

出國報告（出國類別：開會）

赴日本東京參加第七屆國際輻射防  
護體系研討會（ICRP 2023）  
暨拜訪東京大學大學院新領域創成  
科學研究所出國報告

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：陳冠傑 技士      朱映韶 技士

派赴國家：日本

出國期間：112 年 11 月 5 日至 11 月 11 日

報告日期：113 年 1 月 10 日

## 摘要

國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)為研究游離輻射對人體的影響以及提出相關建議之國際組織，該委員會不定期出版技術報告及輻射防護安全導則，該導則常被應用於各國制定游離輻射之輻射安全管制及相關法規時所參考的重要依據；此外，藉由拜訪東京大學大學院新領域創成科學研究所飯本武志教授進行輻射防護交流訪談，以了解日本國內對於天然放射性物質之管制現況，作為我國核能安全委員會(Nuclear Safety Commission ,NUSC，下稱本會)未來修定相關輻射防護管制措施及研修法規之參考。

本次會議首要主題為輻射防護的演變：科學與未來，會議內容圍繞著「下一世代的輻防觀念」做展開，對於現有的輻射醫療劑量評估進行檢討、提出放射線診斷的最新技術研究成果及劑量測定提出新的建議。隨著科技及觀念不斷翻新，需積極回顧並修正現有的輻防體系，以掌握未來輻射防護與管制的重點及趨勢，精進我國輻射管制及相關應用技術，使得輻射安全管制標準與國際接軌。

另亦藉由此次出國參訪行程，從中獲得了許多寶貴知識與訊息，可更為強化輻防管制工作的推動，增進本會人員管制效能。

## 目次

壹、 出國目的與行程.....	4
貳、 國際輻射防護新概念與相關科技發展趨勢.....	6
參、 日本國內天然輻射管制實務.....	26
肆、 心得與建議.....	31

## 壹、出國目的與行程

### 一、目的

職等赴日本東京參加「第七屆國際輻射防護體系研討會(International Symposium on the System of Radiological Protection, ICRP 2023)」，為國際間輻射防護與管制技術之重要會議，會中提出相當多關於輻射防護最新的觀念，以及醫療輻射應用技術的研究發表。藉由參加本次研討會，將有助於提升國內輻射應用技術及更新輻防管制觀念。

透過本次出國參加會議，順道拜訪東京大學新領域創成科學研究所飯本武志教授，了解日本國內有關負離子商品及航空人員輻射劑量的管制現況，做為本會修訂相關法規之參考。

## 二、出國行程

表一 赴日參加研習及參訪行程表

日期	天數	地點	工作內容
112年11月5日	1	台北-日本東京	去程
112年11月6日 至11月9日	4	日本東京	參加第七屆國際輻射防護體系研討會 (ICRP 2023)
112年11月10日	1	日本東京	拜訪東京大學大學院新領域創成科學研究所飯本武志教授進行輻射防護交流訪談
112年11月11日	1	日本東京-台北	回程

## 貳、國際輻射防護新概念與相關科技發展趨勢

本次第七屆國際輻射防護體系研討會(ICRP 2023)由日本量子科學技術研究開發機構(National Institutes for Quantum Science and Technology, QST)於 2023 年 11 月 6 日至 9 日在日本東京台場大飯店舉辦(如圖 1、圖 2、圖 3)，本次會議共有來自 59 個國家及 700 位以上參與者共襄盛舉。



圖 1 日本東京台場大飯店 ICRP 2023 展場外立牌



圖 2 日本東京台場大飯店 ICRP 2023 展場



圖 3 ICRP 2023 會議辦理情形

本研討會係一跨多領域性質之整合型研討會，目的在激發跨領域之創新思維，綜合研討議題大致可分為：(1)游離輻射防護(2)醫療科技發展(3)福島事件相關研究(4)劑量與癌症等多方面，會議期程共計 4 日。

以下就輻射防護及醫療科技發展相關之議題進行說明，其中包括輻射劑量評估技術的更新、重粒子治療之臨床研究等，將有助於本會掌握最新國際輻射劑量建議及輻射應用技術，將可以使國內輻射防護觀念與國際接軌，及精進醫療用輻射技術知識，茲說明如下：

## 一、游離輻射劑量評估

游離輻射對於人體細胞的影響，長久以來都是學界及各國政府所關心的議題之一，而使用電腦模擬計算一直是常見的評估方式之一，模擬的結果會隨著模擬模型的解析度不同而有所差異，因此 ICRP 一直以來對於建立模擬模型技術不斷得求新求變，致力於尋找出一個完美的模型，用以模擬出輻射對人體細胞的影響，進而推算出準確的劑量限度，有利於發生輻射意外事故後的人員劑量重建。

### 模擬模型的進程

在 ICRP 最初採用的電腦模擬，是使用無數個立方體去堆積組建成人體，每個立方體內都視為一個均質的計算單元。這種模擬的方式解決了早期單純以數學方程式計算，不貼近實際情況的問題，但同時也衍生了新的問題。這種模擬方式因使用的最小單元都是正方體，當時最小的解析度為毫米級，並且最小單元本身並不能彎曲，因此模擬出的人體無法得到一個平整的表面及連續的介面，無法呈現組織交接處的真实情況。為了解決以上問題，第二代模型改成以表面分割的方式，先將模擬目標的外型及各項參數建立於電腦後，再分割成無數個網格(mesh)去做模擬計算，而這種模型

雖然能得到較為連續的介面及平整的表面，但是缺點為只能先以平面做模擬，要得到接近人體的數據，需要分別對人體進行不同深度的平面進行模擬，不但計算上會花費非常大量的時間，不同深度之平面的介面也會出現些許不連續的計算結果。因此，於 2010 年開始，開始採用最新的四面體模擬技術(如圖 4)，同時能擁有完整的表面及較短的運算時間，並且能建立出更多不同姿勢(如圖 5)、體型及年齡的人體。

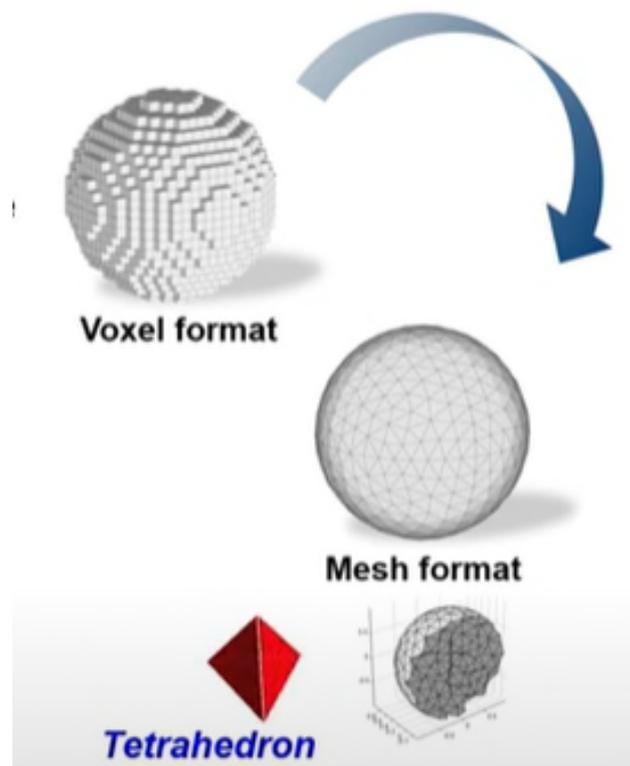


圖 4 模型進程的示意圖(資料來源：Yeon Soo YEOM (Yonsei University, Korea))

