

沸水式核能電廠控制棒完整性安全管制

核 能 管 制 處
九十年七月六日 修 訂 一 版

一、背景說明

基於核能安全，核能電廠必須在偵測到異常狀況時，具有自動停機的能力，此部份功能在設計上有控制棒系統及備用硼液系統等二重設計（請參見圖一），任何一個系統都可以單獨地將反應器急停。以控制棒系統而言，核一廠一、二號機爐心中各有 97 支奇異公司製造的 D-100 及 D-215 型控制棒，核二廠一、二號機各有 145 支奇異公司製造的 D-230 型控制棒，有關控制棒的數目，法規要求在設計上必須有足夠的安全餘裕，即使有任何一支控制棒完全沒有插入爐心時，仍有足夠的控制能力執行反應器急停。

日本東海核電廠二號機於前年（1999 年）利用停機時，檢查該電廠所使用奇異公司生產之 D-120 型控制棒，結果在控制棒葉片把手 Roller Pin Hole（參考圖二與圖三）附近，發現受檢查的 25 支控制棒中，13 支有裂痕指示。有鑑於日本的案例，台電公司核一廠於二號機週期 17 末大修（去年 10~12 月）及一號機週期 18 末大修（今年 1~3 月）時，檢查 88 支控制棒（有 9 支因更換新品而未檢查），結果核一廠一號機發現有 20 支控制棒有類似日本東海核電廠二號機的裂痕問題，而二號機也有 11 支有類似現象。核二廠二號機於週期十四

末大修（今年 3~5 月）時，檢查反應爐內所有 145 支控制棒，結果發現除了有類似日本東海核電廠二號機的問題外，另外在把手與葉片護鞘焊道附近及繫棒與葉片護鞘焊道附近也有許多裂痕，總計發現有 85 支控制棒存有裂痕問題（參見圖四至圖五）。

原能會在核二廠二號機控制棒發現有異於日本東海核電廠的裂痕現象後，隨即邀請學者專家參與審查，針對控制棒裂化肇因、核二廠更換措施、安全影響等事項，提供原能會控制棒材料、結構、控制能力等部分之技術意見，以求本案之執行能夠嚴謹且周延。

二、可能影響

依據核一廠一、二號機及核二廠二號機之檢查結果，共發現有 Roller Pin Hole 內外側、把手與葉片護鞘焊道附近、繫棒與葉片護鞘焊道附近等四種不同位置的裂痕。雖然都是裂痕，但由於裂痕的位置不同，其所引發運轉中的顧慮亦將不同，故以下將針對不同位置裂痕之可能影響，簡述如下：

（一）Roller Pin Hole 外側裂痕

因焊道殘留應力和氧化物成長，可能使焊道造成似圓形狀裂痕，在不當外力作用下，有造成 Pin 與 Roller Ball 掉落的可能。

（二）Roller Pin Hole 內側裂痕：

這種狀況的顧慮是，如果裂痕持續成長，將有可能影響控制棒結構的完整性，造成控制棒把手斷裂。若裂痕成長未達把手斷裂，仍可能因承受控制棒本身重量的受力面積不足，在吊運中發生控制棒掉落事故。

（三）把手與葉片護鞘焊道部份裂痕

假設把手與葉片護鞘焊接處因裂痕而產生金屬薄片掉落，並隨水流可能卡在燃料束內，刮破燃料，並造成燃料受損。

（四）繫棒與葉片護鞘焊道部份裂痕

此處所發現的裂痕為垂直於焊道方向但不明顯，若裂痕成長，焊道仍應健在，不影響葉片完整性，但可能因裂痕而發生金屬薄片掉落，傷及燃料。

根據台電和奇異公司所提供的評估報告，當發生上述零件掉落時，控制棒驅動機構的推力亦足以將控制棒插入爐心，若發生燃料束受損，台電公司依相關核燃料破損因應對策執行，所以台電和奇異公司評估上述異常現象應不致影響控制棒的停機能力；此外，台電公司提出相關之行政管理措施，加強吊運作業監控及防護設施，以預防控制棒吊運過程中，因把手斷裂而發生掉落事故。

三、核一廠的安全評估與因應措施

核一廠控制棒葉片的檢查結果，所發現的裂痕大多位於 Roller 外側，台電公司就核一廠的檢查結果提出相關安全評估，當發生 Pin 與 Roller Ball 掉落，對控制棒的急停安全功能及急停時間並無影響。

