

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

我國智慧電網及燃料電池技術經濟與 3E 效益評估
Techno-Economic Analysis and 3E Efficiency Evaluation of Taiwan
Smart Grid and Fuel Cell

計畫編號：1032001INER037

受委託機關(構)：中原大學

計畫主持人：林師模

聯絡電話：03-2655207

E-mail address：shimolin@gmail.com

核研所聯絡人員：孫廷瑞

報告日期：103 年 11 月

目錄

目錄	I
表目錄	III
圖目錄	IV
中文摘要	VI
ABSTRACT.....	VII
壹、計畫緣起與目的	1
一、研究背景	1
(一) 燃料電池.....	5
(二)智慧電網.....	22
二、研究目的	31
貳、研究方法與過程	34
一、燃料電池	35
(一) 燃料電池研究架構.....	35
(二) 技術經濟分析工具.....	40
(三) 3E 效益評估	45
(四) 市場潛力評估.....	54
二、智慧電網	56
參、主要發現與結論	62
一、 燃料電池國外 SOFC 商業化模式.....	62
二、 我國 SOFC 成本效益分析.....	65
三、我國發展 SOFC 之 3E 效益分析.....	78
四、我國發展 SOFC 之優劣勢	90
五、結論與政策建議	92
(一) 燃料電池.....	92

(二) 智慧電網.....	94
肆、參考文獻	97
伍、附錄	102
附錄一 PEMFC 發展進程受阻	102
附錄二 智慧電網成本效益分析相關文獻	103
附錄三 期中審查會議記錄	107
附錄四 期末審查會議記錄	113

表目錄

表 1	各種燃料電池的種類與特性.....	10
表 2	主要國家燃料電池發展目標與策略.....	19
表 3	全球主要國家智慧電網推動政策.....	27
表 4	智慧電網相關補助政策.....	28
表 5	智慧電網研究方向.....	29
表 6	各年度工作項目.....	33
表 7	SWOT 矩陣.....	56
表 8	日本 ENE·FARM 系統比較.....	64
表 9	成本與效益項目.....	69
表 10	成本效益分析參數表.....	70
表 11	家用系統 base case 成本效益分析結果.....	71
表 12	商用系統 base case 成本效益分析結果.....	73
表 13	燃料電池推廣目標量.....	80
表 14	技術經濟分析與 GEMEET 模型成本效益項目計算方式差異... ..	88
表 15	GEMEET 成本效益分析.....	89
表 16	臺灣與主要國家智慧電網之成本與效益評估.....	95

圖目錄

圖 1	本研究分析概念示意圖	2
圖 2	我國燃料電池推廣量政策	3
圖 3	燃料電池技術研發經費投入	6
圖 4	燃料電池可提供功率與應用市場	11
圖 5	日本歷年家用燃料電池新增裝置量、售價與補助金	16
圖 6	臺灣氫能與燃料電池產業供應鏈	20
圖 7	智慧電網系統架構示意	23
圖 8	全球智慧電網市場規模預估	25
圖 9	能源政策與 3E 之關連性	34
圖 10	FC 產業化涉及層面	36
圖 11	燃料電池技術經濟分析架構	39
圖 12	設備補貼與 R&D 投資對推廣目標之影響路徑	46
圖 13	模型基本架構	49
圖 14	模型內生產巢式結構	50
圖 15	模型內能源投入結構	51
圖 16	模型內電力投入結構-燃料電池當作基載用電	52
圖 17	模型內電力投入結構-燃料電池當作中尖載用電	52
圖 18	智慧電網技術經濟分析概念	61
圖 19	日本 FC 系統商業化現況與展望	63
圖 20	家用系統假定安裝速率	68
圖 21	商用系統假定安裝速率	68
圖 22	家用系統 Base case 累積淨現值	72
圖 23	家用系統 Base case 效益分析	72
圖 24	家用系統 Base case 成本分析	73
圖 25	商用系統 Base case 累積淨現值	74
圖 26	商用系統 Base case 效益分析	74
圖 27	商用系統 Base case 成本分析	75

圖 28	家用系統之敏感性分析結果.....	76
圖 29	商用系統之敏感性分析結果.....	77
圖 30	家庭戶數趨勢.....	79
圖 31	原油價格設定.....	79
圖 32	燃煤價格.....	79
圖 33	天然氣價格.....	80
圖 34	經濟成長與能源消費.....	81
圖 35	二氧化碳排放量.....	82
圖 36	發電結構.....	83
圖 37	能源結構.....	83
圖 38	產業結構-產值.....	84
圖 39	產業結構-附加價值.....	84
圖 40	各種情境下的 SOFC 安裝量.....	85
圖 41	SOFC 當作基載電力下的價格變化趨勢.....	86
圖 42	SOFC 當作中尖載電力下的價格變化趨勢.....	86
圖 43	各年度政策情境相較於參考情境的實質 GDP 差異.....	87
圖 44	各年度政策情境相較於參考情境的二氧化碳排放量差異.....	88

中文摘要

近年全球溫室效應所引發的氣候變遷議題逐漸成為顯學，倡議二氧化碳減排的聲浪居高不下，導致新及再生能源的推動儼然成為各國能源政策最重要的一環。目前多數國家新及再生能源之發電成本相對於傳統發電方式仍然偏高，導致其在開放市場中並不具競爭力，惟即便如此，新及再生能源仍可為環境或能源自主帶來許多的助益。然而，究竟再生能源產業的發展，對於能源、環境及經濟到底可以帶來多少效益？新能源技術產業化成功的機會有多高？市場潛力有多大？對市場就業會帶來何種影響？如果在投入研發前，或是研發期間沒有經過詳細的評估，將有可能最後發展出不具效益或是不具市場競爭力的技術，導致資源的浪費，進而損及國家整體經濟的發展。本計畫的目的在於利用持續發展的 3E 評估模型—GEMEET 為基礎，搭配各種技術經濟評估方法，針對智慧電網及燃料電池產業，蒐集製程技術資料以更新模型之基準資料，並完成技術評估分析、成本效益分析、3E 效益評估等，同時也根據分析結果提出具體的產業化建議。

關鍵字：技術經濟、成本效益、3E 模型。

Abstract

The deterioration of global energy and environmental problems in recent years has forced many countries to accelerate their paces in developing and utilizing alternative energies. However, generation cost using new and renewable energy technologies is still high compared to that of conventional ones. Moreover, although most of the new and renewable energy technologies can bring about significant energy, environmental, and economic benefit to the economy, they are inevitably associated with huge risks and uncertainties. As such, a careful assessment of the potential costs and benefits that the technologies can bring about to the economy is necessary before the decision of development is made.

The aim of this project is to develop a GEMEET-based framework to support a full-range techno-economic and cost-benefit analysis for Taiwan's smart grid and fuel cell industries. Suggestions of how to commercialize the developed technologies and how to create an industrial chain will also be derived based on the analysis results and be provided to the related agencies for formulating suitable policy measures.

Keywords: Technical economic, cost-benefit, 3E model.

壹、計畫緣起與目的

一、研究背景

數十年來，經濟持續成長與化石能源 (fossil fuel) 消費產生了相互依賴的關係，經濟成長加速了化石能源的消耗，化石能源也提供了經濟持續成長的動能。然而，在溫室氣體減排的呼聲及化石能源價格上漲的威脅下，再生能源技術發展及應用已成為各國積極推動之重大能源政策之一。Bloomberg New Energy Finance 報告 (Turner, 2013) 預估，2030 年時全球再生能源裝置容量之占比將可達到 33-39%。該報告也指出，2013 至 2030 年將吸引全球直接投入 11 兆美元到再生能源發電業(占全部電業投資的 73%)，其中，有半數資金會投入到風能和太陽能發電業。

觀察我國整個再生能源技術及產業目前的發展，風力發電及太陽發電的確較於其他再生能源發電，技術發展相對快速且成熟。燃料電池則屬新興能源技術，以再生能源為來源之燃料電池目前尚無商業化產品，該設備目前廣泛使用之燃料為天然氣。天然氣為低碳能源，我國政府規劃逐漸提升天然氣占比，用以取代碳排放高的燃煤，抑或取代有安全疑慮的核能發電。所以，經濟部能源局自 2009 年開始進行「燃料電池示範運轉驗證計畫」，示範運轉建置主要應用分為定置發電、移動設備及運輸動力等，至 2013 年 12 月止，經濟部能源局累計投入新台幣 3.75 億元，廠商自行投入經費達 4.5 億元，輔導 23 家廠商 48 件示範計畫，共建置 231 套系統，總發電容量 712kW。由此可知，政府期待促進前瞻能源技術能逐步取代傳統發電方式，並透過誘因政策（如：主要是設備補助）促進示範實績。惟業者投資新及再生能源發電設施是否有利可圖？激勵誘因是否有足夠效力？政府規劃目標是否可以順利達成？是否需要更多研發投入以加速成本下降？這些都有賴詳細而又嚴謹的技術經濟評估，才可以得到答案。

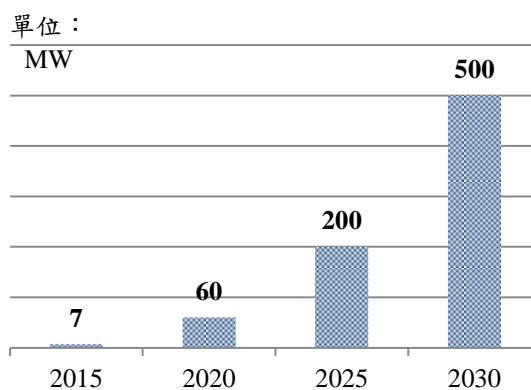


圖 1 本研究分析概念示意圖

技術經濟評估通常需先檢視再生能源技術的合理性，之後再分析再生能源技術之成本與效益。成本效益分析將涉及廠商再生能源技術之投資可行性、政府誘因政策之合理性、再生能源技術之市場及商業性（如圖 1 所示）。由此可知，技術經濟評估多為事前分析，所以必需系統性的界定研究範圍，才能產生合理的政策意涵，但由於技術經濟方法是從廠商的角度出發，缺少產業之間或與整個經濟體系的連結，所以必須再搭配 3E 模型來更完整的評估整個經濟體系所產生之效益。最後可透過技術經濟分析與 3E 效益評估之結果，提出一個更具體且完整的產業化建議。

過去有關再生能源的技術經濟評估，多以特定再生能源系統之成本效益評估為主（如：莊智媚，2008；洪智仁，2008；洪智仁，2008；戴德炫，2010；李遠光，2012；Kaiser and Snyder, 2012；Shaahid et al., 2013），這些研究雖均有助於了解再生能源的發電成本是否能與傳統發電技術競爭，然而卻多無法對整體經濟規劃提出完整的分析意涵；此外，過去文獻亦相對缺乏對新及再生能源誘因政策之探討。截至目前，國內曾針對再生能源技術

及產業進行完整之技術經濟評估者相當有限，僅有林師模等（2011-2013）曾陸續對太陽光電、纖維酒精及風力發電等再生能源產業進行完整之技術經濟評估，這些研究全面性且具體的評估下列四項議題：(1)衡量再生能源生產成本；(2) 議我國再生能源發展配置（以風力發電為例，建議風場設置規劃位址）；(3)分析重要成本因素對再生能源發展的影響程度；及 (4) 評估誘因政策的可行性。除此之外，林師模等（2011-2013）亦曾結合動態 3E 模型，納入再生能源之技術學習效果，並考量政府各種誘因機制的設計，以分析再生能源產業的帶動效果與對總體經濟之影響，進而評估最適之政策與誘因工具組合。



資料來源：能源局 (2012)

圖 2 我國燃料電池推廣量政策

前瞻型能源技術—定置型燃料電池由於具有能源利用效率高、進料種類多元及碳排放量相對較低等優勢，美國、日本等先進國家已從示範運轉計畫進階到商業化階段。該項技術亦被我國政府列為積極推動之分散型再生能源技術選項之一，預定於2015年開始投入發電應用市場（請參圖 2）。

早在 2008 年，林師模及盧樂人（2008）於執行核能研究所委託計畫時，便已嘗試將燃料電池技術加入動態 3E 模型中，且已進行初步的經濟及環境效益評估，但由於當時的 SOFC 技術尚在發展階段，許多資料難以取得，且非計畫執行之重點分析項目，

因此報告之分析結果中並未對燃料電池多有著墨，而這也是後續幾年文獻大多仍僅探討 SOFC 技術發展，卻未有針經濟面進行分析與探討的原因。

近兩年來，我國逐步完整燃料電池產業鏈（請參圖 6），燃料電池技術研究範圍已較能界定，且較容易取得與燃料電池相關之技術及經濟資料，因此逐漸有針對 SOFC 潛在經濟效益或成本進行初步評估之文獻（如柴蕙質、葛復光，2012；彭群雅，2013）。不過，截至目前為止，國內針對 SOFC 技術仍尚未建立系統性的技術經濟分析架構，因此我國燃料電池仍未見完整之技術經濟評估結果。有鑑於此，本計畫擬建立一個完整的技術經濟評估架構，除了具體量化燃料電池的成本效益，也將分析燃料電池產業的經濟帶動效果與環境效益，並探討燃料電池進入商業化階段之可能途徑。

風力發電、燃料電池等再生能源技術雖然對溫室氣體減量提供了一個在供應端具體且有效的解決方案，不過 IEA (2011) 的報告中指出，要有效達到減量，還須要有需求端的管理及協調能源供需的搭配，基於此，智慧電網 (smart grid) 逐漸成為重要發展的搭配技術。

智慧電網是整合發電、輸電、配電及用戶端的現代化電力網路，可降低消費端的用電量及提升其能源使用效率，近年各國均納入節能減碳主要政策中，美國、歐盟與英國等均積極推出建置智慧電網相關政策。根據 Morgan Stanley 的預估，2010 年全球智慧電網市場規模約 200 億元，預測至 2030 年將可成長至 1000 億美元以上。我國政府亦將智慧電網列入「國家節能減碳總計畫」標竿計畫之一，2010 年核定「智慧型電表基礎建設推動方案」，2011 年成立「智慧電網總體規劃小組」，顯見政府推動智慧電網之決心。由於投資額龐大，政府單位有必要對智慧電網計劃發展過程中可能發生的成本效益進行評估與監控，也因為如此，本計

畫亦將針對智慧電網之技術經濟評估，嘗試建立一個可行的分析架構，以利在後續相關分析資料取得的問題逐漸克服後，可以對我國智慧電網之成本效益及 3E 效益進行完整之評估分析。

目前我國智慧電網技術之發展尚未成熟，因此，研究範圍不易界定；此外，其涉及對象廣泛（包括用戶端、智慧電表業者、輸配電業者、儲電業者、發電業者、電源調度中心及資通訊服務業者等），也須考慮電力供需平衡、電力使用效率（含分散式電力系統）及節能減碳，使得智慧電網產業評估之不確定性遠高於其他再生能源產業。¹本研究將蒐集國內外有關於智慧電網之經濟分析及成本效益評估文獻，並參酌相關專家學者所提供之資料與建議，嘗試建立一套可具體評估智慧電網成本效益的分析架構。以下分別呈現燃料電池與智慧電網之發展概況與文獻回顧。

（一）燃料電池

我國燃料電池之研究始於 1987 年，在 2002 年以後投入廠商數量快速成長，至今已有二十餘家廠商投入燃料電池產業，唯目前產值並不多，廠商多處於技術與產品開發階段，尚無特定應用已大規模生產。

政府在補助各綠能產業上均扮演重要的角色，對於燃料電池更形關鍵，現階段政府政策方向完全主導燃料電池產業的發展。我國政府投入燃料電池技術研發已超過二十年，最近五年政府每年投入的經費約在新台幣六至八億元間，大致上呈現逐步增加的趨勢(如圖 3 所示)。

¹以風力發電為例，風場投資者僅需考慮投資是否回收，不須考慮其他涉及對象之反應

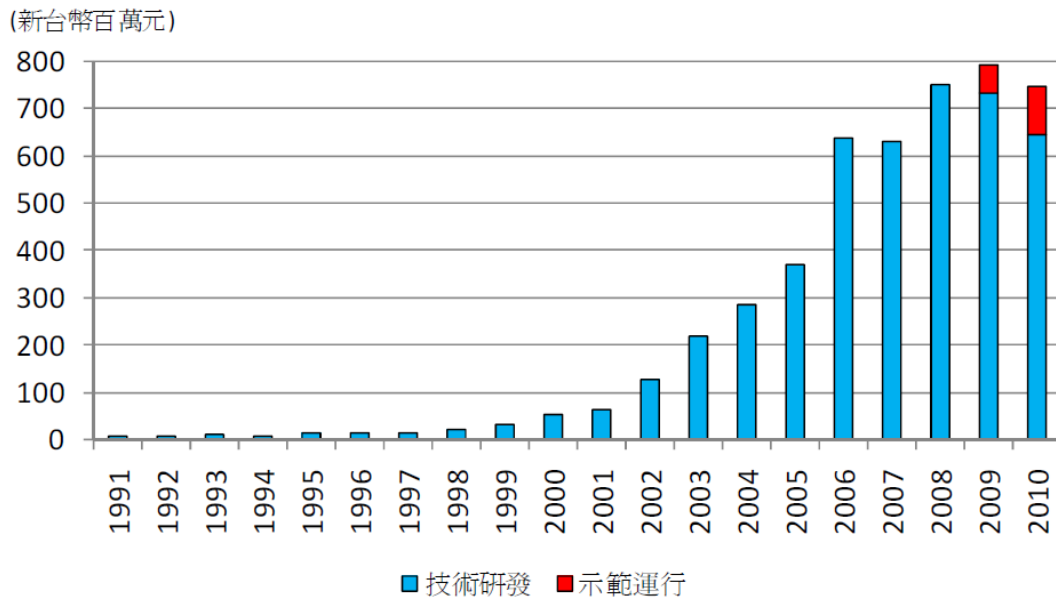


圖 3 燃料電池技術研發經費投入

資料來源：政府研究資訊系統(GRB)；工研院 IEK(2011/03)

1. 燃料電池技術之種類

燃料電池有許多不同的種類，原理大同小異，一般都是利用不同的燃料、不同的電解質或質子交換膜來分類，而且不同種類的燃料電池可以工作在不同的溫度環境，如表 1 所示，包括：鹼性燃料電池、質子交換膜燃料電池、磷酸燃料電池、熔融碳酸鹽燃料電池、固態氧化物燃料電池、直接甲醇燃料電池。

(1) 鹼性燃料電池

鹼性燃料電池(Alkaline Fuel Cell; AFC)使用石棉網做為電解質的載體，氫氧化鉀(KOH)溶液做為電解質傳導陽離子與陰離子，操作溫度大約 70~200°C，屬於「低溫型燃料電池」，陽極必須使用純度很高的氫氣做為燃料，陰極必須使用純度很高的氧氣做為氧化劑，金屬觸媒使用鉑、金、銀等貴重金屬或鎳、鈷、錳等過渡金屬，目前已經成功地應用在航太工業或軍事用途，比較不適合做為民生用途，能量轉換效率可達 40~50%。

(2) 質子交換膜燃料電池

質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell; PEMFC, 亦簡稱 PMFC)使用多孔性的質子交換膜來取代電解質傳導陽離子與陰離子，質子交換膜只含有水份，由於不含強酸或強鹼所以沒有腐蝕的問題，操作溫度低於 100°C，屬於「低溫型燃料電池」，陽極使用氫氣(H₂)或其他含有氫原子的燃料，陰極使用氧氣，金屬觸媒使用鉑、金、銀等貴重金屬或鎳、鈷、錳等過渡金屬，由於壽命長、穩定性高、操作溫度低，可以廣泛應用在各種移動式車輛與電子產品上，能量轉換效率可達 40~50%。

PEMFC 的關鍵材料為質子交換膜，目前市場上效率最好的質子交換膜是由美國杜邦公司所生產的 Nafion，主要的成份為「聚全氟磺酸」；此外，日本的 Asahi Chemical 公司、美國的 Dow Chemical 公司也都有類似的產品，由於質子交換膜的專利權掌握在少數公司手中，再加上貴重金屬觸媒的價格很高，所以，該種燃料電池雖然商業化較早，卻難以普及。

(3) 磷酸燃料電池

磷酸燃料電池(Phosphoric Acid Fuel Cell; PAFC)使用純磷酸做為電解質傳導陽離子與陰離子，操作溫度大約 160~220°C，屬於「中溫型燃料電池」，陽極使用氫氣(H₂)或其他含有氫原子的燃料，陰極使用氧氣，金屬觸媒使用鉑、金、銀等貴重金屬或鎳、鈷、錳等過渡金屬，由於壽命長、穩定性高，能量轉換效率可達 40~50%，是第一個做為民生用途的燃料電池。由於啟動到穩定發電需要時間長，較不適合做為備用發電機。

(4) 熔融碳酸鹽燃料電池

熔融碳酸鹽燃料電池(Molten Carbonate Fuel Cell; MCFC)使用多孔性陶瓷(氧化鋰鋁)做為電解質的載體，熔融狀態的鹼性碳酸鹽做為電解質傳導陽離子與陰離子，操作溫度大約 600~800°C，

屬於「高溫型燃料電池」，陽極使用氫氣(H₂)或其他含有氫原子的燃料，陰極使用氧氣，由於在高溫下操作，化學反應可以自然發生，不需要使用貴重的金屬觸媒，價格較低。但是這種電池壽命短、穩定性低，而且啟動到穩定發電需要比較長的時間，所以不適合做為備用發電機，能量轉換效率可達 50~60%。

(5)固態氧化物燃料電池

固態氧化物燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell; SOFC)使用固態陶瓷 YSZ(氧化鈮—氧化鋯：Y₂O₃-ZrO₂)做為電解質傳導陽離子與陰離子，由於電解質內不含強酸或強鹼所以沒有腐蝕的問題。操作溫度大約 600~1000°C，屬於「高溫型燃料電池」。陽極使用甲烷(CH₄)或其他含有氫原子的燃料，並且使用鈷—氧化鋯(Co-ZrO₂)或鎳—氧化鋯(Ni-ZrO₂)做為觸媒，陰極使用氧氣，並且使用鋇—錳酸鏷(Sr-LaMnO₃)做為觸媒。因為操作溫度高，金屬與陶瓷之間密封不易，而且啟動到穩定發電需要比較長的時間。不過其能量轉換效率可達 50~60%，且待機耗電量低，近年來相在家庭及商用領域實現商業化。

(6)直接甲醇燃料電池

直接甲醇燃料電池(Direct Methanol Fuel Cell; DMFC)結構與質子交換膜燃料電池(PEMFC)相似，使用多孔性的質子交換膜來取代電解質傳導陽離子與陰離子，質子交換膜只含有水份，由於不含強酸或強鹼所以沒有腐蝕的問題，操作溫度低於 100°C，屬於「低溫型燃料電池」。最大的不同是，質子交換膜燃料電池(PEMFC)的陽極通入含有氫原子的燃料(例如：甲醇)時，必須先將甲醇(CH₃OH)經由觸媒的改質反應(Reforming reaction)形成氫氣，才能流入陽極；而直接甲醇燃料電池(DMFC)是直接將甲醇流入陽極，並且和陰極流入的氫氧離子反應，產生水與二氧化碳，其中甲醇分子裏的氫原子產生水(H₂O)，碳原子產生二氧化碳(CO₂)。

DMFC 的陰極使用氧氣，金屬觸媒使用鈳、銻、鉬、鎢等貴重金屬或過渡金屬，由於電池結構簡單，而且啟動到穩定發電需要時間很短，再加上具有穩定性高、操作溫度低、補充燃料方便等優點，是目前唯一可以廣泛應用在各種移動式車輛與電子產品的燃料電池，可惜能量轉換效率較低是唯一的缺點，目前可以達到 30% 左右。此外，也有科學家使用奈米觸媒將這種燃料電池製作成體積很小的「微型燃料電池」，可以應用在手機、PDA、筆記型電腦等手持式電子產品中，能量密度比鋰電池高出數十倍，可以讓手機待機超過 100 天以上，不過奈米觸媒成本較高，而且質子交換膜價格也高，商業化仍然有困難。

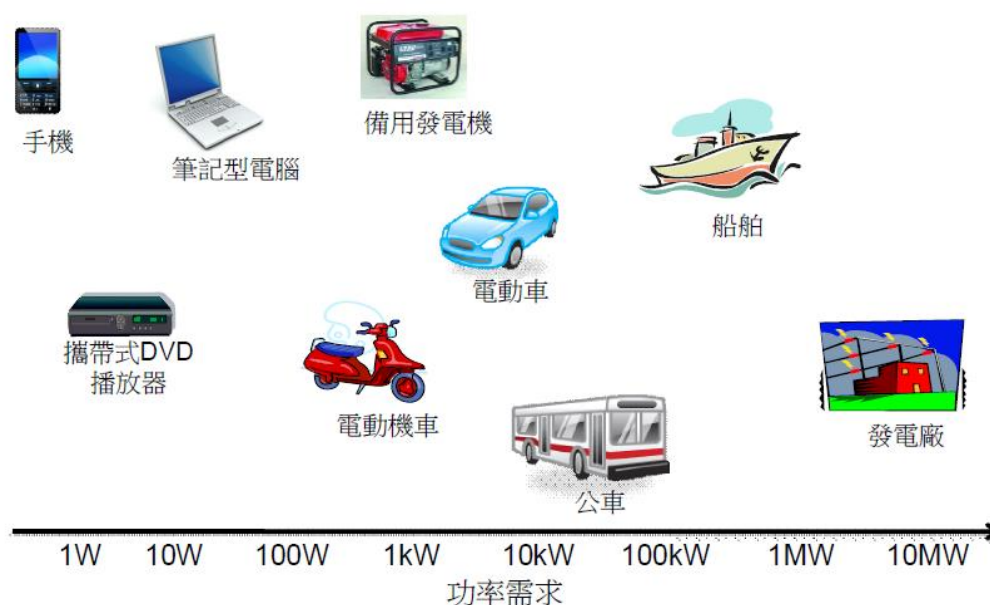
表 1 各種燃料電池的種類與特性

種類	磷酸 燃料電池 (PAFC)	熔融碳酸鹽 燃料電池 (MCFC)	固態氧化物 燃料電池 (SOFC)	鹼性 燃料電池 (AFC)	質子交換膜 燃料電池 (PEFC)	直接甲醇 燃料電池 (DMFC)
電解質	高濃度磷酸(H ₃ PO ₄)	碳酸鋰-碳酸鉀 (Li ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃)	氧化鋯(ZrO ₂)	氫氧化鉀(KOH)	質子交換膜	質子交換膜
陽極	C(含 Pt)	Ni(含 Cr, Al)	金屬(Ni, Zr)	C(含 Pt)	C(含 Pt)	C(含 Pt)
陰極	C(含 Pt)	NiO	金屬氧化物如 LaMnO ₄	C(含觸媒)	C(含 Pt)、鉑黑	C(含 Pt)、鉑黑
流動離子	H+	CO ₃ ²⁻	O ₂ ⁻	OH-	H+	H+
操作溫度	180~200°C	~650°C	~1000°C	室溫~100°C	室溫~80°C	55~75°C
操作壓力	<120psia	<120psia	常壓	<60psia	<30psia	<75 psia
可用燃料	<ul style="list-style-type: none"> ● 天然氣 ● 甲醇 ● 輕油 	<ul style="list-style-type: none"> ● 天然氣 ● 甲醇 ● 石油 ● 煤碳 	<ul style="list-style-type: none"> ● 天然氣 ● 甲醇 ● 石油 ● 煤碳 	<ul style="list-style-type: none"> ● 精煉氫氣 ● 電解副產氫氣 	<ul style="list-style-type: none"> ● 天然氣 ● 甲醇 ● 汽油 	<ul style="list-style-type: none"> ● 甲醇
池體材料	石墨	鎳、不鏽鋼	陶瓷	合成樹脂	石墨	石墨
特性	<ul style="list-style-type: none"> ● 進氣中 CO 會導致觸媒中毒 ● 廢熱可予利用 	<ul style="list-style-type: none"> ● 不受進氣 CO 影響 ● 反應時需循環使用 CO₂ ● 廢熱可予利用 	<ul style="list-style-type: none"> ● 不受進氣 CO 影響 ● 高溫反應，不需依賴觸媒的特殊作用 ● 廢熱可予利用 	<ul style="list-style-type: none"> ● 需使用高純度氫氣做為燃料 ● 低腐蝕性及低溫較易選擇材料 	<ul style="list-style-type: none"> ● 功率密度高，體積小，重量輕 ● 低腐蝕性及低溫較易選擇材料 	<ul style="list-style-type: none"> ● 不需使用燃料重組器，系統簡化。 ● 發電效率低，且甲醇會穿透高分子膜。
優點	<ul style="list-style-type: none"> ● 對 CO₂ 不敏感 	<ul style="list-style-type: none"> ● 可用空氣作氧化劑 ● 可用天然氣或甲烷作燃料 	<ul style="list-style-type: none"> ● 可用空氣作氧化劑 ● 可用天然氣或甲烷作燃料 	<ul style="list-style-type: none"> ● 啟動快 ● 室溫常壓下工作 	<ul style="list-style-type: none"> ● 壽命長 ● 可用空氣作氧化劑 ● 室溫工作 ● 功率大 ● 啟動迅速 ● 輸出功率可隨意調整 	<ul style="list-style-type: none"> ● 壽命長 ● 可用空氣作氧化劑 ● 室溫工作 ● 功率大 ● 啟動迅速 ● 輸出功率可隨意調整
缺點	<ul style="list-style-type: none"> ● 對 CO 敏感 ● 工作溫度高 ● 成本高 ● 低于峰值功率輸出時性能下降 	<ul style="list-style-type: none"> ● 工作溫度較高 	<ul style="list-style-type: none"> ● 工作溫度過高 	<ul style="list-style-type: none"> ● 需以純氧作氧化劑 ● 成本高 	<ul style="list-style-type: none"> ● 對 CO 非常敏感 ● 反應物需要加濕 	<ul style="list-style-type: none"> ● 對 CO 非常敏感 ● 發電效率低
電池內重組可能性	可能	非常可能	非常可能	不可能	不可能	不可能
發電效率	40%	50%	50%	40%	40%	30%
用途	<ul style="list-style-type: none"> ● 汽電共生 ● 分散型發電 ● 離島地區發電 ● 移動式電源 ● 運輸工具電源 	<ul style="list-style-type: none"> ● 汽電共生 ● 分散型發電 ● 取代大規模火力發電 	<ul style="list-style-type: none"> ● 汽電共生 ● 分散型發電 ● 取代大規模火力發電 	<ul style="list-style-type: none"> ● 太空船 ● 潛水艇 	<ul style="list-style-type: none"> ● 小型發電機組 ● 分散型發電 ● 移動式電源 ● 運輸工具電源 	<ul style="list-style-type: none"> ● 移動式電源 ● 可攜式電源
起動時間	1~4 小時	5~10 小時	5~10 小時	< 0.1 小時	< 0.1 小時	< 0.1 小時

資料來源：能源局（2007）、臺灣燃料電池資訊網（2014）、元智大學（2014）、南亞電路板股份有限公司網站（2014）

2.燃料電池之應用

燃料電池 (Fuel Cell) 是電池的一種，其他常見的電池種類還包括一般電池 (Primary Cell) 與可充電電池 (Secondary Cell)。燃料電池的特點為只要持續補充燃料，就可以穩定提供電力，其輸出功率可由數瓦、數千瓦 (kW) 到數百萬瓦 (MW)，可以作為低耗電量設備如手機之電源，亦可以提供發電廠等級的功率輸出，應用相當廣泛 (請參見圖 4)。



資料來源：工研院 IEK(2010/02)

圖 4 燃料電池可提供功率與應用市場

由於地球上化石燃料如煤、石油、天然氣在人類快速消耗下，在未來數十年間可能有枯竭的危機，由再生能源如太陽能、風能、地熱能分解水產生氫氣，作為燃料電池的能源來源，為未來「氫能經濟」世代所規劃的願景。另外，由於燃料電池是直接由化學能轉換為電能，因此較一般火力發電經由燃燒水產生水蒸氣，推動渦輪發電機發電效率高，燃料電池發電效率最高約 60%，若以熱電共生系統效率更可達 80% 以上。氫氣燃燒之後，產生之物質

為水，不會有排放二氧化碳造成溫室效應的問題，因此燃料電池被視為下世代重要之能源供應技術選項之一。

燃料電池擁有許多優勢，目前的科技手段中，尚無一項能源生成技術能如同燃料電池一樣。以下說明其特色：

- **能源安全性**：自 1970 年代的石油危機後，各大工業國對石油的依賴仍有增無減，而且主要靠石油輸出國的供應。若車輛採用燃料電池來驅動，便可節省進口石化燃料之使用。
- **國防安全性**：燃料電池屬於分散式發電設備，可讓地區擺脫集中發電站式的電力輸配架構。長距離、高電壓的輸電網絡易成為軍事行動的攻擊目標。燃料電池設備可採集中也可採分散性配置，分散式的配置可降低敵人癱瘓國家供電系統的風險。
- **高可靠度供電**：燃料電池可架構於輸配電網絡之上作為備援電力，也可獨立於電力網之外。在特殊的場合下，模組化的設置(串聯安裝幾個完全相同的電池組系統以達到所需的電力)可提供極高的穩定性。經過適當規劃的電池系統可以達到的 99.9999% 可靠度，即 6 年內的斷電時間可少於 1 分鐘。
- **燃料多樣性** (請參表 1)：現代種類繁多的電池中，雖然仍以氫氣為主要燃料，但配備「燃料轉化器(或譯重組器，fuel reformer)」的電池系統可以從碳氫化合物或醇類燃料中萃取出氫元素來利用。此外如垃圾掩埋場、廢水處理場中厭氧微生物分解產生的沼氣也是燃料的一大來源。利用自然界的太陽能及風力等可再生能源提供的電力，可用來將水電解產生氫氣，再供給至燃料電池，如此亦可將「水」看成是未經轉化的燃料，實現完全零排放的能源系統。只要不

