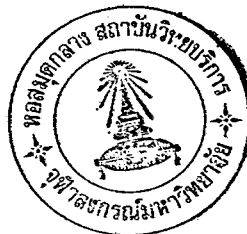


ชนิดของต้นกำเนิดรังสี



๒.๑ ชนิดของต้นกำเนิดรังสี

คำว่าต้นกำเนิดรังสีในที่นี้ เราหมายถึงต้นกำเนิดรังสีแกมมา (gamma source) เท่านั้น ซึ่งเราจะใช้หน่วยสำหรับอัตราการแผ่รังสีด้วยหน่วยความเข้มของต้นกำเนิดรังสี (source strength) และเนื่องจากต้นกำเนิดรังสีนี้จะแผ่รังสีไปในบรรยากาศทุกทิศทางด้วย คุณสมบัติอันเดียวกันตามลักษณะของต้นกำเนิดรังสีนั้น ๆ ดังนั้นในการบอกหน่วยความเข้มของต้นกำเนิดรังสีนั้นจะบอกเป็นจำนวนโฟตอน/วินาที/หน่วยที่ใช้บอกขนาดของต้นกำเนิดรังสี ซึ่งแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

๒.๑.๑ ต้นกำเนิดรังสีชนิดจุด (isotropic point source) หมายถึงต้นกำเนิดรังสีที่เป็นจุด หรือที่มีขนาดเล็กมาก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระยะทางระหว่างต้นกำเนิดรังสีและจุดที่จะวัดปริมาณรังสี และการแผ่รังสีของต้นกำเนิดรังสี จะแผ่ไปรอบตัวเองทุกทิศทางโดยที่คุณสมบัติในการกระจายของรังสีเท่ากันอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นความเข้มของต้นกำเนิดรังสีจะมีหน่วยเป็นจำนวนโฟตอน/วินาที

๒.๑.๒ ต้นกำเนิดรังสีชนิดเส้น (line source) หมายถึง ต้นกำเนิดรังสีที่มีลักษณะเป็นเส้นหรือกรณีที่ต้นกำเนิดรังสี ที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยมาก เมื่อเทียบกับความยาวของต้นกำเนิดรังสี ดังนั้นความเข้มของต้นกำเนิดรังสีจะมีหน่วยเป็น จำนวนโฟตอน/วินาที/หน่วยความยาว

๒.๑.๓ ต้นกำเนิดรังสีชนิดแผ่รังสีจากผิว (surface source) หมายถึงต้นกำเนิดรังสีที่มีความหนาแน่นน้อยมาก เมื่อเทียบกับมิติอื่น การแผ่ของรังสีจะเป็นการแผ่รังสีจากผิวของต้นกำเนิดรังสีนั้น ๆ และ ความเข้มของต้นกำเนิดรังสีจะมีหน่วยเป็น จำนวนโฟตอน/วินาที/หน่วยพื้นที่

๒.๑.๔ ต้นกำเนิดรังสีชนิดแผ่รังสีจากปริมาตร (volume source) หมายถึงต้นกำเนิดรังสีที่มีการแผ่รังสีจากทุกอนุของต้นกำเนิดรังสีตามรูปร่างลักษณะของต้นกำเนิดรังสี ดังนั้นความเข้มของต้นกำเนิดรังสีจะมีหน่วยเป็น จำนวนโฟตอน/วินาที/หน่วยปริมาตร

โดยที่การแผ่รังสีในทั้ง ๔ กรณีนี้ ตามปรกติแล้วจะถือว่าการแผ่รังสีออกไปทุกทิศทาง ตามรูปร่างลักษณะของต้นกำเนิดรังสี ด้วยคุณสมบัติที่เท่ากันโดยตลอด ยกเว้นกรณีที่จะชี้เฉพาะลงไป เช่น กรณีต้นกำเนิดรังสีชนิดแผ่นชนิดที่แผ่รังสีออกมาในทิศทางเดียว

