

行政院原子能委員會核能研究所

委託研究計畫研究報告

中子斷層影像技術開發

Neutron computed tomography technology
development in Taiwan

計畫編號：NL1120223

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫參與人員：裴晉哲、武傳仁、王雅亭、許幼新、鄭勝隆

聯絡電話：03-5742860

E-mail address：jjpeir@mx.nthu.edu.tw

核研所聯絡人員：鄭勝隆博士

報告日期：112 年 12 月 12 日

目 錄

中文摘要	1
英文摘要	1
壹、計畫緣起與目的	2
貳、研究方法與過程	6
參、主要發現與結論	8
肆、參考文獻	21

圖目錄

圖 1. THOR W1 中子照相系統 (a)示意圖、(b)屏蔽保護暗箱結構、(c)搭配的相機系統	4
圖 2. 清華中子照相研究可運用的鏡頭、CCD 相機及解析度測試片	5
圖 3. 中子斷層照相成像系統的架設	7
圖 4. WD-40 油罐之中子電腦初步的斷層分析	12
圖 5. WD-40 油罐之中子電腦斷層分析	17
圖 6. Ladder 金屬梯子之中子電腦斷層分析	20

中文摘要

本研究目標為建立國內中子斷層影像技術的能力。藉清華大學水池式反應器(THOR) W1 中子束的中子照相來進行 2D 影像擷取程序，並開發或利用中子斷層應用軟體，以發展中子斷層影像分析研究能力。經本計畫的執行，已首度建立台灣中子斷層影像的研究技術。

英文摘要

This project is to establish the neutron computed tomography (NCT) image technology of neutron radiography in Taiwan. This work preliminarily starts the capture procedure of the neutron radiography images at W1 Neutron Beam of Tsing Hua Open-pool Reactor, and then develop or apply the NCT software to develop the NCT technology ability in Taiwan. After the execution of the project, the NCT research technology has been firstly established in Taiwan.

壹、計畫緣起與目的

本開發中子影像技術計畫，主要係依據國家「創新原子能科技跨域研發產業關鍵術」的發展目標，規劃並執行，以協助國內產業開發新材料及元件並提昇產業競爭力。現今 3D 影像在非破壞檢測技術的發展，極為重要，X 光的 CT 影像，在醫學診斷已是不可或缺的重要技術，而其在工業應用上，已逐漸推展中，其運用範圍包含缺陷與壁厚檢測、結構檢查、幾何量測、逆向工程...等項目，是先進材料及精密機械組件製造的重要檢測技術。但對於輕原子序物質的檢測方面，X 光較不靈敏，若能結合中子的斷層影像技術，將可提升組件內部輕原子序的檢測，此特點可應用於 3C 產品中散熱模組關鍵熱管組件開發，有機會探測其實際填充物及製冷劑(含氫流體，如水)分佈，以利散熱效能的改善。

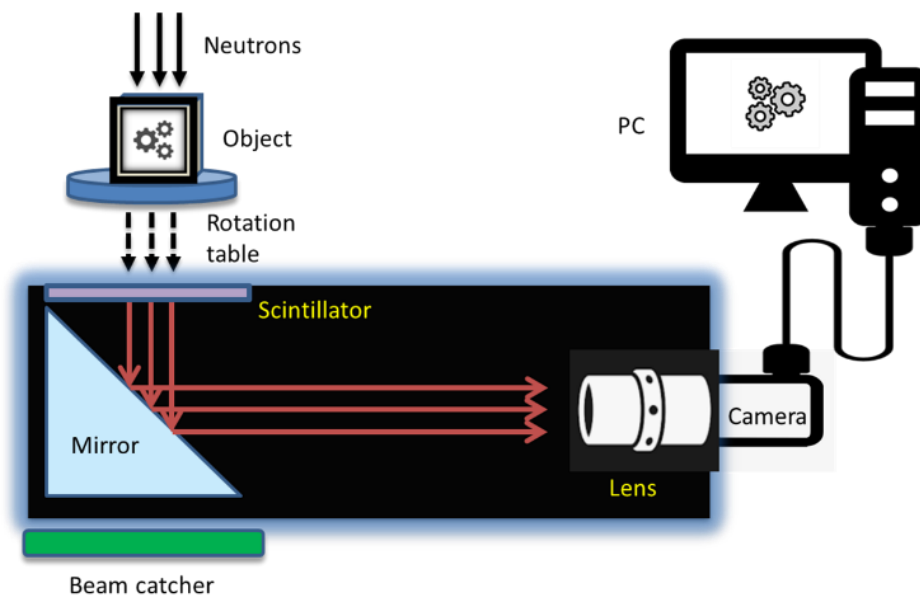
本計畫利用 THOR 的中子射源，藉中子照相技術來進行 2D 影像擷取程序的相關研究，並開發或利用應用軟體，以首度建立台灣中子斷層(neutron computed tomography, NCT)影像分析研究能力。除有助中子影像設施與技術的建立，縮短研發時程並提昇效率，更進一步在相關軟硬體設備及中子斷層影像應用領域的需求上，作先期評估。

中子與物質的作用方式和 X 光不同，前者主要與原子核作用，後者則與物質軌道電子作用，故 X 光對於元素的散射截面大小，與作用元素的原子序大小成正比關係，以致其對於鄰近元素及同位素

不容易分辨，特別是對氫、鋰、碳、及氧等較輕元素，X 光更是無法有效的辨識。另一方面，質子與電子分別帶有正負電，穿透力極低，僅適合進行物質表面的研究。而中子對於不同元素及同位素的散射截面成不規則變化，所以對於不同的元素或同位素的鑑別力相當強。且中子相較於 X 光而言，對於樣品的穿透力較強，可以深入塊材內部。故中子照相在分析上有其獨特性，不僅可用來進行許多物理、生物、考古、及工程等多方面的研究外，也常應用於 X 光所不能檢測的物件上，如海關常無法利用 X 光檢測出旅客攜帶的毒品以及爆炸物品，為一極重要的非破壞檢測技術⁽¹⁻⁴⁾。

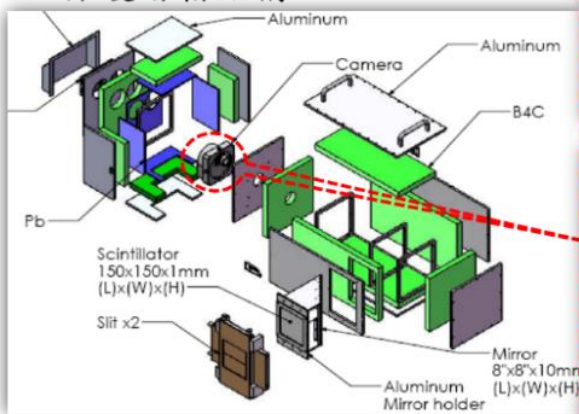
近年來，半導體技術快速成熟的發展，促進了中子照相成像技術的改進。位於清華原子爐 THOR W-1 的中子照相實驗室，已將過去傳統 X 光底片加上轉換屏的成像方式，改變為具旋轉平台結合 CCD 攝影機的成像方式，並配合電腦系統，大幅降低照相成像的時間，也擴大了研究應用的範圍，該系統如圖 1. 所示。當入射中子穿透物質後，藉由與物質的核反應、彈性與非彈性散射後，造成出射中子的強度與入射的不同，再將出射中子信號轉換為可見光，並經由電子系統取得影像。由於中子不帶電，需要將中子信號轉換為可見光，此為中子照相重要的關鍵步驟，這可以藉由中子閃爍體作轉換屏，將中子轉換為可見光，再利用 CCD 攝影機系統，紀錄並取得拍攝的影像⁽⁵⁻⁷⁾，中子照相實驗系統可有效作為相關科學研究與應用的探究利器。圖 2.

