

ทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดรังสี

3.1 ความนำ

การสำรวจ และการวัดปริมาณในห้องปฏิบัติการ ผู้ทำการสำรวจ จำเป็นต้องรู้ธรรมชาติของเครื่องมือ วิธีการใช้เครื่องมืออย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการที่จะวิเคราะห์ข้อมูลให้ได้ผลใกล้เคียงความจริงมากที่สุด จึงจำเป็นต้องรู้ทฤษฎีเกี่ยวกับธรรมชาติของรังสีกับสิ่งแวดล้อม หัววัดรังสี รวมทั้งอุปกรณ์ประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อที่จะได้รู้วิธีการใช้เครื่องมือในการสำรวจให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด และยังเป็นการป้องกันความเสียหาย อันอาจเกิดขึ้นกับหัววัดได้

3.2 กัมมันตรังสีตามธรรมชาติ (Natural radioactivity)

กัมมันตรังสี หมายถึงการสลายตัวหรือการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอม เมื่อปล่อยกัมมันตรังสีแล้วนิวเคลียสอาจจะเปลี่ยนสถานะของประจุ หรือสถานะของมวล หรือทั้งสองอย่าง เมื่อธาตุกัมมันตรังสีสลายตัวให้อาจรังสีแอลฟา รังสีเบตา และรังสีแกมมา รังสีแอลฟาและรังสีเบตาเป็นอนุภาคที่มีมวลและประจุไฟฟ้าเราจึงนิยมเรียกว่า "อนุภาค"

3.2.1 อนุภาคแอลฟา

อนุภาคแอลฟา ก็คือนิวเคลียสของฮีเลียม แต่ละนิวเคลียสของฮีเลียมประกอบไปด้วยอนุภาคมูลฐาน 4 อนุภาค คือ 2 โปรตอน และ 2 นิวตรอน เมื่อนิวเคลียสของฮีเลียมรวมตัวกับอิเล็กตรอนสองตัวจากสิ่งแวดล้อมจะกลายเป็นฮีเลียมอะตอมที่เป็นกลาง โดยบางส่วนจะลอยขึ้นสู่ผิวโลกและกระจายอยู่ในชั้นบรรยากาศ ส่วนที่เหลืออยู่ถูกเก็บไว้ในแร่และจะไม่หนีไปไหนจนกว่าจะเกิดการรวมตัวกับแร่ในบริเวณนั้น เนื่องจากอนุภาคแอลฟามีพลังงานเป็นช่วง ๆ ขึ้นกับไอโซโทปที่ให้อนุภาคแอลฟา ดังนั้นเราสามารถรู้ว่าเป็นไอโซโทปตัวใดได้ โดยการวัดพลังงานของอนุภาคแอลฟาที่ได้จากไอโซโทปนั้น ในธรรมชาติอนุภาคแอลฟาเกิดจากการสลายตัวในอนุกรมยูเรเนียมและอนุกรมทอเรียม

3.2.2 รั้งสีเบตา

รั้งสีเบตา ความจริงก็คืออิเล็กตรอนนั่นเอง ดังนั้นจึงมีประจุเป็นลบ แต่ไม่ได้มีพลังงานเป็นช่วง ๆ เหมือนอนุภาคแอลฟา ทุกครั้งที่มีการปล่อยรั้งสีเบตา จะมีการปล่อยนิวตริโน(neutrino)ด้วยเสมอ โดยนิวตริโนจะมีพลังงานเท่ากับผลต่างของ (1) พลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปภายในนิวเคลียส และ (2) พลังงานของรั้งสีเบตา เนื่องจากทั้งรั้งสีเบตาและรั้งสีแอลฟามีทั้งมวลและประจุจึงสามารถทะลุผ่านสารภายในโลกได้เพียงไม่กี่มิลลิเมตร หรืออาจจะน้อยกว่านั้น ดังนั้นการวัดรั้งสีแอลฟาและรั้งสีเบตาจึงวัดได้ในระยะทางไกล ๆ ไม่ได้

3.2.3 รั้งสีแกมมา

รั้งสีแกมมา คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียส ไม่ได้เกิดจากขบวนการสลายตัวของอิเล็กตรอนในระดับอะตอมซึ่งให้ รั้งสีเอกซ์

เนื่องจากรั้งสีแกมมาไม่มีมวลและไม่มีประจุ ดังนั้นจึงมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง สามารถทะลุผ่านพื้นผิวโลกได้ประมาณ 30 เซ็นติเมตร หรือมากกว่า ไอโซโทปที่ให้รั้งสีแกมมาอาจจะให้รั้งสีแกมมาที่มีพลังงานเฉพาะตัวได้ตั้งแต่หนึ่งถึงหลายระดับพลังงาน จากคุณสมบัติที่มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง และมีพลังงานเฉพาะตัวนี้เอง ทำให้การสำรวจทางธรณีรั้งสีนิยมสำรวจโดยการวัดรั้งสีแกมมา

ตารางที่ 3.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Name of spectral division	Approximate frequency range Cycles per second
Direct Current and Magnetostatic	0
Power Line Frequency	60
Audio Frequency (AF)	$2 \times 10^1 - 2 \times 10^4$
Very Low Frequency (VLF)	$10^4 - 3 \times 10^4$
Radio Frequencies (RF)	$3 \times 10^4 - 3 \times 10^8$
Microwave (RADAR)	$3 \times 10^8 - 3 \times 10^{11}$
Infrared (IR)	$3 \times 10^{11} - 3 \times 10^{14}$
Visible and Ultraviolet (UV)	$3 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$
X-Ray (X-R)	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$
Gamma Ray (γ -R)	$3 \times 10^{19} - 3 \times 10^{23}$
Cosmic Rays	3×10^{20} and greater

3.3 ลำดับการสลายตัวให้รังสี (Radioactive Decay Sequence)

ตารางที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 แสดงลำดับการสลายตัวของกลุ่มไอโซโทปรังสี 3 กลุ่มที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ ได้แก่ อนุกรมยูเรเนียม อนุกรมทอเรียม และโพแทสเซียม-40 สำหรับโพแทสเซียม-40 ไม่มีการสลายตัวต่อ

3.3.1 โพแทสเซียม รูปแบบการสลายตัวของโพแทสเซียม-40 แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2

Decay scheme	Half-life of isotope	Radiation	Gammas per disintegration	Gamma-ray energy (MeV)
^{40}K	$1.3 \times 10^9 \text{ a}$	β, γ	0.11	1.4608
(89%). $^{40}\text{Ca} + \beta$	Stable	-	-	-
(11%). $^{40}\text{Ar} + \gamma$	Stable	-	-	-

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า โพแทสเซียม-40 เท่านั้นที่เป็นไอโซโทปรังสี ซึ่งมีในธรรมชาติเพียง 0.000119 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีนัยสำคัญน้อยมาก จึงถือได้ว่าเป็นกัมมันตรังสีของโพแทสเซียมในธรรมชาติ มีค่าคงที่ เนื่องจากโพแทสเซียม-40 สลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงานเดียวคือ 1.46 MeV โดยความแรงรังสีจำเพาะ (specific activity) (A_s) คำนวณได้จาก สมการ

$$A_s \text{ ของ K-40} = K(\%) \times N_A \times 0.693 \times 0.0118 \text{ s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \dots (3.1)$$

เมื่อ $K(\%) = \% \text{ abundance}$ ของ โพแทสเซียมในสารตัวอย่าง

$$N_A = \text{Avogadro number} = 6.02 \times 10^{23} \text{ molecule/mole}$$

$$t_{1/2} = \text{half life of K-40} = 4.09968 \times 10^{16} \text{ sec}$$

$$A_s \text{ ของ K-40} = 0.000119 \times 6.02 \times 10^{23} \times 0.11 = 3.3 \text{ s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$\text{หรือ } A_s \text{ ของ K-40} = 3.3 \text{ Bq}^{\text{**}}$$

* คือ จำนวน แกมมาต่อการสลายตัว 100 ครั้ง

** ย่อมาจาก Becquerel หมายถึงจำนวนครั้งที่สลายตัวต่อวินาที

3.3.2 อนุกรมยูเรเนียม

ยูเรเนียมในธรรมชาติมี 3 ไอโซโทป คือ ^{238}U มี 99.274 เปอร์เซ็นต์ ^{235}U มี 0.721 เปอร์เซ็นต์ และ ^{234}U มี 0.0056 เปอร์เซ็นต์ โดยทั้ง 3 ไอโซโทป ต่างเป็นไอโซโทปรังสี แต่เนื่องจาก ^{238}U และ ^{234}U มีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นจึงถือได้ว่า กัมมันตรังสีจากยูเรเนียมเกิดจาก ^{238}U เพียงไอโซโทปเดียว

การสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม (^{238}U) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 จากตารางจะเห็นว่า อนุกรม ^{238}U สลายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยให้อนุภาคแอลฟา 11 อนุภาค เบตา 10 อนุภาค และรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ อีกหลายตัว จนถึงตัวสุดท้าย คือ ^{206}Pb ซึ่งจะไม่สลายตัวต่อไปอีก

ยูเรเนียมกับผลผลิตจากการสลายตัว (decay products) ของยูเรเนียม มีกัมมันตรังสีสูงกว่าของโพแทสเซียมมาก คือ มีประมาณ $12.230 = 0.027 \text{ Bq}$ ต่อมิลลิกรัมของยูเรเนียมทั้งหมด แต่กัมมันตรังสีส่วนใหญ่จะเกิดจากลูกหลานตัวที่ 8 และ 9 คือ ^{214}Pb และ ^{214}Bi ผลรวมของครึ่งชีวิตทั้งหมดจนถึง ^{214}Bi มีค่าประมาณ 300,000 ปี ก่อนที่จะสลายตัวเป็น ^{214}Bi มีลูกหลานตัวหนึ่งที่มีสภาพเป็นก๊าซ คือ เรดอน (^{222}Rn) โดยก๊าซตัวนี้จะสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา แล้วกลายเป็นโพลเนียม (^{218}Po)

3.3.3 อนุกรมทอเรียม

ทอเรียม-232 เป็นไอโซโทปที่สำคัญที่สุดของทอเรียมที่เกิดในธรรมชาติ และมีความคล้ายคลึงกับยูเรเนียม คือมีการสลายตัวแบบลูกโซ่หลายขั้นตอน ในที่สุดจะสลายตัวเป็น ตะกั่ว-208 ซึ่งเสถียร (ดูตารางที่ 3.3(ก) และตารางที่ 3.4 (ข) ประกอบ) จากตารางที่ 3.4 จะเห็นว่านิวไคลด์ตัวที่ให้รังสีแกมมาเข้มข้นที่สุด คือ แทลเรียม-208 หรือนิวไคลด์ตัวที่ 9 ของอนุกรม ผลรวมของครึ่งชีวิตทั้งหมดจนถึงแทลเรียม-208 มีค่าประมาณ 8 ปี โดยมีค่ากัมมันตรังสีจำเพาะเท่ากับ 4.1 Bq ต่อมิลลิกรัมของทอเรียมทั้งหมด

3.4 สภาพสมดุลย์ของอนุกรมการสลายตัวให้รังสี (Equilibrium in Radioactive Decay Series)

การสลายตัวให้รังสีของอนุกรมยูเรเนียม และ ทอเรียม จะต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งจึงจะอยู่ในสภาพสมดุลย์ หรือสภาพที่อัตราการสลายตัวของนิวไคลด์ใด ๆ ที่อยู่ระหว่างนิวไคลด์ตัวแรกและตัวสุดท้าย มีค่าเท่ากับอัตราการเกิด ดังนั้นในสภาวะสมดุลย์ นิวไคลด์ตัวที่มีค่าครึ่งชีวิตยาว จะมีความสมบูรณ์มากกว่านิวไคลด์ตัวที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น

อนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม และทอเรียมมีหลายเฟส โดยเฉพาะยูเรเนียมมีเฟสต่างกันหลายตัว แต่ละตัวมีคุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน นิวไคลด์ตัวใดตัวหนึ่งในอนุกรมจะอยู่ในสถานะที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงเกิดสภาพไม่สมดุลย์ในอนุกรมการสลายตัว ซึ่งมีผลทำให้ ณ ตำแหน่งใด ๆ จำนวนนิวไคลด์ตัวกลางและตัวสุดท้าย ไม่เป็นไปตามอัตราส่วนที่ได้คำนวณไว้โดยกฎการสลายตัว ในสภาวะนี้การวัดค่าปริมาณของธาตุ พ่อ-แม่ จะไม่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามระดับของการไม่สมดุลย์จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น สภาพความเป็นแร่ของธาตุรังสีและของสิ่งแวดล้อม การปรากฏ ร่วมกันกับ ซัลไฟด์ หรือ คาร์บอเนต นอกจากนี้ ระดับของความไม่สมดุลย์ยังขึ้นกับสภาพของสิ่งเหล่านี้ คือ สภาพภูมิประเทศ การเคลื่อนย้ายของน้ำใต้ดิน ปริมาตรของสารตัวอย่างที่สนใจ ปริมาณของตัวอย่างที่เก็บจำนวนน้อย มีโอกาสอยู่ในสภาพไม่สมดุลย์ได้สูงกว่าตัวอย่างที่เก็บจำนวนมาก การหาระดับของความไม่สมดุลย์ในสนามทำได้ยากมาก แต่สามารถหาได้ไม่ยากนักจากในห้องทดลอง ซึ่งอาจทำได้โดยการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน หรือโดยการวัดกัมมันตรังสีของนิวไคลด์ต่าง ๆ ในอนุกรม จากการทดลองพบว่า ตัวอย่างที่เก็บมาจากในสนามส่วนมากจะไม่อยู่ในสภาพสมดุลย์ การเกิดสภาพสมดุลย์ของนิวไคลด์ตัวใด จะต้องใช้เวลาประมาณ 3-4 เท่าของผลรวมครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ทั้งหมดที่เกิดก่อน แต่ไม่รวมค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ตัวแรก ทั้งนี้เพราะนิวไคลด์ตัวแรกมีค่าครึ่งชีวิตยาวมาก จึงถือว่ามีความอดอม ณ ขณะใด ๆ เท่ากับจำนวนอะตอมเริ่มต้น

