

出國報告(出國類別:實習)

345kV 電力電纜等設備之設計、試驗及終端處理

服務機關：台灣電力公司綜合施工處

姓名職稱：賴建宏 / 電機工程員

派赴國家：日本

出國期間：97.11.17~11.28

報告日期：97.12.10

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：345kV 電力電纜等設備之設計、試驗及終端處理實習

頁數____ 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/（02）23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：賴建宏/台灣電力公司/

綜合施工處電氣一隊/電機工程師/(02)29340505 #431

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：97年11月17日至97年11月28日 出國地區：日本

報告日期：97年12月10日

分類號/目

關鍵詞：XLPE 電纜、電蝕、等效電容、現場耐壓試驗、PD 試驗

內容摘要：

本次出國計畫任務為「345kV 電力電纜等設備之設計、試驗及終端處理」。本報告內容係將此次在日本 J-Power 公司大阪廠進

行合約內 345kV 電纜之設計及試驗相關章節討論，並參觀電纜廠製造流程。本文將就下列問題與 J-Power 技師討論並整理如內文。

一、電纜之設計首要考量高壓絕緣能力，除此之外，電纜廠家亦會考量其他因素，例如，單位重量及雜訊遮蔽能力等等，此將會影響電纜電容常數，因此，本文將就設計問題與 J-Power 技師討論。

二、依合約規定，現場完工試驗中，承商除了依 IEC 62067 執行 AC 耐壓試驗之外，仍可選擇 DC 耐壓試驗(VDC 690kV / 15 mins)，不過，DC 耐壓試驗經證實已有諸多缺點。對此，此行將詢問廠家對於 DC 耐壓試驗之意願，以作為本公司往後類案修正合約相關章節之參考。

三、本公司綜研所目前正推行現場PDM，以作為日後檢驗電纜品質之參考。經綜研所試驗人員轉述，本處所經辦之核四ES014標一案，恰為本公司首次執行電纜現場PDM，職有幸能參與其中，但截至目前為止，仍未能全盤了解PDM，藉由此次出國機會，將進一步詢問J-Power 技師相關技術，以增進現場電纜試驗之品質。

目 錄

第一章 前 言	7
1.1 緣由與目的	7
1.2 行程與內容	7
第二章 J-Power 公司簡介	8
2.1 公司成立及規模簡介	8
2.2 大阪電纜廠配置	9
2.2.1 VCV Tower	10
2.2.2 UHV Testing Hall	10
第三章 XLPE 電纜製程簡介	11
3.1 XLPE 電纜結構	11
3.2 電纜之製造流程	12
3.3 XLPE 電纜硫化處理	12
3.4 XLPE 電纜內部結構特性比較	15
3.5 潔淨室管制	18
第四章 XLPE 電纜品質相關試驗	21
4.1 AC 耐壓試驗與 DC 耐壓試驗	21
4.2 出廠試驗及現場安裝後電氣特性試驗	22
4.3 部份放電試驗	23

4.3.1 部份放電原理與 PDM 技術	-----	25
4.3.2 部份放電感應器原理及技術	-----	26
4.3.3 連續線上 PDM 系統	-----	28
4.3.4 核四 ES014 標與霧峰 E/S 兩案採用 PDM 技術介紹		28
4.3.4.1 ES014 標核四電廠 ES010 PDM 簡介	-----	29
4.3.3.2 霧峰變電所第二期 E/S 改建工程 PDM 簡介		33
4.4.2.2 判斷標準	-----	37
第五章 心得與建議事項	-----	38

附錄

圖索引

圖 2.1 J-Power 大阪廠配置圖	9
圖 3.1 J-Power 345kV XLPE 2000mm ² 截面圖	11
圖 3.2 XLPE 電纜製造流程圖	12
圖 3.3 絕緣層製程圖	13
圖 3.4 垂直式連續硫化處理設備示意圖	13
圖 3.5 導體介面層、絕緣層以及絕緣介面層同時壓出示意圖	14
圖 3.6 導體介面層、絕緣層以及絕緣介面層同時壓出機簡圖	14
圖 3.7 南科某案 345kV 電纜內部結構簡圖	15
圖 3.8 絕緣遮蔽層接地示意圖	16
圖 3.9 各電纜輸電電壓等級之等效電容值與導體半徑曲線	17
圖 3.10 美國聯邦標準 209D Class 1000 標準圖	20
圖 4.1 部份放電感測訊號傳送圖	27
圖 4.2 PD 監測設備配置圖	29
圖 4.3 耦合電容感測器檢測示意圖	30
圖 4.4 核四 PDM 檢測流程圖	31
圖 4.5 核四現場 AC 耐壓及 PDM 時序表	32
圖 4.6 霧峰連續線上 PDM 架構圖	34
圖 4.7 感測器” A” 及感測器” B” 之區別	36
圖 4.8 霧峰現場 AC 耐壓及 PDM 程序圖	37

表索引

表 2.1 J-Power 工廠主要產品表	9
表 3.1 電纜製程空間無塵室之管控標準一攬表	18
表 3.2 目前世界各國無塵室等級比較及法規	19
表 3.3 美國聯邦標準 209D 潔淨室管制值	19
表 4.1 IEC 62067 電氣試驗標準	23
表 4.2 PDM 判讀要素標準	32
表 4.3 PDM 判讀標準	33
表 4.4 霧峰連續線上 PDM 規格及數量	35

第一章 前 言

1.1 緣由與目的

配合龍門計畫，由本處負責監造之 345kV 電力電纜設備工程，為增進其設計審查、製程檢驗、現場安裝檢驗及後續運轉維護等相關之最新技術，以利該系統在施工階段及日後之運轉維護均能達到高品質要求及充分發揮功效，故選派該案監造檢驗員赴 345kV 電力電纜設備廠家吸取其嶄新技術，增加監、檢知能，並提昇本案設備品質，增進營運績效。

1.2 行程與內容

本次奉派出國主要至 J-Power 公司大阪工廠實習，行程如下：

- (1) 97 年 11 月 17 日，由台灣搭乘長榮航空班機至日本大阪關西機場。
- (2) 97 年 11 月 18 日至 27 日，於 J-Power 大阪工廠實習 XLPE 電纜最新製造技術。
- (3) 97 年 11 月 28 日，由日本關西機場搭乘長榮航空班機至台灣。

第二章 J-Power 公司簡介

2.1 公司成立及規模簡介

J-Power 公司是由日立電線電纜公司(Hitachi Cable, Ltd)以及住友電氣公司(Sumitomo Electric Industries, Ltd)於 2001 年 7 月共同合資成立，總資產約 4 兆日圓，兩方各出資 50%，總員工數超過 1000 人。事業體主要是專注於各種電力電纜、架空輸電線以及電纜相關配件之研發、設計及生產。

J-Power 總公司設立於東京，轄下擁有 4 個工廠，依次為豐浦廠(Toyoura Plant)、日高廠(Hitaka Plant)、茨城廠(Minato Plant)、大阪廠(Osaka Plant)。

豐浦廠主要生產鋼芯鋁纜(ACSR)、複合光纜地線(Optical Fiber Ground Wire 簡稱 O.P.G.W.)，以及電力電纜之監控系統等；日高廠主要生產交連 PE 電纜(XLPE)、電力架空線、電纜零配件以及油浸式電纜(Fluid-Filled Cable)等；茨城廠主要生產海底電纜(Submarine Cable)；大阪廠主要生產海底電纜、油浸式電纜、交連 PE 電纜、架空線以及電纜零配件等。請詳表 2.1 所示。

表 2.1 J-Power 工廠主要產品表

Major Products		Production Site			
		Osaka	Hitaka	Minato	Toyoura
Fluid-Filled Cables					
XLPE Cables	EHV, HV				
	MV, LV				
Submarine Cables					
MV Overhead Distribution Cables					
Overhead Conductors	OPGW				
	ACSR				
Accessories	Epoxy Products				
	Rubber products				

2.2 大阪電纜廠配置

大阪廠鄰近大阪港，腹地面積約有 316,000m²，依產品特性大致分為五個生產區、垂直連續硫化(VERTICAL Continuous Vulcanizer, VCV)製造區、超高壓測試區(UHV Testing Hall)以及重件裝卸貨碼頭；請詳圖 2.1。

