บทที่ 4

เทคนิคการใช้เครื่องมือนิวเคลียร์

4.1 บทนำ

ลืบเนื่องจากโครงการณ์ระเบิดปรมาณูในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีการผลิตนิวไคลด์รังสีปริมาณมากมายจากนิวเคลียร์รีแอ็คเตอร์ (ประมาณปี ค.ศ. 1942) เพื่อนำไปใช้ในด้านการแพทย์ทั้งเพื่อทำงานวิจัย งานวินิจฉัยโรค และเพื่อรักษาโรคในระยะเริ่มแรกสารกัมมันตรังสีถูกนำไปใช้ในงานวิจัยทางการแพทย์ เช่น ใช้ในการศึกษาการทำงานของอวัยวะและการ - แลกเปลี่ยนสารเคมีที่เกิดภายในเซลล์ของร่างกาย (เช่น โซเดียมโปแตสเซียม เป็นต้น) เทคนิคเกี่ยวข้องกับการใช้รังสีวินิจฉัยเรียกชื่อเป็น "สาขาเวชศาสตร์นิวเคลียร์" *(Nuclear Medicine)* ซึ่งส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการตรวจวินิจฉัยโรคมะเร็ง นอกจากนี้ ยังตรวจหัวใจ ปอด ไต ข้อต่อ และพลาเซ็นต้า *(placenta)* เป็นต้น

นิวไคลด์รังสีที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในเวชศาสตร์นิวเคลียร์คือพวกปล่อยรังสีแกมม่า ซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูง เมื่อมีกัมมันตรังสีอยู่ในร่างกาย สามารถใช้เครื่องมือตรวจวัดปริมาณได้จากภายนอกร่างกาย เนื่องจากกัมมันตรังสีที่ใช้มีปริมาณน้อยมาก (ประมาณ 1 μg) จึงไม่มีผลอันตรายใดๆต่อหน้าที่ทางสรีระวิทยา โมเลกุลที่ติดฉลาก *(labeled)* ด้วยสารกัมมันตรังสี - ยังคงประพฤติเสมือนโมเลกุลธรรมดา

บทบาทของนักฟิสิกส์ในเวชศาสตร์นิวเคลียร์คือเป็นผู้ตั้งเครื่องมือให้ได้มาตรฐาน *(calibrate)* เพื่อให้เครื่องทำการวัดผลของสารกัมมันตรังสีได้ถูกต้อง นอกจากนี้ ยังเกี่ยวข้องกับการใช้คอมพิวเตอร์ตลอดจนออกแบบวิธีการตรวจวินิจฉัยใหม่ๆ นอกจากนี้ยังต้องอาศัยเภสัชกรเพื่อทำการเตรียมเภสัชรังสีที่ใช้ในการตรวจวินิจฉัยอีกด้วย

การตรวจวัดปริมาณกัมมันตรังสีในล่าฮา เวชศาสตร์นิวเคลียร์แยกได้เป็น 2 แบบ คือ

1. - การหาปริมาณกัมมันตรังสีในตัวอย่างหรือปริมาตรใดๆที่กำหนดไว้ *(in vitro)*

2. - การหาการกระจายของกัมมันตรังสีในร่างกาย *(in vivo)*

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงเทคนิคการใช้เครื่องมือในเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ซึ่งรวมทั้งเครื่องมือทำให้เกิดภาพต่างๆคือเครื่องสแกน *(scanner)* และแกมม่าคาเมอร่า *(gamma camera)*

4.2 เครื่องวัดลิขวิดซินทิลเลชั่น (liquid scintillation counter)

ใช้วัดรังสีเบต้าและแกมม่าพลังงานต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ^{3}H และ ^{14}C สารตัวอย่างที่ถูกเตรียมเพื่อใช้การวัดโดยลิขวิดซินทิลเลชั่นจะต้องมีส่วนประกอบอย่างน้อยสามส่วน คือ สารที่ต้องการนับวัด ตัวทำละลาย *(solvent)* และซินทิลเลเตอร์

4.2.1 ซินทิลเลเตอร์ *(scintillators)*

คุณสมบัติของซินทิลเลเตอร์ที่ดีคือ

1. ต้องมีประสิทธิภาพที่จะให้แสงได้ดีเมื่อมีรังสีแกมม่าหรือเบต้าชน และแสงที่ปล่อยออกมานั้นควรมีความยาวคลื่นพอเหมาะกับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำหลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ เช่น ผิวหน้าเป็นแก้ว-ไวกับความยาวคลื่นแสง 4200 - 4400 A^{o} ถ้าผิวหน้าเป็นควอทซ์ *(quartz)*-ไวกับ 3800 A^{o} เป็นต้น
2. ต้องละลายเป็นเนื้อเดียวกับสารที่ต้องการวัดและตัวละลาย ณ อุณหภูมิที่ทำการวัดจนเสร็จสิ้นการทดลอง
3. ต้องเป็นสารเคมีคงตัวตลอดช่วงเวลาของการวัด
4. ราคาไม่แพง เพราะในการนับวัดแต่ละครั้งจะต้องทิ้งซินทิลเลเตอร์ไป

ซินทิลเลเตอร์แรกที่รู้จักและใช้กันคือ "พี-เตอร์ฟีนิล" *(p-Terphenyl)* เมื่อประมาณ ค.ศ. 1950 ราคาไม่แพง มีความคงตัวดี มียอบเขตจำกัดของการละลาย ณ อุณหภูมิต่ำ เมื่อมีกัมมันตรังสีฉนจะปล่อยแสงมีความยาวคลื่น 3400 A^{O} ปริมาณมากที่สุด (เหมาะกับหลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ชนิดผิวควอทซ์) นอกจากนั้นยังปล่อยแสงมีความยาวคลื่นระหว่าง 4200-4400A^{O} บ้าง (เหมาะกับหลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ชนิดแก้ว) โดยทั่วไปใช้สำหรับวัด ^{14}C ซึ่งให้รังสีเบต้าพลังงาน 50 กิโลอิเล็คตรอนโวลท์ ไม่เหมาะสำหรับใช้กับ ^{3}H เพราะพลังงานต่ำเกินไป

2, 5 - Diphenyloxazole (PPO) นิยมใช้มาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการให้โฟตอนสูง มีการละลายดี เข้าได้กับทุกตัวทำละลายแม้จะมีอุณหภูมิต่ำถึงศูนย์องศาเซนติเกรด มีความคงตัวดี ให้โฟตอนมีความยาวคลื่นสูงสุด 3800 A^{O} (เหมาะสมกับหลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ชนิดผิวควอทซ์มากกว่าพี-เตอร์ฟีนิลเหมาะสมในการวัด ^{14}C และถ้าใช้วัด ^{3}H ต้องเติมซินทิลเลเตอร์ทุติยภูมิช่วย

2, 5 - Bis-2-(5-t Butylbenzoxazolyl) - Thiophene (BBOT) ให้โฟตอนมีความยาวคลื่น *4350* A^{O} (เหมาะสมกับโฟโตมัลติไพลเออร์ชนิดผิวแก้ว) เป็นสารเคมีที่คงตัวกว่า *PPO* มี "เควนช์" *(quench)* น้อยกว่า *PPO* และ *p-Terphenyl* แต่ต้องใช้กับซินทิลเลเตอร์ทุติยภูมิ

ซินทิลเลเตอร์อื่นๆคือ *2-phenyl-5 biphenyloxadiazole (PBD)* ดีกว่า *PPO* แต่แพงกว่า

4.2.2 ซินทิลเลเตอร์ทุติยภูมิ *(secondary scintillators)*

หน้าที่ของซินทิลเลเตอร์ทุติยภูมิคือจับโฟตอนที่มีความยาวคลื่นต่ำและปล่อยโฟตอนที่มีความยาวคลื่นสูงกว่าออกมาใหม่ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการนับวัดรังสีเบต้าพลังงานต่ำ มักใช้ซินทิลเลเตอร์ทุติยภูมิปริมาณเล็กน้อยและที่สำคัญมี 2 ตัว

คือ *1, 4 - Bis - 2 - (5-phenyloxazolyl) - benzene (POPOP)*

และ *1,4 - Bis - 2 - (4-methyl-5 phenyloxazolyl) - benzene (dimethyl POPOP)* ซึ่งทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกันมากแต่ *dimethyl POPOP* มีการละลายดีกว่า

4.2.3 ตัวทำลาย *(solvents)*

ตัวทำละลายทำหน้าที่เป็นตัวพา และตัวพาที่ดีต้องมีประสิทธิภาพในการพารังสีเบต้าจากต้นกำเนิดกัมมันตรังสีไปยังโมเลกุลของซินทิลเลเตอร์ได้ดี และเป็นตัวกลางให้โฟตอนที่เกิดขึ้นผ่านไปเข้าเครื่องนับวัด ไม่แย่งตัว ณ อุณหภูมิที่ทำการนับวัด ตัวพามักใช้พวกอโรมาติคไฮโดรคาร์บอน *(aromatic hydrocarbon)* เช่น โทลูอีน *(Toluene)* เบนซีน *(benzene)* ไซลีน *(xylene)* เอทธิลแอลกอฮอล์ และไดออกเซน *(dioxane)* จะเห็นได้ว่าโอกาสในการเลือกตัวทำละลายมีมากกว่าการเลือกซินทิลเลเตอร์ โทลูอีนเป็นตัวทำละลายดีที่สุดสำหรับพวกไลปิดส์ *(lipids)* สเตอรอยด์ *(steroids)* กรดไขมัน *(fatty acid)*

4.2.4 สารละลายที่ใช้ในการนับวัด *(counting* solution)

ส่วนผสมของซินทิลเลเตอร์และตัวทำละลายที่ใช้ในการนับวัดกัมมันตรังสีมีหลายชนิด เช่น

- "โทลูอีนโซลูชั่น" *(Toluene solution)* ส่วนผสมคือ *PPO* 5 กรัม, *POPOP* หรือ *dimethyl POPOP* 200 มิลลิกรัม แล้วทำให้เป็น 1 ลิตรด้วยโทลูอีน (ใช้เกรดรีเอเจ่นต์ *(reagent grade)* ก็ได้) โทลูอีนโซลูชั่นใช้ทำการวัดแบบแขวนลอย *(suspension counting)* โดยผสม *Triton X-100* เพื่อวัดพวกโฆรมาโตแกรมชนิดกระดาษได้ และส่วนผสมดังกล่าวที่เตรียมไว้นั้นสามารถเก็บไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้อง ในขวดสีชาหรือดำ (หรือเก็บในตู้เย็นก็ได้) แต่ละครั้งจะใช้ 5-15 ลบ.ซม. แต่ถ้าใช้น้อยค่าแบ็คกราวนด์จะน้อยด้วย

- "เบรย์โซลูชั่น" *(Bray's solution)* ใช้วัดของเหลวได้ทั้งที่เป็นเกลืออนินทรีย์ กรดอมิโน *(amino acid)* ซูโครส *(sucrose)* ปัสสาวะ และน้ำเหลือง ส่วนผสมคือ *naphthalene* 60 กรัม, *PPO* 4 กรัม, *POPOP* 200 มิลลิกรัม, เมธานอล *(methanol)* 100 มิลลิลิตร, *ethylene glycol* 20 มิลลิลิตร แล้วเติมไดออกเซนให้เป็น 1 ลิตร

เติมจากโทลูอีนโซลูชั่น เมื่อต้องการใช้วัดพวกของเหลว (เช่น น้ำ) นิยมใช้ *naphthalene* 100 กรัม, *PPO* 7-10 กรัม, *POPOP* 300 มิลลิกรัม แล้วทำให้เป็น 1ลิตร ด้วยไดออกเซน (เกรด"*spectrochemical*") แต่ *Dioxane-naphthalene* ใช้วัดสารที่มีเกลือปนไม่ได้ จะตกตะกอน ดังนั้น จึงได้มีการดัดแปลงโดย *Bray* เป็นผู้เสนอเบรย์โซลูชั่นขึ้น

- "ระบบ 611" มีส่วนผสมคือ ไดออกเซน 6 ส่วน, *anisole* 1 ส่วน, *Dimethoxyethane* 1 ส่วน ใช้ประโยชน์ในการวัดสารประกอบของ *purines* และ *pyrimidines* และใช้วัด ^{3}H ^{14}C และ ^{35}S ในเลือด แต่สารละลายระบบ 611 นี้จะทำให้โมเลกุลเล็กๆและโปรตีนตกตะกอน ส่วนสารกัมมันตรังสียังคงอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลว ดังนั้น ควรกรองตะกอนออกก่อนทำการนับวัด

4.2.5 เควนชิ่ง *(quenching)*

คำว่า "เควนชิ่ง" หมายถึงขบวนการใดๆที่รบกวนการนับวัดในเครื่องลิควิดซินทิลเลชั่น ที่สำคัญมี 2 แบบคือ เควนชิ่งสี *(color quenching)* และเควนชิ่งเคมี *(chemical quenching)*

- เควนชิ่งเคมี สารเคมีที่รบกวนการนับวัดที่รู้จักกันดีคือออกซิเจนที่ละลายอยู่ในส่วนผสมที่ต้องการวัด กำจัดโดยใช้เครื่องปั่นชนิดอุลตร้าโซนิค *(ultrasonic agitation)* หรือไล่ด้วยแก๊สเฉื่อย จะทำให้อ่านค่านับวัดได้มากขึ้น

- เควนชิ่งสี สีของสารผสมที่รบกวนการนับวัดทำให้น้อยลงได้โดยการฟอกสี แต่ถ้าสีไม่มากนัก สามารถใช้วิธีผสมให้เจือจางด้วยซินทิลเลเตอร์ที่ใช้นับวัดพวกเลือดและสารผสมของเนื้อเยื่อที่ละลายใน *Hyamine 10-X* จะกำจัดสีด้วยพวกเปอร์ออกไซด์จำนวนน้อยๆ หรือโซเดียมโบโรไฮไดรด์ *(sodium borohydride)* แต่ถ้ามีสารพวกคาโรทีนอยด์ *(carotenoids)* ปนต้องกำจัดสีด้วยคลอรีน สารที่ถูกกำจัดสีแล้วจะมีประสิทธิภาพดีเท่าพวกไม่มีเควนช์ บางครั้งนิยมกำจัดสีโดยผ่านถ่าน *(charcoal)* หรือตกตะกอนพวกโปรตีนด้วยกรด *trichloroacetic*

วิธีการแก้เควนชิ่งในเครื่องวัด ที่นิยมมี 3 วิธีคือ

1. ใส่สารมาตรฐานในขวดนับวัด *(internal standardization)* มีหลักการคือ เมื่อใส่สารมาตรฐานที่ไม่มีเควนช์ลงในสารต้องการนับวัดที่มีเควนช์ จะทำให้ประสิทธิภาพของสารกัมมันตรังสีมาตรฐานนั้นเท่ากับประสิทธิภาพของสารต้องการนับวัด วิธีนี้ทำโดยนับวัดสารที่ต้องการนับวัดก่อน แล้วเติมสารกัมมันตรังสีมาตรฐานที่รู้ค่าลงไป จากนั้นทำการนับวัดใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยไม่เปลี่ยนเครื่องและวิธีการนับวัด ดังนั้น สามารถหาประสิทธิภาพของสารต้องการนับวัดได้ กล่าวคือ

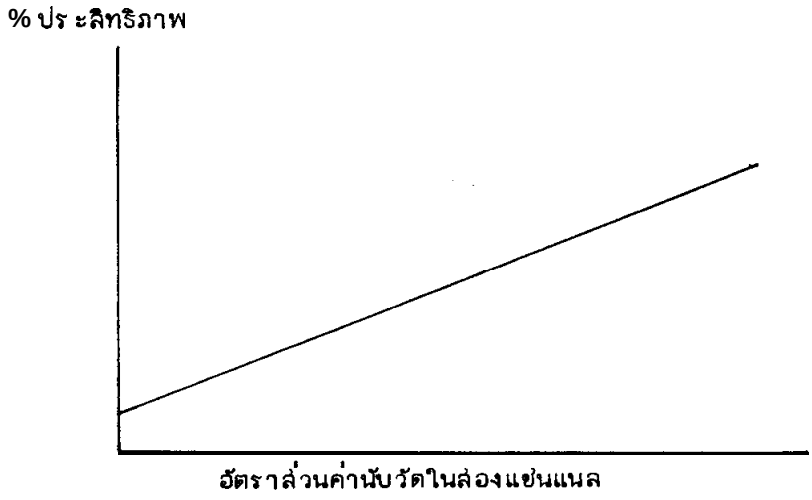
$$\text{ประสิทธิภาพในการนับวัดของสารต้องการนับวัด} = \frac{\text{ค่านับวัดที่เพิ่มขึ้น}}{\text{ปริมาณกัมมันตรังสีที่เติมลงไป}}$$