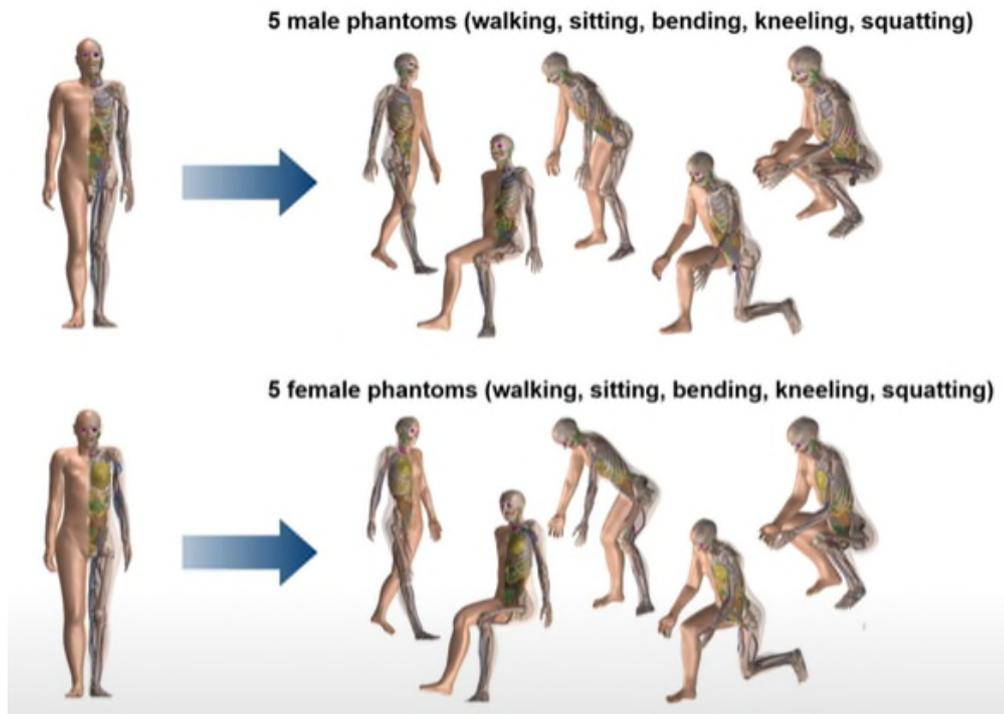


圖 5 不同姿勢下人體模型示意圖(資料來源：Yeon Soo YEOM (Yonsei University, Korea))

### 模擬模型精進的結果

因為模擬技術的更新，在過去被認為對輻射相當敏感，卻難以模擬的皮膚基層細胞層(Basal Cell Layer)，已經可以很好的模擬出輻射對其造成的影響(如圖 6)，也解決了過去因為解析度不足的關係，而難以計算的輻射目標區域，像是肺部的細支氣管(如圖 7)、消化系統內微米級厚的輻射敏感區域等(如圖 8)。

綜上，模擬技術的突破解決了許多舊有模型所出現的問題，藉由此四面體模擬技術，可以更好的模擬輻射對人體細胞的影響，藉此國際輻射單位與度量委員會(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)目前正著手利用最新的模擬結果來與更新各個器官的射質因數(quality factor, Q)與輻射加權因素(radiation weight factor,  $W_R$ )，預計於 2024 年發表，並提供給 ICRP 委員會有關新的輻射劑量之建議。

The **micron-thick** radiosensitive skin layer.

- 50- $\mu\text{m}$ -thickness ( $\geq 15$ -year)
- 60- $\mu\text{m}$ -thickness ( $\leq 10$ -year)

Example: 1fMRCP (left) and amMRCP (right)

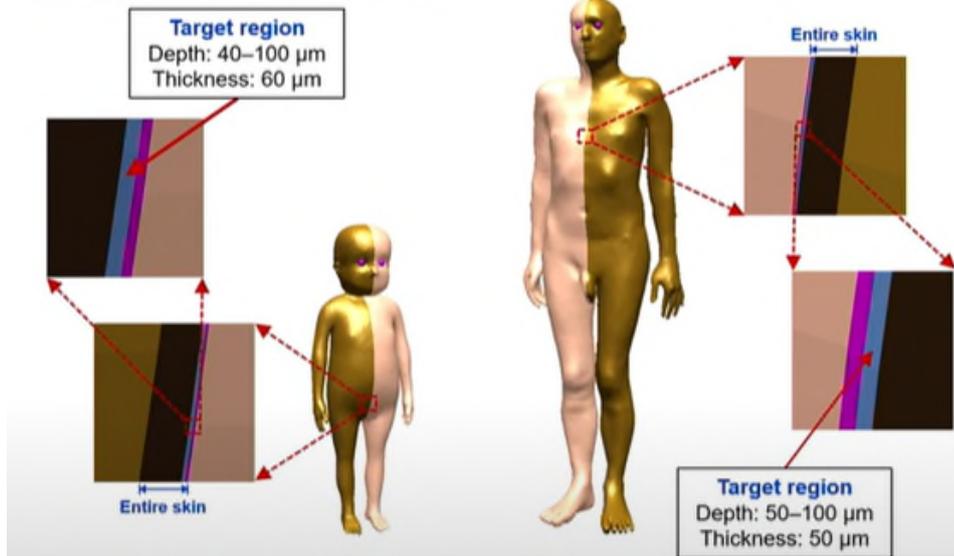


圖 6 皮膚基層細胞層模擬示意圖(資料來源：Yeon Soo YEOM (Yonsei University, Korea))

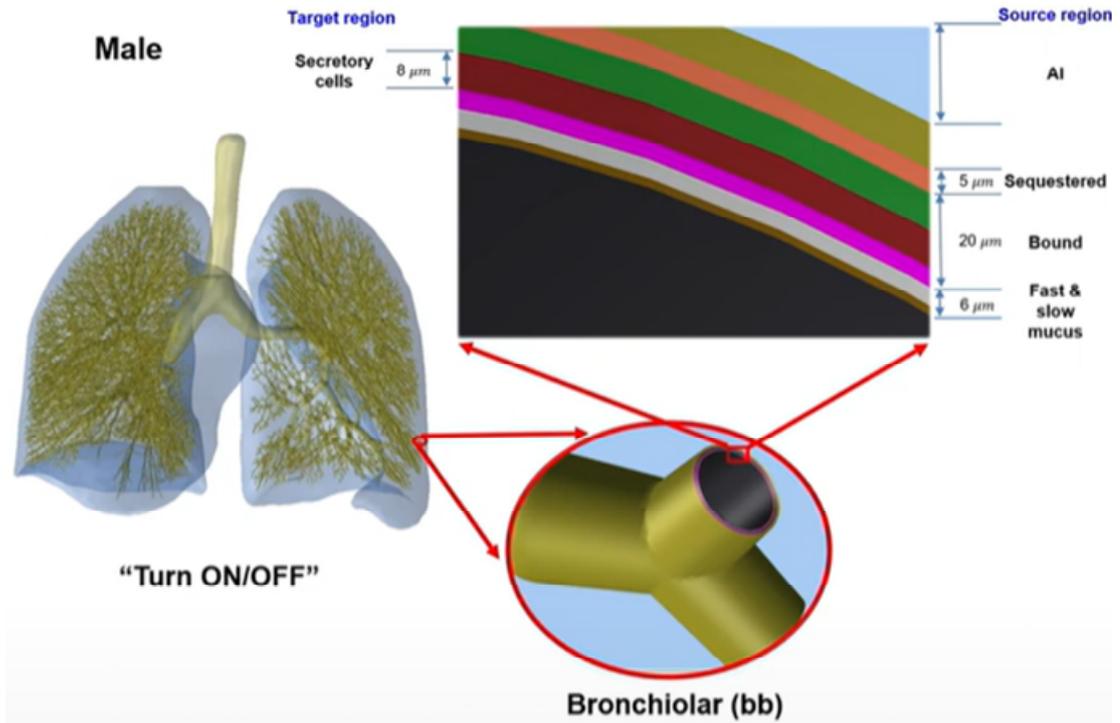


圖 7 肺部支氣管模擬示意圖(資料來源：Yeon Soo YEOM (Yonsei University, Korea))

