

核子醫學

吳和修

藥學系第四屆校友
榮總核子醫學部

一、前言

核子醫學即核能之醫學用途，應用核能之特性於醫學的診斷與治療。目前核子醫學偏重於穿透力最強之伽瑪射線應用，大部份做診斷工作（約佔 95%）。因核子醫學的診斷方法能夠探察醫生沿用已久的 X 光檢查方法所未能察出的病灶，更能簡單而迅速地遂行 X 光檢查或生化檢驗所無法施行的臨床動態功能測定。因之很快地已經成為現代醫學診斷的最可靠方法之一。

放射性同位素的追蹤觀念是核子醫學的基本原理，如何能由體外探測事先所給予病患微量放射性同位素在體內的遊踪，以獲得病灶的確實位置、大小和其功能變化情形；又如何能測出目前生化方法無法測出之體內血液中微量生物物質，以及體內放射性同位素變化之靜態形像及動態功能影像追蹤，均有賴於核子醫學儀器之高靈敏度、自動化及計數電腦處理之發展。由於閃爍攝影機及短暫半衰期之放射性同位素應用成功，核子醫學得能有今日之突破性進步。因此，核子醫學儀器的進展與放射製藥化學的研究已成為核子醫學突飛猛進的兩大棟樑，本文僅就前者加以討論。

核子醫學儀器可分為兩大類：形像掃描與攝影和放射性計數與偵測。

二、形像掃描與攝影

由放射性探測儀器攝取某一器官內放射性物質隨血流分佈的圖形稱為掃描（Scanning）。早在 1950 年左右就有最簡單的甲狀腺掃描機，利用放射性同位素碘-131 給病患口服後 24 小時（或依診斷需要也可在服後 3, 6, 或 12 小時），甲狀腺體內已攝取相當量放射性碘，能發射出伽瑪射線，穿透組織、肌肉及表皮而輻射於掃描機之探測器（Detector），經一連串的電子裝置處理，可在記像紙或軟片感光獲得該甲狀腺之形像。於 1956 年由於探測器內晶體之不斷改進發展及記像裝置之機械性進步，其他較大的器官（如肝、腦、肺、腎）掃描都研究成功。當今的器官掃描機已成為臨床診斷檢查所不可缺的有利儀器。計有兩大類：直角線性掃描機（Rectilinear Scanner）和閃爍攝影機（Scintillation Camera）。

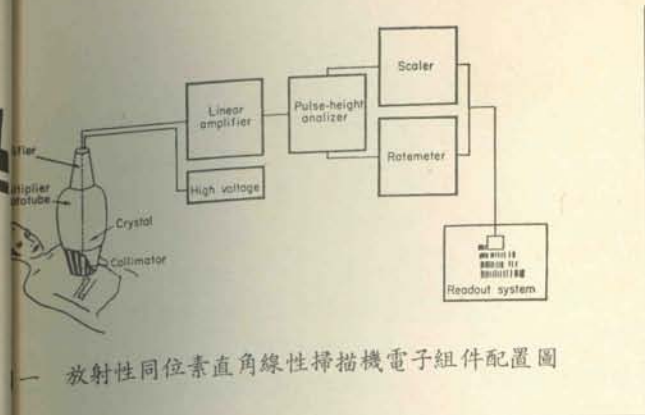
I. 直角線性掃描機 (RECTILINEAR SCANNER)

首先由美國人 Benedict Cassen 於 1951 年發明，以圖一表示其各主要組件之配置來說明其原理。當探測器組合在病患身體的某一器官上橫軸方向來回移動而向縱軸推進，受到由該

