หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

รังสีจากเครื่องปฏิกรณ์

2.1 รังสีจากเครื่องปฏิกรณ์

สสารใดๆ ที่นำเข้าไปวางไว้ภายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย มักได้รับผลกระทบจากรังสีชนิดต่างๆที่เกิดขึ้นภายในแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯซึ่งรังสีเหล่านี้มาจากการที่อนุภาคนิวตรอนเข้าไปทำปฏิกิริยากับแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งมียูเรเนียม - 235 เป็นส่วนประกอบ ในการแตกตัวแต่ละครั้งจะมีการปลดปล่อยนิวตรอนออกมา 2 - 3 อนุภาค ขณะเดียวกันจะเกิดรังสีและพลังงานจำนวนมาก ดังตารางที่ 2.1 อนุภาคนิวตรอนที่หลุดออกมาจากการแตกตัวแต่ละครั้ง ส่วนหนึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาชนิดต่างๆ กับแท่งเชื้อเพลิงและสสารที่อยู่ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ อีกส่วนหนึ่งจะได้รับการลดความเร็วโดยน้ำซึ่งเป็นสารหน่วงนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ฯ จนกระทั่งกลายเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ เรียกว่า เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) ที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับธาตุได้แทบทุกชนิด เนื่องจากธาตุส่วนมากสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับเทอร์มัลนิวตรอนสูง ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาแบบ (n, γ) ส่วนรังสีแกมมาที่เกิดออกมาพร้อมกับปฏิกิริยาการแตกตัวก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับสสาร โดยเกิดปรากฏการณ์ขึ้น 2 แบบ คือ photoelectric effect และ compton scatteing จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลให้เกิดอิเล็กตรอนความเร็วสูง

นอกจากนี้ อนุภาคบีตาที่เกิดเนื่องจาก การสลายตัวของ fission product และการที่อนุภาคนิวตรอนเข้าทำปฏิกิริยากับสสาร จนกระทั่ง สสารได้รับการเหนี่ยวนำให้กลายสภาพเป็นสารกัมมันตรังสี เมื่อเวลาผ่านไป สารกัมมันตรังสีที่ได้รับการเหนี่ยวนำ จะสลายตัวให้อนุภาคบีตาออกมา โดยผลของปฏิกิริยาต่างๆ ทำให้เกิดอนุภาคโพสิตรอน อนุภาคโปรตอน และอนุภาคอัลฟา ตามมาอีกมากมาย

2.1.1 นิวตรอน

แหล่งกำเนิดของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนใหญ่มาจากการเกิดปฏิกิริยาฟิชชั่น (fission) ของยูเรเนียมหรือพลูโตเนียม ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยที่ใช้เทอร์มัลนิวตรอนทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชั่นนั้น ปฏิกิริยาฟิชชันที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดจะเกิดในยูเรเนียม พลังงานของอนุภาคและรังสีต่างๆ ที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 2.1 นอกจากนี้ได้นิวตรอนจากการสลายตัวของ Fission Product ซึ่งมีครึ่งชีวิตยาวถึง 54 วินาทีอีกด้วย เราเรียกนิวตรอนชนิดนี้ว่า delayed neutron ซึ่งเมื่อรวมกันแล้วมีค่าน้อยกว่าร้อยละหนึ่งของนิวตรอนฉับพลัน (Prompt Neutron) และไม่ทำให้เกิดปัญหาอย่างใดกับการวัดปริมาณรังสีดูดกลืน