為在本研究可運用的中子照相鏡頭、CCD 相機及解析度測試片。



(a)

■ THOR W1 中子照相系統屏蔽保護暗箱結構



■ 相機：

- CCD相機(SBIG-3200W)
- ICCD 相機(PSL)
- sCMOS相機(PCO Edge 5.5HS)



• 鏡頭

- Nikon NIKKOR 35mm f/1.4 Ai-S (廣角鏡)
- MICRO-NIKKOR 60mm f/2.8D (微距鏡)



(b)

(c)

圖 1. THOR W1 中子照相系統 (a)示意圖、(b)屏蔽保護暗箱結構、(c) 搭配的相機系統

	
鏡頭 Nikon NIKKOR 35mm f/1.4 Ai-S(廣角鏡)	AF MICRO-NIKKOR 60mm f/2.8D(微距鏡)
	
CCD 相機(SBIG)	sCMOS 相機(PCO Edge 5.5HS)
	
CCD 相機(SBIG-3200W)	Resolution Test Mark (瑞士 PSI)

圖 2. 清華中子照相研究可運用的鏡頭、CCD 相機及解析度測試片

貳、研究方法與過程

一、研究方法

(一) 利用 THOR 產生的中子及 CCD 中子照相系統進行中子斷層影像擷取程序

THOR 提供足夠的功率及中子通率，可對相關研究領域的進行檢測，這些領域包括物理、化學、工程、醫學及材料科學等方面之研究。其建造於民國 48 年，於民國 50 年 4 月 13 日完成初次臨界，現額定功率為 2 MW，為首座安裝於中華民國的核反應器。THOR 係一多用途且與生俱有安全特性之研究用反應器，使用的 TRIGA 棒狀核燃料為美國 GA 公司製造，以鋁架懸吊於 33 英尺深的開放水池中，核心高於地面並具可移動性。池水周圍為 3 公尺厚的水泥屏蔽牆，池中高度清潔過濾的水，不僅作為冷卻劑，中子緩和劑及透明的輻射屏蔽，使池中之設備常年清晰可見。

(二) 主要程序的建立

本研究主要建立的程序為：

1. 完成中子斷層照相成像系統的架設。

項目依序如圖 3.，主要程序是：儀器連接、對焦測試、對焦後取影像。

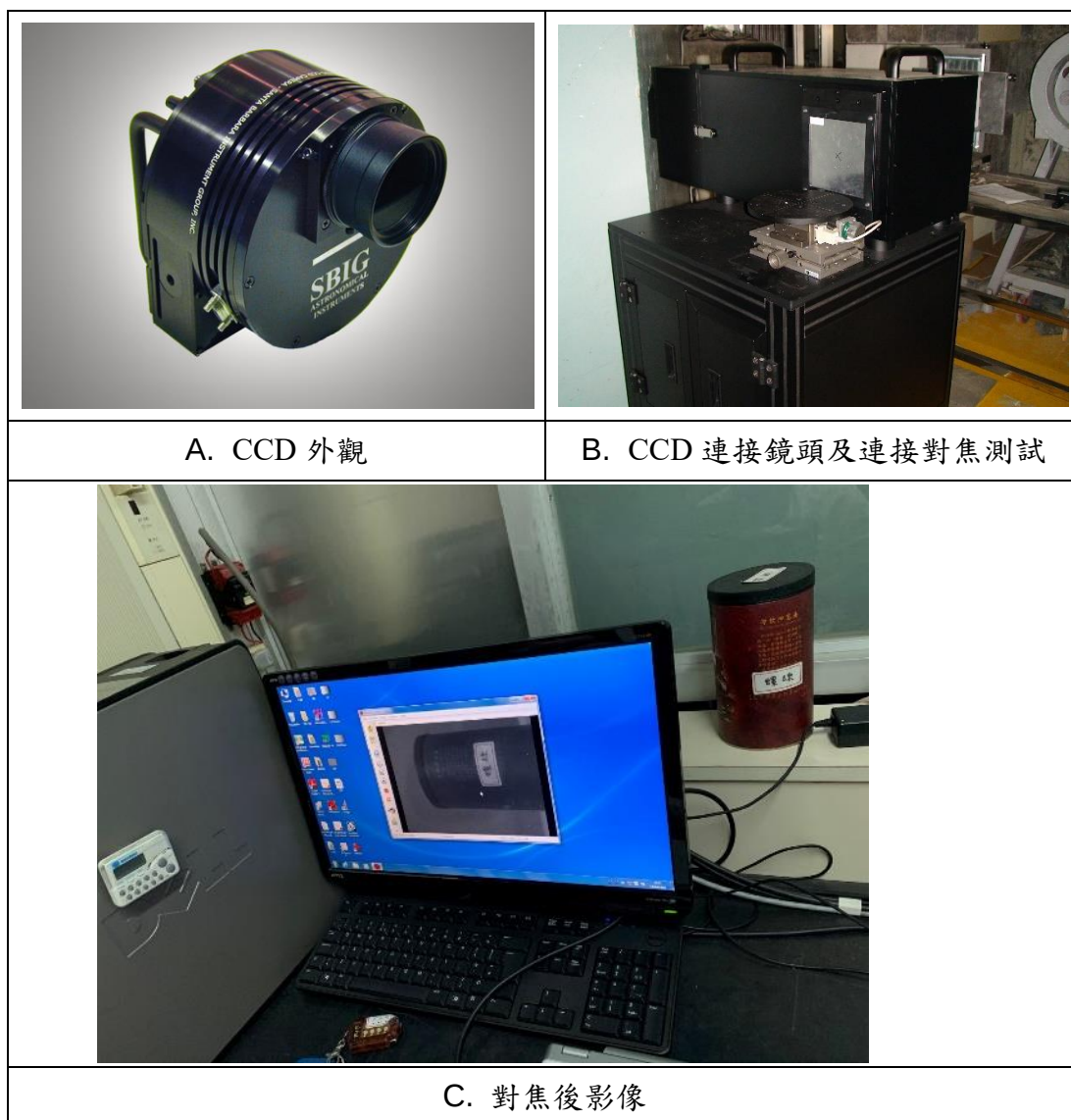


圖 3. 中子斷層照相成像系統的架設

2. 完成中子斷層影像擷取程序建立。

主要有以下程序：

- (1). 安裝鏡頭於的 CCD 轉接環上。
- (2). 連接導線及電源線於 CCD。
- (3). 啟動控制程式，並確認 CCD 與電腦完成連接。

- (4). 進行對焦測試。
- (5). 將 CCD 設備安裝於中子照相箱上。
- (6). 依據設定好條件(曝光時間、像素大小)開始擷取影像。
- (7). 將樣品安裝於旋轉平台上。

3. 進行中子動斷層影像擷取並分析處理斷層影像。

利用自我開發自動控制軟體(說明書如附錄一)，控制旋轉平台旋轉角度，自動截取系列影像，以取得中子斷層影像組，再利用 PSI 所開發的 MuhRec 中子斷層分析軟體⁽⁸⁻¹²⁾。

參、主要發現與結論

一、主要發現

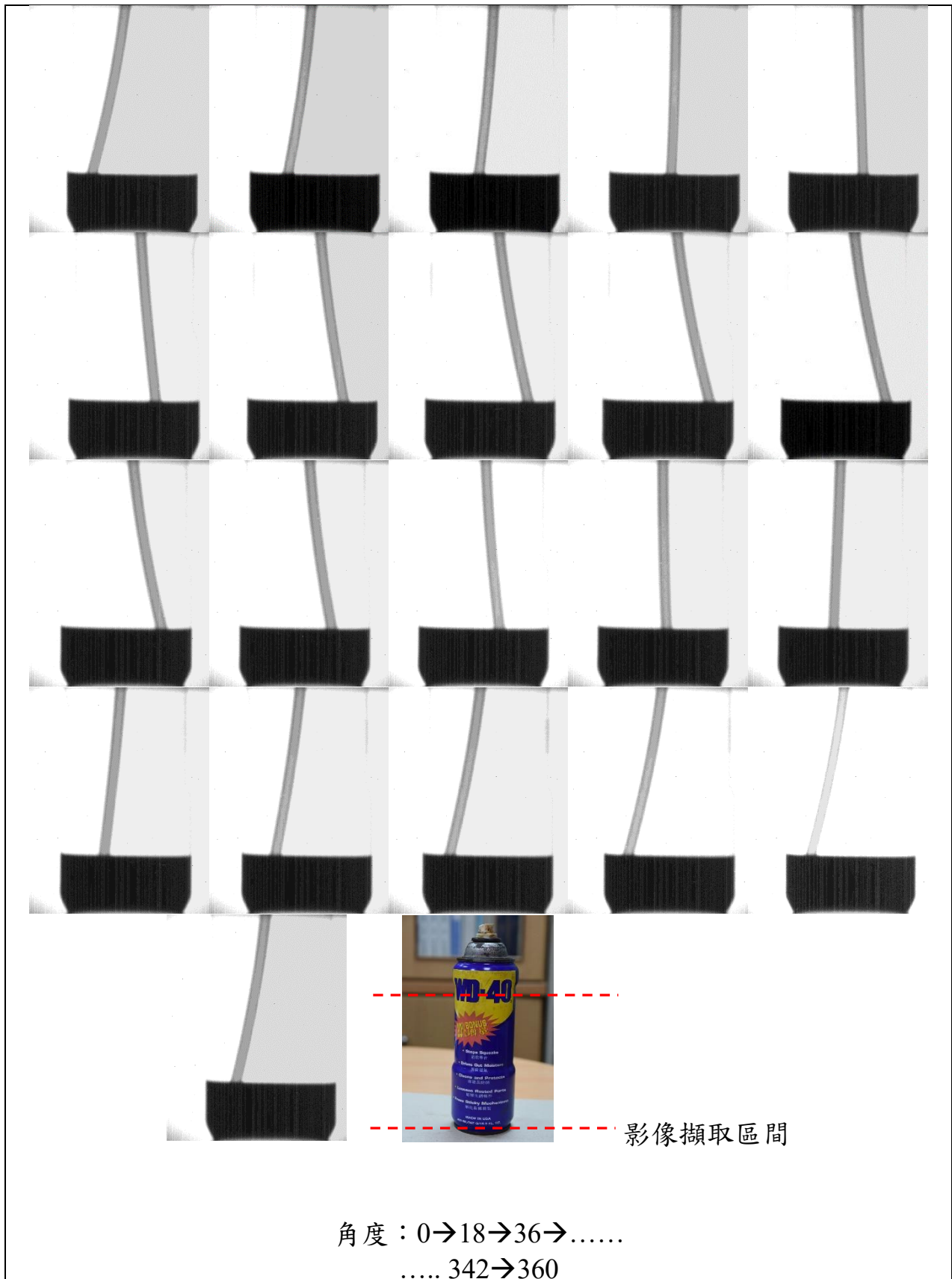
影像的初步擷取係以 WD-40 油罐為測試，每 18 度擷取影像一次，CCD 曝光時間為 3 sec，經影像分析處理，系列上、中、下斷層影像結果顯示如圖 4，紅線之間為影像擷取區間，由其中可以看出油罐底層為潤滑油，其中的吸管隱藏於其中，與上、中段不同，此兩層可以由斷層結果看到其中的吸管。

