究認為，未來在進行核能發電決策時，可先調查正逆向決策者對核能發電的信心程度為何，若調查結果落在 $(1 \sim 0.96)$ 間則表示雙方決策者對於核能發電之認知差異不大，而在此種情形下執行核能發電作業較不會受到民眾抗爭行為。若調查結果落在 $(0.96 \sim 0)$ 間則表示雙方決策者認知差異大，此時若核能發電單位執意要進行核能發電計畫時，與環保利益團體之間的協調作業即變得相當重要，需讓該團體增加其對核能發電的信心程度，才能使整個核能發電計畫順利執行。

6.2 電力需求量敏感度分析

由於發電屬於特殊作業型態無法進行儲存來供應往後的電力需求，因此當期所需要的電力，即需要在當期進行發電與配電作業。由此可知，電力需求量的上下限制即為控制發電量多寡的一項重要參數。在本研究所構建的模式中，限制式(3.4)與(3.5)為有關整體電力需求量的限制式，故以此用做為電力需求量敏感度分析。

在上述二式中，原本模式概念是依照目前台灣發電產業現況代入參數，在電力需求上限是以月尖峰負載為基準，下限則以台灣目前所執行之發電政策，以火力、水力，核

能三項發電提供 80% 電力為主。該項政策主要依據即在我國政府對於上述三種發電型態之發電政策設定其發電供給量約滿足總需求量之 80%。而在電力需求量上限無法單獨變動之情形下，本研究選擇核能發電綠色供應鏈模式中的電力需求量下限來做敏感度分析，將原始電力需求量下限為上限的 80% 為準，以 5% 為基準往下調低。期望藉由電力需求量下限可看出，政府在發電政策上若有變動時，火力、水力，與核能發電之發電量變化為何。而在發電量變化分析中，可分別針對年期與夏季/非夏季月份兩種型態進行分析。

6.2.1 發電量敏感度分析一年期分析

表 6.3(a) 為電力需求量下限經由敏感度分析後所得出的整理表。

表 6.3 電力需求量下限敏感度分析表(a) (單位：萬度)

| | | | 80% | 75% | 70% | 65% | 60% | 55% | 50% |
|----------------------|------------------|-----|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 台灣 主要 發電 型態 | 核能發 電量 | 第一年 | 7832.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 第二年 | 182562.64 | 772.86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 第三年 | 400105.39 | 25483.92 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 火力 發電 (公營) | 第一年 | 15217232 | 15567888 | 15567888 | 15567888 | 15567888 | 15567888 | 15567888 |
| | | 第二年 | 15403273 | 15567888 | 15567888 | 15567888 | 15567888 | 15567888 | 15567888 |
| | | 第三年 | 15545079 | 15567888 | 15567888 | 15567888 | 15567888 | 15567888 | 15567888 |
| | 水力 發電 | 第一年 | 1290576.69 | 672770.4 | 258288.3 | 4779.072 | 0 | 0 | 0 |
| | | 第二年 | 1637753.65 | 1072734 | 483010.7 | 145164.4 | 0 | 0 | 0 |
| | | 第三年 | 2208616.34 | 1604832 | 893885.5 | 317162.3 | 0 | 0 | 0 |

資料來源：自行整理

● 核能與水力發電方面：

由表 6.3(a) 可看出，在政府政策訂定發電量下限時，限定火力水力與核能發電僅需供應總電力需求量 75% 時，核能發電在第一年電力需求量較低的情形中已不進行發電。若再降至 70% 時，則核能發電已完全不用進行發電作業，所有的電力需求量可以由火力與水力發電進行供應。

從另一角度來看，若政府能找到其他發電來源比現有核能考量風險值情況下與水力發電的發電績效更高時，表 6.3 即可提供電力營運單位進行對照。若其他電力供給來源能提供總電力需求的 30%，則核能發電廠即可停止運轉；若能提供 40%，則核能與水力發電兩種發電作業均可停止運轉。

● 火力發電方面：

電力需求量下限設定在 60% 時，可由火力發電來進行其供電作業，此時已核能與水力發電均不用進行發電作業。而在政府政策向下修正火力、水力，與核能發電總供給量

時，仍需考量剩餘電力需求量需由那種發電作業或電力來源來進行需求的供應。且以表 6.3(a)可看出火力發電仍為目前主要發電方式，亦即台灣目前總電力需求仍有大部份是由火力發電所提供。

6.2.2 發電量敏感度分析－夏季/非夏季分析

若將發電量敏感度分析依照發電量於夏季/非夏季區分時，則可看出在夏季月份中，因電力需求量較大，因此火力發電較難供應整體電力需求，需再搭配核能發電或水力發電來進行發電作業。其敏感度分析如表 6.3(b)所示。

表 6.3 電力需求量下限敏感度分析表(b) (單位：萬度)

| | | | 80% | 75% | 70% | 65% | 60% | 55% | 50% |
|----------------------|------------------|-----|------------|----------|------------|------------|----------|----------|----------|
| 台灣 主要 發電 型態 | 核能發 電量 | 夏季 | 494,038.75 | 26256.78 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 非夏季 | 96463.581 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 火力 發電 (公營) | 夏季 | 11675916 | 11676888 | 11676888 | 11676888 | 11676888 | 11676888 | 11676888 |
| | | 非夏季 | 34489668 | 35030664 | 35030664 | 35030664 | 35030664 | 35030664 | 35030664 |
| | 水力 發電 | 夏季 | 2478301.4 | 2043501 | 1052226.09 | 403107.002 | 0 | 0 | 0 |
| | | 非夏季 | 2658645.3 | 1306836 | 582958.32 | 63998.74 | 0 | 0 | 0 |