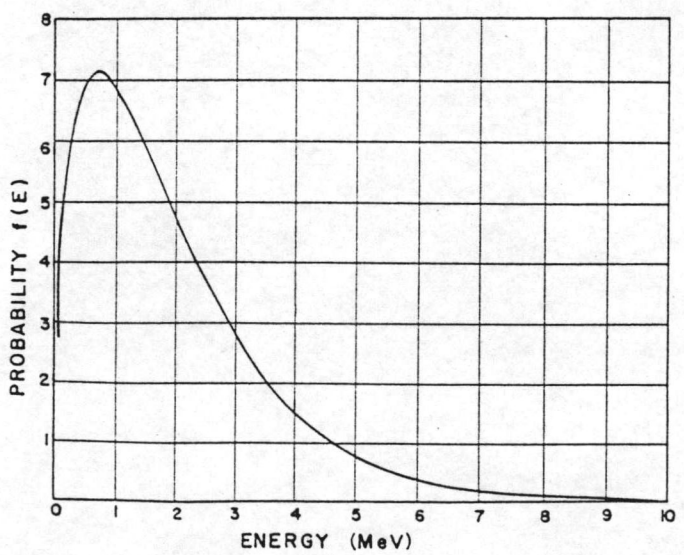
จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าแต่ละครั้งที่เกิดฟิชชัน จะทำให้เกิดนิวตรอนฉับพลันที่มีพลังงานรวมทั้งหมด 5 MeV หรือประมาณร้อยละ 2.5 ของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นของเครื่องปฏิกรณ์ และพลังงานส่วนใหญ่เหล่านี้จะถูกดูดกลืนโดยสารหน่วงนิวตรอน (Moderator)

สเปคตรัมของนิวตรอนที่เกิดจากฟิชชันของ ยูเรเนียม - 235 แสดงในรูปที่ 2.1 สเปคตรัมนี้มาจากสมการที่แสดงดังต่อไปนี้ [Tech. Report No.127,1971]

$$N(E) = Ae^{-BE} \sinh \sqrt{CE} \qquad (2.1)$$

และค่าตัวเลขของการกระจายของพลังงานเมื่อใช้ค่าคงที่

$$A = 0.4527, \quad B = 1.036, \quad C = 2.99$$



รูปที่ 2.1 แสดงสเปคตรัมของนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาการแบ่งแยกนิวเคลียส

ตารางที่ 2.1 พลังงานของอนุภาคต่างๆ และการแผ่รังสีจากปฏิกิริยาระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนกับยูเรเนียม - 235

อนุภาค หรือ รังสี	พลังงานเฉลี่ยที่เกิดจากการแตกตัว 1 ครั้ง (MeV)	บริเวณที่เกิดความร้อน
- อนุภาคที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน	168	บริเวณแท่งเชื้อเพลิง
- นิวตรอนที่ได้จากการแตกตัว	5	สารระบายความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง
- รังสีแกมมาที่ได้จากการแตกตัว	5	วัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ
- รังสีแกมมาที่ได้จากการสลายตัวของ fission product	6	วัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ
- อนุภาคบีตาที่ได้จากการสลายตัวของ fission product	7	บริเวณแท่งเชื้อเพลิง
- รังสีแกมมาที่ได้จากการที่อนุภาคนิวตรอนจับตัวกับสสาร	10	วัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างของแกนเครื่องปฏิกรณ์
พลังงานทั้งหมดที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัว	201	

ในสมการที่ 2.1 แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 พลังงานที่มีโอกาสที่จะเกิดมากที่สุดมีค่าประมาณ 1 MeV และมีพลังงานเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2 MeV

นิวตรอนที่เกิดจากฟิชชั่น ซึ่งเป็นนิวตรอนเร็วสูญเสียพลังงานไปโดยการชนกับเชื้อเพลิงวัสดุโครงสร้าง และสารหน่วงนิวตรอน (Moderator) ผลที่ได้รับก็คือ จะมีนิวตรอนที่มีพลังงานต่างๆ กัน จากเทอร์มัลนิวตรอน (นิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ย 0.025 eV ที่ 25° C) ไปจนถึงประมาณ 10 MeVในเครื่องปฏิกรณ์ แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 สเปคตรัมของนิวตรอนเหล่านี้ทั้งหมดที่จุดใดๆในเครื่องปฏิกรณ์ จะขึ้นอยู่กับระยะทางจากแท่งเชื้อเพลิงที่อยู่รอบๆ และปริมาณของสารหน่วงนิวตรอนตามเส้นทางที่นิวตรอนผ่าน สเปคตรัมรวมนี้ขึ้นอยู่กับสเปคตรัมของนิวตรอนที่เกิดจากฟิชชั่น และโอกาสที่นิวตรอนจะเข้าทำปฏิกิริยากับ (Neutron cross-section) วัสดุต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยที่โอกาสที่นิวตรอนจะเข้าทำปฏิกิริยากับนี้มีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนและอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์

