

บทที่ 2

กัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม

2.1 แหล่งกำเนิดของกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม

ในสิ่งแวดล้อมทุกแห่งมีกัมมันตภาพรังสีซึ่งสิ่งมีชีวิตได้รับอยู่ตลอดเวลา ระดับกัมมันตภาพรังสีนี้โดยทั่วไปถือว่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัย ดังเราจะเห็นจากการวัดรังสีชนิดต่างๆ ด้วยเครื่องวัดรังสี จะพบค่าๆหนึ่งที่เรียกว่า “ แบนคกราวด์ (background) ” ของเครื่องวัดรังสีประเภทนั้นๆ ซึ่งได้มาจากปริมาณกัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ และ กัมมันตภาพรังสีเหล่านั้นจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามกิจกรรมของมนุษย์ จึงสามารถกล่าวได้ว่า กัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อมมีแหล่งที่มาสำคัญ จาก 2 แหล่งได้แก่ กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ และกัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์ผลิตขึ้น

2.1.1 แหล่งกัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ (Natural radiation sources)

แหล่งกัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็น 3 แหล่งใหญ่ๆดังนี้

2.1.1.1 รังสีคอสมิก

รังสีคอสมิก (Cosmic radiation) ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ[13]คือ

2.1.1.1.1 รังสีคอสมิกปฐมภูมิ (Primary cosmic rays) คือ รังสีคอสมิกที่อยู่เหนือชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก โดยส่วนหนึ่งมีแหล่งกำเนิดจากนอกระบบสุริยะจักรวาล และอีกส่วนหนึ่งเกิดบนผิวของดวงอาทิตย์ รังสีคอสมิกจะประกอบด้วย โปรตอน 87 % อนุภาค

อัลฟา 11 % นิวเคลียสหนัก (heavy nuclei) 1 % อิเล็กตรอน 1 % โดยรังสีคอสมิกปฐมภูมิจะมีพลังงานในช่วง $10^8 - 10^{20}$ อิเล็กตรอนโวลต์(eV) ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าอยู่ที่ประมาณ $10^8 - 10^{11}$ เมื่อรังสีคอสมิกปฐมภูมิวิ่งเข้ามาถึงชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกส่วนใหญ่จะเกิดอันตรกิริยากับชั้นบรรยากาศในระยะ 200-300 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรแรก เกิดเป็นรังสีคอสมิกทุติยภูมิ (Secondary cosmic rays) รังสีคอสมิกปฐมภูมิส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนไว้หมดในระยะ 1/10 แรกของชั้นบรรยากาศ

2.1.1.1.2 รังสีคอสมิกทุติยภูมิ คือ รังสีคอสมิกที่เกิดจากรังสีคอสมิกปฐมภูมิเกิดอันตรกิริยากับชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก ซึ่งประกอบด้วย นิวตรอน โปรตอน และ อิเล็กตรอน,.. ปริมาณรังสีจากรังสีคอสมิก จะขึ้นอยู่กับระดับความสูง (altitude) เช่น ที่ เส้นศูนย์สูตร ณ ระดับน้ำทะเล มีค่ากัมมันตภาพรังสีเท่ากับ 23 มิลลิเรมต่อปี แต่ถ้าสูงขึ้นไปอีกที่ระดับ 1000 ฟุต มีค่าเท่ากับ 56 มิลลิเรมต่อปี นอกจากนี้อนุภาคนิวตรอนในรังสีคอสมิก จะเกิดอันตรกิริยากับไนโตรเจนในชั้นบรรยากาศตอนบน(upper atmosphere)ทำให้เกิดคาร์บอน-14 ($^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ มีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 5730 ปี) ซึ่งจะกระจายสู่ชั้นบรรยากาศด้านล่าง (lower atmosphere) และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ จะได้รับเข้าสู่ร่างกายต่อไป

2.1.1.2 กัมมันตรังสีที่ปะปนอยู่ที่ผิวโลก

มีธาตุจำนวน 340 ธาตุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติบนผิวโลก และในจำนวนนั้น 70 ธาตุเป็นธาตุกัมมันตรังสี และสามารถแบ่งธาตุกัมมันตรังสีเหล่านี้ได้เป็น 2 พวกตามลักษณะการเกิด คือ 1. ธาตุกัมมันตรังสีที่มีมาพร้อมการเกิดโลก เรียกว่า ธาตุกัมมันตรังสีดั้งเดิม (primordial radionuclides) (ดังแสดงในตารางที่ 2.1) จะเป็นพวกที่มีค่าครึ่งชีวิตยาวมาก ตัวอย่างของธาตุในกลุ่มนี้ได้แก่ U-238($T_{1/2} = 4.5 \times 10^9$ ปี) , U-235($T_{1/2} = 7.1 \times 10^8$ ปี) , Th-232($T_{1/2} = 1.4 \times 10^{10}$ ปี) , Rb-87($T_{1/2} = 4.8 \times 10^{10}$ ปี) , K-40($T_{1/2} = 1.3 \times 10^9$ ปี) 2. ธาตุ(ดังแสดงในรูปที่ 2.2)

กัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิก (cosmogenic radionuclides) (ดังแสดงในตารางที่ 2.3)
 ซึ่งเกิดขึ้นสืบเนื่องมาจากปฏิกิริยาของรังสีคอสมิก เช่น ทริเทียม(H-3) เบริลเลียม-7(Be-7)
 ฟอสฟอรัส-32 (P-32) ซิลิกอน-32(Si-32) อาร์กอน-37(Ar-37) ซัลเฟอร์-35(S-35)
 แต่ตัวที่สำคัญที่สุดในการบ่งบอกปริมาณของรังสีคือ ^{14}C (มีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 5730 ปี)

⇒ ลำดับการสลายตัวให้รังสี[6] (Radioactive Decay Sequence) ของธาตุหลักในพื้นผิวโลก

- โปแตสเซียม รูปแบบการสลายตัวของโปแตสเซียม-40 (แสดงไว้ในตารางที่ 2.4) จะเห็นได้ว่าโปแตสเซียม-40 เท่านั้นที่เป็นไอโซโทปรังสี ซึ่งมีในธรรมชาติเพียง 0.0119 % ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีนัยสำคัญน้อยมาก จึงถือได้ว่ากัมมันตรังสีของโปแตสเซียมในธรรมชาติมีค่าคงที่ เนื่องจากโปแตสเซียม-40 สลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงานเดียวคือ 1.46 MeV โดยความแรงรังสีจำเพาะ (specific activity, A_s) คำนวณได้จากสมการ

$$A_s = \frac{a \times N_A \times 0.0119}{40 \times T_{1/2}} \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ a = % abundance ของโปแตสเซียมในสารตัวอย่าง

N_A = เลขอาโวกาโด (Avogadro number) = 6.02×10^{23} โมเลกุล/โมล

$T_{1/2}$ = ค่าครึ่งชีวิต (half life) ของโปแตสเซียม-40 = 4.09968×10^{16} วินาที

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

หรือ A_s ของ K-40 = 3.3 Bq**

- อนุกรมยูเรเนียม

ยูเรเนียมในธรรมชาติมี 3 ไอโซโทป คือ ^{238}U มี 99.274 % ^{235}U มี 0.721 % และ ^{234}U มี 0.0056 % โดยทั้ง 3 ไอโซโทป ต่างเป็นไอโซโทปรังสี แต่เนื่องจาก ^{235}U และ ^{234}U มีปริมาณ

* คือ จำนวนแกมมาต่อการสลายตัว 100 ครั้ง

** คือ ย่อมาจาก Becquerel หมายถึง จำนวนครั้งที่สลายตัวต่อวินาที

น้อยมาก ดังนั้นจึงถือได้ว่า กัมมันตรังสีจากยูเรเนียมเกิดจาก ^{238}U เพียง ไอโซโทปเดียว การสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม(^{238}U) ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5(ก)-(ง) จากรูปจะเห็นว่าอนุกรมยูเรเนียม(^{238}U) สลายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยให้อนุภาคแอลฟา 11 อนุภาค เบตา 10 อนุภาค และรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆอีกหลายตัว จนถึงตัวสุดท้าย คือ ^{206}Pb ซึ่งจะไม่สลายตัวอีกต่อไป ยูเรเนียมกับผลผลิตจากการสลายตัว (decay products) ของยูเรเนียม มีกัมมันตรังสีสูงกว่าของโพแทสเซียมมาก คือมีประมาณ $12.230 = 0.027 \text{ Bq}$ ต่อมิลลิกรัม ของยูเรเนียมทั้งหมด 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 แล้วกลายเป็นพอโลเนียม (^{218}Po)

- อนุกรมทอเรียม

ทอเรียม-232 เป็น ไอโซโทป ที่สำคัญที่สุดของทอเรียมที่เกิดในธรรมชาติ และมีความคล้ายคลึงกับยูเรเนียม คือมีการสลายตัวแบบลูกโซ่หลายขั้นตอน ในที่สุดจะสลายตัวเป็น ตะกั่ว-208 ซึ่งเสถียร (กรณาดูรูปที่ 2.6 (ก) (ข) และ 2.6 (ค) และ(ง)) จากรูป จะเห็นว่านิวไคลด์ตัวที่ให้อัตราการสลายตัวสูงสุด คือ แทลเลียม-208 หรือ นิวไคลด์ตัวที่ 9 ของอนุกรม ผลรวมของครึ่งชีวิตทั้งหมดจนถึง แทลเลียม-208 มีค่าประมาณ 8 ปี โดยมีค่ากัมมันตรังสีจำเพาะเท่ากับ 4.1 เบคเคอเรล ต่อ มิลลิกรัมของทอเรียมทั้งหมด

⇒ สภาพสมดุลของอนุกรมการสลายตัวให้รังสี(Equilibrium in Radioactive Decay Series)