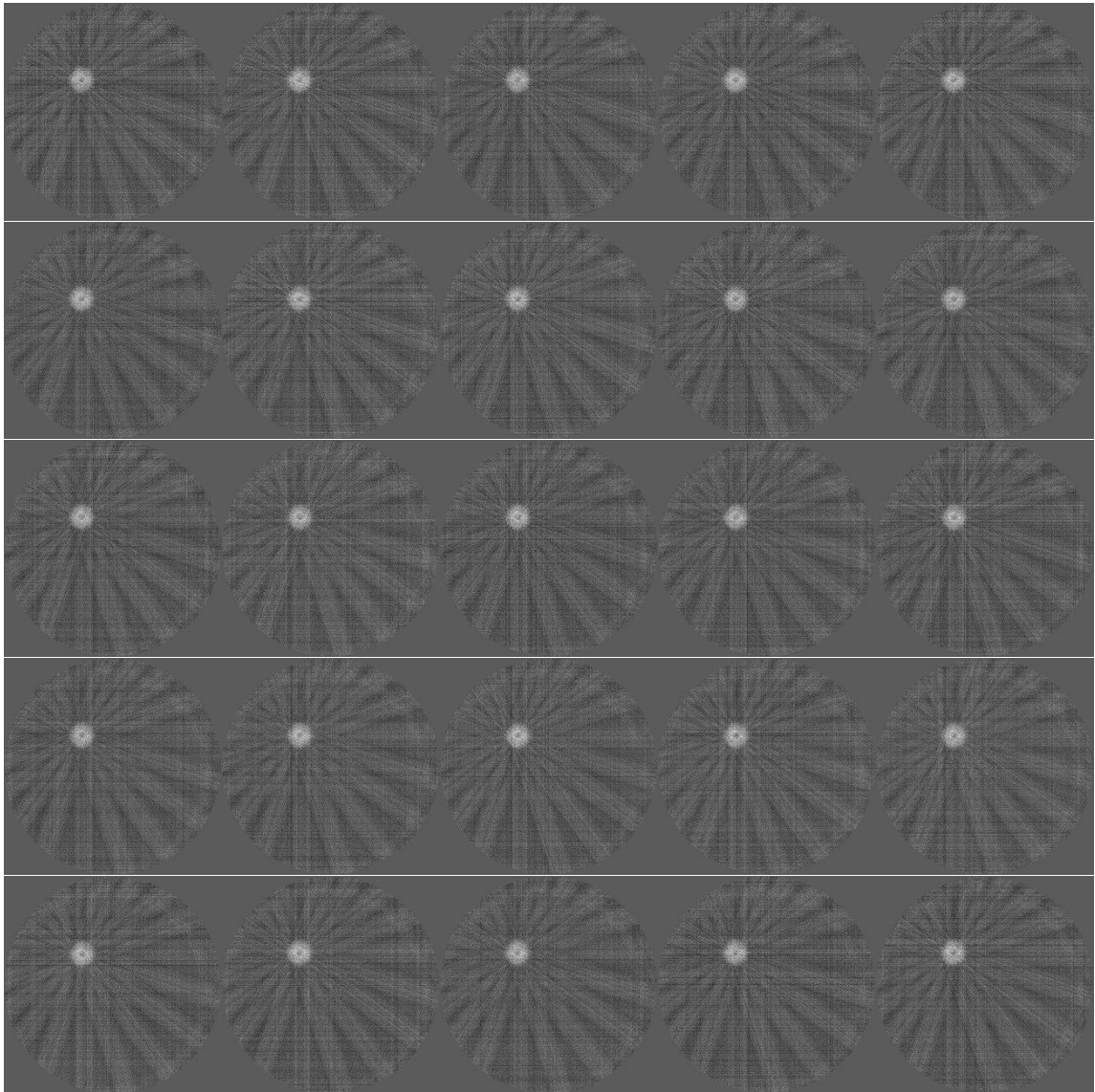
因初步的旋轉掃描為每 18 度擷取一張影像，其角度較大，造成每個斷層分析圖層有明顯條紋現象，可縮小旋轉掃描角度至 1 度，將可獲取更清晰的分析結果。但此方式將造成擷取資料量，大幅提升，

以人工完成將耗時費力，甚至易造成資料命名擷取錯誤問題，必須加以克服。此衍生的問題，藉由自我開發的自動控制軟體，已順利解決，並完成影像擷取。

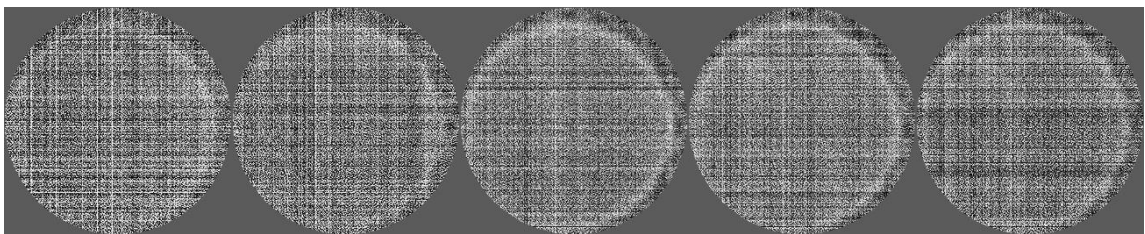
依照以上程序，進一步的進行 WD-40 油罐影像擷取，以每 1 度擷取 WD-40 影像一次，共需要擷取 360 張中子影像，CCD 曝光時間為 3 sec，由於已建立自動的影像擷取系統，整個取像時程順利於 54 分鐘內完成。經利用 PSI 所開發的 MuhRec 中子斷層分析軟體進行影像分析處理，系列上、中、下斷層影像結果顯示如圖 5.，圖 5.的影像解析度明顯較圖 4.大幅提升。

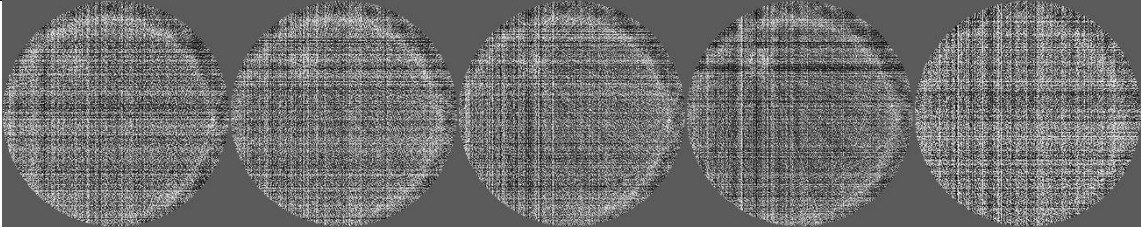
此外，亦附帶以每次 20 度的旋轉方式，擷取 Ladder 金屬梯子的中子影像，分析處理後，系列上、中、下斷層影像結果顯示如圖 6.，其中的空隙結構清晰可見。