ตัวอย่าง เช่น วัด ^{3}H นิยมใช้โทลูอีน $-^{3}H$ เป็นสารมาตรฐาน เป็นต้น

2. ดูอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าที่นับวัดได้ในสเปคโตรสเกลเลอร์ล่องแย่นแนล *(channel ratio method)* *Baillic* เป็นผู้เสนอวิธีการคำนวณเควนชิ่งโดยหาจากการเลื่อนของสเปคตรัม *(spectral shift)* เครื่องมือคือสเปคโตรสเกลเลอร์ 2 แย่นแนล หลักการคือ เมื่อมีเควนช์ สเปคตรัมจะเลื่อนออกไป ดังนั้น ใช้แย่นแนลหนึ่งของสเปคโตรสเกลเลอร์ให้พอเหมาะ

สำหรับนับวัดกัมมันตรังสีที่ไม่มีเควนช์ ส่วนอีกแชนแนลหนึ่งใช้ตรวจตำแหน่งของปลายสเปคตรัมของสารกัมมันตรังสีที่ต้องการนับวัด ถ้าสารต้องการนับวัดไม่มีเควนช์ อัตราส่วนของการนับวัดโดยใช้สองแชนแนลต้องมีค่าคงที่ แต่ถ้าสารต้องการนับวัดมีเควนช์ อัตราส่วนดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไป

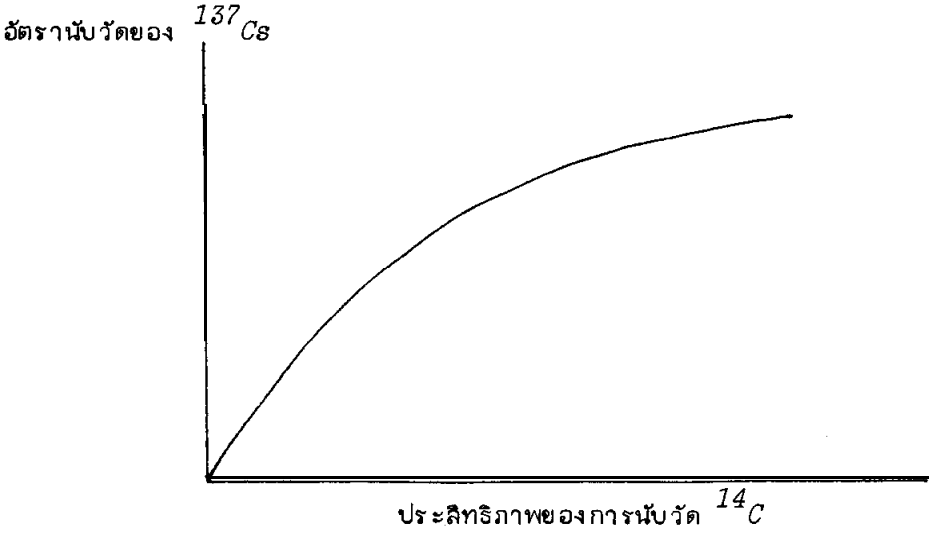
วิธีทำคือ ใช้สารมาตรฐานที่ทราบค่า ทำให้มีเควนช์มากน้อยต่างกันด้วย *pyridine* พล็อตกราฟระหว่างอัตราส่วนค่าที่นับวัดได้ในสองแชนแนล กับประสิทธิภาพของการนับวัด (รูป4.1) ประโยชน์ของกราฟนี้คือ เมื่อวัดสารกัมมันตรังสีทั่วๆไป ถ้าทราบค่าอัตราส่วนการนับวัดในสอง-แชนแนลก็จะสามารถหาค่าประสิทธิภาพของการนับวัดสารนั้นๆได้จากกราฟ



รูป 4.1 ตัวอย่างกราฟประสิทธิภาพของสารต้องการนับวัดโดยใช้วิธีการดูการเปลี่ยนแปลงของค่าที่นับวัดได้ในสองแชนแนล

3. สารมาตรฐานอยู่นอกขวดนับวัด *(external standardization)* วิธีการคือ ทำการนับวัดสารตัวอย่างก่อน ต่อมาวาง ^{137}Cs ให้ชิดสารตัวอย่างให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นได้ แล้วทำการนับวัด (ช่วงเวลาที่ทำการนับวัดครั้งแรกและครั้งหลังไม่ควรห่างกันมากนัก) ผลต่างของ

อัตรานับวัดครั้งแรกและครั้งที่สองคืออัตรานับวัดของ ^{137}Cs ประสิทธิภาพในการนับวัดสารใดๆหาโดยอาศัยกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการนับวัด ^{137}Cs และประสิทธิภาพของการนับวัดสารมาตรฐาน (รูป 4.2) ซึ่งหาได้โดยใช้สารมาตรฐานที่มีประสิทธิภาพต่างๆกัน (เนื่องจากมีเควนช์ต่างกัน) วางให้ยึด ^{137}Cs และดูการเปลี่ยนแปลงของอัตรานับวัดของ ^{137}Cs เมื่อทำการนับวัดสารตัวอย่างที่ไม่ทราบประสิทธิภาพแต่ทราบอัตรานับวัดของ ^{137}Cs ก็สามารถหาประสิทธิภาพการนับวัดของสาตัวอย่างได้จากกราฟ



รูป 4.2 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดของ ^{137}Cs ที่เปลี่ยนแปลงไปกับประสิทธิภาพของการนับวัด ^{14}C ที่มีเควนช์ต่างๆกัน

4.2.6 ตัวละลาย *(solubilizing agents)*

ถ้าสารตัวอย่างที่ต้องการนับวัดไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับซินทิลเลเตอร์หรือตัวทำละลาย เช่น เนื้อเยื่อ โปรตีน เลือด เพพไทด์ *(peptide)* กรดอมิโน *(amino acid)* ต้องใช้พวกตัวทำละลายช่วย ที่ใช้อย่างกว้างขวางคือไฮดรอกไซด์ของ *Hyamine 10-X* เช่น

p - (diisobutylcresoxyethoxyethyl) - dimethylbenzyl ammonium chloride พวกโปรตีน และกรดอมิโน ถ้าจะวัดในซินทิลเลเตอร์ที่ผสมโทลูอีน - *PPO* - *POPOP* ใช้ไฮยามีน *(Hyamine 10-X)* เป็นตัวทำละลาย (ปริมาณเท่ากัน)

ถ้าโปรตีนน้อยกว่า **20** มิลลิกรัม ใช้วิธีตกตะกอนด้วย *TCA (Trichloroacetic acid)*

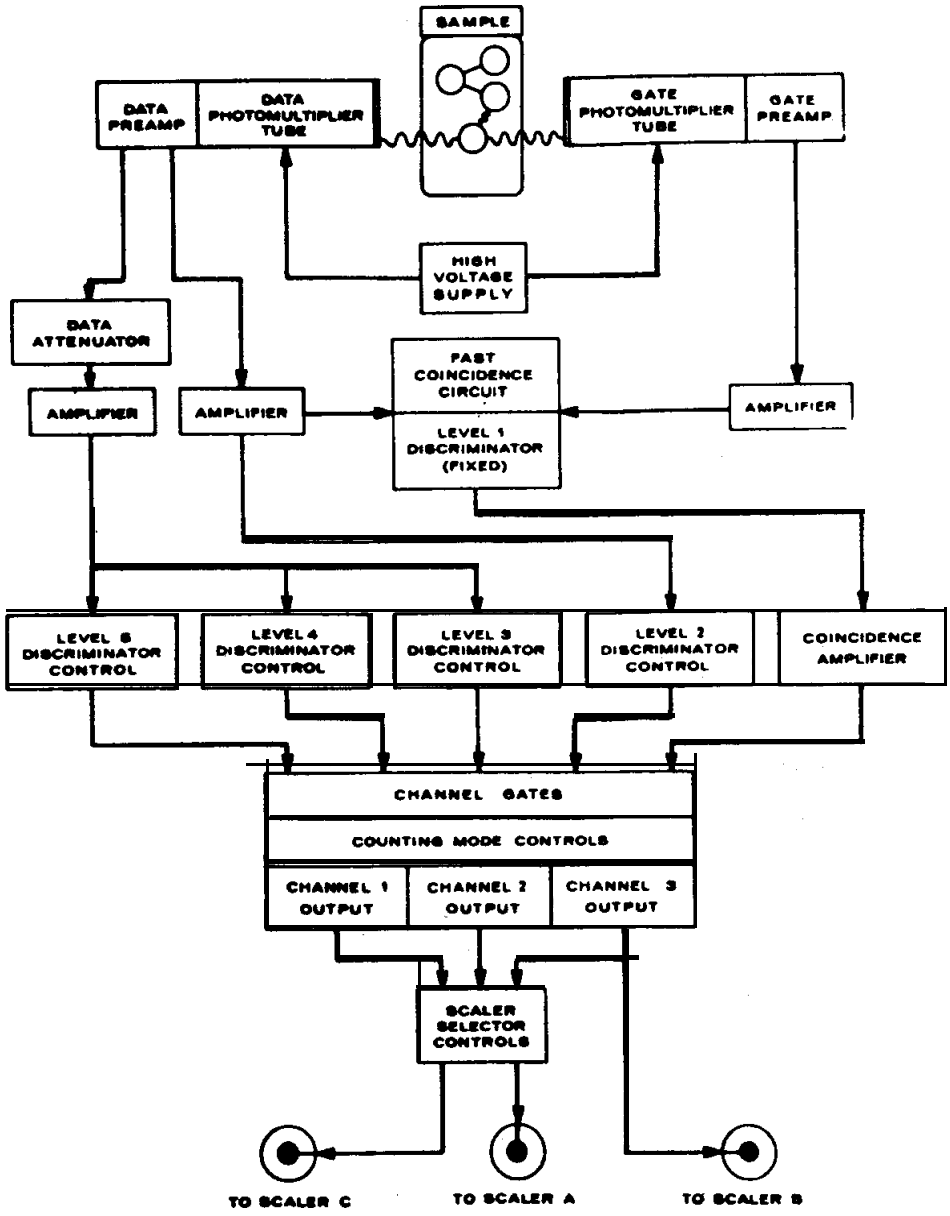
ตัวละลายอื่นที่นิยมใช้คือ *Ethanolic KOH*

4.2.7 ระบบการทำงานของเครื่องวัดลิขวิดซินทิลเลชั่น

แบ่งระบบการทำงานของเครื่องวัดชนิดนี้ออกได้เป็น 4 ส่วนดังนี้

1. ส่วนขยายความยาวคลื่นแสง
2. วงจรอิเล็คทรอนนิคส์
3. การนับวัดสารตัวอย่าง
4. ผลของการนับวัด

เครื่องลิขวิดซินทิลเลชั่นที่ดีที่สุดจะให้ประมาณ 7 โฟตอน ต่อพลังงานของรังสีเบต้า *1 keV* จุดประสงค์สำคัญของเครื่องมือนี้คือต้องการจับแสงปริมาณน้อยๆที่แผ่ออกจากสารตัวอย่างที่ต้องการนับวัด วิธีการทำโดยใช้หลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ร่วมกับวงจรอิเล็คทรอนนิคส์ ปัจจุบันนิยมใช้หลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ 2 หลอด (เดิมใช้หลอดเดียว ซึ่งมีค่าแบคกราวนด์สูง จึงได้มีการดัดแปลงและใช้วงจร *co-incidence* ช่วย) ดังแสดงในรูป 4.3 กล่าวคือ โฟตอนที่โฟโตมัลติไพลเออร์ทั้งสองตัวบันทึกค่าได้ภายในเวลา *"resolving time"* ของวงจร-*cooncidence* เท่านั้นที่จะถูกนับวัด อย่างไรก็ตาม ยังต้องอาศัยการพาโฟตอนจากจุดต้นกำเนิดกัมมันตรังสีไปยังหลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ซึ่งยึ้นกับ



รูปที่ 4.3 บล็อคไดอะแกรมอย่างง่ายของอะนาลัยเซ่อร์ในลิขวิดซินทิลเลชั่น[10]

ปริมาตรของแฮมเบอร์ *(chamber)* ซึ่งเป็นที่วางขวดสารตัวอย่างที่ต้องการนับวัดขณะที่นับวัดต้องยึดสนิทกับหลอดโฟโตมัลติไพลเออร์

กลไกการเปลี่ยนขวดสารตัวอย่าง จะต้องวางตำแหน่งของสารตัวอย่างให้ถูกต้องทุกครั้งและการเปลี่ยนขวดสารตัวอย่างแต่ละครั้งควรเร็วพอสมควร

หลอดโฟโตมัลติไพลเออร์และปริมาตรของแฮมเบอร์สารตัวอย่างต้องอยู่ภายในวัตถุกำบัง เพื่อลดแบคกราวนด์

ขวดที่ใส่สารตัวอย่าง *(vial)* ถ้าสารตัวอย่างมีพลังงานเบต้าต่ำ เช่น ^{3}H ขวดที่ทำด้วยโพลีเอ็ทธีลีน *(polyethylene)* จะใช้ได้ดีกว่าขวดทำด้วยแก้ว คือมีประสิทธิภาพในการนับวัดดีกว่านั่นเอง แต่ถ้าพลังงานเบต้ามีค่าสูงจะได้ประสิทธิภาพต่างกันน้อยมาก ทั้งต้องระมัดระวังในการใช้ขวดโพลีเอ็ทธีลีน เนื่องจากโพลีเอ็ทธีลีนละลายในตัวทำละลายบางตัว และระหว่างที่เตรียมสารตัวอย่างจะใช้ความร้อนไม่ได้

หลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ทำด้วยสารมีฟังค์ชั่นการทำงาน *(work function)* ต่ำ เช่น พวกอัลคาไลเมทัล *(alkali metals)* ได้แก่ ซีเซียมผสมกับแอนติโมนี *(antimony)* ซึ่งจะมีฟังค์ชั่นการทำงานประมาณ 2 อิเล็คตรอนโวลต์ในการที่จะปล่อยให้อิเล็คตรอนหลุดจากผิวหน้า นอกจากนี้หลอดโฟโตมัลติไพลเออร์จะต้องไม่บางเกินไปจนทำให้โฟตอนทะลุผ่านไปได้ความหนาที่พอเหมาะประมาณ 2 $m\mu$ สัญญาณรบกวน *(noise)* จากหลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ขึ้นกับอุณหภูมิ และประกอบไปด้วย 13 ไดโนด *(dynodes)* ถ้าแต่ละไดโนดมีแฟคเตอร์ทวีคูณ *(multiplication factor)* 4 จะได้อัตรายาย 4^{13} หรือมีค่าเป็น 67×10^{6}

การนับวัดสารตัวอย่าง ถ้าจะให้เครื่องมือมีความไวในการนับวัดสูงขึ้นหรือจะทำให้เวลาของการนับวัดน้อยลง จะต้องตั้งเครื่องมือเพื่อวัดสารตัวอย่างแล้วให้อัตราส่วนระหว่าง (ประสิทธิภาพในการนับวัด)^{2}/แบคกราวนด์ มากที่สุด ในการจะตั้งเครื่องมือเช่นดังกล่าวขึ้นอยู่กับการจัดตัวกำจัดสัญญาณทั้งสอง รวมทั้ง "เกน" *(gain)* ด้วย โดยที่ใช้ตัวกำจัดสัญญาณทั้งสอง