資料來源：自行整理

● 核能與水力發電方面：

在核能與水力發電型態方面則可發現，雖然夏季月份只占總月份數的 1/4，但發電量確比非夏季月份多。且核能與水力發電量因為屬於支援性發電型態，因此面對政府發電策略改變時，發電量會有變化產生。原則上是政府越向下修正核能、火力，與水力之總供給量時，核能與水力發電量越少。其減緩趨勢如圖 6.4 所示。由圖中可發現，水力發電在敏感度分析項目 75% 以下時，其夏季總發電量開始超過非夏季總發電量，即可解釋為在政府電業政策下，若火力、水力，與核能三項總發電量僅需供應總需求量之 75% 以下時，水力與核能發電在夏季月份之發電量會超過非夏季月份，此時政府可考量將水力與核能發電規劃僅在夏季進行發電作業。

● 火力發電方面：

由表 6.3(b)可知，火力發電方面夏季月份與非夏季月份之每時階發電量相差不大，均呈現近乎滿載現象。由此可知，在該敏感度分析之下，政府電力結構策略改變時，對基載型態的火力發電而言，無論夏季或非夏季月份均無太大影響。

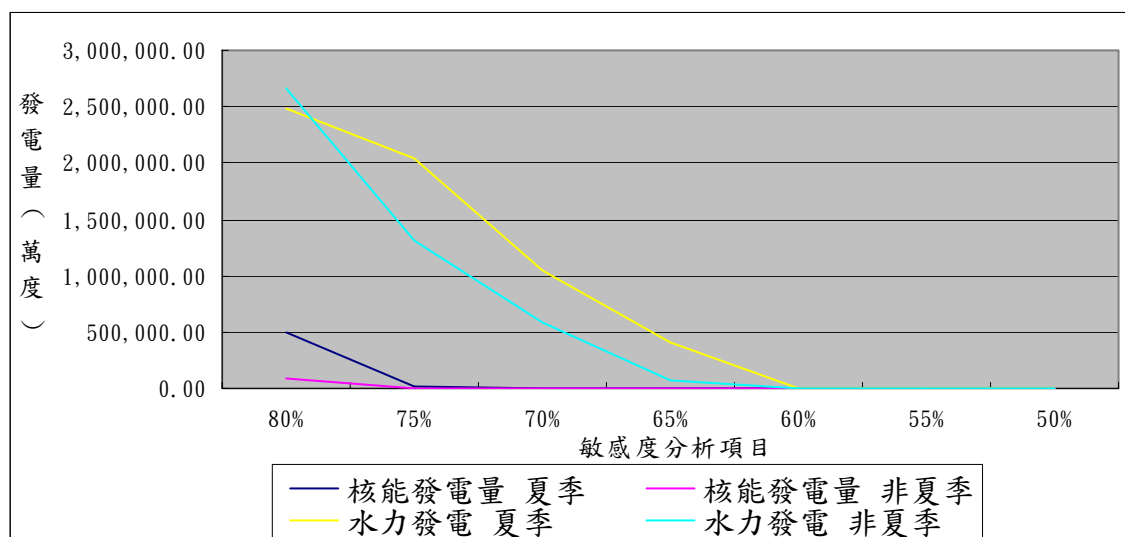


圖 6.4 電力需求量下限敏感度分析圖

資料來源：自行整理

6.3 京都議定書之影響情境

根據郭博堯(2001)於財團法人國政研究報告之「背景分析—京都議定書的爭議與妥協」一文中指出，自從工業革命以來，人類的經濟活動大量使用化石燃料，已造成大氣中二氧化碳等溫室氣體的濃度急速增加，且產生愈來愈明顯的全球增溫、海平面上升及全球氣候變遷加劇的現象，其影響對於水資源、農作物、自然生態系統及人類健康等各層面造成日益明顯的負面衝擊。而為了抑制人為溫室氣體的排放，防制氣候變遷，聯合國於 1992 年地球高峰會舉辦之時，通過「聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)」，對「人為溫室氣體」(Anthropogenic Greenhouse Gas)排放做出全球性管制的宣示。為落實溫室氣體排放管制工作，1997 年 12 月於日本京都舉行聯合國氣候變化綱要公約第三次締約國大會，通過具有約束效力的京都議定書 (Kyoto Protocol)，以規範工業國家未來之溫室氣體減量責任。

而京都議定書所規範的溫室氣體有二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氫氟碳化物、全氟化碳，與六氟化硫共六種，在部門/源類別中可分為能源(燃料燃燒與燃料的易散性排放)與工業兩大類。由此可知，京都議定書之生效對於能源與工業會產生相當影響程度。而在本研究所構建之核能發電綠色供應鏈營運模式內容中，因屬於能源產業且模式變數中的火力發電會產生相當大量的二氧化碳，且京都議定書內容亦對二氧化碳有排放量限制規劃。因此，京都議定書之生效對於模式中的能源分配將產生相當影響。

研究在此將針對京都議定書進行敏感度分析，以檢視整體供應鏈營運模式在加入京都議定書之政策規範後，會對整體發電結果產生何種變化。而對於加入京都議定書之議題，其計算與分析流程如下所示：