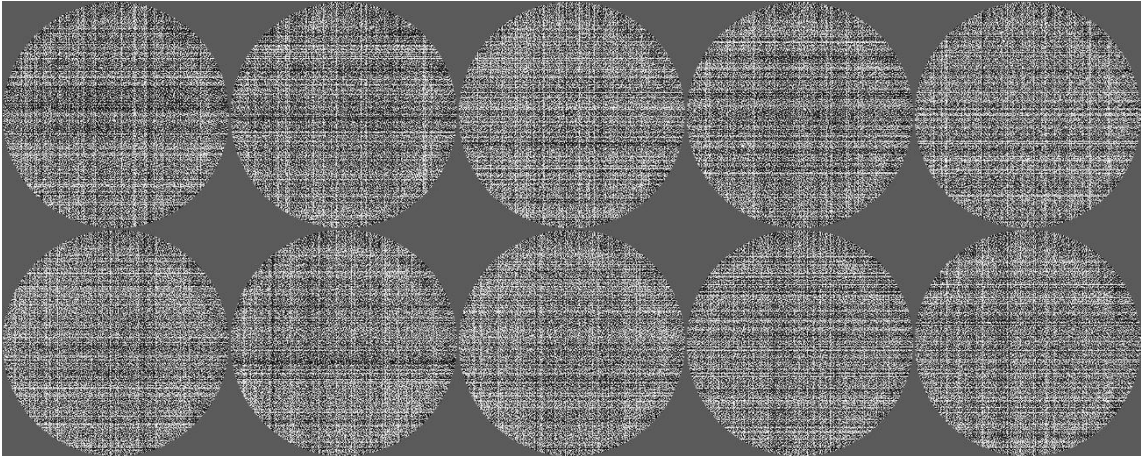


上段



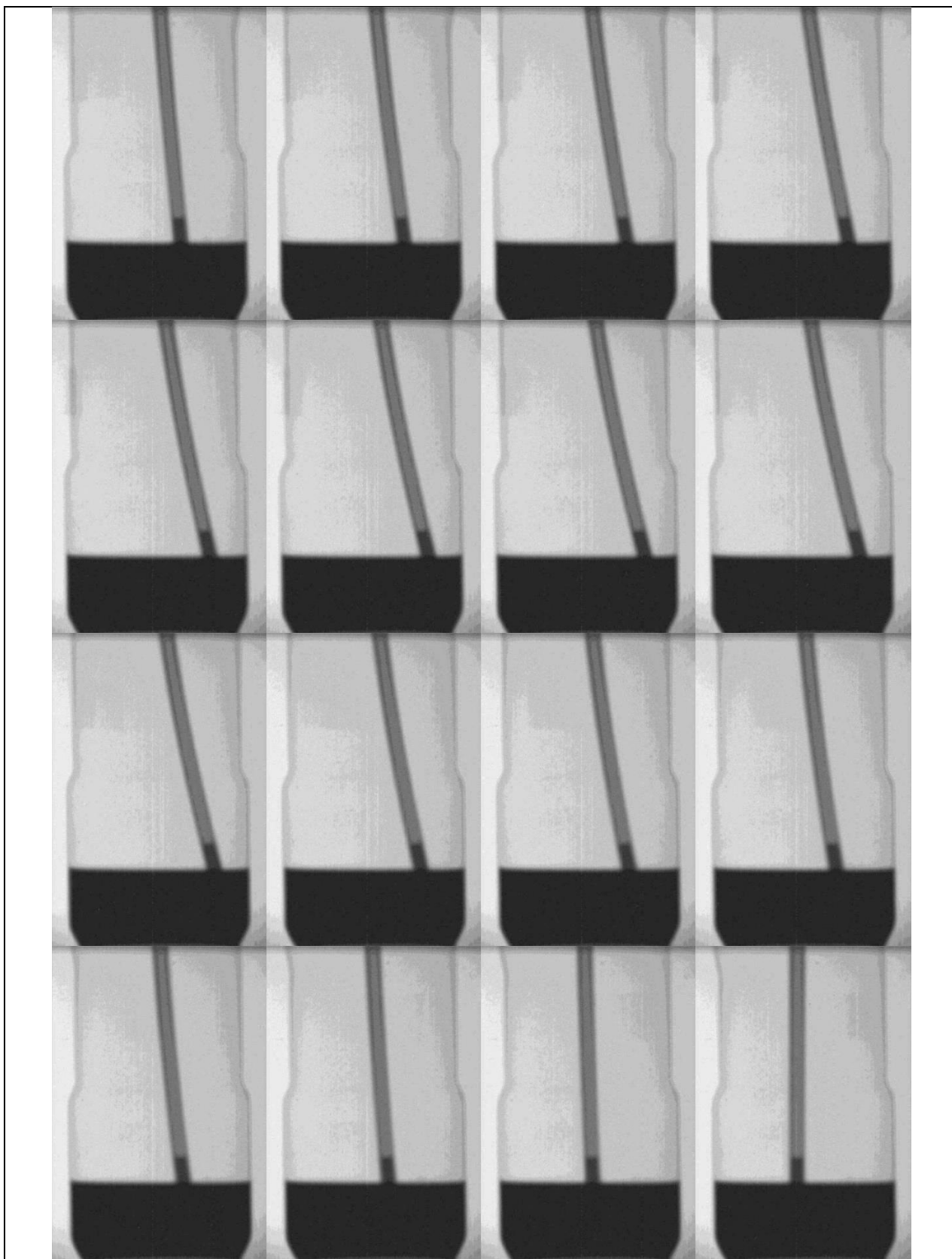


