

出國報告（出國類別：其他：研習）

參加義大利 SOGIN 機構辦理核能電
廠除役訓練課程並參訪 Caorso 核能
電廠除役實務

服務機關：行政院原子能委員會
放射性物料管理局

姓名職稱：陳文泉簡任技正、馬志銘技士

派赴國家：義大利

出國期間：105 年 11 月 5 日至 11 月 18 日

報告日期：105 年 12 月 20 日

摘 要

當前政府致力推動非核家園的政策目標，現有的三座核能電廠到達運轉年限後如期進行除役，而核四廠也已封存不再興建。台灣最早的核能一廠從 67 年開始運轉，預定到 107 年運轉滿四十年，屆時就將進行除役，目前各相關單位已經展開除役的準備作業。台電公司並依核子反應器設施管制法要求，於 104 年 12 月提出核一廠除役計畫，原能會目前正審查中。

義大利原有四座核能電廠，分別為 Garigliano 沸水式核能電廠、Latina 氣體石墨冷卻式核能電廠、Trino 壓水式核能電廠、及 Caorso 沸水式核能電廠，均已於 1987 年前完全關閉並進行除役中。另外義大利核燃料製造廠及用過核燃料再處理廠等核設施均已停止運轉，義大利經濟發展部初步規畫於 2024 年前完成所有核設施的除役。因為義大利核能電廠除役計畫實施已久，因此在設施除役的規劃、除役技術的建立、管制機關的規範、除役廢棄物的管理，值得我國推動核能電廠除役作業規劃階段參考學習。

本次研習，除了在義大利核設施除役與核廢料管理專責機構 SOGIN 公司進行相關課程研習外，也安排到義大利的 Caorso 核能電廠參訪，實地了解義大利除役作業，並與現場工程師訪談諮詢，有助於深入了解核能電廠的除役實務。

關鍵字：Caorso 核能電廠、SOGIN 公司、除役

目錄

摘要.....	i
目錄.....	ii
一、 目的.....	1
二、 出國行程.....	2
三、 研習心得.....	45
四、 建議事項.....	71

一、目的

政府當前致力推動 2025 非核家園政策，國內三座核能電廠將於運轉執照期限(40 年)到期後陸續進行除役，依據核子反應器設施管制法規定，台電公司核一、二、三廠應分別於 104 年底、107 年底、及 110 年中底前向原能會提報除役計畫，申請除役許可。因此從 107 年底核一廠開始進行除役後，國內將逐步邁入除役作業的高峰期，本次參訪見習三項目的如下。

1. 義大利早於 1987 年開始國家政策決定核能電廠關閉不運轉，並採行延後除役(Safestore)的策略，直到 1999 年政府成立核能電廠除役及核廢料管理專責機構(SOGIN)，除役策略改採為一步到位策略(single step strategy)，將儘早拆除老舊核能電廠並移除所有放射性物質，預定於 2024 年前規劃全部除役完畢。為能執行多項核設施的除役作業，SOGIN 投入大量人力進行除役技術的研究發展，並對於放射性廢棄物分類系統進行變革，義大利對於相關除役作業規劃思惟與執行方式，值得國內除役作業執行單位參考與學習。
2. 義大利目前放射性廢棄物最終處置計畫仍在執行，目前產生的廢棄物暫時貯存於原場址，未來將透過公眾參與方式尋求中低放射性廢棄物最終處置場，該場址並作為高放射性廢棄物的集中貯存場所。國內台電公司對於放射性廢棄物管理作法也與義大利 SOGIN 相似，放射性廢棄物暫時貯存於電廠內及蘭嶼貯存場，未來也要逐步推動集中貯存方案與最終處置計畫，因此義大利 SOGIN 推動處置計畫的作法，也是本次研習的重點項目之一。
3. 利用本次研習的機會，主辦單位安排參訪見習 Caorso 核能電廠，實地了解 SOGIN 除役作業情形，並與現場的工程師訪談諮詢，了解義大利除役實務，有助於掌握國內未來核能電廠除役的相關安全管制要項。

二、出國行程

本次出國相關行程概要、研習課程與 Caorso 核能電廠除役作業見習行程分別以表格與簡要文字概述如下。

(一)行程概要

日期	地點與行程	工作內容
105 年 11 月 5 日	台北到羅馬	去程
105 年 11 月 6 日	羅馬	去程
105 年 11 月 7 日	羅馬	參加 SOGIN 核能電廠除役訓練課程
105 年 11 月 8 日	羅馬	參加 SOGIN 核能電廠除役訓練課程
105 年 11 月 9 日	羅馬	參加 SOGIN 核能電廠除役訓練課程
105 年 11 月 10 日	羅馬	參加 SOGIN 核能電廠除役訓練課程
105 年 11 月 11 日	羅馬	參加 SOGIN 核能電廠除役訓練課程
105 年 11 月 12 日	羅馬	整理受訓資料
105 年 11 月 13 日	羅馬到米蘭	轉機
105 年 11 月 14 日	米蘭	參訪 Caorso 核能電廠除役作業
105 年 11 月 15 日	米蘭	參訪 Caorso 核能電廠除役作業
105 年 11 月 16 日	米蘭	參訪 Caorso 核能電廠除役作業
105 年 11 月 17 日	米蘭	返程
105 年 11 月 18 日	米蘭到台北	返程

(二)SOGIN 總部的核能電廠除役訓練課程

日期	課程綱要
11 月 7 日	<ol style="list-style-type: none"> 1. General aspects of decommissioning and Radioactive Waste Management 2. Regulatory activity for Radioactive Waste Management and Decommissioning in Italy 3. Management systems in decommissioning activities 4. Evolution of quality assurance in decommissioning activities 5. Policy, strategy and requirements for Decommissioning and waste management
11 月 8 日	<ol style="list-style-type: none"> 1. Decommissioning organizational aspects. Planning and project control. Strategy alternatives and selection criteria of

	<p>decommissioning</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Decommissioning cost assessment (at various stages and with various objectives) 3. The environmental impact study (content, implementation, examples) 4. Radiation protection aspects during decommissioning and Radioactive Waste Management
11 月 9 日	<ol style="list-style-type: none"> 1. Size reduction (cutting) : Strategy and plan 2. Size reduction techniques 3. Decontamination: Strategy and plan (Chemical, electrochemical, mechanical etc.) 4. Decontamination techniques 5. Dismantlement strategies and techniques: Selection of best techniques for the specific jobs 6. Performance of various techniques 7. Management of large components
11 月 10 日	<ol style="list-style-type: none"> 1. Radioactive waste management : Treatment/conditioning process of the radioactive waste 2. The Waste Management Facility: Design, optimization, equipment, operation 3. Waste minimization techniques 4. Storage and Disposal of RW 5. Waste Acceptance Criteria for the disposal of radioactive waste 6. NPP radiological characterization 7. Waste Characterization 8. Characterization of material for clearance: Final site survey for site release
11 月 11 日	<ol style="list-style-type: none"> 1. Stakeholder involvement and decision making in RWM 2. Safety assessment of decommissioning activities 3. Operational Experience Feedback in decommissioning 4. Safety culture in decommissioning and brainstorming techniques 5. Presentation of test (case study)
11 月 12 日	Review the document for learning in Caorso NPP.

(三)Caorso 核能電廠現場除役作業見習行程

日期	見習內容綱要
11 月 14 日	1. Presentation of Caorso NPP decommissioning activities:

	<p>Explanation of the visit plan in Caorso NPP</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Discussion about case study results 3. The decontamination of the primary circuit in the reactor building 4. Plant visit: The control room, the characterization lab, the reactor building(excluding fuel pool floor)
11 月 15 日	<ol style="list-style-type: none"> 1. Explanation of the visit plan of the day 2. Visit to the temporary repositories (ERSBA1, ERSBA2), with reference to their demolition and reconstruction 3. External tour (Off Gas building, RHR Building) 4. Visit to ERSMA, with reference to treatment of ion exchange resins 5. Practical experience of characterization of a waste drum 6. The Waste Management Facility in Turbine Building 7. Current works in the buffer areas 8. Practical experience of a measurement for free release
11 月 16 日	<ol style="list-style-type: none"> 1. Explanation of the visit plan of the day 2. Video about loading and expedition of fuel casks 3. Visit to the parts of the plant interested by fuel cask preparation: Decontamination and extraction of fuel racks from the fuel pool 4. Final questions and answers and course material distribution 5. Closure of the course and farewell

(四)SOGIN 總部受訓課程及 Caorso 核能電廠現場除役作業見習行程概述

本節將逐日概述本次赴義大利 SOGIN 總部受訓課程及 Caorso 核能電廠現場除役作業見習的情形。

2016 年 11 月 7 日

本日至義大利羅馬的 SOGIN 總部，開始接受有關義大利核能電廠除役與放射性廢棄物管理之相關課程的訓練。本次見習首先要感謝 SOGIN 同仁 Carlo Rusconi 博士的協助，並安排此次所有課程，圖 1 為與 Carlo 博士的合影。



圖1. Carlo Rusconi博士與本局受訓人員合影

在 11 月 7 日上課前，由 SOGIN 公司的國家處置場及技術處(Division National Repository & Technology Park) Angelo Paratore 副處長，代表該公司致詞歡迎台灣學員前來參訓並預祝受訓順利。Angelo Paratore 先生準備有關 SOGIN 公司的簡報，說明 SOGIN 公司是在 2001 年正式營運並於 2004 年集團化，總員工人數超過 1000 人。主要負責的業務是義大利核能電廠的除役與放射性廢棄物管理，也負責國家處置場的選址、設計與建造。對於核能電廠的除役工作，預計將花費 52 億歐元，包括場址的拆除到恢復綠地佔 37 億歐元，完成國家處置場建置 15 億歐元。

當日課程分別由 SOGIN 公司的 Bruno 先生，以及義大利核能安全主管機關 (ISPRA)的 M. Dionisi 先生擔任講師。其中 Bruno 先生講解的課程為義大利核能電廠除役與放射性廢棄物管理，其中主要內容涵蓋：

- (1) SOGIN 公司與義大利政府部門間的關聯性；
- (2) SOGIN 公司除役與廢棄物管理概念主要參考各國國際核能機構概念；
- (3) 說明義大利政府自 1980 年初期至今對於核能的策略變革歷程；
- (4) 義大利除役廢棄物分類、管理及其盛裝容器等。

這當中值得一提的是義大利除役與廢棄物管理概念，雖來自國際各核能

機構，但是主要仍是採納國際原子能總署(IAEA)與歐盟(EU)體系為主，下方圖 2 即為其管理概念的參考來源。

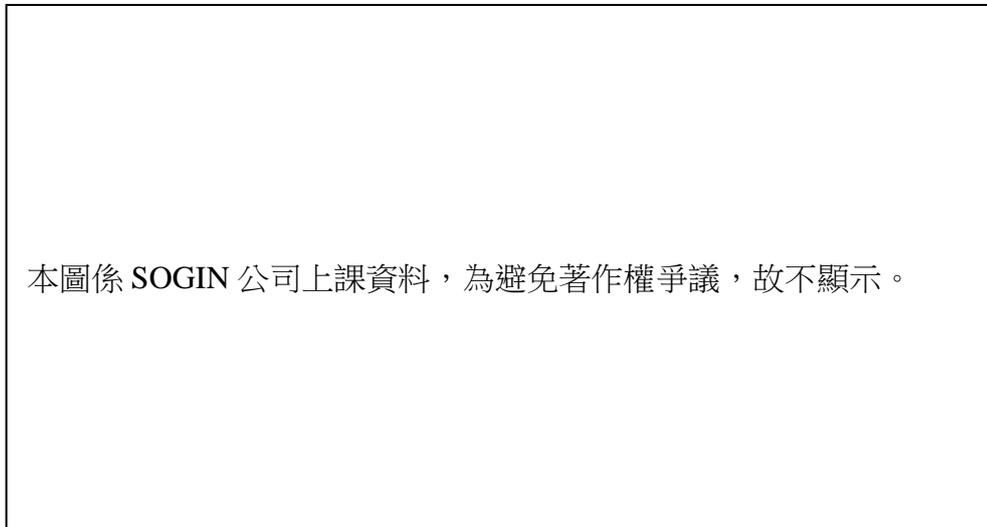


圖2. SOGIN公司除役與廢棄物管理概念參考各國際核能機構的關係圖

來自義大利核能安全主管機關的 M. Dionisi 先生，說明義大利核能體系的法規架構，而他服務的機構主要負責技術指導文件的發布。依據義大利政府對於放射性廢棄物的分類約可分為 6 大類：

- (1)豁免管制放射性廢棄物(Exemption)：核種半化期在 75 天內且比活度 < 1 Bq/g。
- (2)極低半化期放射性廢棄物(VSLW)：核種半化期在 100 天內且在 5 年內可以達到外釋標準。
- (3)極低微放射性廢棄物(VLLW)：核種比活度 ≤ 100 Bq/g (α 核種比活度 ≤ 10 Bq/g)且在 10 年內可以達到外釋標準。
- (4)低放射性廢棄物(LLW)：短半化期核種比活度 $\leq 5M$ Bq/g，Ni-59~Ni-63 核種比活度 ≤ 40 KBq/g，長半化期核種比活度 ≤ 400 Bq/g。
- (5)中放射性廢棄物(ILW)：短半化期核種比活度 $> 5M$ Bq/g，Ni-59~Ni-63 核種比活度 > 40 KBq/g，長半化期核種比活度 > 400 Bq/g。(α 核種比活度 \leq

400 Bq/g，不會產生熱能)

(6)高放射性廢棄物(HLW)：長半化期核種的活度高且會產生熱能。

在第一天課程進行中，SOGIN 公司的執行長 Luca Desiata 先生撥冗，致詞歡迎來自台灣的學員，也特別說明 SOGIN 在義大利核能電廠除役的豐富經驗，本次課程的講師不僅在法規方面，且對於放射性廢棄物管理之安全評估相當熟稔。Luca Desiata 先生最後祝福我們能藉由本次受訓課程受益良多。下圖是 SOGIN 執行長 Luca Desiata 先生的致詞情形。



圖3. SOGIN公司執行長Luca Desiata先生致詞

本日第 3 位講師是 Brogi 女士，說明內容主要是管理系統整合的介紹，及所建立系統之參考標準。而此處所說的參考標準係指需要通過三項主要的認證，包括：品質管理系統認證(ISO 9001)，環境管理系統認證(ISO 14001)及職業安全衛生管理系統認證(OHSAS 18001)。SOGIN 公司採用的管理系統均通過上述之認證，並把這個管理系統的應用套用在下列的範疇：

- (1)設計與實施核子設施的除役作業；
- (2)代表第三方在核能部門、能源部門與環境部門的工程和採購服務；
- (3)設計與提供在輻射防護和核能安全領域的培訓服務。

Brogi 女士也說明 SOGIN 公司雖然是義大利的國有企業，但是相當重視人員培訓的重要性，故在 2008 年時 SOGIN 公司成立了關於義大利的輻射和環境安全保護學校，為其所有員工制定技術培訓計畫，其目的是在除役這個領域達到卓越的水準。本次見習的義大利除役中的 Caorso 核能電廠，除了具有前述三項主要認證的管理系統，更依據歐盟法規 CE 1221/2009 註冊參加生態管理和審計計畫 (EMAS)。這是為了在核能電廠除役過程中，能導入相關的環境管理手段，以確保對於生態之影響無虞。圖 4 為全體受訓同仁與 Brogi 女士與 SOGIN 人員合照。



圖4. 與Brogi女士與SOGIN同仁代表合照

2016 年 11 月 8 日

11 月 8 日課程先由 Bruno 先生介紹在義大利之除役組織架構與計畫控制(含成本管控)。Bruno 先生說明關於核能電廠的除役組織架構是有 2 種不同版本。第一種是除役計畫已獲得核准的情況，電廠會有設施負責的經理與拆廠作業經理共同執行核能電廠的除役作業；第二種是除役計畫在等待核准的期間，電廠僅會設立一個設施負責的經理統籌全廠業務。

在計畫控制方面，則是回歸到除役的成本管控，而 SOGIN 公司在除役成本控制的内容都是參照國際原子能總署(IAEA)與經濟合作暨發展組織核能署

(OECD/ NEA)。此成本管控方法稱為「除役成本的國際架構(ISDC, International Structure for Decommissioning Costing)」，如圖 5。SOGIN 可以將一個要除役的電廠套入這個分層概念中，從底層的各项活動(activity)予以加總後往上回推，即可得到總活動所需之費用，再估算出最終除役之總成本。

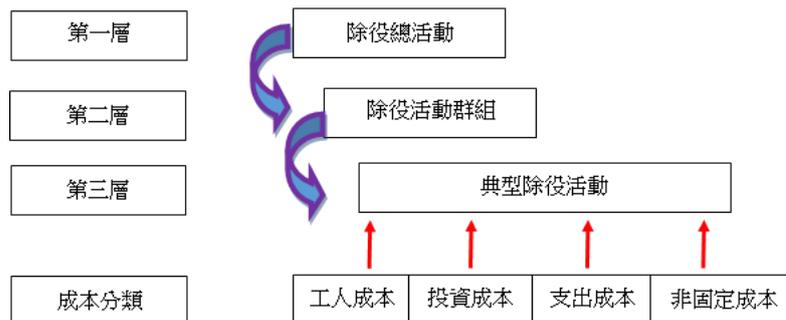


圖 5. ISDC 成本管控方法

此外，Bruno 先生介紹了德國、芬蘭、瑞典、西班牙及美國各類核子反應器壓力容器(RPV)的切割方式與技術，其中分別有熱切割技術、機械切割技術與水切割技術。這些技術皆各有其優點與缺點，並須考量下列因素：