1. 假設台灣已加入京都議定書之締約國，且受到需減量二氧化碳 5.2% 之限制。設定計算基年為民國 79 年；而目標期方面，因模式無法計算 2008~2012 年之二氧化碳量，故以研究年期民國 91~93 年做為目標年來計算平均值。
2. 經由上一步驟可分別求算出計算基年與目標年的二氧化碳，並做比較其差異，判斷是否有超過京都議定書之二氧化碳排放量限制。
若有超過排放量限制時，則加入京都議定書解決方案。本研究將對各種解決方案做為京都議定書之敏感度分析，並把解決方案視為火力發電之額外固定成本項目。依據國際會議上所討論，未來不遵守京都議定書規範的國家，其解決方案有：
 - (1) 購買森林綠地做為排放量抵減方式
 - (2) 向其他國家購買二氧化碳排放權
3. 若無超過排放量限制時，則京都議定書之生效將不對模式結果造成影響，即火力發電額外固定成本項目為零。

而解決方案模式構建方面，加入解決方案後會對正向供應鏈目標式與模式限制式造成影響，其模式改變部份如下所示：

在目標式方面，由於採用上述解決方案均可能造成火力發電成本增加排碳成本項目。因此研究在此將原正向供應鏈目標式(4.4)新增排碳成本變數，其修正後正向供應鏈目標式如公式(6.1)所示：

修正後正向供應鏈目標式

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I Q_t^i R_i G_t^i + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J X_t^j R_j - \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I Q_t^i G C_{mc} G_t^i + \sum_{t=1}^T Q_t^i (I C_t + P C_t + T C_t) \right) \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I A C_t W_t^i + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I V_t^i S C_t - \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J X C_t^j X_t^j - X F C_y + \theta (M O X \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I U_t^i \alpha (1 - \beta) \right)) \end{aligned} \quad (6.1)$$

其中 $X F C_y$ 為：研究年期第 y 年，火力發電所需負擔的排碳成本， $y=1,2,3$ 。

上述(6.1)式中未定義變數之定義請參照第四章之變數定義

而模式限制式方面，本研究將研究年期之二氧化碳排放量是否有超過基年二氧化碳排放量構建為判斷限制式型式，其限制式內容如公式(6.2~6.4)所示：

$$X F C_1 = \begin{cases} plan_{\theta} * ((\sum_{t=1}^{12} X_{1t} * CO_2) - B C O_2) & , \text{if } \frac{(\sum_{t=1}^{12} X_{1t} * CO_2) - B C O_2}{B C O_2} \geq 5.2\% \\ 0 & , \text{if } \frac{(\sum_{t=1}^{12} X_{1t} * CO_2) - B C O_2}{B C O_2} < 5.2\% \end{cases} \quad (6.2)$$

$$XFC_2 = \begin{cases} plan_{\theta} * ((\sum_{t=13}^{24} X_{1t} * CO_2) - BCO_2) & , \text{if } \frac{(\sum_{t=13}^{24} X_{1t} * CO_2) - BCO_2}{BCO_2} \geq 5.2\% \\ 0 & , \text{if } \frac{(\sum_{t=13}^{24} X_{1t} * CO_2) - BCO_2}{BCO_2} < 5.2\% \end{cases} \quad (6.3)$$

$$XFC_3 = \begin{cases} plan_{\theta} * ((\sum_{t=25}^{36} X_{1t} * CO_2) - BCO_2) & , \text{if } \frac{(\sum_{t=25}^{36} X_{1t} * CO_2) - BCO_2}{BCO_2} \geq 5.2\% \\ 0 & , \text{if } \frac{(\sum_{t=25}^{36} X_{1t} * CO_2) - BCO_2}{BCO_2} < 5.2\% \end{cases} \quad (6.4)$$

其中 $plan_{\theta}$ 為：採用解決方案 θ 所需負擔之單位排碳成本(單位：元/公噸)

CO_2 為：每度電轉換成二氧化碳之轉換因子

BCO_2 為：基年的二氧化碳排放量

上述(6.2)~(6.4)式中未定義變數之定義請參照第四章之變數定義

由於(6.2)~(6.3)為概念性模式，因此需改寫為數學規劃型態，其公式如下所示。

$$\text{研究年期第一年} \begin{cases} \frac{(\sum_{t=1}^{12} X_{1t} * CO_2) - BCO_2}{BCO_2} - 0.052 \leq M * K_1 & (6.2-1) \\ XFC_1 = (plan_{\theta} * ((\sum_{t=1}^{12} X_{1t} * CO_2) - BCO_2)) * K_1 & (6.2-2) \end{cases}$$

$$\text{研究年期第二年} \begin{cases} \frac{(\sum_{t=13}^{24} X_{1t} * CO_2) - BCO_2}{BCO_2} - 0.052 \leq M * K_2 & (6.3-1) \\ XFC_2 = (plan_{\theta} * ((\sum_{t=13}^{24} X_{1t} * CO_2) - BCO_2)) * K_2 & (6.3-2) \end{cases}$$

$$\text{研究年期第三年} \begin{cases} \frac{(\sum_{t=25}^{36} X_{1t} * CO_2) - BCO_2}{BCO_2} - 0.052 \leq M * K_3 & (6.4-1) \\ XFC_3 = (plan_{\theta} * ((\sum_{t=25}^{36} X_{1t} * CO_2) - BCO_2)) * K_3 & (6.4-2) \end{cases}$$

其中， $K_1 \sim K_3$ 為 0-1 型態的中介變數

6.3.1 基年與目標年之二氧化碳計算量

根據經濟部能源局網站所提供能源統計月報之歷年火力發電量可知，該年之總發電量約為 86,123.5 百萬度，且該年之能源供給結構為，火力發電約占 78%，核能約占 16%，再生能源(包含水力與新能源)則占 6%。由表 6.4 可得知，在計算基年之台電火力發電量