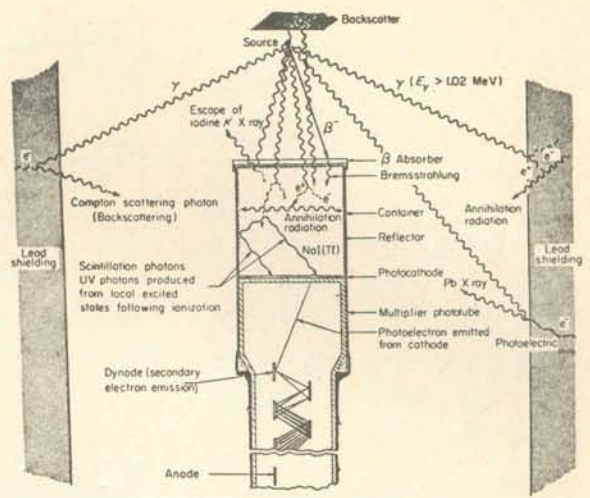
器官發射出之伽瑪射線輻射，經鉛射線柵（Collimator）將散射的射線吸收，使得射線經由射線柵的孔道向輻射於探測器內之碘化鈉（NaI 晶體（Crystal）），激發其分子內各道層之電子，使成為不穩定狀態（有額外能量）而釋出電子，打擊光倍生管（Multiple photo tube）之倍生極逐次加倍增加光子數，而集成無數的光子束（見圖二）。再經電流擴大器（Amplifier）擴大訊號電壓，而由訊號選擇器（Pulse Height Analyzer）選擇在某一特定電壓範圍內之訊號，輸入入記像裝置一點成像（dot recorder）或感光像（photo recorder）記錄其各訊號所匯集成的影像。

A. 探測器與射線柵組合（DETECTOR-COLLIMATOR ASSEMBLY）

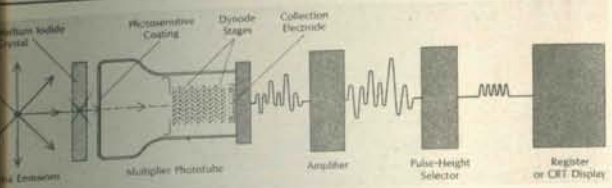
在探測器組合內之鉛質射線柵隨使用目的任意更換。其主要功用於摒除散射之射線，使射線能遵循射線柵之孔道進行，輻射於整面晶體得到最好的解像力（Resolution）通常射線柵內之孔道直徑越大，其像力越差。反之，其靈敏度越高。兼顧兩者即是最適當的設計，目前焦點校正射線柵（focusing collimator）最適用。影響射線柵之解像力和靈敏度之因素除射線柵之型式



放射同位素直角線性掃描機電子組件配置圖



圖二 光電倍增管將放射線轉變為電子訊號之機轉



，尚有其與射源之幾何配置比及其透過性兩大因素。

1. 焦點校正射線柵

當今的直角線性掃描機都採用此種射線柵。此射線柵面內每一六角形之孔道的中心延長線均匯集成一焦點。此點的水平面稱為焦點面 (focal plane)，焦點至射線柵表面之距稱焦點距 (focal length) (如圖三)。假如以一伽瑪射源距射線柵表面不同距離處進行計數 (counting)，經無數次計數，可繪出如圖四之等計數率曲線圖。由此可知，在焦點時之計數率最高，即若器官平放於該射線柵之焦點面上，經掃描可得到最理想之影像。然而，實際上在 50 % 的等計數率曲線上各點均能獲得最好的解像力。

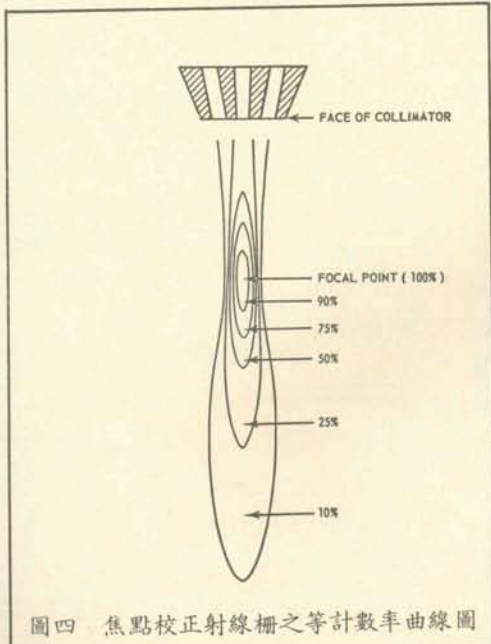
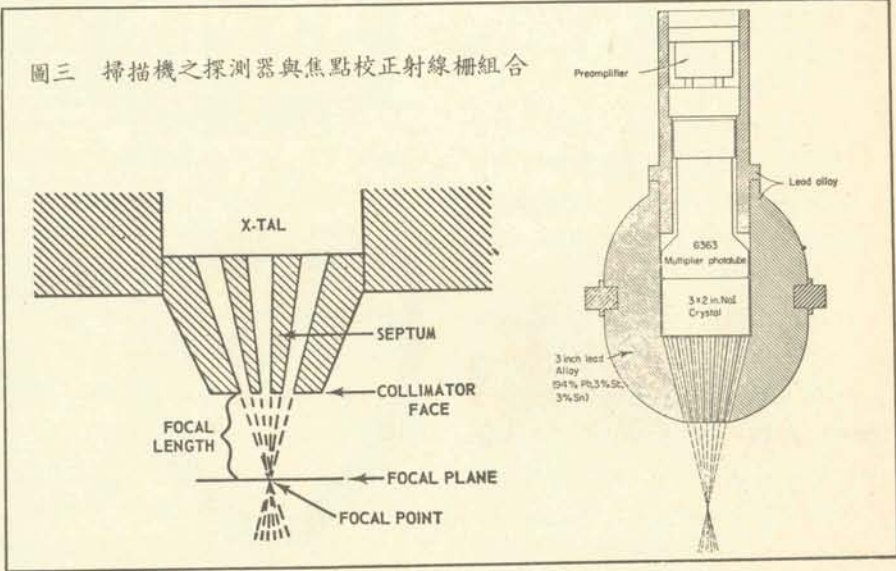
2. 幾何配置比 (Geometry)

