

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

出席第 15 屆台法工業合作會議暨第 18 屆台法經濟合作會議

頁數 30 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話 台灣電力公司/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

徐懷瓊/台灣電力公司/副總經理/23666251

李清山/台灣電力公司/後端營運處/副處長/23666721

鄭運和/台灣電力公司/燃料處/副處長/23653430

梁天瑞/台灣電力公司/第四核能發電廠/放射化學課長/24903550-4060

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他（開會）

出國期間：96/07/07 – 96/07/15 出國地區：法國

報告日期：96/08/25

分類號/目

關鍵詞：核燃料, 鈾濃縮轉化, 放射廢料處置, 用過燃料再處理

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國主要任務有 2 項：(1)出席第 15 屆台法工業合作會議暨第 18 屆台法經濟合作會；(2)參訪 Areva 公司旗下各核能設施，包括：George Besse 鈾濃縮廠、Comurhex 轉化廠、MELOX 燃料製造廠、La Hauge 用過燃料再處理廠…等。

近年來國際核能景氣明顯復甦，我國與 Areva 在原料鈾採購、轉化(conversion)服務採購、與燃料製造服務採購等有長期合作關係；未來可在核電廠技術支援服務、天然氣供應、再生能源、輸配電與儀控技術服務等方面合作，以保障我國電力事業整體競爭力。

本次參訪 La Hauge 再處理廠，發現一向被視為「萬年無解」的核廢料最終處置，早已有妥善解決方案。用過核燃料再處理後，可將其中長半化期的銻、鈾等元素分離再利用，不僅可以把廢料的輻射強度降低 10 倍，更能把廢料體積縮減成原來的 1/3。而且回收的鈾可再製成燃料使用，達成燃料循環、資源永續利用的目標，對於嚴重缺乏自主能源的我國，無疑是保障國家能源安全的一大福音。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

第 15 屆台法工業合作會議暨 第 18 屆台法經濟合作會議出國報告 目次

行政院及所屬各機關出國報告提要	1
目次	2
圖目次	3
一、行程	4
二、會議報告	5
2.1. 第 15 屆台法工業合作會議	5
2.2. 第 18 屆台法經濟合作會議	5
三、參訪行程	6
3.1. 96 年 7 月 9 日參訪 Areva 總公司	6
3.2. 96 年 7 月 10 日參訪 Areva 總公司	8
3.3. 96 年 7 月 11 日參訪 George Besse 鈾濃縮廠與 Comurhex 轉化廠	9
3.4. 96 年 7 月 12 日參訪 MELOX 燃料製造廠	11
3.5. 96 年 7 月 13 日參訪 La Hauge 用過燃料再處理廠	12
四、參訪心得與建議	20

圖目次

圖 1	La Hauge 廠用過燃料再處理流程	14
圖 2	不同酸鹼環境下 TBP 對於 Pu、U 的分配係數	15
圖 3	PUREX 製程	16
圖 4	燃料元件壓縮廢料 (Compacted waste)	18
圖 5	高強度玻璃固化廢料 (Vitrified waste)	18
圖 6	La Hauge 廠內固化體中期儲存場(Atelier E/EV)	19
圖 7	Atelier E/EV 固化體中期儲存場內部	19
圖 8	Atelier E/EV 固化體中期儲存場強制通風冷卻	20
圖 9	燃料再處理可減少 10 倍放射性	23
圖 10	燃料再處理於鈾價高於 30 USD/ lb 時即具有經濟優勢	25
附圖 1	徐副總於 EURODIF 公司門前留念	26
附圖 2	EURODIF 公司 George Besse 濃縮廠全景	26
附圖 3	George Besse 廠擴散濃縮機組	27
附圖 4	Comurhex 轉化廠 Pierrelatte 廠區全景	27
附圖 5	MELOX 燃料製造廠全景	28
附圖 6	參訪人員攝於 MELOX 燃料製造廠	28
附圖 7	La Hauge 燃料再處理廠門前	29
附圖 8	La Hauge 燃料再處理廠全景	29
附圖 9	NT12.1 型用過燃料運輸容器	30

第 15 屆台法工業合作會議暨 第 18 屆台法經濟合作會議 出國報告

一、行程

7 月 07-08 日：離台抵法

7 月 09 日：赴法國財經工業部企業總局（DGE）參加「第 15 屆台法工業合作會議」及參訪活動

7 月 10 日：赴法國企業行動委員會（MEDEF）參加「第 18 屆台法經濟合作會議」及參訪活動

7 月 11 日：參訪 EURODIF 公司 George Besse 鈾濃縮廠與 Comurhex 公司鈾轉化廠

7 月 12 日：參訪 Areva NC 公司 MOLEX 燃料製造廠

7 月 13 日：參訪 Areva NC 公司 La Hauge 用過燃料再處理廠

7 月 14-15 日：離法返台。



二、會議報告

2.1. 第 15 屆台法工業合作會議

本項工業合作會議 (Industrial Cooperation Consultation Meeting, ICCM) 係推動台、法雙方經貿合作的政府高層例行會議，始於 1991 年。今年我方共分能源、設計與伽利略等 3 組，團員一行三十餘人，由經濟部工業局陳局長昭義率領，本公司 徐副總經理懷瓊擔任我方民間團主席。法方由財經工業部 (Ministère de L' économie des finances et de L' industrie) 企業總局 (La Direction General des Enterprise, DGE) 局長 Luc Rousseau 擔任主席。今年年會於 7 月 9 日上午，假財經工業部企業總局舉行。

台法近年來經貿往來非常密切。2006 年雙邊貿易額高達 38 億美元，我方入超約 7 億美元。本次會議討論議題極為廣泛，涵蓋電子與通訊、生物科技、航太產業、能源領域、設計創意產業、環境工業、香水化妝品、科技研發合作、電子商務、城市運輸與伽利略計畫...等。

能源領域由本公司燃料處 鄭副處長運和擔任引言、法方由 Bertrand Furno (法國在台協會經貿組長) 主答。

本公司與法國在核燃料有密切合作關係，Areva 及其子公司供應本公司原料鈾 (U_3O_8) 及鈾濃縮服務、並長期供應核一、二廠所需核燃料製造服務，此外，亦承攬核四廠多項重要電氣設備。而該等服務及設備品質良窳，關乎各核電廠營運績效甚鉅。

由於國際核能景氣復甦明顯，致原料鈾供需失衡而價格飛漲，本公司未來原料鈾採購、轉化 (conversion) 服務採購、與燃料製造服務採購，都希望 Areva 公司能積極參與，建立長期合作關係。

2.2. 第 18 屆台法經濟合作會議

台法經濟合作會議 (Taiwanese-French Economic Cooperation Conference) 為推動台法民間經濟交流之重要例會。本屆會議於 7 月 10 日假法國企業行動委員會 (Mouvement des Entreprises de France, MEDEF) 總部舉行。由本公司 徐副總經理與 MEDEF 會長 François Perigot 共同主持。大會並邀請工業局陳局長、駐法呂慶龍大使致詞，再由法國在台協會經貿組 Bertrand Furno 組長介紹台法雙邊經貿現況。

在能源與環境保護分組討論階段，本公司燃料處 鄭副處長以《Power Supply in

Taiwan》進行專題演講，簡報我國電力工業現況、本公司核能部門營運近況、本公司天然氣（LNG）供需情勢與核燃料前端營運、以及雙方過去合作成果與未來合作範疇展望等議題。

在核燃料前端營運部份，本公司核能部門每年有 333 萬磅原料鈾（相當於 1,280 tU）、1,250 噸 UF₆ 轉化服務、85 萬 SWU 濃縮服務與 150 噸燃料製造等大量需求，多年來 Areva 公司有長期合作關係。歷年向法累積採購金額已達 9.05 億美元。