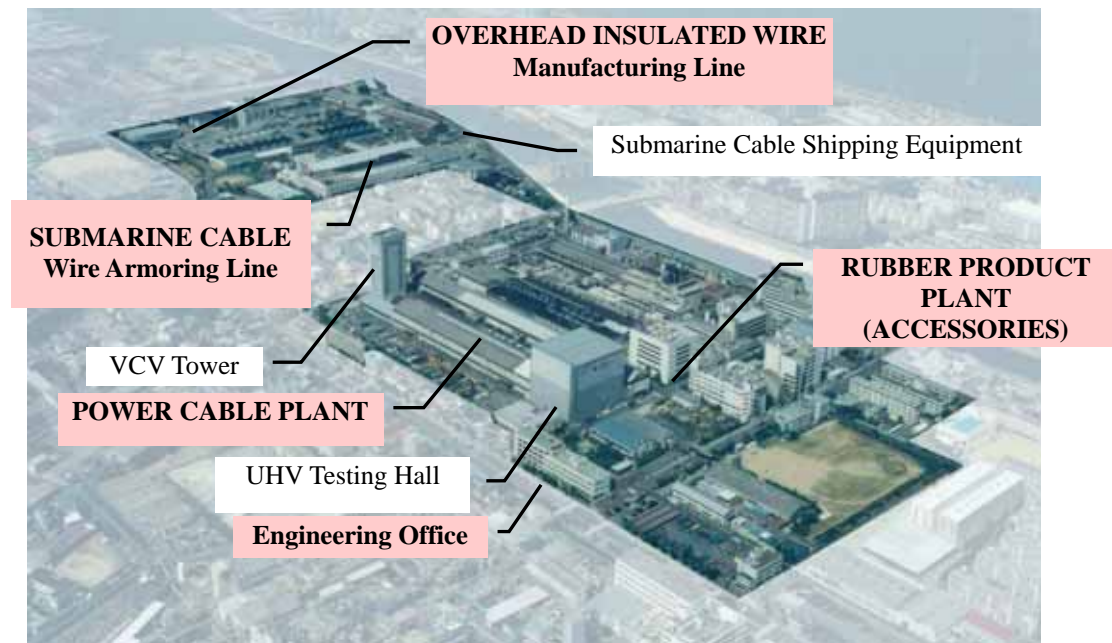
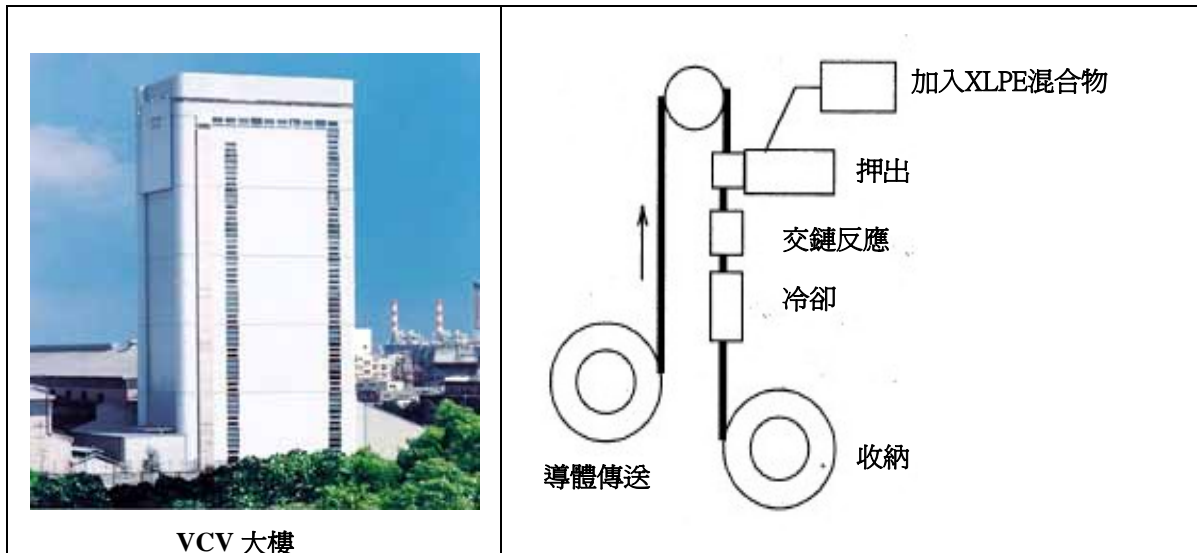


圖 2.1 J-Power 大阪廠配置圖

2.2.1 VCV Tower


VCV (Vertical Continuous Vulcanizer, VCV)即為垂直連續硫化設備，此設備係為XLPE 電纜製程中佔有極重要的關鍵。



2.2.2 UHV Testing Hall

J-Power 超高壓測試中心擁有之升壓設備最高可升壓至 AC 2100kV/120A、DC 2500kV/70mA；並有突波產生器，可產生最高 6000kV/300kJ。

UHV Testing Facilities




Testing Hall


Feature
Double Shielded-Corona Free Hall

Capacity

Facilities	Specifications
AC Transformer	Max. 2100kV/120A
DC Generator	Max. 2500kV/70mA
Imp. Generator	Max. 6000kV/300kJ
Testing Hall	48m(W)×44m(D)×44m(H)



AC Transformer

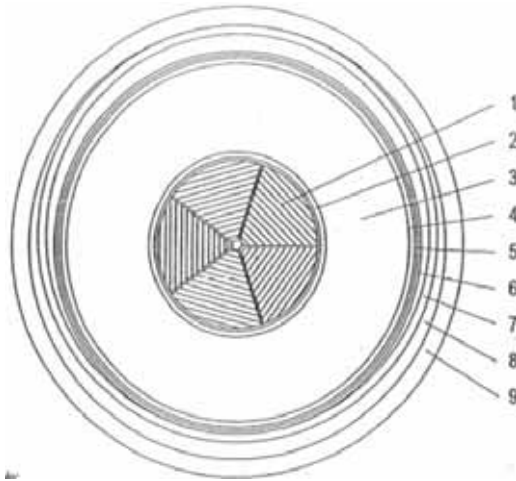


Imp. Generator

第三章 XLPE 電纜製程簡介

3.1 XLPE 電纜結構

核四工程 ES014 標採用 345kV 2000mm² XLPE 電纜其截面共分有 9 層，由內而外分別為：1.銅導體層、2.導體遮蔽層(或內半導電層)、3.XLPE 絕緣層、4.絕緣遮蔽層(或外半導電層)、5.半導體層、6.錫銅線編織層、7.鋁波管層、8.瀝青層以及 9.PVC 外被覆層；其截面及規格如圖 3.1 所示：



No.	Item	Unit	Thickness or diameter
1	Copper conductor (Plain annealed copper, 5 segmental)	Cross-section Area	Nominal mm ² 2000
		Outside diameter	mm 55.0±1.1
2	Conductor screen	Semicon. tape layer	Approx. mm 0.5
		Extruded Compound	Nominal/Minimum mm 1.8/1.4
3	XLPE insulation	Min Ave./Min.	mm 28.0/25.2
4	Insulation screen	Extruded Compound	Nominal/Minimum mm 1.8/1.4
5	Semi-conducting swellable tape layer	Approx.	mm 1.0
6	Tin coated copper wire woven fabric swellable tape	Approx.	mm 0.5
7	Corrugated seamless aluminum sheath (Spiral shaped)	Nominal/Minimum	mm 2.8/0.74
8	Bitumen compound	—	—
9	Flame retardant black PVC oversheath with graphite coating	Nominal/Minimum	mm 5.0/2.16
Overall diameter		Approx.	mm 156
Cable weight		Approx.	kg/km 36000
D.C. conductor resistance at 20°C		Max.	Ω /km 0.0090

圖 3.1 J-Power 345kV XLPE 2000mm² 截面圖

3.2 電纜之製造流程

有關 XLPE 電纜製造流程，大致可分為銅導體成束壓縮、扇形導體束合股成圓形、絕緣押出及硫化、絕緣層乾燥、絕緣層遮蔽層膠帶纏繞、金屬披覆層押出以及 PVC 外皮押出等，請詳圖 3.2 所示。

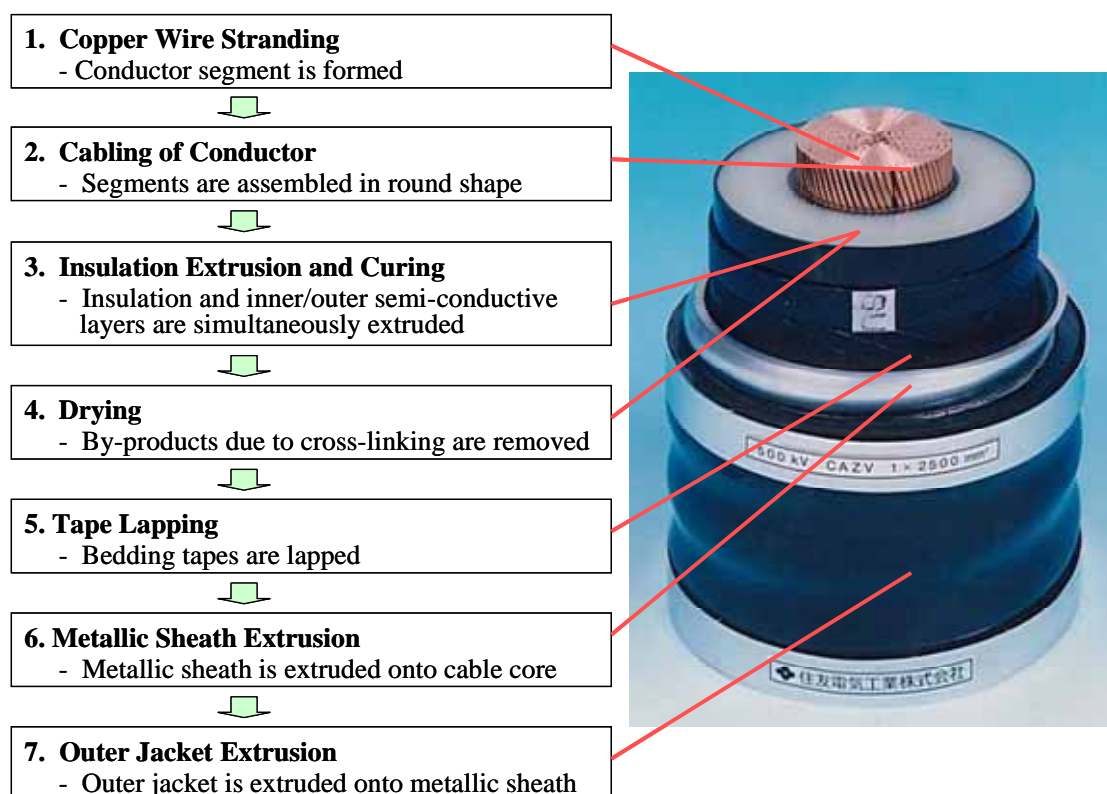


圖 3.2 XLPE 電纜製造流程圖

3.3 XLPE 電纜硫化處理

當銅導體合股成束之後，將經由輸送帶被傳送至 VCV 大樓進行絕緣層押出及硫化處理；其流程如圖 3.3 所示。其中，高溫高壓下所進行之交鏈反應即是硫化(Vulcanize)，此製程需在定溫、定壓且無塵下執行，若有異狀，整個流程必須全部停止，須排除問題後再繼續。其目的的主要是避免因溫度或壓力變動或異物使得絕緣層中夾雜氣泡