- (1)切割所需花費的時間；
- (2)廢棄物盛裝容器的尺寸與廢棄物處理設施的系統；
- (3)爐心燃料池的空間大小；
- (4)輻射防護的考量，特別是考慮合理抑低(ALARA)；
- (5)切割後所產生的二次廢棄物產量；
- (6)執行切割的設備與成本；
- (7)總計畫時程的考量；
- (8)放射性廢棄物與二次廢棄物的處理成本。

SOGIN 公司的 Traini 講師講解除役成本評估的內容，Traini 先生指出除役成本的評估必須考量除役的策略、除役計畫與準備階段的作業、放射性廢棄物與用

過核子燃料管理、拆除的方式與時間、除役最終階段的解除執照審查、場址復原及再利用、人力及合約管理，國家處置場的建造等，其中人力管理是當中佔最大宗的部分。Traini 先生舉例 SOGIN 公司在 2006 年所做的 Trino 電廠除役各項活動費用所佔百分比，與專家評估除役各項活動費用最大、最小區域所佔的百分比比較，結果比例確實是落在專家評估區域的大小值之間(詳表 1)。而這裡的各項活動都離不開人的部分，故維持人力的開銷無疑是最大的。

表 1. Trino 電廠除役各項活動費用所佔百分比說明

最小值	除役成本群體	最大值	Trino電廠除役成本百分比
1.9%	計畫與執照申請	7.2%	4.4%
22.1%	營運與人力管理	37.6%	34.7%
15.8%	核能設施拆除作業	32.6%	19.2%
16.3%	廢棄物管理	39.2%	31.3%
7.0%	場址復育	27.3%	10.3%
除役總成本			100.0%

本日的第 3 位講師 Di Gasbarro 先生分享義大利除役時的燃料管理作業，其中在 2006 年 3 月官方確認用過核子燃料送境外再處理的政策，同年 11 月義大利與法國簽署一份合約，合約指出法國必須處理與再處理義大利電廠 235 噸核子燃料。2007 年 11 月時，義大利再次與法國簽署第二份合約，內容是接收來自 Creys Malville 核能電廠處理過的用過核子燃料中的鈾燃料。

2009 年 8 月，義大利的經濟發展部初步溝通 SOGIN 公司要處理從英國 Sellafield 核能電廠送回的體積較小的而且活度相等於中低放射性廢棄物的玻璃固化廢棄物，並妥善管理到義大利完成國家處置場。2016 年 8 月經濟發展部正式協議由 SOGIN 公司要妥善管理玻璃固化廢棄物。總之，目前在義大利的用過

核子燃料幾乎都送到境外處理，而法國與義大利的互動最為密切，其相關機構(如鐵路機關、核安全管制機關、核能工業公司等)，都會對於運送護箱的申請、運送計畫及保安等議題參與其中。

接著 Elena Bunone 講師主講義大利核能領域有關的環境影響評估(EIA)內容，他指出義大利是在 1986 年的 Law 394 中明訂要開始執行環境影響評估的作業。課程中他除了講解環境影響評估的執行方式，也說明環評報告的架構。而後則是舉一個位在義大利南部，要新建立廢液處理廠所執行環評的過程來與我們分享，說明這個廠在環評過程中須考量氣體排放、噪音產生、液體排放、對土壤的影響以及輻射等因素。結果環評因義大利環保署承受許多反對的聲浪，而無法通過。

本日最後一位講師 Roberto Falcone 介紹除役期間的輻射防護及放射性廢棄物管理，義大利是參照國際輻射防護協會(ICRP)及國際原子能總署(IAEA)的輻射防護相關報告制定其國內的輻射防護系統，而其輻射防護原則是依據 ICRP 60 號報告需要符合合理抑低(ALARA)規定，至於對於劑量限值的要求則是採用 ICRP 103 號報告的規定。

Roberto 先生說明義大利核能電廠會出現的核種有兩大類，典型的受活化的放射性核種(Typical Activation Radionuclides)及典型的受污染的放射性核種(Typical Contamination Radionuclides)如下所示，

(1)典型的受活化的放射性核種：Co-60, Ni-63, Ni-59, Fe-55, C-14, H-3；

(2)典型的受污染的放射性核種：Co-60, Cs-137, Sr-90, Ni-63, Ni-59, Fe-55, C-14, (其中錒系元素則有 U, Pu238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Am241, Cm244)

SOGIN 公司在 2000 年 12 月 31 日對其所負責的義大利境內 4 座核能電廠，

統計其受活化的放射性核種與受污染的放射性核種所佔的百分比(如表 2 及表 3)，結果顯示確實為前述 2 種放射性核種為主。

表 2. 義大利 4 座核能電廠中的的受活化放射性核種所佔百分比

		Co-60 %	Ni-63 %	Ni-59%	Fe-55%	Other %
BWR	Caorso	61.6	16.8	0.17	16.5	4.9
PWR	Trino	40.96	35.23	0.01	23.8	0.1
GCR	Latina	24	16	-	47	13
BER	Garigliano	31.1	63.1	-	4.7	1.1

表 3. 義大利 4 座核能電廠中的的受污染放射性核種所佔百分比

		Co-60 %	Cs-137 %	Sr-90 %	Fe-55 %	Ni-63 %	Ni-59 %	Other %
BWR	Caorso	64.38	0.397	-	15.1	19.2	-	-
PWR	Trino	75.6	0.51	0.041	17.95	6	0.013	-
GCR	Latina	20	34	26	19	-	-	1 alfa
BER	Garigliano	26.7	1.1	0.09	1.3	69.3	1.5	0.03 alfa

Roberto 先生在課程中所提出的放射性廢棄物管理，並分享在 Latina 核能電廠拆除與除污作業的內容，包括拆除反應器主循環管路(primary circuit pipe)及污泥貯存庫(sludge repository)並進行除污後，可分析出其中有那些核種的成分；而先執行反應器主要冷卻系統的旁通管路(by-pass lines)拆除，可以對於現場劑量及後續拆除作業得到許多資訊。圖 6 是舉例說明 Latina 核能電廠在切割一些會產生灰塵的物件時，使用防止空浮的設備進行除污。

本圖係 SOGIN 公司上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖6. Latina核能電廠在切割作業所使用的防止空浮設備

2016年11月9日

本日課程由 Bruno 先生先補充說明關於核能與環境安全下的 SOGIN 公司除役組織，包括 SOGIN 公司除役組織的依據為法令 230/95 號 46 條的規定，規定 SOGIN 公司對於核能設施的須建立一套適當的營運原則與組織，讓員工在此核能設施的試營運、正式營運及除役期間，對於設施之管理、維護及操作都能在符合保健物理與醫療防護的監控下進行。

此外，Bruno 先生也說明歐洲除役組織在建立上所需要的關鍵元素，包括了計畫經理(PM)、營運與維護(O&M)、行政組織(Administration)、廢棄物的管理(WM)、放射性與核能安全(Radiation and Nuclear Safety)，並舉了西班牙的 José Cabrerias、英國的 Sellafield 與德國 Greiswald 核能電廠除役的組織架構與我們分享。它們的組織架構如下方圖 7~9 所示

本圖係 SOGIN 公司上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖7. 西班牙的José Cabrerias電廠除役的組織架構

本圖係 SOGIN 公司上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 8. 英國的 Sellafield 電廠除役的組織架構

本圖係 SOGIN 公司上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖9. 德國Greisfwald電廠除役的組織架構

Bruno 先生本日的第 2 項課程是關於除役時廢棄物拆除與切割後物件的尺寸減小技術(Size Reduction Techniques)，首先說明沸水式及壓水式核能電廠除役時，對於反應器內部組件與壓力槽是用何種方式進行拆除與切割。例如：蒸汽分離器(Steam Separator)大部分使用鋼鋸(Hack Saw)、等離子電弧(Plasma Arc)氣化設備、帶鋸機(Band Saw)等方式進行切割，此外還有應用在那些核能電廠除役，及其使用期間。至於反應器壓力槽(RPV)本身，則多數是使用磨料水流切割(Abrasive Water Jet Cutting)技術、氧氣燃料切割(Oxy-fuel)及帶鋸機等方式進行。

Bruno 先生也列表分析，關於電熱式切割(Electric-Thermal Cutting)、機械式切割(Mechanical Cutting)與水力切割(Hydraulic Cutting)等方式之優缺點。他的總

結對於反應器內部組件適合用機械式切割，而反應器壓力槽則是仍以前述 3 種主要的切割方式為主。

Bruno 先生本日的第 3 項課程是關於除役時廢棄物的除污方式介紹，他所指出的除污方式包括有化學除污、電化學除污與機械式除污。在各個除污方式中不外乎是針對 2 大類物質來進行，如下所示：

- (1)金屬類：通常是針對其表面淺層處(very thin surface layer)進行除污；
- (2)混凝土類：通常是針對混凝土建築的深處，一般是深入數公分或更深處除污。

他說明在除役計畫中，放射性廢棄物除污的方式的考量重點包括：

- (1)減少人員的輻射曝露風險；
- (2)為了使設備與物料可以再次使用；
- (3)為了廢棄物的減容；
- (4)為了再次貯存；
- (5)貯存或是處置前的準備階段時，將非固著性污染物去除，以確保民眾的健康及安全。

而他本人也總結了放射性廢棄物除污的經驗與心得與我們分享，說明如下：

- (1)在除役時，對放射性廢棄物除污的技術會採用 2 種以上進行，決不會只用單一種方式；
- (2)為了獲得最佳化的除污，事前需對於可能的劑量、產生多少二次廢棄物以及後續的處置等先進行評估；
- (3)現地直接除污的方式是無法在劑量的吸收、除污成本及廢棄物處置上得到最佳化；
- (4)目前的化學除污方式之應用仍是對於特定案例個別處理，而我們能做的

部分是努力將現有除污過程其直接的適用性最大化；

(5)大部分應用於除污過程均為專有的(Proprietary)；

(6)對於封閉式系統(closed systems)，一次到位的除污方式與過程將會使得二次廢棄物的產生量最小化。

本日課程的第 2 位講師 Marco Andreani 用 Garigliano 核能電廠除役受污染煙囪(Stack)的拆除作業，來向參訓學員們說明 SOGIN 公司考慮的步驟。為了拆除該煙囪，SOGIN 公司列出 7 大主要步驟：

(1)發展機械人設備(Robotic Equipment)以移除污染物；

(2)發展特定工具以刮除煙囪內部表面的污染；

(3)發展特定工具做為混凝土取樣的特性調查之用；

(4)組建模型以效率與可靠性測試；

(5)執行煙囪內部表面的刮除與特性調查作業；

(6)利用風洞試驗(Wind Tunnel Tests)執行煙囪的結構分析；

(7)由上往下將完全除污後的煙囪進行拆除。

從這 7 大步驟可以看到，SOGIN 公司對於拆除煙囪是非常謹慎的，特別是在第 4 步驟中，SOGIN 公司還在廠址附近組建一個 12 公尺高的煙囪模型，其目的是測試所發展機械人的設備是否可用，並可以建立許多參數做為正式拆除主要煙囪之用。而執行風洞試驗的目的，可以先分析出高空作業時的空氣動力與壓力係數，藉此最大限度提高拆除作業時工作人員的安全，同時可避免對於地面上臨近的核能設施造成潛在的破壞。Marco 講師表示，此次拆除煙囪及除污的經驗可以回饋給 SOGIN 公司其他的核能電廠除役之參考。下方圖 10 是特定設備在煙囪模型內部執行刮除表面的污染的情形，另一張圖 11 則是執行風洞試驗的情形。

本圖係 SOGIN 公司上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 10. 特定設備在煙囪模型內部刮除表面污染作業

本圖係 SOGIN 公司上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 11. 執行風洞試驗的情形

最後一位講師 Luca Ricci 先生告訴參訓學員們，雖然 SOGIN 公司有自己的核能電廠在進行除役作業，但是 SOGIN 公司仍長期蒐集與研究國際間用於反應器壓力槽(RPV)與內部組件之拆除技術。因此他今天課程要跟我們分享 SOGIN 公司對於國際上 2 個知名的核能電廠除役的拆除工作，而這 2 座分別是 José Cabrera(或是俗稱的 Zorita 電廠，位於西班牙)電廠與 Stade 電廠(位於德國)。

一般而言，內部組件之拆除作業會因為輻射較高，國際上常用的技術是經由水下切割。然而最近的國際間趨勢對於內部組件之拆除卻開始朝向使用機械式(mechanical)的切割法，因為此方式可以減少因水下切割產生碎屑後降低能見度的問題。至於反應器壓力槽的拆除作業則是仍以 3 項主要技術為主，分別為機械式、熱處理及水力切割，而這三種方式都已經有成功的經驗。

西班牙的 José Cabrera 核能電廠是由西屋公司(Westinghouse)負責反應器壓力槽與內部組件之拆除，合約期間是在 2013 年 6 月至 2015 年 4 月，其中反應器壓力槽用了 10 個月時間將其搬到燃料池，經由水下切割處理後完成。切割所產生的廢棄物約 114 噸重，並運送到 EL CABRIL 低放射性廢棄物處置場。內部組件之拆除則是在 2010 年 9 月至 2013 年 11 月期間執行，拆除方式是以水下與機

械式切割的兩種方式合併處理。拆除後的廢棄物約 59.5 噸，高放性的廢棄物是以乾式貯存的方式處理，低放性的廢棄物則是運送到 EL CABRIL 處置場。

Stade 核能電廠是在 2005 年獲准進行拆除作業，而在 2004 年至 2005 年期間先執行全系統的除污(Full System Decontamination, FSD)作業，2007~2009 年執行反應器內部組件拆除作業，所有的工作均在水下進行，拆除後的廢棄物總重量為 85 噸，目前先裝桶存放在電廠的暫時貯存庫，待德國的 Konrad 中低放最終處置場完成後，再進行處置。而前述的全系統除污與內部組件拆除作業，均委託法國的 Areva 公司負責。下方圖 12 為 Stade 核能電廠的爐心上層組件搬運到用過燃料池的情形。

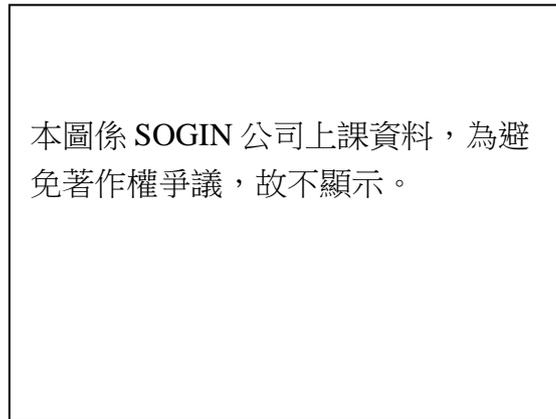


圖12. Stade核能電廠的爐心上層組件搬運到用過燃料池的情形

接下來 Stade 核能電廠的反應器壓力槽之拆除作業，則由德國的 Siempelkamp NIS 及 E.ON Anlagenservice GmbH 兩家核能工業公司共同負責。整個拆除期程是從 2008 年開始至 2010 年完成。在 2009 年時進行反應器壓力槽輻射特性調查，直到 2010 年才開始正式拆除工作。這項拆除作業使用了高功能的熱切割系統與角向磨光機配合進行，整個壓力槽被切割成 172 塊，總重量為 209 噸，然後將爐心區域的部分裝入 59 桶 MOSAIK 的貯存容器，另外的區塊則是裝入 39 個用混凝土屏蔽的鋼製容器內。

2016 年 11 月 10 日

11 月 10 日課程的首位講師是 Valentino Maio 先生，講解主題是關於放射性廢棄物的管理。因為義大利的放射性廢棄物管理是依據國際原子能總署(IAEA)報告制定，所以他說明 IAEA 的 Safety Series No. 111-F 報告中所提出的九項主要的放射性廢棄物管理原則。而後又說明 IAEA 在 2009 年時，在 GSR Part 5 的安全報告中提出對於放射性廢棄物管理的要求，再介紹放射性廢棄物的分類、外釋的規定、豁免與解除管制的規定等。

他接著講義大利的放射性廢棄物管理的實際案例，首先是在廢棄物處理上，所用的體積減容比(Volume reduction factor)是設定在 3~5，並使用超高壓縮設備來進行。他們是將 220 公升的廢棄物桶壓縮後，每 8 個會再裝入 380 公升的廢棄物桶來完成體積的減容。另外，義大利的放射性廢棄物也可以經由焚化(Incineration)來進行減容，此種方式所得到的質量減容比(Mass reduction factor)是可以達到 30，而體積減容比甚至可以高達 100。

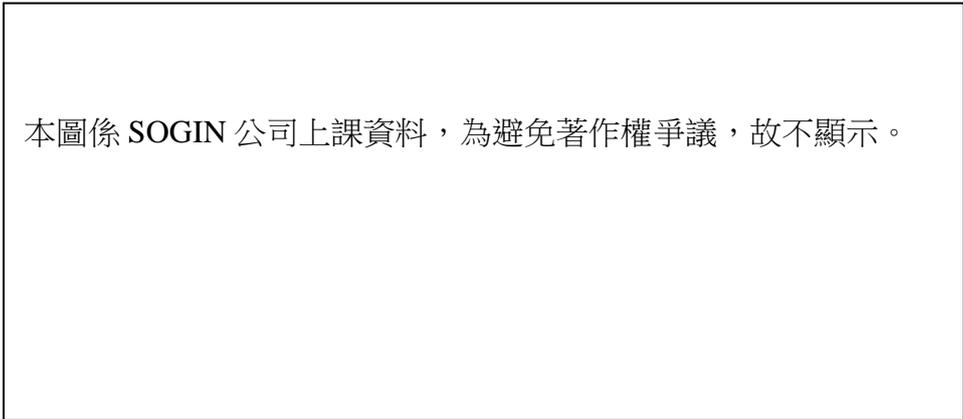
最後，Maio 先生提到在 Caorso 電廠的汽機廠房內有一個廢棄物管理設施(WMF)，可以處理電廠除役時所產生的廢棄物。下方圖 13 為 Maio 先生介紹放射性廢棄物管理的實際案例。



