

陣列式超音波應用於鋼結構高強度螺栓之檢測

*彭朋畿¹，程彥嘉²，陳信利³

¹中龍鋼鐵股份有限公司 冶金技術處 課長

²中龍鋼鐵股份有限公司 冶金技術處 NDT高級檢測師

³中龍鋼鐵股份有限公司 冶金技術處 NDT中級檢測師

摘要

螺栓是鋼結構工程之重要組件，本文主要研究高階超音波檢測法中之相位陣列式超音波檢測技術，利用其具多樣訊號種類與掃瞄角度，以提供螺栓較佳之檢測效率及準確度。同時本文利用距離振幅校正曲線法(DAC)，建立螺栓瑕疵大小之評估方法。以上有效結合陣列式超音波與距離振幅校正曲線等技術，預期可協助工程人員評估新建或使用中螺栓之品質，以降低鋼結構失效之風險。

關鍵字：螺栓、超音波檢測

聯絡作者：彭朋畿 007885@dragonsteel.com

1. 前言

目前螺栓已大幅應用於工程業界，但螺栓斷裂事件時有所聞，如101年台電核二廠1號機第22次大修，發現反應爐支撐裙板內圈7支螺栓斷裂事件，造成社會關注。另職業災害中多起案例源於移動式起重機上部旋轉體固定螺栓斷裂[1]，導致上部旋轉體翻覆事

件(如圖1所示)，由上可知螺栓檢測之必要性。



圖1 移動式起重機旋轉體翻覆事件(固定螺栓斷裂)

高強度螺栓常用於鋼結構之重要部位，目前一般鋼結構使用之螺栓檢測包括物性與表面要求。物性要求如強度、硬度、伸長率與面積收縮率等(如表 1 所示 JIS 與 ASTM 規範)，表面要求如裂痕、凹痕與空隙等(CNS 4486 螺釘表面瑕疵規範)。

另目前國內鋼結構施工規範有關高強度螺栓接合，針對新建螺栓之品質部分有明確要求物理性質及尺寸[2]，並說明國內所生產、使用之結構用高強度螺栓，主要有美國 ASTM 規格之 A325 及 A490 與日本 JIS 規格之 F10T 及 S10T 螺栓。另規範內容亦有說明高強度螺栓之接合精度、安裝與鎖緊方法，以供業界參考與遵循。

由上可知，一般鋼結構針對螺栓之內部缺陷較無規範要求，可是上述缺陷易造成應力集中與破壞起源。同時使用中之螺栓由於應力、腐蝕與疲勞等因素，可能造成螺栓

裂紋而斷裂，因此相關瑕疵或缺陷之檢測更顯重要。

表 1 JIS 與 ASTM 規範之螺栓物性要求

螺栓規格	降伏強度 (tf/cm ²)	抗拉強度 (tf/cm ²)	伸長率 (%)	面積收縮率 (%)	硬度(HRC)
JIS F10T	9.0	10-12	14	40 min.	27-38
JIS S10T	9.2	10-12	14	40 min.	27-38
ASTM A325	6.44(直徑 13~25mm)	8.40(min)	-	-	24-35
	5.67(直徑 28~38mm)	7.35(min)	14	35 min.	19-31
ASTM A490	9.10(直徑 13~38 mm)	10.50-11.90	14	40 min.	33-38

2. 檢測基本原理

本文簡介非破壞檢測之超音波檢測，並敘述相位陣列式超音波之原理，相關說明如下所示：

下所示：

2.1 非破壞檢測

目前工程界已廣泛利用各種儀器和技術執行非破壞檢測工作，所謂非破壞檢測 (nondestructive testing, NDT) 是指在不破壞檢測工件內部構件安全及不影響使用性能的前提下，利用聲、光、熱、電、磁和射線等方法，測定有關檢測工件性能方面的物理量，並進而藉由這些關係來推定其內在或潛在的缺陷，以達到更安全或更可靠的程度。目前