射線柵正面面積與射源距該正面所處的半球面積之比稱為幾何配置比。通常此比值越大表示此射線柵越靈敏，即射源距射線柵正面越近越靈敏，但解像力就越差。又幾何配置比與探測器內之晶體直徑大小成正比，但與距焦點面之遠近成反比。一般應用上，以直徑 5 吋之晶體最適當。

3. 透過性 (Transmission)

因為射線柵是鉛質品，當然會吸收一部份射線，減少射線所照射的晶體面積，因之亦減低此探測器之探測

圖三 掃描機之探測器與焦點校正射線柵組合



圖四 焦點校正射線柵之等計數率曲線圖

效率。一般約為 40% 至 60%。在一定透過性的射線柵之解像力，完全決定於其所含有的孔道數目，孔道愈多其解像力愈好。因而，射線柵內之孔道都設計成六角形，以能夠在一定的圓面積內獲得為數最多的孔道，增加其透過性。但，孔道間之距離 (septum) 有其厚度極限，因所使用的珈瑪射線能量強度而有所限制。即高能量之同位素須用間距較厚的射線柵，才能獲得最理想的影像。

B. 掃描機記像之原理

有兩種記像的裝置：匯點記像及感光記像。

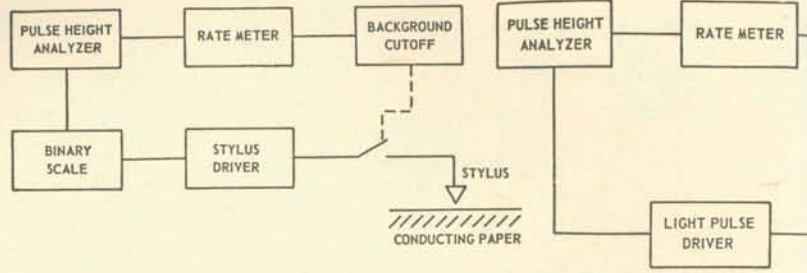
1. 匯點記像 (Dot Recorders)

(a) 電子灼筆匯點記像 (Electronic Stylus dot recorder)

每當由探測器送來一訊號，經由如圖五電子裝置之層層處理後，而在導電性的記像紙上，由於訊號傳送引起瞬間電壓改變而燒灼成黑點。圖五內之除二線路 (Binary Scale) 將由訊號選擇器得來之訊號，每八個轉送一訊號給電子灼筆，而在導電紙上燒一黑點。即具有減低計數率之功效，使電子灼筆不致於因放射性太強，應接不暇而癱瘓。又另一限制計數的電子裝置為週遭計數減率 (background cut off)，設定某一比較電壓，超過該設定電壓的訊號，方能通過該線路而使電子灼筆之開關發生作用。隨着訊號電壓的強弱，電子灼筆燒灼導電紙的程度亦有黑白層次的區別。該設定電壓以全計數率之百分比表示，如計數率錶全開為 3,000 CPM (每分鐘內之計數)，週遭計數減率定為 10%，則計數率必須超過 300 CPM 之訊號，才能由電子灼筆在導電紙上記上黑點。由於上述兩項限制訊號之電子裝置的作用，而能獲得黑白層次分明的掃描影像。

