

出國報告（出國類別：訪問）

日本 SHI-ATEX 加速器中子源參訪

服務機關： 核能研究所
姓名職稱： 杜定賢 副研究員
派赴國家/地區： 日本愛媛縣西條市
出國期間： 108年12月16日~108年12月18日
報告日期： 109年2月11日

摘 要

此次出國目的是參訪日本住友 ATEX 株式會社(SHI-ATEX)之加速器中子源及中子照相設備，以吸取中子相關經驗和技術。SHI-ATEX 公司位於日本愛媛縣西條市，本次參訪為期一天。參訪活動包括簡報討論和設施參觀，參觀設備包括加速器、中子產生靶站、中子減速器(Moderator)、中子反射體(Reflector)以及中子照相設備等。核研所加速器中子源預定用 24-30 MeV 質子照射鈹靶以產生中子以執行中子照射應用。SHI-ATEX 中子源設備適可讓我們參考設計製作，此次參訪所吸收學習知識有助於未來規劃核研所迴旋加速器中子源設施。本次參訪為私人公司，內容涉及該公司著作權部份不便撰寫於此份報告中。建議事項包括(1)及早建立加速器中子源程式模擬能力，(2)派員參訪國外其它加速中子源設施，(3)前往清大反應器實習中子照相技術及其它中子應用技術。

目 次

摘 要

(頁碼)

一、目 的.....	1
(一) 參訪目的.....	1
(二) SHI-ATEX 公司簡介.....	1
(三) 核研所加速器中子源初步規劃.....	2
二、過 程.....	5
(一) 行程.....	5
(二) 參訪經過.....	5
1. 簡報與討論.....	5
2. 設施參觀.....	10
三、心 得.....	20
(一) 中子特性及中子源重要性.....	20
1. 中子特性.....	20
2. 重要性.....	20
(二) 加速器中子源設備.....	20
1. 照射靶.....	21
2. 中子減速器.....	22

3. 中子反射體.....	23
4. 中子照相.....	24
(三) 日本中子源.....	24
(四) SWOT 分析.....	25
四、建議事項.....	43
五、參考文獻.....	44

一、目的

(一) 參訪目的

核能研究所(以下簡稱核研所)同位素應用組副研究員杜定賢於 108 年 12 月 16 日至 108 年 12 月 18 日期間奉派前往日本參訪加速器中子源設施。此次出國目的是參訪日本愛媛縣西條市住友 ATEX 株式會社(SHI-ATEX)之加速器照射服務項目和中子源及相關應用設備，主要擬參訪之中子源設備包括產生中子之照射靶、中子減速器、中子反射體以及中子照相裝置。期能藉由此次參訪中吸取 SHI-ATEX 公司中子相關經驗技術，以便能更完整規劃核研所迴旋加速器中子源設施計畫，以能建立中子源設備提供中子讓核研所重啟中子應用研究。更重要的是可提供國內對中子研究有興趣的單位使用，以擴展核研所迴旋加速器輻射照射應用範圍，除能提供質子照射服務，亦能提供中子照射服務。

(二) SHI-ATEX 公司簡介

SHI-ATEX 有限公司於 2017 年由住友檢驗有限公司和日本電子輻照服務有限公司合併而成，其中住友檢驗有限公司創立於 1979 年，以非破壞檢測、材料檢測、各種檢查為主，業務包括檢查服務和輻射應用。日本電子輻照服務有限公司始於 1989 年，主要業務為電子輻照服務。因此，SHI-ATEX 公司業務主要包括輻射利用事業和檢查診斷業務，其中輻射利用事業包含離子束利用服務和電子束服務，而離子束利用服務中的加速器利用技術則含有中子照相服務。SHI-ATEX 之中子源是屬於加速器中子源，是利用 18 MeV 質子束撞擊靶材而產生中子。核研所迴旋加速器亦擬採用同樣方法來產生中子源，而且產生中子源的規格與 SHI-ATEX 相近，故前往觀摩學習。

日本中子源規模從大到小皆有且數量不少，中子源類型包括反應器中子源(JRR-3, KUR)、散裂中子源(J-PARC)及加速器中子源(RANS, KUANS, HUNS, SHI-ATEX, iBNCT 等)，其中加速器中子源數量最多，日本加速器中子源分佈請見圖 1[1]。日本中子源除了傳統的中子散射、中子繞射、中子照相應用外，也致力於發展醫療應用，尤其用於中子捕獲治療(BNCT)。中子照

相是中子源的基本應用，圖 2[2]中顯示日本兼具中子照相用途的中子源分佈，圖中的數值是指該中子源位於樣品處的熱中子通率。本次前往參訪之 SHI-ATEX 中子源亦有中子照相設備，參看中子照相設備也是本次前往參訪的目的之一。SHI-ATEX 中子源是利用 18 MeV, 20 μ A 質子束撞擊鈹靶而產生中子，中子經減速後在樣品處產生的熱中子通率約為 2×10^5 n/sec/cm²。

(三) 核研所加速器中子源初步規劃

核研所 30 MeV 質子迴旋加速器建於民國 82 年，主要用途是醫用放射性同位素的生產研製和一般質子照射研究。為擴展核研所迴旋加速器質子照射應用範圍，擬於 110 年成立計畫建立加速器中子源，期能讓核研所有一個中子源設備以重啟中子應用研究並提供所外有興趣單位使用。經評估國內對中子應用可能的需求以及核研所現有加速器設備場地限制，擬建立的中子應用項目初步預定為熱中子照相和軟錯誤率測試(Soft error rates)。

核研所加速器中子源預定用 24-30 MeV 質子照射鈹靶以產生中子，並經由減速器將中子減速為熱中子，因此所需裝置包括靶站、中子減速器(neutron moderator)、中子反射體(neutron reflector)、準直器、中子照射裝置等。SHI-ATEX 中子源都配備有這些裝置，因此適可讓我們參考設計製作。

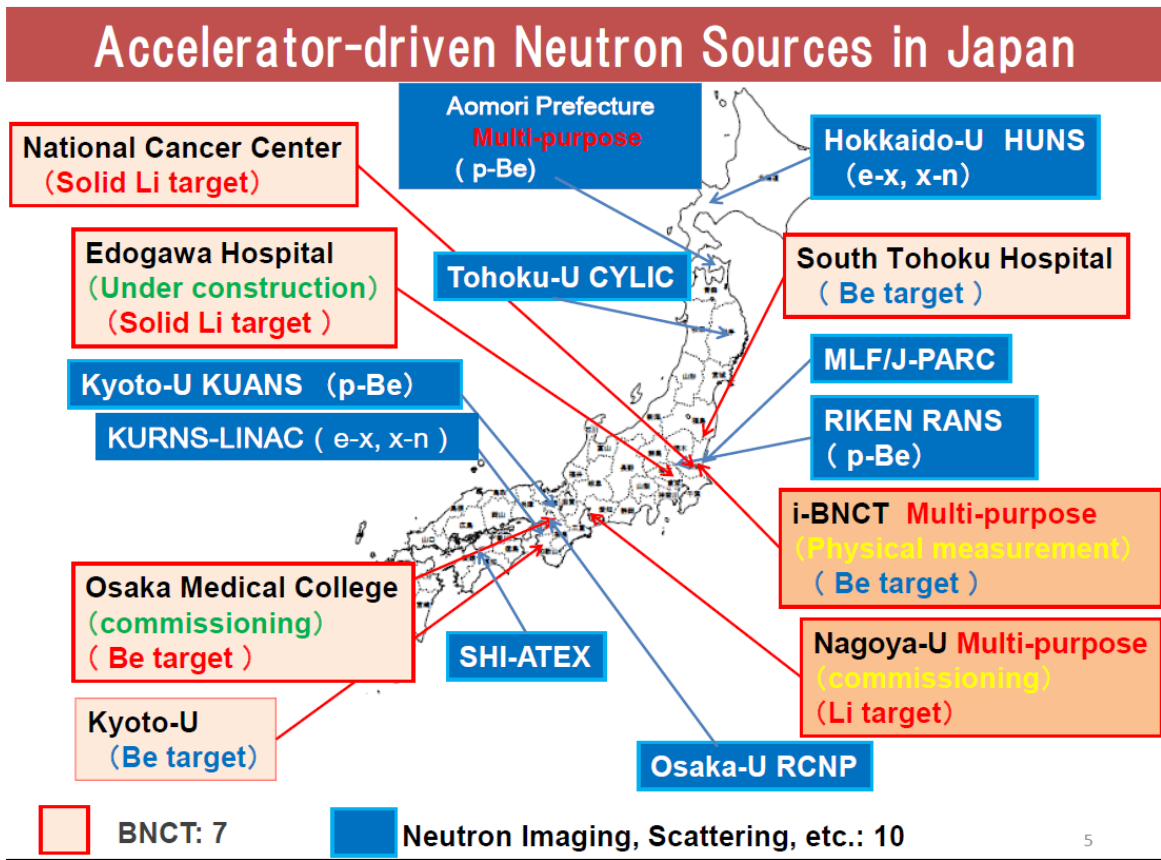


圖 1 日本中子源分佈。

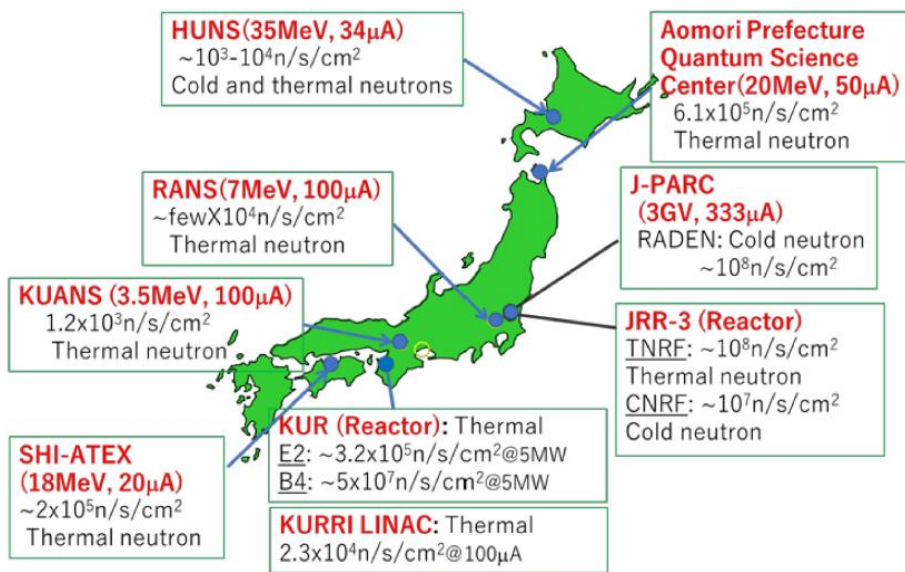


圖 2 日本兼具照相用途的中子源分佈。圖中顯示的數值是指樣品處的熱中子通率。

二、過 程

(一) 行程

核研所同位素應用組副研究員杜定賢此次奉派前往日本愛媛縣西條市參訪 SHI-ATEX 中子源的期間是 108 年 12 月 16 日至 108 年 12 月 18 日，共為期 3 天。參訪 SHI-ATEX 公司加速器中子源設施主要是在 12 月 17 日，接待人員為醫療先端機器統括部營業部之 Akio Kaku 先生，行程及工作內容請參考表一。

表一 出國人員行程表

行 程					公差地點		工 作 內 容
月	日	星期	地 點		國名	地 名	
			出 發	抵 達			
12	16	一	桃園	愛媛縣西條市	日本	愛媛縣西條市 SHI-ATEX	去程
12	17	二	愛媛縣西條市	愛媛縣西條市	日本	愛媛縣西條市 SHI-ATEX	參訪加速器中子源設施
12	18	三	愛媛縣西條市	桃園	日本	愛媛縣西條市 SHI-ATEX	回程

(二) 參訪經過

參訪 SHI-ATEX 公司過程分兩部份，簡報與討論以及設施參觀，分述如下。

1. 簡報與討論

簡報是由 SHI-ATEX 公司人員提報，簡報題目：Neutron Business at SHI-ATEX，提報人：Ryuji Uemoto (開發部主任技師)，另外參加討論的 SHI-ATEX 人員計有：Koichi Oikawa (醫療先端機器統括部營業部科長), Akio

Kaku (醫療先端機器統括部營業部), Katsuhiko Saito (醫療先端機器統括部設計部科長), Tomoya Iwata (醫療先端機器統括部設計部主任技師)。簡報與討論的主要內容敘述如後：

(1) SHI-ATEX 公司提供服務內容主要為

- 半導體離子束和電子束照射 (Ion & Electron beam irradiation for semiconductor)。
- 中子照相測試 (Neutron Radiography Testing (NRT))。
- 引擎活化磨耗分析 (Radionuclide Technique in Mechanical-engineering (RTM))。
- 醫療器材電子束滅菌 (Electron Beam Sterilization for Medical Equipment)。

(2) 主要加速器設備包括

- 4 台迴旋加速器 (廠牌型號：SHI, CYPRIS-370(第一台)和 CYPRIS-370V (第二、三、四台))，規格請見表二。
- 1 台范氏加速器(High Voltage Engineering, AN2500 Van de Graaff type electrostatic accelerator)。
- 2 台電子加速器(SHI, Dynamitron，分別位於大阪泉大津市和茨城縣筑波市)。
- 2018 年增設一台用於中子捕獲治療(BNCT)相關研究和 F-18 生產之迴旋加速器(18 MeV, 200 μ A)，預定 2020 年啟用。

(3) 中子產生設備包括

- 加速器中子源實驗室平面示意圖請參考圖 3，中子源是利用第一台迴旋加速器照射鈹靶產生，照射條件是質子能量 18 MeV，射束電流 20 μ A，位於圖中右上角。
- 鈹(Be-9)靶站，利用 18 MeV 質子撞擊鈹靶，經由核反應 ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ 產生中子，這些照射產生的中子能量分佈有一範圍，多數屬於快中子。鈹靶因質子撞擊而接受能量($360\text{ W} = 18\text{ MeV} \times 20\ \mu\text{A}$)而產生熱量，須利用冷卻水散熱。鈹靶厚度稍小於質子入射深度，入射深度決定於入射能量。某一能量質子入射特定材料的深度範圍(range)可利用 SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter)軟體計算而得。

- 中子減速器(neutron moderator)和反射體(neutron reflector)，不同中子能量有不同應用範圍，SHI-ATEX 主要中子應用為熱中子照相和快中子軟錯誤率測試。照射產生的快中子可直接使用於軟錯誤率測試，而中子照相所需熱中子則需先使快中子減速而得。中子反射體則可將熱中子反射，減少熱中子外漏損耗。中子減速器材質為高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)，中子減速器包住整個靶體，快中子經過適當厚度高密度聚乙烯會減速為熱中子。中子反射體亦為高密度聚乙烯材質，與中子減速器形成一體而包圍住整個減速器，減速器和反射體整個為一正方體，邊長 70 公分。中子產生設備示意圖請見圖 4，內含加速器、靶體、中子減速器、反射體和中子照相裝置。中子減速器構造示意圖請見圖 5(a)，其實體照片請見圖 6。在 SHI-ATEX 加速器中子源的設計中，中子減速器可移開，移開時在質子射束前進方向可引出快中子，請見圖 5(b)。圖 5(a)和(b)節取自 SHI-ATEX 加速器中子源貼牆海報。

