

變壓器絕緣偵測技術

影像檢測技術於電氣設備不停電檢查之應用

壹、序論

電氣設備(變壓器也是屬於電氣設備之一)的故障除了會產生設備損壞維修的成本之外；因設備故障所造成之生產線停產損失，乃至衍生電氣火災或人員傷害等災害，其損害更形嚴重。

採行不停電檢查技術，可以在不影響生產活動的前提下，及早發現設備初期的異常，以及時進行維修工作，在預知保養維護(predictive maintenance)工作體系中具有重要的價值。運轉中的電氣設備，因其帶有高電壓或大電流之特性，並不宜採取接近式或接觸式的檢查工作，在此將介紹兩種影像檢測技術：紅外線熱影像檢測與紫外線放電影像檢測，極適合於電氣設備的不停電檢查工作。

表 1 用以說明紅外線(infrared)、可見光(visible)、與紫外線
(ultraviolet)

所定義之波長範圍，這三類光波均屬於電磁波頻譜(electromagnetic spectrum)的範圍，但是紅外線與紫外線均在人類的視覺能力之外，必需藉助先進的光學量測技術，經由濾光、感測、訊號轉換與傳輸等過程，以輸出影像訊號滿足人類工作上的要求。上述的兩種影像檢測方法，可對電氣設備的檢查工作提供更大的便利性與可靠度，其工作上的特性包括：

1. 非接觸式：可提高檢測者工作時的安全性。
2. 非破壞性：此兩類檢測工作不會對受測設備造成額外的損傷。

3. 不受電磁場或噪音干擾:電氣設備的運轉環境往往有較大之電磁場或噪音問題, 容易干擾檢測工作之進行, 甚至造成診斷上的誤判。
4. 直覺式量測:經由儀器作訊號轉換後以影像方式顯示, 可便利檢測者研判異常部位與原因, 提供更明確之診斷結果。
5. 可提供明確的定量測值與清晰的影像資料, 可便利診斷結果之記錄與管理工作。
6. 量測快速, 在一定時間內可進行大量之設備查核工作。
7. 不需作額外的接線或採樣工作, 具有良好之便利性。

貳、紅外線熱影像檢測技術

一、電氣設備的發熱與危害

正常運轉的電力設備, 由於電流、電壓的作用, 會產生一定程度的熱損耗, 因而產生發熱現象(如圖 1); 當電氣設備發生缺陷或故障時, 問題部位的熱損耗會加劇而產生異常的溫度變化現象。電氣的熱損耗主要包含三類:

1. 電阻性損耗:屬於電流效應所引起之發熱;當接觸不良導致電阻過高或負載電流過大時, 均會產生異常之高溫現象。
2. 介質性損耗:屬於電壓效應所引起之發熱;當絕緣介質老化、劣化或受潮導致絕緣不良時, 會有異常之溫升現象。
3. 鐵磁性損耗:電與磁交互感應作用會產生熱損耗;當鐵心的磁迴路不正常、磁通密度過高或渦流損耗時, 會產生異常之高溫現象。

電氣設備發生異常過熱現象時, 除了警示某些既存的缺陷待維修外, 其產生

之不良影響尚包括：(1)使絕緣材料加速老化(壽命減短)；(2)使固體材料的機械強度下降(即軟化、脆化)；(3)使導電材料的導電能力下降；(4)使材料絕緣的耐壓能力下降；(5)使電子元件的性能不穩定；(6)因設備產生非預期性失能之生產損失；(7)可能衍生電氣火災與人員傷害；(8)形成能源浪費。

二、儀器的測溫原理

紅外線熱影像儀器的測溫原理，是針對物體表面的熱輻射進行感測、訊號轉換、與溫度換算。自然界中一切溫度高於絕對零度(0 K)的物體，隨時都在輻射出紅外線，隨著物體溫度的不同，其輻射之波長分布特性與強度亦隨之改變，依據史帝夫-波茲曼(Stefan-Boltzmann)定理的描述：物體表面的紅外線輻射功率與其絕對溫度的4次方成正比。「紅外線」係指波長介於0.8 μm 到 100 μm 間的電磁波頻譜，物體輻射的紅外線在地球表面傳送時，會受到大氣組成物質(例如水蒸氣、CO₂、O₃等)的吸收，使強度大幅衰減，僅在2 μm 2.5 μm 、3 μm 5 μm 及 8 μm 13 μm 三個特定波長區域有較高的穿透率(transmission)，此三個波長區域被稱為紅外線的「大氣窗(atmospheric windows)」(如圖 2)，而目前紅外線熱影像儀器所使用之偵測波段多為 3 μm 5 μm 或 8 μm 12 μm ，一般概以「短波(short wave)」或「長波(long wave)」來作為區別。由於紅外線對多數固體物質的穿透能力極差，紅外線熱像儀的量測方式是以感測物體表面輻射的紅外線能量為

主。紅外線熱像儀是以連續輸出的平面影像方式，顯示被測對象的表面溫度分佈情形，可便利使用者覺察不正常的溫度分佈型態(pattern)或溫度值。

三、 檢測技術之實際應用

應用紅外線熱像檢測進行電氣設備的檢查工作已相當普及，國際上若干與電氣設備有關的維護標準已將該項檢測列入必要的測試項目；在國內，一般已推行預知保養體系之工廠，也逐漸採取該項檢測以取代以往採行之定期接點緊固措施。這項檢測技術在電氣設備的應用對象可擴及發電廠、開關場、電力輸配線路、變電站、電氣室、控制室、線槽、分電箱及用電設備所在的分區場所，其間可包括發電機、架空線路、斷路器、變壓器、比流器、比壓器、避雷器、套管、匯流排、電抗器、電容器、電纜、導線，以及各式開關、切換器、電驛，甚至用電之機台與動力設備本身，均可應用此項檢測查找出重要的設備異常問題。

圖 3 列出若干實測的案例。在實際檢測工作中，經常可檢出之電氣設備問題類型包括：

1. 各種型式之接點接觸不良：包括螺絲鬆脫或滑牙、異物嵌入、導電金屬氧化、接觸面密合不良、端子壓接處理不良、電纜斷股、或接觸面積不足等。
2. 絕緣與耐壓功能不良：包括沿面污染、環境溼度太高、水露凝結、絕緣距離不足、材料耐壓等級不足、絕緣劣化或擊穿等諸多因素所致。
3. 設備過載、三相負載不平衡、欠相、或開路等。
4. 渦流過熱：因渦流感應所產生之過熱現象十分普遍而嚴重，其造成原因多因設

計不良或施工疏失所致。

5.旋轉摩擦：旋轉機構(例如各型電動機)因轉軸偏心、潤滑不良等因素產生異常大量之摩擦熱,使設備溫度上升。

6.散熱不良:包括線槽電纜堆覆過度密集、變電站空調不足或迴風不良、盤體通風不良,設備使用環境溫度偏高等因素所導致之積熱無法消除之過熱現象。

四、變壓器檢測異常研判

4.1 變壓器的線圈及鐵心在油箱中間,四周充滿變壓器油,內部如有局部過熱,由於油的散熱作用,在油箱的表面無法形成局部明顯的異常熱像圖。一般而言,油箱表面的熱分佈,因為漏磁的影響,會有不均勻的現象。而箱壁表面局部較熱部位,往往是因為該處漏磁較大,而形成渦電流發熱而引起的,並不一定表示該表面對應的內部有局部過熱情形。

4.2 變壓器油路系統

變壓器的油閥、冷卻器、油箱、防爆管等油路系統故障,如油路阻塞,散熱器表面溫度均勻與否,防爆管破裂等故障現象,可以由熱像判斷出來。

4.3 套管內部故障,常因主絕緣不良或局部放電而發生爆炸。此種局部發熱現象,可由比較三相套管的熱像圖判斷出來。套管上部引線接點是否過熱,可輕易由熱像圖判斷。

參、紫外線放電影像檢測技術

一、電暈放電(corona discharge)的發生與危害

依照 ASTM D1868-73 的定義：「電暈放電」(corona)是一種局部化的放電現象(localized discharge)，導因於絕緣系統之局部電壓應力超過臨界值時所產生之氣體電離化(gaseous ionization)現象。一般而言，當帶電體表面之局部電位梯度超過空氣的絕緣強度(約 30KV/cm)時，會使空氣分子電離而產生電暈放電現象；特別是高壓電力設備，其常因設計、製造、安裝、設備使用環境及維護工作不良而形成電暈放電問題。

電暈放電是嚴重的閃絡放電與電弧放電的先期癥兆，不利於電力設備之運轉，是眾多電力系統事故的導因。初期的電暈放電會使絕緣系統產生緩慢而漸進性的破壞；當絕緣破壞到一定程度時，可能惡化造成絕緣瞬間崩潰，引發損害或重大事故(如圖 4)。因電暈放電所造成之不良影響，主要包括：

1. 會產生離子衝擊(ion bombardment)效應，對設備形成機械性破壞。
2. 會產生臭氧(ozone)及硝酸(nitric acid)等氧化性物質，對設備形成化學性破壞。
3. 會產生無線電干擾(射頻干擾)訊號，影響附近範圍的收訊或收視效果。
4. 會消電能，降低電力傳輸效率。

二、儀器的感測原理

紫外線放電影像檢測儀的檢測原理，係以感測物體輻射之紫外線波段能量，達到發現問題之目的。氣體的電離化過程中，原本呈電中性的分子被誘導分離為帶負電荷的自由電子與帶正電荷的離子；在相對運動的過程中，正電荷離子可能與另一個電子碰撞結合成為中性的分子(亦即放電)，並同時釋出光波能量。氣體放電後放射的光波頻率與氣體種類有關，因為空氣中主要的成份是氮氣(N₂)，其放射波長約略介於 240 ~ 400nm，屬於紫外光(UV)波段，該放射能量之波長主要落在 280nm ~ 400nm，少部份放射能量之波長則低於 280nm。紫外線放電影像檢測儀器區分為屋內型與屋外型兩類，適合在沒有陽光干擾的環境下(如室內或晚間)工作的屋內型儀器，以 $\lambda = 280\text{nm} \sim 400\text{nm}$ 為檢測波段。但是在有太陽光干擾的環境下， $\lambda = 280\text{nm} \sim 400\text{nm}$ 的波段與太陽光輻射頻譜卻有大部份重疊(請參考圖 5)，屋外型儀器具有額外的濾波功能，可針對波長介於 240 ~ 280nm 的太陽盲光(solar-blind)波段進行感測，使電暈放電檢測工作不必受強烈陽光之限制，可進行全天候的檢測工作。

三、檢測技術之特點與實際應用

與現行的電暈放電檢測方法作比較，本檢測方法俱備「有效」、「快速」與「明瞭」等優點，是一項更經濟而便利的工具，可供及早察覺電氣設備絕緣問題的癥兆。紫外線放電影像檢測技術是以「影像」方式顯示電暈放電問題(如圖 6)，可提供更充分的資訊以利發現及研判電氣的放電問題，該檢測技術具有之工作特點包括：

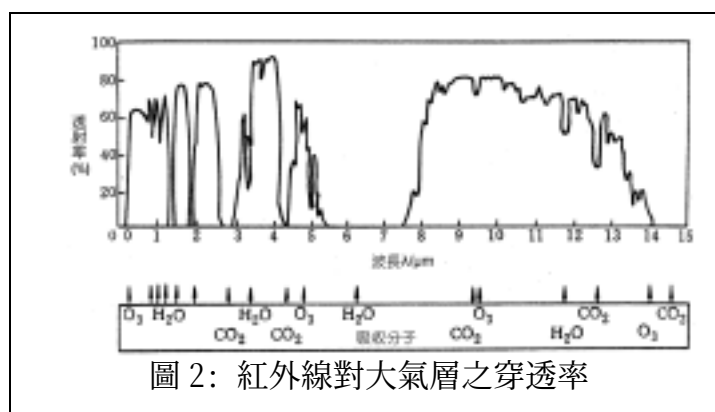
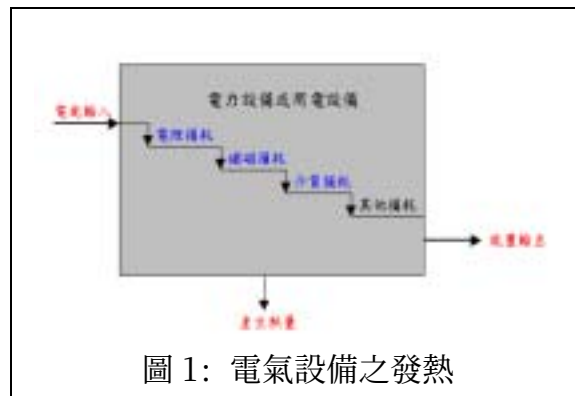
1. 儀器感測的靈敏度高，並可不受電磁場與一般環境光源之干擾。
2. 可計算光輻射量之測值(光子數)，以進行定量量測，供比較放電程度的大小程度。
3. 可提供具體的影像資料，有利檢查人員逐級報告異常問題或作資料存檔。
4. 可明確顯示出放電部位，便利藉由放電影像結構研判造成放電之原因。
5. 不受電磁與噪音等環境因素之干擾，亦不需停電或做接線措施，可有效率地進行大量的檢測工作。紫外線放電影像檢測技術主要用以檢查發生於「外部」的放電現象，此技術可幫助相關人員解決的問題包括：(1)檢查設備絕緣不良問題；(2)監測與研判閃絡放電問題；(3)管理礙子污染與清洗事宜；(4)確認電場應力消除裝置(如電暈環)之效果；(5)發現鬆脫之夾鉗接點；(6)發現輸配線路斷股位置；(7)協助進行馬達、變壓器與發電機之高壓線圈繞組檢修工作；(8)協助高壓電力設備的設計、製造、安裝與驗收工作；(9)協助確認收訊與收視之干擾源。