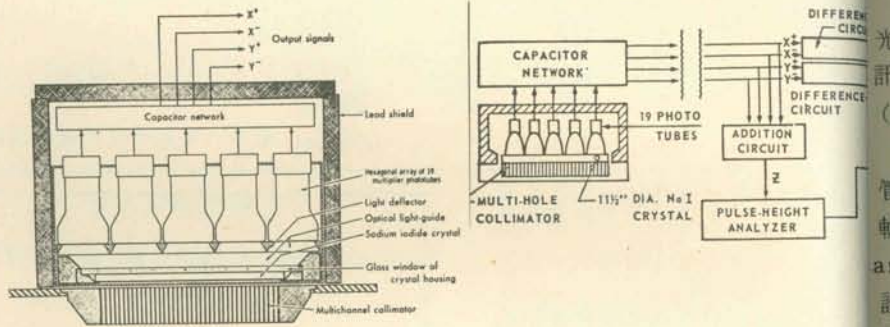
(b) 彩色匯點記像 (Color Dot Printer)

由探測器來的訊號，經一連串電子線路處理後，依實際計數之強弱，由電磁化線圈 (Solenoid) 使相應某

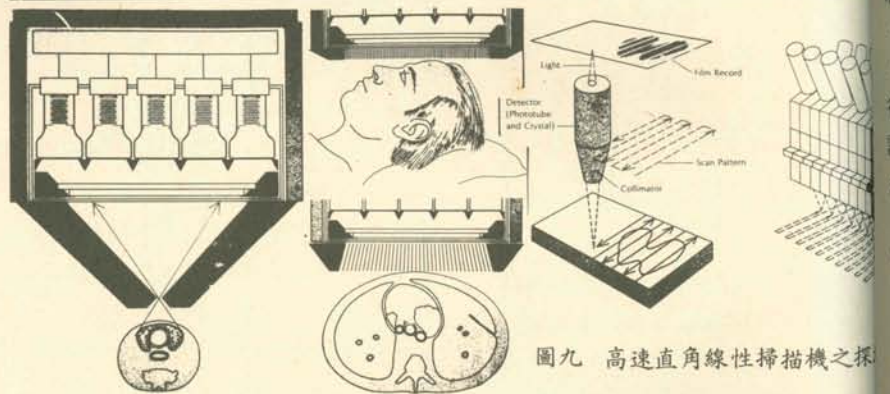


圖五 電子灼筆匯點記像原理

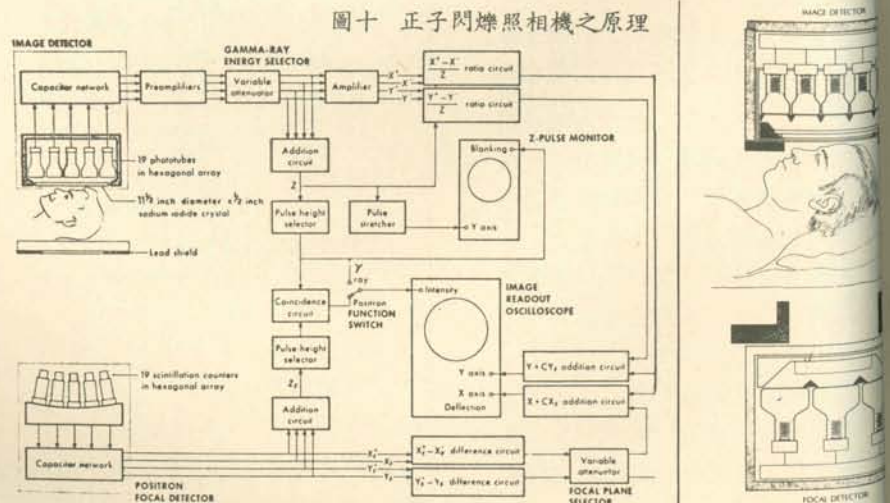
圖六 感光記像原理



圖七 閃爍珈瑪照相機之探測器組合及其電子組件線



圖八 閃爍照相機用探測器及射線柵 (右圖為實物)