圖 13. Maio 先生介紹放射性廢棄物管理的實際案例

第二位講師是 Angelo Paratore 先生，他與我們分享的主題是關於放射性廢棄物的接收標準。他首先說明處置的安全原則，包括低放處置與高放處置。而有了遵循的安全原則，就可以設想情節進行處置場的安全評估。以短期的近地表低放處置場來說，一般就考慮輻射情節；至於意外的情節為包件墜落及火災；正常情節就是時間久了，工程障壁損壞；異常情節就是入侵事件與地表侵蝕。

Angelo 先生表示 SOGIN 公司必須在每年的 12 月 31 日前，將各個設施現存的放射性廢棄物的數量與活度提報給主管機關 ISPRA，而 ISPRA 則會把接收的資料建立在國家現存廢棄物活度系統(National Inventory of existing waste, SIRR)中。而義大利的放射性廢棄物的接收標準是從處置場的安全分析獲得的，故可決定放射性廢棄物要裝入廢棄物包件種類。例如低放射性的廢液必須裝入 380-440 公升的廢棄物桶，而下圖 14 所示即為 SOGIN 公司所設計用於盛裝低放射性廢液的容器，未來處置場即可直接接收。



本圖係 SOGIN 公司上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 14. SOGIN 公司設計用於盛裝低放射性廢液的容器

此外，Angelo 先生分享義大利放射性廢棄物的貯存與處置，他先提到歐盟對於放射性廢棄物的管理策略，其中歐盟的法令(Euratom Directive 2011/70)對於各會員國要求要必須解決自行產生的用過核子燃料及放射性廢棄物，並建立相關的法源與成立管理組織。接著他說明歐洲現在各國的放射性廢棄物的貯存與處置

設施，包括營運中、發展中/申請執照中、以及關閉的。至於義大利則是在 2025 年左右可能會有中低放射性廢棄物處置場，最壞的打算則是延後到 2031 年，但是深地層的放射性廢棄物處置場在未來數 10 年內仍無法完成。

義大利的地方民眾跟許多國家相同，都是反對在當地蓋處置場，甚至於興建新的貯存設施都難以接受，因此核能電廠都是採取提昇既有設施的安全或進行安全再評估，持續使用作為放射性廢棄物的暫時貯存設施。至於在 2025 年可能會有中低放射性廢棄物處置場，目前是依據主管機關 ISPRA 在 2014 年所發布的技術指導規則 n.29 進行選址作業中。

下一位講師 Luca Pizzingrilli 先生介紹除役之財務成本與義大利除役基金之來源。基本上，除役之財務成本管理有兩種模式，第一種是核能發電業者從販售電價中收取，例如美國與法國都是用這樣的模式。第二種是每千瓦小時(kWh)發電固定徵收之費用，義大利就是採用第二種模式收取除役之經費，而在義大利這樣的計價方式又稱為 A2 費率。

由於 SOGIN 公司要負責核能電廠除役的工作，所以必須提交除役活動的計畫給義大利的電力及天然氣管主管機關(AEEGSI)，然後 AEEGSI 在告知電力提供者採 A2 費率計算電價。電力提供者跟消費者收費後，會將 A2 費率所得的電價一部分撥付給義大利的環境及能源組織(CSEA)，同時 AEEGSI 也會告知該組織如何付款的方式。最後則由 CSEA 將收到的錢支付給 SOGIN 公司做為核能電廠除役的工作經費，圖 15 就是義大利除役基金的流向示意圖。

本圖係 SOGIN 公司上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖15. 義大利除役基金的流向

Luca 先生向我們說明 SOGIN 公司要負責境內 4 座核能電廠與 5 個核能設施之除役工作，上述費用經過評估需要 65 億歐元。而從 2001 至 2013 年所有的費用已經花掉 26 億歐元，接著 2014 至 2035 年尚餘 39 億歐元。

本日課程的最後一位講師是 Daniela Manes 女士，她是 SOGIN 公司輻射防護的專員，與我們分享的是關於核能電廠輻射特性調查的內容。她指出輻射特性調查的工作是除役計畫中的基本關鍵元素，在下列三個階段皆有其重要性：

- (1) 電廠過渡到除役階段：詳細的輻射特性調查作業能做為最終除役計畫版本的確認，並且估算出除役所需的經費；
- (2) 電廠拆除階段：明確的輻射特性調查，可以決定除污需要使用何種設備，亦可決定拆除的步驟如何進行。此外，對於人員劑量評估、廢棄物分類、運送及未來的處置都有影響；
- (3) 執照終止階段：輻射特性調查可以確認設施或是廠址是否符合外釋標準。

她說明在義大利所用的輻射特性調查方式是以美國使用的 MARSSIM 做為基礎，另也參考國際原子能總署的場址復育(Site Remediation)與場址外釋(Release of Site)相關報告，該輻射特性調查方式與我國台電公司將採行的方式相同。下方圖 16 是與 Daniela Manes 女士合影。

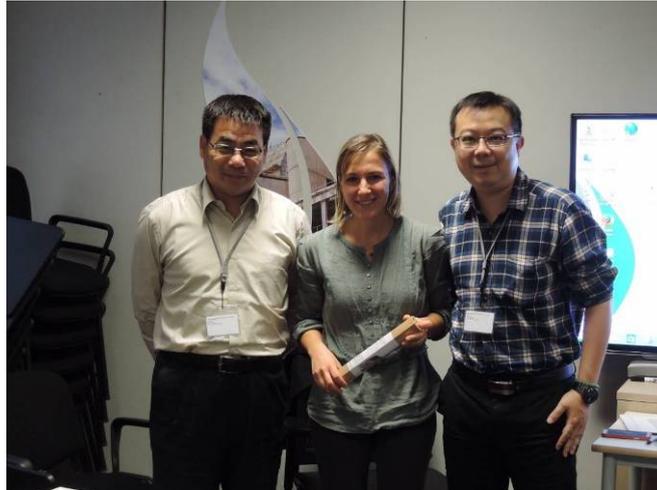


圖16. 與Daniela Manes女士之合影

2016年11月11日

本日先由講師 Daniela Marta 先生說明利害關係人參與的議題。首先他提到歐盟於 2011/70 法規指令中，要求各會員國對於用過核子燃料及放射性廢棄物的安全管理需有下列之義務：

- (1)要做到公開透明(法規 10.1)；
- (2)在決策過程中要提供民眾參與的機會(法規 10.2)；

Daniela 先生用圖 17 說明利害關係人與管制機關、放射性廢棄物產生者、國家政策間的相互關係。他同時指出此圖中幾個關鍵處，包括：

- (1)利害關係人與民眾的互動是困難的；
- (2)決策過程上有太多的不確定性；
- (3)民眾對於放射性廢棄物的管理，會因為恐懼放射性而怯步。

本圖係 SOGIN 公司上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖17. 各個利害關係人與民眾之關係圖

Daniela 先生又說明民眾與利害關係人溝通困難的原因，包括：核彈與過去美蘇之間的冷戰、石化工業燃料產業的遊說、核能研究人員與媒體及政治家的介入，甚至民眾對於放射性知識缺乏的因素都要考慮在內。而如何降低民眾與利害關係人溝通困難的方式，許多國家採用下列的方法：

- (1)利用網路來宣傳放射性知識；
- (2)從教育年輕一代的知識著手，例如從小學開始教導放射性的知識；
- (3)由放射性廢棄物的管理設施向民眾辦理放射性知識的宣傳工作。

一但降低了民眾對於放射性知識缺乏的因素後，就有機會讓民眾主動參與到放射性廢棄物的管理決策作業。Daniela 先生強調對於做好民眾與利害關係人溝通的作業，絕對沒有一體適用(No “one fits all” size)的方式，每個國家都有其成功與失敗的案例。舉例來說：南韓在低放選址作業就相當成功，讓 4 個州郡做為自願場址來參加選址，最後慶州(Gyeongju)獲得高達 90%的投票支持，成為自願場址。

第 2 位講師 Di Bartolomeo 先生說明除役活動之安全評估內容。這裡指的安全評估是由一個運轉中的核能電廠轉為要進行除役工作時應注意事項的。而所有安全評估當中值得注意的是所有運轉中電廠的安全評估項目都是除役時需要重

新檢視，包括：深度防禦概念、電廠的正常運轉及意外狀況、電廠系統結構與組件、放射性物質的管制、地震的分類等。在除役時有 3 個主要危害必須納入安全評估的，如下所示：

(1)廠內火災事件； (2)物品或物件墜落事件； (3)液體洩露事件。

Di Bartolomeo 先生表示電廠除役時，SOGIN 公司所引用的安全分析法仍然是參考國際原子能總署的報告，而後在實施時轉換為自己的方式。在安全分析方法，SOGIN 重視的是主要危害分析(PHA)，對於主要危害分析的步驟：

(1)決定主要危害分析的先決條件； (2)危害事件的確認；

(3)危害事件的發生頻率； (4)危害事件嚴重性的等級；

(5)危害事件的發生頻率的等級； (6)風險排序；

(7)危害事件的發生機率； (8)檢視所有危害分析的評估過程。

上述危害分析的步驟，SOGIN 公司在執行電廠除役安全評估時，也會導入危害操作法的概念。這個概念在說明所有可能的危害是可以被操作的，而如此一來就可以降低危害發生的可能。圖 18 是 Di Bartolomeo 先生上課的情形。



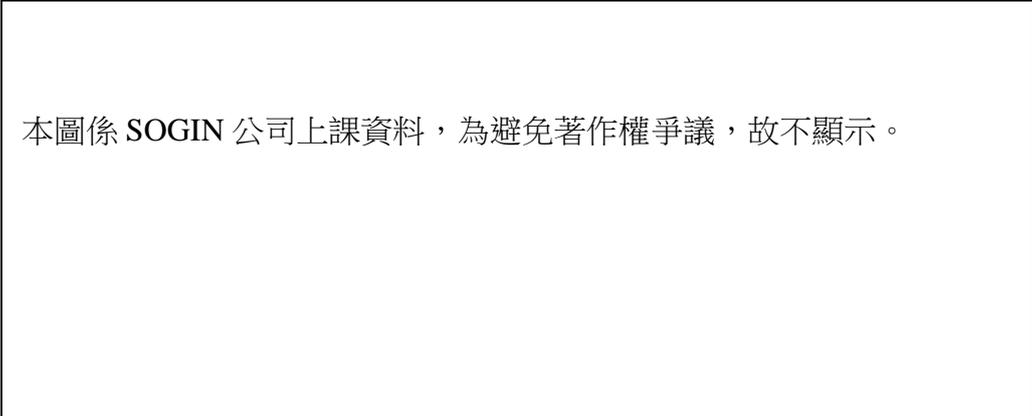
圖18. Di Bartolomeo先生說明除役活動之安全評估內容

本日的第三位講師是 Paolo Fargione 先生說明的主題是將核能電廠運轉時的經驗回饋到除役作業。首先如何收集核能電廠運轉時的經驗將是一個關鍵，這就

需要建立一套系統將電廠營運時所發生的事件，以及事件的特性都紀錄下來。此套系統有一個最重要的任務，就是與核能工程師說的是同一種語言，意即要讓使用者在一個友善的界面下，獲得電廠的訊息。

再者建立此套系統，一定要輸入電廠運轉時的案例發生基本原因(Root Cause)與嚴重等級(Severity)。舉例來說，造成案例發生的基本原因很多，包括：電話溝通上的誤解、工作日誌記載錯誤、人機界面訊息錯誤、工作環境不良、人員組織調整、訓練認證不確實、系統設計變更、裝備工具使用不當、外在因素的影響(暴雨、洪水、火災)等。至於嚴重等級方面，義大利則參考國際原子能總署制定的核能事故 0~7 級來劃分。

最後，Paolo Fargione 先生分別用了反應器冷卻水泵的軸承斷裂(RCP Shaft Break)以及柴油發電機(Diesel Generator)補充油料時的污染事件做為案例，說明如何系統化的分析。做為一個運轉員必須知道這樣的事件會造成什麼設備的影響、RCP 是屬於何種系統、造成這事件的原因、它會造成核能事故等級等。一但這些資料被詳實記載到系統中，對於回饋到除役作業時，會有許多助益。圖 19 是 RCP 軸承斷裂的系統分析資料。



本圖係 SOGIN 公司上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖19. RCP軸承斷裂的系統分析資料

本日最後一位上課的講師是 Carlo Rusconi 先生，他主辦這次來義大利受訓的活動。Carlo Rusconi 先生講授的主題是關於除役的安全文化，並且從幾個有趣圖中要讓我們進行腦力激盪。首先他說有一種新的方法可以快速的讓電廠的員工得知安全的規範，這方法就是像老師發給學生各種不同的卡片，卡片中會記錄不同的事件，例如：有害物質是那些，讓員工提前知道；又例如將某個區域的輻射劑量寫在卡片上，讓員工前往工作時隨身攜帶，這樣可以避開許多風險。

他更用了廚房及修車廠當示範，告訴我們到了廚房是否知道瓦斯爐是危險的，那在修車廠時是不是也要注意隨時會開進來的汽車呢？回過頭來，當你進入核能電廠前，是否也能預先想到可能的危害而將風險降到最低？接著他又用了下方圖 20 來問我們大家，能否從圖中看出什麼不一樣的地方，或是圖中有隱藏著什麼潛在的危害呢，

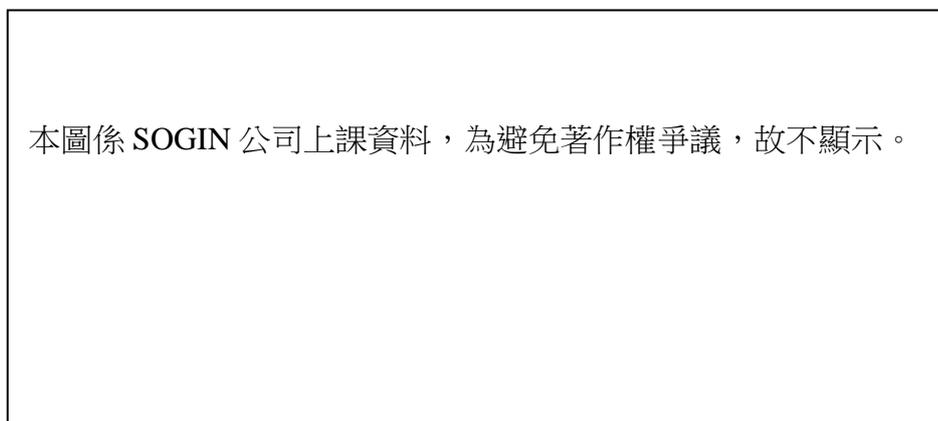


圖 20. Carlo Rusconi 先生用兩種幾乎相同的照片與我們分享安全文化

而後答案揭曉，這圖的左右兩張幾乎是一樣，但是研究發現某些人可以找出些許的不同之處。此外，更有人可以從圖中找到好幾種潛在的危害。這個簡單的圖分享隱含著一個重要的安全概念，就是不能僅憑著會出現在眼前的「明顯危害」來進行防範，每個人對於危害都必須多一份“心眼(mind’ s eye)”，這樣才能做

到真正降低風險及提升安全文化的目的。

最後，Carlo Rusconi 先生再用旅行當比喻，他說到當你擔任駕駛要開車載朋友旅行前，你雖然擁有性能優越又安全性高(具有 ABS 及安全氣囊等)的車輛，加上自己又是開車技巧高超，但是這趟旅程有著許多障礙物及隧道，或許只依賴優越的車輛及好的駕駛技術是不夠的。你必須和一同旅行的夥伴們說明路況(意指溝通與知識分享)，確認地圖與導航的功能(意指知識管理)。檢查車輛的安全與控制系統(煞車、輪胎狀況、燈光等)，然後準備出發時還需要清理擋風玻璃並打開燈光，因為安全文化中需要清楚的視野。第一週課程結束後，所有參訓學員與 SOGIN 公司在場的同儕於教室內合影(圖 21)。



圖21. 參訓學員與SOGIN公司於第一週課程結束後合影

2016 年 11 月 14 日

11 月 14 日前往參訪的 Caorso 核能電廠，其地點是位於米蘭東南方約 1 小時車程的皮亞琴察(Piacenza)小鎮上。該電廠目前是正在進行除役作業，也是我們此次來參訪的目的。由於電廠於 1999 年之後就屬於 SOGIN 公司所擁有，電廠在除役期間就由廠址經理(Site Manager)擔任廠長一職，而 Caorso 核能電廠的現任

廠址經理是 Sabrina Romani 女士。

就像國內電廠一樣，我們參訪時必須通過換證之後，再通過旋轉門與 X-光機的保安檢查，方能進入電廠的管制區。雖然 Caorso 核能電廠是在除役的狀態也是非常重視保安議題，整個廠區基本上都有攝影管制。圖 22 為 Caorso 核能電廠大門入口處。

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖22. Caorso核能電廠大門入口處

課程開始時，即由 Caorso 核能電廠的現任廠址經理 Sabrina Romani 女士致詞並歡迎我們的到來。她先說明未來三天參訪行程的安排，接著介紹 Caorso 核能電廠的目前的除役作業。在說明除役作業前，她還是先介紹了電廠的歷史及電廠全區圖。圖 23 即為 Sabrina Romani 女士介紹電廠全區圖的情形。



圖23. Sabrina Romani女士介紹電廠全區圖的情形

Caorso 為沸水式馬克二型(BWR, Mark II)的核能電廠，為義大利最大的核能

電廠，擁有一部機組且發電容量為 860 MW。電廠在 1970 年開始建造，1977 年達到第一次臨界，1978 年 5 月與義大利國電網正式連接，並於 1981 年 12 月正式營運商轉。後來因為 1986 年 4 月所發生的車諾比核災，該電廠於 1986 年 10 月停止定期的放入燃料棒作業並且不再重新啟動，而義大利民眾於 1987 年 11 月對於核能電廠投票的結果，也是贊成不再重新啟動。