不停地供給燃料給電池，它就可不斷地產生電力。

- **高效能**(請參表 1)：由於燃料電池的原理係經由化學能直接轉換為電能，而非產生大量廢氣與廢熱的燃燒作用，現今利用碳氫燃料的發電系統電能的轉換效率可達 40~50%；直接使用氫氣的系統效率更可超過 50%；發電設施若與燃氣渦輪機併用，則整體效率可超過 60%；若再將電池排放的廢熱加以回收利用，則燃料能量的利用率可超過 85%。目前用於車輛的燃料電池其能量轉換率約為傳統內燃機的 3 倍以上，內燃引擎的熱效率約在 10~20%。
- **環境親和性**：燃料電池運用能源的方式大幅優於燃油動力機排放大量危害性廢氣的方案，其排放物大部份是水份。某些燃料電池雖亦排放二氧化碳，但其含量遠低於汽油之排放量(約其 1/6)。燃料電池發電設備產生 1000kWh 的電能，排放之污染性氣體少於 1 盎斯；而傳統燃油發電機則會產生 25 磅重的污染物。所以，燃料電池應可改善空氣污染的情況。
- **可彈性設置/用途廣**：燃料電池可集中設置，亦可分散到各區域。它還具有縮放性，利用模組式堆疊配置可將供電量放大至所欲的輸出功率。單一發電元所產生的電壓約為 0.7 伏特，剛好能點亮一只燈。將發電元予以串接，便構成燃料電池組，其電壓則增加為 0.7 伏特乘以串聯的發電元個數。燃料電池可供應的電力範圍極廣，如 1W~1,000MW，故其應用的產品領域也很廣。
- **其它優點**：燃料電池尚有一些值得強調的特點：免充電、無火花、低噪音、無廢棄物處理問題、高機動性等。燃料電池零污染、無燃燒、無噪音，更不需充電，且可 24 小時運作，不像太陽能或風力發電有夜間或無風時段限制。

然而，就當前的技術而言，燃料電池科技仍有一些技術瓶頸待克服，燃料電池的劣勢摘列如下：

- **燃料電池造價偏高**：車用 PEMFC 之成本中質子交換隔膜 (USD300/m²)約佔成本之 35%；鉑觸媒約佔 40%，二者均屬高價格材料。
- **反應/啟動性能**：燃料電池的啟動速度尚不及內燃機引擎。反應性可藉增加電極活性、提高操作溫度及反應控制參數來達到，但提高穩定性則必須避免副反應的發生。反應性與穩定性常是魚與熊掌不可兼得。
- **碳氫燃料無法直接利用**：除甲醇外，其它的碳氫化合物燃料均需經過轉化器、一氧化碳氧化器處理產生純氫氣後，方可供現今的燃料電池利用。這些設備亦增加燃料電池系統之投資額。
- **氫氣儲存技術**：目前 FCV 的氫燃料是以壓縮氫氣為主，車體的載運量因而受限，每次充填量僅約 2.5~3.5 公斤，尚不足以滿足現今汽車單程可跑 480~650 公里的續航力。以 -253°C 保持氫的液態氫系統雖已測試成功，但卻有重大的缺陷：約有 1/3 的電能必須用來維持槽體的低溫，使氫維持於液態，且從隙縫蒸發而流失的氫氣約為總存量的 5%。
- **氫燃料基礎建設不足**：氫氣在工業界雖已使用多年且具經濟規模，但全世界充氫站僅約 70 站，因其造價高貴，仍屬於示範推廣階段。

因應綠色產業潮流，臺北科技大學燃料電池研發團隊繼美、澳、日後，成功研發零污染燃料電池。該燃料電池技術屬中溫型，相較國外高溫型，能源轉換效率更高，北科大初步估算成本，每度電約新台幣 6.2 元。由於該技術設備接天然氣(瓦斯)後可發電、

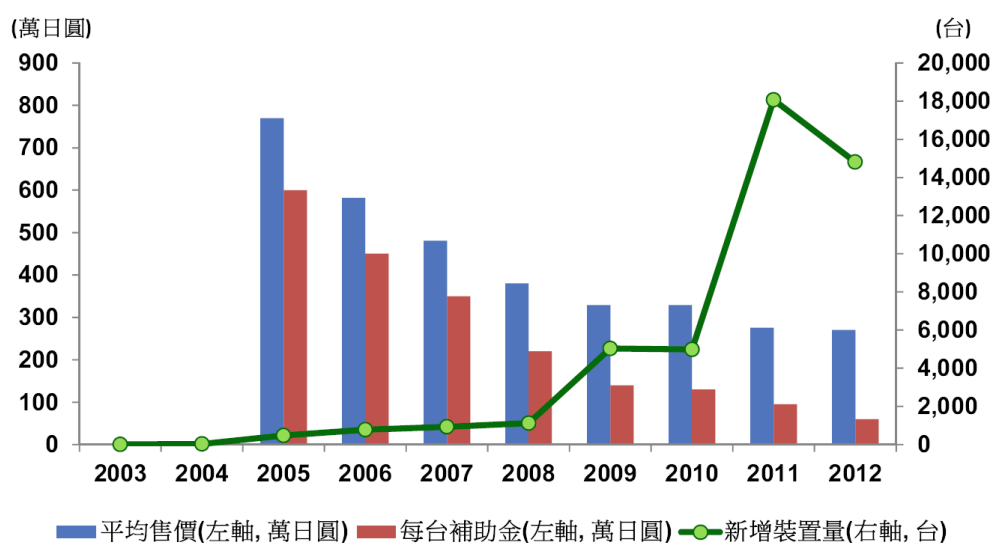
供熱水，能源轉換率是核能發電二倍(大紀元，2013)。姚立德指出，火力發電能源轉換率只有 30%，核能發電約 40%，燃料電池可達 85%，只要接上天然氣管線就可發電，還可產生熱水，且體積小，可安裝在各角落，發電量甚至可支援工廠或整個社區，且無須像發電廠透過管線送電，顯見使用效率高的燃料電池技術更有利偏鄉或離島地區設置。

3.國內外燃料電池發展

(1) 日本

日本於 2002 年啟動家用燃料電池示範計畫，並於 2005 年開始補助家用燃料電池系統的裝置費用，在累積多年示範應用的經驗後，2009 年初以「ENE-FARM」的名稱，正式宣布家用燃料電池進入商用化階段。2009 年 1 月 28 日，六家燃料電池營運商，包括東京瓦斯、大阪瓦斯、東邦瓦斯、西部瓦斯、新日本石油和 Astomos Energy，在東京共同宣示將大力推展 ENE-FARM 系統。

日本設定 2015 年與 2030 年分別達到累計銷售 75 萬台與銷售 250 萬台的目標，各營運商也開始透過網路與實體通路銷售 ENE-FARM 系統。在 2005 年政府開始補助裝置費用後，裝置量開始明顯的成長，而在 2009 年各營運商公開販售 ENE-FARM 後，安裝量有另一波顯著的提升。截至 2009 年，累計家用燃料電池系統安裝量約為 5,500 台，唯 2009 年新增安裝量為 2,200 台，低於年初 ENE-FARM 公開販售時，六家營運商設定的 4,000~5,000 台之銷售目標。康志堅 (2013)認為，主要因素為補助金額調降速度過快，使得民眾自付額過高，影響安裝意願，造成安裝量無法達到原先設定的目標。



資料來源：康志堅 (2013)

圖 5 日本歷年家用燃料電池新增裝置量、售價與補助金

(2) 南韓

南韓是家用燃料電池產業發展進度最快的國家，且南韓在燃料電池產業的發展企圖心相當強烈，列為南韓綠能產業三項(太陽光電、風力發電、燃料電池)重點之一。南韓家用燃料電池系統驗證計畫從 2006 年開始進行，目前有 210 台驗證運轉中，計畫將於 2011 年底告一段落，接下來預計將展開 1 萬台的大規模驗證，目標至 2020 年累計裝置量達到 200 萬台，並成為全球燃料電池技術與產品的主要出口國。南韓除了積極扶植產業之外，也利用政策創造國內市場作為業者早期練兵的場所。韓國即將實施 RPS(Renewable Portfolio Standard)制度，期望為燃料電池在內的綠能技術創造許多市場機會。

(3) 美國

美國能源部在 2009 年打算大幅削減燃料電池發展預算，經過美國三大燃料電池產業協會，包括「電動車輛運輸協會」(Electric Drive Transportation Association)、「國家氫能協會」

(National Hydrogen Association)、以及「氫能與燃料電池協會」(Fuel Cell and Hydrogen Energy Association)的積極爭取，幸而預算並未削減，反而小幅度增加。然而這顯示美國政府對燃料電池的支持下降，受到美國嚴重的預算赤字影響，政府對於綠色能源的推動轉為保守，反對徵收碳排放稅，因此燃料電池預算不被削減的難度增高許多。美國燃料電池的研發經費主要來自於能源部，另外小部分來自於運輸部與國防部。目前全球燃料電池廠商尚無已達到損益平衡，研發費用往往佔公司支出絕大部分。美國許多燃料電池廠商從美國政府取得不少研發補助，若是補助金額大幅縮水，對於各公司營運將造成不小衝擊。

(4) 歐盟

歐盟在應用技術的研究上，以一個整合型的計畫 Framework Program 整合各界資源，以達最大效益，現階段此計畫已經執行至第七期，簡稱為 FP7(執行期間為 2007~2013 年)，在 FP7 中包含許多發展項目，氫能與燃料電池為其中之一。FP7 中氫能與燃料電池統合由 FCH JU(Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking)負責各計畫的協調。歐盟在燃料電池的應用上，最主要的發展重點在於運輸工具的應用。

針對燃料電池應用的發展，歐盟有多個計畫在執行中，包括以公共汽車為主的 HyFleet：CUTE (Hydrogen-FLEET：Clean Urban Transport for Europe)計畫、以小型汽車為主的 Zero Regio 計畫、以短程小型運輸為主的 HyChain 計畫。除了歐盟主導的計畫之外，歐盟各會員也有一些相關計畫，例如德國 CEP(Clean Energy Partnership)計畫。CEP 計畫目標為發展氫燃料與潔淨燃料，以加速燃料電池車輛商業化的時程。2011 年 6 月德國戴姆勒汽車(Daimler AG)的三輛燃料電池汽車以 125 天完成三萬公里環繞世界一周的壯舉，不過相對於部分廠商如豐田、現代，紛紛宣布將於 2015 年推出商用化的燃料電池汽車，歐洲廠商認為寧可等

到技術更加成熟，相關配套措施更加完善再推出產品也不遲。

(5) 臺灣

我國從 2000 年起逐漸開始發展與擴大燃料電池研發規模，包括工研院能環所、材化所開始家用型燃料電池發電機的研發；元智大學的燃料電池中心也獲得一個五年期的長期計畫，進行相關材料與基礎技術的開發。在業界中，亞太燃料電池公司成立，開發電池組、電動機車與發電機等產品。之後，越來越多的公司投入燃料電池的領域，例如亞太燃料電池公司研究電動機車、真敏公司發展燃料電池發電機、恩良公司開發複合材料雙極板、亞太燃料電池公司建立電池組試量產線、核能研究所進行 5 年期的 SOFC 與 DMFC 的產品研發計畫。2009 年開始，經濟部能源局開始執行「燃料電池示範運轉與推動計畫」，期望藉由政府補助業者各項示範應用計畫，協助業者的研發成果能有實際應用的機會，並加速臺灣燃料電池產業商業化的發展。

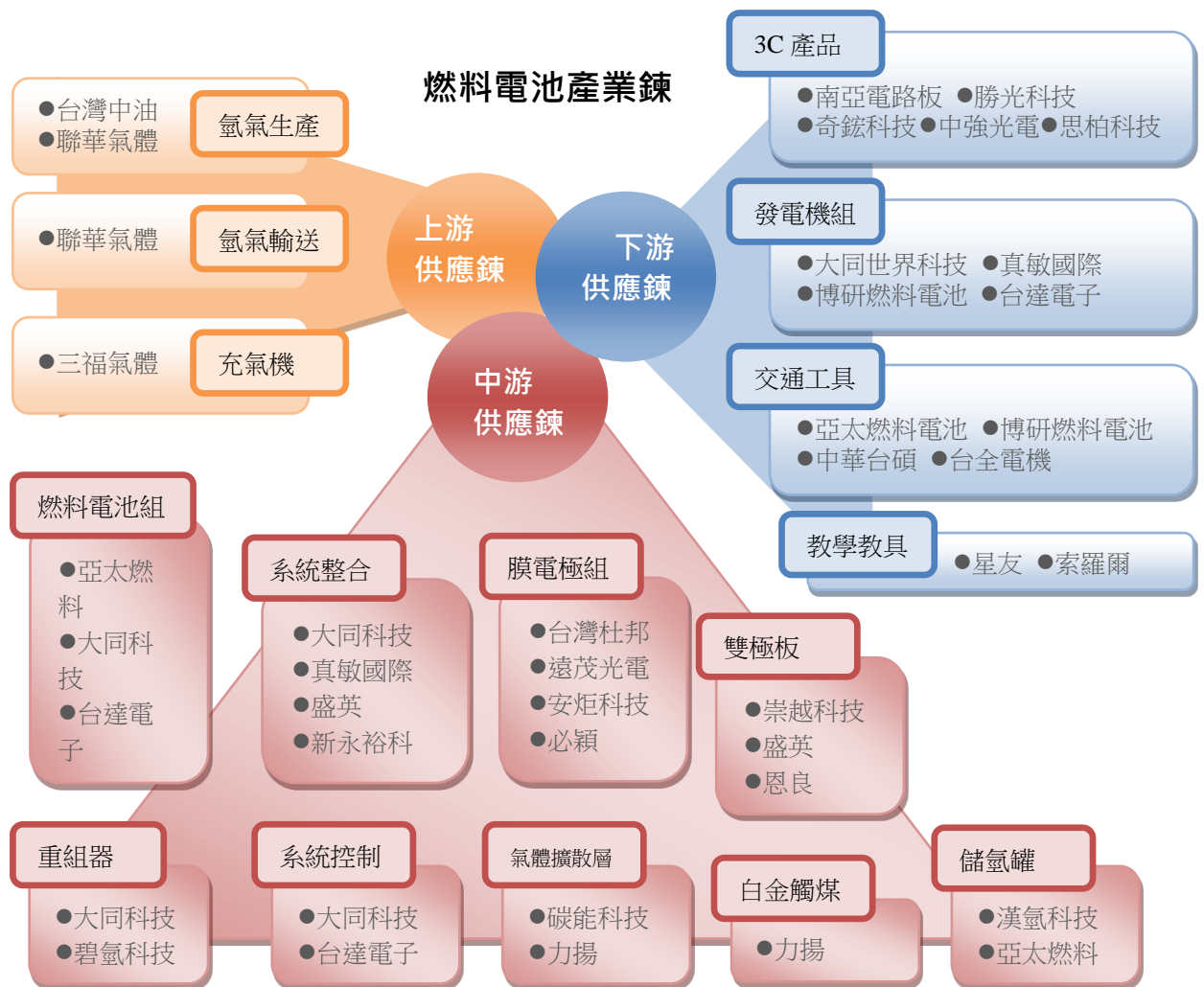
圖 6 為彙整我國氫能與燃料電池產業供應鏈上、中、下游及周邊商品的廠商，目前已有超過 30 家廠商投入，其中上游的原材料製造包括薄膜、膜電極組、氣體擴散層、觸媒、雙極板等 12 家廠商。中游之產業主要為電池組件的製造商，包括製造電池堆、重組器等 11 家廠商。下游廠商則為燃料電池系統應用的 12 家廠商。周邊商品的製造供應商，則包括天然氣、氫氣、甲醇供應商、BOP 零組件、水電解設施以及儲氫相關產品等 19 家廠商。在原材料研發方面，國內廠商投入不多，主要以雙極板為主，而占成本最高之膜電極組則受限於技術能力與國外大廠專利箝制，發展進度落後於國外；至於系統應用產品，目前 PEMFC 廠商主要以小型定置型發電系統或燃料電池機車為開發方向。根據工研院的統計，2010 年臺灣氫能與燃料電池產業產值為新台幣 3.7 億元，較 2009 年成長 8.5%，主要成長動力為企業用備援電力系統。估計 2011 年產值可達新台幣 4.8 億元，較 2010 年成長 28.3%，企業

用備援電力系統市場需求預計有明顯成長，而帶動整體產值成長。另一方面，臺灣也有一些廠商投入 SOFC 機組相關零組件的開發與銷售，近年，BloomEnergy 與臺灣廠商合作開發各項零組件，包括高力的熱處理工業生產熱交換器系統、臺灣保來得的金屬連接板、康舒科技的電源轉換供應器、宏進金屬科技的熱噴塗披覆雙極板等，都已大量外銷美國，今年產值可望超過 60 億元(經濟日報，2014/9/15)。

表 2 主要國家燃料電池發展目標與策略

目標	策略
日本 鎖定家用熱電共生應用，集中力量發展，以達到全球第一。	政府大規模補貼用戶裝置，以國內市場壯大本土產業，複製太陽光電興起模式。
南韓 成為全球主要的燃料電池產品輸出國。	以南韓本地市場作為廠商先期導入的標的，政府挑選少數具有潛力的廠商全力扶植，目標產生幾家具世界競爭力的廠商。
美國 原先設定至 2015 年再決定商業化時程，不過近兩年美國燃料電池發展方向正在爭辯中。	近兩年美國政府與業界對於燃料電池發展方向出現重大歧見，須待目標重新確立後再擬定策略。
歐盟 燃料電池發展策略為整體能源政策的一環，以應用為主，產業發展較不為重點。	歐盟認為燃料電池長期具發展潛力，然短期尚未達到可大量商用化的條件，因此持續發展關鍵技術，維持小規模示範。
中國大陸 以燃料電池車輛為產業發展重點。	燃料電池車為電動車「三縱三橫」策略中的一環，聲勢雖不如鋰電池電動車，仍然列入「十二五」重點項目。

資料來源：工研院 IEK(2011/03)



資料來源：工研院 IEK(2011/03)

圖 6 臺灣氫能與燃料電池產業供應鍊

4. 燃料電池之文獻回顧

近年來分析燃料電池產業的研究，主要是以管理模型分析、計量經濟模型為主。蘇川銘(2006)以**技術成長曲線**之觀點探究燃料電池產業超額報酬是否隨技術力之提升而有明顯之增加，說明專利數累計所代表之技術力進步，確實可反應產業中技術力之成長曲線。依據技術力成長曲線，股價的超額報酬到應用成長期才會大幅成長。蕭易呈(2005)利用**灰色理論預測**未來燃油價格與氫能價格之趨勢走向，藉以分析燃料價格之變化對公車業者營運成

本之影響。並考量政府部門之補貼預算限制，並在最小化社會總成本之目標下，構建**補貼規劃模式**，以決定業者均衡使用量與最適資本補貼與績效補貼額度。研究結果顯示，透過政府之補貼可提高公車業者使用燃料電池公車之意願，此外，公車業者未來使用量愈多，空氣污染之減量成效愈彰，能源節約效益亦隨之愈大

陳郁潔(2009)曾對可攜式燃料電池進行研究，目的在估計鋰電池不同階段產品間之替代**彈性**，推估燃料電池與鋰電池之間可能的替代彈性區間。再利用日本鋰電池與燃料電池的實際與推估之產量趨勢，搭配上上述之學習彈性估計結果推估鋰電池與燃料電池二者價格比之趨勢；最後，再以價格比趨勢結合替代彈性值推估出燃料電池取代鋰電池之數量趨勢。結果顯示臺灣在生產技術上仍有很大成長的空間。王信博(2009)本研究使用替代曲線、價值網分析探討運輸工具以燃料電池為動力源的優勢與必要性、關鍵零組件及供應鏈、技術瓶頸及發展現況。

蒲慎修(2004)利用價值網分析探討發展燃料電池的必要性、各種燃料電池應用之研發、應用情形及發展之現況與展望、燃料電池發電在國內外發展應用面臨的瓶頸與阻力、臺灣地區如何能有效發展燃料電池應用。武天翔(2008)利用 Porter 的五力分析模型、SWOT 分析，認為導入燃料電池技術後，具有再生能源效率與環保特色，產品更具國際競爭力。

Seong and Soo(2002)使用生命週期成本分析，生命週期成本主要受燃料電池的尺寸，燃料電池的成本，以及氫的成本。當燃料電池的成本高，混合是有利的，但是當燃料電池的成本低於400 美元/千瓦，純燃料電池汽車是更有利可圖。Zheng et al.(2012)利用定態模型考慮優化控制概念，評價等效的燃料消耗方面並比較最佳的控制效果的染料經濟性。Trendewicz and Braun(2013)使用技術經濟分析固態氧化物燃料電池應用在污水處理設施。

Jalilzadeh et al.(2010)使用折現現金流量分析燃料電池能源系

統。Bezmalinovića et al.(2013)使用經濟分析光伏系統中質子交換膜燃料電池的重要性。Sanghai (2013)使用敏感性分析各種氫燃料電池系統。確定四種類型的燃料電池，可以使用在氫燃料電池存儲系統中。

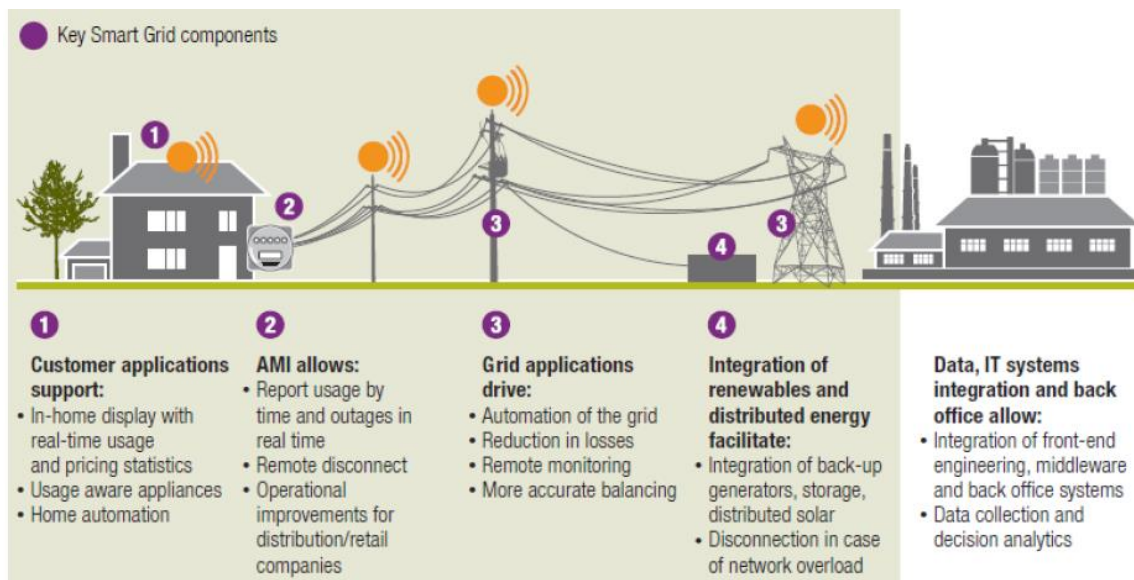
林師模及盧樂人(2008)曾嘗試將燃料電池技術加入動態 3E 模型中，且已可進行初步的經濟及環境效益評估，但由於臺灣當時的 SOFC 技術尚在發展階段，許多資料難以取得，且並非計畫執行之重點分析項目，因此報告中並未對燃料電池多有著墨。過去幾年受限於資料取得困難，使得多數燃料電池文獻大多僅探討 SOFC 技術發展，而未有針經濟面進行分析與探討的原因。目前僅有柴蕙質、葛復光(2012)與彭群雅(2013)嘗試探討燃料電池之經濟性問題。

(二)智慧電網

1. 智慧電網之重要性

受到目前全世界倡議減碳及能源價格高漲的影響下，再生能源成為現在各個國家積極發展之重大能源政策之一，其中再生能源包含太陽能、風力與生質能等。加上日本福島核災事件，迫使各國政府思考其能源政策之永續發展可能性。在這樣的背景下，以風力、太陽光電等再生能源發電替代傳統能源發電，顯然成為各國進行電力建設的重要課題。只是，再生能源發電之不穩定特性，加上傳統電網(electrical grid)並沒有儲電設計，突顯出再生能源電要併入傳統電網在實務上有一定困難。所以即使再生能源對溫室氣體減量提供一個具體且有效的解決方案，仍要思考再生能源主之供應端穩定性。以及，International Energy Agency (IEA, 2011)的報告中亦指出，即便再生能源能為溫室氣體帶來相當大的貢獻，但仍不足以讓 CO₂ 降至想水準，尚需仰賴能源使用效率

提升，這便需要需求端的管理及協調能源供需的搭配。因此，在不久的將來，智慧電網 (smart grid) 也將成為重要的減量技術之一。



資料來源：Mckinsey & Company (2010)

圖 7 智慧電網系統架構示意

智慧電網是整合發電、輸電、配電及用戶端的現代化電力網路(如圖 7 示)，可降低消費端的用電量及提升其能源使用效率，近年各國均納入節能減碳主要政策中。美國、歐盟、日本、韓國、中國大陸均積極推出建置智慧電網相關政策。根據 Morgan Stanley 的預估，2010 年全球智慧電網市場規模約 200 億元，預測至 2030 年將可成長至 1000 億美元以上。此外，根據美國市場調查公司 SBI Energy 的調查，美國 2009 年智慧電網相關產業市場約 60 億美元，預估至 2014 年將達 170 億美元。

一直以來，臺灣的能源消費有 9 成以上來自進口，能源自主性相當低。此外，臺灣過度依賴單一發電方式（火力發電），如今須更全面性的思考能源使用效率，及分散能源使用種類。為提供更穩定的發電組合，臺灣電力公司（後簡稱「台電」）從 2007

年開始，發展智慧電網，希望將過去單向輸送的電力，改為可區域交換式，降低能源消耗、增加再生能源使用、提升能源使用效率。目前台電於 2012 年開始布建高壓智慧電表，期望能監控 2.3 萬的工業用電大戶，及能隨時調配電力。至於其餘電網設置，預計 2030 年完成，也設定 2008 年開始，連續 8 年，每年提高能源效率 2% 以上，使能源密集度在 2015 年較 2005 年，下降 20% 以上，在 2025 年下降 50% 以上。而我國行政院於 99 年 6 月 23 日核定「智慧型電表基礎建設推動方案」，正式啟動我國智慧電表 (advanced metering infrastructure; AMI) 建設，並提出我國智慧電網之總體規劃。這些都顯示「智慧電網」已經被認為是近期可以節提高能源效率的重要項目。

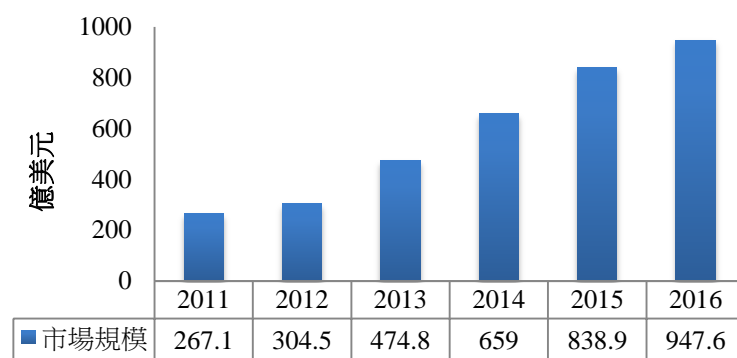
2. 智慧電網之發展現況

不同於傳統發電技術，新能源發電受制於許多地理天然環境條件，所以在新能源發電目標的規劃上需要考慮到其他自然環境以及技術層面之因素。尤其，傳統電力網路在擷取再生能源電能時，容易受到天候影響導致供電不穩定，甚至在電力傳送過程中，會造成約六成的能源損耗，這造成用電效率不彰，因此微型電網在地擷取、在地使用的讓供電較穩定特性，以及可開發更多新興能源應用等特色，使得各國重視智慧電網的布建。

智慧電網是整合發電、輸電、配電及用戶端的現代化電力網路，可降低消費端的用電量及提升其能源使用效率，近年各國均納入節能減碳主要政策中。美國、歐盟、日本、韓國、中國大陸均積極推出建置智慧電網相關政策。根據工研院 IEK 的調查，2011 年全球智慧電網市場規模約 267 億元，Frost & Sullivan 的預估至 2016 年將全球望成長至 1000 億美元左右，較 Morgan Stanley 預估 2030 年 1000 億美元以上的預期更為樂觀許多。

2012 年智慧電網市場成長將略為趨緩，市場規模達 304.5 億

美元，相較於 2011 年成長 14%。智慧電網屬於民生基礎設施，建置驅動力來自於各國政府預算支持，因此，當地政府是否有意願及具備充足預算來推動智慧電網計畫，對是否能形成產業將造成重要影響。由於近年來，全球經濟復甦腳步緩慢，許多國家財政陸續曝露危機，企業對各項投資縮減，這些會對各國政府的推動計畫有所阻礙。所以，反應 2012 年全球經濟表現不佳的問題，歐美等重要國家不得不放緩智慧電網建設腳步，必須延遲智慧電網部分計畫撥款或延緩計畫，這是促成 2012 年市場成長略為趨緩的主因。幸運的是，2012 年中國大陸與日本政府仍持續加速推動智慧電網建設，成為智慧電網市場需求成長性最高的兩大市場。所以，亞太市場是 2012 年智慧電網市場成長主要動能。



資料來源: Frost & Sullivan (2011) ; 工研院 IEK (2012/12)

圖 8 全球智慧電網市場規模預估

各國為減少化石能源的依賴、積極促進再生能源發展、鼓勵節約能源及提高能源效率，因此必須改變傳統電網架構，推動電力基礎建設升級，各國開始制定新能源政策以及推動智慧電網建設之相關法規，因而產生智慧電網市場需求。主要國家，例如：歐盟（EU Smart Grid）、美國（Intelligrid, GridWise, Modern Grid Initiative）、日本（Intelligent, Interactive and Integrated Power System）為了未來分散型能源大量加入做準備，提出了智慧電網的架構。這些領導國家認為未來的電力潮流有別於傳統電網，將會更加複雜，唯有更強健與更具智慧的電網方能滿足未來社會的

多元期望。未來電網勢必要滿足智慧電網三大需求為：（1）供電可靠度與供電品質的保證，（2）納入再生能源電能以減緩氣候變遷影響，以及（3）提高用電效率與營運績效。

全球主要國家近年來智慧電網推動政策顯示各國政府對智慧電網新領域的重視（如表 3 及表 4 所示）。歐盟 2005 年推動「智慧電網技術平台（European Smart Grid Technology Platform, ETP SmartGrids）」，並制訂 2020 年以後發展與推廣智慧電網的願景；美國依據「美國復甦與再投資法案（American Recovery and Reinvestment Act; ARRA）」推動智慧電網相關投資補助、測試及人才培育專案；日本推動「離島智慧電網計畫」與智慧收費及智慧住宅計畫；韓國制訂「國家智慧電網路線圖」，並支持國內企業籌組智慧電網測試聯盟，在濟州島推動示範與測試計畫；中國大陸將「智慧能源網」納入「十二五」計畫，並積極擬定智慧電網發展規劃綱要、關鍵技術研究框架，以及相關技術標準。

