บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

ในปี ค.ศ. 1896 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ เฮนรี่ เบคเคอเรล (Henri Becquerel 1852 - 1908) ได้สังเกตเห็นว่ามีแสงเรืองเกิดขึ้นจากผลึกของเกลือยูเรเนียม การเรืองแสงของมันสามารถทำให้ฟิล์มถ่ายรูปเกิดรอยดำได้เช่นเดียวกับแสงสว่าง และยังสามารถทะลุผ่านสสารต่าง ๆ ได้ เช่นกระดาษ แก้ว ฯลฯ ซึ่งคุณสมบัตินี้เรียกว่า กัมมันตภาพรังสี ปี ค.ศ.1898 เปียร์ คูรี่(Pierre Curie 1859 - 1906) และ มารี คูรี่ (Marie Curie 1867 - 1934) ได้ศึกษารังสีที่แผ่ออกมาจากแร่พิทช์เบลนด์ (Pitchblende) และได้ค้นพบธาตุกัมมันตรังสี คือ ธาตุโพโลเนียม (Polonium) และธาตุเรเดียม (Radium) หลังจากนั้น รัทเธอร์ฟอร์ด (Rutherford) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ พบว่ารังสีที่แผ่ออกจากเกลือยูเรเนียมและธาตุกัมมันตรังสีมีอยู่ 2 ชนิด คือ รังสีแอลฟา (alpha rays) และรังสีเบตา (Beta rays) ในปี ค.ศ. 1899 ต่อมาในปี ค.ศ. 1900 รังสีชนิดที่ 3 คือรังสีแกมมา (gamma-rays) ก็ถูกค้นพบโดย เปียร์ คูรี และวิลลาด (Villard)

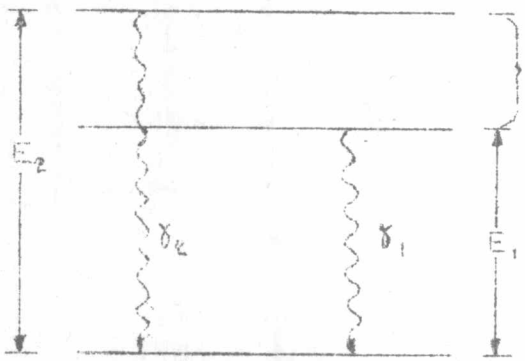
2.1.1 <u>รังสีแอลฟา</u> (Alpha rays) คือนิวเคลียสของธาตุฮีเลียม (helium) ใช้สัญญลักษณ์ $_{2}He^{4}$ หรือ α เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า + 2 e ถูกปลดปล่อยออกจากนิวเคลียสด้วยพลังงานต่าง ๆกัน เมื่อนิวเคลียสปล่อยรังสีแอลฟาแล้วจะมีประจุลดลง 2 หน่วย และมีมวลลดลง 4 หน่วย จึงกลายเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ เนื่องจากรังสีแอลฟามีมวลมากประมาณเกือบ 4 เท่าของอะตอมของไฮโดรเจน จึงมีอำนาจทะลุทะลวงผ่านสิ่งต่าง ๆ ได้ไม่มาก โดยจะเสียพลังงานไปจนหมดสิ้นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านอากาศ 3.842 ซม. ดังนั้นกระดาษที่หนาหรือแผ่นโลหะบาง ๆ ก็สามารถกำบังรังสีแอลฟาได้

2.1.2 รังสีเบตา (Beta rays) คืออนุภาคอิเลคตรอนและโพซิตรอน มีสัญญลักษณ์ β^- หรือ $_{-1}e^0$ และ β^+ หรือ $_{+1}e^0$ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก ใกล้ความเร็วของแสง จึงมีอำนาจทะลุทะลวงได้ดีกว่ารังสีแอลฟา รังสีเบตาเกิดจากการเปลี่ยนนิวตรอนเป็นโปรตอน หรือจากโปรตอนเป็นนิวตรอน

2.2.3 รังสีแกมมา (Gamma rays) คือรังสีซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต่างจากรังสีแอลฟาและเบตาซึ่งเป็นอนุภาค มีสัญญลักษณ์ γ รังสีแกมมาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ (nuclear transitions)โดยมักจะเกิดหลังจากการสลายตัวให้รังสีแอลฟาและเบตาแล้วเสมอ รังสีแกมมาไม่มีประจุไฟฟ้า มีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง และมีอำนาจทะลุทะลวงสูงมาก สามารถทะลุแผ่นตะกั่วหนาหลายเซนติเมตรได้ ดังนั้นในการป้องกันอันตรายจากรังสี ปัญหาการกำบังรังสีแกมมาจึงสำคัญมาก จำเป็นต้องกล่าวถึงรายละเอียดของรังสีแกมมาต่อไป

2.2 รังสีแกมมา (Gamma Rays)

ในปฏิกิริยานิวเคลียร์ต่าง ๆ รวมทั้งขบวนการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะไม่อยู่ตัว (excited state) ซึ่งมีพลังงานภายใน(internal energy) สูงกว่าสภาวะปกติ (ground state) ภายในช่วงเวลาสั้น ๆสภาวะที่ไม่อยู่ตัวนี้จะลดลงมาสู่สภาวะที่มีพลังงานต่ำกว่าหรืออาจเป็นสภาวะปกติ โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาอยู่ในรูปของรังสีแกมมา ตามทฤษฎีการแผ่รังสีทางควันตัม (quantum theory of radiation) พลังงานของรังสีแกมมาจะถูกปล่อยออกมาในรูปของอนุภาคเรียกว่าโฟตอน (photons) พลังงานของโฟตอนมีค่าเท่ากับ ผลต่างของพลังงานระหว่างสองสภาวะที่เกิดการเปลี่ยนแปลง จากรูป 2.1 แสดงการถ่ายเทพลังงานจากสภาวะไม่อยู่ตัวสู่สภาวะปกติ พลังงานของโฟตอนจะเป็น E_1 และ E_2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงสภาวะของนิวเคลียส

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน E ของโฟตอนกับความยาวคลื่น(wave length) λ ของการแผ่รังสี แสดงให้เห็นโดยทฤษฎีควันตัมจากสมการของแพลงค์(Planck's equation)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \qquad \text{.....2.1}$$

เมื่อ E คือ พลังงานของโฟตอน เป็น จูล

h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ $= 6.62 \times 10^{-34}$ จูล-วินาที

ν คือ ความถี่ของคลื่น เป็น เฮิทซ์

λ คือ ความยาวคลื่น เป็น เมตร

C คือ ความเร็วแสง $= 3 \times 10^{8}$ เมตร/วินาที

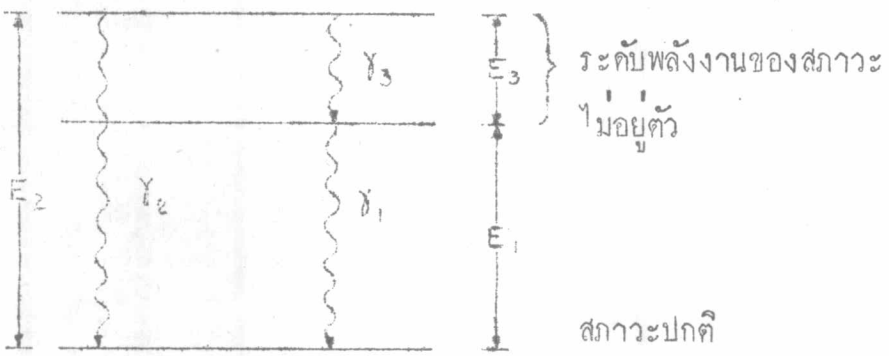
ถ้า E มีหน่วยเป็น MeV จะได้ว่า

$$\lambda \text{ (เมตร)} = \frac{1.25 \times 10^{-12}}{E \text{ (MeV)}} \qquad \text{.....2.2}$$

เราสามารถกล่าวถึง การแผ่รังสีแกมมาในเทอมของพลังงานโฟตอนได้ เช่น รังสีแกมมาพลังงาน 1MeV หมายถึง รังสีที่ประกอบด้วยโฟตอนพลังงาน1 MeV โดยทั่วๆ ไปพลังงานนิวเคลียร์ที่เกิดจากสภาวะไม่อยู่ตัว มักจะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.1

จนถึง 10 MeV ดังนั้นพลังงานของรังสีแกมมาจึงมีขนาดต่าง ๆ กันในช่วงนี้ และความยาวช่วงคลื่นของรังสีซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานในช่วงนี้จะมีขนาดตั้งแต่ 10^{-11} ถึง 10^{-13} เมตร

ในหลาย ๆ กรณี การถ่ายเทพลังงานจากสภาวะไม่อยู่ตัวระดับสูง ๆ ไปสู่สภาวะปกติจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย เรียกว่า ฟอร์บิดเด้น (forbidden) ดังนั้นสภาวะที่ไม่อยู่ตัวระดับกลาง ๆ จะเกี่ยวข้องกับขบวนการนี้ด้วย โดยจะถ่ายเทพลังงานต่อเนื่องกันไปสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตาม พลังงานรวมของรังสีแกมมาจะต้องมีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นกับระดับพลังงานสุดท้าย จากรูป 2.2 จะได้ $E_2 = E_1 + E_3$



รูป 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างระดับพลังงานต่างกัน 2 ระดับในนิวเคลียส

สำหรับนิวเคลียสที่มีเลขมวล (mass number) ต่ำสภาวะที่ไม่อยู่ตัวระดับแรกจะมีพลังงานสูงกว่าสภาวะปกติอย่างน้อย 1MeV และมีค่าน้อยลง สำหรับนิวเคลียสที่มีเลขมวลสูงขึ้น โดยนิวเคลียสที่หนักที่สุดสภาวะที่ไม่อยู่ตัวระดับแรกจะมีพลังงานสูงกว่าสภาวะปกติเพียง 0.1 MeV

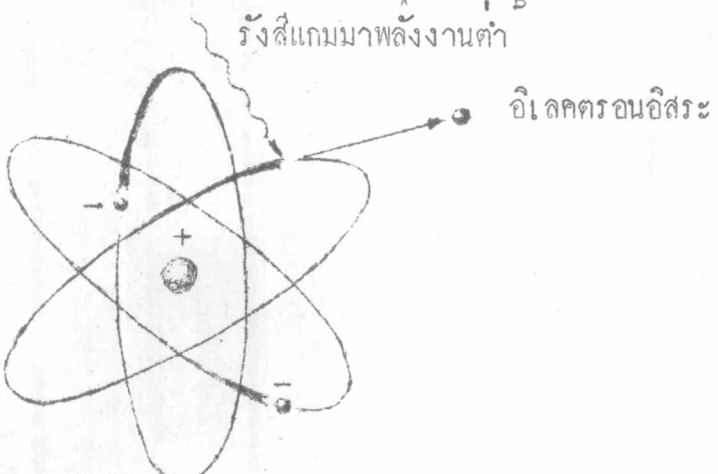
2.3 อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับวัตถุ (Interaction of Gamma Rays with Matter)

รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ (X-ray) และเบรมสตราลุง (Brems strahlung) เป็นรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave rodiation) สำหรับรังสีแกมมาเป็นรังสีที่มีแหล่งกำเนิดมาจากนิวเคลียส ส่วนรังสีเอกซ์และเบรมสตราลุงเป็นรังสีที่เกิดภายนอกนิวเคลียสของอะตอม แต่ลักษณะพื้นฐานที่เกิดขึ้นก็เหมือนกันเมื่อรังสีเหล่านี้ทำอันตรกิริยากับวัตถุ อันตรกิริยาที่สำคัญเมื่อรังสีแกมมากระทบกับวัตถุมีอยู่ 3 อย่างคือ โฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ (photoelectric effect) คอมป์ตัน เอฟเฟคท์ (compton effect) และแพร์ โปรดัคชั่น (pair production)

2.3.1 โฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ (Photoelectric effect)

โฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของอิเลคตรอนในวงโคจรของอะตอม แกมมาโฟตอนจะเข้าชนกับอิเลคตรอนตัวนั้นพร้อมกับถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเลคตรอน ทำให้อิเลคตรอนตัวนั้นหลุดออกจากอะตอม เรียกว่าโฟโตอิเลคตรอน ถ้า E_γ เป็นพลังงานของแกมมาโฟตอน และ E_B เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเลคตรอนในอะตอมจะได้ว่า

พลังงานจลน์ของโฟโตอิเลคตรอน = $E_\gamma - E_B$ 2.3



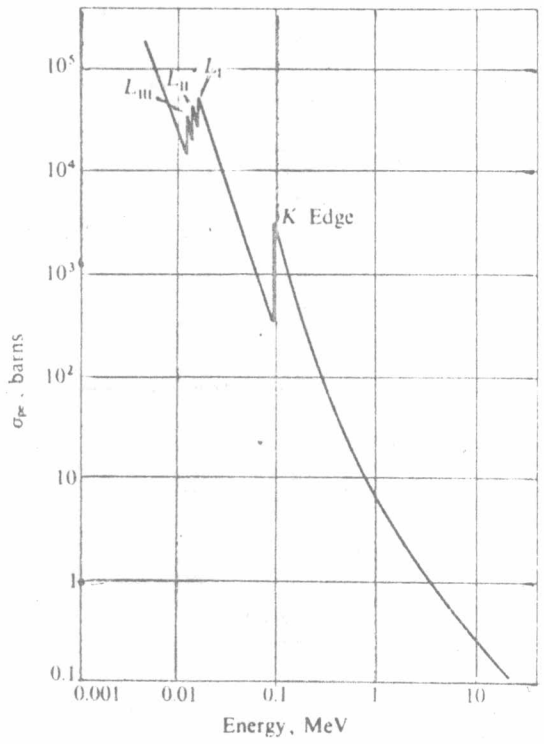
รูปที่ 2.3 (10) แสดงการเกิดโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์

โฟโตอิเลคตรอนจะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับอนุภาคเบตาที่มีพลังงานเท่ากัน สำหรับรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูง โฟโตอิเลคตรอนจะมีทิศทางในแนวเดียวกันกับแกมมาโฟตอนที่เข้าชน และจะทำมุมกับทิศทางเดิมเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานต่ำ กระบวนการนี้มักจะเกิดขึ้นกับอิเลคตรอนในเคเชลล์ (K-shell) เพราะว่าอยู่ใกล้นิวเคลียสมากที่สุดและรังสีแกมมามีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้อิเลคตรอนในวงโคจรนี้หลุดออกจากอะตอม ขอบเขตของการเกิดโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมา E และเลขอะตอม Z ของวัตถุที่โฟตอนเข้าชน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

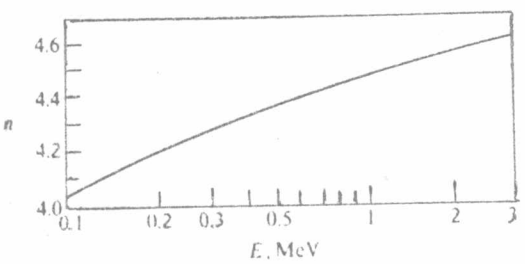
$$\text{โอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์} \simeq \text{ค่าคงที่} \times \frac{Z^n}{E^3} \quad \ldots 2.4$$

เมื่อ n มีค่าตั้งแต่ 3 สำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่ำถึง 5 สำหรับรังสีแกมมาพลังงานสูง จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์จะเกิดมากขึ้นเมื่อเลขอะตอมของวัตถุมีค่าสูงขึ้นและพลังงานของรังสีแกมมามีค่าลดลง ดังนั้นกระบวนการดูดกลืนรังสีแกมมาของวัตถุโดยการเกิดโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ มีความสำคัญเฉพาะรังสีแกมมาที่มีพลังงานน้อยกว่า 1MeV ทำอันตรกิริยากับวัตถุที่มีเลขอะตอมสูง ๆ แต่ถ้ารังสีแกมมามีพลังงานน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเลคตรอนในอะตอมแล้วอิเลคตรอนก็จะไม่หลุดออกจากอะตอม

เมื่ออิเลคตรอนถูกผลักออกจากวงโคจรหลุดไปจากอะตอมอิเลคตรอนจากวงโคจรรอบนอกตัวอื่นจะเข้ามาแทนที่โดยการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ (Characteristic x-ray) ซึ่งมีพลังงานต่ำมากเมื่อเทียบกับพลังงานของรังสีแกมมาที่เข้าทำอันตรกิริยา ส่วนมากแล้วเอกซ์เรย์โฟตอนจะเข้าชนกับอิเลคตรอนในวงโคจรรอบนอกกว่าให้หลุดออกจากอะตอม ในลักษณะเดียวกับการเกิดโฟโตอิเลคตรอน เอฟเฟคท์ เรียกว่า โอเจ อิเลคตรอน (Auger electron) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับพลังงานของรังสีเอกซ์ ลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเลคตรอนในวงโคจรนั้น แล้วโอเจ อิเลคตรอนจะสูญเสียพลังงานไปโดยอันตรกิริยาเช่นเดียวกับอนุภาคเบตา จึงพอสรุปได้ว่า โฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ เป็นการดูดกลืนรังสีแกมมาทั้งหมด แล้วส่งอิเลคตรอนและรังสีเอกซ์พลังงานต่ำออกมา



รูปที่ 2.4[8] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวาง เนื่องจากอันตรกิริยาโฟโตอิเลคตริค (Photoelectric cross section) กับพลังงานของรังสีแกมมา



รูปที่ 2.5[8] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ n กับพลังงานของรังสีแกมมา

2.3.2 <u>คอมป์ตัน เอฟเฟคท์</u> (Compton effect)

ในอันตรกิริยาคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ แกมมาโฟตอนจะเข้าชนกับอิเลคตรอนในอะตอมของวัตถุแบบอิลาสติค (Elastic Collision) อิเลคตรอนนี้ประพฤติตัวเหมือนเป็นอิสระเพราะว่าพลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าน้อยกว่าพลังงานของโฟตอนมาก ในการชนแบบนี้ทั้งโมเมนตัมและพลังงานไม่สูญหาย โฟตอนจะเสียพลังงานบางส่วนให้กับอิเลคตรอน ทำให้อิเลคตรอนหลุดออกจากวงโคจรในทิศทางทำมุม ϕ กับทิศทางการเคลื่อนที่เดิมของโฟตอน ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานลดลงจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไป (Scattered photon) โดยทำมุม θ กับทิศทางเดิม และมีความยาวคลื่นมากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน E ของโฟตอนที่ตกกระทบ พลังงาน E' ของโฟตอนที่สะท้อนไปในหน่วย MeV และ θ มุมที่สะท้อนได้ว่า

$$E' = \frac{0.51}{1 - \cos\theta + \frac{0.51}{E}} \qquad \text{.....2.5}$$

ถ้ามุมสะท้อนมีค่าน้อย $\cos\theta = 1$ E จะมีค่าประมาณเท่ากับ E' และโฟตอนที่สะท้อนออกมามีทิศทางใกล้เคียงกับทิศทางเดิม

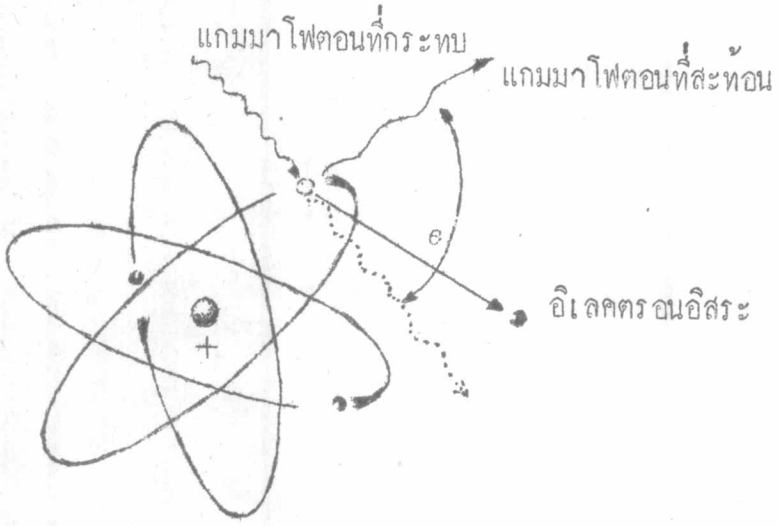
สำหรับ $\theta = 90^{\circ}$ ดังนั้น $\cos\theta = 0$ จะได้ว่า

$$E' = \frac{0.51\,E}{E + 0.51} < 0.51 \text{ MeV} \qquad \text{.....2.6}$$

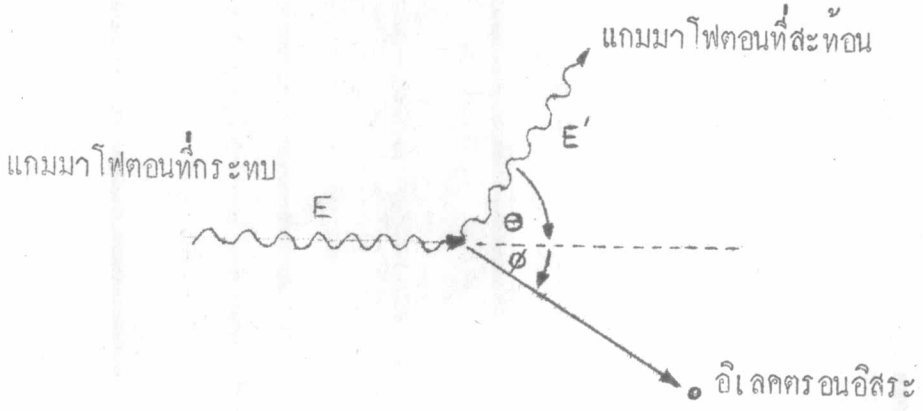
ลักษณะเช่นนี้ทำให้โฟตอนสะท้อนกลับเป็นมุมฉากและมีพลังงานน้อยกว่า 0.51 MeV หากจะพิจารณาความยาวคลื่นของโฟตอน เมื่อโฟตอนมีมวล $= \frac{h\nu}{c^2}$ และมีโมเมนตัม $= \frac{h\nu}{c}$ จากกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม (Conservation of energy and momentum) จะได้ว่า

$$\lambda - \lambda' = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) \qquad \text{.....2.7}$$

เมื่อ λ, λ' เป็นความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบและโฟตอนที่สะท้อนออกไป m เป็นมวลนิ่งของอิเลคตรอน



รูปที่ 2.6[10] แสดงการเกิดอันตรกิริยา คอมป์ตัน เอฟเฟคท์



รูปที่ 2.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมาจากอันตรกิริยาคอมป์ตัน

ห้องสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะเห็นได้ว่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปขึ้นกับมุมสะท้อนของโฟตอน ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงานของโฟตอนที่มากระทบและวัตถุที่เป็นตัวดูดกลืน แต่อย่างไรก็ตามอัตราส่วนพลังงานของโฟตอนที่สะท้อนต่อพลังงานของโฟตอนที่มากระทบหาจากสมการ (2.6) ได้ดังนี้

$$E'/E = \frac{0.51}{E(1-\cos\theta)+0.51)} \qquad \ldots\ldots 2.8$$

ที่ค่าคงที่ θ ใด ๆ อัตราส่วนของพลังงานนี้จะลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนที่กระทบมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ พลังงานส่วนใหญ่ของรังสีแกมมาสูญเสียไปในอันตรกิริยาคอมป์ตัน เอฟเฟคท์

003789

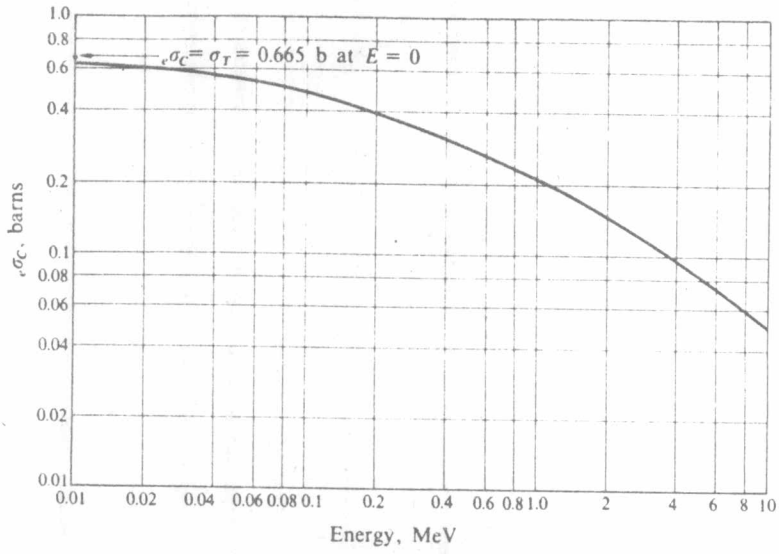
เนื่องจากคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ เป็นอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับอิเลคตรอน ดังนั้นปริมาณการเกิดคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ จึงขึ้นอยู่กับจำนวนอิเลคตรอนในวงโคจรของอะตอมของวัตถุที่ใช้ดูดกลืน หมายถึง เลขอะตอมนั่นเอง เพราะฉะนั้นกระบวนการดูดกลืนโฟตอน โดยคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ จึงเกิดได้ดีกับวัตถุที่มีค่าเลขอะตอมสูง และจะลดลงเมื่อพลังงานของแกมมาโฟตอนสูงขึ้น ซึ่งอาจจะประมาณได้ว่า

โอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ $\propto$ ค่าคงที่ $\times \frac{Z}{E}$ 2.9

ข้อแตกต่างระหว่างอันตรกิริยาโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์และคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ ก็คือ โฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ เป็นการดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดที่มากระทบ ส่วนคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ เพียงแต่ลดขนาดพลังงานเดิมของโฟตอน โฟตอนซึ่งมีพลังงานลดต่ำลงนี้ อาจจะทำอันตรกิริยากับวัตถุ เกิดโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ได้อีก เนื่องจากกระบวนการนี้เกิดได้ง่ายขึ้น เมื่อโฟตอนมีพลังงานลดต่ำลง

2.3.3 <u>แพร์ โปรดัคชัน</u> (Pair production)

อันตรกิริยาแพร์ โปรดัคชัน เป็นแบบหนึ่งของกระบวนการดูดกลืนโฟตอน เกิดขึ้นได้เมื่อโฟตอนมีพลังงานอย่างน้อย 1.02 MeV วิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอม โฟตอนจะหายไปโดยใช้พลังงานไปในการสร้างอิเลคตรอนและโพซิตรอนขึ้นมาคู่หนึ่ง เนื่องจากมวลของอิเลคตรอนกับโพซิตรอนมีค่าเทียบเท่ากับพลังงาน 1.02 MeV

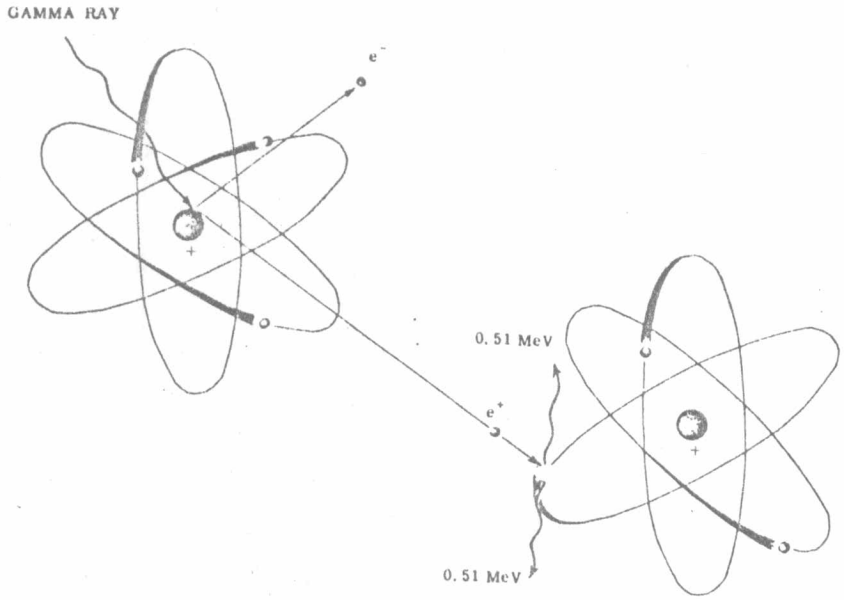


รูปที่ 2.8[8] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวาง เนื่องจากอันตรกิริยาคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ต่ออิเลคตรอนหนึ่งตัว (Compton cross section per electron) กับพลังงานของรังสีแกมมา

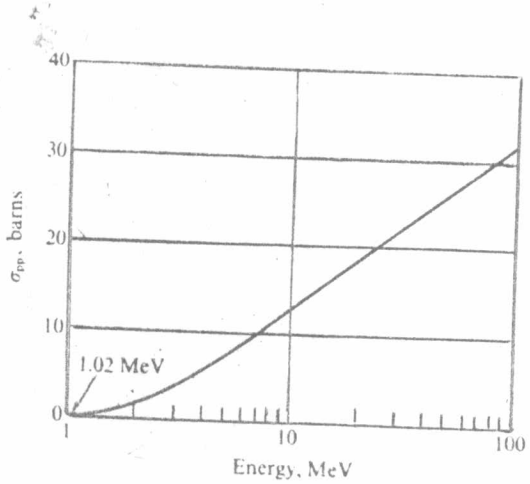
ดังนั้นแกมมาโฟตอนต้องมีพลังงานไม่ต่ำกว่า 1.02 MeV จึงสามารถทำให้เกิดแพร์ โปรดัคชันได้ ถ้าแกมมาโฟตอนมีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV พลังงานที่เกินส่วนใหญ่จะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเลคตรอนและโพซิตรอน มีบางส่วนเท่านั้นที่ถ่ายเทให้กับนิวเคลียสของอะตอม

ขอบเขตของการเกิดอันตรกิริยาแพร์ โปรดัคชัน ขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมา E และเลขอะตอม Z โดย

โอกาสการเกิดอันตรกิริยาแพร์ โปรดัคชัน $\approx$ ค่าคงที่ $\times Z^2(E - 1.02)$ 2.10



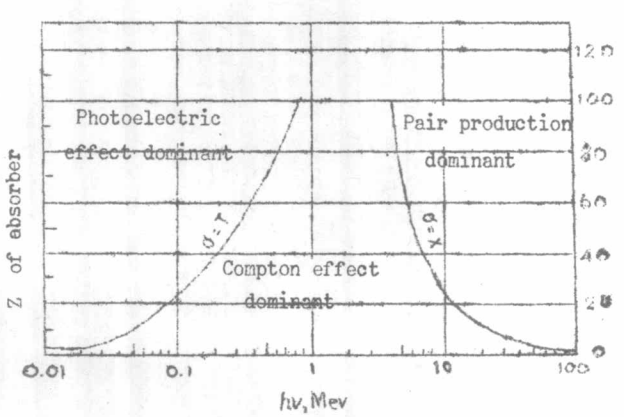
รูปที่ 2.9[9] แสดงการเกิดอันตรกิริยาแพร์ โปรดัคชัน และแอนนิฮิเลชัน



รูปที่ 2.10[8] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางเนื่องจากอันตรกิริยาแพร์ โปรดัคชัน (Pair production cross section) ของตะกั่วกับพลังงานของรังสีแกมมา

แสดงว่าอันตรกิริยาแพร์ โปรดัคชันเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของวัตถุและพลังงานของโฟตอนส่วนที่เกินกว่า 1.02 MeV ความจริงแล้วความสัมพันธ์ข้างบนนี้เป็นไปได้เฉพาะการเกิดแพร์ โปรดัคชันในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสเท่านั้น แต่กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในสนามไฟฟ้าของอิเลคตรอนในวงโคจร โดยจะมีโอกาสการเกิดเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมเช่นกัน เมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น อันตรกิริยาโฟโตอิเลค-ตริค เอฟเฟคท์และคอมป์ตัน เอฟเฟคท์จะลดลง แต่แพร์ โปรดัคชันจะเพิ่มขึ้น สำหรับวัตถุที่มีเลขอะตอมสูงและรังสีแกมมามีพลังงานมากกว่า 5 MeV แล้ว แพร์ โปรดัคชันจะเป็นกระบวนการดูดกลืนโฟตอนที่มีความสำคัญที่สุด

จากอันตรกิริยาแพร์ โปรดัคชัน แกมมาโฟตอนจะถูกดูดกลืนหายไปพร้อมกับมีอิเลคตรอนและโพซิตรอนเกิดขึ้น อิเลคตรอนและโพซิตรอนที่เกิดขึ้นนี้บางตัวจะรวมตัวกันเอง หรือโพซิตรอนอาจจะรวมตัวกับอิเลคตรอนตัวอื่นแล้วให้โฟตอน 2 ตัว ซึ่งมีพลังงานตัวละ 0.51 MeV เรียกว่า แอนนิฮิเลชัน เรดิเอชัน (annihilation radiation) แต่อย่างไรก็ตาม โฟตอนที่เกิดขึ้นนี้มีพลังงานต่ำและกระจัดกระจายไปทุกทิศทุกทาง ทำให้ส่วนที่พุ่งไปข้างหน้ามีปริมาณต่ำ ดังนั้นในทางปฏิบัติ เช่น การคำนวณการกำบังรังสี จึงสามารถสมมุติได้ว่า โฟตอนถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์ในอันตรกิริยาแพร์ โปรดัคชัน



รูปที่ 2.11 (12) แสดงความสำคัญของอันตรกิริยาต่าง ๆ

2.4 การลดของรังสีแกมมา (Attenuation of Gamma Rays)

เมื่อรังสีแกมมาวิ่งผ่านเข้าไปในวัตถุ บางส่วนของรังสีจะถูกดูดกลืนโดยอันตรกิริยาต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว บางส่วนก็จะกระจายไปและบางส่วนก็จะผ่านออกมาได้ ความเข้มของรังสีแกมมาจะลดลงอย่างเอกซ์โปเนนเชียล(exponential) พิจารณารังสีแกมมาพลังงานเดียว (monoenergetic of monochromatic gamma rays) วิ่งผ่านวัตถุ การสูญเสียความเข้มของรังสีในความหนา dx ของวัตถุที่จุดใด ๆ เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มของรังสีที่จุดนั้น กับความหนาของวัตถุที่รังสีผ่านออกไป นั่นคือ

$$dI = -\mu I dx \quad \text{.....2.11}$$ (9)

หรือ

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad \text{.....2.12}$$

เมื่อ I คือ ความเข้มของรังสีแกมมาในหน่วย โฟตอน/ซม.-วินาที

μ คือ สัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้นของวัตถุ (linear attenuation coefficient) ในหน่วย ซม.$^{-1}$

ถ้าความเข้มเดิมของรังสีแกมมาพลังงานเดียวที่เป็นลำขนานแคบ ๆ I_o วิ่งผ่านวัตถุหนา x ซม. ความเข้มของรังสีที่ผ่านออกมาได้ Ix จากสมการ 2.12 อินทิเกรต (integration) จะได้

$$I_x = I_o e^{-\mu x} \quad \text{.....2.13}$$

หรือ

$$\log \frac{I_x}{I_o} = -0.4343 \mu x \quad \text{.....2.14}$$

ค่า μ จากสมการ 2.12 เป็นสัมประสิทธิ์การลดรังสีรวมเนื่องจากการกระจาย (scattering) ของคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ และการดูดกลืน (absorption) จากโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ และแพร์ โปรดัคชัน เพราะว่าเป็นสมการที่ใช้หาความเข้มของโฟตอนที่ผ่านออกมาเข้าเครื่องวัด เมื่อรังสีแกมมาเป็นลำขนานแคบ ๆ (narrow collimated beam) ถ้าไม่มีการกระจายของโฟตอนสมการนี้สามารถใช้ได้กับรังสีที่มีลำขนานกว้างได้ (broad collimated beam) โดยจะแทนค่าสัมประสิทธิ์การลดของรังสีเนื่องจากการดูดกลืน (attenuation coefficient for absorption) เท่านั้น