非破壞檢測之應用範圍甚廣，從小零件至房屋、橋梁、港口、輪船、飛機、石化設備及發電設備等，都可執行非破壞檢測。

一般工業非破壞檢測之執行時機大致可分為兩類：一為新建工程品質之檢驗，二為使用新老劣化結構設備之評估，下列將舉例說明。第一類新建工程品質之檢驗：有關新建工程，非破壞檢測將扮演品質把關之角色，相關非破壞檢測之執行將可確認承製廠商是否依照合約及圖面規定施工。例如新建核能電廠所有設備及管線之安裝均需依據合約之規定或法規執行檢驗，方能確保未來營運之安全。同時新建鋼結構大樓樑柱對接之銲道，亦應執行超音波檢測，以利整體結構應力有效之傳遞。第二類使用新老劣化結構設備之評估檢驗：由於檢測技術之不斷發展及劣化經驗之累積，非破壞檢測將可針對使用中之設備執行檢驗，以利未來殘餘壽命之評估。例如結合脈衝式渦電流檢測技術與超音波檢測技術評估港灣基樁之腐蝕情形、發電設備之鍋爐爐管相關檢測等，均可依檢測結果作適當評估，以了解目前設備之使用情況。因此若能善加利用非破壞檢測各項技術，將可有效消弭設備存在瑕疵所造成之風險，並提高結構體本身之安全。

2.2 超音波檢測法

超音波檢測法是利用音波振動導入材料內部，以檢測表面或內部缺陷之非破壞檢測方法。一般金屬超音波檢測之頻率範圍由 1MHz 至 25MHz，其中以 1MHz 至 5MHz 最常使用。其原理主要是將壓電材料所製造之探頭，應用壓電效應達成能量轉換以產生超音波，並經由耦合劑傳入工件。在工件內超音波的傳遞速率需視材料而定，當傳至不同介面時，超音波會有反射或折射現象，因此藉由分析反射或透射所呈現的訊號，可檢測

出材料瑕疵及其性質[3-6]。

超音波探頭主要是由壓電薄片、背面填料、導線及耐磨層組成。壓電薄片經極化後，具有壓電特性，其兩面鍍上金屬膜，接上導線以便電壓分佈於表面。背面填料用金屬粉末（如銀、鋁等）和膠調成，並吸收超音波適當能量，使其脈波具有適當鑑別力。由於超音波檢測所採用之壓電式探頭是依據其本身的機械振動來產生訊號，故須與受測物表面維持良好的接觸。為預防壓電晶體薄片磨損或破裂，因此一般都會在壓電晶體的前緣黏貼塑膠耐磨層，或在探頭與受測物間塗抹耦合劑，甚至直接使用浸泡於水中的浸液式探頭等，來保護探頭免於受損。

2.3 超音波之反射與折射

超音波為應力波之一種，因此需藉由介質才能傳遞，然而不同之介質其音阻抗亦不同（音阻抗為波速 V 與材料密度之乘積）。在不同的物質中，音阻抗與物質之密度成正比。所以當超音波經過兩種不同介質時，入射波形成部分反射波及部分折射波之狀態，而超音波的傳遞受衰減、反射及折射的影響，其能量將愈來愈弱。且入射角（ α ）與折射角（ β ）關係遵循 Snell's 定律[3,4]：

$$\sin\alpha/\sin\beta = V_1/V_2 \quad (2-1)$$

假設有兩種材料相接，其音阻抗分別為 Z_1 及 Z_2 。當超音波音壓 P_e ，由材料甲垂直入射於介面時，反射波之波式與入射波相同但方向相反，其音壓為 P_r 。而傳送入材料乙之折射波之波式和方向均與入射波相同，音壓為 P_d 。其音壓間之關係如下[3]：

$$Pr/Pe = R \quad (2-2)$$

$$Pd/Pe = D \quad (2-3)$$

其中 R 及 D 為音壓之反射係數與透過係數，其與音阻抗(Z)間之關係如下[3]：

$$R = Z_2 - Z_1 / Z_2 + Z_1 \quad (2-4)$$

$$D = 2Z_2 / Z_2 + Z_1 \quad (2-5)$$

2.4 超音波之發散角

超音波音束影響的範圍稱為音場，超音波音束本身隨壓電晶片的距離而改變，其音壓並非均勻性的變化。音場分為兩個區域，包括近場與遠場。一般近場受到壓電晶片相互干涉較為明顯，音壓變化較為複雜。而遠場為近場之後的區域，其音壓變化較均勻。音束的發散角其與壓電晶體的直徑 d 及超音波之波長 λ 有關，而頻率愈高其音束發散角也愈大，發散角(γ)之公式如下所示[3,5]：

$$\text{Siny} = 1.22\lambda/d \quad (2-6)$$

2.5 相位陣列式超音波原理

一般超音波斜束探頭為單晶探頭，並以固定角度傳送超音波至試件內。但由於缺陷之方向性不同，將間接影響固定折射角探頭之檢出率，因此某些法規會要求以不同折射角之探頭互相搭配，以提高檢測缺陷之機率。例如美國銲接協會 AWS D1.1 之超音波檢