而影響品質。

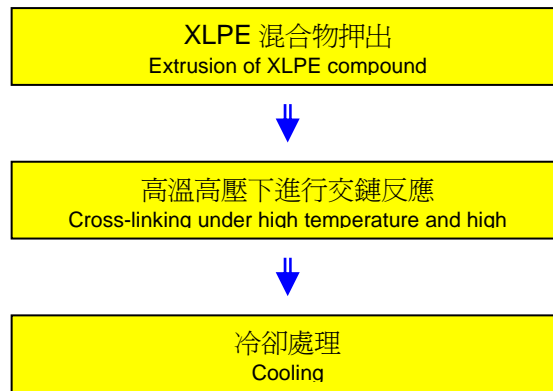


圖 3.3 絕緣層製程圖

有關垂直式連續硫化處理設備請詳圖 3.4。其中，成束圓導體將被傳送至離地約 60m 之 VCV 大樓，再由上而下進行絕緣壓縮、硫化及冷卻等流程。

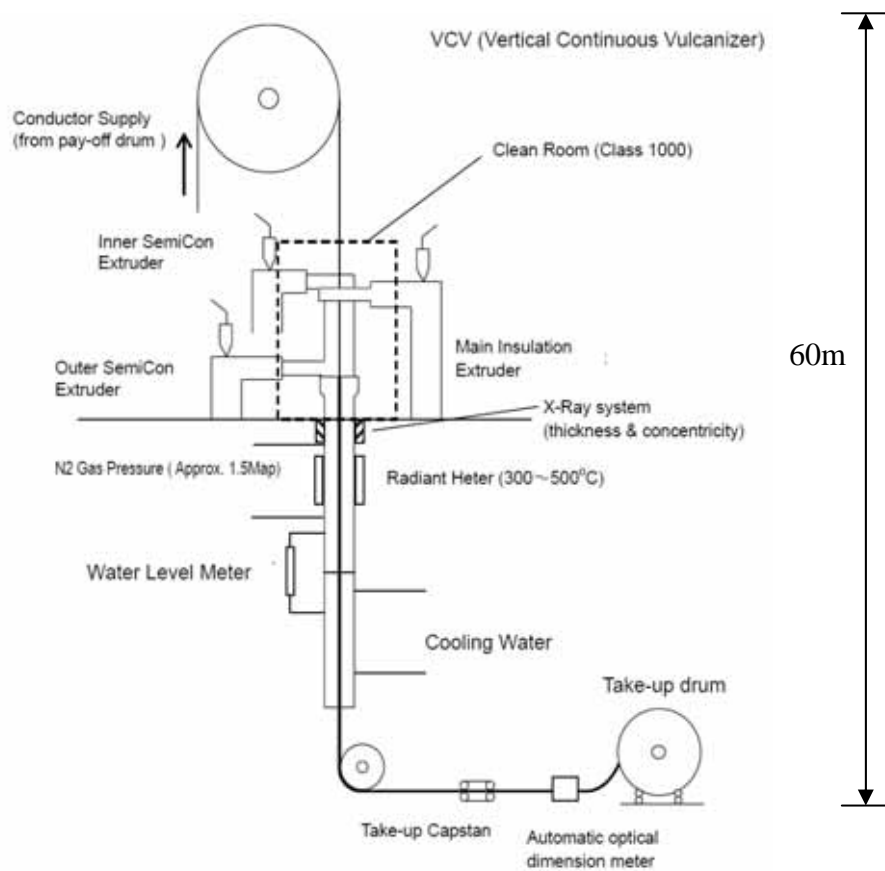


圖 3.4 垂直式連續硫化處理設備示意圖

由於此製程極為重要，爲了避免繁複的製程影響製造品質，將導體遮蔽層、XLPE 絕緣層及絕緣遮蔽層同時押出後，再進行硫化；請詳如圖 3.5 及圖 3.6 所式。

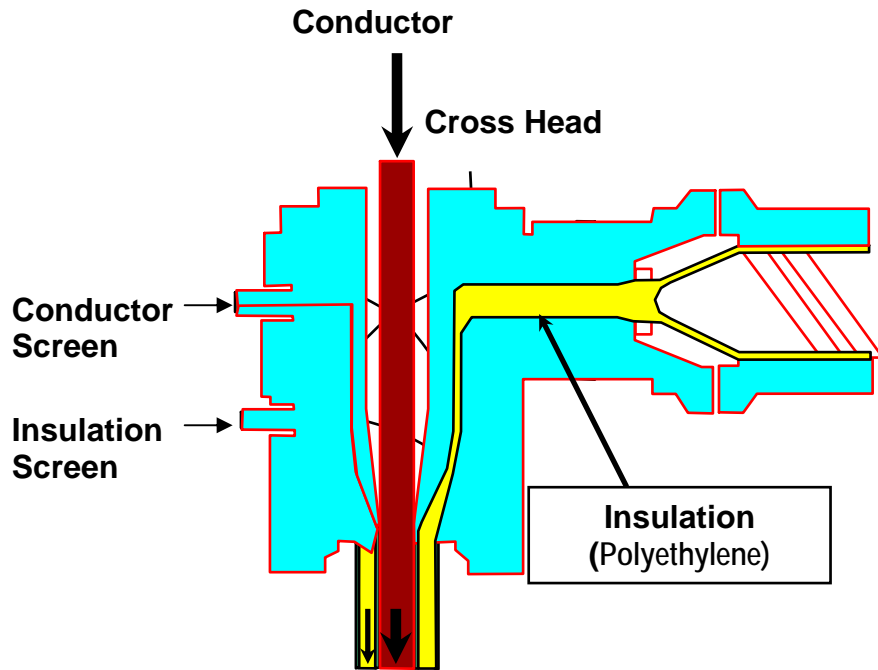


圖 3.5 導體介面層、絕緣層以及絕緣介面層同時壓出示意圖

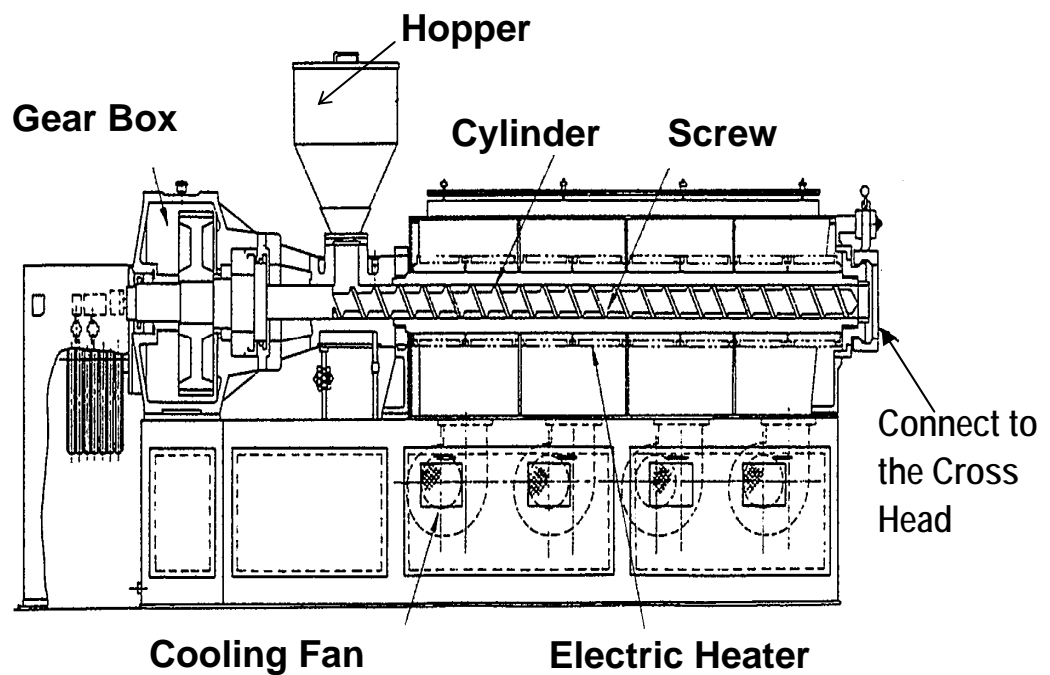


圖 3.6 導體介面層、絕緣層以及絕緣介面層同時壓出機簡圖

3.4 XLPE 電纜內部結構特性比較

基於系統運轉時長期使用的考量，或依據製造成本及客戶需求，電纜製造商通常會以不同材質及技術層層包覆電纜銅導體。日本技師表示，若以同是由 J-Power 承攬之核四工程 ES014 標與南科某案所使用之 345kV 電纜比較，ES014 標之電纜於半導體層外部分別以鋁波管層作為金屬屏蔽及電纜承受應力保護；而南科某案之電纜係依據本公司需求於半導體層外部係以錫銅導體斜繞後，再以鋁箔及 PVC 層版膠帶(laminated tape，僅 0.3mm)纏繞，請詳圖 3.7 所示。

