

建置區域能源整合系統之管線成本分析

潘述元¹ 蔣本基^{2*} 劉毅弘³ 王溫翔⁴ 張怡怡⁵ 談駿嵩⁶

摘要

「區域能源整合」係溫室氣體減量之重要策略，本研究首先針對國內具潛力之能源供應端與需求端進行調查，並搜研國外成功經驗，期能落實溫室氣體實質減量。由於建立技術及經濟可行之區域能源整合系統，其關鍵因子包括：渦輪機、管線、輸送網絡、及熱儲能系統等，因此管線設置與選擇係進行區域能源整合之重點工作，管線材質選擇須依據使用途徑不同，而承受不同程度之壓力與溫度，將蒸氣或熱水透過管線輸送至需求端；此外，建造區域供熱系統之支出成本，主要係用於安裝配送管網。其中管線材料成本佔55%，因此管線材料與管徑選擇，會最直接影響到整個區域供熱系統建設之總成本。據此，本文針對建置區域能源整合系統之管線成本進行分析；同時，研析建置區域能源系統之蒸汽管材、管徑、管線配置等關鍵因素之評估原則，提出管線成本推估之方法，以將蒸氣能量損失最小化，最佳化整體成本效益。

關鍵詞：汽電共生技術、配送管網、蒸氣管線、碳鋼管、最佳化

1. 前言

根據國際能源總署「2012年能源技術展望」報告(IEA, 2012)，若欲在2050年將全球升溫控制於2°C範圍內，「提升整體能源效率」為最重要之關鍵策略，其貢獻度約佔43%。國際上許多先進國家已積極推動與落實「區域能源整合」，使能源效率提升至90%以上。一般而言，能源之型式包括：電能、熱能、及冷能。為能有效地推動區域能源整合，須調查冷、熱、電能之潛在供應端與需求端，並鑑定具潛在可媒合之場址及有配合意願之產業；其次宜考量評估甄選適宜之關鍵能源轉換技術，例

如：汽電共生技術(Combined Heat and Power，簡稱CHP)與冷熱電三生技術(Combined Heating, Cooling, and Power，簡稱CCHP)，進行技術可行性之評估；最後，針對能源供應及需求端建立實質能源鏈結，進行成本效益評估。

臺灣地狹人稠，且石化與鋼鐵等工業發達，造成相當多二氧化碳排放。據此，若能針對國內重點工業區或產業進行「區域能源整合」，則對於臺灣人均碳排放之降低將有顯著之貢獻。本研究彙整國內區域冷熱供應與需求端潛在可媒合之場區，詳如表1所示。可發現具潛力供應端包括：S1-傳統產業(例如：鋼鐵業、石化業、造紙業)、S2-焚化爐、及S3-汽電

¹ 國立臺灣大學環境工程學研究所 博士候選人

² 國立臺灣大學環境工程學研究所 特聘教授

³ 工業技術研究院綠能與環境所 研究員

⁴ 國立臺灣大學環境工程學研究所 碩士研究生

⁵ 國立臺北醫學大學醫學院生化科系 教授

⁶ 國立清華大學化學工程學系 教授

*通訊作者, 電話: 02-23622510, E-mail: pcchiang@ntu.edu.tw

收到日期: 2014年08月15日

修正日期: 2014年11月21日

接受日期: 2014年11月28日

表1 臺灣區域冷熱供應與需求端潛在可媒合之場區

供應端	需求端
S1. 傳統產業 • 鋼鐵業 • 石化業 • 造紙業 • 水泥業	D1. 製造業 D2. 農村使用 D3. 廠區內部 D4. 住宅社區 D5. 商業區 D6. 工業區 D7. 高科技廠(電機電子廠)
S2. 焚化爐 • 污水處理廠 (下水道污泥)	
S3. 汽電共生廠 • 發電廠	

資料來源：本研究整理。

共生廠；具潛力需求端包括：D1-製造業、D2-農村使用、D3-廠區內部、D4-住宅社區、D5-商業區、D6-工業區、及D7-高科技廠(電機電子廠)。

由於國內焚化爐目前已近替代與更新之時間，其廢熱多且皆未妥善利用，因此焚化爐為具潛在可媒合之供應端；同時，汽電共生廠與鋼鐵廠、石化廠、造紙廠、水泥廠等傳統產業，應具有多餘之製程冷熱能，亦可能成為潛在之能源供應端。另一方面，媒合潛在需求端包括：住宅社區或商業區、工業區、高科技廠、傳統產業、及廠區內部。以臺中港工業專區為例，中龍鋼鐵公司為其潛在之區域能源供應中心，其設置之煉鋼鍋爐可提供蒸汽與製程餘熱，擬與鄰近之廠商進行能源鏈結。

Kalhammer (1985)曾提出：「建立技術及經濟可行之區域供熱系統，其關鍵因子包括：渦輪機、管線、輸送網絡、及熱儲能系統」。由此可知，「關鍵技術」與「成本效益」評估，為成功推動「區域能源整合」之關鍵因子。據此，本文針對建置區域能源整合系統之管線成本進行分析，透過問卷調查國內重點排放源廠商之蒸氣管線建置成本；同時，研析建置區域能源系統之蒸汽管材、管徑、管線配置等關鍵因素之評估原則，提出管線成本推估之方法，以將蒸氣能量損失最小化，最佳化整體成本效益。

2. 建置區域能源整合系統

建置完善之區域CHP系統可分成五大步驟(Bullock, 2011)，包括：資格鑑定、第一階段可行性分析、第二階段可行性分析、採購程序、及操作與維護，詳如圖1所示，說明如下：

- (a) 場址候選之資格鑑定(Qualification)：於國內各具潛力場址中之供應端及需求端進行調查與分類；選擇適當場址後，分析其潛在正面效應，包括：財務分析、信賴度分析及污染排放減量等。
- (b) 一階可行性分析(Level 1: Feasibility Analysis)：於上述篩選之場址候選名單中，個別進行篩選分析，以找出最適合之操作場址；技術評