ดังนั้น ยูเรเนียม-238 จะอยู่ในสภาพสมดุลย์กับนิวไคลด์ตัวใดในอนุกรม จึงสามารถคำนวณได้จาก 3-5 เท่าของครึ่งชีวิตสะสมจนถึงนิวไคลด์ตัวนั้น เช่น บิสมัท-214 มีครึ่งชีวิตสะสม 300000 ปี 3 เท่าของครึ่งชีวิตมีค่าประมาณ หนึ่งล้านปี ส่วน แทลเรียม-208 มีครึ่งชีวิตสะสม 8 ปี 5 เท่าของครึ่งชีวิตมีค่าประมาณ 40 ปี

ถ้าระบบการสลายตัวอยู่ในสมดุลย์ เราสามารถคำนวณหาปริมาณของนิวไคลด์ พ่อ-แม่ ได้จากปริมาณของนิวไคลด์ตัวลูกแต่ละตัวได้ โดยใช้สมการ

$$N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2 = N_3 \lambda_3 = \dots = N_n \lambda_n \quad \dots (3.2)$$

เมื่อ N_n คือ จำนวนอะตอมของนิวไคลด์ตัวที่ n

การคำนวณหาปริมาณนิวไคลด์ของยูเรเนียม-238 จากปริมาณ

บิสมัท-214 ที่พลังงาน 1.76 MeV ก็ใช้หลักการนี้ และในทำนองเดียวกัน การวัดปริมาณแทลเรียม-208 ที่พลังงาน 2.62 MeV สามารถหาปริมาณ ทอเรียมได้โดยวิธีนี้เช่นกัน

3.5 สภาพไม่สมดุลย์ในอนุกรมการสลายตัว (Disequilibrium in Radioactive Decay Series)

บริเวณผิวโลกหรือใกล้ ๆ กับผิวโลก การสลายตัวจะถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อมมาก เช่นอาจถูกรบกวนจากการชะล้าง (weathering) ซึ่งอาจทำให้เกิด การเพิ่มหรือลดปริมาณของนิวไคลด์ตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัว ดังนั้นเมื่อเก็บ สารตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณของนิวไคลด์ตัวใดในอนุกรม จึงไม่สามารถเทียบกลับไปหาปริมาณของตัวพ่อ-แม่ได้

3.6 หน่วยของการวัด (Unit of Measurement)

ในการสำรวจนิยามวัดในรูปความเข้มข้นของธาตุที่สนใจที่ปนอยู่ในดิน หิน แร่ธาตุต่าง ๆ เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการทำเหมืองแร่ เหตุที่ต้อง วัดความเข้มข้นของ ทอเรียม กับ โปแทสเซียม พร้อมไปกับการวัด ยูเรเนียม เพราะธาตุทั้งสามชนิดมักจะพบอยู่ร่วมกัน ในการประมาณค่าความเข้มข้นของ ยูเรเนียมและทอเรียม ให้ถือว่าปริมาณของยูเรเนียม และทอเรียมในสภาวะ สมดุลย์ เมื่อกำหนดดังนี้แล้วทำให้สามารถระบุ หน่วยของปริมาณยูเรเนียม และ ทอเรียม ได้ในรูปเปอร์เซ็นต์ความสมบูรณ์ (% abundance) อีกวิธีหนึ่ง คือการบอกในรูป ppm $_{U}$ และ ppm $_{Th}$ ในกรณีของโปแทสเซียมที่ไม่สมดุลย์ ก็เขียนได้ในรูปคล้ายกัน คือ ppm K (ไม่มี e) หรือในรูป % K

3.7 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา กับสสาร (Interaction of Gamma Rays with Matter) (3)

รังสีแกมมาเคลื่อนที่ในสุญญากาศด้วยความเร็วเท่ากับแสง เพราะ เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตั้งได้กล่าวมาแล้ว และ มีความถี่แปรผันโดยตรงกับ พลังงาน ตามสมการ $E = h\nu$ เมื่อ E คือ พลังงาน h คือ ค่าคงที่ของ แพลงค์ (Planck constant) ν คือ ความถี่

เมื่อรังสีแกมมาเกิดอันตรกิริยาจะเกิดผลได้ 3 ลักษณะด้วยกัน คือ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric Effect) การกระเจิงคอมพ์ตัน (Compton scattering) แพร่โปรดัคชัน (pair production)

เมื่ออนุภาคมีประจุเกิดอันตรกริยากับสสาร จะสูญเสียพลังงานอย่างต่อเนื่องโดยการเกิดไอออนไนเซชัน และเอกไซเตชัน แต่อันตรกริยาของรังสีแกมมา กับสสารจะเกิดการดูดกลืนทั้งหมด หรือเกิดการกระเจิง อันตรกริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสสาร อาจมองได้ในรูปของอันตรกริยาของโฟตอนกับพาหะทางไฟฟ้า (carrier of electricity) ดังต่อไปนี้

- (1) กับอิเล็กตรอนในอะตอม
- (2) กับอิเล็กตรอนอิสระแต่ละตัว
- (3) กับสนามคูลอมบ์ของนิวเคลียส หรือของอิเล็กตรอน
- (4) กับนิวคลีออน (แต่ละนิวคลีออนหรือทั้งนิวเคลียส)

รูปแบบของอันตรกริยาเหล่านี้ทำให้เกิดผลใน 3 ลักษณะคือ

- (1) ดูดกลืนโฟตอนทั้งหมด
- (2) เกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)
- (3) เกิดการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

โดยทางทฤษฎีแล้ว รังสีแกมมาเกิดอันตรกริยากับสสารได้ถึง 12 กระบวนการ แต่ในช่วงพลังงานที่เราเกี่ยวข้องด้วย จะอยู่ในช่วงประมาณ 10 KeV ถึง 10 MeV ผลของอันตรกริยาล้วนมากจะเกิดในกระบวนการต่อไปนี้ คือ

(1) ถ้าพลังงานต่ำโฟโตอิเล็กทริกจะเด่นกว่า กล่าวคือ โฟตอนจะให้พลังงานทั้งหมดกับอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจะใช้พลังงานส่วนหนึ่งเพื่อเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) พลังงานส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูปของพลังงานจลน์

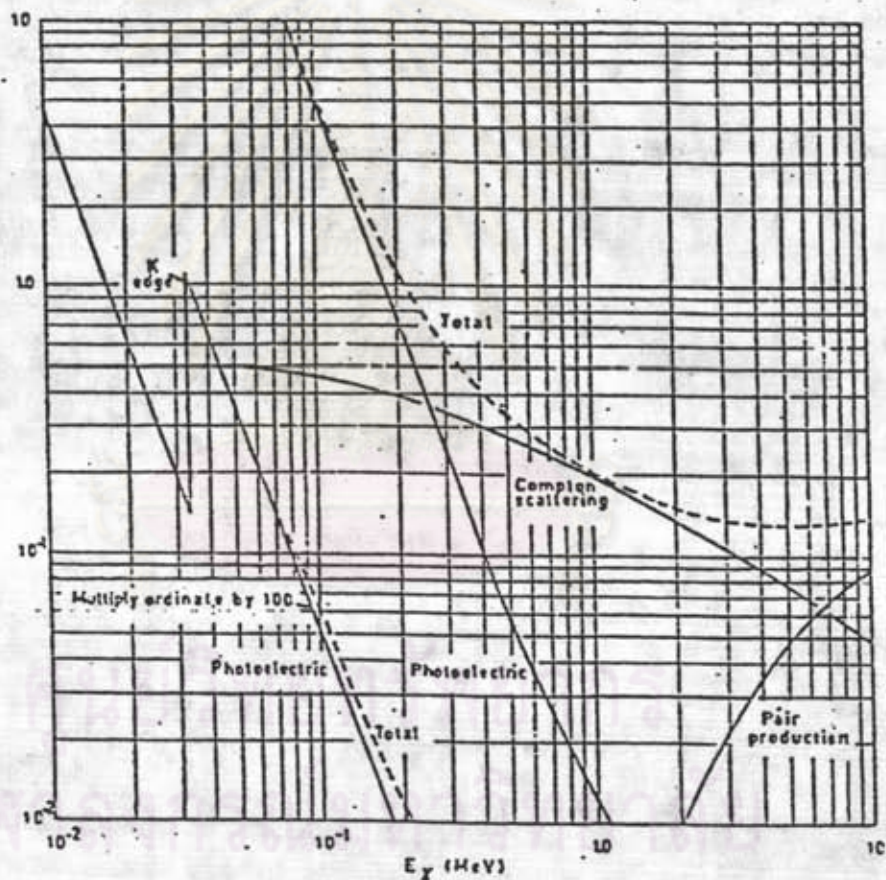
(2) โฟตอนอาจกระเจิงโดยอะตอม หรือโดยแต่ละอิเล็กตรอน ซึ่งอาจมีการสูญเสียพลังงานบางส่วน หรือทั้งหมด หรืออาจไม่มีการสูญเสียพลังงานเลย

ถ้าพลังงานของโฟตอนมีค่ามาก ๆ โฟตอนจะเกิดการกระเจิงเสมือนว่า อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะอิสระและหยุดนิ่งกับที่ เรียกผลเช่นนี้ว่า คอมพ์ตันเอฟเฟกต์ (Compton effect) ผลของคอมพ์ตันจะเด่นที่พลังงาน 1 MeV (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ)

(3) ถ้าพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบ มากกว่า 1.022 MeV อาจเกิดคู่อิเล็กตรอน (pair production) ในบริเวณใกล้ ๆ สนามคูลอมบ์ของอนุภาคประจุ โดยมีพลังงานเท่ากับผลต่างของพลังงานของโฟตอน กับ

พลังงานของมวลนิ่ง ของอนุภาคทั้งสอง ($2m_0c^2 = 1.022 \text{ MeV}$)

ในการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ คอมพ์ตันเอฟเฟกต์ และการเกิดอิเล็กตรอนคู่ มีความสำคัญมาก การเกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่นหรือแบบโคฮีเรนซ์มีความสำคัญในช่วง พลังงานต่ำ ๆ จนถึง 100 KeV อิเล็กตรอนที่ยึดเกาะ (bounded) อย่างเหนียวแน่นกลับชาติหนักมักเกิดการกระเจิงลักษณะนี้ แต่ค่าตัดขวางของการกระเจิงแบบโคฮีเรนซ์ มีค่าน้อยกว่าค่าตัดขวางของโฟโตอิเล็กทริกมาก



รูปที่ 3.1 ลัมประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ

เมื่อผลึกโซเดียมไอโอไดต์ (แทลเลียม) เกิดอันตรกิริยากับรังสีแกมมา จะเกิดการดูดกลืนรังสีแกมมา ตามกระบวนการเรืองรังสี (Scintillation) โดยมีจำนวนควอนตาของแสงเป็นสัดส่วนตรงกับ

พลังงานของรังสีแกมมาที่ผลิติดูดกลืน อันตรกิริยาเหล่านี้คือ โฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ การกระเจิงคอมพ์ตัน และการเกิด แพร์โปรดักชัน โอกาสของการเกิดปฏิกิริยาทั้งสามแบบขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมา ดังแสดงในรูปที่ 3.1

การเกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ รังสีแกมมาจะถูกดูดกลืนทั้งหมด แต่ในการเกิดอันตรกิริยาแบบคอมพ์ตัน พลังงานของรังสีแกมมาจะถูกดูดกลืนเพียงบางส่วนขึ้นกับมุมกระเจิง ตามสมการ

$$T = E_\gamma (1 + m_0 c^2 / (1 - \cos \theta) E_\gamma)^{-1} \quad \dots (3.3)$$

เมื่อ $m_0 c^2$ เป็นพลังงานเทียบเท่ามวลหนึ่งของอิเล็กตรอน (0.511 MeV) และ E_γ เป็นพลังงานของรังสีแกมมาที่เกิดอันตรกิริยากับผลึก ดังนั้นปริมาณควอนตาของแสงที่เกิดจากกระบวนการคอมพ์ตันจะมีค่าต่าง ๆ กัน ขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมาที่สูญเสียให้แก่ผลึก