至於本公司與法國企業，可在核燃料前端營運、核電廠技術支援服務、天然氣供應、再生能源、輸配電與儀控技術服務等方面密切合作。

三、參訪行程

3.1. 96 年 7 月 9 日參訪 Areva 總公司

3.1.1. 主要接待人員

Areva NP（燃料部門）執行副總 Ralf Güldner、資深副總 Jean-Pierre Gros、亞太區銷售副總 Klaus Al Usta、Areva 集團駐台辦事處首席董事 Jean- Pierre Dalcorsio、Areva NC 礦業部門經理 Guillaume Sliwa 與 Jérôme Sermage 及 Areva T&D 副總 Jerome Barthe 等人。

3.1.2. 參訪經過與心得

本日參訪由 Areva NP 高層主管簡介集團組織與營運概況。

Areva 擁有全球最完整的核能工業體系，營業範圍橫跨前、後端營運與反應器設計製造。該集團去年總營業額高達 109 億歐元，純益 6.5 億，員工總數 61,000 人，去年純益大幅成長 43.9%，顯示全球核能景氣復甦力道強勁。集團分為 4 大部門：

核能前端營運部門（Front end division）：包括原料鈾採探、轉化加工（conversion）、濃縮加工（enrichment）與核燃料製造（nuclear fuel fabrication）。

核反應器與服務部門（Reactor and services division）：包括核反應器與電廠關鍵設備製造、核能營運服務、輻射度量儀器、儀控資訊與機械系統。

核能後端營運部門（Back end division）：包括用過核燃料再處理、燃料再循環、放射性除污與相關後勤支援。

輸配電服務部門 (Transmission and distribution division)：包括電力調度服務、輸配電設備軟硬體服務與資訊系統等。

為因應近年國際核能工業強勁復甦，Areva 公司將在未來數年積極投資核能工業，主要方向包括：

拓展原料鈾市場占有率：目前該公司除加拿大、尼日與哈薩克現有礦區產能外，亦從現貨市場與前蘇聯釋出的高濃縮鈾 (HEU) 取得供應來源，由於過去 5 年全球原料鈾價格飛漲超過 10 倍，促使該公司積極掌握並開發鈾源。預計於未來數年投資 5.5 億歐元於加拿大、哈薩克、南非、尼日與美國等地加強探勘活動，預計 2014 可達 11,000 tU/y 產量，期能提高全球市場占有率至 1/3，其所掌握之鈾礦藏量至少可供 3,200 爐-年所需。

積極發展新世代反應器：由 Areva 研發的新世代歐洲壓水式反應器 (EPR)，除已獲得芬蘭 Olkiluoto-3 號機與法國 Flamanville-3 號機訂單外，也積極拓展美國、英國與中國市場。EPR 為目前世界功率最大的壓水式反應器，發電容量高達 1,600 MW，若近期內能獲得美國核管會 (NRC) 與歐洲電力事業需求規範 (Europe Utility Requirements, EUR) 認證，將具有相當的市場競爭力。

擴展核能前端營運服務：Areva 在 Tricastin 核電廠附近設有完整的鈾轉化、濃縮廠，為提升整體競爭力，目前正規劃全面更新設備。包括：

1. 投資 6.1 億歐元，興建新的 Comurhex II 鈾轉化廠 (uranium conversion facilities)。預計於 2009 年動工，2012 年商轉。
2. 投資 30 億歐元，興建 George Basse II 離心式濃縮廠 (centrifuge enrichment facility)，預計 2009 年上半年初期營運，2018 年達到 750 萬分離功單位 (SWU) 的預定產能，並可擴充至 1,100 萬 SWU。
3. 規劃於美國興建年產能 300 萬 SWU 之離心式濃縮廠 (George Basse III 計劃)，預計 2013-2014 商轉，2017 達預定產能。
4. 規劃在美國南卡羅來納州 Savannah River Site，興建首座 MOX 燃料廠。

Areva 與本公司目前有長期原料鈾與核燃料供應合約，深入瞭解其未來發展動向，對於雙方密切合作關係有重要意義。

本次參訪也藉機與 Areva 相關人員討論本公司 U_3O_8 採購契約內容，並協助安排民間 IPP 電廠星能電力李董事長甘常、台灣機電工程服務社陳董事長重光與法方 T&D 部門人員晤談。

3.2. 96年7月10日參訪 Areva 總公司

3.2.1. 主要接待人員

Areva NC (後端營運部門) 資深副總 Jacques Besnainou、副執行長 Patrice Bernard、駐台辦事處首席董事 Jean- Pierre Dalcorso 等人。

3.2.2. 參訪經過與心得

本日參訪主要由 Areva NC 高層主管詳細介紹該集團後端部門營運狀況。該公司於 Cherbourg 附近的 La Hauge 設有全球最大、技術最先進的用過燃料再處理廠 (spent fuel reprocessing plant)。從 1974 年以來，該廠已累積處理超過 21,000 噸的用過核燃料，幾佔全球總處理量的 3/4¹，並曾技術轉移日本六所村再處理廠，目前尚與美國、中國洽談相關技術轉移合作。²

鑒於近年來化石燃料供應緊澀，經濟新興國家對於燃料需求迫切，再加上 2006 年俄羅斯-烏克蘭爆發天然氣割喉戰刺激，「國家能源安全」(energy security) 已成為先進國家制定能源政策的首要考量³。對於 98.3% 能源都仰賴進口的我國而言，保障能源安全更應列為能源政策首要考量。

核能對於我國能源安全有極重要貢獻。相對於傳統化石燃料，核燃料具有體積極小、運輸與儲存便利等優勢外，如果能從用過核燃料中回收利用 97% 的鈾與鈾，幾乎可以達成自給自足、生生不息的能源永續利用目標。

以往核燃料再循環受限於核子武器擴散疑慮與國際鈾價低迷，所以真正付諸再處理的國家並不多。

但近年來國際能源供需嚴重失衡、各國尋覓高放射性廢棄物處置場址屢屢受阻，美國遂與國際原子能總署 (IAEA) 先後倡議《全球核能夥伴計畫 (Global Nuclear Energy

¹ 全球具有商用燃料再處理能力的國家包括：法國 (La Hauge)、英國 (Sellafield)、俄羅斯 (Tcheliabinsk) 與日本六所村 (Rakkasho Mura)。累計處理量約為 29,000 噸，其中法國獨佔 21,000 噸。

² Areva 公司目前積極競逐美國「全球核能夥伴計畫 (GNEP)」的計畫核心 - 整合式燃料處理廠 (Consolidated Fuel Treatment Facility, CFTS)。

³ 近年來各先進國家能源政策白皮書對核能保障能源安全都持高度肯定，如：美國 (2005)《能源政策法, Energy Policy Act》、歐盟 (2007)《歐洲能源政策評估, European Commission's Strategic Energy Review》、日本 (2007)《能源基本政策草案》、英國 (2006)《The Energy Challenge Energy Review Report 2006》。

Partnership, GNEP)》⁴、「世界燃料銀行 (World Fuel Bank)」等概念，使核燃料再循環前景綻露曙光；許多原本奉行「用過核燃料直接處置」政策的國家，紛紛考慮改絃易轍。今年 5 月，義大利即委託法國再處理 235 噸的用過核燃料。

核燃料再處理除對於確保國家能源安全、資源永續利用等具有重要功能外，對於核廢料處置更有積極意義。

用過核燃料含有 97%的鈾、鈾等長半衰期核種與 3%的分裂產物等短半化期核種。透過再處理回收鈾、鈾後，廢棄物只剩下分裂產物。這些核種的放射性可在千年內衰變殆盡，所以核廢料不再是「萬年無解的難題」。