肆、圖與表

表 1：波長的定義

光波	波長範圍
紅外線	800nm ~ 10 ⁵ nm
可見光	400nm ~ 800nm
紫外線	100nm ~ 400nm

註： 1nm = 10⁻⁹m = 10⁻³μm



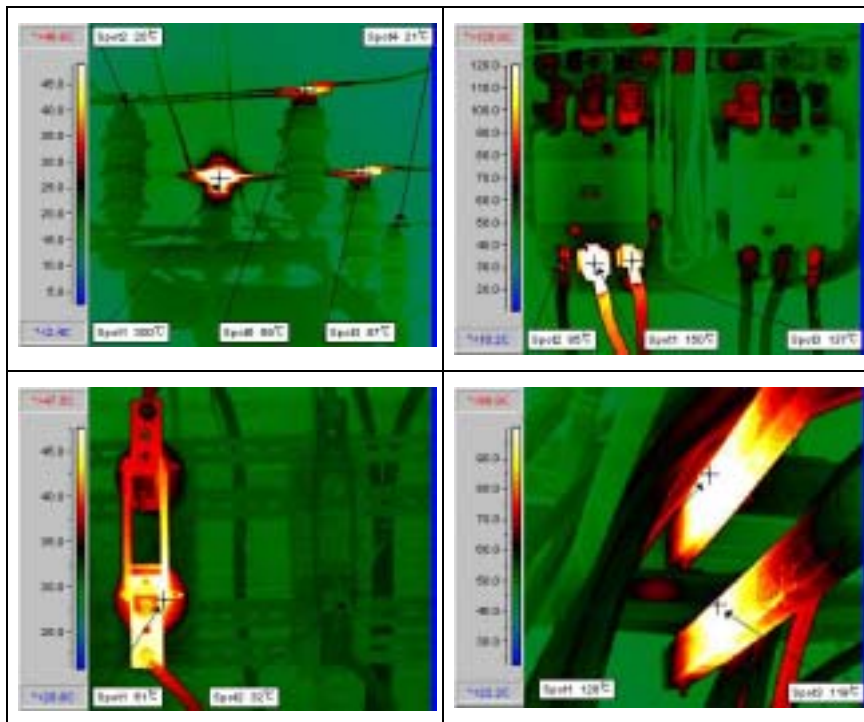


圖 3：紅外線熱像檢測實例。左上圖為空斷開關(ABS)；右上圖為電磁接觸器(MC)；左下圖為切離開關(DS)；右下圖為線槽支撐角鐵。



圖 4：電暈放電造成之破壞實例。圖左為銅排表面絕緣護套之漸進性破壞；圖右為高壓接頭因絕緣不良已經被燒損。

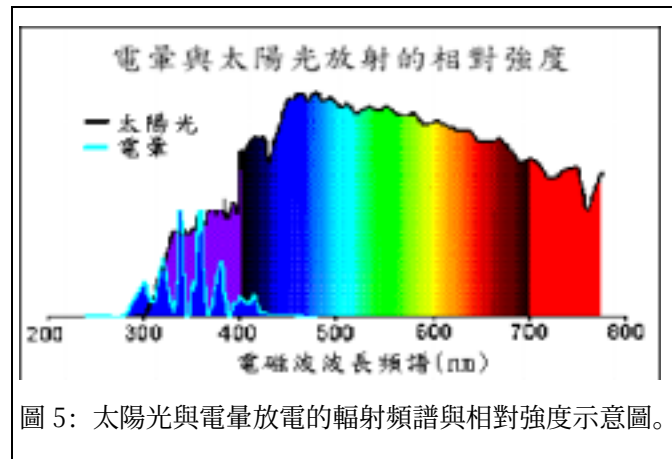
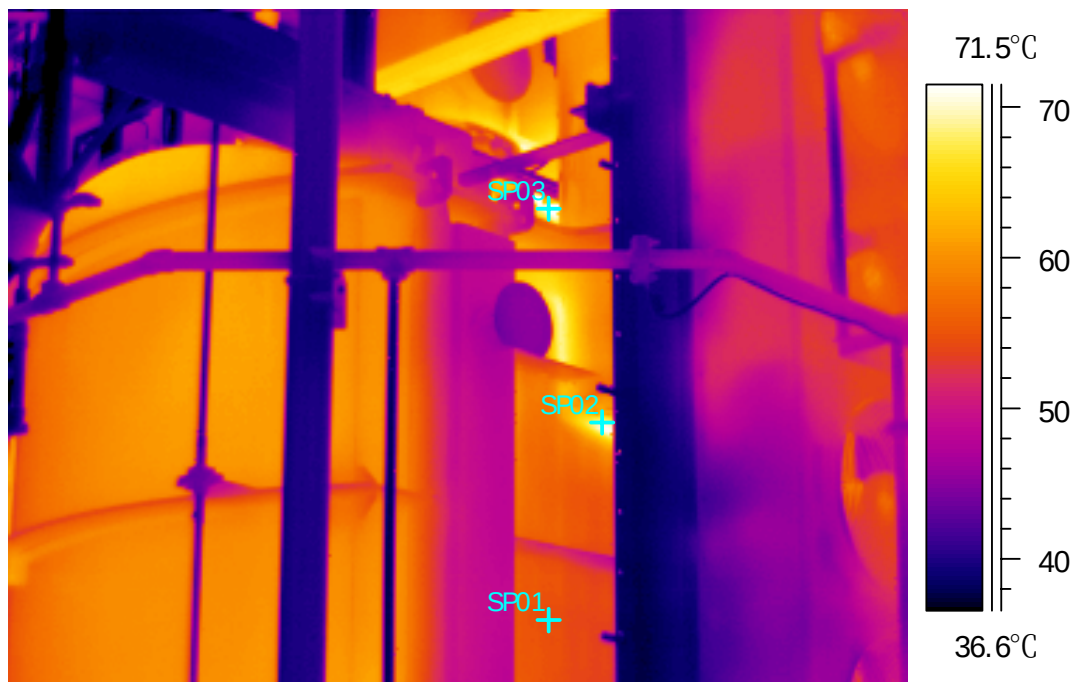


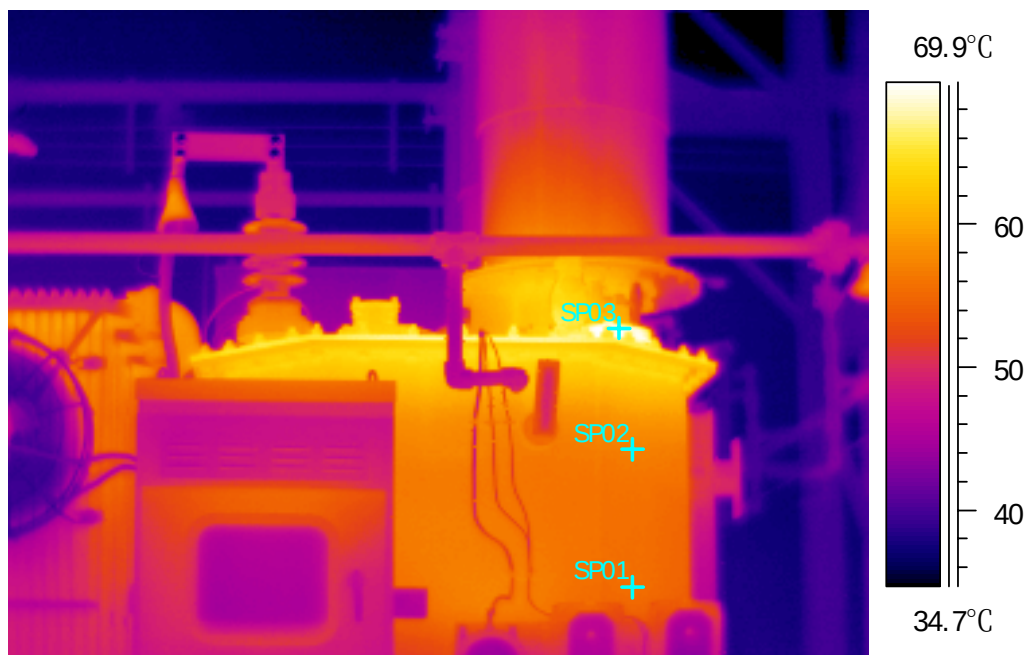
圖 6：紫外線放電影像檢測實例。左上圖為拉張礙子串之電暈；右上圖為支撐礙子之電暈；左下圖為變壓器套管之接點與招弧棒（差別絕緣裝置）之電暈；右下圖為導線接續處之電暈。