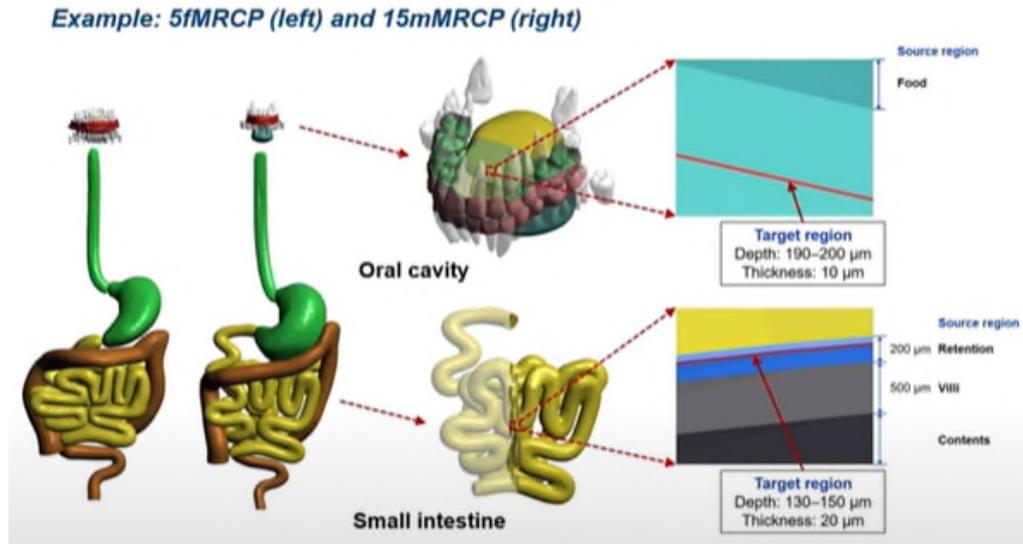


圖 8 消化系統輻射敏感區模擬示意圖(資料來源：Yeon Soo YEOM (Yonsei University, Korea))

## 二、At-211(Astatine-211) $\alpha$ 粒子標靶治療的發展與臨床應用

核醫藥物目前於全球應用發展迅速，除可作為身體上功能性之檢查外，近年更積極研究其對腫瘤專一性的技術，期望藉由放射性核種高度集中於腫瘤病灶以進行精準治療。以放射性同位素鐳-223(Radium, Ra-223)而言，其發出的  $\alpha$  粒子放射線能量很強，且只能行進很短的距離，研究發現可用於治療攝護腺癌的骨轉移末期病人，以有效控制骨頭轉移病灶的惡化，進而改善病人生活品質，以延長整體存活率。故我國中央健康保險署自 108 年 3 月 1 日起核准 Ra-223 納入健保給付，越來越多醫院核子醫學科向本會申請 Ra-223 使用，至 112 年底為止，本會共核准 74 家醫院新增 Ra-223 使用申請。此外，從 112 年開始國內有 3 家醫院申請放射性同位素錒-225(Actinium-225, Ac-225)，作為攝護腺癌病人臨床治療，是屬於國內新興的治療藥物。

近年來，日本對於放射性同位素砷-211 (Astatine-211, At-211)進行了一連串的研究及試驗，At-211 為  $\alpha$  粒子標靶治療(Targeted Alpha Therapy, TAT)的一種，雖然目前尚未正式應用於臨床治療，仍在癌症治療領域引起了廣泛的關注。在本次會議中，由日本講者針對 At-211 進行介紹，並分享近期

日本臨床試驗及研究成果，也期望未來能對於目前較難以治療的癌症提供新的治療選擇。

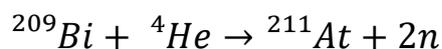
### $\alpha$ 粒子標靶治療(Targeted Alpha Therapy, TAT)介紹

$\alpha$  粒子標靶治療是一種放射治療方法，利用放射性同位素釋放的高能量  $\alpha$  射線，對癌細胞造成傷害，從而達成癌症治療的目的，臨床上可用於  $\alpha$  粒子標靶治療的放射性同位素如: Ra-223、Ac-225、At-211 等。 $\alpha$  粒子相較一般常使用於放射性同位素治療的  $\beta$  粒子質量大、能量高 (~4-8.5 MeV)、射程短 (~25-100  $\mu$ m)，對周圍組織的穿透能力較差，因此能在短範圍內有效傷害癌細胞，同時減少對周圍正常組織的損傷。

### At-211(Astatine-211)

At-211 是一種會在衰變過程中釋放  $\alpha$  射線的放射性同位素，其原子序為 85，半衰期較短，約為 7.2 小時。

At-211 以人工合成方式所產生，利用能量為 30 MeV 的迴旋加速器提供  $\alpha$  射束撞擊金屬鉍靶(Bismuth target)產生核反應所製成，反應式如下:



At-211 衰變釋放的  $\alpha$  射線可應用於放射治療，除此之外，At-211 在衰變為子核 Po-211(Polonium-211)過程中會釋出能量範圍約 77-92keV 的 X-ray，利用影像接收器偵測這些 X-ray，則可以用於影像成像，了解放射性藥物在體內的分佈，利於臨床診斷用途以及危急器官劑量評估。

### At-211 的臨床應用

At-211 的  $\alpha$  粒子標靶治療主要期望應用於一些難以治療的癌症，尤其是對傳統癌症治療方法和放射性同位素藥物反應不佳或不敏感的情況。At-211

通常被標記到特定的載體分子上，利用其分子特異性結合到腫瘤細胞，將同位素藥物精確的傳送到腫瘤區域，對局部腫瘤造成傷害。

At 與 I(Iodine，碘)同屬元素週期表中第 17 族(鹵素元素)，化學性質較為相近，故研究與試驗常以 At-211 及 I-131 進行比較(如圖 9)

Radioiodine( <sup>131</sup> I) vs Astatine( <sup>211</sup> At)		
	<sup>131</sup> I (iodine)	<sup>211</sup> At (Astatine)
Types of radiation	Beta ray	Alpha rays
Biological effect ratio	1	5
Therapeutic effect	Mild to moderate	High
Range	Short	Extremely short
Gamma ray emission	Large	Small
Dosage (MBq)	Large	Small
Half-life	About 8 days	7.2 hours
Side effects	Mild	Mild
Hospitalization in a dedicated room	Necessary	No
Outpatient treatment	No	Possible*
Domestic self-sufficiency	No	OK

圖 9 I-131 與 At-211 特性比較(資料來源：Tadashi WATABE (Osaka University, Japan))