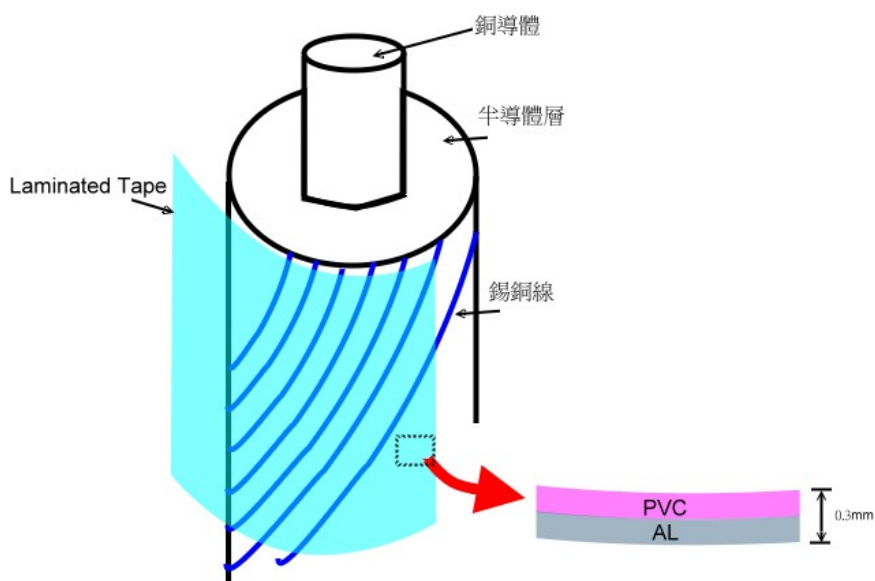


圖 3.7 南科某案 345kV 電纜內部結構簡圖

其中，錫銅線主要作為電纜承受應力支撐，另外，為了使電纜內部達到完整屏蔽，需以鋁或其他金屬材質包覆電纜，不過，如果在錫銅線上直接包覆金屬材質，將會因異種金屬接合造成電蝕現象 (electrolytic corrosion)，導致金屬孔蝕。因此，設計電纜之初，

便考量在錫銅線與鋁箔間以PVC作接合介面。此種設計有別於以往的電纜製程，雖可大量的減少成本及重量，不過，對於外在環境的酸、蟻等異物侵害或腐蝕的防護及電纜承受應力的防護能力相對降低。

另外，電纜使用上通常會將絕緣遮蔽層接地，主要是考量：

- (1)將電場侷限於絕緣遮蔽層與導體遮蔽層之間。
- (2)使介質內的電位梯度成對稱及同心圓分佈，使表面放電最小化。
- (3)使電場均勻分佈，不因周圍環境因素而導致應力集中，避免發生放電現象或加速絕緣破壞。

絕緣遮蔽層接地示意圖請詳圖 3.8 所示。

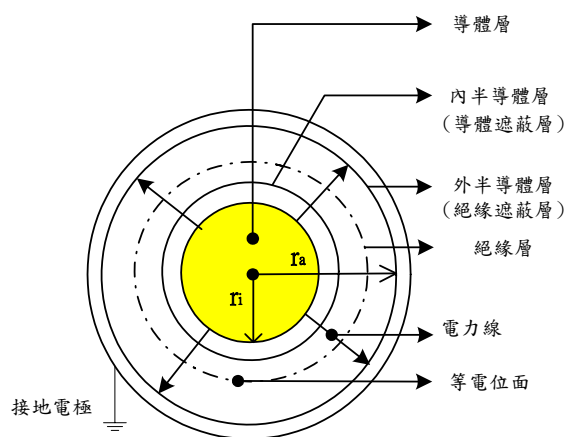


圖 3.8 絕緣遮蔽層接地示意圖

當絕緣遮蔽層接地時，如同在電纜內加入同心圓電極，此同心圓電極與電纜導體之間相當於一個等效電容，此電容值之計算如(3.1)式所示。

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \quad (3.1)$$

ϵ_0 : 空氣介電常數 ($8.85 * e^{-12}$ f/m)

ϵ_r : 相對介電常數 (交連 PE=2.3)

r_i : 導體層半徑

r_a : 絕緣層半徑, $r_a = r_i + t$, t: 絕緣厚度

由上式可知，其電容量與導體層厚度及絕緣層厚度有絕對的關係。若試以在絕緣厚度 t 為 6.6mm、15.6mm、23mm 以及 32mm 下，改變導體半徑 r_i 由 0mm 漸增至 53mm，並帶入(3.1)式中，可以 Matlab 繪出不同絕緣厚度下，其等效電容量與導體半徑之曲線如圖 3.9 所示。

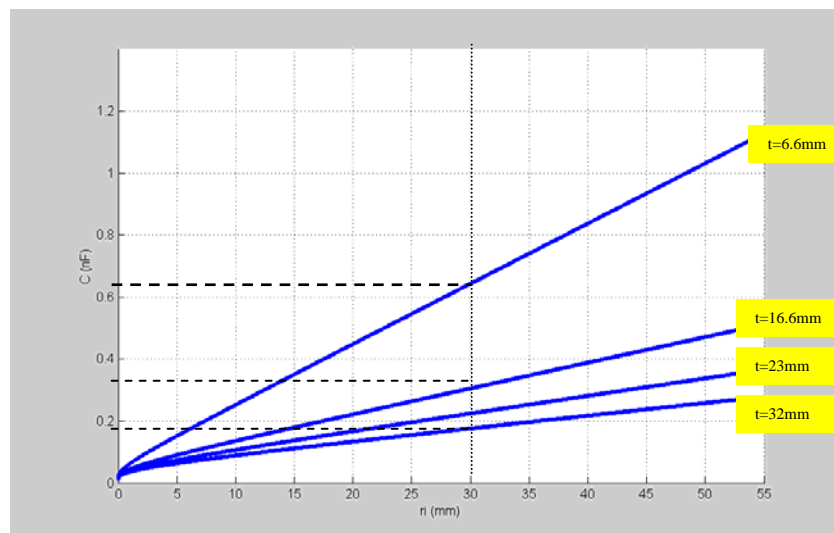


圖 3.9 各電纜輸電電壓等級之等效電容值與導體半徑曲線

由上圖可知，等效電容值隨著導體層半徑 r_i 增加而呈現拋物線增加的曲線；若固定導體半徑時，則絕緣厚度 t 越厚，電纜之等效電容將會逐漸下降；意即，電纜等效電容值與絕緣厚度 t 成反比關係。

隨著電纜製造技術的提高而逐漸降低絕緣厚度以減少電纜重量，就必須重新評估電纜之等效電容值，以設計適當的補償電抗器容量，以抑制輕載時所造成系統電壓偏高的問題。

3.5 潔淨室管制

爲了避免電纜製造過程中異物侵入影響品質，J-Power 公司對於各電纜製程空間，均有不同程度的無塵量管控，其依據標準如表 3.1 所式。

表 3.1 電纜製程空間無塵室之管控標準一覽表

Location	Clean Facility	Clean Class	Control Method
PE Base Resin Receiving Room	Air Filter Air Conditioner	Clean Class 1000 (ISO14644-1 Class 6) at Downloading from Tank lolly	Check of Air Filter
Compounding Room	Air Filter Air Conditioner Air Shower	Clean Class 1000 (ISO14644-1 Class 6) at Material Supply	
Inspection room	Air Conditioner	—	
Extrusion Room for Assembling X-Head	Air Filter Air Conditioner Air Shower	Clean Class 1000 (ISO14644-1 Class 6)	Dust Particle Counter before and after assembling X-Head
SC Compound Blending Room (Hitaka Factory)	Air Conditioner	—	Check of Air Filter

上表中有關” Clean Class” 一欄中，Clean class 100 即是採

用美國聯邦標準 209D, 1992, 其標準可等同於 ISO 14644-1 Class 6 標準, 對照表請詳如表 3.2 所式。

表 3.2 目前世界各國無塵室等級比較及法規

ISO 14644-1	USA 209D 1992	Japan B 9920 1989	France X44101 1981	Germany VID 2083 1990	UK BS 5295 1989	Australia AS 1386 1989
Class 1		1				
Class 2		2		0		
Class 3	1	3	4000	1	C	0.035
Class 4	10	4		2	D	0.35
Class 5	100	5		3	E,F	3.5
Class 6	1,000	6		4	G,H	35
Class 7	10,000	7	400,000	5	J	350
Class 8	100,000	8	4,000,000	6	K	3,500
Class 9				7	L	

有關美國聯邦標準 209D,1992 內容, 請詳如表 3.3 所示。

表 3.3 美國聯邦標準 209D 潔淨室管制值

級數	粒子大小	粒子數目	壓力	溫度°C			風速或換氣率	照度	
	μm	Particles/ft ³	mmAg	範圍	推薦值	誤差值	次/hr	lux	
1	≥ 0.5	≤ 1	> 1.3	19.4~25	22.2	± 2.8	層流方式	1080	
	≥ 5.0	0							
10	≥ 0.5	≤ 10							
	≥ 5.0	0							
100	≥ 0.5	≤ 100							
	≥ 5.0	≤ 1							
1,000	≥ 0.5	≤ 1000					亂流方式		
	≥ 5.0	≤ 10							
10,000	≥ 0.5	≤ 10000					≥ 20 次/hr		特殊需求
	≥ 5.0	≤ 65							
100,000	≥ 0.5	≤ 100000	± 1.4						
	≥ 5.0	≤ 700							

由上表可知，若以 Class 1000 來說，在溫度 19.4~25°C 之每立方英尺(ft³)空間中，允許存在之微粒子大小及數量分別為： $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 需 ≤ 1000 顆； $\geq 5.0 \mu\text{m}$ 需 ≤ 10 顆，由上述資料可繪製如圖 3.10 所示。