การสลายตัวให้รังสีของอนุกรมยูเรเนียม และ ทอเรียม จะต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งจึงจะอยู่ในสภาพสมดุล หรือสภาพที่อัตราการสลายตัวของนิวไคลด์ใดๆ ที่อยู่ระหว่างนิวไคลด์ตัวแรกและตัวสุดท้าย มีค่าเท่ากับ อัตราการเกิด ดังนั้นในสภาวะสมดุลนิวไคลด์ตัวที่มีครึ่งชีวิตยาว จะมี

ความสมบูรณ์มากกว่าตัวที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น อนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม และ ทอเรียม มีหลายเฟส โดยเฉพาะยูเรเนียมมีเฟสต่างกันหลายตัว แต่ละตัวมีคุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน นิวไคลด์ตัวใดตัวหนึ่งในอนุกรมจะอยู่ในสภาพที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงเกิดสภาพไม่สมดุลย์ในอนุกรมการสลายตัว ซึ่งมีผลทำให้ ๓ ตำแหน่งใด ๆ จำนวนนิวไคลด์ตัวกลางและตัวสุดท้าย ไม่เป็นไปตามอัตราส่วนที่ได้คำนวณไว้ โดยกฎการสลายตัวในสภาวะนี้การวัดค่าปริมาณของธาตุ พ่อ-แม่ จะไม่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามระดับของการไม่สมดุลย์จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น สภาพความเป็นแร่ของธาตุรังสีและของสิ่งแวดล้อม การปรากฏร่วมกันกับ ซัลไฟด์ หรือ คาร์บอเนต นอกจากนี้ ระดับของความไม่สมบูรณ์ยังขึ้นกับสภาพของสิ่งแวดล้อม คือ สภาพภูมิประเทศ การเคลื่อนย้ายของน้ำใต้ดิน ปริมาตรของสารตัวอย่างที่สนใจ ปริมาณของตัวอย่างที่เก็บจำนวนน้อย มีโอกาสอยู่ในสภาพไม่สมดุลย์ได้สูงกว่าตัวอย่างที่เก็บจำนวนมาก การหา ระดับของความไม่สมดุลย์ในสนามทำได้ยากมาก แต่สามารถหาได้ไม่ยากนักจากในห้องทดลอง ซึ่งอาจทำได้โดยการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน หรือโดยการวัดกัมมันตรังสีของนิวไคลด์ต่าง ๆ ในอนุกรม จากการทดลองพบว่า ตัวอย่างที่เก็บมาจากในภาคสนามส่วนมากจะไม่อยู่ในสภาพสมดุลย์ การเกิดสภาพสมดุลย์ของนิวไคลด์ตัวใด จะต้องใช้เวลาประมาณ 3-4 เท่า ของผลรวมค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ทั้งหมดที่เกิดก่อน แต่ไม่รวมค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ตัวแรก ทั้งนี้เพราะนิวไคลด์ตัวแรกมีค่าครึ่งชีวิตยาวมาก จึงถือว่ามีจำนวนอะตอม ๓ ขณะใด ๆ เท่ากับจำนวนอะตอมเริ่มต้น ดังนั้น ยูเรเนียม-238 จะอยู่ในสภาพสมดุลย์ของนิวไคลด์ตัวใดในอนุกรม จึงสามารถคำนวณได้จาก 3-5 เท่าของครึ่งชีวิตสะสมจนถึงนิวไคลด์ตัวนั้น เช่น บิสมัท-214 มี ครึ่งชีวิตสะสม 300000 ปี 3 เท่า ของครึ่งชีวิตมีค่าประมาณ หนึ่งล้านปี ส่วน แทลเลียม-208 มีค่าครึ่งชีวิตสะสม 8 ปี 5เท่าของครึ่งชีวิตมีค่าประมาณ 40 ปี ถ้าระบบการสลายตัวอยู่ในสมดุลย์ เราสามารถคำนวณหาปริมาณของนิวไคลด์พ่อ-แม่ ได้จากปริมาณของ

นิวไคลด์ลูกแต่ละตัว โดยใช้สมการ

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_n N_n \dots \dots \dots (2.2)$$

เมื่อ N_n คือ จำนวนอะตอมของนิวไคลด์ตัวที่ n

การคำนวณหาปริมาณนิวไคลด์ของ ยูเรเนียม-238 จากปริมาณ บิสมัท-214 ที่พลังงาน 1.76 MeV ก็ใช้หลักการนี้ และในทำนองเดียวกันการวัดปริมาณ แพลเลียม-208 ที่พลังงาน 2.62 MeV สามารถหาปริมาณทอเรียมได้โดยวิธีนี้เช่นกัน

2.1.2 กัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์ผลิตขึ้น และจากกิจกรรมของมนุษย์ (Man-made sources)
(ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.7 ก-ข)