(4) 中子照相設備

- 鈹(Bi)加馬濾板，用來濾掉加馬射線同時不易阻擋熱中子的通過，位於準直器(collimator)前端(請見圖 5 和圖 6)。
- 準直器，用於使中子束有一定的平行度，其射束平行度定義為 $L/D = 44$ ，L 為準直器入口端到樣品距離，D 為準直器中子入口端開口大小。鈹加馬濾板到照相樣品位置為 210 公分，中子照相樣品範圍為 35 cm × 43 cm。準直器內壁材質為高密度聚乙烯內再添加 10% 硼(HDPE+B 10%)，形狀為中空立體梯形。準直器內壁材質添加硼的目的是用來吸收熱中子，將偏離的熱中子吸收掉以保持照相用熱中子的平行度。
- 成像裝置，包括樣品升降台、底片(film)或 IP(Imaging Plate)、轉換屏(converter)，轉換屏材質為釷(Gd)。Gd 吸收熱中子的反應截面很大，吸收熱中子後會放出加馬射線和內轉換電子(conversion electrons)，這些加馬射線和內轉換電子可與底片或 IP 作用而成像。中子照相樣品處熱中子通率為 5×10^5 n/cm²/s，底片成像時間為 120 分鐘，IP 成像時間為 12 分鐘，但底片成像解析度較高，IP 成像解析度較差。中子成像裝置示意圖請見圖 7。
- 中子射束規格和品質，SHI-ATEX 中子照相設備規格列於表三，其中有

一項參數鏷比值(Cadmium ratio = 3.5)，鏷比值可用來粗略判定準直器內的中子束熱中子的比例，Cadmium ratio (Cd ratio)定義為 $(A_{th}+A_s)/A_s$ ，其中 $A_{th}+A_s$ 代表中子偵檢器沒有包覆鏷的反應， A_s 代表中子偵檢器包覆鏷的反應， ^{113}Cd 對於低於 0.5 eV 的中子有很大的吸收機率，因此鏷比值大表示熱中子含量較多。除了考量 L/D 和 Cd ratio 外，中子射束還會考量其它參數，請見表四。按 ASTM 分級，SHI-ATEX 中子照相射束品質滿足第三級。圖 8 顯示 SHI-ATEX 中子照相實例。

表二 SHI-ATEX 加速器規格表

No.1: CYPRIS Type-370, Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

Ion	Energy (MeV)	Max. Beam current (μA)
Proton($^1\text{H}^+$)	18	50
Proton($^1\text{H}^+$)	5	3
Deuteron($^2\text{H}^+$)	10	10
Helium-3($^3\text{He}^{2+}$)	24	10

No.2: CYPRIS Type-370V, Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

Ion	Energy (MeV)	Max. Beam current (μA)
Proton($^1\text{H}^+$)	18	50
Proton($^1\text{H}^+$)	8	20
Proton($^1\text{H}^+$)	4.5	10
Proton($^1\text{H}^+$)	2	5
Deuteron($^2\text{H}^+$)	9	40
Helium-3($^3\text{He}^{2+}$)	24	10
Helium-4($^4\text{He}^{2+}$)	18	5

表三 中子照相設備規格

Accelerated Particles	Proton 18MeV
Neutron Source	${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ reaction
Neutron Flux (Vertical Port)	2×10^4 n/cm ² /s/ μA
Real Neutron Intensity (Vertical Port)	4×10^5 n/cm ² /s
Cadmium ratio (Vertical Port)	3.5
L/D (Beam Parallelism)	44
Irradiation Field	350 mm \times 430 mm

表四 中子照相射束 ASTM 分級

Category	Thermal Neutron component	Scattering Neutron Component	γ -ray component	Electron Pair Creation component
I	65%	5%	3%	3%
II	60%	6%	4%	4%
III	> 55%	< 7%	< 5%	< 5%
IV	50%	8%	6%	6%
V	45%	9%	7%	7%

2. 設施參觀

設施參觀活動主要是參觀 SHI-ATEX 加速器中子源和中子照相裝置。SHI-ATEX 加速器中子源外觀照片請見圖 9，照片中可看到中子減速器和反射體及中子照相用的準直器。鈹靶被減速器包圍，無法從外觀看到，但可從圖 6 內部結構照片看到。不同面向的中子減速器和反射體外觀照片請見圖 10，最左邊照片可看到質子射束線進入中子減速器，中間照片顯示中子減速器和反射體的側面，可看到底部有連接準直器通往地下室，地下室是進行中子照相的場所。最右邊照片顯示中子減速器和反射體的後面。當要執行快中子實驗時，可將中子減速器移開，從圖 11(為參考資料照片)和圖 5(b)可看出中子減速器往上移的路徑和快中子行進的開口。圖 11 右邊圖顯示在做軟錯誤率試驗，快中子從反射體的後面引出可進行快中子照射實驗。

中子照相設備請見圖 12，左圖是樣品下降狀態，在此時可安裝或卸載樣品。右圖是樣品上升狀態，此時可進行中子照相。圖中亦顯示準直器及樣品置放檯面和底片置放檯面，底片置放檯面是放置底片(或 IP)和 Gd 轉換屏。Gd 轉換屏和 IP 實體照片請見圖 13。樣品置放檯面可垂直升降，亦可左右移動，如此可照射尺寸較大樣品。IP 完成中子照相後，IP 成像處理設備及其步驟請見圖 14，處理步驟按數字順序進行。

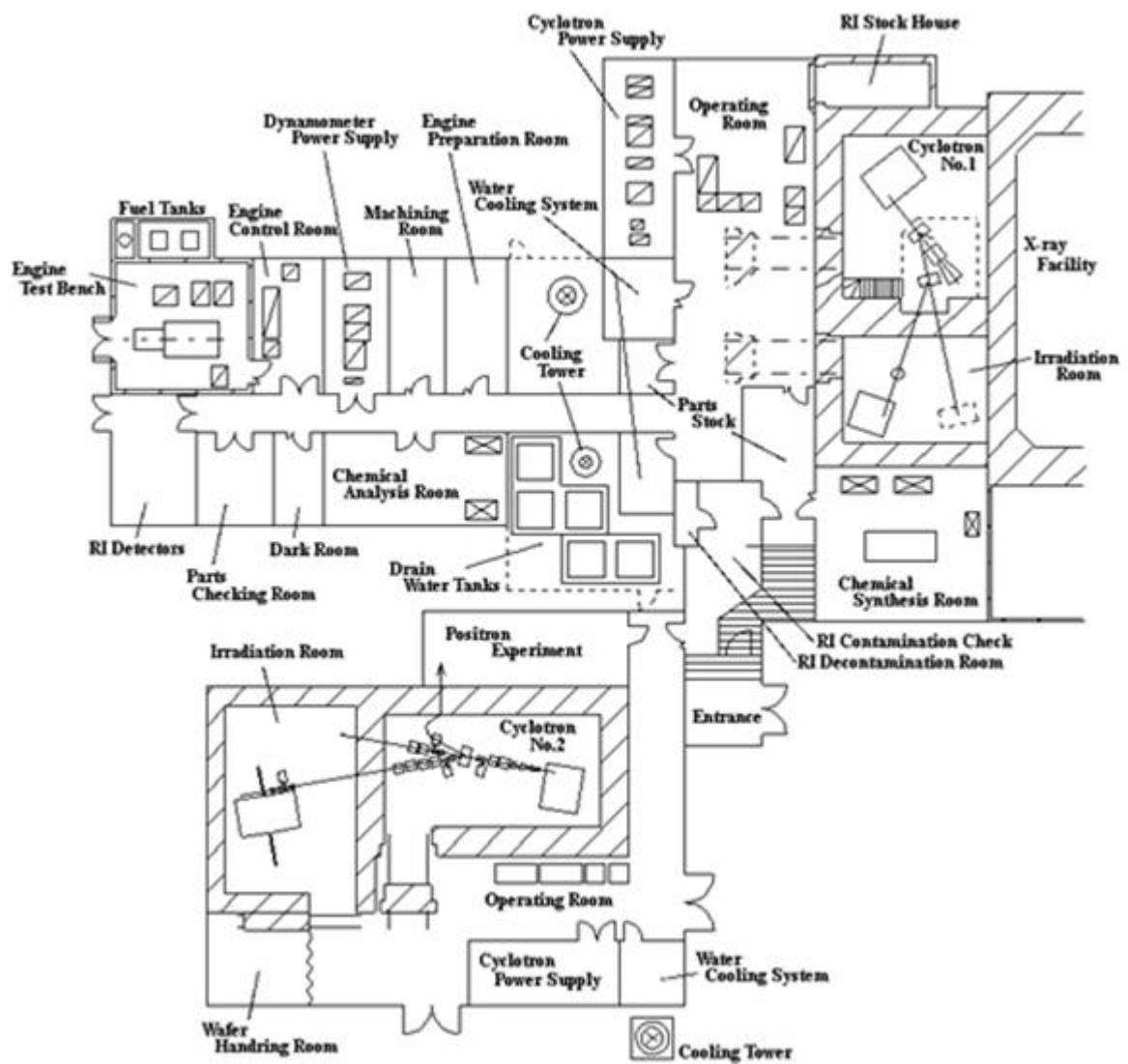


圖 3 加速器中子源實驗室平面示意圖。中子源靶室位於圖中右上角。

(From http://shiei.co.jp/english/cyclotron_cy.html)