伍、紅外線熱影像檢測應用實例



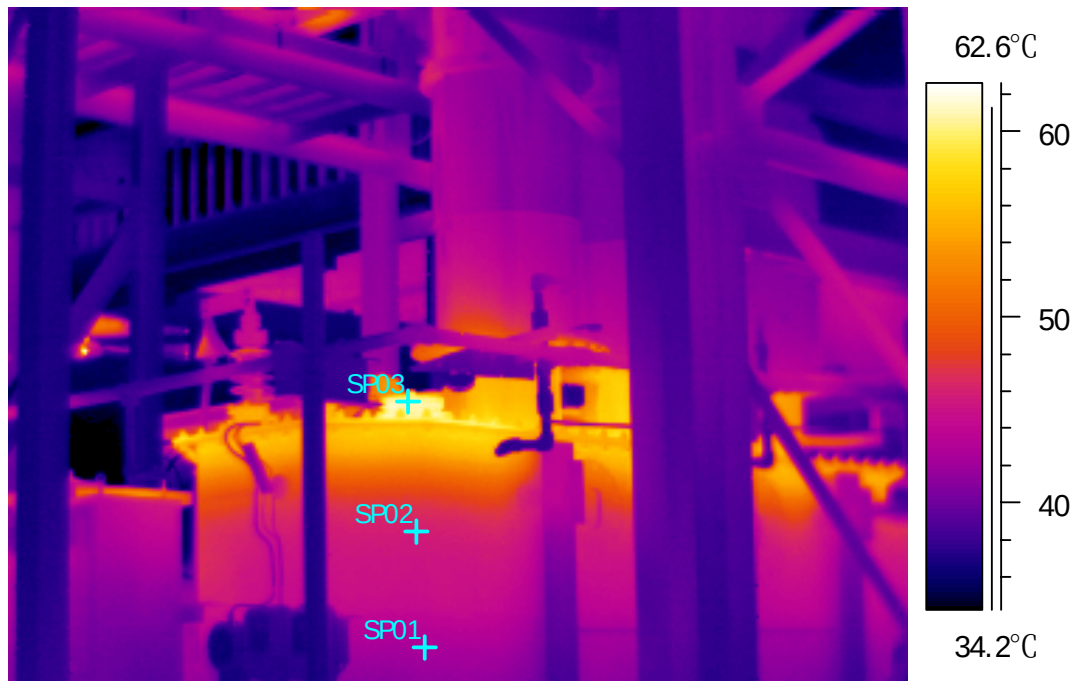
SPO1:54.8 °C SPO2:69.6°C SPO3:73°C





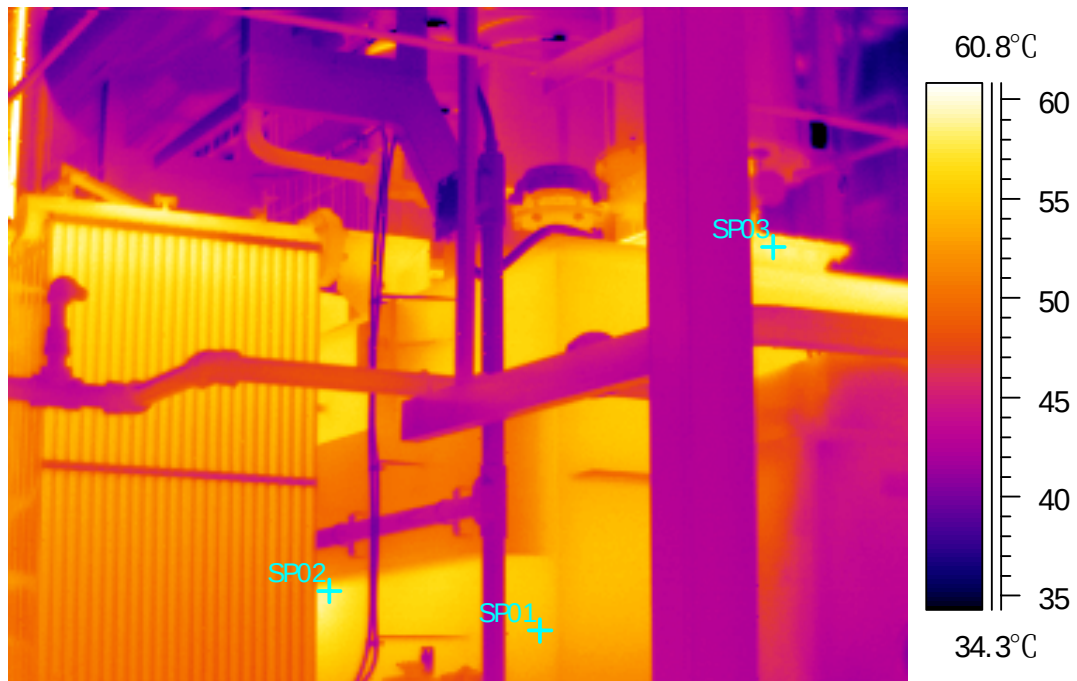
SPO1:55.7 °C SPO2:57.3°C SPO3:69.4°C





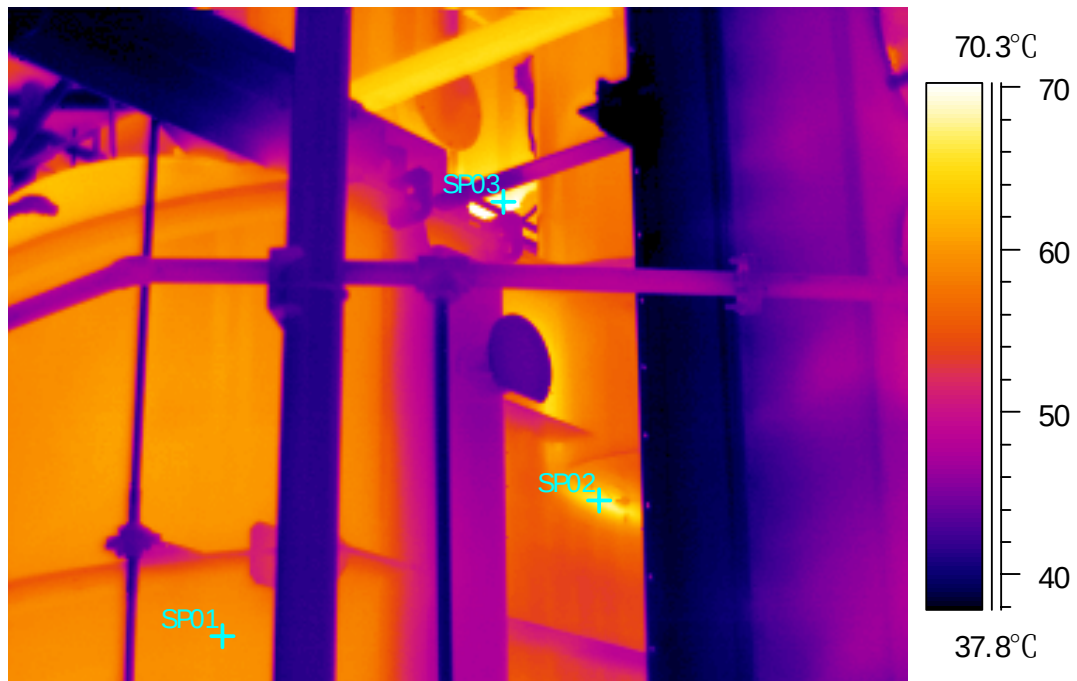
SPO1:42.6 °C SPO2:46°C SPO3:60.5°C



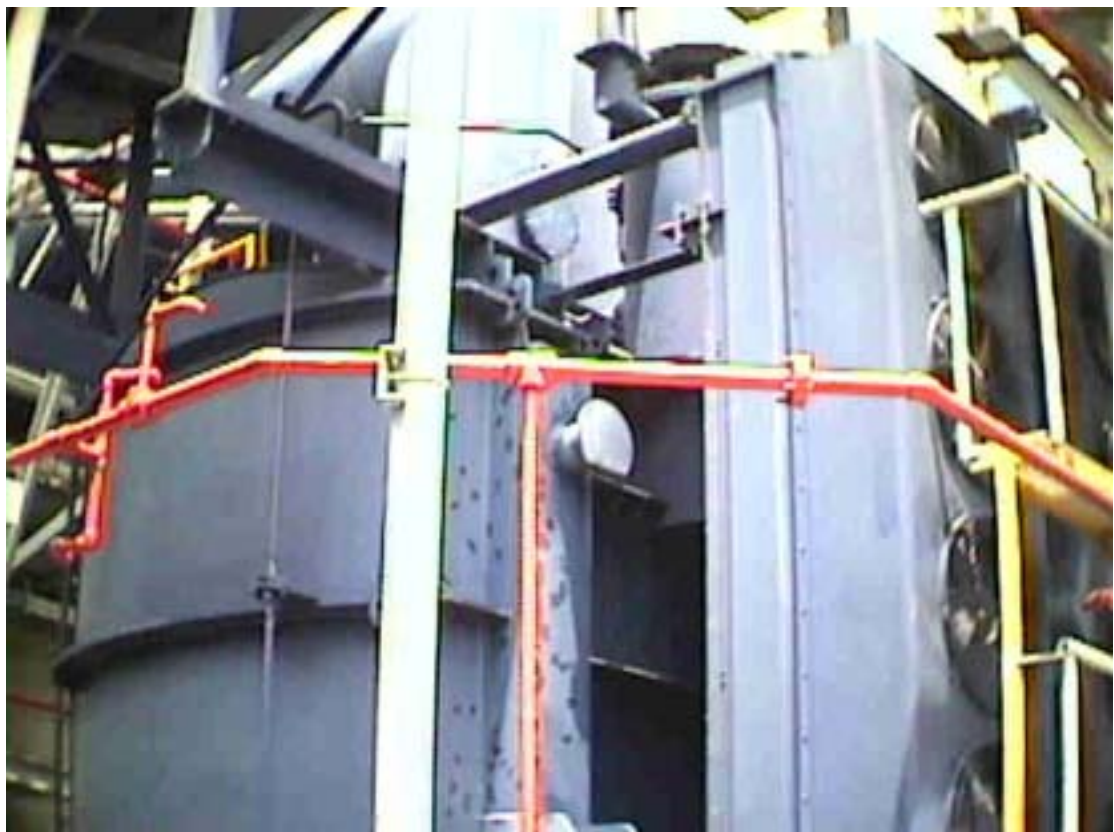


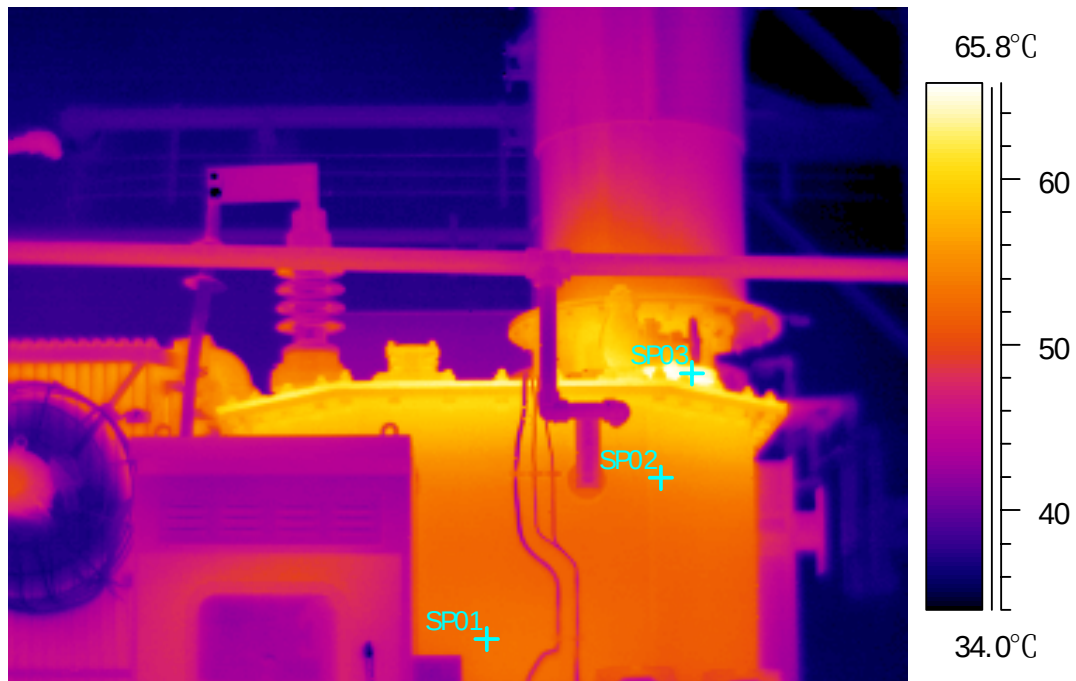
SPO1:54.5 °C SPO2:58.5°C SPO3:58.8°C





SPO1:59.8°C SPO2:67.5°C SPO3:69.5°C





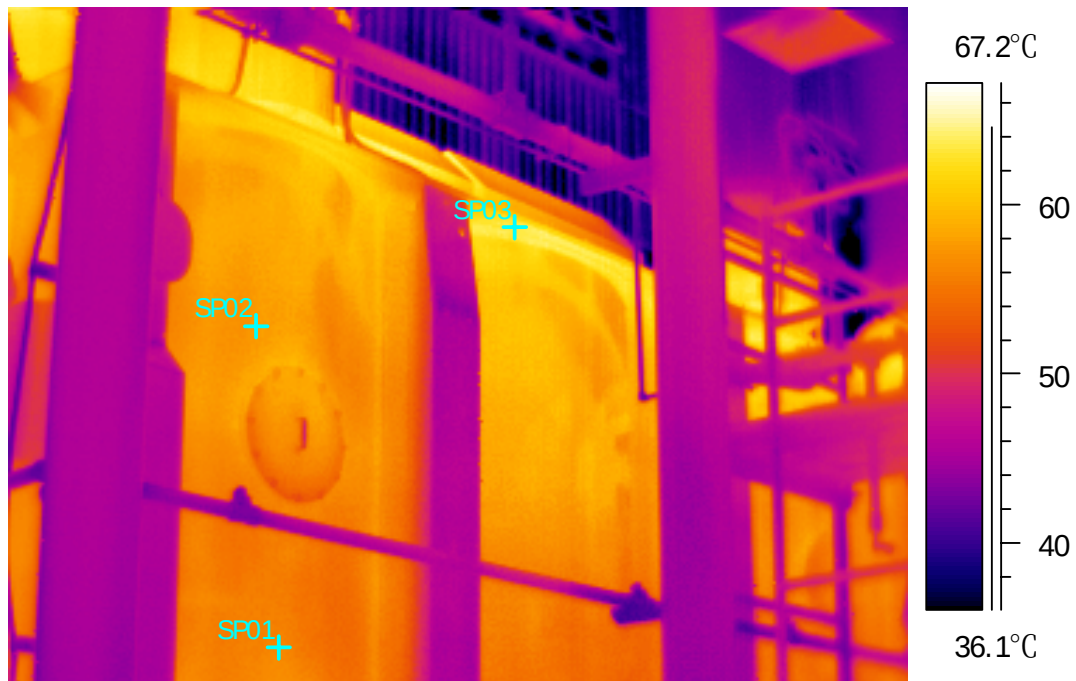
SPO1:53.1 °C SPO2:54.5°C SPO3:65.2°C





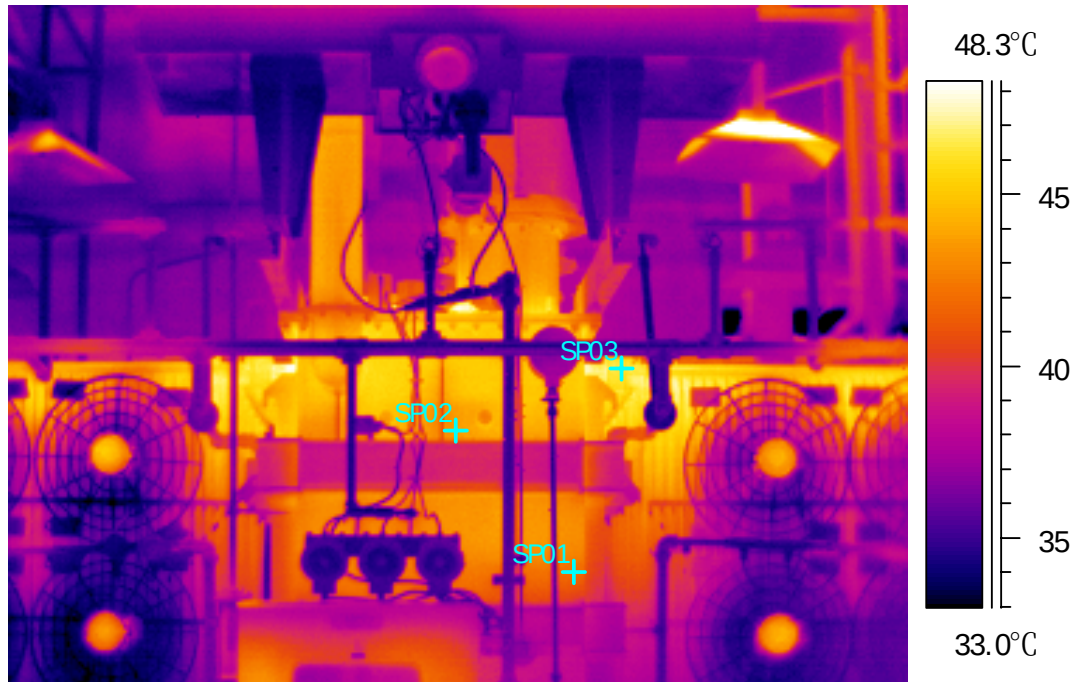
SPO1:41.7°C SPO2:45.6°C SPO3:59.5°C





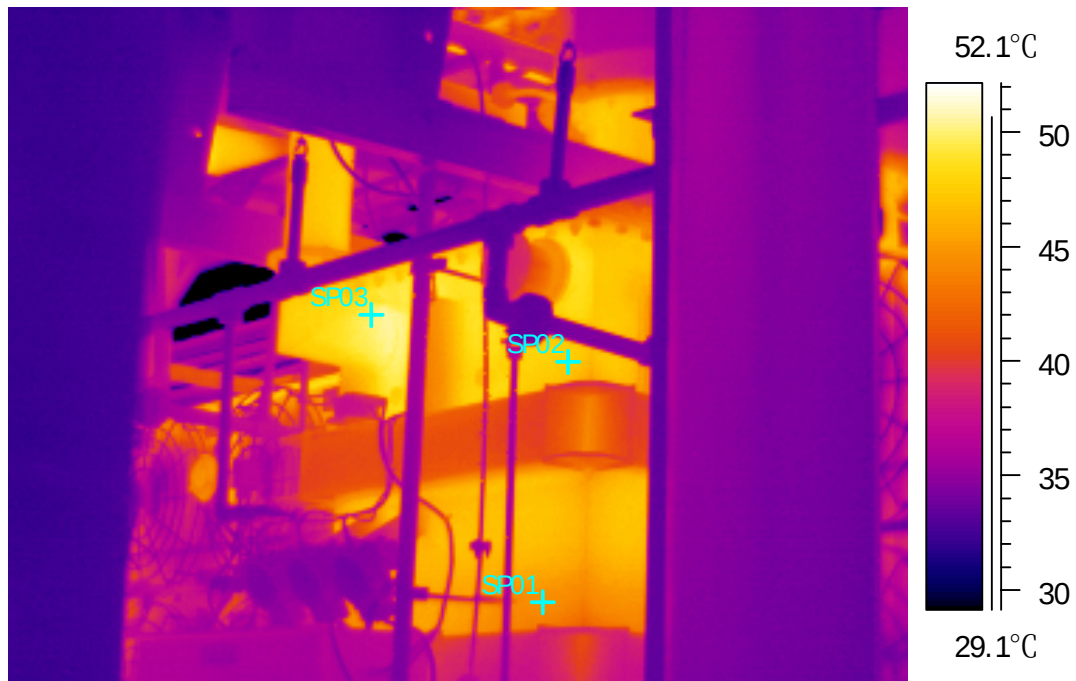
SPO1:56.6 °C SPO2:58°C SPO3:63.6°C





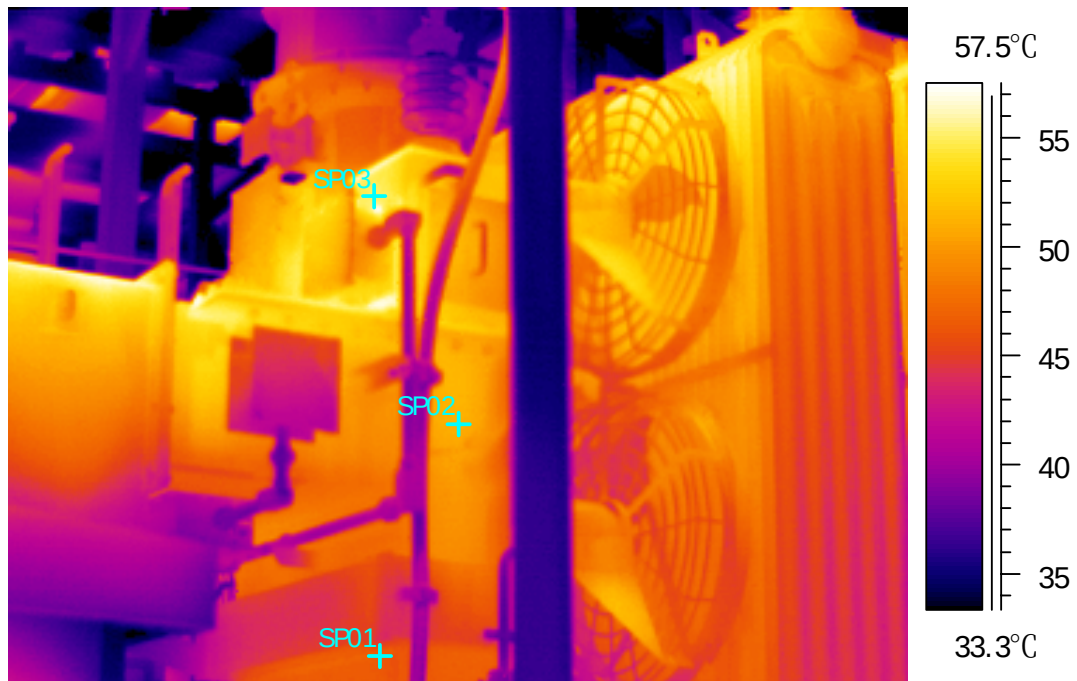
SPO1:41.9°C SPO2:43.6°C SPO3:46.5°C



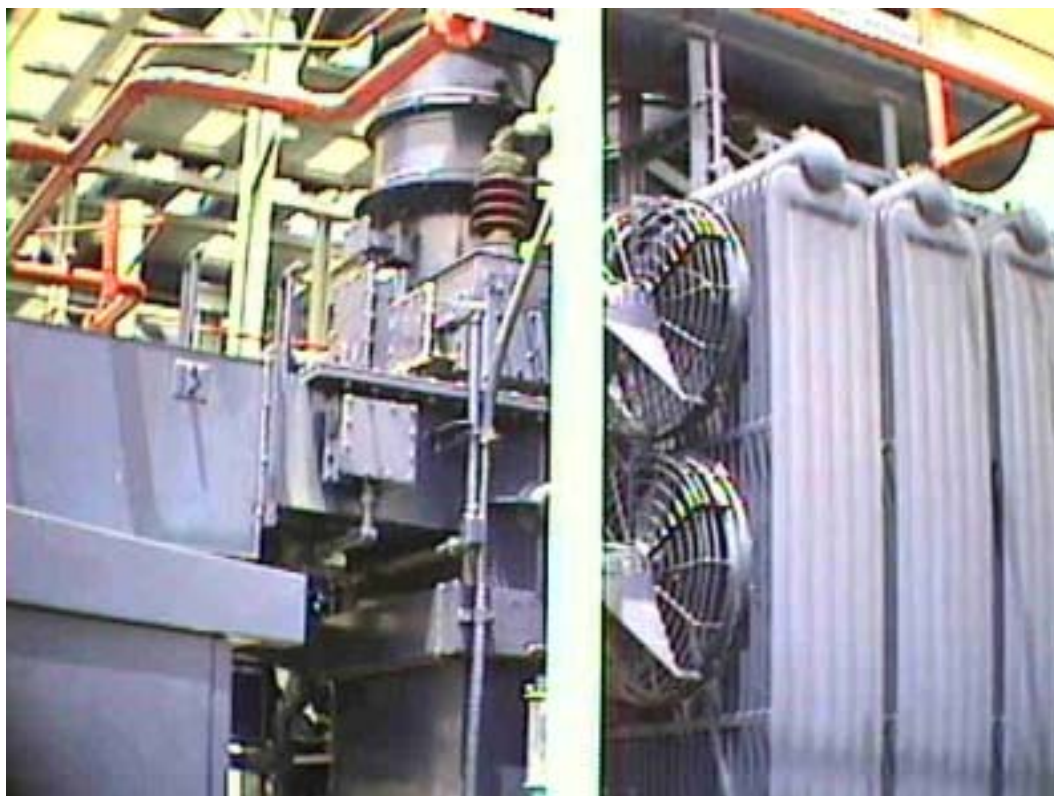


SPO1:44.7°C SPO2:47.6 °C SPO3:50.°C





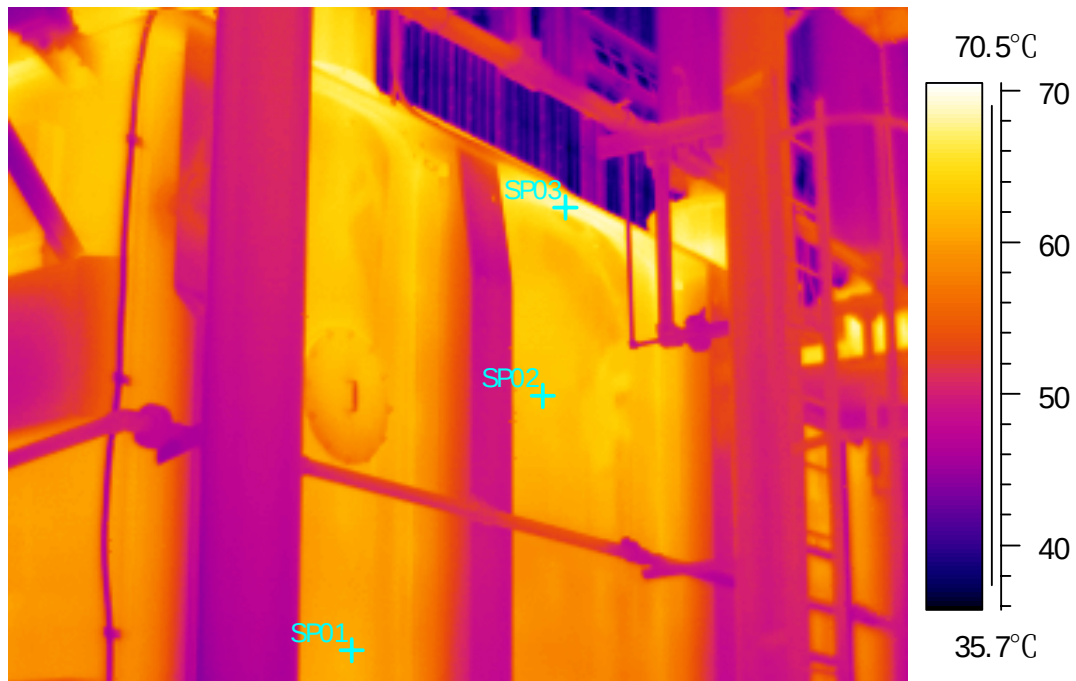