นอกจากนิวตรอนเร็วแล้ว ก็ยังมีเทอร์มัลนิวตรอน และนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วงของเทอร์มัลนิวตรอนและนิวตรอนเร็ว มักเรียกนิวตรอนชนิดนี้ว่า อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (intermediate neutron) สำหรับในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (thermal research reactor) ขั้นตอนของการหน่วงความเร็วของนิวตรอน เกิดขึ้นรวดเร็วกว่าการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา (capture gamma ray) ทำให้จำนวนของเทอร์มัลนิวตรอนที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์มีจำนวนมากกว่านิวตรอนเร็ว โดยที่พลังงานของอินเตอร์มีเดียตนิวตรอนอยู่ในช่วงที่เกินกว่าเทอร์มัลนิวตรอนคือจาก 0.025 eV ไปจนถึง 1 MeV และเป็นช่วงของการเกิด resonance นั่นก็คือ ค่าโอกาสของการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากในช่วงแคบๆ ของพลังงานนิวตรอนเหล่านี้

คุณสมบัติต่างๆ ของนิวตรอนเร็ว อินเตอร์มีเดียต และเทอร์มัลนิวตรอน พร้อมอันตรกิริยาของทั้งสามกลุ่ม จะได้กล่าวถึงดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1.1.1 นิวตรอนเร็ว (Fission neutron)

อนุภาคนิวตรอนชนิดนี้เกิดจากปฏิกริยาฟิชชัน (fission reaction) ของเชื้อเพลิงปรมาณูยูเรเนียม-235 ในการแตกตัวแต่ละครั้งจะมีการปลดปล่อยนิวตรอนออกมา 2-3 อนุภาค ซึ่งเรียกนิวตรอนชนิดนี้ว่า นิวตรอนเร็วหรือนิวตรอนพลังงานสูง โดยทั่วไปปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้รับจากการเกิดปฏิกริยาระหว่างนิวตรอนเร็วกับสสารมาจากการเข้าชนของนิวตรอนเร็วทั้งแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น

ตารางที่ 2.2 การกระจายพลังงานของนิวตรอนที่มาจากปฏิกริยาการแบ่งแยกนิวเคลียส ของ U-235

Energy interval (MeV)	Fraction in interval	Energy interval (MeV)	Fraction in interval	Energy interval (MeV)	Fraction in interval	Energy interval (MeV)	Fraction in interval
0 - 0.2	0.03776	1.8 - 2.0	0.05011	3.6 - 3.8	0.0179	5.4 -5.6	0.00527
0.2 - 0.4	0.06102	2.0 - 2.2	0.04548	3.8 - 4.0	0.0158	5.6 -5.8	0.00457
0.4 - 0.6	0.06914	2.2 - 2.4	0.04103	4.0 - 4.2	0.0138	5.8 -6.0	0.00395
0.6 - 0.8	0.07143	2.4 - 2.6	0.03684	4.2 - 4.4	0.0121	6.0 - 6.2	0.00342
0.8 - 1.0	0.07054	2.6 - 2.8	0.03294	4.4 - 4.6	0.0106	6.2 - 6.4	0.00295
1.0 - 1.2	0.06779	2.8 - 3.0	0.02935	4.6 - 4.8	0.00	6.4 -6.6	0.00255
1.2 - 1.4	0.06396	3.0 - 3.2	0.02604	4.8 - 5.0	0.00804	6.6 - 6.8	0.00220
1.4 - 1.6	0.05935	3.2 - 3.4	0.02310	5.0 - 5.2	0.007	6.8 -7.0	0.00189
1.6 - 1.8	0.05485	3.4 - 3.6	0.0204	5.2 - 5.4	0.00607	7.0 - 7.2	0.00163
						7.2 -7.4	0.00140
						7.4 - 7.6	0.00120
						7.6 -7.8	0.00104
						7.8 -8.0	0.008887
						8.0 - 8.2	0.000761
						8.2 -8.4	0.000652