測規定[7]，不同檢測厚度將以不同探頭折射角度搭配(如 45 度、60 度及 70 度之角度搭配)。

相位陣列式超音波與傳統超音波法(單一晶片)最大差異為相位陣列法使用多晶片探頭，並以不同激發與接收之延遲時間。多晶片探頭之各小晶片可視為產生柱狀波的線狀波源，依據豪更斯原理(Huygen's Principle)產生不同波前(wave front)行進波式，其波前會互相建設性或破壞性干涉而產生新的波前，因此可利用電腦之電子式操縱、掃描與聚焦相關音束。由其多角度掃描特性，故對於各類型缺陷性質皆有某一適當角度能與缺陷方向性成垂直，以獲得最佳反射信號與檢出能力[8]。

相位陣列式超音波技術檢測速度較傳統超音波檢測快，波束操控可將缺陷檢出能力達到最佳化，因此對於因現場工作環境或幾何形狀限制之檢測構件，波束操控特型為一明顯有效解決之方法。同時由於相位陣列式超音波可電子式聚焦波束，故對於可能存在缺陷之位置能更有效檢出。

近年相位陣列式超音波檢測技術已廣泛應用各式銲道與複雜形狀工件，分析其具備以下優點[8]：

- (1) 檢測速度快：相位陣列式超音波檢測技術對於銲道或腐蝕構件，其線性掃描能力可增加檢測之速度。
- (2) 呈像能力佳：相位陣列式超音波檢測技術具備 S-scan、E-scan、2-D 及 3-D 呈像方式，可提供更佳缺陷評估之判斷資訊。
- (3) 方式較彈性：相位陣列式超音波檢測技術對於各不同構件之缺陷類型，可進行多樣性掃描，以增加評估能力。
- (4) 資料儲存佳：相位陣列式超音波檢測技術可將相關檢測資訊，以全部或個別檔案存取與顯示，可提供較佳缺陷判釋資訊，更有助於資料保存與查詢。

- (5) 訊號再現性佳：相位陣列式超音波檢測技術經試驗證明，對於相同設定與檢測程序下，較傳統超音波檢測更具重覆性之結果。

2.6 相位陣列式超音波之掃描型式

相位陣列式主要利用晶片陣列排置方式，分別各自獨立激發與控制時間差，檢測者可自行設計激發延遲時間，以獲得各式音波之特性。同時亦可經由檢測角度、焦距距離及掃描型式等資料設定，由電腦系統運算獲得結果。

相位陣列式超音波技術中，各晶片時間延遲值，係取決於探頭晶片驅動尺寸、音波型式、折射角度及聚焦深度，其電腦控制波束之掃描型式主要有下列三種：

- (1) 電子式掃描(Electronic Scanning)：E-scan 藉由動作元件產生固定角度波束，並沿探頭長度方向進行掃描，其相當於傳統超音波檢測移動掃描一段距離。
- (2) 動態深度聚焦(Dynamic Depth Focusing)：相位陣列式超音波技術以不同聚焦深度進行掃描，實際檢測時係傳送單一焦距脈波，於接收時再針對聚焦法決定深度，並進行重新聚焦。
- (3) 扇形掃描(Sectorial Scanning)：S-scan 針對特定聚焦深度產生音束，並掃描一扇形角度範圍。其範圍之起始與終止視探頭設計、楔形塊與波式而定。如圖 1 所示為相位陣列式超音波檢測螺栓之情形，圖 2 所示為扇形掃描之結果，畫面顯示為螺栓無瑕疵之情形。