ตัดสัญญาณรบกวนที่มีพลังงานต่ำหรือสูงเกินไป อนาลัยเซอร์มีเรนจ์จาก 0-1000 ช่อง ถ้าจัดให้ *"lower discriminator"* อยู่ที่ระดับ 50 ช่อง และ *"upper discriminator"* อยู่ที่ระดับ 1000 ช่อง เรียกว่าทำการวัดในช่วง *(window)* 50-1000 หรือเรนจ์พลังงาน *(energy range) 20 : 1* แล้วปรับปุ่ม *"gain"* จนได้ค่านับวัดสูงสุด บันทึกค่าอัตรานับวัดนั้นและจดค่าแบคกราวนด์ด้วย จากนั้นลด *"upper discriminator"* ลงเป็น 900,800,700,.... จนถึง 100 ทุกครั้งให้ปรับปุ่ม *"gain"* ให้ได้ค่าอัตรานับวัดสูงสุด (รวมทั้งวัดแบคกราวนด์ด้วยเสมอ) จากนั้นหาค่า *"figure of merit"* คือ (ประสิทธิภาพในการนับวัด)^2/แบคกราวนด์ ที่มีค่าสูงสุด ถ้าเป็นไอโซโทปพลังงานต่ำ เช่น ^3H จะได้ค่าพอเหมาะของการจัดอนาลัยเซอร์ที่เรนจ์พลังงาน *20 : 1* แต่ถ้าเป็นไอโซโทปพลังงานสูง เช่น ^{14}C จะได้ค่าพอเหมาะที่เรนจ์พลังงาน *5 : 1*

4.3 เครื่องวัดซินทิลเลชั่น (scintillation counter)

เครื่องวัดซินทิลเลชั่น (หรือเรียกเป็น *NaI (Tl)*) มี 2 ชนิดคือ ชนิดที่เป็นหลุมใช้วัดแอคติวิตี้ของกัมมันตรังสีในหลอดทดลอง และชนิดตัน ใช้วัดกัมมันตรังสีที่ส่งออกมาจากอวัยวะที่ต้องการศึกษา

4.3.1 เครื่องวัดซินทิลเลชั่นแบบหลุม *(well scintillation counter)*

ใช้วัดรังสีแกมม่าในหลอดทดลอง มีความไวสูงกว่าแบบตันแต่มีความสามารถในการแยกพีคพลังงานได้ไม่ดีเท่าแบบตัน ขนาดมีต่างๆกันคือ 2" × 2" 3" × 3" และ 5" × 5" การใช้เครื่องมือชนิดนี้ต้องคำนึงถึงสาเหตุที่มีผลต่อค่านับวัดคือ

1. ปริมาตรของสารรังสีที่ต้องการวัด เนื่องจากส่วนของรังสีแกมม่าที่หนีออกทางรูเปิดขึ้นกับปริมาตรของสารที่ต้องการนับวัด

2. ควรวัดเฉพาะโฟโต้พีค และตัดสัญญาณแบคกราวนด์ออก เช่น รังสีเนื่องจากคอมป์ตันเอฟเฟ็ค *(Compton effect)* แพร์โพรดัคชั่น *(pairproduction)* ฟลูออร์เรสเซนส์เอ็กซ์ *(X-rays fluorescence)* ซึ่งเกิดจากรังสีแกมม่าชนตะกั่วเครื่องกำบัง และพีคจากการสะท้อนกลับและถ้าสารที่ต้องการนับวัดมีรังสีเบต้าปน ต้องระวังเบรมสตราห์ลังด้วย

3. ประสิทธิภาพของเครื่องนับวัดขึ้นอยู่กับพลังงานของกัมมันตรังสี รังสีแกมม่าพลังงานต่ำ ประสิทธิภาพของการนับวัดสูง ในการนับวัดรังสีแกมม่าพลังงานสูงควรเลือกหลอดนับวัดที่มีความหนามากขึ้น จะช่วยให้ค่าที่นับวัดได้สูงขึ้น

4.3.2 ๖ เครื่องวัดอัพเทค *(uptake courter)*

โดยทั่วไปใช้ผลึก *NaI (Tl)* ขนาด 2" × 2" หรือขนาดไม่เล็กกว่า 2.5 ×2.5 เซ็นติเมตร วัตถุกำบัง *(shielding)* ควรใช้ตะกั่วที่มีความหนาพอที่จะป้องกันกัมมันตรังสีจากส่วนอื่นของร่างกายมาเข้าเครื่องนับวัด คอลลิเมเตอร์มักใช้เป็นรูปกรวย ณ ระยะที่ทำงานหลอดควรมี *"visual field"* ประมาณ 7 ซม. (*"visual field"* เป็นความกว้างของบริเวณที่มีความเข้มกัมมันตรังสี 90-100% ของกัมมันตรังสีที่ศูนย์กลาง ใช้ตัวย่อ *R)* บริเวณที่มีความเข้ม 50% ของศูนย์กลางควรมีขนาดไม่เกิน *1.2 R* และที่ 5% ไม่เกิน *1.4 R*

การวัดอัพเทค คือวัดเปอร์เซ็นต์ที่ต่อมธัยรอยด์สามารถจับสารรังสีไว้ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของโดสที่ได้รับ ถ้าใช้นิวไคลด์รังสีเทคนีเซียม *-99m* ทำอัพเทคเมื่อ 20-30 นาทีหลังฉีด ถ้าเลือกไอโซโทปของไอโอดีน (ได้แก่ ไอโอดีน -131 ไอโอดีน -125) ทำเมื่อ 4 24 หรือ 48 ชั่วโมงอัพเทค

ธัยรอยด์ใช้ไอโอดีนในการผลิตฮอร์โมนซึ่งควบคุมอัตราเมตะโบลิค *(metabolic)* ของร่างกาย กรณีที่บุคคลมีอาการธัยรอยด์ทำงานน้อยกว่าปกติ (เรียก "ไฮโปธัยรอยด์"

(hypothyroid)) จะรับไอโอดีนน้อยกว่ากรณีธัยรอยด์ปกติ (เรียก "ยูธัยรอยด์"*(euthyroid)*) และถ้าธัยรอยด์ทำงานมากเกินกว่าปกติ (เรียก "ไฮเปอร์ธัยรอยด์" *(hyperthyroid)*) จะรับไอโอดีนมากกว่าระดับปกติ

ถ้าทำธัยรอยด์อัพเทคอย่างเดียวโดส์ที่ให้ไม่ควรเกิน *10* μ*Ci* (^{131}I) แต่ถ้าตรวจอย่างอื่นร่วมด้วยไม่ควรเกิน *25* μ*Ci* (^{131}I) นอกจากทำธัยรอยด์ส์แกนใช้ *50* μ *Ci* (^{131}I) ยาจะอยู่ในรูปแคปซูลหรือของเหลว (โดยทั่วไปอยู่ในรูปของเหลว) ถ้าอยู่ในรูปของเหลวและเป็นชนิดปราศจากพาหะ *(carrier free)* ควรเติมไอโอดีน -127 ในแต่ละโดส์ไม่ควรเกิน *1* μ*g* ปกติแล้วคนไข้ไม่จำเป็นต้องงดอาหาร นอกจากจะทำ *"early uptake"*

ตัวอย่างวิธีการวิเคราะห์คือ ใช้ปริมาณไอโอดีน -131 เริ่มแรกเป็นค่ามาตรฐาน 24 ชม.ต่อมาวัดปริมาณไอโอดีน -131 มาตรฐานในแบบจำลองและในคนไข้เช่นกัน ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องมีการแก้ไขปริมาณนับวัดเนื่องจากกชรส์ลายตัวของไอโอดีน -131 เนื่องจากสาร-รังสีมาตรฐานในแบบจำลองและในคนไข้ส์ลายตัวด้วยอัตราเดียวกัน

$$\% \text{ 24 ชม.อัพเทค} = \frac{\text{ปริมาณกัมมันตรังสีนับวัดในคนไข้}}{\text{ปริมาณกัมมันตรังสีนับวัดในมาตรฐาน}} \times 100$$

ยูธัยรอยด์มีค่าประมาณ 10 - 40% (เฉลี่ยประมาณ 20%)

ไฮโปธัยรอยด์มีค่าต่ำกว่า 10%

ไฮเปอร์ธัยรอยด์มีค่าสูงกว่า 40%

แบบจำลองและมาตรฐานที่ใช้โดยทั่วไปคือ

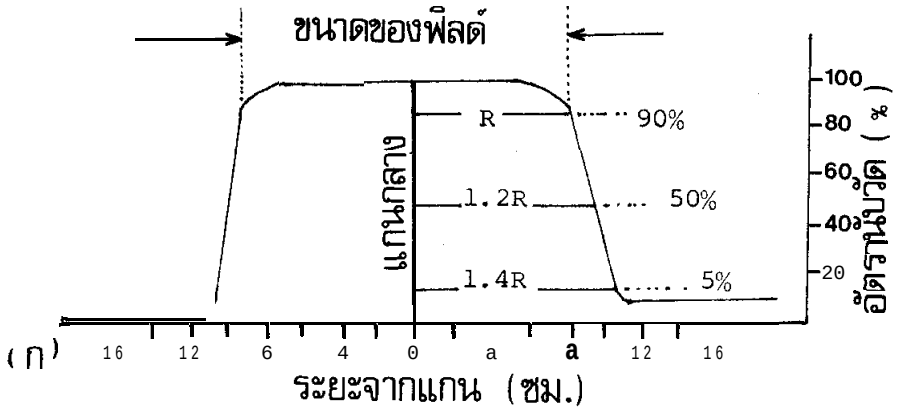
มาตรฐาน ใช้ไอโอดีน -131 ทำมาตรฐานโดยมีปริมาณเท่ากับที่ให้คนไข้ทานปริมาตรของมาตรฐานควรประมาณ 30 มิลลิลิตร ซึ่งเท่ากับปริมาตรเฉลี่ยของต่อมธัยรอยด์ในผู้ใหญ่

ส่วนเด็กใช้เล็กกว่านี้ ขวดใส่มาตรฐานควรเป็นโพลีเอ็ทรีลีนมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร และสูงพอที่จะบรรจุปริมาตร 30 มิลลิลิตรได้

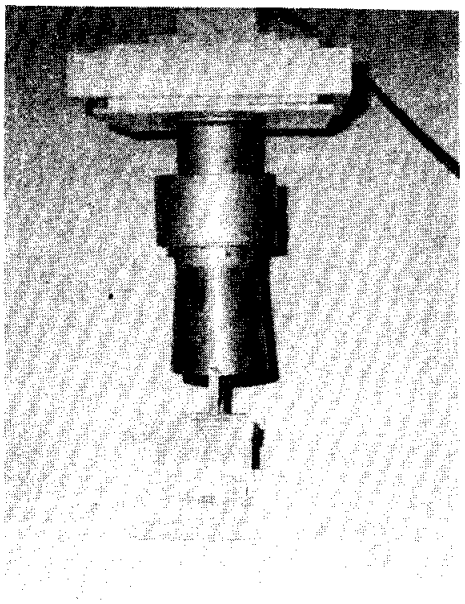
- แบบจำลองรูปคอ *(neck phantom)* เพื่อตัดปัญหาเครื่องมือวัดกัมมันตรังสีจากการกระจัดกระจายด้วย ค่ามาตรฐานจึงควรวัดในแบบจำลองซึ่งควรเป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 15 ซม. ทำด้วยลูไซต์ *(lucite)* หรือเพอร์ซเพ็กส์*(perspex)* และต้องมีรูเพื่อใส่ขวดมาตรฐาน รูควรเจาะต่ำกว่าผิวลงมา 0.5 ซม. ทุกครั้งที่วัดค่ามาตรฐานระวังอย่าให้แบบจำลองเปรอะเปื้อนสารกัมมันตรังสี สำหรับต่อมที่มีขนาดเล็กหรือใหญ่กว่าที่ระบุไว้ควรทำ "คอร์เร็คชันแฟคเตอร์" *(correction factors)* ไว้แก้ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าว พร้อมทั้งแก้ความตื้นลึกของต่อมจากผิวหนังด้วย คอร์เร็คชันแฟคเตอร์หาได้จากการทดลองโดยใช้น้ำในแบบจำลองที่มีขนาดเท่ากับคอคน และใช้มาตรฐานที่มีขนาดต่างๆกันวางที่ความลึกต่างๆกัน หาค่าอัตรานับวัด และหาคอร์เร็คชันแฟคเตอร์ไว้ (ใช้น้ำเป็นแบบจำลองจะดีกว่าใช้พลาสติค เพราะให้ค่าถูกต้องดีกว่า) (ดูรูป 4.4)

4.3.3 เครื่องทำรีโนแกรม *(renogram)*

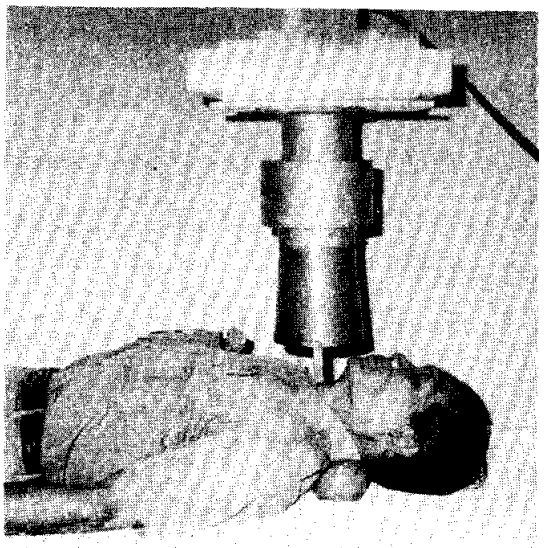
ศึกษาการทำงานของไตโดยฉีดสารกัมมันตรังสีเข้าในกระแสเลือดเมื่อสารกัมมันตรังสีเข้าอยู่ในไตจึงทำการวัดปริมาณกัมมันตรังสีด้วยหัววัด *NaI (Tl)* และนิยมใช้คอลลิเมเตอร์ทรงกระบอก สัญญาณจากหัววัดทั้งสองจะเข้าไปยังเรตมีเตอร์ *(ratemeter)* เพื่อบันทึกปริมาณกัมมันตรังสีที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ค่าจากเรตมีเตอร์จะเป็นค่านับวัดต่อหน่วยเวลา (เป็นนาทีหรือวินาที) และมักจะต่อกับเครื่องบันทึกแผนภาพ ซึ่งจะพล็อตค่านับวัดต่อหน่วยเวลาลงบนกระดาษ เรียกวิธีการดังกล่าวว่า "รีโนแกรม" รูป 4.5 แสดงแผนภาพของอุปกรณ์ในการทำรีโนแกรมของไตปกติ กราฟที่ได้ไม่เป็นเส้นเรียบแต่จะหยิกหยักเนื่องจากค่าทางสถิติของรังสีแกมม่าที่ทำการวัด



(ก)



(ข)

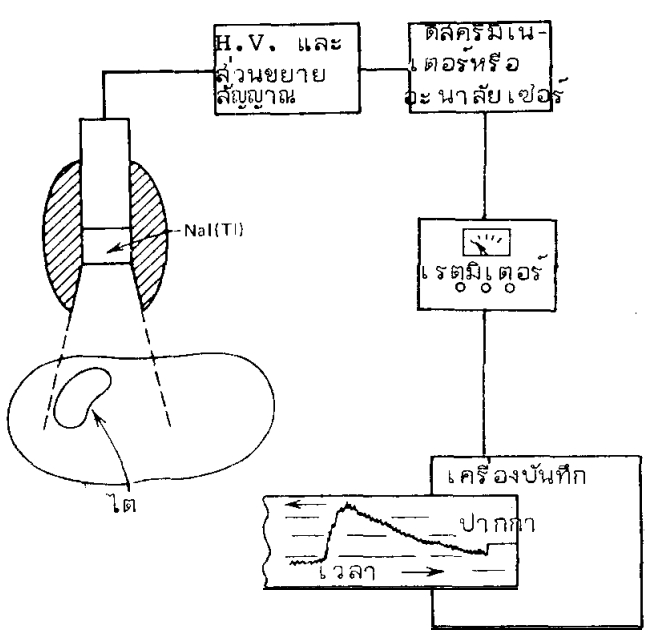


(ค)