本會於審查「核一廠一號機裂痕指示報告」後，並參考核研所專家意見，認為因反應爐水壓與控制棒 Roller Ball 幾何形狀之關係，於運轉中應能確保控制棒停機功能，此部份台電及原廠家安全分析報告之結論應可同意。

為因應原能會的安全管制要求，核一廠採取以局部更新、局部挪移的方式重新安排控制棒，並就控制棒動作測試、爐水水質偵測、以及機組冷爐時對有裂痕的控制棒執行全程抽插及摩擦測試，且原能會要求核一廠於機組運轉中必須加強監測，若發現異常，經評估確認屬裂痕引起的問題，核一廠須停機檢查。

根據台電公司提出的評估報告，發生裂痕的原因為製造過程中有污染物殘留在 Pin 和 Pin Hole 間，造成罅隙腐蝕，且因氧化物體積增長，產生應力和應變，促進裂痕成長。為了確認此項結論，台電公司應原能會要求，將進行材料金相分析及評估，以確認裂痕發生的肇因，再依分析結果，提出適當之因應措施。

四、核二廠的安全評估與因應措施

核二廠二號機的檢查內容，可以概分為 Roller Pin Hole 附近、把手與葉片護鞘焊道區域、繫棒與葉片護鞘焊道附近、及速度限制器與葉片護鞘焊道，全部檢查結果如下：

裂痕位置	Roller Pin Hole		把手與葉片護鞘焊道	繫與棒葉片護鞘焊道	速度限制器與葉片護鞘焊道
	外側	內側			
裂痕支數	72/145	6/145	54/145	1/15	0/15
檢查支數					

註：不同位置上的裂痕並不是單獨發生在單一控制棒葉片上，即有多支控制棒葉片具有多重裂痕，經統計有裂痕的控制棒總共為 85 支。

依據核二廠二號機的檢查結果，以及為確保核二廠二號機週期十五的運轉安全，台電公司提出核二廠二號機的處理方案：

(一)Roller Pin Hole 有內側裂痕指示之控制棒共有六支，全部用 D-230 新品更換。

(二)把手與葉片護鞘焊道附近有裂痕指示共有五四支控制棒，其中包括前項所述有 Roller Pin Hole 內側裂痕指示的六支。除該六支以 D-230 新品更換外，其餘四八支則以已退出爐內之原型控制棒 (D-100 型)中燃耗較低，且經檢查後無裂痕的控制棒取代。

(三)Roller Pin Hole 有外側裂痕指示，但無內側裂痕及把手與葉片護鞘焊道附近有裂痕之控制棒共有三一支，於週期十五繼續使用。

依據台電和奇異公司送至原能會之核二廠控制棒安全評估報

告，就影響控制棒停機能力之因素，奇異與台電公司分別以應力分析和事故評估的觀點，當控制棒系統安全功能在發生零件掉落時，不論 Roller Ball 或 Pin 掉落、控制棒整組把手或者葉片護鞘的金屬薄片掉落，經評估都不會阻礙控制棒急停功能；或者當機組在急停時，控制棒因快速插入爐心內，致使各組件所承受衝擊負荷，仍可維持控制棒之完整性，而控制棒不會有喪失中子吸收物質或喪失控制棒插入能力之虞，機組仍可維持安全運轉，以及停機能力能夠獲得確保。

目前原能會專案小組雖已完成奇異與台電公司的安全分析報告之評估，也初步針對控制棒發生裂痕之可能肇因進行推測，認為奇異與台電公司的說明應可接受。然控制棒為核能電廠的重要安全設備，以及實際肇因尚未釐清前，原能會基於機組運轉安全之考量，遂要求核二廠二號機大修後再起動時，須對控制棒執行相關功能測試，另於運轉期間須加強監測，並就測試結果執行趨勢分析，以掌握控制棒最新狀況。

核二廠二號機控制棒裂痕問題的處理，係基於裂痕檢測結果及可能之肇因分析，經評估後採取部份更換，以因應控制棒安全運轉一個週期之需求，所採取的保守處理措施。至於運轉中的核二廠一號機，因採用與二號機相同型式的控制棒，在一、二號機控制棒所處環境條件並無不同下，推測應有與二號機相同的裂痕問題，但因一號機尚未