表 3 全球主要國家智慧電網推動政策

國別	政策名稱	政策內容
歐盟	2005 年「歐洲科技平台 (ETP) 計畫」 歐洲戰略能源科技計畫 (European Strategic Energy Technology Plan, SET Plan)	制訂 2020 年以後發展與推廣智慧電網的願景，以及 2020 年智慧電表占 80% 之目標。 提出對歐洲電網倡議 (European Electricity Grid Initiative, EEGI)，使輸配電系統在 2020 年前可承受 35% 電力來自分散或集中式再生能源，並使發電在 2050 年達到完全除碳化。
美國	2005 年能源政策法案 (Energy Policy Act) 2007 年能源獨立與安全法案 (Energy Independence and Security Act)	促進發展再生能源、鼓勵提高能源效率及能源節約；建立需量反應機制、鼓勵制訂智慧電表標準。 推動智慧電網基礎建設及應用環境。
州政府	AMI 計畫 電表資訊與隱私安全 智慧電表選擇退出 (Opt-Out) 鼓勵淨計量 (Net Metering) 與分散式發電 需量反應 (Demand Response)	共 8 州立法推動 AMI 建置。 共 3 州立法建立電表資訊與隱私安全監管機制。 僅緬因州，已立法制定智慧電表選擇退出方案。 共 45 州已制訂淨計量電價政策，共 44 州已制訂分散式電源鼓勵政策。 包含動態電價與 (Dynamic Pricing) 與能源效率 (Energy Efficiency)：共 12 州立法推動動態電價；共 42 州立法推動能源效率計畫。
日本	2009 年「離島智慧電網計畫」 2009 年「智慧收費計畫」 2009 年「智慧住宅計畫」	在沖繩偏遠離島推動示範計畫，並評估在更大範圍導入再生能源的結果，同時測試電池容量。 在停車場和加油站配置電動車輛充電容量，並建立配備 IT 的收費系統，以滿足用戶需求。 連接太陽電池、燃料電池、智慧型家電和家用伺服器，實現先進的能源需求管理。
韓國	「國家智慧電網路線圖」 智慧電網促進法案 (Smart Grid Promotion Law)	制訂至 2030 年智慧電網長程計畫：預計至 2030 年為止，政府與民間將投資 27 兆韓圓，進行技術開發支援，並建設 2 萬 7000 座電動汽車充電站。 促進異業合作及培育新的技術與服務，內容主要包括國家級智慧電網基本計畫確立、指定示範地點、制定投資回收和稅收優惠方案、促進 ICT/電力/家電間跨產業合作、制訂智慧電網標準，與安全指南及收集與利用能源訊息安全保護指南等。
中國大陸	「十二五」計畫 2009 年堅強智能電網發展策略	2009 年 11 月正式將「智慧能源網」納入「十二五」計畫；規劃出中國大陸十二五期間之發展目標包含：突破智慧電網核心關鍵技術、形成具有自主知識產權的智慧電網技術體系和標準體系、建立完善的智慧電網產業鏈等。 包含一個發展目標、兩條發展主線、三個發展階段、四個構架體系、五個內涵、六個環節。一個目標為以特高壓電網為骨幹網架，各級電網協調發展，具有信息化，自動化，互動化特徵的堅強智能電網。兩條發展主線為技術主線上實現信息化、自動化、互動化；管理主線實現集團化、集約化、精益化、標準化。三個階段為 2009~2010 年：規劃試點階段；2011~2015 年：全面建設階段；2016~2020 年為引領提升階段。四個構架體系分別為電網基礎體系、技術支撐體系、智能應用體系、標準規範體系。五個內涵為堅強可靠、經濟高效、清潔環保、透明開放，友好互動。六個環節包含發電、輸電、變電、配電、用電和調度。

來源：清華大學能源產業科技策略研究中心 (2012/07)

表 4 智慧電網相關補助政策

補助方式	內容
提供研發或示範計畫投資補助	美國智慧電網投資獎勵計畫 (Smart Grid Investment Grant program) 與示範計畫投資補助 (Smart Grid Demonstration Program)，共約 45 億美元。 德國 E-Energy 計畫智慧電網技術研發補助，德國聯邦經濟與技術部 (BMWi) 補助 6,000 萬歐元。 日本經產省補助進行橫濱市、豐田市、關西文化學術研究都市 (京都府)、北九州市及東北 8 個地區智慧電網實證計畫。
補助智慧電網相關產品使用	日本經產省 2012 年投入 2,324 億日圓補助金，補助設置 HEMS/BEMS、家用太陽能、節電設備、儲能電池等相關產品。

來源：美國 ARRA 智慧電網計畫網站；日本經產省 (2011/11)

而我國將智慧電網列入「國家節能減碳總計畫」標竿計畫之一，主要致力推動智慧電表基礎建設、規劃智慧電網及智慧電力服務。期望透過智慧電網得以有效納入再生能源電能，及提升電力系統運行及控制效率。於 2010 年 6 月 23 日核定「智慧型電表基礎建設推動方案」，進行智慧電表的測試與示範計畫，形成推動智慧電網之開端。為建構我國智慧電網建設，經濟部能源局於 2011 年 8 月 3 日成立「智慧電網總體規劃小組」。

3. 智慧電網之文獻回顧

依據國際能源總署 (International Energy Agency; IEA) 定義，智慧電網 (Smart Grid) 是使用雙向數位化科技與其他先進技術，對來自所有電力供應端的電力輸送進行監測以及管理，並滿足終端用戶不同電力需求的電力網絡。智慧電網可協調所有電力供電端、電網運營商、終端用戶和電力市場所有利害關係人的需求和能力，以盡可能實現系統中各部分的達到電力資源的最佳配置，使成本和環境影響最小化，使系統可靠性、彈性和穩定性最大化。

在建置智慧電網時，重要的是智慧型電表基礎建設取代傳統

計費電表是否能提高整體能源績效，朱榮貴（2011）發現智慧型電表基礎建設的績效顯著地高於傳統計費電表。他曾就法規、技術、經濟及企業社會責任四個構面，發現建置智慧型電表基礎建設取代傳統計費電表之關鍵績效指標而言，重要的構面依序為經濟、技術、法規及企業社會責任。

表 5 智慧電網研究方向

研究方向	方法	文獻
產業研究/ 可行性研究	層級分析法 (Analytic Hierarchy Process; AHP)	<ul style="list-style-type: none"> ● 朱榮貴 (2011), 建置智慧型電表基礎建設取代傳統計費電表之關鍵績效指標。 ● 李睿騰 (2012), 智慧電表系統基礎建設之可行性評估研究。 ● 李信璋 (2009), 我國智慧型電表基礎建設產業發展策略之研究。
建置規劃	PEST 分析、鑽石模型分析、SWOT 分析、五力分析 小樣本專家問卷	<ul style="list-style-type: none"> ● 張登傑 (2010), AMI 基礎建設產業之策略研究。 ● 謝榮道 (2009), 台電公司先進讀表基礎建設與控制中心之通訊網路探討。 ● 蔡侑宗 (2010), 先進讀表基礎建設通訊系統之設計與實作。
技術類		<ul style="list-style-type: none"> ● [電表] 賴政男 (2011), 智慧型電表開發與校正, 台北市: 國立臺北科技大學。 ● [偵測] 陳建宇 (2012), 利用先進讀表基礎建設資料偵測竊電。 ● [申請中專利] 徐明煜 (2012), In-Home Display Authentication Protocols in AMI System。
電能最適組合	線性規劃 (GAMS)	<ul style="list-style-type: none"> ● Chen et al. (2013), Economic analysis and optimal energy management models for microgrid systems: A case study in Taiwan.
電能管理方案 消費者認知	假說研究 (問卷) 訪談	<ul style="list-style-type: none"> ● 許志義、林子揚、顏海倫 (2012), 住宅部門智慧電能管理方案分析與政策意涵。 ● Mah et al. (2012), Consumer perceptions of smart grid development: Results of a Hong Kong survey and policy implications. ● Krishnamurti et al. (2012), Preparing for smart grid technologies: A behavioral decision research approach to understanding consumer expectations about smart meters. (mental model) ● Kaufmann et al. (2013), Customer value of smart metering: Explorative evidence from a choice-based conjoint study in Switzerland. (cluster analysis).
成本分析	個案研究	<ul style="list-style-type: none"> ● Dalton et al. (2009), Feasibility analysis of renewable energy supply options for a grid-connected large hotel. ● 劉躍新等 (2010), 智慧電網成本效益分析及測算模型研究。(以中國大陸某省為例)

有趣的是，李睿騰（2012）亦對智慧電表系統基礎建設之可行性評估研究，獲得了稍微不同的成果。他主要考量的構面包含技術、經濟法規及企業社會責任等三個構面，並發現建置智慧型電表基礎建設取代傳統計費電表之關鍵績效指標重要性依序為技術、企業社會責任、經濟法規。主要差異反映在朱榮貴（2011）與李睿騰（2012）所考量的構面有些許不同。

李信璋（2009）利用 PEST 分析、鑽石模型分析、SWOT 分析五力分析智慧型電表基礎建設產業發展策略。他建議需讓建置期有調整的空間，並有跨部會的政策主導者整合相關政策，持續進行效益評估工作，支持電價結構調整，訂定界面標準，輔導業者策略聯盟或整合，進行民眾教育工作等。而產業發展方面建議業者要積極參與能源局規劃及台電公司建置工作，發展自主技術，進行策略聯盟及整併工作，確認上游供應商品質，利用國內網通業銷售管道並能降低勞力資本。張登傑（2010）則以無母數統計方法以進行小樣本專家問卷之推論探討 AMI 基礎建設產業之策略。

除了探討智慧電表的產業發展策略外，還有黃佳文（2010）透過問卷調查探究 AMI 參與意願調查與入口網站規劃對電表的建置規劃；謝榮道（2009）探討台電公司先進讀表基礎建設與控制中心之通訊網路；蔡侑宗（2010）對先進讀表基礎建設通訊系統之設計與實作；哈冀連、蔡水安（2010）根據文獻分析法發現臺灣智慧電網市場發展趨勢存在無限商機；賴政男（2011）進行智慧型電表開發與校正之研究；陳建宇（2012）討論利用先進讀表基礎建設資料如何偵測竊電；徐明煜（2012）研發電表的驗證通訊協定技術。從過去的智慧電網研究方向（如表 5 所示）得知，目前多偏重智慧電表的策略發展、建置規劃、相關技術為主，顯見智慧電表在智慧電網中的重要性。

二、研究目的

本計畫的目的在於利用持續發展的 3E 評估模型—GEMEET 為基礎，搭配各種技術經濟評估方法，針對智慧電網及燃料電池產業，蒐集製程技術資料以更新模型之基準資料，並完成技術評估分析、成本效益分析、3E 效益評估等，同時也根據分析結果提出具體的產業化建議。

GEMEET 經過幾年的研發及持續的資料更新，目前已具備了完備的能源政策評估功能，也能夠與能源工程模型 MARKAL 進行整合，因此可以用於評估更多元的能源及再生能源政策。GEMEET 目前已進入第二階段的模型研發，除已配合主計處公佈的最新產業關聯資料大幅度更新模型基準資料外，也重新推估及檢討各種模型參數，更依據最新蒐集之新能源資料調整新能源技術之成本結構資料，並反覆測試求解模型基準資料，再由求解結果產製各種重要觀察指標，不斷檢視這些結果是否符合現況、政策規劃目標及專家預期...等。除了上述外，研究也已納入各種新的分析及政策模擬功能。

98 年度除了針對 Top-down 能源科技一般均衡模型進行建置工作外，也持續對此一模型與能源工程技術模型間的軟連結 (soft link) 做實際的測試。99 年度則配合主計處公布之 95 年投入產出表，將模型基準資料全面更新，另一方面，也同時針對能源技術部門修正或調整一些模型的設定，以使其更符合我國之現況，並使模型可用於躉購費率之政策影響評估及能源安全評估。為了確認模型的可用性及模擬結果的合理性，因此 100 年度計畫執行重點在於模型的驗證與確認 (Verification and Validation; V&V)，除了驗證 GEMEET 模型是否符合委託單位需求外，並確認模擬結果的正確性，以提高模型之公信力與可驗證性；此外，100 年度也針對太陽光電進行技術分析、成本效益分析、3E 效益評估，以及市場潛力分析，生質酒精產業也完成技術經濟分析與成本效益

分析。

在 101 年度計畫中，本研究主要針對生質酒精的部份再加強分析結果與政策建議，同時提出更具體化的產業化建議，另也針對 CCS 提出相關的成本效益分析及經濟影響評估。102 年度計畫進行風力發電之成本效益及經濟影響評估及對智慧電網相關技術進行初步評估。本（103）年度計畫進行燃料電池與智慧電網之成本效益及經濟影響評估。具體的工作項目包含以下八項：

1. 技術評估分析：評估產業製程的技術及其成本，以釐清新及再生能源產業於減碳貢獻之多寡，以及成本、產業及效率上之特性。此外，針對新及再生能源產業與其他技術之間的競爭可能性進行評估，此一部份可藉由經濟學中的替代彈性來表示。
2. 成本結構彙整及分析：建置 SOFC 燃料電池產業技術成本之本土化資料庫，為了避免所蒐集資料與國內產業界相去甚遠，因此有必要訪談相關研究單位、廠商，或產業聯盟組織等。若本土化資料不足，則蒐集整理國外數據。
3. 成本效益及靈敏度分析：依本土化成本數據評估再生能源產業的成本效益，並進行敏感度分析找出核心影響，分析範圍包含各種技術及經濟條件。
4. 3E 效益評估：完成 SOFC 燃料電池之動態 3E 效益分析，探討其對總體經濟（產值、GDP、附加價值、就業人口、單位減碳成本等）、環境（如 CO₂ 減量效益）、能源（如能源密集度）之影響。
5. SOFC 市場潛力分析：完成 SOFC 燃料電池產業之國際市場潛力推估，以及國際市場對我國之經濟效益（包含：產值、GDP 及就業人口），釐清其產業化之重要技術關鍵，探討我國具有之優勢。
6. SOFC 產業化建議：完成 SOFC 燃料電池現況調查分析以及產業化建議，包含：(1) 技術發展現況及展望，(2) 國內相關技術研發、產業能量及其整合之調查分析，(3) 技術發展 SWOT 分析，(4) 技術系統及產業化之發展路徑

(包含未來需自行發展之核心技術)、預期效益及策略，(5) 我國發展燃料電池產業之推動策略，(6) 產業化時程與整體貢獻 (GDP、產值、減碳成本及國內可裝置量)。

7. 完成智慧電網之技術經濟分析方法研析，建構一套適用於衡量國內智慧電網成本效益之評估方法。
8. 更新動態 3E 模型參數資料庫，確認模型之品質，並與國內其他模型比較。

在 100、101 及 102 年度計畫中，已針對太陽光電、生質酒精、碳補捉封存及風力發電完成上述 1~6 項的評估。延續 102 年度的計畫，本 (103) 年度將針對燃料電池完成 1~6 的評估，並對智慧電網完成 4~6 項評估。本研究針對以上工作項目將採整合評估研究的方式達成，不限於特定模型，研究重點將著重在成果之可見度、衝擊性與影響性。至於智慧型電網之經濟影響評估及燃料電池之技術經濟與經濟影響評估等，將於 103 年度完成分析，各年度詳細工作項目規劃如下表 6 所示。

表 6 各年度工作項目

技術項目 \ 年度	100	101	102	103
太陽光電	1~6 項			
生質酒精	1~3 項	4~6 項		
CCS		1~6 項		
風力發電			1~6 項	
智慧型電網			1~3 項	4~6 項
燃料電池				1~6 項

貳、研究方法與過程

新能源及再生能源技術的發展，就如同一般產業技術或是產品的發展歷程，總是會經歷初期研發投入高、產品成本高、市場需求少...等不利產業發展的階段，而後，隨著環境的變遷，各種有利條件的出現及相關政策的配合會使其逐漸變得有競爭力，市場逐漸擴大，相關產業也得以逐漸擴張。因此，各國在積極發展新能源及再生能源的同時，通常也會很關心大量資源投入這些技術及產業發展所可能產生的各種效應，包括可能產生的資源排擠效應。

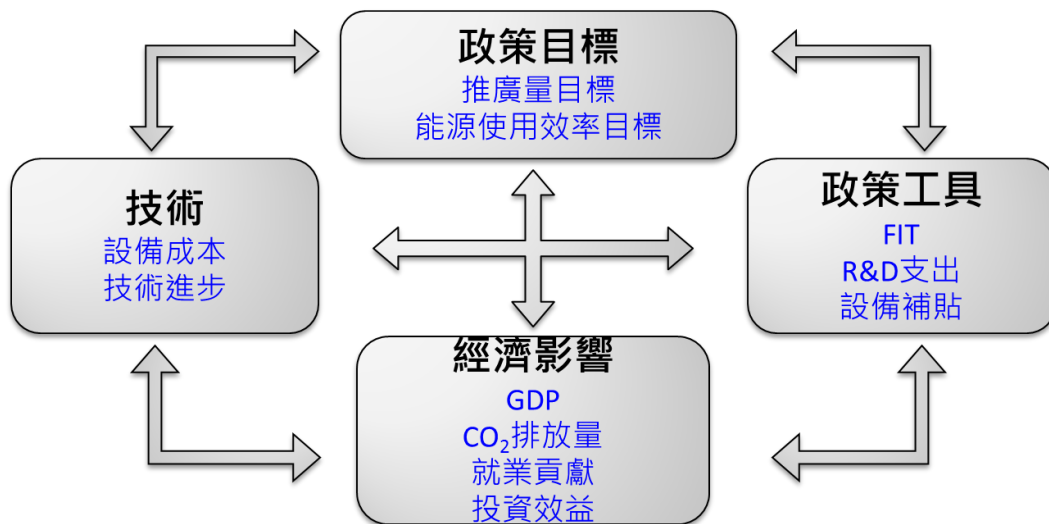


圖 9 能源政策與 3E 之關連性

雖然藉由各種立法，提供了新能源及再生能源發展的誘因，不過，能源政策如果不能與產業政策及科技政策、環境政策形成互補，就沒有辦法產生正向循環，達到相輔相成的效果(請參圖 9)。就以再生能源為例，光是透過對新能源及再生能源的供應及使用端獎勵、補貼，如果沒有搭配產業政策對廠商的扶助、科技

政策對再生能源研發的激勵，以及環境政策對環境品質及不同能源類型需求的要求，能源政策的效果將會相當有限。因此，這些新能源技術的發展，對於能源、環境及經濟到底可以帶來多少效益？新能源技術產業化成功的機會有多高？市場潛力有多大？對市場就業會帶來何種影響？如果在投入研發前，或是研發期間沒有經過詳細的評估，將有可能最後發展出不具效益或是不具市場競爭力的技術，導致資源的浪費，進而損及國家整體經濟的發展。

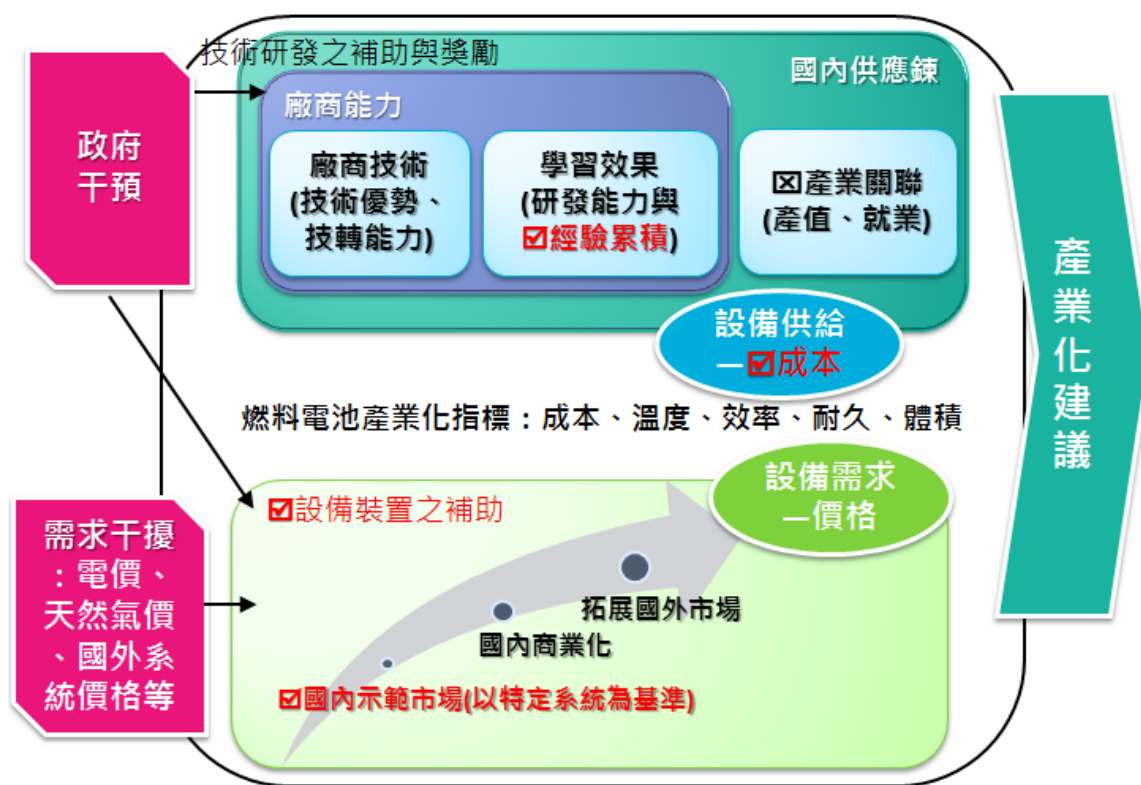
要針對新能源技術進行詳細的成本、效益、競爭力及市場潛力評估，需要有一套完整而又複雜的架構，惟過於複雜的架構通常需要投入的人力及成本較高，也比較不易操作，而所能夠產生的分析邊際效益也可能有限，因此，需要衡量所擁有的分析工具，再搭配各種時間及成本的考量，決定所將採行的分析架構。

一、燃料電池

(一) 燃料電池研究架構

過去的研究皆是單純針對燃料電池某種特殊用途或是特定面向來做分析，為了對我國燃料電池產業進行整合性的探討，以評估發展燃料電池技術發展的可行性，本研究主要以技術經濟分析方法（techno-economic analysis method）為主，同時搭配與核研所共同開發研究之 3E 評估模型 GEMEET，針對固體氧化物燃料電池(SOFC)，在各種不同用途如住家、工商業、發電及再生能源儲能等其他用途，及不同的燃料種類下，更完整評估其成本與效益。通常，技術經濟分析係透過成本分析，計算各種經濟效益指標供投資者參考，其中，燃料電池產生的電能亦可換算成節能效益及二氧化碳減排之效益。另外政府在規劃未來燃料電池發展時，雖然已經訂定未來年度的規劃目標，但可能技術尚未成熟，所以在

相關補貼政策還無任何規劃，透過技術經濟分析除了可以分析不同種類燃料電池之成本效益以外，還可以評估相關的補貼政策如躉購費率及設備補貼等。至於在 3E 模型評估方面，主要是評估發展燃料電池發電技術及其相關之設備製造產業時，對其他產業及總體經濟的影響，包括經濟影響（經濟成長或衰退、產業結構變化）、環境影響（CO₂ 排放量變化或因提高自製率導致的 CO₂ 排放量變化）與能源影響（能源消費結構改變等），另外也可透過技術經濟分析所評估出來的補貼政策，來觀察在這樣的補貼政策下未來燃料電池的發展潛力與政府所訂定目標之可行性。最後技術經濟分析與 3E 模型分析的結果將綜整後，再進一步提出我國燃料電池產業的產業化建議（如圖 10 所示）。



☑進行技術經濟分析模擬 ☒進行 GMEET 模型分析

圖 10 FC 產業化涉及層面

如前所述，本研究係透過技術經濟分析為燃料電池成本效益

評估的基礎。利用分析，可以探討燃料電池技術與傳統發電技術相比是否具成本有效性，也可以探討取代傳統發電的環境效益。除此之外，利用此一架構，本研究也可以進一步評估未來合理的補貼政策。具體而言，本研究進行以下的探討：

1. 估計燃料電池發電技術之均化成本，
2. 分析重要成本因素對均化成本的影響，
3. 評估未來合理的補貼政策，
4. 分析補貼政策對於均化成本與成本效益評估指標的影響，

本研究之成本效益分析詳細探究各不同用途及燃料之燃料電池，也能提供簡單易懂的分析指標（例如：淨現值、內部報酬率等），惟此一分析也有其不足處，說明如下：

1. 本計畫雖就燃料電池技術的成本與效益項目進行詳盡的分析，但技術的推展對經濟體系其他產業可能產生的帶動效益（如：其他相關產業產值的增加），或對經濟體系可能產生的負面影響（如：製造燃料電池也會產生 CO₂），則無法做適當的考量。
2. 我國燃料電池發電技術目前尚處於規劃階段，無法取得實際資料及數據，且實際設置及併網的費用有可能比目前估計得還高。
3. 實務上，我國能源推廣規劃是以投資組合概念進行，成本效益分析法無法評估長期競合關係。例如：目前風力發電與太陽光電都是再生能源電源的重要來源，如果未來要加入燃料電池技術，其研發資金要如何分配到各項技術？什麼樣的組合在政府的支持可以支付最少的代價來取代最多的化石能源？

有鑑於以上，為求分析的完整性，本研究亦採用了涵蓋經濟、能源、環境的 3E 模型 GEMEET 進行相關的探討。GEMEET 模型涵括幾種新能源及發電設備產業，也包含了大部分的發電技術，

可以完整探討經濟體系中產業的關聯效果。該模型的部分優點概述如下：

1. 為動態模型，並納入多種新能源技術，如：陸域風力發電技術、離岸風力發電技術、太陽光電技術與燃料電池等，可用於探討新能源產業的可能發展和最適發電組合等議題。
2. 納入技術學習效果之設定，可探討未來可能的補貼政策路徑下，現行推廣政策之可行性，以及分析最適之政策與誘因工具之組合。
3. 編製各種新能源及燃料電池發電技術的成本及投入結構，可分析燃料電池發電及燃料電池產業發展對經濟體系其他部門之連動效應，包括對他產業產出的帶動效果與對總體經濟的影響，如：GDP、產業結構、CO₂排放、能源消費結構等。

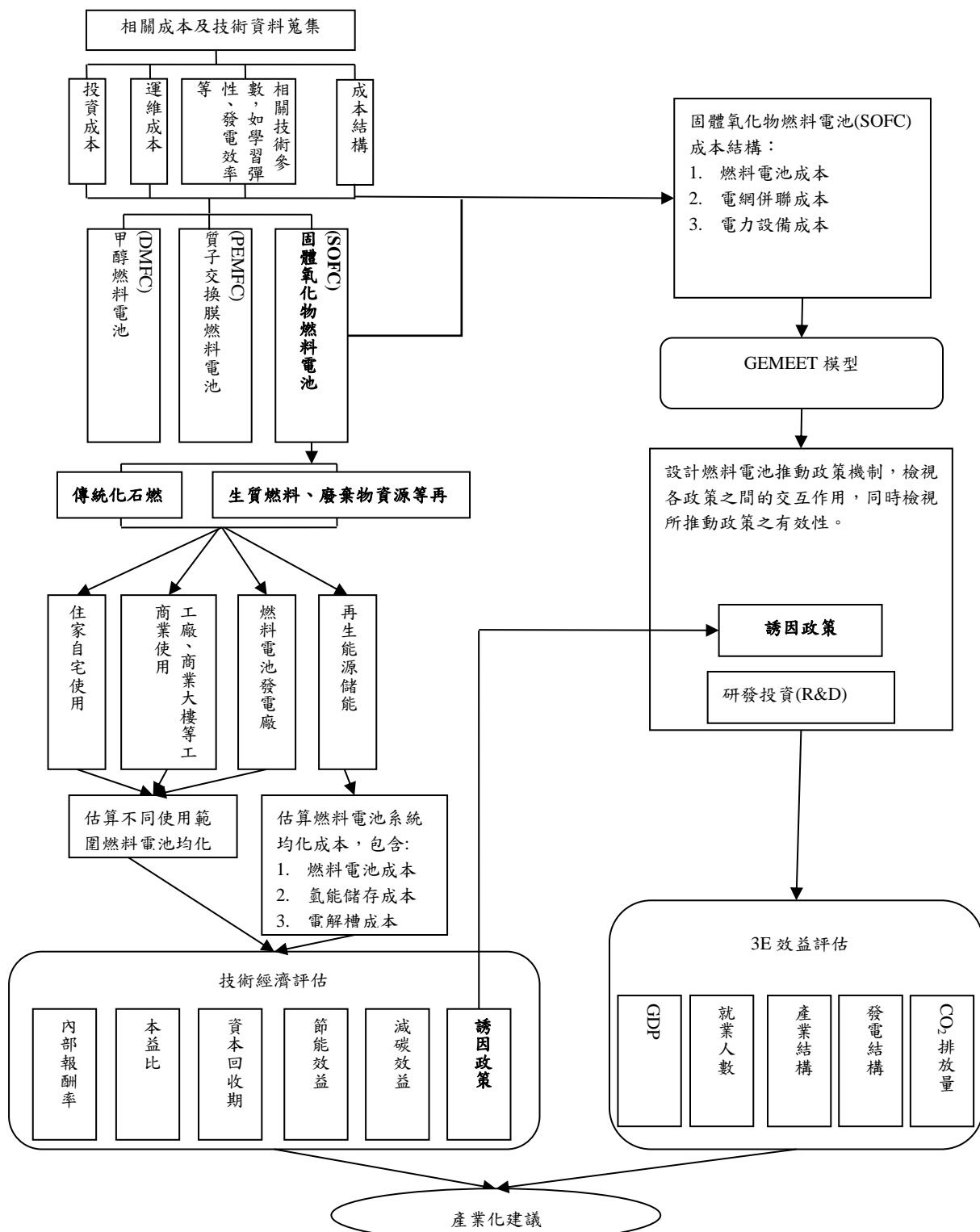


圖 11 燃料電池技術經濟分析架構

發展新能源產業是建立低碳家園的重要政策，惟新能源外部效益（如：發展在地能源、降低進口能源依賴、CO₂ 減排效益）的經濟價值無法透過價格訊號（price signal）來反映，導致新能源成本表面上看似高於傳統能源，需要政府適當介入，以矯正市場失靈的現象。惟政府介入以扶植新能源的措施或許可以改善市場失靈的情況，但政府干預也會影響效率與公平，任意的干預也可能導致政府失靈，造成更多的社會無謂損失。有鑑於此，政府在干預之前，必須審慎評估干預之代價與市場績效之改善程度，而本研究應用的 GEMEET 模型可以協助政策制定者模擬與分析再生能源之財務誘因與研發政策組合的效果，以及評估干預可能引起的市場績效變化。然而，該模型目前仍有以下之限制：

1. 模型建置的基礎資料為投入產出表（Input-Output Table），若要對特定產業之特定投入成本（如：燃料電池成本、運維成本等）進行敏感性分析，則需重新編表，分析上略為繁複。
2. 模型內相關補貼政策只能外生給定，無法在給定報酬率下內生求解出適合之補貼政策。

(二) 技術經濟分析工具

2.1 燃料電池之均化成本

一般如果只考慮發電用之燃料電池，則影響燃料電池成本最主要的因素為電池的額定功率(rated power)，因此燃料電池的期初投資成本為：

$$COST_{FC} = UnitCost_{gen} \times P_{discharge}$$

$UnitCost_{gen}$ 為氫能燃料電池之單位成本(\$/kW)

$P_{discharge}$ 為燃料電池系統的額定功率(kW)

燃料電池的總年均成本($TC_{storage}$)為年均資金成本(AC)、年均運維費用($O\&M_c$)及燃料成本(F)的總和，如下式所示：

$$TC_{storage} = AC + O\&M_c + F$$

而年均資金成本則為期初投資成本與固定資產回收係數(CRF)之間的乘積：

$$AC = COST_{FC} \times CRF$$

$$CRF = \frac{i_r(1+i_r)^{n_y}}{(1+i_r)^{n_y} - 1}$$

i_r 為折現率(%)

n_y 系統壽命(年)

燃料電池的均化成本則代表每產生一度電所需之成本，可以下式來表示：

$$LCOE = \frac{TC_{storage}}{AEP}$$

LCOE 為均化成本(\$/kWh)

AEP 為每年所產生之電力(kWh/yr)

2.2 成本效益指標

成本效益分析方法通常被政府或民間部門應用於評估投資方案的可行性分析。成本效益分析係利用數量分析方法，評估一項或多項投資計畫所可能衍生的成本及效益，以提供決策者了解計畫之可行性，並作為決策之重要依據(許義忠，2007)。因此，成本效益分析可用於私人企業或政府單位，以衡量一項民間或公共投資計畫是否符合經濟效益，惟兩者評估的差異在於私人企業追求利潤極大，而政府單位則是追求整體社會福利最大，故私人企

業僅需考量其可能發生的現金流，而政府單位則需將一項公共投資計畫執行後，可能帶來的無形、有形的外部效益及成本均納入考慮。成本效益分析考量的重點簡述如下：

(1)明確界定分析者的目的

成本效益分析前需區別到底係以投資者或政府角度來分析再生能源之經濟效益，通常分析人員不能只根據經濟效益的高低作成政策推薦的決定，還應該通盤考慮社會公平性和政治可行性等價值存在的意義（張四明，2001）。因為政府與一般投資者追求的目的不同，往往會因此導致評估效益的項目有所不同。以投資者而言，其追求個人利潤最大，將設置新能源設備的設備補助、發電量之節約電費支出設為收益項目，相反地，對政府而言，再生能源收購補助或設備補貼應視為社會成本，且政府係以追求全體社會福利最大為目標，故對於再生能源產業對環境、社會、能源的外部效果，如空氣污染減量效益、產業帶動效益、自主能源效益、經濟減緩成本等均應加以考量。

(2)確定各種成本和效益項目

分析者考慮到再生能源所帶來的外部成本及效益時，通常以「願付價值」來衡量，若涉及正的外部性，以人們願付最大金額來估算效益；若涉及負的外部性，則以人們願意最大代價來規避之金額估算外部成本（張四明，2001）。

(3)選定貼現率

貼現率的選擇在理論上有兩種看法：「機會成本觀點」和「社會時間偏好觀點」，前者強調透過機會成本的估算來決定公私部門間的資源分配，即用「影子價格」作為貼現率；後者強調用「社會時間偏好率」作為貼現率，可確實反映時間差異及跨世代的觀點，惟兩者均不易推估。實務上則是最常採用「資本市場利率」做為貼現率，如政府公債利率、中央銀行重貼現率、商業銀行存