ได้แก่การดำเนินงานในด้านการใช้เทคโนโลยีต่างๆ ที่ทำให้เกิดการกระจายของรังสีไปสู่สิ่งแวดล้อมทั่วไป ตัวอย่างของการดำเนินงานเหล่านั้น ได้แก่ การทดลองอาวุธนิวเคลียร์ซึ่ง จะเกิดธาตุกัมมันตรังสีที่สำคัญต่อมนุษย์ เช่น สตรอนเชียม-90 (Sr-90) ซีเซียม-137 (Cs-137) สารกัมมันตรังสีที่เกิดจากทดลองอาวุธนิวเคลียร์นี้ อาจถูกส่งขึ้นไปสูงถึง 40,000-60,000 ฟุต (ชั้นบรรยากาศ โทรโปสเฟียร์ (troposphere)) และอาจถูกพัดพาไปไกลได้ทั่วโลก การผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยานิวเคลียร์ กากของกัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีส่วนในการเพิ่มปริมาณรังสีในธรรมชาติ ในปัจจุบันพบว่าปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกากของกัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ มีปริมาณเพียง 0.2 มิลลิเรม ต่อ ปี การใช้รังสีในทางการแพทย์ เช่น ในการวินิจฉัยโรค พบว่า 75-90 % ของผู้ที่รับรังสีจากการแพทย์มาจากการใช้รังสีเอ็กซ์ (X-rays) นอกจากนี้ยังมีใช้ในการรักษาโรค เช่น การใช้รังสีแกมมาจากธาตุกัมมันตรังสีในการยับยั้งโรคมะเร็ง การใช้ในงานทางนิวเคลียร์การแพทย์ เช่น การใช้ ไอโอดีน-131 (I-131) รักษาไทรอยด์ เทคนิเชียม-99เอ็ม (Tc-99m) หาสมมติฐานของโรคเป็นต้น การก่อสร้างอาคาร โดยเฉพาะที่ใช้ หินแกรนิต ซีเมนต์ และ คอนกรีต ซึ่งมีธาตุในอนุกรม

ยูเรเนียม ทอเรียม และ ธาตุโปแตสเซียมเป็นองค์ประกอบ อันทำให้เกิดการกระจายของก๊าส เรดอนสู่ผู้อาศัยได้ การสูบบุหรี่ก็อาจทำให้มีการกระจายของรังสีไปสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากต้นใบยาสูบอาจได้รับ ตะกั่ว-210 จากอากาศจึงอาจพบว่าในบุหรี่ 1 ซองมี ตะกั่ว-210 (Pb-210) และ นิโวลด์ลูกของมันคือ พอลอเนียม-210 (Po-210) ในปริมาณ 10-20 พิโคคูรี การเดินทางทางอากาศพบว่ามีความอันตรายจากปริมาณรังสีคอสมิกที่สูงกว่าพื้นราบ

2.2 การวัดรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อม (Environmental Gamma-Rays Measurement)

การวัดรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อมสามารถแบ่งได้เป็น การวัดรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Gamma-Rays Measurements) และ การวัดรังสีแกมมาในพื้นที่จริง (In-Situ Gamma-Rays Measurements) โดยหลักการแล้วการวัดปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อมนั้น มาจากการวัดจากกลุ่มตัวอย่าง นั่นคือเมื่อทำการวัดเมื่อใด กลุ่มตัวอย่างที่ถูกวัดนั้นก็จะเป็นตัวแทนของสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ ณ ขณะนั้น

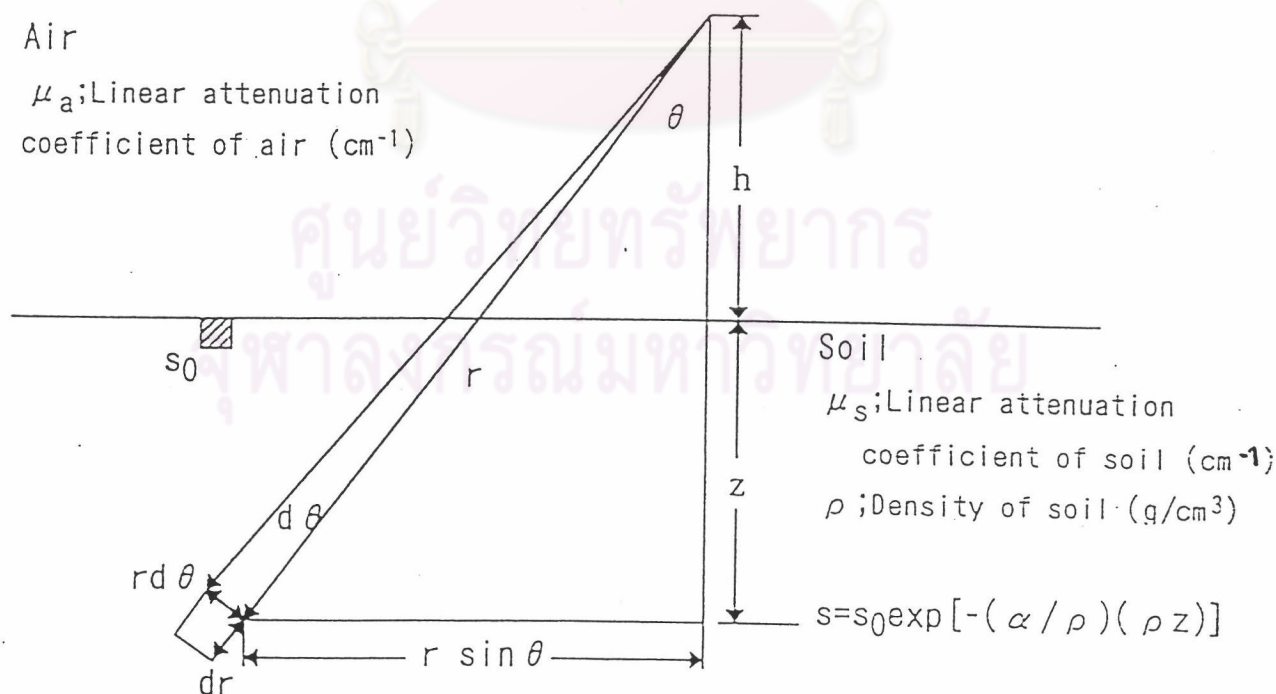
2.2.1 การวัดปริมาณรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ

การวัดปริมาณรังสีแกมมาของตัวอย่าง ของสิ่งแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ ในช่วงเวลาที่กำหนดเป็นวิธีที่ ง่าย และ เพราะเป็นงานสั้น ๆ พื้นที่เล็ก ๆ และการวัดอยู่ภายใต้การควบคุมของสภาวะในห้องปฏิบัติการ การเปรียบเทียบตัวอย่างของสิ่งแวดล้อมกับสารมาตรฐานทำได้ง่าย เพราะมีระบบการวัดที่เหมือนกันจึงสามารถเปรียบเทียบกันได้เลยโดยตรง ส่วนเรื่องของการเตรียมตัวอย่าง (sample preparation) นั้นโดยปกติตัวอย่างที่จะนำมาวัด จะต้องมีการเตรียมเพื่อให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการวัด ถ้าตัวอย่างอยู่ในรูปของแข็ง จะต้องเตรียมตัวอย่างให้มีรูปลักษณะเดียวกัน เช่น มีขนาดเดียวกัน มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ มีผิวหน้าเรียบ มีความหนาใกล้เคียงกันโดยต้องไม่หนากว่าความหนาวิกฤต และในขณะเดียวกันตัวอย่างจะต้องนำกลับมาใช้ได้อีก สำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็งและต้องการวัดรังสีแกมมา ปกติจะวัดโดยตรง ซึ่งอาจมีการเตรียมตัวอย่างล่วงหน้าเพียงเล็กน้อย เตรียมตัวอย่างให้มีขนาดพอเหมาะกับหัววัด

ส่วนภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างนั้นจะต้องทำด้วยสารที่มีเลขอะตอมต่ำๆ เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับเข้าไปในหัววัดอีก เพราะรังสีที่สะท้อนกลับอาจจะไปรบกวนพีคที่พลังงานต่ำกว่า ดังจะกล่าวได้ว่า ในการวัดตัวอย่างเพื่อให้เป็นบรรลุตามวัตถุประสงค์มากที่สุด นั้นมีหลักการต่างๆไปที่ต้องคำนึงถึงคือ (1) ชนิดของหัววัด (2) กัมมันตรังสีของตัวอย่าง (3) จำนวนตัวอย่างที่จะวัด (4) เวลาที่ใช้วัด (5) ความยากง่ายในการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางเคมี หรือทางกายภาพของตัวอย่าง

2.2.2 การวัดปริมาณรังสีแกมมาในพื้นที่จริง [1]

สิ่งสำคัญประการหนึ่ง ที่ควรทราบก่อนการวัดรังสีในสิ่งแวดล้อมจากพื้นที่จริง ก็คือลักษณะหรือรูปแบบการกระจายของฟลักซ์ของรังสีแกมมาจากธาตุกัมมันตรังสีที่พื้นดิน กับมุมใด ๆ ที่สัมพันธ์กันกับหัววัดรังสี ที่ความสูง h ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



จะเห็นว่า ความแรงรังสีจากพื้นดินที่มุมที่เป็นแนวแกนของหัววัดรังสี (หรือมุมฉากกับระนาบของพื้นดิน) สามารถคำนวณได้จาก

$$S = S_0 \exp[-(\mu/\rho)(\rho z)] \dots \dots \dots (2.3)$$

โดยที่ θ = มุมระหว่างหัววัดรังสี กับ ภาตุดกัมมันตรังสีในดิน

ρ = ความหนาแน่นของดิน หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

h = ระยะห่างจาก หัววัดจนถึงผิวดิน หน่วยคือ เซนติเมตร

r = ระยะห่างจากหัววัดจนถึงภาตุดกัมมันตรังสีนั้นใด ๆ ในดิน

S_0 = ความแรงรังสีที่ผิวดิน หน่วยคือ โฟตอน/วินาที-ลูกบาศก์เซนติเมตร

α = relaxation length ระหว่างกันของการกระจายรังสีแบบเอกโปเนนเชียลกับความลึก หน่วยคือ เซนติเมตร-1

z = ความลึกจากผิวดินจนถึงภาตุดกัมมันตรังสีใด ๆ ในดิน หน่วยคือ เซนติเมตร

μ_s, μ_a = สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีแกมมาใน ดิน, อากาศ หน่วยคือ เซนติเมตร-1