SPO1:46.6°C SPO2:51.3 °C SPO3:55.2°C





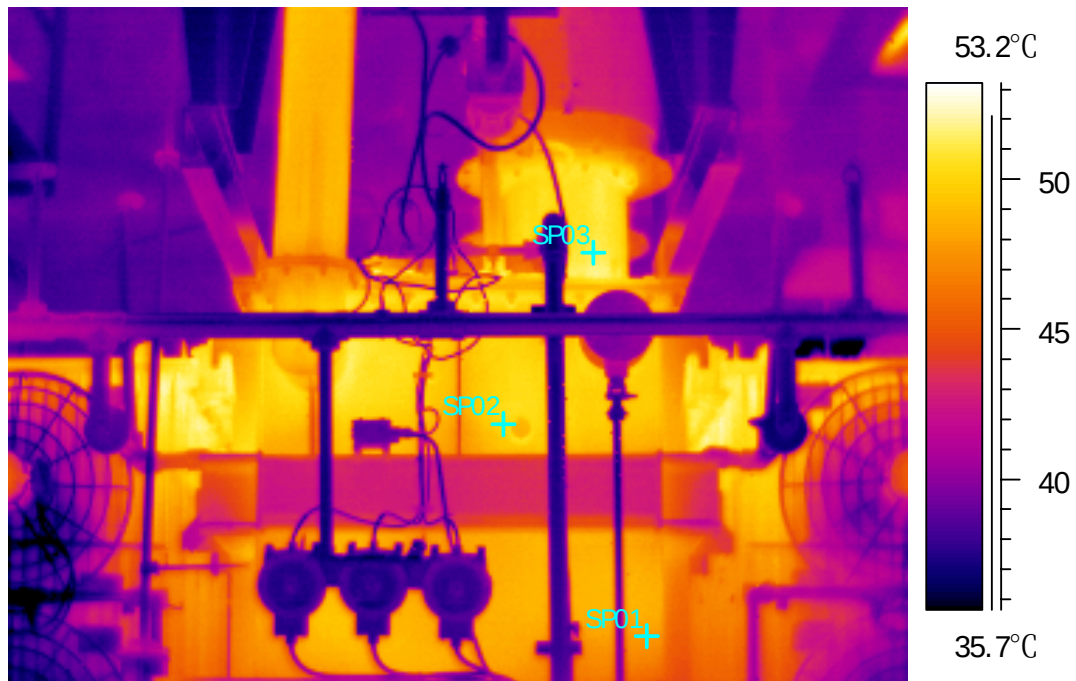
SPO1:41.8°C SPO2:49.2°C SPO3:51.2°C





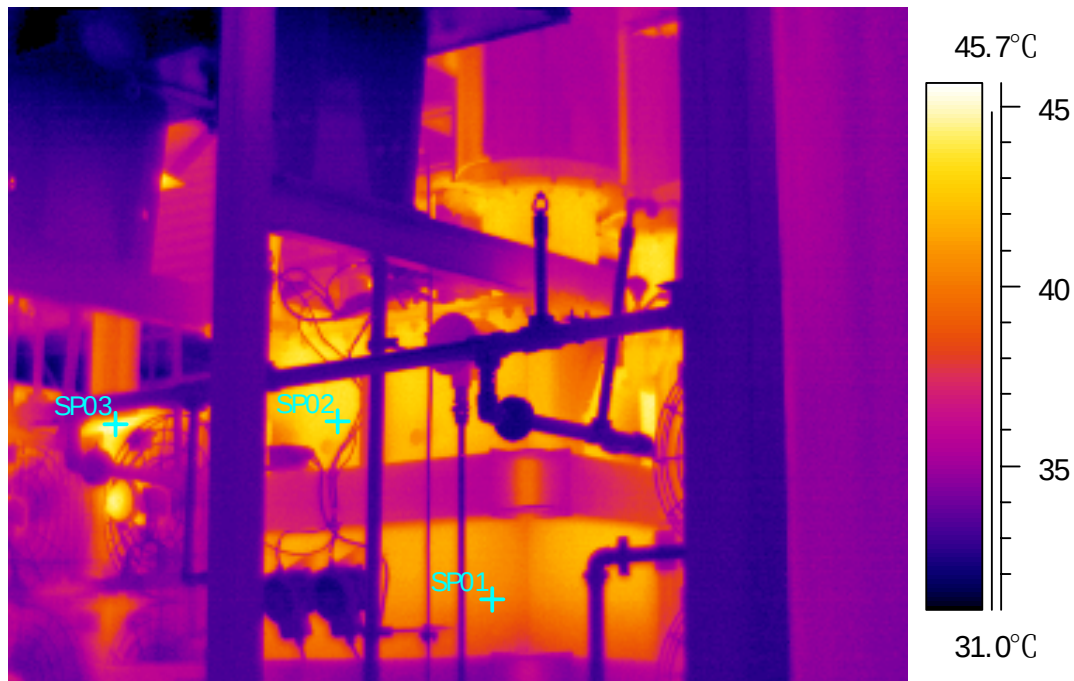
SPO1:61.1°C SPO2:63.1°C SPO3:68.5°C



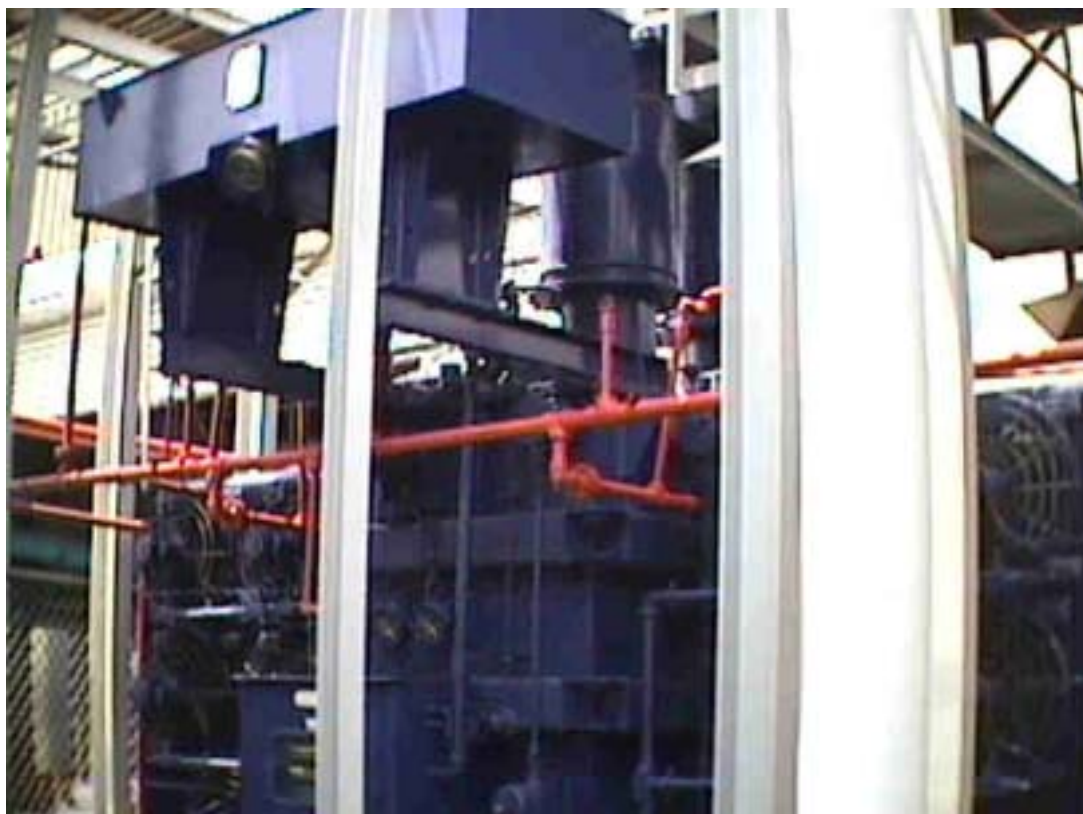


SPO1:47.9°C SPO2:50.1°C SPO3:52.4°C



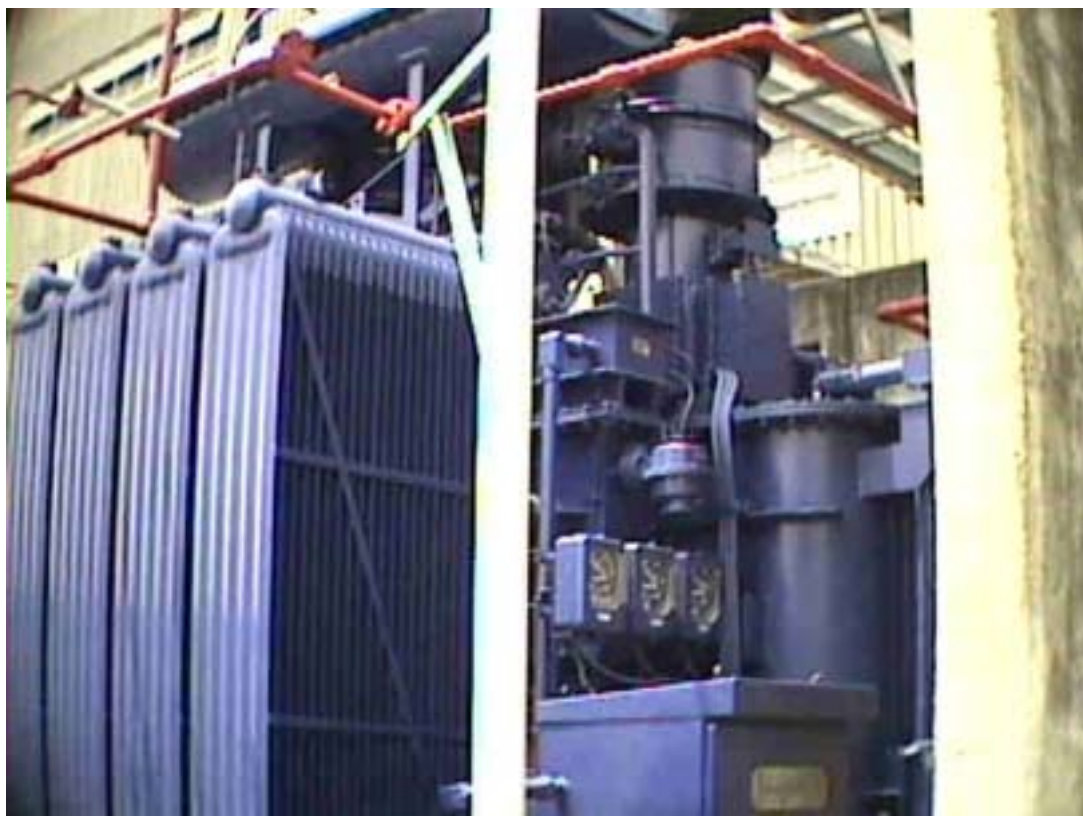


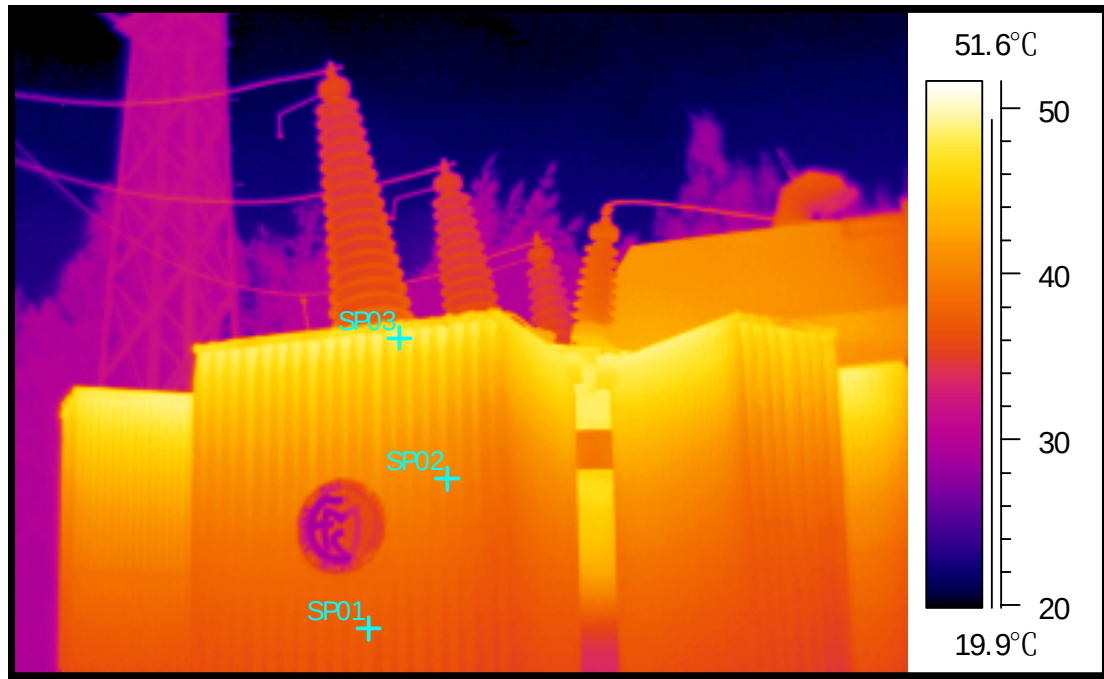
SPO1:40.3°C SPO2:43.4°C SPO3:45°C





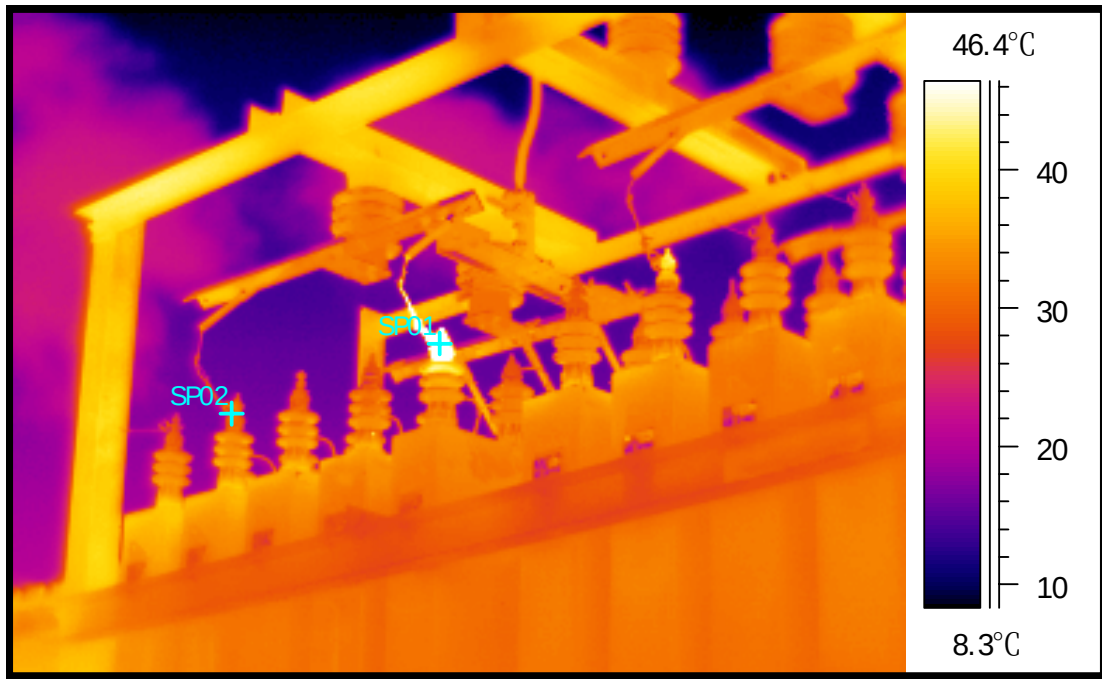
SPO1:44.4°C SPO2:48.5°C SPO3:52.4°C



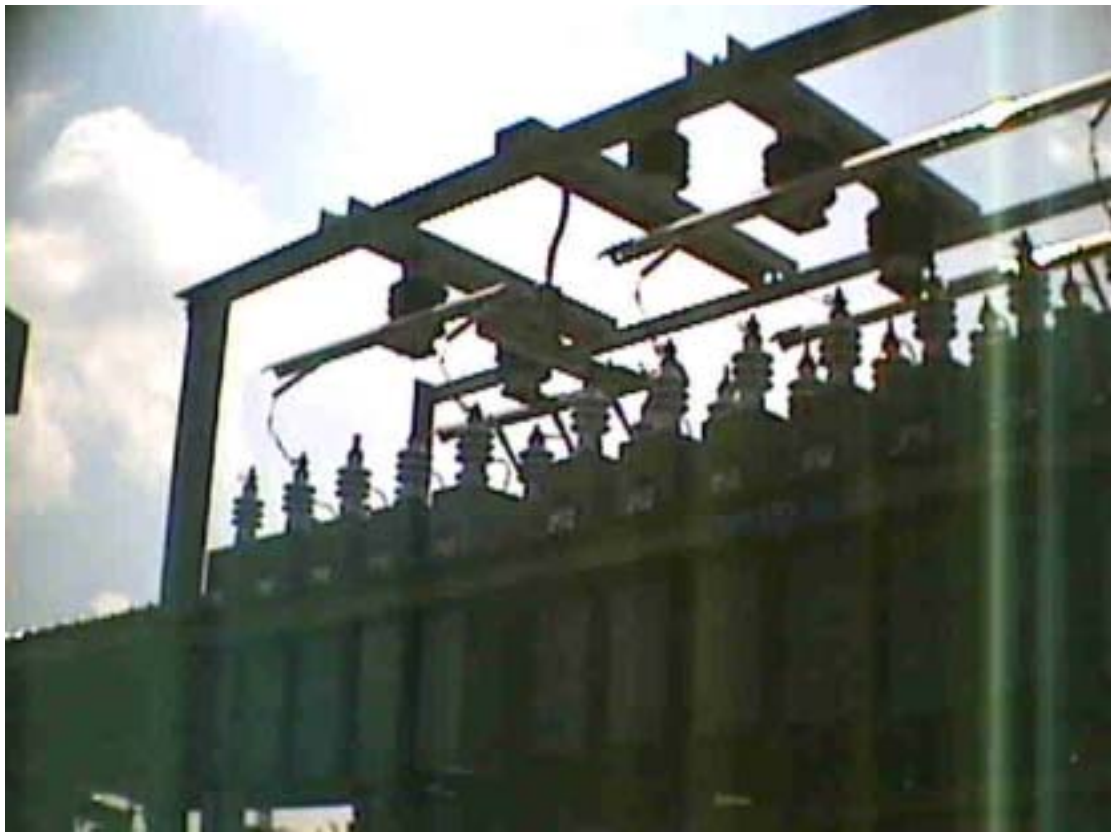


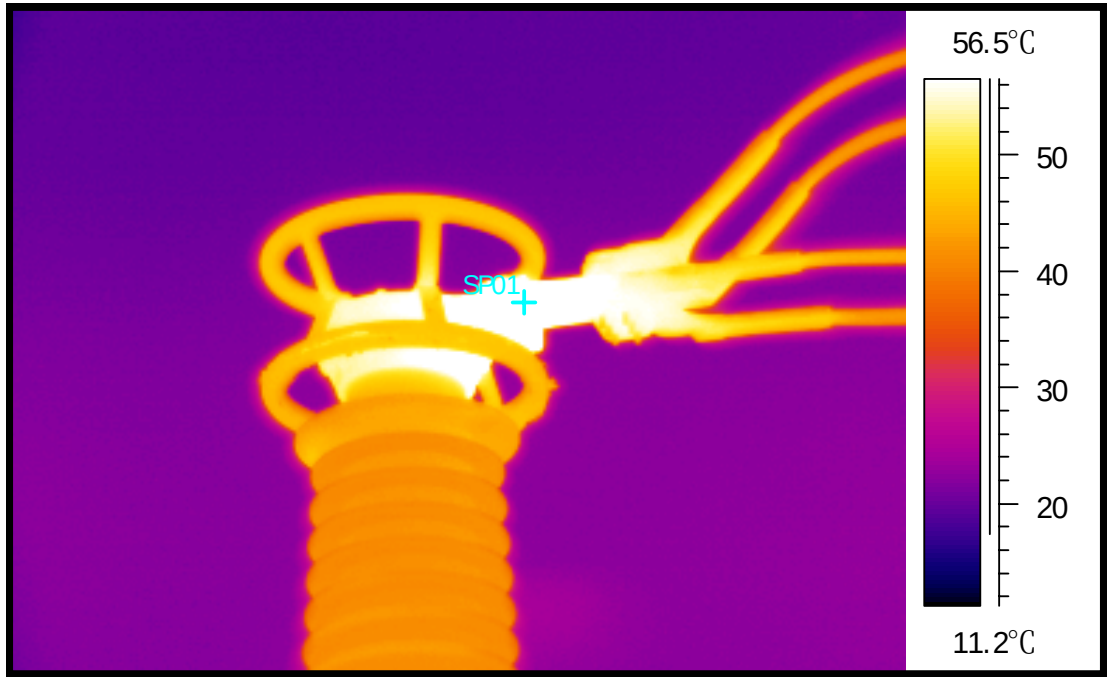
SPO1:37.3°C SPO2: 40°C SPO3:47.1°C





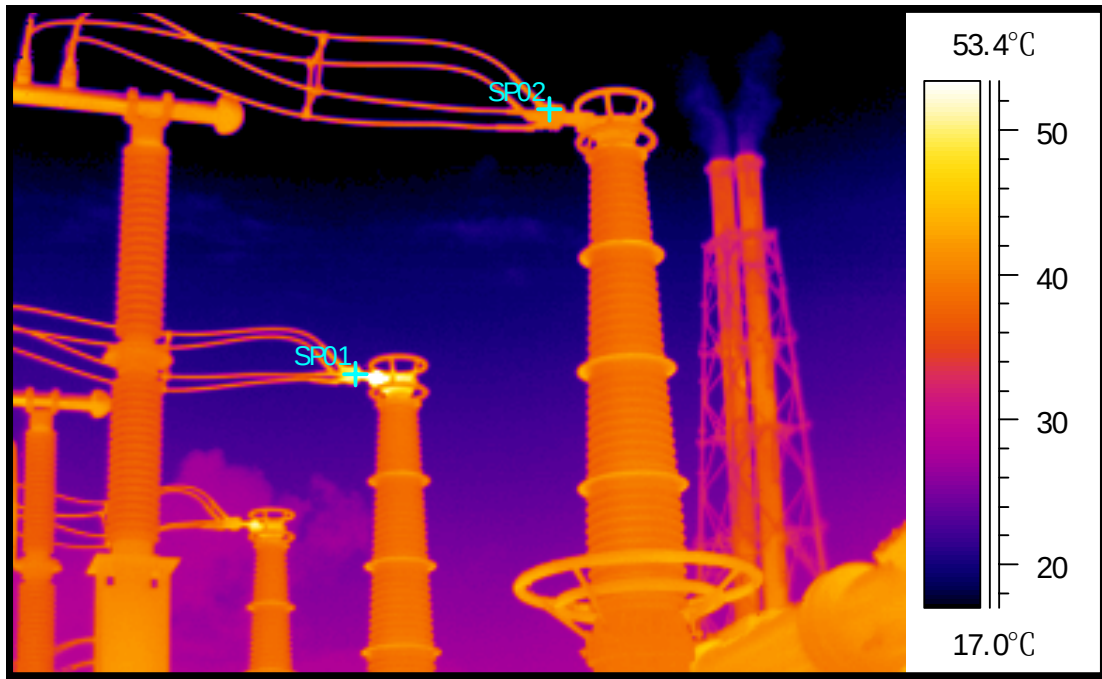
SPO1: 170°C SPO2:32.4°C





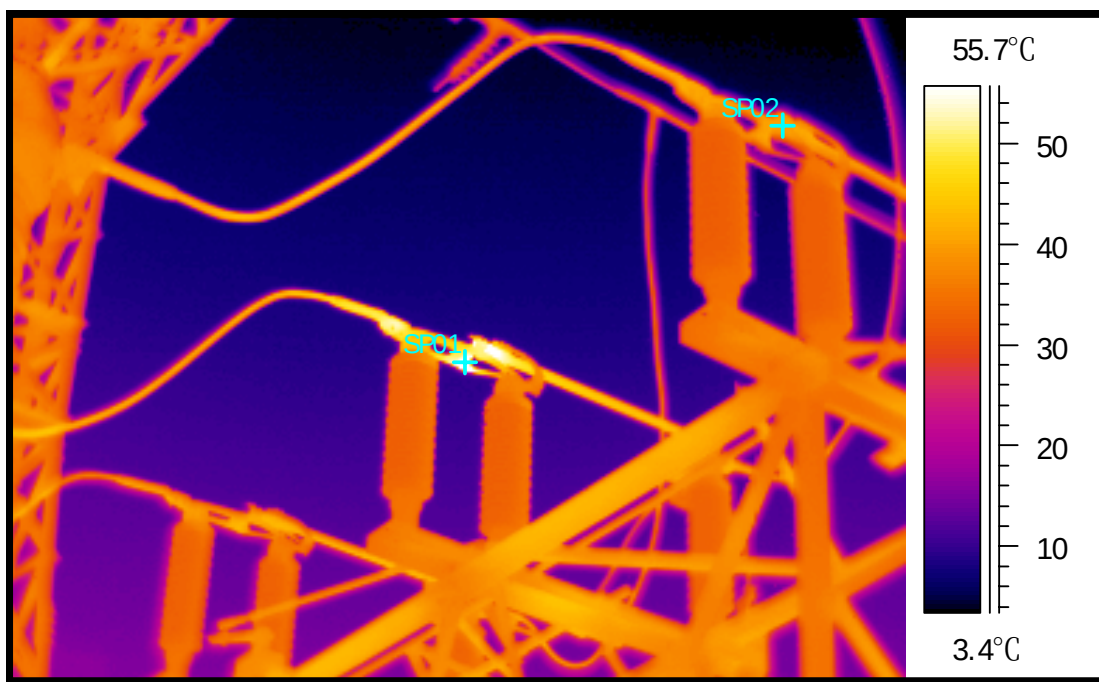
SPO1: 70.9°C





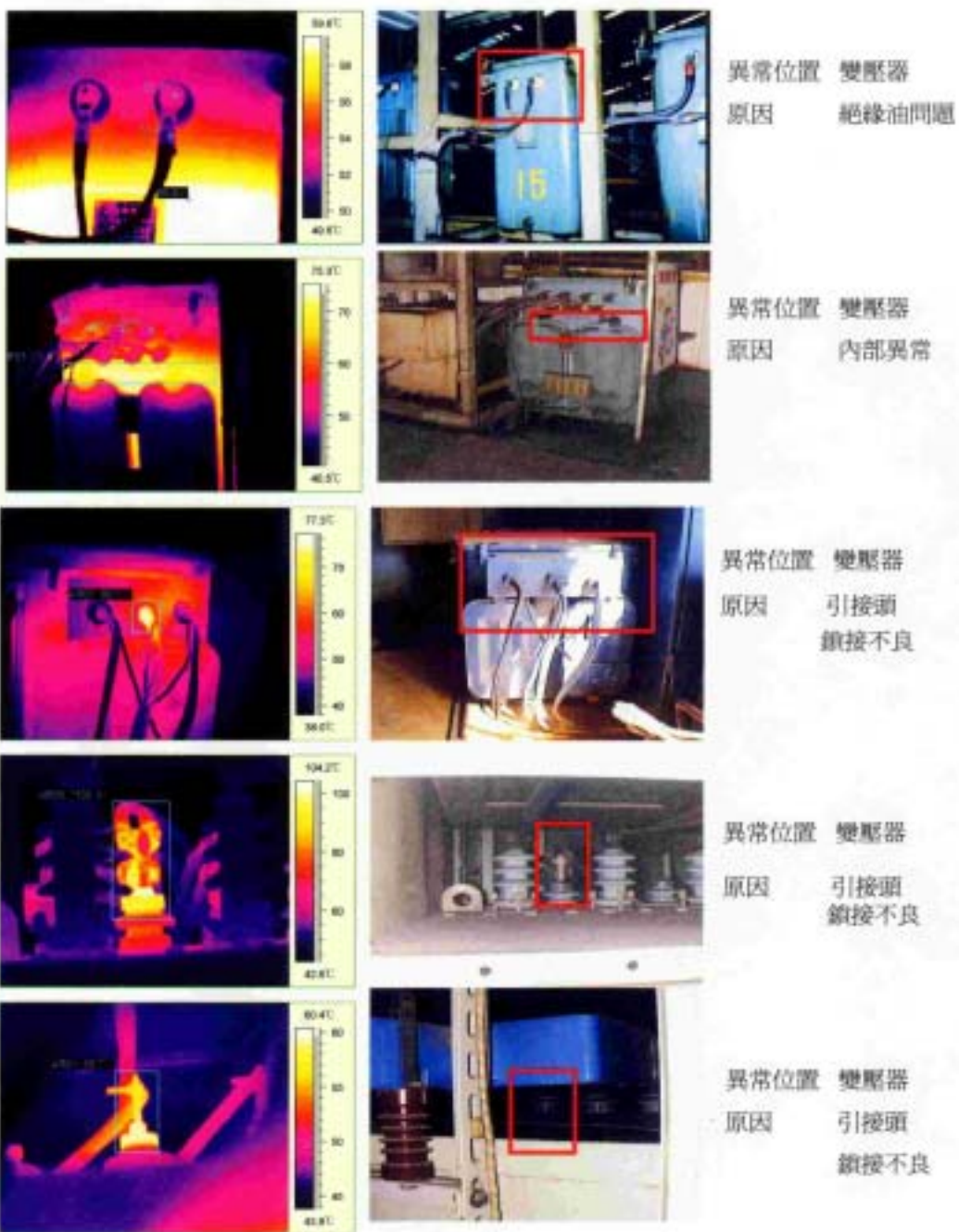
SPO1: 50.9°C SPO2: 40.2°C





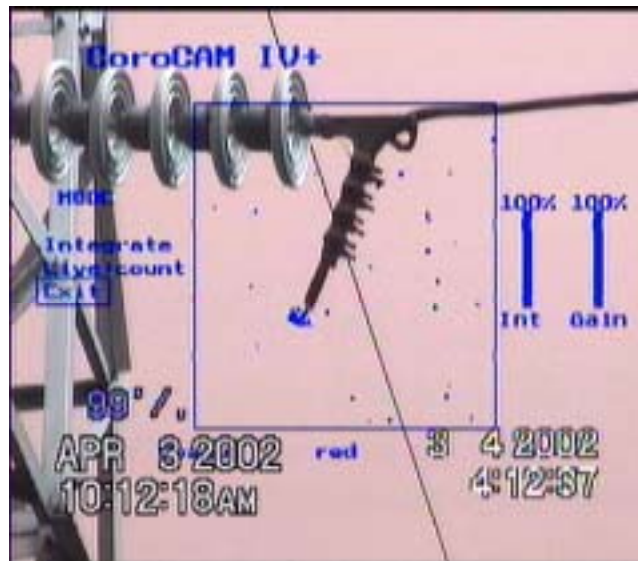