放款利率、股票市場利率、乃至於民間借貸或互助會的利率等，基本上取捨並無絕對的標準。由於政府公債風險低，易吸引人從事長期的投資，故部分經濟學家認為政府長期公債利率較能代表社會時間偏好率。

(4)選定評估準則

一般成本效益評估指標中較常用的評估準則有六種，包含(a)淨現值(Net Present Value, NPV)、(b)內部報酬率 (Internal rate of return, IRR)、(c)益本比(Benefit-cost ratio, B/C)、(d)折現回收期 (Discounted Payback Period, DPB)、(e)簡易回收期 (Simple Payback Period, SPB)、(f)獲利指數 (Profitability Index, PI)。

成本效益分析的目的係在探討燃料電池的經濟可行性，本研究透過以下之成本效益指標，說明我國不同用途燃料電池之成本與效益，各項指標簡要說明如下。

(a) 淨現值 (Net Present Value; NPV)

是將投資項目之未來的現金流入 (Cash Inflow; CI) 與現金流出 (Cash Outflow; CO)，全部按基準折現率 (i) 折現成投資起始日現值之總合，稱為該投資的淨現金流量，或稱為淨現值。假設燃料電池的設置淨現值等於或大於零時，即項目收益等於或大於投資成本，代表該項目損益兩平或是投資者有淨利，方案是可接受的；相反的，如果投資評估的淨現值為負數，代表此項目會造成投資者損失，此方案不應該接受。其計算公式如下：

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{(CI_t - CO_t)}{(1+i)^t}$$

其中，n 為計畫投資期間， CI_t 為第 t 期現金流入量， CO_t 為第 t 期現金流出量，i 表示企業或投資人內部訂定的基準折現率。

本研究採用的基準折現率 (或稱折現率)，乃是參考能源局

再生能源電能躉購費率所假設之 5.25%（能源局，2013）。此折現率並非單指業者的投資報酬率，而是指計畫投入全部資金之報酬率，實指自有資金與借貸資金的平均資金成本率（Weighted Average Cost of Capital; WACC），計算公式如下：

$$\begin{aligned} WACC &= R_O \times W_O + R_I \times W_I = R_O \times W_O + (R_O + \beta) \times W_I \\ &= (R_f + \alpha) \times W_O + (R_f + \alpha + \beta) \times W_I \end{aligned}$$

其中，

$$W_O + W_I = 1;$$

R_O 為借貸資金利率；

W_O 為借貸資金比例，依典型計畫案例設定為 7 成；

R_I 為自有資金報酬；

W_I 為自有資金比例，依典型計畫案例設定為 3 成；

R_f 為無風險利率，10 年期政府公債殖利率之 99 年度平均值為 1.36%；

α 為信用加碼風險，即銀行對新興投資計畫之融資加碼，採用 2%；

β 為風險溢酬，參考國內外投資案例，採用值 6.177% 作為標竿；

融資期間為 10 年，第 11 年償還全部貸款本金。

(b) 內部報酬率 (Internal Rate of Return; IRR)

亦稱內部收益率，為讓投資計畫在分析期間內的淨現金流量現值合計等於零的折現率。當內部報酬率 (IRR) 等於或大於基準折現率 (i) 時，投資項目是可以接受的。計算公式如下：

$$NPV(IRR) = \sum_{t=1}^n \frac{CI_t - CO_t}{(1 + IRR)^t}$$

(c) 益本比 (Benefit-Cost Ratio; B/C)

即是將各年淨現金流入折現成利益總合 (B)，除以期初投資額之折現成本總合 (C) 之比值，計算方式如 (5) 式所列。當 B/C 等於 1 時，表示投資項目達損益兩平；若 B/C 大於 1，代表該項目之利益總合大於成本總合，投資者可接受該項目；若值小於 1，則不可接受該項投資計劃。其計算公式為：

$$B/C = \frac{\text{Benefit}}{\text{Cost}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}},$$

其中，n 為計畫投資期間， B_t 為第 t 期項目收益， C_t 為第 t 期投資支出，r 為折現率。

(d) 投資回收期 (payback period)

亦稱還本期間，用於衡量回收投資項目期初投資成本所需要的年期，即以投資項目淨現金流入抵償原始投資金額所需要的全體時間。回收期間 (N_t) 之計算方式如下：

$$\sum_{t=0}^{N_t} (CI - CO)_t = 0$$

(e) 社會效益

燃料電池的燃料可分為傳統化石燃料與非傳統化石燃料式如生質燃料、廢棄物與再生能源等，本計畫可針對這些不同類別的燃料電池計算其 CO₂ 排放量。並與傳統化石燃料發電技術做比較，最後評估出 CO₂ 減量的環境效益及化石能源的節約效益。

(三) 3E 效益評估

在 3E 效益評估中，本計畫將以動態一般均衡 (computable

general equilibrium ; CGE) 模型 GEMEET²來補充技術經濟分析所無法觸及之整體經濟中產業關聯及回饋效果。一般來說，從發展燃料電池的角度來看，以目前成本較其他化石燃料發電技術還要高的情況下，勢必要投入更多的人力與資金才能使其在市場上更有競爭力。也就是說在目前台灣發展燃料電池之初期階段，高成本的特性會阻礙其產業技術進步的推展。所以為了要消除燃料電池這樣的發展障礙與不確定性，設備補貼與研發投入為其提升競爭力及技術進步主要之驅動力。

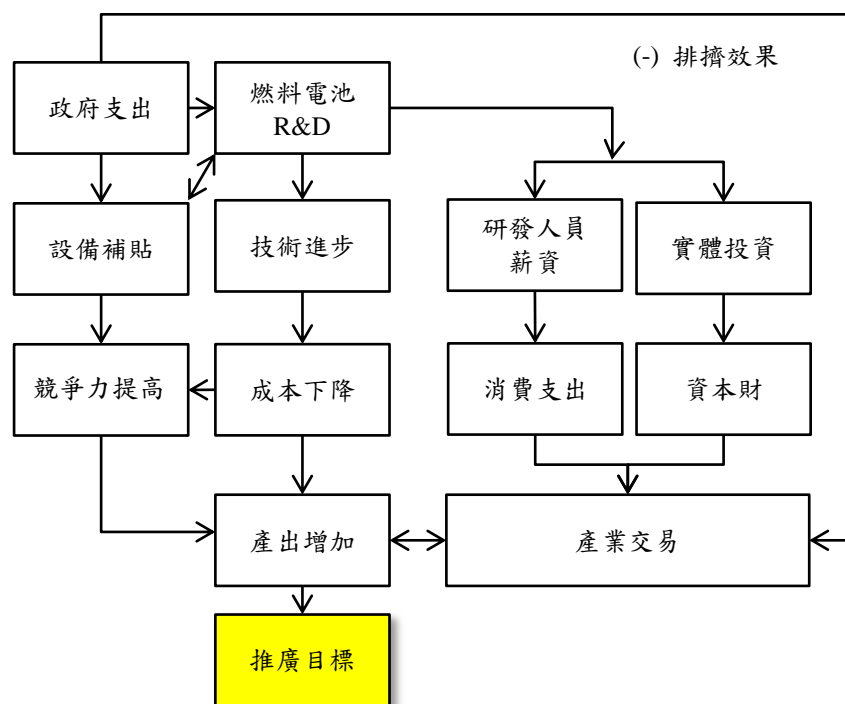


圖 12 設備補貼與 R&D 投資對推廣目標之影響路徑

而從經濟體系一般均衡的角度，本計畫可由圖 7 約略說明實施設備補貼與 R&D 投資對推廣目標可能產生的影響。實施燃料

²在原子能委員會核能研究所支持下，中原大學應用經濟模型研究中心開發了適合於再生能源政策及產業發展效益評估的 3E (Energy, Environment, and Economy) 評估模型—GEMEET (General Equilibrium Model for Energy, Environment, and Technology Analysis)。此一模型有三個最主要的重點：(1) 符合經濟現況，並納入重要之新及再生能源產業與主要發電技術 (2) 可以用於評估新及再生能源產業發展的成本與效益；及 (3) 可以將其與 MARKAL 或是 MARKAL-MACRO 模型做軟連結，以發揮兩類模型的最大效益，提升政策評估的品質。

電池設備補貼制度時，主要使其相對於傳統發電技術保有競爭力，產出也得以增加。另外，政府投資 R&D 在燃料電池的技術發展時，會加速這些產業的技術進步，進而使其成本下降、競爭力提升，發電量自然也跟著增加。除此之外，增加 R&D 投資也會增加整體研發人員的雇用，使整體薪資支出增加，另有部分也會用於購買相關設備及產品等實體性投資。薪資報呈增加會使消費支出增加，而實體投資增加則會增加資本財的購買，這些再進一步透過產業間互相關聯的運作，促使各部門產出也跟著增加，部分會再回饋到再生能源部門，使其推廣目標的達成更進一步，整體經濟之成長也有額外正面的效果。但從另一方面來說，雖然設備補貼與 R&D 投資對於燃料電池或整體經濟有正面的影響，但由於執行這些政策主要的資金來源為政府，所以同時也會排擠掉政府對整個經濟體系之支出，減弱了一些原有的產業間交易效果，對於燃料電池產業與整體經濟將有一些負面的效果。

有鑑於此，本研究的目的主要有幾個方向。政府透過相關補助政策發展燃料電池，經過整個經濟體系各個部門之間的互動下，如果燃料電池所扮演的角色不同，例如當作基載電力或是直接與燃氣發電作替代等，其所產生之經濟、社會及減碳效益等也會有所改變。接著如果能從整體經濟發展的角度出發，分析成本效益之間的關係，則可補足技術經濟在這方面不足的部分。為達到上述目的，本文採用一動態可計算一般均衡模型 **GEMEET**(**General Equilibrium Model for Energy Economic and Technology Analysis**)，以納入主要能源技術部門（包含傳統及新能源、再生性能源，如：火力發電、太陽光電、風力發電、水力發電、核能、IGCC、燃料電池發電等）為主。除此之外，在模型運作的機制方面，本研究模型核心的部份雖與多數動態可計算一般均衡模型³之設定類似，但模型在經過各種與新及再生能源技術特型及相關政策機制

³本文所採用之 CGE 模型主要乃以澳洲 ORANI-G 模型(Horridge,2003)架構為基礎，期間模型歷經多次修改與資料調整而成。

與方程式之調整、重新設計後，已成為一相當獨特的政策評估模型。而目前建置的 GEMEET 模型已具有以下之特色：

1. 納入特殊之新能源及再生能源部門
2. 部份新能源或再生能源主要用於發電，部份則以作為一般消費為主，另有一些則屬於以半成品或組件、設備製造為主
3. 考量了內生技術變動的機制，並連結了科技政策的影響機制
4. 發電部門係由不同之發電技術所組成
5. 考量了能源政策中的誘因或補貼政策，針對租稅及補貼有特殊的處理
6. 考量環境政策的施行，設計了課徵碳稅或能源稅，以及直接進行總量管制之機制

在建置的 GEMEET 模型基本架構中（圖 13），生產者購買包括商品（中間需求）及原始要素（要素需求）來進行生產，而就家計單位、政府及國外購買者等最終需求者而言，其僅購買商品，並無原始要素的購置。而政府可以針對商品、家計及生產者課徵稅收。惟不論中間或最終需要，其所購買之商品均可分為國產品及進口品。至於在決策行為模式的設定上，係利用投入—產出弱可分割假設（weak separability assumption），將生產者、投資者及消費者之決策行為以巢式（nested）的結構設定處理。

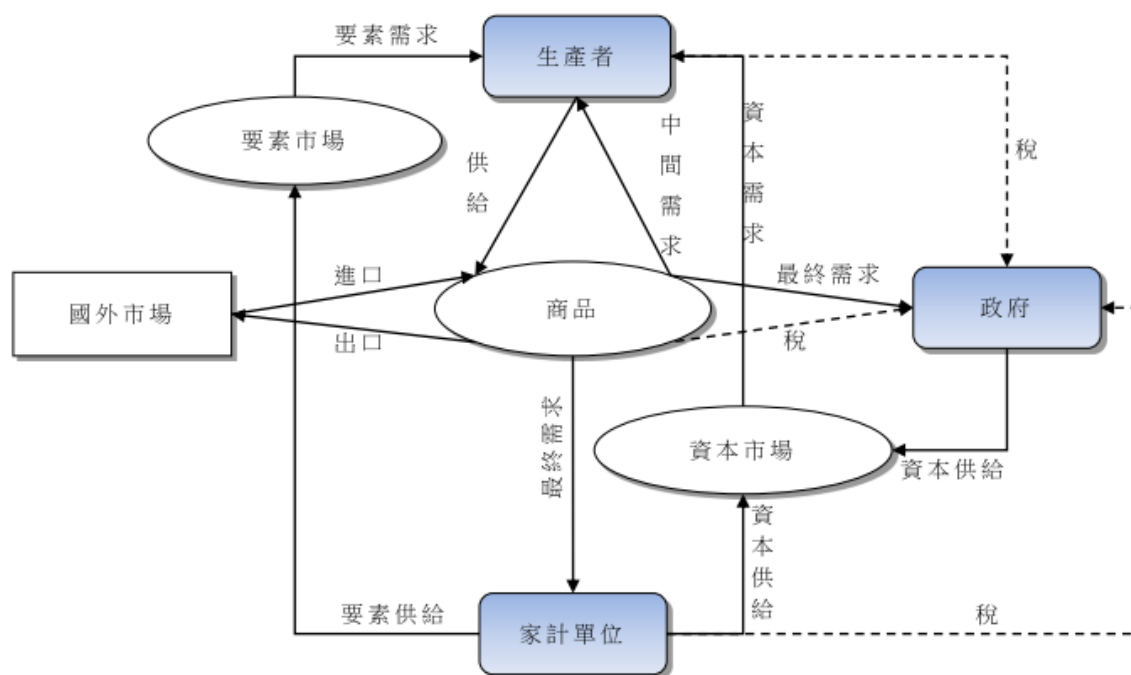


圖 13 模型基本架構

生產者行為的設定是在成本最小化的前提下，在特定的生產函數中選擇最適投入組合以求取最適的產出。在投入面方面，圖 9 下層的投入組合代表各個產業是採用 Leontief 生產函數將中間產品與複合能源原始投入作為要素來生產商品，這樣的設定代表著上述各項投入之間無替代性，只是反映出各生產投入將隨著產出的擴張或緊縮而呈等比例的增減。而中間投入各商品的組合是由該商品國產與進口品透過 CES 函數加總而成之複合產品。而在 CES 函數中，則是透過其替代彈性 (σ) 的大小來反應投入之間的替代性。而複合能源原始投入則代表著能源與原始投入之間有相互替代之關係，能源投入在模型內也有相當詳盡之刻畫。而原始投入一樣是由勞動、土地、資本透過 CES 函數加總而成。在產出的部分，圖 14 最上層的 CET 加總函數所代表的是生產者在追求利潤極大化的前提下，以固定轉換彈性決定最適的產出分配。換句話說，國內的產業會依照各個產品的價格進而決定各種產品的生產比例來追求收入的最大化。而廠商生產供本國或是出口使用的比例則是由本國與出口的相對價格而定。

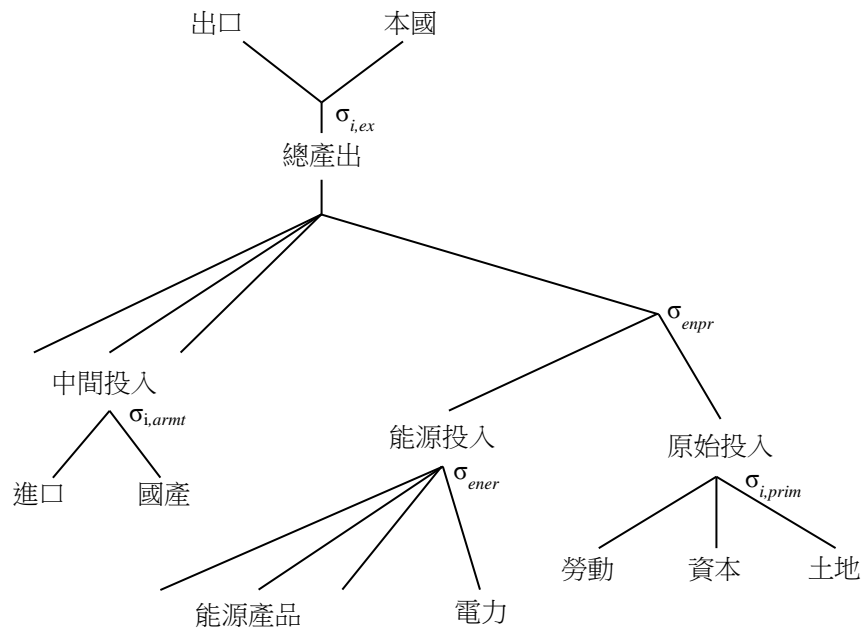


圖 14 模型內生產巢式結構

本模型也涵蓋了相關能源產品，其所包含之範圍及結構如圖 15 所示。在能源投入中，煤及製品、燃氣、汽油產品、柴油、其他油品以及電力互相為一不完全替代之關係，而汽油產品分別由纖維酒精與汽油做複合加總而成，燃氣則為液化石油氣及天然氣所組成。現實社會的狀況也類似與此，當其中某種能源相對價格高漲，廠商對該種能源之需求量會減少，自然會提高其他能源的需求量。

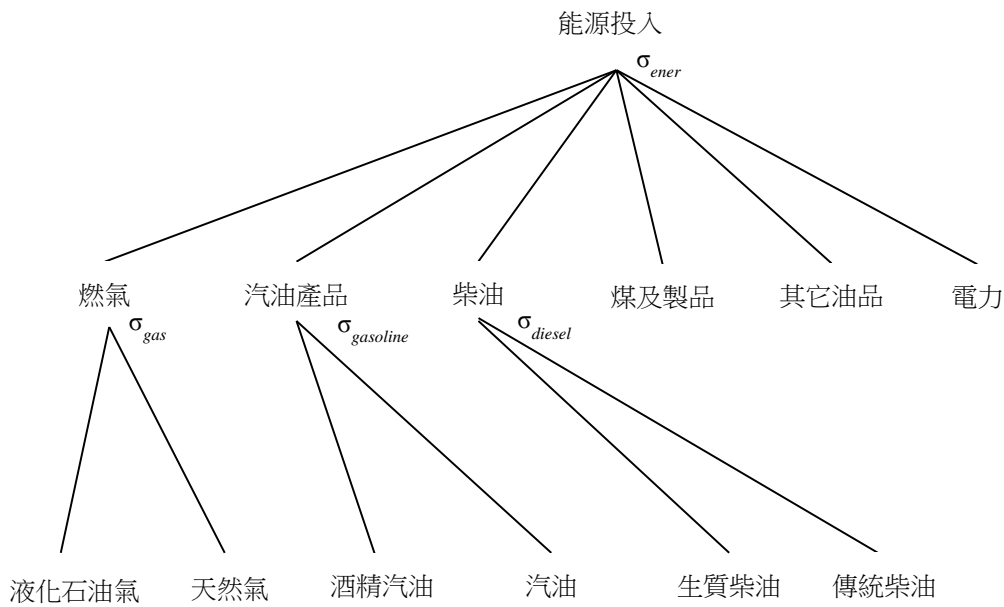


圖 15 模型內能源投入結構

至於電力結構方面，在模型內電力可區分為基載與中尖載電力，其中基載電力包含了燃煤、核能、離岸風力與汽電共生，而中尖載電力則涵括燃油、燃氣、水力、陸域風力、太陽光電發電等。而在這裡值得注意的是，今年度首次將燃料電池發電技術納入模型內，但隨著燃料電池在的用途不同，其在整個電力結構所扮演的角色也會不同，最後在整體產業或是經濟體系會反映著不同的影響差異。為了能詳細地刻畫這樣的差異，在本計畫內本計畫假設燃料電池有兩種腳色。第一，由於台灣未來基載電力可能有短缺的狀況，所以本計畫假設燃料電池主要是用來當作基載電力來替代燃氣發電(圖 16)。第二種情形主要是用來直接替代燃氣發電，所以本計畫在模型內把燃料電池放在中尖載的電力結構內，同時直接與燃氣發電作替代(圖 17)。所以之後再進行相關模擬時本計畫可觀察在不同的設定下，對於結果會有何影響。

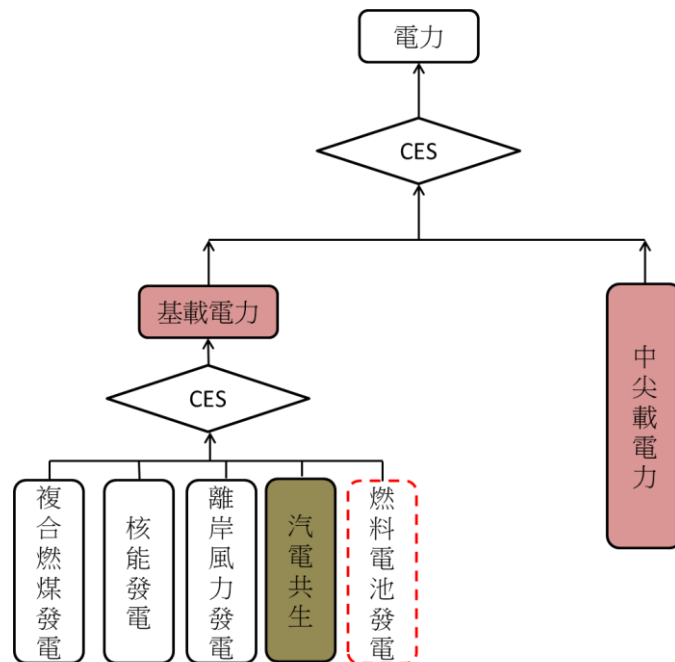


圖 16 模型內電力投入結構-燃料電池當作基載用電

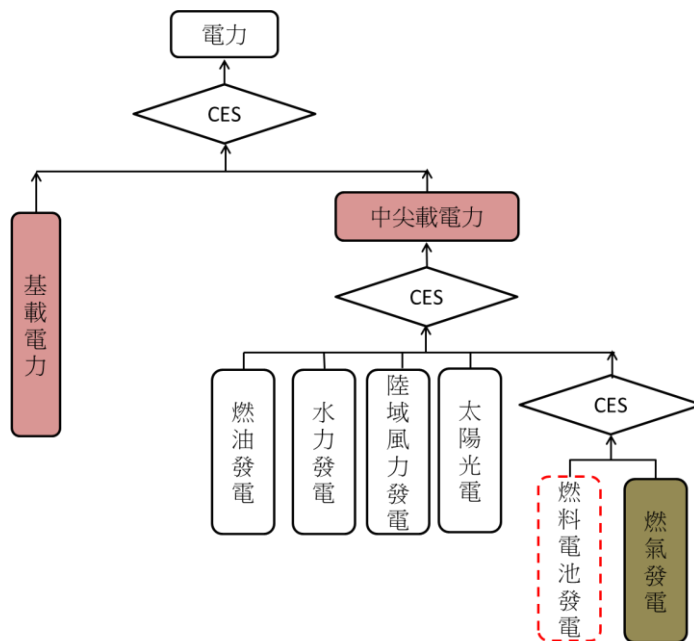


圖 17 模型內電力投入結構-燃料電池當作中尖載用電

由於燃料電池產業技術目前仍處於初期發展階段，高額的期

初研發投入使得產品成本相較於其他化石能源產品高出許多，因此無法刺激市場需求。然而隨著環境變遷，各種有利條件出現及在相關政策配合之下，再加上研發經費投入及產業學習效果，將使其成本逐漸具有競爭力。為了體現再生能源產業的研發投資及產業生產的學習效果，因此模型中將生產成本與研發資本存量及累積產品產量進行連結。此外，由於設備補助為推動燃料電池的重要政策之一，所以在模型內本計畫也建立相關產品補助的機制。以下便針對由對學習曲線、設備補助制度於模型中的設定做簡要說明：

1. 學習曲線

再生能源產業及發電業透過累積生產及 R&D 投資，進而使其生產成本下降或生產力提升，在模型中可透過二因子學習曲線機制的設定來加以體現，其設定係透過以下的方程式來完成：

$$GC_{k,t} = a \times CP_{k,t}^{-b} \times KS_{k,t}^{-c} \quad (1)$$

$$KS_{k,t} = KS_{k,t-1} \times (1-s) + AR \& D \times ypp_t \quad (2)$$

式中： $GC_{k,t}$ 表示為第 t 期 k 產業之單位成本；

$CP_{k,t}$ 表示為第 t 期 k 產業之累積產量；

$KS_{k,t}$ 表示為第 t 期 k 產業之研發資本存量；

b 為累積產量學習彈性；

c 為 R&D 資本學習彈性；

$AR \& D$ 為總研發投資；

ypp_t 為研發投資各年之支出比例。

由 (1)式可知，在二因子學習曲線設計中，產業的單位成本將受到該產業的累積產量與累積研發投資（即研發資本存量）兩項因子所影響，而影響大小則是分別由累積產量彈性與 R&D 資本彈性所決定；(2)式則為研發投資之資本累積方程式。

2. 燃料電池設備補貼

有關燃料電池設備補貼在模型中的處理方式，可以下列之方程式說明：

$$P_{\text{實際購買價格}} = P_{\text{系統售價}}(1-t), \quad (3)$$

在模型中，政府會對燃料電池設備的系統售價作補貼， t 即為補貼率。所以對購買者而言，實際購買的價格會等於系統售價扣除所補貼之金額，使得購買的價格降低，增加產業裝置燃料電池的誘因。但補貼的金額是由政府來負擔，所以相反地當補貼的金額越高時對於政府財政上的負擔也會越來越高，進而對整個經濟體系會有負面的衝擊。

(四) 市場潛力評估

新能源技術發展的市場潛力推估，除了可以藉助 3E 模型外，有時候也需要仰賴產業分析及其他計量方法；當然，有時候也需要仰賴其他國家的資料、其他類似產品的發展經驗、及國際經濟情勢的預測與展望等。另外，一般技術的發展過程歷經幾個階段，如創新、擴散、成長、成熟及衰退等，而在創新、擴散到快速成長的階段，可以應用產品創新擴散的理論或模型來推估未來的市場潛力。動態 3E 模型如果納入主要的新及再生能源產業部門，

可以用於模擬各種政策及不同外在條件情境下，產業產出的發展情況。不過，因為 3E 模型的規模較大，因此涵蓋的各種參數及外生變數也較多，致使要以模型產出合理的推估結果的前提是，能夠藉由各種資訊設定合理的參數及外生變數數值。計量方法及創新擴散模型相對而言較 3E 模型簡單許多，不過，通常也無法做各種政策及情境的模擬。

整體而言，技術或產品的市場潛力推估要具有說服力，需要結合幾種不同的分析方法，方可以竟其功。除此之外，資料的有無及品質也具有關鍵性的影響。本研究將評估再生能源產業之國內外市場規模，以及其是否可達到發展所需之規模經濟條件。國內市場規模部份，需藉助 GEMEET 模型的估計，藉由對未來經濟情景的推估，搭配政府所提出的再生能源政策目標，估計再生能源產業在國內的市場潛力。最後，在經過上述分析之後，便可藉由分析結果提出具體的產化建議，其中包含(1)該不該自行發展，(2)需自行發展之核心技術，(3)自行發展所需之配套條件，(4)產業化時程與整體貢獻(產值預估、減碳成本及國內可裝置量)。

要針對新能源產業提出產業化建議，首先必須先瞭解其相對優劣勢，以及其機會與威脅，而 SWOT 分析恰讓本計畫瞭解產業可加以利用的內在優勢 (Strengths)，以及必須強化的內在劣勢 (Weaknesses)，此外也列出外在環境的機會 (Opportunities) 與威脅 (Threats)。內在條件的劣勢包括設備、技術、人力資本等，外部條件包括經濟條件、政府政策、國際趨勢、市場潛力、潛在競爭者、法律文化等，而 SWOT 矩陣如下表 7 所示。

表 7 SWOT 矩陣

		內部分析	
		優勢 (S)	劣勢 (W)
外部分析	機會 (O)	SO 策略 (Max-Max)	WO 策略 (Min-Max)
	威脅 (T)	ST 策略 (Max-Min)	WT 策略 (Min-Min)

此外，根據新能源產業的技術經濟評估分析、成本效益分析、3E 效益分析、國際市場評估等結果，可提出新能源的產業化建議。據此，對於新能源產業的產業化建議，可依下述步驟分項提出：

1. 利用 SWOT 分析瞭解產業的優劣勢後，可以讓本計畫瞭解臺灣再生能源產業化的可能性，及其潛在的競爭與機會。
2. 藉由技術評估分析與成本結構分析，可以讓本計畫瞭解產業發展的關鍵技術為何。
3. 利用 GEMEET 模型推估未來臺灣經濟情境及能源使用情況，同時搭配政府對再生能源推廣目標，因此即可瞭解國內可裝置容量。
4. 利用 GEMEET 模型，搭配國際市場潛力評估及政府對再生能源的推廣目標，評估臺灣發展的新能源產業要達到全球某一市場占有率時，所需的條件為何，而這些可能的條件包含 R&D 投資，學習曲線彈性，技術進步率等。

二、智慧電網

自從我國將智慧電網列入「國家節能減碳總計畫」標竿計畫後，國內對智慧電網之研究亦陸續增加。以 2013 年為例，共有

11 篇學位論文探討智慧電網議題，其中，大多探討家庭式電能管理或輸配電端之電力負載平衡管理（鄭艾琳，2013；梁嘉宇，2013；黃雅莉，2013；陳思瑤，2013；郭千瑜，2013；陳學謙，2013），也有論文在關注資通訊技術（簡浩哲，2013；董勁宏，2013；）與輸電可靠性（黃士耘，2013），顯見國內學界期望釐清智慧電網在技術建立與管理可能會遭遇之問題，並嘗試其穩定與普及智慧電網之效用（例如：提供輸配電公司供需量反應資訊、提供家戶之自我監控與用電配置資訊）。

智慧電網是我國管理分散式能源、提升設備能源效率的重要措施，所以，智慧電網架設是我國建立低碳家園願景的核心議題，但要更新整個電力系統所費不貲。根據國際能源署（International Energy Agency, IEA）研究指出，從 2007 年至 2030 年，若要從生產、輸電到配電全部更新，需要花費 1.5 兆歐元。因此，除了技術上與管理的問題，以國家為層級之智慧電網的經濟可行評估相當重要。在我國，簡民濂（2013）曾用質性決策工具 SWOT 來探討我國智慧電網現況與發展潛勢。

至於國外對智慧電網之經濟可行性研究，有 Dalton (2009)就澳洲黃金海岸區的大型渡假村進行個案分析，探討併聯太陽光電及風力發電的智慧型電網之經濟性，透過不同的情境分析 (grid-only、wind/grid、PV/grid、PV+wind/grid、RES-only)，用生命週期間之成本淨現值 (NPC)、回收期 (payback time)、RF(renewable fraction)值為評估工具。Chaurey and Kandpal (2010)比較太陽能家用系統與太陽光電微電網兩種系統，對用戶端、能源服務業者和社會之可行性，發現微電網系統通常更有效益。Kelleher and Ringwood (2009)架構一運算模型，用以探討併聯太陽光電與風力發電的微電網之經濟性。所以，本計畫發現目前學者有對智慧電網之經濟可行性有進行個案研究，但鮮少對國家整體的智慧電網成本效益進行探討。

由於投資額龐大，政府單位有必要對智慧電網計劃發展過程中可能發生的成本效益進行評估與監控。有鑑於此，歐盟聯合研究中心（Joint Research Centre; JRC）於2012年初公布「智慧電網計畫的成本效益分析指導原則（Guidelines for conduction a cost-benefit analysis of Smart Grid projects，以下簡稱「智慧電網CBA指導原則」），它提出了具代表性的國家型智慧電網的評估架構。其設計架構仍依據歐洲過去及現在正在進行的智慧電網示範計畫的成果，試圖提出全面性的成本效益分析（cost-benefit analysis, CBA）評估架構，並選定葡萄牙 InovGrid 計畫作為參考實例以調整相關內容。

這是第一次具體的將 CBA 使用在智慧電網的實際案例評估之上，「智慧電網 CBA 指導原則」是為協助使用者分析不同地區的考量因素，以瞭解利益與成本，並分析關鍵要素，包括計畫的規模大小（例如每年接受服務的消費者、能源消費等）、工程特色（例如所採用的技術、主要設備的功能性）、電網當地特色、利益關係者（哪些人的成本及利益應納入考慮）、計畫的明確目的及預期對社會經濟的衝擊，以瞭解像分散式能源整合的可能性、電價及租稅的衝擊、環境成本等。

本計畫試圖以「智慧電網 CBA 指導原則」的建議，初步提出對**智慧電網示範系統**之研究框架，呈現於圖 18。圖 18 為智慧電網產業之研究概念圖，本團隊就累積之再生能源技術研究經驗，初步釐清研究流程與步驟，作為未來分析考量時的可能方向清單。智慧電網系統涉及層面甚廣，目前，臺灣智慧電網總體規劃將之概分(1)智慧發電與調度，(2)智慧輸電，(3)智慧配電，(4)智慧用戶，(5)智慧電網產業，(6)智慧電網環境等六大面向。為進行智慧電網系統之技術經濟評估，除界定採行技術，亦須確立**智慧電網成員之投資意願**，包括用戶端、智慧電表業者、輸配電業者、儲電業者、發電業者、電源調度中心及資通訊服務業者等。若這些成員認為投資無法回收或電力市場運作沒有效率將不會有意願