3.8 เครื่องวัดรังสีที่ใช้ในการสำรวจ

เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจทางรังสีมีมากมายหลายชนิด เช่น หลอดไกเกอร์ (Geiger tubes) ผลึกเรืองรังสี (scintillation crystals) หัววัดกึ่งตัวนำ (semiconductor detectors) การเลือกใช้เครื่องมือชนิดใดนั้น ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้ เช่น เครื่องวัดบางชนิด สามารถวัดรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีได้ในระดับต้น ๆ หรือบริเวณใกล้เคียงดิน แต่เครื่องวัดบางชนิดสามารถวัดรังสีที่เกิดจากต้นกำเนิดรังสีที่อยู่ในระดับลึกมาก ๆ ได้ เช่น เครื่องวัดรังสีแอลฟาแบบกัทรอย และ เรดอน มอนิเตอร์ เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้ในการสำรวจ คือ หัววัดเรืองรังสีแบบผลึก NaI(Tl) เนื่องจากเหตุผลดังนี้ :

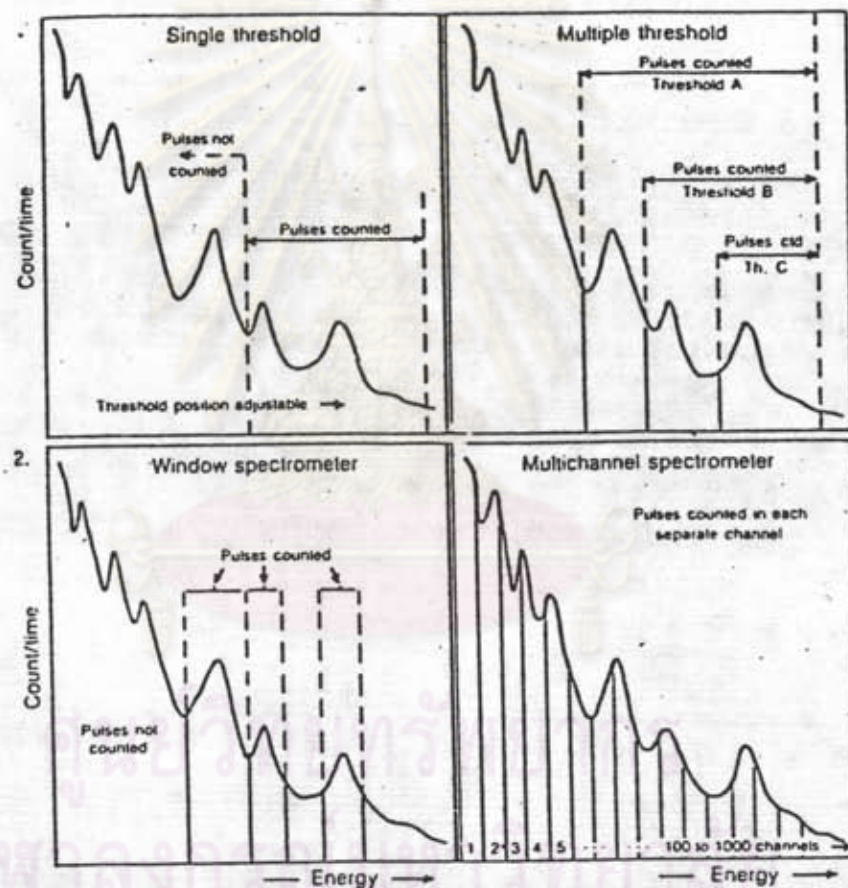
- (1) มีความหนาแน่นสูง ทำให้มีการดูดกลืนรังสีแกมมาได้มาก
- (2) มีความโปร่งแสงดี จึงทำให้สามารถถ่ายเทพลังงานให้กับหลอดทวีคูณอิเล็กตรอนได้ดี
- (3) สามารถแยกพลังงานได้
- (4) สามารถปลูกผลึก NaI ได้ง่าย และสามารถสร้างผลึกขนาดใหญ่ได้

ใหญ่ได้

เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวทำให้หัววัด NaI(Tl) มีประสิทธิภาพในการวัดสูง สามารถวัดได้ในเวลาอันสั้น มีราคาไม่สูงนัก การใช้งานและการเก็บรักษาง่าย และสามารถแยกระดับพลังงานได้ แต่มีข้อเสีย คือ

เรโซลูชัน (resolution) ไม่สู้ดีนัก แต่ก็เพียงพอที่จะนำมาวัดแยกแยะระดับพลังงานได้ค่อนข้างดี ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งคือ ผลึกโซเดียมไอโอไดด์แทลเลียม ร้าวง่าย และทนความชื้นไม่ค่อยได้ ดังนั้นการเก็บรักษาหัววัดจะต้องไม่ให้สะท้อนมาก และต้องเก็บในที่ที่มีความชื้นไม่สูงมาก

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดรังสีแกมมาเพื่อการสำรวจในสนาม มีทั้งแบบที่แยกแยะระดับพลังงานได้ และ แบบที่ไม่สามารถแยกแยะระดับพลังงานได้ ความสามารถในการแยกแยะระดับพลังงานไม่ได้ขึ้นกับผลึกเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ร่วมกับหัววัดอีกด้วย



รูปที่ 3.2 การแยกพลังงานของเครื่องวัดทั้งสองแบบ

หลักในการวัดรังสีแกมมา ที่เกี่ยวกับการสำรวจและการวัดปริมาณในห้องทดลอง โดยใช้หัววัดเรืองรังสีแบบผลึก NaI(Tl) หัววัดชนิดนี้ที่นำไปใช้ในการสำรวจ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่วัดสเปกตรัม แบบ 4 ช่อง ช่องที่หนึ่งใช้วัดทุกช่วงพลังงาน จาก 0.5 MeV - 3.0 MeV ช่องที่

สองใช้วัดพลังงานของ โปแทสเซียม-40 (พลังงาน 1.46 MeV) ช่องที่สามใช้วัดพลังงานของ บิสมัท-214 (พลังงาน 1.76 MeV) ช่องที่สี่ใช้วัดพลังงานของ แทลเลียม-208 (พลังงาน 2.62 MeV) ส่วนอีกชนิดหนึ่งใช้วัดทุกช่วงพลังงาน แต่ไม่สามารถแยกระดับพลังงานได้ ถ้าสัญญาณแบ่งออกเป็นหลายช่วงประมาณ 100 ถึง 1000 ช่วงพลังงาน โดยระบุขีดจำกัดสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละช่วง พลังงานที่แบ่งแต่ละช่วงนี้เรียกว่า "ช่อง" (channel) แต่ถ้าจำนวนช่วงพลังงานที่แบ่งไว้มีไม่กี่ช่วง เช่น 4 หรือ 5 ช่วง โดยแต่ละช่วงจะบอกขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดไว้เช่นกัน นิยมเรียกช่วงของพลังงานที่แบ่งแบบนี้ว่า "หน้าต่าง" (window) เครื่องมือที่แบ่งลักษณะนี้ เรียกว่า

"ดิฟเฟอเรนเชียล สเปกโตรมิเตอร์" (differential spectrometers) ถ้าสัญญาณแบ่งเป็นช่วง ๆ แต่ระบุขีดจำกัดต่ำสุดเพียงค่าเดียวเรียกการแบ่งแบบนี้ว่า "อินทิกรัลสเปกโตรมิเตอร์" (integral spectrometers)

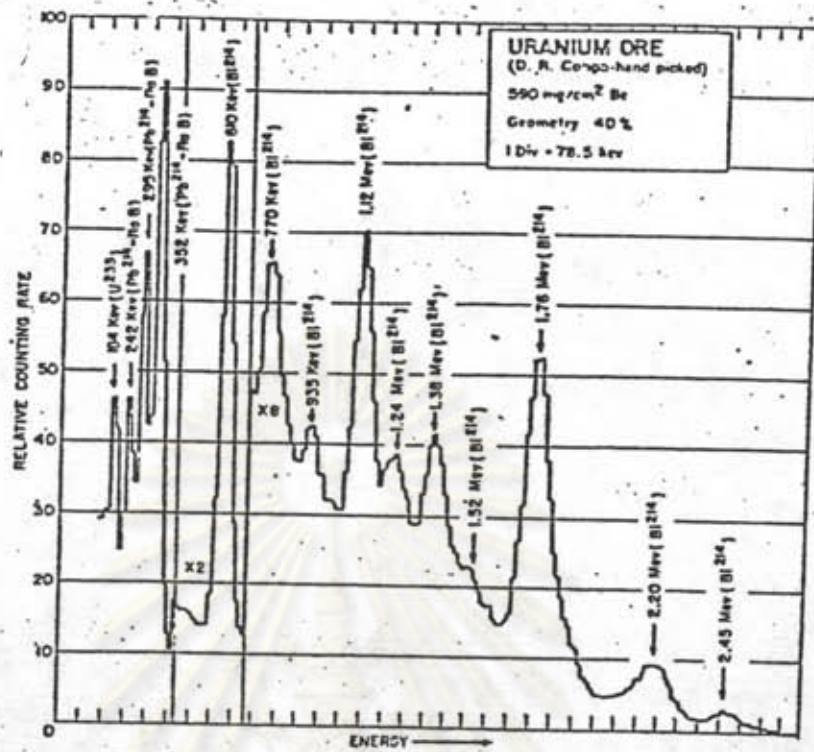
ดิฟเฟอเรนเชียล สเปกโตรมิเตอร์มีข้อได้เปรียบในการวัด คือ มีความแม่นยำสูง มีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูง จึงง่ายต่อการวิเคราะห์ คือ ทำให้รู้ว่าเป็นค่าที่วัดได้ในแขนแนลไหนบ้าง มีพลังงานเท่าไร และมีอัตรานับในแต่ละช่องเท่าไร ส่วนอินทิกรัล สเปกโตรมิเตอร์ มีข้อได้เปรียบ คือ มีราคาถูก ดูแลรักษาง่าย และมีอัตรานับสูง ความคงที่ของพลังงานในช่วงที่แบ่ง จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าสูงจากแหล่งจ่ายแรงดันที่ให้ไบอัสหัววัด และลักษณะการขยายของหลอดทวีคูณสัญญาณ เนื่องจากความคงที่ของแรงดันไฟฟ้าสูงจากแหล่งจ่ายแรงดัน และหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ ต่างแปรผันกับค่าอุณหภูมิ จึงมีผลทำให้เกนเปลี่ยนแปลงได้ สเปกโตรมิเตอร์ส่วนใหญ่ ใช้วิธีการควบคุม เกน (gain) หรือ อัตราขยายสัญญาณแบบอัตโนมัติ โดยใช้ ต้นกำเนิดปรับเทียบ (calibration source) ที่รู้ค่าพลังงานใส่ไว้หน้าหัววัดอย่างถาวร หรือ ใส่ไว้เป็นช่วง ๆ แล้วใช้วงจรป้อนกลับในการควบคุมให้ค่าที่วัดได้จากต้นกำเนิดปรับเทียบอยู่ที่ตำแหน่งเดิมตลอด อย่างไรก็ตามการควบคุมอุณหภูมิในสนามยังมีความจำเป็นมาก เพราะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน อาจมีผลทำให้ผลึกของหัววัดร้าวได้ นอกจากนี้การเปลี่ยนอุณหภูมิยังมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าสูงของหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์เปลี่ยน ดังนั้นจึงควรทำฉนวนความร้อน และวงจรควบคุมการเปลี่ยนเกนให้กับระบบวัดด้วย ในบางสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงมาก เราอาจจำเป็นต้องใช้ขลวดความร้อนพันรอบหัววัด เพื่อให้ระบบวัดมีอุณหภูมิคงที่

ตารางที่ 3.4 พลังงานต่าง ๆ ในอนุกรมยูเรเนียมเรียงตามลำดับพลังงาน

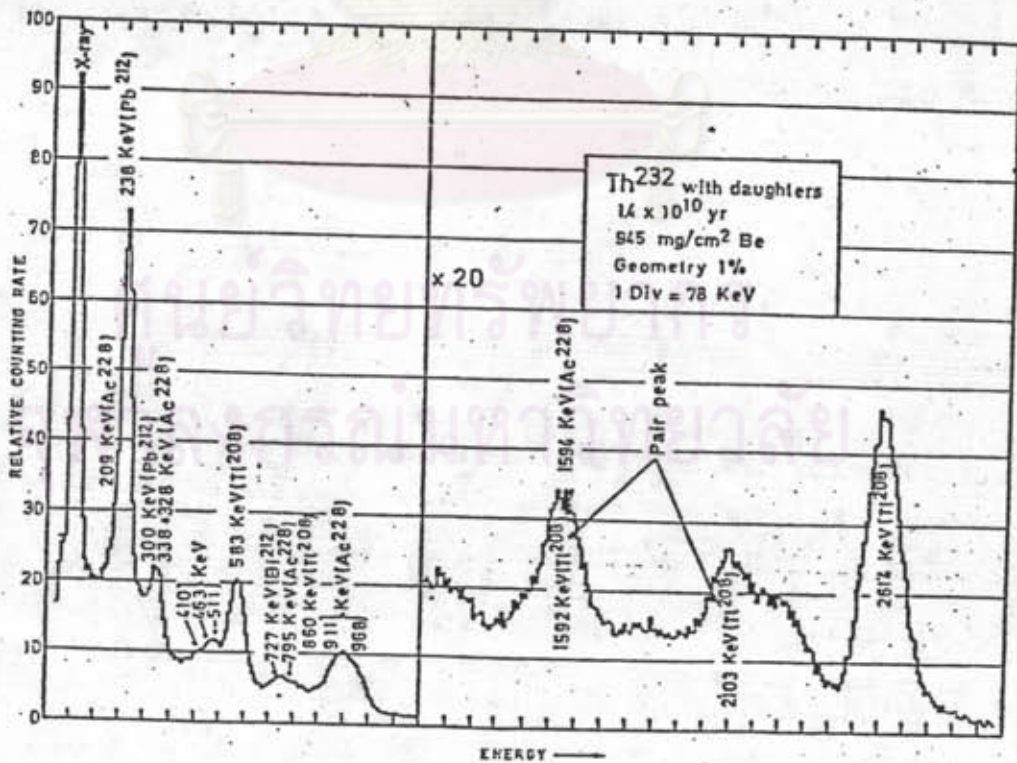
Decaying isotope	Gamma-ray energy (MeV)	Gammas per 100 disintegrations
^{214}Pb	0.2952	17.9
^{214}Pb	0.3520	35.0
^{214}Bi	0.6094	43.0
^{214}Bi	1.1204	14.5
^{214}Bi	1.2382	5.6
^{214}Bi	1.3778	4.6
^{214}Bi	1.7647	14.7
^{214}Bi	2.2045	4.7
^{214}Bi	2.4480	1.5