中性子ラジオグラフィ設備模式図

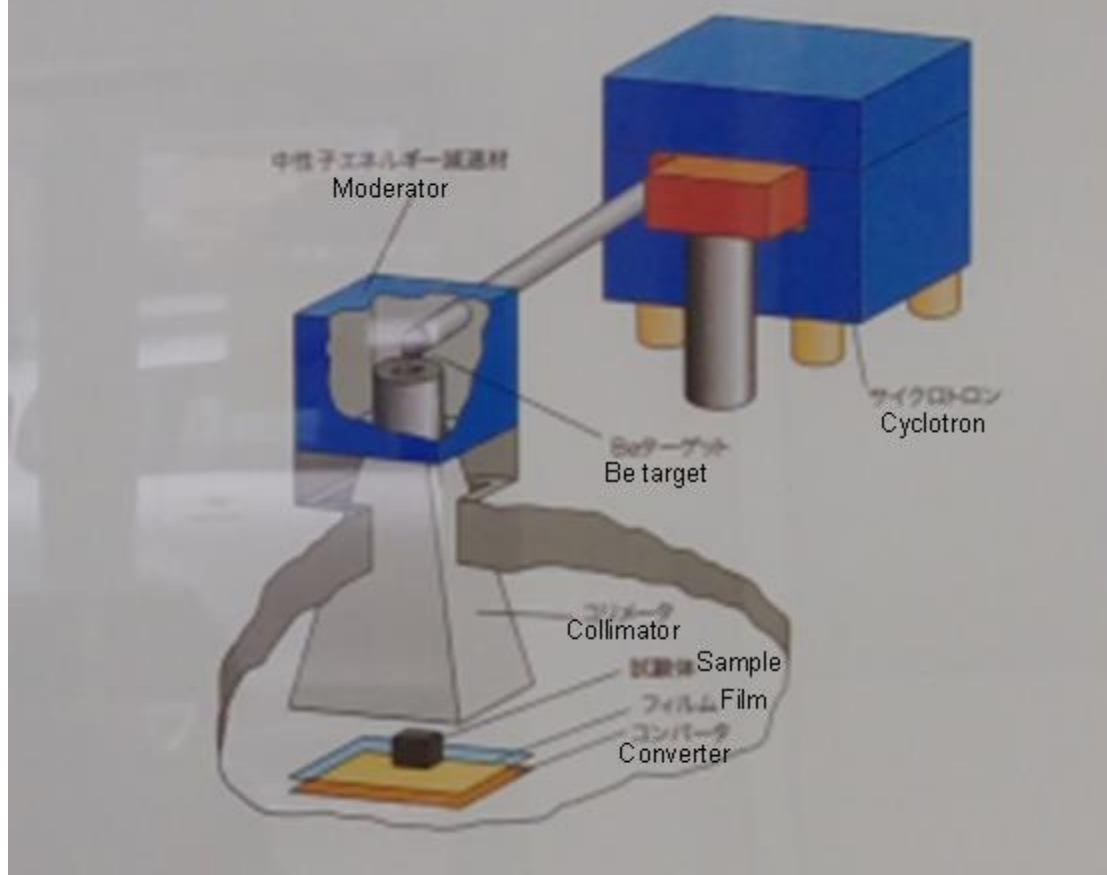


圖 4 中子設備示意圖。

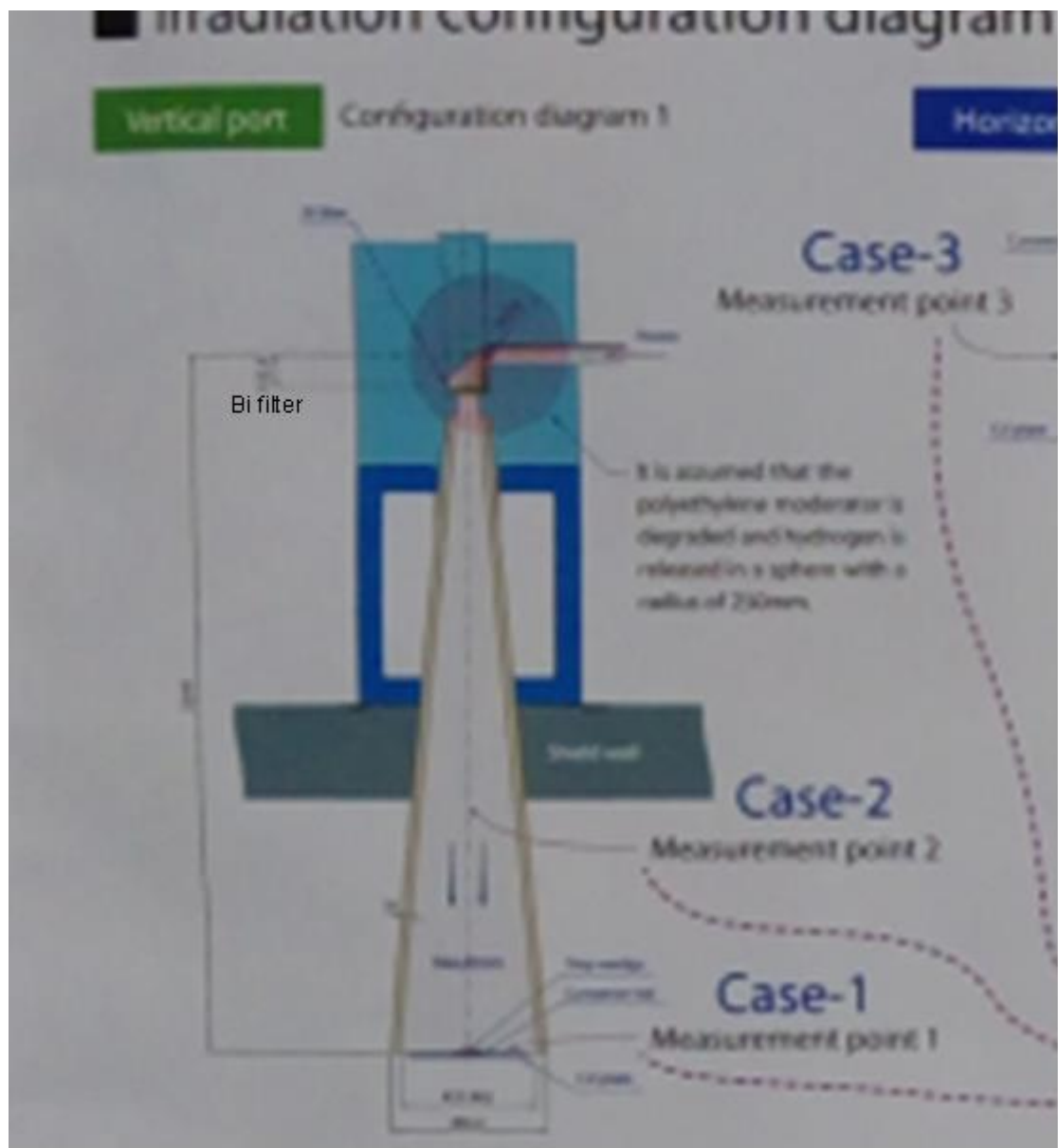


圖 5(a) 中子照相準直器和中子減速器構造示意圖。

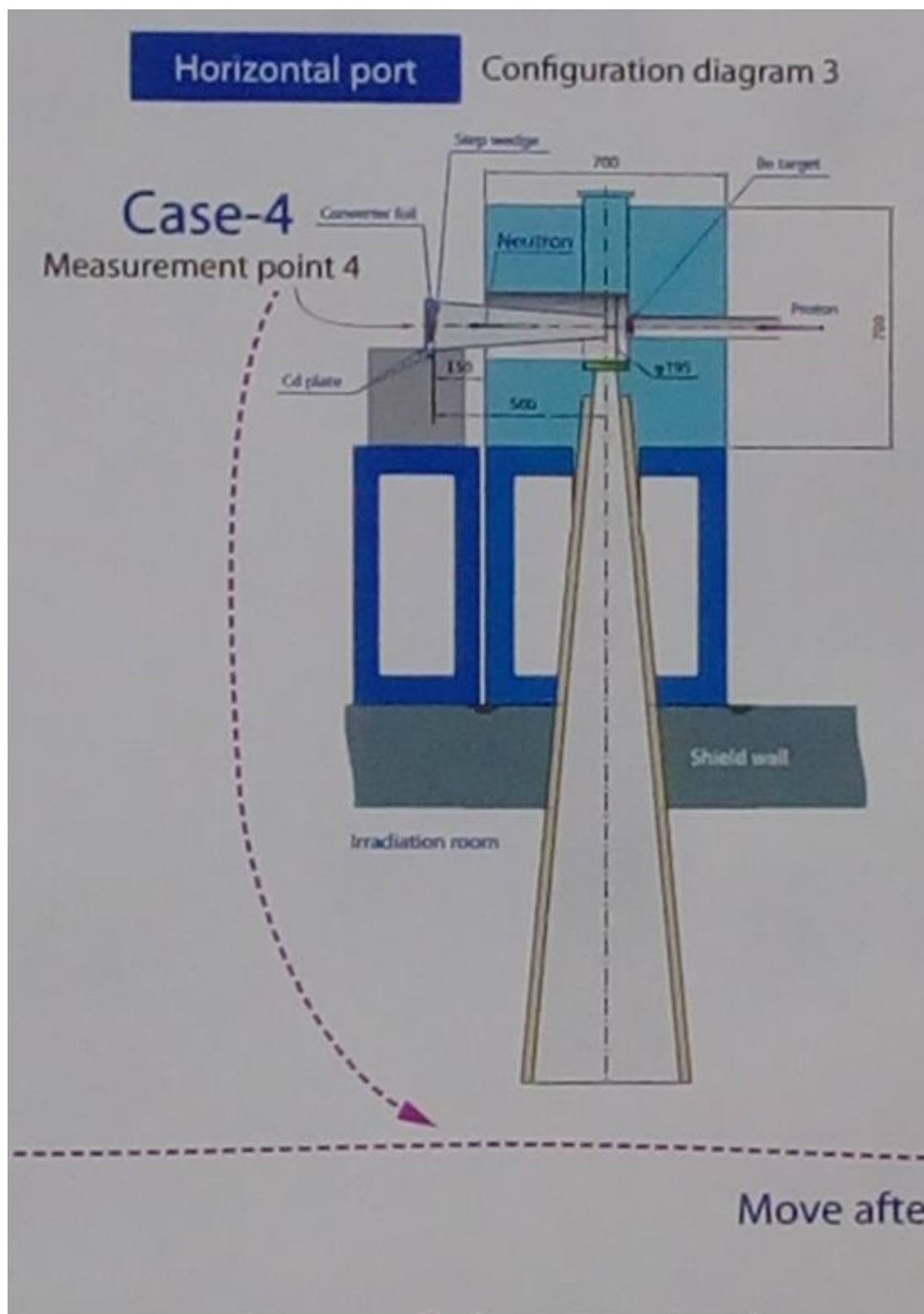


圖 5(b) 快中子引出示意圖。

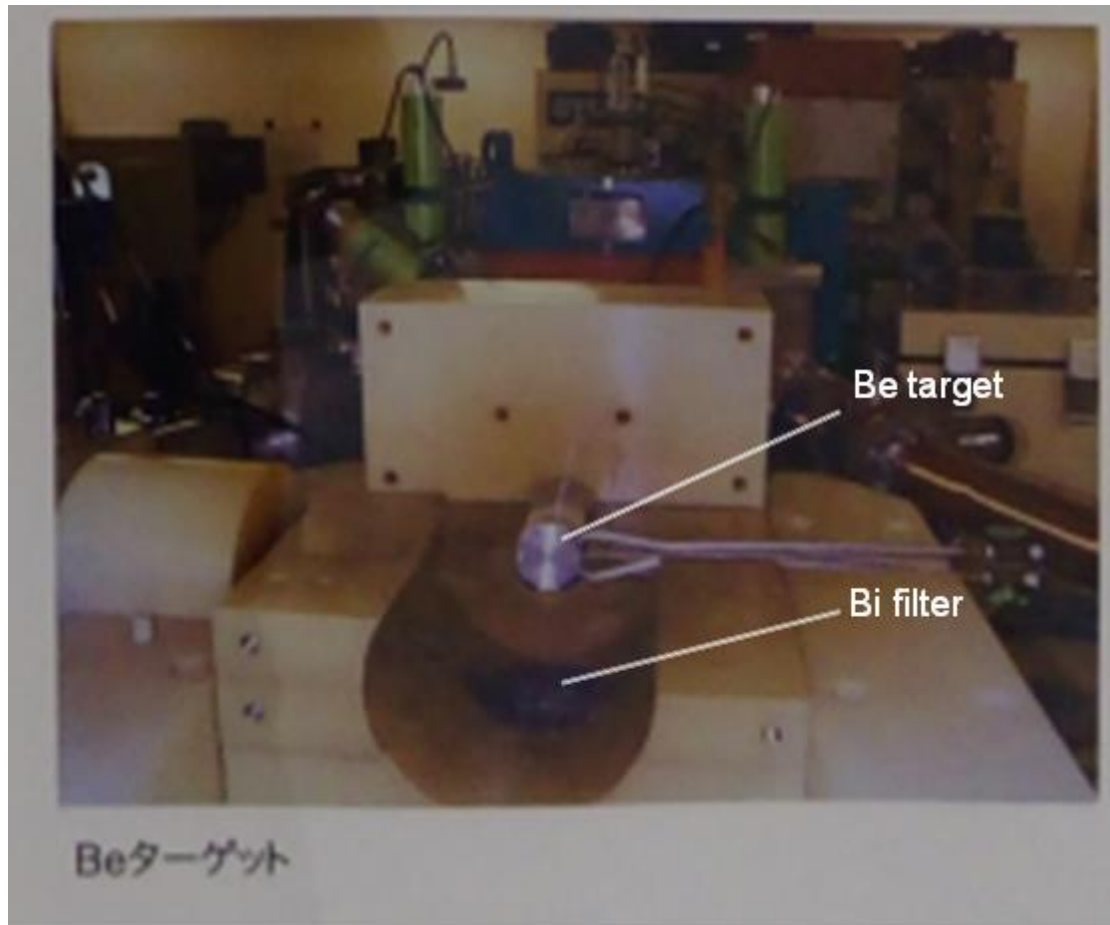


圖 6 鈹靶、中子減速器和 Bi 加馬濾板實體照片。

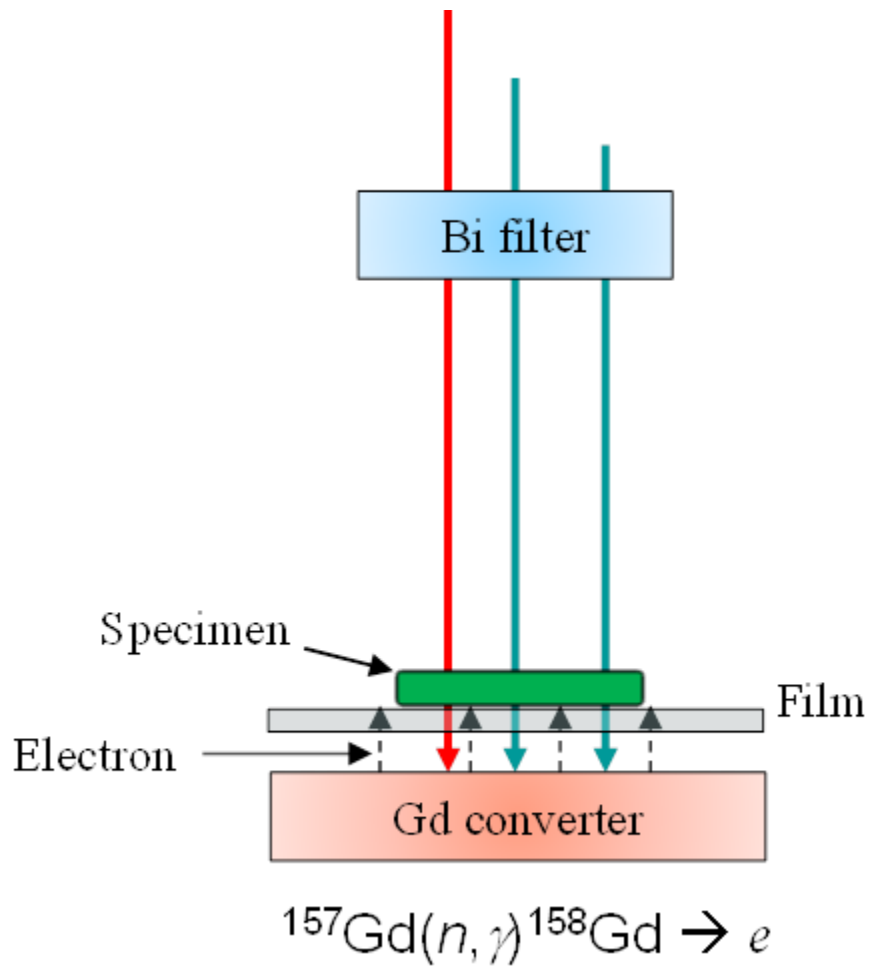


圖 7 中子成像裝置示意圖。



Observation of oil in oil lighter
(Left : none Right : Remanent)

Observation of explosive in metals
(Left : Before use Right : After use)