投入智慧電網建設，若要建立智慧電網商業模式⁴之前，必須先區分各個成員之成本項目，透過此步驟，本計畫也可以探討各個對象的關鍵資源與成本結構，從中探尋推動智慧電網之關鍵活動。

在關係人分析的過程中，由於我國與歐洲國家之電力市場制度不盡相同，例如，我國目前輸配電、儲電、發電對電源調度主要是由台電公司擔任，另外，亦可能須要考慮近期的電業自由化輿論是否會為未來的智慧電網規劃增添變數。由此可知，智慧電網規劃的範圍尚充滿不確定性，本團隊的研究架構不周延處期望透過我國計畫的開發者及相關決策者的專業判斷來改善。

本團隊參考英國、美國智慧電網之成本與效益評估，列出我國智慧電網之可能成本項目與效益項目。至於詳細的評估步驟，有賴後續文獻探討與專家訪談進行界定。在完成智慧電網之技術經濟方法研析後，本研究即可建構一套適用於衡量國內智慧電網成本效益之評估方法。若計畫年度能蒐尋到相關技術經濟資訊，將按照本研究建構之指導原則進行數值評估，本團隊得評估我國智慧電網之經濟性與對重要參數進行敏感性分析。從數值模擬與驗證當中發現產業化建議。

然而，文獻探討中本計畫也發現智慧電網之研究範圍仍有許多不確定性因素，導致經濟性研究缺乏，即使有，也多以智慧電錶為主，如：朱榮貴(2011)、李睿騰(2012)、李信璋(2009)。若界定我國智慧電網系統之研究範圍有實務上之困難，則表示本計畫之研究範圍需要重新定義。

根據過去文獻研究方向，發現可選定特定個案進行研究，如對智慧電錶產業(朱榮貴，2011；李睿騰，2012；李信璋，2009)、或對併聯某特定能源技術之微電網(Dalton, 2009; Chaurey and

⁴商業模式主要是闡述一個企業創造、傳遞與獲取價值的原理(Osterwalder & Pigneur, 2010)。

Kandpal, 2010; Kelleher and Ringwood, 2009) 等進行技術經濟分析，分析方法仍可根據圖 18 之評估架構進行，其細節亦需考慮個案設置地區之因素，以瞭解利益與成本，並分析關鍵要素，包括個案的規模大小（例如每年接受服務的消費者、能源消費等）、工程特色（例如所採用的技術、主要設備的功能性）、電網當地特色、利益關係者（哪些人的成本及利益應納入考慮）、個案的明確目的及預期對社會經濟的衝擊，以瞭解像分散式能源整合的可能性、電價及租稅的衝擊、環境成本等。

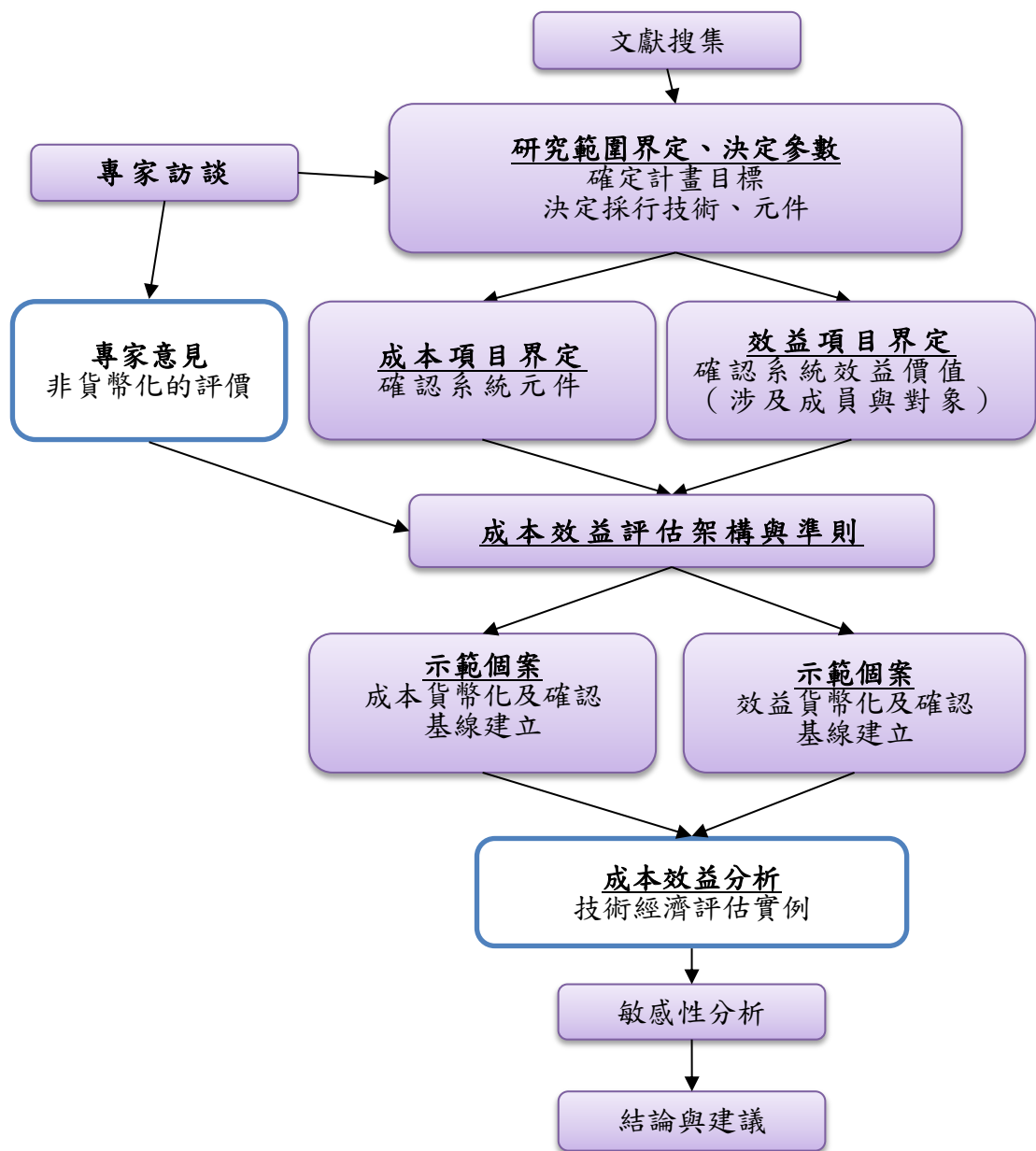


圖 18 智慧電網技術經濟分析概念

參、主要發現與結論

一、 燃料電池國外 SOFC 商業化模式

燃料電池，目前使用較多是質子交換膜燃料電池(PEMFC)，和固態氧化物燃料電池(SOFC)，其系統發電效率 39%，熱回收效率 56%，總體熱電效率可達 95%。許多國家因此致力於在各種可攜式、定置型和運輸等領域的技術應用研發，並獲得豐碩的成果。本團隊接下來整理日本家用燃料電池系統的商業化路徑，希望借鏡他山之石。

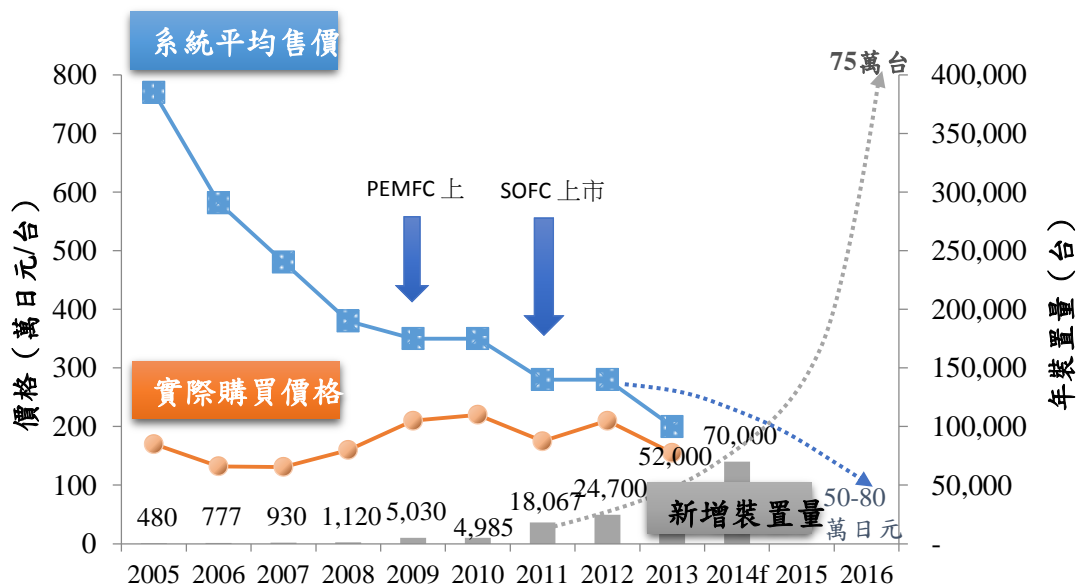
(1) 日本商業化路徑

- 2003-2008 年家用定置型電熱共生系統(CHP)大規模實證。
- 累計至 2008 年止，示範座數達 3307 座，實證結果平均節能 16%、減碳 28%以上，被認為效益顯著。
- 2009 年步入商業化，PEMFC CHP 上市
- 日本政府特別取了 LOGO「ENE·FARM」以推廣家用 FC CHP 系統
- 2011 年 SOFC CHP(700W)上市

歸納日本商業化經驗，最重要的就是從電池元件到模組規格一致性。日本政府認為強制規格(容量大小)有助於業者開發週邊配件與組件形成規模經濟，且可降低故障發生機率(原先有些示範計畫因電池元件與週邊配件規格不合，常發生故障)。所以，日本政府將家用系統規格統一，設計提供約七成家庭消費電力(一家四口，每日用 12 度電)、45-70%熱水。

如前所述，規格一致化，讓上中下游廠商有所依循，使得生產效率與規模都迅速提高，SOFC 家用系統在 2011 年時售價逐漸

下降。加上 311 大地震後防災意識大幅提高，日本廠商銷售國內數量明顯提升（請參圖 19）。



資料來源：日經技術在線 (2012/06/18)、Omata (2013)

*實際購買價格=系統平均售價-政府補貼金額

圖 19 日本 FC 系統商業化現況與展望

由圖 19 可知，日本家用燃料電池系統，SOFC 取代 PEMFC (或簡稱 PEFC) 成為主流。由於 PEMFC 較早商品化，日本廠商在示範階段大都投入 PEMFC 的技術研發，然而由於 PEMFC 的專利權掌握在少數公司手中，再加上貴重金屬觸媒的價格很高，日本廠商發現 SOFC 系統，與 PEMFC 相比，不會提供太多熱能(電能才是家戶所需要，尤期是夏天)、發電效率較高、不需要排除 CO、壽命長、體積較少等優點，非常適合家戶使用，家用系統比較細節詳見表 8。這些優點增強了研發廠商的信心，促成 2011 年 SOFC 系統在日本正式上市。

表 8 日本 ENE·FARM 系統比較

	PEMFC	SOFC
額定功率(kW)	0.7-1	0.7
操作溫度	70 – 90°C	700 – 900°C
發電效率(LHV)	36%	45%
熱電比	1.29	0.66
燃料	H ₂	H ₂ 、CO
啟動時間	短(可每日開關機)	長(連續運轉)
年運轉時數	6500-8000h	8800h
尺寸(1kWClass)	280L(09FY Model)	150L(09FY Model)
熱水溫度	約65°C	約80°C
商業化年度	2009	2011

資料來源：石井弘毅（2008）；日經技術在線（2012/06/18）

日本政府可以說是其燃料電池商業化成功的大功臣。它以政府力量全力促進商業化，不論是生產端與終端使用端，都予以補助：生產端補助生產設備 50%，終端使用端補助購買設備成本 30%（中國鑛冶工程學會，2013）。

(2) 他國 SOFC 商業化歷程

除了日本，美國在 SOFC 上的商品化亦相當成功（中國鑛冶工程學會，2013）。2008 年 Bloom Energy（後簡稱 BE）開始銷售 100kW SOFC 之商業化機組。銷售市場鎖定加州，因該州有昂貴電價（約 NT\$4.2/kWh）與最高額的補助。BE 以租賃方式，賺取補助的電費差價（5-20%），可有 NT\$ 0.9-1.8/kWh 的利潤。自 2011 年起 BE 調整營運模式，改以供電合約方式，免費安裝發電機組與負責維修，客戶僅需按期繳交電費。由於 BE 企圖擴充在全球之 SOFC 供應版圖，以及看好日本 SOFC 應用市場前景，BE 選擇日本軟銀（SoftBank）合資發展日本大型 SOFC 系統，去

年(2013) 11 月裝設第一部大型 SOFC 系統，今年(2014) 陸續在 BE 東京總部大樓及慶應大學裝機。由於日本軟銀是 BE 合資夥伴(各自占股 50%)，這也彰顯日本軟銀進入大型 SOFC 系統市場之決心。

另一個商品化成功的公司是澳洲的 CFCL，該公司創立 BlueGen 品牌，主攻外銷市場，近年來與德國、英國、法國政府合作，推動地主國的燃料電池發展政策（中國鑛冶工程學會，2013）。CFCL 的經營手法是與當地代理商或經銷商合作(大多為瓦斯公司)，當地政府以協議電價收購終端使用者所發電力。以英國為例，2012 年收購價格為每瓩時 15.7 便士(約新台幣 7.85 元)。

綜合 SOFC 模組商品化的成功案例，可以發現美國 BE、澳洲的 CFCL 等廠商積極尋找可行市場，過程中並不斷思考如何提高客戶安裝意願。舉例來說，2011 年起 BE 改以供電合約方式提供能源服務，減少客戶端管理手續；另一方面，加洲政府提供高額補助亦功不可沒。這些成功要素都值得我國政府與廠商借鏡。

二、我國 SOFC 成本效益分析

SOFC 系統的資源潛力主要取決於發電成本，若其系統發電成本能低於銷售地電價（抑或當地政府允諾之收購價格），也就是安裝效益大於安裝成本時，終端使用者就會願意安裝。不過，新能源發電目標的規劃上尚需要考慮到其他自然環境以及技術層面之因素。由於燃料電池能延遲新傳統電廠的投資以及溫室氣體減排等，這些社會與環境效益也應被考慮。因此，本研究亦對燃料電池應用之社會環境效益進行初探，期透過量化研究成果說明我國燃料電池之市場潛力，並從中提出具體的產業化建議。

(一)、成本效益分析範圍

在評估我國發展 SOFC 之成本效益時，因為目前我國尚無 SOFC 模組化能力，缺乏本土化系統數據。所以，本研究借鏡日本與美國發展較成熟之機組進行技術成本參數設定。由於 SOFC 可應用區域廣泛，本研究受限於時間、物力與人力等限制，先就特定區域進行評估，例如：商業系統的研究範圍限制在學校宿舍與醫院。相關詳細說明如下：

(1) 針對特定使用者進行經濟分析，分成家用系統、商用系統。

家用系統：採用日本已初步商業化之 0.7kW 系統，鎖定家戶為分析對象。近年來日本 SOFC 系統廠商考慮小型系統之實用性，在提高系統耐用性與縮小系統體積方面頗具成效。對我國來說，都市地區多大樓公寓，家庭居住樓地板面積有限，系統體積大小與能否普及推廣有關，這也是本研究採用日本系統做為範例的原因。相關成本與技術參數(日經技術在線，2012)如下：

- 系統額定功率：0.7 kW
- 採購成本：800,000 元/台
- SOFC 電效率：45%
- 容量因數：91%
- 系統壽命：10 年
- 推廣量：先向高收入家戶推廣，現有戶數二成估算，推廣期間二十年，第 20 年約 150 萬台系統累積安裝量(已扣除淘汰量)。
- 學習率(lr)：16% (Rivera-Tinoco, 2012)⁵

⁵學習曲線描述隨著產品累積產量的增加，單位產品的成本以一定的比例下降的現象。學習率 (lr) 推導系統成本公式如下。其中， α 是學習指數， Q_0 為第 0 年產量， Q_t 為第 t 年產量， C_0 為第

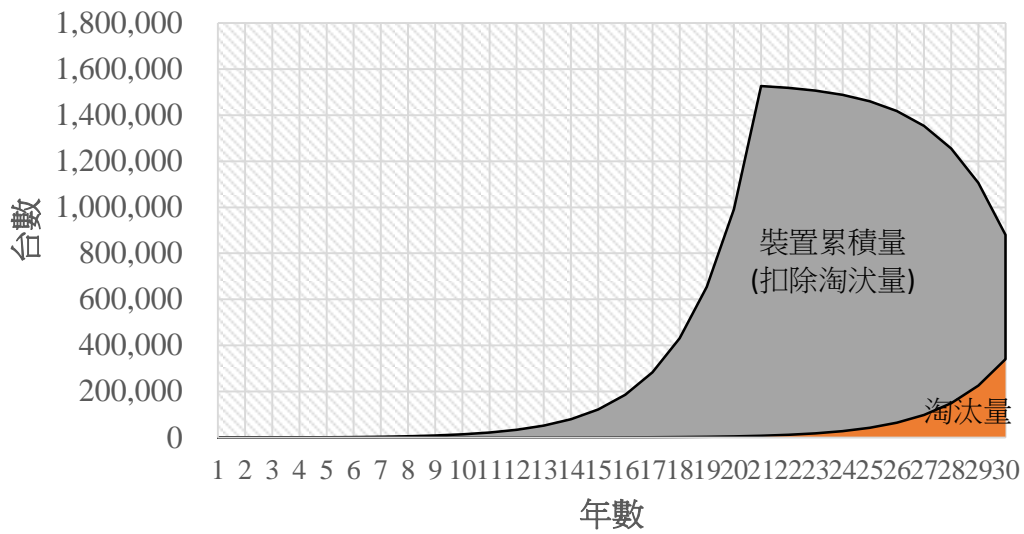
商用系統：以美國 Bloom Energy 商業化之 200kW 系統，目前以學校宿舍與醫院為分析範圍。相關成本與技術參數(日經技術在線，2012)如下：

- 系統額定功率：200kW
- 系統價格：48,000,000 元/台
- SOFC 電效率：50%
- (來源：Bloom Energy)
- 容量因數：91%
- 系統壽命：10 年
- 以學校宿舍與醫院為推廣對象：
 - 學校宿舍之可安裝數量推估：依 102 學年度各大專校院住宿人數估計(不含學校向外承租數)，假設每人每日用電量 3kWh，共計有 106 台系統安裝潛力。
 - 醫院之可安裝數量推估：依醫院之能源用量(包括醫學中心、區域醫院、地區醫院、精神專科醫院)之七成估算，共計有 2,269 台系統安裝潛力。
- 學習率(lr)：16% (Rivera-Tinoco, 2012)

(2) 假設 SOFC 系統設備全為國產自用，以假設安裝速率投入市場(參圖 20 與圖 21)，且此安裝速率將影響成本下降率(以學習曲線估算)。

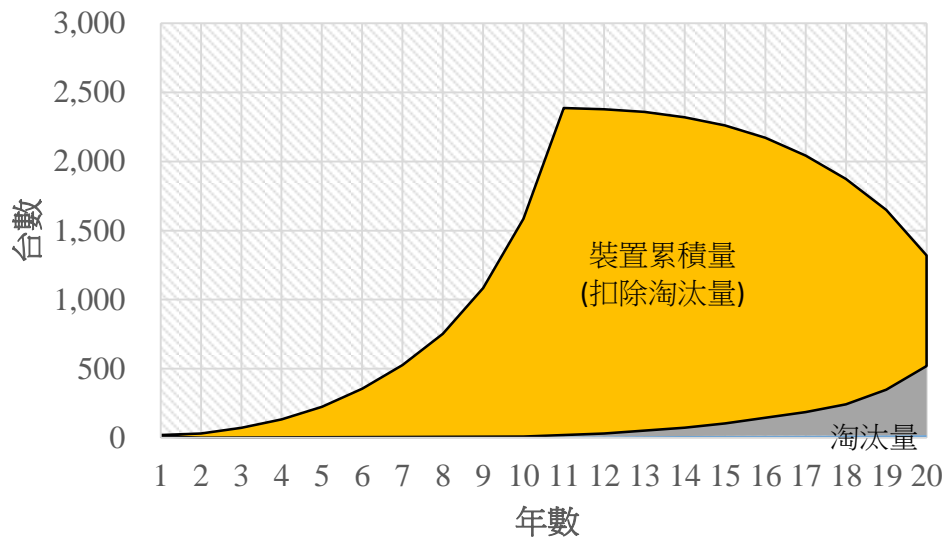
0 年成本， C_t 為第 t 年成本。

$$lr=1-2^{-\alpha}$$
$$C_t=C_0*(Q_t/Q_0)^{-\alpha}$$



說明：
 本研究假設 SOFC 系統全為國產自用。
 系統設備壽命為 10 年，使用滿 10 年即淘汰設備。
 裝置累積量 + 淘汰量 = 國內假設總產量。

圖 20 家用系統假定安裝速率



說明：
 本研究假設 SOFC 系統全為國產自用。
 系統設備壽命為 10 年，使用滿 10 年即淘汰設備。
 裝置累積量 + 淘汰量 = 國內假設總產量。

圖 21 商用系統假定安裝速率

(3) 實務上，售電價格會隨時間變化，以台電長期負載預測(10302 案) 進行設定，年平均成長 0.2%。

SOFC 機組由於使用壽命長且可長時間運轉，本研究參照國外使用經驗，⁶ 將家用系統(額定功率 0.7 kW)與商用系統(額定功率 200 kW)，當作「基載」電源，非為「備用」電源，與 NGCC 進行成本效益分析。

下表 9 列出本研究所估算之 SOFC 成本與效益分析項目。如表 9 所示，SOFC 成本項目包括了設備投資成本、燃料成本及運維成本；效益項目則分為用戶效益項目、社會效益項目、電業效益項目。計算公式請參表 9，參數值則請參表 10。

表 9 成本與效益項目

成本項目	
設備投資成本	SOFC 系統設備成本*安裝量
燃料成本	每度電所需燃料量*天然氣價格*SOFC 發電量
運維成本	SOFC 系統設備成本*運維費比例
效益項目	
用戶效益	
節約電費支出	SOFC 發電量*售電價格
熱能效益	SOFC 熱能(以電力表示)*可轉換成電力比例*售電價格
社會效益	
減少因缺電產生之經濟損失	系統安裝量*(2013 年每戶停電時間/60 分鐘)*因缺電產生之經濟損失
CO2 減排效益	相對替代方案天然氣使用減少量*IPCC2006 碳排係數*CO ₂ 價格
電業效益	
減少線路耗損	SOFC 發電量*2013 年線路損失率*售電價格
延遲新電廠投資成本與減少其運維成本	投資成本=系統裝置容量*(天然氣火力發電廠建置成本+輸電工程與設備費用*輸電工程容量與發電廠容量比+配電工程與設備費用*配電工程容量與發電廠容量比)；運維成本=發電量*燃氣輪機維護成本
可靠度改善	電業為維持供電可靠度，降低停電時間與停電次數，會產生相關資本支出與顧客服務管理成本。裝置 SOFC 可減少電業為維持供電可靠度需要的相關支出，該電業減少之支出，即為裝置 SOFC 之可靠電改善效益。 避免可靠度改善計畫的資本支出=SOFC 安裝量*每戶停電次數*預估可減少停電時間*用戶每度電之停電損失；及，因停電管理改善減少交通成本=SOFC 安裝量*每戶停電次數*每次故障平均可減少開車時間*365 天/60 小時*故障處理人員成本。
燃料節省效益	SOFC 相對替代方案可節省之燃料量*天然氣價格

⁶ 以美國為例，BE 的客戶，包括 Apple 在南加州的資料中心、微軟在芝加哥的資料中心，SOFC 機組都是作為基載，24 小時運轉。

表 10 成本效益分析參數表

代號	參數名稱	值	單位	說明/資料來源
(1)	系統使用年限	10 年		80,000 小時/10 年
(2)	折現率	3.65%		盧展南(2013)
(3)	天然氣價格	20 元/立方公尺		臺灣中油(2014)
(4)	2013 年每戶停電時間	18.086 分/戶.年		臺電(2014)
(5)	每戶停電次數為	0.264 次/戶.年		臺電(2014)
(6)	預估可減少停電時間	5 分		臺電(2014)
(7)	因缺電產生之經濟損失	15.9 元/kWh		楊豐碩等(2011)
(8)	2013 年線路損失率為	4.25%		臺電(2014)
(9)	每度售電成本	3.077 元		臺電(2014)
(10)	天然氣火力發電廠建置成本 2012 年價位	30,300 元/kW		盧展南(2013)
(11)	輸電工程與設備費用	9,000 元/kW		盧展南(2013)
(12)	配電工程與設備費用	16,460 元/kW		盧展南(2013)
(13)	輸電工程容量與發電廠容量比	3		盧展南(2013)
(14)	配電工程容量與發電廠容量比	4		盧展南(2013)
(15)	每次故障平均可減少開車時間	3 分		盧展南(2013)
(16)	故障處理人員成本(人力,車輛,燃料)	520 元/時		盧展南(2013)
(17)	燃氣發電機組維護成本	0.15 元/度		World Building Design Guide (WBDG) website
(18)	燃氣發電機組電效率	48%		臺電(2014)
(19)	熱能可轉成電能比例,餘為耗損	70%		台經院(2011)
(20)	CO ₂ 價格	861 元/CO ₂ 公噸		102 年臺灣公司碳價

家用系統 base case 成本效益分析結果如表 11 及圖 22 至圖 24 所示，商用系統則呈現在表 12 及圖 25 至圖 27。根據分析結果，可發現家用和商用系統的主要成本項目為，均為設備成本，家用系統占 63% 的成本，商用系統則占 68%，這表示潛在使用者會權衡購置 SOFC 之成本效益，當使用效益大於使用成本時，才會產生投資意願。

根據本研究估算，家用系統之益本比為 1.04，商用系統為 0.97。益本比均接近 1。理論上，益本比大於或等於 1，投資者就會考慮該項投資方案之可行性。只是，對終端使用者（用戶）來說，燃料電池似乎不是個有利可圖或損益相當的投資方案。觀察家用

系統之主要效益項目，有節約電費支出 (46%)，延遲新電廠投資成本 (29%)、熱能效益 (21%)；商用系統主要效益項目，有節約電費支出 (58%)，延遲新電廠投資成本 (37%)、料節省效益 (2.91%)。觀察效益項目，可知「延遲新電廠投資成本」效益項目不論在家用或商用系統中之占比都相當高，顯示電力供給端可因燃料電池應用而減輕其投資新電廠之投資壓力；但對電力需求端來說，該項效益不歸屬於他們，這也是終端使用者對投資方案卻步的理由。

表 11 家用系統 base case 成本效益分析結果

取代發電效率 48%的 NGCC	現值	
總成本	251,913	百萬元
設備投資成本	74,839	百萬元
燃料成本	158,543	百萬元
運維成本	18,532	百萬元
總效益	261,968	百萬元
用戶效益	175,565	百萬元
節約電費支出	120,085	百萬元
熱能效益	55,479	百萬元
社會效益	-870	百萬元
減少因停電產生之經濟損失	32	百萬元
CO2 減排效益	-902	百萬元
電業效益	87,274	百萬元
減少線路耗損	5,104	百萬元
延遲新電廠投資成本與運維成本	75,234	百萬元
可靠度改善	16,845	百萬元
燃料節省效益	-9,909	百萬元
淨現值	10,055	百萬元
益本比	1.04	
評估期間之平均單位成本	2.92	元/度
評估期間之平均單位效益(含熱能效益 0.64 元/度)	3.04	元/度

累積淨現值(=總效益-總成本)

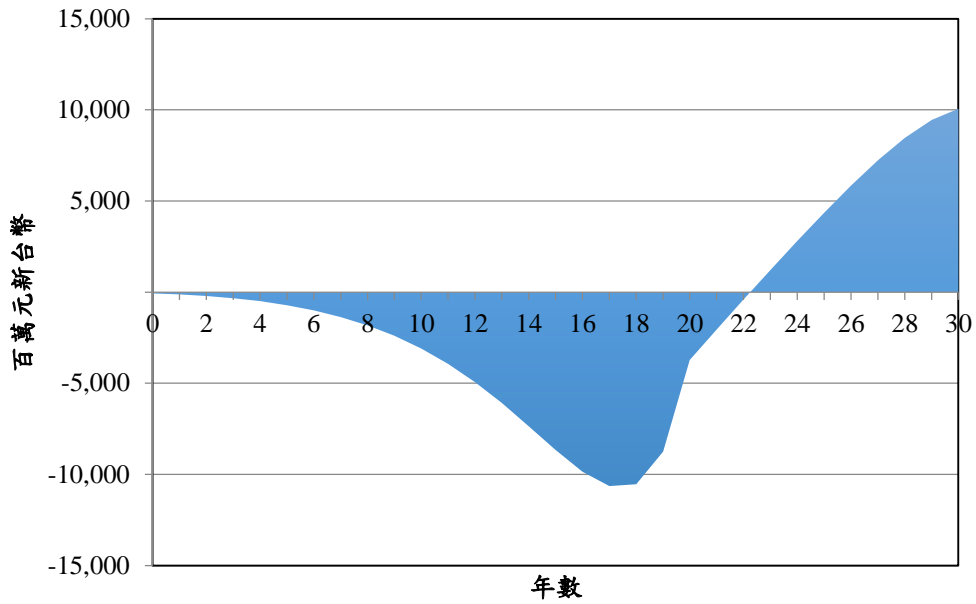


圖 22 家用系統 Base case 累積淨現值

效益分析

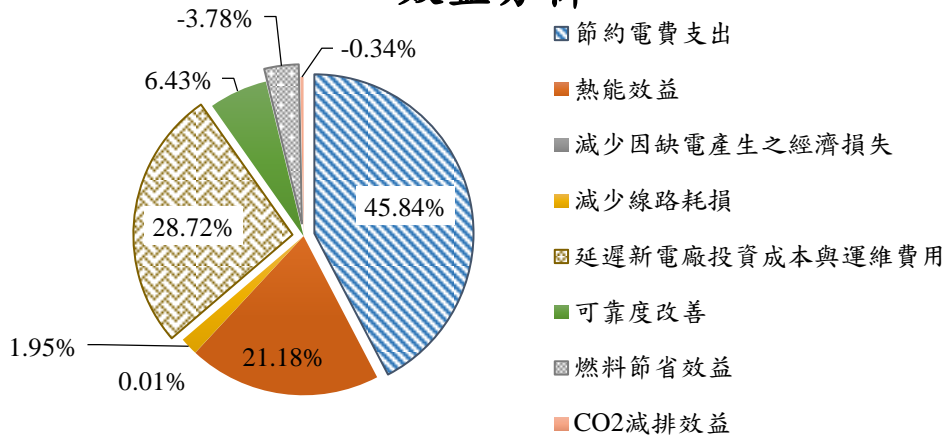


圖 23 家用系統 Base case 效益分析

成本分析

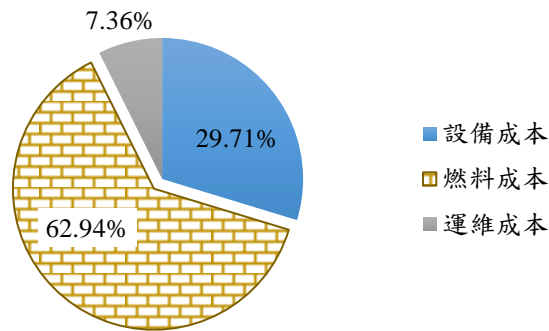
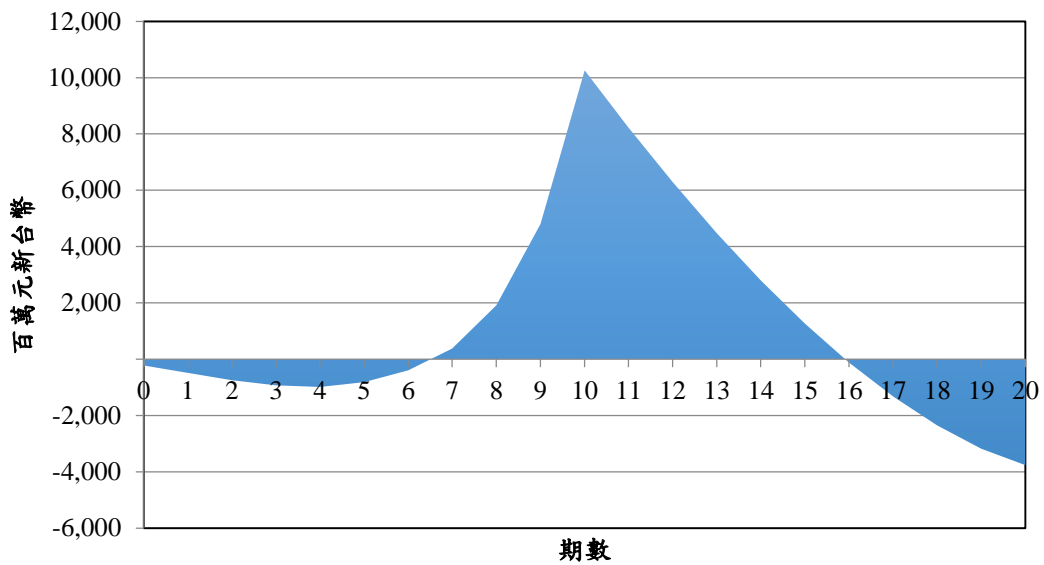