ตารางที่ 3.5 พลังงานต่าง ๆ ในอนุกรมยูเรเนียม เรียงตามลำดับพลังงาน

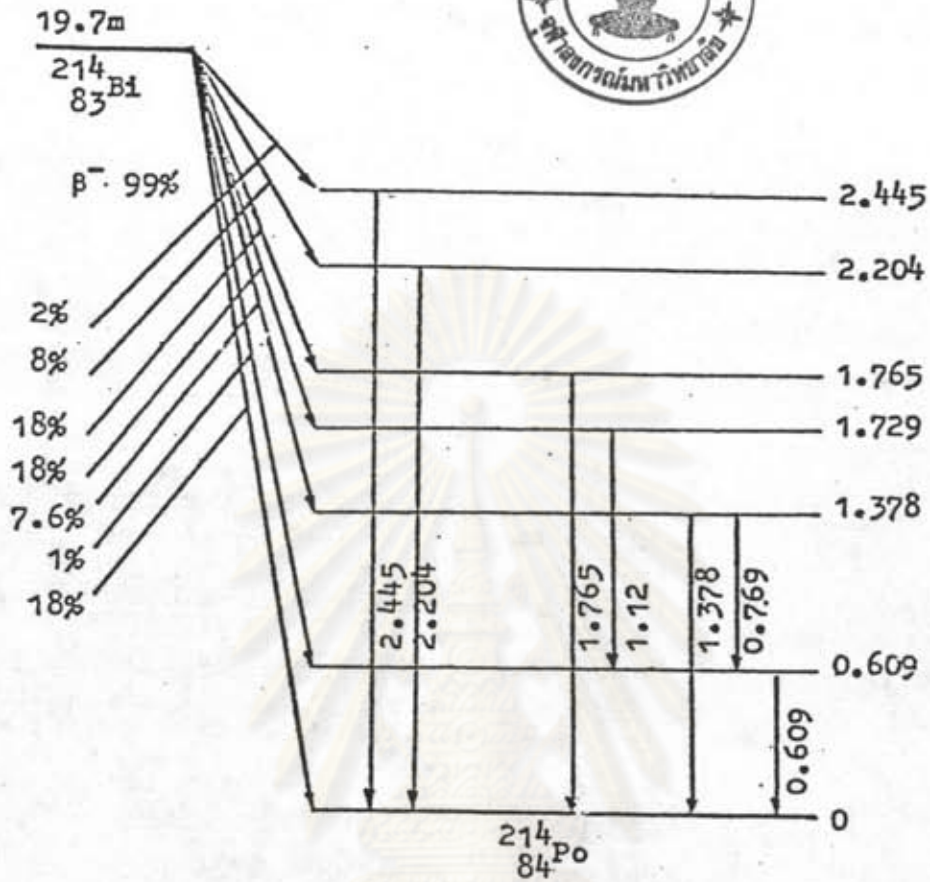
Decaying isotope	Gamma-ray energy (MeV)	Gammas per 100 disintegrations
^{212}Pb	0.2386	45.0
^{228}Ac	0.3385	12.3
^{208}Tl	0.5107	9.0
^{208}Tl	0.5831	30.0
^{212}Bi	0.7272	7.0
^{228}Ac	0.9111	29.0
^{228}Ac	0.9667	23.0
^{228}Ac	1.5881	4.6
^{208}Tl	2.6147	35.9



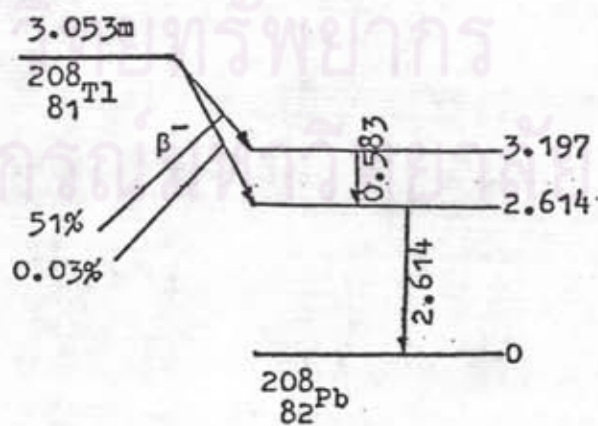
รูปที่ 3.3 สเปกตรัมของยูเรเนียม(U-238) (4)



รูปที่ 3.4 สเปกตรัมของทอเรียม-232 และผลผลิตในอนุกรม (4)



รูปที่ 3.5 รูปแบบการสลายตัว (decay scheme) ของโปโลเนียม-214 (4)



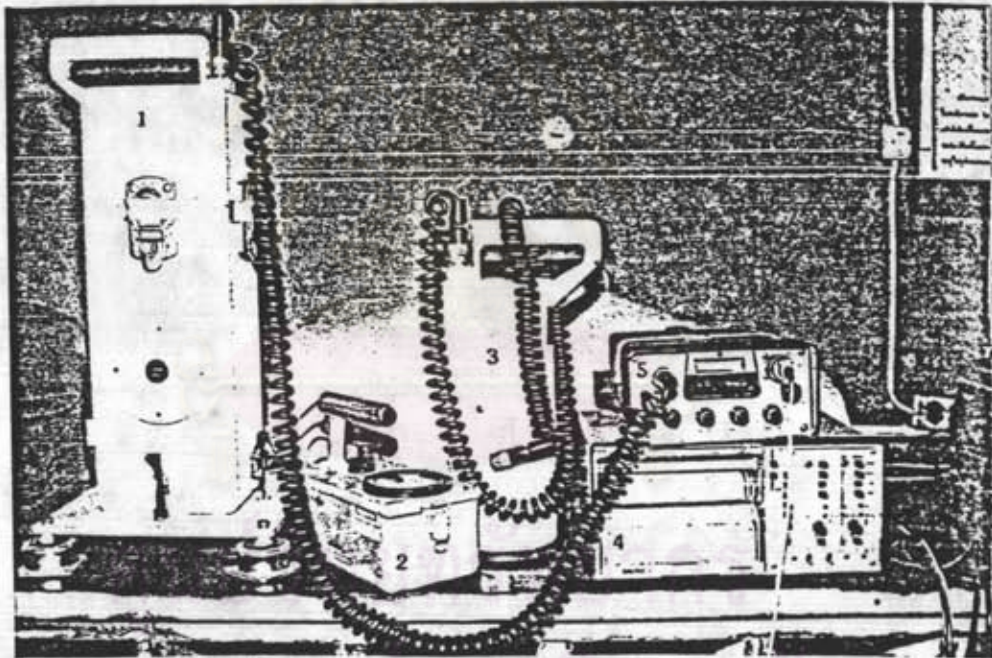
รูปที่ 3.6 รูปแบบการสลายตัว (decay scheme) ของแทลเลียม-208 (4)

เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เครื่องวัดรังสีแกมมาชนิดใช้หัววัดเรืองรังสีแบบผลึก NaI(Tl) และเครื่องวัดรังสีแอลฟาชนิดใช้หัววัดเรืองรังสี ZnS

3.8.1 เครื่องวัดรังสีแกมมาชนิดใช้หัววัดเรืองรังสีแบบผลึก

NaI(Tl)

หัววัดเรืองรังสีแบบผลึก NaI(Tl) ที่ใช้ในการสำรวจมีทั้งแบบที่ใช้วัดพลังงานรวม และแบบวัดแยกพลังงาน 4 ช่อง ช่องที่ 1 ใช้วัดจำนวนนับรวม (total count) โดยวัดทุกพลังงานจาก 500 KeV ถึง 3 MeV ช่องที่ 2 วัดโพแทสเซียมที่พลังงานของ K-40 (1.46 MeV) ช่องที่ 3 วัดยูเรเนียมที่พลังงานของ Bi-214 (1.76 MeV) ช่องที่ 4 วัดทอเรียมที่พลังงานของ Tl-208 (2.62 MeV) แต่บางชนิดมีถึง 6 ช่อง โดยเพิ่มช่องที่ 5 สำหรับวัดทุกพลังงาน และช่องที่ 6 สำหรับวัดพลังงานที่สูงกว่าช่องของทอเรียม

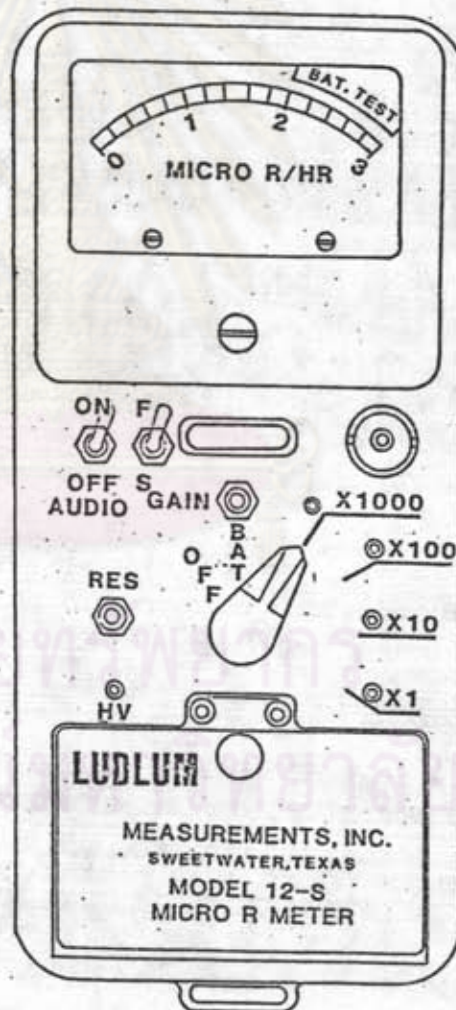


รูปที่ 3.7 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดรังสีแกมมาในสนามประกอบด้วย :

- (1) หัววัดเรืองรังสีแบบผลึก NaI(Tl) ขนาด 5"x5" (GPX110)
- (2) เครื่องสำรวจแบบใช้หัววัดไกเกอร์
- (3) หัววัดเรืองรังสีแบบผลึก NaI(Tl) ขนาด 3"x3" (GPX21)
- (4) ตัวบันทึกที่แสดงค่าอัตรานับเทียบกับเวลา (recorder and x-y plotter)
- (5) สเปกโตรมิเตอร์แบบแยกระดับได้ 4 ช่อง

3.8.1.1 เครื่องวัดรังสีแกมมาแบบวัดทุกระดับพลังงาน
เครื่องวัดชนิดนี้ใช้ของ LUDLUM MEASUREMENTS, INC.