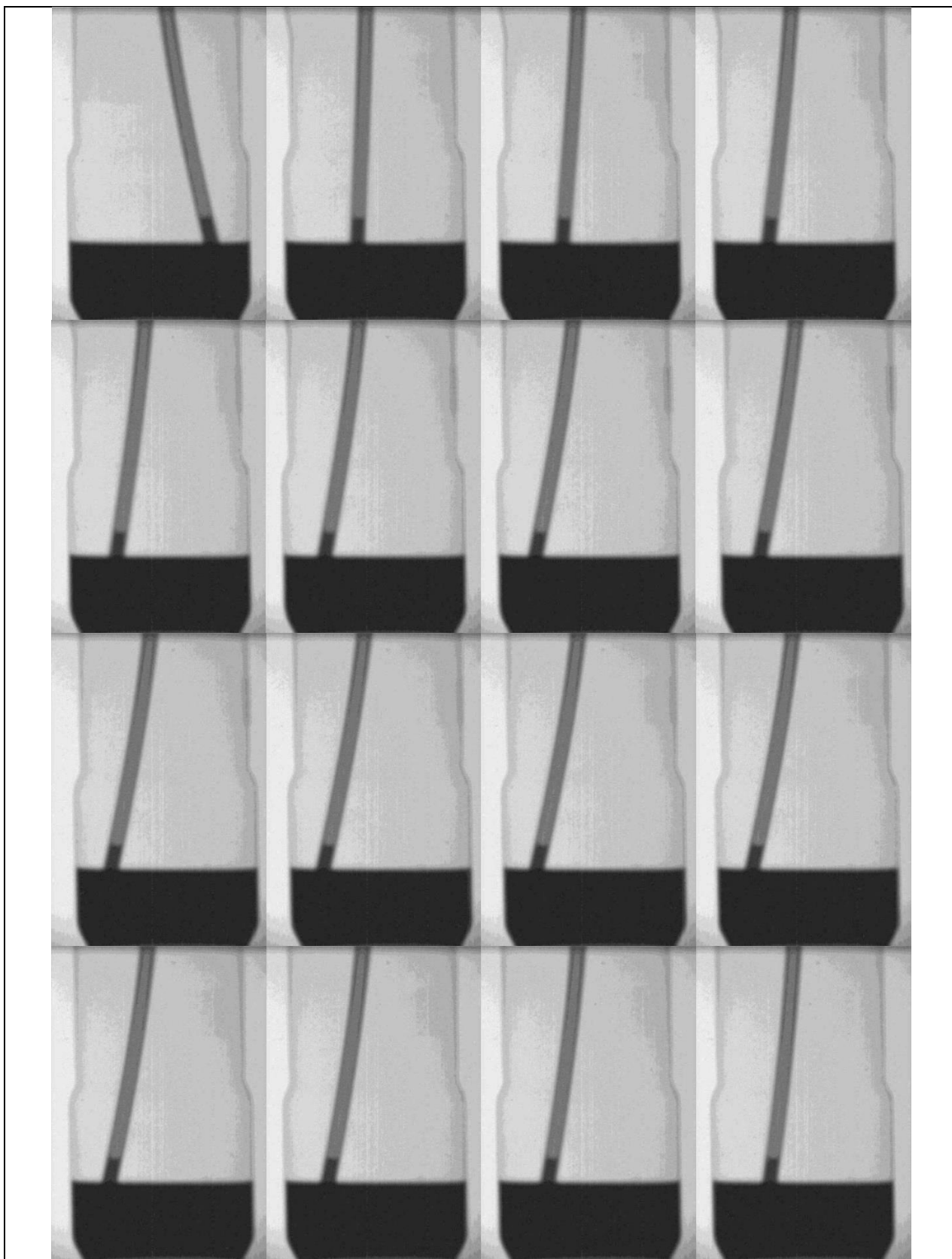
中段

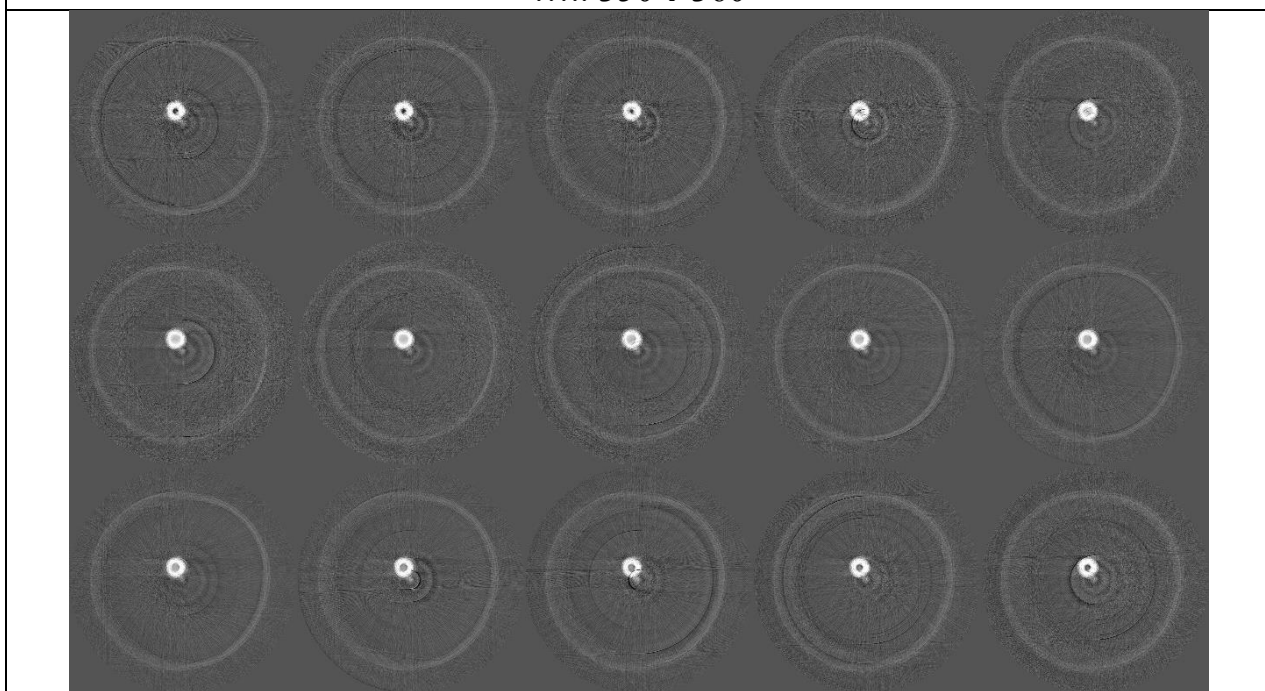
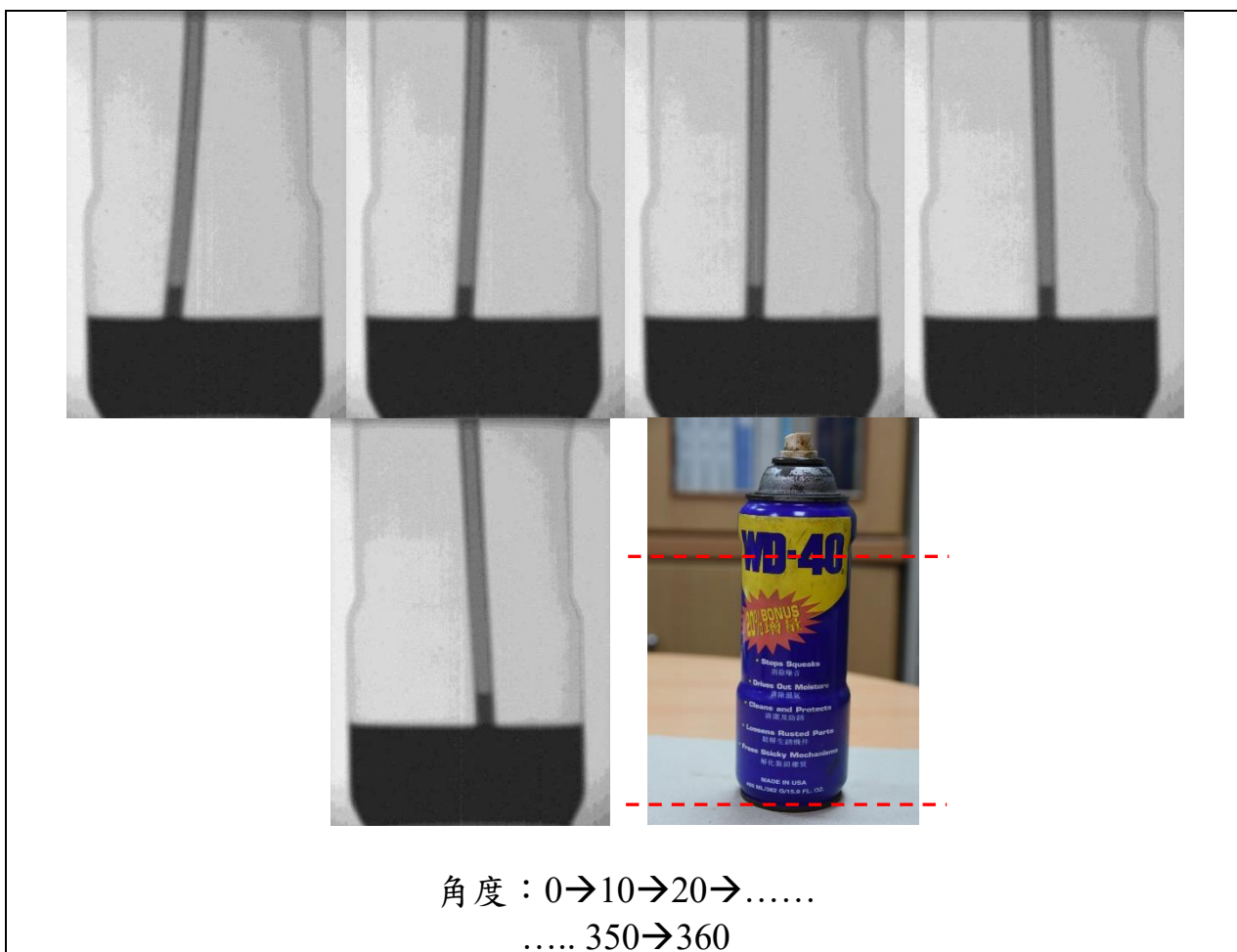