ค่าสัมประสิทธิ์การลดรังสีรวมของวัตถุจะเปลี่ยนแปลงตามพลังงานของแกมมาและชนิดของวัตถุที่รังสีแกมมาเข้ากระทบ เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับวัตถุทั้ง 3 ชนิดที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขอะตอมเพิ่ม ตัวอย่างเช่น อลูมิเนียม อันตรกิริยาโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ เกิดขึ้นน้อยมากและไม่มีความสำคัญเลยเมื่อโฟตอนมีพลังงานมากกว่า 0.2 MeV แต่คอมป์ตัน เอฟเฟคท์ จะมีความสำคัญจนถึงพลังงาน 4 MeV หรือมากกว่า เพราะว่าสัมประสิทธิ์การลดของรังสีเนื่องจากโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ (μ_{pe}) และสัมประสิทธิ์การลดเนื่องจากคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ (μ_c) มีค่าลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มในขณะที่สัมประสิทธิ์การลดเนื่องจากแพร์ โปรดัคชัน (μ_{pp}) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานของรังสีแกมมามากกว่า 1.02 MeV

Energy (MeV)	Water	Concrete	Aluminum	Iron	Lead
0.5	0.0966	0.204	0.227	0.651	1.64
1.0	0.0706	0.149	0.166	0.468	0.776
1.5	0.0575	0.121	0.135	0.381	0.581
2.0	0.0493	0.105	0.117	0.333	0.518
3.0	0.0396	0.0853	0.0953	0.284	0.477
4.0	0.0339	0.0745	0.0837	0.259	0.476
5.0	0.0301	0.0674	0.0761	0.246	0.483
8.0	0.0240	0.0571	0.0651	0.232	0.520
10.0	0.0219	0.0538	0.0618	0.231	0.554

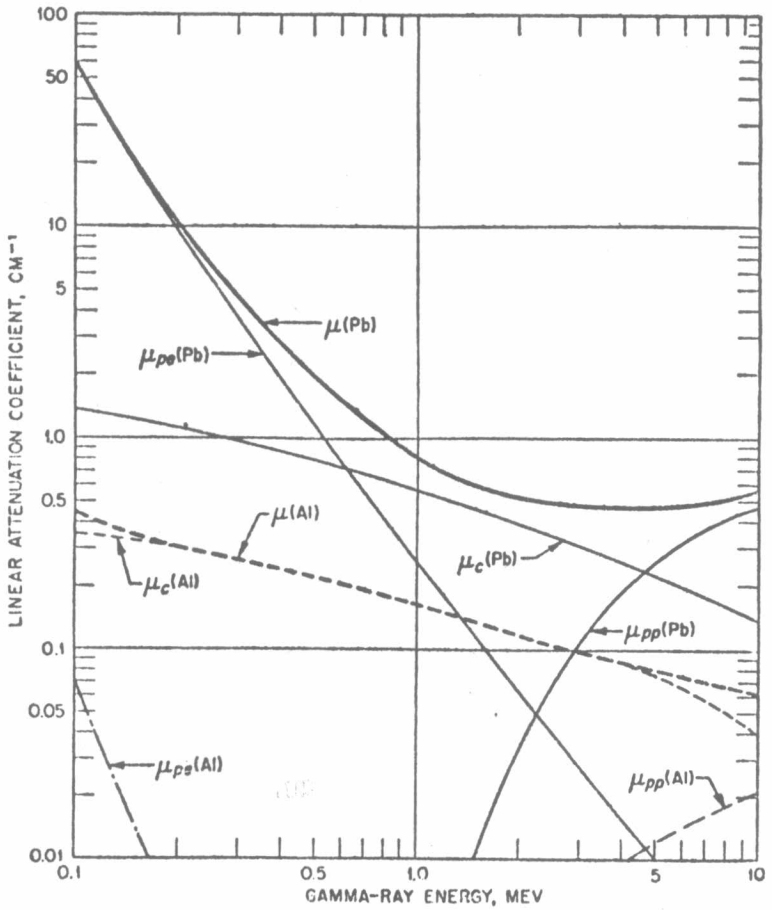
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้นในหน่วย ซม.$^{-1}$ สำหรับธาตุต่าง ๆ

เราสามารถทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้นได้ โดยวัดความเข้มของรังสีแกมมาพลังงานเดียวจากลำขนานแคบ ๆ I_x ซึ่งผ่านวัตถุหนา x ซม. จากความเข้มเดิมของรังสีแกมมา I_o แล้วสร้างกราฟระหว่าง log I_x และ x จะหาค่า μ ได้จาก

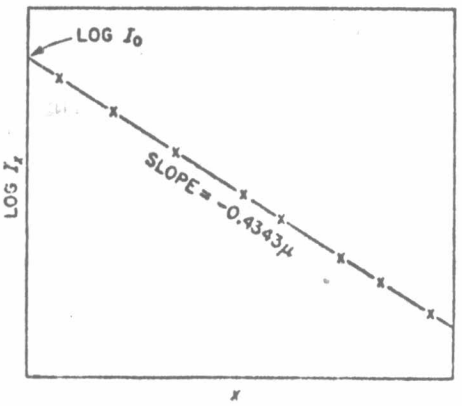
$$\text{Slope} = -0.4343\mu \qquad \text{.....2.16}$$

จากค่า μ เราสามารถทราบถึงความหนาของวัตถุที่จะลดรังสีแกมมาให้มีความเข้มเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของความเข้มเดิมได้ เรียกว่า HVL (Half value layer) จะมีค่า

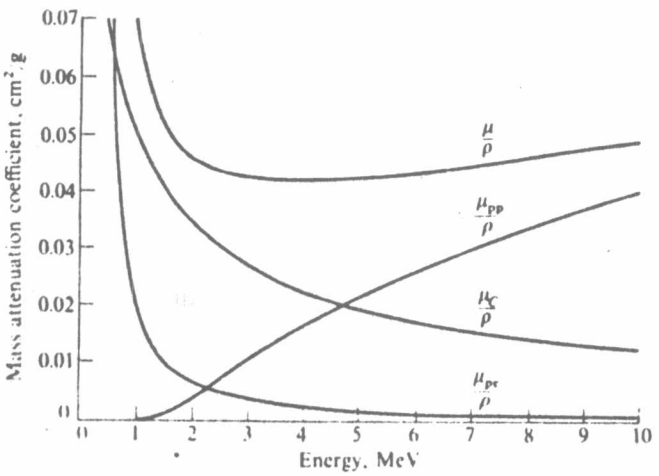
$$\text{Half value layer (HVL)} = X_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\mu} \qquad \text{.....2.17}$$



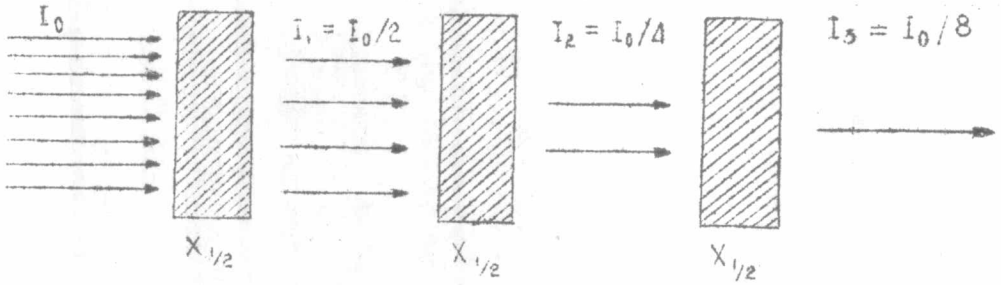
รูปที่ 2.12[8] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้นของอลูมิเนียมและตะกั่ว กับพลังงานของรังสีแกมมา



รูปที่ 2.13 (8) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า log Ix กับ x



รูปที่ 2.14 (8) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลของตะกั่ว กับพลังงานของรังสีแกมมา

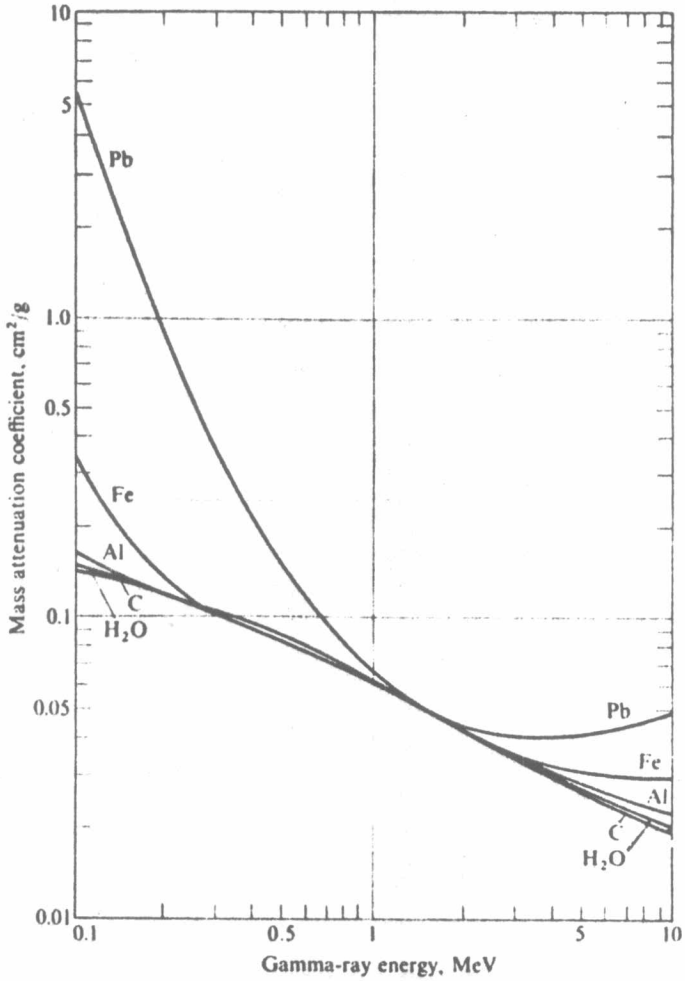


รูปที่ 2.15 (10) แสดงการลดลงของรังสีแกมมาเมื่อผ่าน HVL

TVL (Tenth value layer) ก็หมายถึงความหนาของวัตถุที่ทำให้ความเข้มของรังสีแกมมาลดลง $\frac{1}{10}$ ของความเข้มเดิม หาได้จาก

$$\text{Tenth value layer (TVL)} = \frac{2.3}{\mu} \qquad .....2.18$$

ถ้าสัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้นในหน่วย ซม.$^{-1}$ ถูกหารด้วย ρ ซึ่งเป็นความหนาแน่นของวัตถุในหน่วย กรัม/ซม.^{3} จะได้ค่า μ/ρ ซึ่งเรียกว่าสัมประสิทธิ์การลดเชิงมวล (mass attenuation coefficient) มีหน่วยเป็น ซม./กรัม ค่านี้จะมีความสำคัญในช่วงพลังงาน 0.1 ถึง 10 MeV สำหรับธาตุเบา และจาก 0.2 ถึง 3 MeV สำหรับธาตุที่มีเลขมวลปานกลางซึ่งคอมป์ตัน เอฟเฟคท์จะมีความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากจำนวนอิเลคตรอนในวัตถุประมาณได้ว่า เป็นปฏิภาคโดยตรงกับมวล ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอันตรกิริยาคอมป์ตัน เอฟเฟคท์เปลี่ยนแปลงไปตามมวล จากรูป 2.16 จะเห็นได้ว่าในช่วงพลังงานช่วงหนึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุที่ทำปฏิกิริยากับรังสีแกมมา



รูปที่ 2.16 (8) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลของธาตุบางชนิด กับพลังงานของรังสีแกมมา

$I_x = I_0 e^{-\mu x}$ $\mu = \mu/\rho$

จากสมการ 2.13 เมื่อหารและคูณตัวยกกำลังด้วย ρ จะได้

$$I_x = I_0 e^{-(\mu/\rho)(x\rho)} \quad \text{.....2.19}$$

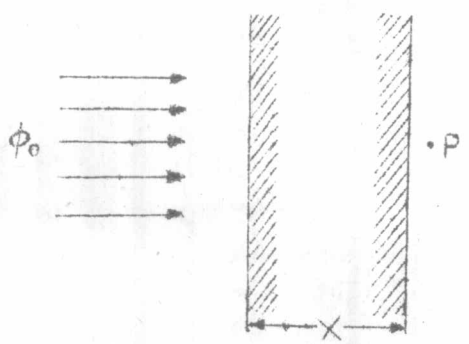
ตัวประกอบตัวยกกำลังตัวแรก คือสัมประสิทธิ์การลดเชิงมวล ส่วนตัวที่สองเป็นความหนาแน่นต่อหน่วยพื้นที่ (areal density) ของวัตถุในหน่วย กรัม/ซม.^{2} จะเห็นได้ว่าในกรณีที่สัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลมีค่าเท่ากันสำหรับวัสดุต่าง ๆ ค่าความหนาแน่นต่อหน่วยพื้นที่ที่ถูกกลืนรังสีแกมมาได้ปริมาณหนึ่ง ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของวัตถุเลย หรืออาจกล่าวว่าความหนาของวัตถุที่ใช้ดูดกลืนรังสีแกมมาได้อัตราส่วนเดียวกัน เป็นปฏิภาคกลับกับความหนาแน่นของวัตถุนั้น

2.5 การกำบังรังสีแกมมา (Gamma-ray shielding)

การลดของรังสีแกมมาลำขนานแคบ ๆ (narrow beam) ผ่านวัสดุกำบังหาได้จากสมการเอกซ์โพเนนเชียล ดังนี้

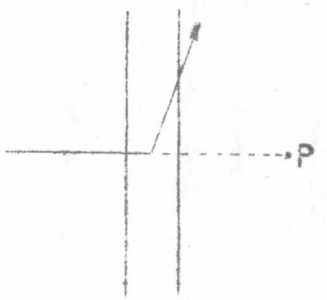
$$\phi_x = \phi_0 e^{-\mu x} \quad \text{.....2.20}$$

เมื่อ ϕ_0 และ ϕ_x เป็นฟลักซของรังสีแกมมาก่อนและหลังผ่านวัสดุกำบังหนา x และ μ เป็นสัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้น

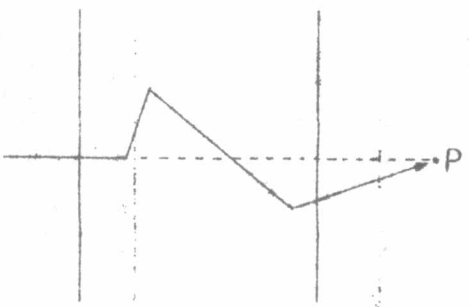


รูปที่ 2.17 ลำของรังสีแกมมาทิศทางเดียวผ่านแผ่นวัสดุกำบัง

จากสมการ 2.20 สมมุติว่ามีอนุภาคโฟตอนบางตัวกระจายออกจากลำของรังสีอย่างสิ้นเชิง ค่าของฟลักซ์ที่วัดได้ เรียกว่า อันคอลไลด์ ฟลักซ (uncollided flux) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากลำของรังสีแกมมาขนาดกว้าง (broad beam) และในกรณีที่วัสดุกำบังรังสีมีขนาดบาง โดยเฉพาะเมื่อแกมมาโฟตอนมีพลังงานสูง เพราะว่าโอกาสที่โฟตอนที่กระจายออกไปจะมาถึงจุดที่สังเกตหรือหัววัดรังสีหลังจากทำอันตรกิริยากับวัตถุเพียงครั้งเดียวมีค่าน้อย ดังรูปที่ 2.18 ในทางตรงกันข้ามถ้าวัสดุกำบังรังสีมีขนาดหนาโฟตอนบางตัวอาจจะทำอันตรกิริยาแล้วกระจายภายในวัตถุหลายครั้งแล้วผ่านเข้าหัววัดรังสีได้ ดังรูปที่ 2.19 ในกรณีนี้ฟลักซ์ที่วัดได้เรียกว่า บิลด์อัพ ฟลักซ (buildup flux) ผลของรังสีที่กระจายออกมาเรียกว่า บิลด์อัพ แฟคเตอร์ (buildup factor)



รูปที่ 2.18 การกระจายของโฟตอนในแผ่นกำบังรังสีที่บาง



รูปที่ 2.19 การกระจายของโฟตอนในแผ่นกำบังรังสีที่หนา

จากรูป 2.17 ถ้าไม่มีวัสดุกำบังรังสีจะหาค่าอัตราการรับรังสี (exposure rate) ที่จุด P ได้ดังนี้

$$\dot{X}_0 = 0.0659\, \phi_0 E_0 (\mu_a/\rho)^{air(\delta)} \quad mR/hr \quad \ldots.2.21$$

เมื่อ $\dot{X}_0$ คือ อัตราการรับรังสี มีหน่วยเป็นมิลลิเรินท์เก้น/ชม.