รุ่น 12-S หัววัดชนิดนี้แม้จะมีขนาดเล็กเพียง 1"x1" แต่สามารถวัดรังสี
ที่ระดับต่ำมาก ๆ ได้ดีพอสมควร จึงใช้สำรวจหาตำแหน่งที่มีค่าผิดปกติได้
ทำงานได้ในช่วงต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เนื่องจากเครื่องวัดชนิดนี้
ใช้ง่าย เพียงดูจากหน้าปัดของเครื่องมือก็สามารถใช้ได้แล้ว ส่วนรายละเอียด
เกี่ยวกับการใช้หลายจุดจะคล้ายกับแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ แบบ 4 ช่อง



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดรังสีแบบวัดทุกระดับพลังงานที่ใช้ในการสำรวจ

3.8.1.2 เครื่องวัดรังสีแกมมาแบบวัดแยกพลังงานได้ 4

ช่อง

เครื่องวัดรังสีแกมมาแบบวัดแยกพลังงานที่ใช้ในการสำรวจ เป็น
ของบริษัท DOSE METER OPERATION OF AMERICA ใช้สเปกโตรมิ
เตอร์ รุ่น GR-410 ใช้ได้กับหัววัด 2 ขนาด คือ ขนาด 3"x3" และ ขนาด
5"x5"

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดเครื่องมือและวิธีการใช้เครื่องมือในการสำรวจ

<u>อุปกรณ์</u>	<u>สเปกโตรมิเตอร์</u>	<u>รุ่น</u>	GR-410
<u>หัววัด</u>	<u>รุ่น</u>	GPX - 21(3"x3") และ GPX - 110(5"x5")	

รายละเอียดของระบบ

หัววัด ผลิกโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม)

ตัวจำกัดพลังงาน เครื่องวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบ
ดิฟเฟอเรนเชียลความไวสูง สามารถปรับพลังงานได้โดยปุ่มควบคุมที่อยู่ด้าน
ข้างของ GR - 410 แต่ช่วงกว้างหน้าต่าง (window width) ได้ตั้งไว้
จากโรงงานแล้วไม่สามารถปรับแต่งได้

จำนวนนับทั้งหมด (total count)

วัดทุกพลังงานจาก 0.5 MeV ถึง 3 MeV

โพแทสเซียม (K-40)

ยอดหน้าต่าง (window peak) $E_{\gamma} = 1.46$ MeV

ความกว้างหน้าต่าง (ΔE) 176 KeV

ระดับพลังงานต่ำ (E) แปรได้จาก 0 ถึง 3 MeV

ยูเรเนียม (Bi-241)

ยอดหน้าต่าง (E_{γ}) = 1.76 MeV

ความกว้างหน้าต่าง (ΔE) = 210
 ระดับต่ำ (E) แปรได้จาก 0 ถึง 3 MeV

ทอเรียม (Th-208)

ยอดหน้าต่าง (E_{γ}) = 2.62 MeV
 ความกว้างหน้าต่าง (ΔE) = 320 KeV
 ระดับต่ำ (E) แปรได้จาก 0-3 MeV

เวลาสงบ (dead time) 10 μ sec

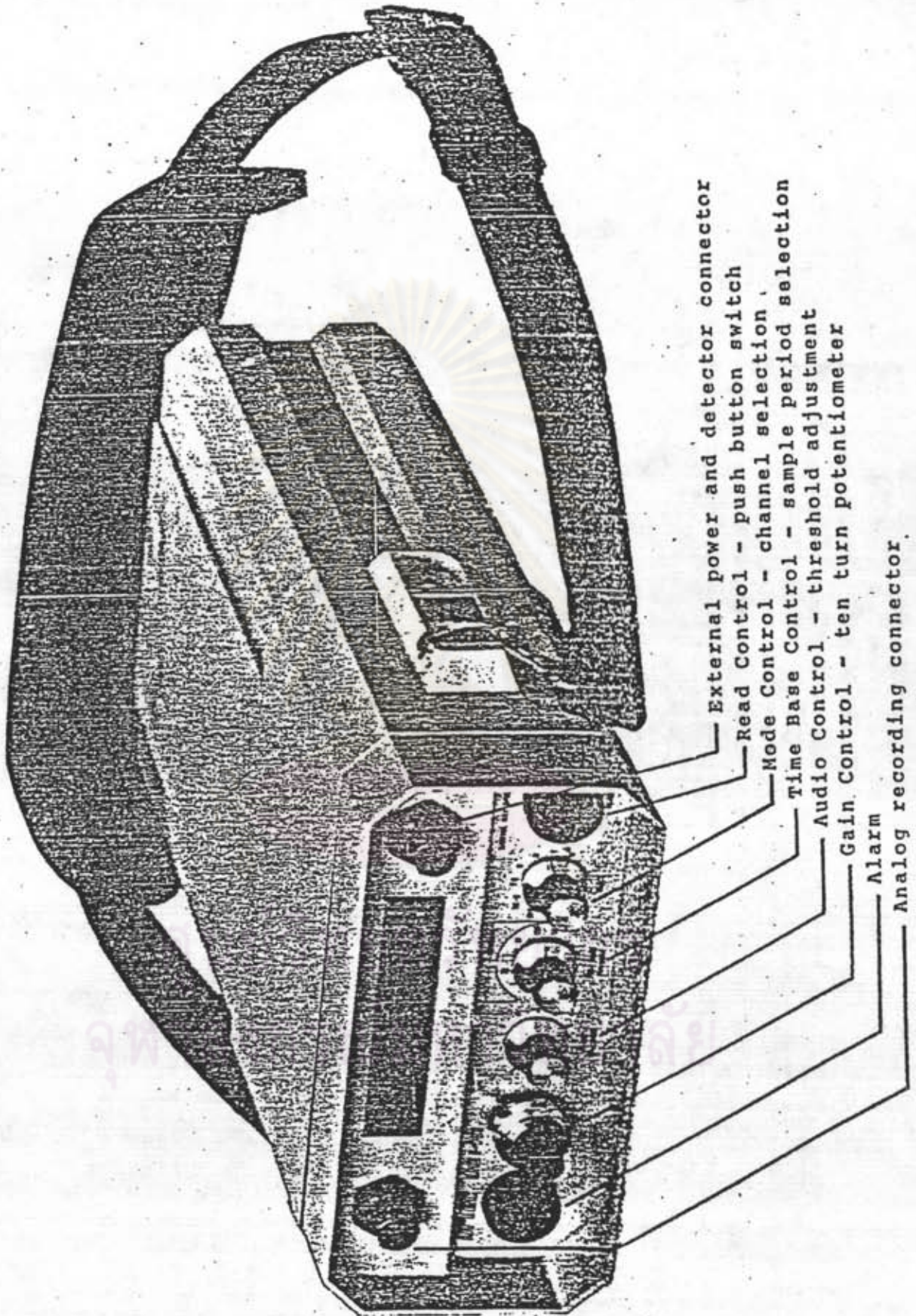
เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม แสดงผลในรูป อนาลอกมิเตอร์ด้านหน้า
 สามารถขยายช่วงได้จาก 100 ถึง 12800 cps สูงสุด

สภาวะการชาร์จแบตเตอรี่ คุ้ได้จากสามเหลี่ยมลิเชียวบนหน้าปัทม์
 ของเครื่อง

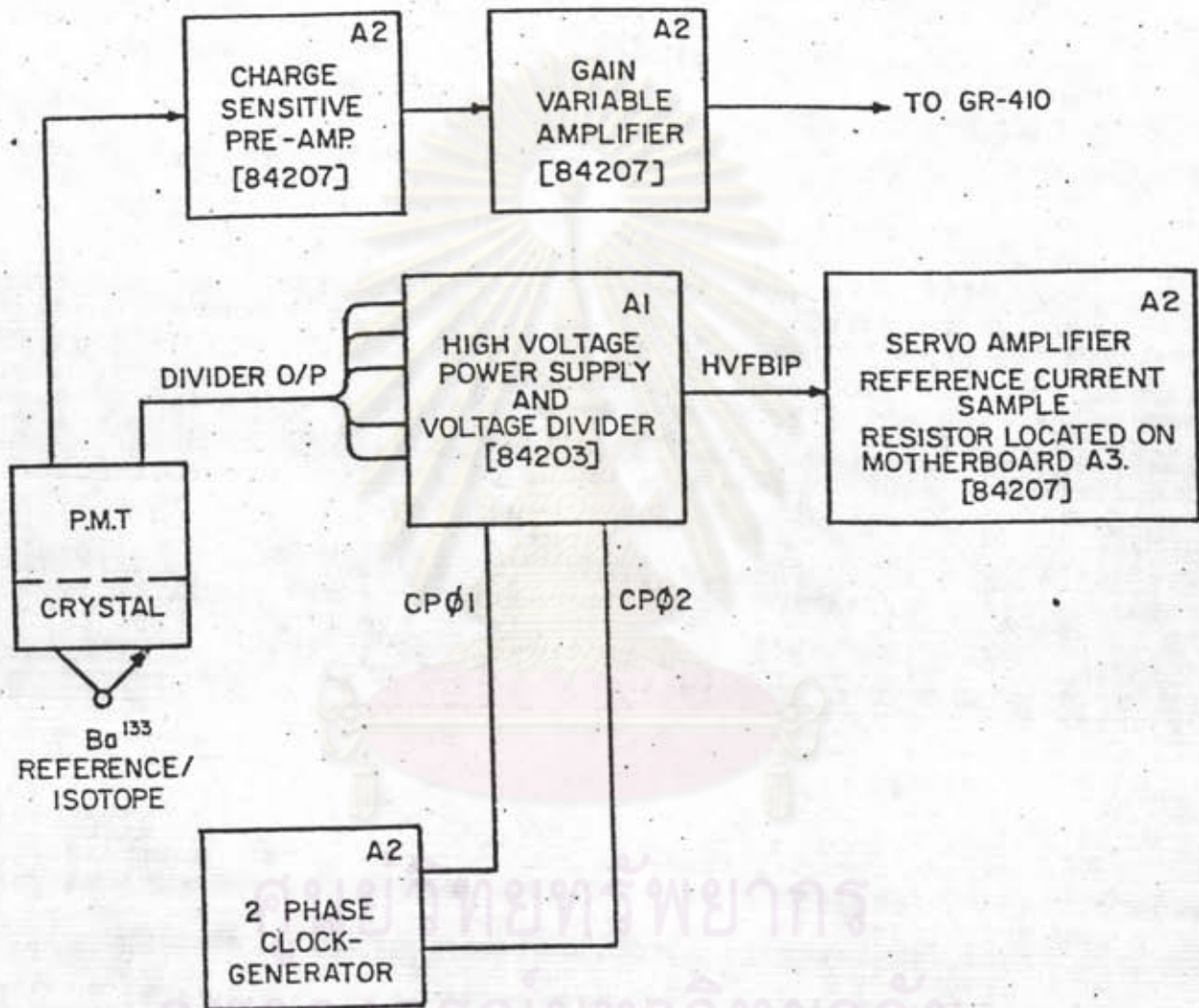
ตัวแสดงค่าความผิดพลาดของแกนมอนิเตอร์ bowtie สีเขียว

เปอร์เซ็นต์ตัวเลือกสัญญาณเตือน สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์สัญญาณ
 เตือนได้ช่วงละ 10 % จาก 10 % ถึง 100 % ของสเกลสุดท้ายปัทม์

เอาท์พุทตัวบันทึก (recorder output) ใช้สำหรับต่อเข้ากับ
 อินพุทของ X-Y plotter



รูปที่ 3.9 เครื่องมือวัดรังสีแบบวัดแยกพลังงานที่ใช้ในการสำรวจ



A3 = MOTHERBOARD (INCLUDING THE HV. FEEDBACK RESISTOR)

รูปที่ 3.10 แผนภาพกล่องของเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจ

3.8.2 เครื่องวัดรังสีแอลฟาชนิดใช้หัววัดเรืองรังสี ZnS (เรดอนมอนิเตอร์)

เครื่องวัดรังสีแอลฟาชนิดใช้หัววัดเรืองรังสีที่ใช้ในการสำรวจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เรดอน มอนิเตอร์ ที่ใช้ชื่อนี้เพราะเครื่องวัดชนิดนี้ใช้หลักการวัดรังสีแอลฟาจากก๊าซเรดอน หลักการทำงานของเครื่องมีชนิดนี้คือเมื่อเรดอน-222 สลายตัวให้รังสีแอลฟาแล้วเปลี่ยนเป็นโพโลเนียม-218 ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็ง เมื่อรังสีแอลฟากระทบผลึกเรืองแสง ZnS จะให้แสงในช่วงที่เหมาะสมที่จะกระตุ้นโฟโตคาโทด ปล่อยให้ยอิเล็กตรอนออกมา แล้วถูกขยายให้เพิ่มจำนวนมากขึ้น โดยหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน จนได้อัตราขยายระหว่างโฟโตคาโทดและแอนโนดมากกว่า 10^6 เท่า สัญญาณจากโฟโตคาโทดจะถูกส่งไปขยายสัญญาณต่อโดยส่วนขยายส่วนหน้าและส่วนขยายหลัก แล้วส่งต่อไปยังภาคแสดงผลเพื่อแสดงผลการวัด

การใช้เรดอน มอนิเตอร์ จะต้องระวังเรื่องการเปราะเนื่องมาจากผลผลิตของเรดอนที่ให้อนุภาคแอลฟาด้วย เพราะเมื่อเรดอนสลายตัวกลายเป็นโพโลเนียม-218 โพโลเนียม-218 จะจับอยู่ที่บริเวณผิวด้านข้างของหัววัด และเนื่องโพโลเนียมสลายตัวต่อให้อนุภาคแอลฟา จึงทำให้ผลการวัดค่ารังสีแอลฟาจากก๊าซเรดอนผิดพลาดได้

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดและวิธีการใช้ เรดอน มอนิเตอร์

ชื่อชิ้นส่วนที่ใช้	รายละเอียด
(1) แบตเตอรี่	ใช้แบตเตอรี่ HP2 (ถ่านไฟฉายก้อนใหญ่) จำนวน 6 ก้อน
(2) กระแสที่ใช้	62 มิลลิแอมแปร์ (สภาพปกติ)
(3) แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด	+ 6.5 โวลต์
(4) อายุของแบตเตอรี่ขณะใช้งาน	(ก) 70 ชั่วโมงที่ +20 °C (ข) 35 ชั่วโมงที่ 0 ° (ค) 23 ชั่วโมงที่ -10 °C หรือ 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง ต่อวัน
(5) สารเรืองแสง (phosphor)	ผลึก ZnS ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 7/8" (2.2 เซ็นติเมตร) x 12" (34 เซ็นติเมตร)

ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

ชื่อชิ้นส่วนที่ใช้	รายละเอียด
(6) ความสามารถในการนับของสเกลเลอร์	สูงสุด 9999
(7) การแสดงผลของสเกลเลอร์	แสดงผลได้ 4 หลัก
(8) ช่วงเวลาที่ตั้งวัดสูงสุด	1530.60 วินาที หรือ manual
(9) ความถูกต้องของเวลา	+ 0.5 % ในทุกช่วง
(10) ตัวจำกัดต่ำสุด (discriminator)	เทรลโวล ประมาณ 0.8 โวลต์
(11) แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง	+600 โวลต์ ถึง +1600 โวลต์
(12) ช่วงอุณหภูมิที่สามารถทำงานได้	-10 °C ถึง +50 °C

หลังจากพบตำแหน่งที่น่าสนใจจากการสำรวจ โดยใช้เครื่องวัดรังสีแกมมาแล้ว จะต้องทำการสำรวจสภาพภูมิประเทศ รวมทั้งลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ที่จะทำการสำรวจ เพื่อกำหนดตำแหน่งที่จะทำการวัดโดยใช้ เรคออน มอนิเตอร์ ควบคู่ไปกับการใช้ แกมมาสเปกโตรมิเตอร์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำเขียนเส้นระดับรังสี (radio contours) เพื่อหาบริเวณที่เป็นแหล่งสะสมตัวของยูเรเนียมที่เข้มข้นที่สุด

การสำรวจอย่างละเอียดทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ

(1) กำหนดพื้นที่ที่จะทำการสำรวจ โดยใช้แกมมาสเปกโตรมิเตอร์ ตรวจวัดก่อน จนได้จุดหรือบริเวณที่มีรังสีสูงสุด

(2) เลือกจุดที่รังสีสูงสุดและเหมาะสมต่อการใช้เรคออน มอนิเตอร์ ในการวัด เพื่อใช้เป็นจุดศูนย์กลางในการกำหนดจุดสำรวจ บางบริเวณวัดรังสีแกมมาได้สูงสุด แต่ไม่เหมาะในการใช้เป็นจุดศูนย์กลางการสำรวจ เพราะพื้นที่ไม่อำนวย กล่าวคือ มีหินฐานรากตื้น ทำให้ไม่สามารถเจาะหลุมเพื่อทำการวัดได้

(3) ใช้กล้อง ทีโอดอลไลท์(theodolite)และสตาเดียม(stadia) กำหนดจุดที่จะทำการสำรวจ โดยตึกกริด(grid) เป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่ในการสำรวจครั้งนี้ใช้วิธีกำหนดจุดต่าง ๆ ใน แนวรัศมีของวงกลม โดยใช้จุดศูนย์กลางที่วัดด้วยรังสีแกมมาแรงสุด(วัดเหนือ พื้นไม่ได้เจาะหลุมวัด) เหตุที่ต้องทำเช่นนี้เพราะมีงบประมาณจำกัด และ บางพื้นที่มีหินโผล่ หรือมีชั้นหินอยู่เบื้องล่าง ดังนั้นในการกำหนดแนวรัศมีจึง พยายามหลีกเลี่ยงตำแหน่งเหล่านี้ ข้อดีในการกำหนดหลุมเจาะลักษณะนี้ คือ ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายได้มาก แต่มีข้อเสีย คือ เขียนเส้นระดับรังสีได้ ค่อนข้างหยาบ เพราะตำแหน่งที่ห่างจากจุดศูนย์กลางมาก จะมีระยะห่าง ระหว่างหลุมของแต่ละแนวเส้นรัศมีมาก อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจริง ๆ ที่มีงบประมาณเพียงพออาจใช้วิธีนี้ในช่วงแรก เมื่อพบบริเวณที่มีรังสีสูงสุด โดยวิธีนี้แล้ว จึงกำหนดจุดศูนย์กลางในการตึกกริดอีกครั้ง

(4) วัดรังสีในหลุมเจาะโดยใช้ทั้งแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ และ เรคคอร์ด มอนิเตอร์

(5) นำข้อมูลที่วัดได้มาเขียนเส้นระดับรังสี เพื่อเปรียบเทียบผล จากการวัดทั้งสองแบบ

(6) วิเคราะห์ผลการวัดเพื่อระบุตำแหน่งที่ควรจะมีการสะสมตัวของยูเรเนียมสูงสุด จากนั้นจึงจะถึงขั้นเจาะสำรวจเพื่อหาแหล่งแร่ และ ปริมาณสำรองต่อไป

3.8.3 ลำดับการใช้ เรคคอร์ด มอนิเตอร์ ในการวัด

รังสีแอลฟา

(1) เจาะรู ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดยใช้เครื่องเจาะรูปแบบมีอ กระแทก(drive-point C2524)

(2) สอดท่อกันดินถล่มลงไปหลุมเจาะ

(3) สอดหัววัด เรคคอร์ด มอนิเตอร์ ลงในท่อกันดินถล่ม

(4) วัดสัญญาณและสัญญาณรบกวนเพื่อเลือกค่า EHT

(5) บันทึกค่าที่อ่านได้เพื่อเป็นข้อมูลในการเขียนเส้นระดับรังสี

3.9 การสำรวจยูเรเนียมโดยการวัดรังสีแอลฟา

การสำรวจโดยการวัดรังสีแอลฟามีหลายวิธี เช่นวิธีบันทึกรอยรังสีแอลฟาบนแผ่นฟิล์มเซลลูโลสไนเตรต (track etch) วิธีวัดรังสีแอลฟาโดยใช้เรคอน มอนิเตอร์ แต่วิธีที่นิยมใช้กันมาก คือ วิธีวัดรังสีแอลฟาที่เกิดจากรีดอน-222 โดยใช้หัววัดเรืองรังสี ZnS เนื่องจากเรคอน-222 เป็นก๊าซและเป็นผลผลิตตัวหนึ่งของอนุกรมยูเรเนียม หลังจากที่ยูเรเนียมสลายตัวให้เรคอน ก๊าซเรคอนจะลอยขึ้นเบื้องบน สู่ชั้นผิวดิน และสู่ชั้นบรรยากาศ ในขณะที่เดียวกันจะมีการสลายตัวให้รังสีแอลฟา ดังนั้นการวัดรังสีแอลฟาจากรีดอนในพื้นที่สำรวจ จึงสามารถแสดงตำแหน่งสะสมตัวของยูเรเนียมได้จากตารางที่ 3.3(ก) จะเห็นว่าเมื่อเรคอนสลายตัวให้โพลเนียม-218 ซึ่งสลายตัวต่อโดยให้รังสีแอลฟาเช่นกัน รังสีแอลฟาที่ได้จากการสลายตัวของโพลเนียม-218 จะทำให้เกิดการรบกวนการวัดรังสีแอลฟาที่เกิดจากรีดอน เนื่องจากโพลเนียม-218 เป็นของแข็ง จึงเกาะติดที่ด้านข้างของหัววัด ZnS ทำให้การวัดผิดพลาดได้ แต่เนื่องจากโพลเนียม-218 มีครึ่งชีวิตเพียง 3 นาที ดังนั้นถ้าปล่อยให้ไว้ประมาณ 30 นาที (10 เท่าของครึ่งชีวิต) โพลเนียม-218 จะสลายตัวหมด ดังนั้นการบันทึกรังสีจากรีดอนแต่ละครั้ง จึงควรทิ้งช่วงเวลาในการวัดประมาณ 30 นาที เพื่อให้โพลเนียมที่เกาะติดที่ด้านข้างสลายตัวหมดเสียก่อน มิฉะนั้นจะทำให้อัตรานับมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ได้ ทั้ง ๆ ที่มีความแรงรังสีเท่าเดิม

สำหรับก๊าซเรคอน($Rn-220$) ซึ่งเป็นลูกหลานตัวเดียวของอนุกรมทอเรียมที่เป็นก๊าซ (ดูรูปที่ 33.3(ข) ประกอบ) ก็เป็นตัวรบกวนการวัดจากรีดอน-222 เช่นกัน และด้วยเหตุผลเดียวกัน คือ เรคอน-220 มีครึ่งชีวิตเพียง 59 วินาที จึงมีโอกาสมาถึงหัววัดน้อยมาก ดังนั้นรังสีแอลฟาส่วนใหญ่ที่วัดได้ จึงถือได้ว่าเป็นผลจากการวัดเรคอนเพียงอย่างเดียว

การวัดเรคอนทำได้ 2 วิธี คือ

- (1) เก็บก๊าซด้วยปริมาตรหนึ่งที่คงที่จากหลุมเจาะ
- (2) ดูดก๊าซจากหลุมเจาะผ่านหัววัดด้วยอัตราไหลคงที่

3.9.1 การเก็บก๊าซโดยมีปริมาตรคงที่ (fixed volume method)

กำหนดให้ N คือจำนวนอะตอมของเรคอน ณ เวลาใด ๆ ภายในปริมาตรที่คงที่ หลังจากเวลาผ่านไป t วินาที

$$N = N_0 \exp(-\lambda_1 t) \quad \dots (3.4)$$

เมื่อ λ_1 คือค่าคงที่การสลายตัว (decay's constant) ของเรดอน-222

มีค่า $\lambda_1 = 0.693/t_{1/2} = 2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

N_0 คือจำนวนอะตอมของเรดอน ณ เวลา t ใด ๆ

ดังนั้นอัตราการสลายตัวของเรดอน (R_1) มีค่า

$$R_1 = -dN/dt = \lambda_1 N_0 \exp(-\lambda_1 t) \quad \dots (3.5)$$

โดยที่ R_1 คืออัตราการสลายตัวให้รังสีแอลฟาต่อวินาที

และเนื่องจากเรดอนสลายตัวให้โพลonium-218 ถ้ากำหนดให้จำนวนอะตอมของโพลonium-218 ณ เวลา t ใด ๆ คือ M ดังนั้น

$$dM/dt = \lambda_1 M_0 \exp(-\lambda_1 t) - \lambda_2 M \quad \dots (3.6)$$

เมื่อ λ_2 คือ ค่าคงที่การสลายตัวของโพลonium-218 มีค่า

$$\lambda_2 = 0.693/t_{1/2} = 3.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

โดยที่ $\lambda_1 N_0 \exp(-\lambda_1 t)$ คืออัตราการเกิดของ โพลonium-218

และ $-\lambda_2 M$ คือ อัตราการสลายตัวของ โพลonium-218

จากสมการ 3.6 หา M ได้

$$M = \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) N_0 [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] \quad \dots (3.7)$$

ดังนั้นอัตราการสลายตัวของ โพลonium-218 คือ อัตราการให้รังสีแอลฟา เนื่องจากปฏิกิริยา



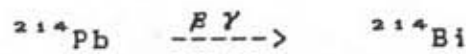
หรือ $\lambda_2 M = -\frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] = R_2 \quad \dots (3.8)$

จากสมการ (3.5) และ (3.8) หาค่า R_1 และ R_2 ได้

$$R_1 = 2.1 \times 10^{-6} N_0 \exp(-2.1 \times 10^{-6} t)$$

$$R_2 = 2.1 \times 10^{-6} N_0 [\exp(-2.1 \times 10^{-6} t) - \exp(-3.8 \times 10^{-3} t)]$$

สำหรับปฏิกิริยาการสลายตัวขึ้นไป คือ

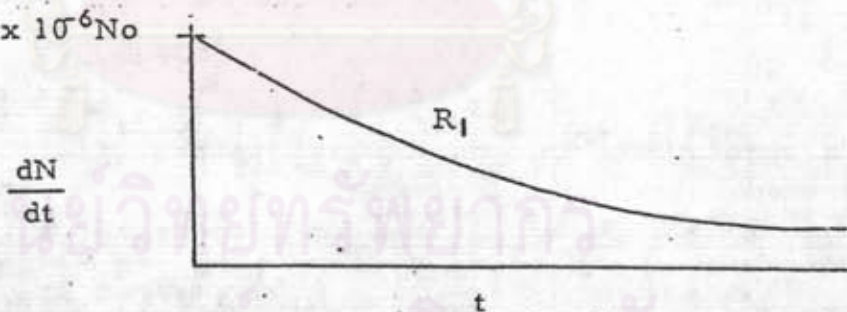


เนื่องจาก บิสมัท-214 ไม่มีการสลายตัวให้รังสีแอลฟา และหลังจากการสลายตัวให้เบตาและแกมมา จะเปลี่ยนเป็น โพลonium-214 ตัวครึ่งชีวิต = 19.7 นาที โดยที่โพลonium-214 ไม่คงตัว จึงสลายตัวต่อให้รังสีแอลฟา แล้วเปลี่ยนเป็น โพลonium-210 แต่เนื่องจากผ่านการสลายตัวถึง 2 ขั้นตอน คือ 26.8 นาที และ 19.7 นาที จึงไม่จำเป็นต้องนำมาคิดถ้าใช้เวลาในการวัดไม่นานนัก (น้อยกว่า 10 นาที) ปกติการวัดในสนามโดยใช้เรดอน มอนิเตอร์ จะใช้เวลาเพียง 2-3 นาทีเท่านั้น แต่ถ้าจำเป็นต้องวัดในช่วงเวลา 1/2 ชั่วโมง จะต้องคำนวณจากสมการ