2.1.1.2 อินเตอร์มีเดียต (Intermediate neutron)

เป็นอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าเทอร์มัลนิวตรอน แต่มีพลังงานต่ำกว่านิวตรอนเร็ว โดยค่าพลังงานของนิวตรอนชนิดนี้คือค่าที่อยู่ในช่วง 0.4-1 kev ซึ่งเป็นช่วงของการเกิด resonance ปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้รับจากนิวตรอนชนิดนี้มาจากการเข้าชนแบบยืดหยุ่น

2.1.1.3 เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron)

เป็นอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ย 0.025 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถทำให้เกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction) กับธาตุได้แทบทุกชนิด เนื่องจากธาตุส่วนมากมีค่าภาคตัดขวางในการเกิดปฏิกริยานิวเคลียร์กับเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron cross-section) สูง และปฏิกริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกริยาการจับกับเทอร์มัลนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา หรือ (n,γ)

2.1.2 อันตรกิริยาจากอนุภาคนิวตรอน

เนื่องจากอนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงไม่สามารถทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้โดยตรง อันตรกิริยาของนิวตรอนต่อตัวกลางทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออนทางอ้อม โดยนิวตรอนจะถ่ายเทพลังงานให้นิวเคลียสของธาตุในตัวกลาง ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ ยังผลให้ได้อนุภาคที่มีประจุ หรือได้ผลผลิตที่เป็นสารรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคที่มีประจุ ซึ่งอนุภาคที่มีประจุที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์เหล่านี้ จะทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออนต่อไป

โอกาสที่นิวตรอนจะทำปฏิกิริยากับตัวกลางบอกด้วยค่า Microscopic cross section ใช้สัญญลักษณ์ว่า " σ "มีหน่วยเป็นบาร์น (1 บาร์น มีค่าเท่ากับ 10^{-24} ซม^2) Marcoscopic cross section ใช้สัญลักษณ์ว่า" $\sum$ "

อนุภาคนิวตรอนเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาได้หลายอย่าง แต่ที่พอจะรวบรวมได้มีอยู่ 6 ชนิด

2.1.2.1. การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

ในกระบวนการนี้ นิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสซึ่งอยู่ที่ระดับพลังงานต่ำสุด (ground state) นิวตรอนจะกระเด็นออกมา และนิวเคลียสยังคงอยู่ที่ระดับพลังงานต่ำสุดตามเดิม ในกรณีนี้เรียกการกระเจิงแบบยืดหยุ่นโดยนิวเคลียส ปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้ใช้สัญลักษณ์ (n,n)

2.1.2.2. การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering)

กระบวนการนี้คล้ายกับการชนแบบยืดหยุ่น นอกจากว่านิวเคลียสที่เหลือจะถูกทิ้งไว้ที่ภาวะถูกกระตุ้น (excited state) เพราะพลังงานยังถูกเก็บไว้โดยนิวเคลียส เป็นอันตรกิริยาเอนโดเทอร์มิค (endothermic interaction) ใช้สัญลักษณ์(n,n') นิวเคลียสที่ถูกกระตุ้นจะพยายามกลับเข้าสู่ระดับพลังงานต่ำสุดโดยการปลดปล่อยพลังงานในรูปของรังสีแกมมา เนื่องจากรังสีแกมมาเหล่านี้มีกำเนิดมาจาก การกระจายแบบไม่ยืดหยุ่น จึงถูกเรียกว่า "inelastic gamma ray"