3.3. 96 年 7 月 11 日參訪 George Besse 鈾濃縮廠與 Comurhex 轉化廠

3.3.1. 主要接待人員

EURODIF 總經理 Gerard Perrat、Comurhex 銷售經理 Pierre Durante、駐台辦事處首席董事 Jean- Pierre Dalcorsio 等人。

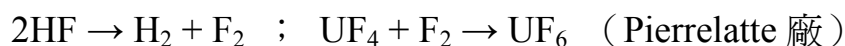
3.3.2. 參訪經過與心得

核燃料與傳統化石燃料應用方法迥異。開採出來的鈾礦，必須先精煉 (milling & refining) 製成原料鈾 (俗稱黃餅, Yellow cake, U_3O_8)，經轉化為 UF_4/UF_6 (氣體) 後，再以擴散或離心方式將其中 U-235 含量濃縮至適當濃度後，才能製成核燃料使用，是為核能前端營運。本日參訪地點，即為將 UF_4 轉化為 UF_6 的 Comurhex 轉化廠，與 George Besse 鈾濃縮廠。

Areva 公司核燃料前端營運體系，包括：

1. 原料鈾自各地輸入後，先在南部 Malvesi 廠轉化為 UF_4 ，再運往 Pierrelatte 廠 (即本次參訪目的地) 進一步轉化為 UF_6 ，以供後續濃縮作業之饋料。Malvesi 與 Pierrelatte 廠合稱為 Comurhex 轉化廠。目前 Comurhex 廠年最大產能為 14,000 t UF_6 /y，市場佔有率 27%，為世界規模最大的轉化廠。鈾轉化廠主要作業流程為：

⁴ 美國布希政府所倡議之《全球核能夥伴計畫 (Global Nuclear Energy Partnership, GNEP)》即結合美、俄、中、英、法與日本等核能先進國家結盟為「核能夥伴」。向參加該計畫的「友好國家」提供新鮮核燃料，並回收用過核燃料再處理。再處理後製成無法分離出 Pu 的新式 MOX 燃料，供該等核能先進國家使用。



為擴充產能，Areva 將投資 6.1 億歐元，分別在 Malvesi 與 Pierrelatte 興建 Comurhex II 廠，年產能為 15,000 - 21,000 tUF₆/y。新廠將氟化作業全部集中於 Pierrelatte 廠，並由 Malvesi 廠提供 UO₃。該廠預計於 2009 年動工，2012 年商轉，並於翌年達到 21,000 tUF₆/y 的最大產能。

2. 原料鈾轉化成 UF₆ 後，可隨客戶需求送進行濃縮服務。Areva 目前有 EURODIF 濃縮廠。

EURODIF 公司位於亞維農近郊 Tricastin 核電廠附近，是 Areva 前端營運重鎮，設有 George Besse 濃縮廠。公司全名 European Gaseous Diffusion Uranium Enrichment Consortium，係法國、比利時、瑞典與西班牙四國於 1973 年合資創設。其後瑞典退出，由伊朗買下股權繼續投資。

George Besse 鈾濃縮廠自 1979 年開始營運，以氣體擴散 (gaseous diffusion) 法，透過 1,400 級濃縮程序，將 U-235 濃度由天然鈾中的 0.7% 濃縮至 3.5-6%，年產能為 1,100 萬分離功單位 (SWU)，足可供應 81 座標準核電廠所需的低度濃縮鈾 (LEU)。該廠產能規模約佔全球 1/4，僅次於俄羅斯。產品主要供應法國與其他歐洲國家，小部份供應美國與亞洲國家。

鈾濃縮製程可分為氣體擴散與離心濃縮兩種，雷射濃縮技術尚處於發展階段。

氣體擴散屬於老舊技術，耗能極高，目前僅美國 USEC 與 EURODIF 還在採用。如 EURODIF 即需耗去 Tricastin 核電廠所有 3,000 MW 電力。該廠擁有 1,400 級 (stage) 濃縮程序，每 20 級構成 1 組 (group)，全廠共有 70 組。為達到最有效率濃縮目的，每級尺寸並不一致。但基於維護便利考量，將擴散器統一為高 16、19 與 23 公尺等 3 種尺寸；單級耗能分別為 0.6、1.6 與 3.3 MW。由於耗能極大，氣體擴散目前市場占有率僅為 25%，已明顯不符經濟效益，預計 2017 年後完全退出市場。

離心濃縮屬於新技術，耗能僅為前者的 1/50，極具經濟競爭力與環保優勢。新一代的鈾濃縮廠，如 Urenco、日本六所村、俄羅斯的 Rosatom (現已併入 Atomprom)，均已採用離心濃縮技術。目前市場占有率達 65%，穩居技術主流。

近年國際核能工業景氣復甦極快，需求成長急速，舊有產能早已捉襟見肘、供不應求。因此核能先進國家紛紛增設新廠、擴充產能。如美國已核准設置，Urenco 的國家鈾濃縮廠 (National Enrichment Facility, NEF) (產能為 300 萬 SWU)、USEC 的 Piketon

濃縮廠(產能為 380 萬 SWU)。Areva 也不落人後，在 George Besse 現址增設 George Besse II 二代廠(GBII) 及擬議在美國興建之 GBIII 廠，也選用 Urenco 離心濃縮技術。

George Besse II 濃縮廠佔地只有舊廠 1/3，用電只有 1/50。自 2006 年動工以來進展快速，預計 2009 年上半年初期營運，2018 年達到 750 萬 SWU 的預定產能。未來可輕易擴充至 1,100 萬 SWU 產能，前景頗值得期待。

3.4. 96 年 7 月 12 日參訪 MELOX 燃料製造廠

3.4.1. 主要接待人員

MELOX 燃料廠總經理 Jürgen Krellmann 與駐台辦事處首席董事 Jean- Pierre Dalcorso 等人。

3.4.2. 參訪經過與心得

Areva 旗下的 MELOX 燃料廠，是專門生產 MOX 燃料的製造廠。MOX(Mixed oxide fuel) 源自燃料再處理後回收的鈾與鈾濃縮後下腳料，經一定比例混合後重新燒結，再製成新燃料。

MELOX 燃料廠自 1991 年興建，1995 年商轉，目前年產能 195 噸重金屬 (tHM)，累積產量達 1,175 tHM，是世界最大、技術最先進的 MOX 燃料廠。該廠已技術轉移予日本六所村 J-MOX 燃料廠，更計畫在美國 Savannah River Site 興建 MFFF 燃料廠(MOX fuel fabrication facility)。

MOX 燃料與一般核燃料最大差異，即在於燃料含有的可裂材料 (fissile material) 不同，MOX 燃料以 Pu-239 取代後者的 U-235。因此 MOX 燃料 Pu-239 含量與一般燃料中 U-235 含量相近，均為 3-5%。但含有 Pu-241，所以 MOX 燃料的輻射劑量率還是比新燃料高一些⁵，但不致對目前電廠輻射防護實務造成負擔。此外，MOX 燃料含有鈾，在製成燃料棒之前過程必須在密封熱室中進行，以防止空浮污染。

由於 MOX 含有鈾，反應度比一般鈾燃料稍大，因此爐心通常只裝填 1/3 的 MOX 燃料。儘管目前使用 MOX 燃料的電廠以 PWR 居多，但也有 6 座 BWR 電廠使用。由

⁵ Pu-241 半化期為 14.35 年，衰變產物為 Am-241，後者釋放的 γ 射線是造成 MOX 燃料的主要輻射來源。

於外觀尺寸上與普通燃料相同，因此使用 MOX 燃料的電廠幾乎不需更動 NSSS 系統硬體，但必須微調爐心佈局。

使用 MOX 燃料的積極意義，在於促進鈾資源的永續利用。用過燃料約含有 1% 的 Pu-239，假如各國都採取燃料再循環政策，等於減少 1/3 的原料鈾消耗。即使以再處理並不普遍的今日規模估計，每年都可節省 3,000 噸的原料鈾消耗(@ 1,000 噸再處理量)。