圖 8 SHI-ATEX 中子照相實例。



圖 9 SHI-ATEX 加速器中子源。



圖 10 中子減速器(neutron moderator)和反射體(neutron reflector)照片。



圖 11 中子減速器正後面參考資料照片(左邊)和軟錯誤率實驗參考資料照片(右邊)。



圖 12 中子照相設備。

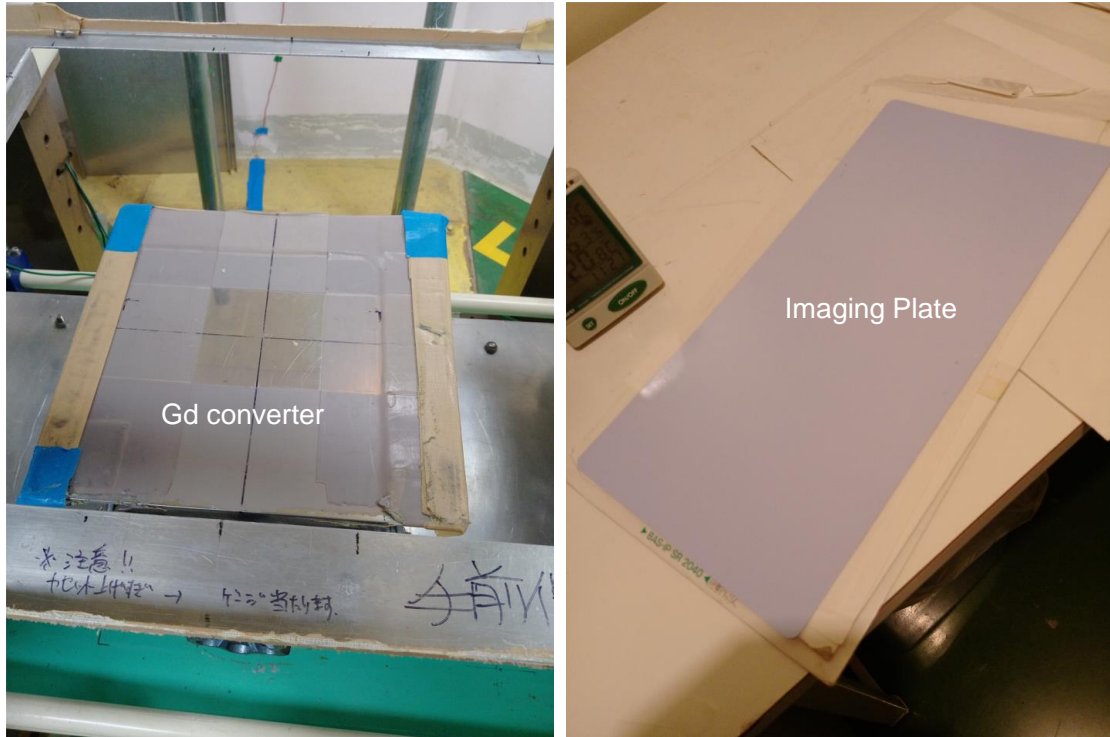


圖 13 中子照相之 Gd converter 轉換屏和 Imaging Plate。

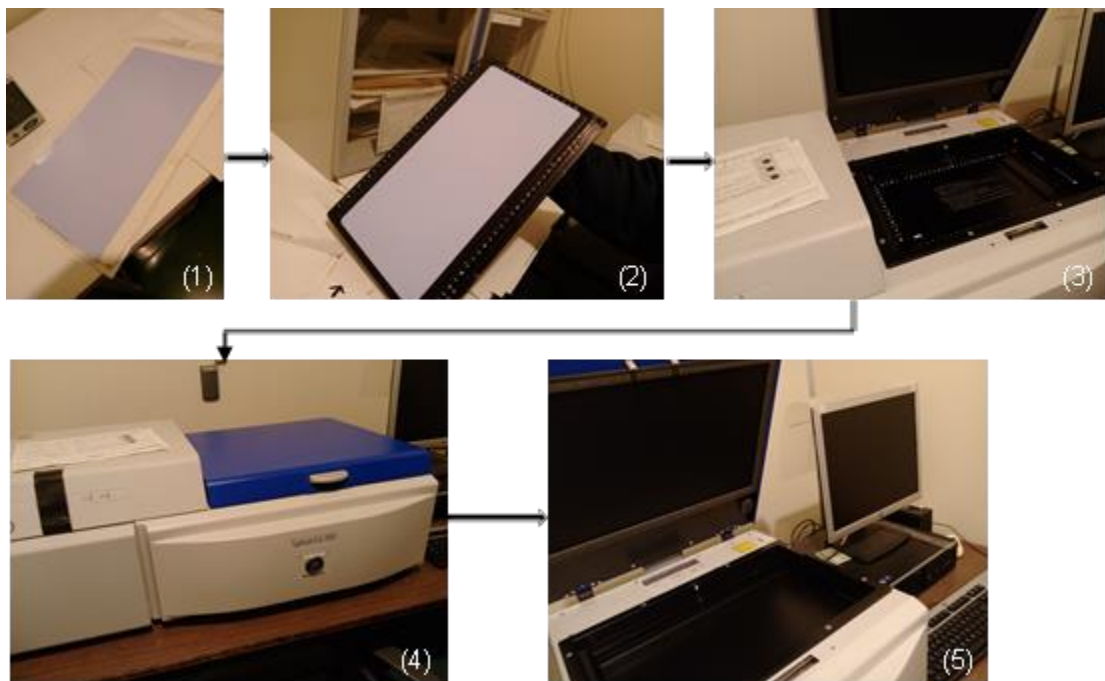


圖 14 Imaging Plate 處理設備及其步驟。

三、心得

本次出國心得是參訪日本 SHI-ATEX 加速器中子源設施和閱讀相關中子源資料綜合而得，擬以條例敘述於後。

(一) 中子特性及中子源重要性

1. 中子特性

- 同步輻射光和中子是兩把探索微結構的利器。國內有同步輻射光源，但缺少中子源，無法完整探索物質的微結構。
- 同步輻射光主要與原子外圍電子作用，外圍電子愈多，作用愈強，看得愈清晰，適於探測較重的元素。
- 中子是與原子核作用，中子被輕原子散射的機率並不亞於被重原子散射的機率，因而能清晰看到輕原子的存在。X-ray 和中子散射反應截面比較圖請見圖 15。
- 同步輻射光和中子在探索微結構上有互補作用。

2. 重要性

- 中子應用範圍廣泛，從基礎科學到農、工業、醫學、能源、國防等皆有其應用實例。應用技術包括中子散射、中子繞射、中子磁偶極矩等；檢測尺度可從原子間隔到公分以上；應用項目包括考古材料、儲能材料、磁性材料、含氫材料和金屬材料等，請見圖 16。
- 加速器中子源沒有燃料棒的核廢料，對環境的影響要小得多。加速器中子源可隨時關閉，安全性較高。
- 中子源種類可區分加速器中子源、散裂中子源、反應器中子源，請見圖 17。加速器中子源適合核研所未來投入建立，小規模中子源可作為跳板做先期相關研究以重啟核研所中子應用研究並提供所外有興趣單位使用。

(二) 加速器中子源設備

加速器中子源主要設備可區分為照射靶、中子減速器、中子反射體和應用設備，初步中子應用設備擬訂為中子照相設備。靶(Target)、減速器

(Moderator)、反射體(Reflector)一般統稱為 TMR 系統。研究用反應器中有進行許多的中子應用研究，其設備中亦包括有中子減速器、反射體、射束線和應用設備，因此研究用反應器有許多可參考的內容，尤其是基本中子物理的研究。在中子減速器和中子反射體中，加速器中子源的中子行為會與反應器中的中子行為類似，因此反應器物理中建立的中子行為模式可以做參考。以下將針對照射靶、中子減速器、中子反射體和中子照相設備等做心得報告。

1. 照射靶

- 靶材質

反應器中子是經由核分裂反應產生，加速器中子源的中子是經由高能粒子撞擊靶材，經由散裂反應(spallation)或核反應來產生中子。通常大型中子源是靠散裂反應產生中子，而小型加速器則是靠核反應產生中子。核研所迴旋加速器中子源屬於小型中子源，擬採用照射鈹靶經由 ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ 核反應產生中子，此核反應的激發函數(excitation function)請見圖 18[3]。

- 靶厚度

不同厚度鈹靶經質子照射中子產率變化請見圖 19[3]，圖 19 中亦顯示質子在鈹靶內的分佈情形。質子在停止前有一個峰值(稱 Brag Peak)，在 Brag Peak 處質子會放出較多能量在材料內造成熱量，而且質子停在材料內會變成氫氣造成材料起泡。因此為避免熱量累積和起泡現象，通常會將靶厚度稍微降低讓 Brag Peak 不要在靶材內發生。

- 中子產率、能譜和角度分佈

不同中子源所產生中子能量分佈不同，核研所加速器經由初步程式模擬，利用 10 μA , 30 MeV 質子照射鈹靶(5.5 mm thick)，一個 30MeV 質子打到鈹靶的中子產率約為 3%，可產生中子平均能量 6-8 MeV，中子產率約 1.8×10^{12} n/sec，其中子能譜請見圖 20。另外，照射產生的中子其飛行方向在任何方向都有可能，如以質子行進方向為軸並訂為 0° 角，則中子的分佈會以此軸為圓形對稱，在參考文獻[3]中可看到利用 MCNP 軟體可模擬不同角度的中子能量分佈圖(請見圖 21)，該模擬顯示在 30° - 60° 之間有較多的中子量。照射產生中子屬於快中子，需要經由減速器以減速到熱中子。熱中子產率則需待中子減速器設計確定後再進行模擬。

未來如需提升中子產率，可增加質子束電流。核研所迴旋加速器質子射束電流單一射束線最高可達 400 μA ，中子產率在高電流照射下估計可達約 7×10^{14} n/sec。鈹靶如要能夠承受高電流，除了散熱能力要高，也可採用掃描式照射和斜靶照射。

2. 中子減速器

在加速器中子源中，很重要的就是中子減速器和中子反射體的設計，包括選用材質和形狀尺寸。在此之前，先了解中子的減速過程及成為熱中子後的行為模式可幫助選材與設計。中子減速目的主要是將照射產生快中子減速成為熱中子，減速方法是讓快中子與減速器中的原子做彈性碰撞，每一次碰撞都可將中子動能傳遞給被碰撞原子，直到中子動能與減速器材料的原子熱動能達到平衡。中子在碰撞過程中，除了發生彈性碰撞，也會發生中子共振反應(neutron resonance)和中子吸收反應(neutron absorption)。為達到中子有效減速，在減速過程中，希望彈性碰撞機率大，碰撞時傳遞能量大，中子吸收反應機率小。另外，中子減速器材質還需考量低活化、高熔點、高導熱率、耐腐蝕和價格等因素。

中子減速成為熱中子後，會失去原來的方向，因此熱中子沒有特定方向。中子在減速器和反射體中的運動可以用擴散運動來近似，就好像一群氣體分子進入另一群氣體中的運動[4]。熱中子的擴散運動有一擴散距離，擴散距離的定義是中子從減速變成熱中子那一點為起點，被吸收那一點為終點，起點與終點間距離為擴散距離。熱中子在不同材質內有不同擴散距離， H_2O 內擴散距離為 2.54 cm， D_2O 內擴散距離為 160 cm，Be 內擴散距離為 18.3 cm，C 內擴散距離為 53.5 cm。材質內如熱中子吸收反應截面愈大，中子擴散距離愈短。

- 材質

中子減速效果最好的是含氫材質，不同元素減速效果請見圖 22[3]，圖中第 3 列顯示中子能量從 2 MeV 降到熱中子能量所需碰撞次數，可看出中子碰撞氫原子降能效果最好，但因氫原子對中子的吸收截面積較大，會讓熱中子較易損耗。因此在考量材料選擇時，也會考慮熱中子吸收反應截面，圖 22 第 4 列和最後一列分別列出不同元素的熱中子彈性碰撞反應截面積和吸收反應截面積。加速器中子源中常用的減速材料有 C, PE, Be 等，例如日本 KUANS

所使用中子減速器材料為 PE，反射體為石墨(請見圖 23)；日本 RANS 所使用中子減速器材料為 PE，反射體為石墨(請見圖 24)；日本 NUANS 所使用中子減速器材料為 PE，反射體為碳(請見圖 25)。SHI-ATEX 加速器中子源減速器材質也是高密度 PE。

- 幾何形狀

由於從被照射靶材產生的中子是向四面八方發射，因此減速器的形狀設計須能包圍住整個靶體，而且熱中子引出的管道不要直接能看到靶體，否則引出的熱中子中會含較多量的快中子。靶材的厚度要多少始可將快中子減速到熱中子，圖 26 顯示利用 Monte-Carlo simulation 可計算不同能量中子減速到熱中子所需 PE 厚度[5]。但由照射靶產生的中子有不同的能量，因此從圖 26 不易看出適合的 PE 厚度。另一方式就是從入射質子為模擬起點，模擬不同能量質子照射靶材所產生中子經不同 PE 厚度減速後的熱中子通量[3]，模擬結果請見圖。圖中顯示，不同能量質子照射時，PE 靶厚度都在 4 公分時可獲得最大熱中子通量。但實際上，這個模擬結果只能參考，日本不同單位中子源(請見圖 23, 24, 25)所使用 PE 材質減速器厚度只有 RANS 為 4 公分，其它兩個單位為 10 公分，而 SHI-ATEX 之 PE 靶厚度估量為 8 公分。

3. 中子反射體

中子反射體功用主要用來將熱中子反射回到中子源內，減少熱中子的外釋。因此反射體的材質需要高的中子彈性碰撞反應截面，以及低的中子吸收反應截面。

- 材質

反射體的材質與中子減速器的材質要求相同，因此適合做減器的材料，亦可用於中子反射體。常用的反射體材料為石墨和 PE，日本三個加速器中子源單位(KUANS, RANS, NUANS)都使用石墨做反射體，但 SHI-ATEX 是用 PE 作為反射體材料。

- 幾何形狀

反射體的形狀設計須能包覆整個減速器，反射體的效能可用反射中子與入射中子的比值來評估，不同材質的中子反射比值請見圖 28，圖中可看出 PE 材質的中子反射體反射效能較好，10 公分厚度 PE 即可反射 95%的中子。SHI-ATEX 中子反射體厚度約 30 公分，應該也有屏蔽加馬射線的考量。

4. 中子照相

中子照相設備主要包括加馬濾板(Bi 材質)、準直器、成像裝置等，這些裝置主要功能與工作機制已於參訪經過中說明，在此不再重複敘述。中子照相中有一很重要參數即為 L/d ，此值愈大則中子平行度好，中子照相品質愈佳。 L/d 比值與照相品質的關係請見圖 29[6]， L 為準直器入口端到樣品距離， d 為準直器中子入口端開口大小， z 為樣品到底片的距離。 $\lambda_g = zd/L$ ， λ_g 愈小照相愈清晰，因此 L/d 比值要大且 z 值要小，亦即中子束要夠平行，底片與樣品要貼近。Bi 材質可過濾加馬射線和較高能中子而且可讓熱中子通過，請見圖 30 中子與 Bi 反應截面圖，可以看出為何被選為中子照相的濾板。

核研所迴旋加速器現有靶室場地空間有限，所以熱中子的引出會在約 130° 方向引出(請見圖 31)，以期有增加 L/d 比值的空間。此外，為減少加馬射線對中子照相的干擾，在成像裝置周圍要設屏蔽體，以阻擋來自旁邊從射束線放出的加馬。熱中子的引出方向也可以考慮 90° 向下到地下室，如此會與 SHI-ATEX 類似，而且加馬干擾會較少。

(三) 日本中子源

日本中子類型包括反應器中子源、散裂中子源和加速器中子源，這些中子源的地理位置請見圖 1 和圖 2，日本散裂中子源和加速器中子源基本規格請見圖 32[1]。另外，反應器中子源為 JRR-3，其熱中子通率(TNRF)為 $\sim 10^8$ n/s/cm²，冷中子通率(CNRF)為 $\sim 10^7$ n/s/cm²，地理位置請見圖 2。不同中子源中子產生機制和中子產率(n/p)請見圖 33[7]，反應器中子源中子產生機制主要為核分裂反應，中子產率平均為每次分裂 2.5 個中子；散裂中子源中子產生機制主要為高能質子(或離子)撞擊重靶材產生中子，通常高能質子能量大於幾百到幾千 MeV (以日本散裂中子源 J-PARC 為例，其質子能量高達 3000 MeV)，中子產率平均為每個質子產生 10-30 個中子，視靶材和能量而定，能量愈高產率愈大(請見圖 34[8])；加速器中子源中子產生機制主要為質子(或電子)撞擊靶材產生核反應以產生中子，常見中子產率平均為每個質子產生千分之幾到百分之幾個中子。日本中子源照片、規格和應用請參考圖 35 至圖 44。

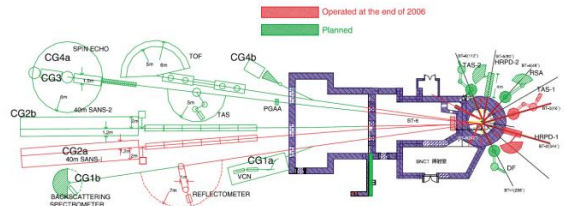
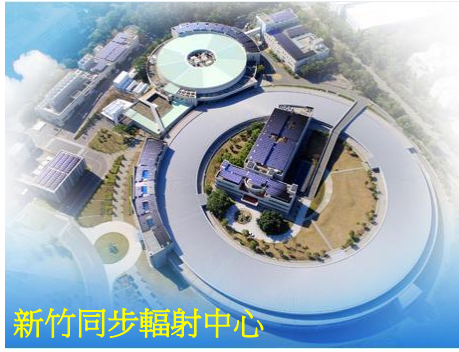
(四) SWOT 分析

核研所擬利用現有迴旋加速器建立加速器中子源，初步預計熱中子通率約為 1×10^5 等級，安裝場所為 052 館 154 室(加速器研發靶室)，主要預定應用項目為中子照相。表五為核研所和 SHI-ATEX 建立加速器中子源的 SWOT 分析表。