2.1.2.3. การจับอนุภาคนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมาออกมา (Radiative capture)

เมื่อนิวตรอนถูกจับเข้าไปในนิวเคลียส และมีรังสีแกมมาตัวหนึ่งหรือหลายตัวส่งออกมา เรียกว่า "capture gamma ray" เป็นอันตรกิริยาเอกซ์โซเทอร์มิค (exothermic interaction) ใช้สัญลักษณ์ (n,γ) เนื่องจากมีต้นกำเนิดมาจากนิวตรอนถูกดูดกลืน กระบวนการนี้จึงเป็นตัวอย่างของการกระทำที่เรียก กิริยาการดูดกลืน (absorption reaction)

2.1.2.4. การจับอนุภาคนิวตรอนแล้วปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา (Capture with Particle ejection)

ในปฏิกิริยาชนิดนี้ นิวตรอนจะหายไปจากผลของการดูดกลืน แล้วส่งอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น (n,p) อาจเป็นอันตรกิริยาเอกซ์โซเทอร์มิค หรือ เอนโดเทอร์มิค ก็ได้

2.1.2.5. ปฏิกิริยาที่ให้นิวตรอน (Neutron-producing reaction)

ปฏิกิริยาที่ให้นิวตรอน เช่น (n,2n) (n,3n) เกิดขึ้นกับนิวตรอนที่มีพลังงานสูง มักเป็นปฏิกิริยาเอนโดเทอร์มิค ในปฏิกิริยา (n,2n) มีนิวตรอนอีกตัวหนึ่งถูกผลักออกมาจากนิวตรอนที่เข้าชน ส่วนปฏิกิริยา(n,3n) จะมีนิวตรอนถึง 2 ตัว ถูกผลักออกมาจากนิวตรอนที่เข้าชน (n,2n) เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยน้ำหนัก D_2O หรือเบอริลเลียม เนื่องจาก H^2 และ Be^9 เป็นพวกที่มีนิวตรอนเกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ (loosely bound neutron) ดังนั้นนิวตรอนจึงถูกส่งออกมาโดยง่าย

2.1.2.6. ปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission)

นิวตรอนเป็นต้นกำเนิดให้เกิดปฏิกิริยาการแบ่งแยกนิวเคลียสกับธาตุหนัก ๆ เช่น U^{235} ,Pu^{239} และ U^{233}เมื่อนิวตรอนชนกับนิวคลีไอ ทำให้นิวเคลียสแตกออกเรียกว่าเกิด "ฟิชชัน" เป็นต้นกำเนิดที่สำคัญของพลังงานนิวเคลียร์

2.1.3 รังสีแกมมา

การเปลี่ยนแปลงภายในอะตอมและนิวเคลียส จะทำให้เกิดพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnatic radiation) เช่นการปล่อยรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา เป็นต้น พลังงานนี้มีคุณสมบัติทั้งทางแม่เหล็กและไฟฟ้า เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง(c) (ประมาณเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที) มีความยาวคลื่น (wave length) = λ และมีความถี่ช่วงคลื่น = ν โดย

$$\lambda \nu = c \qquad (2.2)$$

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า บางครั้งจะอยู่ในกลุ่มของพลังงานที่เรียกว่า Photons หรือ Quanta ไม่มีน้ำหนัก ไม่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วของแสง เช่นเดียวกันความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและความยาวช่วงคลื่น แสดงได้ดังสมการ

$$E(kev) = \frac{12.4}{\lambda}(A^\circ) \qquad (2.3)$$

โดยที่

A° เป็นหน่วยวัดความยาวคลื่นเรียกกว่า "อังสตรอม" (Angstrom) มีค่าเท่ากับ 10^{-8} cm