MOX 燃料使用已超過 30 年，應用情況分析如下：

1. 目前共有 4 國 36 座電廠長期使用，包括：德國 10 座(1972)、瑞士 3 座(1984)、法國 20 座(1987) 與比利時 2 座(1995)。
2. 日本有 11 座電廠確定將使用 MOX 燃料，目前仍持續與附近居民溝通。
3. 美國 Duke Power 的 Catawba 核電廠於 2005 年開始測試 4 束 MOX 燃料。
4. 經歷數百爐-年的長期考驗，MELOX 很自豪的表示從未發現燃料破損或異常狀況。

3.5. 96 年 7 月 13 日參訪 La Hauge 用過燃料再處理廠

3.5.1. 主要接待人員

La Hauge 燃料再處理廠總經理 Eric Blanc、副總 Denis Alexandre 與駐台辦事處首席董事 Jean- Pierre Dalcorso 等人。

3.5.2. 參訪經過與心得

La Hauge 再處理廠是 Areva 後端營運部門皇冠上的鑽石，更是法國獨步全球的科技結晶。該廠自 1974 年營運以來，已累積處理超過 21,000 噸的用過核燃料，幾佔全球總處理量的 3/4。目前廠內設有 UP2 與 UP3 兩座處理廠，年處理量 1,700 噸/年。

La Hauge 廠採用 PUREX (Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction) 製程，用過核燃料處理流程大致如圖 1：

1. 用過核燃料經陸路、海路運抵再處理廠後，先經檢查後，暫儲於用過燃料儲存池 (storage pond) 約 3-5 年，俟燃料溫度與輻射劑量率下降至適合處理程度。La Hauge 廠設有 3 座儲存池，共可儲存 14,000 噸用過燃料。
2. 用過燃料實施再處理時，燃料束先經高壓切斷 (shearing) 為平均 35 mm 的小段。此時氣態放射性核種如： I_2 、Kr、Xe 等，會自燃料中散逸，必須以廢氣處理系統過濾、

吸附處理。

3. 切斷的燃料溶解於 6-12 N 硝酸溶液中，此時 UO_2 燃料丸會溶解，但鋳合金護套與燃料組件則不溶解。這些不溶部份經收集、淋洗去污後，送往壓縮處理；而溶液則輸往萃取廠房。
4. PUREX 萃取程序，是再處理的核心程序⁶。一般分為 TBP 溶劑萃取 (solvent extraction)、鈾/鈾群分離 (Pu/U partition) 與鈾回收 (U stripping)、與鈾純化 (Pu purification) 等 4 項子步驟⁷：

4.1. TBP 溶劑萃取

有機溶劑對於不同離子的萃取能力，取決於螯合 (chelating) 力，以分配係數 (distribution coefficient) 大小表示。這項能力因酸鹼環境不同，有很大差異。

圖 2 顯示 TBP (磷酸三丁酯, Tributyl phosphate, $(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_3\text{PO}$) 在強酸 (6N 硝酸溶液) 環境中，對於 Pu、U 等離子的萃取效果極佳，卻無法萃取分裂產物 (FP)、 Am^{3+} 、 Eu^{3+} 與 Th^{4+} 等離子。PUREX 製程就利用 TBP 這個特性，將 Pu、U 萃取至有機相，把其他分裂產物與短半衰期超鈾元素殘留在硝酸溶液中 (稱為 raffinate)，達到 Pu、U 與其他物質分離目的。詳細分離程序如圖 3。在實務上，多選擇 30% TBP@Kerosene 為萃取劑。萃取分離率一般可達 99% 以上。

4.2. 鈾/鈾群分離 (Pu/U partition)

經過第 1 次萃取程序後，Pu、U 留存在有機相，再使用還原劑 (一般為 $\text{Fe}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2$)，將 Pu^{4+} 還原為 Pu^{3+} ， U^{4+} 則被氧化為 U^{6+} (以 UO_2^{2+} 形式存在)。 Pu^{3+} 會離開有機相，重新回到硝酸溶液中，就可以繼續萃取-純化程序，提高 Pu 的純度。 UO_2^{2+} 仍然穩定存在於有機相。淨反應式如下：



⁶ G. Choppin, J. Liljenzin and J. Rydberg (2002), *Radiochemistry and Nuclear Chemistry*, 3rd ed., Butterworth-Heinemann Co., New York.

⁷ 本流程係摘要自 C. Muskas, W. Schulz (1992), *Principle and Practices of Solvent Extraction*, Marcel Dekker.