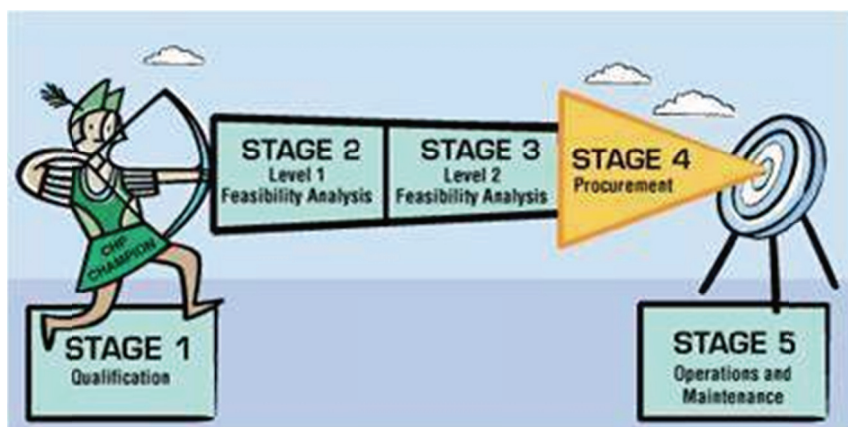


圖1 建立汽電共生系統應用之步驟
參考資料：Bulloc (2011)

估與經濟效益分析，包括：效用分析(Utility Rate Structure Analysis)、模式基線校正、敏感度分析、回收年限、淨現值法、內部投資報酬率計算、投資最小成本計算等；進行障礙分析與評估，應考量可能面臨之阻礙及其解決方案。

- (c) 二階可行性分析(Level 2: Feasibility Analysis)：以實際上操作來取代第二步驟之假設條件，將整理系統設計、容量及操作最佳化；計算加總系統之效益分析與投資報酬率。一般而言，依複雜程度不同，此部分需要一至四個月的時間，花費成本介於一萬到十萬美元間。
- (d) 採購(Procurement)：確認選址計畫及設備清單(包含：發電及供熱設備等)、設備選擇、系統操作方式、總系統成本、操作維護費用(不包含燃料成本)、計畫時程、資金流動假設與概估、及其他細節。
- (e) 操作與維護(Operations and Maintenance)：系統設備之操作與維護，包括：燃燒渦輪機、天然氣壓縮機、熱回收蒸氣機及相關輔助設備等。

國外諸多先進國家如丹麥等，對於推動「區域能源整合」機制，均有良好成效。據此，為能將國外成功經驗引進臺灣，作為我國推動區域能源整合之借鏡，表2彙整國外成功推動區域能源整合國家，包括：丹麥卡倫堡(Kalundborg)產業共生體系、美國Cabazon Resource Recovery Park、韓國蔚山工業區、及中國魯北生態工業園區等，其成功經驗與關鍵因素。研析國外成功經驗可發現，除給予低利貸款及補貼等經濟誘因之外，於建築法規亦均有相當程度的規範，例如：韓國另訂專法，在進行新市鎮區開發時期，直接規劃設置相關管線與設備，降低後續設置與行政成本支出；同時，區域能源整合系統之關鍵技術已成熟多年，因此落實此機制之關鍵因素係為經濟成本效益，其中，又由以輸配管網建置及技術設備費用等，為最重要之要素。

3. 管線成本分析

根據Ulloa (2007)研究指出，建造區域供熱系統之支出成本，主要係用於安裝配送管網(Distribution Network)。表3係建設區域供熱系統之管線配送網絡支出成本分配情況，可發現管線材料之成本佔了55%，其次為管線安裝之施工成本(包括：挖鑿、鋪設與接管等)。因此，管線之材料與管徑選擇，直接影響到整個區域供熱系統建設之總成本。

國外區域供熱系統之蒸氣配送管網大多係以埋設於地底之方式來建造。此配送網絡之管線又可分成兩種用途：將蒸氣或熱水輸送至使用端，亦或是將熱交換使用後之熱水回送至加熱廠加熱；此外，依照不同配送模式又可分成軸向式(Radial System)與迴圈式(Looped System)，如圖2所示。一般而言，軸向式蒸氣(熱水)配送系統之建造成本較迴圈式低，但其因只靠一端加熱廠當作區域供熱之配送中心，若遇到維修或故障等情況，而造成系統關機(Shut-up)，則系統即中斷對區域之供熱服務，因此軸向式系統之可靠性(Reliability)亦較迴圈式低。

管線設置與選擇係進行區域能源整合之重點工作，其必須將蒸氣或熱水透過管線輸送至需求端，因此管線材質之選擇須依據使用途徑之不同，而能承受不同程度之壓力與溫度。管線性質之分類常見的為ASTM (American Society for Testing and Materials)分類與API (American Petroleum Institute)分類，常用之規格如表4所示。

區域供熱配送管網之管材一般係使用鋼管(Steel Pipe)，其中以ASTM A106與ASTM A53為國外區域供熱系統常見之蒸氣管類型。一般碳鋼管材係設計成最高可耐溫至750°F (相當於400°C)；另一方面，若輸送流體為熱水，且溫度低於95°C，則亦可選擇材料成本較低之塑膠管(Plastic Pipe)；此外，若區域供熱管網埋設於地底壕溝(Trench)中，其深度最淺需達600