為 76176.33 百萬度，而依據經濟部能源委員會的資料顯示，在台灣平均每發一度電將會排放 0.51 公斤的二氧化碳，其中雖然是以水力、核電、和火力發電的平均值計算，但其中絕大部份二氧化碳是由火力發電所產生，故以該數值做為火力發電轉換二氧化碳量因子(CO_2)。亦即，在民國 79 年時台灣所產生二氧化碳量為 38,849,928.3 公噸，而該數據即為基年二氧化碳的排放量(BCO_2)。

表 6.4 民國 79 年各種發電型態之發電量

| 發電別 | 發電量(百萬度) | 所佔比例(%) |
|------|-----------|---------|
| 核能發電 | 13,779.76 | 16% |
| 火力發電 | 76176.33 | 78% |
| 再生能源 | 5,167.41 | 6% |
| 合計 | 86123.5 | 100% |

資料來源：自行整理

6.3.2 解決方案 1—購買森林綠地

此與台灣林地狀況、林齡大小及工資高低有關，故能提高林地生產力，將可再提高碳吸存量及在購買森林面積方面，目前美國和日本的電廠已經分別到中南美洲、澳洲購買大量的土地來培養森林，便是希望未來可作為計算抵扣排放量，亦即期望以植物利用二氧化碳行光合作用的機制。根據行政院林業試驗所李國忠，陳麗琴(2000)之研究報告指出，台灣每公頃森林每年大約可吸收掉 76.8 噸的二氧化碳，以折現率 3% 進行比較成本效益可得，平均每公頃造林地的成本與碳吸存量來估算貯存每公噸碳所需成本為 2,208 元，該數值與國外研究相較雖偏高，但降低碳吸存成本。由上可估算出，若經由模式所計算出的火力發電量超過京都議定書之限制時，則每噸二氧化碳需負擔 2,208 元的造林成本($plan_1$)，用以扣抵二氧化碳之排放量。

藉由以上描述，研究將購買森林綠地之解決方案做為京都議定書之影響因素加入模式後，其整體運算結果如表 6.5 所示，而採用購買森林綠地對火力發電之計算結果如表 6.6 所示。

表 6.5 目標值數據表(解決方案 1)

| | 解決方案 1 | 未納入京都議定書 |
|----------|---------------------------------------|-----------------|
| 正向供應鏈總利潤 | 115,865,912,175 | 376,252,520,290 |
| 核能發電 | -2,964,950,685 (560,522.32 萬度) | -6,367,970,569 |
| 火力發電 | 147,084,069,600 (46,703,664.00 萬度) | 410,873,697,600 |
| 水力發電 | -28,253,206,740 | -28,253,206,740 |

| | | |
|----------|-------------------|-----------------|
| | (5,136,946.68 萬度) | |
| 逆向供應鏈總成本 | 1,077,167,564 | 1,131,736,443 |
| 作業總成本 | 952,887,950 | 1,003,853,961 |
| 風險總成本 | 124,279,614 | 127,882,482 |
| 供應鏈總利潤 | 114,788,744,611 | 375,120,783,847 |

資料來源：自行整理

表 6.6 採用解決方案 1 之火力發電細部項目

| | |
|-----------|--------------------|
| 火力發電量 | 46,703,664(萬度) |
| 火力發電總收益 | 415,662,609,600(元) |
| 排碳成本(第一年) | 89,526,180,000(元) |
| 排碳成本(第二年) | 89,526,180,000(元) |
| 排碳成本(第三年) | 89,526,180,000(元) |
| 火力發電總利潤 | 147,084,069,600(元) |

資料來源：自行整理

由表(6.5)可知，模式加入京都議定書議題後，由於火力發電對於其所產生的二氧化碳需負擔高額排碳費用，因此相較於表 5.11 之利潤而造成整體供應鏈利潤降低之情形。另一方面，雖然火力發電細部利潤項目的有所變動，但由整體發電量來看，仍無造成相當變動，其中核能發電仍占三項發電型態總發電量的 1.07%，火力發電占 89.13%，水力發電則占 9.8%。而在表(6.6)中，藉由模式結果所計算出的火力發電利潤約為 4,156 億元，三年的總排碳成本約為 2,686 億元，因此就現有發電情形來看，若台灣加入京都議定書之締約國且受到其規範後，火力發電作業營運三年之利潤相較於未加入京都議定書前，將下降約 2,638 億元。以台灣目前整體經濟情勢來看，國家經濟若再加上該筆負擔將對整體經濟環境產生相當大的影響。

由此可知，採用解決方案 1(購買森林綠地)來因應京都議定書之影響，雖然不會對整體電力結構造成太大影響，但在經營利潤方面卻需要多負擔龐大的成本項目，因此供應鏈決策者在整體考量下是否能因應該項成本的增加仍為重要的課題之一。

最後，本研究在納入解決方案 1 時仍有許多考量因素未加入模式，例如是否能購買到足夠的森林綠地或實際的國際政治中是否容許國家完全採用該種策略等，這些均是採用解決方案 1 時所需考量的重要因素。