圖十 正子閃爍照相機之原理

一顏色上的觸筆磁化，而被放紙張之鐵板吸下成色於該紙上。或用壓力敏感紙可以複印出掃描形像。若色帶有八種（或九種）顏色，每一訊號選擇某一顏色，如為紅色，表示該訊號是放射性最強即計數率最高。依計數率高低逐次記錄成八種顏色的形像。

2. 感光記像 (Photographic recorder)

如圖六簡單電子線路圖可說明感光記像之原理。探測器送出之訊號經訊號選擇器選擇後，分送入計數率錶 (rate meter) 及光搏起動器 (light pulse driver)，而激發陰極射線管 (Cathode ray tube) 發出射線使軟片感光記像或以拍立得相機 (Polaroid Camera) 拍下相片，立刻可供診斷參攷。陰極射線光之強弱，依其選定時間常數產生直流電訊號，經直流電擴大器放大電壓，而激發陰極射線管發出光線。至於軟片之曝光時間，則由光搏起動器來決定，約在 $1 \sim 150 \mu\text{Sec}$ 之間。但此曝光時間，往往與病患器官內之放射性活性強度即計數率高低及掃描速度有密切關係。這種種因素都決定陰極射線光之強弱，而能獲得該器官內放射性物質之分佈情形。

3. 其他記像裝置

尚有儲存性顯像管成像，如彩色電視之利用，保留性影像管，以及磁帶錄影。還有最新發展的超微粒軟片感光記像 (Micro dot photo recorder)。

II. 閃爍伽瑪射線照相機 (SCINTILLATION GAMMA CAMERA)

因為直角線性掃描機之探測用晶體很小，直徑只有 3 吋或 5 吋，其靈敏度不夠。若掃描大器官需費時約 1 小時之久。故於 1958 年美國人 Hale O. Anger 研究製作成功一種碘化鈉晶體直徑約為 11 吋半厚為 $\frac{1}{2}$ 吋的大型探測器，足以涵蓋人體內某一器官，並利用拍立得相機，終於提高了器官閃爍攝影的速度，約比一般掃描機

快三倍。此種閃爍照相機的原理和掃描機一樣，惟探測器內之晶體較大，光電管為數有 19 或 36 支。故非但保有很好的解像力，並提高其照相之靈敏度。

A. 探測器與射線柵組合

此探測器組合可以圖七說明。該項晶體是經鈦 (Tallium) 活化之碘化鈉晶體，其經伽瑪射線激發產生很強的閃爍光，由光電管接收而逐次擴散成一束巨大的訊號，導入電流擴大器再加強成高電壓，使陰極射線管依光電管所發出之每一訊號在螢光幕上形成相應強度的光點，供攝影裝置或錄影帶記下形像。因為使用 19 支光電管，須有一電容線路將其發出的訊號分成四部份如 X^+ , X^- , Y^+ , 和 Y^- 來組合成相對應位置的訊號而成形像，如圖七的線路配置。 X^+ 和 X^- 訊號經減差線路形成 X 軸方向之形像，同理， Y 軸方向之形像亦由 Y^+ 和 Y^- 訊號組合而成。然而 Z 軸方向之訊號經相加線路再經訊號選擇器選擇某一定範圍內之電壓波，成像於影像管，由拍立得相機照相，供診斷之參攷。至於所用的射線柵分多孔平行柵及針孔聚光柵二種。前者用於肝、腦、腎、肺等較大器官攝影。後者專用於甲狀腺或較小部份器官之照相。如圖八。

1. 多孔平行柵 (Parallel multiple hole)

(a) 低能量射線用：

該射線柵含有 4000 個平行方形孔，供一般最常用之放射性同位素— Tc-99m (鎝-99m) 之肝、腎、及腦閃爍攝影用。

(b) 高能量射線用

(i) 收斂柵：為平行圓孔有 1,000 孔，孔道向外會聚成收斂狀。

(ii) 擴散柵：有 1,000 孔，由孔道向外擴散，因其晶體所見視野較廣，供較大器官如肺部攝影。

2. 針孔聚光柵

供甲狀腺和小器官作更清晰的攝影，其原理與一般照相機之針孔原理一樣。

B. 閃爍攝影記像裝置

與掃描機之記像原理一樣，目前有一最新裝置—超微粒軟片感光成像。

C. 電腦數據處理 (Computer Data Processing)

因放射性同位素隨時都在衰變，其衰變的情形可以其計數表示。故可以用電腦將數據儲存，再加以分析，以了解放射性在某器官內的分佈情形，供臨床診斷研判。尤其對於臨床動態功能檢查最為方便且確實。