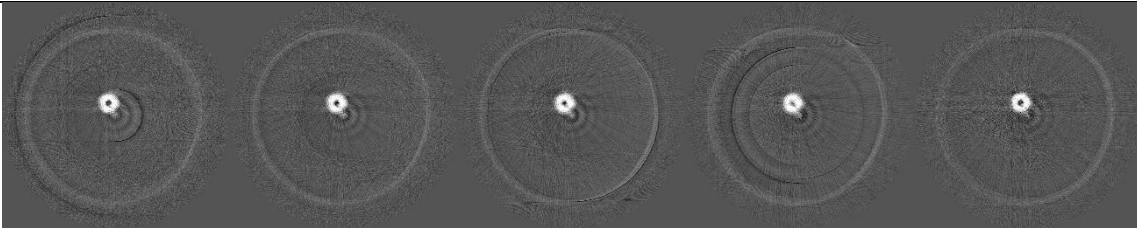
底段

圖 4. WD-40 油罐之中子電腦初步的斷層分析

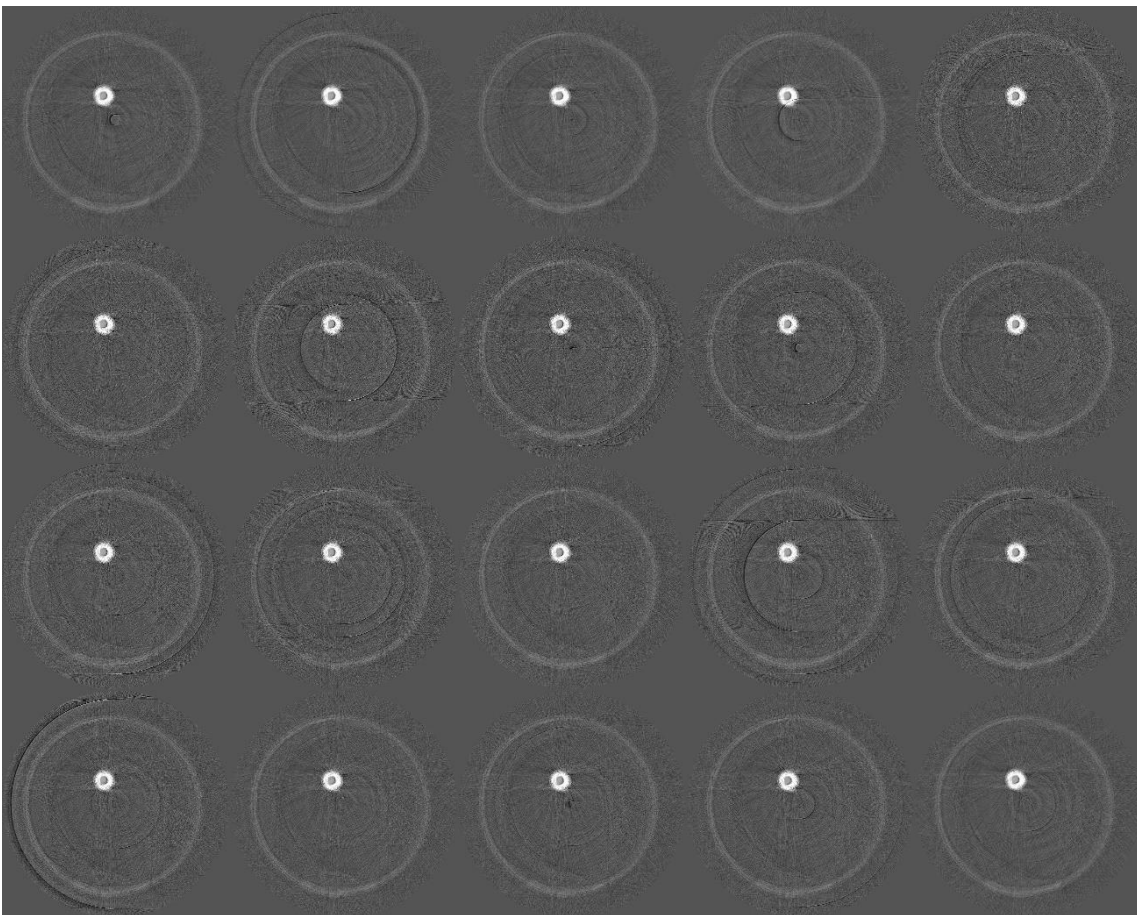




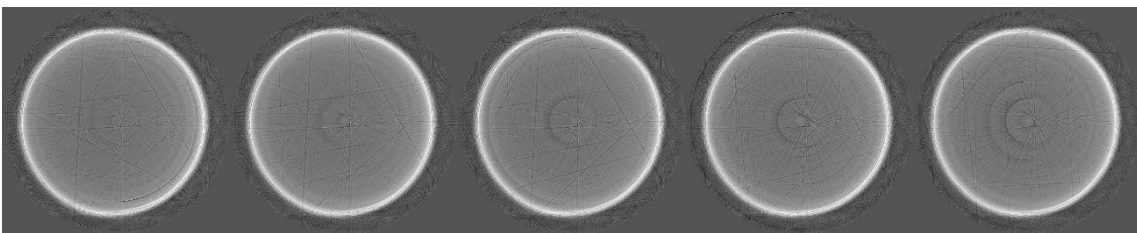




上段



中段



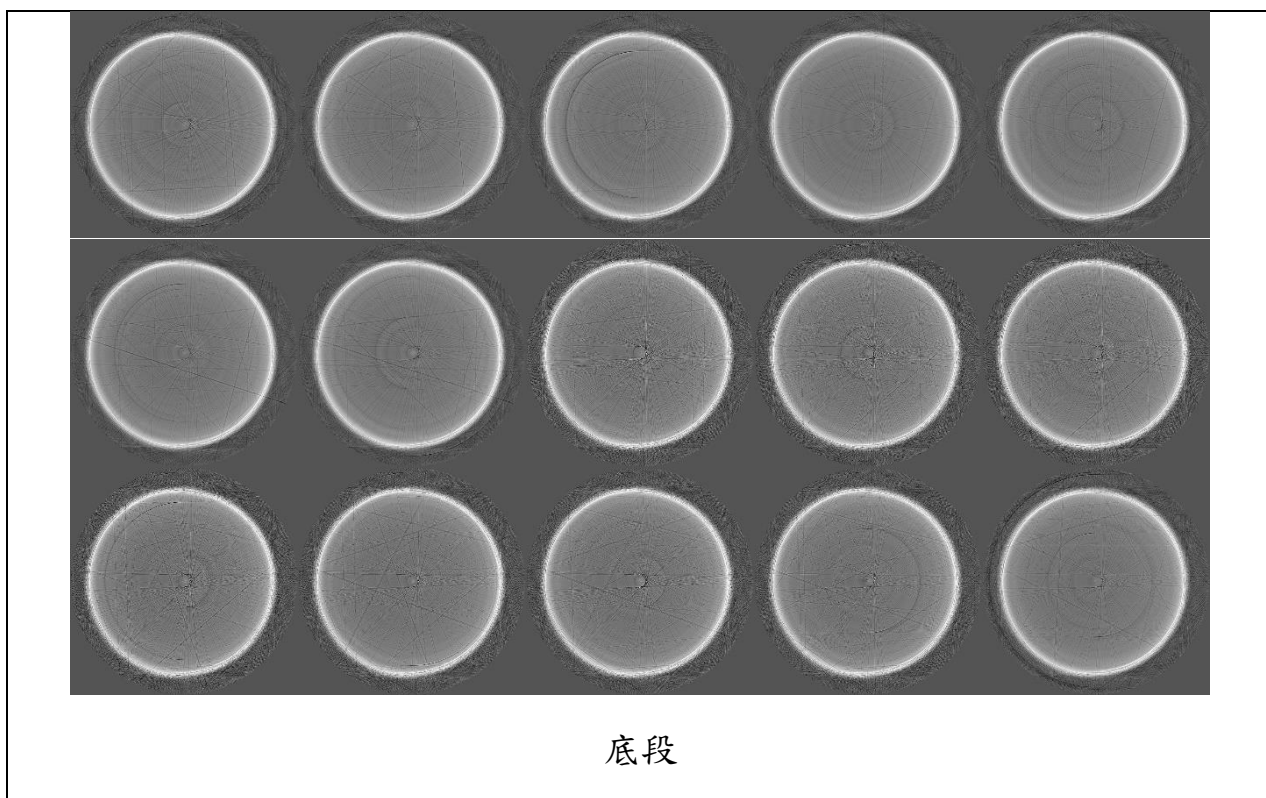
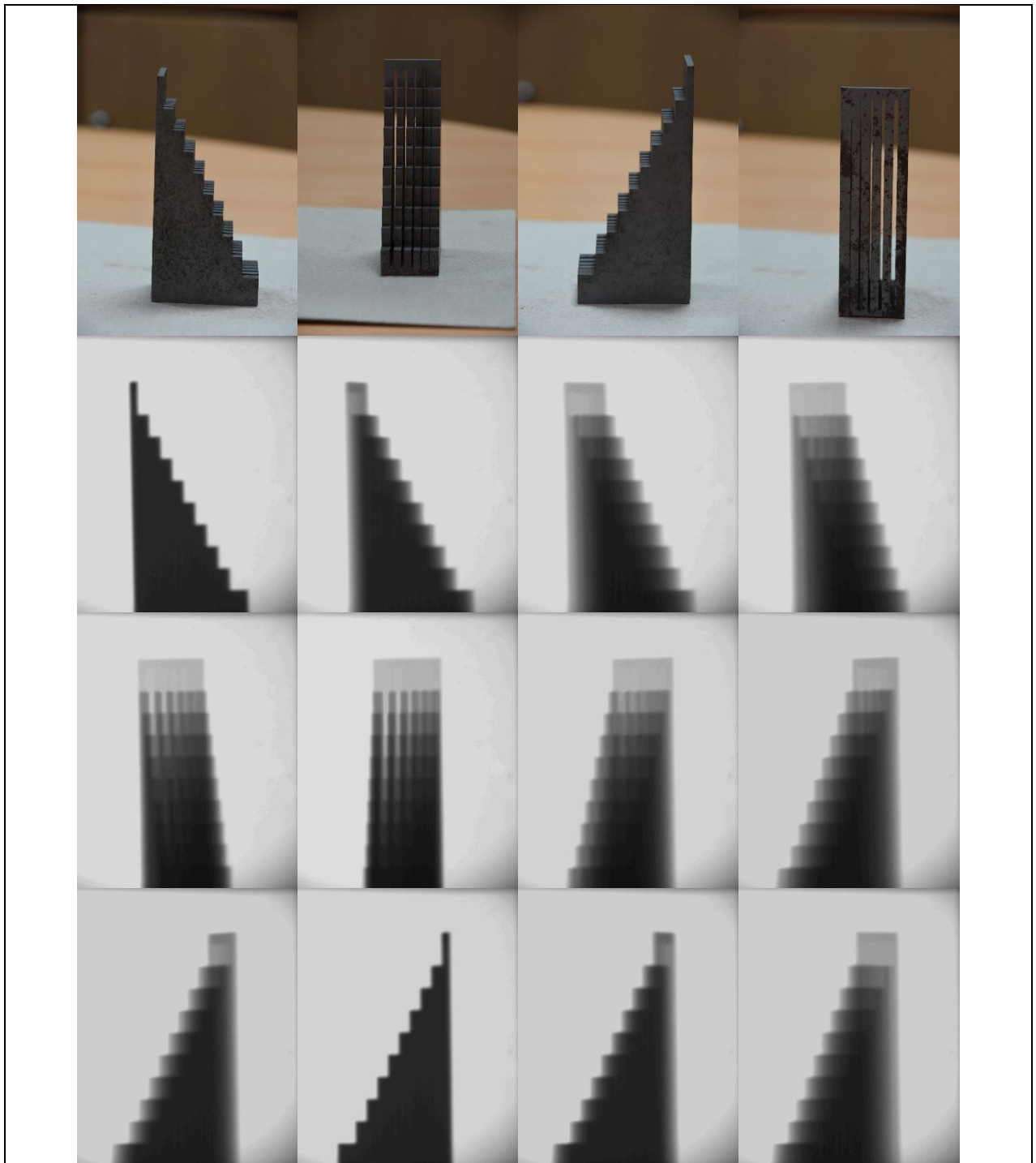
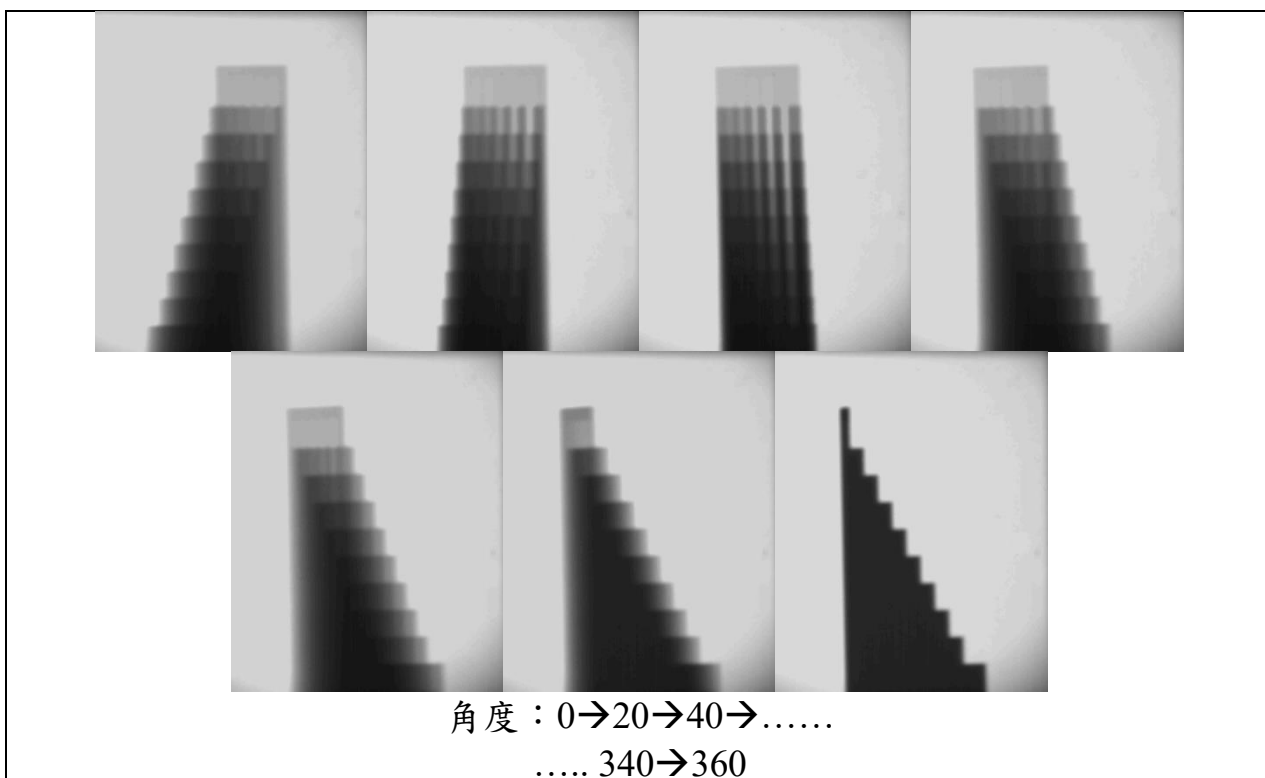