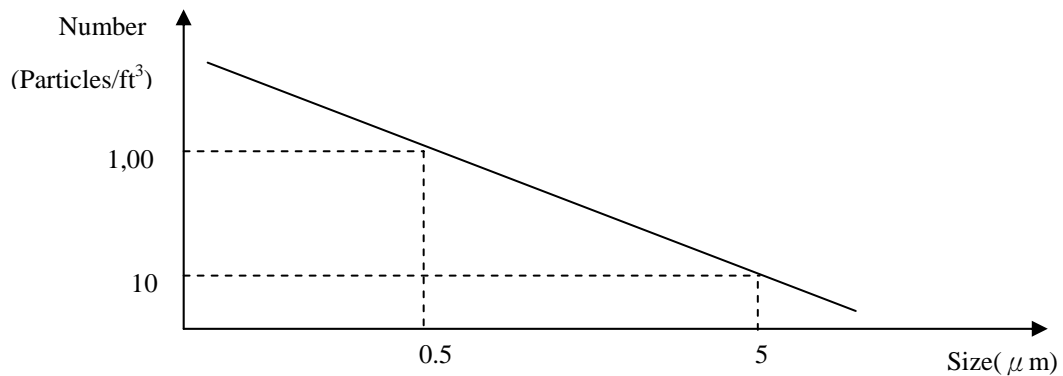


圖 3.10 美國聯邦標準 209D Class 1000 標準圖

日本技師表示，雖然無塵室依循 Class 1000 標準，不過，無塵室通常被管控在更嚴格 Class 100，亦即允許存在之微粒子大小及數量分別為： $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 需 ≤ 100 顆； $\geq 5.0 \mu\text{m}$ 需 ≤ 1 顆，更能確保整個製程品質。

第四章 XLPE 電纜品質相關試驗

4.1 AC 耐壓試驗與 DC 耐壓試驗

由於核四工程 ES014 標、4.4.4 節中，於現場完工試驗中，承商除了依 IEC 62067 執行 AC 耐壓試驗之外，仍可選擇 DC 耐壓試驗(VDC 690kV / 15 mins)，爲此，特地請教日本技師，在 J-Power 的承攬工程中，是否仍有於完工試驗中實施直流耐壓試驗?日本技師回覆早期約 10 年前的工程中，對於中低壓等級的電纜仍實行直流耐壓試驗，不過，XLPE 電纜直流耐壓試驗仍存在許多問題，包括：

一、直流電壓下，電纜絕緣的電場分佈取決於材料的體積電阻率，而交流電壓下的電場分佈取決於各介質的介電常數，意即等效電容值，特別是在電纜終端端電纜附件中的直流電場強度的分佈與交流電場強度的分佈完全不同。

二、XLPE 電纜在直流電壓下會儲存單極性殘餘電荷，此殘餘電荷將需長時間釋放，若在直流殘餘電荷未完全釋放之前加入系統電壓時，此殘餘電荷所形成的直流偏壓將會疊加在系統電壓上，造成電纜試驗電壓遠遠超過額定電壓，導致電纜絕緣擊穿。

三、若 XLPE 電纜之絕緣層於製造中即產生水樹，在直流電壓下會迅速轉變爲電樹，並快速地導致放電現象，加速了絕緣劣化，以至於在系統電壓下，會在短時間導致絕緣擊穿。而在交流耐壓下，出現

水樹現象之絕緣層仍能保持相當的耐壓值，而能持續運轉一段時間。

四、直流耐壓無法有效發現電纜於交流系統電壓下的某些缺陷，且在交流電壓下最容易發生擊穿的位置，由於特性不同，在直流耐壓下往往不會發生；相反地，在直流電壓下最容易發生擊穿的位置，在交流耐壓下也不會發生。

因此，日本技師再次強調，即使 XLPE 電纜通過直流加壓試驗，仍無法確保加入系統後能保持相當的穩定度，且，IEC 62067 標準亦推薦 AC 耐壓試驗來檢測電纜品質，除了考量上述因素之外，並考量直流耐壓設備價格較高，且體積較大，搬運不易等缺點，因此，現在所有承攬工程中均已改採用 AC 耐壓。

4.2 出廠試驗及現場安裝後電氣特性試驗

國際標準有關交連 PE 電力電纜之規範以 IEC 最為完整，IEC 60840 為 69KV 及 161KV 電纜試驗標準，IEC 62067 為 345KV 電纜試驗標準。在此，便將 IEC 62067 有關電纜電氣特性試驗標準摘錄如下表：

表 4.1 IEC 62067 電氣試驗標準

	Value of U ₀	Voltage test		Partial discharge	DC voltage test of the oversheath	
	kV	Voltage	Duration(min)	kV	kV	Duration(min)
Electrical tests of Rutine Test (IEC 62067 Ch9.1~9.3)	190	420	60	1.5·U ₀	25	1
Electrical tests after installation (IEC 62067 Ch14.1~14.2)		250 or 1.7·U ₀	60	-	25	1
		Alternatively, a voltage of U ₀ may be applied for 24 hr				

由上表可知，IEC 62067 Ch9.1~9.3 規範出廠電氣特性測試需包含 AC 耐壓試驗、部份放電試驗以及外被覆層 DC 耐壓試驗；而現場安裝後測試包含 AC 耐壓試驗及外被覆層 DC 耐壓試驗。不過，依據核四工程 ES014 標之合約規定，承攬商對於有關電纜出廠及現場試驗除遵循 IEC 62067 之試驗標準外，仍需於現場執行 AC 耐壓試驗的同時，需執行部份放電試驗。另外，雖上表 IEC 規範 AC 耐壓須達 60 分鐘，不過，礙於本公司之耐壓設備功率無法承受長時間運轉所需容量，因此，目前在工地實際實行之 AC 耐壓為 1.73·U₀ 持續 10 分鐘。

4.3 部份放電試驗

隨著都市人口密集度逐漸增加，負載需求密度也逐漸增加，越來越多國家使用高壓聚合物材料電纜來供應增加的負載，電力電纜的可靠性也越來越受重視。電力電纜係依靠高度聚合材質絕緣，不過，絕緣

材質在長期高壓運轉下，可預期將會出現老化等現象，彷彿不定時的炸彈，隨時都可能發生絕緣擊穿，造成重大損失。

目前用於檢測電纜絕緣能力的方法很多，請詳附件 1 所示。其中，PD 監測(Partial Discharge Monitoring, PDM)已經被實行多年，傳統上係為一種非破壞性離線測試技術，可用來電纜絕緣能力之評估，並已漸漸成為判斷電纜絕緣缺陷的重要工具。

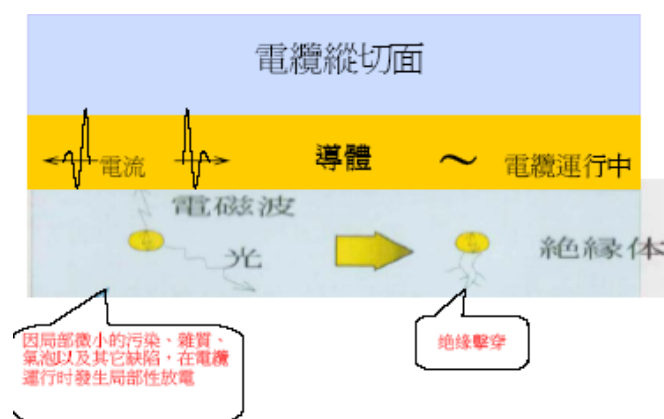
依據 IEC 62067 Ch 9.2 規定 XLPE 電纜於出廠時所執行之部份放電試驗之方法為：測試電壓漸漸升壓至 $1.75 \cdot U_0$ ，維持 10 分鐘，然後再將測試電壓緩降至 $1.5 \cdot U_0$ ，其測試值須為 5pC 或更佳 ($\leq 5\text{pC}$)。

由於電纜廠內 PD 試驗區監視儀器可設置於封閉空間，其四周特殊材質牆面可阻絕各種周圍環境電氣雜訊，因此，試驗值較不易受到雜訊干擾，可獲得精確的試驗值。而電纜現場屬開放性空間，且試驗儀器屬可攜式設備，抗雜訊能力較差，由感測器偵測信號需再經由濾波、放大等信號處理程序後，再加以判讀分析。然而，環境干擾雜訊種類複雜，包括廣播電波、個人電子產品(PDA、PC 及手機等)甚至連儀器本身積體電路板的 L、C 元件亦會產生干擾雜訊，因此，雜訊無法有效濾除。部份放電所產生的物理現象繁多，各家廠家 PDM 所依循的技術原理亦大不相同，又，各自開發不同靈敏度的感測器；且，若要能達到相當準確率的判斷程度，需倚賴大量的實績資料，也就是所

謂的專家系統，另外還需長時間培訓經驗判讀人員。綜合上述之困難點，可知目前有關部份放電現場檢測技術有一定的難度，不易檢測出部份放電確切良測值，就連 IEC 仍未將部份放電檢測列為完工後執行的測試要項。因此，目前各家廠商發展各自的技術，端視合約甲乙雙方的信賴度。

4.3.1 部份放電原理與 PDM 技術

電纜絕緣介質內如存在介電係數之弱點，例如內部絕緣缺陷或長時間運轉造成絕緣老化等，則當施加高電壓於電纜時，絕緣介質內電場強度將呈不均勻分佈，不同電場強度的介質壓差形成一通道並導致洩漏電流。又，由於電荷的轉移將產生暫態放電脈波，如持續存在並產生電應力衝擊，洩漏電流將在此一通道內步擴散，而致使介質劣化，進而降低絕緣材料的絕緣能力及耐久性。當絕緣介質內通道擴散到相當程度時，放電路徑將全部貫通，導致局部擊穿或絕緣破壞。



通常放電區域內電場強度較大，但放電能量很小，故 PD 的存在並不影響電氣設備的短時間的絕緣強度。但如果電氣設備在運轉電壓

長期存在 PD 現象，這些微弱的放電能量和由此產生的一些不良效應就會緩慢地破壞絕緣，最後將導致整個絕緣擊穿或崩潰，電氣設備就會發生突發性故障。因此，若能在運轉中檢測出設備部份放電時即更換設備，則可預防更嚴重的事故發生。

4.3.2 部份放電感應器原理及技術

發生部份放電時，會伴隨聲音、振動、光、熱、脈波電流、電磁波等物理現象的產生。現行感測器，其基本量測原理係基於用來偵測上述物理現象；依感測器類型大致可將偵測方式分為:[1]