D. 目前閃爍攝影機之發展

1. 光電倍增管數目之增加，以提高其解像力。現已增為 36 支。

2. 多晶體式探測器，由數個較小的晶體組合成一大探測器，提高其靈敏度及解像力，更利於臨床動態功能檢查之應用。

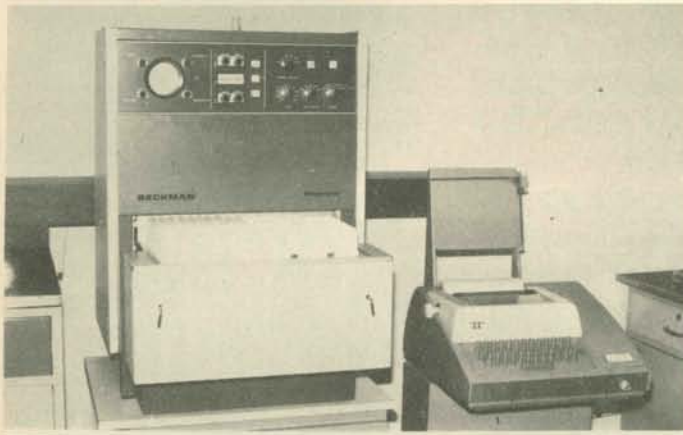
III. 高速直角線性掃描機 (HIGH SPEED RECTILINER SCANNER)

一般現在使用之掃描機，其解像力比閃爍攝影機好，但靈敏度却比不上。因而再研究出能兩全其美的高速掃描機。有十個獨立的探測器組成一組探測器 (如圖九)。操作時，先橫方向掃描成 10 條線，再由縱方向作垂直線性掃描而得一掃描圖。其掃描速度較一般掃描器快甚多。

IV. 正子掃描機及攝影機 (POSITRON SCANNER AND CAMERA)

由吸收正子 (β^+) 而產生背向的兩相毀滅性光子，經由上下兩晶體及光電倍增管將訊號增多，跟一般掃描機原理一樣 (如圖十)。此種掃描器之探測器內沒有射線柵。該機最主要優點是其解像力與靈敏度均甚高，能攝取病灶的斷層影像 (Tomograph)。但因為所使用之同位素能量過高 (511 keV)，一般常用的鎝-99m (Tc-99m) 之能量僅為 140 keV，增加病患之放射性吸收量，而且該機昂貴，所使用之放射性同位素必須由加速器製造，得來不易，故目前不能普遍使用。

圖十一 伽瑪射線計數器：右為老式手動，左為自動式可一次計數200個標本。



圖十二 1.閃爍攝影機、錄影及資料記憶裝置

2.直角線性掃描機

三、計數與保健物理偵測儀器

核子醫學的工作，除體內器官造影外，還有一重要的試管檢查。一般着重於放射免疫分析 (Radioimmunoassay)，即利用免疫學的反應，加入微量放射性同位素，以測定人體血液內所含有的微量藥物、抗原或內分泌激素等。此項檢查就必須仰賴放射性計數儀器之應用。

I. 計數儀器及其原理

計數儀器是偵測放射線將周圍的氣體、液體或固體三種介質離子化或

激發的程度。依此三種介質，可將計數儀器分成三類：

A. 氣體離子化計數器 (Gas ionization counter)

因放射線能將氣體離子化，在一密閉管腔內充滿空氣或特殊氣體，兩端電極施以高電壓，當有放射性物質輻射時，腔內氣體就被離子化產生電流，由電錶上可讀出相應之放射性活性強度。

1. 離子化腔 (Ion Chamber)

(a) 放射性活性劑量測定儀 (Dose Calibrator) 核子醫學檢查用放射性針劑劑量控制，完全需由此型計數器

來測量。

(b) 氣流計數器 (Flow counter)

在密閉腔內充入多種混合氣體稱為 Q Gas，以利在大氣壓下能進行計數。一般放射性藥品之品質管制，就需用此型計數器，如 Actigraph III，Nuclear Chicago。

(c) 蓋格-彌勒管 (Geiger-Muller tube)