ซึ่งอาศัยหลักการนี้เราสามารถจำแนก ความแตกต่างของการคำนวณไปตามลักษณะ เหตุการณ์ และ ตำแหน่งการจัดวางตัวของภาตุดกัมมันตรังสี ซึ่งอาจแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ[2]ดังนี้คือ

◆ การกระจายแบบปกคลุมพื้นผิวดิน (Infinite plane source) ตัวอย่างก็คือ

นิวไคลด์ทั้งหลายที่พบในกรณีของการเกิดอุบัติเหตุทางรังสีของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ หรือ จากการทดลอง หรือ ใช้อาวุธนิวเคลียร์ เช่น ซีเชียม-137 สตรอนเซียม-90 ฯลฯ

$$\text{เมื่อ } \frac{\alpha}{\rho} = \infty$$

$$\phi = (S_A/2)_0 \int_0^{\pi/2} \tan \theta \exp(-\mu_s h / \cos \theta) d\theta = (S_A/2) E_1(\mu_s h)$$

$$\frac{d\phi}{d\theta} = (S_A/2) \tan \theta \exp(-\mu_s h / \cos \theta) \dots \dots \dots (2.4)$$

S_A คือ ความแรงรังสีในดินต่อหน่วยพื้นที่ (photon/cm² sec)

- ◆ การกระจายแบบ เอกโปเนนเชียล กับความลึก (Exponentially distributed source with depth) ตัวอย่างเช่น กัมมันตรังสีชนิดเดียวกับที่แผ่ปกคลุมพื้นผิวดิน แต่เนื่องจากระยะเวลาที่ยาวนานกว่าจึงมีการกระจายลงสู่ใต้พื้นดิน

$$\begin{aligned}\phi &= \iint \frac{S_0}{4\pi r^2} \exp[-(\alpha/\rho)(\rho z)] \exp(-\mu_s z / \cos \theta) \exp(\mu_a h / \cos \theta) 2\pi r \sin \theta dr d\theta \\ &= \frac{S_0}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\frac{h}{\cos \theta}}^{\infty} \exp[-\{\alpha/\rho\}\rho z + (\mu_s / \cos \theta)z] \exp(\mu_a h / \cos \theta) \sin \theta dr d\theta \\ \frac{d\phi}{d\theta} &= \frac{S_0 \sin \theta}{2\rho(\alpha/\rho) \cos \theta + (-\mu_s / \rho)} \exp(-\mu_a h / \cos \theta) \dots \dots \dots (2.5)\end{aligned}$$

- ◆ การกระจายอย่างสม่ำเสมอกับความลึก (Uniformly distributed source with depth) ตัวอย่าง โปแตสเซียม-40 อนุกรมยูเรเนียม อนุกรมทอเรียม เป็นธาตุกัมมันตรังสีที่พบในพื้นดินในธรรมชาติทั่วไป

$$\text{เมื่อ } \frac{\alpha}{\rho} = 0$$

$$\begin{aligned}\phi &= \left(\frac{S_0}{\rho} \right) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\frac{2\mu_s}{\rho} \right] \exp(-\mu_a h / \cos \theta) \sin \theta d\theta \\ \frac{d\phi}{d\theta} &= \frac{(S_0 / \rho) \sin \theta}{2(\mu_s / \rho)} \exp(-\mu_a h / \cos \theta) \dots \dots \dots (2.6)\end{aligned}$$

แต่การวัดรังสีในสถานที่จริงนั้นมีหลักปฏิบัติที่แตกต่างกับการวัดรังสีสิ่งแวดล้อมจากห้องปฏิบัติการมาก กล่าวคือลักษณะของตัวอย่างก็คือพื้นที่จริงที่มีขนาดใหญ่และมีปริมาณมากกว่ามาก รวมถึงมีธาตุกัมมันตรังสีที่หลากหลาย และมีรังสีที่มีพลังงานมากมายซับซ้อน อีกทั้งการเข้าสู่หัววัดรังสีของกัมมันตภาพรังสีเป็นไปในรูปแบบอิสระทุกทิศทางยากต่อการควบคุมการที่จะบ่งบอกความถูกต้องของระดับรังสีที่วัดได้จริง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการ

เปรียบเทียบห้วงวัดให้เที่ยงตรง แม่นยำ และ น่าเชื่อถือ เสียก่อนการออกไปปฏิบัติการวัดรังสีในพื้นที่จริง

2.2.2.1 การเปรียบเทียบห้วงวัดรังสี[8]