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีหลายชนิดมีความยาวช่วงคลื่นและพลังงานต่างๆกัน รังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาจะอยู่ในกลุ่มของพลังงานสูงช่วงคลื่นสั้น จึงอยู่ในตำแหน่งท้ายสุดของสเปคตรัม ในขณะที่แสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่ามีพลังงานต่ำช่วงคลื่นยาว

แหล่งกำเนิดของรังสีแกมมาในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมีอยู่ 4 ชนิดคือ

(1) การเกิดฟิชชัน

(2) การสลายตัวของ fission product

(3) การปลดปล่อยรังสีแกมมา อันเนื่องมาจากการที่วัสดุเกิดการจับตัวกับนิวตรอน แล้วให้รังสีแกมมาออกมา

(4) การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับอนุภาคนิวตรอน

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่นั้น ส่วนใหญ่มาจากการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมาออกมา และแหล่งกำเนิดของรังสีแกมมาอันอื่นที่เกิดขึ้นจากนิวตรอน พลังงานของรังสีแกมมาสูงสุดต่อการแตกตัว 1 ครั้งจากยูเรเนียมธรรมชาติมีค่าประมาณ 20 Mev โดยสามารถแบ่งแยกพลังงานของรังสีแกมมาออกเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

- Prompt ~ 8 Mev
- Fission product ~ 7 Mev
- Capture with ^{238}U ~ 4 Mev
- ^{235}U ~ 1 Mev หรือประมาณ 10% ของการแตกตัว

เนื่องจากความเป็นไปได้ของการปลดปล่อยของรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ยูเรเนียมธรรมชาติในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมีค่าประมาณ 20-40% ดังนั้นจากแกนของเครื่องปฏิกรณ์มีโอกาสพบรังสีแกมมาประมาณ 2-4 % เมื่อเครื่องปฏิกรณ์เดินที่กำลังสูงสุด ส่วนการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมาของวัสดุมีค่าประมาณ 1% ด้วยเหตุที่ ค่าสัมประสิทธิ์ของการโอนถ่ายพลังงานเชิงมวลที่มีต่อรังสีแกมมามีค่า 0.025 cm^2/g ดังนั้นรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนภายในแกนของเครื่องปฏิกรณ์ ถึงแม้ว่าขนาดของเครื่องปฏิกรณ์จะมีขนาดเล็ก อัตราของปริมาณรังสีดูดกลืนภายในวัสดุมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ในทางกลับกันจะมีค่าลดลงตามปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ฯ

สำหรับขั้นตอนการหาค่าปริมาณรังสีดูดกลืนที่เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีแกมมาโดยแคลอรีมิเตอร์สามารถทำได้โดยนำตัวอย่างที่บรรจุในแคลอรีมิเตอร์มาหุ้มด้วยแคดเมียม โดยให้แคดเมียมทำหน้าที่ดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอน เพื่อให้ค่าปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นเป็นค่าที่มาจากรังสีแกมมาเท่านั้น

2.1.4 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา

การสูญเสียพลังงานของรังสีแกมมาเมื่อผ่านสสาร จะไม่เหมือนกับอนุภาคที่มีประจุ เพราะอนุภาคที่มีประจุมักจะสูญเสียพลังงานไป เนื่องจากอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนของอะตอม แต่รังสีแกมมาอาจจะทะลุตัวกลางไปได้ไกลโดยไม่เข้าทำปฏิกิริยา และไม่สูญเสียพลังงานเลยก็ได้ และเมื่อใดก็ตามที่เกิดปะทะกับอิเล็กตรอนในอะตอมก็อาจจะสูญเสียไปหมด อาจถูกจับไว้หรืออาจสูญเสียพลังงานไปบางส่วนและหักเหออกมาด้วยความยาวคลื่นที่ยาวกว่าเดิม จะเห็นได้ว่ารังสีแกมมาไม่มี Specific range ที่แน่นอนเหมือนอนุภาคที่มีประจุ ปฏิกิริยาของรังสีแกมมาต่อสสารจะแบ่งได้ 3 แบบ คือ