相比臨床上已廣泛使用的  $\beta$  放射性同位素 I-131，At-211 具有許多優勢，包括較高的 RBE(Relative Biological Effectiveness，相對生物效應)以及較短的射程距離，使得 At-211 在有效範圍內對癌細胞造成更大傷害，同時保護周圍正常組織細胞。此外，由於 At-211 僅有 7.2 小時的較短半衰期，給藥劑量小，釋放較少的  $\gamma$ -ray，這些特性對於治療後的輻射防護至關重要，病人在施以 At-211 的  $\alpha$  粒子標靶治療後，不必住進醫院的特定隔離病房即可安全返家，有助於減少病人本身與其家庭成員接觸到放射性物質的風險。

## 日本對於 At-211 的臨床試驗及其相關研究

日本正在進行一項由研究人員所發起的國內第 1 期臨床試驗研究，這是首次將 At-211 實際應用於人體，並預計於 2025 年 3 月 31 日完成該臨床試驗研究。該研究將 [At-211] NaAt 以靜脈注射方式治療放射性碘難以治療的甲狀腺癌患者，評估其安全性、藥物動力學、吸收劑量、療效等資訊，以進一步評估未來第 2 期臨床試驗研究的放射性藥物建議使用劑量。

有關 At-211 的輻射防護，由日本近畿大學細野誠教授所領導的厚生勞動省研究團隊進行了輻射防護的相關調查與研究。該臨床試驗方式是給予病人活度 700MBq/kg 的 [At-211]NaAt，估計出的有效劑量為：公眾 0.017 mSv (ICRP 及國際原子能總署(International Atomic Energy Agency ,IAEA)建議上限為 1 mSv)、病人照護者 0.072 mSv(ICRP 及 IAEA 建議上限為 5mSv)。

根據調查結果顯示，即使病人在接受 [At-211]NaAt 的  $\alpha$  標靶治療後立即離開輻射管制區，其輻射曝露仍遠低於劑量限度，並符合 ICRP 及 IAEA 對於公眾和病人照護者的輻射安全標準。

因此，病人不但能以門診方式接受 At-211 的  $\alpha$  粒子標靶治療，且在接受治療後不需要住院在輻射管制區內的特定隔離病房，即可立即返家。該研究的結論有助於確保病人在放射性同位素治療過程中達到有效的輻射防護，同時降低了對公眾和病人照護者的潛在風險。

另一項研究結果顯示，將 At-211 與現今同樣較為熱門的放射治療用同位素 Lu-177 和 Ac-225 進行相關特性比較，Lu-177 為  $\beta$  放射性同位素，而 Ac-225 與 At-211 同為  $\alpha$  放射性同位素；除此之外，相較之下 At-211 具有多樣臨床及輻射防護優勢，例如：小於十倍的半衰期、對周圍環境造成的劑量較小、治療後病人不須進行住院隔離、能選擇門診治療方式，並可以應用於醫學影像成像。

然而，儘管具有這些優勢，At-211 仍需經歷進一步的臨床試驗和研究，以及發展穩定的生產方式，以供應臨床使用。目前尚未正式應用於臨床放射治療，也尚未獲得美國食品藥物管理局(FDA)的認證。

At-211 放射治療藥物雖國際上尚未真正應用於臨床治療，但我國對於同為  $\alpha$  粒子標靶治療的 Ra-223、Ac-225 均已具備豐富管制經驗，也特別要求醫院於每次執行此類放射性藥物輻射作業後，皆應進行劑量率及污染偵測，在確保人員輻射安全之餘，亦確保輻射作業場所場域的安全。未來本會將持續關注國際發展動態，讓管制方法與時俱進。

### 三、粒子射束放射治療的發展與輻射防護

粒子射束放射治療(Ion Beam Radiotherapy, IBRT) 是近年來放射醫學界頗具關注的癌症治療方式，其為一種體外射束放射治療，以其帶電粒子(如：質子、重粒子)的物理特性為特色，實現精準且高劑量的腫瘤治療，減少周圍正常組織的輻射劑量。

至 112 年 12 月底，國內有 8 家醫院向本會提出 IBRT 使用許可申請，其中 4 家醫院(林口長庚紀念醫院、高雄長庚紀念醫院、台北榮民總醫院、台北醫學大學附設醫院)已取得使用許可證、2 家醫院(台灣大學醫學院附設醫院癌醫中心分院、中國醫學大學附設醫院)核准試運轉中、2 家醫院(彰化基督教醫院、台中榮民總醫院)核准建造中，除北榮使用重粒子治療模式外，其餘醫院皆為質子治療模式。

ICRP 在 2014 年發布了 ICRP 127 刊物，專門闡述 IBRT 的輻射防護，總結了相關原則並提出建議。

本次會議中，日本講者介紹了 IBRT 原理以及近期發展，同時分享了來自日本的相關輻射防護研究成果。自 ICRP 127 提出的 IBRT 輻射防護措施和建議，至今仍然是有效的。

## IBRT 介紹及發展現況

IBRT 的原理是使用帶電粒子(如質子或重粒子)來治療腫瘤細胞，帶電粒子相較傳統的光子放射治療，以其獨特的物理特性為治療優勢，IBRT 利用布拉格峰(Bragg peak)的特性(如圖 10)，在帶電粒子穿透至人體一定深度後才釋放大部分能量，形成高峰值的輻射劑量，最大程度的傷害癌細胞，提升治療精準性，同時因布拉格峰之後，帶電粒子的能量急遽下降，對周圍正常組織的損傷較小，相較於光子放射治療更具優勢。

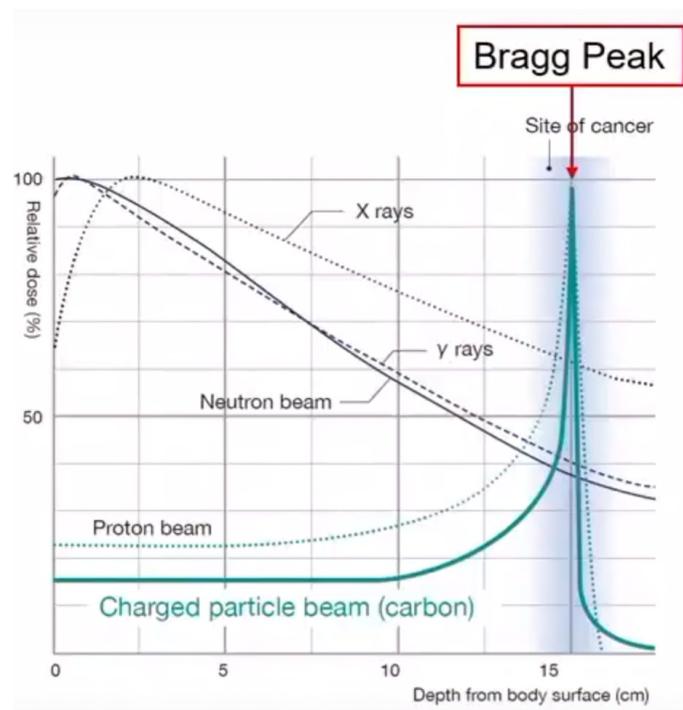


圖 10 帶電粒子之布拉格峰(資料來源：Tadashi WATABE (Osaka University, Japan))

截至 2023 年，IBRT 仍然是癌症治療的重要方式之一，並且全球約有 40 個 IBRT 設施正在興建中。根據粒子治療合作組織 (Particle Therapy Co-operative