圖 24 家用系統 Base case 成本分析

表 12 商用系統 base case 成本效益分析結果

取代發電效率 48% 的 NGCC	現值	
總成本	133,090	百萬元
設備投資成本	28,084	百萬元
燃料成本	90,236	百萬元
運維成本	14,770	百萬元
總效益	129,323	百萬元
用戶效益	74,429	百萬元
節約電費支出	74,429	百萬元
熱能效益	-	百萬元
社會效益	356	百萬元
減少因停電產生之經濟損失	14	百萬元
CO2 減排效益	342	百萬元
電業效益	54,538	百萬元
減少線路耗損	3,163	百萬元
延遲新電廠投資成本與運維成本	47,578	百萬元
可靠度改善	37	百萬元
燃料節省效益	3,760	百萬元
淨現值	-3,767	百萬元
益本比	0.97	
評估期間之平均單位成本	3.50	元/度
評估期間之平均單位效益(無熱能效益)	3.40	元/度

累積淨現值(=總效益-總成本)



說明：第 11 年因沒有安裝 SOFC 後，由於沒有延遲新電廠投資之效益，導致累積淨現值逐漸下降。

圖 25 商用系統 Base case 累積淨現值

效益分析

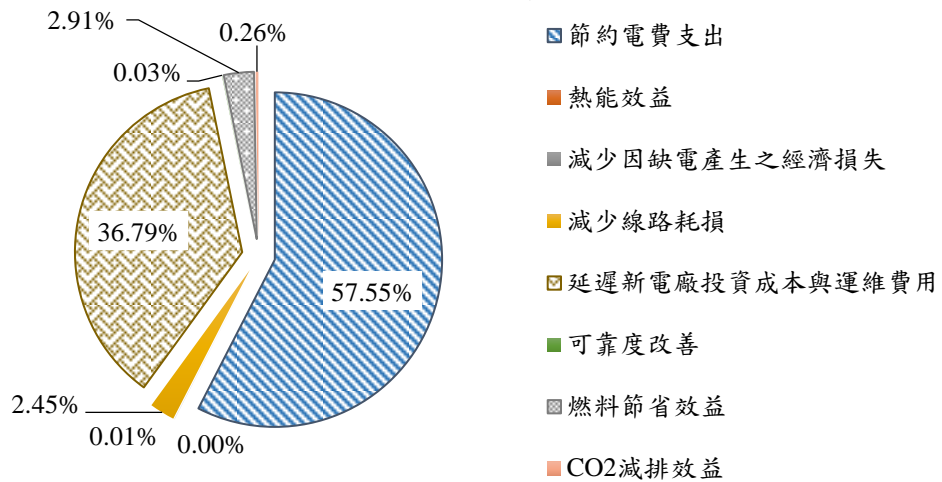


圖 26 商用系統 Base case 效益分析

成本分析

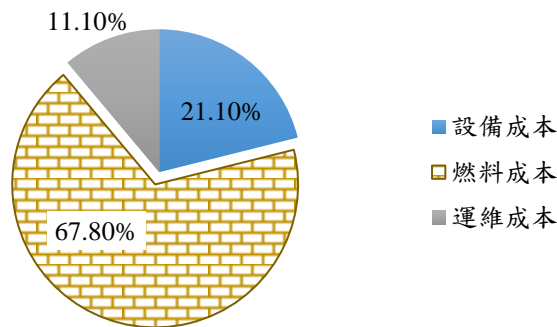


圖 27 商用系統 Base case 成本分析

發展 SOFC 系統應用，還有帶動 SOFC 產業發展之效益，即能讓傳統機電產業轉型到較高附加價值的前瞻能源技術產業。所以，站在政府的角度看，扶植 SOFC 產業確實能獲得經濟、能源、環境之三重效益。目前，由於缺乏數據資料在技術經濟分析中較難探討，未來待國內有示範實績後，建議對此產業轉型效益再進行具體評估。

如前所述，SOFC 系統期初投資相對高（設備投資成本占比高），有報酬的投資方案才值得進行投資。所以，本研究找出對投資項目經濟效益指標有重要影響的因素進行敏感性分析。其他不確定成本因素保持在基準值的條件下，測算各重要影響因素對益本比的衝擊程度。也就是說，本研究利用敏感性分析協助確定哪項風險對投資項目具有最大的潛在影響。以下就 SOFC 系統發電效率、電價年增率高、熱能無回收（僅家用系統）、政府提供設備投資補助、學習率等重要因素進行風險測試。

本研究設計之敏感性分析情境，包括：(1)假定 SOFC 系統發電效率提升至 55%，(2)電價年增 0.5%、(3)熱能無回收（僅家用系統）、(4)設備補助有 50%，(5)考量我國學習率可能在早期商業化階段，故參考 Rivera-Tinoco et al. (2012) 下修學習率 5%（此為早期研發學習率）。敏感性分析結果如圖 28 及圖 29 所示。

根據敏感性分析結果，本團隊發現發電效率提升、政府提供設備投資補助及電價是關鍵因素。當發電效率提高，意謂著 SOFC 系統產電量增加，均化發電成本會隨之降低；政府若提供投資補助，代表設備購買成本降低，對使用者來說，均化發電成本亦會下降；電價若提高表示，用戶向電業購電之成本提高，當向外購電成本高於自行裝置 SOFC 系統之產電成本時，用戶則因能節約電費支出有意願投資。

熱能，其屬於 SOFC 系統之副產品效益，由於系統產生熱能可能大於用戶所需，其效益價值尚有爭議，有待本土化資訊驗證。最後，本團隊發現學習率的下修，對 SOFC 系統益本比之影響並沒有很大。這可能是因為本研究假定為 SOFC 系統為國產自用，產品並無外銷，導致成本下降速度並不顯著。

益本比

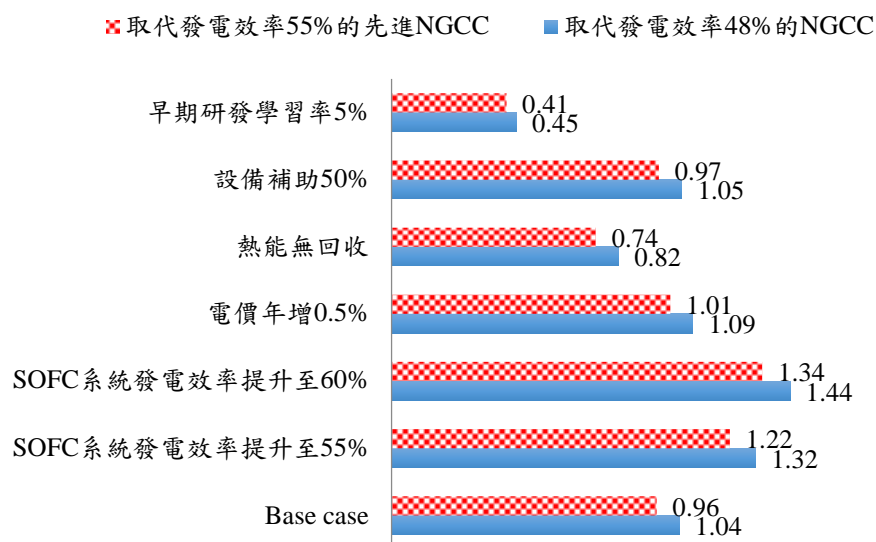


圖 28 家用系統之敏感性分析結果

益本比

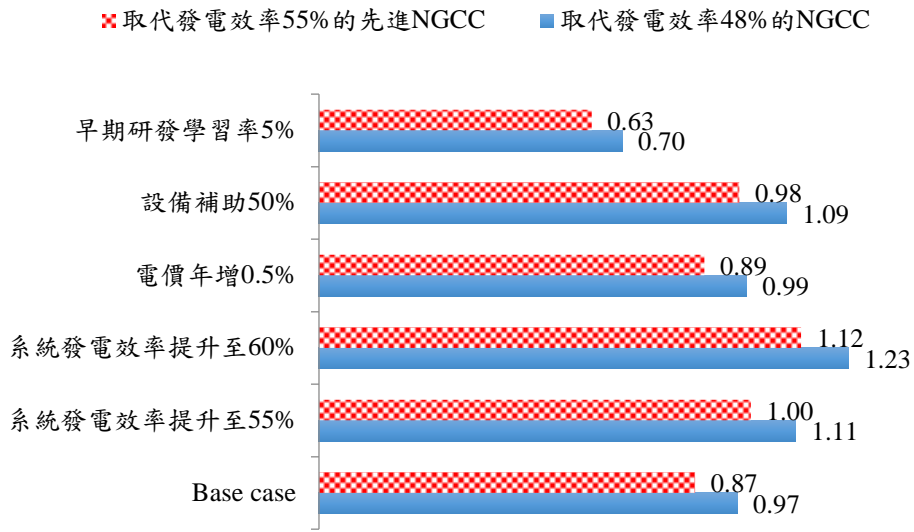


圖 29 商用系統之敏感性分析結果

三、我國發展 SOFC 之 3E 效益分析

技術經濟分析可從廠商的角度出發，評估在相關外在條件下是否值得投資這項技術，但缺少產業之間或與整個經濟體系的連結，所以必須再搭配 3E 模型來更完整的評估整個經濟體系所產生之效益。在此本計畫利用動態可計算一般均衡 GEMEET 模型，而模型主要以 2006 的產業關聯表為基期，透過歷史模擬校準至 2013 年，而從 2014 年逐步求解模擬至 2050 年。在模擬結果中，本計畫將重點放在燃料電池的發展對整個經濟體系所產生的效益。而模擬情境主要可分為參考情境與政策情境。政策情境主要是在不同的用途下搭配未來燃料電池的設備補助與達到推廣目標做模擬，而補助的資金來源為政府，最後再透過不同的指標來比較不同情境之間的效益。最後計算本益比來與技術經濟的結果作比較。

3.1 情境設計

在參考情境中，假設燃料電池無任何裝置量。而其他相關之設定則如下：

- A. 核能發電技術假設：在模型內假設核四廠排定不商轉，核一廠於 2018、2019 各有一部機組除役，核二廠於 2021、2023 分別一部機組除役，而核三廠則排定於 2024、2025 年各一部機組除役。
- B. 水力發電技術假設：由於台灣水力發電之河川有限，且也已幾乎開發待盡，所以在未來年裡發電量並不會有太大幅之增加，而模型內本計畫將水力發電之設定為外生變數，設定值為為過去的平均成長率每年成長 0.28%。
- C. 未來家計戶數成長率：資策會產研所對全國家庭戶數有做預測，其利用國發會低推計之未來人口預測結果，來預測未來家庭戶數的趨勢。所以在此本計畫直接使用其推估結

果(圖 30)。

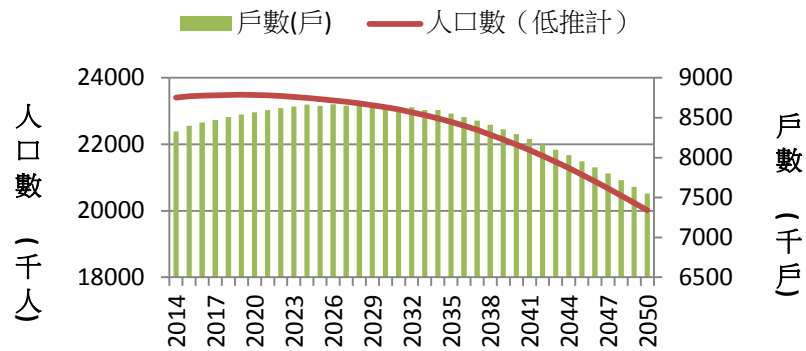


圖 30 家庭戶數趨勢

- D. 未來國際能源價格：在模型未來年中本計畫必須將國際能源包含原油、天然氣及煤的名目價格設定為外生，目前使用核研所團隊所提供之名目能源價格。原油價格(圖 31)為中油所預估，而天然氣與煤價格(圖 32 圖 33)則為核研所團隊自行估計。

圖 31 原油價格設定

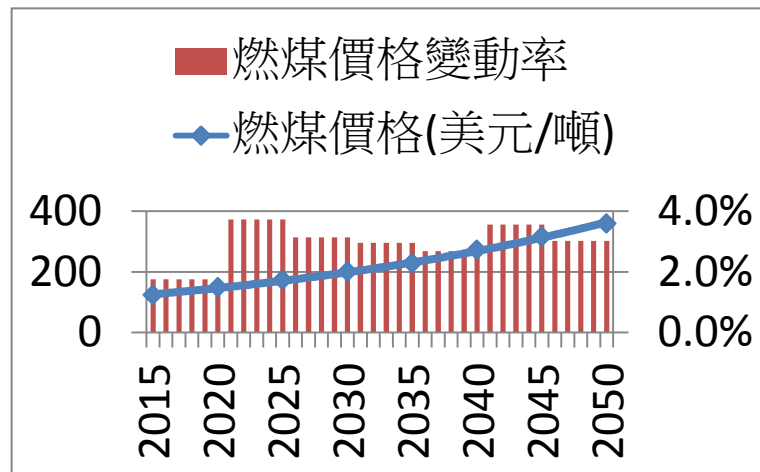


圖 32 燃煤價格

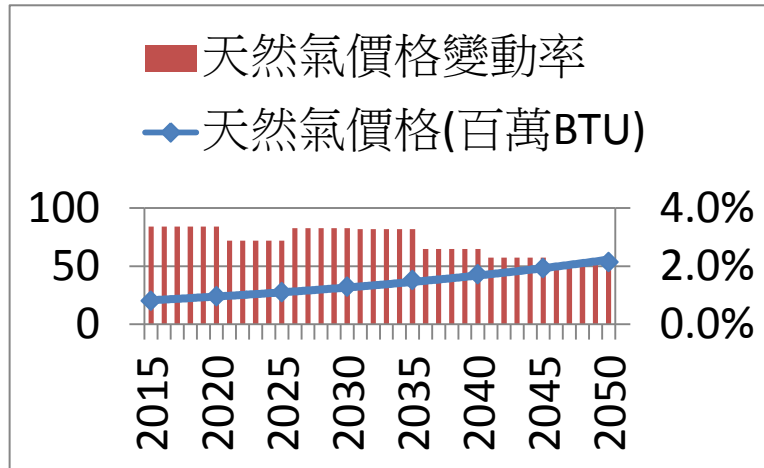


圖 33 天然氣價格

E. 未來平均年投資率：假設未來每年投資成長率為過去的平均 4.52%。

在政策情境中，本計畫假設燃料電池有兩種用途，第一，本計畫假設燃料電池主要是用來當作基載電力來彌補未來基載可能不足的狀況。第二，燃料電池用來當作中尖載電力且直接替代燃氣發電。接著分別在以上兩種不同用途下，模擬設備補助與達到推廣目標所產生之效益。在設備補助方面，本計畫假設未來每年產品售價的補貼率維持在 50%。至於推廣目標情境裡，本計畫將 SOFC 的外生設定使其達到過去政府所設定之推廣目標量(表 13)，。雖然目前燃料電池已無推廣目標，但模擬結果可做對照及參考用。然而推廣目標內並未指出是針對哪一種燃料電池，所以在本情境假設推廣量全部皆為 SOFC，2030 以後則讓 SOFC 內生求解自然成長。

表 13 燃料電池推廣目標量

	2010	2011	2012	2015(f)	2020(f)	2025(f)	2030(f)
氫能燃料電池	-	-	-	7	60	200	500

資料來源：2010~2012 年裝置容量資料取自經濟部能源局「能源統計月報」；2015 至 2030 之推動目標數據來自能源局召開之「經濟部能源研究會報」2011 年第一次會議「能源科技研究發展方向」簡報。

3.2 模擬結果

3.2.1 參考情境

圖 34 為經濟成長率與能源消費的時間數列趨勢，由結果可觀察 2020 年之後的經濟成長率開始下降，主要與未來核能除役及家戶成長之設定有關，2025 年後人口減少導致勞動力也跟著下降，但實際的情況下人口減少不一定會導致勞動力減少，可以透過外勞的引進來維持整體經濟體系之勞動力，但目前模型中無考慮到外勞引進這個因素。而模型內所解出之經濟成長率到 2050 年將收斂至 1.8% 左右。而能源消費成長率在未來年則是從 2020 年 2.04 緩步下降至 2050 年的 1.75。在經濟成長的速度越來越緩慢情況下，未來能源消費彈性會逐漸提高，到 2050 年約為 0.98。

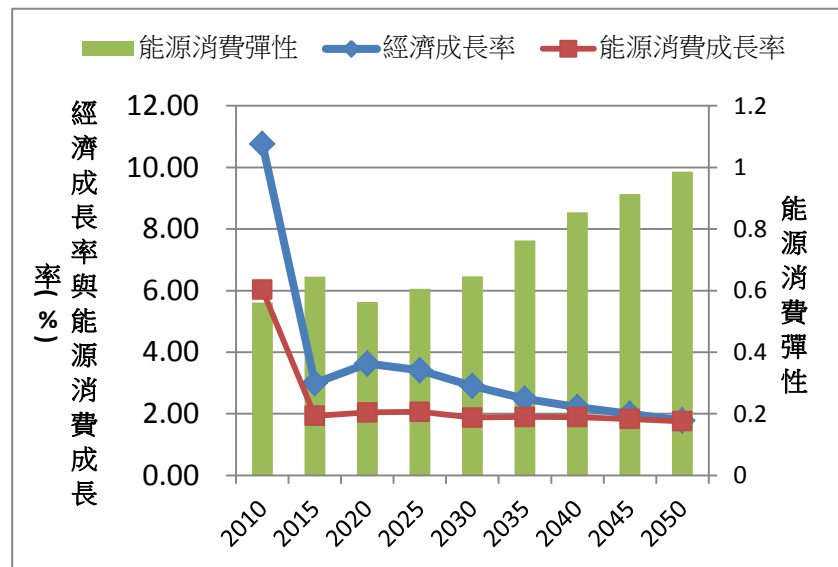


圖 34 經濟成長與能源消費

圖 35 則是模型所求解出台灣的二氧化碳排放量。隨著經濟成長能源使用增加，二氧化碳排放量自然日益增加，到 2050 年排放量約為 524 百萬公噸，但伴隨著能源使用效率的提升，二氧化碳排放密集度也逐漸下降。從 2010 年 18 下降到 2050 年 12 左右。

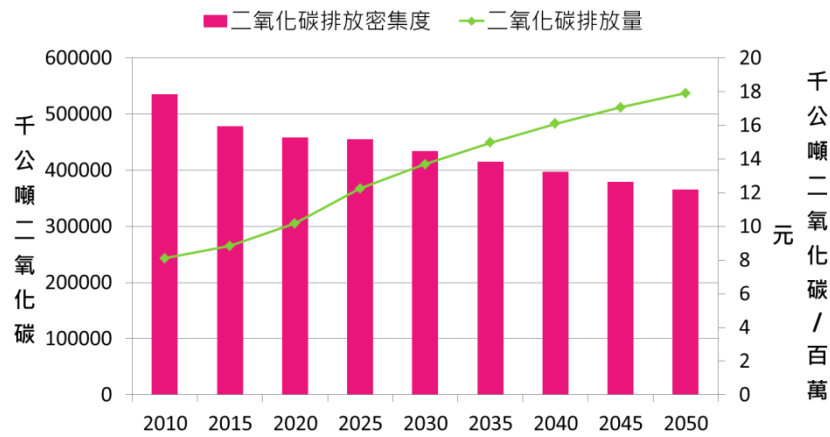


圖 35 二氧化碳排放量

圖 36 的發電配比可以發現，隨著核電廠的除役，雖然汽電共生的比例將逐漸提高，然而因核電廠除役所需的發電量將大部份由燃煤、汽電共生及燃氣取代。至於再生能源方面，本模型將再生能源區分為兩類，第一類為水力發電，其在台灣行之有年，並占總再生能源發電之大宗。第二種為新能源技術，其中包含了太陽能與風力發電這兩種發電技術。由於我國地理環境條件之因素，所能開發水力發電之河川有限，且也已幾乎開發待盡，所以在未來年裡發電量並不會有太大幅之增加，故占總發電量之配比也是呈現逐年下降的趨勢。至於新能源技術，礙於在基準情境裡本計畫並沒有對這些新能源技術做額外政策誘因的設定，而是讓其自然成長，所以在如此高成本的發電技術下，透過本模型內價格機制調整的結果下，增加的幅度並沒有超過其他傳統發電技術幅度，導致整個再生能源的配比逐漸呈現下降的趨勢。而從圖 37 所示的能源結構可以得知，未來電力對於整個經濟體系的重要性日益增加。

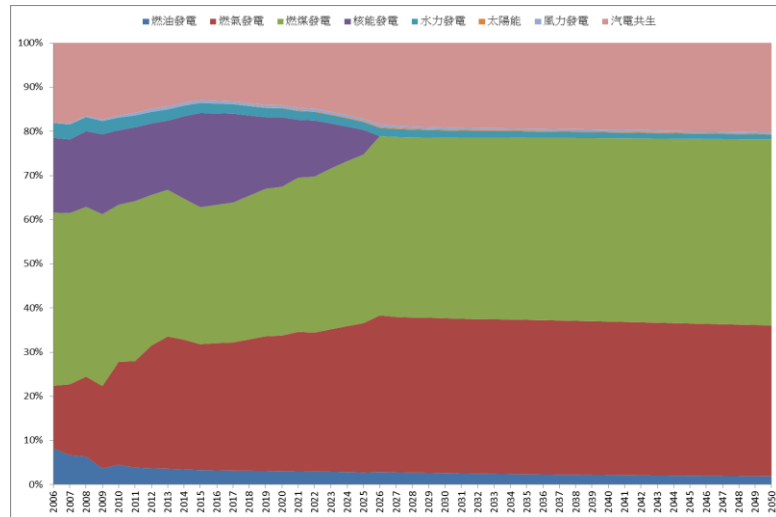


圖 36 發電結構

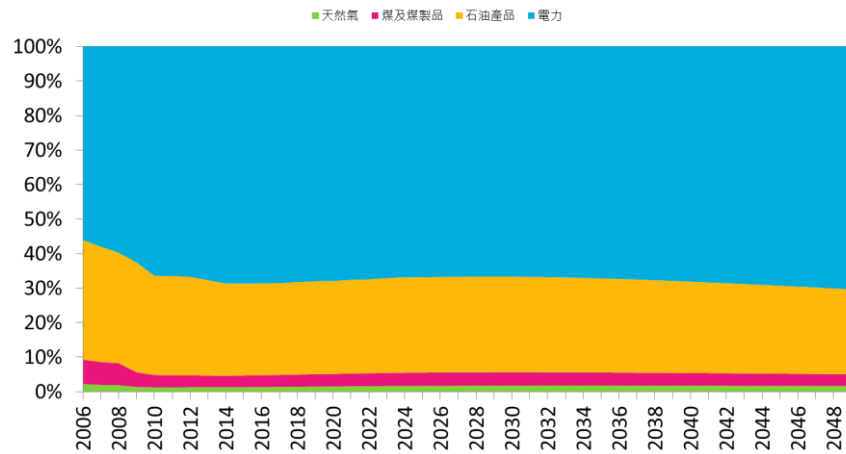


圖 37 能源結構

如果就產值之產業結構（圖 38）來看，未來還是以工業的結構占大宗，且維持一穩定的比例約在 50%左右，但如果就附加價值（圖 39）來說，那麼雖然還是以服務業為主，但是依照未來的趨勢來看，其占比逐漸縮小，到 2050 年約占 68%。

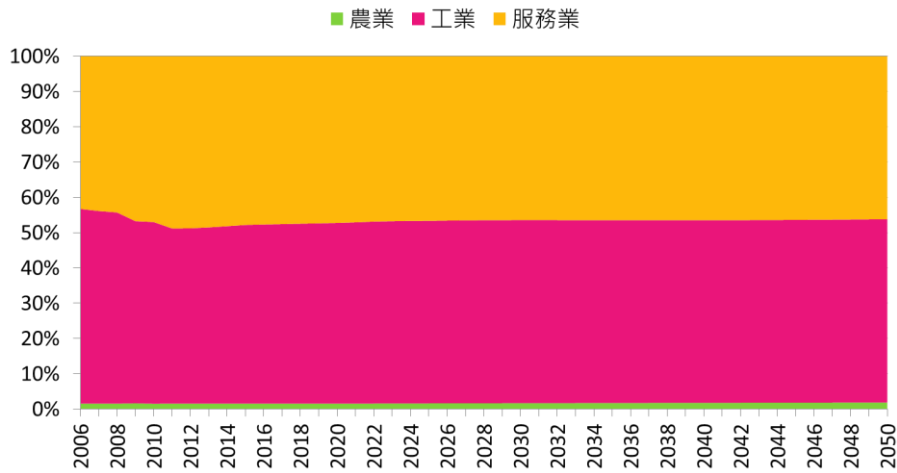


圖 38 產業結構-產值

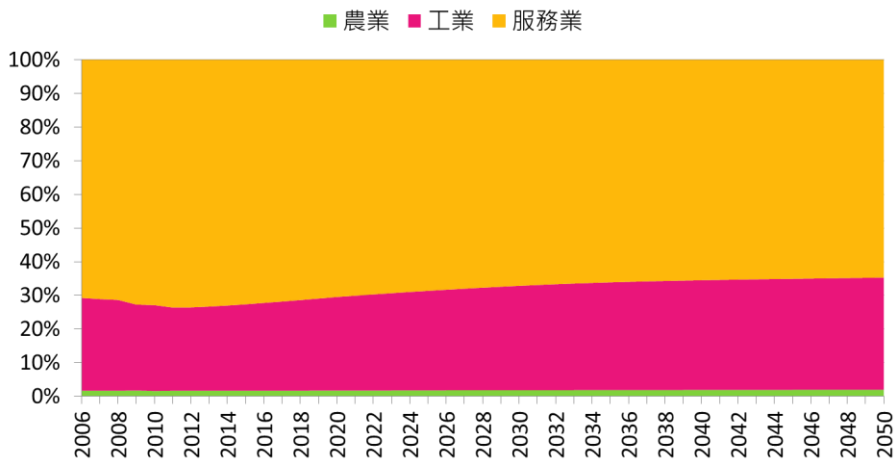


圖 39 產業結構-附加價值

3.2.2 政策情境

3.2.2.1 效益分析

圖 40 為不同用途下各情境 SOFC 的安裝量，在推廣目標的情境下，由於在 2030 年以前是直接將量外生，所以成長速度較快，之後由於讓其自然成長且無任何補貼誘因政策，所以導致其成長速度較為緩慢，而如果把 SOFC 直接替代燃氣發電，安裝量會較為當作基載用電還要多。而在補貼率維持在 50% 的情況下，不論是當作基載還是中尖載，安裝量都比推廣目標的量還要少，這可

能也反映著誘因不夠的情形。而與推廣目標一樣的情形，在實施補貼率的狀況下 SOFC 當作中尖載用電的量也會比基載還要高。但之後不論是何種用途安裝量成長的速度都會減緩。

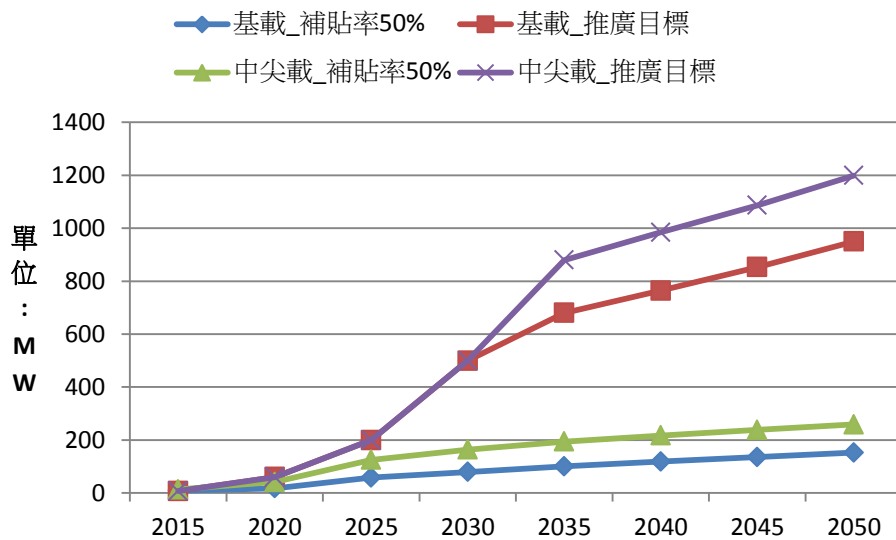


圖 40 各種情境下的 SOFC 安裝量

圖 41 與圖 42 為模擬後 SOFC 在不同用途下的產品價格與實際購買價格，在設定與技術經濟相同的學習率(16%)下，透過產量累積的學習效果，廠商在生產 SOFC 時會有成本下降的現象，也會進一步反映在產品的價格，但隨著產量越來越高，其下降的速度也會越來越慢，主要是因為產品安裝量的速度在減緩。對於購買者來說，雖然補貼率一直維持在 50%，但是由於成本下降的現象，導致實際補貼的金額也在減少當中，反映補助的誘因也會跟著下降。

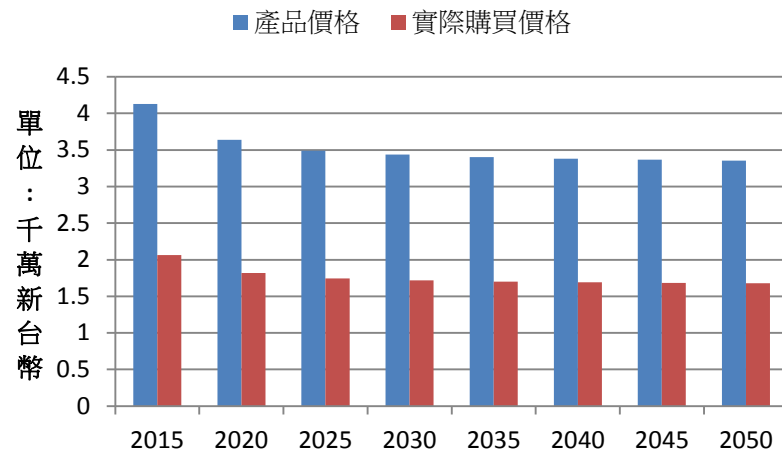


圖 41 SOFC 當作基載電力下的價格變化趨勢

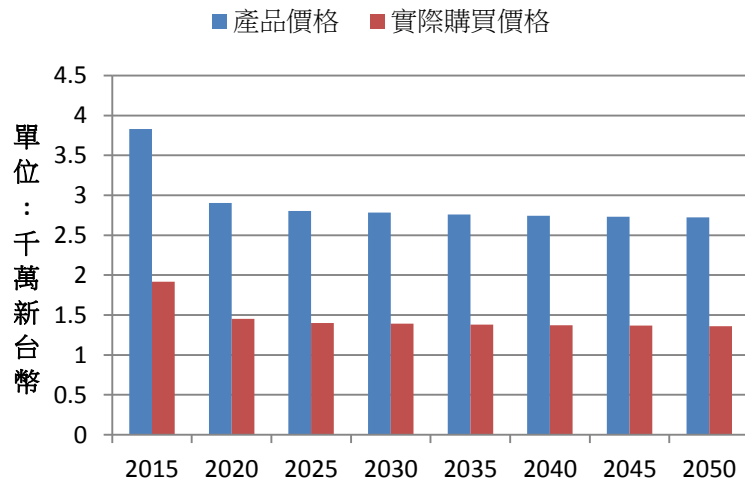


圖 42 SOFC 當作中尖載電力下的價格變化趨勢

接著本計畫從不同的角度與指標來則針對各個情境的結果做效益評估。如果就經濟效益來看(圖 43 與圖 44)，在 SOFC 當作基載且達到推廣目標的情況下的實質 GDP 與就業人數增加最多，雖然其安裝量不如在中尖載的情境，但由於 SOFC 在基載時與其他基載電力之間的替代性較低，所以反映著基載電力機組的量增加，對於經濟體系在成長的過程中會更有發展的空間。而在補貼率的情境由於安裝量相較於推廣目標的量還要少，所以對經濟的貢獻自然也較低。如果從環境面(圖 45)來看，在 SOFC 當作基載使用並達到推廣目標時減碳的貢獻最大，主要的原因是 SOFC 在