1. 同軸電纜感測器；
2. 電感性高頻 CT(High Frequency current Transformer, HFCT)；依感測方式大致分為環繞於電纜與環繞於遮蔽層接地線兩種；
3. 方向性耦合器(directional coupler)；
4. 置於電纜接續夾之箔膜電極(foil electrodes)；
5. 音射技術(acoustic emission)。

電氣耦合技術的工作頻率介於數 MHz 至數百 MHz，對於交連高壓電纜而言，有效的 PD 感測器必須精簡且易於安裝；又，PD 感測器需具有高敏感度及較佳訊號雜訊比(signal to noise ratio, S/N)。音射技術具有電氣干擾的優點，不過，由於音頻訊號會衰減，將會明顯地

降低量測的敏感度。由於量測現場多半具有大量的電氣干擾源，因此，AE 技術較適用於電力變壓器以及斷路器 PD 監測。當高壓電纜出現放電現象時，將會快速地產生高頻成分的放電訊號，因此，感測器必須被設置在靠近放電訊號源以取得最佳之感測效果。如圖 4.1 所示，當電纜某處發生部份放電時，部份放電訊號若經由長距離傳送，將會產生嚴重衰減而使得 PDM 誤判為雜訊。

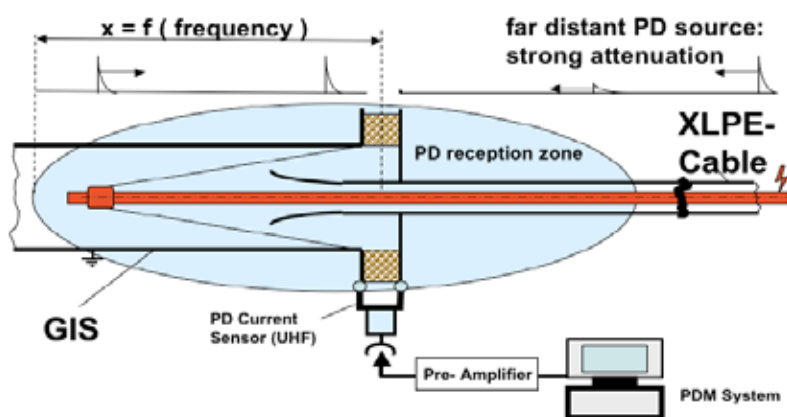


圖 4.1 部份放電感測訊號傳送圖

用於 PD 訊號傳輸最簡單且最便宜的方式是利用同軸電纜，不過，由於設置於電纜接續夾附近之 PD 信號偵測器所傳送之 PD 信號須經由相當長的距離，而導致明顯的信號衰減而降低量測靈敏度，且，位於量測儀器前端或後端之感測器，其內部供訊號擷取之電氣介面將會更進一步地降低偵測靈敏度。因此，電氣雜訊將會某些情況下特別明顯而將實際 PD 訊號覆蓋。

爲了克服長距離傳輸衰減以及電氣介面性能所造成之雜訊問題，可利用光纖電纜作為訊號傳輸之媒介。與藉由電氣傳輸方式相比

較，PD 訊號藉由光纖電纜傳輸可大量地降低訊號衰減，且可免除電氣介面性能問題。光纖電纜亦可作為量測設備之電氣隔離。一般來說，由感測器偵測之 PD 訊號係被送入光傳送器後轉換成光訊號，再藉由光纖電纜傳送並由光纖接收器量測。選擇性地，由 PD 感測器傳送之訊號可被數位化後，再藉由數位光纖電纜傳送並由接收單元 (acquisition unit) 所接收。使用數位光纖電纜明顯的優點是靠近於電纜接續夾之所有接收單元可藉由單一條光纖電纜連接，藉此，透過相同線路，主單元便可對各接收單元定址及控制。

4.3.3 連續線上 PDM 系統

再由前述所知，電纜絕緣材質的介電能力將隨著時間逐漸降低，為了能評估運轉中高壓電纜的老化程度，若能實行定期、不定期或線上 PDM，將更能確保電纜的運轉品質。PD 線上即時監測可提供有關因負載調度操作上的暫態突波所造成的電纜絕緣缺陷資訊，尤其是具連續線上 PD 監測(Continuous On-line Monitoring)系統更可提供額外的資訊，包含因系統負載調度操作的暫態突波所造成絕緣衰減趨勢以及專家系統分析。[2]

4.3.4 核四 ES014 標與霧峰 E/S 兩案採用 PDM 技術介紹

J-Power 技師表示，對於現場 PDM 技術擁有多項專利，不僅可以準確偵測電纜內部 PD 現象，且能夠準確檢測 PD 現象出現之位置。不

過，礙於公司之技術保密原則，不方便提供詳細資料。以下僅介紹 J-Power 依約執行 PD 試驗所使用之設備及方法，另外，適逢本處經辦另一工程—霧峰變電所改建第二期 E/S 亦於近期完工，亦包含 345kV XLPE 電纜之施工，且使用線上連續 PDM 技術，有別於 ES014 標之 PDM 技術，故在此摘錄參考。

4.3.4.1 ES014 標核四電廠連絡電纜 PDM 簡介

此案工程範圍包含 XFMR Unit 1~GIS(路徑長度約 745 公尺)及 XFMR Unit 2~GIS(路徑長度約 563 公尺)之 345kV XLPE 2000mm² 地下電纜，採一回線複導體配置。

A. PDM 設備簡介

承商採用之 PDM 儀器係以電容耦合感測器偵測電纜終端匣內部部份放電情形。PD 監測設備設置於 GIS 側，主變壓器測之 PD 傳感器以光纖電纜佈設，經電纜洞連接至 GIS 側之監測設備。其實際接線請詳圖 4.2 所式。



圖 4.2 PD 監測設備配置圖

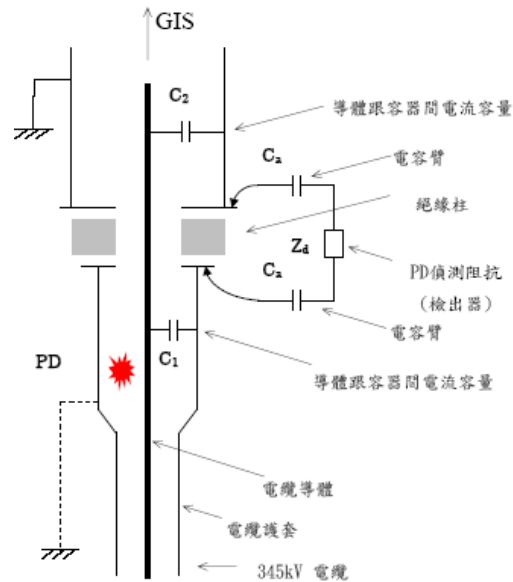


圖 4.3 耦合電容感測器檢測示意圖

若電纜終端匣內部產生部份放電，則可由耦合電容檢測出脈衝電流信號(測試需配合交流耐壓試驗檢測)，在經由電光訊號轉換送信器進行信號處理。請詳圖 4.3 所式。

信號處理包括濾波、放大、並進行電光轉換後，經由光纖傳送至另端電光訊號轉換送信器解碼後，由示波器進行頻譜特性分析。其流

程圖請詳圖 4.4 所示。

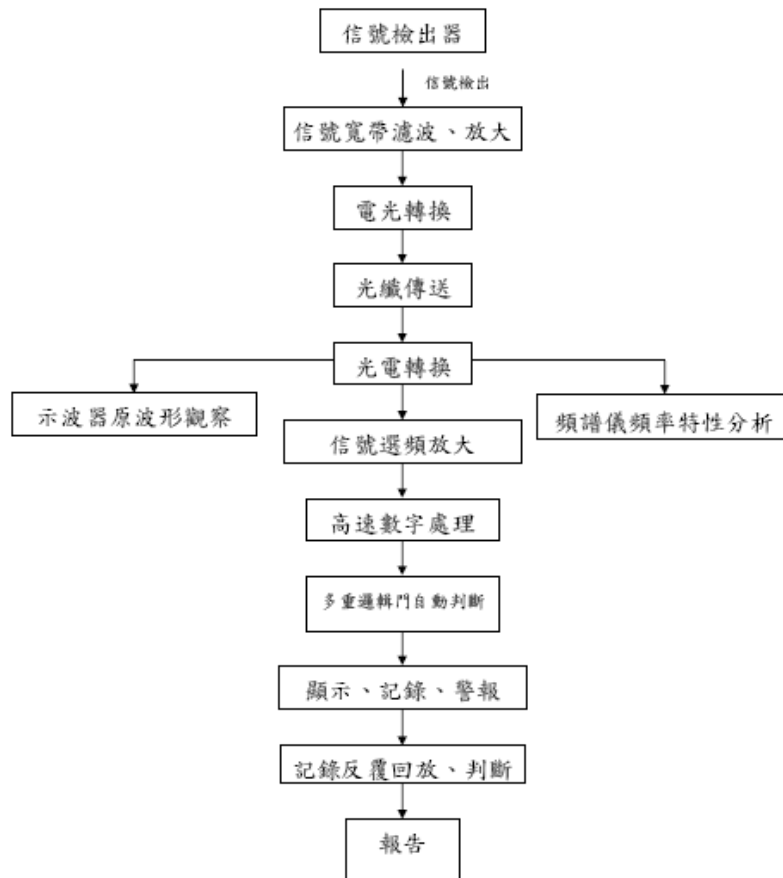


圖 4.4 核四 PDM 檢測流程圖

B. AC 耐壓及 PDM 試驗程序

此案依合約規定，需於現場完工試驗由承商執行 PD 試驗。XFMR Unit 1~GIS 間之 345kV 電纜於 97 年 9 月執行完工 AC 耐壓及 PD 試驗。其中，AC 耐壓試驗係與 PDM 一併實施，AC 耐壓及 PDM 時序表請詳圖 4.5 所式。