Group, PTCOG)網站的統計，自 2014 年以來，全球 IBRT 設施的數量增加了一倍，累積接受治療的病人數量也成長了兩倍。

自 2014 年後發生了一項重大的改變，以掃描射束法(scanning beam method)取代寬射束法(broad beam method)的照射系統顯著增加，尤其是在碳離子放射治療(Carbon Ion Radiotherapy, CIRT)。眾所皆知，掃描射束法理論上可以提高射束到達患者的效率，並在輻射防護上取得相對優勢，例如產生較少的二次活化中子及較少的活化材料。其中緣由，主要在於寬射束法需要的照射裝置比掃描射束法多(如圖 11、圖 12)，而主射束會和這些設備相互作用，產生大量的二次輻射並活化設備零件。

現今許多碳離子放射治療設施與質子放射治療設施，皆配以掃描射束法的裝置，而非寬射束法裝置，這對於 IBRT 輻射防護來說是一項重大的進展。

全世界之粒子治療正處於蓬勃發展階段，目前我國擁有 1 座重粒子治療設施(臺北榮民總醫院)，其採用掃描射束法照射系統，有效減少因照射零件活化所造成的二次輻射，降低病人及醫護人員不必要的額外輻射劑量。且台灣重粒子治療設施亦有使用本次會議中所介紹之影像導引技術，應用於實際臨床醫治病患，有效提升放射治療精準度。

由於 IBRT 是一種相對較新的放射治療方法，目前尚無已發表的研究評估統計接受 IBRT 的病人基於流行病學數據的癌症繼發性風險。日本國立研究開發法人量子科學技術研究開發機構(National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, QST)將持續研究 IBRT 輻射防護，研究重點會在於 CIRT 的輻射防護。

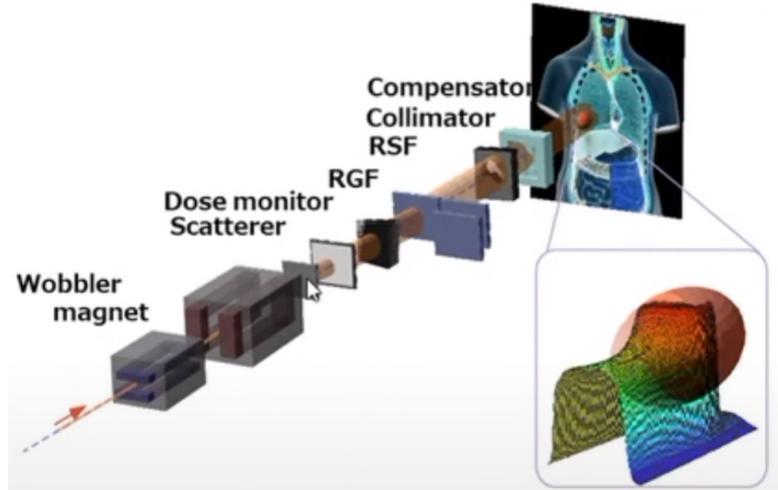


圖 11 寬射束法(broad beam method)的照射系統(資料來源：Tadashi WATABE (Osaka University, Japan))

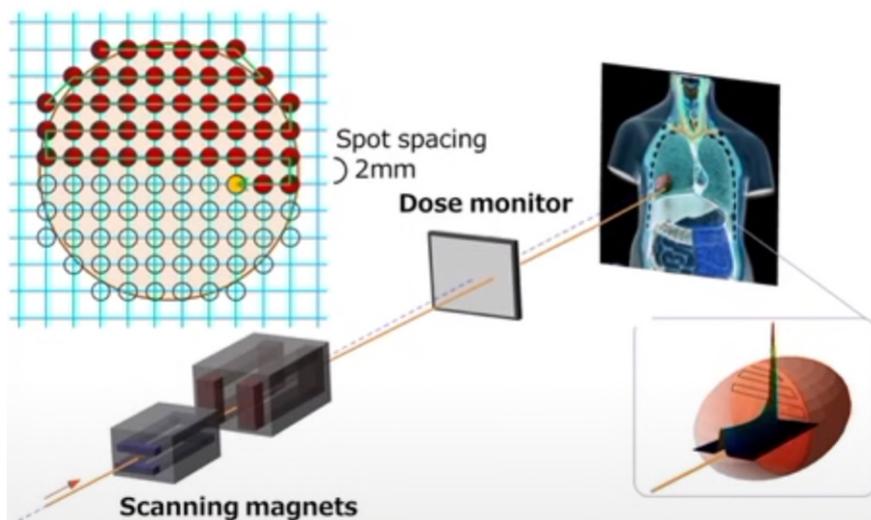


圖 12 掃描射束法(scanning beam method)的照射系統(資料來源：Tadashi WATABE (Osaka University, Japan))

### CIRT 二次活化中子劑量測定研究

研究方法係使用 WENDI-II 中子偵檢器進行測量，評估病人治療位置每治療劑量(Sv/Gy(RBE))的中子周圍等效劑量( $H^*(10)$ )，如圖 13。

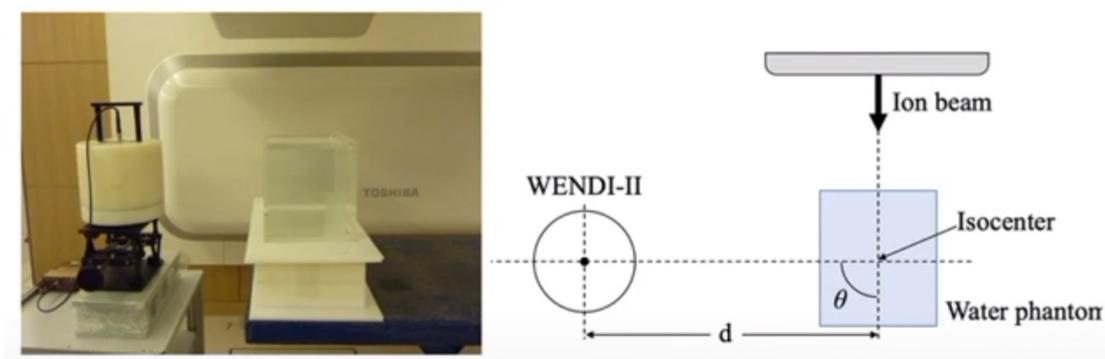


圖 13 以 WENDI-II 中子偵檢器評估中子周圍等效劑量(資料來源：Tadashi WATABE (Osaka University, Japan))

首先，以 400MeV/u 碳離子射束進行照射，探討掃描射束法與寬射束法所造成的劑量差異。研究結果顯示，採用掃描射束法產生的中子劑量低於寬射束法的百分之十，且距離主射束軸心越遠，劑量差異更大(如圖 14)。

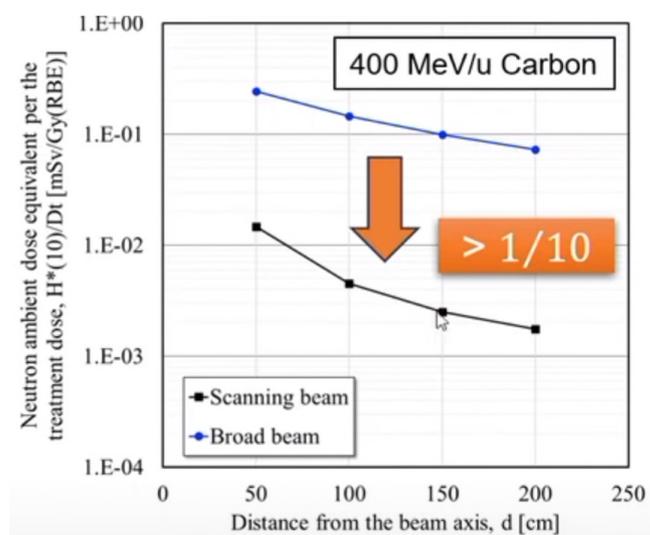


圖 14 掃描射束法與寬射束法中子周圍等效劑量評估(資料來源：Tadashi WATABE (Osaka University, Japan))