ϕ_0 คือ ฟลักซของรังสีแกมมา มีหน่วยเป็น รังสีแกมมา/ซม.^{2}วินาที

E_0 คือ พลังงานของรังสีแกมมาในหน่วย MeV

$(\mu_a/\rho)^{air}$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลในอากาศ (mass obsorption coefficient) ที่พลังงาน E_0 มีหน่วยเป็น ซม.^{2}/กรัม

อาจจะเขียนสมการ 2.21 ให้อยู่ในรูปแบบง่าย ๆ ได้ดังนี้

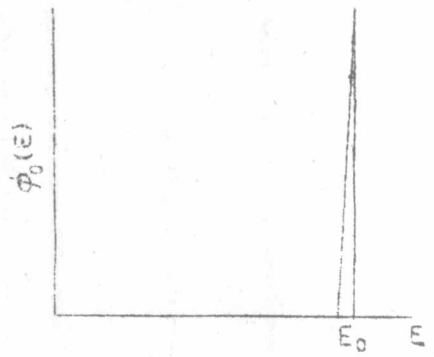
$$\dot{X}_0 = C\phi_0 \quad \ldots..2.22$$

เมื่อ $C = 0.0659\, E_0 (\mu_a/\rho)^{air}$ $\ldots..2.23$

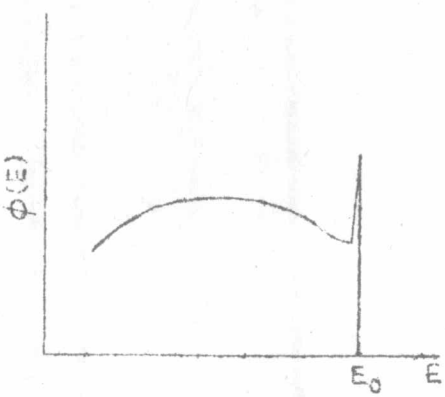
และเมื่อ μ เป็นสัมประสิทธิ์การลดรวมที่พลังงาน E_0 จะหาค่าของอันคอลไลด์ ฟลักซ ϕ_u ได้โดย

$$\phi_u = \phi_0 e^{-\mu x} \quad \ldots..2.24$$

จากอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับวัตถุโฟตอนที่มีพลังงานลดลงจะกระจายออกจากอันตรกิริยาคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ สำหรับอันตรกิริยาโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ และแพร์ โปรดัคชัน โฟตอนจะถูกดูดกลืนไปสิ้น แล้วเกิดรังสีเอกซ์และโฟตอนจากการแผ่รังสีแอนนิฮิเลชัน ทำให้สเปคตัมของพลังงาน(energy spectrum)รังสีแกมมาก่อนที่จะถูกกำบังมีลักษณะดังรูปที่ 2.20 เมื่อผ่านวัสดุกำบังรังสีแล้วจะมีการกระจายของสเปคตัมอย่างต่อเนื่อง (continuous spectrum) ดังรูปที่ 2.21 ในรูปนี้ส่วนที่เป็นยอดแหลมที่พลังงาน E_0 จะสัมพันธ์กับโฟตอนที่ไม่กระจายและขนาดของฟลักซที่ได้



รูปที่ 2.20[8] สเปคตัมของพลังงานรังสีแกมมาก่อนผ่านวัสดุกำบัง



รูปที่ 2.21[8] สเปคตัมของพลังงานรังสีแกมมาที่ผ่านออกจากวัสดุกำบัง

จากสมการ 2.24 สำหรับส่วนที่ต่อเนื่องออกไปของสเปคตัม เกิดจากโฟตอนที่กระจายออกไปเนื่องจากอันตรกิริยาคอมป์ตัน เอฟเฟคท์ เป็นส่วนมาก กับบางส่วนของโฟโตอิเลคตริคเอฟเรย์และรังสีจากแอนนิฮิเลชัน ดังนั้นการคำนวณหาค่าฟลักซของรังสีแกมมาเมื่อผ่านวัสดุกำบังซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาและความหนาของวัสดุกำบัง พิจารณาจากค่าอัตราการรับรังสีจะได้ดังนี้

$$\dot{X}_o = 0.0659 \int_0^{E_o} \phi(E) E (\mu_a/\rho)^{air} dE \qquad .....2.25$$

ผลจากการคำนวณสมการที่ 2.25 จะได้ว่า

$$\dot{X} = \dot{X}_o B_m(\mu x) e^{-\mu x} \qquad .....2.26$$

เมื่อ $\dot{X}$ และ $\dot{X}_o$ เป็นอัตราการรับรังสีของรังสีแกมมาก่อนและหลังผ่านวัสดุกำบัง $B_m(\mu x)$ คือ เอกซ์โพเชอร์ บิลด์อัพ แฟคเตอร์ (exposure buildup factor) ของรังสีลำขนานทิศทางเดียวและเช่นเดิม μ เป็นสัมประสิทธิ์การลดรวมที่พลังงาน E_o จากสมการนี้จะได้ค่าอัตราการรับรังสีที่เกิดขึ้นจริงที่จุด P

ตารางที่ 2.4 แสดงค่า B_m ที่พลังงานต่าง ๆ สำหรับวัสดุหลาย ๆ ชนิด จะเห็นว่า B_m อาจจะมีค่ามาก ๆ ได้ แสดงว่าการคำนวณที่เกี่ยวกับการกำบังรังสีแกมมาค่าที่เพิ่มขึ้นจากการกระจายของโฟตอนท์มีความสำคัญ เช่น ถ้าน้ำเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 1 MeV โดย $\mu x = 10$ จะได้ $B_m = 18$ แต่ถ้าเราไม่คำนึงถึง B_m ผลของการคำนวณการกำบังรังสีจะผิดไป 18 เท่า ดังนั้นค่า B_m ของรังสีที่ผ่านวัสดุกำบังจึงไม่ควรละเลย เนื่องจากค่า B_m ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมา ความหนาและเลขอะตอมของวัสดุกำบัง ดังนั้นจึงคำนวณหาค่า B_m ของวัสดุที่ไม่ได้กำหนดในตารางได้โดยเขียนกราฟระหว่าง B_m กับเลขอะตอมของวัสดุกำบังที่พลังงานที่ต้องการก็จะทราบค่า B_m ของวัสดุต่าง ๆ ได้

จากสมการ 2.22 จะเห็นว่า $\dot{X}_o$ เป็นสัดส่วนกับ ϕ_i ดังนั้นอัตราการรับรังสีที่เกิดขึ้นจริงที่จุด P จากสมการ 2.26 อาจเขียนได้ว่า

$$\dot{X} = C\phi_i \qquad .....2.27$$

ซึ่ง C แสดงให้เห็นแล้วในสมการ 2.23 และ ϕ_i เป็นบิลด์อัพ ฟลักซ

Material	Gamma-Ray Energy, MeV																	
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2	3	4	5	6	8	10
H	.295	.265	.243	.212	.189	.173	.160	.140	.126	.113	.103	.0876	.0691	.0579	.0502	.0446	.0371	.0321
Be	.132	.119	.109	.0945	.0847	.0773	.0715	.0628	.0565	.0504	.0459	.0394	.0313	.0266	.0234	.0211	.0180	.0161
C	.149	.134	.122	.106	.0953	.0870	.0805	.0707	.0636	.0568	.0518	.0444	.0356	.0304	.0270	.0245	.0213	.0194
N	.150	.134	.123	.106	.0955	.0869	.0805	.0707	.0636	.0568	.0517	.0445	.0357	.0306	.0273	.0249	.0218	.0200
O	.151	.134	.123	.107	.0953	.0870	.0806	.0708	.0636	.0568	.0518	.0445	.0359	.0309	.0276	.0254	.0224	.0206
Na	.151	.130	.118	.102	.0912	.0833	.0770	.0676	.0608	.0546	.0496	.0427	.0348	.0303	.0274	.0254	.0229	.0215
Mg	.160	.135	.122	.106	.0944	.0860	.0795	.0699	.0627	.0560	.0512	.0442	.0360	.0315	.0286	.0266	.0242	.0228
Al	.161	.134	.120	.103	.0922	.0840	.0777	.0683	.0614	.0548	.0500	.0432	.0353	.0310	.0282	.0264	.0241	.0229
Si	.172	.139	.125	.107	.0954	.0869	.0802	.0706	.0635	.0567	.0517	.0447	.0367	.0323	.0296	.0277	.0254	.0243
P	.174	.137	.122	.104	.0928	.0846	.0780	.0685	.0617	.0551	.0502	.0436	.0358	.0316	.0290	.0273	.0252	.0242
S	.188	.144	.127	.108	.0958	.0874	.0806	.0707	.0635	.0568	.0519	.0448	.0371	.0328	.0302	.0284	.0266	.0255
Ar	.188	.135	.117	.0977	.0867	.0790	.0730	.0638	.0573	.0512	.0468	.0407	.0338	.0301	.0279	.0266	.0248	.0241
K	.215	.149	.127	.106	.0938	.0852	.0786	.0689	.0618	.0552	.0505	.0438	.0365	.0327	.0305	.0289	.0274	.0267
Ca	.238	.158	.132	.109	.0965	.0876	.0809	.0708	.0634	.0566	.0518	.0451	.0376	.0338	.0316	.0302	.0285	.0280
Fe	.344	.183	.138	.106	.0919	.0828	.0762	.0664	.0595	.0531	.0485	.0424	.0361	.0330	.0313	.0304	.0295	.0294
Cu	.427	.206	.147	.108	.0916	.0820	.0751	.0654	.0585	.0521	.0476	.0418	.0357	.0330	.0316	.0309	.0303	.0305
Mo	1.03	.389	.225	.130	.0998	.0851	.0761	.0648	.0575	.0510	.0467	.0414	.0365	.0349	.0344	.0344	.0349	.0359
Sn	1.58	.563	.303	.153	.109	.0886	.0776	.0647	.0568	.0501	.0459	.0408	.0367	.0355	.0355	.0358	.0368	.0383
I	1.83	.648	.339	.165	.114	.0913	.0792	.0653	.0571	.0502	.0460	.0409	.0370	.0360	.0361	.0365	.0377	.0394
W	4.21	1.44	.708	.293	.174	.125	.101	.0763	.0640	.0544	.0492	.0437	.0405	.0402	.0409	.0418	.0438	.0465
Pt	4.75	1.64	.795	.324	.191	.135	.107	.0800	.0659	.0554	.0501	.0445	.0414	.0411	.0418	.0427	.0448	.0477
Tl	5.16	1.80	.866	.346	.204	.143	.112	.0824	.0675	.0563	.0508	.0452	.0420	.0416	.0423	.0433	.0454	.0484
Pb	5.29	1.84	.896	.356	.208	.145	.114	.0836	.0684	.0569	.0512	.0457	.0421	.0420	.0426	.0436	.0459	.0489
U	10.60	2.42	1.17	.452	.259	.176	.136	.0952	.0757	.0615	.0548	.0484	.0445	.0440	.0446	.0455	.0479	.0511
Air	.151	.134	.123	.106	.0953	.0868	.0804	.0706	.0636	.0567	.0517	.0445	.0357	.0307	.0274	.0250	.0220	.0202
NaI	1.57	.568	.305	.155	.111	.0901	.0789	.0657	.0577	.0508	.0465	.0412	.0367	.0351	.0347	.0347	.0354	.0366
H_2O	.167	.149	.136	.118	.106	.0966	.0896	.0786	.0706	.0630	.0575	.0493	.0396	.0339	.0301	.0275	.0240	.0219
Concrete	.169	.139	.124	.107	.0954	.0870	.0804	.0706	.0635	.0567	.0517	.0445	.0363	.0317	.0287	.0268	.0243	.0229
Tissue	.163	.144	.132	.115	.100	.0936	.0867	.0761	.0683	.0600	.0556	.0478	.0384	.0329	.0292	.0267	.0233	.0212

* From L. T. Templin, editor, *Reactor Physics Constants*, ANL-5800, 2nd ed., 1963; based on G. W. Grodstein, National Bureau of Standards Circular 583, 1957.

ตารางที่ 2.2 (8) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลของวัตถุต่าง ๆ ในหน่วย ซม.^{2}/กรัม

Material	Gamma-Ray Energy, MeV																	
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.50	2	3	4	5	6	8	10
H	.0411	.0487	.0531	.0575	.0589	.0591	.0590	.0575	.0557	.0533	.0509	.0467	.0401	.0354	.0318	.0291	.0252	.0255
Be	.0183	.0217	.0237	.0256	.0263	.0264	.0263	.0256	.0248	.0237	.0227	.0210	.0183	.0164	.0151	.0141	.0127	.0118
C	.0215	.0246	.0267	.0288	.0296	.0297	.0296	.0289	.0280	.0268	.0256	.0237	.0209	.0190	.0177	.0166	.0153	.0145
N	.0224	.0249	.0267	.0288	.0296	.0297	.0296	.0289	.0280	.0268	.0256	.0236	.0211	.0193	.0180	.0171	.0158	.0151
O	.0233	.0252	.0271	.0289	.0296	.0297	.0296	.0289	.0280	.0268	.0257	.0238	.0212	.0195	.0183	.0175	.0163	.0157
Na	.0289	.0258	.0266	.0279	.0283	.0284	.0284	.0276	.0268	.0257	.0246	.0229	.0207	.0194	.0185	.0179	.0171	.0168
Mg	.0335	.0276	.0278	.0290	.0294	.0293	.0292	.0285	.0276	.0265	.0254	.0237	.0215	.0203	.0194	.0188	.0182	.0180
Al	.0373	.0283	.0275	.0283	.0287	.0286	.0286	.0278	.0270	.0259	.0248	.0232	.0212	.0200	.0192	.0188	.0183	.0182
Si	.0435	.0300	.0286	.0291	.0293	.0290	.0290	.0282	.0274	.0263	.0252	.0236	.0217	.0206	.0198	.0194	.0190	.0189
P	.0501	.0315	.0292	.0289	.0290	.0290	.0287	.0280	.0271	.0260	.0250	.0234	.0216	.0206	.0200	.0197	.0194	.0195
S	.0601	.0351	.0310	.0301	.0301	.0300	.0298	.0288	.0279	.0268	.0258	.0242	.0224	.0215	.0209	.0206	.0206	.0206
Ar	.0729	.0368	.0302	.0278	.0274	.0272	.0270	.0260	.0252	.0242	.0233	.0220	.0206	.0199	.0195	.0195	.0194	.0197
K	.0909	.0433	.0340	.0304	.0298	.0295	.0291	.0282	.0272	.0261	.0251	.0237	.0222	.0217	.0214	.0212	.0215	.0219
Ca	.111	.0489	.0367	.0318	.0309	.0304	.0300	.0290	.0279	.0268	.0258	.0244	.0230	.0225	.0222	.0223	.0225	.0231
Fe	.225	.0810	.0489	.0340	.0307	.0294	.0287	.0274	.0261	.0250	.0242	.0231	.0224	.0224	.0227	.0231	.0239	.0250
Cu	.310	.107	.0594	.0368	.0316	.0296	.0286	.0271	.0260	.0247	.0237	.0229	.0223	.0227	.0231	.0237	.0248	.0261
Mo	.922	.294	.141	.0617	.0422	.0348	.0315	.0281	.0263	.0248	.0239	.0233	.0237	.0250	.0262	.0274	.0296	.0316
Sn	1.469	.471	.222	.0873	.0534	.0403	.0346	.0294	.0268	.0248	.0239	.0233	.0243	.0259	.0276	.0291	.0316	.0339
I	1.726	.557	.260	.100	.0589	.0433	.0366	.0303	.0274	.0252	.0241	.0236	.0247	.0265	.0283	.0299	.0327	.0353
W	4.112	1.356	.631	.230	.121	.0786	.0599	.0426	.0353	.0302	.0281	.0271	.0287	.0311	.0335	.0355	.0390	.0426
Pt	4.645	1.556	.719	.262	.138	.0892	.0666	.0465	.0375	.0315	.0293	.0280	.0296	.0320	.0343	.0365	.0400	.0438
Tl	5.057	1.717	.791	.285	.152	.0972	.0718	.0491	.0393	.0326	.0301	.0288	.0304	.0326	.0349	.0354	.0406	.0446
Pb	5.193	1.753	.821	.294	.156	.0994	.0738	.0505	.0402	.0332	.0306	.0293	.0305	.0330	.0352	.0373	.0412	.0450
U	9.63	2.337	1.096	.392	.208	.132	.0968	.0628	.0482	.0383	.0346	.0324	.0332	.0352	.0374	.0394	.0443	.0474
Air	.0233	.0251	.0268	.0288	.0296	.0297	.0296	.0289	.0280	.0268	.0256	.0238	.0211	.0194	.0181	.0172	.0160	.0153
NaI	1.466	.476	.224	.0889	.0542	.0410	.0354	.0299	.0273	.0253	.0242	.0235	.0241	.0254	.0268	.0281	.0303	.0325
H_2O	.0253	.0278	.0300	.0321	.0328	.0330	.0329	.0321	.0311	.0298	.0285	.0264	.0233	.0213	.0198	.0188	.0173	.0165
Concrete	.0416	.0300	.0289	.0294	.0297	.0296	.0295	.0287	.0278	.0272	.0256	.0239	.0216	.0203	.0194	.0188	.0180	.0177
Tissue	.0271	.0282	.0293	.0312	.0317	.0320	.0319	.0311	.0300	.0288	.0276	.0256	.0220	.0206	.0192	.0182	.0168	.0160

* From L. T. Templin, editor, *Reactor Physics Constants*, ANL-5800, 2nd ed., 1963; based on G. W. Grodstein, National Bureau of Standards Circular 583, 1957.