6.3.3 解決方案 2—購買碳排放權

根據洪世淇於經濟部技術處 ITIS 計畫中提出有關京都議定書的生效與排放權交易一文指出：「日本經濟產業省地球環境對策室長關總一郎先生在日本正式批准京都議定

書之前表示，將二氧化碳排放量抑制在限定的配額內，其難易度視國家、產業、企業之不同而有差別。在排放權交易當中，難以達成目標的企業欲從較易達成抑制目標的企業購買多餘的排放權是商業常態，如此企業可以比較投資設備以抑制排放量或從其他企業購買排放權，何者最為有利。結果能以低成本致力於排放減量的企業，當然儘量地朝自行減量的方向努力，由社會整體觀之吾人可以期待排放減量所投入的成本將可自然降低。德國 Eco Research Institute 的副所長馬特斯先生表示，國際排放權交易實施之後，二氧化碳的減量成本最高可降低 60%。」

由上可知，本國向其他國家購買二氧化碳排放權之解決方案以經過許多國家進行討論且有初步共識。採用該項解決方案不僅可減少國家對二氧化碳減量的壓力，亦可提升提供碳排放權國家之收益。而在排放權交易價格方面，歐盟於 2004 年初即正式起動二氧化碳排放權交易，其交易價格在一月間達到每公噸 15 歐元的最高價，隨後因交易清淡在 5 月間降至 6 歐元。而在俄羅斯批准京都議定書的態度漸趨明朗之後，六月間又回復到 10 歐元左右價位。本研究之二氧化碳排放權交易價格則依照 10 歐元($plan_2$)進行計算，以目前匯率換算，折算新台幣則約為 411.82 元。

藉由以上描述，研究將購買碳排放權之解決方案做為京都議定書之影響因素加入模式。整體運算結果如表 6.7 所示，採用購買森林綠地對火力發電計算結果如表 6.8 所示。

表 6.7 目標值數據表(解決方案 2)

| | 解決方案 2 | 未納入京都議定書 |
|----------|---------------------------------------|-----------------|
| 正向供應鏈總利潤 | 327,636,419,233 | 376,252,520,290 |
| 核能發電 | -6,241,053,527 (590,502.59 萬度) | -6,367,970,569 |
| 火力發電 | 362,130,617,900 (46,185,811.00 萬度) | 410,873,697,600 |
| 水力發電 | -28,253,145,140 (5,136,935.50 萬度) | -28,253,206,740 |
| 逆向供應鏈總成本 | 1,089,709,876 | 1,131,736,443 |
| 作業總成本 | 1,003,854,410 | 1,003,853,961 |
| 風險總成本 | 85,855,466 | 127,882,482 |
| 供應鏈總利潤 | 326,546,709,357 | 375,120,783,847 |

資料來源：自行整理

由表 6.7 可知，若採用購買二氧化碳排放權之解決方案時，因每公噸二氧化碳排放權交易價格約為 411.82 元，其相較於解決方案 1 之每公噸需負擔 2,208 元較低。因此在火力發電利潤方面，解決方案 2 之利潤較解決方案 1 多 2,150 億元。另一方面以整體發電結構來看，核能、火力，與水力發電之發電量與發電結構均與解決方案 1 或未考量京

都議定書之情形差距不大。而在表 6.8 的排碳成本中，營運三年總共需向其他國家購買排碳權之成本約為 480 億元，而總利潤則約有 3,620 億元。

表 6.8 採用解決方案 2 之火力發電細部項目

| | |
|-----------|--------------------|
| 火力發電量 | 46,185,811(萬度) |
| 火力發電總收益 | 411,053,717,900(元) |
| 排碳成本(第一年) | 15,961,300,000(元) |
| 排碳成本(第二年) | 16,311,940,000(元) |
| 排碳成本(第三年) | 16,649,860,000(元) |
| 火力發電總利潤 | 362,130,617,900(元) |