一般用於放射性防護用之偵測儀器。

B. 液體閃爍計數器 (Liquid Scintillation Counter)

放射性標本用某種特殊螢光溶液

調配，此溶液經放射性物質輻射而產生光子，激發陰極產生光電子，經由光電管測出其電流強度，而知其相應放射性計數。目前生物化學各種機轉研究及內分泌激素之測定都需應用此計數器。

C. 固體閃爍計數器 (Solid Scintillation Counter)

放射性能源，尤以珈瑪射線最具穿透力，當閃爍晶體碘化鈉 (NaI) 吸收其能量而釋出再次電子，發出與原來放射性強度成比例的光子，經光電倍增管多次放大而成一電脈波，以計數率或數據表示其放射性強度。

1. 井式閃爍計數器 (Well Scintillation Counter)

因其放置放射性標本處，形同一口井，而得名。在標本之四周圍繞着碘化鈉晶體，標本所輻射之射線除少部份垂直向上的沒被晶體吸收，其他全部都被吸收，故其計數效率相當高。是核醫學試管檢查的必備計數器。近幾年來，已發展成自動化計數記錄，對放射免疫分析是一大推動力。如圖十一。

2. 放射性攝取及功能檢查儀器

放射線經圓筒射線柵射入晶體而計數。應用於甲狀腺碘攝取功能檢查 (Radioactive iodine uptake test) 及繪製腎血流圖 (Renogram)。

3. 全身計數器 (Whole Body Counter)

人體內放射性物質殘留量之測定，以明瞭某物質在人體內代謝的情形，供作診斷參攷，有 2π 和 4π 兩種計數器。

II. 偵測儀器

即放射性安全防護用儀器，用以偵測環境和個人接受之放射性強度。

A. 區域偵測器 (Area monitor)

裝置於實驗室，指示該區域當時之放射性強度，並有警笛裝置，當該區域放射性強度超過某一定強度時，就鳴聲警告工作人員，以備防護。

B. 個人偵測器 (Personnel monitor)

個人攜帶，當進入某放射性區域時，如該區域放射性超過有害強度時，就鳴聲警告，其聲調隨放射性之強弱而有高低之分。

C. 劑量計

欲知個人在某一段時間內所接受的放射性劑量，可用下列諸方法直接或間接獲得數據。

1. 膠片佩帶章 (Film badges)

利用膠片被放射線感光之強弱，可判別所接受之為何種放射線及其劑量多少。一般從事於放射性工作人員，均需每人佩帶，每月更換膠片，測定其每月所接受之劑量，近十三週內之累積量及每年之累積劑量，詳細記載於保健物理檔案，永久貯存備查。

2. 電容離子化腔 (Condenser Ionization chamber)

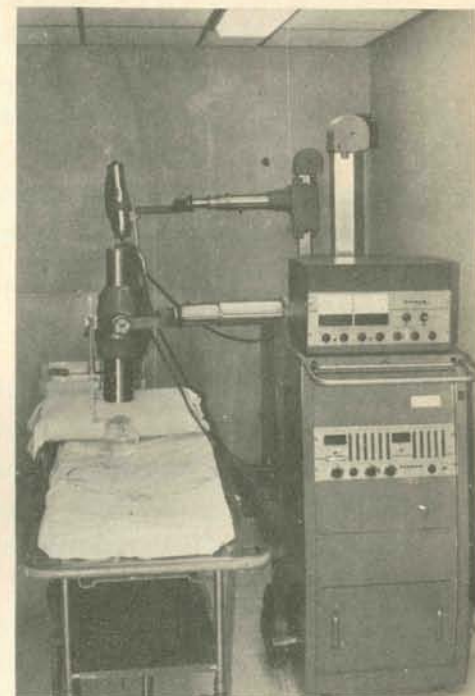
當被充好電之離子化腔，經放射線照射時使其腔內電壓減低，以電壓之減少量，可知接受了多少放射性劑量。如個人劑量計 (Personnel dosimeter)。

3. 熱螢光劑量計 (Thermoluminescent dosimeter, TLD)

利用某些物質如 CaF_2 , LiF , 和 CaSO_4 吸收放射性之能量，以捕獲電子之形態暫時貯存於該物質內，當此等物質經加熱時，發出螢光，以螢光測定器測其發出螢光之強弱可知某人已經接受之放射性劑量。