基載時有替代掉部分的燃煤發電。而在設備補貼的情境下由於安裝量較少，所以其對減碳的貢獻也就有限。

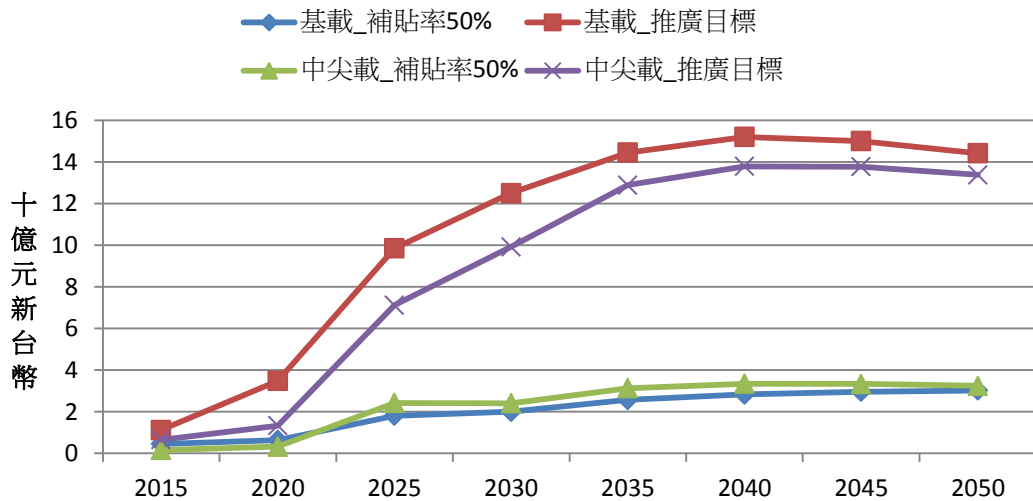


圖 43 各年度政策情境相較於參考情境的實質 GDP 差異

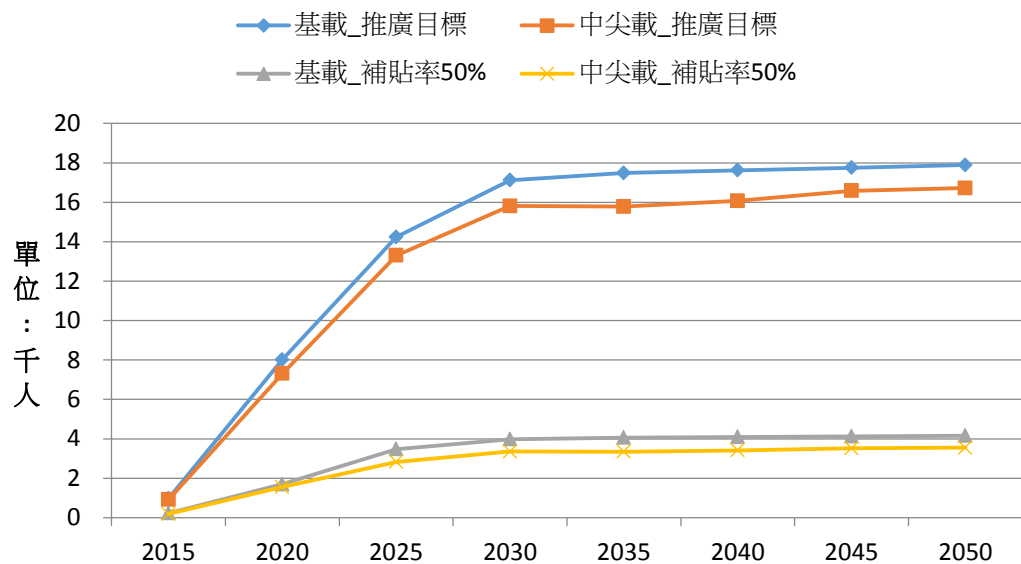


圖 44 各年度政策情境相較於參考情境的就業人數差異

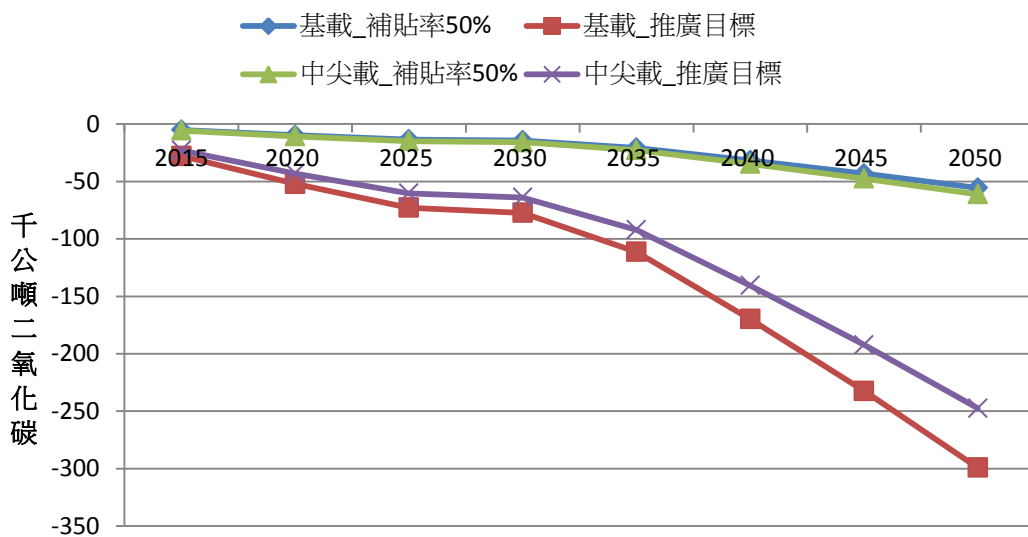


圖 45 各年度政策情境相較於參考情境的二氧化碳排放量差異

3.2.2.2 益本比分析

透過上述的模擬，本計畫也可從比較總體的角度來針對分析成本效益，以彌補技術經濟的不足，但 GEMEET 模型中所產生之結果不一定可以跟技術經濟分析的結果做對比，主因是兩者計算方式之基礎與研究範疇有所不同，部分結果可透過外部計算或是間接方式來做比較，而有些結果可用來補足另一方法之限制，表 14 則為技術經濟與 GEMEET 模型成本效益分析項目的差異。

表 14 技術經濟分析與 GEMEET 模型成本效益項目計算方式差異

成本項目	技術經濟分析	GEMEET 模型分析
設備投資成本	SOFC 系統設備成本*假設安裝量	SOFC 系統設備成本*模型解出之安裝量
燃料成本	每度電所需燃料量*天然氣價格*SOFC 發電量	每度電所需燃料量*當年天然氣價格*SOFC 發電量
運維成本	SOFC 系統設備成本*運維費比例	

效益項目		
用戶效益		
售電效益	SOFC 發電量*售電價格	SOFC 發電量*當年售電價格
社會效益		
減少因缺電產生之經濟損失	系統安裝量*(102 年度每戶 停電時間/60 分鐘)*因缺電產生之經濟損失	
CO2 減排效益	相對替代方案天然氣使用減少量*IPCC2006 碳排係數*CO2 價格	有發展 SOFC 之情境相較於參考情境所減少之 CO2
經濟效益		有發展 SOFC 之情境相較於參考情境所增加之實質 GDP

表 15 為利用 GEMEET 模型內的結果所設算出之益本比結果，在成本方面，燃料成本的比例最高，其次為設備成本，運維成本所佔的比例最小。而在效益方面，用戶的效益最高，其次為經濟效益，環境的效益最小，主要因為 SOFC 也會造成二氧化碳排放，所以對於減碳的貢獻也就有限。而從較為宏觀的角度來看益本比的話，不論哪一種情境，其益本比皆大於一，其中又以如果把 SOFC 當作基載電力且政府有補貼的情況下。而益本比最低為在推廣目標下 SOFC 當作中尖載使用。

表 15 GEMEET 成本效益分析

成本項目	達到推廣目標		補貼率 50%	
	基載	中尖載	基載	中尖載
設備成本	1299.06	1601.14	203.60	374.87
燃料成本	5602.20	6914.93	831.02	1526.31
運維成本	613.58	762.51	95.32	171.86

總成本	7514.84	9278.58	1129.94	2073.04
效益項目				
經濟效益	3916.88	3333.90	730.85	808.62
環境效益	38.65	31.97	7.18	7.89
用戶效益	5427.62	6675.01	847.31	1561.38
總效益	9383.16	10040.88	1585.34	2377.89
益本比	1.25	1.08	1.40	1.15

四、我國發展 SOFC 之優劣勢

燃料電池雖然有發電效率高、低碳排放(與使用燃料有關)、集中或分散式發電皆可等優勢，然而也因我國尚未具備模組化能力，向國外購買設備則有成本昂貴問題，使得我國燃料電池的發展至今仍落後先進國家。此外，若家用燃料電池得以發展，則可降低民眾對外購電力的需求，也因此可降低電力公司的尖峰負載及備用容量，如此可大幅降低電力公司的中尖載的發電成本，柴蕙質與葛復光(2012)的研究指出，台電公司的氣渦輪機之發電成本 2008 年約為 55.6 元/kWh、2009 年大幅增加為 109.2 元/kWh、2010 年為 99.22 元/kWh，而其主要原因則為使用率偏低，而氣渦輪發電則主要用於中尖載發電及備用容量。由於 SOFC 機組技術門檻高，為確認我國 SOFC 可行技術發展之優劣勢，本團隊除參考日本技術進程，並訪談核研所 SOFC 研發團隊確認我國技術發展進程，最後歸納於下：

SOFC 系統之優勢：

- (1) 自材料研究至系統開發已有核心技術專利；
- (2) 國內已有廠商投入研發生產，可望建立完整供應鍊；
- (3) 安全性高於 PEMFC：高溫氫可完全燃燒，降低氫爆可能；
- (4) 熱電聯產，燃料使用效率；

- (5) 氫可內重組(reform)，故燃料選擇多種；
- (6) 待機幾乎零耗能：得不關機，可作備用電源；
- (7) 可進行 0~100%的負荷追蹤運行，及變動製氫；
- (8) 餘熱排放：避免過熱，系統得持續運轉。

SOFC 系統之劣勢：

- (1) 臺灣 SOFC 技術在實驗階段（中鋼目前已建置 kW 級實驗設備），尚未制定驗證規範；
- (2) SOFC 設備購買成本昂貴，且尚需進口；
- (3) 目前系統大多使用天然氣，天然氣為進口燃料，除價格問題，還有氣源供應穩定與安全隱憂；
- (4) 現階段電價相對便宜，民眾尚無使用動機；
- (5) SOFC 非再生能源技術，屬於前瞻能源技術，政府無制訂明確法規補助生產端或用戶端（目前僅有示範計畫）。

綜合技術經濟分析成果與我國 SOFC 技術發展劣勢，可知昂貴設備成本及運維成本是我國推廣應用之重大問題；換言之，降低使用成本是 SOFC 系統應用發展之成功關鍵。一旦國內廠商有能力自行製造組裝 SOFC 系統，大幅度的降低設備成本，我國 SOFC 應用市場自然就會發展起來。

五、結論與政策建議

(一) 燃料電池

整體來看，臺灣目前在燃料電池產業有相當完整的供應鏈，燃料電池相關產業的廠商分佈，如圖 6 所示。只是，產業供應鏈的形成，並不代表我國生產的燃料電池在國際具有成本競爭力。要改良提升製程效率與發電效率，須要經驗累積與規模經濟。因此，國內應用市場是一良好試金石，建議政府以設備補助機制擴展國內應用市場，提供國內廠商實績驗證機會以發展全球市場。

本研究透過技術經濟分析針對燃料電池進行成本效益分析之探討，說明現階段 SOFC 發展效益不在用戶端。雖然目前該系統設備與運維成本昂貴，而站在國家整體發展的角度上看，該系統之推廣應用能促進傳統機電產業有產業轉型的機會與帶動燃料電池產業發展；以及，SOFC 還有能提高能源的使用效率(相較於現階段傳統電廠)、降低能源密集度(其屬於分散發電系統)的好處。但從技術經濟分析的結果來看，發展國用應用裝置量尚有一定難度。

就現階段而言，與 SOFC 推行成功的美國、日本相比，我國電價較低，面備高昂的設備投資費用，民眾購買意願不高；又屬於前瞻技術，其技術門檻高，政府對燃料電池應用補助偏向保守態度，這樣一來，廠商的研發投資意願就相對低。由於電價調整屬於民生重大議題，須多方考量兼顧。因此，若要政府打算加速推動 SOFC 產業能發展足夠的市場規模，最直接的辦法為提升國內技術層次，並仿照日本提供設備補助促使廠商有實績驗證機會。在發展初期，若向國外採購設備時，與國外廠商簽定技術合作，以扶植國內相關鍵零組件產業，對外切入其供應鏈體系，對內提高產品自製率。現階段要持續強化技術研發，加速結合產官學界的相關研發能量，愈早進行研發，透過研發資本的累積，可創造

愈大的效益，加速產業發展。

本研究藉由技術經濟分析研究結果說明我國燃料電池應用之發展可行性，並從中提出以上具體的產業化建議，但亦存在研究限制。由於臺灣尚未有國產成熟可商品化 SOFC 模組，缺乏本土化技術數據，本研究依日本、美國發展較成熟機型之技術成本參數計算。以及，國內產業鍊廠商在追求生產規模時，有可能將產品外銷，這時，系統銷售價格可能會比本研究所估算下降的更快；抑或，廠商技術研發進展不如預期，本研究設定學習率高估，那麼，本研究則會低估各期(年)設備投資成本。

另外透過 GEMEET 模型的分析結果，在以整體經濟產業使用為主，所以僅考慮 200kW 大型機組之安裝的情況下。根據模型評估結果，不論將 SOFC 當作基載用電或是直接與燃氣發電作替代，如果按現階段政府規劃之 SOFC 推廣目標發展或實施補貼制度，對用戶來說，在只考慮到用戶效益的情況下，益本比遠遠小於 1，此反映著 SOFC 對於用戶而言不具安裝誘因，此與技術經濟的評估結果一致。但如果在政府的角度，考量到經濟及環境等相關之效益下，雖然其益本比皆高於 1，代表政府應積極推廣 SOFC 之安裝以利整體經濟與環境之發展，但如果單就經濟效益來看，在 SOFC 設備業出口比例不高的情況下，其所增加的實質 GDP 及就業人數有限，反映國內在發展相關產業時，除了自身國內的需求，如何開拓國際市場來促進國內相關產業的發展為相當重要的課題，而政府的角色除了提供設置誘因以外，在目前國內自製的技術可行性下，應該整合從上游零組件到下游系統整合的完整供應鏈以達到 100% 自製率，這樣可除了可避免進口設備價格較高導致安裝意願較低的情況，也同時帶動國內相關製造 SOFC 之傳統產業進行產業升級，提高其附加價值。

(二) 智慧電網

傳統電網屬集中式發電，單向送電、單向通訊、缺乏用戶端資訊，以歷史經驗來運轉，而智慧電網則包括集中與分散式（再生能源）發電，多方向送電、多方向通訊，以及將需求整合於系統中。即時性運轉、融合再生能源加上資通訊科技（ICT）係未來智慧電網基本架構，也就是未來發電方式將會是多元的。

智慧電網為整合發電、輸電、配電及用戶的先進電網系統，其兼具自動化及資訊化的優勢，具備自我監視、診斷及修復等功能，提供具高可靠度（Reliability）、高品質（Quality）、高效率（Efficiency）及潔淨（Clean）的電力使用效益。並提供用戶各種用電資訊與選擇，使得用戶能更有智慧的運用能源及降低碳足跡，同時最佳化基礎建設，確保系統多功能、強健與可靠。

臺灣與英國、美國智慧電網之成本與效益評估呈現於表 16。表 16 列出各國智慧電網的安裝規模、系統使用壽命、成本項目、效益項目及益本比（B/C）。英國估計智慧電網的益本比為 1.65，美國估算為 2.8-6.0，得知主要國家普遍認為智慧電網具有投資效益。只是從傳統電網轉換到智慧電網需要龐大的投資金額，故智慧電網基本架構，從發電、輸電、配電到用電，都須進行整合性的規劃。

以英國為例，英國規劃 2020 電網願景並提出智慧電網路徑圖，後續 OFGEM（Office of Gas and Electricity Markets）更提供 5 億英鎊，協助推動智慧電網示範計畫。英國政府對 2011~2030 年 AMI 建置成本預估及各部門效益更進行詳實的估算。從英國成本效益分析項目中，可發現智慧電網建構包括用戶、能源供應商、輸電網公司、發電公司及國家等角色。目前，臺灣的能源供應、輸電網與發電主要廠商均為台電公司，似乎比較單純。但臺灣未來若要朝向電力自由化邁進，是否會讓智慧電網的建構難度提高。

也就是說，執政當局可能要重新評估資通訊術的標準建置、利益關係者（哪些人的成本及利益應納入考慮）及預期對社會經濟的衝擊等可能受影響層面。

目前，我國能源局（2012）在智慧電網總體規劃方案中，估算臺灣建置智慧電網的總成本須花費 1399 億新台幣，評估項目包含六大主題，(1)智慧發電與調度為 75 億新台幣，(2)智慧輸電為 107 億新台幣，(3)智慧配電約 98 億新台幣，(4)智慧用戶共 958 億新台幣，(5)智慧電網產業為 79 億新台幣，(6)智慧電網環境建構計 82 億新台幣。

表 16 臺灣與主要國家智慧電網之成本與效益評估

	英國	美國	臺灣
來源	National Audit Office (2011/6); IEK (2011)	EPRI (2010, 2011); FERC (2009)	能源局 (2012)
安裝規模	2017 年完成換裝智慧電表與智慧瓦斯表共 5,300 萬具	141 百萬具電表 (全部安裝 14,099 萬具)	1200 萬戶智慧型電表系統建置 (第一階段為 600 萬戶)
系統壽命 假設	20 年 (2011-2030) 3.5% Constant price in 2009	20 年 Discount rate: from 4.5% to 1.5%. Constant price in 2010	20 年 (2011-2030)
成本	11,331 百萬英磅	3,380-4,760 億美元	1,399 億新台幣
效益	18,649 百萬英磅	12,940-20,280 億美元	
B/C	1.65	2.8-6.0	
成本項目	智慧表初始成本 智慧表安裝成本 通訊系統運行與維護費 資訊技術 通訊系統建設 能源 智慧表運行與維護費 讀取未安裝智慧表之無效率成本 產業建構成本 行銷成本 將不符合標準的表進行升級 舊表處置成本	Transmission and substations Distribution Consumer	智慧發電與調度 智慧輸電 智慧配電 智慧用戶 智慧電網產業 智慧電網環境建構
效益項目	用戶效益 : 減少能源支出 微型發電 能源供應商效益 : 迴避人工抄表成本、減少客戶查詢成本、減少客戶服務費用、減少債務處理成本、迴避預付表成本、遠端斷/復電、減少竊電損失、減少客戶轉換成本 輸電網公司效益 : 減少線路損失、搭時間電價平滑尖離峰延、遲配網	Productivity Safety Environment Capacity Cost Quality Quality of Life Security	供電穩定效益: 減少全國停電時間、降低線路損失、改善供電瓶頸、變電所智慧化 減碳效益 提高綠能使用 產業效益

投資之迴避成本、減少停電損失、
減少故障修復營運成本、更有效的
訂定投資決策、迴避電壓抱怨調查
成本、減少停電通知成本

發電公司效益：搭配時間電價平滑
尖離峰、降低發電成本、搭配時間
電價平滑尖離峰、延遲電廠建置之
迴避成本

國家效益：減少 CO2 排放、減少
能源使用降低歐盟排、放交易成
本、搭配時間電價平滑尖離峰、減
少 CO2 排放降低歐盟排、放交易
成本

Reliability

肆、參考文獻

1. Bezmalinović, D., Barbir, F. and Tolj, I. (2013) “Techno-economic analysis of PEM fuel cells role in photovoltaic-based systems for the remote base stations” *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (1), 417–425
2. C.H. Zheng, C.E. Oh, Y.I. Park, S.W. Cha f (2012) "Fuel economy evaluation of fuel cell hybrid vehicles based on equivalent fuel consumption", *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 1790-1979.
3. Chen, Yen-Haw, Lu, Su-Ying, Chang, Yung-Ruei, Lee, Ta-Tung, & Hu, Ming-Che. (2013). Economic analysis and optimal energy management models for microgrid systems: A case study in Taiwan. *Applied Energy*, 103, 145-154. Mah, Daphne Ngar-yin, van der Vleuten, Johannes Marinus, Hills, Peter, & Tao, Julia. (2012). Consumer perceptions of smart grid development: Results of a Hong Kong survey and policy implications. *Energy Policy*, 49, 204-216.
4. Colin Cockcroft Division, Anthony D Owen (2006) “A Cost-Benefit Analysis of Perth’s Hydrogen Fuel Cell Buses” Murdoch University.
5. Dalton, G. J., Lockington, D. A., & Baldock, T. E. (2009). Feasibility Analysis of Renewable Energy Supply Options for a Grid-Connected Large Hotel. *Renewable Energy*, 34(4), 955-964. Trendewicz, A.A. and Braun, R.J. (2013), “Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities” *Journal of Power Sources*, 233 .
6. EIA (2011), *International Energy Outlook 2011*, Washington: U.S. Energy Information Administration.
7. G. Righettini, P. Mousse (2004)” Ventilation Savings with Fuel Cell Vehicles a Cost-Benefit Analysis for Selected US Metal/Non-Metal Mines”, SME Annual Meeting.
8. Hondo, H. (2005), “Life cycle GHG emission analysis of power

- generation systems: Japanese case,” *Energy*, 30, 2042-2056.
9. IEA (2011) , "中國風電發展路線圖 2050," International Energy Agency.
 10. IRENA (2011), *Renewable Energy Jobs: Status, Prospects & Policies*, International Renewable Energy Agency.
 11. J.K. Seong, O.B. Soo (2002) ”Fuel economy and life-cycle cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle” *Journal of Power Sources*, 105 (1).
 12. Kaufmann, Simon, Künzel, Karoline, & Loock, Moritz. (2013). Customer value of smart metering: Explorative evidence from a choice-based conjoint study in Switzerland. *Energy Policy*, 53, 229-239.
 13. Krishnamurti, Tamar, Schwartz, Daniel, Davis, Alexander, Fischhoff, Baruch, de Bruin, Wändi Bruine, Lave, Lester, & Wang, Jack. (2012). Preparing for smart grid technologies: A behavioral decision research approach to understanding consumer expectations about smart meters. *Energy Policy*, 41(0), 790-797.
 14. Matsushashi, Ryuji, Kae Takase, Tsuyoshi Yoshioka and Yoshikuni Yoshida (2010), "Sustainable development under ambitious medium term target of reducing greenhouse gases," *Procedia Environmental Sciences*, 2, 1246-1254.
 15. Rivera-Tinoco, R., Schoots, K, and van der Zwaan, B (2012), Learning curves for solid oxide fuel cells, *Energy Conversion and Management*, 57, 86-96.
 16. Saeed Jalilzadeh, Hossein Kord, and Ahmad Rohani (2010) ” Optimization and Techno-Economic Analysis of Autonomous Photovoltaic/Fuel Cell Energy System”, *Ecti Transactions On Electrical Eng., Electronics, and Communications VOL.8, NO.1 February 2010*
 17. Schumacher, Katja and Ronald D. Sands (2006), "Innovative energy technologies and climate policy in Germany," *Energy Policy*, 34, 3929-3941.
 18. Stocker, Andrea, Anett Grobmann, Reinhard Madlener, and Marc Ingo Wolter (2011), "Sustainable energy development in Austria

- until 2020: Insights from applying the integrated model e3.at," Energy Policy, 39, 6082-6099.
19. T.E. Lipman, J.L. Edwards, D.M. Kammen (2004). "Fuel cell system economics: comparing the costs of generating power with stationary and motor vehicle PEM fuel cell systems", Energy Policy, 32 (2004), 101-125
 20. Yash Sanghai (2013). "Techno-Economic Analysis of Hydrogen Fuel Cell Systems Used as an Electricity Storage Technology in a Wind Farm with Large Amounts of Intermittent Energy" Submitted to the Graduate School of the University of Massachusetts Amherst in partial fulfillment of the requirements for the degree.
 21. 中國鑛冶工程學會(2013)，第3次SOFC產業連盟籌組策略討論會會議紀錄，2013年5月21日。
 22. 王仲平(2009)，我國燃料電池產業分析與策略規劃探討。未出版碩士論文，新竹市：國立清華大學。
 23. 王信博(2009)，臺灣氫能運輸工具燃料電池產業的發展研究。未出版碩士論文，台中市：東海大學。
 24. 石井弘毅(2008)，譯者：林羿姝，圖解燃料電池，台北：世茂出版社。
 25. 朱榮貴(2011)，建置智慧型電表基礎建設取代傳統計費電表之關鍵績效指標。未出版碩士論文，台北市：國立臺北科技大學。
 26. 李信璋(2009)，我國智慧型電表基礎建設產業發展策略之研究。未出版碩士論文，台北市：國立政治大學。
 27. 李睿騰(2012)，智慧電錶系統基礎建設之可行性評估研究。未出版碩士論文，台北市：臺北城市科技大學。
 28. 武天翔(2008)，我國燃料電池產業未來發展之市場競爭策略分析。未出版碩士論文，新竹市：國立交通大學。
 29. 徐明煜(2012)，In-Home Display Authentication Protocols in AMI System。未出版碩士論文，新竹市：國立清華大學

30. 張登傑 (2010)，AMI 基礎建設產業之策略研究。未出版碩士論文，新竹市：國立交通大學。
31. 許志義、林子揚、顏海倫. (2012)，住宅部門智慧電能管理方案分析與政策意涵。碳經濟, 第 27 期, 頁 30-40。
32. 陳建宇 (2012)，利用先進讀表基礎建設資料偵測竊電。未出版碩士論文，台北市：大同大學。
33. 陳郁潔 (2009)，臺灣可攜式燃料電池產業之市場潛力推估。未出版碩士論文，中壢市：中原大學。
34. 蒲慎修 (2004)，燃料電池發展個案與策略之研究。未出版碩士論文，台北市：國立臺灣大學。
35. 劉躍新等 (2010)，智慧電網成本效益分析及測算模型研究 (以中國大陸某省為例)。
36. 蔡侑宗 (2010)，先進讀表基礎建設通訊系統之設計與實作。未出版碩士論文，台南市：國立成功大學。
37. 蕭易呈 (2005)，燃料電池公車成本結構與市場潛力分析之研究。未出版碩士論文，新竹市：國立交通大學。
38. 賴政男 (2011)，智慧型電表開發與校正。未出版碩士論文，台北市：國立臺北科技大學。
39. 謝榮道 (2009)，台電公司先進讀表基礎建設與控制中心之通訊網路探討。未出版碩士論文，台北市：國立台北科技大學。
40. 蘇川銘 (2006)，新創技術投資時機之研究—以燃料電池產業為例。未出版碩士論文，高雄市：國立中山大學。
41. 康志堅 (2013)，2013 年全球燃料電池發展回顧與展望，IEK 報告。
42. 余宗翰 (2013)，利用 PCA 近似法對智慧電網作假數據注入攻擊。未出版碩士論文，台南市：國立成功大學。
43. 梁嘉宇 (2013)，以誠實機制進行智慧電網內用電需求排程。未出版碩士論文，新竹市：國立清華大學。

44. 郭千瑜 (2013) , 智慧電網中以戶為單位之用電特徵分析。未出版碩士論文, 台北市: 國立臺灣師範大學。
45. 陳思瑤 (2013) , 智慧電網下最佳化之家庭電能管理系統。未出版碩士論文, 台南市: 國立成功大學。
46. 陳學謙 (2013) , 家庭用電之日前預先排程與即時排程在智慧電網中的應用。未出版碩士論文, 新竹市: 國立清華大學。
47. 黃士耘 (2013) , 利用類擬剛體改善智慧電網傳輸可靠性。未出版碩士論文, 宜蘭市: 國立宜蘭大學
48. 黃雅莉 (2013) , 智慧電網電力需求回應之模擬探討。未出版碩士論文, 台南市: 國立成功大學。
49. 董勁宏 (2013) , 在 IEEE 802.15.4 下智慧電網中家庭區域網路之控制訊號服務品質分析與研究。未出版碩士論文, 台北市: 國立臺灣科技大學
50. 鄭艾琳 (2013) , 基於使用者體驗的智慧電網之電力資源管理, 未出版碩士論文, 花蓮縣: 國立東華大學。
51. 簡民濂 (2013) , 我國智慧電網現況與發展潛勢探討。未出版碩士論文, 新北市: 國立台北大學
52. 簡浩哲 (2013) , 通訊技術應用於前瞻產業之策略分析-以智慧電網與物聯網整合為例。未出版碩士論文, 新竹市: 國立交通大學。
53. 臺灣電力公司 (2014) , 臺灣長期負載預測(10302 案) , http://www.taipower.com.tw/UpFile/_userfiles/file/臺灣長期負載預測.pdf。

伍、附錄

附錄一 PEMFC 發展進程受阻

質子交換膜燃料電池(PEMFC)商業化腳步早於 SOFC，近年來卻被 SOFC 迎頭趕上(臺灣燃料電池資訊網，2014；日經技術網)。其操作溫度介於 80 至 100°C 之間，安全顧慮較 SOFC 低。然而，近年來，PEMFC 的發展卻緩慢下來，理由是其系統成本下降有困難度。因為其觸媒白金價格昂貴，若減少其使用量，操作溫度勢必會提升。PEMFC 因其低溫、啟動速度快特性，日本、美國目前以運輸設備 (燃料電池車；FCV)為主要發展方向。不過由於加氫站設置成本昂貴(日本推估 2015 年單座設置成本 2 億日元)，以及加氫站安全問題 (易發生氫爆)，受限了車用燃料電池的發展進程。在家用系統部分，由於其熱電比高於 SOFC (PEMFC: 1.29, SOFC: 0.66)，對家戶來說會產生過多的熱能，不利於推廣應用。此外，白金容易與一氧化碳反應而發生中毒現象，因此也比較不適合用在大型發電廠。

SA(2012)報告評估顯示，當設備容量一樣和生產規模相同時，SOFC 生產成本與 PEMFC 生產成本相近。該評估結果說明了，在當前技術下，SOFC 的價格競爭力已能與 PEMFC 媲美 (其評估乃依據美國 NREL 提供資訊)。

附表 1.1 燃料電池系統設備成本

LT PEM Systems	1 kWe	5 kWe	25 kWe	100 kWe
100 sys/yr	\$10,106	\$3,182	\$1,180	\$771
1,000 sys/yr	\$7,854	\$2,556	\$941	\$637
10,000 sys/yr	\$6,618	\$2,185	\$760	\$486
50,000 sys/yr	\$6,032	\$1,935	\$658	\$428
HT PEM Systems	1 kWe	5 kWe	25 kWe	100 kWe
100 sys/yr	\$10,130	\$3,483	\$1,363	\$1,062
1,000 sys/yr	\$7,895	\$2,840	\$1,181	\$867
10,000 sys/yr	\$6,699	\$2,448	\$941	\$680
50,000 sys/yr	\$6,101	\$2,132	\$816	\$606
SOFC Systems	1 kWe	5 kWe	25 kWe	100 kWe
100 sys/yr	\$11,830	\$3,264	\$981	\$532
1,000 sys/yr	\$6,786	\$2,168	\$671	\$440
10,000 sys/yr	\$5,619	\$1,862	\$599	\$414
50,000 sys/yr	\$5,108	\$1,709	\$570	\$402

單位：US\$/kWe

名詞說明：Low Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (LT PEM); High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (HT PEM); Solid Oxide Fuel Cell (SOFC); kilowatts of electricity (kWe).