1990 年 7 月時由國家部會級的經濟規劃委員會(CIPE)決定 Caorso 核能電廠永久停止運轉，1997 年 6 月提出延遲除役(Safestore)的申請。1998 年 11 月將用過核子燃料從反應器內移除，2000 年 8 月義大利政府要求加速除役。因此，SOGIN 公司接手 Caorso 核能電廠後，隨即在 2001 年 7 月提出立即拆除的除役作業申請。但是該電廠在 2008 年 10 月才獲得環評通過，並一直到 2014 年 2 月才取得除役許可。

Sabrina Romani 女士提到 Caorso 核能電廠現階段的除役工作已完成許多項目，經由統計後如下方表 4 所列：

表 4. Caorso 核能電廠現階段除役工作的狀態

編號	除役的活動	狀態
a	用過核子燃料運送境外再處理	已完成
b	放射性廢棄物的處理	持續進行中
c(1)	汽機(Turbine)的拆除作業	已完成
c(2)	廢氣(Off-gas)廠房的拆除作業	已完成
d	餘熱移除高塔(RHR Towers)的拆除作業	已完成
e	反應器主循環系統(Primary circuit)的除污作業	已完成

Renzo Botti 先生介紹 Caorso 核能電廠除役期間的除污作業，說明當 2000 年後 Caorso 核能電廠的除役策略由延遲除役改為立即除役後，SOGIN 公司就考慮用化學除污的方式以減少除役時的劑量率。因此，開始進行除污前，SOGIN 公司也與美國電力研究公司(EPRI)合作，對於除污工作進行可行性的研究，並且蒐

集許可國際的除污經驗與文獻。

原先選擇的四大系統進行化學除污作業，經評估成本與效益後，SOGIN 公司決定對於電廠的反應器再循環系統(RRS)與爐水淨化系統(RWCU)，這 2 種由不銹鋼製作的系統才執行化學除污作業，由法國的 Framatome ANP 這間核能工業公司得標執行。這次的除污作業設定了 2 項目標，分別是：

- (1)最小的平均除污因子要達到 20：
- (2)最大的廢棄物產生量不得超過 1.9 m^3 。

這次除污作業使用了先進的化學除污方式，稱之為 HP CORD D/UV。此種方式是由 AREVA 公司所開發的，經由實際執行後發現除污效果良好，才由各國公司逐漸採用。HP CORD D/UV 的除污方式包括 4 種工序：

- (1)以高錳酸鉀氧化；
- (2)利用除污化學藥劑草酸還原高錳酸鉀；
- (3)開始除污；
- (4)將草酸以紫外線分解與淨化。

整個反應器再循環系統(RRS)與爐水淨化系統(RWCU)系統的除污期程是從 2003 年 12 月開始，於 2004 年 2 月完成。依除污結果計算平均除污因子為 204，而廢棄物產生量僅有 1.25 m^3 並沒有超過 1.9 m^3 。至於人員接收劑量率的部分，預定值為每人 63 mSv，實際值約在 51 mSv，除污的成果相當良好。圖 24 是 Renzo Botti 先生上課的情形，而總結此次成功的除污經驗，有下列 3 點值得參考：

- (1)為了獲得最佳的除污過程，該系統詳細的輻射特性調查與代表性的樣本必須儘早提供給處理的廠商。如果可行，哪些地方可能有 α 核種的污染也應該告知處理的廠商。
- (2)除役作業若要執行化學除污的方式，應在電廠永久停止運轉後儘快決定。

(3) 依據各個電廠的狀態與污染程度，採用全系統除污(Full System Decontamination)是比較方便的方式，但可以考慮反應器壓力槽是要全部一起除污或採用部分個別除污。



圖24. Renzo Botti先生介紹Caorso核能電廠除役期間除污作業

當日下午由 Silvano Ravera 先生和 F. Ghiraldi 帶我們到電廠內部進行參訪，首先參訪地點是機組的控制室。由於 Caorso 核能電廠停止運轉多年並已開始除役，控制室已經沒有運轉員在值班，但是仍安排了 2 位工作人員坐在控制室的後方監控室內，其目的就是透過廠內的監視器監看用過燃料池以及其他區域(詳圖 25)。他們表示雖然電廠已經在進行除役，但是廠內仍有許多的管制區，必須做好電廠的保安工作。

Silvano Ravera 先生帶我們參訪電廠的第二站是特性化調查實驗室，它目前的負責人是 Michele Orango 先生。這個實驗室主要是接收現場送過來的物件，並進行化學特性分析與放射性活度的量測。尤其在 2017 年上半年時，反應器廠房的拆除計畫將送主管機關審查，預計 2019 年後動工。因此，此特性化調查實驗室就扮演著相當重要的角色，特別是個別區域的取樣分析，它可以避免並降低許多輻射污染的機率。圖 26 是 Michele Orango 先生解說實驗室分析儀器的情形。

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 25. 控制室內的監看設備

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 26. Michele Orango 先生為解說實驗室分析儀器

今日的最後一個參訪地點是反應器廠房，Caorso 核能電廠自 1998 年 11 月將用過核子燃料從反應器槽(Reactor Vessel)移出後，Silvano Ravera 先生表示一直到 2007 年 12 月才開始將 1032 束的用過核子燃料運到法國的 La Hague 再處理廠進行再處理，整個運送到 2010 年 6 月才結束，這過程將反應器廠房的放射性活度減少了 99%，故參訪時許多區域幾乎都沒有任何輻射污染。不過仍要求我們要穿著白色的工作服，並且依照電廠的輻射防護規定配戴電子劑量配章(EPD)。

由於反應器廠房多數區域的放射性活度都相當低，廠內的員工就可以進行相當詳細的輻射特性調查的作業。當我們穿梭在廠房時，隨處可見被工作人員截斷的管路，又或是某個管件被塗寫號碼，或者管件某個位置被挖個洞之後又再填補回去，而這些均為廠房內經過輻射特性調查後留下的證據(詳圖 27~29)

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 27. 管件編號進行取樣

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 28. 管路截斷進行取樣

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 29. 管件被挖洞取樣後又填補處

隨後 Silvano Ravera 先生再帶著我們到反應器廠房的燃料池樓層參觀，目前這個樓層因為燃料早就移除，四周沒有看到任何的輻射防護圍籬，所以算是清潔區域。即便如此，從這個樓層的角落可以看到放置了數個收集污染廢棄物的垃圾桶(圖 30)，可見 Caorso 核能電廠對於放射性廢棄物的分類管理也相當用心。

因為此區域曾經搬運過用過核子燃料，故仍保留了大型吊具與運送容器的高壓噴水除污處理設備(圖 31~32)。另外，此處的一個空間竟擺放了許多的燃料格架(圖 33)，其型式還分為 8x10、9x10 以及 10x10 的共計三種。經詢問 Silvano Ravera 先生，他表示 Caorso 核能電廠並無乾式貯存設施，所有的用過核子燃料送法國再處理後，這些燃料格架經過除污後就暫時存放在這所謂的乾式池內。

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 30. 反應器廠房內有實施污染廢棄物的分類收集

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 31. 反應器廠房周圍擺放著燃料挪移用之大型吊具

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 32. 用過燃料運送容器的高壓噴水除污處理設備

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 33. 暫存在乾式池內的燃料格架

2016 年 11 月 15 日

11 月 15 日的行程首先參訪 2 座低放射性廢棄物貯存庫，分別是 ERSBA1 和 ERSBA2(圖 34)。進入第一座低放貯存庫(ERSBA1)前，他的門外貼著一張輻射劑量限制值，也就是說此處存放的低放廢棄物桶的劑量值是介於 0.8~850 $\mu\text{Sv/h}$ ，而另一座低放貯存庫(ERSBA2)對於低放廢棄物桶的劑量值是介於 1.3~900 $\mu\text{Sv/h}$ 。這兩座貯存庫對於存放的低放廢棄物桶的劑量值是相近的，然而它們所存放的廢棄物桶的顏色是與台灣不同的，共分為四種顏色，說明如下表 5：

表5. ERSBA1和ERSBA2貯存庫內低放廢棄物桶的分類

低放廢棄物桶顏色	廢棄物桶內容物的規定
白色桶	固化廢棄物或超高壓縮桶
黃色桶	活度大於1850 MBq
灰色桶	乾性廢棄物(DAW)
棕色桶	活度小於1850 MBq

陪同我們的 Silvano Ravera 先生說，貯存在這 2 座低放射性廢棄物貯存庫內的多數是棕色廢料桶如圖 35 所示，故而他可以與我們站在此類廢料桶旁邊進行

解說。但是也有部分的灰色廢料桶與白色廢料桶(圖 36)因為劑量較高，需要用磚牆進行屏蔽(圖 37)。Silvano Ravera 先生最後補充說，幾乎多數貯存在這 2 座低放貯存庫內的廢料桶的容量都是 220 公升，僅有少數的白色廢料桶的容量是 380 公升，這是因為它內部是要盛裝經過超高壓縮後的低放射性廢棄物。

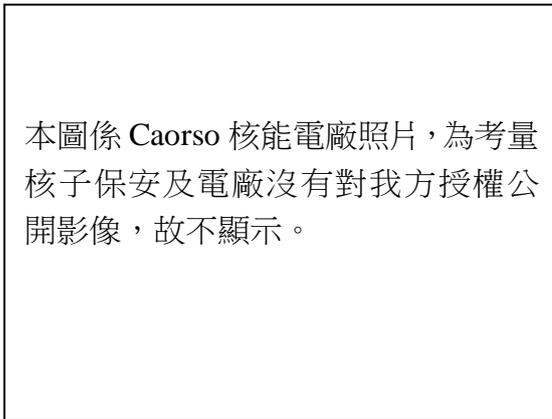


圖 34. 低放廢棄物貯存庫 ERSBA1 以及 ERSBA2

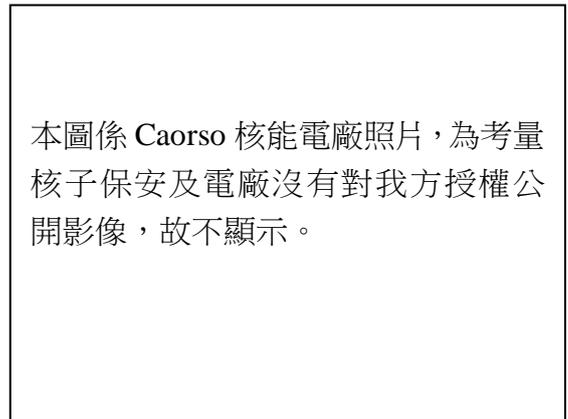


圖 35. 參訪人員在棕色廢料桶旁邊與 Silvano Ravera 先生討論

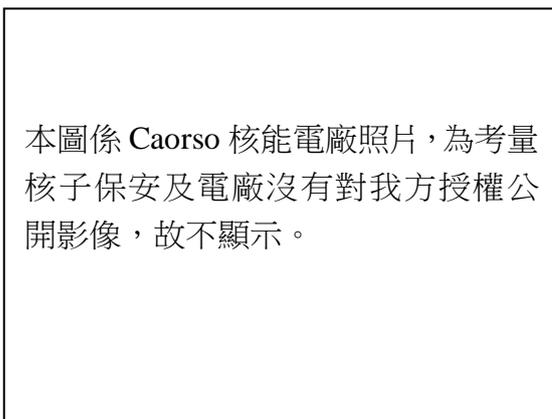


圖 36. 劑量較高的白色與灰色廢料桶用牆面進行屏蔽

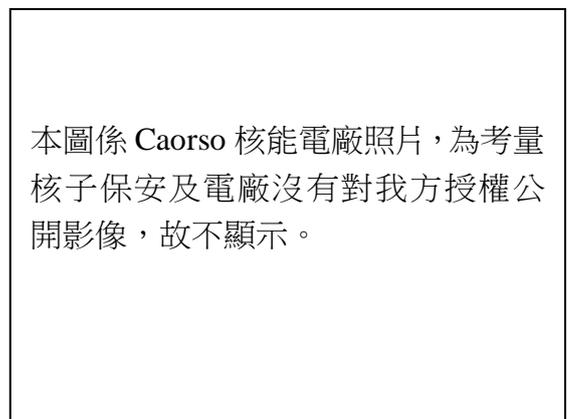


圖 37. 我們不能靠近部分劑量較高的廢料桶(在磚牆後方)

接著我們一行人跟著 Silvano 先生前往已經拆除的廢氣廠房(Off Gas Building)現地，由於拆除後的廠房經過灌漿填平後，只留下一塊空地，連排氣的煙囪都已不復見。目前上面僅放著幾只貨櫃，實在無法得知原來的模樣，所以電廠在現地架設一塊原來照片的看板(圖 38)，讓未來的人們可以知道這是何處。

Silvano 先生說明廢氣廠房的整體拆除工程是在 2013 年 12 月完成的。所有

拆除下來的物件中，混凝土佔最多量，共計 7200 噸，而且全部都已經外釋出電廠。而第二大量的拆除物件是金屬，共計 926 噸，已經外釋出電廠的數量就有 908 噸，這代表電廠對於金屬物件的除污效果良好。至於在旁邊有一棟不完整的結構物(圖 39)，Silvano 先生說明那是餘熱移除廠房(RHR Building)，因已將大部分屬於冷卻塔(Cooling Tower)結構拆除後，所剩下部分僅為原結構體的 1/4 不到。總計拆除體積為 3100 m³，重量約為 300 噸。

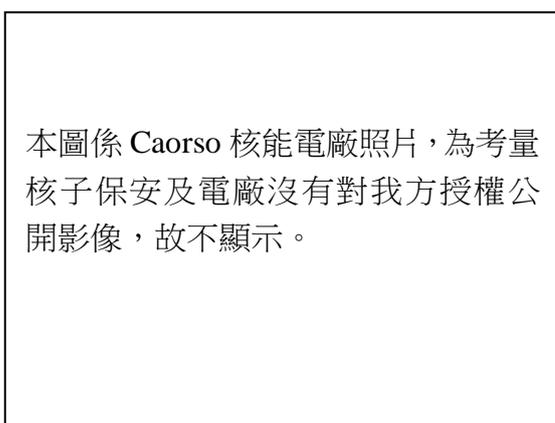


圖 38. 電廠為廢氣廠房拆除後留下一塊原貌照片的看板

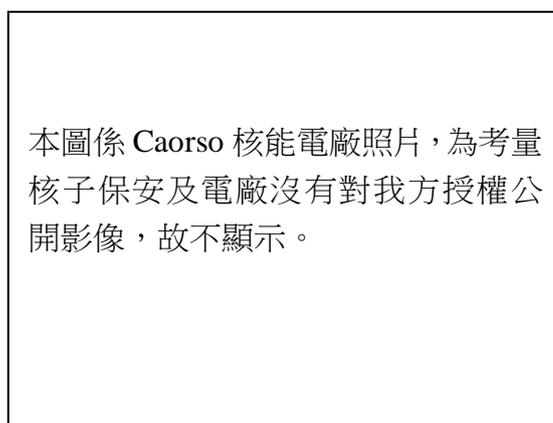


圖 39. 將餘熱移除廠房冷卻塔拆除後留下的

再來的行程是前往 Caorso 電廠的中放射性廢棄物貯存庫(ERSMA)，而為我們解說的人員為 Rossella Bongiorno 女士。不過在進入 ERSMA 貯存庫之前，他先帶我們參觀位在貯存庫外面所架設的運送前處理設施，該設施是由簡易的白色帆布所搭建而成，內部已擺放著一個運送容器，其外觀是一只可以從前方開啟之貨櫃(圖 40)。此貨櫃形狀的運送容器，它的內部可放入 48 個 220 公升的廢料桶，分別是 12 個中放廢棄物桶與 36 個低放廢棄物桶。後續存放在 ERSMA 貯存庫的中放廢棄物桶，將透過此處理設施被放入運送容器中，然後運送到捷克的斯洛伐克進行固化處理。

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 40. 貨櫃形狀的運送容器內可裝入 48 個 220 公升的廢料桶

Rossella Bongiorno 女士帶著我們進入 ERSMA 貯存庫，這是一處與 ERSBA1 和 ERSBA2 低放貯存庫完全不同的設計廠房。首先是我們看不到任何的廢料桶，取而代之的是一區區高聳的牆壁，還有停放在兩區牆壁間的大型機具。經由 Rossella 女士說明，我們看不到廢料桶是因為都存放在每一區的牆壁裡面，每一面牆都可以看到一格格方形的門蓋(圖 41)，此一格門蓋中可以存放 20 只廢料桶。

因為此貯存庫存放的是中放射性廢棄物，在牆面低層處是看不到廢料桶的貯存狀況，唯在高層處恰好可以看到廢料桶擺放的樣子，電廠是用橫向的方式放置(圖 42)。而在兩區牆壁間的大型機具，其目的是將廢料桶放入牆內貯存區的設備(圖 43)。旁邊另有部分的設備(附設夾具軌道，詳圖 44)，其目的是在廢料桶出入庫時進行劑量量測之用。最後，Rossella 女士告訴我們，目前在 ERSMA 貯存庫內存放有 1500 只的廢樹脂桶，其餘約 4000 只的廢樹脂桶因為劑量較低，目前是存放在 ERSBA1 和 ERSBA2 低放貯存庫。Caorso 電廠之後決定將 ERSMA 貯存庫拆掉重建，目前已將重建計畫送主管機關審查，等主管機關核准並將現存放在貯存庫的廢料桶都搬運出來後就會開始執行。