SPO1: 60.4°C SPO2:40.4°C





陸、紫外線放電影像檢測應用實例

CoroCAM的檢測案例



CoroCAM的檢測案例



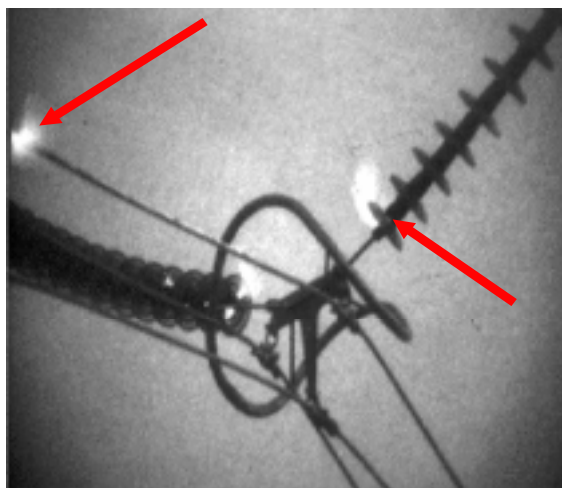
CoroCAM的檢測案例



CoroCAM的檢測案例



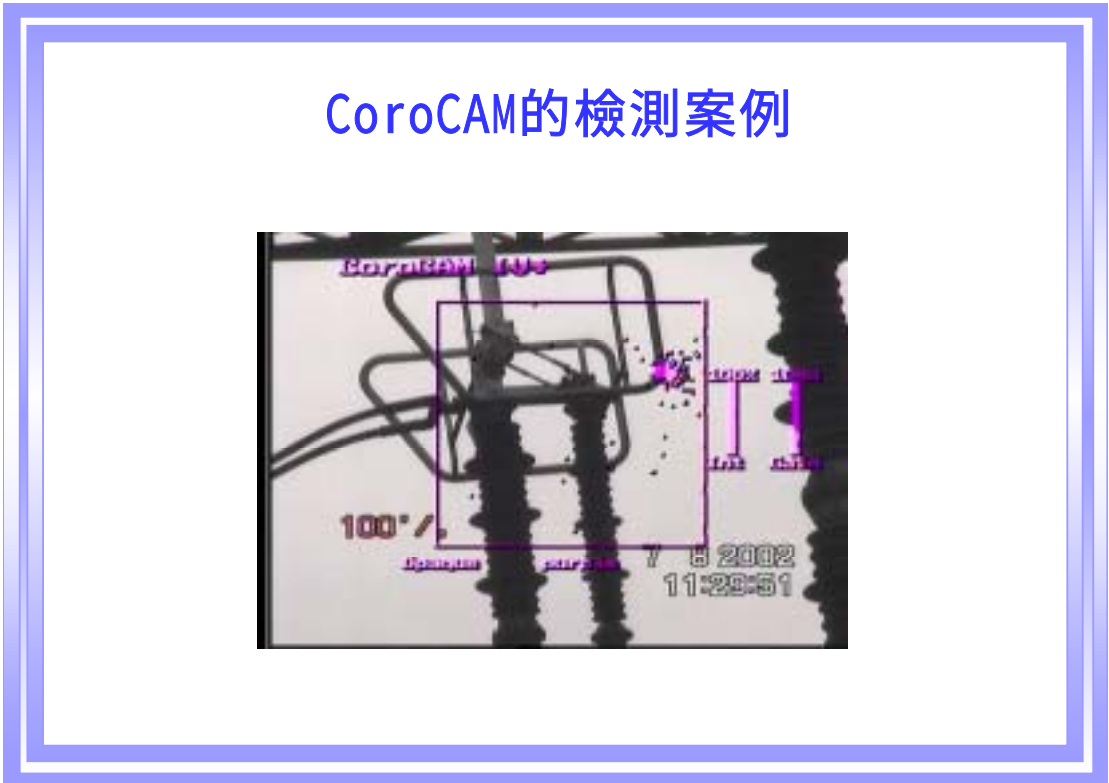
CoroCAM的檢測案例



CoroCAM的檢測案例



CoroCAM的檢測案例



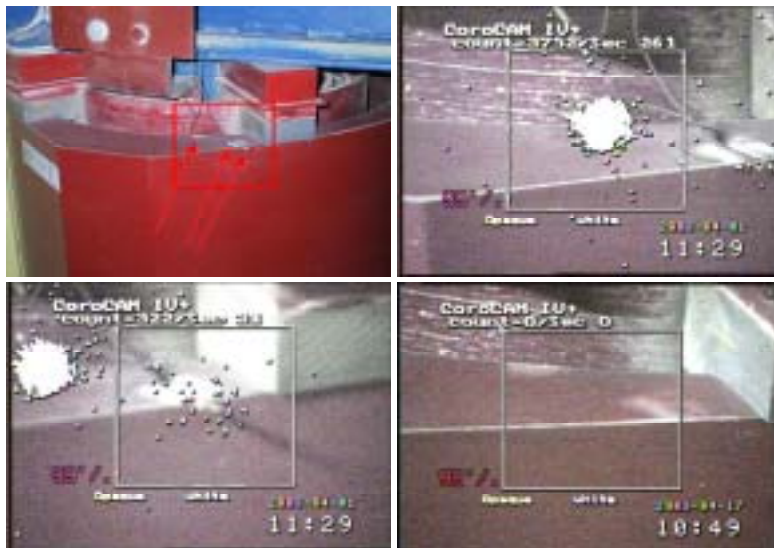
CoroCAM的檢測案例



CoroCAM的檢測案例



CoroCAM的檢測案例



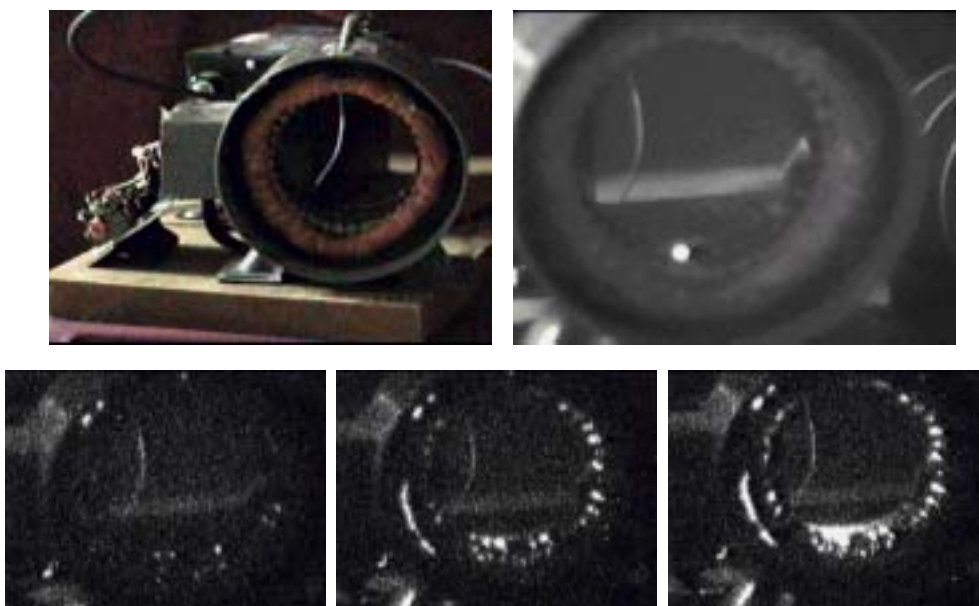
CoroCAM的檢測案例



CoroCAM的檢測案例



CoroCAM的檢測案例



柒、紫 外 線 與 紅 外 線 檢 測 比 較

紅外線表面溫度測定

紅外線攝影機測量物體輻射出的紅外線輻射能並構成影像，是基於物體表面溫度與輻射能成函數關係，使紅外線攝影機能夠自動計算並顯示溫度；報告分析專用軟體不僅可在個人電腦作分析；各變電所內：變壓器、斷路器、變比器、電容器、電纜頭或接點等電力設備及鐵塔懸垂礙子之表面異常溫度測定或線上監測。

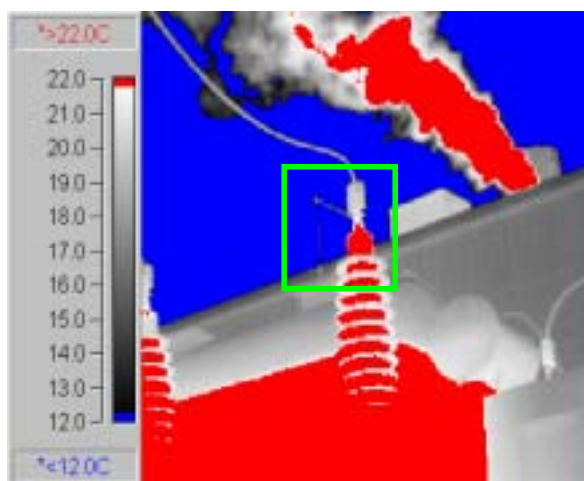
紫外線攝像檢測技術

利用紫外線攝像檢測技術檢查高壓輸電設備的電暈放電現象、聚酯絕緣礙子老化、電弧、絕緣礙子污染程度、設備施工不良、接地不良、變壓器、發電機、電力電纜...等等是近幾年的最新應用科技。

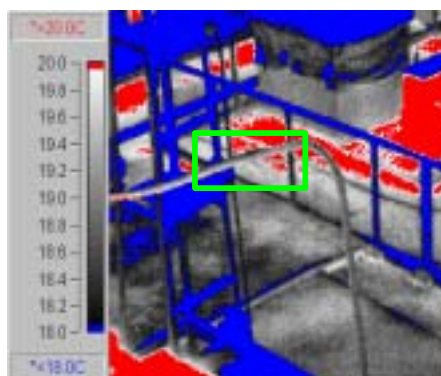
紫外線檢測－突破性檢測技術與紅外線比較

紫外線	紅外線
檢測電暈部分放電及電弧（外部現象）	檢測熱點- 無法測電暈（內部現象）