ตารางที่ 2.3 (8) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของวัตถุต่าง ๆ ในหน่วย ซม.^{2}/กรัม

Material	E_0, MeV	μ_{eN}					
		1	2	4	7	10	15
Water	0.5	2.63	4.29	9.05	20.0	35.9	74.9
	1.0	2.26	3.39	6.27	11.5	18.0	30.8
	2.0	1.84	2.63	4.28	6.96	9.87	14.4
	3.0	1.69	2.31	3.57	5.51	7.48	10.8
	4.0	1.58	2.10	3.12	4.63	6.19	8.54
	6.0	1.45	1.86	2.63	3.76	4.86	6.78
	8.0	1.36	1.69	2.30	3.16	4.00	5.47
Iron	0.5	2.07	2.94	4.87	8.31	12.4	20.6
	1.0	1.92	2.74	4.57	7.81	11.6	18.9
	2.0	1.69	2.35	3.76	6.11	8.78	13.7
	3.0	1.58	2.13	3.32	5.26	7.41	11.4
	4.0	1.48	1.90	2.95	4.61	6.46	9.92
	6.0	1.35	1.71	2.48	3.81	5.35	8.39
	8.0	1.27	1.55	2.17	3.27	4.58	7.33
	10.0	1.22	1.44	1.95	2.89	4.07	6.70
Tin	1.0	1.65	2.24	3.40	5.18	7.19	10.5
	2.0	1.58	2.13	3.27	5.12	7.13	11.0
	4.0	1.39	1.80	2.69	4.31	6.30	
	6.0	1.27	1.57	2.27	3.72	5.77	11.0
	10.0	1.16	1.33	1.77	2.81	4.53	9.68
Lead	0.5	1.24	1.39	1.63	1.87	2.08	
	1.0	1.38	1.68	2.18	2.80	3.40	4.20
	2.0	1.40	1.76	2.41	3.36	4.35	5.94
	3.0	1.36	1.71	2.42	3.55	4.82	7.18
	4.0	1.28	1.56	2.18	3.29	4.69	7.70
	6.0	1.19	1.40	1.87	2.97	4.69	9.53
	8.0	1.14	1.30	1.69	2.61	4.18	9.08
	10.0	1.11	1.24	1.54	2.27	3.54	7.70
Uranium	0.5	1.17	1.28	1.45	1.60	1.73	
	1.0	1.30	1.53	1.90	2.32	2.70	3.60
	2.0	1.33	1.62	2.15	2.87	3.56	4.89
	3.0	1.29	1.57	2.13	3.02	3.99	5.94
	4.0	1.25	1.49	2.02	2.94	4.06	6.47
	6.0	1.18	1.37	1.82	2.74	4.12	7.79
	8.0	1.13	1.27	1.61	2.39	3.65	7.36
	10.0	1.10	1.21	1.48	2.12	3.21	6.58

ตารางที่ 2.4[8] แสดงค่าเอกซ์โพเชอร์ บิลด์อัพ แฟคเตอร์ ของต้นกำเนิดรังสีชนิดแผ่นรังสีทิศทางเดียว

จะหาค่า ϕ_b ได้โดยแทนสมการที่ 2.22 และ 2.27 ลงในสมการ 2.26 จะได้ว่า

$$\phi_b = \phi_0 B_m(\mu x) e^{-\mu x} \qquad \text{.....2.28}$$

หรือ

$$\phi_b = \phi_\mu B_m(\mu x) \qquad \text{.....2.29}$$

2.6 <u>ผลของรังสีต่อมนุษยชาติ</u>

วัตถุประสงค์สำคัญในการใช้เครื่องกำบังรังสีก็เพื่อความปลอดภัยของบุคคลที่เกี่ยวข้องและประชาชนทั่วไป ซึ่งปัจจุบันปริมาณการใช้รังสีในงานต่าง ๆ มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อรังสีกระทบร่างกายก็จะถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมของร่างกายก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ ถึงแม้ว่ารังสีชนิดต่าง ๆ จะถ่ายเทพลังงานเท่ากัน แต่ก็ทำให้เกิดความเสียหายแก่ร่างกายไม่เท่ากัน รังสีแอลฟา จะทำความเสียหายมากกว่ารังสีแกมมา แต่รังสีแกมมาสามารถเข้าทำลายเนื้อเยื่อภายในได้มากกว่า อันตรายจากรังสีจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

(1) <u>ปริมาณรังสี</u> ถ้ารังสีมากจะเกิดความเสียหายมาก

(2) <u>อัตราการรับรังสี</u> การได้รับรังสีด้วยอัตราที่มากก็จะก่อให้เกิดความเสียหายมากกว่าการรับด้วยอัตราที่น้อย ทั้งนี้เปรียบเทียบปริมาณรังสีที่เท่ากัน

(3) <u>ชนิดของรังสี</u> ต้องพิจารณาว่ารังสีที่ได้รับเป็นรังสีประเภทใด รับรังสีภายนอกหรือภายในร่างกาย นอกจากนี้รังสีชนิดเดียวกันถ้ามีพลังงานต่างกันการก่อให้เกิดความเสียหายก็ต่างกันด้วย

(4) <u>ชนิดของสารรังสี</u> สารรังสีแต่ละชนิดก็ให้รังสีแตกต่างกัน บางอย่างอาจจะให้รังสีเบตาอย่างเดียว บางอย่างให้ทั้งรังสีแอลฟาและแกมมา

(5) <u>ความไวของสารรังสีต่ออวัยวะร่างกาย</u> เป็นกรณีที่สารรังสีเข้าไปในร่างกายแล้วไปสะสมอยู่ในอวัยวะใดอวัยวะหนึ่งเป็นพิเศษ

รังสีไม่เพียงแต่ทำให้เกิดอันตรายกับผู้รับรังสีเท่านั้น ยังมีผลต่อลูกหลานของบุคคลนั้นด้วย ดังนั้นจึงอาจจะแบ่งผลเนื่องจากการรับรังสีของร่างกายเป็น 2 ประเภทคือ

2.6.1 Somatic effect หมายถึง ผลที่เกิดขึ้นกับร่างกายส่วนหนึ่งส่วนใดของบุคคลที่ถูกรังสี อาจเป็นผลที่เกิดขึ้นจากการรับรังสีปริมาณสูงในช่วงเวลาสั้นๆ (Acute somatic effect) หรือเป็นผลจากการรับรังสีปริมาณไม่มากนักแต่เป็นเวลานาน (Chromic somatic effect)

2.6.2 Genetic effect เป็นผลที่เกิดขึ้นจากเซลสืบพันธุ์ซึ่งไม่แสดงอาการให้เห็น แต่การเปลี่ยนแปลงจะปรากฏในรุ่นลูกหลาน

W.B. dose rad.	Appro. time of death after radiated	Mode of death
10,000 & above	few minutes to 48 hr	Central nervous System Syndrome
1,000 - 10,000	3 - 5 day	gastointestinal Syndrome
200 - 1,000	10 - 30 day	bone narrow syndome.
less than 200	a few weeks before the unirradiated control animals	radiating life shortening

ตารางที่ 2.5 (7) แสดงช่วงระยะเวลาและปริมาณรังสีที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์

I15919511

ดังนั้นคณะกรรมาธิการว่าด้วยการป้องกันรังสีระหว่างประเทศ (International Commission on Radiation Protection) ICRP ได้ทำการวิจัยถึงระดับรังสีที่ปลอดภัยต่อมนุษยชาติ แล้วกำหนดปริมาณรังสีสูงสุดที่ยอมให้รับได้ (Maximum permissible dose) MPD ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ นั้นอยู่ในตารางที่ 2.5 ค่านี้จะต้องสมดุลย์ระหว่างอันตรายที่เป็นไปได้ที่สังคมยอมรับกันกับผลประโยชน์ที่สังคมได้รับจากการใช้รังสี ICRP แบ่งบุคคลออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

(1) บุคคลที่มีอายุมากกว่า 18 ปีและทำงานเกี่ยวข้องกับรังสี

(2) บุคคลทั่ว ๆ ไป

ในที่นี้เรายึดถือค่าที่ปลอดภัยสำหรับบุคคลที่ทำงานด้านรังสีซึ่งรับรังสีทั้งปวง คือ รังสีที่รับตลอดทั้งปีต้องไม่เกิน 5 แรม (rem) และในช่วง 3 เดือนใด ๆ การรับรังสีต้องไม่เกิน 3 แรมด้วย แต่ในการปฏิบัติงานจะต้องพยายามให้ได้รับรังสีน้อยที่สุด ในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉินทางรังสีหรืออุบัติเหตุ ต้องมีบุคคลเข้าไประงับเหตุนั้นให้คืนสภาพปกติ กำหนดหลักการไว้สำหรับการเข้าไปปฏิบัติงานนั้น ๆ ดังนี้

(1) ยอมให้ผู้เข้าไปทำงานครั้งนั้นรับรังสีได้ไม่เกิน 2 เท่าที่กำหนดไว้ให้ได้รับตลอดปี

(2) คนที่เข้าไปทำงานนี้ต้องได้รับรังสีเมื่อรวมครั้งนี้แล้วไม่เกินค่าที่คำนวณได้จาก 5 (อายุ - 18)

(3) จะต้องเป็นผู้ที่ไม่เคยได้รับรังสีครั้งเดียวเกิน 3 แรม เมื่อ 12 เดือนก่อน

(4) ต้องเป็นผู้ที่ไม่เคยได้รับรังสีจากอุบัติเหตุมากกว่า 5 เท่า ของค่าที่ให้รับได้ตลอดปี

(5) หญิงมีครรภ์ไม่ให้ทำงานในกรณีนี้

Organ or tissue	MPD for adults exposed in the course of their work	Dose limits for member of the public
gonad, red bone	3 rems in a quarter of year	0.5 rems in a year
narrow whole body	5 rems in a year or if necessary 5 (N-18) rems when N is age in years	
skin,bone,thyroid	15 rems in a quarter 30 rems in a year	3 rems in a years
hands and forearms feet and ankles	40 rems in a quarter (strickly 38 rems) 75 rems in a year	7.5 rems in a year
other single organ	8 rems in a quarter 15 rems in a year	1.5 rems in a year

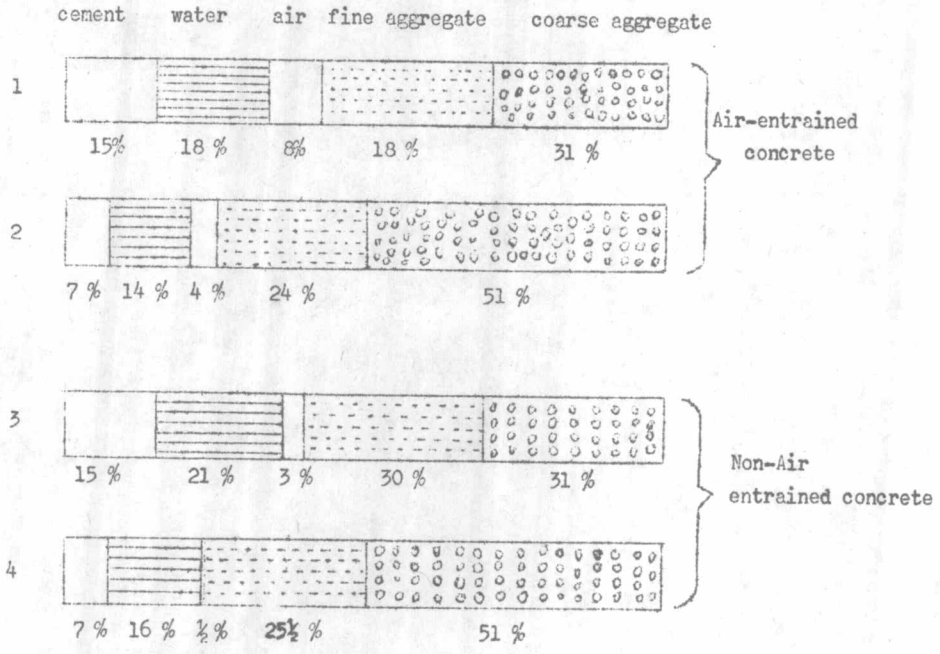
ตารางที่ 2.6 (7) แสดงรายละเอียดของ MPD ต่ออวัยวะส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย

2.7 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคอนกรีต

คอนกรีต (concrete) หมายถึง ส่วนผสมที่มีสัดส่วนพอเหมาะของปูนซีเมนต์ วัสดุผสมและน้ำ เป็นวัสดุเปรียบเสมือนหินที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้ เป็นวัสดุโครงสร้างซึ่งดีกว่าวัสดุอื่น ๆ เช่น อิฐ ไม้ เหล็ก เพราะสามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะและขนาดได้ตามต้องการ โครงสร้างของคอนกรีตที่เห็นกันอยู่ทั่วไป ได้แก่ พื้น คาน ผนัง เสาของอาคาร ถนน ฯลฯ คอนกรีตแบ่งได้หลายชนิด เช่น คอนกรีตกาซ (Aerated concrete) คอนกรีตเสริมเหล็ก (Ferro-concrete) คอนกรีตอัดแรง (Pre-stressed concrete) คอนกรีตหนัก (Heavy concrete) ซึ่งสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับแต่ละจุดประสงค์ของงานโครงสร้าง

เนื้อคอนกรีตอาจแยกออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ วัสดุผสม(Aggregate) และซีเมนต์เพสท์ (paste)โดยทั่วไปวัสดุผสมยังแบ่งออกเป็น 2 พวกคือวัสดุผสมละเอียก (fine aggregate) และวัสดุผสมหยาบ (coarse aggregate) วัสดุผสมละเอียดหมายถึง วัสดุที่มีขนาดเล็กที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ได้ ซึ่งได้แก่ ทราย ส่วนวัสดุผสมหยาบ หมายถึง วัสดุผสมที่ก้อนโตไม่ผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ได้แก่ หิน หรือกรวดส่วนซีเมนต์เพสท์ หรือ เพสท์ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ และอากาศ

ในเนื้อคอนกรีตทั่วไปมีปริมาตรของซีเมนต์เพสท์ประมาณ 25 ถึง 40 เปอร์เซนต์ ซึ่งเป็นปริมาตรของปูนซีเมนต์ 7 ถึง 15 เปอร์เซนต์ น้ำ 14 ถึง 21 เปอร์เซนต์ และปริมาตรของอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่างประมาณ 8 เปอร์เซนต์ ดังรูป 2.22 ดังนั้น จึงมีวัสดุผสมอยู่ประมาณ 60 ถึง 80 เปอร์เซนต์ ของปริมาตรทั้งหมด การเลือกใช้วัสดุผสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง วัสดุผสมที่จะใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตจะต้องแข็งแรงรับแรงอัดได้ดี ทนทานไม่ขยายตัวมากนัก และสะอาด



รูปที่ 2. 22 (2) แสดงปริมาตรของส่วนผสมคอนกรีต ปริมาตรส่วนผสมที่ 1 และ 3 เป็นส่วนผสมที่แก่ปูนมีวัสดุผสมน้อย ส่วนปริมาตรส่วนผสมที่ 2 และ 4 เป็นส่วนผสมที่อ่อนปูนมีวัสดุผสมมาก

โดยไม่มีสารจำพวกที่จะทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของคอนกรีต นอกจากนี้วัสดุผสมต้องมีส่วนขนาดคละ (gardation) ที่ดี เพื่อช่วยให้ได้คอนกรีตมีเนื้อแน่น สม่ำเสมอ มีช่องว่างน้อย ทำให้เปลืองซีเมนต์เพสท์น้อยลงและราคาถูก

ในเนื้อคอนกรีต ซีเมนต์เพสท์ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวประสาน โดยจะไปเคลือบหรือหุ้มเม็ดทรายและก้อนหินทั้งหมด และยึดให้ติดเข้าด้วยกันเป็นก้อนแข็งรวมทั้งจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดหินและทรายอีกด้วย ทำให้มีเนื้อแน่นขึ้น ฉะนั้นความแข็งแรงของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของซีเมนต์เพสท์นี้ด้วย

สำหรับคุณภาพของซีเมนต์เพสท์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (water-cement ratio) ที่ใช้ในส่วนผสม ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เรียกว่า ไฮเดรชัน (hydration) ปฏิกิริยาทางเคมีนี้ขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิและความชื้น และจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรก ๆ แล้วช้าลงตามลำดับในตอนหลังภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

การใช้งานทั่วไปกำลังของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญซึ่งต้องนำมาพิจารณาเป็นอันดับแรก จากนั้นจึงพิจารณาถึงคุณสมบัติด้านอื่น ๆ และวัตถุประสงค์ในการใช้งาน สำหรับกำลังของคอนกรีตนั้นขึ้นโดยตรงกับปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตซึ่งเกี่ยวโยงไปถึงการทำปฏิกิริยาทางเคมี ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่ดำเนินติดต่อกันไป กำลังของคอนกรีตจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำที่ใช้ผสมเพิ่มขึ้นและจะเพิ่มขึ้นตามอายุของมันเมื่อคอนกรีตยังอยู่ในสภาพที่ชื้นหรือยังมีน้ำเหลือปนอยู่ในส่วนผสม เพราะถ้าคอนกรีตแห้งสนิทแล้วการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์จะหยุดทันที ฉะนั้นการบ่มคอนกรีตในขณะก่อสร้างจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้กำลังของคอนกรีตสูงตามต้องการ โดยทั่วไปกำลังของคอนกรีตขึ้นกับสิ่งต่อไปนี้

2.7.1 <u>ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้</u> ปูนซีเมนต์ต่างชนิดกันจะให้กำลังของคอนกรีตต่างกันไป ความแตกต่างของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความละเอียดของเม็ดปูนซีเมนต์ที่ใช้ ถ้าเม็ดปูนซีเมนต์ยิ่งละเอียดกำลังจะสูงในระยะแรก แต่ในช่วงระยะเวลายาวนานออกไปจะให้กำลังของคอนกรีตเท่ากันในที่สุด

2.7.2 <u>ลักษณะและรูปร่างของมวลรวม</u> สำหรับส่วนผสมที่มีความเข้มข้นเท่ากัน การใช้มวลรวมที่มีรูปร่างค่อนข้างกลมนั้นจะให้กำลังสูงกว่า เพราะต้องการอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า

2.7.3 <u>อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์</u> สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตที่กำหนดให้อย่างหนึ่ง ๆ กำลังของคอนกรีตขึ้นโดยตรงกับอัตราส่วนของน้ำกับปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสม แต่จะต้องเป็นส่วนผสมที่เหลวพอเทได้

2.7.4 ช่วงเวลาที่มีการผสมคอนกรีตและสภาพแวดล้อม การผสมคอนกรีตที่ให้กำลังสูงควรเป็นเวลาเที่ยงวันที่มีแสงแดดพอควร

2.7.5 การกระทุ้งและสั่นคอนกรีตให้แน่น เพื่อเป็นการลดช่องว่างในคอนกรีตทำให้มีกำลังสูง

2.7.6 วิธีบ่มและอายุของคอนกรีต การบ่มคอนกรีตโดยใช้ความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมทำให้ได้คอนกรีตกำลังสูง และป้องกันรอยร้าวที่ผิวของคอนกรีตอันเกิดจากการสูญเสียน้ำไปอย่างรวดเร็ว กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามอายุ และจะมีกำลังเกือบคงที่หลังจาก 90 วันไปแล้ว

2.7.7 ผลจากการเก็บตัวของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วในคอนกรีตที่ผสมใหม่ ๆ จะลดกำลังของคอนกรีตและพิกัดยืดหยุ่น

จะเห็นได้ว่างานคอนกรีตมีรายละเอียดและยุ่งยากพอสมควร เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีและมีคุณสมบัติตามต้องการ การทำงานไม่อาจกำหนดได้ง่าย ๆ จะต้องอาศัยความชำนาญและความสังเกตด้วย

2.8 คอนกรีตหนัก (Heavy concrete)