另一項研究，係探討 IBRT 中，採用不同帶電粒子(質子及碳離子) 以掃描射束法照射所造成的劑量差異。研究結果顯示，碳離子放射治療的中子劑量約

為質子放射治療的百分之六十。除此之外，倘若改為採行寬射束法進行照射，質子放射治療產生的中子劑量為碳離子放射治療的兩倍以上(如圖 15)。

總結來說，在選擇放射治療方式時，不同的粒子和射束照射方法將對於治療中產生的中子劑量有顯著的影響。

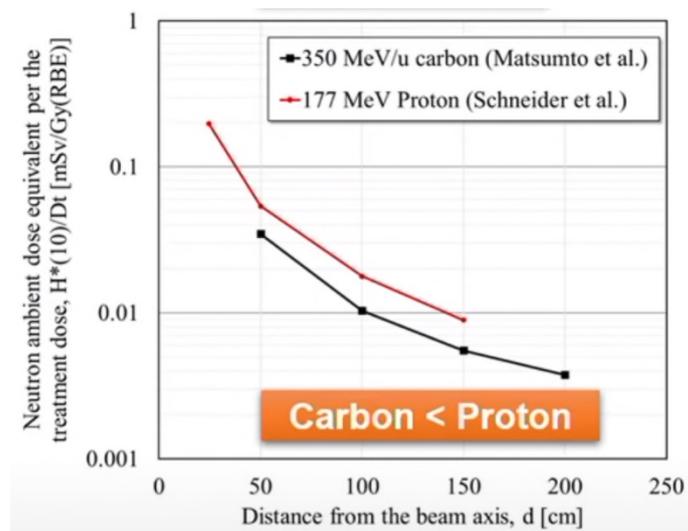


圖 15 質子及碳離子中子周圍等效劑量評估(資料來源：Tadashi WATABE (Osaka University, Japan))

### 多重離子放射治療(Multi-ion Radiotherapy)

使用多重離子射束的 IBRT 具有優越性，能透過不同離子射束劑量分佈及特性差異，實現強度調控並優化放射治療計畫，提高局部腫瘤控制效果，這種治療方法有望克服部分腫瘤缺氧或對輻射反應不佳，而導致治療效果不佳的問題。

目前日本 QST 正在進行多重離子放射治療的研究，所使用的離子包含：氦(He)、碳(C)、氧(O)、氖(Ne)。研究結果顯示，相較於質子射束，這些離子射束的照射產生的中子劑量較低(如圖 16)，有助於提高治療的安全性。

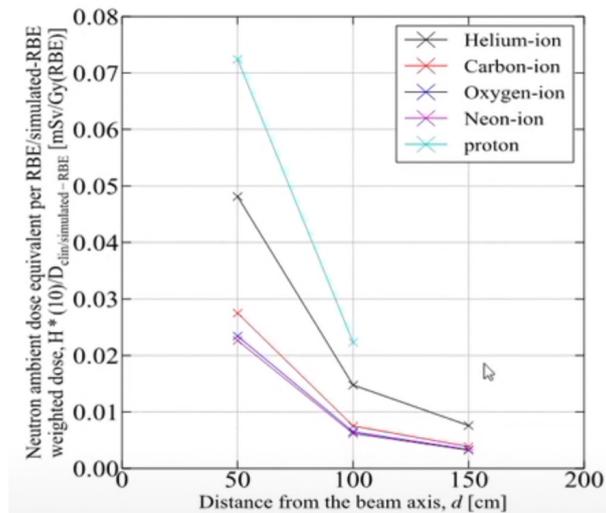


圖 16 多重離子放射治療中子周圍等效劑量評估(資料來源：Tadashi WATABE (Osaka University, Japan))

#### 四、重粒子放射治療影像導引技術

重粒子放射治療(Heavy Ion Radiotherapy)是近年來放射治療界的熱門話題。日本量子科學技術研究開發機構(QST)設立之醫院，自 2011 年開始進行碳離子放射治療(Carbon Ion Radiotherapy, CIRT)，接受 CIRT 的病人數目每年逐漸增加，QST 醫院每年約有 900 位病人接受這項治療，其中百分之四十搭配使用了影像導引技術放射治療(Image-Guided Radiotherapy, IGRT)。

考量評估放射治療位置偏差、建立病人器官運動模型、監測不同時間器官位置變化，以及在治療計畫中實施適當的因應策略等方面的困難，這些因素為重粒子放射治療的影像導引技術帶來了一系列挑戰。因此，解決技術層面的困難，並發展更多元的技術，將其相互搭配利用，對提高重粒子放射治療的效果和安全性具有重要意義。

## 重粒子放射治療(Heavy Ion Radiotherapy)

重粒子放射治療是離子射束放射治療(Ion Beam Radiotherapy, IBRT)的一種，使用重帶電粒子(如:碳離子或氦離子)進行體外放射治療。其具有帶電粒子獨特的布拉格峰特性，相較於傳統的光子放射治療，重粒子在穿透人體到達腫瘤細胞時，才釋放高劑量，且劑量在腫瘤細胞之後急遽下降，可減少對周圍正常組織的損傷。

### 影像導引技術應用於重粒子放射治療中的重要性

病人治療位置以及治療中移動器官位移的準確性，在重粒子放射治療中至為重要，任何位置偏差或劑量誤差都可能影響癌細胞治療療效，甚至導致周圍正常組織不必要的劑量。

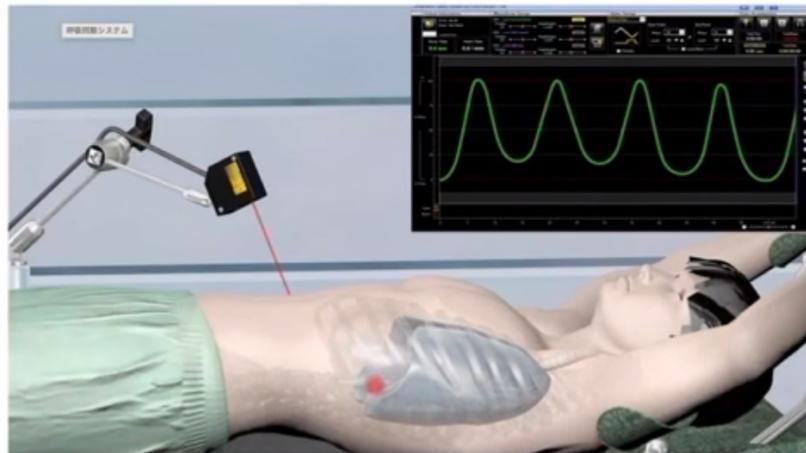
引入放射治療影像導引技術(Image-Guided Radiotherapy, IGRT) 能夠透過影像融合技術，精準定位病人治療位置並實時監測器官移動，從而提升治療精準度。

IGRT 技術在傳統光子放射治療和重粒子放射治療中的應用基本原理相同，主要差異在於射束穿透深度範圍和對不同組織器官密度變化的敏感性。

### 重粒子放射治療影像導引技術應用於肺部腫瘤的挑戰

在特定情況下，例如肺部區域的腫瘤治療，由於腫瘤和肺部組織之間存在較大的組織密度差異，短時間內(幾秒鐘)即可能因呼氣和吸氣運動造成肺部大幅度位移，這種情形下，IGRT 的應用將成為重粒子放射治療中的研究重點。IGRT 將有助於追蹤肺部組織的移動，使治療更加準確，同時最小化對周圍正常組織的影響。