表2 國外區域能源整合成功經驗

國家：案例地點	能(資)源鏈結案例	關鍵技術與設備	效益分析	致勝關鍵
丹麥： 卡倫堡產業共生體系 (Kalundborg)	<ul style="list-style-type: none">• 由十九項能源鏈結關係所構成，包括：Asnaes發電廠、Statoil煉油廠、Gyproc石膏版工廠、Novo Nordisk製藥廠等。• 能源鏈結種類：蒸汽、熱水。• 資源鏈結種類：石膏、硫酸、生物污泥等。• 由生質能源廠和回收製造商合作生產再利用輪胎。• 美國境內第一個機能性生態化產業園區。	<ul style="list-style-type: none">• Asnaes發電廠為丹麥最大燃煤發電廠，發電量約1,500 MW。• Statoil煉油廠為丹麥最大煉油廠，年產480萬公噸。• Gyproc石膏版工廠每年製造14 Mm²石膏牆版(約可建造六個卡倫堡大小股城鎮內所有的房屋)。• Novo Nordisk製藥廠供應全球40%之胰島素與工業用酵素。• 林業廢棄林木與產業廢棄物混燒產生蒸汽，驅動渦輪發電機發電。• 汽電共生廠煤灰→堆肥→土壤改質劑。• 廢輪胎→裂解氣化→能源+金屬。	<p>經濟效益：</p> <ul style="list-style-type: none">• 總投資7,500萬美元(19項鏈結)• 每年可節省1,500萬美元• 投資回收期約5-6年 <p>環境效益：</p> <ul style="list-style-type: none">• 每年減少燃油使用約19,000噸• 每年減少水使用約60萬m³• 每年降低CO₂排放17.5萬噸與SO₂約1萬噸• 發電容量約48 MW，可供約45,000個家庭使用	<ul style="list-style-type: none">• 區域中各產業類別須相異，且具供應需求潛力• 透過分析評估使利益關係人風險降低，並具完善之商業性及利潤回收• 廠商自願性高，且與管理機構保持密切合作關係。• 能資源實質鏈結距離短• 建立完善之資訊交流平台。• 降低收費標準。• 降低成本。• 稅收優惠政策。
美國： Cabazon Resource Recovery Park	<ul style="list-style-type: none">• 蔚山生態中心規劃與推動區內資源化鏈結。• 由四家公司包括：KP化學公司、韓國PTIG公司、韓松EME公司、SKC公司，建立蒸汽交換網絡。	<ul style="list-style-type: none">• 工業垃圾焚燒發電廠提供蒸汽予造紙廠。• 城市固體廢物焚燒廠提供蒸汽予酸性製造公司。• 回收油降解材料，轉換作為廢物活性污泥。	<p>經濟效益：</p> <ul style="list-style-type: none">• 總投資金額約為6,500萬美元。• 總經濟收益每年約6,850萬美元。 <p>經濟效益：</p> <ul style="list-style-type: none">• 每年CO₂排放減少約22.7萬噸。• 每年空氣污染物排放減少約3,680噸。	<ul style="list-style-type: none">• 由國家規劃大型計畫進行，分三階段，共15年，並訂定明確遠景、目標、執行策略等。• 另訂專法，在進行新市鎮區開發時期，直接規劃設置相關管線與設備，降低後續設置與行政成本支出
韓國： 蔚山工業區	<ul style="list-style-type: none">• 各個產業鏈內部和產業鏈之間建立了良性共生關係，包括：15個互利共生關係和2個互利共生關係。• 汽電共生產生之電和蒸汽，供給予各個產業鏈使用。• 汽電共生廠煤渣再利用於水泥產業。	<ul style="list-style-type: none">• 汽電共生廠利用海水替代淡水進行冷卻，係運用餘熱蒸發海水，又節約淡水。• 氯鹼廠產生之氫氣用於磷鉍、硫酸、水泥產業鏈中的合成氨生產；或將鉀鹽產品用於復合肥生產。• 磷鉍、硫酸、水泥產業鏈中廢液SO₂，於溴素廠中回收，並將硫元素轉化成鹽石膏，再用來生產水泥和硫酸。	<p>經濟效益：</p> <ul style="list-style-type: none">• 共生關係產生了佔總產值14%的經濟效益，並降低其生產成本30-50%。• 對企業年總產值的增長貢獻率達40%。• 據研究鑑定，磷礦石的原子利用率達97.7%，清潔能源利用率達85.9%。	<ul style="list-style-type: none">• 制訂循環經濟發展規劃，同時將進一步完善國家對循環經濟的投資支持政策。• 中國為促進經濟轉型，需要對其進行改造升級，因而投資空間巨大。
中國： 魯北生態工業園區				

參考資料：Gertler, 1995；Kumar *et al.*, (2012)；丘崇德(2004)；藍慶新(2007)；巢志成與蔡啟明(2009)；巢志成(2009)；陳彥全(2009)；低碳世界(2012)。

表3 建設管線配送網絡之成本分配

項目	成本比例
管線材料成本(Supply of pipe)	55%
挖鑿成本(Excavation)	20%
鋪設與接管成本(Laying and jointing)	5%
調整與特殊施工成本(Pipe-fittings and specials)	5%
工程與調查成本(Engineering and survey costs)	5%
其他(例如：管材包覆成本、結構架設、行政支出等)	10%
總和	100%

參考資料：Ulloa (2007)

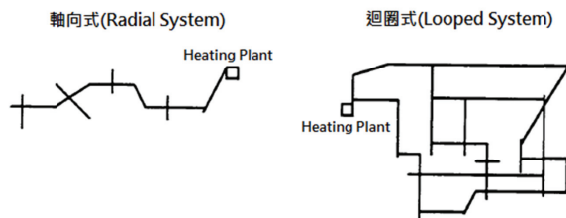


圖2 軸向式與迴圈式配送系統

參考資料：Ulloa (2007)

mm，以足夠支撐其表面負載重量；而於寒帶區域，管線埋設之深度亦應注意不可低於結凍線(Frost line)，以免造成流體於管線中凝固而無法輸送。蒸氣可以提供熱能與機械功，如何

減少蒸氣之能量損失一直是工業上將操作成本最小化與能源運用效率最大化之重要關鍵。良好之蒸氣分配系統設計能減少能源損失，並增加蒸氣系統之效率，以將整體能源成本減低。據此，應針對蒸氣管線之成本與成本效益最佳化，進行彙整與分析。表5蒐集國外蒸氣管線之材料成本。

另一方面，為瞭解設置區域能源整合系統管線之關鍵因素，本研究訪查國內共13家傳統產業及汽電共生公司，針對其管線佈建重要影響因素、管線施工技術與成本及現階段運作情況進行調查，結果彙整如表6所示，發現國內管線佈建之重要影響因素主要為成本及法規，其他次要因素則包括：壓力、品質、施工技術等。現階段國內區域能源整合使用之蒸氣管網，大多使用碳鋼材質之管線，並採用無縫配管(Seamless，簡稱SMLS)方式銜接管網。使用碳鋼管規格不盡相同，常見規格例如：ASTM A106 Gr.B、ASTM A53 Gr.B與API 5L Gr.B。