ปัจจุบันมีการใช้พลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติมากขึ้นเช่น โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งอาคารเหล่านี้ต้องเกี่ยวข้องกับกัมมันตภาพรังสีต่าง ๆ เช่น รังสีเบตา แกมมา และนิวตรอน ฉะนั้นจึงต้องก่อสร้างอาคารที่ใช้ในการดังกล่าวให้มีความสามารถต้านทานการแผ่รังสี ซึ่งอาจจะทำได้โดยก่อสร้างอาคารที่มีผนังคอนกรีตหนามาก ๆ แต่พบว่าคอนกรีตจะต้านทานและดูดกลืนรังสีได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของคอนกรีต สำหรับคอนกรีตธรรมดาประกอบด้วยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำเรียกว่า วัสดุเบา (light element) ซึ่งสามารถดูดกลืนนิวตรอนได้มากกว่ารังสีแกมมา เพื่อที่จะเพิ่มความสามารถในการกำบังรังสีแกมมา วัสดุที่ใช้ในการทำคอนกรีตจะต้องมีเลขอะตอม (atomic number) สูงหรืออีกนัยหนึ่ง

คือมีความถ่วงจำเพาะสูง จะได้คอนกรีตที่เรียกว่า คอนกรีตหนัก ซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

วัสดุที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุผสมในการทำคอนกรีตหนักมีหลายชนิด เช่น แร่แมกนีไทท์ (Magnetite) ลิโมไนท์ (Limonite) จีโอไทท์ (Geothite) แบไรท์ (Baryte) และอิลมีไนท์ (Ilimenite) ฯลฯ แต่อย่างไรก็ตามจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติ ราคาของมวลรวมและค่าก่อสร้างคอนกรีตหนักด้วย

คอนกรีตหนักที่นิยมใช้ก่อสร้างเป็นเครื่องกำบังรังสีของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หรือห้องปฏิบัติการรังสีสูง คือ แบไรท์คอนกรีต ซึ่งใช้แร่แบไรท์เป็นทั้งวัสดุหยาบและวัสดุละเอียด แร่แบไรท์มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 5 คอนกรีตหนักชนิดนี้จึงมีความหนาแน่นมากพอที่จะกำบังรังสีแกมมาดีกว่าคอนกรีตธรรมดามาก อีกทั้งยังกำบังนิวตรอนอีกด้วยเพราะว่าค่าภาคตัดขวาง (cross section) ของแบเรียมมีค่าสูง คอนกรีตที่ทำจากแร่แบไรท์ไม่ค่อยทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศนัก แต่คุณสมบัติอื่น ๆ ดีมาก โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และพัวส์ซองเรโช พอ ๆกับคอนกรีตธรรมดา แต่มีการหดตัวน้อยกว่าประมาณ $\frac{1}{4}$ ถึง $\frac{1}{3}$ เท่า การขยายตัวเมื่ออุณหภูมิ $4^{\circ}c$ ถึง $38^{\circ}c$ มีค่าเป็นสองเท่าของคอนกรีตธรรมดา ความร้อนจำเพาะและการนำความร้อนน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา

MATERIAL	CHEMICAL COMPOSITION (percentages by weight)	TRUE DENSITY	
		g/cm³	lb/ft³
Water	H_2O	1	62.4
Earth, dry	Variable	1.15–1.6	72–100
Sand, dry	90% SiO_2	2.3–2.6	142–162
Concrete, ordinary (1 : 2 : 4).	12.2% cement, 28.5% sand, 52.0% stone, 7.3% water.	2.4	150
Limestone, dry	90% $CaCO_3$	2.5–2.6	156–162
Aluminum	Al	2.7	168
Ilmenite concrete	39.5% Fe, 14.7%Ti, 35%O, 3.5% Si, 2% Al, 3% Ca, 1.5% Mg, 1% H + C.	3.3	206
Limonite, dry	50% Fe, Si, and Al; 10% H_2O	3.3–3.8	206–237
Hematite, dry	34%Fe, 30% $CaCO_3$, 15% SiO_2	3.3–5.2	206–324
Barytes concrete	48% coarse barytes, 36% fine barytes, 11% cement, 5% water.	3.6	225
Magnetite concrete	45% coarse magnetite, 40% fine magnetite, 10% cement, 5% water.	3.7	230
Barytes, dry	95% $BaSO_4$	4.3–4.5	268–281
Ilmenite, dry	$FeO.TiO_2$	4.4–4.9	274–306
Ferrophosphorus concrete.	52% coarse FeP, 34% fine FeP, 9% cement, 5% water.	4.8	300
Limonite-steel concrete.	70% coarse steel, 18% fine limonite, 8% cement, 4% water.	5.0	312
Magnetite, dry	60% Fe, some Ti, Si, and Al	5.1	318
Magnetite-steel concrete.	67% coarse steel, 22% fine magnetite, 7% cement, 4% water.	5.2	327
Ferrophosphorus, dry	70 to 72% Fe as phosphides	6.5	405
Ductile cast iron	92.36% Fe, 3.50% C, 2.75% Si, 1.00% Ni, 0.35%Mn, 0.04% P.	7.1	444
Galena, dry	80% Pb as sulfide	7.5	468
Iron, bar	Fe	7.6	474
Lead, bar	Pb	11.3–11.4	705–713
Mercury, liquid metal	Hg	13.5	843
Mallory 1000 metal, Hevimet	90% W, 6% Ni, 4% Cu	16.9	1058
Uranium, solid metal	U	18.9	1180
Tungsten, solid metal	W	19.3	1202
Gold, solid metal	Au	19.3	1202
Platinum, solid metal	Pt	21.5	1340

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าความหนาแน่นและส่วนผสมของคอนกรีตชนิดต่าง ๆ

2.9 การกำบังรังสี (Radiation Shielding)

วัตถุประสงค์ของการกำบังรังสี เพื่อป้องกันบุคคลและอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ จากการทำลายของรังสีที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกริยานิวเคลียร์ รวมทั้งการกำบังรังสีจากต้นกำเนิดกัมมันตภาพรังสีด้วย รังสีแอลฟาและเบต้าเป็นอนุภาคที่มีประจุและมีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ จึงไม่มีปัญหาในการกำบังรังสีชนิดนี้ แต่รังสีแกมมาและนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้าจึงสามารถทะลุทะลวงผ่านวัตถุได้ดี นิวตรอนทุกตัวเมื่อเริ่มเกิดขึ้นจะเป็นนิวตรอนเร็ว (fast neutron) การกำบังนิวตรอนจึงต้องลดพลังงานของนิวตรอนให้เป็นเทอร์มาลนิวตรอน (thermal neutron) จากนั้นจึงถูกจับโดยนิวคลีไอของสารที่ดูดกลืน สำหรับการกำบังรังสีแกมมาก็เพื่อลดปริมาณของรังสีแกมมา ดังนั้นวัสดุที่เหมาะสมจะใช้เป็นเครื่องกำบังรังสี อาจแบ่งได้ตามจุดประสงค์ดังนี้

1. เพื่อลดพลังงานของนิวตรอน โดยเกิดการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างนิวตรอนเร็วกับนิวเคลียสของธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ ๆ เช่น ไฮโดรเจน การชนดังกล่าวพลังงานและโมเมนต์ตัมจะคงที่ พลังงานเกือบทั้งหมดของนิวตรอนจะถ่ายเทให้กับไฮโดรเจน น้ำซึ่งมีปริมาณของไฮโดรเจน 6.7×10^{22} อะตอม ต่อ ซม.^{3} เป็นวัสดุกำบังนิวตรอนได้ดีในกรณีนี้ เพราะว่าน้ำมีราคาถูก หาได้ง่ายและช่วยถ่ายเทความร้อนด้วย การจัดหาน้ำเพื่อใช้เป็นเครื่องกำบังรังสีต้องพิจารณาถึงสารละลายที่ปนอยู่ในน้ำด้วย เพราะอาจจะเป็นสาเหตุทำให้น้ำกลายเป็นไอเร็ว และเพิ่มปริมาตรของน้ำเกินระดับที่ปลอดภัย ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์ถึงปริมาณของสิ่งเจือปนในน้ำที่จะนำมาใช้ ซึ่งอาจจะต้องมีการกลั่นให้บริสุทธิ์ขึ้น นักวิทยาศาสตร์ชื่อ N.A. Lange ได้วิเคราะห์ถึงปริมาณสิ่งเจือปนในน้ำที่นำมาจากสถานที่ต่าง ๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกา แล้วแสดงให้เห็นในรูปของตารางในหนังสือ Handbook of Chemistry, 7 th ed., Handbook Publishers, Sandusky, Ohio, 1949 ตัวอย่างเช่น

น้ำที่นำมาจากแม่น้ำใน New England และทะเลสาบใน New York มีสารละลายเจือปนอยู่ประมาณ 30 พีพีเอ็ม อันประกอบด้วยไบคาร์บอเนต 14 พีพีเอ็ม ซัลเฟต 9.7 พีพีเอ็ม แคลเซียม 5.8 พีพีเอ็ม ซิลิก้า 2.4 พีพีเอ็ม แมกนีเซียม 1.4 พีพีเอ็ม และอื่น ๆ เป็นน้ำอ่อนนำไปใช้ได้

ส่วนน้ำจากทางน้ำ St.Lawrence มีความกระด้างปานกลาง ปริมาณของสารละลายเจือปนประมาณ 165 พีพีเอ็ม โดยมีไบคาร์บอเนต 119 พีพีเอ็ม แคลเซียม 36 พีพีเอ็ม ซัลเฟต 22 พีพีเอ็ม ซิลิก้า 12 พีพีเอ็ม การนำไปใช้จะต้องลดความกระด้างลงก่อน

เครื่องกำบังรังสีที่สามารถลดพลังงานนิวตรอนได้ดีอีกชนิดหนึ่งคือ โพลีเอทิลีน (Polyethyline $(CH_2)n$) ซึ่งมีปริมาณของไฮโดรเจนมากกว่าน้ำ มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ไฮโดรเจนและคาร์บอน จากรายงาน WAPD - B(L)-456 กล่าวถึงคุณสมบัติของโพลีเอทิลีนไว้ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว = $9\ 10^{-5}$ / องศา ฟ.
ความถ่วงจำเพาะ = 0.92
ค่าการนำความร้อน = 2.2 บีทียู / ชม. / ฟุต^2
ปริมาณของไฮโดรเจนมากกว่าน้ำ 1.29 เท่า
อ่อนตัวลงเมื่ออุณหภูมิ = 240 องศา ฟ.
มีความต้านทานต่อกรด น้ำและน้ำมัน ดี

โพลีเอทิลีนจะลดพลังงานของนิวตรอนได้ดี แต่จะส่งรังสีแกมมาออกมาได้อีก และไม่มีความคงทนนัก ดังนั้นจึงถูกใช้เป็นเครื่องกำบังนิวตรอนครั้งที่สอง

2. <u>เพื่อดูดกลืนนิวตรอน</u> เทอร์มาลนิวตรอนจะถูกดูดกลืนโดยการเกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ชนิด (n,α) , (n,p)หรือ (n,γ) โบรอนจะเป็นตัวดูดกลืนนิวตรอนได้ดี เครื่องกำบังรังสีที่ใช้มักจะผสมสารประกอบของโบรอนลงไปด้วย เช่น โบราล ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นที่ประกอบด้วย โบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) 30-50 เปอร์เซนต์ หุ้มด้วยอลูมิเนียมหนาประมาณ 0.02 นิ้ว รายละเอียดของโบราล V.L.McKinney และ T.Rockwell ได้รายงานใน AECD-3625 เช่น กล่าวถึงคุณสมบัติของโบราลไว้ดังนี้

- ส่วนประกอบของโบราลหนา $\frac{1}{4}$ นิ้ว มี
  - โบรอน 15.7 เปอร์เซนต์
  - คาร์บอน 4.3 เปอร์เซนต์
  - อลูมิเนียม 80.0 เปอร์เซนต์
- ความหนาแน่น = 2.53 กรัม / ซม.^{3}
- การนำความร้อนที่ 200 องศา ฟ. = 25 บีทียู/ชม./ฟุต/ °ฟ.

และ T.Rockwell ได้กล่าวถึงชนิดต่าง ๆ ของเครื่องกำบังรังสีที่มีโบรอนผสมอยู่ในปริมาณต่าง ๆ กัน เปรียบเทียบกับราคาเมื่อปี 1950 ในรายงาน AECD-3352 ดังตารางที่ 2.8

3. <u>เพื่อลดปริมาณของรังสีแกมมา</u> การลดลงของรังสีแกมมาเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับวัสดุกำบัง สำหรับงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะการกำบังรังสีแกมมาเท่านั้น อันได้กล่าวถึงรายละเอียดของอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับวัตถุไว้แล้วนั้น เครื่องกำบังรังสีแกมมาจะต้องเป็นธาตุหรือสารประกอบหนัก เช่น เหล็ก,ตะกั่ว หรือวัตถุที่มีความหนาแน่นสูง อันจะได้กล่าวถึงรายละเอียดพอสมควรดังนี้

Material	Grams of boron/cm^3	Boron, wt.%	Total density	Dollars/lb of boron	Dollars/lb of total (large lots)	Other elements, g/cm^3
Crystalline boron, theoretical density and purity	2.33	100	2.33	150	150	
Crystalline boron, hot-pressed with B_2O_3	2.00	98 max.	2.04			
Amorphous boron, hot-pressed with B_2O_3	1.8	80	2.3	20	15	Magnesium and carbon impurities
B_4C, Norton abrasive grade	2.0	80	2.5	~9	~7	<1% impurities. Some iron and carbon
B_4C, Norton metallurgical grade	1.8	78	2.3	~6	~4.5	
$B_{10}H_{14}$ (a paraffin-like material)	0.83	88.4	0.94	High	High	0.108H
Boral (1/4-in. sheet and aluminum wrapper)	1.012	40	2.5	7.50	~3	1.3Al; 0.25C
Boroxal (1/4-in. sheet and aluminum wrapper)	0.305	15	2.0	1.33	~0.20	1.0Al; 0.7O
B_2O_3	0.575	31	1.85	0.485	~0.15	1.3O
Colemanite	0.0606	16	2.3	0.234	0.038	0.056H
Ammonium pentaborate	0.40	20	2	0.530	0.106	0.074H
Borax	0.197	11.4	1.73	0.155	0.018	0.092H
Boroffin (20% B_2O_3)	0.062	6.2	1.0	1.39	0.086	0.089H
Saturated H_3BO_3 solution in H_2O (3%)	0.0093	0.93	1.0	0.272	0.0014	0.119H
Mi cement (magnesium oxychloride plus colemanite)	0.0845	4.45	1.90	0.655	0.0281	0.072H
Ferroboron	1.0	~20	5.0	7.50	1.50	Iron and carbon
Boron steel	0.152	~2.0	7.6	8.00	0.16	Iron, carbon, and manganese
Lead borate glass (assumed 60% PbB_2O_4 and 40% B_2O_3)	0.627	16.8	3.73			
Scrap pyrex glass	0.104	44.0	2.6	1.48	0.06	
Boron plastic, Monsanto	0.081	3.8	2.14			0.078H
Boron plastic, ORNL (to be reported)	1.07	67	1.6			0.027H

ตารางที่ 2.8[15] แสดงคุณสมบัติสารประกอบของโบรอนชนิดต่าง ๆ ที่ใช้กำบังรังสี

3.1 <u>เหล็ก</u> (เหล็กกล้าและเหล็กไร้สนิม) มักจะสร้างเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เพราะสามารถกำบังความร้อนเนื่องจากรังสีและกำบังรังสีแกมมาได้ดี เพราะมีจุดหลอมเหลวและความหนาแน่นสูง แต่จะมีปัญหาเกิดการแผ่รังสีครั้งที่สอง เนื่องจากนิวตรอนถูกดูดกลืนโดยธาตุบางชนิดที่มีอยู่ในเหล็ก เช่น แมงกานีส แทนทาลัม และโคบอลท์ สำหรับเหล็กกล้าที่มีความถ่วงจำเพาะ 7.8 ควรมีปริมาณของแมงกานีสมากที่สุดเพียง 0.9 เปอร์เซนต์

3.2 <u>ตะกั่ว</u> เพราะว่าตะกั่วมีความหนาแน่นสูงจึงมีคุณสมบัติในการกำบังรังสีแกมมาได้ดีมาก โดยจะเกิดอันตรกิริยาโฟโตอิเลคตริค เอฟเฟคท์ เนื่องจากรังสีแกมมาพลังงานต่ำ และมีค่าภาคตัดขวางของการเกิดอันตรกิริยาแพร์โปรดัคชันมากสำหรับรังสีแกมมาพลังงานสูง แต่ที่พลังงาน 3 เอ็มอีวี จะมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ตะกั่วจะมีคุณสมบัติในด้านโครงสร้างไม่ดี ที่อุณหภูมิมากกว่า 150 องศา ฟ. และยังมีราคาแพงอีกด้วย การควบคุมคุณสมบัติของตะกั่วเป็นเรื่องที่จำเป็นสำหรับการกำบังรังสีที่มีค่าฟลักซ์สูง เพราะตะกั่วอาจจะเป็นพิษได้ คุณสมบัติทั่ว ๆ ไปของตะกั่วมีดังนี้

เลขอะตอม = 82

น้ำหนักอะตอม = 207.21

ปริมาตรอะตอม = 18.27 ซม.^{3} / โมล

ความถ่วงจำเพาะ = 11.35

จุดหลอมเหลว = 618 องศา ฟ.

ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์-

การขยายตัวเชิงเส้น (17-100° ซ.) = 29.3 10^{-6}/°ซ.