圖 1 相位陣列式超音波檢測螺栓

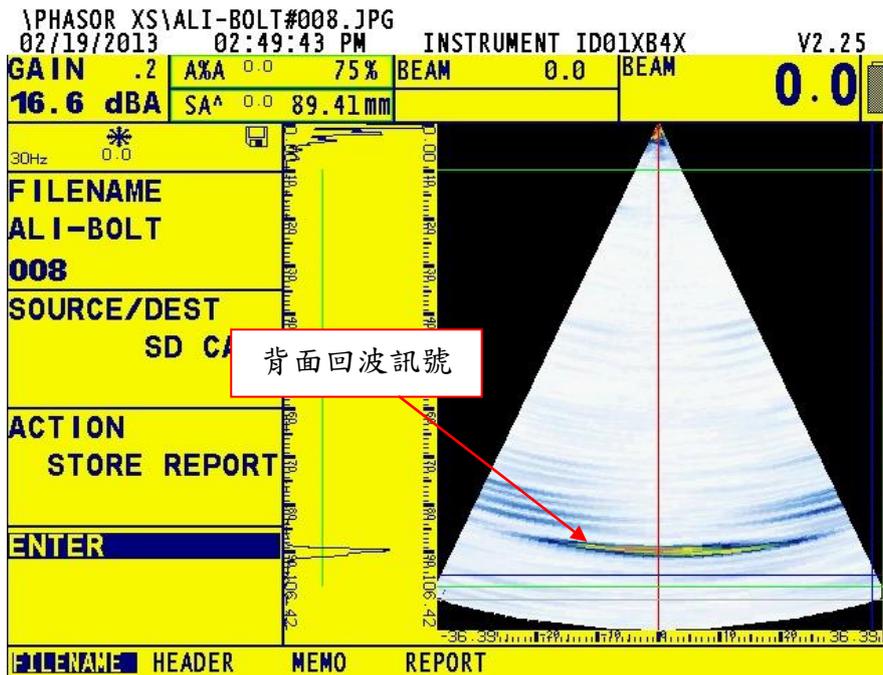


圖 2 扇形掃描之結果

3. 檢測程序與方法

本文經實際執行超音波檢測試驗後，建議螺栓檢測程序有三項，包括製作靈敏度規塊、建立 DAC 曲線及相位陣列式超音波之掃描，說明如下：

3.1 製作靈敏度規塊

檢測前準備相同之螺栓試件，並於螺牙不同位置製作人工缺陷規塊，以利靈敏度校正。本次檢測共取三支 JIS F10T 螺栓(長度 90mm)，並於其中兩支螺栓之螺牙處製作人工缺陷(缺陷位置分別從表面至 51mm 與 76mm 處)。依據 ASME Sec. V 所建議之螺栓人工缺陷深度[6]，當 2 吋至 3 吋長度之螺栓，須製作 2mm 深度之人工缺陷(如表 2 所示)。

表 2 ASME Sec. V 建議螺栓人工缺陷深度

Bolt Size	Notch Depth
Less than 2 in. (50 mm)	1 thread depth
2 in. (50 mm) and greater, but less than 3 in. (75 mm)	$\frac{5}{64}$ in. (2.0 mm)
3 in. (75 mm) and greater	$\frac{3}{32}$ in. (2.5 mm)

3.2 建立距離振幅校正曲線(distance amplitude correction curve)

一般超音波檢測對瑕疵大小均以回波信號大小判定，但影響回波信號大小之因素很多，如瑕疵大小、形狀、方向及距離等。故本文建議執行螺栓檢測前，先執行相關靈敏度校正，以利評估瑕疵大小與嚴重程度。故檢測前先準備螺栓缺陷規塊，同時其所有條

件應與檢測時相同，如使用相同探頭、儀器與耦合劑等，並建立 DAC 曲線。

DAC 曲線法，即發射相同強度的超音波進入螺栓規塊及螺栓試件內，使之傳送一段相同的距離，並比較接收到信號強度，以決定規塊及試件對同一信號衰減的比例，並利用此一比例推算規塊中某一信號高度，如在試件中其信號高度應為多少的方法，因此本方法可適當評估瑕疵之尺寸。

製作 DAC 時將其各點測得之波峯連接成一曲線，此即為 DAC 曲線。檢測瑕疵回波達及此曲線者不論距離為何，均表示與此 DAC 設定時之人工瑕疵大小相當。然後再以 DAC 設定時之靈敏度分別增減 6dB 或 12dB，繪出其 ± 6 dB DAC 曲線及/或 ± 12 dB 曲線，以作為判定瑕疵分別相當於原人工缺陷之比較。本次檢測兩支人工缺陷螺栓，並建立 DAC 曲線如圖 3 所示。