資料來源：自行整理

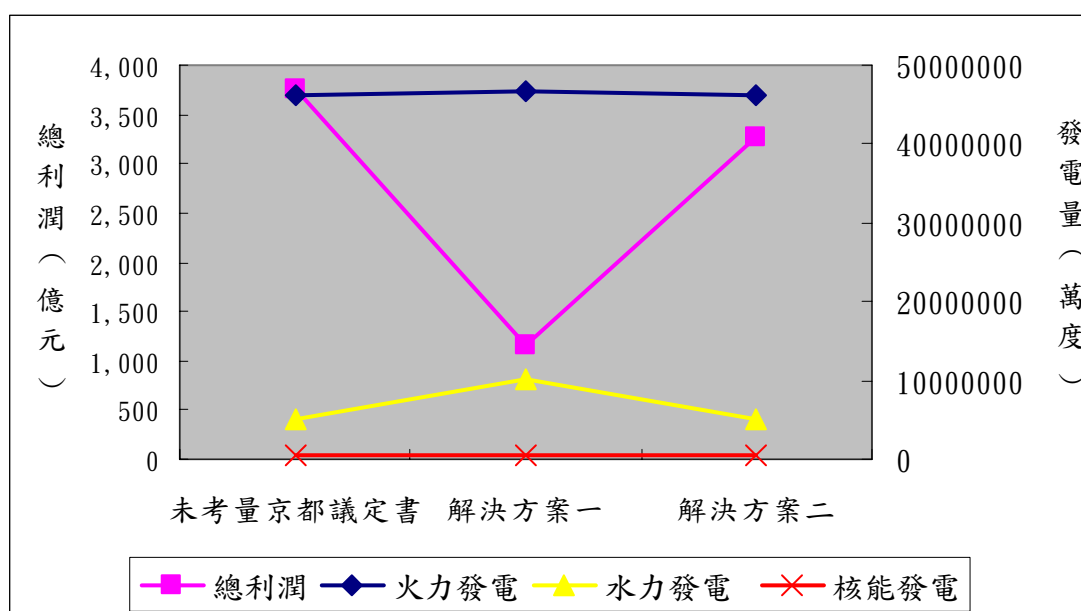


圖 6.5 不同解決方案之比較圖

資料來源：自行整理

以未考量京都議定書政策與兩種解決方案所求得結果相比較可得知，在考量京都議定書對發電量影響之後，其整體發電結構並無太大影響，主要影響在於總利潤方面的變化。由圖 6.5 可看出，整體發電總利潤以未考量京都議定書為最高，解決方案二之總利潤略低，而解決方案一的總利潤則為最低。其原因在於，以研究背景所在之電力供需現況與核能發電加入風險成本概念來看，因為受到電力需求量之限制條件，使得火力發電量必需維持一定發電量來滿足最低電力需求，且採用解決方案一在面對京都議定書需負擔較高成本，因此造成總利潤大幅低於解決方案二。

6.3.4 小結

在全球受到溫室效應影響之下，國際間已開始重視溫室氣體排放問題且制訂出京都議定書來要求各國家對於溫室氣體降低排放量。目前歐盟準備在 2008 年時，對於各國所超出的溫室氣體排放量進行罰款，而每公噸二氧化碳預計罰款約為 100 歐元。以本研究之個案為例，由於台灣目前的電力結構仍仰賴火力發電為主，且火力發電亦為主要產生二氧化碳的發電型態，而未來台灣若加入京都議定書之締約國後，每年即需面對二氧化碳排放量限制。因此採用適當的解決方案將可大大降低台灣在二氧化碳排放量上的罰款。

而在京都議定書敏感度分析中可得知，採用購買二氧化碳排放權之解決方案對於整體供應鏈利潤來看較有利益，且發電結構上亦無太大變動。因此建議未來在選擇面對京都議定書之解決方案時，在考量利潤之下可採用向其他國家購買排放權來因應二氧化碳排放量限制。但站在京都議定書之環保精髓來看，向其他國家購買排放權並無法使全球二氧化碳量有效的降低，反觀利用造林或購買森林綠地時，可促使世界各國在種植森林方面做努力，以藉由森林綠地來吸收二氧化碳，降低過多的溫室氣體對於地球所造成的影響。

因此，未來電力單位或國家在面對該項環保課題時，若無法避免京都議定書之溫室氣體罰則時，在解決方案的選定上應從多方面來進行考量。假如能用其他積極策略來直接使二氧化碳排放量降低時，即可不需擔心該項問題，而這亦是世界各國共同制訂京都議定書所期盼的最終目標。



第七章 結論與建議

隨著國際環保聲浪高漲，核能發電之發電效益已受到大家所質疑。其中最為人們所重視的則為核能廢料處理問題。以現今技術之下，世界各國對於低放射性或高放射性核廢料仍無法有效進行處理，僅能以掩埋方式來處理核廢料，而該方式似乎無法達到真正消除輻射風險。若真正發生風險事故時，其影響範圍與後果將是人民所無法承擔。因此，本研究嘗試將作業風險概念導入整體供應鏈流程中並應用於核能發電作業模式來構建一個核能發電綠色供應鏈營運管理模式，以重新檢視核能發電的發電效益，並做為營運管理者做決策分析時的輔助工具。

在此，本章將研究過程所獲得之結果與心得歸納出下列的結論與建議，以供後續學者與管理者在探討該方面的相關研究時可做參考。

7.1 結論

(一)核能發電之綠色供應鏈概念

根據研究結果發現，核能發電作業以傳統供應鏈的作業模式概念計算之下，其結果與實際作業情形無太大差異。但在加入逆向供應鏈的作業風險概念後，綠色供應鏈的影響對於核能發電產生相當大的變化，使得核能發電由原本的基載型電力單位轉變為支援型的電力單位，且由於長期性與連續性的進行發電作業對於基載電力單位較能產生發電效益，因此以核能發電的作業效益來看，若國家政策將核能發電型態視為支援型電力單位將造成過多的啟動作業，此舉將大大降低核能發電的發電效益。

由此可知，核能發電在加入綠色供應鏈概念之後，將對發電效益產生相當大的影響，未來電力單位在進行效益評估時應加入此概念，才能計算出真正的整體發電效益。

(二)整體發電結構

本研究之研究對象主要為核能發電產業，但在考量整體發電市場並非由單一核能發電所能主導，仍必需輔以其他發電方式進行配合，因此模式亦加入火力與水力發電兩種目前主要的發電型態。研究中即藉由核能發電、火力發電，與水力發電三種型態來滿足整體電力需求市場。

經由研究結果可得知，火力發電無論是在發電效益與發電量上均占有重要比例。而核能發電方面，在加入綠色供應鏈作業風險後，其不足的發電量均由水力發電所進行提供。而在發電量下限的敏感度分析中亦可發現，在發電量下限設定為 70% 時，由火力與水力進行發電，而設定在 60% 時，則僅由火力發電即可供應電力。亦即，若國家政策能提高其他發電方式(非核能、水力，與火力發電)之發電量時，不會對火力發電產生影響，但對於核能與水力發電會產生相當大的影響。

(三)電力需求的逐年增加

以台灣電力需求發展來看，每年的尖峰電力需求量均呈現上升趨勢(如表 5.5 所示)。以此數據代入本研究模式發現，核能發電量雖然在加入綠色供應鏈作業風險後有大幅降低的情形。但以研究年期來看，隨著國家對於尖峰電力需求量的提高，而核能發電量亦有增加的趨勢。因此，由本研究結果可判斷出在未來電力需求量若持續增加，且電力單位無法增加其他發電型態的發電量時，核能發電仍必需做為提供電力單位的發電型態之一。