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 41. 廢料桶存放在方形的門蓋後方

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 42. 廢料桶是以橫向的方式放置

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 43. 兩區牆壁間的大型機具是放置廢料桶的設備

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 44. 附設夾具軌道的設備廢料桶出入庫時進行劑量量測之用

接下來再由 Silvano 先生帶我們前往飼水分佈器廠房(Feedwater Sparger Building)，此處廠房目前已被改建為廢料桶整桶特性量測實驗室。它的量測系統類似我國核一、二廠目前使用中的廢料桶量測系統(WDIS)，先是把廢料桶放入輸送帶(圖 45)，然後會經過外觀檢查區、秤重、核種分析站(圖 46)等，整個系統一次性可以量測 20 只廢料桶。Caorso 電廠除役所產生的裝桶廢棄物，未來要送國家處置場前，都可以用此套系統建立起基本核種分析資料。

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 45. 廢料桶透過此輸送帶進行後續整桶特性量測

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 46. 廢料桶正在透過 γ 核種分析站進行核種量測

本日下午由 Antonio Testi 先生為我們介紹汽機廠房的重要設施，這次參訪的地點是位於汽機廠房標高 60 公尺的廢棄物管理設施(WMF)。該設施可以說是一處複合式的廢棄物處理廠房，它建造的的目的是為了處理電廠除役拆除作業後的物件，包括廢棄物減容與除污。此設施是建造於 2008~2009 年，它使用的是 SOGIN 公司自行開發的管理系統，稱之為(DECAORSO, MIARCAO, 3D)。

圖 47 是由 Caorso 電廠提供的廢棄物管理設施內各項設備的分佈圖，圖左方是磷酸除污系統區域(PHADEA Area)，右上方是噴砂(Sandblast)除污間(圖 48)。右方噴砂除污間的下方是污染廢棄物的工作區，這裡有一間遮蔽式的白色帆布打造的金屬切割室(圖 49)，Antonio 先生說明這是為了避免廢金屬切割後產生的空浮污染。他也表示建立 WMF 設施對於電廠除役過程是必須的，因為在拆除的過程中是會產生相當多的廢棄物，這類設施對於台灣來說是值得參考的。

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖47. 廢棄物管理設施(WMF)平面佈置圖

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 48. 位於 WMF 設施內的噴砂除污設備

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

圖 49. 由白色帆布打造的遮蔽式金屬切割室

今日最後行程由 Antonio Testi 先生帶著我們移動到汽機廠房的 49.2 公尺處，這裡有一間專門量測廢棄物以符合外釋的控制室(CCA)。目前此控制室的負責人是 Michele Orango 先生，在此控制室內有 2 套 γ 核種量測設備。第一套設備是擁有 16 個偵檢器的長方體量測設備(圖 50)，又稱為箱型量測系統(Box Counter System)，根據 Michele 先生表示只需約 30 分鐘的時間，就可以獲得整個待外釋廢棄物的量測數據，唯一缺點這些偵檢頭是固定且外釋廢棄物必須裝在一個小型容器內來量測。

第二套設備是僅有 2 個偵檢器的 γ 核種量測設備(圖 51)，這套設備與前一套功能是類似的，而且量測平台上不需要將待測物品放在一個小型容器內，而且優

點是偵檢頭可以前後移動。此外釋的控制室與 WMF 設施是有一部運送貨梯相連，當廢棄物在 WMF 設施除污後，即可送到此處量測。

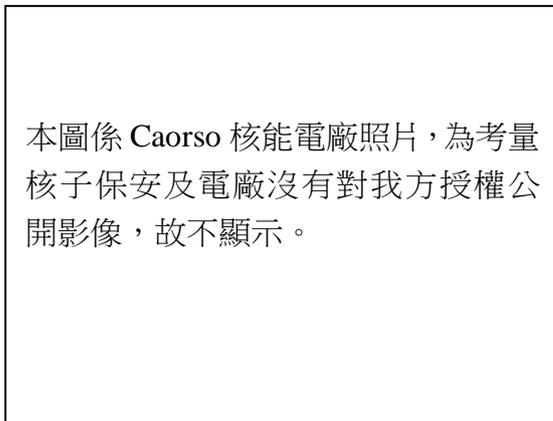


圖 50. Michele 先生介紹箱型量測系統設備

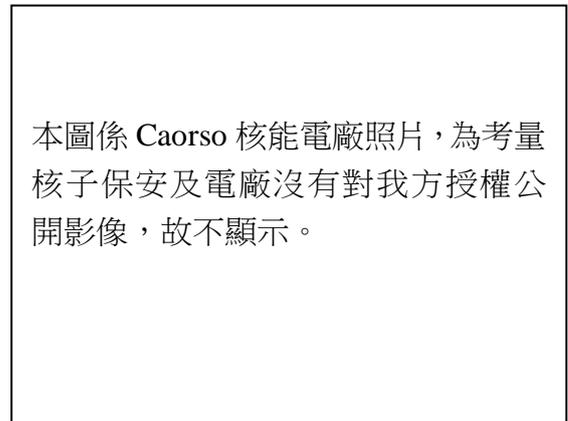


圖 51. 另一套 γ 核種量測設備(可移動偵檢頭)

2016 年 11 月 16 日

Silvano 先生與 Renzo Botti 先生於今日再次帶我們前往反應器廠房的燃料池樓層與汽機廠房參訪，在燃料池的樓層區域，我們聽取 Renzo Botti 先生說明完整的燃料移除過程，這個過程與我國在核一廠搬運用過核子燃料出廠房前幾乎相同。Renzo Botti 先生表示 Caorso 電廠所使用的運送護箱總計可裝填 17 束的燃料，每一個運送護箱裝填好燃料約需 1 週的時間。

當裝妥 4 個運送護箱之後，會用大型吊具逐一將各個護箱吊至平面樓層，再從反應器廠房平面樓的一處屏蔽門將(圖 52)護箱放到 Caorso 核能電廠的火車上，即可以火車執行一趟運送作業，運送到法國進行再處理。

接著再由 Silvano 先生帶我們前往反應器廠房底下樓層，並沿路向我們說明拆除的設備。其中有一處地點是未來 Caorso 核能電廠要把反應器廠房與汽機廠房兩處打通的連接牆，詳本局陳簡任技正站立處後方(圖 53)。打通此牆面的

目的是將反應器廠房主要系統拆除的物件，經由此連接通道運送到汽機廠房的 WMF 設施進行切割與除污作業。

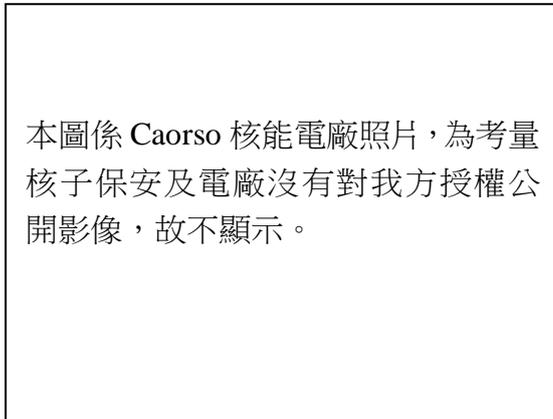


圖 52. 位於反應器廠房平面樓層的屏蔽門(燃料護箱運送出口)

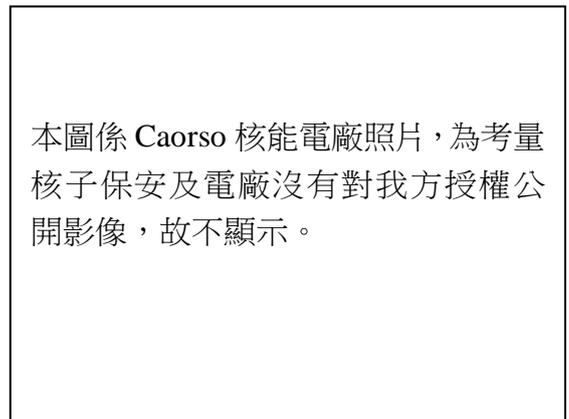


圖 53. 反應器廠房底下樓層未來要打通連接汽機廠房的樓層

本日前往第三個地點是汽機廠房下方樓層，Silvano 先生主要帶我們前往參觀超高壓縮設備的安裝廠房。首先我們都已了解汽機廠房的 WMF 設施可以進行廢金屬的切割作業，但是 Caorso 核能電廠希望將此切割後的金屬再進行體積的減容作業，於是廠方將此區域原先設備移除後直接改建為超高壓縮廠房。Silvano 先生告訴我們，目前此區域仍在進行設備安裝地點的土木工程(圖 54)，待土木工程結束後才進行設備的安裝作業。

本日參訪行程在結束後，我方代表一行人跟著 Silvano 先生前往教室集合，由電廠的主管經理 Sabrina Romani 女士及這 3 天陪同參訪的電廠同仁與我們進行問題討論。接著，我方表示要感謝這幾天電廠提供的參訪行程，著實讓我方獲益良多。最後，電廠方面由 Sabrina 女士逐一為我方參訓同仁頒發結訓證書，並與大家共同合照(圖 55)。本局同仁結訓證書如圖 56~57 所示。

本圖係 Caorso 核能電廠照片，為考量核子保安及電廠沒有對我方授權公開影像，故不顯示。

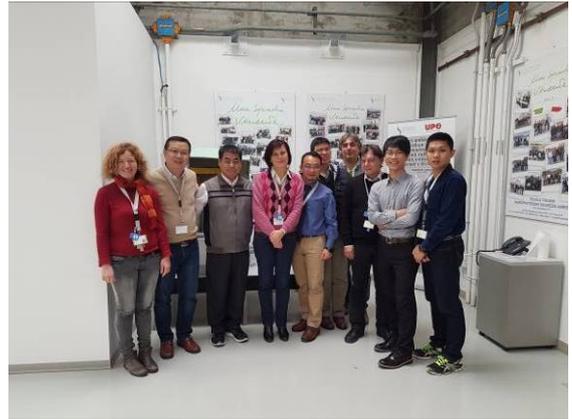


圖 54. 欲安裝超高壓縮設備之土建工程正施工中

圖 55. Sabrina 女士及電廠同仁於結訓後與我方同仁合影



圖 56. 本局陳簡任技正結訓證書

圖 57. 本局馬技士結訓證書

三、研習心得

透過本次參加義大利 SOGIN 機構辦理核能電廠除役訓練課程及參訪 Caorso 核能電廠除役實務，對於義大利除役策略及實務作法，以及義大利在核能電廠停止運轉後，放射性廢棄物的管理及處置作業，有深一層的了解。茲將此次見習活動的心得以主題方式陳述於後，作為國內未來單位在進行核設施除役及放射性廢棄物管理的參考。

一、義大利除役與放射性廢棄物管制法規

(一)法規體系

任職於義大利核能安全主管機關(ISPRA)的 M. Dionisi 先生說明義大利的放射性廢棄物及核設施除役的管制法規架構。義大利的法規架構可分為法律(Act)、部會法令(Ministerial decrees)、ISPRA 通過的技術導則(Technical Guides)、技術準則(Technical Standards)等。重要的法令規定整理如下：

Law No.1860/1962：有關核能和平使用之法規，用過核子燃料與放射性廢棄物管理是廢棄物產生者的責任。

Legislative Decrees n°225/1992：立法成立National Service of the Civil Protection
(修正n°393/1996)

Legislative Decrees n°230/1995：訂定工作人員、公眾與環境的輻射劑量限值(取代n°185/1964)，設施執照持有者應負安全責任。第55-57條規定，設施經營者除役作業前，必須向經濟發展部申請除役許可。申請過程中，ISPRA將接受環境部、內政部、勞動部、衛生部、以及當地地區的意見，整合為評估報告，提供經濟發展部作最後的決定。

Legislative Decrees n°241/2000：導入EU指令 96/29/Euratom，奠定工作人員的輻射防護和公眾基本的安全標準，該指令規定的標準納入ICRP 1990年建議。

Ministerial Decree on January 26, 2000：電廠除役及放射性廢棄物基金來源隨電費徵收。

Ministerial Decree on April 17, 2001：電廠除役及放射性廢棄物基金交由SOGIN公司管理，政府進行監督。

Legislative Decrees n°108/2001：實施1998年的Arhus公約。

Legislative Decrees n°257/2001：修正n°241/2000在修改醫、農、工、研的輻射防護規定細節。

Legislative Decree No.96/2003：有關再處理境外輸出之法規。

Legislative Decrees n°368/2003：建立高放射性廢棄物國家處置場的選址程序。

Legislative Decrees n°239/2004：將n°368/2003的範圍擴充到低放射性廢棄物國家處置場的選址程序。

Decree of 2nd December 2004：經濟發展部責成SOGIN執行核能電廠除役與放射性廢棄物管理作業，並要求SOGIN探詢將所有義大利利用過核燃料送往國外再處理的可行性。

Legislative Decrees n°282/2005：核准用過核燃料與放射性廢棄物安全管理聯合公約。

Law n°99/2009：提出新的核能政策並建立核能管制單位。

Legislative Decrees n°23/2009：導入歐盟(EU)指令 2006/117/Euratom，關於用過核燃料與放射性廢棄物監督與運送管制

Legislative Decrees n°31/2010：SOGIN必須依據法令要求的新選址程序，進行低放射性廢棄物國家處置場及中高放廢棄物貯存設施的設置、興建與運轉。

Legislative Decrees n°214/2011：廢止Nuclear Safety Agency(該機構理論上應依n°99/2009創立，但並未設立)，相關任務暫時轉移到ISPRA，直到新的管制機構成立。

Act No.27/2012：有關簡化行政程序加速除役之法規。基於經濟發展而建立一個新的程序，藉由地方的參與而降低除役作業許可階段的時間。

Legislative Decrees n°45/2014：成立ISIN (National Inspectorate for Nuclear Safety and Radiation Protection)，專職核能領域的管制業務。

Ministerial Decree Aug. 7, 2015：建立新的放射性廢棄物分類系統。

Technical Guide No.26：有關放射性廢棄物管理安全準則之導則。

UNI 9498：國家標準組織(UNI)發布之「核能電廠除役(UNI 9498)」，其中主要包含 8 個章節，概述如下：

- (1) 一般標準：提供概略性說明包含核能電廠除役必須考量的原則與因子，亦包含在管制狀態下須規劃與完成的所有程序、行政、技術類別等整體性要求。
- (2) 除污技術：規劃與執行除污作業時必須考量的原則與方法，並提供必要的技術資訊與建議。
- (3) 貯存與監管：確定核能電廠營運結束後必須完成的基本作業，使其維持在安全條件。
- (4) 結構與組件的拆除：污染結構與組件的拆除作業必須考量的原則與因子；
- (5) 放射性物質的存量：評估殘餘放射性所須遵循的方法；
- (6) 物質的輻射特性與類別：除役過程產生的物質必須考量的特性化與分類；
- (7) 核能電廠或場址部分外釋標準：核能電廠決定延後拆除作業，則將部分電廠劃分為C&M(Care and Maintenance)狀態；
- (8) 放射性廢棄物與物質暫時貯存的要求：放射性廢棄物暫時貯存所依循的標

準，並提供新的暫時貯存設施設計與管理的技術要求。

(二)低放射性廢棄物固化體品質標準

M. Dionisi 先生說明義大利對於低放射性廢棄物安定化後的品質要求，須符合 Technical Guide No.26 的規定，為此 SOGIN 必須提出低放射性廢棄物的品質與管制計畫(Qualification and Control Program)，並針對安定化後的低放射性廢棄物進行品質測試，接受標準如表 6。

表 6. 義大利低放射性廢棄物安定化後的廢棄物體品質測試要求

測試項目	廢棄物體接受標準
機械強度	至少 10MPa (UNI 混凝土破壞檢測)
熱循環測試	30 次熱循環後廢棄物體機械強度至少 10MPa
抗輻射性	經過一百萬戈雷輻射照射後，廢棄物體機械強度至少 10MPa
耐火性測試	依據 ASTM D 635-81 測試
浸出性測試	依據 ISO 6961, 1981 測試
自由液體	依據 ANSI/ANS 55-1 測試
抗生物降解	依據 ASTM G21, G22 測試，廢棄物體機械強度至少 10MPa
浸水測試	經過 90 天浸水後，廢棄物體機械強度至少 10MPa
核種濃度	不超過 TG 26 附表規定

上述測試方法與我國低放射性廢棄物均勻固化體測試項目、方法與標準相近。

(三)解除管制標準(clearance)

解除管制是核設施除役過程減低廢棄物負荷的方式。所謂的解除管制是指放射性物質或固體放射性廢棄物，若一開始就超過豁免管制值，就納入輻射管制體系。當其輻射影響衰減至可忽略程度，可解除管制，這就是一定活度比活度以下放射性廢棄物管理辦法所規範的範圍。圖 58 為解除管制品質管制作業示意圖。