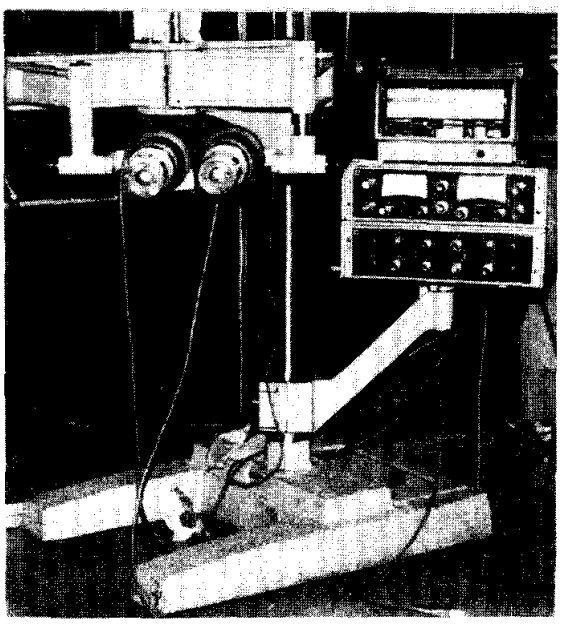
รูป 4.4 ก. แสดงขนาดของฟิลด์ของการที่เครื่องจับภาพได้สัมพันธ์กับแกนกลางของคอลลิเมเตอร์

ข. แบบจำลองที่ใช้ในการทำอัพเทคของธัยรอยด์

ค. ตัวอย่างการวัดค่าแอ็คติวิตี้ในคนไข้



(ก)



(ข)

รูป 4.5 ก. ส่วนประกอบต่างในการทำรีโนแกรม

ข. เครื่องทำรีโนแกรม

เภสัชรังสีที่ใช้อาจเป็น ^{131}I - ฮิปปิวราน ^{99m}Tc - *DTPA* หรือ ^{99m}Tc-*DMSA* แต่ ^{131}I -ฮิปปิวรานยังเป็นที่นิยมที่สุด (ใช้ปริมาณ *7 MBq* หรือประมาณ *200* μCi)

ปัญหาในการทำรีโนกราฟี คือขนาดและตำแหน่งไตในแต่ละคนไข้ไม่แน่นอน ควรหาตำแหน่งโดยเอ็กซ์เรย์ก่อน ใช้หลอดนับวัดจ่อที่ไตทั้งสอง หรือจะแก้ปัญหาโดยใช้หลอดนับวัดขนาดใหญ่ คลุมไตได้ทั้งสองข้างและสามารถเลือกวัดเฉพาะแอคติวิตี้บริเวณไต (โดยตัดแอคติวิตี้บริเวณรอบๆออก) คอลลิเมเตอร์ที่ใช้มักเป็นรูปทรงกระบอก รูเปิดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4-5 ซม. และจากปากคอลลิเมเตอร์ถึงหัววัดมีขนาด 4-5 ซม. นอกจากนี้ แฟคเตอร์ที่จะทำให้รีโนแกรมผิดไป คือดีกรีของไฮเดรชั่น *(hydration)* ของคนไข้ปริมาณของพาหะฮิปปิวราน และ "โฟลเรต" *(flow rate)* ของการขับปัสสาวะ

4.3.4 *t* เครื่องนับวัดรังสีทั้งตัว *(whole-body counter)*

จุดประสงค์ของการนับวัดรังสีทั้งตัวเพื่อหาปริมาณทั้งหมดของกัมมันตรังสีที่ยังคงมีอยู่ในร่างกาย หลังจากที่คนไข้ได้รับสารกัมมันตรังสีและบางส่วนถูกขับออกทางปัสสาวะและอุจจาระ ดังนั้น การวัดแบบนี้จึงเป็นการวัดกัมมันตรังสีทั้งในเลือด เนื้อเยื่อ และอวัยวะ (รูป 4.6)

หลอดนับวัดเดี่ยวนิยมใช้ขนาด 8" × 4" หรือ 8" × 2" แต่ถ้าใช้แบบหลายหลอดใช้ขนาดเล็กกว่านี้ ปัญหาที่ต้องคำนึงถึงคือ

1. การจัด "จีโอเมทรี" *(geometry)* เพื่อให้การวัดปริมาณกัมมันตรังสีได้อัตราการนับวัดดี ไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งที่อยู่ของกัมมันตรังสี

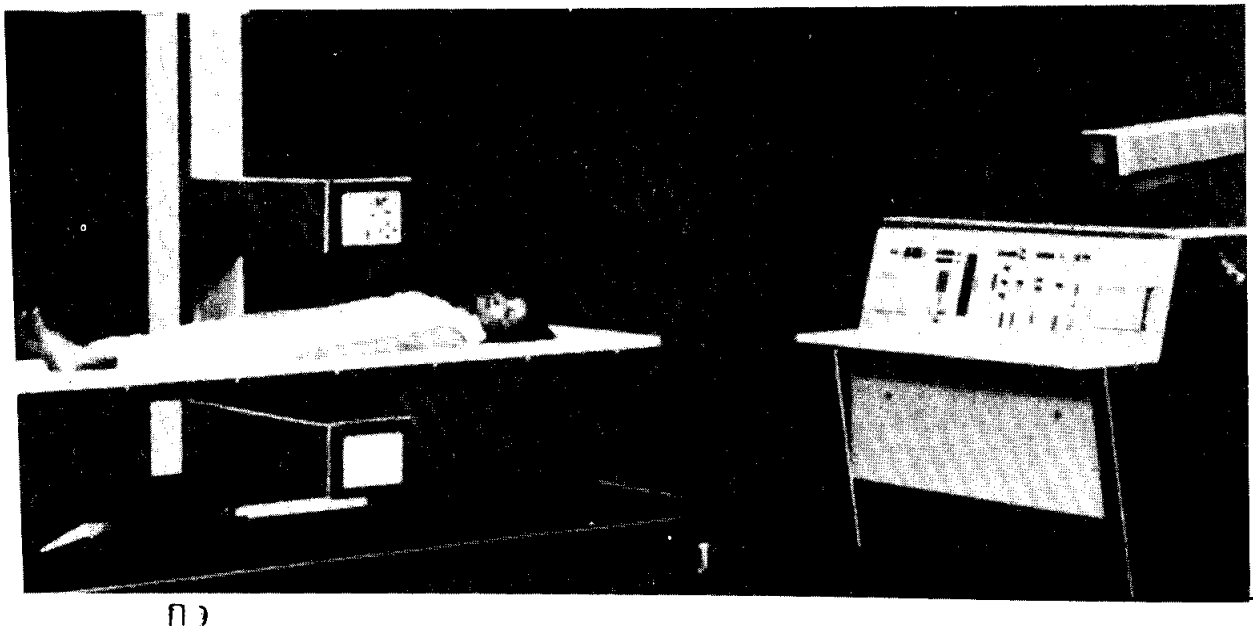
2. น้ำหนักของวัตถุกำบังของหลอดต้องไม่เกินที่ห้องจะรับได้

3. หลอดนับวัดควรมีประสิทธิภาพสูง ในการวัดแต่ละครั้งไม่ควรเกิน 15-20 นาที

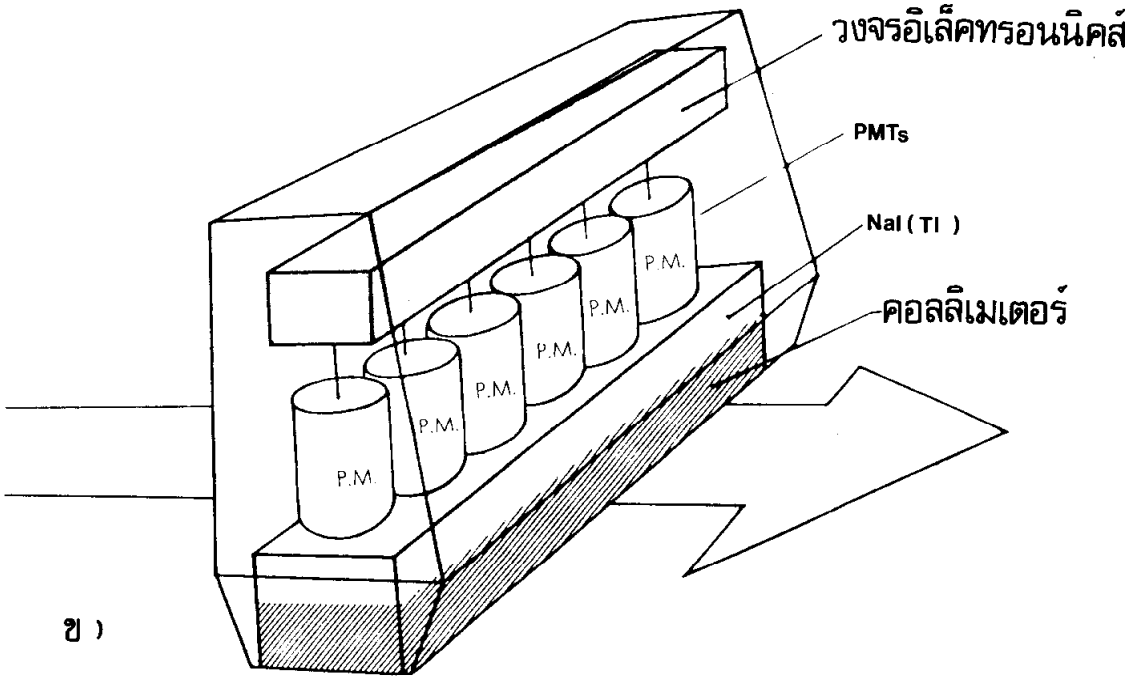
4. เครื่องควรทำส่แกนทางเดียว *(profile)* ได้ เพื่อแสดงตำแหน่งการกระจัดกระจายของสารกัมมันตรังสีในร่างกายได้

เพื่อให้เครื่องมือเป็นไปตามวัตถุประสงค์ เครื่องนับวัดรังสีทั้งตัวจึงมี 2 แบบ คือ แบบอยู่นิ่ง และแบบเคลื่อนที่

- แบบอยู่นิ่ง หมายถึงหลอดนับวัดและคนไข้ไม่มีการเคลื่อนที่ มีทั้งแบบใช้หลอดเดี่ยวและหลายหลอดร่วมกัน แบบหลอดเดียวยังแบ่งเป็นหลายลักษณะ คือหลอดเดี่ยวคนไข้นอนราบ คนไข้นอนบนส่วนโค้ง คนไข้นั่งเก้าอี้พิเศษ ส่วนแบบใช้หลายหลอดมักนิยมคนไข้นอนราบ แล้วใช้ผลรวมการนับวัดของทุกหลอดร่วมกันเป็นค่านับวัดกัมมันตรังสีทั้งตัว
- แบบเคลื่อนที่ มีทั้งหลอดเดี่ยวและหลายหลอด การเคลื่อนที่มีทั้งชนิดหลอดนับวัดเคลื่อนที่-คนไข้นอนราบ และหลอดนับวัดอยู่นิ่งคนไข้เคลื่อนที่



ก)



ข)

รูป 4.6 ก. แสดงเครื่องนับวัดรังสีทั้งตัว มีหัววัดส่องหัวอยู่ด้านบนและด้านล่างของคนไข้ จึงทำการศึกษาอวัยวะ (สแตติค) ได้ส่องจีโอเมตริคอลในเวลาเดียวกัน[3]

ข. ไดอะแกรมส่วนประกอบอย่างง่ายของเครื่องมือในรูป ก.[3]

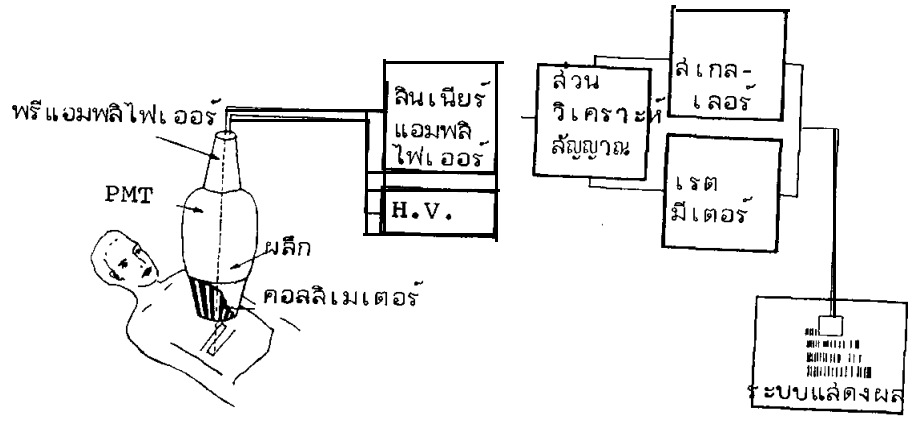
4.4 เครื่องบันทึกภาพ

ในการศึกษาอวัยวะต่างๆในเวชศาสตร์นิวเคลียร์ นอกเหนือจากข้อมูลที่ได้เป็นค่านับวัดกัมมันตรังสีต่อหน่วยเวลา ได้มีการคิดค้นวิวัฒนาการเครื่องมือเพื่อบันทึกภาพการกระจาย-ของกัมมันตรังสีภายในอวัยวะแต่ละส่วนเพื่อความสะดวกและแม่นยำในการให้ผลวินิจฉัยโรคต่อคนไข้ ซึ่งได้เริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 เครื่องมือแสดงผลเป็นภาพมีสำคัญ 2 แบบคือเครื่องสแกนเรคทิลินเนียร์ *(rectilinear scanner)* และแกมม่าคาเมอร่า *(gamma camera)*

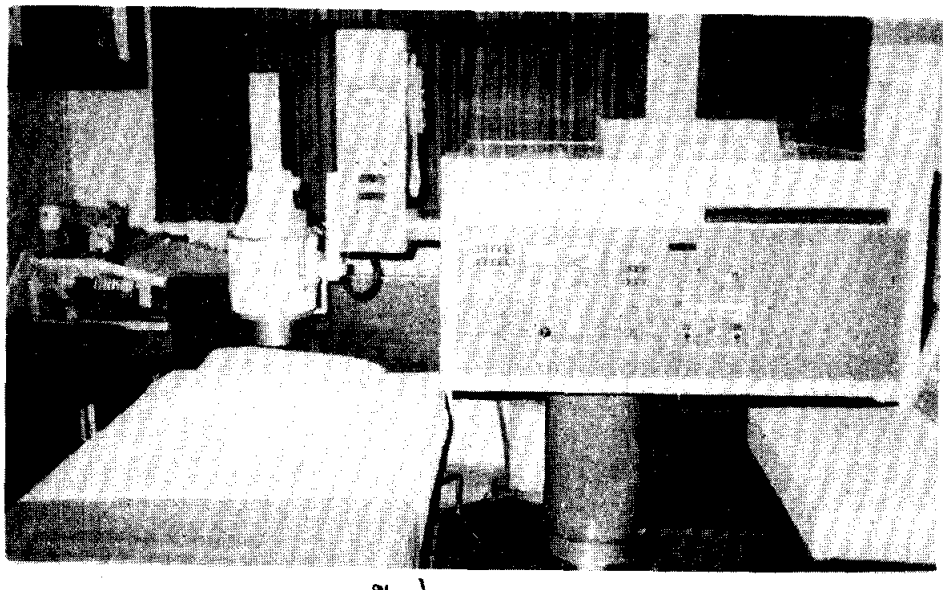
4.4.1 เครื่องสแกน *(scanner)*

หลอดนับวัด คือ *NaI (Tl)* มีขนาด 3" × 2" 5" × 2" และ 8" × 2" ใช้ร่วมกับคอลลิเมเตอร์แบบโฟกัสซึ่งมีลักษณะเป็นรูหลายๆรู เส้นผ่าศูนย์กลางของรูด้านในใหญ่กว่าด้านนอก และทุกๆรูมีจุดโฟกัสร่วมกัน เครื่องสแกนเป็นเครื่องมือที่นับวัดปริมาณกัมมันตรังสีเป็นจุดๆและเคลื่อนที่ต่อเนื่อง ปัญหาของเครื่องสแกนคือความไว *(sensitivity)* และเรโซลูชั่น *(resolution)* เพื่อจะดูขอบเขตของกัมมันตรังสีที่กระจัดกระจายในอวัยวะที่ต้องการดูได้ชัดเจน (คือ *spatial resolution* นั่นเอง ต่างกับ *photopeak resolution* ดังได้อธิบายแล้ว-ในบทที่ 3) ส่วนประกอบของเครื่องสแกนเป็นตามรูป 4.7