目前各國政府所提倡之節約能源政策精神即在於希望民眾能具有節約能源的意識。核能發電目的僅在於提供民眾的電力需求，倘若全國能執行節約能源，使得電力需求量降低至無需採用核能發電亦能維持現今生活水準時，則民眾即無需再擔心核能發電作業風險會對民眾造成影響。

(四)核能發電之爭議所在

本研究在進行權重敏感度時發現，將目標式權重值(0~1)間區分為 100 單位後，研究結果可分為兩大區域，區域一為正向目標式權重值在(1~0.96)間，區域二為正向目標式權重值在(0.96~0)間。其中，權重值設定在區域一間時，整體電力供給較仰賴核能與火力發電，且整體發電利益較高；反觀設定於區域二時，核能發電量即趨於平緩，僅提供最低電力需求量；而在利益方面，區域二也較區域一低許多。由此可知，決策者在認定目標式權重時，若選擇區域不同即會對核能發電結果產生極大的差異，此亦證實不同決策者對於核能發電認知差異極大的原因所在。

(五)京都議定書的影響

基於京都議定書於近年已開始執行後，世界上許多國家開始朝向議定書內容所努力。而根據 1997 年工業局委託中華經濟研究院所進行之研究指出，若我國被定位為議定書的「附件一成員」，則對我經濟結構衝擊過大，勢必無法承擔。且經評估後，在同樣減量情境下，我國減量幅度較已開發國家高 10 至 20 倍以上；但將我國自我定位為「非附件一成員」時，則又將被視為逃避溫室氣體減量責任。因此，我國在京都議定書之定位不同將嚴重影響公約為我國之衝擊。

因目前無法判定台灣屬於京都議定書之成員地位為何，故本研究將我國視為京都議定書之附件一成員，以較嚴格的營運情勢來重新檢視京都議定書對於我國電力結構之影響。藉由本研究結果可發現，未來台灣在加入京都議定書之附件一成員後，在維持現有電力需求情形之下，雖然對於整體電力結構並無造成太大影響，但因火力發電需負擔龐大的排碳成本，而會使得整體發電利益大大的降低。因此，未來電力單位在評估京都議定書時應重視該項成本。

7.2 建議

(一)核能發電綠色供應鏈模式

本研究所建構之核能發電供應鏈模式中，仍有許多參數項目(例如：存貨作業成本、後端營運細部成本，與風險模式參數等)均無法精確計算，建議後續研究可針對該部份進行深入探討，以求算出更精確之結果。此外，研究中所構建之風險模式僅以學者 Erkut 所提出之風險概念所延伸，其是否能足以表示整體後端營運所造成的影響仍有待後續研究進行討論與研究。

(二)多目標供應鏈模式求解方法

本研究對於研究所建構之多目標供應鏈模式求解方法是採用權重法進行運算，然而數學規劃對於多目標模式仍有許多求解方法與演算法可進行更精細的求解運算。因此研究建議後續研究可嘗試使用不同的求解方式來進行多目標數學規劃求解。

(三)電力供應鏈管理

本研究僅以核能發電做為主要研究對象，雖然已加入火力發電與水力發電來表示大部份電力供需市場，但在綠色供應鏈部份僅考量核能發電部份，而未將火力與水力發電一併考量入內，且在整體電力供應鏈管理方面，未來電力需求量的逐年增加幅度與研究對象的選定均會影響整體電力結構。

因此，本研究建議後續研究學者在探討電力產業的供應鏈管理議題時，可將所有可能採用的發電型態一併納入模式中，並導入作業風險對於發電效益的影響概念，如此即可求出精確的電力結構結果。

(四)先進核能發電技術之應用

目前部份先進國家已開始對先進核能發電技術(例如：混合燃料技術與快滋生反應器技術等)進行實驗性運轉測試。雖然上述技術仍無法完全實行商業化運轉，但該技術在未來若能實際應用時，勢必將使得整體核能發電的發電效益、作業風險影響程度，甚至是供應鏈作業模式產生極大影響與變化。因此本研究建議後續研究學者可朝向該方面進行研究。

(五)京都議定書之影響

本研究對於京都議定書之影響僅針對利潤面進行討論，但實際上京都議定書對於國家影響並非如此單純。在解決方案的選定與交互使用、國家之於京都議定書的定位、國內其它產業對於京都議定書的共同影響，與國家面對京都議定書之看法等不同，均會造成不同的研究結果。

另一方面，目前世界各國在面對該項議題時均視京都議定書為首要環保公約且需嚴格執行。故該議題為我國目前所需直接面對的問題，若處理不當則產生的影響後果將是我國企業甚至是國家所無法承擔。因此，本研究在此建議後續研究可針對京都議定書內的各項課題進行深入探討，以提供決策單位更精確的影響結果。