圖 5. WD-40 油罐之中子電腦斷層分析





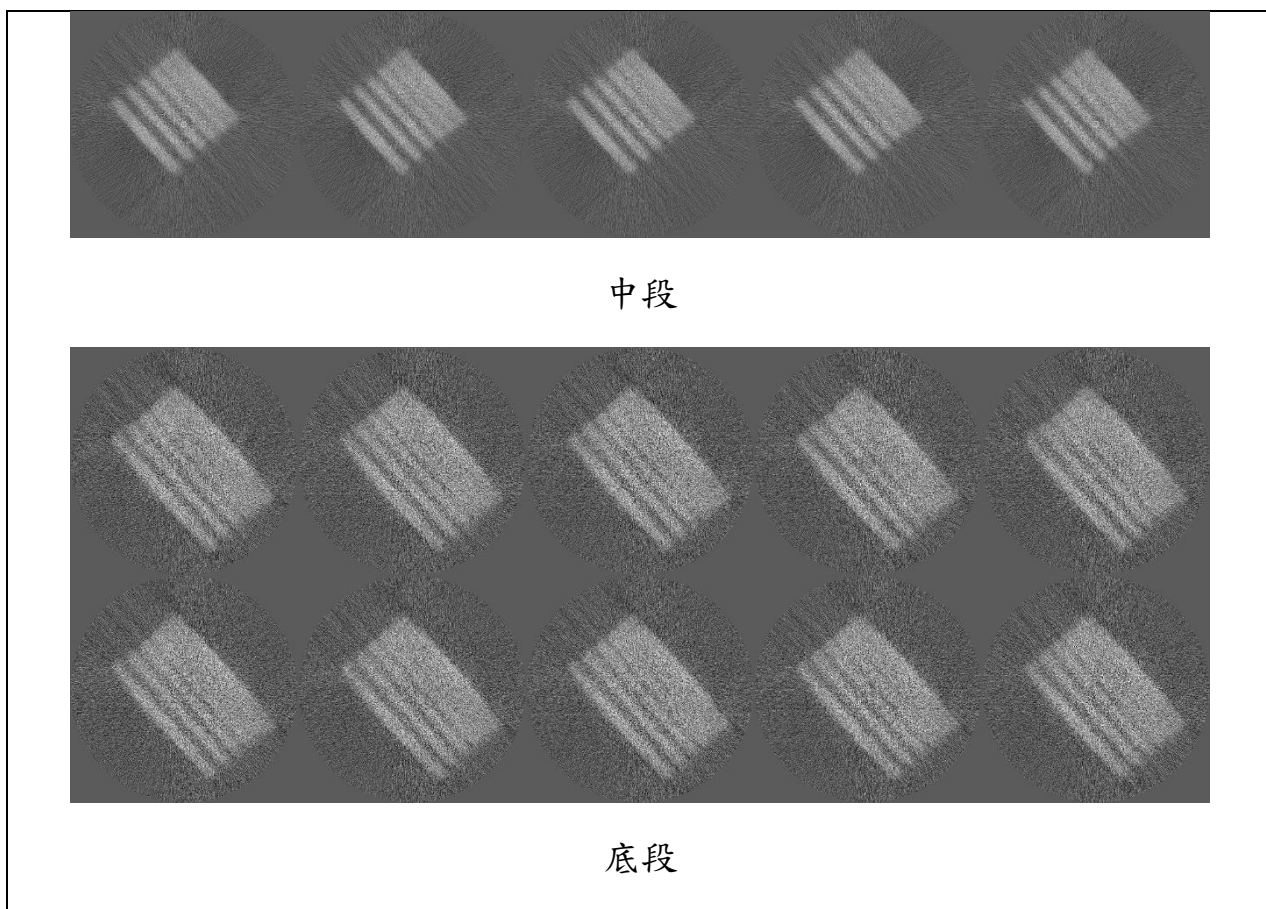


圖 6. Ladder 金屬梯子之中子電腦斷層分析

二、結論

本研究經執行，主要有以下主要結論：

1. 已藉THOR-W1，建立台灣首度的中子電腦斷層影像(NCT)分析的程序，影像處理程序也已建立完成。
2. 以WD-40油罐較簡易物件的斷層初步分析，再進一步開發自動擷取影像系統，並應用其分析程序與方法，進行物件的中子電腦斷層影像分析與探討，可提供國內非破壞結構研究團隊一項特殊的檢測利器。

3. 中子影像掃描牽涉龐大的資料處理，中子斷層影像的後分析處理，需要做高技術性(中子物理)的影像修正，方能提升其清晰度，經本計畫的執行，已順利引進PSI開發的MuhRec中子斷層分析軟體，未來可供國內非破壞結構研究團隊，於中子斷層影像上進行深入的研究。