คอลลิเมเตอร์ที่มีความไวดีควรมีรูเปิดกว้าง และมี "เซปต้า" *(septa)* บาง (คือค่าความหนาระหว่างช่องเปิด) ส่วนคอลลิเมเตอร์มีเรโซลูชั่นดีควรมีรูถี่มากๆ และมีเซปต้าหนาพอที่จะตัดกัมมันตรังสีที่ไม่ต้องการได้ ดังนั้น คอลลิเมเตอร์จะให้มีลักษณะดีเลิศทั้งสองอย่างใน-เวลาเดียวกันไม่ได้ ในทางปฏิบัติจึงควรเลือกใช้คอลลิเมเตอร์ที่มีเรโซลูชั่นดีเลิศกับอวัยวะเล็กเล็กและใช้คอลลิเมเตอร์ที่มีความไวดี (มีเรโซลูชั่นดีพอสมควร) กับอวัยวะใหญ่ๆ



ก)



ข)

รูป 4.7 ก. บล็อคไดอะแกรมของเครื่องสแกน

ข. แสดงเครื่องสแกนซึ่งมีคอลลิเมเตอร์แบบโฟกัสติดอยู่ แสงจากต้นกำเนิดรังสีจะปรากฏบนฟิล์มใน *photorecorder* ซึ่งมีส่วนที่ปล่อยแสงเคลื่อนที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของหัววัด

ส่วนประกอบทางอิเล็คทรอนนิคส์ของเครื่องสแกนเป็นดังได้อธิบายแล้วในบทที่ 3 แต่มีปุ่มควบคุมเพิ่มขึ้นดังนี้ คือ

- *line spacing* ใช้เลือกความห่างของบรรทัดที่ปรากฏในภาพ โดยทั่วไปใช้ 0.2 ซม. สำหรับอวัยวะเล็กๆ เช่น ธัยรอยด์ และใช้ 0.3-1 ซม. สำหรับอวัยวะใหญ่ๆ
- *dot factor* เป็นดัชนีบอกถึงค่าที่นับวัดได้ที่เคาน์ *(count)* แทนด้วย 1 จุดในภาพ
- *density* เป็นช่วงเวลาที่หลอดนับวัดจับกัมมันตรังสีได้ และเปลี่ยนเป็นแสงฉายบนฟิล์ม ถ้าใช้ตัวเลขสูง-ฟิล์มจะถูกแสงนานและจะดำกว่าใช้ตัวเลขต่ำ
- *range differential* เป็นตัวเลขบอกเปอร์เซ็นต์ความกว้างของค่าที่นับวัดได้จากมากสุดถึงน้อยสุด ที่ต้องการให้ปรากฏบนภาพสแกน เป็นการตัดแบคกราวนด์ในฟิล์ม อวัยวะอื่นๆจะใช้ช่วงกว้าง นอกจากสมองใช้ช่วงความแตกต่างระหว่างเนื้อสมองและแอคติวิตี้สูงสุด

ผลของสแกนน่าเชื่อถือได้มากน้อยขึ้นอยู่กับ "อินฟอร์เมชั่นเดนซิตี้" *(information density* เรียกเป็น *I.D.)* คือจำนวนค่าที่นับวัดได้ต่อตารางพื้นที่ที่สแกน ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$I.D. = \frac{\text{count rate (cpm)}}{\text{scan speed (cm/min)} \times \text{line spacing (cm)}}$$

หน่วยของ *I.D.* คือ $count/cm^2$ และค่าที่ใช้โดยทั่วไปคือ *800* $counts/cm^2$ ถ้าค่ามากกว่านี้ค่าความถูกต้องไม่ดีขึ้นเท่าไร แต่ถ้า *I.D.* ค่าน้อยกว่าจะทำให้ค่าความถูกต้องทางสถิติน้อยลง ในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องทำให้ค่า *I.D.* เป็น *800* $counts/cm^2$ เสมอทุกครั้ง เนื่องจากยังมีแฟคเตอร์อื่นต้องคำนึงถึงอีก เช่น เมื่ออัตรานับวัดมีค่าต่ำมากๆ ถ้าเราต้องการ *I.D. 800* จะต้องใช้ความเร็วในการสแกนช้ามาก จะไม่ทันต่อการขับกัมมันตรังสีออกไปจากร่างกาย หลักทั่วไปในทางปฏิบัติคือ ไม่ควรเลือก *I.D.* ต่ำกว่า *300* เว้นแต่การสแกน - สมอง *(brain scan)* ซึ่งใช้เภสัชรังสีอื่นที่ไม่ใช่ ^{99m}Tc และการสแกนกระดูก *(bonescan)*

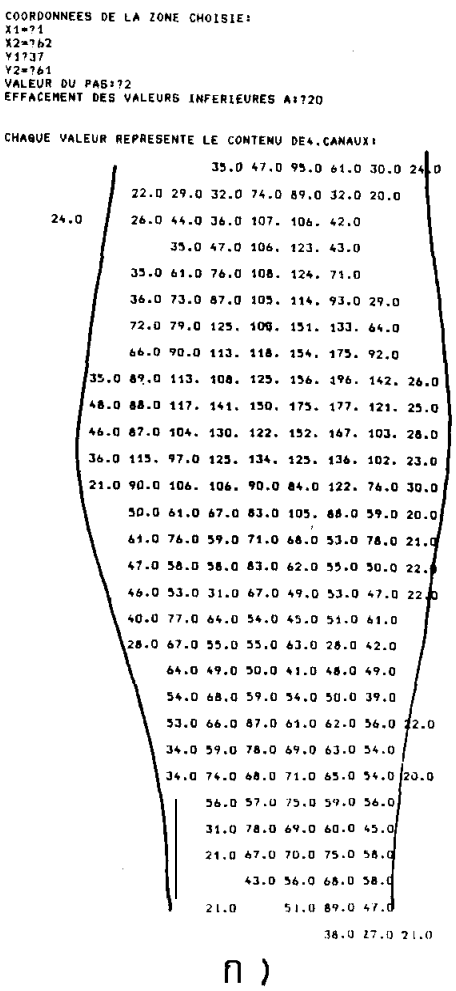
ค่าทางสถิติของเรตมิเตอร์ขึ้นอยู่กับอัตรานับวัดและ *"time constant"* ซึ่งถ้าอัตรานับวัดที่อ่านจากเรตมิเตอร์คลาดเคลื่อนจะทำให้ค่า *I.D.* คลาดเคลื่อนด้วย ความแม่นยำของเรตมิเตอร์ขึ้นกับการเลือกค่า *time constant* ซึ่งในการเลือกค่านี้ต้องพิจารณาความเร็วที่ใช้ในการสแกน โดยทั่วไปมักใช้ค่าดังนี้

scan speed range (cm / min)	*time constant*
2 - 7	1.0
8 - 24	0.25
25 - 75	0.08
76 - 200	0.03
201 - 600	0.01

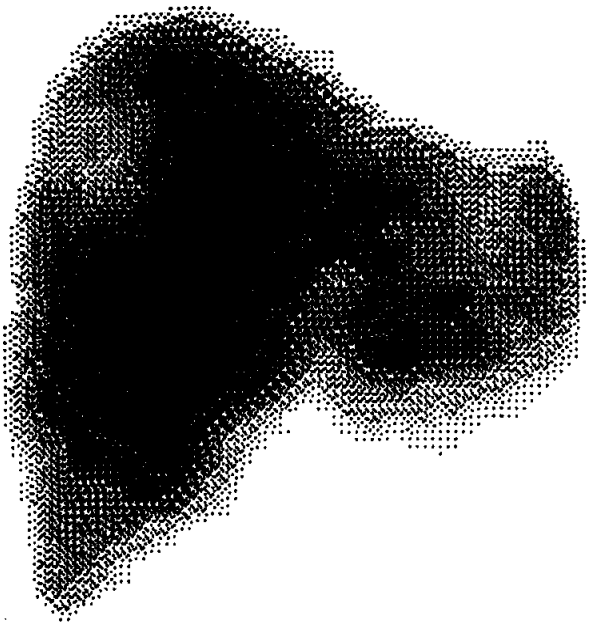
การกระจายของกัมมันตรังสีในอวัยวะที่ต้องการศึกษาโดยเครื่องสแกนนั้น ผลที่แสดงมีหลายแบบ เช่น

1. การนับวัดจุดต่อจุด *(point - by - point counting)* วิธีนี้ใช้อัตรานับวัดเป็นตัวบอกความเข้มรังสีที่มีอยู่ โดยวัดแต่ละจุดแล้วพิมพ์ลงบนกระดาษผลเช่นนี้อ่านค่อนข้างยาก แต่สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของตำแหน่งที่ผิดปกติได้ดีจากตัวเลขที่แสดง (ตามรูป 4.8)

2. อัตรานับวัดแนวเดียว *(count rate profile)* คือแทนที่จะวัดผลออกมาเป็นตัวเลขดังข้อ 1 กลับหาอัตรานับวัดจากเรตมิเตอร์แล้วแสดงผลเป็นกราฟ ถ้าใช้ค่าอัตรานับวัดแนวเดียวทุกๆเส้นที่ได้ตลอดอวัยวะมาซ้อนกันจะได้ภาพ 3 มิติ



ก)



ข)

ค)

รูป 4.8 แสดงผลที่ได้จากเครื่องสแกน(ก) พิมพ์ตัวเลขแสดงอัตรานับวัด (ข) แสดงผลเป็นจุด (ค) ภาพสแกนสี

3. การพิมพ์สัญญลักษณ์ *(symbol printing)* แสดงผลเป็นการพิมพ์ด้วยจุด ยืด บาร์ หรือ กากะบาดลงบนกระดาษ บนริบบ้อน หรือบนกระดาษคาร์บอน วิธีนี้มีประโยชน์คือเห็นผลได้ทันที จากรูปและทำง่ายแต่ไม่ทราบค่าความแตกต่างเป็นตัวเลข (รูป 4.8)

4. ภาพสแกนสี *(colour acanning)* ใช้สีต่างๆแทนความเข้มกัมมันตรังสีที่เรตมีเตอร์อ่านอัตรานับวัดออกมา เช่น

100 % แทนด้วยสีแดง

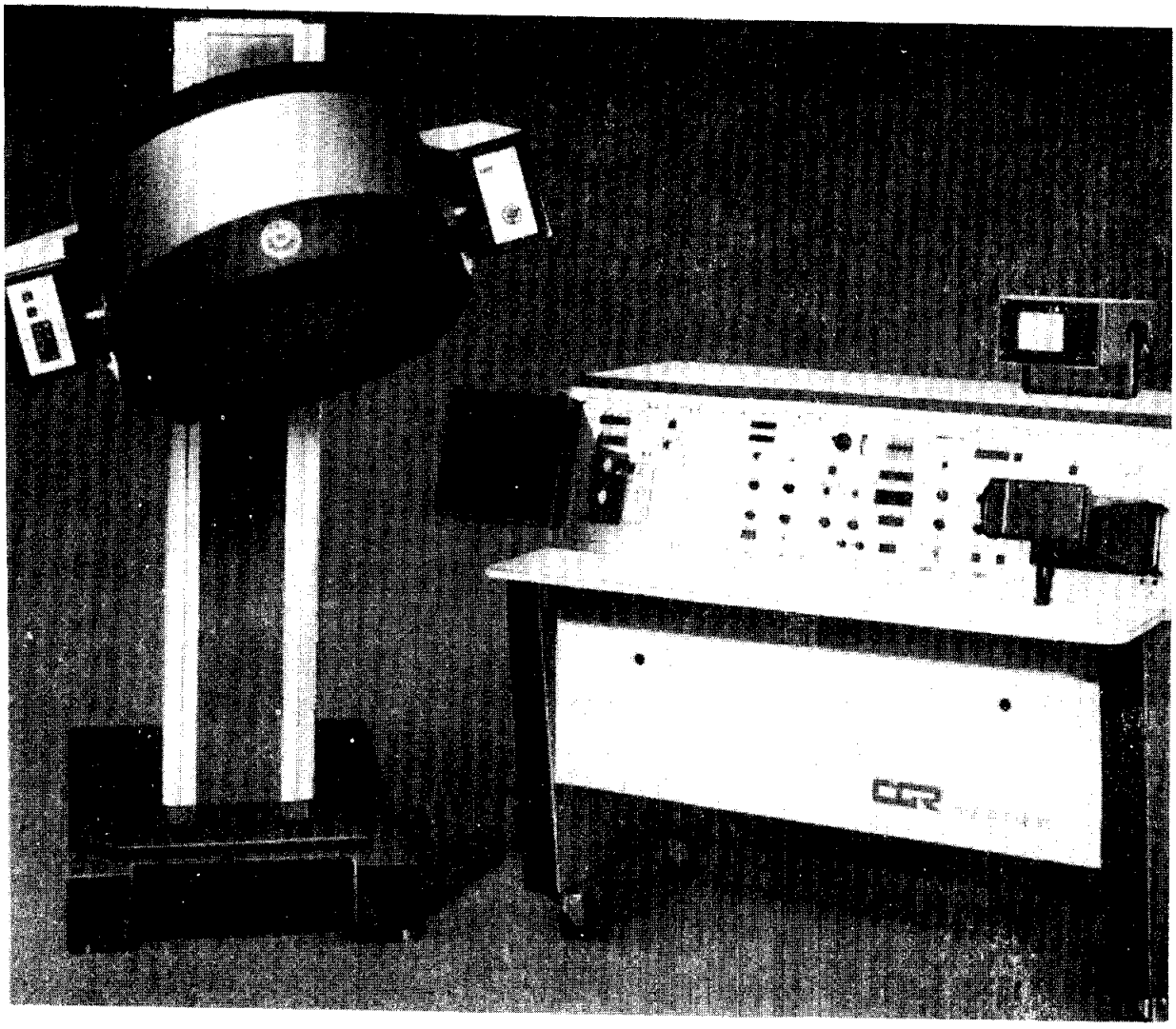
9 0 % สีส้ม

10 % สีดำ

และต่ำกว่านั้นเป็นสีขาว เป็นต้น สีอ่านง่ายและคล้ายกับบอกค่าแอ็คติวิตี้ที่กระจายในอวัยวะเป็นตัวเลขหยาบๆ (รูป 4.8)

5. โฟโต้สแกน *(photoscanning)* เป็นการแสดงผลสแกนในรูปของฟิล์ม สัญญาณไฟฟ้าที่ผ่านวงจรอิเล็คทรอนิคส์ออกมาถูกเปลี่ยนเป็นแสงฉายไปบนฟิล์ม

6. การเก็บข้อมูลไว้ในเทปแม่เหล็กเพื่อหาผลของการสแกนใหม่อีกครั้งหนึ่ง กล่าวคือเก็บบันทึกข้อมูลไว้ในเทปแม่เหล็ก จากนั้นแสดงผลแบบต่างๆ (จากข้อ 1-5) อีกครั้งหนึ่งนั่นเอง



รูป 4.9 เครื่อง แอ็คติคาเมอร่า(*Acticamera 3420*)