附錄 資料來源

1. 新核家園美麗新世界 <http://www.newnuclearhome.com>
2. 台灣電力公司 <http://www.taipower.com.tw>
3. 清蔚園 <http://vm.nthu.edu.tw/science>
4. 世界核能協會(WNA) <http://www.world-nuclear.org/>
5. 經濟部工業局 <http://www.moeaidb.gov.tw/>
6. 經濟部能源局 <http://www.moeaboe.gov.tw>
7. 台灣電力公司基隆營業處非官方營業網 <http://keepower.webhostme.com/>
8. 李國忠，陳麗琴，「台灣杉人工林碳吸存潛力及成本效益」，台灣林業科學，第 15 卷第 1 期，2000
9. 邱靜玉，陳妍蓓，「國政研究報告：核能發電之必要性」，財團法人國家政策研究基金會，2000
10. 郭博堯，「國政研究報告：背景分析—京都議定書的爭議與妥協」，財團法人國家政策研究基金會，2001
11. 洪世淇，「京都議定書的生效與排放權交易」，經濟部技術處 ITIS 計畫
12. 王德義，「怕它不如了解它—核能發電淺談」，行政院原子能委員會，2004
13. 翁寶山，「輻射原理與輻射防護(核能電廠輻射防護教材)」，台灣電力公司核能發電處—台北，P.44-46，1986
14. 林德福，「台電核能營運現況與展望」，台電核能月刊，P.9-20，1999
15. 翁寶山，台灣核能史話，行政院原子能委員會編印，2001
16. 許志義，多目標決策，五南圖書公司，2003
17. OECD NEA，Radioactive waste management in perspective，1996
18. Joseph Sarkis，"A strategic decision framework for green supply chain management"，Journal of Cleaner Production vol.11，P.397-409，2003
19. Sarkis J.，"Manufacturing strategy and environmental consciousness"，Technovation，vol.15(2)，P.79-97，1995
20. Ioannis Giannikos，"A multi-objective programming model for locating treatment sites and routing hazardous wastes"，European Journal of Operational Research vol.104，P.333-342，1998
21. Nagel, M.H.，"Environmental Supply-Chain Management versus Green Procurement in the Scope of a Business and Leadership Perspective," IEEE International Symposium on Electronics and the Environment，P.219-224，2000
22. Konstantinos G. Zografos and Konstantinos N. Androutsopoulos，"A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems"，European Journal of Operational

- Research vol.152 , P.507-519 , 2004
23. Arvind K. Nema and S.K. Gupta , “Optimization of regional hazardous waste management systems : an improved formulation” , Waste Management vol.19 , P.441-451 , 1999
 24. Li-Hsing Shih , “Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan” , Resources, Conservation and Recycling vol.32 , P.55-72 , 2001
 25. Mortinz Fleischmann 、 Hans Ronald Krikke 、 Rommert Dekker and Simme Douwe P. Flapper , “A characterization of logistics networks for product recovery” , Omega vol.28 , P.653-666 , 2000
 26. Patroklos Georgiadis and Dimitrios Vlachos , “The effect of environmental parameters on product recovery” , European Journal of Operational Research vol.157 , P.449-464 , 2004
 27. Roberto Bubbico 、 Giacomo Dore and Barbara Mazzarotta , “Risk analysis study of road transport of ethylene oxide” , Journal of Loss Prevention in the Process Industries vol.11 , P.49-54 , 1998
 28. Eleftherios T. Iakovou , “An interactive multiobjective model for the strategic maritime transportation of petroleum products: risk analysis and routing” , Safety Science vol.39 , P.19-29 , 2001
 29. K. Yamaji and Nagano, K , “Long-range optimal strategy of Plutonium Utilization” , Energy Systems, Management and Economics: Selected Papers from the IFAC/IFORS/IAEE symposium , P.441-446 , 1990
 30. Timothy S. Margulies , “Risk optimization: siting of nuclear power electricity generating units” , Reliability Engineering and System Safety Vol.38 , P.323-325 , 2004
 31. A. Strupczewski , “Accident risks in nuclear-power plants” , Applied Energy Vol.75 , P.79-86 , 2003
 32. Alan R. McKendall Jr., James S. Noble, Cerry M. Klein , “Simulated annealing heuristics for managing resources during planned outages at electric power plants” , Computers & Operations Research Vol.32 , P.107-125 , 2005
 33. Michelle M. Cowing, M. Elisabeth Pate-Cornell, Peter W. Glynn , “Dynamic modeling of the tradeoff between productivity and safety in critical engineering systems” , Reliability Engineering and System Safety Vol.86 , P.269-284 , 2004
 34. L. Eeckhoudt, C. Schieber, T. Schenider , “Risk Aversion and the external cost of a nuclear accident” , Journal of Environmental Management Vol.58 , P.109-117 , 2000
 35. Jacques Percebois , “The peaceful uses of nuclear energy : technologies of the front and back-ends of the fuel cycle” , Energy Policy Vol.31 , P.101-108 , 2003
 36. Wolfgang Hawickhorst , “Management of radioactive wastes from the operation of nuclear power plants” , Nuclear Engineering and Design Vol.176 , P.171-176 , 1997

37. Erhan Erkut and Vedat Verter, “A framework for hazardous materials transport risk assessment”, Risk Analysis Vol.15 No.3, P.589-601, 1995
38. Erhan Erkut and Armann Ingolfsson, “Transport risk models for hazardous materials : revisited”, Operations Research Letters Vol.33, P.81-89, 2005
39. 何家豪,「有害廢棄物逆向物流聯合處理營運模式之研究」, 交通大學交通運輸研究所, 碩士論文, 2003
40. 胡峻嘉,「資訊科技產業之整合物流管理」, 台灣大學土木工程學研究所, 碩士論文, 2001
41. 陳碧珍,「科技風險知覺之資訊整合實驗 — 以石化業為例」, 國立中山大學公共事務管理研究所, 碩士論文, 1996
42. 張維仁,「核能電廠大修排程的最優化」, 國立政治大學應用數學系, 碩士論文, 2001