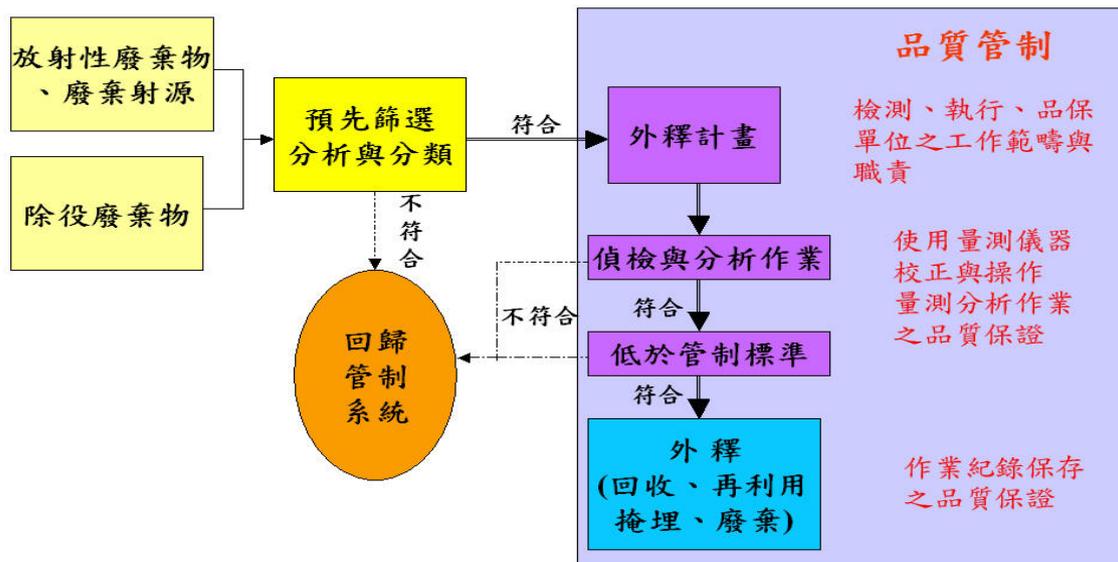


圖 58. 解除管制作業品質管制示意圖

Caorso 電廠提供義大利主管機關 ISPRA 所訂的放射性廢棄物解除管制標準，摘述如表 7 到表 9。

表 7. 義大利 ISPRA 訂定之金屬材料無條件外釋標準

核種	再利用	回收	再利用/回收
	表面濃度 (Bq/cm ²)	表面濃度 (Bq/cm ²)	重量濃度 (Bq/g)
H-3	10.000	100.000	1
C-14	1.000	1.000	1
Mn-54	10	10	1
Fe-55	1.000	10.000	1
Co-60	1	10	1
Ni-59	10.000	10.000	1
Ni-63	1.000	10.000	1
Sr-90	10	10	1
Sb-125	10	100	1
Cs-134	1	10	0.1
Cs-137	10	100	1
Eu-152	1	10	1
Eu-154	1	10	1
α 核種	0.1	0.1	0.1
Pu-241	10	10	1

表 8. 義大利 ISPRA 訂定之混凝土結構物無條件外釋標準

核種	再利用的建築	拆除建築物	再利用/拆除結構物 去除混凝土碎片
	表面濃度 (Bq/cm ²)	表面濃度 (Bq/cm ²)	重量濃度 (Bq/g)
H-3	10.000	10.000	1
C-14	1.000	10.000	1
Mn-54	1	10	0.1
Fe-55	10.000	10.000	1
Co-60	1	1	0.1
Ni-59	100.000	100.000	1
Ni-63	10.000	100.000	1
Sr-90	100	100	1
Sb-125	1	10	1
Cs-134	1	10	0.1
Cs-137	1	10	1
Eu-152	1	10	0.1
Eu-154	1	10	0.1
α 核種	0.1	1	0.1
Pu-241	10	100	1

表 9. 義大利 ISPRA 訂定之金屬與混凝土之外其他材料的無條件外釋

核種	再利用/拆除	核種	再利用/拆除
	重量濃度(Bq/g)		重量濃度(Bq/g)
H-3	1	Sb-125	1
C-14	1	Cs-134	0.1
Mn-54	0.1	Cs-137	1
Fe-55	1	Eu-152	0.1
Co-60	0.1	Eu-154	0.1
Ni-59	1	α 核種	0.1
Ni-63	1	Pu-241	1
Sr-90	1		

二、義大利核設施除役與核廢料管理管理體系

(一) 義大利核設施分布

義大利原有四座核能電廠，為 Garigliano 沸水式核能電廠、Latina 氣體石墨冷卻電廠、Trino 壓水式核能電廠、及 Caorso 沸水式核能電廠，均已於 1987 年前完全關閉並進行除役中。義大利另外有核燃料循環試驗設施(EUREX 及 ITREC)，及燃料製造廠(Bosco Marengo)等設施，目前也都永久停止運轉。義大利相關核設施分布圖如圖 59。

2008 年時義大利政府考量降低對國外能源的依賴，因此於 2009 年通過 99 號法案(Act No.99/2009)，保留重啟核能的能源選項。但在 2011 年日本福島核子事故發生後，義大利於 2011 年 6 月再次辦理全國公投，多數民眾表明反對重啟核能的提案，確立了目前的非核的國家政策，亦即廢止 2009 年 99 號法案，不再建新核能電廠，並執行既有核能電廠的除役工作。

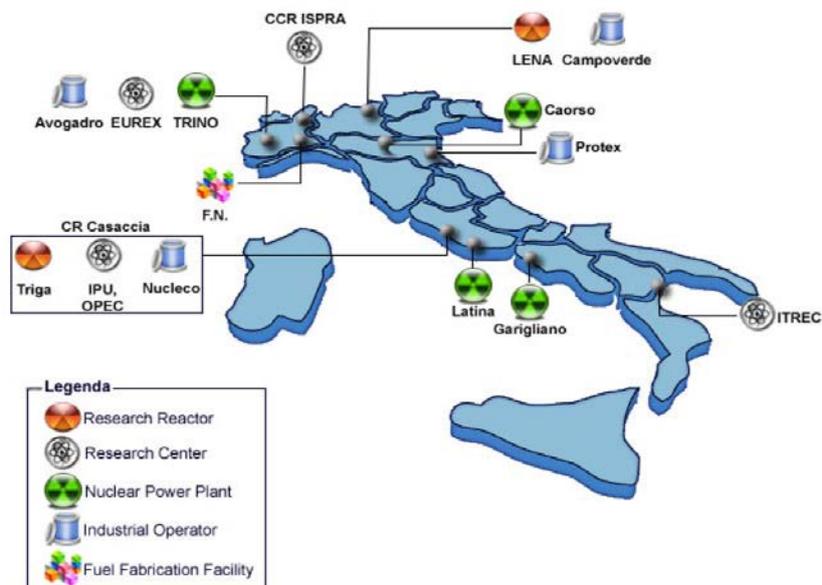


圖59. 義大利核設施分布圖

(二)義大利核廢料分類

義大利放射性廢棄物的分類，早期係由義大利國家環境保護與技術服務局 (APAT, National Agency for Environmental Protection and Technical Services)發布的技術規範 Technical Guide n°26，將義大利的放射性廢棄物分為三類：

第一類廢棄物：所含放射性核種的放射活性可以在幾個月內衰減到不致影響環境安全的標準值以下，半化期小於 1 年的廢棄物(大部分均小於 2 個月)。該類廢棄物大部分屬於研究或醫療廢棄物，可依照有毒廢棄物進行處置。

第二類廢棄物：所含放射性核種的放射活性可以在幾個世紀內衰減到大約 370Bq/g 的廢棄物主要採取近地表的最終處置方式。第二類廢棄物為處置目的進行處理後的廢棄物濃度限值如表 10，但每個廢棄物包件平均不得超過 3.7 kBq/g (100 nCi/g)。至於無法處理的第二類廢棄物，其廢棄物濃度限值如表 11。

第三類廢棄物：無法被歸類在第一類及第二類的放射性廢棄物。所含放射性核種的半化期極長，至少需要數千年才能放射活性才能衰減到數百個 Bq/g。其來源主要來自用過核燃料的再處理製程，以及混合燃料(MOX)製造、研究發展過程中產生的會釋放阿伐射線及中子的高放射性廢棄物，須採深層地質處置方式進行處置。

表10. 可處理的第二類廢棄物濃度限值

核種	濃度
阿伐核種(半化期>5 年)	370 Bq/g (10 nCi/g)
貝它加馬核種(半化期>100 年)	370 Bq/g (10 nCi/g)
活化金屬中貝它加馬核種(半化期>100 年)	3.7 kBq/g(100 nCi/g)
貝它加馬核種(5 年<半化期<100 年)	37 kBq/g (1μCi/g)
銻-137與銻-90	3.7 MBq/g (100μCi/g)
鈷-60	37 MBq/g (1 mCi/g)
氚-3	1.85 MBq/g (50μCi/g)
銻-241	13 kBq/g (350μCi/g)

^{242}Cm	74 kBq/g (2 $\mu\text{Ci/g}$)
核種(半化期<5 年)	37 MBq/g

表11. 無法處理的第二類廢棄物濃度限值

核種	濃度
核種(半化期>5 年)	370 Bq/g (10 nCi/g)
銫-137 與銥-90	740 Bq/g (20 nCi/g)
核種(半化期<5 年)	18.5 kBq/g(500 nCi/g)
鈷-60	18.5 kBq/g(500 nCi/g)

2015 年 8 月義大利採取新的放射性廢棄物分類標準(詳見義大利 Ministerial Decree Aug. 7, 2015), 其分類方式如表 12。義大利早期放射性廢棄物分類與 2015 年以後採用的放射性廢棄物分類比較如附表 13。

表12. 義大利2015年後採行放射性廢棄物分類

類別	條件與活度濃度		最終地點
豁免廢棄物(EW: Exempt Waste)	依據Legislative Decree n°230/1995第二章第154條		符合 Legislative Decree n°152/2006規定
極短半化期廢棄物 (VSLM: Very Short Lived Waste)	1.半化期<100天 2.五年內達到下列條件 (1) n° 230/1995第154條第2段規定 (2) n° 230/1995第30條或第154條第3段規定		依據n° 230/1995第33條規定暫時貯存；符合n° 152/2006的處置
非常低放射性廢棄物 (VLLW: Very low level waste)	$\leq 100 \text{ Bq/g}$ (阿伐核種 $\leq 10 \text{ Bq/g}$)	十年內可達到下列條件：n°230/1995第30條或第154條第3段規定	處置於地表或近地表具工程障壁的處置場 (處置場符合n° 31/2010)
		十年內無法達到下列條件：n°230/1995第30條或第154條第3段規定	
低放射性廢棄物 (LLW: low level waste)	短半化期核種 $\leq 5 \text{ MBq/g}$ 鎳-59及鎳-63 $\leq 40 \text{ kBq/g}$ 長半化期核種 $\leq 400 \text{ Bq/g}$		
中放射性廢棄物	短半化期核種 > 5	阿伐核種 ≤ 400	

(ILW: intermediate level waste)	MBq/g 鎳-59及鎳-63> 40 kBq/g 長半化期核種>	Bq/g 貝它加馬核種濃度 符合地表處置設施 之規定	暫時貯存於國家處 置場的貯存設施 (n° 31/2010) 將來進行地質處置
	400 Bq/g 不會產生衰變熱	核種濃度不符合地 表處置設施之規定	
高放射性廢棄物 (HLW: high level waste)	產生衰變熱之廢棄物 具高濃度的長半化期核種		

表13、義大利放射性廢棄物分類的比較

2015年後新的廢棄物分類方式	早期廢棄物分類方式
極短半化期廢棄物(VSLM: Very Short Lived Waste)	第一類廢棄物
非常低放射性廢棄物(VLLW: Very low level waste)	
低放射性廢棄物(LLW: low level waste)	第二類廢棄物
中放射性廢棄物(ILW: intermediate level waste)	第三類廢棄物
高放射性廢棄物(HLW: high level waste)	

SOGIN 的 Bruno 先生解釋義大利放射性廢棄物分類系統的變更，主要原因是為了可與歐盟其他國家的分類系統相近，俾便相互比較。為此分類系統變革，SOGIN 必須耗費 5 年以上時間投注人力，將以往已產生的廢棄物分類重新更改其分類系統。但此一作法並不影響義大利對於放射性廢棄物最終處置的規劃，原則上仍將採用地表處置中低放放射性廢棄物，以及深地層處置高放射性廢棄物。

(三)義大利放射性廢棄物與除役管理體系

SOGIN 的 Flaviano Bruno 先生，針對義大利放射性廢棄物管理及核能電廠除役的相關機關，說明如下：

1. 經濟發展部(Ministry of Economic Development)：為核能安全主管機關。負責核安、輻防、放射性廢棄物管理等之立法、監督與核發執照等。經濟發展部亦為義大利核發除役許可機關，核准依據係基於ISPRA的技術建議，以及環

- 境影響評估的評核。此外，亦要求內政部、勞動部、與衛生部提供相關建議。
2. 環境-陸地-海洋部(Ministry for Environment and Land and Sea Protection)：為環境保護主管機關。負責環境保護相關審核與管制，並參與各項執照審查。
 3. 環境保護與研究研究所(Institute for Environmental Protection and Research, ISPRA)：ISPRA為義大利的管制機關，其下設的核能-技術-工業風險處(Nuclear, Technological, and Industrial Risk Department)負責放射性廢棄物管制、導則訂定、技術評估與管制稽核等，並提供執照申請案審查意見供主管機關做為裁決參考。義大利政府在2014年依據國家法令n°45/2014法令要求，成立核安與輻防稽查署ISIN (National Inspectorate for Nuclear Safety and Radiation Protection)，專職核能領域的管制業務。
 4. ISIN：依據法令(Legislative Decree No.45/2014)將成立的管制機構。將由核能-技術-工業風險處改組而成，以脫離研究機構性質的ISPRA，成為獨立的管制機關，此作法係為符合歐盟指令(Council Directive 2011/70/ EURATOM)相關要求，成立權責獨立的管制機關。
 5. 新技術-能源-及永續發展研究機構(Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, ENEA)：義大利國立研究機構，主要研究議題包含能源效率、再生能源、核能、氣候和環境、安全與健康、創新技術、與電力系統研究，進行研發並提供技術性支援給各政府機關。
 6. SOGIN公司：1999年國營電力公司民營化時，當時的義大利經濟與財政部成立的核能電廠除役與核廢料管理專責機構(SO.G.I.N.公司, Società Gestione Impianti Nucleari)，簡稱SOGIN，負責核能電廠的除役與放射性廢棄物的處置。SOGIN目前隸屬於義大利經濟部(Ministry of Economy)，負責執行義大利政府擬訂的除役策略，目前義大利的除役最終需達場址外釋(green field)。由

於國家處置場(National Repository)尚未設置，因此除役廢棄物目前都貯存於核能電廠內特定貯存區域(blown field)。依據國家法令n° 31/2010，SOGIN必須依據法令要求的新選址程序，進行國家處置場的設置、興建與運轉，以便執行中、低放射性廢棄物的處置與高放射性廢棄物的貯存。上述相關活動的經費，係由電費中抽取費用設置基金支應。SOGIN於2004年收購Nucleco公司60%股權後成為集團公司。Nucleco公司負責小產源放射性廢棄物接收。SOGIN公司主要任務職掌包括(1)處理液體與固體放射性廢棄物，以利運往國家處置場；(2)執行管理用過核子燃料的所有作業(含運往國外再處理)；(3)執行核能電廠除役作業；(4)執行一步到位策略，於20年內完成核設施除役，以備最終處置；(5)執行國家處置場的選址、建造與運轉。

(四)放射性廢棄物存量(inventory)

(1)用過核子燃料/高放射性廢棄物部分

義大利用過核子燃料的管理，採用再處理管理策略，分別將四座核能電廠的用過核子燃料送往英國及法國再處理。在1978年以前有963.2噸鈾金屬的用過核燃料送英國再處理，當時合約高放射性廢棄物並不需要送回義大利。1978到2005年間有716噸鈾金屬的用過核燃料送英國再處理，高放射性廢棄物回運義大利。在2005年當時合約最後一批送往英國後，曾有短暫停止，但因地方反對乾貯設施，故政府於2006年3月重新考慮全部再處理，並跟法國政府達成協議，由SOGIN公司跟法國AREVA公司於2007年4月簽訂商業合約，將剩下的用過核子燃料(235 tHM)進行再處理。

Garigliano核能電廠及Latina核能電廠的用過核子燃料早已送往國外進行再處理，而Caorso核能電廠190.4噸鈾金屬的用過核子燃料則是到2010年6月，

才全數送往國外再處理。目前還有 Trino 核能電廠，規劃要到 2016 年底後才會全數運送到國外。再處理後之放射性廢棄物運回集中貯存。俟國家處置場 (National Repository) 建造完成後進行最終處置。

(2) 其他廢棄物部分

迄 2013 年底義大利國內放射性廢棄物目前於各產生地點暫貯中，多數尚未經安定化或減容處理，存量如表 14 所示。表中數量以處理後的體積估算。目前放射性廢棄物都貯存於原產生地，等待未來將來國家處置場設置後可以運送廢棄物進行處置。現行貯存期間，義大利採用提升廢棄物貯存安全的措施，包括強化 (refurbish) 現有貯存設施、與建新的貯存設施以容納除役廢棄物。

表14. 義大利其他放射性廢棄物的數量統計(以處理後數量預估)

設施	類別	VLW	LLW	ILW	總量
Caorso	核能電廠	18	1,900	0	1,918
Garigliano	核能電廠	0	2,820	0	2,820
Latina	核能電廠	421	1,970	860	3,251
Trino	核能電廠	0	1,700	130	1,830
EUREX	再處理研發	1,156	2,740	1,990	5,886
ITREC	再處理研發	285	2,550	370	3,205
OPEC 1	燃料研發	0	7	7	14
IPU	燃料研發	0	0	273	273
Bosco Marengo	燃料組裝	0	410	0	410
Avogadro	濕式貯存	0	340	0	340
NUCLECO	RW 管理	415	5,793	235	6,443
JRC Ispra	研究中心	562	7,700	1,650	9,912
Campoverde	醫療/工業	295	980	0	1,275
Cemerad	醫療/工業	1,026	230	25	1,281
Protex	醫療/工業	949	530	0	1,479
SORIN	醫療/工業	184	860	0	1,044
CESNEF	研究用反應器	0	10	0	10
LENA	研究用反應器	0	5	0	5
總數		5,311	30,545	5,540	41,396