為了監測病人因呼吸而造成的器官位移，藉由門控治療(gate treatment)的體外呼吸監測系統(External surrogate system)直接監測病人體表(如圖 17)，可以得到病人在吸氣和呼氣期間的訊號並提供即時生理資訊(如圖 18)，從而分析體內腫瘤細胞移動，有助於更準確地調整治療計劃，以應對呼吸相關的組織移動，進一步確保治療的效果和安全性。



<https://anzai-med.co.jp/az733vi/>

圖 17 體外呼吸監測系統(資料來源：Shinichiro Mori (QST, Japan))

### 重粒子放射治療醫學影像系統

重粒子放射治療常使用的醫學影像系統，包含：4DCT(Four-Dimensional Computed Tomography，四維電腦斷層掃描)、透視 X-ray(X-ray-fluoroscopy)、CBCT(Cone Beam Computerized. Tomography，錐狀射束電腦斷層影像)、In-room CT(治療室內電腦斷層掃描)等多元化的醫學影像系統，依據臨床治療需求搭配選擇不同的影像，滿足不同放射治療需求。

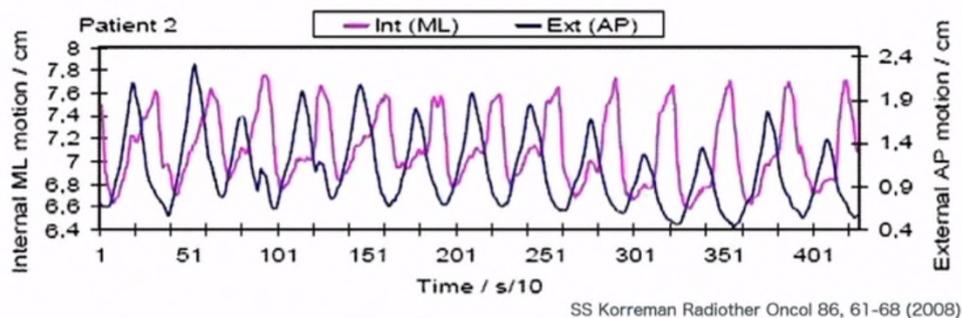


圖 18 病人吸氣與呼氣間訊號的關係(資料來源：Shinichiro Mori (QST, Japan))

我國所擁有之 1 座重粒子治療設施 (臺北榮民總醫院)，於病人治療前亦會使用醫學影像系統去確認要治療的位置。前述四種醫學影像系統中，臺北榮民總醫院重粒子治療設施可透過 4DCT、透視 X-ray 及 In-room CT 進行取影像對位，讓病人得到最佳的治療。

在眾多醫學影像系統之中，唯一能同時滿足空間解析度和時間解析度的是使用 X-ray 的透視影像系統，能夠應用於透視門控治療，並可即時追蹤影像上所設定的腫瘤標記位置，觀察腫瘤標記與呼吸起伏間的移動情形。

透視影像技術納入重粒子放射治療後，期望透過結合 4D 治療計畫、影像處理和未來欲發展的機器學習技術，在提升影像品質與治療精準度的同時，降低病人所接受的劑量。

## 參、日本國內天然輻射管制實務

自然環境中廣泛存在著天然輻射源，包含宇宙射線、地表輻射的天然放射性物質、氡氣等等，儘管一般民眾工作不倚賴游離輻射，仍然會受到游離輻射的曝露，在一般情況下，這些天然的輻射源因無法管制或是不會造成有危害民眾輻射安全的疑慮，所以通常是排除管制或是豁免管制。隨著人類的經濟發展，導致越來越多的天然放射性物質從地層內被帶到地表，雖然 ICRP 與 IAEA 都有提出相關的管制建議，然而這些天然輻射來源有部分已經歷史悠久且融入該地的民族文化內，例如日本的溫泉，因此管理的力道及方式應該依各國的國情、歷史文化及社會接受度的不同而因地適宜。藉由本次前往日本參加第七屆國際輻射防護體系研討會的機會，拜訪東京大學新領域創成科學研究所飯本武志教授，以了解日本國內目前天然輻射管制實務。

以下就目前日本天然輻射管制實務進行說明，其中包括負離子商品及航空人員劑量管制部分，將有助於本會了解日本國內管制方式，未來在推廣國內相關規定時將可用以借鏡，茲說明如下：

### 一、負離子商品

#### 日本政府對於負離子商品的管制

在日本國內，聲稱會產生負離子的商品也是非常具有人氣的商品，具有一定的擁護者與受眾，雖然 ICRP 和 IAEA 都曾提到，基於輻射防護三原則，於商品內刻意添加負離子粉是不具有正當性的，日本政府也同意他們的觀點，但管理仍然需要基於公眾的需求和理解以及該地的歷史和文化。總而言之，在負離子商品還沒有確定對人體有害以前，日本政府認為不必嚴格管制。考量在日本境內這些負離子商品非常熱賣，嚴格管制的手段和

法令將對許多企業的生產造成嚴重衝擊，相關法令的制定，還是必須取決於國家的文化和歷史。

日本政府認為應該順從文化，在還沒證明負離子商品會對民眾產生嚴重健康危害之前，應該順應人民意願，基本上只要不超過導則所提供的標準，不宜強制性管理，因此僅以導則的方式讓生產此類商品的業者有所依循和參考。在確認該產品為一般消費性產品（也就是不以放出輻射為目的的材料，例如前言所說的負離子產品，如表二），導則中建議使用每年一毫西弗的一般人劑量限度，但如果是以放出輻射為目的的材料（例如實驗室耗材等）則採用較嚴格的 10 微西弗作為建議值。

日本的管理方式，是採取管理從業者的方式，透過跨部會合作蒐尋可能涉及負離子商品的公司，將導則交給這些公司，並對公司告知其所使用之原料及商品會造成輻射曝露，為避免員工於工作時受到過多的輻射曝露，請公司依照導則進行管理。而導則的制定大約分為 3 步驟：

- 1.調查市場上可能具有輻射的產品種類，涉及其製造的公司以及自高輻射風險地區輸入商品的從業者。
- 2.對於涉及上述對象的公司負責人及其員工進行輻射相關資訊的教育，並同時向大眾教育輻射相關資訊，提升全體民眾對於輻射的認知。
- 3.制定此類商品相關管理的標準導則，並提供給從業者進行自主管理。

目前日本政府提供給公司的導則，僅針對鈾和鈷等 2 種天然放射性核種進行管理，該導則規範的對象是製作含有天然放射性物質商品公司的員工，並沒有規範到商品的公眾曝露，並且該導則目的與精神是為了保護從業者的輻射安全，並沒有強制性和罰則。