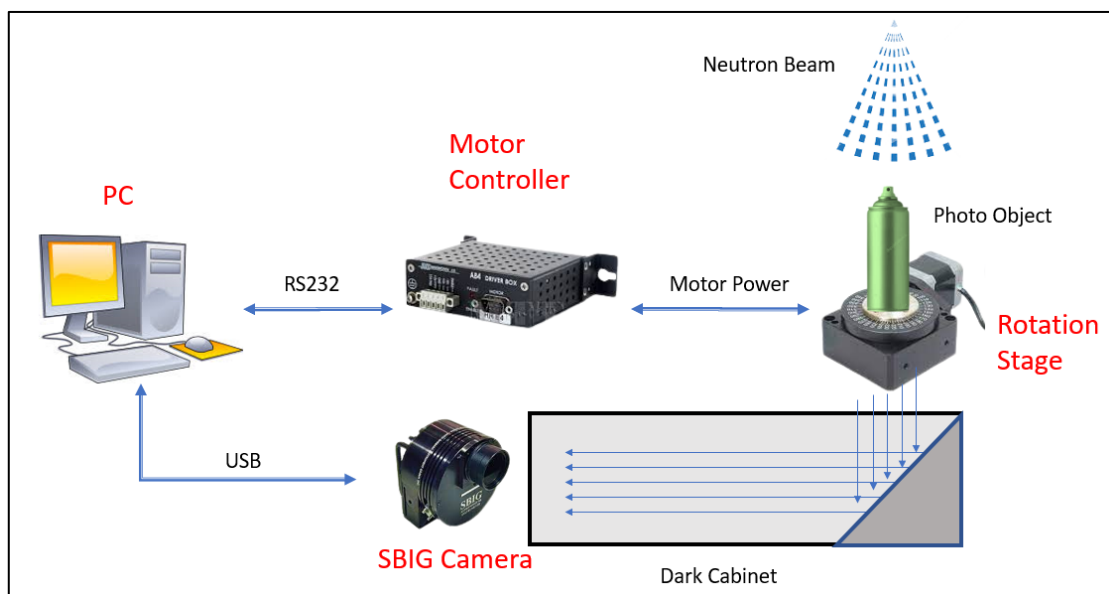
肆、參考文獻

- (1) Lehmann EH, Vontobel P, Kardjilov N, "Hydrogen distribution measurements by neutrons," *Applied Radiation and Isotopes* 61 (4): 503-509 (2004) .
- (2) Lehmann E, Vontobel P, "The use of amorphous Silicon flat panels as detector in neutron imaging," *Applied Radiation and Isotopes* 61 (4): 567-571 (2004) .
- (3) Lehmann E, Vontobel P, Estermann M, "Study of material changes of SINQ target rods after long-term exposure by neutron radiography methods," *Applied Radiation and Isotopes* 61 (4): 603-607 (2004) .
- (4) Birjukovs M, Dzelme V, Jakovics A, Thomsen K, Trtik P, "Phase boundary dynamics of bubble flow in a thick liquid metal layer under an applied magnetic field", *Physical Review Fluids*. 2020; 5(7): 061601(R).
- (5) 裴晉哲，"中子照相於直接甲醇燃料電池行為機制之研究，"國立清華大學原科中心反應器組（2005）。
- (6) 裴晉哲，"中子照相原理與應用發展，"國立清華大學原科中心反應器組（2005）。
- (7) 陳忠生，"微功率反應器中子照相設施及應用，"核能研究所（2005）。
- (8) <https://www.psi.ch/en/niag>

- (9) Kaestner, A. P.; Kis, Z.; Radebe, M. J.; Mannes, D.; Hovind, J.; Grunzweig, C.; Kardjilov, N.; Lehmann, E. H., “Samples to determine the resolution of neutron radiography and tomography” *Neutron Imaging for Applications in Industry and Science*, 88, 258-265(2017).
- (10) A.P. Kaestner “MuhRec – a new tomography reconstructor” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, 651 (2011), pp. 150-160, 10.1016/j.nima.2011.01.129.
- (11) B. Schillinger, E. Lehmann, and P. Vontobel, “3D neutron computed tomography: requirements and applications,” *Physica B: Condensed Matter* 276 (2000) 59-62. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(99\)01254-5](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(99)01254-5).
- (12) B. Schillinger and A.E. Craft, “A freeware path to neutron computed tomography,” *Physics Procedia* 88 (2017) 348-353. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.06.047>.

附錄一：THOR 中子電腦斷層 NCT 儀控系統流程說明書

1. Hardware Layout



1) PC :

- Send command to motor controller for object stage rotation
- Trigger SBIG camera to snap a photo, then receive the image and save it in PC storage

2) Motor Controller :

- Get command from PC to rotate the object stage
- Connect with PC by RS232 com port

產品組裝



3) Rotation Stage :

- Carry the object and rotate

- Connect to the stepping motor driver in motor controller

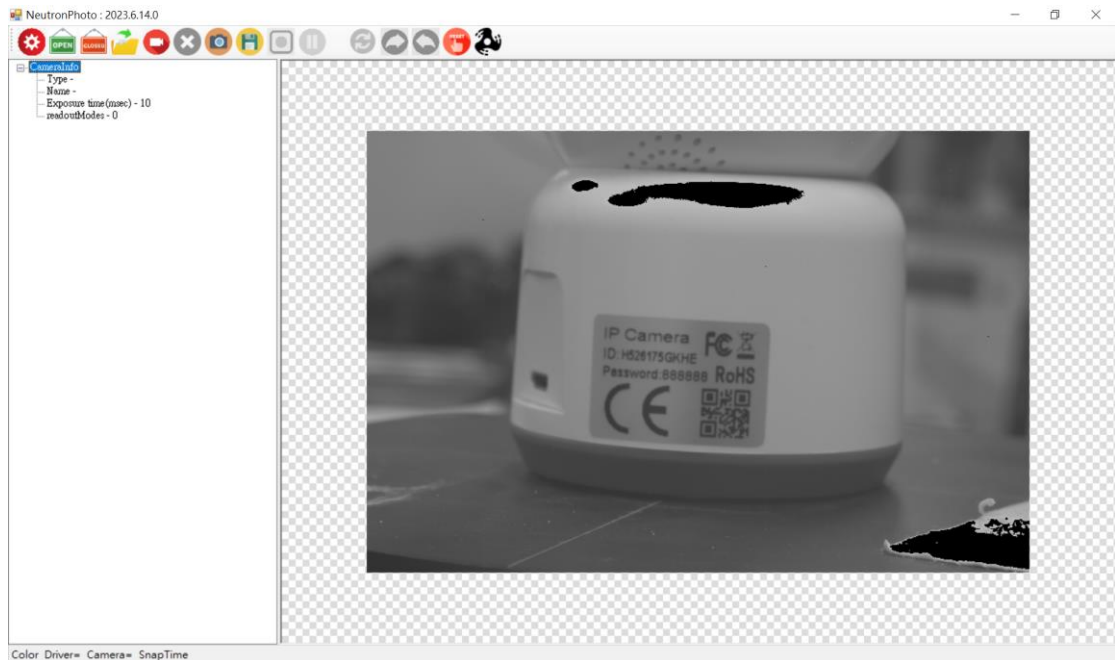
4) SBIG Camera

- Take a photo then send image back to PC
- Connect to PC by USB cable

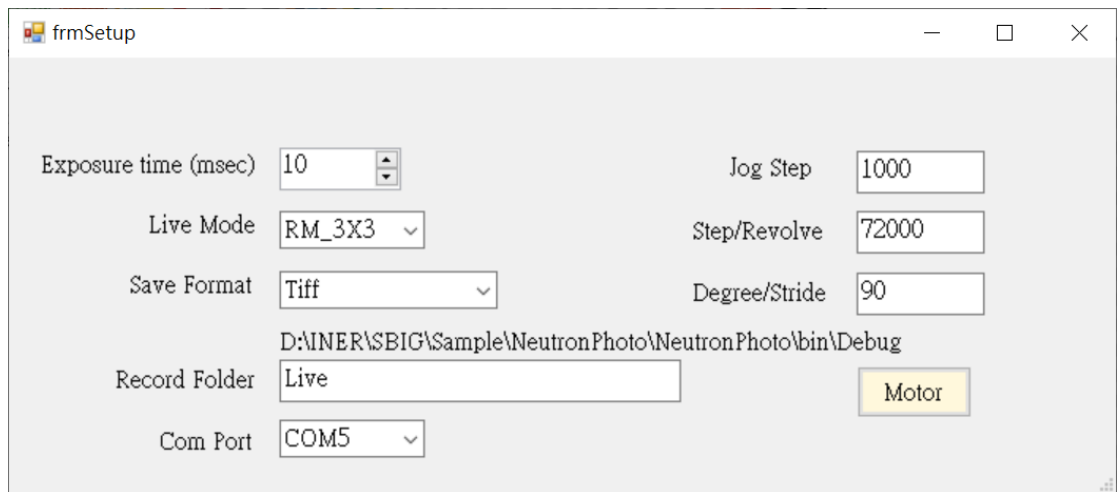


2. Software Functions

Using Visual Studio 2017 C# to develop control software



1) System Configuration setup



The screenshot shows a Windows-style dialog box titled "frmSetup". It contains several configuration fields and a button:

- Exposure time (msec):** A numeric input field with the value "10" and a small up/down arrow icon.
- Live Mode:** A dropdown menu showing "RM_3X3".
- Save Format:** A dropdown menu showing "Tiff".
- Record Folder:** A text input field containing the path "D:\MINER\SBIG\Sample\NeutronPhoto\NeutronPhoto\bin\Debug".
- Com Port:** A dropdown menu showing "COM5".
- Jog Step:** A numeric input field with the value "1000".
- Step/Revolve:** A numeric input field with the value "72000".
- Degree/Stride:** A numeric input field with the value "90".
- Motor:** A yellow button labeled "Motor".

- Setup exposure time(msec)
- Live Mode (Image quality) for live
- Save file format
- Save file folder
- Motor controller COM port
- Motor Jog step
- Step per revolve = 7200
- Degree per stride for snap image

2) Connect/Disconnect camera

3) Load/Save image

4) Live

5) Snap one shot

6) Initialize rotation stage

7) Stage Jog & Rotate

8) Integrated snapping flow

3. Logic Flow of THOR NCT Image Capture System