大修，無法執行控制棒葉片目視檢查，故原能會對核二廠一號機控制棒之主要安全管制方式是以三個方向來執行，包括審查奇異和台電公司之設計安全評估、清查過去測試紀錄分析以及要求運轉中全面測試。基於安全考量，一號機運轉中執行之全面測試項目，包括急停時間測試、功能測試與緩衝功能測試，後二者係非例常性測試項目，為本案安全管制之要求事項，由於相關測試須配合機組降載，台電公司已利用六月十、十七日兩天假日分批完成測試工作，經查核測試結果，均符合接受標準。

依台電公司機組大修排程，核二廠一號機至大修時間（今年九月一日）剩下一個多月運轉期間，原能會仍要求台電公司須加強運轉中例行性監測，尚須執行爐水硼含量偵測和趨勢分析，以掌握控制棒最新狀態。一號機大修時，也將全面檢查反應爐內所有控制棒葉片的裂痕情形，屆時（今年九月十四日前提出）台電公司亦將提出二號機肇因分析報告以及相關因應措施，原能會將視金相分析的結果，對核一、二廠控制棒裂痕問題採取必要的後續安全管制措施。

五、日本的做法與美國現況

雖然製造廠家認為裂痕並不是安全問題，但是日本東海核電廠因當時（1999 年）適值停爐一年，該廠仍選擇全面更換受檢的 25 支控

制棒，包括 13 支有裂痕指示的控制棒。

另外，從製造廠商所提供最近十年內生產之 D-215 型控制棒的資料看來，除供應核一廠使用外，也供應美國 BWR 4/C#1、BWR 5/C#1,#2,#3 等電廠使用，因為不認為對安全有影響，並未執行類似之檢查；至於 D-230 型控制棒，美國及歐洲核電廠曾檢查此型式控制棒某些功能時，順便檢查 Roller Pin Hole 焊道附近及把手與葉片護鞘焊道附近，但未發現有裂痕問題。由於台電核一、二廠控制棒葉片檢查發現有裂痕問題，奇異公司已將台電公司核二廠二號機大修時，檢查 D-230 型控制棒葉片發現裂痕及奇異公司評估結果，通知使用奇異公司生產之控制棒葉片的客戶，並向美國核管會（USNRC）報告有關 D-230 型控制棒裂痕事件。至目前為止，因肇因分析尚未釐清，美國核管會（USNRC）尚未對此項問題採取進一步措施，也沒有此方面檢查之規定。