註：1.數量單位為立方公尺(m³)。

2.再處理後的高放射性廢棄物仍在國外未運回。

(五)放射性廢棄物管理原則

義大利對於放射性廢棄物管理的原則如下：(1)依據 Act No. 1860/1962，用過核燃料與放射性廢棄物管理是廢棄物產生者的責任；(2)依據 Legislative Decree No.230/1995，設施執照持有者應負起安全責任；(3)依據 Technical Guide No.26 應考慮放射性廢棄物管理活動對後代的潛在影響；(4)放射性廢棄物管理安全應符合國際安全標準；(5)放射性廢棄物管理應採用現行最佳技術；(6)放射性廢棄物境外運輸應符合歐盟相關規定；(7)核設施拆除、除污與處理應力求減少放射性廢棄物產生並抑低數量。

義大利放射性廢棄物管理策略，包括(1)處理和安定化所有液體和固體廢物，俾利國家處置場接收；(2)廢棄物產生的電廠內，興建廠內臨時貯存；(3)規劃興建國家處置場與科技園區，足以容納義大利所有放射性廢棄物；(4)國家處置場內處置非常低放射性廢棄物；(5)在深層地質處置場設置前，在國家處置場內集中長期貯存中高放射性廢棄物；(6)除了特殊案例外(國外再處理廠不接收高濃化鈾)，所有用過核子燃料都送到國外再處理；(7)再處理產生的廢棄物回運義大利；(8)進行用過核燃料與高放射性廢棄物安全管理的研發計畫；(9)確保公眾在用過核燃料與高放射性廢棄物管理相關的決策過程中的透明和公眾參與。

運轉與除役低放射性廢棄物，基本上先在原始產生的場址暫時貯存。每個貯存設施都會加強安全管理，並等待國家處置場完成後送到處置場進行最終處置。小產源放射性廢棄物，則由政府核准的廢棄物清理廠商 Nucleco 公司代為管理貯存，等待國家處置場設立後再處置。

(六)審照程序

核能電廠除役許可申請程序，規範於 Legislative Decree No. 230/1995 第 55-57

條。依據法令規定，除役作業前須獲得經濟發展部核准，而 ISPRA 將對該除役申請案提供技術建議，包含核准除役申請的技術規範，並考量環境部(Ministry of Environment)、內政部(Ministry of Interior)、勞動部(Ministry of Labor)、衛生部(Ministry of Health)、與當地地區所表達的意見。環境影響評估的評核主要由環境與領土部(Ministry of Environment and Territory)執行，該部亦將與內政部、勞動部、衛生部、ISPRA、以及當地地區協商。

當設施經營者向各主管機關申請除役許可時，須敘明放射性物質貯存量、各階段設施狀態描述、執行相關操作的安全分析、放射性物質的規劃、除役作業對環境的輻射影響評估、與輻射防護計畫等主要資訊。收到除役許可申請後，各主管機關將提供 ISPRA 對該申請案的評論，而 ISPRA 則考量這些評論、特定條件、與規範後，擬定有關安全與輻射防護的評估。後續由各主管機關考量 ISPRA 的評估後，擬定最後評論，並由 ISPRA 向經濟發展部提送最後的建議與技術規範。最後由經濟發展部核發除役許可，代表符合 ISPRA 建立的技术規範。

除役作業進行時，由 ISPRA 肩負監管責任，而除役作業完成後，經營者須向 ISPRA 說明作業評估、場址與環境狀態，並由 ISPRA 擬定評估報告提交各主管機關提供建議。當經濟發展部接收 ISPRA 與各主管機關的評估報告與建議後，若符合技術規範要求則核准場址外釋。義大利核設施除役執照申請流程圖，詳如圖 60。

核電廠除役執照申請審核流程

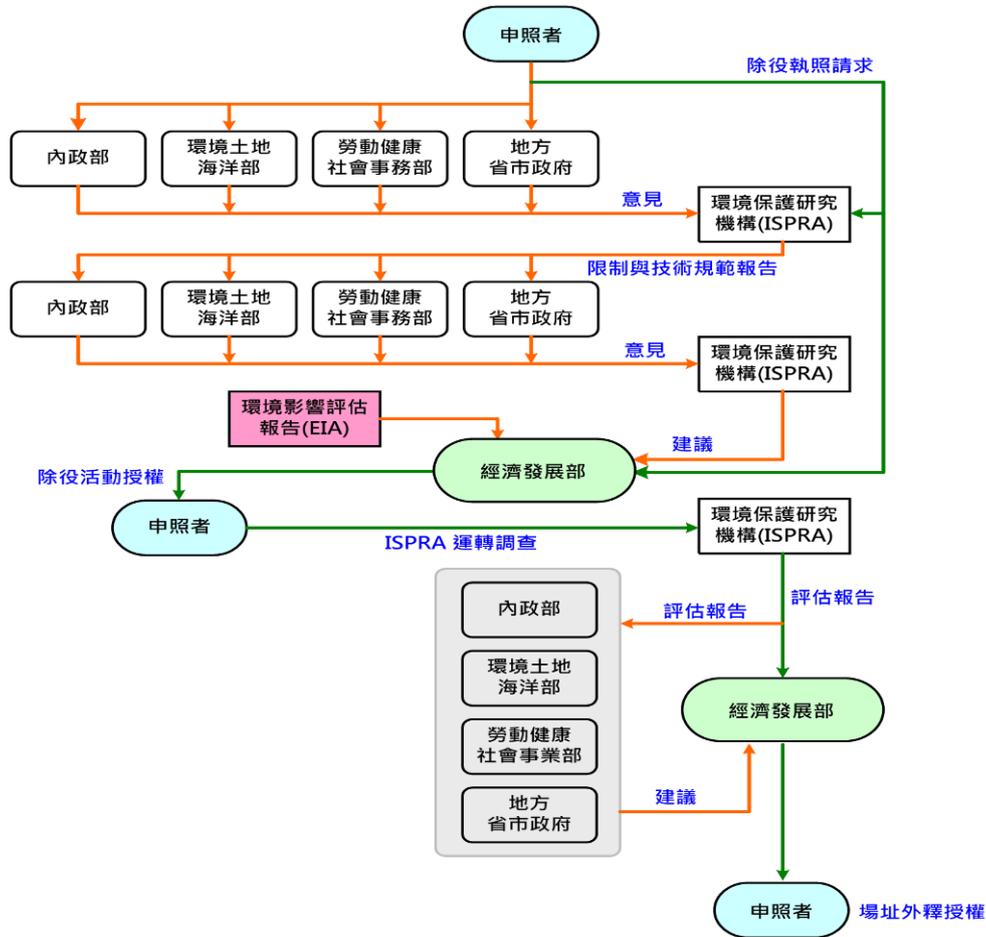


圖60. 義大利核設施除役審照流程圖

(七)後端基金

義大利於 1962 年由當時的 ENEL 電力公司設立核設施拆除及用過核燃料處理與處置基金，以支應除役作業及放射性廢棄物管理需求。在 1999 年 SOGIN 成立後，該基金約 7 億 5 千萬歐元於 2011 年移交給 SOGIN 應用，並重新設立專項基金供電廠除役及放射性廢棄物處理、貯存、與處置等各項作業所需。

資金來源係依據行政命令 Ministerial Decree on January 26, 2000 隨電費徵收，前述行政命令之後修訂為 Ministerial Decree on April 17, 2001，將基金交由 SOGIN 公司管理，政府進行監督。SOGIN 公司每年須根據除役計畫及用過核子

燃料與放射性廢棄物管理作業估算所需費用，提報資料給國家電力、燃氣、與水力管理局(AEEGSI, National Authority for Electricity Gas and Water)，從年度電費中撥付基金額度。目前後端資金徵收額度相當於每千瓦 0.0003 歐元，SOGIN 每年可收取約 7500 萬歐元費用，平均每個義大利家庭為此付出 2 歐元額度的費用。

三、義大利核廢料處置計畫概況

(一)處置計畫沿革

目前義大利的放射性廢棄物絕大部分都暫時貯存在產出廢棄物的原場址。義大利放射性廢棄物處置設施的選址可追溯自 1996 年。義大利政府在西元 1999 至 2000 年間由 ENEA(Agency for New Technology, Energy and Environment)成立了一個任務編組，初期選擇 8107 個區域進行評估，其中 200 個面積大於 300 公頃的地區適合作為處置設施，直到 2002 年進一步篩選出 30 個地區具有適合的地形(geomorphological)、基礎設施和人口密度的特性。最後義大利政府發布法令確認南義大利場址為高放射性廢棄物、中放射性廢棄物、與低放射性廢棄物處置場址。該場址鄰近 Scanzano Jonico 鎮，地質為鹽層(saline)結構，深度為 600 公尺深。

然而該決定受到環保團體強烈反對，主要爭論為農業與觀光為當地經濟來源，並將相關聲明提交地方行政法院。後續雖然政府持續溝通但仍未有顯著結果。頒布法令後兩周，政府改變原有決定並於 2004 年頒布新法規(Legislative Decree 368/04)，成立專門委員會，該委員會成員由不同組織代表，其中亦包含當地利害關係者，員額為 19 人。目的係為高放射性廢棄物與用過核子燃料選擇一個合適地場址；場址須由 ISPRA、CNR、與 ENEA 於一年內完成驗證；場址設計由 ISPRA 於 120 天內核准；目標於 2009 年前完成營運的準備；SOGIN 負

責管理與實施範疇；核設施所在地區將依放射性廢棄物的貯存量，每年提撥費用直到處置設施營運為止。

義大利評估的最終處置場包含近地表及深地層二種。除選址基準外，該專門委員會尚須建立下列各項管制技術：

1. 放射性廢棄物的資料系統；
2. 廢棄物的長期安全性；
3. 不少於300年的監管期(含主動監管與被動監管)；
4. 監管期間結束後，最終處置場資料紀錄仍需有效保存措施；
5. 一般民眾接受到的輻射劑量必須限制在不高於0.01 mSv/y。

在最終處置場啟用前，所有的放射性廢棄物都將繼續暫時貯存在原產出的核設施，但義大利政府已經開始實施一些強化安全性的措施，包括某些廢棄物處理計畫、翻新現有的貯存設施及新建貯存設施。其中貯存設施的新建是為了因應除役所需。

義大利國家法令 n° 31/2010 要求 SOGIN 必須依據法令要求的新選址程序，進行國家處置場的設置、興建與運轉，該設施必須符合國際原子能總署(IAEA)、義大利主管機關、及義大利策略環境評估(Strategic Environmental Evaluation)的結果。選址程序已於國家法令 n° 31/2010 有所規範，ISPRA 的 Nuclear, Technological, and Industrial Risk Department 訂定中低放處置設施的選址技術規範，而 SOGIN 將提出潛在合適區域(CNAPI, National Map of Potentially Suitable Areas)。

目前處置計畫仍在環境土地海洋部及經濟發展部審查中，處置計畫依國家法令 n° 45/2014 會包括環評程序。

(二)國家處置場計畫

義大利的國家處置場(National Repository)規畫為一座以工程障壁為主，符合國際原子能總署標準的地表處置場，該處置場預定可處置 75,000 立方公尺的中低放射性廢棄物，並貯存 15,000 立方公尺的高放射性廢棄物。總數 90,000 立方公尺的放射性廢棄物，其中 60%廢棄物來自於核能電廠，40%來自於醫、農、工、研產生的放射性廢棄物。在國家處置場附近將規劃興建一座技術園區(Technology Park)，作為開放國際共同研究放射性廢棄物管理的研究中心。SOGIN 將負責相關的設計建造與運轉國家處置場及技術園區。

國家處置場及技術園區的選址程序需要地方參與，並符合義大利政府的法律要求。選址準則是以國際原子能總署標準及 ISPRA 所定的標準為基礎。選址作業基本上分為兩個層次，全國層次篩選與區域層次篩選。

全國層次篩選是漸次的排除不符合 ISPRA 所定標準的區域，考量如地震、水文地質、與海洋、人口密集區及國家公園的距離等。在區域層次篩選方面則是導入 ISPRA 的調查準則。綜合上述調查結果，SOGIN 會將沒有被排除的地方，提出潛在合適區域圖(CNAPI)。一旦潛在合適區域圖確認後，會通知所在區域的地方機關，表達其擔任主辦場址的意願，一旦達成主辦意願的協議後就可以開始進一步的詳細調查。這樣的選址作法，是義大利首度在全國範圍進行地方最有利條件的調查作業。

此外，SOGIN 為潛在合適區域圖(CNAPI)建立一個資料庫，內含 CNAPI 相關區域的相關資訊，包括火山活動、地震活動、地貌、水文、水文地質、地表與地下資源、人類居住情形、工業活動、交通基礎設施、環境、歷史和考古遺址等。

SOGIN 已經將 CNAPI 送給 ISPRA 審查，並完成驗證。ISPRA 並已將審查結果轉經濟發展部和環境部審定。一旦通過審核後，SOGIN 將出版 CNAPI 並進

行初步設計。下一階段，SOGIN 將辦理全國研討會(National Seminar)，邀請所有有興趣團體進行技術諮詢。並在 90 天內將全國研討會蒐集的意見回饋到修正版的潛在合適區域圖(CNAPI)，然後將修正版的潛在合適區域圖(CNAPI)轉給經濟發展部。經濟發展部會商 ISPRA 意見後，核定潛在合適區域圖(CNAPI)。一旦 CNAPI 被核定後，SOGIN 啟動協商階段，從相關地方機構取得意向書。有關國際處置場的選址程序規劃主要分為五個階段：(1)完成潛在適合地區位置圖(Map of the potentially suitable areas, CNAPI)與設施初步設計；(2)核准 CNAPI 且獲得當地機構同意；(3)場址資格和選擇；(4)詳細設計、安全分析與環境影響評估許可；(5)建造。

義大利關心選址程序過程中的公眾參與及利害關係人的溝通，主要是依據義大利法規、國際原子能總署相關規定、及歐盟相關規定(如 no. 108/2001 實施歐盟 1998 年 Aarhus 公約)。義大利國家處置場及技術園區的選址程序(詳圖 61)主要奠基於資訊、透明度與參與度。SOGIN 正發展溝通管道讓當地居民表達其自己的需求和建議。

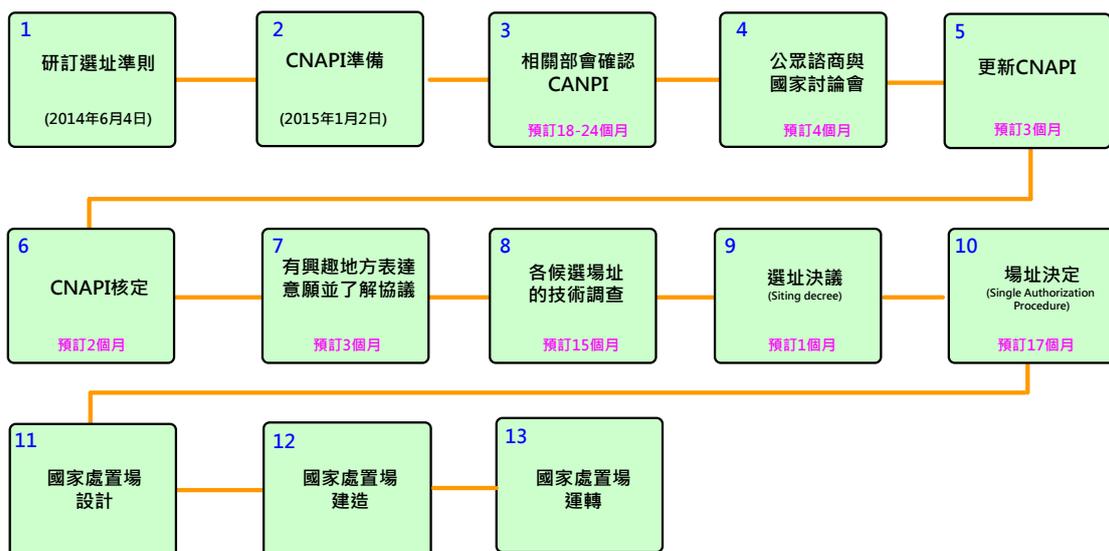


圖61. 義大利國家處置場的選址流程圖

目前 SOGIN 已依據 ISPRA 技術導則(Technical Guide n.29)，參考有關地震、水文、人口密集區、與國家公園的研究與排除標準，擬定 CNAPI，並於 2015 年 1 月提報 ISPRA，待經濟發展部與環境部核准。另一方面，亦完成處置設施的初步設計概念。未來短半化期中、低放射性廢棄物處置設施將採近地表處置方式，將廢棄物罐包封於混凝土模組內(concrete modules)，並處置於鋼筋混凝土處置窖(規格為 27m×15.5m×10m)中。

(三)義大利處置計畫執行經驗與回饋

SOGIN 公司的國家處置場計畫副主持人 Angelo Paratore 先生分享義大利處置計畫的執行經驗回饋，重點如下：

- 1.在電廠運轉階段核准實施特定廢棄物的處置方案，可能不符合除役階段後的安全標準或者已經不是最合適作法，因此建議即使在初步階段也應該進行處置可行性評估，來驗證符合現行法規標準和最合適作法。
- 2.過去早期廢棄物安定化後，仍有些廢棄物體無法達到處置場接受標準，需要重新處理與再安定化，因此 SOGIN 建議大量廢棄物在進行安定化作業之前，若有不確定因素存在情況下，應盡量延後安定化作業，並可考慮選用可再取出式的安全包裝作為替代措施。
- 3.廢棄物包件在運轉階段沒有合適的物理/化學/放射性特性化，會導致廢棄物分類錯誤或安定化作業不當，致使需要更耗時耗經費的再特性化與再安定化作業。因此建議廢棄物在產生階段，配合處理或安定化就作好特性化作業，並有適當紀錄俾利管制追蹤。
4. 目前容器或廢棄物處理方式可能不符合於未來長期貯存和處置的需求，因此 SOGIN 建議長期貯存和處置的需求導向，應盡早導入容器與處理方式的概念