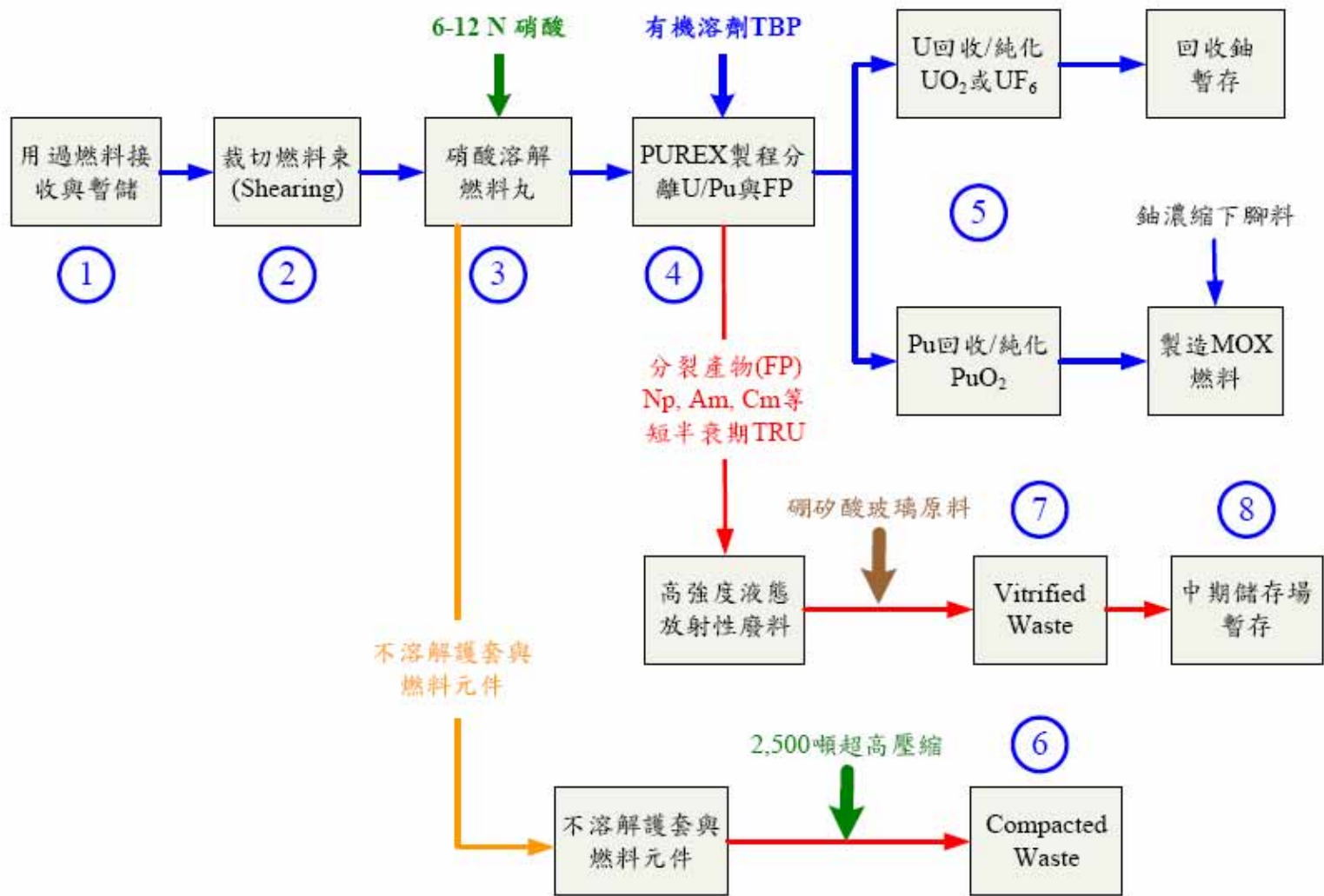


圖 1 La Hauge 廠用過燃料再處理流程

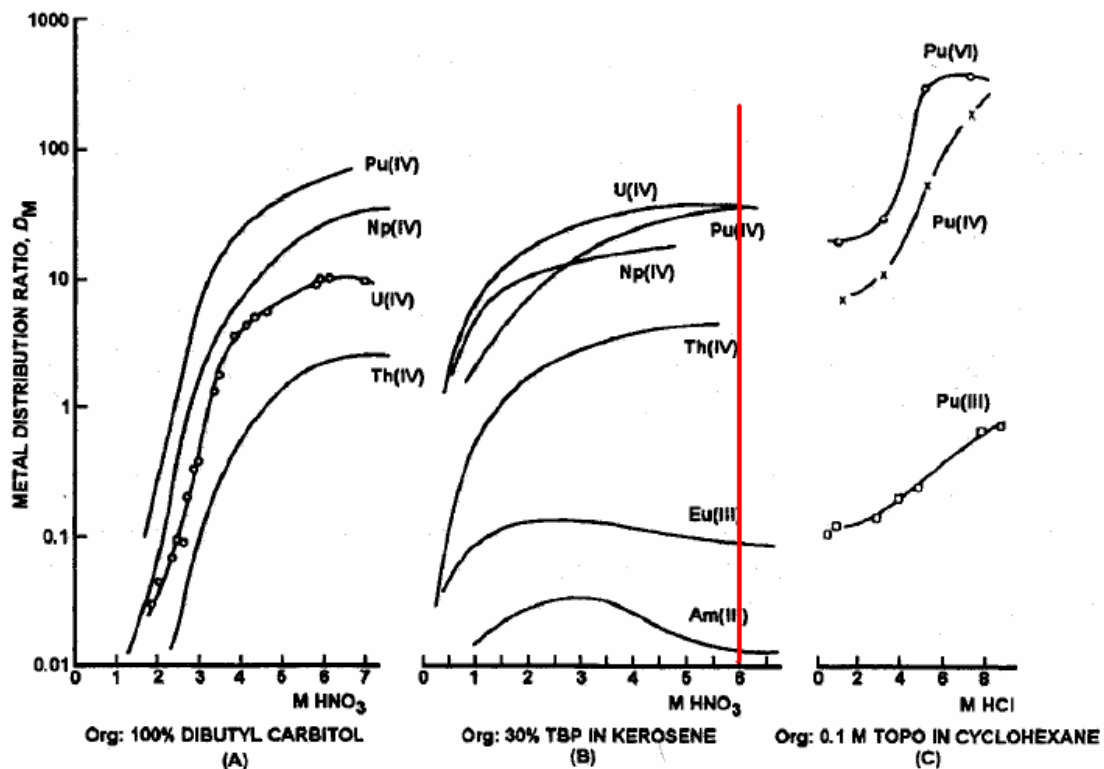


FIG. 16.8. Extraction of actinide complexes into various solvents. (From Ahrlund, Liljenzin and Rydberg.)

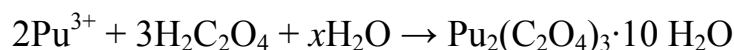
圖 2 不同酸鹼環境下 TBP 對於 Pu、U 的分配係數

4.3. 鈾回收 (U stripping)

經過萃取與群分離後，剩下 UO_2^{2+} 與微量 Np、Ru 與 Th 留存在有機相中。有機溶劑再經過純化後，可去除絕大多數殘存雜質，並生成 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ (Uranyl nitrate)。目前回收鈾都暫存於廠區，等待時機成熟後再利用。

4.4. 鈾純化 (P purification)

前述 4.2. 中存在於液相的 Pu^{3+} 經反覆萃取後，加入草酸形成 $\text{Pu}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{Pu}(\text{C}_2\text{O}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 沉澱。再以超過 500°C 的高溫加熱，熱解草酸根，最後形成 PuO_2 固體。反應式如下：



5. PUREX 程序回收的 UF_6 或 UO_2 與 PuO_2 ，可重新濃縮或製成 MOX 燃料。

再處理的回收鈾（Reprocessed uranium, Rep. U）U-235 含量約為 0.8–1%，甚至比天然鈾中 U-235 含量更高。但因含有極低放射性，目前氣體擴散濃縮廠無法直接再濃縮，而暫儲於廠區。俟日後離心濃縮廠建成後，或可規劃部份機組濃縮回收鈾。PuO₂ 則送往 MELOX 燃料廠，與鈾濃縮下腳料混合製成 MOX 燃料，完成燃料再循環作業。

6. 前述廢棄的護套及燃料組件，經 2,500 噸超高壓縮機，壓縮製成金屬餅，是為壓縮廢棄物（compacted waste），封存於廢料容器內，屬於低放射性廢棄物，詳如圖 4。