六、原能會的綜合結論

針對核一廠一、二號機和核二廠二號機檢查控制棒葉片，所發現的裂痕問題，經原能會專案小組審查台電公司與原製造廠家的安全評估報告後，可以獲致如下結論：

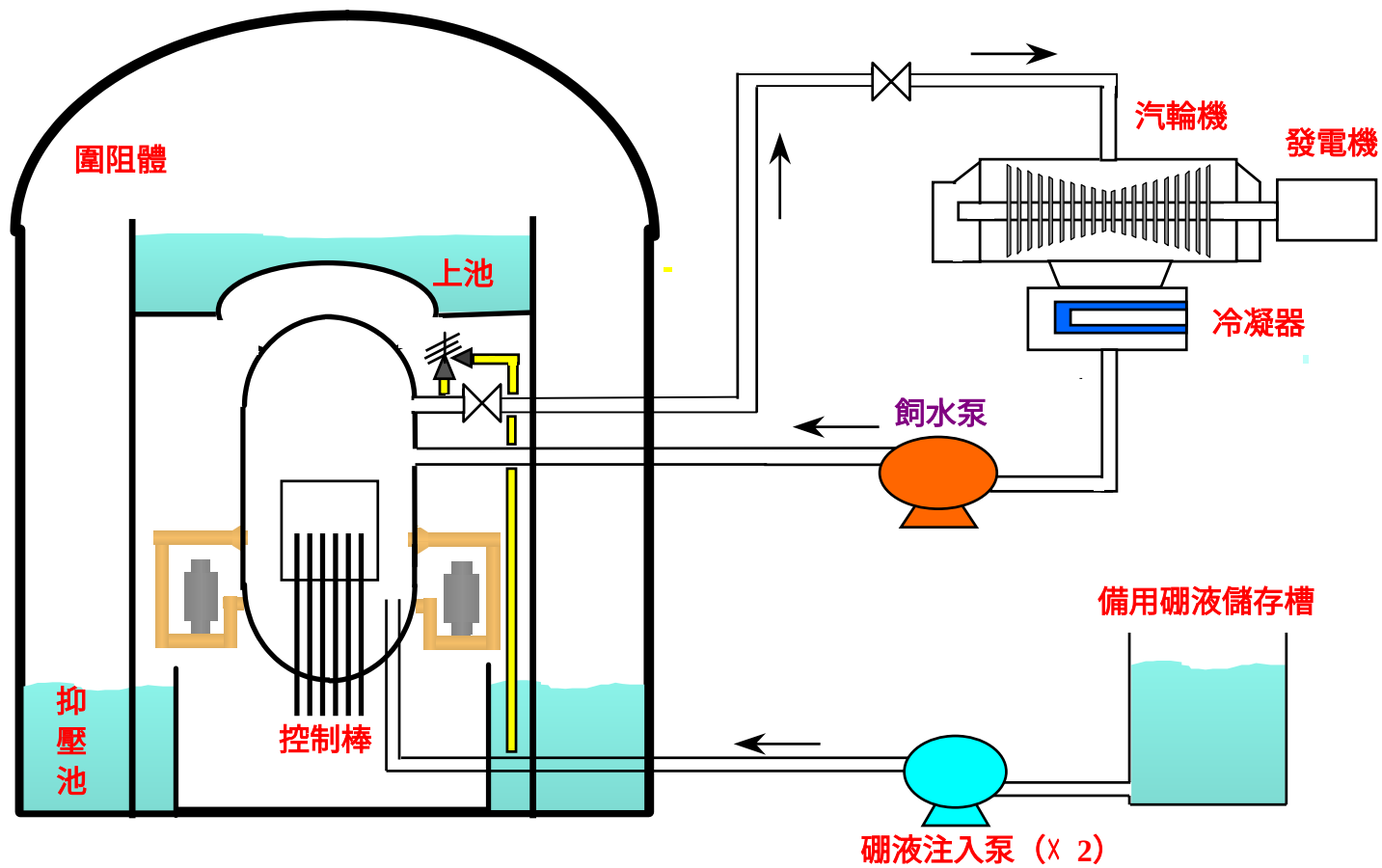
（一）此項材料之異常現象，應不致對控制棒的停機功能造成影響。

但仍應加強機組運轉中監測，並對測試結果執行趨勢分析，以掌握控制棒最新狀態。

- (二) 如果裂痕長度繼續成長，有可能導致 Roller Ball、Roller Pin、或葉片護鞘金屬片掉落爐心，此種狀況有可能會局部地傷害到核燃料的鈾金屬護套。
- (三) 依據目前核二廠二號機檢查結果，Roller Pin Hole 內側裂痕可能會繼續成長到更大的範圍，在不利的狀況下，控制棒於吊運時，材料可能無法支撐本身的重量，而發生掉落並撞擊燃料。
- (四) 目前正在運轉中的一號機，因與二號機採用同型之 D-230 控制棒，相信可能存有同樣的裂痕問題。
- (五) 根據台電和奇異公司的報告，造成 Roller Pin Hole 裂痕的原因為製造過程中有污染物殘留，滋生氧化物並增長，造成孔洞內承受應力和應變，產生應力腐蝕龜裂機制；在把手與葉片護鞘焊道附近的裂痕，疑為冷加工製程產生微裂縫和加工硬化所致；另在繫棒與葉片護鞘焊道附近的裂痕，可能為焊接殘留應力所致。