4. 管線成本推估

建設區域供熱系統之蒸氣分配管網時，其分配管網之成本效益可透過Natural Resources Canada機構所提出之規範，估算整體建造成本

表4 區域能源整合使用之蒸氣管類型分類

Standard Category		Description and Application
ASTM	A36/A36M	Specification for Structural Steel.
	A53	Standard Specification for Pipe, Steel, Black, and Hot-Dipped, Zinc-Coated Welded and Seamless.
	A105/A105M	Standard Specification for Forgings, Carbon Steel, for Piping Components.
	A106	Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service.
	A126	Standard Specification for Gray Iron Castings for Valves, Flanges, and Pipe Fittings.
	A134	Specification for Pipe, Steel, Electric-Fusion (Arc)-Welded (Sizes NPS16 and Over).
API	5L	Specification for Line Pipe.

參考資料：Mechanical Engineering Design Criteria (2007)

表5 汽電共生系統管線成本分析

案例(地點)	管線材質	管徑(mm)	管材價格(US \$/ ton)	備註	參考資料
Bridgeport, Connecticut WTE Plant (美國)	Steel pipe with polyurethane foam insulation for hot water delivery	19.5" (optimum) Actual pipes varied from ¾" to 30"	11.7×10^6 ^a	總長為62 km，熱水溫度70-120°C，流量為0.464 m ³ /s	Ulloa (2007)
Shijiazhuang Ruidatong Pipe Fitting Co., Ltd. (中國)	ASTM A106	21.3–1,219	800–1,500	氣體管/液體管(Gas Pipe/ Fluid Pipe)	Shijiazhuang Ruidatong Pipe Fitting Co., Ltd 網站資料
Shanghai Hanqi Metallic Material Co., Ltd. (中國)	ASTM A106 Gr.B	219	925–975	Oil Pipe, Fluid Pipe L = 6 m	Shanghai Hanqi Metallic Material Co., Ltd. 網站資料
Shandong Liaocheng Baoyuan Steel Pipe Co., Ltd. (中國)	ASTM A106 Gr.B or ASTM A106 Gr.A	21.3–610	550–950	-	Shandong Liaocheng Baoyuan Steel Pipe Co., Ltd網站資料
Tianjin North-Pipe Trade Co., Ltd. (中國)	ASME SA106 Seamless	6–640	535–910	長度為11.3 m	Tianjin North-Pipe Trade Co., Ltd.網站資料
Hunan Bestar Steel Co., Ltd. (中國)	ASTM A106	10–1,016	500–800	Structure Pipe	Hunan Bestar Steel Co., Ltd.網站資料
Cangzhou Rize Steel Pipe Co., Ltd. (中國)	API 5L or ASTM A106 Seamless	21.4	500–1,000	液體管(Fluid Pipe)	Cangzhou Rize Steel Pipe Co., Ltd. 網站資料

^a 此價格為工程中總管材花費價格

表6 調查國內工業廠商於管線施工技术與成本彙整

工廠	管線佈建重要影響因素								蒸汽條件				管線		管線佈建成本		
	成本	法規	壓力	品質	技術	溫度	流量	地形	氣候	溫度(°C)	壓力(kg/cm ²)	流量(T/H)	施工技術	材質	安全係數	管徑(吋)	成本(臺幣/公尺)
傳統產業A	×	○	○	○	○	○	×	×	○	187 158	12 6	~100	管架/埋設	碳鋼	1.5	24	142,000
傳統產業B	○	○	×	×	○	×	×	○	×	175 150	3 2.5	~195	管架	鋼管	依法規規定	34	100,000
汽電廠A	○	○	○	○	○	×	×	×	×	186	8.8	~60	管架	碳鋼 ASTM A106 (SMLS)	依法規規定	-	30,000~40,000
汽電廠B	×	○	○	○	○	×	×	○	×	186	8.8	~60	管架	碳鋼 ASTM A106 (SMLS)	依法規規定	-	30,000~40,000
傳統產業C	○	○	○	○	○	○	○	×	×	147 138	4.5 3.0	~65	管架	碳鋼 API 5L Gr.B	依法規規定	-	20,000~30,000
傳統產業D	○	○	×	×	○	×	×	○	×	230	10.5	~195	管架	鋼管	依法規規定	34	100,000
傳統產業E	○	○	○	○	○	○	×	×	×	225/260	31.0	~60	管架	碳鋼 ASTM A106 Gr.B / A53 Gr.B	-	30	70,000
傳統產業F	○	○	○	○	○	○	○	×	×	243	35.7	~2	管架	碳鋼 API 5L Gr.B	依法規規定	-	20,000~30,000
汽電廠C	○	○	○	○	○	○	○	○	×	220	9.0	~180	管架明渠	碳鋼 STPG 40S	-	-	10,000
傳統產業G	○	×	○	×	○	○	○	○	×	275	17	~350	管架	碳鋼	1.67	24	150,000
傳統產業H	×	○	×	×	×	×	○	×	×	275	17.5	~300	管架	碳鋼 ASTM A53 Gr.B (SMLS)	-	32	90,000
汽電廠D	○	○	○	○	×	×	×	×	×	330	25	~60	管架	主蒸汽管：P22其他 蒸汽：ASTM A106 (SMLS)	依法規規定	8	40,000
																10	109,000
																12	118,000
傳統產業I	○	○	○	○	○	○	○	×	×	311	102	~65	管架	碳鋼 API 5L Gr.B	依法規規定	-	20,000~30,000