สิ่งสำคัญที่สุดในการวัดฟลักซ์ของรังสีแกมมา คือ ห้วงวัดรังสีที่ได้รับการเปรียบเทียบมาอย่างเที่ยงตรงทั้งในแง่ของพลังงาน ($\frac{N_0}{\phi}$) และในแง่ของความสัมพันธ์กับมุมที่ฟลักซ์ตกกระทบห้วงวัด

$$\left(\frac{N_f}{N_0}\right)$$

♣ การเปรียบเทียบห้วงวัดรังสีที่สัมพันธ์กับพลังงาน ($\frac{N_0}{\phi}$)

ทำการเปรียบเทียบนี้ (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) เพื่อทราบความสัมพันธ์ของห้วงวัดรังสีกับฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่พลังงานใดๆ ในรูปแบบของประสิทธิภาพสมบูรณ์ของห้วงวัด อาศัยข้อมูลจากการวัดรังสีในระบบวัดที่เหมือนจริงทุกประการโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานหลายชนิดที่คาดว่าสามารถครอบคลุมกับพลังงานของรังสีที่มีอยู่จริงในสิ่งแวดล้อมที่สามารถพบได้ นำผลที่วัดได้มาเขียนเส้นโค้งหาความสัมพันธ์ของพลังงานกับอัตราการนับวัดรังสี ซึ่งสามารถนำค่าสมการที่ได้จากเส้นโค้งของการเปรียบเทียบที่พลังงานต่างๆ มาคำนวณหาค่าประมาณอัตราการนับวัดรังสีที่พลังงานอื่นๆ นอกเหนือจากที่มีในต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบ เพื่อประโยชน์ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของห้วงวัดรังสี ณ พลังงานต่างๆ นั่นคือเพื่อคำนวณหาปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อมที่มีความหลากหลายและซับซ้อนมากขึ้นได้ ซึ่งรูปแบบการคำนวณที่สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{N_0}{\phi} = \frac{\text{Peak net counts} \cdot 4\pi^2(\text{cm}^2)}{[\text{Lt}(\text{sec}) \cdot A(\mu\text{Ci}) \cdot G(\text{Gamma} / \text{dis}) \cdot (3.7 \times 10^4) \cdot (\text{dis} / \text{sec})]} \dots(2.7)$$

♣ การเปรียบเทียบห้วงวัดรังสีที่สัมพันธ์กับมุมที่ฟลักซ์ตกกระทบห้วงวัด($\frac{N_f}{N_0}$)

ทำการเปรียบเทียบชนิดนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ของทิศทางที่มุมต่างๆที่มีผลต่อปริมาณของฟลักซ์ของแกมมาที่ตกกระทบหัววัด ทำโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานดังที่กล่าวมาแล้ว มาวัดฟลักซ์ของแกมมาในแต่ละมุมตั้งแต่ 0-90 องศา (รูปเครื่องทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ประกอบ) ทีละ 10 องศา ที่ระยะห่างเท่า ๆ กันจากหัววัด เพราะฟลักซ์ของรังสีแกมมา จากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน ไม่ได้จำกัดอยู่ที่ในแนวแกนเดียวเท่านั้น ความหนาแน่นของฟลักซ์ยังกระจายเข้าสู่หัววัดเป็นรูปครึ่งวงกลมในอากาศเหนือพื้นดิน ดังนั้นค่า N_f/N_0 จึงจำเป็นต้องได้รับการคำนวณเพื่อเป็นค่าแก้ สำหรับการวัดรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อมในพื้นที่จริงต่อไป

$$\frac{N_f}{N_0} = \int_0^{\pi/2} \frac{\phi(\theta)}{\phi} \times \frac{N(\theta)}{\phi} \times \frac{N(\theta)}{N_0} \dots \dots \dots (2.8)$$

$\frac{\phi}{I}$ คือ ฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่มุมใด ๆ ต่อฟลักซ์ทั้งหมดของรังสีแกมมานั้น

$\frac{N(\theta)}{N}$ คือ อัตรานับวัดในพีคของรังสีแกมมาพลังงานใด ๆ ที่มุมใด ๆ ต่ออัตราการปลด

ปล่อยของรังสีแกมมา (Gamma emission rate) พลังงานนั้น

นอกจากนี้อัตราปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนในอากาศ (Exposure Rate) เหนือพื้นดินนั้น ยังมีความสัมพันธ์กับ ค่าจำนวนนับของอัตราการดูดกลืนในพีคของพลังงาน (Absorption Peak Counting Rate) ที่สามารถวัดได้โดยหัววัดรังสี โดยที่

$$\frac{N_f}{I} = \frac{N_0}{\phi} \times \frac{N_f}{N_0} \times \frac{\phi}{I} \dots \dots \dots (2.9)$$

เมื่อ $\frac{N_0}{\phi}$ คือ อัตรานับจากพีคของโพตอนพลังงานใด ๆ ที่ตกกระทบหัววัดในสเปกตรัม ณ