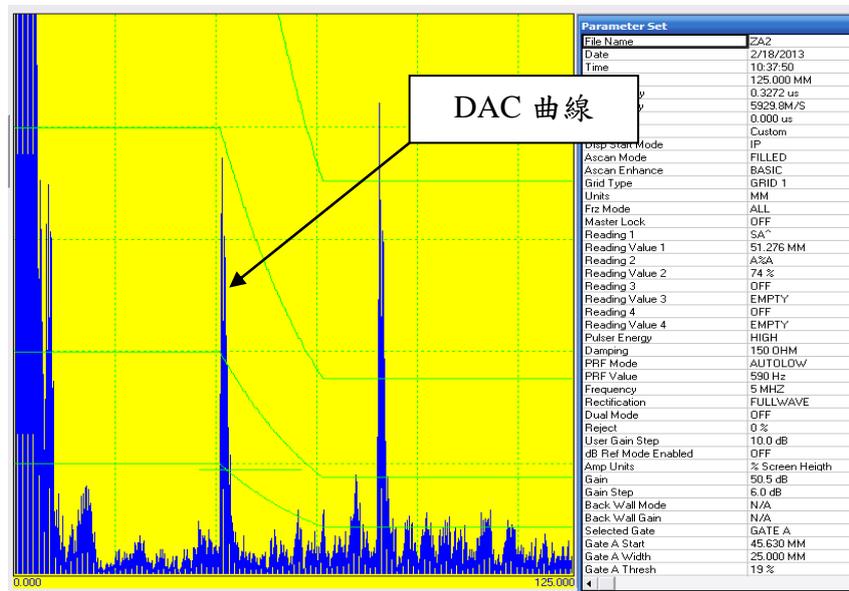


圖 3 建立 DAC 曲線

3.3 相位陣列式超音波之掃描

本次檢測針對兩支人工缺陷螺栓，執行相位陣列式超音波之扇形掃描。扇形角度範圍設定為-20度~+20度，如圖 4 所示為人工缺陷位於表面下 51mm 之畫面，可清楚顯示瑕疵之位置。