註：○表示有影響，×表示無影響，-表示無資料
資料來源：本研究彙整。

與單位英呎中每提供MW-h熱水之成本，共包括六個步驟：

(a) 界定範圍與估算總樓地板面積：

應先界定此區域供熱系統之服務範圍，並估算其服務之總樓地板面積(單位為 m^2)。

(b) 推估尖峰能量需求：

以區域供熱為例，其熱需求用途包括：建築物暖氣與熱水供應，其中，暖氣供應之需求與戶外之溫度相關，溫差越大則需求越高；另一方面，熱水供應則與其尖峰熱水消耗量有關。根據以上原則，可推估單位面積之尖峰熱需求(單位為 kW/m^2)；再乘上第一步驟估算之樓地板面積，則可得區域內之尖峰熱需求(單位為 kW)。根據Kalhammer (1985)建議，一個具有經濟效益之區域供熱系統，其最小尖峰熱負載量應介於60-90 MW/ mi^2 (相當於23.4-35.2 MW/ km^2)。

(c) 評估安裝分配管網最低成本：

計算整體系統成本時，應使用每輸送單位蒸氣量所需之成本。管線網絡系統之成本與其管徑相關，而管徑又與系統裝置容量、供給與需求端間溫差、壓力及流速等相關，管徑選擇方法與成本分析將於後續進行詳細說明。若供熱系統之目的係供應熱水，則可使用成本較低之預隔熱管(Pre-insulated Pipe)，此類管常仍以碳鋼管為主管，其外包覆著一層聚脲酯(Polyurethane Foam，俗稱PU塑膠)以減少熱散失，其成本會比傳統以礦物纖維(Mineral Wool)絕熱並埋於混凝土中之方法低廉；若熱水溫度低於 $95^\circ C$ ，則可使用成本更低之塑膠管。

假若系統操作因子(例如：壓力損失等)皆保持固定，則當管線直徑增加兩倍，理論上蒸氣容量會增加六倍；另一方面，其管線材料成本大約會增加兩倍，因此，輸送單位蒸氣之成本會變為原來的三分之一；然而，管線安裝成本約為管線材料成本之五倍，根據安裝於不同情況之場址，其安裝成本甚至可能會是材料成本的十倍(Stephenson, 1976)。據此，系統規模大小、管徑、及管線總長度，係影響單位成本

之重要因子。

蒸氣管管徑之選擇可透過兩種方式，第一種為方程式推導，另一則為圖解法。以方程式推導為例，管徑係與蒸氣供應容量(與熱需求相關)、蒸氣品質(決定其比重)、蒸氣流速等相關。據此，管徑(d_p)可透過式(1)或(2)來求得：

$$\dot{F} = \frac{\dot{Q}}{\Delta T \cdot s} = A \cdot v = \left(\frac{\pi}{4} \cdot d_p^2\right) \cdot v \quad (1)$$

$$d_p = \sqrt{\frac{4\dot{Q}}{\Delta T \cdot s \cdot \pi \cdot v}} \quad (2)$$

其中， F 為蒸氣質量流率(kg/s)， Q 為供熱率(kJ/h)， ΔT 為供應端與需求端間之溫差($^\circ C$)， s 為蒸氣之比熱($kJ/^\circ C \cdot kg$)， v 為蒸氣流速(m/s)。流速決定必須考量工程上使用之幾項拇指定律，因若蒸氣通過單位截面積之速度過高，易造成紊流而使得壓損增加，造成蒸氣能量之消耗，並產生噪音(Ulloa, 2007；Dutta and Datar, 2012)：

- 過熱蒸氣(Superheated)於管線中之流動速率應介於50-70 m/s
- 飽和蒸汽(Saturated)應介於30-40 m/s
- 一般含水蒸氣(Wet or Exhaust)應介於20-30 m/s
- 熱水則其流速應介於0.5-4.0 m/s，惟一般操作常以2.4 m/s為上界，以避免產生噪音。

此外，管徑亦可透過圖解法來求得，一般蒸氣管可參考圖3來選定管徑，擇定順序如粗線所示(A→B→C→D)，依序包括：蒸氣溫度、蒸氣壓力、蒸氣質量流率、設定蒸氣流速等。

據此，透過上述方法，求得在已知系統操作規模與供熱需求之適當管徑後，即可針對不同規格管進行成本估算。為評估不同管材成本，本研究進行市場調查，根據不同製造廠商提供之資料進行統計分析，以工業界上最常使用之ASTM A106 GRB蒸氣管為例，其單位重量管材之成本與其管徑關係，詳如圖4為例，可發現以無縫管(Seamless)之單位成本較焊接管(Welded)之單位成本高。