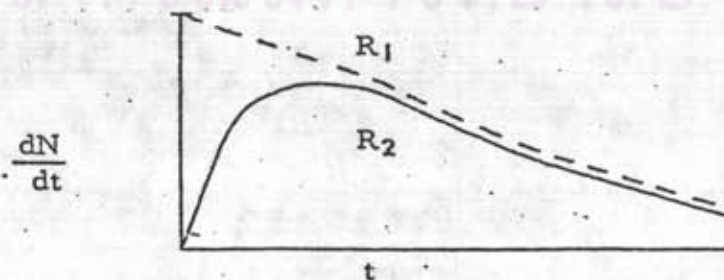
$$R \text{ (ทั้งหมด)} = R_1 + R_2 \dots (3.9)$$

โดย R_1 มีค่าลดลงอย่างเอกโปเนนเชียล (ดูรูปที่ 3.11 ประกอบ) ขณะที่ R_2 เป็นผลบวกจากการสลายตัวของ 2 เอกโปเนนเชียล ส่วนหนึ่งเป็น + และอีกส่วนหนึ่งเป็น -

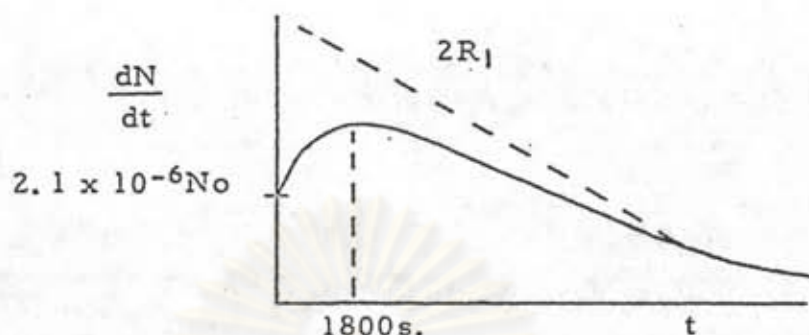
$$2.1 \times 10^6 \text{No}$$



รูปที่ 3.11 การสลายตัวของเรดอน-222 เกี่ยวกับเวลา



รูปที่ 3.12 อัตราการเกิดและอัตราการสลายตัวของโพลonium-218



รูปที่ 3.13 อัตราการสลายตัวให้รังสีแอลฟาทั้งหมดที่หัววัดนับได้

จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าเส้นกราฟ $R (= R_1 + R_2)$ เริ่มต้นจาก $\lambda_1 N_0$ และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเข้าใกล้ $2R_1$

ดังนั้นถ้าวัดในหลุมนาน ๆ อัตรานับจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็น 2 เท่าของค่าเริ่มต้น และมีค่าสูงสุด เมื่อเวลาผ่านไป 1800 วินาที

3.9.2 การวัดโดยวิธีต่อเนื่อง (continuous method)

ถ้าดูดก๊าซผ่านหัววัดอย่างต่อเนื่อง ของแข็งที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนผ่านหัววัดโดยไม่มี การจับที่ผนังหัววัด (มีข้างที่ เกิดขณะเคลื่อนผ่านหัววัดแต่น้อยมาก) ดังนั้นเรดอนจึงมีความเข้มข้นคงที่ นั่นคือ อัตรานับ R จะมีค่าคงที่

วิธีวัดอย่างต่อเนื่องมีข้อได้เปรียบกว่า คือ วัดได้เร็วกว่า และมีการเปราะเขือนน้อยกว่า แต่วิธีวัดแบบปริมาตรคงที่วัดได้แม่นยำกว่า และสามารถเขียนกราฟของ R (อัตรานับทั้งหมด) ได้ อย่างไรก็ตาม ในการสำรวจเราเพียงต้องการชี้แหล่งสะสมตัวของยูเรเนียมเท่านั้น

3.10 การเตรียมตัวอย่าง (Sample Preparation)

โดยปกติตัวอย่างที่จะนำมาวัดจะต้องมีการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมต่อการวัด ถ้าตัวอย่างอยู่ในรูปของแข็ง เราจะต้องเตรียมตัวอย่างให้มีรูปลักษณะเดียวกัน เช่น มีขนาดเดียวกัน มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ มีผิวหน้าเรียบ มีความหนาเท่ากันแต่ต้องไม่หนากว่าความหนาวิกฤต และในขณะที่เตรียมตัวอย่างจะต้องสามารถนำกลับมาใช้ได้ อีก โดยประการหลังมีความสำคัญมาก สำหรับการวัดตัวอย่างที่ให้อนุภาค แอลฟา และอนุภาคเบตาพลังงานต่ำ แต่ถ้าใช้วัดโดยวิธีเรอริงสีในของเหลว ตัวอย่างจะต้องอยู่ในรูปที่เหมาะสมกับตัวกลางที่เรืองแสง และต้องไม่ทึบแสง ดังนั้นจึงต้องทำให้ตัวอย่างอยู่ในรูปสารละลายก่อน สำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็งและต้องการวัดรังสีแกมมาจากตัวอย่าง ปกติจะวัดโดยตรงโดยมีการเตรียมตัวอย่างล่วงหน้าเพียงเล็กน้อย เช่น ต้องเตรียมตัวอย่างให้มีขนาดพอเหมาะกับหัววัด และตัวยึดตัวอย่างจะต้องทำด้วยสารที่มีอะตอมมิกนัมเบอร์ต่ำ เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับไปเข้าหัววัดอีก เพราะรังสีที่สะท้อนกลับอาจจะไปรบกวนฟิคที่พลังงานต่ำกว่า

ในการวัดตัวอย่างเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์มากที่สุดจะต้องขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้คือ

- (1) ชนิดของหัววัด
- (2) กัมมันตรังสีของตัวอย่าง
- (3) จำนวนตัวอย่างที่จะวัด
- (4) เวลาที่ใช้วัด
- (5) ความยากง่ายในการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับ

คุณสมบัติทางเคมีหรือทางกายภาพของตัวอย่าง

หัววัดบางชนิด เช่น หัววัดชนิดของเหลวเรืองแสง (liquid scintillation detector) หัววัดชนิดนี้ไม่เหมาะสำหรับการวัดรังสีที่ระดับสูงมากกว่า 1 มิลลิคูรี แต่อาจใช้เทคนิคการทำให้เจือจาง (dilution techniques) มาทำให้สารเจือจางอยู่ในระดับที่วัดได้ดี แต่นิยมใช้วิธีอื่นซึ่งอาจวัดได้ดีกว่า สำหรับหัววัดที่มีตัวอย่างอยู่นอกหัววัด เช่น หัววัดไกเกอร์ หัววัดแบบแปรผันตรง (proportional detector) หัววัดกิ่งตัวนำ หัววัดของแข็งเรืองแสง และหัววัดรอยนิวเคลียร์ (nuclear tracks)

การเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งเพื่อใช้ในการวัด มีข้อดี คือ ตัวอย่างที่เป็นของแข็งสามารถถือและเก็บได้ง่าย หลักในการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการวัดรังสี แอลฟา เบตา และแกมมาที่มีพลังงานต่ำ ก็คือ จะต้อง



เตรียมตัวอย่างให้บางมาก ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของรังสี และระดับพลังงานที่จะวัด แต่ตัวยึคสารตัวอย่างจะต้องทำด้วยสารที่มีเลขอะตอมต่ำ

ถ้าตัวอย่างมีลักษณะเป็นผง ต้องคลุกเคล้าตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน อาจจะวัดในลักษณะเป็นผง หรืออัดให้เป็นแวนบาง ๆ เพื่อให้มีความหนาสม่ำเสมอ และมี geometry เดียวกัน

เนื่องจากตัวอย่างที่เก็บมา มีทั้งหินและดิน ดังนั้นก่อนนำมาวัดจะต้องเตรียมตัวอย่างให้มีลักษณะเป็นผง และมีขนาดเท่ากัน โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh ถ้าเป็นหินก่อนบดต้องทำความสะอาด เพื่อไม่ให้มีสิ่งเจือปน นำผงดินและหินที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว มาอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำไปบรรจุในกล่องพลาสติก รูปทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร หนา 2 เซนติเมตร จากนั้นปิดฝาแล้วพันด้วยเทปกาว เพื่อกันไม่ให้ก๊าซเรดอนรั่วออก เก็บไว้ประมาณ 1 เดือน เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลย์

3.11 การเตรียมสารมาตรฐาน (Standard Preparation)

สารมาตรฐานที่ใช้ควรมีความเข้มข้นใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง และควรเตรียมให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เพื่อให้ผลจากการวัดคลืนตัวเองมีค่าเท่ากัน ส่วนวิธีเตรียมอื่น ๆ ใช้หลักการเดียวกับการเตรียมสารตัวอย่าง

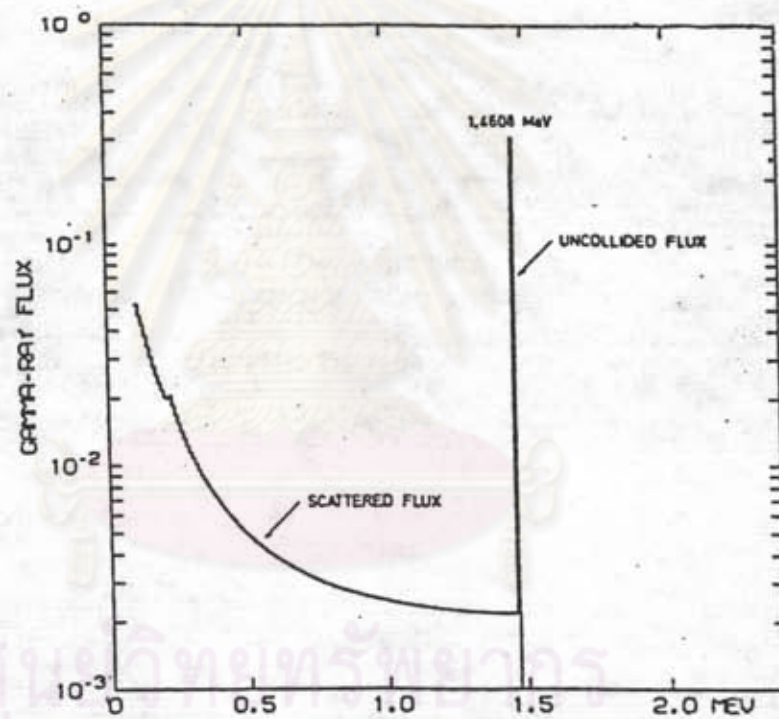
3.12 การวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม

การวิเคราะห์ปริมาณทั้งในสนาม และในห้องปฏิบัติการ จะใช้วิธีเดียวกัน แต่การวัดในห้องปฏิบัติการมีความถูกต้องสูงกว่า เพราะสามารถจัด geometry ให้คงที่ตลอดการทดลองได้ อีกทั้งยังมีการรบกวนจากสภาพแวดล้อมน้อยกว่า

3.12.1 อัตราส่วนการหักลบการรบกวนจากการกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton Stripping Ratios)

ข้อมูลที่ได้จาก สเปกโตรมิเตอร์ ทั้งที่ใช้ในสนามและที่ใช้ในห้องทดลอง สามารถที่จะคำนวณหาปริมาณของนิวไคลด์รังสีได้ แต่จะต้องแก้ไขผลจากการเบี่ยงเบนคอมพ์ตันในหัววัดก่อน

จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่า การเบี่ยงเบนคอมพ์ตันของรังสีแกมมาพลังงานสูง ทำให้จำนวนนับในช่องที่ต่ำกว่า มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าพลังงานที่ลดลง ในรูป ลอการิทึม ค่าที่ใช้สำหรับแก้จำนวนนับในแต่ละส่วนของสเปกตรัม ซึ่งเป็นผลจากการรบกวนของสเปกตรัมที่สูงกว่าเรียกว่า สัมประสิทธิ์การแก้ไขคอมพ์ตัน (compton correction coefficients) หรือ อัตราส่วนหักลบคอมพ์ตัน (stripping ratios) เนื่องจากอัตราส่วนหักลบคอมพ์ตันแปรค่าตามขนาดและรูปร่างของผลึก และแปรค่าตามการจัดระบบของหัววัดและต้นกำเนิดรังสี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อัตราส่วนหักลบคอมพ์ตันที่ต่างกัน นอกจากที่กล่าวมาแล้ว อัตราส่วนหักลบคอมพ์ตันยังขึ้นอยู่กับลักษณะที่ใช้งานและสภาพแวดล้อม



รูปที่ 3.14 ผลของการกระเจิงคอมพ์ตันทำให้จำนวนนับในช่องที่ต่ำกว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าพลังงานที่ลดลงในรูปลอการิทึม