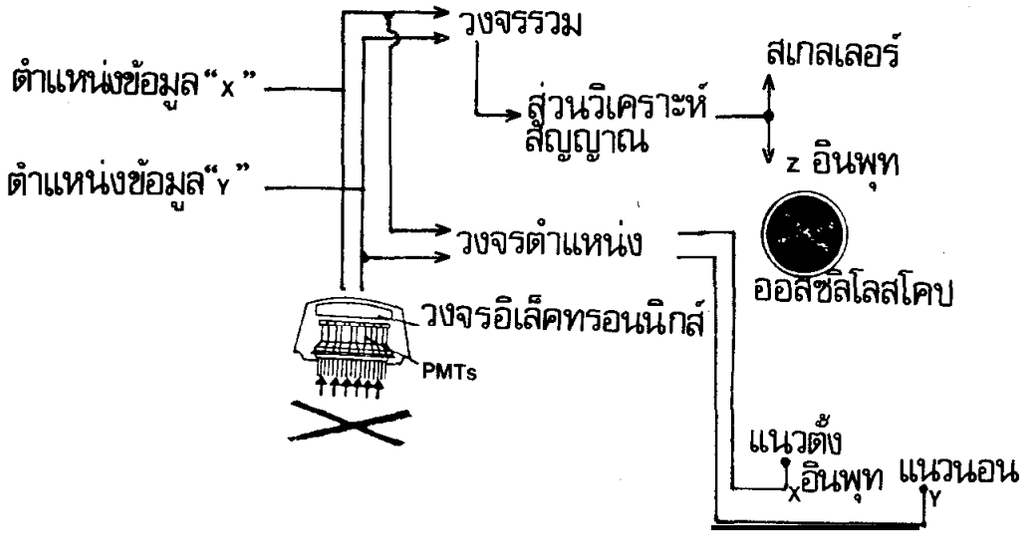
4.4.2 แกมม่าคาเมอร่า *(gamma* camera)

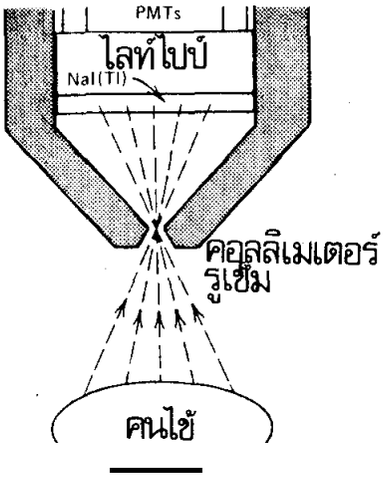
เป็นเครื่องมือใช้บันทึกภาพดูการกระจัดกระจายของกัมมันตรังสีในอวัยวะ โดยเก็บบันทึกความเข้มกัมมันตรังสีตลอดทั้งอวัยวะในเวลาต่อเนื่องกัน ภาพที่ได้เร็วกว่าการส่แกน หลอดนับวัดคือ *NaI (Tl)* ใช้ขนาดใหญ่มาก แต่บางชนิดนิยมใช้ขนาด 11" × ½" (รูป 4.9)

คอลลิเมเตอร์ที่ใช้มีหลายแบบ เช่น คอลลิเมเตอร์รูเข็ม คอลลิเมเตอร์รูขนาน และไดเวอร์จิ่งคอลลิเมเตอร์ *(diverging collimator)* ปัญหาเรื่องความไวและเรส์โซลูชั่นขึ้นกับขนาดและปริมาณของรูคอลลิเมเตอร์เช่นเดียวกับเครื่องส่แกน นอกจากนั้นยังสามารถเลือกคอลลิเมเตอร์เพื่อใช้กับสารกัมมันตรังสีที่มีพลังงานสูงหรือต่ำ

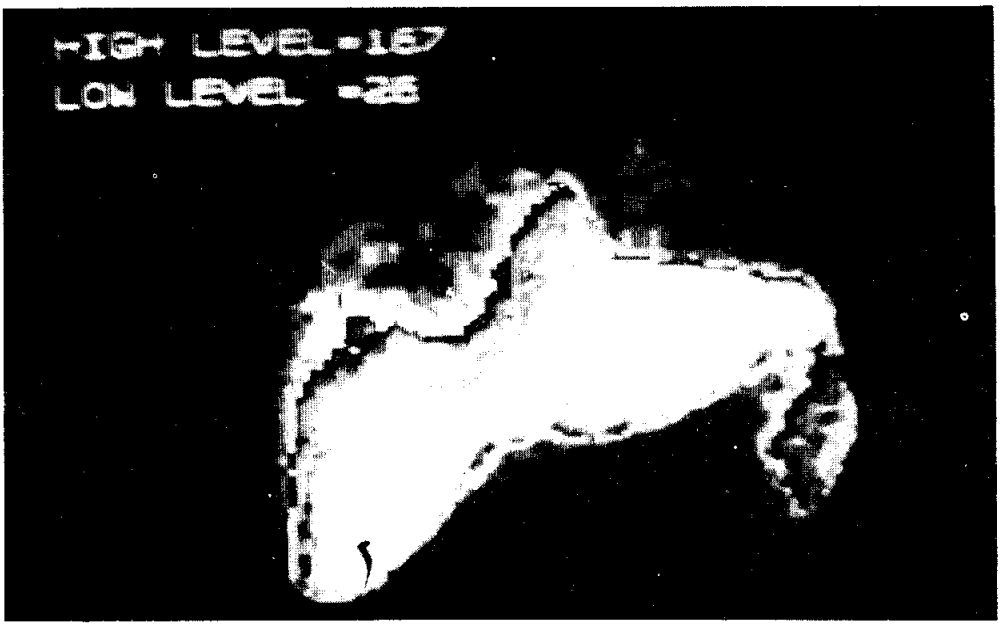
การเรืองแสงผ่านทาง "ไลท์ไปป์" *(light pipe)* ของ *PMT* ซึ่งมีถึง 19 หรือ 37 หลอด เมื่อรังสีแกมม่าชนหัววัดจะเกิดการเรืองแสงมากที่สุดจากหัววัดที่อยู่ใกล้ที่สุด ทำให้เกิดสัญญาณขนาดใหญ่ใน *PMT* ที่อยู่ใกล้สุดนั้น และเกิดสัญญาณขนาดเล็กใน *PMT* ชิ้นๆ สัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปหาโคออร์ดิเนต (x, y) ของการเรืองแสง (รูป 4.10) รูป 4.11 เป็นตัวอย่างภาพจากแกมม่าคาเมอร่า ปัจจุบันมีการต่อเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อทำการส่ร้างข้อมูลเชิง - ปริมาณ

เรส์โซลูชั่นของแกมม่าคาเมอร่ามีขนาดพอๆกับของเครื่องส่แกนกล่าวคือ สามารถแยกต้นกำเนิดรังสีที่อยู่ห่างกันเพียง 5 มม.ได้ แต่ใช้เวลาเพียง 2-3 นาทีเท่านั้น จากคุณสมบัตินี้เองทำให้สามารถศึกษาข้อมูลไดนามิกส์ได้ (คือ ณ เวลาต่างๆกันหลังจากกัมมันตรังสีเริ่มเข้าสู่ร่างกายจะกระจายไปยังส่วนใดของร่างกาย) ซึ่งเครื่องส่แกนทำไม่ได้ ทั้งยังสามารถใช้นิวไคลด์รังสีอายุสั้นมากๆได้ (ครึ่งอายุประมาณ 2 นาที หรือน้อยกว่า) (สรุปข้อเปรียบเทียบของเครื่องส่แกนและแกมม่าคาเมอร่าแสดงในตาราง 4.1)

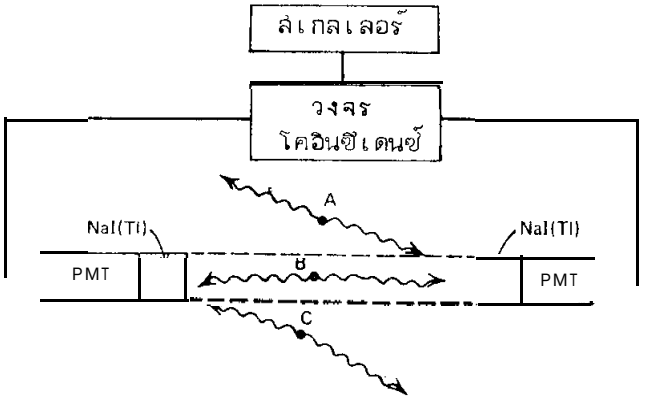




รูป 4.10 แสดงแผนภาพของ *Anger scintillation camera*



รูป 4.11 แสดงตัวอย่างภาพจากแกมม่าคาเมอร่าโดยต่อเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถดูผลได้จากจอภาพ



รูป 4.12 แสดงโพซิตรอนคาเมอร่า ในแต่ละครั้งที่เกิดการสลายตัวโพซิตรอนที่อยู่ในบริเวณเส้นประเท่านั้นที่จะทำให้เกิดสัญญาณแบบโคอินซิเดนซ์ใน PMT ทั้งสอง โพซิตรอนที่ตำแหน่งอื่น เช่น A และ C อาจทำให้เกิดสัญญาณในหัววัดได้เช่นกัน

ตาราง 4.1 เปรียบเทียบเครื่องสแกนและแกมม่าคาเมอร่า

	เครื่องสแกน	แกมม่าคาเมอร่า
ราคา	แบบง่ายที่สุดราคาถูกกว่าแกมม่าคาเมอร่า	แบบง่ายสุดราคาถูกกว่าเครื่องสแกนแบบสองหัววัด *(dual head)*
ภาพที่ได้	โดยทั่วไปได้ภาพในแนวเดียวเท่านั้น	สามารถจัดผลึกให้ทำมุมกับอวัยวะได้
ไดนามิกส์	ใช้ศึกษาเฉพาะสแตติคได้เท่านั้น	ใช้ศึกษาทางไดนามิกส์ได้ดี
ขนาดของวิว	สามารถใช้สแกนทั้งตัวได้	สามารถใช้สแกนทั้งตัวได้
การบันทึกภาพที่เห็น	ขนาดอวัยวะเต็มที่เป็นดอต เป็นลีหรือเป็นภาพบนฟิล์ม	ขนาดอวัยวะเต็มที่ โดยทั่วไปใช้ฟิล์มโพลารอยด์หรือฟิล์มเอ็กซ์เรย์
ยูนิเฟอร์มิตี้ของวิว	ภายใน ±2%	ปกติภายใน ± 10%
โทโมกราฟี่	จำกัดที่คอลลิเมเตอร์ และขึ้นกับขนาดผลึกและความลึกของจุดโฟกัส	สามารถใช้ทำได้
ความเร็ว	จำกัดที่กลไกของความเร็ว อาจทำได้ 500 *cm/min* แต่เวลาในการทำการสแกนนานกว่าคาเมอร่า	จำกัดที่แอ็คติวิตี้ที่ใช้ ถ้าอัตรานับวัดต่ำต้องเพิ่มเวลาในการทำภาพ
ความสะดวกในการใช้เครื่อง	การปรับวินโดว์พลังงานซับซ้อนกว่า และมีหลายปุ่มที่ใช้ปรับ สมัยใหม่ได้มีการปรับแบบออโตแมติค เครื่องสแกนทั่วไปเคลื่อนที่ได้	ง่ายในการปรับวินโดว์พลังงานและง่ายในการใช้งาน สามารถย้ายที่ได้ แต่เคลื่อนที่ไม่ได้
ความถูกต้อง	วงจรอิเล็คทรอนิกส์เชื่อถือได้ ทางเมคแคนิกส์อาจมีปัญหาบ้าง	ทั้งอิเล็คทรอนิกส์และเมคแคนิกส์ถูกต้องดี
พลังงาน	ประมาณ 25-500 *keV* ประสิทธิภาพสูงเมื่อพลังงานสูง	ประมาณ 80-500 *keV* ประสิทธิภาพดีประมาณ 200 *keV*
การหาตำแหน่ง	ต้องใช้เวลา และยุ่งยากเมื่ออัตรานับวัดต่ำ	ง่ายและสะดวกโดยใช้สโคป

กรณีต้นกำเนิดโพซิตรอน ได้มีการปรับปรุงเครื่องมือโพซิตรอนคาเมอร่า *(positron camera)* เมื่อโพซิตรอนวิ่งไปรวมตัวกับอิเล็คตรอนและปล่อยโฟตอนพลังงาน *0.511 MeV* คือ-รังสีจากการทำลาย *(annihilation radiation)* วิ่งไปทิศทางตรงข้ามกัน โพซิตรอนคา-เมอร่าจึงถูกสร้างขึ้นตามหลักการดังกล่าว (รูป 4.12) ซึ่งสัญญาณจากหัววัดทั้งสอง (อยู่ตรงข้ามกัน) จะถูกวิเคราะห์โดยวงจรโคอินซิเดนซ์ *(coincidence)* (จะบันทึกค่านับวัดต่อเมื่อสัญญาณ-จากหัววัดทั้งสองเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันเท่านั้น)

4.5 สถิติของการนับวัดกัมมันตรังสี

ในการวัดอัตราการสลายตัวหรือปริมาณกัมมันตรังสี ความถูกต้องของการนับวัดขึ้นกับปริมาณที่วัดได้ คือถ้าเก็บตัวเลขได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การผิดพลาดจะน้อยลง ถ้าทำการวัดไอ-โซโทปรังสีชนิดหนึ่งซ้ำหลายครั้งๆแล้วนำไปเขียนกราฟระหว่างอัตรานับวัดกับค่าความถี่ จะได้รูปมีลักษณะคล้ายระฆัง มียอดอยู่ที่ค่าเฉลี่ย *(mean)* ของการวัดทั้งหมด ลักษณะการกระจายค่าตามรูปดังกล่าวเรียกว่าการกระจายแบบปัวซอง *(Poisson distribution)*

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน *(standard deviation)* ของเครื่องนับวัดแบบสเกลเลอร์ มีค่าเป็น $\sqrt{N}$ และแบบเรตมิเตอร์มีค่า $\sqrt{2nt}$

โดยที่ N เป็นจำนวนเคาน์ที่นับวัดได้

n เป็นค่านับวัดต่อเวลา (เช่น *counts/see*)

t เป็นค่า *time constant*

ค่าจะแม่นยำเมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อย

Standard error คือ $\sqrt{N} / N$ และถ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะได้เป็น $100/\sqrt{N}$ ถ้าให้ Δ_N แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน กล่าวได้ว่า

โอกาสของการนับวัดจะอยู่ในช่วง $N \pm \Delta_N$ มี 67 %

$N \pm 1.6\ \Delta_N$ - 90 %

$N \pm 2.0\ \Delta_N$ - 95 %

$N \pm 2.6\ \Delta_N$ - 99 %

ในการนับวัดสารกัมมันตรังสีจะวัดค่าแบคกราวนด์อยู่ด้วย ค่านับวัดได้ทางสถิติต้องคำนึงถึงค่า *standard error* ของทั้งสองอย่างรวมกัน คือ

$$\sigma = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_b^2}$$

โดยที่ σ เป็น *standard error* ทั้งหมด

σ_s เป็น *standard error* ของสารตัวอย่างที่ต้องการวัด

σ_b เป็น *standard error* ของแบคกราวนด์

<u>ตัวอย่าง</u> วัดกัมมันตรังสีในสารตัวอย่างได้ S เคาน์ใน T นาที

วัดค่าแบคกราวนด์ได้ B เคาน์ใน t นาที

เขียนค่าที่นับวัดได้เป็น

$$\left(\frac{S}{T} - \frac{B}{t}\right) \pm \sqrt{\frac{S}{T}2 + \frac{B}{t}2} \quad \text{เคาน์/นาที}$$

และเปอร์เซ็นต์ของ *Standard error* คือ $\dfrac{\sqrt{\frac{S}{T}2 + \frac{B}{t}2}}{\left(\frac{S}{T} - \frac{B}{t}\right)} \quad 100$

- *Figure of Merit (Q)* เป็นตัวเลขบอกความดีของเครื่อง เพื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอื่น มีสูตรเป็น

$$Q = \sqrt{C} - \sqrt{B}$$

โดย C เป็นค่านับวัดรวมค่าแบคกราวนด์

B เป็นแบคกราวนด์

$S = C - B$ เป็นปริมาณกัมมันตรังสีที่แท้จริง

เครื่องใดมีค่า Q สูง เป็นเครื่องที่ดีกว่า

เมื่อได้ค่า Q จะหาเวลาใช้น้อยที่สุดเพื่อให้ได้ *error* ตามต้องการ จากสูตร

$$T_{min} = 1/\sigma^2 Q^2$$

โดย σ เป็น *standard error* ที่กำหนด

บางครั้งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องมือสองชนิด ถ้าต้องการความแน่นอนสูงอาจใช้สูตรของ *Hine* ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\textit{Relative figure of Merit } (Q_R) = \left[(S_2 + 2B_2)/(S_1 + 2B_1) \right] (S_1^2 / S_2^2)$$