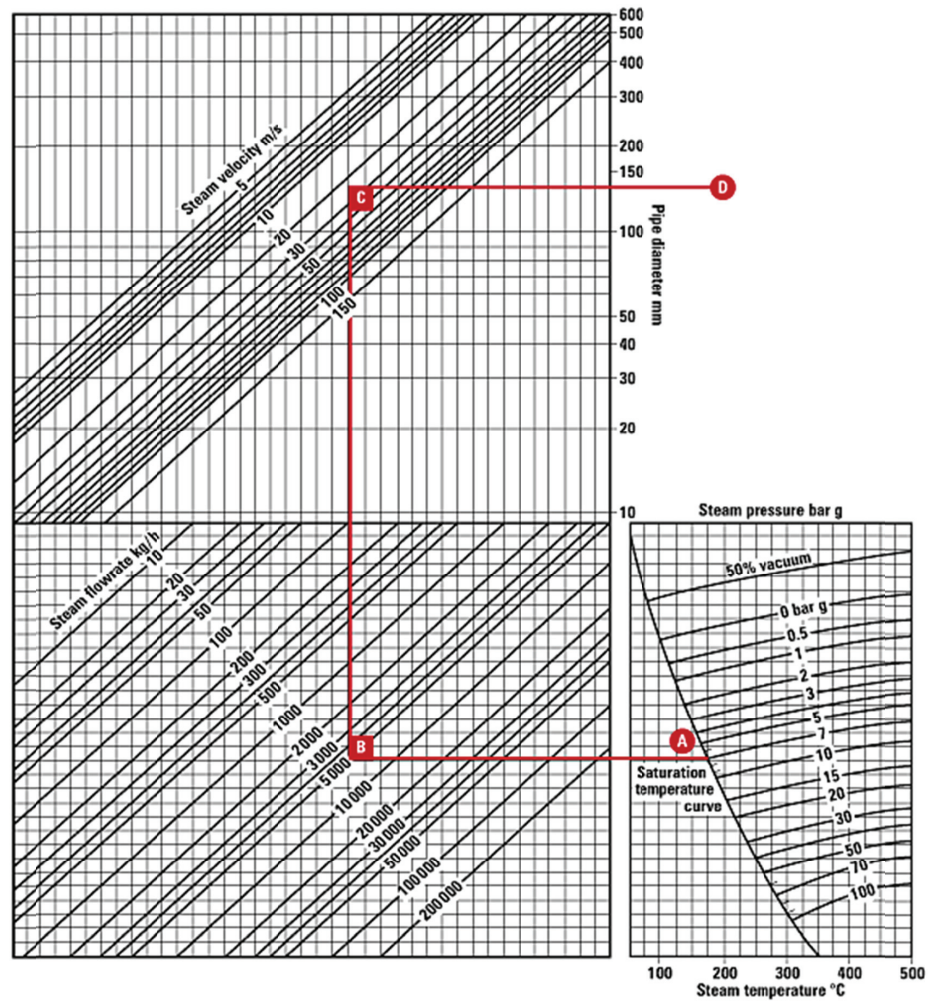


圖3 蒸氣管線管徑-流速圖
參考資料：Spirax-Sarco (2005)

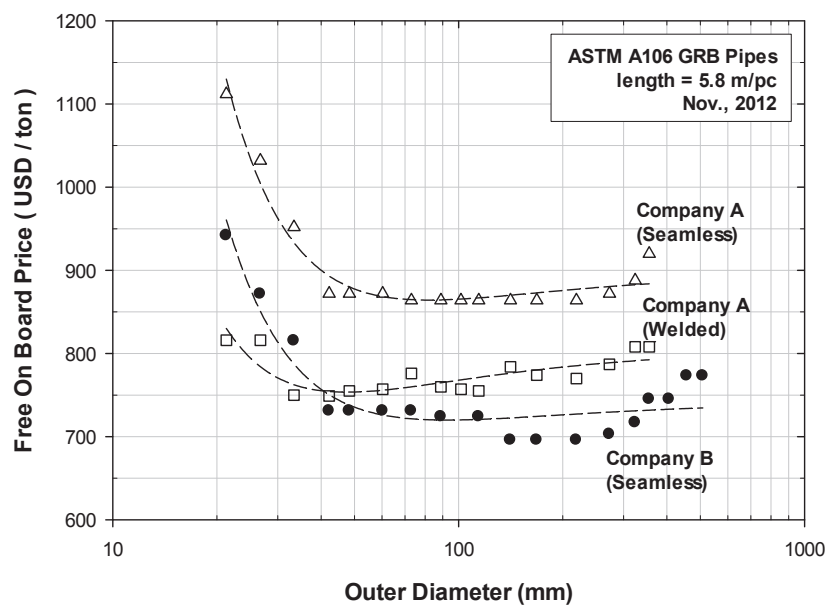


圖4 不同管徑ASTM A106 GRB蒸氣管之採購成本圖
參考資料：本研究調查

若比較ASTM A106 GRB、ASTM A53 GRB、及API 5L蒸氣管，則其單位重量管材之成本與其管徑關係，詳如圖5所示。API規格之蒸氣管依據其抗壓程度之不同，區分成11個等級(SCHEDULE，簡稱SCH)，抗壓最低為SCH 5，至抗壓力最高為SCH 120；對同一管外徑而言(例如：100 mm外管徑)，SCH 80管壁(8.56 mm)較SCH 40管壁為厚(6.02 mm)，因此SCH 40之管內徑會較SCH 80之管內徑長個些許公厘；此外，SCH 80之成本亦較SCH 40為高。

據此，不同管徑皆有不同之管壁厚，而其可承受之蒸氣壓力與溫度皆不相同，以ASTM A106 GRB為例，其管線規格與可承受之蒸氣品質可參考附錄所示。一般而言，所有碳鋼管之操作溫度不宜超過425°C，以免管材中之碳元素產生石墨化現象，造成管線抗壓能力受損，產生公安危險；若需使用更高溫度之蒸氣，則需使用合金鋼管(Alloy Steel Pipes)。

(d) 依據地質特性調整管線成本：

管線安裝成本會受當地地質情況而不同，地層若以黏土與碎岩石所組成，則地質較堅硬，其施工安裝成本(例如：挖鑿、地基回填等)會增加；相對於以砂土組成且無存在植物根

基等地質，其施工安裝成本則較低。所得粗估之管線安裝成本，配合公利率與供熱系統服務壽命(一般假設30年)，則可推估年均管網建設成本。

為了將蒸氣能量損失最小化，除了管材與管徑之選擇外，尚須考慮管線配置、管徑、蒸氣壓力、隔熱方式(材質)、蒸氣品質、蒸氣含水量、卻水器(Steam traps)選擇等因素，以能將整體成本效益最佳化，其中，與管線較相關之因素為隔熱材質之選擇與厚度之決定(Dutta and Datar, 2012)。隔熱材料成本與安裝成本會隨著管線隔熱之厚度增加而增加；另一方面，因熱量損失所造成燃料成本支出，卻隨著厚度的增加而減少，但此厚度增加到某一程度後，燃料成本支出減少之速率會遞緩。因此，管線隔熱層之厚度應可透過圖6之方法，而找到最佳厚度，以使得管線隔熱材料及安裝成本與燃料消耗成本總合最小，並決定符合經濟效益之隔熱厚度。