และ ASTM spec. B 29-43 กำหนดคุณภาพของตะกั่วที่จะใช้เป็นเครื่องกำบังรังสีว่าจะต้องมีปริมาณของธาตุตะกั่วอย่างน้อยที่สุด 99.72 เปอร์เซนต์

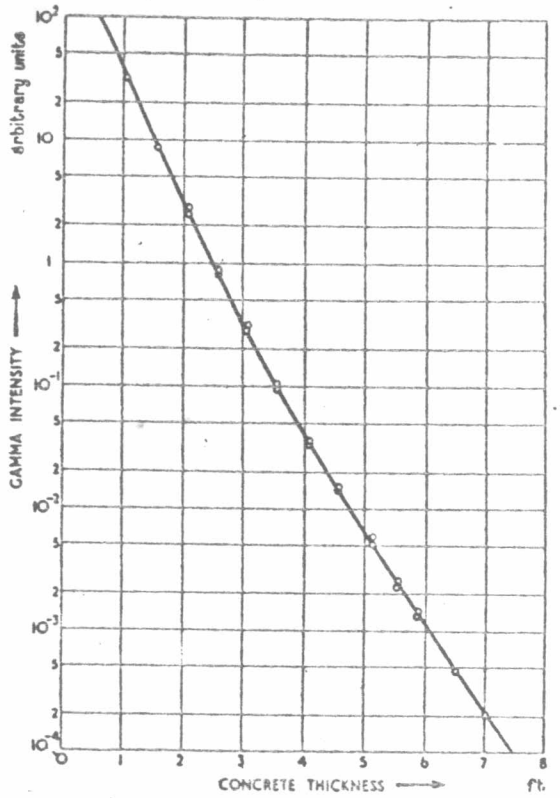
3.3 คอนกรีต เครื่องกำบังรังสีแกมมาที่นิยมใช้ทั่วไปแล้ว คือ คอนกรีตเพราะมีราคาถูกสามารถก่อสร้างได้หลายรูปแบบและกำบังรังสีแกมมาได้ดี อันจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของคอนกรีตที่ใช้กำบังรังสีแกมมา ดังนี้

3.3.1 ความหนาของคอนกรีต

นักวิทยาศาสตร์ 2 ท่านคือ Skillings และ Mured ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาขนาดต่าง ๆ ของคอนกรีตธรรมดา ซึ่งมีความหนาแน่น 2.4 กรัม / ซม.^{3} กับความเข้มของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านในรูปของกราฟ (จากการอ้างถึงของ B.T.Price,C.C.Horton และ K.T.Spinney ในหนังสือ Radiation Shielding) ซึ่งความเข้มของรังสีแกมมาจะลดลงเมื่อความหนาของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ที่แสดงไว้เกือบจะเป็นเส้นตรงที่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.23

3.3.2 ความหนาแน่นของคอนกรีต

จากสมการการลดลงของรังสีแกมมาเมื่อผ่านวัสดุกำบัง จะเห็นว่าความหนาแน่นของวัสดุกำบังจะมีผลต่อการลดลงของรังสีแกมมาด้วย ดังนั้นถ้าเพิ่มความหนาแน่นของคอนกรีตธรรมดา โดยการใช้วัสดุผสมที่มีความหนาแน่นมากในการหล่อคอนกรีตดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ก็จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำบังรังสีแกมมา จากการรวบรวมของ EVERITT P. BLIZARD ในหนังสือ Nuclear Engineering Handbook เปรียบเทียบคุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมาที่พลังงาน 6 เอ็มอีวี ของคอนกรีตธรรมดา ความหนาแน่น 2.7 กรัม / ซม.^{3} กับคอนกรีตหนักที่มีแบไรท์เป็นวัสดุผสมความหนาแน่น 3.49 กรัม / ซม.^{3} โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ลดของรังสีแกมมาดังนี้ ดังตารางที่ 2.9



รูปที่ 2.23[14] แสดงปริมาณความเข้มของรังสีแกมมาที่ลดลงในคอนกรีต

Element	Atomic weight, A	ρ_i, density in concrete, g/cm³	Neutron attenuation*		γ-ray attenuation for 6 Mev†	
			Σ_r/ρ, cm²/g	Σ_r, cm⁻¹	μ/ρ, cm²/g	μ, cm⁻¹
Ordinary (Portland) Concrete						
O	16.0	1.103	0.041	0.0452	0.0255	0.0282
Si	28.06	0.2815	0.0295	0.0083	0.0279	0.0079
Al	26.97	0.0330	0.0301	0.0010	0.0266	0.0009
Fe	55.85	0.0183	0.0200	0.0004	0.0305	0.0006
Ca	40.08	0.7712	0.024	0.0185	0.0302	0.0233
C	12.01	0.0761	0.050	0.0038	0.0246	0.0019
Na	23.00	0.0116	0.033	0.0004	0.0255	0.0003
K	39.10	0.0079	0.0245	0.0002	0.0289	0.0002
H	1.0	0.0250	0.602	0.0150	0.0449	0.0011
Mg	24.32	0.0426	0.032	0.0014	0.0267	0.0011
Total		2.37		0.0942		0.0655
Barytes Concrete						
Ba	137.36	1.470	0.0124	0.0182	0.0367	0.0539
O	16.0	1.090	0.041	0.0447	0.0255	0.0278
S	32.07	0.348	0.0275	0.0096	0.0287	0.0100
Fe	55.85	0.307	0.0200	0.0061	0.0305	0.0094
Ca	40.08	0.159	0.024	0.0038	0.0302	0.0048
Si	28.06	0.061	0.0295	0.0018	0.0279	0.0017
Al	26.97	0.020	0.0301	0.0006	0.0266	0.0005
H	1.0	0.015	0.602	0.0090	0.0449	0.0007
Mg	24.32	0.013	0.032	0.0004	0.0267	0.0003
Na	23.0	0.005	0.033	0.0002	0.0255	0.0001
Mn	54.93	0.003	0.0202	0.0001	0.0294	0.0001
Total		3.49		0.0945		0.1093

ตารางที่ 2.9[16] แสดงคุณสมบัติและส่วนประกอบของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสี

เมื่อปี ค.ศ.1955 J.A.Lane รายงานในหนังสือ Nucleonics (Theodore Rockwell III) รวบรวมรายละเอียดไว้ในหนังสือ Reactor Shielding Design Manual) ว่า สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ให้ค่าฟลักซสูง (10^{11}) คอนกรีตที่ใช้กำบังรังสีควรมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 3.0-4.5 กรัม / ซม.^{3} เมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นก็จะเป็นการลดความหนาของคอนกรีตลง Lane ได้เปรียบเทียบความหนาของคอนกรีตที่สามารถกำบังรังสีแกมมาพลังงาน 2-3 เอ็มอีวี ได้ปริมาณเท่ากันดังตารางที่ 2.10

Lane ยังเสนอแนะไว้ว่า โครงสร้างของคอนกรีตไม่ควรได้รับรังสีเกินกว่า 2×10^{11} เอ็มอีวี / ซม.^{3} / วินาที เพราะว่าปริมาณฟลักซนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น 100 บีทียู / ชม./ ฟุต^2 ซึ่งเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับคอนกรีตถึง 50 องศา ฟ.

3.3.3 ราคาของคอนกรีต

ถึงแม้ว่าคอนกรีตเมื่อมีความหนาแน่นสูงขึ้นจะกำบังรังสีได้ดีขึ้น แต่ถ้าพิจารณาของคอนกรีตแล้ว ยิ่งคอนกรีตมีความหนาแน่นสูง ก็จะมีราคาสูงด้วย เพราะราคาของวัสดุผสมสูงขึ้นและจำเป็นต้องใช้วัสดุผสมในปริมาณมาก ดวย H.S. Daris ได้เปรียบเทียบราคาและชนิดของคอนกรีตไว้ในหนังสือ Nucleonics, 13(6):62 (1955) (รวบรวมไว้ในหนังสือ Nuclear Engineering Handbook โดย Everitt P.Bliyard) ดังนี้

คอนกรีต	น้ำหนัก (ปอนด์/ฟุต^3)	ราคา/ปอนด์ (เซนต)
คอนกรีตธรรมดา	154	2.4
แมกนีไทท์คอนกรีต	232	3.7
ลิโมไนท์คอนกรีต	263	15.5

Shield material	Specific gravity	Absorption,† cm^{-1}	Needed thickness for 10^8 attenuation, ft	Aggregate, tons/cu yard
Water	1.0	0.029	21	0
Standard concrete	2.3	0.067	9.1	1.65
Barytes concrete	3.5	0.100	6.0	2.66
Iron-aggregate concrete	5.6	0.162	3.8	4.45

ตารางที่ 2.10[16] แสดงความหนาของวัสดุกำบังรังสีต่างชนิดกัน

Material	Density, g/cm^3	Grams of hydrogen/cm^3	Cents/lb	Dollars/cu ft	Compressive strength, psi
Portland cement, wet, in special concrete	2.0	0.100	0.62	0.62	4000
Portland cement, dry but well cured	1.8	0.060	0.62	0.62	4000
Portland cement, poorly cured	1.6	0.018	0.62	0.62	2000
Magnesium oxychloride	1.8	0.078	2.56	2.88	6000
Lead glycerine	3.8	0.079	20.7	38.76	4500
Plaster of paris	2.3	0.041	0.53	0.76	4000
Lumnite + $CaSO_4$ (BMI)	1.9	0.06			5000
$3CaO{\cdot}5Al_2O_3$ (BMI)	~1.8	0.07			3000
Paraffin ($\sim CH_2$)	0.9	0.128	7.0	3.93	
Pitch	1.1	0.132	2.5	1.72	
Synthetic elastomers ($\sim CH_2$)	1.0	0.143	2.0	12.50	
Water (or silica gel)	1.0	0.111	0.13	0.082	
For comparison:					
Wood (oak; maple)	0.7	0.042	3.8	1.67	4500
Masonite	1.3	0.078	10.0	8.10	

ตารางที่ 2.11[16] แสดงคุณสมบัติของซีเมนต์ที่ช่วยในการกำบังรังสี

Property	Ordinary	Barytes	Iron shot	Ferrophosphorus
Mixture (wt. %)	Portland cement 8·2% Sand 28·7% Gravel 56·4% Water 6·7%	Coarse barytes agg. (1 in.) 45·2 Fine barytes agg. ($\frac{3}{8}$ in.) 39·2 Portland cement 9·4 Water 6·2	Iron shot ($\frac{1}{4}$ in.–1 in. dia) 50·4 SAE shot $\frac{1}{8}$ in. dia. 22·8 SAE shot $\frac{1}{32}$ in. dia. 15·2 Portland cement 8·9 Water 2·7	Portland cement 8·04 Coarse f.p. 57 Fine f.p. 30·7 Water 4·24
Density	2·3 g cm^{-3} (144 lb ft^{-3})	3·5 g cm^{-3} (219 lb ft^{-3})	5·9 g cm^{-3} (370 lb ft^{-3})	4·8 g cm^{-3} (300 lb ft^{-3})
Crushing strength at 28 days	3500 lb $in.^{-2}$	3600 lb $in.^{-2}$ (4200 at 112 days)	3663 lb $in.^{-2}$	3870 lb $in.^{-2}$ (120 days)
Transverse rupture strength	1000 lb $in.^{-2}$	845 lb $in.^{-2}$	~970 lb $in.^{-2}$	—

ตารางที่ 2.12[14] แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตชนิดต่าง ๆ

3.3.4 การเลือกใช้วัสดุผสม

การเลือกใช้วัสดุผสมของคอนกรีตหนัก ซึ่งมักจะใช้สินแร่ที่มีในธรรมชาติที่ความหนาแน่นสูง หรือใช้วัสดุอื่น เช่น เหล็กตัดเป็นชิ้น ๆ ซึ่งไม่สามารถพิจารณาเลือกใช้เหมือนกันได้ในแต่ละแห่ง เนื่องจากจะต้องคำนึงถึงแห่งที่มี ราคา คุณภาพ และค่าขนส่งด้วย H.S.Daris ได้ศึกษารายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับคุณภาพและราคาค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัสดุผสมจากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกา แล้วรายงานใน Nucleonic, 13:6 (1955) เช่น

แร่แบไรท์ จาก Tennessee มีปริมาณของ $BaSO_4$ มากกว่า 92 % ความถ่วงจำเพาะ 4.20 ปริมาณของเหล็ก 1-10% โดยน้ำหนัก ค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัสดุ 22-30$/ tcn

แร่แบไรท์ จาก Nevada มีปริมาณของ $BaSO_4$ มากกว่า 90 % ความถ่วงจำเพาะ 4.28 ปริมาณของเหล็กมากกว่า 1% ค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัสดุ 30-40$/tcn

สำหรับประเทศอื่น ๆ ก็ได้มีการศึกษาและเปรียบเทียบราคาของวัสดุที่ใช้กำบังรังสีเช่นกัน เช่น ประเทศอังกฤษ E.W. Sicebotham และ T. Standen เป็นผู้ศึกษาแล้วรายงานใน IGE-R13 (1955)

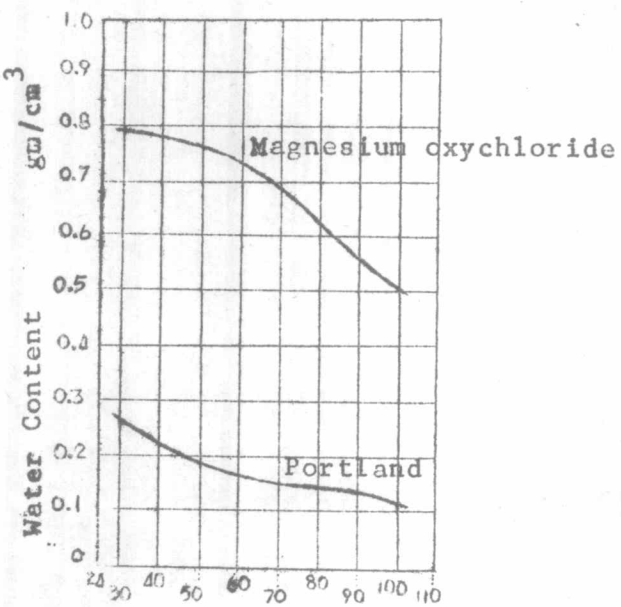
3.3.5 การผสมคอนกรีต

ขบวนการผสมคอนกรีตให้มีความหนาแน่นสูงซึ่งต้องพิจารณาขนาดของวัสดุผสมและมีขนาดคละที่ดี ในขณะที่ต้องสามารถทำงานได้ วัสดุผสมหยาบอาจจะมีขนาดตั้งแต่ $\frac{3}{4}$ - $1\frac{1}{2}$ นิ้ว และมีขนาดใหญ่ขึ้นสำหรับโครงสร้างที่ใหญ่ อัตราส่วนของซีเมนต์ต่อวัสดุผสมอาจจะมีค่าตั้งแต่ 1:6 สำหรับคอนกรีตที่ต้องการกำลัง และ 1:2

สำหรับคอนกรีตที่ไม่จำเป็นต้องรับกำลัง และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ มักจะอยู่ในช่วง 0.37-0.7 ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังและคุณสมบัติอื่นของคอนกรีต รวมทั้งความจำเป็นของงานคอนกรีตด้วย C.C.Furnas และ F.O. Anderegg ได้ยกตัวอย่างของการผสมคอนกรีตไว้ในหนังสือ Ind.Eng.Chem 23:1052 (1931) ว่าการผสมคอนกรีตให้มีช่องว่างน้อยที่สุด เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากที่สุด เมื่อใช้ซีเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.001 นิ้ว ขนาดของวัสดุหยาบ 2.2-1 นิ้ว และขนาดของวัสดุละเอียดควรจะเป็น 28 เมช โดยใช้อัตราส่วนผสม $1:2\frac{1}{2}:6\frac{1}{2}$

3.3.6 การเลือกใช้ซีเมนต์

ซีเมนต์ที่ใช้ในงานคอนกรีตมักจะเป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา แต่ถ้าปริมาณของไฮโดรเจนในซีเมนต์มากขึ้นก็จะช่วยในการกำบังรังสีดีขึ้น เช่น ซีเมนต์แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ (Magnesium oxychloride) A.E. Ravlish และ J.C.Wynd ได้เปรียบเทียบปริมาณน้ำในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีเมนต์แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไว้ใน AECD-3007 ในรูปของกราฟ ดังรูป



ได้มีนักวิทยาศาสตร์อีกหลายท่านศึกษารายละเอียดคุณสมบัติของซีเมนต์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำบังรังสี เช่น ผลรายงานใน AECD-3004 โดย M.J. Snyder, C.A. Burkhart และ J.W. Clegg ใน AECD-3007 A.E. Parlish และ J.C. Wynd และ T. Rockwell ได้รายงานใน AECD-3352 ถึงคุณสมบัติของซีเมนต์ชนิดพิเศษที่ใช้ในคอนกรีตหนัก ดังตารางที่ 2.11

3.3.7 สารผสมในคอนกรีต

มีสารประกอบหลายชนิดเมื่อผสมลงในคอนกรีตแล้วจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำบังรังสีให้กับคอนกรีต เช่น โคลีมาไนท์ (colemanite) ซึ่งเป็นสารประกอบของโบรอน มีสูตรทางเคมีเป็น $2CaO\text{-}3B_2O_3\text{-}5H_2O$ แต่ก็ทำให้ราคาของคอนกรีตที่มีโบรอนผสมแพงขึ้นอีก 2-3 เท่าของคอนกรีตที่ไม่มีโบรอน

ลิโมไนท์ (limonite) ซึ่งมีสูตรเคมี $2Fe_2O_3\text{-}2H_2O$ ก็จะเป็นวัสดุผสมที่ใช้กำบังรังสีได้ดีขึ้น เพราะนอกจากจะเป็นแร่ที่มีความหนาแน่นสูงแล้ว ก็ยังมีโมเลกุลของน้ำอยู่ในส่วนประกอบด้วย

3.3.8 การควบคุมความหนาแน่น

การควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตในขณะเทก็เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำบังรังสี โดยการใช้เครื่องเขย่าคอนกรีตเป็นการลดช่องว่างในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและสม่ำเสมอ แต่ถ้าใช้เครื่องเขย่ามากไปก็จะเกิดการแยกตัวของคอนกรีตในบริเวณบนสุดและล่างสุด โดยจะเกิดมอร์ต้า (วัสดุละเอียดและซีเมนต์) ขึ้นด้านบนของคอนกรีต ทำให้เครื่องกำบังรังสีมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน

3.3.9 กำลังของคอนกรีต

กำลังของคอนกรีต ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ขนาดและชนิดของวัสดุผสม B.T.Price,C.C.Horton และ K.T.Spinney ได้รวบรวมไว้ในหนังสือ Radiation Shielding จากรายงานของ H.S Davis ใน Nucleonics,13 (June) 60 (1955) H.E.Hungerford, USAEC Reactor Handbook,Physics (1955) และ R.B. Gallaher,A.S.kitzed ใน ORNL 1414(1953) ดังตารางที่ 2.11