1. Photoelectric effect

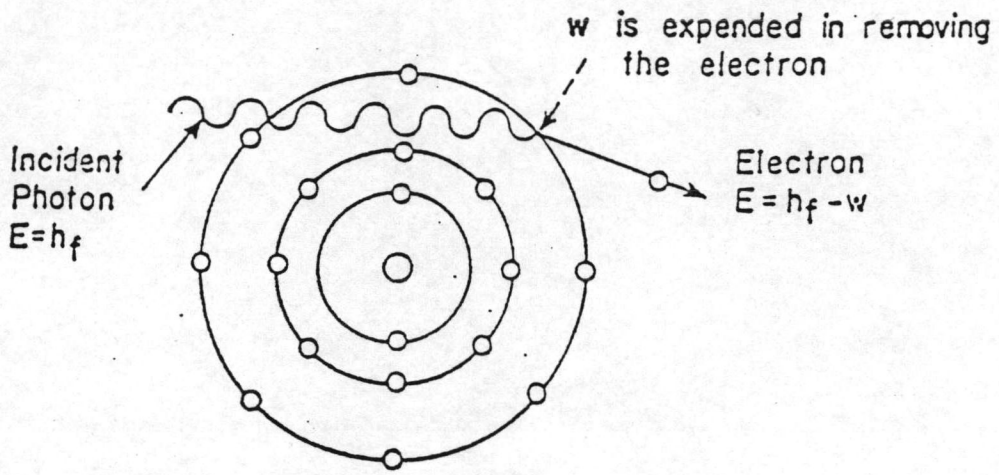
ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาชนโดยตรงกับอะตอมของตัวกลาง และถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้แก่อิเล็กตรอนในวงโคจร แล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรซึ่ง

เราเรียกอิเล็กตรอนชนิดนี้ว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) และสามารถเขียนสมการของการเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ 2.4 และแสดงรูปของการเกิดปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.2

$$E_e = E_\gamma - E_b \qquad (2.4)$$

เมื่อ

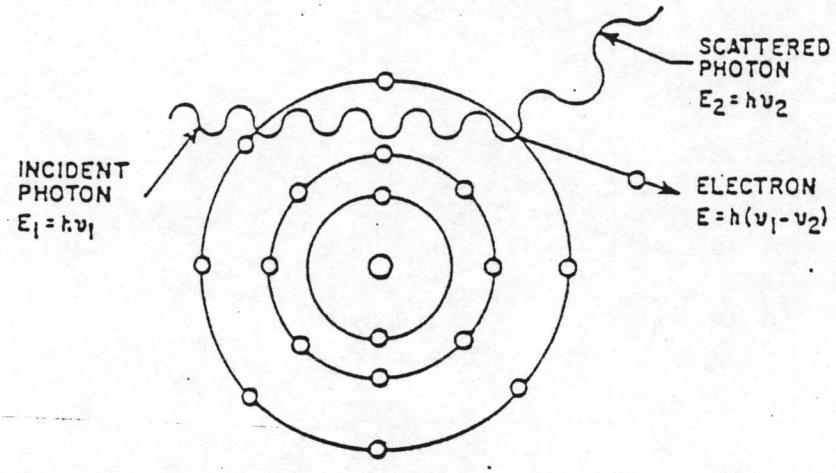
E_b คือ ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.2 Photoelectric effect