只要有電壓即可測	需要較高負載
可在日照及任何氣候條件下操作	需考慮物體輻射及溫度狀況
可偵測各階段的絕緣老化情形	只能在絕緣老化較嚴重時才測得到

“紫外線放電影像”與“紅外線熱影像”



“紫外線放電影像”與“紅外線熱影像”



捌、結論與建議

建立不停電檢測系統

已往電氣設備必須在停電下才能執行絕緣檢測試驗，如今已可活電作業。

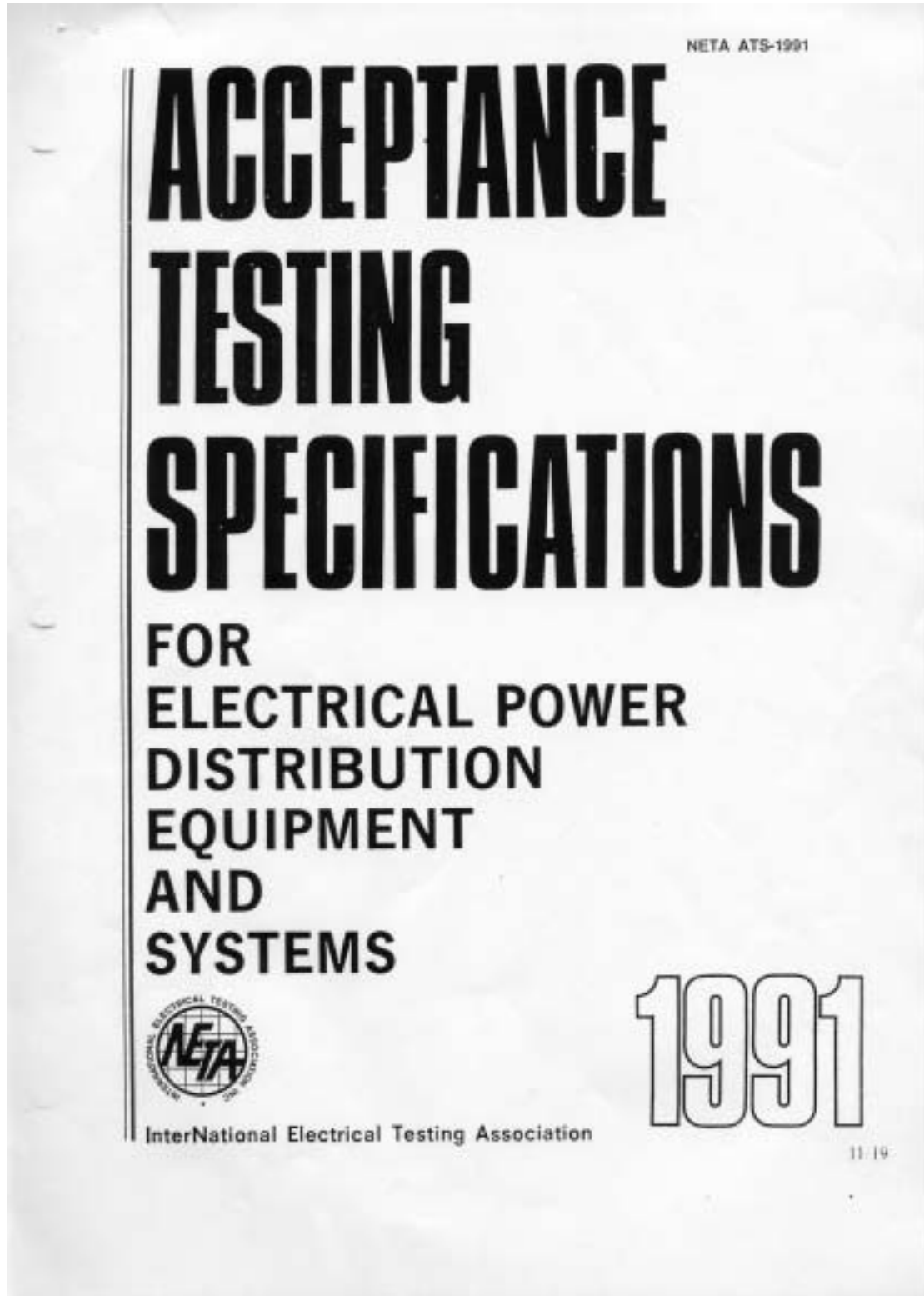
提高電氣設備的運轉安全是電廠整體防災工作的重點。而造成電氣設備失誤的原因眾多，故仍需整合各項檢驗方法與維護工作；而採用不停電下可執行之檢測方法，將可增加電氣設備預防保養工作的效益。在現有的不停電檢測方法中，一般電氣人員已熟知紅外線熱影像檢測在電氣過熱問題的檢出效果，特別是接點不良問題的查核，熱影像檢測已成為最有效的技術；而在絕緣不良問題的查核工作中，紫外線放電影像檢測較之熱影像檢測更為靈敏而有效。電氣設備問題主要導因於導電與絕緣兩類不良因素，結合上述兩項檢測技術，將可提高電氣設備預知保養檢測工作的完整性。

然而，此兩項影像檢測技術有其適用上的限制，由於紅外線與紫外線對大多數的固體物質並不具穿透能力，因此對於存在電力設備內部(非裸露部)的問題查核工作上，會有很大的侷限性，往往必需採行拆卸外部遮蔽物(如蓋板與外殼)之措施，或佐以其他有效的檢測方法，以提高可靠性。

在實務的檢測工作中，較高的負載狀態較有利於紅外線熱像檢測進行過熱問題的查找；紫外線放電影像檢測宜針對高壓設備來施行。在檢測儀器的選擇

方面，紅外線儀器在近期已因製造技術的進度與成本的下降，在價格上有顯著的下降趨勢；紫外線儀器則仍處於技術推廣階段，待進一步累積操作經驗與診斷經驗。建立良好的檢測制度與培養優秀的檢測人員，是提高檢測工作效益之不可或缺的元素。

玖、 參考文獻



PART 2: TEMPERATURE CRITERIA FOR ELECTRICAL SYSTEMS

7.0 Delta-T Criteria