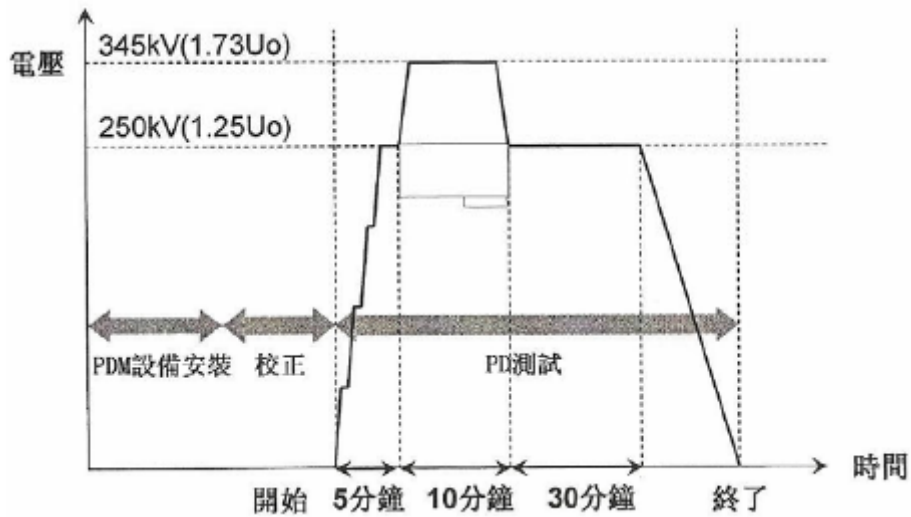


圖 4.5 核四現場 AC 耐壓及 PDM 時序表

C. 測試標準及合格標準

可依頻率、相位、頻度(Count Rate)、電量(Magnitude)、時間(Occur Time)五要素來判讀分析，其測試標準如表 4.2 所式。合格標準如表 4.3 所式。

表 4.2 PDM 判讀要素標準

要素	部分放電判讀標準
頻率	多個頻率可同時測出同樣異常信號→PD
相位	相差 180°的 2 各信號→PD
頻度	頻度達 10~30pps→PD
電量	其中一個相位特別高，電荷量基本上電值→PD
時間	異常持續發生→PD

表 4.3 PDM 判讀標準

測試值(pc)	判讀標準
無 PD 信號	每個測試頻率紀錄大於 10min，總共>30min
1~10	屬於可無視範圍
10~100	要注意確認，延長測試時間觀察其變化
100~300	需做出對策，密切追蹤，追加測試調查、定位
300~1000	必須立即深入調查確認，做出更換作業計畫方案
1000~	立即中止耐壓試驗，並提出更換計畫方案

4.3.3.2 霧峰變電所第二期 E/S 改建工程 PDM 簡介

霧峰變電所改建第二期 E/S 為屋內式變電所，由台電公司 345kV 輸電系統引接與饋送電源，並由本改建計畫所設置之變配電設備，提供一期 D/S 所需之 161kV 特高壓電源。

此案採用 BRUGG 345kV 電纜(XLPE 2500mm²)，由瑞士 BRUGG 承攬施工，引接 345kV 輸電鐵塔至 345kV GIS，包含峨嵋線~霧峰(共 1 回 6 條線)、霧峰~中寮二路(共 1 回 6 條線)、霧峰~中寮一路(共 1 回 6 條線)以及霧峰~中港線(共 1 回 6 條線)共 4 回線；以及配置於 345kV GIS 至 345/161/69kV A.TR(共三台變壓器)間。

A. 連續線上 PDM 架構

此案採用德國 LEMKE DIAGNOSTICS GmbH(LDIC)公司所生產之連續線上部份放電偵測系統(continuous partial discharge measurement)，每一電纜終端設置一組超高頻方向性感測器(UHF

directional sensor), 跨接於電纜頭基板(base plate)以及接地之間。每一回線之感測器透過高頻同軸電纜連接至信號處理箱, 也就是 PD Guard 設備; 此系統共有四回線, 故採用四組 PD Guard。所有 PD Guard 透過 FO 轉換器並經光纖(Fiber Optical, FO)連接至匯流排系統(bus system)。匯流排系統係由設置於所內之電腦主機控制, 電腦主機內含 200GB 硬碟作為資料儲存及備份, 並備有專家系統及相關軟體供後續信號分析處理; 其他個人電腦亦可透過乙太網路線或電話線/數據機與電腦主機連線溝通。請詳附圖 4.6 所式。

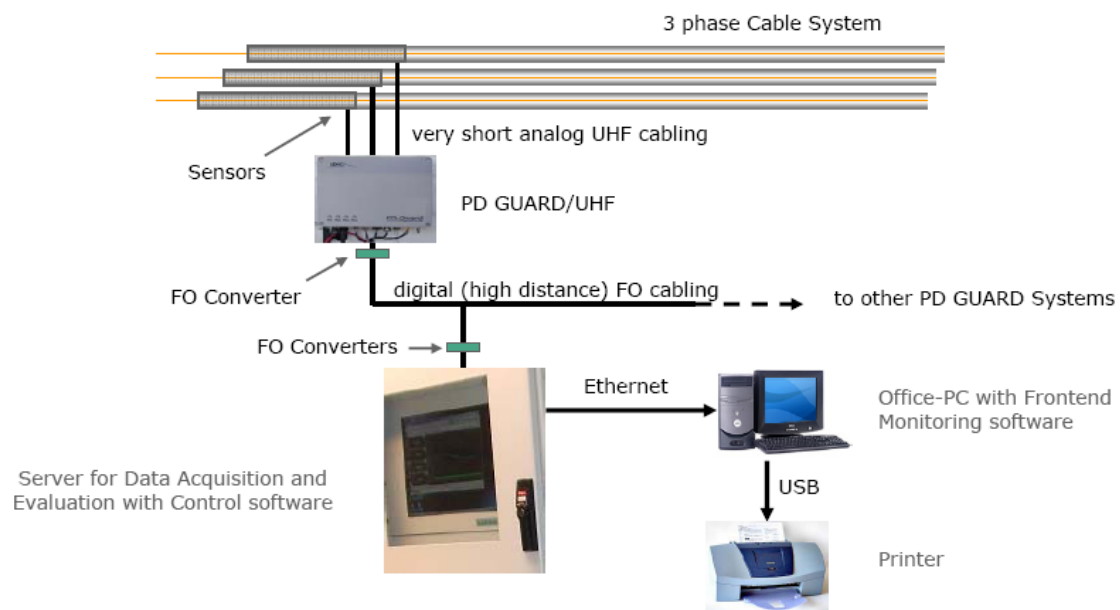


圖 4.6 霧峰連續線上 PDM 架構圖

B. PDM 設備規格及數量

連續線上 PDM 設備之其規格及數量如表 4.4 所示:

表 4.4 霧峰連續線上 PDM 規格及數量

項次	材料/設備名稱	數量	備註
1	Sensor “A” , (請詳附註)	33	電感性線路耦合 UHF PD 感測器(100MHz~1GHz) , 設置在每一組 345kV 電纜終端接續匣
2	Sensor “B” , (請詳附註)	33	電感性線路耦合 UHF PD 感測器(100MHz~1GHz) , 設置在每一組 345kV 電纜終端接續匣
3	BNC Cabling between Sensor and PD Guard UHF	66	連接於感應器及 PD Guard UHF 間
4	PD Guard UHF	4+1spqre	每回線(共 3 相 6 條線)使用一組 PD Guard UHF , 四組 PD Guard UHF 可同時運作
5	FO converters+FO cabling	1 Lot	連接於 PD Guard 與乙太網路交換器間
6	Ethernet Switch	1	10/100Mbps , multi-port
7	100 Mbps Ethernet cabling RJ-45	1	連接於乙太網路交換器及伺服電腦間
8	Portable data acquisition and evaluation computer	1	內含 PD 分析軟體以及專家系統

附註:

電感性線路耦合 UHF PD 感測器(100MHz~1GHz)