表五 SWOT 分析表

優勢		劣勢	
核研所	SHI-ATEX	核研所	SHI-ATEX
<ol style="list-style-type: none"> 核研所已有 30 MeV 質子加速器，可用以建造加速器中子源。 核研所是國內少數可用於發展中子研究的場所。 具有 TRR 中子源經驗及相關技術人才。 	<ol style="list-style-type: none"> SHI-ATEX 公司與住友重工業有限公司有密切關聯，住友重工可協助 SHI-ATEX 設計製造加速器和中子源，SHI-ATEX 公司有強大可靠的支援。 日本有許多中子研究應用單位，容易獲得新技術。 	<ol style="list-style-type: none"> 加速器研發靶室場地大小受限，中子應用項目最多只能選 2 項。 可產生的中子通率較低，合適做的中子應用項目有限。 	<ol style="list-style-type: none"> SHI-ATEX 加速器中子源屬於緊湊型(compact)中子源。因此中子通率較低，無法與大型散裂中子源或反應器中子源比擬，可提供的中子應用項目有限
機會		威脅	
核研所	SHI-ATEX	核研所	SHI-ATEX
<ol style="list-style-type: none"> 國內缺乏加速器中子源，僅清大有 1 座反應器中子源，但中子實 	<ol style="list-style-type: none"> 日本中子研究議題很多，中子應用業界需求較多。 	<ol style="list-style-type: none"> 清大有反應器中子源，也可提供中子實驗。清大中子實驗設 	<ol style="list-style-type: none"> 日本中子研究單位多，競爭對手亦多。尤其是大型中子源的競爭能力

<p>驗設備使用率目前較低。</p> <p>2 中子和同步輻射光是觀察微結構的兩把利器，各有擅場並可互補。國內有許多方面會需要用中子來觀測。國內中子應用有潛在需求。</p>		<p>備如再整備好，會是競爭對手。</p> <p>2 小型中子實驗可到國外進行。</p> <p>3 因中子通率較低，恐無法滿足業界中子應用需求。</p> <p>4 中子會有活化問題，會讓業界猶疑。</p>	<p>強。</p>
--	--	--	-----------



圖八 國內正設計建造中的 TRR-II 研究用反應器及初步規劃之各式中子散射儀的配置圖。有兩部小角度中子散射儀 (SANS)、時間飛行式中子散射儀 (TOF)、垂直式反射儀 (reflectometer)、反向散射儀 (back scattering spectrometer)、迴旋迴聲散射儀 (spin-echo) 及三軸繞射儀 (TAS)。(圖由原子能委員會核能研究所提供)

核研所中子應用 (多年前規劃)

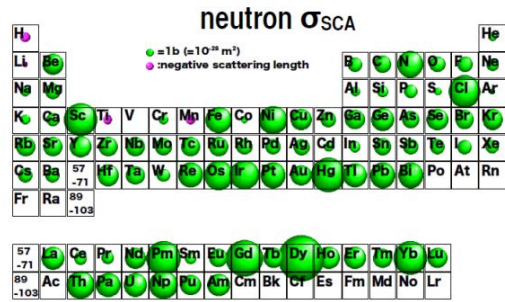
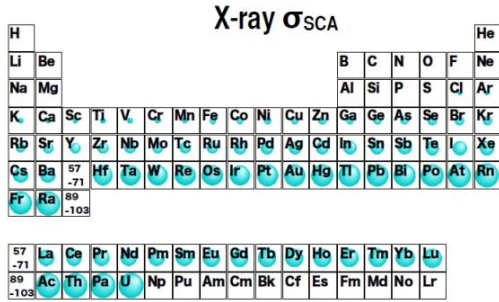


圖 15 X-ray 和中子散射反應截面比較圖。

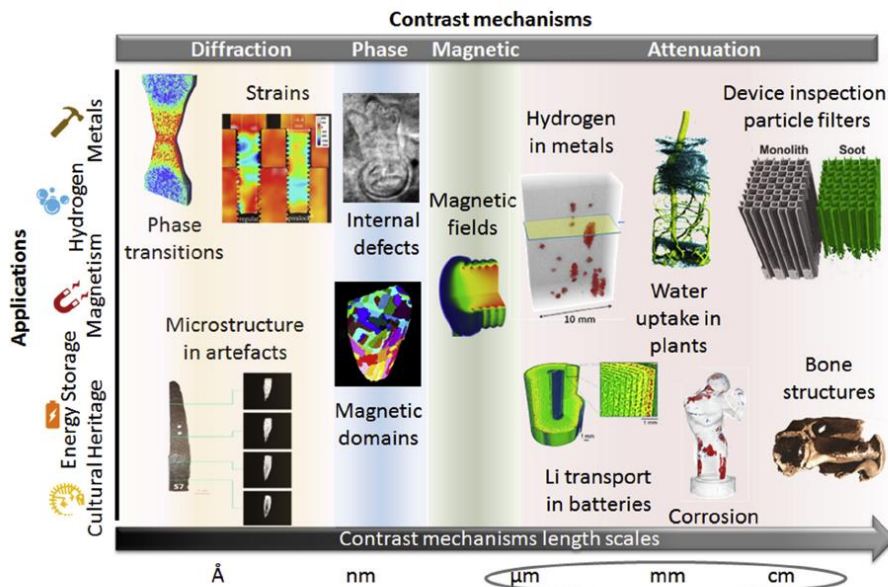


FIGURE 1

Different contrast mechanisms can be used to explore various length scales in materials and to study their properties and related processes. The relation between contrast mechanisms and different application fields is presented. The length scale presented on the lower axis relates to the corresponding contrast mechanism specified on the upper axis. For the attenuation-based image techniques the large length scale was emphasized by grouping the scales from μm to cm.

圖 16 中子應用範圍和相關應用技術及檢測尺度。

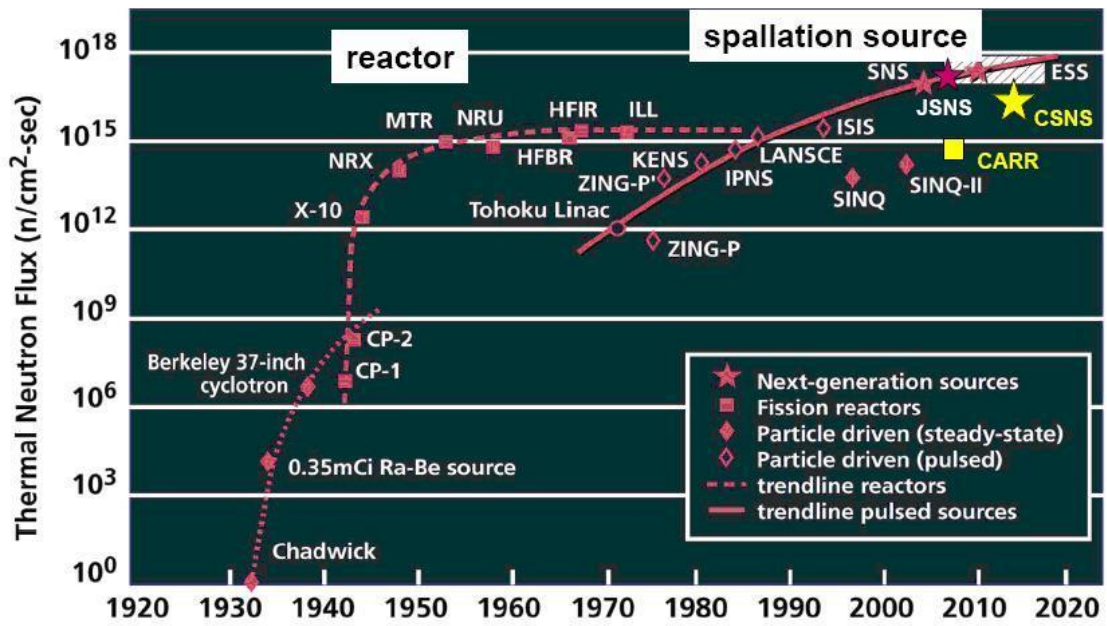


圖 17 中子源種類。

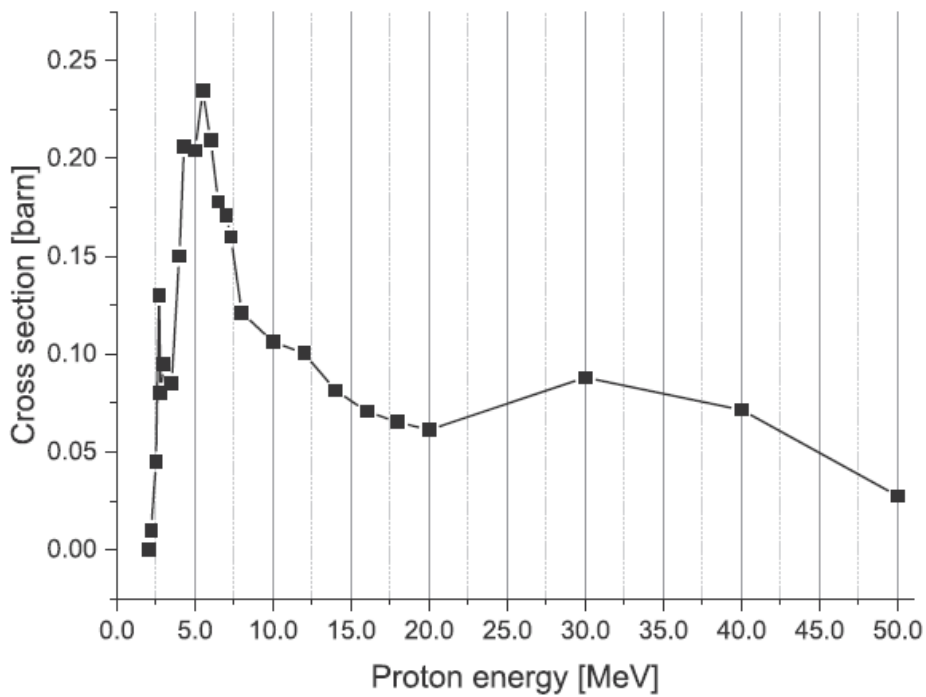


圖 18 核反應 ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ 的激發函數。

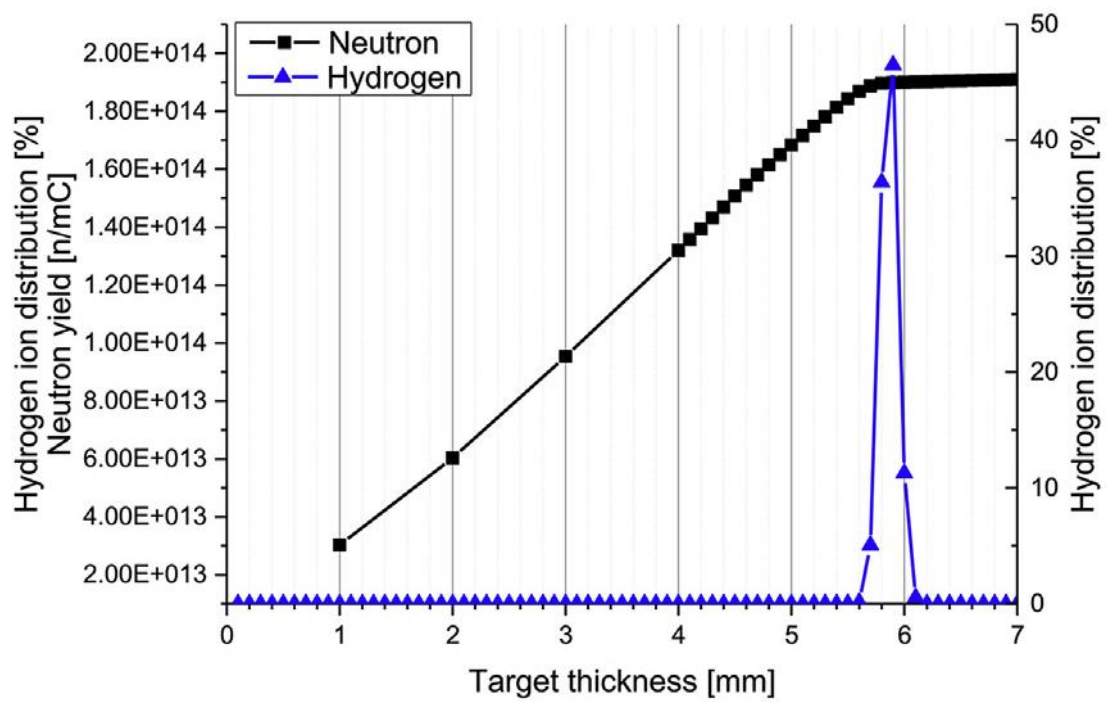


圖 19 中子產率與靶厚度關係圖。

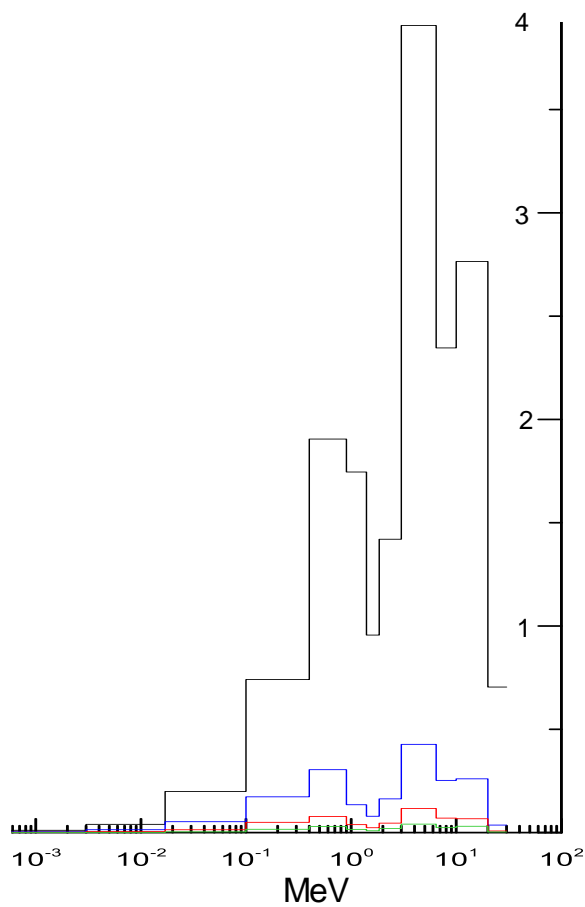


圖 20 模擬 30 MeV 質子照射鈹靶後所產生中子能譜。

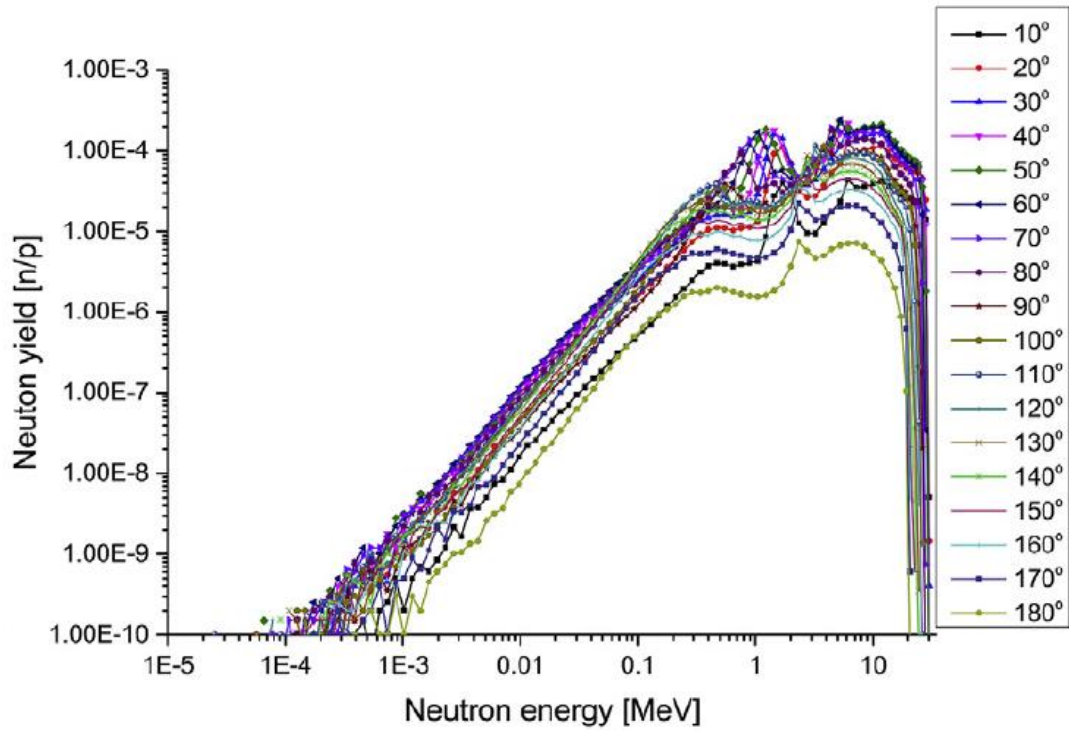


圖 21 不同角度的中子能量分佈。

Parameter	H	D	He	Li	Be	C	O	U
A	1	2	4	7	9	12	16	238
N(collision)[2 MeV --> 0.0253 eV]	18	25	43	67	86	114	150	2172
Scatt xs [b] @ 0.0253 eV	82.03	7.64	1.34	1.4	7.63	5.559	4.232	8.871
Absorp xs [b] @ 0.0253 eV	0.3326	0.0005	0	0.0454	0.0076	0.0035	0.0001	2.68