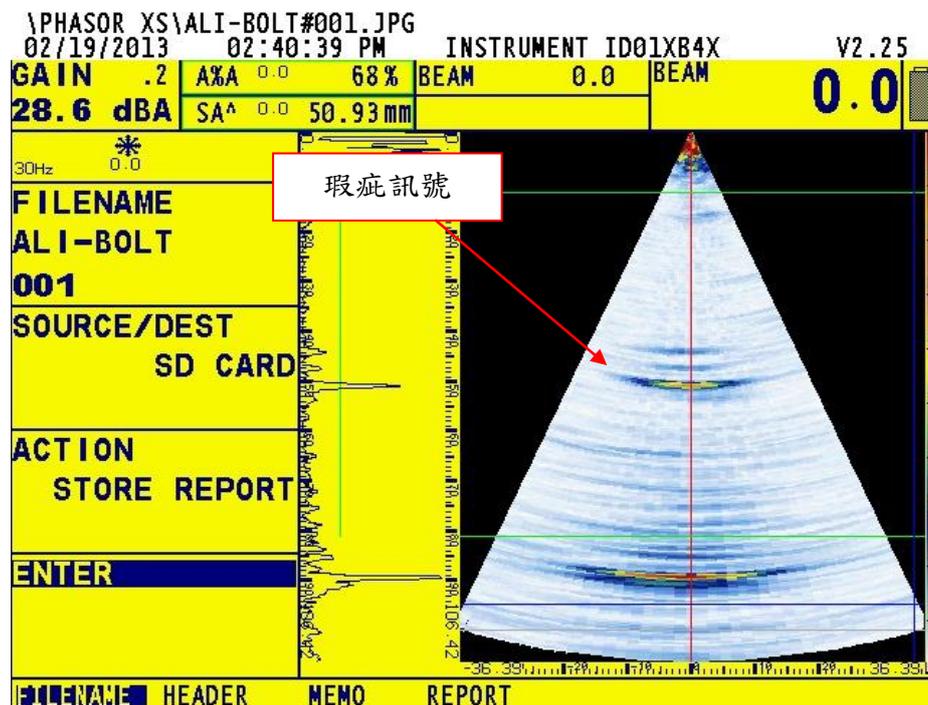


圖 4 人工缺陷位於表面下 51mm 之檢測畫面

3.4 檢測案例

由上述可知，本研究技術可有效檢測鋼結構接合之高強度螺栓，並判讀缺陷大小，以利使用者後續之評估。除此之外，本技術亦可評估較大型之螺栓，如設備基礎螺栓、鋼結構柱基礎螺栓等，其中圖 5-7 所示為超音波檢測廠房結構柱基礎螺栓之情形。由於此類螺栓工件長度較長，因此超音波探頭之大小、頻率等選擇非常重要。一般超音波波

長愈短，即頻率愈高，則瑕疵檢出能力愈高，換言之能檢出較小之瑕疵，但容易衰減之特性將造成無法在工件較長時有效檢測瑕疵，所以適當檢測程序之建立，方可發揮非破壞檢測之最佳效果。



圖 5 相位陣列式超音波檢測基礎螺栓(含螺帽)



圖 6 相位陣列式超音波與傳統超音波檢測基礎螺栓(含螺帽)



圖 7 相位陣列式超音波檢測基礎螺栓

超音波在試件行進時，若遇到瑕疵（界面），則部份音波反射，部份音波會穿透。這些音波經接收後，加以訊號處理，可用來判斷試件是否有瑕疵存在及試件之品質是否良好。故本案例可藉由是否出現瑕疵回波，間接評估判斷是否有瑕疵及嚴重程度，其相關超音波參數設定如表 3 所示。同時從檢測示波器訊號畫面，可看出無明顯瑕疵回波(如圖 8 所示)，故本案例基礎螺栓內部應無有害之缺陷。

表 3 超音波參數設定

儀器型式	探頭型號	探頭直徑	探頭頻率	音速	角度	範圍	掃瞄感度
GE PHASOR XS	MB 4S	Φ 10 mm	4 MHZ	6046 m/s	0°	500 mm	69 dB
	B2S	Φ 24 mm	2 MHZ	6046 m/s	0°	500 mm	77.6 dB
	115-000-491	5×7 mm	5 MHZ	5934 m/s	-20°~20°	2250 mm	42 dB



圖 8 檢測示波器訊號畫面

4. 結論

本文利用相位陣列式超音波技術檢測鋼結構之高強度螺栓，檢測結果顯示針對缺陷特性評估具相當可靠度及準確性。經比較傳統超音波檢測，相位陣列式技術可提高超音波音束之效率，並逐漸可取代傳統超音波須使用多角度探頭掃描檢測之需求，預估將可大量降低訊號擷取之檢測時間，以提高檢測完整性。

相位陣列式超音波多樣之檢測資訊，可提高檢測者直接由畫面瞭解瑕疵位置，同時更易想像超音波於試件內傳遞之情形。另由於可快速激發不同角度之超音波，故可大幅提高掃描靈敏度及降低掃描感度。針對螺栓檢測，本文建議可先製作規塊與 DAC 曲線，

並使用相位陣列式超音波技術執行初掃描，再以 DAC 曲線評估瑕疵大小與嚴重程度，預期應可有效掌握螺栓缺陷情形，以利後續使用評估。

5. 參考文獻

- (1) 中華民國鋼結構協會，鋼結構施工規範，中華民國鋼結構協會，台北 (2008)
- (2) 歐良模，移動式起重機上部旋轉體固定螺栓破壞原因探討及檢查技術研究，行政院勞工委員會第七屆全國職場安全週得獎論文，台北 (2012)。
- (3) 金崇勳，機械材料，復文書局，台南 (1995)。
- (4) 吳學文、黃啟貞、陳必貫、葉競榮，超音波檢測法（初級），中華民國非破壞檢測協會 (1988)。
- (5) 葉競榮、徐鴻發，超音波檢測法（中級），中華民國非破壞檢測協會 (1990)。
- (6) ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, ASME Sec. V Nondestructive Examination, American Society of Mechanical Engineers (2010).
- (7) AWS D1.1 2008, “Structural Welding Code-Steel”, American Welding Society (2008).
- (8) R/ D Tech, “Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications-R/ D Tech Guideline”, published by R/D Tech Inc. (2004).