1. Sensor “A” 係為高阻抗型:具有實質電容器(2nF) , 用於非接地終端 , 其連接示意圖及配置圖請詳圖 4.7 所式。
2. Sensor “B” 係為低阻抗型:無實質電容器 , 用於接地終端 , 其連接示意

圖及配置圖請詳圖 4.7 所式。

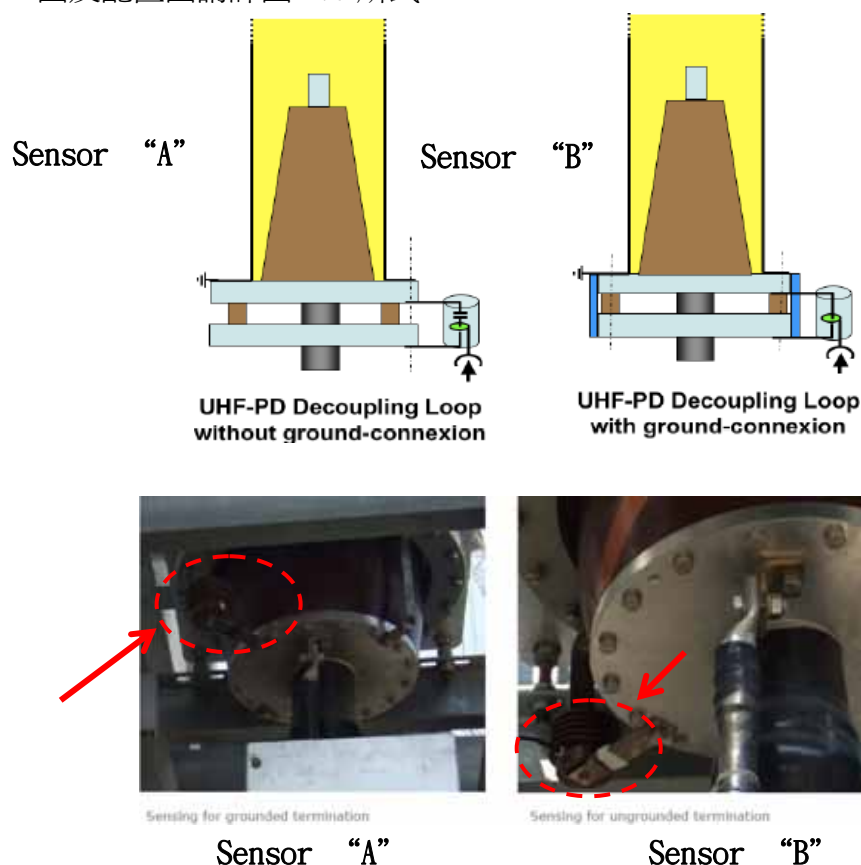


圖 4.7 感測器 "A" 及感測器 "B" 之區別

C. 現場 AC 耐壓及連續線上 PDM 試驗程序

此案於 97 年 9 月 23 日執行電纜完工耐壓試驗，PDM 亦與 AC 耐壓試驗一併實施，其程序如下列所示：

Step 1: 升壓至 120kV，維持 10~15 分進行 PD 試驗，若無異狀，進行下步驟。

Step 2: 續升壓至 199kV(U_0)，維持 5~10 分進行 PD 試驗，若無異狀，進行下步驟。

Step 3: 續升壓至 345kV($1.73 \cdot U_0$)，維持 10 分進行 PD 試驗，

若無異狀，則結束試驗。若有出現 PD 現象，則降至 285kV 後繼續 PD 試驗觀察。

依據上述步驟，可繪製程序圖如下：

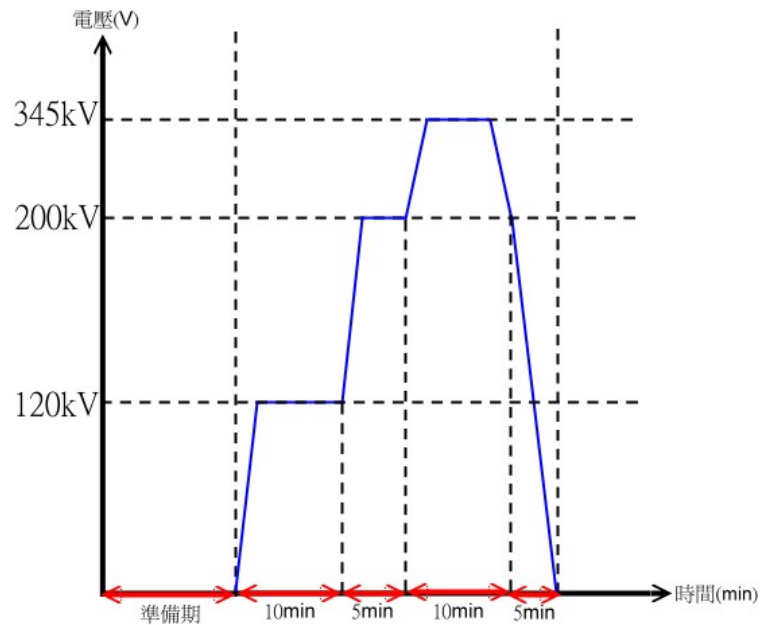


圖 4.8 霧峰現場 AC 耐壓及 PDM 程序圖

D. 判斷標準

此連續線上 PDM 內含有專家系統，可監測、記錄量測值，當量測值經由專家系統判斷為部份放電現象時，電腦即會發出警告訊號再由技師判斷確切情形。

第五章 心得與建議事項

一、有關 XLPE 電纜之層狀包覆技術，僅止於書面資料，尙未深入了解。不過，藉由此次出國機會，試圖詢問電纜設計相關問題，J-Power 公司技師詳細比較兩案使用電纜不同之差別，藉此，一方面可了解 XLPE 電纜設計過程中所需考量之設計理念，另一方面，也可了解絕緣層之厚度與線路電容常數呈反比之關係。

二、J-Power 公司對於製程中所有空間均訂有潔淨度標準，在管理上更嚴謹要求管制值高於標準值，更能確保生產品質。此種做事態度，值得作為國內廠商之借鏡。

三、由於核四工程 ES014 標、4.4.4 節中，於現場完工試驗中，承商除了依 IEC 62067 執行 AC 耐壓試驗之外，仍可選擇 DC 耐壓試驗 (VDC 690kV / 15 mins)，不過，DC 耐壓試驗經證實已有諸多缺點，且 345kV XLPE 電纜試驗所依循之 IEC 60270 亦規範 AC 耐壓標準，再者，廠家對於亦無實施 DC 耐壓試驗意願，因此，建議公司往後對於 345kV XLPE 電纜合約內試驗章節修改對於 DC 耐壓試驗之選擇性，以更明確精簡合約規範精神。

四、本公司綜研所目前正推行現場 PDM，以作為日後檢驗電纜品質之參考。經綜研所試驗人員轉述，本處所經辦之核四 ES014 標一案，恰為本公司首次執行現場 PDM。再觀霧峰二期 D/S 改建工程進行

現場 PDM，已有相當的成效，當峨嵋線~霧峰 R 相及霧峰~中寮二路 R 相共兩相進行 AC 耐壓及 PDM 時，雖通過 AC 耐壓試驗，但現場可明顯聽到 CHD 發出雜音，且由儀器判定出現異常 PD 訊號，經現場討論後，於兩天後開蓋檢查，發現兩相內絕緣套筒底部有異物雜質，但均無明顯放電現象，請詳圖 5.1 所示。



圖 5.1 絕緣套筒檢修

清潔絕緣套筒後，再次進行現場 PDM。結果，霧峰~中寮二路 R 相正常無異狀，而峨嵋線~霧峰 R 相進行 PD 試驗時，當電壓升至 100kV(U₀)，試驗儀器即出現明顯的雜訊，經儀器判定具有 PD 放電現象。現場人員馬上進行工具箱會議討論後，決定停止加壓，並拆除峨嵋線~霧峰 R 相 CHD 內絕緣套筒檢查，即發現纏繞於電纜終端之絕緣膠帶脫落，請詳圖 5.2 所式。再進一步檢查，發現絕緣膠帶貼近半導

電層部分出現電樹狀產生物，請詳圖 5.3 所式。判斷應為施工人員未纏緊絕緣膠帶，而使絕緣膠帶脫落並懸掛於絕緣套筒中，當進行加壓試驗時，導致電纜導體高電壓經由絕緣膠帶媒介於絕緣層發生部分放電現象。

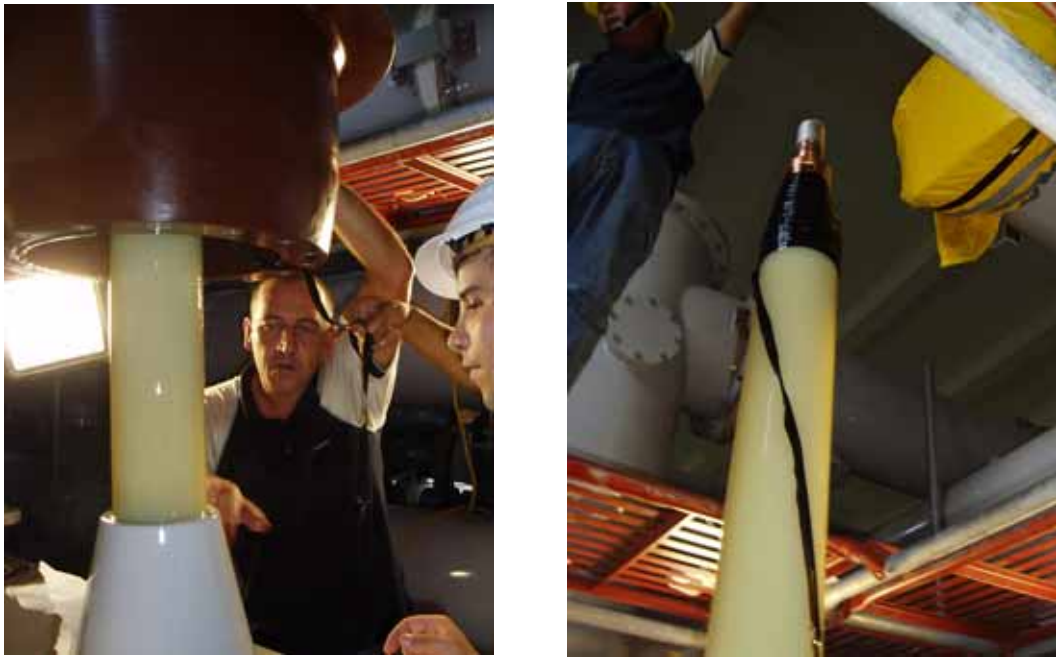


圖 5.2 絕緣膠帶脫落



圖 5.3 絕緣層發生部分放電時電樹現象

由上述事件檢討可知，當電纜通過 AC 耐壓試驗，未必能通過 PD 試驗，現場 PDM 確實有其實質的效用，能在竣工當時，即時發現施工缺失並立即切除異常之電纜終端，避免日後加入系統後可預期之風險。

藉由此次出國機會，當面請教 J-Power 技師相關問題，雖礙於他方技術不公開之原則，但也收穫不少，同時，也可以看出日本公司對於 PDM 技術之重視。因此，在本人吸收新知的同時，亦希冀本公司未來能投入相當的人力、物力研究，以期能增進電纜施工及運轉維護品質。

參考文獻：

- [1] Y Tian, PL Lewin, J S Wilkinson, S J Sutton and S G Swingler, “Continuous On-line Monitoring of Partial Discharges in High Voltage Cables”, Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN USA, 19-22 Sep. 2004
- [2] P.L. Lewin, L. Hao, D.J. Swaffield and S G Swingler, “Continuous Monitoring of Power Cables”