โดยเครื่องชนิดที่ 1 วัดสารตัวอย่างได้ S_1 และวัดแบคกราวนด์ได้ B_1

เครื่องชนิดที่ 2 วัดสารตัวอย่างได้ S_2 และวัดแบคกราวนด์ได้ B_2

ถ้า $Q_R > 1$ แสดงว่าเครื่องชนิดที่หนึ่งดีกว่าชนิดที่สอง

กรณีแบคกราวนด์มีค่าน้อยกว่าอัตรานับวัดสารตัวอย่างมากๆ ใช้สูตร

$$Q_R = S_1 / S_2$$

กรณีที่อัตรานับวัดในสารตัวอย่างต่ำ (เมื่อเทียบกับแบคกราวนด์) ใช้สูตร

$$Q_R = (S_1^2 / B_1) / (S_2^2 / B_2)$$

- การแบ่งเวลาสำหรับใช้วัดสารกัมมันตรังสีและวัดแบคกราวนด์

ในกรณีที่มีเวลาจำกัดในการนับวัด T นาที ต้องการแบ่งเวลาเพื่อวัดกัมมันตรังสี T_C และวัดแบคกราวนด์ T_B และให้เกิด *standard error* น้อยที่สุด หรือให้มีความถูกต้องสูงสุด ใช้หลักดังนี้

$$T_C = \frac{T\sqrt{C}}{\sqrt{C} + \sqrt{B}} \quad , \quad T_B = \frac{T\sqrt{B}}{\sqrt{C} + \sqrt{B}}$$

โดย C เป็นอัตรานับวัดรวม

B เป็นอัตรานับวัดแบคกราวนด์

- แบคกราวนด์ มีผลต่อความถูกต้องทางสถิติของการนับวัดกัมมันตรังสีมาก ควรวัดกัมมันตรังสีให้ได้ค่านับวัดสูงกว่าแบคกราวนด์ 5 - 10 เท่าจึงจะทำให้ค่าคลาดเคลื่อนทางสถิตินอยลง นอกจากนั้น แบคกราวนด์ยังเป็นตัวกำหนดความไวของเครื่องมือ (ปริมาณกัมมันตรังสีน้อยที่สุดที่เครื่องมือจะนับวัดได้) การจะวัดกัมมันตรังสีให้ได้ผลที่น่าเชื่อถือ สารนั้นต้องมีความเข้มรังสีเฉลี่ยแล้ว-ไม่น้อยกว่า 1/10 เท่าของแบคกราวนด์

4.6 การใช้รังสีเอ็กซ์วินิจฉัยโรค

การใช้เอ็กซ์เรย์ในการวินิจฉัยโรคซึ่งเป็นที่รู้จักแพร่หลายคือการเอ็กซ์เรย์ฟัน ปอด หรือส่วนอื่นๆของร่างกาย

เอ็กซ์เรย์โฟตอนจัดอยู่ในตระกูลแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งรวมถึงแสงชนิดต่างๆ (อินฟรา-เรด แสงสว่างช่วงสายตามองเห็น และอุลตร้าไวโอเล็ต) คลื่นวิทยุ เรดาร์และสัญญาณโทร-ทัศน์ และรังสีแกมม่า

4.6.1 ปริมาณที่คนไข้ได้รับกัมมันตรังสีจากการเอ็กซ์เรย์

หน่วยของกัมมันตรังสีเอ็กซ์โพเซอร์คือเรินต์เกน *(R)* คือการวัดประจุไฟฟ้าเกิดจากการแตกตัวของอากาศ

$$1\ R = 2.58 \times 10^{-4}\ Coulomb/_{kg}\ \text{อากาศ}$$

ตาราง 4.2 แสดงปริมาณกัมมันตรังสีที่ได้รับจากการศึกษาหรือวินิจฉัยโรคโดยใช้รังสีเอ็กซ์

ตาราง 4.2 ปริมาณกัมมันตรังสีได้รับโดยผู้ใหญ่ในสหรัฐอเมริกา (1974)[1]

ส่วนของร่างกายที่ถูกรังสีเอ็กซ์	เอ็กซ์โพเซอร์ *(mR)*	พ.ท.สำรังสี / พ.ท.ฟิลม	เอ็กซ์โพเซอร์สัพธ์ที่เกิดบนพื้นที่ *(raps)*
หน้าอก	23	2.0	0.5
กระดูกกะโหลก	270	1.1	1.3
หน้าท้อง	560	1.1	4.7
เหนือเซอร์วิคัลสไปน์ *(upper cervical spine)*	230	1.9	1.5
ใต้สัมบาร์ซาครัลสไปน์ *(lower lumbar sacral spine)*	790	1.1	6.6
ฟัน	650	2.9	0.2

หมายเหตุ *rap (Roentgen - Area Product)*

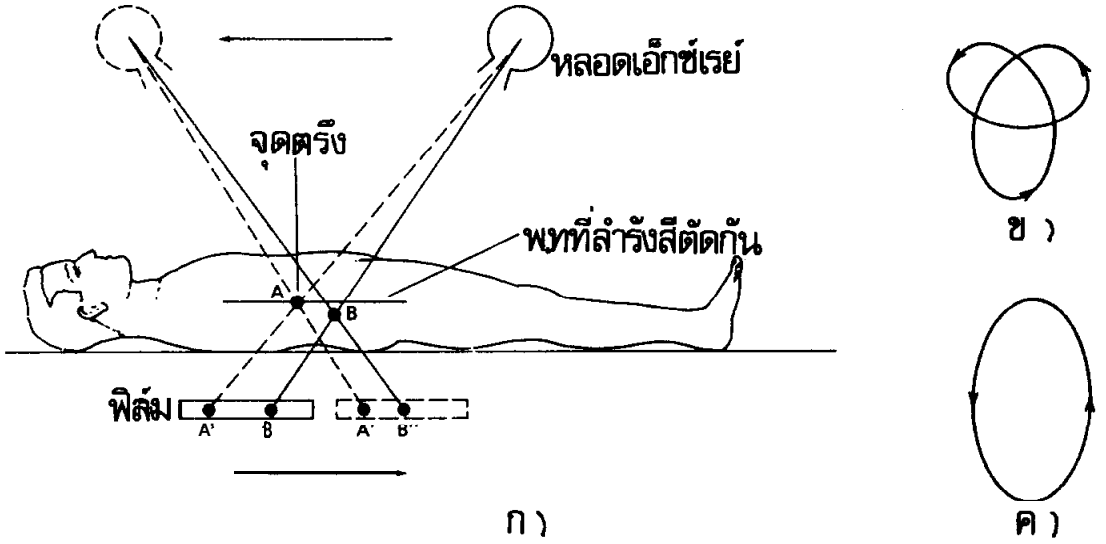
$$1\ rap = 100\ Rcm^2$$

4.6.2 ภาพตัดขวางของร่างกายโดยใช้รังสีเอ็กซ์

ภาพถ่ายเอ็กซ์เรย์โดยทั่วไปนั้นเงาของวัตถุ (ร่างกาย) ที่ถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์จะปรากฏบนแผ่นฟิล์มที่รองรับ ถ้าอวัยวะหรือส่วนของร่างกายที่ต้องการศึกษาอยู่ซ้อนกับอวัยวะอื่นจะเกิดเงาซ้อนกันจนยากต่อการอ่านฟิล์มวินิจฉัยโรค เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว นักรังสีวิทยาจึงพยายามเก็บภาพจากรังสีเอ็กซ์ซึ่งได้จากทิศทางต่างๆกัน เช่น จากด้านหลัง ด้านข้าง หรือจากมุมใดมุมหนึ่ง ภาพที่ได้จึงเป็นภาพตัดของอวัยวะในช่วงบางๆหรือที่เรียกว่า *"Section radiography"* ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในนาม "โทโมกราฟฟี" *(tomography)* ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 และยังเป็นวิธีดีที่สุดในการแยกเงาอวัยวะที่ต้องการศึกษา ซึ่งได้รับการปรับปรุงเมื่อปี ค.ศ. 1972 (เดิมเรียก *"conventional tomography"* ต่อมาหลังการปรับปรุงแล้วเรียก *"computerized tomography")*

หลักการพื้นฐานของโทโมกราฟฟีคเชิงเส้นแสดงในรูป 4.13 หลอดเอ็กซ์เรย์และแผ่นฟิล์มต่างเคลื่อนในทิศส่วนกัน จังหวะในการฉายรังสีเอ็กซ์ถูกจัดให้มีช่วงพอเหมาะ เพื่อเกิดภาพอวัยวะในระดับที่ต้องการศึกษาในคนไข้ที่บริเวณลำรังสีตัดกัน ภาพบริเวณนี้จึงชัดเจน สำหรับภาพที่อยู่เหนือหรือใต้บริเวณดังกล่าวจะเบลอร์ไม่ชัดเจน เนื่องจากรังสีเอ็กซ์ตัด ณ จุดต่างกันบนฟิล์มและจะกลายเป็นแบคกราวนด์ เช่น เงาของโครงสร้างที่อยู่เหนือหรือใต้แนวตัดซึ่งอยู่ในแนวเดียวกับการเคลื่อนที่ยังคงปรากฏอยู่ และทำให้เกิดเงา "อาร์ติแฟคต์" *(artifact)* ได้ ในการกำจัดจะต้องมีขั้นตอนของการทำให้อุปกรณ์โทโมกราฟฟีคเคลื่อนที่ได้อย่างซับซ้อนยุ่งยากไปจากหลักการเดิม ในอุปกรณ์สมัยใหม่ สำเอ็กซ์เรย์และฟิล์มจะมีโครงสร้างเป็นรูปไซคลอยด์*(cycloidal)* หรือรูปไข่ *(elliptical)*

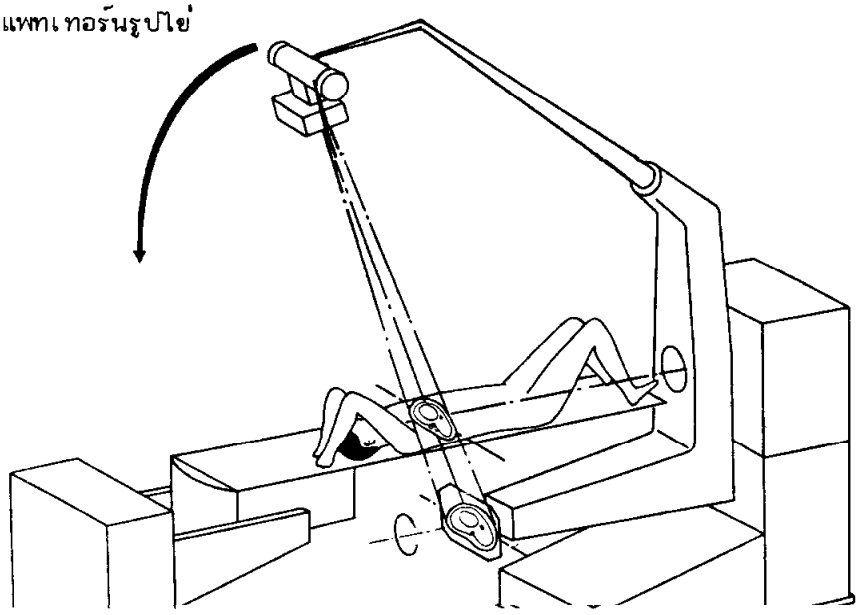
"แอ็กเซียลโทโมกราฟ" *(axial tomograp)* เป็นภาพลักษณะเฉือนตัดขวางร่างกายเป็นชั้นบางๆ วิธีการทำโดยหมุนหลอดเอ็กซ์เรย์และฟิล์มรอบคนไข้ (รูป 4.14) เทคนิคดังกล่าวเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวางแผนกำหนดปริมาณกัมมันตรังสีเพื่อใช้รักษาโรคมะเร็ง



รูป 4.13 ก) แสดงหน่วยของโทโมกราฟฟิคเชิงเส้น หลอดเอ็กซ์เรย์และฟิล์มเคลื่อนในทิศตรงข้ามกัน ภาพที่จุด A จะชัดเจนเนื่องจากเงาเกิดจากการตัดกัน (ตามเส้นประ) ณ ตำแหน่งเดิมบนฟิล์ม ภาพที่จุด B จะเป็นภาพเบลอร์

ข) แพทเทอร์นของหลอดเอ็กซ์เรย์และฟิล์มเป็นรูปไซคลอยด์

ค) แพทเทอร์นรูปไข่

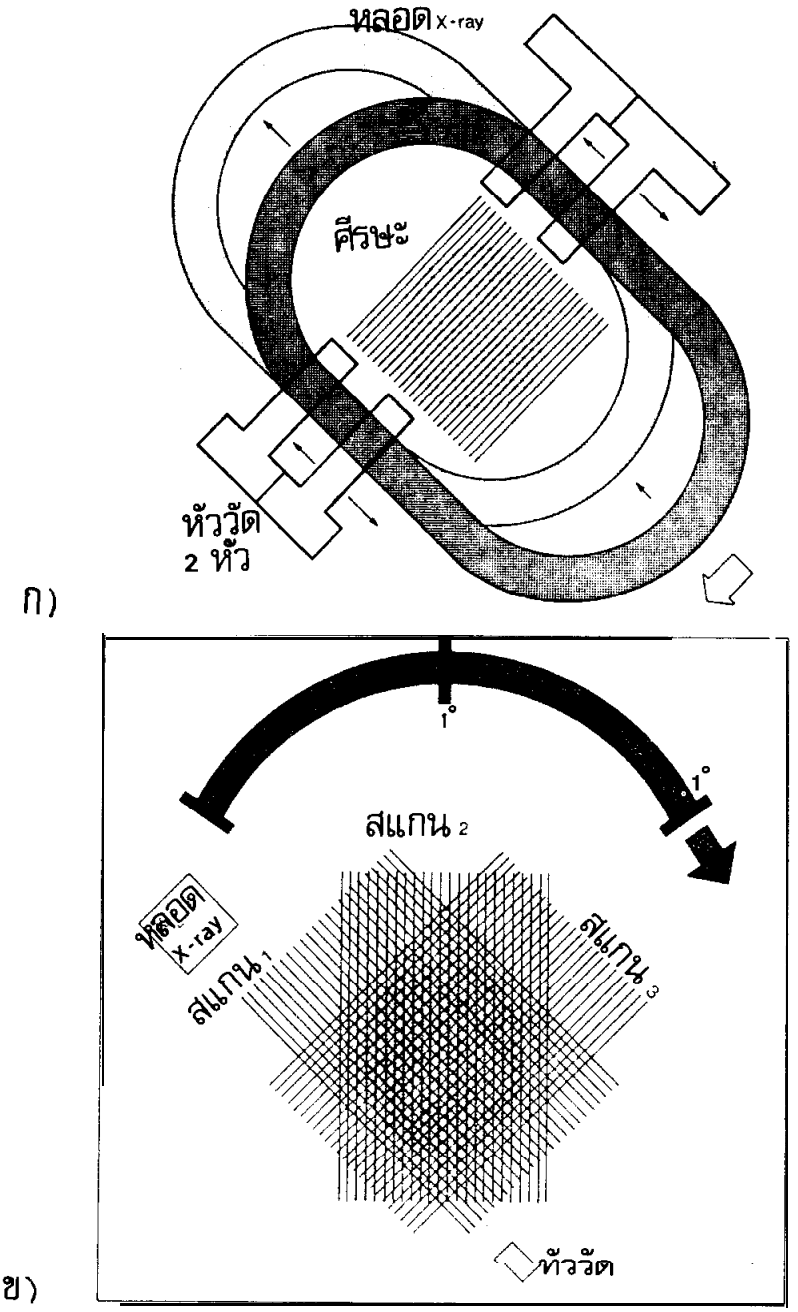


รูป 4.14 แผนภาพแสดงตำแหน่งของคนไข้ หลอดเอ็กซ์เรย์ และฟิล์ม ทิศทางการเคลื่อนที่ของฟิล์มและต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์ทำให้ได้เงาที่ชัดเจนปรากฏบนฟิล์ม