四、榮民總醫院核子醫學部現況

榮總核子醫學部是於民國六十年九月正式作業，當時僅有閃爍攝影機 (Phogamma III Camera)、閃爍掃描機 (Scintillation Scanner) (如圖十二)，甲狀腺碘攝取測定系統和雙探測計數器各一部 (如圖十三)。經該部主任葉鑫華專心致力於推展核子醫學，始有今天的輝煌業績。



圖十三 1. 甲狀腺體碘攝取功能測定機

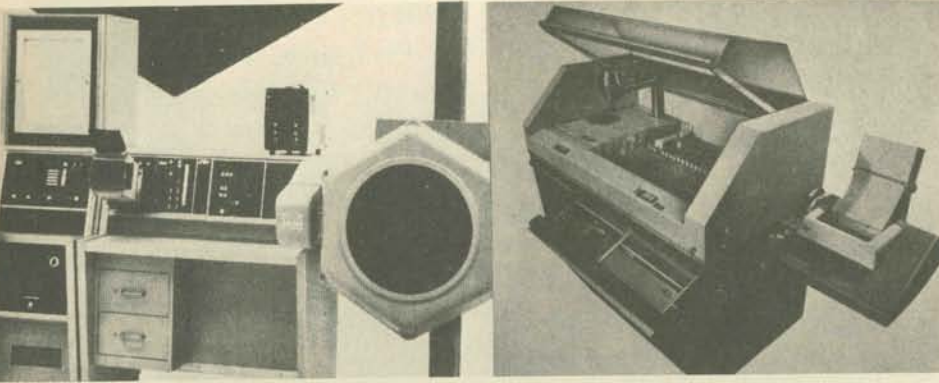
2. 雙探測腎血流計數繪圖機

圖十四 全身骨骼掃描機：圖中右一為彩色滙點記像器 圖右二為電視顯像及錄影器



目前已經增加最新設備為病患作最善、最精確的診斷。有全身閃爍掃描機 (Whole Body Scanner) (如十四)，新型閃爍攝影機 (Phogamma IV Camera) 和自動化珈瑪線計數器 (Auto-well Gamma Counter) (如圖十五) 各一部。

現在該部為病患檢查項目如表所列。每天平均工作量相當繁重：官造影檢查約廿五位、試管檢查約位。今後核子醫學診斷方法，由於用核子儀器之靈敏度與解像力不斷進，放射製藥化學的進步，以及資料記錄與處理的電腦化，將可對灶的生理與生化變化，作更詳盡的斷與分析。咸認在未來十年至十五內，所有醫院診斷檢查約佔 50~% 均將仰賴核子醫學診斷檢查。



圖十五 左：最新型閃爍照相機 (PHO/GAMMA IV SCINTILLATION CAMERA) 配以最新微粒感光記像機 (MICRO-DOT DISPLAY) 如圖左上角 右：自動伽瑪射線計數器

表一 榮民總醫院核子醫學部檢查及治療項目

器官造影檢查	器 官 檢 查	治 療
1. Tc-99m brain scanning or scintiphotography with cerebral blood flow	1. Effective thyroxine ratio test	1. I-131 treatment for hyperthyroidism
2. Tc-99m MAA lung scintiphotography	2. Co-57 schilling test with intrinsic factor	2. I-131 treatment for carcinoma of thyroid
3. Tc-99m kidney scintiphotography	3. Cr-51 blood volume determination	3. P-32 treatment for polycythemia vera
4. Tc-99m liver scintiphotography	4. Cr-51 RBC survival	4. Au-198 or P-32 installation in serous cavities
5. Tc-99m whole body bone scintiphotography or scanning	5. Cr-51 spleen:liver equilibration	
6. In-113m placental scanning	6. I-131 RISA blood volume determination	
7. In-113m heart scanning	7. Radioimmunoassay for Digoxin	
8. I-131 thyroid scanning and 24hr uptake	8. Radioimmunoassay for Angiotensin I.	
9. I-131 neck and chest scanning	9. Radioimmunoassay for Alphafetoprotein	
10. I-131 Rose bengal liver scanning	10. Radioimmunoassay for LH	
11. I-131 differential renogram	11. Radioimmunoassay for FSH	
12. I-131 RISA cisternography	12. Radioimmunoassay for Carcinoembryonic antigen (CEA)	
13. I-131 uptake 1,3,6, or 24 hrs		
14. I-131 uptake plus repeat after TSH stimulation		
15. I-131 uptake plus repeat after T ₃ suppression		