圖 22 中子減速器和反射體常見元素及其與中子相關性質。

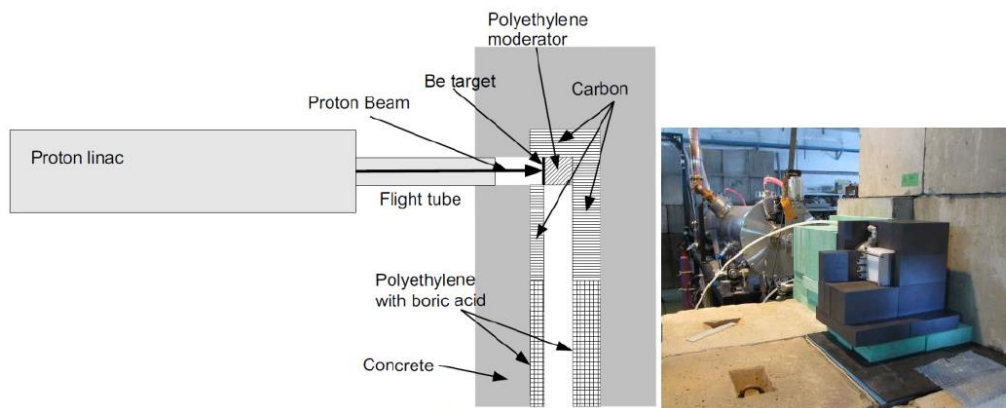


Fig.1. Schematic view (left) and photograph (right) around the moderator of KUANS.

圖 23 日本 KUANS 加速器中子源示意圖和實體相片，PE 為邊長 10 公分正方體。

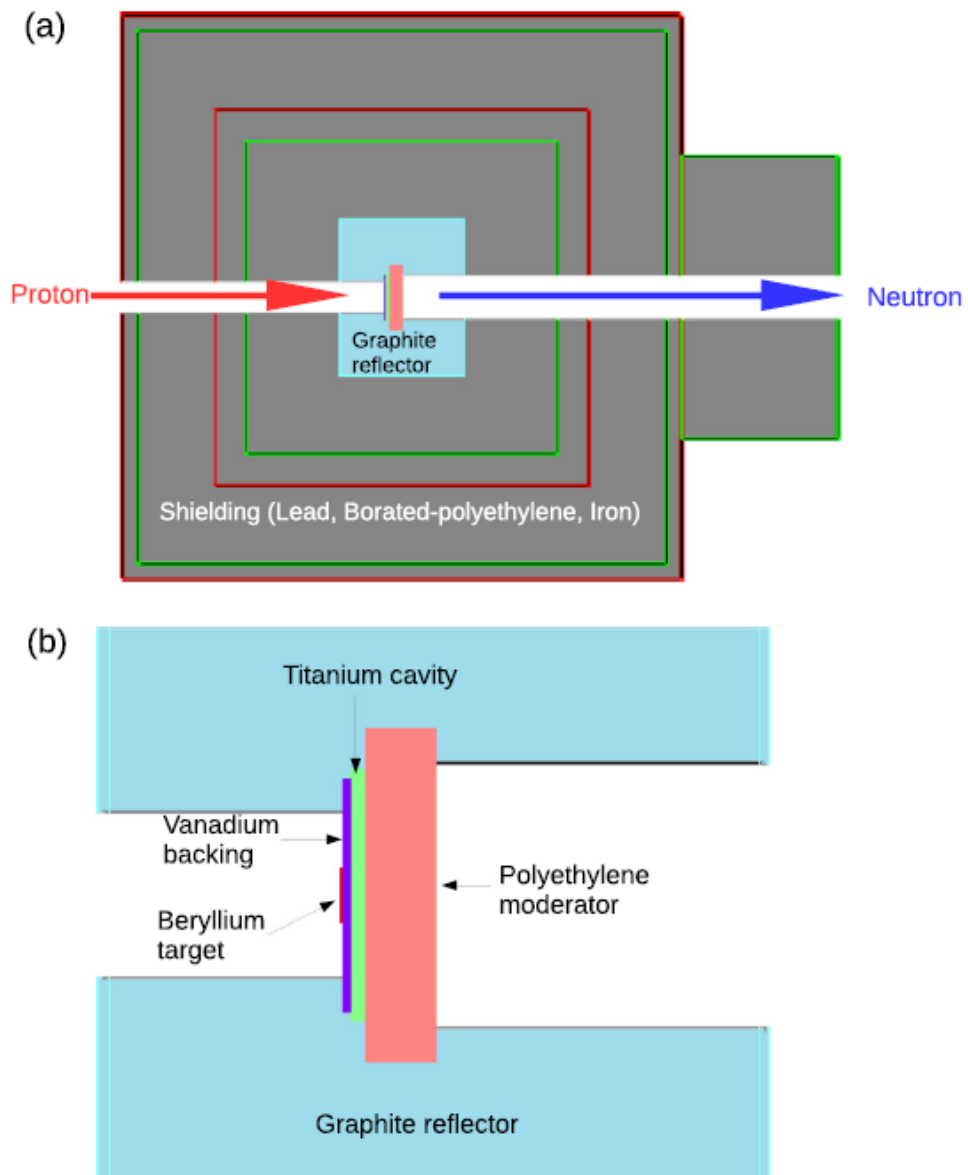


Fig. 2. (a) A schematic of the cross-sectional view of the target station of RANS, and (b) an enlarged detail drawing around the beryllium target.

圖 24 日本 RANS 加速器中子源示意圖，PE 厚度 4 公分，反射體 40×40×40 公分。

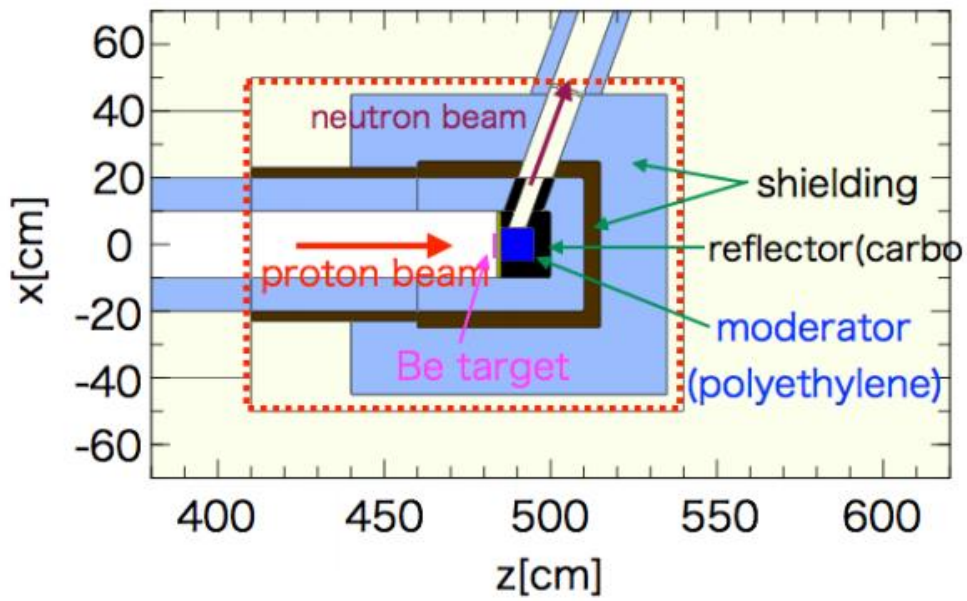
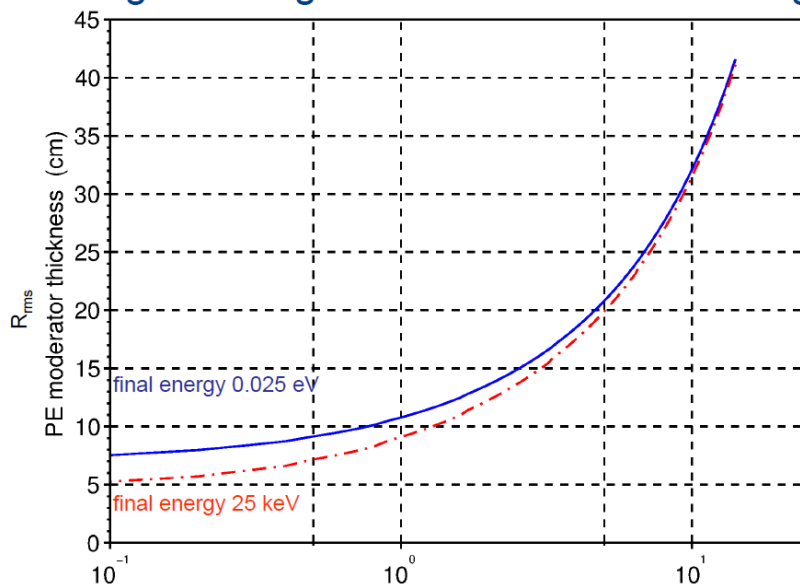


圖 25 日本 NUANS 加速器中子源示意圖，PE 厚度 10 公分。

■ Average slowing down distance from averaged parameters



Average slowing down distance depends only weakly on the final energy required.