ตำแหน่งที่หัววัดรังสีและต้นกำเนิดรังสีอยู่ในแนวเดียวกัน

$\frac{N_f}{N_0}$ คือ ค่าสำหรับแก้การนับรังสีในหัววัดที่มีผลมาจากมุมต่าง ๆ

$\frac{\phi}{I}$ คือ ความหนาแน่นของโฟตอนฟลักซ์ที่หัววัดอันเกิดจากโฟตอนพลังงานใด ๆ ในสเปกตรัม
ต่อหน่วยของปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนในอากาศ จากทุก ๆ โฟตอนที่เกิดจากทุก ๆ ธาตุ
กัมมันตรังสีและอนุกรม

ซึ่ง $\frac{N_0}{\phi}$ และ $\frac{N_f}{N_0}$ แปรผันกับในส่วนของหัววัดรังสี มีเพียง $\frac{\phi}{I}$ ที่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ
ของต้นกำเนิดรังสี และ การจัดวางตำแหน่ง ในทำนองเดียวกันการหาค่าความเข้มข้นของธาตุ
กัมมันตรังสีแต่ละชนิดก็มีความสัมพันธ์กับ ค่าจำนวนนับของอัตราการดูดกลืนในพีค ของ
พลังงาน (Absorption Peak Counting Rate) โดย

$$\frac{N_f}{s} = \frac{N_0}{\phi} \times \frac{N_f}{N_0} \times \frac{\phi}{s} \dots \dots \dots (2.10)$$

$\frac{\phi}{S}$ คือ ความหนาแน่นของโฟตอนฟลักซ์ทั้งหมด ที่ตำแหน่งของหัววัด ต่อหน่วย
ความเข้มข้นรังสีของเรดิโอไอโซโทป และอนุกรม

* ประสิทธิภาพของการนับรังสี (Counting Efficiency)

ประสิทธิภาพของการนับรังสี เป็นตัวที่สามารถบ่งบอกให้ทราบว่า หัววัดมีความ
สามารถในการวัดรังสีได้ดีเพียงใด ค่าประสิทธิภาพอาจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่คือ

♣ ประสิทธิภาพสมบูรณ์ของการวัด (Absolute Efficiency) ซึ่งจะเท่ากับ จำนวนสัญญาณที่
นับได้ต่อ จำนวนรังสีที่ปล่อยออกมาจากต้นกำเนิด

$$= \frac{\text{Peak net counts}}{[\text{Lt}(\text{sec}).A(\mu\text{Ci}).G(\text{Gamma} / \text{dis}).(3.7 \times 10^4).(\text{dis} / \text{sec})]} \dots \dots (2.11)$$

A : ความแรงรังสีของ point source

Lt : ระยะเวลาในการนับวัด

G : จำนวนของแกมมาต่อการสลายตัวใน 1 ครั้ง

ค่าประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของการวัด นี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหัววัดรังสี และรายละเอียด ลักษณะการจัดวางต้นกำเนิดกับหัววัด (Counting Geometry) ซึ่งได้แก่รูปร่างของต้นกำเนิด และระยะทางระหว่างหัววัดกับต้นกำเนิด

- ♣ ประสิทธิภาพแบบอินทรินสิก (Intrinsic Efficiency) ซึ่งจะเท่ากับ จำนวนสัญญาณที่นับได้ต่อ จำนวนรังสีที่ตกกระทบหัววัด ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหัววัดรังสีเพียงอย่างเดียว

ในทางปฏิบัติแล้วนิยมใช้ค่า ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของการวัด (Absolute Efficiency) มากกว่า เพราะสามารถทำได้สะดวกกว่า

2.2.2.2 การเลือกสถานที่

การเลือกสถานที่จะต้องเลือกสถานที่ที่มีพื้นดินที่เรียบ และเป็นสถานที่เปิด ไม่มีการกีดขวางของสิ่งใด ๆ ที่จะสามารถมีผลใน การกั้นขวางแนวของแกมมาฟลักซ์ จากพื้นดินอันจะมีผลให้ค่าที่วัดได้ไม่ตรงกับ ความเป็นจริง เช่นก้อนหินขนาดใหญ่ ต้นไม้ยืนต้น หรือสิ่งก่อสร้างใด ๆ ในรัศมี 10 เมตร นอกจากนี้ความขรุขระของพื้นดินเป็นสิ่งที่ไม่อาจมองข้ามได้ และจะยิ่งมีผลต่อการวัดมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างหัววัดและพื้นดินน้อยลง ตัวอย่างความสัมพันธ์ของฟลักซ์ที่มีผลต่อพื้นดินจากการวัดที่ระดับความสูง 1 เมตร ในกรณีของรังสีที่มีพลังงานระดับกลาง(662 keV) กับเส้นที่แสดงถึงกระจายในดิน (ดังแสดงดังรูปที่ 2.6) ในการวัดกรณีที่มีการรั่วไหลของกัมมันตรังสีจากแหล่งที่มีกิจกรรมทางรังสีใด ๆ นั้น พื้นที่ที่ถูกเลือกจะต้องไม่ถูกรบกวนโดยน้ำ หรือ ลม รวมไปถึงกิจกรรมของมนุษย์ อย่างเช่น การเพาะปลูก ทำไร่นา