2. Compton scatterring

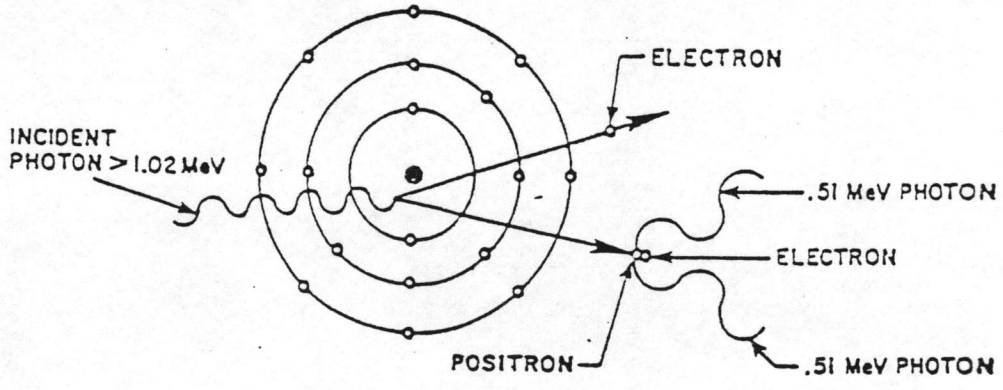
เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาถ่ายทอดพลังงานบางส่วนให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรออกเป็นมุมต่างๆ กัน พร้อมกับที่รังสีแกมมามีพลังงานลดลงอันตรกิริยาแบบนี้เกิดมากสำหรับรังสีแกมมาที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 Mev ดังได้แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 Compton Scatterring

3. Pair Production

เกิดเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานมากกว่า 1.02 Mev วิ่งผ่านสนามไฟฟ้าของนิวเคลียส ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโพสิตรอนขึ้นเรียกว่า "Pair Production" และผลของการเกิดปรากฏการณ์นี้ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนทุติยภูมิ นอกจากนี้โพสิตรอนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนอิสระทำให้เกิดรังสีแกมมา 2 ตัวพุ่งไปในทิศตรงข้ามกัน (annihilation) ดังได้แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Pair Production

2.1.5 อนุภาคบีตา

ส่วนใหญ่อนุภาคบีตาที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์นั้น เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ทำให้เกิดสารกัมมันตรังสีที่มีจำนวนนิวตรอนมากเกินไปในนิวเคลียส สลายตัวให้อนุภาคบีตาออกมา โดยมีครึ่งชีวิตอยู่ในช่วง 1 วินาทีไปจนถึงมากกว่า 10^{14} ปี

2.1.6 อันตรกิริยาของอนุภาคบีตา

อนุภาคบีตามีมวลและประจุน้อยกว่าอนุภาคอัลฟา การเคลื่อนที่ของอนุภาคบีตาจะมีความเร็วสูงกว่าอนุภาคอัลฟาที่มีพลังงานเท่ากัน ความสามารถในการทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนจึงน้อยกว่า แต่พิสัยมากกว่าอนุภาคอัลฟา อนุภาคบีตาที่มีพลังงานสูงเกินกว่า 1 Mev การแตกตัวเป็นไอออนจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของอนุภาคบีตา เนื่องจากอนุภาคบีตาเป็นอนุภาคที่มีประจุและมีพลังงานสูงมีความเร็วใกล้ความเร็วแสง ความเข้มของสนามไฟฟ้าของอนุภาคจึงมากกว่าปกติ ก่อให้เกิดการรบกวนสนามไฟฟ้าของอะตอมตลอดทิศทางที่วิ่งผ่าน ผลทำให้อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออนมากขึ้น และอนุภาคที่มีความเร็วสูงเมื่อวิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของธาตุหนักจะถูกบ่ายเบนทิศทางและถูกลดความเร็ว เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าพร้อมกับปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ ที่เรียกว่า รังสีเบรมสตราลุง (Bremstrahlung radiation)

สำหรับแต่ละหัวข้อที่ได้กล่าวมานั้น สามารถที่จะเป็นต้นเหตุให้เกิดความร้อนในวัสดุที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้ สาเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนส่วนใหญ่มักจะมาจากเทอร์มัลนิวตรอน นิวตรอนเร็ว และรังสีแกมมา วิธีการที่สมบรูณ์ของการวัดปริมาณความร้อนสะสม ก็คือวิธีการวัดด้วยแคลอรีมิเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถเปลี่ยนค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นให้เป็นค่าปริมาณรังสีดูดกลืนได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ค่าความสัมพันธ์อื่นเลย