11 cm PE thermalize a 1 MeV Neutron
41 cm PE thermalize a 14.1 MeV Neutron



圖 26 利用 Monte-Carlo simulation 計算不同能量中子減速到熱中子所需 PE 厚度 [5]。

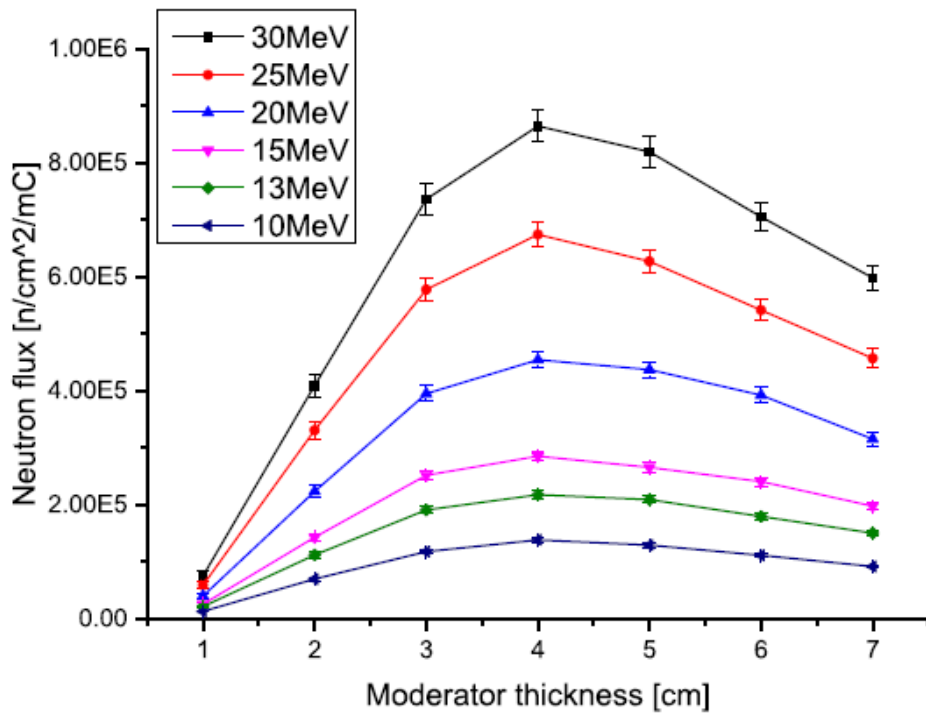


圖 27 利用 MCNP 模擬不同能量質子照射鈹靶所產生快中子經過不同厚度 PE 減速後之熱中子通量變化圖[3]。

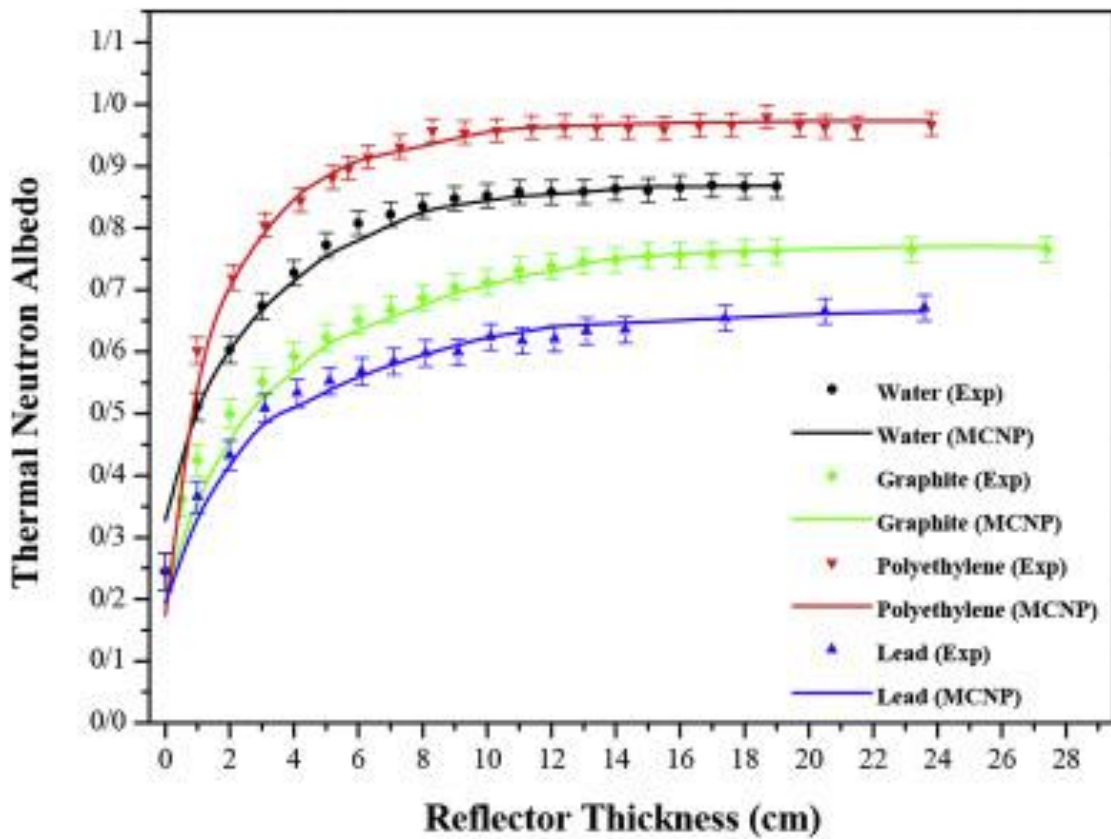


圖 28 不同材質的中子反射體反射效應比較圖。

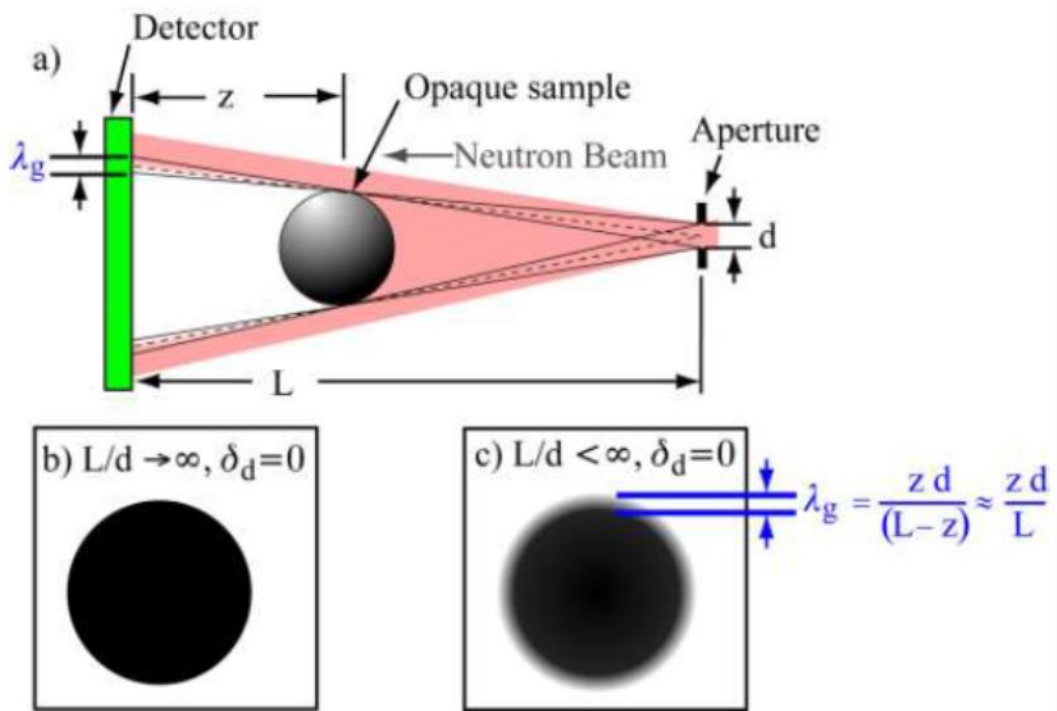


圖 29 照相品質與 L/D 的關係。[6]

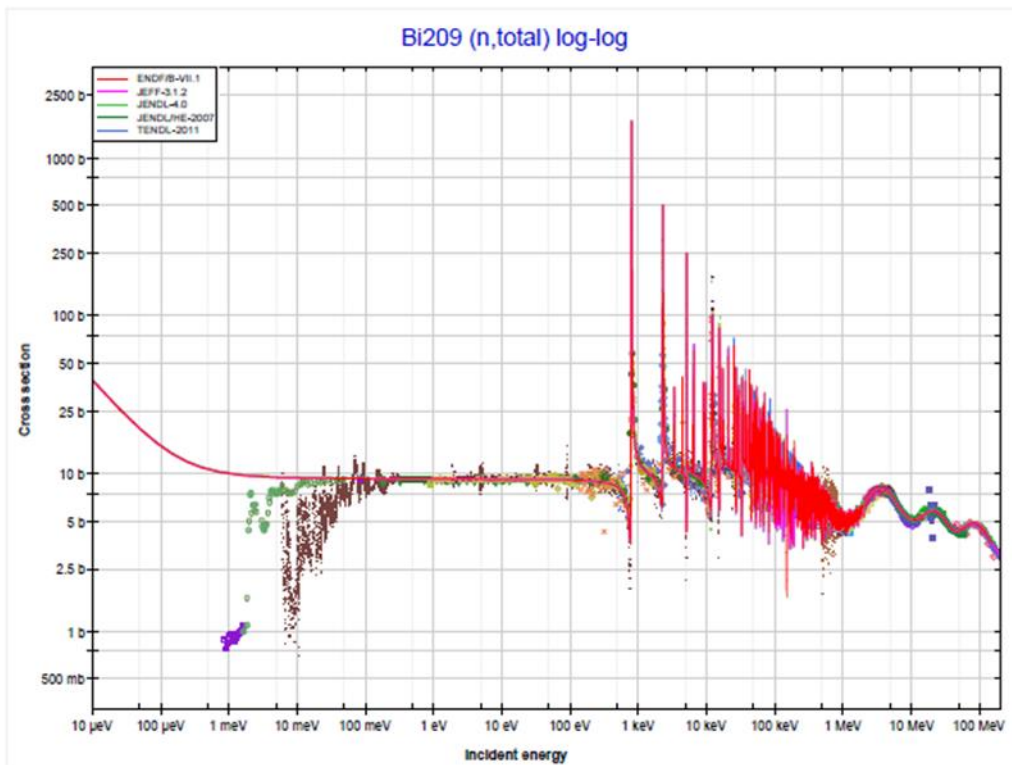


圖 30 Bi 與中子之反應截面圖。

本所小規模
中子源規劃
示意圖

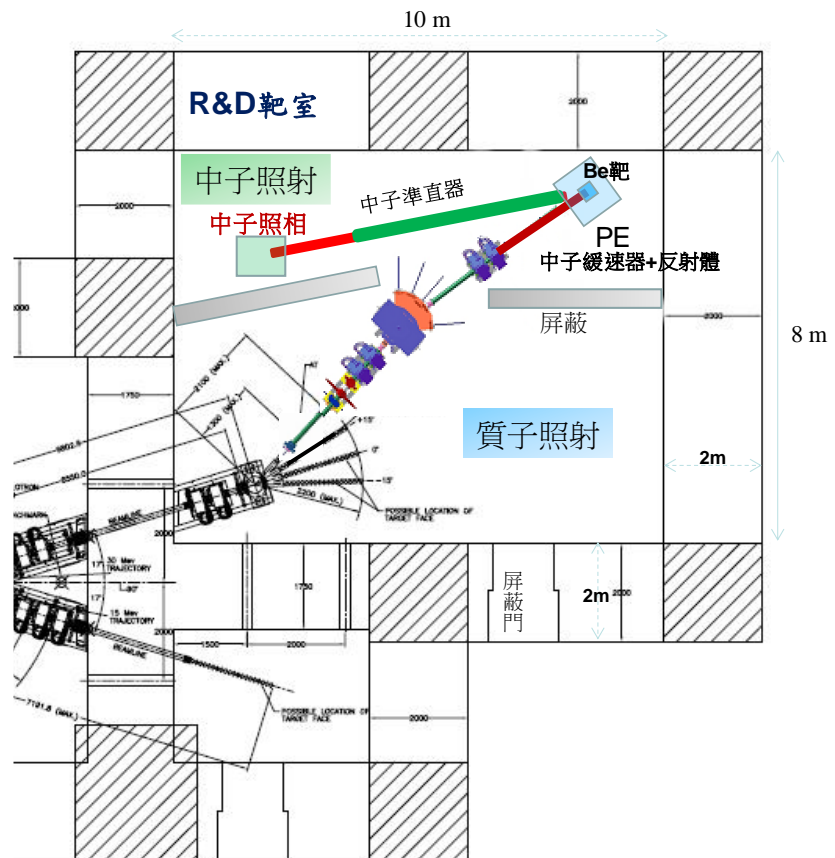


圖 31 核研所迴旋加速器中子源規劃示意圖。

Specifications of accelerator-based facilities in Japan

Facility Name	Accelerator Type	Acceleration Particle (Energy)	Accelerator Power (kW)	Moderator Type	Neutron Flux (n/cm ² /s)	L/D
HUNS	Linac	Electron (35 MeV)	~1	Thermal Cold	~few × 10 ³ ~few × 10 ⁴	~60
Aomori Prefecture Quantum Science Center	Cyclotron	Proton (20 MeV)	1	Thermal	6.1 × 10 ⁵	44
J-PARC RADEN	Synchrotron	Proton (3000 MeV)	1000	Cold	2.6 × 10 ⁷	180-7000
RANS	Linac	Proton (7 MeV)	0.7	Thermal	~few × 10 ⁴	21-781
KUANS	Linac	Proton (3.5 MeV)	0.35	Thermal	1.2 × 10 ³	~20
KURRI-LINAC	Linac	Electron (40 MeV)	6	Thermal	2.4 × 10 ⁴	~85
SHI-ATEX	Cyclotron	Proton (18 MeV)	0.36	Thermal	2.0 × 10 ⁵	44
RCNP (OSAKA U.)	Cyclotron	Proton (400 MeV)	1.1 μA	Cold White neutron	~ few × 10 ⁵	
CYRIC (TOHOKU U.)	Cyclotron	Proton (70 MeV)	< 0.1	quasi-monoenergetic Thermal	1 × 10 ⁶ 2 × 10 ⁴	

圖 32 日本加速器中子源規格。[1]

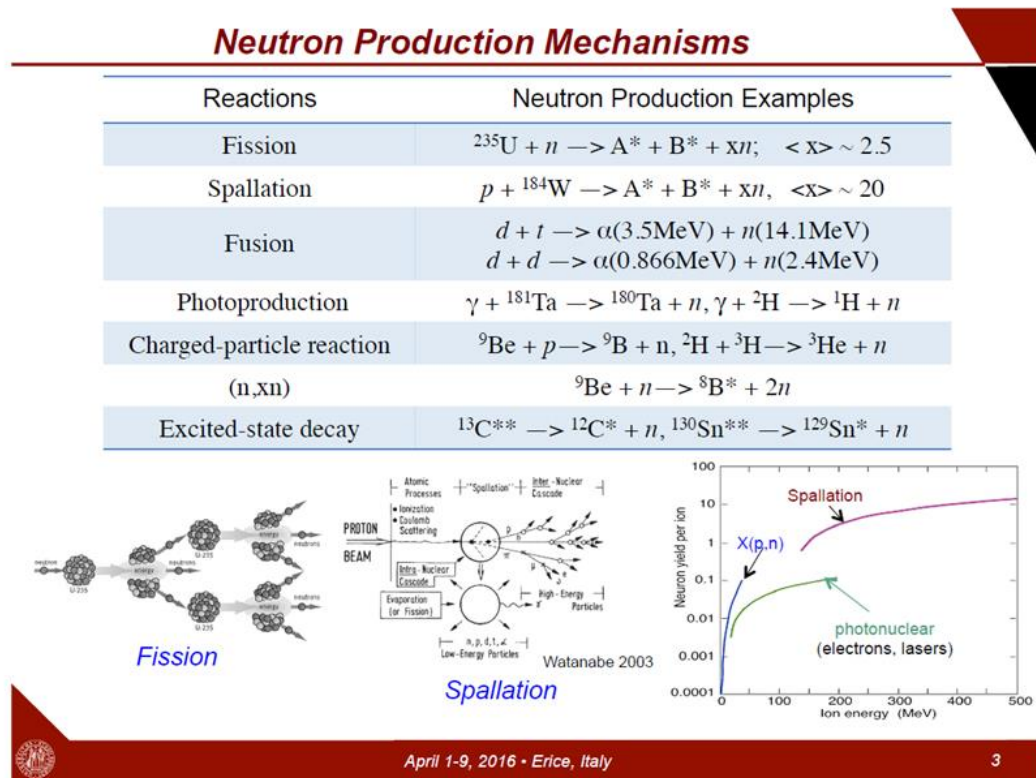


圖 33 不同中子源的中子產生機制和產率(n/p)。[7]

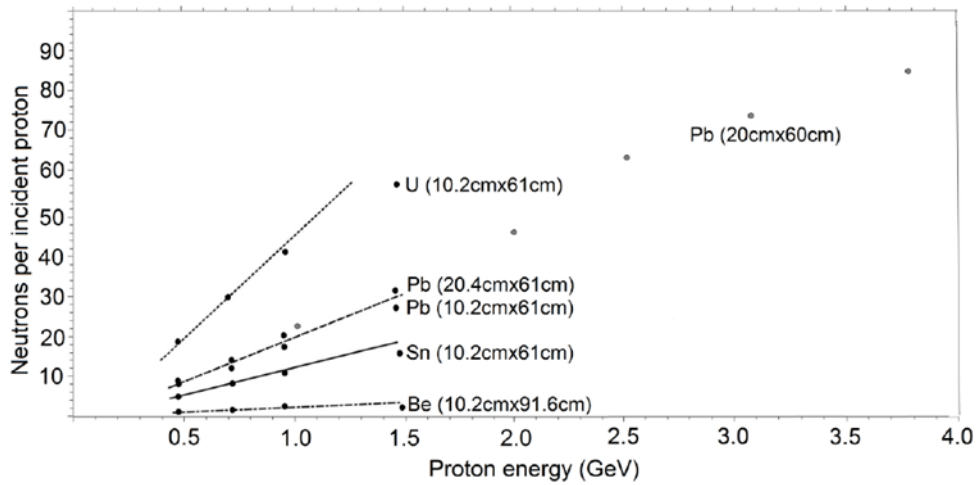


圖 34 散裂中子源的中子產率(n/p) 。 [8]

HUNS (Hokkaido U.)