สำหรับการวัดในสนาม ต้องการเพียงเปรียบเทียบ เพื่อหาปริมาณ สัมพันธ์อย่างคร่าว ๆ ไม่จำเป็นต้องแก้ไขข้อมูลก็ได้ แต่การวัดในห้องทดลอง ที่ต้องการวัดปริมาณอย่างละเอียด จึงมีความจำเป็นต้องรักษาระบบวัดให้ เหมือนกันทุกประการ

3.11.2 ค่าคงที่ความไว (Sensitivity Constant)

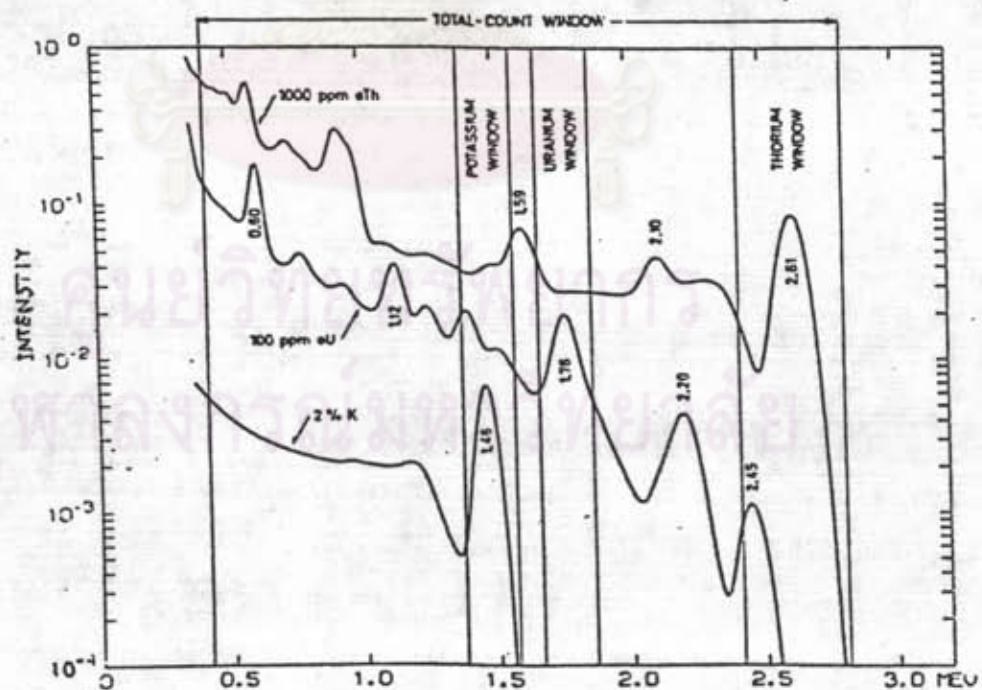
คืออัตราส่วนของจำนวนนับในช่องที่ถูกรบกวน ต่อ จำนวนนับเนื่องจากการรบกวน สมการที่ 3.10, 3.11 และ 3.12 แสดงการหาปริมาณ ยูเรเนียม ทอเรียม และ โพแทสเซียม

$$\text{Th(ppm)} = C_{\text{Th}} \{N_{\text{Th}} - b_{\text{Th}} - S_1(N_{\text{U}} - b_{\text{U}}) - S_2(N_{\text{CoE}} - b_{\text{CoE}})\} \dots (3.10)$$

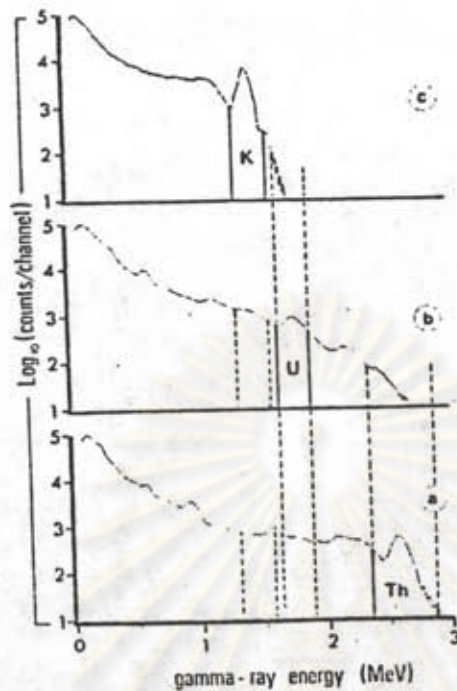
$$\text{U(ppm)} = C_{\text{U}} \{(N_{\text{U}} - b_{\text{U}} - S_3(N_{\text{Th}} - b_{\text{Th}}) - S_4(N_{\text{CoE}} - b_{\text{CoE}}))\} \dots (3.11)$$

$$\text{K(\%)} = C_{\text{K}} \{(N_{\text{K}} - b_{\text{K}} - S_5(N_{\text{Th}} - b_{\text{Th}}) - S_6(N_{\text{U}} - b_{\text{U}}) - S_7(N_{\text{CoE}} - b_{\text{CoE}}))\} \dots (3.12)$$

โดยที่ C_{Th} , C_{U} และ C_{K} คือ ค่าคงที่ความไว หรืออัตราส่วนความสมบูรณ์ ของไอโซโทปที่สลายตัว ต่อ จำนวนนับที่แก้ไขแล้ว สัมประสิทธิ์ S_n คือ อัตราส่วนหักลบคอมตัน b_{Th} , b_{U} , b_{K} และ b_{CoE} คือแบคกราวนด์ในช่องของทอเรียม ยูเรเนียม และโพแทสเซียม ตามลำดับ (ดูรูปที่ 3.15 และ 3.16 ประกอบ)



รูปที่ 3.15 สเปกตรัมของ ทอเรียม ยูเรเนียม และโพแทสเซียมที่ระดับพิวคิน โดยใช้หัววัด NaI(Tl) ขนาด 3"x3"



รูปที่ 3.16 สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากสารมาตรฐาน (a) ทอเรียม
(b) ยูเรเนียม (c) โพแทสเซียม

ค่าคงที่ความไว และ และอัตราส่วนหักลบ หาได้จากการทดลอง โดยควบคุมระบบให้เหมือนกันทุกประการ ดังนี้

- (1) จะต้องเป็นผลลิกที่รูปร่างเหมือนกัน และมีขนาดเท่ากัน
- (2) ใช้ได้กับหัววัด และต้นกำเนิดรังสี ที่มี geometry เหมือนกัน
- (3) อ่านค่า N_{Th} , N_U , N_x และ N_{Co60} เป็นค่าที่นับได้ต่อหน่วยเวลา ในช่องของ แทลเลียม-208 บิสมัท-214 โพแทสเซียม-40 และช่องของรังสีคอสมิก ปกติถือว่าช่องของรังสีคอสมิกอยู่สูงกว่าหน้าต่างของ แทลเลียม-208

จากสมการ 3.10 จะเห็นว่า S_x , N_U ใช้แก้ค่าจำนวนนับในช่องของ ทอเรียม ค่าที่ไปแก้ไม่ได้เป็นผลเนื่องจากการเบี่ยงเบนคอมน์ตัน แต่ใช้แก้เนื่องจากมีส่วนหางของ บิสมัท-214 ที่พลังงาน 2.43 และ 2.20 MeV แทรกอยู่ใน ช่องที่ค่อนข้างกว้างของ แทลเลียม-208 แต่เนื่องจากมีค่าน้อยมากจึงตัดทิ้งได้ ในกรณีที่ไม่ต้องการความละเอียดมากนัก

จากการสำรวจพบว่า สัญญาณจากพื้นผิวมีค่าแรงกว่า สัญญาณที่เกิดจากชั้นบรรยากาศ และ รังสีคอสมิก ดังนั้นค่าการรบกวนเนื่องจากรังสี

คอสติกจึงตัดทิ้งได้ สมการ 3.2, 3.3 และ 3.4 อาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$Th \text{ (ppm)} = C_{Th} (N_{Th} - b_{Th}) \quad \dots(3.13)$$

$$U \text{ (ppm)} = C_U (N_U - b_U - S_u (N_{Th} - b_{Th})) \quad \dots(3.14)$$

$$K \text{ (%) } = C_K \{ (N_K - b_K - S_e (N_{Th} - b_{Th})) - S_e (N_U - b_U - S_u (N_{Th} - b_{Th})) \} \quad \dots(3.15)$$

โดยที่อัตราส่วนหักลบคอมพัตัน คือ

$$S_u = \frac{n_u - b_u}{N_{Th} - b_{Th}} = \frac{\text{count in U channel dues to}}{\text{count in Th channel}}$$

$$S_e = \frac{n_k - b_k}{N_{Th} - b_{Th}} = \frac{\text{count in K channel dues to}}{\text{count in Th channel}}$$

$$S_e = \frac{n_k - b_k}{N_U - b_U} = \frac{\text{count in K channel dues to}}{\text{count in U channel}}$$

เมื่อ n_u และ n_k คือจำนวนนับในช่องของยูเรเนียมและโพแทสเซียม ที่เกิดจากการรบกวนเนื่องจากทอเรียมมาตรฐาน ส่วน n_k คือจำนวนนับในช่องของโพแทสเซียมที่เกิดจากการรบกวนเนื่องจากยูเรเนียมมาตรฐาน

ตารางที่ 3.8 แสดงค่าอัตราส่วนหักลบของหัววัดที่มี ผลึกขนาด 2"x2", 3"x3" และ 5"x5" อัตราส่วนของ S_u ของหัววัดขนาด 2"x2" และ 3"x3" จะเพิ่มขึ้นประมาณ 42 เปอร์เซ็นต์ การที่ค่า S_u ของผลึก 2"x2" มีค่ามากกว่า เพราะผลึก 2"x2" มีประสิทธิภาพน้อยกว่า ผลึก 3"x3"

ตารางที่ 3.8 ค่าคงที่ความไวและค่าหักลบคอมพ์ตันของหัววัด NaI(Tl)

NaI(Tl) Size	Sensitivity constant ppm/counts/min			Compton stripping ratio		
	C_{Th}	C_U	C_K	S_3	S_5	S_6
2 x 2 in (a)	0.63	0.16 ⁻	0.019	1.7	2.3	1.5
3 x 3 in (a)	0.14	0.036	0.0048	1.2	1.6	1.3
5 x 5 in (b)	1.43	0.36	0.039	0.51	0.81	1.03

(a) In situ analysis of outcrops

(b) Laboratory analysis of 230 grams material

ตารางที่ 3.9 ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

สิ่งที่วัด	จำนวนนับต่อนาที		
	Th (Tl-208)	U (Bi-214)	(K-40)
แบคกราวนด์ Th < 3 ppm U < 1 ppm K < 1 %	10	15	40
ทอเรียม Th = 150 ppm U < 1 ppm K < 1 %	800	245	400
ยูเรเนียม Th < 3 ppm U = 200 ppm K < 1 %	20	2200	1100
โพแทสเซียม Th < 3 ppm U < 1 ppm K = 7 %	15	20	4000

ค่าอัตราส่วนหักลบ หาได้จากสมการที่ 3.16, 3.17 และ 3.18 คือ

$$S_a = \frac{n_u - b_u}{N_{Th} - b_{Th}} = \frac{245 - 15}{800 - 10} = 0.29$$

$$S_b = \frac{n_k - b_k}{N_{Th} - b_{Th}} = \frac{400 - 40}{800 - 10} = 0.46$$

$$S_c = \frac{n_{k'} - b_{k'}}{N_u - b_u} = \frac{1100 - 40}{2200 - 15} = 0.49$$

ถ้าใช้สารมาตรฐาน 3 ตัว เราสามารถหาค่า S_a , S_b และ S_c ได้จากการวัดค่า N_{Th} , N_u , N_k , n_u , n_k , $n_{k'}$ และ b_k แล้วนำไปหาค่าในสมการ 3.13, 3.14 และ 3.15 เมื่อรู้ค่า S_a , S_b , S_c , $K(\%)$ U_{ppm} และ Th_{ppm} นำไปแทนค่าใน 3.13, 3.14 และ 3.15 จากนั้นสามารถคำนวณหาค่า C_u , C_k และ C_{Th} ได้จาก

$$C_{Th} = Th(ppm)/(N_{Th} - b_{Th}) = 150/790 = 0.19 \quad ppm/cps$$

$$C_u = U(ppm)/\{N_u - b_u - S_a(n_{Th} - b_{Th})\} = 200/2178 = 0.92 \quad ppm/cps$$

$$C_k = K(\%)/\{[N_k - b_k - S_b(N_{Th} - b_{Th}) - S_c(n_u - b_u - S_a(n_{Th} - b_{Th}))]\} \\ = 7/3943 = 0.0056 \quad \%/cps$$

จากค่าคงที่ต่าง ๆ นำไปหาค่าความเข้มข้นของยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมได้จากสมการ

$$Th(ppm) = \frac{(ppm \text{ Th in standard})(Net \text{ Area Th/Wt})_{sample}}{(Net \text{ Area Th/Wt})_{standard}}$$

$$U(ppm) = \frac{(ppm \text{ U in standard})(Net \text{ Area U/Wt})_{sample}}{(Net \text{ Area U/Wt})_{standard}}$$

$$K(\%) = \frac{(\% \text{ K in standard})(Net \text{ Area K/Wt})_{sample}}{(Net \text{ Area K/Wt})_{standard}}$$