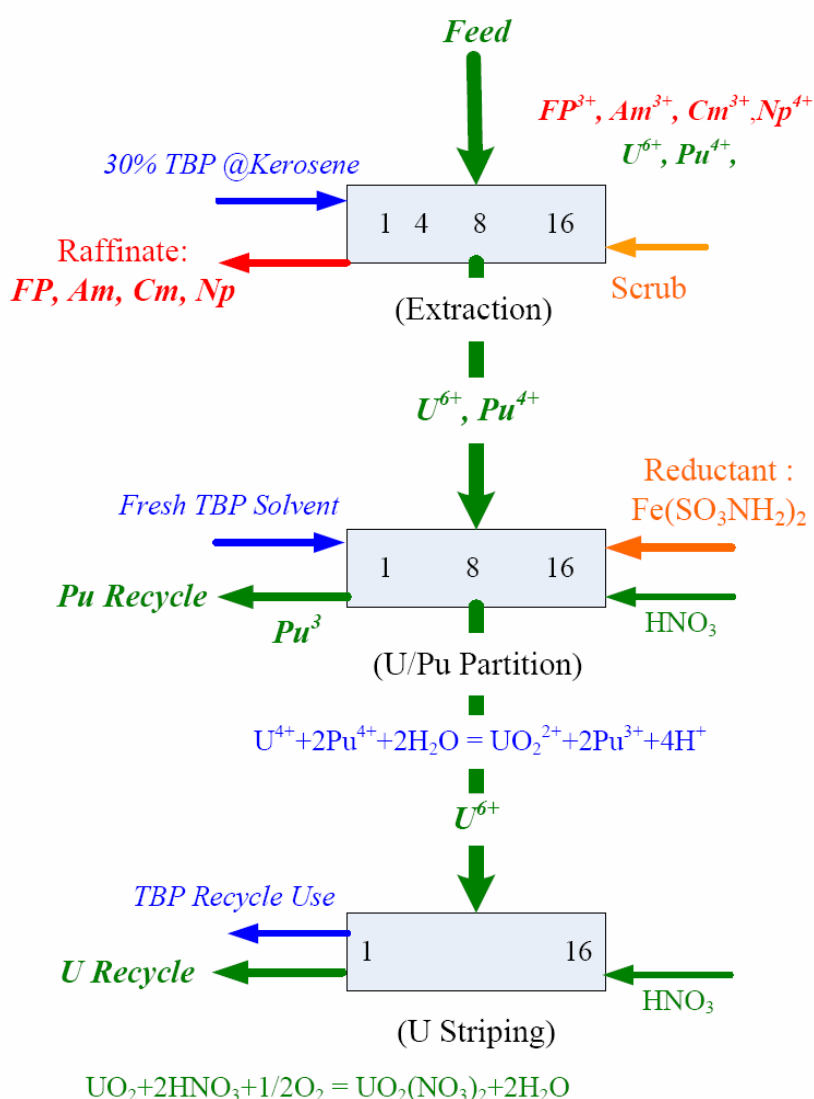


圖 3 PUREX 製程

7. 殘存的分裂產物廢液則與玻璃原材料混合，感應加熱至 1,100 °C 熔融後，製成玻璃固化體（vitrified waste），詳如圖 5。

每束壓水式反應器燃料淨重約 700 公斤（其中鈾約重 420 公斤、鈾約 5 公斤、分裂產物約 15-20 公斤，其餘為護套或燃料組件），經再處理後，每 2 噸燃料（約 4 束燃料）僅產生 1 桶壓縮廢棄物與 1 桶玻璃固化體。

8. 至於最終產生的高放射性玻璃固化體，暫儲於設備完善的中期儲存場，靜待運返委託國進行最終處置。在前數年之儲存期間因衰變熱，尚需強制通風冷卻；數年之後只需自然對流冷卻。

以往燃料再處理被視為高度政治敏感議題，是因為 PUREX 製程將 Pu 與 U 分離，予有心人士取得 Pu 的可乘之機。事實上，如果稍微修改製程，不把 Pu⁴⁺ 還原為 Pu³⁺，使 Pu 與 U 共同留在有機相而無法分離，即可杜絕單獨取得 Pu 的機會，可以大幅降低核物質擴散風險，且在實務上應無太大困難。例如目前已有的 COEX，就採取 Pu、U 不分離製程。

本次特地參訪位於 La Hauge 廠內 Atelier E/EV 固化體中期儲存廠，如圖 6 至圖 8。請注意，儲存廠內每個 Cogema 的圓形標誌（直徑約 80 公分）下方就是 1 個儲存穴，每穴可儲存 7-9 桶玻璃固化體（相當於 14-18 噸用過燃料，只要 500 個小穴就可以容納我國 4 座核電廠營運 40 年所有 8,300 噸用過燃料再處理後的固化體）

Areva 表示，只要 1 公頃的土地，就可以儲存全法境內 59 座核電廠 40 年所有產生的高放固化體，其規模是我國的 8 倍（含核四）。據此推估，只要 1 座標準游泳池面積，就能儲存我國所有核電廠營運 40 年中所有的高放射性核廢料。

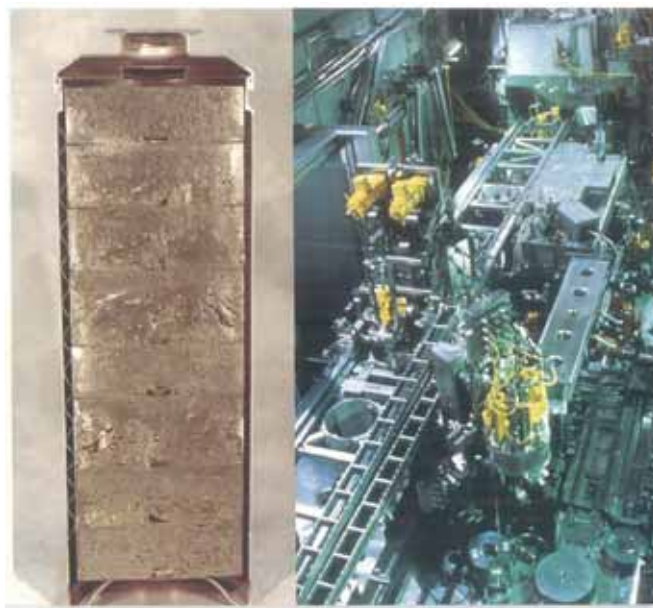


圖 4 燃料元件壓縮廢料 (Compacted waste)



圖 5 高強度玻璃固化廢料 (Vitrified waste)



圖 6 La Hauge 廠內固化體中期儲存場(Atelier E/EV)
(圖中綠色建築物，由巴士與建築物比例可知該儲存場佔地很小)



圖 7 Atelier E/EV 固化體中期儲存場內部

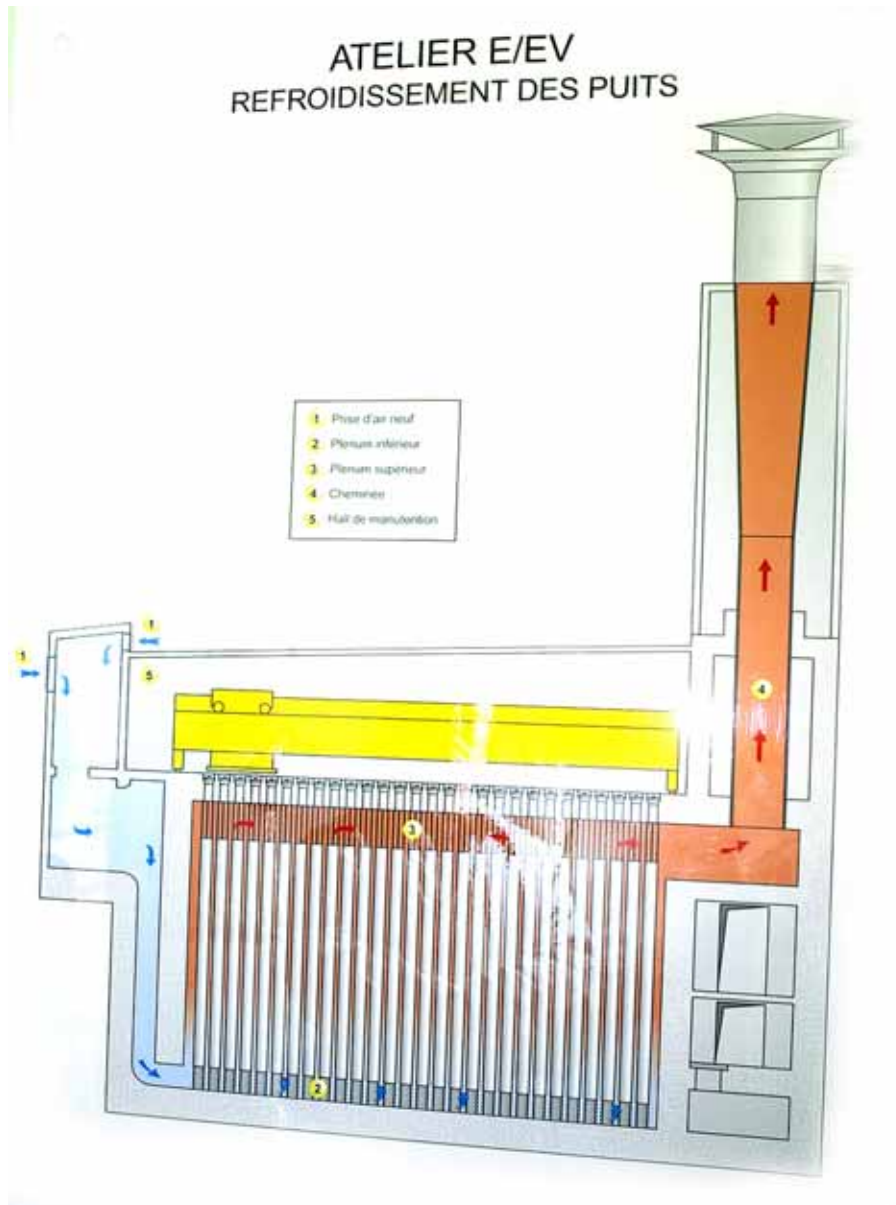


圖 8 Atelier E/EV 固化體中期儲存場強制通風冷卻

四、參訪心得與建議

本次參訪活動雖然非常緊湊，但成果非常豐碩。

1. 本次參訪發現 Areva 對於全球核能復甦前景極為樂觀，未來計劃投入鉅資更新擴建各項設施，以保持技術領先地位，迎接即將來臨的無限商機。台電公司雖與 Areva 簽有長期原料鈾採購與燃料製造合約，但面臨全球需求成長快速強勁、產能擴充緩慢的情況，有必要提早規劃因應。