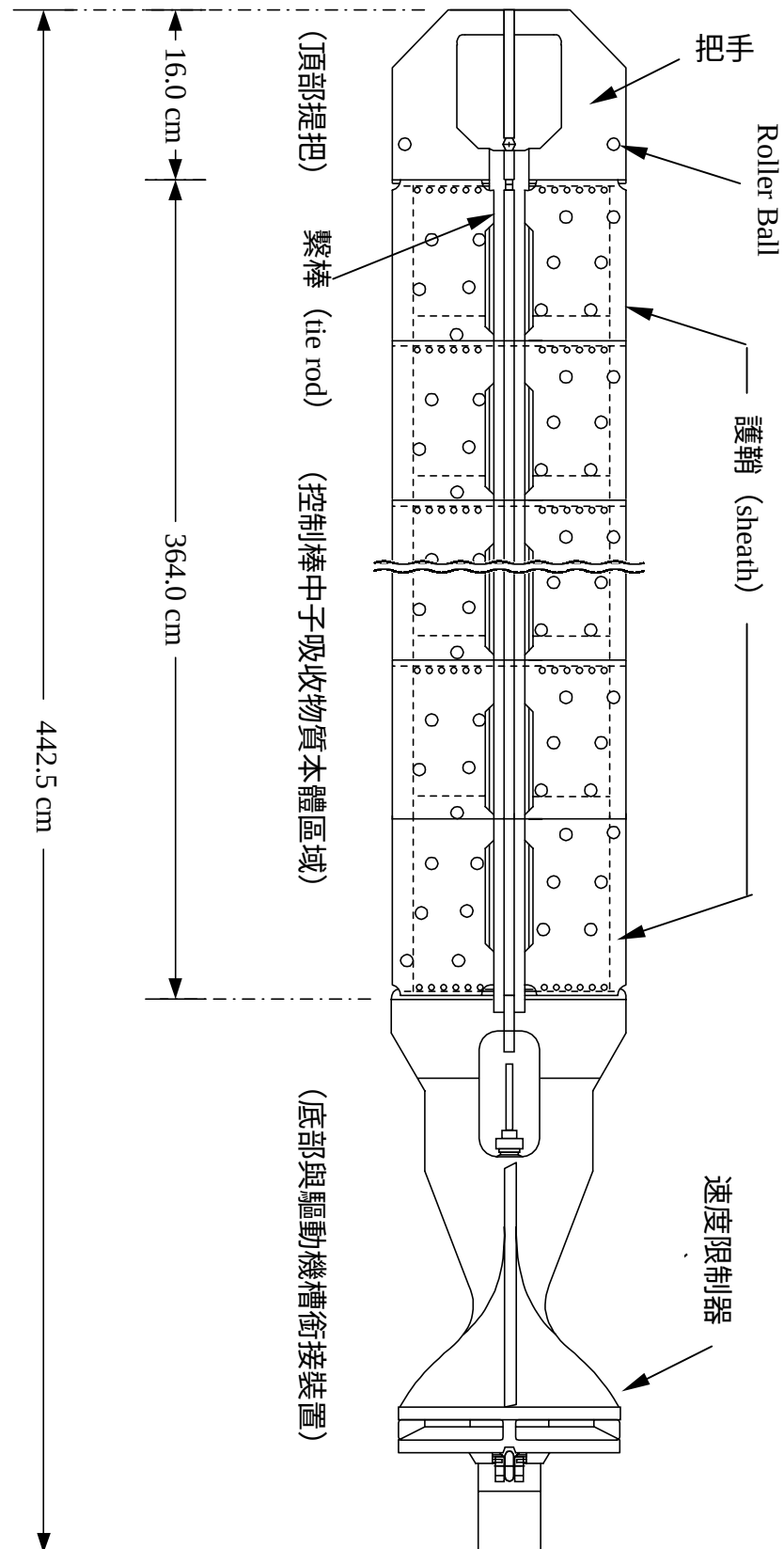
目前台電和奇異公司就不同位置的裂痕，提出可能肇因之推測，但為能嚴格確認此項結論，則有待台電公司提出材料金相分析後釐清。台電公司除須加強核一、二廠爐心運轉狀況監視外，也必須提出

控制棒完整的處理方案，而原能會將視金相分析的結果，採取必要的後續安全管制措施。



- 註：(1) 硼-10 為強中子吸收物質，一旦注入反應器爐心，核分裂連鎖反應便會停止。
(2) 控制棒亦為強中子吸收物質，一旦插入反應器爐心，核分裂連鎖反應便會停止。