資料來源：SA (2012)

附錄二 智慧電網成本效益分析相關文獻

附表 2.1 智慧電網各文獻分析內容差異

來源	Schoenwetter (2007)	Southern California Edison (2006)	George and Wiebe (2008)	EPRI (2011)
機構/公司	Consolidated Edison Company of New York	Southern California Edison	PG&E	EPRI
評估地區	New York State (US)	Southern California (US)	Vermont (US)	US
規模	approximately 510,000 electric and gas end-points	over 600,000 automatically read meters	-	2030 年有 165 百萬電力用戶
導入時間	4 年	2 年	-	-
成本效益分析期間	15 年 (7 年佈建+8 年執行)	26 年 (2007-2032) (2 年導入+4 年佈建+20 年執行)	20 年	20 年
主要情境	Business case	Business case	Demand response strategy*	Low, High
通訊技術	RF, BPL, PLC	RF, PLC	RF, BPL, PLC	RF, PLC
主要成本項目 (成本占比)	電表硬體投資 (53%) 電表安裝成本 (12%) 運維費(13%) 勞工成本(12%) 通訊管理基礎設施投資 (6%) 電表資料管理系統(2%)	基礎設施投資成本 (43%) IT 系統開發和整合成本 (10%) AMI 的基礎設施安裝和建置成本 (8%) 需量反應之操作成本 (13%) AMI 運維費用 (6%) 建置完成後的穩態增量營運成本 (18%)	電表硬體投資與安裝成本(64%) 網路電表硬體投資與安裝成本 (7%) 設備維護(6%) WAN 通訊管理基礎設施投資 (4%) 需量反應操作成本與 MDMS 成本 (18%)	輸電與變電所成本(24%) 配電成本(69%) 用戶端成本(7%)
主要效益項目 (效益占比)	<u>公司效益</u> 節省讀表成本 (34%) 因讀表準確性改善的收入增加(5%) 遞延電網投資成本(18%) <u>社會效益</u> 負載管理提升的迴避容量成本 (16%) 因使用端管理增進的迴避容量成本(13%) 降低停電產生的顧客成本 (5%)	節省讀表成本(46%) 節省帳單成本(8%) 需量反應-價格反應 (24%) 需量反應-負載控制 (13%)	節省讀表成本 (51%) 需量反應效益 (41%)	需量反應與負載管理效益(23%) 節省能源成本 (26%) 能源安全(12%) 能源可靠度 (22%) 環境效益(8%)
淨現值	69.7 百萬美元 (in 2007)	106 百萬美元 (in 2007)	17.9 百萬美元	Low: 956,000 百萬美元 High:1,552,000 百萬美元
益本比	1.10	1.09	1.23	Low: 2.74 High: 5.96

附表 2.2 智慧電網各文獻分析內容差異(續)

來源	張哲瑜(2009)	彭光中(2009)	盧展南(2013)	工研院(2012)
機構	工研院	工研院	臺灣	工研院
評估地區	臺灣	臺灣	臺灣	臺灣
規模	1200 萬低壓用戶	1200 萬低壓用戶	1 萬低壓用戶	1200 萬低壓用戶
分析期間	13 年(2009-2011 佈建)	15 年(2011-2026)	15 年	2012-2045
主要情境	敏感性分析結果顯示：電表價格與節能效果為重要參數	3X3 陣列，共 9 種情境分析。 三種功能(成本與相對收益)：A 窄頻、B 音頻、C 寬頻。 三種合理需量反應(不同效益)：1 無需量反應、2 保守需量反應、3 樂觀需量反應。	基礎情境 不確定情境：A,B,C,D,E (裝置戶數情境，電表配置情境，電表品質情境，需量反應情境，電價策略情境，尖載抑低情境，附加服務情境，風險評估情境之組合)	最差情境 最佳情境
通訊技術	-	BPL, PLC, ADSL, GPRS	BPL, PLC, GPRS	PLC, ADSL
主要成本項目(成本占比)	電表投資與安裝成本(97.8%)	電表投資成本(61%) 電表安裝成本(15%) 電表耗電成本(15%) 通訊設備投資與安裝成本(6%) 通訊設備耗電成本(1%) 維護成本(2%)	系統軟硬體設備建置成本(57.74%) 系統運轉維護成本(33.96%) 智慧電表耗電成本(6.30%) 智慧電表檢驗費用(6.63%)	系統軟硬體設備建置成本(83.61%) 系統運轉維護成本(4.08%) 智慧電表耗電成本(11.90%) 智慧電表檢驗費用(14.39%)
主要效益項目(效益占比)	節能效益(60%) 用電平滑後延遲建廠成本(27%) 節省碳稅(10%) 減少人工抄表成本(1.5%) 機械電表之耗電(1.5%)	國家觀點 搭配時間計價的節能效益(57%) 延遲投資成本(6%) 節省燃氣的社會成本(20%) 節省碳稅(10%) 節省人工抄表成本(4%) 節省機械表耗能(3%)	電業觀點 延遲電廠及輸配電設備投資成本(17%) 用戶節能效益(11%) 可靠度改善(5%) 減少負載研究費用(56%)	經濟面 能源使用效率(7%) 減少竊電發生(21%) 節省電力成本(44%) 節省輸配電資本支出(2%) 環境面 氣體減排效益(7%)
淨現值	397.7 億新台幣	-	基礎情境：-2.3 億新台幣	最差情境：300 億新台幣 最佳情境：450 億新台幣
益本比	1.24	電業益本比 A1:1.16; A2:1.76; A3:2.56; B1:1.20; B2:1.65; B3:2.25; C1:1.23; C2:1.58; C3:2.06.	基礎情境：0.46	最差情境：1.66 最佳情境：2.03

附表 2.3 智慧電網相關文獻之成本差異

單位：百萬元	工研院 (2012)	盧展南 (2013)	成本 差異	差異說明
系統軟硬體設備建置成本	5,693	9,521	3,828	工研院(2012)假設智慧表每具 4000 元，盧展南(2013)為每具 4800 元。盧展南(2013)討論的系統設備投資成本包含屋內顯示器、測試系統平台、場勘、文書等，上述工研院(2012)未包括。盧展南(2013)根據大同公司得標文件推算所有系統設備項目投資成本。
系統運轉維護成本	758	3,630	2,872	
智慧電表耗電成本	1,023	1,379	356	
通訊網路費用	-	1	1	
智慧電表檢驗費用	1,225	2,614	1,389	檢驗費用，工研院(2012)為每具 700 元，盧展南(2013)為每具 800 元。另外，盧展南(2013)假設檢驗時替換智慧表之購買成本。
避免機械電表設備成本	-750	-1,500	-750	機械表成本每具 1500 元，工研院(2012)採用期望成本概念，其價值為盧展南(2013)之一半。
避免機械電表安裝成本	-25	-100	-75	工研院(2012)假設機械表安裝成本每具 50 元採用期望成本概念(期望機率為 1/2)；為盧展南(2013)假設機械表安裝成本每具 100 元。
避免機械電表耗能成本	-473	-452	21	
避免機械電表驗證成本	-53	-100	-48	工研院(2012)假設機械表安裝成本每具 105 元採用期望成本概念(期望機率為 1/2)；為盧展南(2013)假設機械表安裝成本每具 100 元。
合計	7,399	14,994	7,595	

附表 2.4 智慧電網相關文獻之效益項目差異

單位：百萬元	工研院(2012)		盧展南(2013)	
	最佳情境	最差情境	基礎情境	差異說明
遞延發輸配電設備投資成本與減少營運成本	1,801	1,680	3,360	工研院(2012)以減少營運成本為主，盧展南(2013)以遞延投資成本為大項。
需量反應效益	2,803	2,199	267	需量反應的電力價格基礎不同，工研院(2012)為「(尖峰發電成本-平均電價)」，盧展南(2013)為「(每度售電成本 3.04 元-平均售電單價 2.72 元)」。
用戶節能效益	2,631	2,064	1,901	每年度節省電力，工研院(2012)最差情境與最佳情境分別採用每年每戶平均可節省 114.103~145.399kWh，盧展南(2013)採用 77.92kWh。以及，工研院(2012)電價假設逐漸上升(3.08~3.30 元/度)，盧展南(2013)為固定電價 2.9428 元/度。
可靠度改善	-	-	937	工研院(2012)未評估。
減少用戶停電損失	58	53	6	
減少線路損耗	554	504	87	電力價格基礎不同，工研院(2012)為「尖峰發電成本」，盧展南(2013)為「每度售電成本 3.04 元/度」。
防止竊電效益	2,055	1,870	31	盧展南(2013)假設預防低壓用戶竊電，並設定追償電費比例為 15%。工研院(2012)則無此設限。
減少人工抄表成本	365	365	395	
減少帳單處理費用	51	26	8	工研院(2012)年度帳單處理成本參數高於盧展南(2013)。工研院(2012)以「臺灣配電營運成本之 10%」作為「年度帳單處理成本」；盧展南(2013)以臺灣陳情案件來計算。
減少人工停復電費用	-	-	507	工研院(2012)未評估。
減少負載研究費用	-	-	114	工研院(2012)未評估。
協助提升運轉維護效率	-	-	142	工研院(2012)未評估。
環境效益	943	746	298	工研院(2012)包括降低健康成本、二氧化碳減排效益，以前者為大項。盧展南(2013)僅討論二氧化碳減排效益。
合計	11,260,961	9,507,529	8,053,409	

附錄三 期中審查會議記錄

會議名稱	「我國智慧電網與燃料電池技術經濟與 3E 效益評估」期中審查會議		
時間	2014/07/09	地點	核能研究所
出席者	<p>主持人：門立中副所長/主任</p> <p>諮議委員：楊清田執祕、郭明朝副執祕、李瑞益副組長</p> <p>核研所能經團隊：葛復光副主任、張訓志副主任、卓金和、袁正達、孫廷瑞、韓佳佑、蘇治維、陳治均、洪璋嶸、張志璋</p> <p>中原團隊：林師模教授、林晉勗教授、溫珮伶、馮君強</p>		
內容	審查意見與回應		
	<p>楊清田執祕：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. SOFC 技術經濟分析中設定學習率 27%可能高估，建議參考相關資訊重新設定。以及，建議商業模型也可參考美國 Bloom Energy 的租賃方式。 2. 簡報第 44 頁，若有充足資訊建議補充日本 2013 及 2014 年之 SOFC 設備成本及安裝量數據。 3. 由於台灣較不需要熱能，建議「熱回收」思考製冷應用效益。 4. 關於智慧電網，目前台灣為起步階段，建議研究範圍為所內已研究之微電網(micro grid)，並與所內研究團隊。以及，由於智慧電網/微電網會衍生能源儲存(energy storage)議題，建議探討其附帶成本，及可能創造產值。 5. 簡報第 97 頁之 SOFC 成本結構，陶瓷製品占總成本 3%之設定，不符現況，建議重新檢視。 6. GEMEET 模型請提供全名。該模型 	<p>林師模教授回應：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝楊執祕的建議與資訊，承如楊執祕所言，研究報告要具有學術性，也要能提出具體產業建議。這也是本團隊一直努力的方向。 2. 關於 Bloom Energy 商業模式，以及日本 SOFC 近年資訊，本團隊會持續搜集相關資訊，進行探討與更新。 3. 目前 SOFC 技術經濟分析中，設定將熱能轉換成電能，後以電價將熱效益貨幣化。至於將熱能轉成製冷應用，後續研究得思考作為熱能效益之可行性。 4. 如同楊執祕所言，智慧電網之成效將依賴儲能技術，然而我國智慧電網處於起步階段，對儲能技術之成本仍不明確，本團隊後續搜集相關資訊，應可進行敘述性說明。 5. 感謝楊執祕的提醒，在檢視相關報告後發現原始資料陶瓷製品即占總成本 3%。這部分會再與該報告的執 	

	<p>之模擬結果與現況有些不符，包含 2024 年核三廠除役以後核能的總發電占比應該為零，但是模型跑出來的結果在 2024 年以後卻有維持一定的占比。另外政府規劃未來將執行擴大天然氣方案，但是從結果來看天然氣並無明顯增加。看起來擴大天然氣方案並無放入 BAU 的設定中，且燃油發電在未來應該完全消失，太陽光電的占比要越來越高，但模型的結果卻顯示燃油發電一直維持著一定的占比且太陽光電看起來占比相當的小。最後能源密集度在 2009 年下降的太快，建議重新檢視設定。</p> <p>7. 建議先制定產業發展的架構與策略下，再進行技術經濟分析。</p>	<p>行單位作確認。</p> <p>6. GEMEET 模型的全名為 General Equilibrium Model for Energy Economics and Technology Analysis，</p> <p>7. 在核能結果的部份可能尚包含核四商轉，將會在模型拿掉核四商轉的因素。另外擴大天然氣方案的確沒有包含在模型的 BAU 中，此部份將考量要如何放入模型中。燃油發電的結果將在重新檢視其原始設定，但在模型運作的機制下未來要完全消失較不容易。而太陽光電主要是因為在 BAU 中並未設定其一定會達到推廣目標，而是單純透過實行 FIT 在市場機制調整的情況下之結果，所以發電量並不高。最後能源密集度的快速下降可能要針對細部結果作檢視接著再作修正。</p> <p>8. 感謝楊執祕之建議，此部分會再作調整。</p>
	<p>郭明朝副執祕：</p> <p>1. 建議界定討論範圍何者為 PEMFC，何者為 SOFC。以及，將澳洲發展情況納入討論。</p> <p>2. 由於我國天然氣成本較高，國內推廣 SOFC 顯得困難，建議考量設備外銷，將可提高發展燃料電池產業之可能性。</p> <p>3. 簡報第 18 頁說明 SOFC 取代之天然氣機組發電效率僅 30%，此設定過低，建議重新檢視。</p>	<p>林師模教授回應：</p> <p>1. 謝謝郭副執祕的建議，後續會研究範圍予以重新界定。並將主要燃料電池發展國家納入討論。</p> <p>2. 外銷效益確實有助於燃料電池產業發展，後續將藉助 GEMEET 模型之模擬，觀察產業關聯效益??</p> <p>3. 本研究採用 World Building Design Guide (WBDG) 燃氣輪機機組電效率 30%，該電效率是否設定過低，後續將參考國內外資料檢討。</p>

	<ol style="list-style-type: none"> 4. 建議訪談 SOFC 元件廠商，以獲取廠商意見。 5. 智慧電網對電力系統將會有很大的衝擊，建議分析評估架構並未考慮輸配電業者。中原團隊引用台電之智慧電網成本效益分析（盧展南，2012），認為其設備投資成本為主要成本。只是台電所引用為大同公司報價，是否隱含廠商因素。 6. 就政府決策角度來看，關心的是產業切入點為何時，其核心技術為何？希望中原團隊能提供相關產業建議。 7. GEMEET 模型中設定基載/中載的用意為何？基中載轉換是由誰控制？ 8. BAU 設定是否與國家的設定一樣？ 	<ol style="list-style-type: none"> 4. 本團隊持續努力接洽廠商進行訪談，亦期望能得到業界寶貴意見。 5. 我國輸配電業者主要以台電為主，所以，目前分析架構並未將電業角色細分為發、輸、配電業者。至於，引用大同公司報價資料，確如郭郭副執祕所言，可能隱含廠商因素。所以，實證分析中，本團隊分析結果會受限於可獲得資料。 6. 本團隊將就技術經濟分析結果與 GEMEET 模型模擬等量化研究成果與質化訪談，提供燃料電池產業化建議。這些工作項目將於下半年度執行。 7. 模型裡區分基載與中尖載的目的主要是反映實際電力機組運作之狀況，而此機制的轉換是由操作人員依據該發電技術的特性自行控制。 8. 目前模型 BAU 的設定為自行假設，未來會與核研所團隊進行討論將 BAU 的設定統一。
	<p>李瑞益副組長：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝中原團隊說明 SOFC 在熱電比及發電效率都比 PEMFC 高，澄清溫度低就產生比較少熱能的誤解。就技術面來看，國內目前尚無 PEMFC 核心技術專利（例如：電池單元），相較來說，國內對 SOFC 則從開始到系統整合都有核心專利。所以，我國若要發展燃料電池產業，SOFC 技術應為可行選項。 2. 建議在討論燃料電池推廣效用時， 	<p>林師模教授回應：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝李副組長的肯定。 2. 謝謝李副組長的建議，本團隊後續會思考國內可能執行政策，及是否能協助產業發展，期許提出具體產業化建議。 3. 謝謝李副組長建議，天然氣使用成本可能不是最重要的因素，缺電對某些產業可能會造成莫大衝擊。因此，缺電成本應是裝置燃料電池設備的重要動機，本研究後續將予以

	<p>可以思考外銷產值，例如：保來得今年創造 60 億產值。並建議思考國內政策是否能協助產業發展。</p> <p>3. 燃料電池使用成本中，天然氣成本雖然占很高的比例，但只有在使用時才會發生。重要的是缺電造成的成本，對特定產業（如：資訊中心）一旦發生缺電將會造成龐大損失，這才是推廣燃料電池的重要原因。</p>	<p>納入討論。</p>
	<p>孫廷瑞：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 簡報 P43 為電熱比或熱電比？請再行確認。 2. 簡報 P56 指出台灣家用推廣量可達 330 萬戶，相較於日本經驗差異甚大(推廣近 8 年只達 8 萬戶安裝)，請再行確認推。 3. 簡報 p.57、63 提及家用與商用 SOFC 的各期淨現值(總效益)，圖形為何在第 11 年後都轉為負值？是受到那些因素影響？建議可在報告內容補充說明。 4. 簡報 p.64 提及各項方案，電效率提升 60%，每度電價 10 元、熱能可回收 70%、設備補助 50% 等情境方案是否有相關研究之佐證根據？因為各情境下所得到的益本比都蠻高的。 5. 日本目前燃料電池可降至一台 80 萬元，且在政府政策扶持下，近年來裝置容量明顯提升，而目前台灣廠商是否具有發展產業化之可能性，若要達到產業化之條件，有哪些建議發展之策略或具體作法？(日本經 	<p>林師模教授回應：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝指正，已於新版簡報更正為熱電比。 2. 謝謝建議，日本推廣速率經驗將列入後續檢討事項。另外，對比日本政府規劃 2030 年累計 250 萬台安裝量，目前所設定之裝置用戶 330 萬可能為相對樂觀情境，將一併檢討。 3. 謝謝建議，已於新版簡報中將圖標題「各期淨現值(總效益)」修改為「各期淨現值(總效益-總成本)」，於報告增加效益分析與成本分析。 4. 以下就敏感性分析進行說明，電效率 60% 為 SOFC 技術目標，每度電價 10 元為本研究假設，熱能可回收 70% 為本研究假設，設備補助 50% 為日本政府先前推廣燃料電池安裝之政策。 5. 目前僅就技術經濟分析結果提出一些產業化建議（例如：設備投資成本高，其發展尚需政府補助，在敏感度分析中補助 50% 設備費將讓電

	<p>驗是否有可借鏡?)</p> <p>6. 簡報 P57 與 P63 提及商用與家用燃料電池的淨現值(僅用戶效益)皆為負值，但是後續益本比的計算都是大於 1，可見效益主要來自「社會效益」與「電業效益」，然而「社會」或「電業」是否有足夠的動機或補貼去促進上述效益，建議可在提出政策建議時，多加描述或與他國比較。</p> <p>7. 簡報 P96 提及 BAU 情境相關假設，是否有考量到目前台灣天然氣儲量之上限如目前模型中?</p> <p>8. 建議 CGE 模型 BAU 情境推估結果可在呈現能源密集度、用電量等趨勢，另可配合呈現特定年度(如 2010、2020、2030、2040、2050)之數值與區間平均成長率，以利於與歷史趨勢及其他研究結果比較，確認其推估結果之合理性。</p> <p>9. 建議呈現基/中間載之切換機制前後做法後對於發電結構之影響，作為提升模型評估能力之佐證。</p> <p>10. 建議建構一 AMI 成本效益分析標準評估程序，以及建議可使用之技術與成本參數，作為後續研究之基礎。</p>	<p>力均化成本降至 3.52 元/度)。完整產業化建議將於下半年度完成。</p> <p>6. 謝謝孫先生建議，後續在提出政策建議時將予以納入。</p> <p>7. 目前 BAU 並無考慮台灣天然氣儲量上限，之後會再將這部分的考量納入模型中。</p> <p>8. 感謝孫先生建議，未來會針對結果呈現方面作調整。</p> <p>9. 模型基/中間載之切換機制只是方便操作人員立即調整發電技術之特性以作測試，在未調整發電特性時，這樣的機制對於結果並不會造成影響。</p> <p>10. 謝謝孫先生建議，後續將予以納入。</p>
	<p>葛復光副主任：</p> <p>1. 五年期計畫即將在明年(104 年)落幕，建議中原團隊先行思考具體完整的再生能源技術之產業化策略，提供總結之結論。</p>	<p>林師模教授回應：</p> <p>1. 未來將會加強模型結果的呈現與解讀，透過不論是技術經濟或是 CGE 模型，提出更為具體之產業化策略與結論。</p>

<ol style="list-style-type: none"> 2. 智慧電網架構龐大非短期內我國可以執行項目，曾詢求林法正委員建議，認為微電網是目前實際且可行的研究方向。 3. SOFC 技術之成本下降速度過快，請中原團隊檢視設定。 4. 建議 GEMEET 模擬結果 2020 年與 2025 年一定要呈現 5. 今年度議題模擬的部分中原團隊有提到要做 FIT 與 RPS 政策的比較，但 RPS 與 FIT 對燃料電池的幫助不大，而且台灣對燃料電池推行 FIT 的機會也不大。請再重新思考此議題之可行性 6. 建議模型發電結構的部分除了佔比以外也可以呈現絕對量 	<ol style="list-style-type: none"> 2. 承如葛副主任所言，微電網可能為目前實務上可行之研究方向，本團隊後續將修正研究範圍。 3. SOFC 技術之學習率依照文獻設定為 27%，由於 SOFC 技術仍在快速成長階段，所以，此學習率設定會讓成本下降得很快。將來亦可透過敏感度分析模擬不同學習率。 4. 感謝葛副主任之建議，未來在結果呈現方面會再作調整。 5. 此部分的議題主要是針對太陽光電及風力發電等再生能源作分析，以反映模型在議題模擬的分析能力。 6. 感謝葛副主任之建議，未來在結果呈現方面會再作調整。
---	---

附錄四 期末審查會議記錄

會議名稱	「我國智慧電網與燃料電池技術經濟與 3E 效益評估」期末審查會議		
時間	2014/11/19	地點	核能研究所
出席者	<p>主持人：門立中副所長</p> <p>諮議委員：郭明朝副執祕、李瀛生委員、李輝隆經理、閻明宇協理</p> <p>核研所能經團隊：</p> <p>葛復光副主任、張訓志副主任、卓金和、袁正達、孫廷瑞、柴蕙質</p> <p>中原團隊：林師模教授、林晉勛教授、馮君強</p>		
內容	審查意見與回應		
	<p>閻明宇協理：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 期末報告 P.20 裡 SOFC 的供應鏈圖已過時，建議更新。 2. 在模型評估裡 SOFC 可做為基載又可做為中尖載的理由?而 SOFC 用來做中尖載是否合理? 3. 簡報 P.69 電費是否依照台電中尖載的電價為評估基礎? 4. 簡報 P.75 裡以學校及醫院為評估對象中，是否有考量到管線普及率?因為有些地方在管線無法到達的情況可能就不適合安裝 SOFC。 5. 簡報 P.64 裡，請確認 SOFC 可進行 0-100% 的負荷追蹤技術。 6. 簡報 P.58 裡的 PEMFC 1kw 為 10000 美金，是否有含重組器?因為 PEMFC 要加重組器才可與 SOFC 來進行比較。 	<p>中原團隊回應：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝閻協理相當實務且有用的建議與資訊，會根據閻協理所提之建議來做報告中的修改與補充。 2. 當時模型設定 SOFC 用來當作基載或中尖載的目的主要是因為對實際的情況並不完全了解，所以針對兩種情況都有做相關的模擬。而設在基載主要是因為台灣基載電力的不足，所以實際上已經有部分 NGCC 進入到基載的發電裡，而 SOFC 在基載電力所扮演的角色就是替代基載裡的 NGCC，來補足基載電力不足的情況。 3. 在技術經濟分析中，設定 SOFC 用來當作基載電力，故以使用者購買電價為評估基礎。 4. 本研究討論裝置 SOFC 機組之學校或醫院，皆是以滿足自身電力需求的基載電力，故暫不考慮管線普及率問題。如委員指教，未來研究若 	

		<p>要討論大規模推廣 SOFC 系統時，必須考慮管線普及率問題。</p> <p>5. 本團隊針對 SOFC 新技術發展，曾就教於核研所 SOFC 研發團隊，已確認 0-100% 的負荷追蹤技術為可行技術。</p> <p>6. 謝謝閻協理的提醒，已確認 PEMFC 1kw 成本包含重組器。</p>
	<p>李輝隆經理：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 期末報告 P.19 有提到台灣年產值超過十億，實際上應該超過 30 億。 2. 期末報告 P.69 裡的提到的備用電源要做修正。因為 SOFC 啟動時間慢，無法及時反應電力的需求，所以不適合用來作備用電力。 3. 模型的結果模擬到 2050 年是否有點久遠?重點應該放在未來 10-15 年。而且未來 SOFC 應該會有爆發性的成長與發展，但模擬結果為一平順且趨緩的發展趨勢。 4. 期末報告 P.91 內有提到 SOFC 的劣勢，建議增加針對劣勢可以進行改善的地方?例如設備購買的成本昂貴所以需要進口，但如果國內有能力自行製造的話那麼成本就不會如此昂貴。 5. 在報告裡 SOFC 的發展效益大多在用戶端，但如果站在政府的角度來看可帶動產業發展，尤其是傳統產業，藉此可讓傳統產業可以有轉型的機會。 6. SOFC 目前熱不回收的發電效率已 	<p>中原團隊回應：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝李經理相當寶貴的意見供本團隊做參考。 2. 模型模擬到 2050 年主要是配合政府的相關規劃都是到 2050 年所以才會有如此長時間的模擬，並不是單純因為 SOFC 才有這麼長的模擬期間。 3. 因為模型的情境設定僅有達到推廣目標與補貼率的假設，所以結果看起來並無爆發性的成長。但如果考量到廠商所生產的 SOFC 設備不只供應台灣，主要是以出口到全世界為主。未來可以修改模型的基準資料讓 SOFC 產業類似於電子業，大部分都出口，那麼模型的結果可能就會有比較爆發性的成長。 4. 大部分的數據會依照李經理的建議做修改，像是發電效率超過 60% 的部分，會重新做計算，結果當然就會有所改變。 5. 當時在做 SOFC 的技術經濟分析時因為要先界定分析範圍，並無法全面性的評估，未來可以針對銀行來

經超過了 60%，但報告內用的數據還是 45%，建議修正。

7. 簡報 P.47 裡 Apple 的照片建議加入系統設備照片，以讓報告更具有說服力。
8. 美國的 SOFC 都用在資料中心，是否可以考量到銀行業設置效益？其效益應該遠高於學校。另外若把國家安全的因素考量進來，會讓政府更重視 SOFC 的發展。
9. 建議可增加參考日本 Softbank 的 SOFC 相關資料。

做分析。

6. 謝謝李經理寶貴意見，本研究將以發電效率 60% 敏感性分析，呈現最新技術效率。
7. 謝謝李經理寶貴意見，已更新圖片。



8. 謝謝李經理寶貴意見，將列為未來重要研究方向。
9. 謝謝李經理寶貴意見，報告中加入 Softbank 相關訊息。

李瀛生委員：

1. 報告內以燃料電池為主，且台灣目前發展最多的是 PEMFC，為何只針對 SOFC 進行分析？
2. 台灣發展 SOFC 必定要考慮到國際市場，如只考慮自用則很難發展起來。
3. 要思考台灣到底適用發展哪一種系統，例如因為台灣氣候炎熱，所以 CHP 在台灣所能推動的量有限。
4. 要吸引 SOFC 設備的安裝，價格是相當重要的一項因素，如能在成本這一方面進行多一點分析，例如所有零件與組裝皆由台灣自製，那麼在價格上會更有吸引力，出來的結果也不會像現在的結果一樣大部分

中原團隊回應：

1. 感謝李委員相當寶貴的意見。由於近年 SOFC 系統成本逐年下降，商業化腳步快速，目前已能與 PEMFC 競爭，又 SOFC 之發電效率高及電熱比低等優勢，成為美、日等先進技術國家之發展重點，參考國際展望，政府亦將此新能源技術列為積極推動之分散型再生能源技術選項之一，於是本研究對該技術進行探討。
2. 本計畫以 SOFC 為主的原因是核研所在燃料電池的技術研發上是以 SOFC 為主，且受限於計畫規模，所以當時就決定以 SOFC 為主要的研究分析對象。故無法對整個燃料

<p>成本效益都只是打平而已。</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. 備用發電這部分的描述要做修正。 6. 在實際的狀況像日本，補貼率並不會一直維持 50%，之後會慢慢下降，這部分在模型內的模擬設計看要如何做調整。 7. 在報告內要思考怎麼樣讓政府有一個具體的建議來發展 SOFC。 8. 從報告裡是否可以看的出來台灣究竟適合發展哪一種類型的燃料電池? 9. 在模型裡是否有考慮到最近油價下跌的因素? 	<p>電池產業做一個完整的政策建議。</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. 如李委員所言，臺灣氣候炎熱，然對家庭來說，熱能 (熱水)還是有一定需求，故本究設計 CHP 在臺灣能推動的對象以家戶為主；商業用戶則以不能熱回收的系統做初步評估。 4. 感謝李委員相當寶貴的意見，由於國內尚未進步到整機自製與整合階段，缺乏本土成本資訊，未來待有明確數據時將參考李委員的意見修正。 5. 如果 SOFC 未來以出口為主的話，在模型內可以調整出口比例來評估在不同的出口比例上，到底對 SOFC 會有什麼影響。 6. 由於 SOFC 系統成本對民眾來說仍屬高價格產品(因電價相對便宜)，補貼率下降恐不利推廣應用，故本研究維持補貼率不變情況模擬。 7. 感謝李委員相當寶貴的意見，於結論中強化論述。 8. 感謝李委員相當寶貴的意見，惟本研究針對 SOFC 進行探討，未來可參考李委員的意見進行研究。 9. 模型在設定油價時是依據當時某個研究機構所做出的預測結果來做設定，當時如果沒有預測到的話就沒有考慮到最近油價下跌的現象。未來可以再做調整。
<p>郭明朝副執祕：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 計畫名稱為燃料電池與智慧電網的 	<p>中原團隊回應：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝郭副執祕相當寶貴的意見供本

	<p>技術經濟與 3E 效益評估，但在報告內針對智慧電網的分析僅止於分析架構的提出，在 KPI 等成果的達成是否會有問題?</p> <p>2. GEMEET 模型是以投入與產出的關係來建立，而驗證與確認是以一年的資料做後面年度的確認還是把幾年的資料寫成方程式納入到模型內的投入產出關係?而且在模型確認裡雖然產業結構的趨勢相同，但服務業產業結構占比誤差高達 8%。</p> <p>3. 在建立模型時我們希望能將能源的部分也納入到模型的架構裡，但在報告內幾乎沒有看到 Markal 模型的說明，因為技術方面沒有置入模型的話，在分析範疇上會有限制。</p> <p>4. 模型所用的參數要放入到內文裡以做參考。</p> <p>5. 技術經濟分析結果裡，是否有辦法告訴政府投資成本與運維成本對於用戶來說是一項相當大的負擔，未來政府如果要積極發展 SOFC，那要如何來針對這部分來做處理。</p> <p>6. 目前國內燃料電池每年的研究經費大約只有六億，要如何說服政府繼續加碼投資?</p> <p>7. 下年度智慧電網的訪談可以多安排一些民間企業。</p> <p>8. 模型內再生能源的躉購費率是固定的還是每年調整?</p>	<p>團隊做參考，本年度的工作項目是提出智慧電網的分析架構，故並不會影響 KPI 等成果的達成。</p> <p>2. 模型的確認首先依照政府的資料如投入產出表建立基準年 2006 的資料，中間利用 2007-2013 的模型結果來做確認。而產業結構的誤差原因主要是比較基準的不同，模型所產生的產業結構是以投入產出表為主，而比較的實績值是主計處的雙面平減表，兩者本來就有一點差異，所以才會存在如此大的誤差。</p> <p>3. 由於 GEMEET 模型是在經濟模型的基礎下建立，慢慢把技術的部份納入到模型內，所以無法像 Markal 模型把技術的部份考慮到這麼完整。不過可以透過軟連結的方式把 GEMEET 模型與 Markal 做連結。</p> <p>4. 謝謝郭副執秘寶貴的意見，會將參數放入內文中。</p> <p>5. 感謝郭副執秘寶貴的意見，在成本分析中將強化投資成本與運維成本之論述，並於結論與建議提供明確建議。</p> <p>6. 謝謝郭副執秘寶貴的意見，於結論與建議強化論述。</p> <p>7. 謝謝郭副執秘寶貴的意見，明年度將規劃參訪民間企業，</p> <p>8. 模型內的躉購費率是依造未來可能的成本下降率每年做調整。</p>
--	--	--

<p>孫廷瑞：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 報告中 P72 與 P74 提及之家用及商用系統成本效益分析結果，指出均化成本已達 2.92 元/度及 3.50 元/度是指哪一年之數據?若與目前住宅與商用電價 2.92 元/度與 4.1 元/度(台電統計年報，2013)相比，應已具經濟可行性，但與目前實際現況不符，請再確認數據分析結果。 2. 請補充說明 SOFC 成本效益分析對熱能效益之假設，在家用及商用有不同之假設?(家用 SOFC 考量熱能效益，但商用 SOFC 不考量熱能效益於 Basecase 中?) 3. 模型內未來能源消費彈性越來越高，跟一般所認知未來會持平或是下降的趨勢不一樣，其原因為何? 	<p>中原團隊回應：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 「均化成本」更名為「評估期間之平均單位成本」，意指評估期間之總投資與運維成本除總發電量所得。由於技術經濟分析中，使用設備成本會隨學習效果下降，故平均單位成本才能分別達 2.92 元/度及 3.50 元/度，該數據確認無誤。 2. SOFC 系統可區分成熱回收、熱不回收兩類。一般使用者需要的是電力，熱能需求較少。前者大都用在家戶系統，發電效率較後者低。以實際應用來看，大型系統屬於熱不回收類，因此，本研究中設計商用系統沒有熱回收。 3. 模型內能源消費彈性越來越高主要的原因與能源投入效率的設定有關，如果效率設定的不高，就有可能出現現在這樣的結果。
<p>葛復光副主任</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 簡報 P.58、P.59 裡的數字要再確認。 2. 報告內 P.116 SOFC 的推廣目標是過去舊的政策，目前已經無推廣目標，此部分要再多做說明。 3. 報告內 P.119 內的能源密集度 2010 到 2015 年的能源密集度下降的太快，大約一年要掉 6% 才有可能有這樣的結果，請確認資料是否正確。 4. 模型內出口的部分可以再多做一點模擬，不然對經濟體系所創造的效益相當有限。 	<p>中原團隊回應：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝葛副主任提醒，經確認後無誤。 2. 謝謝葛副主任寶貴的意見，於內文將會多做說明。 3. 謝謝葛副主任寶貴的提醒，已針對這部分做修正。 4. 模型出口模擬需要針對基準年的資料重新編製較為耗時，未來再重新編製資料時可再考慮不同出口比例下的基準資料。 5. 謝謝葛副主任寶貴的意見，於內文將會加強論述。

5. 最後策略建議要再論述完整一點。

6. 模型結果要呈現就業人口。

6. 謝謝葛副主任寶貴的意見，於內文

將會呈現就業人口。