Areva 目前以積極向上游掌握鈾礦為主要營運策略，今年 7 月才以 25 億美元併購南非鈾礦大廠 UraMin，一舉掌握非洲主要礦源。該公司計畫在 2015 年達成全球最大原料鈾供應商目標。為分散、確保各核電廠燃料來源、增加營運彈性，擬建議公司應積極規劃掌握長期原料鈾之來源。

2. 由於我國依賴燃氣發電日深，天然氣用量佔全國總用量 60%，為保障公司營運，有必要逐步建立自主氣源。法商 TOTAL 石油是世界主要天然氣供應商之一，為保障未來氣源供應穩定，擬建議公司評估與渠等建立長期合作關係。
3. Areva 擁有完整的核能工業體系與先進技術，無論從前端營運、電廠技術服務到後端營運都有許多可資我國借鑑學習之處，若彼此能建立長期交流合作關係，對於提升我國核能安全與營運績效將有重要助益。
4. 過去十餘年我國溫室氣體排放成長率高居全球之冠，是世界排放平均增加率 3.5 倍。本公司每年二氧化碳排放量佔全國總排放量 1/3 左右，是全國第一排放大戶。

核能是我國最主要的潔淨能源，也是目前減緩溫室氣體排放的有效策略。但我國未來電力開發，仍以燃氣與燃煤發電為主，勢將大幅增加排放，成為本公司永續經營必須嚴肅面對的課題。

氫能源是新世紀潔淨能源的主流、是對抗全球氣候變遷最佳方案，也是本公司減少二氧化碳排放的最佳策略。

氫能源經濟分為前端氫生產與後端氫應用兩部分。後者投資成本低、有益於短期獲利；但如無法突破生產瓶頸，即使終端應用成熟，亦無濟於事。「如何以潔淨方式產生氫氣」，才是實現氫能源經濟的關鍵。

目前可行的產氫方法，不外乎電解水、高溫裂解水蒸氣與核能產氫等 3 種途徑。但前二者都會排放大量溫室氣體⁸。只有「核能產氫」⁹是「以潔淨方式、生產潔淨能源」的唯一整體解決方案。

⁸ 電解產氫過程仍然需要大量電能，如果供電來自傳統火力電廠，將排放更多溫室氣體。高溫裂解水蒸氣，係將水蒸氣通過高溫燃燒的天然氣，生成 CO 與氫氣。一樣會產生大量二氧化碳。

⁹ 所謂「高溫熱化學產氫」技術，係以核反應產生的高溫，以硫酸與碘為中間產物，分解水產生氫氣與氧氣的過程。一般分為 3 個反應步驟：

(1) 以核反應產生高溫(800 - 1,000°C)，分解硫酸，產生氧氣、二氧化硫： $H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + 1/2O_2$ (吸熱反應)。

(2) 加入碘與二氧化硫、水反應，產生碘化氫： $I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2HI + H_2SO_4$ (產熱反應)

(3) 將碘化氫的碘和氫分離(200 - 600°C)，產生氫氣和碘： $2HI \rightarrow H_2 + I_2$ 。

先進國家對於發展「核能產氫」一向不遺餘力：美國能源部在 90 年代，就由能源部推動 STAR-H2 小規模產氫¹⁰；中、韓合作在高溫氣冷式反應器基礎上，發展產氫用反應器¹¹；日本原子能研究所則利用高溫試驗研究反應器（HTTR）發展產氫技術¹²，都有相當成果。據估計，一座 300 MWt 核反應器，就能年產 30,000 噸氫氣，產值高達 10 億美金。

今年 7 月，美國能源部公開徵求有意設計並發展產氫反應器的團隊，一般咸信，西屋公司將以球床模組化反應器（Pebble Bed Modular Reactor, PBMR）、General Atomics 以燃氣渦輪-模組化氦冷反應器（Gas Turbine Modular Helium Reactor, GT-MHR）、Areva 則以類似 GT-MHR 的 ANTARES 反應器參與競標。核能產氫之路已經越來越接近實現。

為確保本公司永續經營優勢、減少溫室氣體排放、保障國家電力供應安全、提升國家競爭力，擬建議本公司著手評估開發核能產氫之可行性，並進行先導型技術驗證，以為本公司未來主導我國氫能源經濟發展的戰略佈局。

5. 本次參訪 La Hague 再處理廠，發現一向被視為「萬年無解」的核廢料最終處置，早已有妥善解決方案：用過核燃料再處理後，可將其中長半化期的銻、鈾等元素分離再利用，不僅可以把廢料的輻射強度降低 10 倍，更能把廢料體積縮減成原來的 1/3。而且回收的鈾可再製成燃料使用，達成燃料循環、資源永續利用的目標，對於嚴重缺乏自主能源的我國，無疑是保障國家能源安全的一大福音。
6. 根據美國 10CFR61 與 40CFR191 規定，高放射性廢料處置場至少需保持 10,000 年完整性。用過燃料的輻射特性，詳如圖 9。用過核燃料在處置後 1,000 年內主要輻射來源是分裂產物，其後才是超鈾元素（TRU）如 U-235/238、Pu-239、Np-237 等。由於這些核種半化期太長（最短的 Pu-239 都有 24,400 年），通常要等 10,000–100,000 年，才能衰變到自然背景強度。因此能符合處置場地質要求的潛在場址選擇極少，投資也相當驚人。

¹⁰ 美國 STAR-H2 採用小型鉛冷式快滋生反應器，在 780°C 高溫下，以脫鹽作用來產生氫氣，已獲得實驗室驗證可行。

¹¹ 中國清華大學與韓國原子能研究所（KAERI）計畫在 2006 年之前，建成容量 160 MWt 的 HTR-PM 高溫氣冷式反應器，開發發電/產氫等多用途應用。

¹² 日本原子能研究所即採用前述高溫熱化學法製氫。以 HTTR 冷卻劑氦氣提供 960 °C 的熱源將水熱解。該所早在 1997 年就完成世界首次實驗室驗證；並於 2003 年 8 月進行第二階段試驗，以 36 L/hr 產率持續產氫 6.6 hr，並進行了 30 m³/hr 規模的先導試驗。最終階段將驗證 1,000 m³/h 的產氫能力。

反之，用過燃料經再處理、移除長半化期核種後，可大幅縮短整體輻射衰變時間，通常僅需千年即可使輻射強度降至自然背景範圍，也大幅簡化處置場設計，對於強化民眾廢料處置安全性的信心，有極重要的意義。

7. 一般質疑燃料再循環的論點，不外乎增加核子物質擴散風險與其經濟性。這在以往核燃料價格低迷、低估用過燃料直接處置費用狀況下，有其正當性。但近年原料鈾價格飛漲、處置費用預算節節升高情況下，燃料循環已具有相當經濟性。