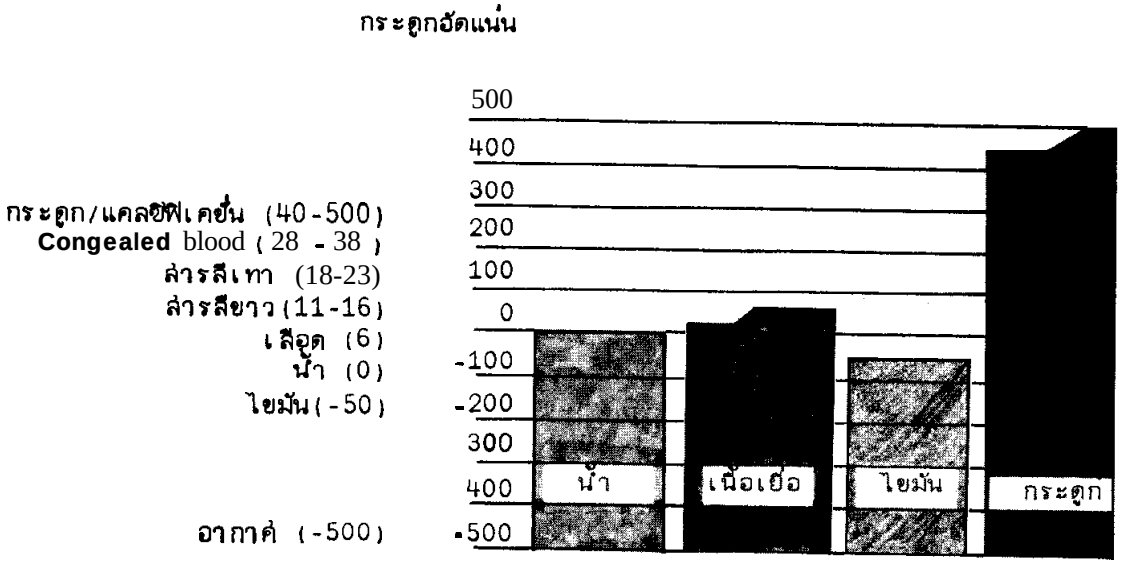
ในปี ค.ศ. 1972 แอ็กเซียลโทโมกราฟฟีได้รับการปรับปรุงให้ได้ผลมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เรียกชื่อเป็น "คอมพิวเตอร์ไรซ์ดแอ็กเซียลโทโมกราฟฟี" *(Computorized axial tomography)* มีชื่อย่อเป็น *CAT* แต่โดยทั่วไปมักเรียก "คอมพิวเตอร์ไรซ์โทโมกราฟฟี" และชื่อย่อคือ *CT* ของบริษัท *EMI* (ประเทศอังกฤษ)

ในสมัยเริ่มแรกนั้น *CAT* ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการสแกนศีรษะ ซึ่งหลอดเอ็กซ์เรย์ (มีความต่างศักย์สูงประมาณ *140 kVp*) จะเป็นต้นกำเนิดลำรังสีเอ็กซ์แคบๆ 2 ลำที่ทำการสแกนรอบศีรษะคนไข้ ความเข้มของลำรังสีเอ็กซ์ที่ทะลุผ่านศีรษะจะถูกบันทึกโดยหัววัด 2 หัวซึ่งอยู่ตรงข้ามต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์และเคลื่อนไปพร้อมๆกับลำรังสีเอ็กซ์ (รูป 4.15*a*) ข้อมูลที่ได้จากการสแกนถูกเก็บไว้ในเมโมรี่ *(memory)* ของคอมพิวเตอร์ จากนั้นหลอดเอ็กซ์เรย์และหัววัดจะหมุนไป 1^{o} และเริ่มขบวนการใหม่ดังได้อธิบายข้างต้น (รูป 4.15*b*) เมื่อสแกนครบ-180^{o} (ใช้เวลาประมาณ 4 นาที) คอมพิวเตอร์จะวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาการกระจายของความหนาแน่นของเนื้อเยื่อซึ่งเป็นส่วนประกอบของชิ้นส่วนบางๆของร่างกาย ผู้ใช้เครื่องสามารถจะเลือกว่าจะให้ผลของการวิเคราะห์แสดงออกเป็นรูปตัวเลข หรือในรูปขาวดำ ตัวเลขจะมีค่าแตกต่างตั้งแต่ -500 (ความหนาแน่นของอากาศ) ถึง +500 (ความหนาแน่นของกระดูก) โดยกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำเป็นศูนย์ (รูป 4.16) นักฟิสิกส์จะทำการปรับเครื่องให้มีความยาวตำอย่างพอเหมาะตามความแตกต่างของความหนาแน่นที่ประกอบกันขึ้นในอวัยวะแต่ละชิ้นส่วนเครื่องมือที่สมบูรณ์สามารถบอกความแตกต่างได้ถึง 1%

สำหรับทอแร็กซ์ *(Thorax)* ต้องใช้เวลาในการสแกนน้อยกว่า 4 นาที เนื่องจากคนไข้มักจะเกิดความลำบากเมื่อกลั้นลมหายใจนานกว่า 30 วินาที จึงทำโดยคอลลิเมเตอร์เป็นตัวบังคับลำรังสีเอ็กซ์ให้แผ่เป็นรูปพัด แล้วใช้หัววัดหลายๆหัว เพื่อทำการบันทึกลำรังสีเอ็กซ์ส่วนที่ทะลุผ่านไป วิธีนี้ใช้เวลาประมาณ 20 วินาที



รูป 4.15 หลักการทำงานของหัววัด CAT ในรูป ก) หลอดเอ็กซ์เรย์ทำให้เกิดลำรังสีเอ็กซ์แคบๆ 2 ลำ ซึ่งจะทำการสแกนตัดศีรษะ ความเข้มของลำรังสีที่ทะลุผ่านออกมาจะถูกวัดโดยใช้ 2 หัววัดเคลื่อนที่ไปพร้อมกับลำรังสี ข) จากนั้นเครื่องจะหมุนไป 1° แล้วเริ่มทำการสแกนใหม่เช่นเดิมจนครบ 180°



รูป 4.16 ค่าความหนาแน่นของสารต่างๆในศีรษะที่ได้จาก CAT สแกนเนอร์[1]

4.7 m a y

จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันมีการนำความรู้สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ใช้ในด้านการแพทย์อย่างกว้างขวางและได้ผลเป็นที่น่าพอใจ สำหรับเครื่องสแกนนั้นขณะทำการสแกนจะได้ภาพ 2 แบบคือ

- ภาพได้จากออสซิลโลสโคป หรือเครื่องหมายรูปสี่เหลี่ยมเล็กๆ (□) ตอกลงบนกระดาษความหนาแน่นบางครั้งแสดงผลเป็นสี โดยแยกสีตามความเข้มข้นรังสีที่ปรากฏในหัววัด

- ภาพได้จากการเคลื่อนที่ของต้นกำเนิดแสงไปบนแผ่นฟิล์ม โดยแสงมีความเข้มข้นตามความเข้มรังสี

และถ้าต่อเครื่องมือกับคอมพิวเตอร์ โดยบันทึกผลดังกล่าวลงในเทปแม่เหล็ก หรือในแผ่นดิสค์ *(disc)* จะทำการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ได้

เครื่องสแกนใช้คอลลิเมเตอร์แบบโฟกัส ซึ่งรัศมีการกระจายของกัมมันตรังสีได้ในระยะห่างจากปลายคอลลิเมเตอร์ 7.5 - 12.5 ซม. ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการสแกนทั้งด้านหน้า (นอนหงาย) และด้านหลัง (นอนคว่ำ) ของคนไข้ หรือในบางเครื่องที่มีสองหัววัด*(dual probe)* ก็สามารถทำการสแกนได้ทั้งสองด้านในเวลาเดียวกันเพื่อเป็นการประหยัดเวลาของทางโรงพยาบาลและสะดวกสบายต่อคนไข้ทั้งนี้ เนื่องจากการสแกนแต่ละท่ากินเวลาถึง 30 นาที และคนไข้จะต้องอยู่นิ่งตลอดการสแกน อย่างไรก็ตาม คนไข้สามารถกลั้นลมหายใจ 30-60 วินาที ดังนั้น ผลจากการสแกนตับจะปรากฏ "อาร์ติแฟคท์" เนื่องจากตับเคลื่อนขึ้นและลงประมาณ 2 ซม. ระหว่างการหายใจแบบปกติ

แกมม่าคาเมอร่าใช้เวลาน้อยกว่าการสแกนและสะดวกในการหาข้อมูลเพื่อศึกษาทางไดนามิกส์ จึงเป็นที่นิยมใช้ ตาราง 4.1 ได้สรุปข้อเปรียบเทียบของเครื่องสแกนและแกมม่าคาเมอร่าพอสมควร แม้ว่าภาพที่ได้จะแสดงผลไม่ละเอียดเท่าการเอ็กซ์เรย์ แต่ข้อมูลที่ได้มีความสำคัญ และในบางกรณีอาจหาไม่พบโดยวิธีการวินิจฉัยแบบอื่นๆ โดยทั่วไปแล้วรังสีเอ็กซ์จะถูกดูดกลืนในเนื้อเยื่อมะเร็งและในเนื้อเยื่อปกติเหมือนกัน ภาพที่ได้จากการเอ็กซ์เรย์มักไม่ปรากฏมะเร็ง

หลักการวินิจฉัยอวัยวะต่างๆพอสรุปได้ดังนี้

- ธัยรอยด์ ใช้ไอโอดีน -131 คนไข้กินสารรังสี *(100 MBq* หรือประมาณ *100μCi)* ก่อนทำการวินิจฉัย 24 ซม. หรือใช้ *Tc - 99m* หาภาพธัยรอยด์ (เนื้อเยื่อที่ดูดกลืนไอโอดีนจะดูดกลืน "เปอร์เทคนีเตตไอออน" *($^{99m}TcO_4^-$)* เช่นกัน) มักใช้ $^{99m}Tc\ O_4^-$ ประมาณ *150 MBq* (ประมาณ 4 *m Ci*)

- ตับ มะเร็งในตับระยะแพร่ขยาย *(metastasizes)* สามารถตรวจพบโดยใช้การสแกนตับ เนื้อเยื่อตับปกติจะกรองอนุภาค "ลับไมโครสโคปิค" *(submicroscopic)* รังสีจากเลือด ขณะที่มะเร็งในตับจะไม่ปรากฏเป็นบริเวณที่ดูดรับสารรังสีไว้มาก เภสัชรังสีคือ *Tc - 99m* ติดฉลากซัลเฟอร์คอลลอยด์ *(sulfur colloid)* โดยขนาดอนุภาคประมาณเส้นผ่าศูนย์กลาง *0.5* µm ปริมาณ *200 MBq* (ประมาณ *5 m Ci*) ฉีดเข้าเส้นเลือด *(vein)* หลังจากนั้น 10 นาที ทำการตรวจหาภาพ

- สมอง สำหรับมะเร็งในสมอง อาการทั่วไปทางคลินิคจะคล้ายคลึงกับอาการโรคทางสมองทั่วไป แต่เมื่อฉีดเภสัชรังสีเข้าในเลือด มะเร็งในสมองจะจับสารรังสีได้มากกว่าเนื้อเยื่อสมองปกติที่ล้อมรอบอยู่ กัมมันตรังสีที่ใช้คือ ^{99m}Tc *500 MBq* (ประมาณ *15 m Ci*) หลังจากนั้น 2 ชม. ทำการตรวจโดยแกมม่าคาเมอร่า (ภาพด้านหน้า ด้านหลัง ด้านขวา และด้านซ้ายของศีรษะ)

- กระดูก มะเร็งในระยะแพร่ขยายตัวจะลุกลามไปยังกระดูก การทำโบนสแกนได้ผลปรากฏแน่นอนกว่าเอ็กซ์เรย์ กระดูกจะมีการสร้างสเกลเลตัน *(skeleton)* ทดแทนส่วนที่ถูกมะเร็งทำลาย ซึ่งต้องอาศัยธาตุหลายชนิดมากกว่ากระดูกปกติ แม้ว่าจะไม่มีไอโซโทปรังสีของแคลเซี่ยมที่เหมาะสม แต่การใช้ ^{99m}Tc โดยติดฉลากสารประกอบฟอสเฟต *(phosphate compound)* ก็สามารถให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ปกติใช้ *500 MBq* (ประมาณ *15 m Ci*) และทำการสแกนหลังจากฉีดสารกัมมันตรังสีประมาณ 3 ชม. ต่อมา บริเวณที่เป็นมะเร็งในกระดูกหรือบริเวณที่มีการงอกของกระดูกจะมีสารกัมมันตรังสีอยู่มากมาย

- ไต โดยทั่วไปมักตรวจหลังการปลูกไตเทียม ทำโดยฉีดกรดฮิปปูริครังสี ซึ่งถูกขับออกจากไตโดยรวดเร็ว ใช้แกมม่าคาเมอร่าจับภาพทุก 2-3 นาที ขณะเดียวกันนั้นต่อสัญญาณเข้าคอมพิวเตอร์จะสามารถได้ผลรีโนแกรม

- ปอด กรณีเกิดการแข็งตัวของเส้นเลือดแดงใหญ่ในปอด (เรียก *"pulmonary embolism"*) ตรวจวินิจฉัยโดยใช้ *100 MBq* (ประมาณ *3 m Ci*) ของ *lumpy (macroagregate)* ^{99m}Tc ติดฉลากอัลบิวมิน *(albumin)* ฉีดเข้าในเส้นเลือด ซึ่งจะเดินทางไปยังหัวใจและต่อไปปอด แต่อนุภาคดังกล่าวมีขนาดใหญ่เกินกว่าจะผ่านเส้นเลือดฝอยของปอดได้ จึงถูกบางส่วนของเส้นเลือดฝอยจับไว้ และจะถูกบล็อคน้อยกว่า 1% ของเส้นเลือดฝอย และสลายตัวภายใน 2 ถึง 4 ชั่วโมง

ถ้าเป็นระบบหายใจของปอด ใช้ ^{133}Xe (ครึ่งอายุ 5.3 วัน) โดยศึกษาการกระจายของสารกัมมันตรังสีและช่วงระยะเวลาที่ยังคงอยู่ในปอด

คำถามทบทวน

4.1 คุณสมบัติที่ดีของซินทิลเลเตอร์มีอะไรบ้าง ยกตัวอย่างซินทิลเลเตอร์ที่นิยมใช้สองตัว พร้อมทั้งกล่าวถึงคุณสมบัติของแต่ละซินทิลเลเตอร์

4.2 "เควนชิ่ง" คืออะไร แบ่งได้เป็นกี่แบบ

4.3 การแก้เควนชิ่งในเครื่องนับวัดมีกี่วิธี อะไรบ้าง

4.4 อธิบายหลักการของ "วงจรโคอินซิเดนซ์" พอสังเขป

4.5 จงเปรียบเทียบเครื่องวัดซินทิลเลชั่นแบบหลุมและแบบตัน

4.6 เครื่องวัดอัพเทค คืออะไร จงอธิบายวิธีการหาเปอร์เซ็นต์อัพเทคของไอโอดีน

4.7 เครื่องทำรีโนแกรมคืออะไร

4.8 อธิบายวัตถุประสงค์ของเครื่องนับวัดรังสีทั้งตัว

4.9 เครื่องทำให้เกิดภาพในเวชศาสตร์นิวเคลียร์มีอะไรบ้าง

4.10 จงเปรียบเทียบเครื่องเรคทิลินเนียร์สแกนเนอร์กับแกมม่าคาเมอร่า

4.11 *I.D.* คืออะไร จงอธิบายความหมาย สูตรที่ใช้หาค่า และหน่วยของ *I.D.*

4.12 ถ้านับวัดกัมมันตรังสีในสารตัวอย่างได้ 10^4 เคานต์ใน 10 นาที และวัดค่าแบคกราวนด์ได้ 200 เคานต์ ใน 10 นาที จงหาค่า

ก) *standard error*

ข) **figure of** *merit*

4.13 จงอธิบายหลักการพื้นฐานของ CAT

4.14 จงบอกชื่อเภสัชรังสีที่ใช้ในการวินิจฉัยโรคในอวัยวะต่อไปนี้

ก) ธัยรอยด์

ข) ตับ

ค) สมอง

ง) กระดูก

จ) ไต

ฉ) ปอด