- 7.1 The infrared thermographer may use the following delta-T (temperature difference) criteria to evaluate the temperature severity of an exception. These delta-T criteria are reported as the temperature rise of the exception above the temperature of a defined reference, which is typically the ambient air temperature, a similar component under the same conditions or the maximum allowable temperature of the component:

N.E.T.A. Maintenance Testing Specifications¹, for electrical equipment:

- 1) 1 to 3C°: possible deficiency and warrants investigation.
- 2) 4 to 15C°: indicates deficiency; repair as time permits.
- 3) 16C° and above: indicates major deficiency; repair immediately.

Military Standards², for electrical equipment:

- 1) 10 to 25C°: component failure unlikely but corrective measure required at next scheduled routine maintenance period or as scheduling permits.
- 2) 25 to 40C°: component failure probable unless corrected.
- 3) 40 to 70C°: component failure almost certain unless corrected.
- 4) 70C° and above: component failure imminent. Stop survey. Inform cognizant officers.

Experience-Based³, for electrical and/or mechanical equipment:

Any delta-T classification system based on experience, such as the following³:

- 1) 0 to 10C°: corrective measures should be taken at the next maintenance period.
- 2) 10 to 20C°: corrective measures required as scheduling permits.
- 3) 20 to 40C°: corrective measures required ASAP.
- 4) 40C° and above: corrective measures required immediately.

Motor Cores⁴, (on test bench, not in service):

- 1) 0 to 10C°: no exception likely.
- 2) 10 to 20C°: possible exception, consult motor core test data.
- 3) 20C° and above: exception likely.