表二 天然放射性物質的分類及建議對策

類別		需要檢討的事件	除外、輻射作業、干預的區分	法律管制	對應的方式	考量對策時的劑量參考值
一	未經過加工處理的天然礦石中，所含的天然放射性物質	庭園石頭、研究用礦物樣品、博物館中所有礦物樣品、河川或工地的礦石	排除	否	----	----
二	過去廢棄的含天然放射性物質的殘渣	鈦工廠等過去廢棄的殘渣或不法丟棄的殘渣	干預	否	行動基準 (Action level)	將來檢討 (1~10mSv/年)
三	工廠產生的灰、鐵垢等(原料物質活度在豁免管制以下者)	煤灰(含飛灰)、油田、汽田的鐵鏽污垢、鋼鐵廠的爐渣	干預	否	行動基準	將來檢討 (1~10mSv/年)
四	工廠產生的殘渣、目前開採中的礦山殘土、廢土	獨居石、研磨材料、磷礦、鈔、鈾礦、鈾礦、鈾礦、煤礦及其他一般商品的原料等	輻射作業/ 干預 <sup>註1</sup>	是	<ul style="list-style-type: none"> <li>●先確定可能超過某特定活度的物質。</li> <li>●使用特定物質時，依據工作人員或民眾所受的劑量，訂定適當的輻射防護管理方式。</li> </ul>	1mSv/年 (檢討超過此值時應採取管制或干預)
五	工業用原料(製造、生產能源)、開採		輻射作業/ 干預 <sup>註1</sup>	是	與分類4相同	1mSv/年 (同上)
六	一般商品(使用)	溫泉素、健康器具、寢具、衣類、塗料、壁爐架、汽車用觸媒、耐火物、研磨材料、肥料、水垢	輻射作業	依各商品檢討是否納入管制	基本上適用 BBS 豁免管制標準  檢討類似「公告豁免」制度	10μSv/年  1mSv/年
七	以利用所放出的輻射為目的，精製而成的核子燃料物質及射源	核子燃料物質(鈾、鈾)、鐳等	輻射作業	是	適用 BBS 豁免管制標準	10μSv/年
八	氫氣	管制內的鐳射源所產生的氫氣	輻射作業	是	適用 BBS 豁免管制標準	----
		核子原料物質礦山中工作環境的氫氣	輻射作業	依礦山保安法管制	----	----
		住家以及上欄除外的一般工作環境	干預	否	行動基準	將來檢討

註1：基本上是屬於輻射作業的範圍，但輻射作業及干預兩要素都具備，在操作原料的初期過程，干預的要素較重要。

資料來源：財團法人中華民國輻射防護協會

## 二、宇宙射線

宇宙射線為常見的天然游離輻射來源之一，主要由 83 %的高能質子，16%的阿伐粒子及其他高能粒子所組成，稱為一次宇宙射線。一次宇宙射線與大氣層中的空氣分子碰撞後產生二次宇宙射線，其中包含電子、質子、中子、光子等粒子。因為輻射是來自地球外部，因此宇宙射線在距離地表越高的位置，其強度就越強，所造成的劑量也就越高，據研究大約高度每上升 6000 呎，其劑量率就會增加一倍。此外因為地球磁場的影響，在同一高度時緯度越高的地方，宇宙射線強度越高。

### 航空人員輻射劑量監測

在 1993 年，UNSCEAR 提出了航空公司機組人員和乘客劑量的相關報告。航空機組人員的輻射曝露劑量來源主要是來自於一次宇宙射線，由於一次宇宙射線在高空時會與大氣層發生反應，絕大部分的一次宇宙射線此時就被大氣層吸收掉，能到達地表少之又少，因此一次宇宙射線對於生活在地表附近民眾的輻射曝露可予忽略，但對於高空航空作業，特別是高緯度長途國際航空來說，其輻射劑量據評估會高於一般民眾每年一毫西弗的劑量限度，因此 UNSCEAR 出版的「Sources and Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 Report」報告中，將航空人員納入職業輻射曝露中進行評估。

### 日本政府對於航空人員的管制

目前日本國內對航空人員輻射劑量的管制手段不是以法律規範，而是由政府提供給各航空公司相關導則，並對航空人員的劑量評估方法、教育、劑量管理、後續健康管理等方面提出相關建議。導則的推行，是由政府先發函各大航空公司，告知其有關航空人員的輻射曝露，為確保航空人之輻射安全，請依照

相關導則執行管控，而後續的管理與劑量數據統計等是由航空公會或是各航空公司內部自主管理，而非政府介入管制。日本政府發函告知新的管制方向以後，航空公會與公司基本上都會據以執行，並且也會對新入職的空服人員進行輻射知識教育，避免員工對航空人員的輻射曝露有不必要的疑慮，目前政府僅針對航空人員提出導則，並沒有對一般民眾的航空輻射防護提供相關導則。

日本提供給航空公司的導則包含五個項目：（1）航空人員的劑量管理；（2）航空人員的劑量評估方法；（3）對航空人員進行宇宙輻射曝露的講解與教育；（4）檢視、記錄及保存航空人員的劑量資料；（5）航空人員的醫療保健管理，其中航空人員的劑量評估方法，是交由日本各家航空公司依導則所建議的方法，自行建立輻射劑量評估系統，輸入出發地到目的地的資訊並依據航空人員出勤的頻率及飛行距離等資訊推算輻射劑量。

## 肆、心得與建議

本次研討會於 2023 年 11 月 6 至 9 日在日本東京台場大飯店舉辦，為期 4 天，討論議題相當廣泛成果豐碩，包含輻射劑量模擬模型技術的發展、重粒子應用和各種醫用輻射技術的新發現。參與此類國際輻射防護與管制技術相關會議不僅是拓展輻射防護視野的重要途徑，同時也讓各國在長時間的研究中積累的寶貴經驗在會議上得以充分展示，使與會人員能夠快速吸收這些寶貴的經驗，在既有的思考邏輯中帶來更新穎的輻射防護觀點，有助於我們更有效應對當前和未來可能面臨的輻射防護挑戰。

此次前往訪談飯本教授，機會實屬難得，教授在天然放射性物質的研究方面具有相當的成就，曾於許多國際期刊上發表過很多與天然放射性物質相關的文章。本次與教授訪談，了解日本國內對於負離子商品以及航空人員的管制方式，對於本會未來相關管制方向有重大的幫助。

本次國外出差行程，建議事項如下：

1. 持續參加國際研討會議，掌握世界輻射最新知識、技術及防護觀念，以促進國內輻射應用及輻防觀念的提升：

隨著科技不斷的發展，輻射的應用與防護不斷更迭，期許透過持續派員參與更多相關的國際會議，不斷精進學習與交流，根據國際最新技術和趨勢滾動修正並回饋至我國的管制需求，使得我國輻射安全管制標準與國際接軌，達成確保民眾輻射安全的最終目的。

2. 持續關注國際放射治療技術於國際發展動態情形，完善相應之管制措施，把關國內醫療輻射安全：

我國於醫療輻射之發展應用及管制一直以來跟隨國際趨勢不斷精進與提升，國內現已既有的醫療輻射源相關技術及其輻射防護，均依據國際最新的

建議，採行有益於病患及醫護人員的方式進行臨床治療；而對於國際尚在發展中的醫療輻射應用，透過參與相關國際會議，不斷與時俱進並持續關注國際發展動態，以因應未來可能面臨之輻射防護挑戰，確保創造安心無虞的輻射安全醫療環境。

3. 持續關注國際天然放射性物質與航空人員劑量之管理趨勢，研析各國相關實務管理做法，以推動可行且合理之輻防管理措施：

天然輻射的管理，各國都應依其國情及文化的不同而採取相對應的管理力道及方式，而日本對於航空人員或是負離子商品的做法，都是向有關公司提供導則，再與從業人員教育輻射知識，以確保從業人員對自身的輻射安全有一定認知，特別是針對負離子商品的管理，日本認為在沒有確切的科學證據證明此類商品對人體的健康有危害之前，管理手段較宜採取循序漸進的方式。本次參訪了解到日本特殊的國情及其管制實務，應多研析各國管制實務，以推動可行且合理之輻防管理措施。