另一方面，亦可根據工程上之經驗來決定管隔熱之厚度，詳如表7所示，即為針對高溫蒸氣系統，所建議碳鋼管絕熱層之厚度。

(e) 評估年均建設成本：

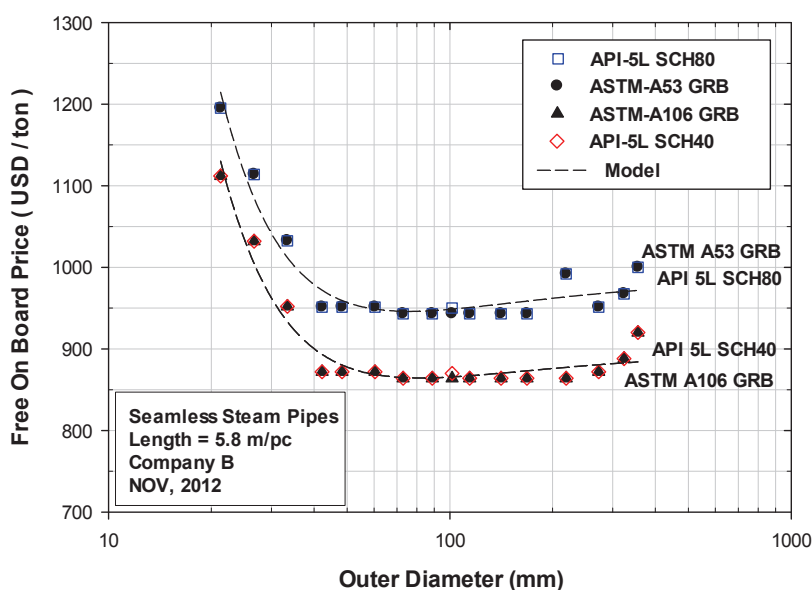


圖5 不同規格蒸氣管之採購成本圖
參考資料：本研究調查

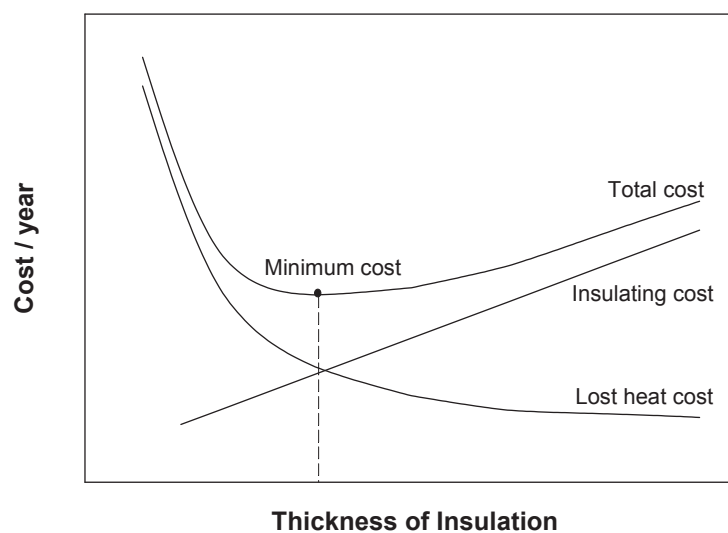


圖6 符合經濟效益之管線隔熱厚度決定方法
參考資料：重繪自Dutta and Datar (2012)

表7 針對高溫蒸氣系統所建議碳鋼管絕熱層之厚度

Nominal Pipe Size NPS (inches)	Temperature Range (°C)					
	Below 200	200-300	300-370	370-500	500-600	600-650
< 1	1	1	1.5	2	2	2.5
1.5	1	1.5	1.5	2	2	2.5
2	1	1.5	1.5	2	2.5	3
3	1	1.5	1.5	2.5	2.5	3
4	1	1.5	1.5	2.5	2.5	3.5
6	1	1.5	1.5	2.5	3	3.5
8	1.5	1.5	2	2.5	3	3.5
10	1.5	1.5	2	2.5	3	4
12	1.5	2	2	2.5	3	4
14	1.5	2	2	3	3	4
16	2	2	2	3	3.5	4
18	2	2	2	3	3.5	4
20	2	2	2	3	3.5	4
24	2	2	2	3	3.5	4

參考資料：Stephenson (1976)

透過熱需求資料表(Heat Demand Profile)或負載延時曲線(Load Duration Curve)，計算此區域之等效負載利用時間(Equivalent Full Load Hours)；並乘上第二步驟之尖峰熱需求量，則可估算年度總熱需求量(單位為kW-h/yr)。此年

度總熱需求量除上第四步驟所得之年均建設成本，則可得到一粗估之供熱服務售價(單位為\$/kW-h)。

(f) 評估銷售回收之利潤：

以供熱區域中之房屋密度為基準，並假設

所有房屋皆接受區域供熱系統之服務，乘上每家戶年均花費在熱需求之支出，即可評估從DH系統回收之年利潤。

國內由於管線佈設工程需協調跨廠區或不同專區與公司間，進行區域能源整合管線架設恐涉及不同法規，例如：環保法、商港法、消防法、工安、交通安全等，且各種管線施工技術亦不同，包括：管線鋪設方式於公路、高架化、地下化、或沉埋穿越航道等，因此，「管線施工成本分析」及「排擠既有業者權益」等議題應審慎評估與規劃。

5. 結 論

國內潛在可媒合場區之能源供應端，包括：傳統產業、焚化爐、汽電共生廠；國內潛在之能源需求端，包括：住宅社區或商業區、工業區、高科技廠、傳統產業、廠區內部。綜觀國外先進國家例如：丹麥、芬蘭、挪威等，對於推動區域能源供應系統之建置，均有良好成效。究其緣由，除給予低利貸款及補貼等經濟誘因之外，於建築法規亦均有相當程度的規範，例如：韓國另訂專法，在進行新市鎮區開發時期，直接規劃設置相關管線與設備，降低後續設置與行政成本支出；可作為我國藉由都市更新與開發新工業區，推動區域能源整合之借鏡。

建造區域供熱系統之主要支出成本，即係安裝配送管網之成本，其中，管線材料成本佔55%，其次為管線安裝施工成本。本研究調查結果顯示影響國內產業佈建管線之重要影響因素為成本及法規，其次為技術層面(例如：蒸氣壓力、品質、施工技術等)。現階段國內區域能源整合使用之蒸氣管網，管線大多使用碳鋼材，採用無縫配管銜接管網；然而，由於管線佈設工程需協調跨廠區或不同專區與公司間，且涉及法規、施工技術、及排擠既有業者權益等複雜議題，因此，管線施工應審慎評估與規劃。區域能源整合系統之管線材料與