Table 4.1.7 Parameters of HUNS, the Hokkaido University Neutron Source

Electron linac	Target station	Major activities
35 MeV, 30 μ A (50 pps)	(e, X), (X,n)	Radiation effects, imaging, SANS
1 kW	Water/coupled methane	Detector/device/moderator research and development
Short pulse, width 10 ns–3 μ s	1.6×10^{12} n/s	Education
50 or 100 Hz	Thermal 10^3 n/s/cm ²	Astrophysics, nuclear transmutation, soft error rate
	Cold 10^4 n/s/cm ²	



Figure 4.1.7. The HUNS facility: (left) electron linac, (right) experiment hall.

圖 35 北海道大學中子源 (HUNS) 。

KUANS (Kyoto U.)

Table 4.1.10 Parameters of KUANS, the Kyoto University Accelerator-driven Neutron Source

Proton radio frequency quadrupole (AccSys Technology)	Target station	Major activities
3.5 MeV, 16 kW	Be(p, n)	Imaging wavelength dependent images
10 mA (peak), 100 μ A (average)	PE, ambient	Detector development
Long pulse, width 0.03–0.2 ms, 20–200 Hz	$\sim 1 \times 10^{11}$ n/s (calc.)	Education
	Thermal 1.2×10^3 n/s/cm ²	

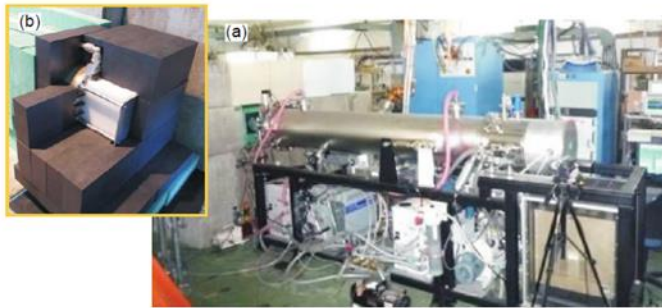


Figure 4.1.10. The accelerator system (a) and the target assembly (b) of the KUANS facility.

圖 36 東京大學中子源(KUANS)。

KURRI-LINAC (Kyoto U.)

Table 4.1.11 Parameters of KURRI-LINAC, Kyoto University Research Reactor Institute–Electron Linear Accelerator

L-band electron linear accelerator	Target station	Major activities
30 MeV, 1 μ A	Tantalum	Neutron resonance transmission analysis
6 kW	Water moderator	Neutron resonance capture analysis
	3×10^{11} n/s/cm ²	Pulsed neutron imaging
	Thermal	
	2.4×10^4 n/s/cm ²	

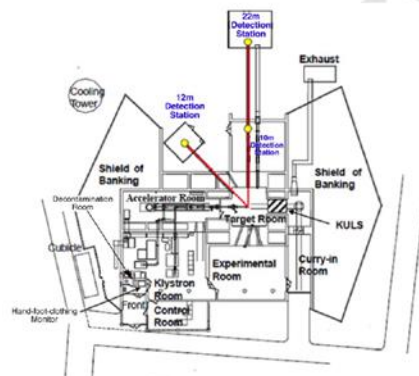


Figure 4.1.11. A schematic layout of the KURRI-LINAC facility.

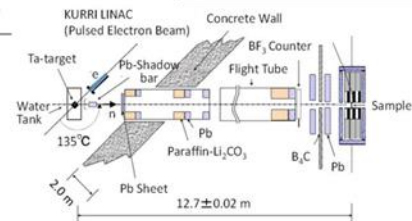


Figure 14. Layout of the beam line of KURRI-LINAC.



圖 37 京都大學中子源(KURRI-LINAC)。

RANS (RIKEN)

Proton RFQ + 1 linac	Target station	Major activities
7 MeV, 16KW 10 mA (peak), 100 μ A (average) Long pulse, width 0.5 ms, 20 Hz	Be(p, n) PE(initial), cold mesitylene (final) $\sim 1 \times 10^{12}$ n/s Thermal $\sim 10^4$ n/s/cm ² .	<u>Imaging</u> , industrial applications <u>Fast neutron</u> interrogation

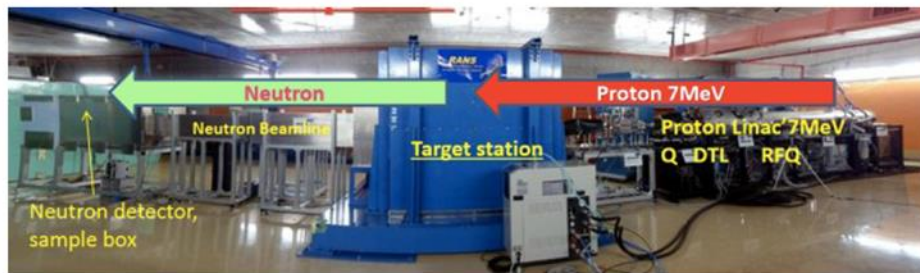


Figure 4.1.14 RIKEN Accelerator-driven Neutron Source.

圖 38 RIKEN 中子源(RANS)。

NUANS (Nagoya U.)

Table 4.2.7 Parameters of the Nagoya University Accelerator-driven Neutron Source

DC accelerator (Dynamitron)	Target station	Major activities
Protons, 1.9–2.8 MeV (variable), maximum 42 kW	Li(p, n) MgF ₂	Compact neutron source R&D for BNCT Engineering applications (neutron imaging)
15 mA	Epithermal neutron flux $\sim 1 \times 10^9$ n/cm ² s	
DC		

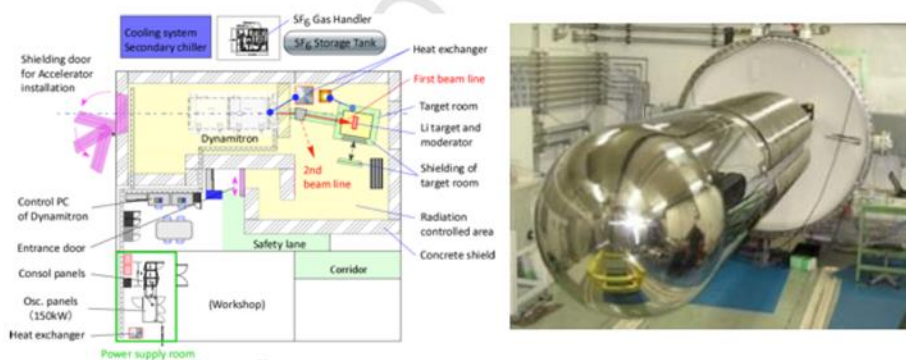


Figure 4.2.7 A schematic layout and photograph of the NUANS facility and Dynamitron proton accelerator in NUANS.

圖 39 名古屋大學中子源(NUANS)。

Aomori Prefecture Quantum Science Center

Cyclotron	Target station	Major activities
Protons 20 MeV, 50 μ A	Be(p,n) thermal neutrons 6.1×10^5 n/s/cm ²	<u>Imaging</u> , L/D=44 plastic detection in metal materials water in plants

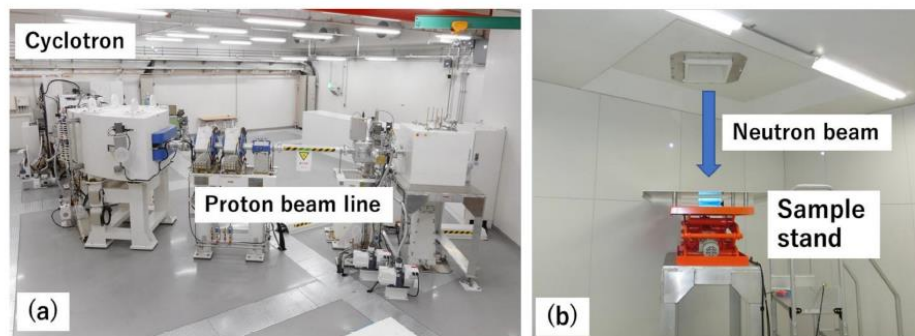


Figure 7. Cyclotron accelerator and proton beam line (a) and a vertical irradiation room (b).

圖 40 Aomori Prefecture Quantum Science Center 中子源。

Sumitomo Heavy Industry ATEX (SHI-ATEX)

Cyclotron	Target station	Major activities
Protons 18 MeV, 20 μ A	Be(p,n) thermal neutrons 2×10^5 n/s/cm ²	Imaging, L/D=44 Imaging, checking explosive devices, extraneous materials SER



圖 41 住友 ATEX 公司中子源 (SHI-ATEX)。

CYRIC (TOHOKU U.)

Table 4.1.3 Parameters of the quasi-monoenergetic neutron beam facility at CYRIC

Azimuthal varying field cyclotron	Target station	Major activities
70 MeV, 1 μ A < 0.1kW	Li(p, n) 10^6 n/cm ² /sec/ μ A at 1.2 m downstream from the production target	Radiation damage effects on semiconductors Detector/optics/moderator R&D Education

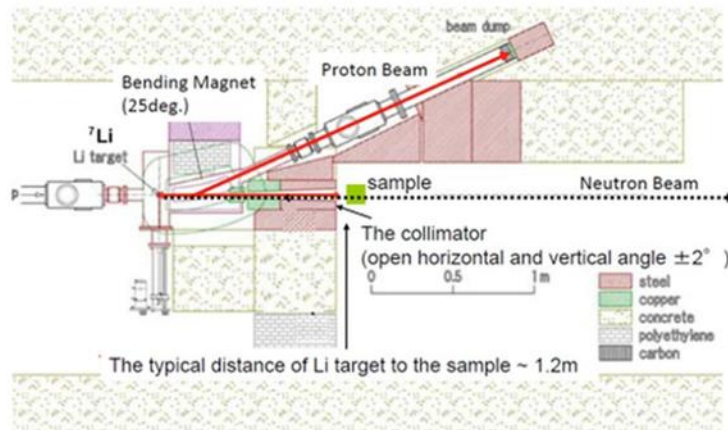


Figure 4.1.3. Schematic layout of the CYRIC neutron facility.

圖 42 東北大學中子源(CYRIC)。

White neutron irradiation facility at RCNP (OSAKA Univ.)



圖 43 大阪大學散裂中子源(RCNP)。

J-PARC the world highest intensity pulsed neutron produced by using 3 GeV protons with a current of 333 micro-amps and a repetition rate of 25 Hz

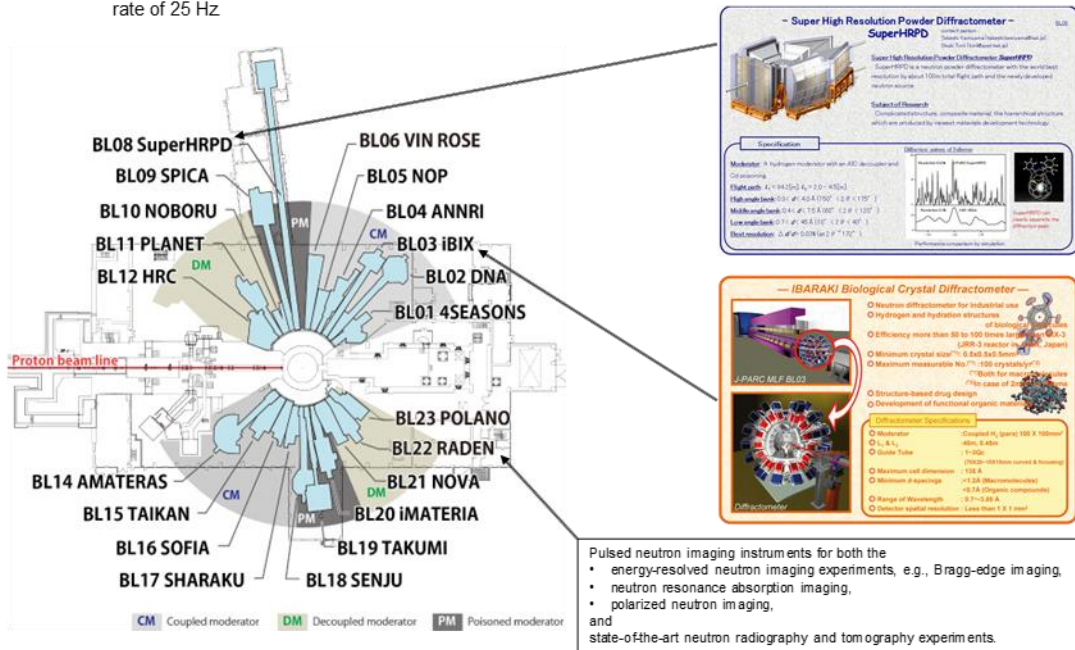


圖 44 日本大型散裂中子源(J-PARC)

四、建議事項

1. 及早建立加速器中子源程式模擬能力

建立加速器中子源硬體設施之前，需先經過規劃設計驗證評估階段。能有效驗證設計結果的正確度，就是利用程式模擬。目前已有市售軟體可進行程式模擬，常見的有 MCNP 軟體。程式模擬項目可包括：不同靶體厚度和冷卻背板設計下空間各角度的中子能譜和中子通率、不同厚度減速器所發射出各方向的中子能譜和中子通率、不同中子反射體設計在某指定方向的中子能譜和中子通率、材料活化模擬計算等，模擬結果也可協助盡早完成輻射安全評估。

2. 派員參訪國外其它加速中子源設施

本次參訪單位其加速器中子源是屬於早期建立的，且屬於商業用途。建議再派員前往中子源研究應用單位參訪或實習，以學習較新的中子源相關技術和中子應用技術，而日本的加速器中子源研究單位 KUANS、RANS、NUANS 是值得前往學習的單位。

3. 利用清大反應器實習中子照相技術及其它中子應用技術

在核研所加速器中子源未建立完成之前，建議可派員前往清大反應器實習中子照相技術及其它中子應用技術，例如中子散射技術、中子繞射技術等。當核研所中子源硬體建立完成後，可於最短時間建置屬於核研所中子應用設備和相關技術。

五、參考文獻

1. Yoshiaki Kiyonagi, “Compact Accelerator-driven Neutron Sources (CANSs) and their applications in Japan”, SPES@ Ferrara, Italy, 2019.
2. Yoshiaki Kiyonagi, “Neutron Imaging at Compact Accelerator-Driven Neutron Sources in Japan”, Journal of Imaging, 2018.
3. B. Jeon et al., “Target-Moderator-Reflector system for 10-30 MeV proton accelerator-driven compact thermal neutron source: Conceptual design and neutronic characterization”, Nuclear Engineering and Technology, <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.08.019>.
4. <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/neutron-diffusion-theory/meaning-of-diffusion/>
5. Arnd Junghans , “Neutron beams for nuclear data measurements”, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Postfach 510119, 01314 Dresden, Germany.
6. David Jacobson, “Neutron Imaging”, NIST, 2016.
7. Chun K Loong, “Compact Accelerator-driven Neutron Sources (CANS)”, DESIGNING AND BUILDING A NEUTRON INSTRUMENT, The 2nd Erice School, 2016.
8. I.S. Anderson, C. Andreani, J.M. Carpenter, G. Festa, G. Gorini, C.-K. Loong, R. Senesi, “Research opportunities with compact accelerator-driven neutron Sources”, Physics Reports (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2016.07.007>