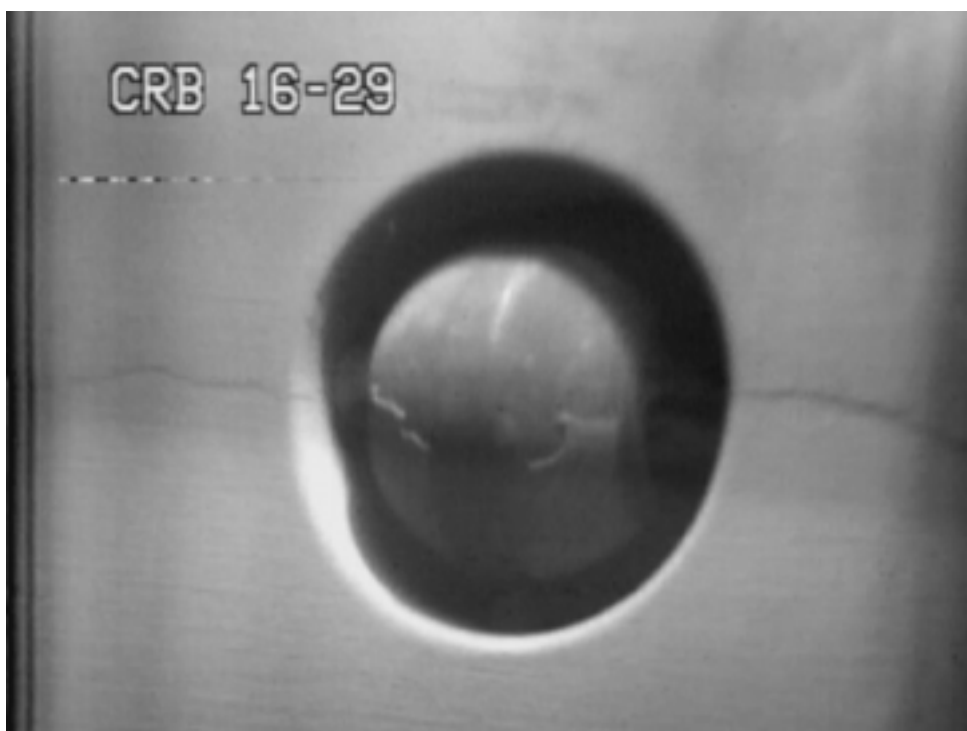
圖一 核二廠反應器停機系統示意圖



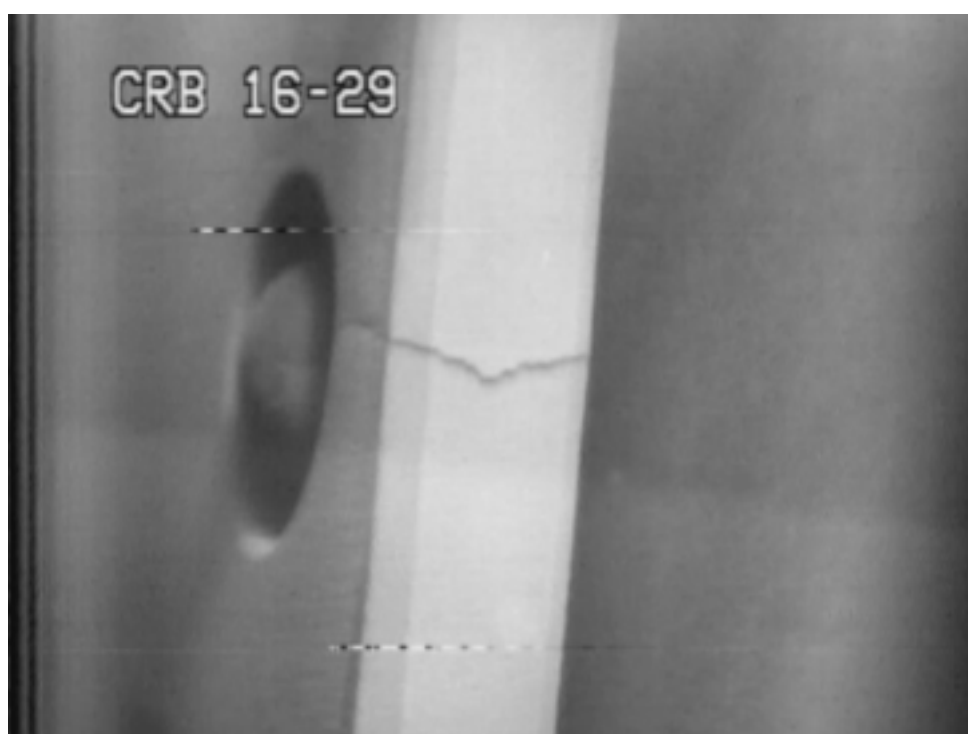
圖二 D-230 型控制棒幾何形狀概述



圖三 D-230 型控制棒之上、下半部外觀及
Roller Ball 和 Pin 之相關位置



a. 控制棒葉片裂痕情形（葉片正面）



b. 控制棒葉片裂痕情形（葉片側面）

圖四 控制棒葉片裂痕情形



圖五 把手與葉片護鞘焊道附近裂痕情形