管徑選擇，會直接影響到整個區域供熱系統建設之總成本；管材常見係使用碳鋼管(例如：ASTM A106、ASTM A53及API 5L)，且以無縫管(Seamless Steam Pipes)單位成本較焊接管(Welded Steam Pipes)之單位成本高；此外，區域能源整合應整併於建築法規中，於進行建案開發時，同時規劃設置區域能源整合之設備與管線，建構「共同管溝」，以降低整體能源整合技術設置成本。

6. 誌 謝

感謝經濟部能源局102年度「工業部門能源查核與節能減碳輔導計畫」(計畫編號：102-E0405)，所提供的經費協助。

參考文獻

- 丘崇德，2004，「生態工業園區規劃及營運機制之研究」，國立政治大學經營管理碩士學程碩士論文。
- 低碳世界，2012，「中國生態工業園區發展的成功案例：魯北生態工業園區」，網站專欄文章。
- 陳彥全，2009，「國內外生態工業區推動現況」，以城市採礦促進節能減碳—環保科技園區資源循環鏈結成果發表會。
- 巢志成，蔡啟明，2009，「林園工業區能資源鏈結分析」，98年度製造業節能減碳成果發表會—工業區能資源整合成果發表。
- 巢志成，2009，「生態化工業園區介紹」，國立成功大學永續環境科技研究中心，簡報資料。
- 藍慶新，2007，「來自丹麥卡倫堡循環經濟工業園的啟示」，對外經濟貿易大學世界經濟研究室。
- Bullock, D., 2011, "Introduction to Core Technologies, strategies, and Methods", *Combined Heat and Power Conference &*

- Trade Show*, Houston, Texas.
- CangzhouRize Steel Pipe Co., Ltd. Website, <http://www.rizepipe.com/english/>
- Dutta, P. and Datar, R., 2012, "Efficient Steam Distribution System", e-book.
- Gertler, N., 1995, "Industrial Ecosystems: Developing Sustainable Industrial Structures", M.S. Thesis, *Massachusetts Institute of Technology*, USA.
- Hunan Bestar Steel Co., Ltd. Website, <http://bestar-steel.en.alibaba.com/>
- International Energy Agency (IEA), 2012. "Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a Clean Energy System", OECD/IEA, France.
- Kalhammer, F., 1985, "Energy management and utilization division, R & D status report", *EPRI Journal*, 10, 59.
- Kumar, S. B., Kim, J.H., Lee, S.Y., Suh, S. and Park, H.S., 2012, "Evolution of designed industrial symbiosis networks in the Ulsan Eco-industrial Park: research and development into business as the enabling framework", *Journal of Cleaner Production*, 29-30, 103-112.
- Mechanical Engineering Design Criteria, EY0 62006001SAC/334553/061680010, <http://www.chapterpdf.com/ebook/appendix-10-3-mechanical-engineering-design-criteria.pdf>
- Natural Resources Canada, "District Energy Economic Assessment of Distribution Networks" (brochure developed by CETC).
- Shandong Liaocheng Baoyuan Steel Pipe Co., Ltd website, <http://lcby.en.alibaba.com/>
- Shanghai Hanqi Metallic Material Co., Ltd. website, <http://www.shanghaihanqi.com/index.asp>
- Shijiazhuang Ruidatong Pipe Fitting Co., Ltd website, <http://www.ruidatong.com/En/index.asp>
- Spirax-Sarco, 2005, "The Steam and Condensate Loop", ISBN 978-0-9550691-5-4.
- Stephenson, D.A., 1976, "Pipeline Design for Water Engineers", Elsevier.
- Tianjin North-Pipe Trade Co., Ltd. Website, <http://tianjin300400.en.china.cn/>
- Ulloa, P., 2007, "Potential for Combined Heat and power and District Heating and Cooling from Waste-to Energy Facilities in the US-Learning from the Danish Experience", MS Degree Thesis, Dept. of Earth and Environmental Engineering, Columbia University.

Cost Analysis on Establishing Piping Network System for District Energy Supply

Shu-Yuan Pan¹ Pen-Chi Chiang^{2*} I-Hung Liu³ Wen-Hsian Wang⁴
E-E Chang⁵ Chung-Sung Tan⁶

ABSTRACT

Implementation of district energy supply (DES) system is considered to be one of the key strategies for mitigating the anthropogenic greenhouse gas (GHG) emissions. This article is to collect the state-of-the-art information regarding DES from countries outside Taiwan and to investigate the feasibility to apply the DES within Taiwan. The details including the qualification of suitable site and determinations of the supply and demand of DES system were proposed. In addition, the cost-benefit analysis of construction of turbine, pipe lines, distribution network and thermal energy storage for the district heating and cooling supply system were evaluated. Various types of pipe lines can be designed and utilized to transfer energy at different transfer conditions of pressure and temperature; for instance, the steam or hot water should be transported to the demand sides by proper designed pipe lines. Because the costs of pipe lines were found to be more than 55% of the total engineering costs, the types of piping material and the diameter of pipe line should optimally selected and determined, respectively. Therefore, the evaluation criteria for constructions of pipe lines and distribution networks were proposed in this article to maximize the overall economic benefit and minimize the energy loss during the steam transportation.

Keywords: combined heat and power, distribution networks, steam pipes, carbon steel, optimization

¹ Ph.D. Candidate, Graduate Institute of Environmental Engineering, National Taiwan University

² Distinguished Professor, Graduate Institute of Environmental Engineering, National Taiwan University

³ Researcher, Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

⁴ Master Student, Graduate Institute of Environmental Engineering, National Taiwan University

⁵ Professor, Department of Biochemistry, Taipei Medical University

⁶ Professor, Department of Chemical Engineering, National Tsing Hua University

* Corresponding Author, Phone: +886-2-23622510, E-mail: pcchiang@ntu.edu.tw

Received Date: August 15, 2014

Revised Date: November 21, 2014

Accepted Date: November 28, 2014