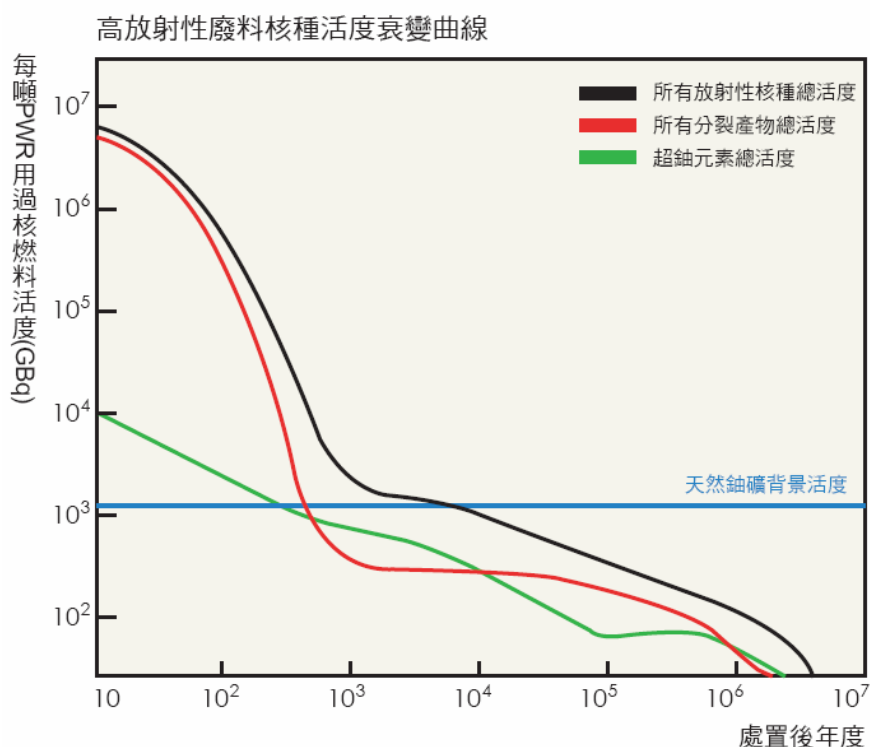


圖 9 燃料再處理可減少 10 倍放射性

Boston Consulting Group 最近重新評估燃料再循環的整體經濟性¹³。研究強調：再循環的整體經濟效益，不能只考慮燃料價格的供需變動，更必須考量因再循環所節省之處置成本。

圖 10 顯示，當鈾價 30 USD/lb-U₃O₈ 時，燃料再循環就具有正面經濟價值(美國 Yucca

¹³ Boston Consulting Group (2006), *Economic Assessment of Used Nuclear Fuel Management in the United States*.

Mt.處置場爲例)；更何況目前鈾價約 100 USD/ lb-U₃O₈，燃料再處理的經濟性已可確定。展望未來鈾價長期漲勢未歇，再處理的經濟優勢將會日益明顯。

由於我國境內很難找到如 Yucca Mt.優良地點作爲處置場，用過核燃料的後端費用可能比美國更昂貴。因此無論就減少後端處置壓力、節省後端營運費用、保障能源安全等各方面綜合考量，燃料再循環應是可深入研究的方向。

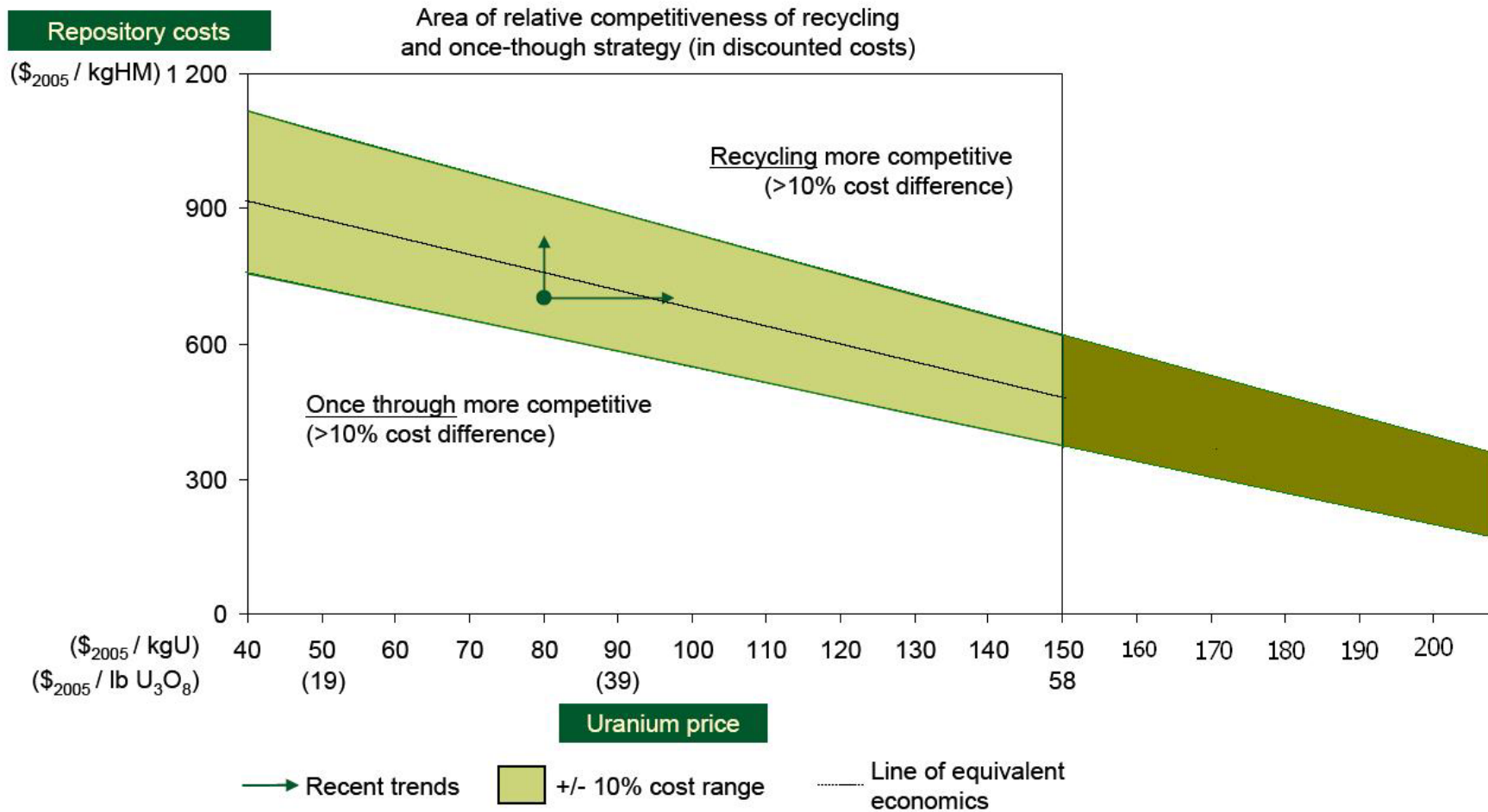


圖 10 燃料再處理於鈾價高於 30 USD/lb 時即具有經濟優勢

附圖



附圖 1 徐副總於 EURODIF 公司門前留念



附圖 2 EURODIF 公司 George Besse 濃縮廠全景



附圖 3 George Besse 廠擴散濃縮機組



附圖 4 Comurhex 轉化廠 Pierrelatte 廠區全景



附圖 5 MELOX 燃料製造廠全景



附圖 6 參訪人員攝於 MELOX 燃料製造廠



附圖 7 La Hauge 燃料再處理廠門前



附圖 8 La Hauge 燃料再處理廠全景



附圖 9 NT12.1 型用過燃料運輸容器
(可裝 12 束 LWR 燃料，內容器 60 噸、全重 110 噸)

註：本次參訪 Areva 公司各廠，受限於商業保密規定，無法近距離攝影，故圖 6-8 及附圖 2-5 與 8-9，係自 Areva 公司網站公開下載。