จะเห็นได้ว่าอาจจะสามารถผสมคอนกรีตหนักได้ต่าง ๆ ชนิดกันและมีความสามารถกำบังรังสีแกมมาและนิวตรอนเร็วได้ต่าง ๆ กัน E.W.Sidebotham และ T. Stander ได้ศึกษาคุณสมบัตินี้แล้วรายงานใน IGE-R13 พร้อมกับเปรียบเทียบกับเครื่องกำบังรังสีชนิดอื่น เช่น น้ำ ตะกั่ว เหล็ก โบราล ฯลฯ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.13

3.3.10 คอนกรีตในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

การกำบังรังสีแกมมาในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีความสำคัญมาก เพราะว่ารังสีแกมมาเกิดขึ้นได้ในหลายกรณี ดังนี้

- Prompt fission gamma-rays ซึ่งเกิดขึ้นภายใน core และถูกกำบังโดย core

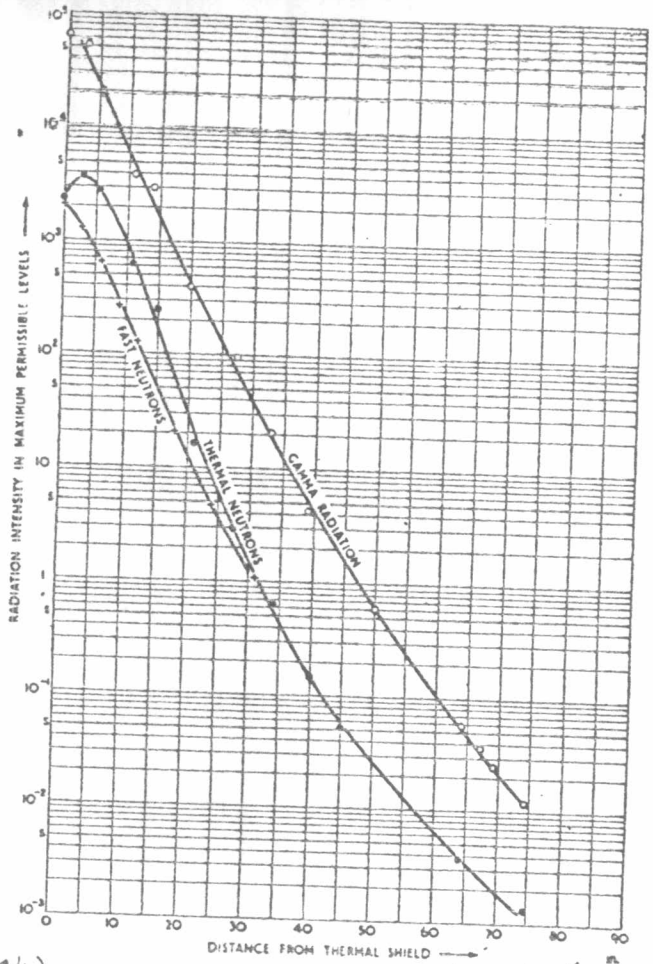
- Fission product decay gamma-ray เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงหลังจากปิดเครื่องปฏิกรณ์

- Inelastic gamma-rays ถูกส่งออกมาจากนิวคลีไอที่ไม่อยู่ตัวเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอนกับวัสดุกำบัง

ตารางที่ 2.13[14] แสดงคุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมาและนิวตรอนของเครื่องกำบังรังสี

Material	Density, ρ lb. ft.$^{-3}$	Cost of shield shillings per ft^3	Gamma attenuation: μ (5 MeV), (cm^{-1})	Gamma attenuation: Relative value = constant $\times \frac{\mu}{\text{cost}}$	Fast neutron attenuation: Σ_{rem} (cm^{-1})	Fast neutron attenuation: Relative value* = constant $\times \frac{\Sigma_{rem}}{\text{cost}}$	Remarks
1 : 2 : 4 P.C. concrete, whinstone aggregate	155·0	12·0	0·0715	1·0	0·084	1·0	As used in Windscale biological shields
1 : 2 : 4 P.C. concrete, limonite aggregate	170·4	15·17	0·0817	0·904	0·104	0·99	Bog iron ore, mainly hydrated Fe_2O_3
1 : 2 : 4 P.C. concrete, hematite aggregate	207·4	32·18	0·0999	0·521	0·105	0·47	Iron ore, mainly Fe_2O_3
1 : 2 : 4 P.C. concrete, ilmenite aggregate	196·9	19·97	0·0944	0·793	0·102	0·73	Titanium ore, ex Malaya, >50% TiO_2
1 : 2 : 4 P.C. concrete, amblygonite aggregate	146·4	43·11	0·0695	0·271	0·081	0·27	Lithium ore, ex Portugese E. Africa
1 : 2 : 4 P.C. concrete, galena aggregate	266·4	148·7	0·1627	0·184	0·084	0·08	Lead ore, mainly PbS
1 : 2 : 4 P.C. concrete, barytes aggregate	188·5	30·7	0·0952	0·521	0·088	0·41	Barium ore, mainly $BaSO_4$
1 : 2 : 4 P.C. concrete, borocalcite	129·5	34·39	0·0599	0·292	0·088	0·37	Boron ore, approx. 45% B_2O_3
1 : 2 : 4 P.C. concrete, blast furnace slag aggregate	143·0	10·46	0·0665	1·067	0·077	1·06	Mainly calcium, silicon, and al. oxides
1 : 2 : 4 P.C. concrete, copper refinery slag aggregate	169·1	11·64	0·0756	1·090	0·089	1·09	Contains oxides of iron, silicon, aluminium, zinc, and calcium
1 : 2 : 4 P.C. concrete, steel punchings aggregate	276·0	27·14	0·1377	0·852	0·130	0·69	Punchings obtained as scrap from metal perforators
1 : 2 : 4 P.C. concrete, lead aggregate	369·5	312·0	0·2410	0·129	0·094	0·04	Lead in the form of shot
P.C. concrete with 86% by wt. cast iron shot (used for Fig. 6.7.2)	333·0	72·2	0·1655	0·385	0·153	0·30	Max. density obtained by using graded shot
Portland cement, set	124·0	18·4	0·0568	0·518	0·075	0·59	Portland cement, fully hydrated and set
Ciment Fondu, set	112·0	42·8	0·0624	0·245	0·089	0·30	40% Al_2O_3, hydrated
High-alumina cement set	112·0	368·0	0·0584	0·027	0·111	0·04	"Secar 250" 70% Al_2O_3 hydrated
Plaster of Paris, set	144·0	37·9	0·0688	0·305	0·106	0·40	Hydrated calcium sulphate, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Magnesium oxychloride cement, set	135·0	92·0	0·0631	0·115	0·136	0·21	Hydrated $MgCl_2$ and MgO
82% by wt. steel punchings in MO cement	344·0	31·2	0·1655	0·890	0·183	0·84	Max. practical density, using these materials
Calcined magnesite	219·0	39·1	0·0991	0·425	0·109	0·40	Commercial dehydrated magnesia, MgO
Common brick	138·0	10·8	0·0665	1·034	0·071	0·95	Cost includes placing with P.C. mortar
Concrete brick	150·0	12·2	0·0686	0·944	0·080	0·94	Cost includes placing with P.C. mortar
Steel plate	488·0	446·0	0·2410	0·091	0·208	0·07	0·25% C, cost includes erection (Windscale thermal shield)
Water	62·5	0·01	0·0303	508·6	0·097	1400	Untreated town's water. Cost does not include containment
60% steel punchings, by vol. in water	320·0	10·27	0·1620	2·643	0·164	2·3	Cost does not include containment
Asphalt	81·2	13·0	0·0376	0·485	0·099	1·1	Oil refinery by-product. Cost does not include containment
Lead	710·0	685·0	0·4860	0·119	0·122	0·026	Material cost only
Cadmium	534·0	6,220	0·035	0·0009	0·141	0·003	Material cost only
Boron	145·0	115,000	0·0398	0·0001	0·141	0·0002	Material cost only
Boron carbide	159·0	3,180	0·0615	0·0032	0·151	0·007	Material cost only (B_4C)
Boral	160·0	19,200	0·0747	0·0006	0·098	0·0007	Sintered B_4C-Al complex. Cost includes installation
Boron steel	481·0	463	0·2410	0·087	0·205	0·064	0·15% B, cost includes erection
Lithium hydride	51·2	20,400	0·0220	0·0002	0·083	0·0006	Material cost only
Titanium hydride	245·0	26,950	0·1255	0·0008	0·187	0·001	Material cost only
Liquid ammonia	38·8	38·8	0·0056	0·024	0·091	0·34	Material cost only
Kerosene	56·0	10·5	0·0274	0·438	0·125	1·7	Material cost only. Comm. grade paraffin
Polythene	58·0	760	0·0282	0·0062	0·124	0·02	Material cost only. Polymerized ethylene $(CH_2)_n$
Oil refinery residue	58·0	4·9	0·0273	0·935	0·101	3·0	Material cost only. Mainly C, H, and S

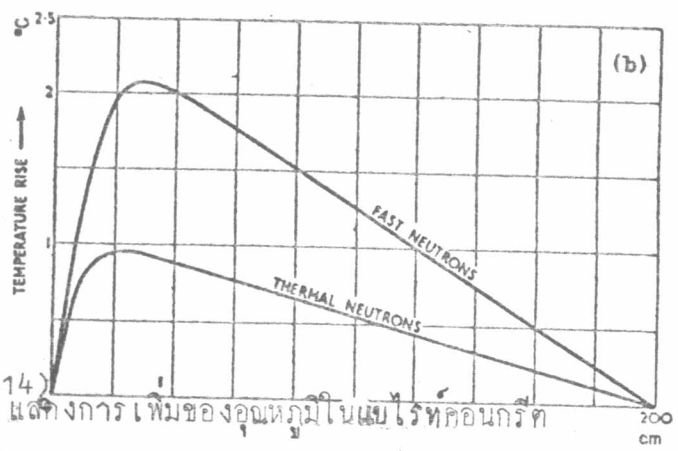
* The fast neutron "relative value" is really of significance only for hydrogenous materials.
20 shillings = 1 pound (£).
The abbreviation P.C. denotes Portland cement.



รูปที่ 2.24[14] แสดงการลดลงของปริมาณรังสีในแบไรท์คอนกรีต

Block	Time (months)	Thermal flux $\times 10^{13}$ (n cm^{-2} sec^{-1})	Integrated thermal flux n cm^{-2} ($\times 10^{19}$)	Total rate of energy deposition (watts cm^{-3})	Weight loss (per cent)	Rupture stress (lb in.$^{-2}$)
Q	2	1·1	0·5	0·011	2	1073
R	2	1·1	0·5	0·011	2·1	1076
S	6	1·2	1·6	0·012	2·4	918
T	6	1·2	1·6	0·012	2·6	810
U	12	1·3	3	0·013	2·2	810
V	12	1·3	3	0·013	2·6	940
W	24	1·4	7	0·014	—	734
X	24	1·4	7	0·014	—	627

ตารางที่ 2.14[14] แสดงผลการเปลี่ยนแปลงในคอนกรีตที่ใช้กำบังรังสี



รูปที่ 2.25[14] แสดงการเพิ่มของอุณหภูมิในแบไรท์คอนกรีต

- Capture gamma-rays เนื่องจากเทอร์มาลนิวตรอนถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียสของวัสดุกำบังแล้วส่งรังสีแกมมาออกมา

- Activation gamma-rays เกิดจากนิวเคลียสของกัมมันตภาพรังสีในเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากการดูดกลืนนิวตรอน

ดังนั้นการกำบังรังสีแกมมาในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ต้องพิจารณาเลือกใช้วัสดุหลายชนิดตามความเหมาะสมของตำแหน่งและการถ่ายเทความร้อน โดยจะมีการกำบังรังสีหลายชั้น สำหรับคอนกรีตหนักจะเป็นการกำบังรังสีหลังจากการกำบังรังสีเนื่องจากความร้อนแล้ว (thermal shield). จากผลงานของ J.R.Harrison, A.M. Mills และ D.Bendell รายงานใน AERE RP/R1604 (1955) ศึกษาการลดความเข้มของรังสีแกมมาในแบไรท์คอนกรีตที่ระยะห่างจาก Thermal shield ต่าง ๆ กัน ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิด BEPO ซึ่งให้พลังงาน 6.3MW มี natural uranium เป็นเชื้อเพลิง และมีกราไฟท์เป็น modurator, reflector และ thermal shield เป็นเหล็กกล้าหนา 6 นิ้ว แบไรท์คอนกรีตกำบังรังสีแกมมามีความหนาแน่น 3.1 กรัม/ซม.^{3} แสดงไว้ในรูปที่ 2.24 ซึ่งจะเห็นว่าความเข้มของรังสีแกมมาจะลดลงเมื่อระยะห่างออกไปจากเครื่องกำบังความร้อนเนื่องจากรังสีมากขึ้น

3.3.11 การเปลี่ยนแปลงในคอนกรีต

การรับรังสีของคอนกรีตทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในคอนกรีตด้วย แต่ก็มิใช่การเสียหายที่มากนัก เช่น การทดสอบคอนกรีตกำบังรังสีของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ Oak Ridge ที่เดินเครื่องไปแล้วเป็นเวลา 5 ปีครึ่ง ปรากฏว่าไม่เกิดการเสียหายที่เป็นอันตราย แต่ก็ต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของคอนกรีต เช่น การทดลองของ Chisholm และ Batten นำแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาด $2 \times 2 \times 8$ นิ้ว^3 ผสมโดยใช้อัตราส่วนของซีเมนต์ต่อวัสดุผสม 1:3 ขนาดของวัสดุผสม $\frac{3}{8}$ นิ้ว คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้พอสมควร นำแท่งตัวอย่างไปอาบรังสีที่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิด BEPO

คอนกรีตได้รับ Thermal flux ประมาณ 10^{12} neutron cm^{-2} sec^{-1} และอัตราการรับรังสีแกมมา 10^{6} R/hr คอนกรีตได้รับพลังงานทั้งสิ้น 0.01 วัตต์/ซม.^{3} ผลการทดลองนี้ B.T.Price, C.C.Horton และ K.T.Spinney ได้นำแสดงไว้ในหนังสือ Radiation Shielding ดังตารางที่ 2.14

3.3.12 <u>ความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต</u>

การเปลี่ยนแปลงของคอนกรีตเนื่องจากความร้อนทำให้น้ำหนักและกำลังของคอนกรีตลดลง จึงต้องมีการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นและการกระจายของความร้อนในคอนกรีต เนื่องจากการกำบังรังสีแกมมาและนิวตรอน ผลงานของ D.B.Halliday ใน AERE R/R1963 ให้ค่า

-การนำความร้อนของคอนกรีตธรรมดา = 0.00865 วัตต์/ซม./องศา ซ. = 0.5 บีทียู/ชม./ฟุต/องศา ฟ.

-การนำความร้อนของแบไรท์คอนกรีต = 0.00655 วัตต์/ซม./องศา ซ. = 0.38 บีทียู/ชม./ฟุต/องศา ฟ.

โดยอุณหภูมิของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น 1 องศา ซ. ต่อพลังงานที่กระทบ 1 มิลลิวัตต์ ต่อ พื้นที่ 1 ซม.^{2} การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแบไรท์หนา 2 เมตร แสดงไว้ดังรูปกราฟ 2.15

เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีต จึงจำเป็นต้องใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก ช่วยในการถ่ายเทความร้อนและเป็นการเพิ่มกำลังของคอนกรีตด้วย และมักใช้ในบริเวณที่มีโครงสร้างสำคัญ

เมื่อมีการนำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้อย่างแพร่หลายขึ้นในปี พ.ศ.2507 จึงมีหน่วยงานที่มีชื่อว่า Radiation Shielding Information Center (RSIC)

ในประเทศสหรัฐอเมริกาเพื่อให้คำแนะนำเกี่ยวกับการกำบังรังสีเพื่อความปลอดภัย และพัฒนาวัสดุที่ใช้กำบังรังสีให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น อีกทั้งมีการคำนวณ , ออกแบบเครื่องกำบังรังสีสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ เช่น Fast-Breeder Reactor, High-Temperature Gas Cool Reactor (HTGR) สำหรับการผสมคอนกรีตหนักแล้วไม่ใคร่มีส่วนเปลี่ยนแปลงนัก นอกจากการเพิ่มสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการกำบังรังสีลงไปในคอนกรีต และการใช้คอนกรีตอัดแรง แต่การคำนวณหาขนาดและความหนาของคอนกรีตและเครื่องกำบังรังสีชนิดอื่น ได้พัฒนาขึ้นมากโดยการใช้การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ และออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการขนย้ายและเก็บแท่งเชื้อเพลิงด้วย

สำหรับประเทศไทยแล้ว ยังไม่มีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่นำพลังงานมาใช้ประโยชน์โดยตรง การกำบังรังสีแกมมาที่จำเป็นได้แก่ ห้องโคบอลท์-60 เพื่อรักษาผู้ป่วยเป็นโรคมะเร็ง ห้องเอกซ์เรย์ ซึ่งใช้ผนังคอนกรีตธรรมดาเพื่อกำบังรังสีแกมมา เช่น ห้องโคบอลท์-60 ของโรงพยาบาลพระมงกุฎเกล้าใช้ผนังคอนกรีตหนา 110 ซม. พ.ศ.2520 คุณสุรัตน์ วินิจสร ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ศึกษาการวัดรังสีสะท้อนจากคนไข้ที่ได้รับการรักษาโดยโคบอลท์-60 ด้วยเครื่องมือเทอร์โมลูมิเนสเซนต์ และคำนวณหาความหนาของผนังคอนกรีตธรรมดา ที่ยอมให้รังสีทะลุผ่าน 0.1 R ต่อสัปดาห์ เปรียบเทียบกับผนังคอนกรีตที่มีอยู่จริง ได้ผลว่า ห้องโคบอลท์-60 ที่มีอยู่ในปัจจุบันส่วนมากมีผนังหนาเกินความจำเป็นทั้งนี้ก็เพื่อความปลอดภัย แต่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเนื้อที่มาก ถ้าหากใช้คอนกรีตหนักแล้วก็จะเป็นการลดความหนาของผนังคอนกรีตลง