設計。

- 5.核能電廠的現有廢棄物貯存容量常不足以容納運轉及除役廢棄物，又必須等待集中貯存設施或最終處置場，導致除役與放射性廢棄物管理相關作業的延宕。由於集中貯存設施或最終處置場的選址作業非常耗時，因此有必要在現有核能電廠廠內規劃設置增建中期貯存設施的貯存容量。
- 6.核能電廠除役的解除管制申請核准作業太晚完成，可能導致除役廢棄物不斷積存因而需要額外貯存空間，SOGIN 建議應盡早通過解除管制審核以盡量使廢棄物產量最少化並降低貯存需求。
- 7.不同廢棄物流(waste stream)混合廢棄物若為考量到其化學成分、毒性和放射性含量特性時，可能具有潛在長期劣化、氣體產生或增加地質處置廢棄物體積的風險，因此 SOGIN 建議廢棄物應依據處理流程、容器材質和未來的處置選項，進行適當分類、分裝與隔離。具危險性、反應性、及有機性物質應被排除或限制於地表處置之外。

四、義大利核設施除役概況

(一)除役策略變革

(1)延後除役(deferred decommissioning)策略

義大利決定停止核能發電後，1980 年代末期當時的義大利跨部會經濟規劃委員會(Inter-ministerial Committee for the Economic Planning, CIPE)要求國營電力公司(National Electricity Company, ENEL)著手準備核能電廠除役事宜，除役策略採安全貯存的延後除役(deferred decommissioning)策略。相關決策停滯多時的狀況下，促使義大利思考選擇延後除役的適宜性，包括(1)自永久停機後，輻射劑量未如預期般顯著降低；(2)場內須維持足夠的營運人員；(3)當地政府要求盡

速使場址作為其他用途。

(2)立即除役策略

1999 年在國營電力公司(ENEL)民營化的過程時，義大利工商部(經濟發展部前身)簽署核能電廠除役的政策文件，包括設置 SOGIN 公司作為核設施除役的專責機構。除役策略改為一步到位策略(single step strategy)，將儘早拆除老舊核能電廠並移除所有放射性物質。1999 年時該政策文件的主要策略包括：

1. 所有產生的廢棄物經處理後皆貯存於現有核設施內；
2. 經由中央政府和地方政府之間的協議，啟動中低放射性廢棄物地表處置與高放射性廢棄物貯存設施的選址作業；
3. 對於將除役的核設施，放棄早期安全貯存方案，改採立即除役(IAEA level 3)方案；
4. 建立國家機構來管理與處置放射性廢棄物；
5. 從發電中徵收一定額度費用成立特別基金來進行相關活動。

經濟發展部於 2001 年 1 月 26 日要求執行該項新政策，建立核能電廠與核設施除役的資金徵集計畫與程序。並要求 SOGIN 立即開始進行義大利境內所有核能電廠及核設施的除役工作，除役期限設定為 20 年。2003 年夏天，義大利經濟發展部進一步要求 SOGIN 應負責針對其他機構 (ENEA 和 FN) 的核設施進行除役。

為加速除役作業的進行，2012 年通過 Act No.27/2012，在考慮地方意見的情況下，簡化管制的行政程序。

義大利核設施除役目標是將核能電廠恢復成綠地，除役時間的規劃需考量(1)國家最終處置場之可用性；(2)除役許可及國家與地方主管機關之核准；(3)總數八個場址之最佳化計劃及知識建立專案。

(二) SOGIN 除役技術發展

SOGIN 為順利執行義大利核能電廠除役工作，內部設立核廢管理與除役組 (Waste management and Decommissioning Division)，發展可用的新除役技術，藉以增加安定化與處理系統的健全性與彈性、簡化操作降低系統複雜性、簡化維護需求、減少二次廢棄物、實施 ALARA 及降低成本的多重目標。

SOGIN 的 Flaviano Bruno 講師特別舉例介紹 SOGIN 發展的廢棄物處理模組化系統(SiCoMoR)，該系統須具有模組化/可移動性/彈性/健全性特性(詳圖 62)。簡言之，模組的每一個單元都可以移動到不同的場址；模組的每一個單元可以在不同廢棄物型態進行不同的配置的處理能力評估；在處理不同型態廢棄物時的最終產品特性應相同。惟該系統的安全分析仍在主管機關審查中，目前尚未上線運轉。

本圖係 SOGIN 公司上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖62. SOGIN發展的廢棄物處理模組化系統(SiCoMoR)

五、Caorso 核能電廠除役作業見習心得

本次見習安排參訪位於米蘭南邊約 50 公里處的 Caorso 核能電廠。Caorso 核能電廠屬於 Mark II、BWR 4 機型，電廠有一部機組(860MWe)。Caorso 電廠自 1970 年開始建造，1977 年達到臨界，1986 年停止運轉，最後在 1990 年政府(CIPE) 決定永久終止運轉，1997 年提出以 SAFESTORE(延遲除役)為除役策略的除役許

可申請。依據義大利的法規制度，雖然除役計畫仍在審查作業中，但只要除役活動經過申請核准仍然可以執行，因此義大利於 1998 年 11 月開始移除反應爐內的用過核子燃料，並開始準備送往國外再處理，2006 年 11 月獲政府同意境外再處理，所有 Caorso 核能電廠用過核子燃料於 2010 年 6 月運送到國外再處理。

在 1999 年成立 SOGIN 公司負責後續核設施的除役作業，2000 年政府(MICA)要求除役政策改為立即除役，因此 SOGIN 於 2001 年 7 月改提出以 DECON(立即拆除)為除役策略的除役許可申請。2003 年提出環境影響評估報告，並於 2008 年 10 月通過 EIS，Caorso 核能電廠最後於 2014 年 2 月取得除役許可。

目前 Caorso 核能電廠已完成以及進行中的除役作業，包括(1)完成循環管路的除污；(2)完成 RHR 冷卻塔、汽機廠房、廢氣廠房(off-gas building)的拆除作業；(3)營運 PHADEC 除污廠房，以磷酸進行化學除污作業，使廢棄金屬除污至解除管制標準；(4)用過核子燃料運往法國再處理。

經本次參訪見習 Caorso 核能電廠除役作業，發現義大利的除役作法，與台灣除役制度的設計並不相同，兩個國家雖然都需要提報除役計畫送審，但義大利的除役計畫僅為全貌性的陳述，至於每一項除役活動的進行，都需要另提安全分析送審通過後，才能執行。因此 SOGIN 在 Caorso 核能電廠的除役進行的相對緩慢，SOGIN 人員解釋很重要原因是每項活動都還在審批中。而台灣一旦除役計畫通過後，業者就可以進行除役細節的全盤規劃。儘管如此，觀察義大利除役實務作法，歸納下列幾項作法可以國內參考與學習。

(一)現有廠房空間的有效利用

Caorso 核能電廠汽機廠房在主要的蒸汽產生器移除後，對於廠房做了許多改建工程。包括於 2008~2009 年期間於完成了廢棄物管理設施(WMF)廠房的興建、建造了專門量測廢棄物以符合外釋的控制室(CCA)，最後於最底下樓層要興

建超高壓縮設備廠房。

其中 WMF 廠房的興建與我國核一、二廠除役時要提出的核廢料處理園區有異曲同工之處，因為 Caorso 核能電廠的 WMF 廠房本身就是一個複合式廢棄物處理廠房。在此處所拆除的廢棄物可以被進行切割及除污處理，然後將處理過的廢棄物送到 CCA 控制室執行外釋前的核種分析與量測。當 WMF 廠房切割後的廢金屬，還可以運送到最底下樓層進行超高壓縮作業，以達到體積減容目的。另外，Caorso 核能電廠也積極清空用過核燃料池，進行適當除污後，加以適當改建，作為未來除役時相關系統設備除污的具有良好屏蔽的作業空間。

我國除役計畫的執行，可以參考義大利 Caorso 核能電廠對於汽機廠房再利用的概念，將除役期間廢棄物處理設施建立於汽機廠房或其他可利用空間，可以達廢棄物產生量減低，並提供有效輻射屏蔽，有助於除役計畫的推動。

(二)推動解除管制具有必要性

Caorso 核能電廠人員特別說明推動解除管制對於除役電廠放射性廢棄物管理成效有很大關連性。以 Caorso 核能電廠汽機廠房為例，該廠房拆除的物質與外釋的數量列表 14 如下。可以發現汽機廠房除役產生廢棄物，經過適當除污後，金屬物質可外釋比率達 97.6%、石棉材達 98.1%、混凝土達 44.9%、其他物質也達 87.3%，如此一來可以大幅紓解放棄物貯存設施的倉貯壓力，同時也達已達到資源再利用的目標，因此在核能電廠除役作業時，實有必要推動解除管制。

表 14. Caorso 核能電廠汽機廠房拆除的物質與外釋的數量

	拆除廢棄物數量(噸)	外釋數量(噸)
金屬	8,474	8,272
石棉材	106	104
混凝土	390	175

其他物質	1,176	1,027
總計	10,146	9,578

針對解除管制的物質，Caorso 核能電廠化學試驗室負責現地量測與實驗室分析，據 Caorso 核能電廠人員說明，Caorso 核能電廠可達外釋標準的混凝土，現階段皆使用於電廠內作為地基材料。而達外釋標準的金屬物質，則與外部回收廠商簽約，將來資源再利用時，必須與新鑄的金屬材料以 1:9 以上的比例混合再利用，如此一來可使外釋再利用得廢金屬，比於外釋標準再低一個數量級。

(三)放射性廢棄物跨國處理活動

Caorso 核能電廠除將用過核子燃料送往國外再處理，並將產生的放射性廢棄物回運義大利之外，對於部分低放射性廢棄物，SOGIN 機構與瑞典 Studsvik 公司簽署合約，規劃將 350 噸低放射性廢棄物運往瑞典 Studsvik AB 電廠進行焚化與熔融作業，處理後的殘餘物並將進行安定化作業。上述廢棄物於 2011 年五月開始啟運，整個焚化與安定化作業到 2012 年 10 月結束，總計有 204 個廢棄物包件在 2013 年 8 運回義大利。

此外，Caorso 核能電廠將電廠內的廢樹脂，以 urea-formaldehyd 固化後裝在 220 公升金屬桶，總計超過 5500 只。Caorso 核能電廠規劃與廠內另外 360 桶廢渣(sludge)送往捷克的 Javis 焚化廠進行焚化。

探究義大利的各類型放射性廢棄物得以送往國外進行處理，在主要是因為在歐盟架構下，各國在放射性廢棄物議題與實務交流的活動比較容易。所謂的歐盟架構，是指 Euratom 指令 2011/70，其重點包括每個成員國對其管理所產生的用過核燃料和放射性廢棄物負有最終責任；除非另有協議，放射性廢棄物應在其產生的成員國中處置；成員國應建立並維護放射性廢棄物管理的國家法令、法規與

組織架構(National Framework 國家架構)，對權責單位分配責任。其中國家架構應包括國家管理計畫提報歐盟並定期更新；放射性廢棄物安全的國家安排；放射性廢棄物管理活動的申照制度；相關機關的責任分配；提供公眾資訊與參與；適當的財務計畫(即充足的經費資源)。因此，在此國家架構下，歐盟成員國之間的核廢料代處理作法顯得非常具有彈性，且對區域合作處理核廢料具有利基。

六、訓練課程心得綜整

經由本次 SOGIN 的核設施除役訓練課程，有幾項實務與重要的核設施除役焦點議題如下方表 15，經與義大利具除役實務人員的討論後，可以提出供國內核能電廠除役管制作業的參考。

表 15. 義大利與台灣在核能電廠除役制度的比較

項目	義大利	台灣
除役策略	早期採延遲除役，目前改為立即除役	立即除役
除役作業年限	無明確規定	25 年
專責機構	SOGIN 公司	尚未設立
除役品保	採 ISO 9000 系列	採專案品保
除役廢棄物貯存	電廠內貯存於原電廠內	規劃廠內設置貯存設施
處置設施	尚未設立	尚未設立
集中貯存	未來高放射性廢棄物要集中貯存於國家處置場	台電公司規劃集中貯存方案作為處置計畫替代應變方案
外釋標準	主管機關訂有外釋標準，並在除役計畫推動過程中實際推動	主管機關訂有外釋標準
除役經費	每個家庭從電費中徵集	已設置後端基金徵集費用

四、建議事項

藉由本次義大利 SOGIN 機構核能電廠除役訓練課程並 Caorso 核能電廠除役實務見習，了解義大利在放射性廢棄物的作法，及目前除役中電廠的實務，有助於未來國內執行核能電廠除役作業的管制。透過本次見習活動的觀察與回饋，擬具有下列幾項國內推動核設施除役及放射性廢棄物管理的建議事項：

(一)專責機構對推動核廢管理有正面效益：

本次安排見習活動為義大利除役與放射性廢棄物處理專責機構 SOGIN 機構，於 1999 年設立。自成立後就積極展開四座核能電廠與四座核設施的除役工作，同時進行最終處置計畫，各項工作依序辦理，也具實效。綜觀國際間各核能國家，不論其核能政策如何改變，但由能源主管機關設置放射性廢棄物管理專責機構，執行放射性廢棄物管理的成功案例很多。國內台電公司執行放射性廢棄物管理計畫時常受挫，我國行政院因而於 2016 年 11 月 17 日通過「行政法人放射性廢棄物管理中心設置條例」草案，後續將送請立法院審議。參酌義大利設置專責機構對提升核廢料管理助益的經驗，建議國內台電公司及目的事業主管機關宜儘速推動完成專責機構立法作業，以利國內放射性廢棄物管理跟上國際腳步。

(二)核能電廠除役人力訓練宜盡早整備

此次見習期間，SOGIN 人員多次提及除役電廠的員工的籌備維持，是一項重要議題。核能電廠除役作業與核能電廠運轉大不相同，核能電廠運轉只需要根據程序書所要求步驟一步一步執行即可，但除役核能電廠依據電廠特性、除役策略與方式選擇、廢棄物管理策略等差異，實難有標準教材可以訓練使用。本次研習地點 SOGIN 公司已經在 Caorso 核能電廠成立訓練學校，有來自義大利各地方

的學生等來接受核能相關之輻防、核能安全及環境相關之訓練課程，另外針對除役作業時引進適合的承包商，也可以在一定時間內對承包商進行基本教育。此外 SOGIN 也認為核能電廠運轉期間的人員，是除役時的重要人力資產，因為這些人員熟悉核能電廠的運轉歷史與過去發生的相關事件紀錄，因此 SOGIN 公司曾聘用當年曾經當過 Caorso 電廠廠長擔任高級顧問，指導電廠的工作人員相關布置及程序等專業內容。建議國內未來執行除役計畫的相關單位，應針對核能電廠除役作業，適時網羅相關人才並進行相關人力訓練，以確保除役作業能依相關核能與工安法令，安全的執行。

(三)除役電廠內現有廠房可思考利用

Caorso 核能電廠在除役期間，因為當地民眾的反對，無法於廠區內另外興建新的廠房或是廢棄物處理設施。故 SOGIN 公司將現有的廠房進行改建，像是本次參訪的汽機廠房，由於此廠房的大型設備早已完成拆除，因此，就直接於廠房內改建了廢棄物管理設施(WMF)以及專門量測廢棄物以符合外釋的控制室(CCA)，並於最底下樓層建造超高壓縮設備廠房。

義大利 Caorso 核能電廠現有廠房的改建，對於拆除後的放射性廢棄物，除了可以進行減容處理，亦可完成廢棄物的除污。對於外界民眾的抗爭，也可以消弭反對的聲浪。建議除役作業執行單位台電公司可以參考義大利 SOGIN 的實務作法，於除役期間將核能電廠內現有的廠房進行改建來執行除役時的設備或系統除污工作，以有效利用現有資源並達成除役作業時的廠房最佳化的利用。

(四)在處置場完成前，除役電廠內貯存設施是共通必要措施

義大利在核能電廠除役時，也務實面對核廢料處置場尚未完成的議題，因此

在除役電廠內設置中低放射性廢棄物的貯存設施，並適時評估與強化其安全性。以 Coroso 核能電廠為例，該除役電廠內已設置兩座低放射性廢棄物貯存設施(ERSBA)與一座中放射性廢棄物貯存設施(ERSMA)，將來也會持續作為除役電廠的貯存設施。為此，SOGIN 也對地方居民說明爭取認同，以利除役作業之執行。國內目前也面臨相似的議題，核一廠除役計畫也規劃在廠區內設置除役保留區。建議計畫執行單位應加強宣導溝通爭取認同設置除役保留區的必要性，俾利除役計畫之執行。

(五)核能電廠除役年限宜有彈性以確保執行更為安全有效

義大利四座核能電廠早期是採取延遲拆除方式，但義大利政府考量自永久停機後，輻射劑量未如預期般顯著降低、廠內須維持足夠的營運人員、地方政府要求儘速使場址作為其他用途等因素，1999 年義大利政府改採一次到位的立即拆除策略，循序漸進。惟義大利對於核能電廠除役作業並無年限限制，因此各電廠得依其特性，設計採用最合適的除役作法。現行核管法及其施行細則雖明訂核電廠除役應採立即拆除方式及除役作業時程，但亦保留作業調整的彈性，得據以變更除役作業時程，可確保安全及抑低輻射劑量，實質上兼具延遲拆除方式的優點。建議除役執行單位應參酌義大利 SOGIN 每三年檢討處置計畫的作法，定期檢討我國除役計畫的合宜性，當我國核電廠除役期間如遇增加環境輻射之虞、增加除役工作人員輻射劑量之虞、增加放射性廢棄物產量之虞、發現除役計畫中有未涵蓋安全問題、除役作業之完成時程變更等情事，適時向主管機關提出除役計畫的時程變更申請，以保留除役作業彈性與最佳化安排。