#### ๒.๒ อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับวัสดุ

เมื่อรังสีแกมมากระทบวัสดุจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับวัสดุโดยการพิจารณาอันตรกิริยานั้น จะพิจารณาในเทอมของโอกาสที่เมื่อรังสีแกมมาชนกับวัสดุแล้วเกิดอันตรกิริยาประเภทใดซึ่งจะขึ้นอยู่กับ

- (๑) พลังงานของรังสีแกมมา
- (๒) คุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุที่รังสีแกมมาจะชน

อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นจะได้แก่

๒.๒.๑ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (photo electric effect) คือการที่รังสีแกมมาเข้าชนกับอะตอมของวัสดุที่วางกันแล้วรังสีแกมมาจะถูกดูดแล้วจะถ่ายเทพลังงานให้อะตอมซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนตัวใดตัวหนึ่งของอะตอมมีพลังงานเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดต่ำสุดของพลังงานที่ต้องการใช้ในการยึดเหนี่ยว ดังนั้นจะทำให้อิเล็กตรอนตัวนั้น สามารถกระเด็นหลุดออกจากอะตอมเดิมมาได้พร้อมด้วยพลังงานส่วนที่เหลือ และเมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกมา อิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกก็จะวิ่งเข้าไปแทนที่ จะทำให้เกิดพลังงานส่วนเกินออกมา และพลังงานส่วนนี้จะอยู่ในรูปของ รังสีเอ็กซ์ และ Auger electron ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอันตรกิริยานี้จะขึ้นอยู่กับ

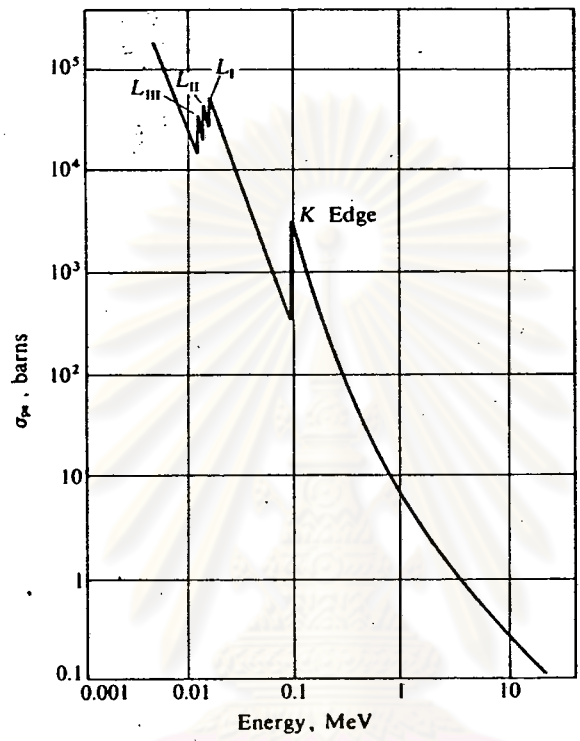
(๑) พลังงานของรังสีแกมมาหรือโฟตอนที่วิ่งมาชน

(๒) ค่าอะตอมมิคใหม่ เบอร์ของวัสดุ (Z)

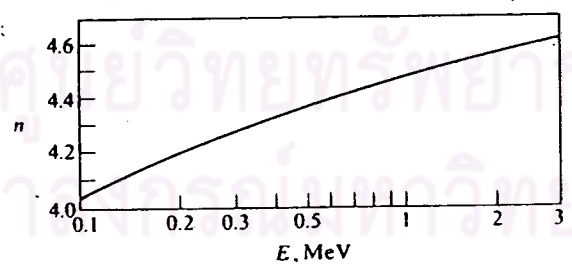
และค่าที่ใช้วัดอันตรกิริยานี้คือ  $\sigma_{pe}$  (cross section per atom of photo electric effect)

$$\sigma_{pe} \propto Z^n E^{-m}$$

ค่า  $n$  จะเป็นค่าที่อยู่ในฟังก์ชันของพลังงาน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของ  
 แพลกเตอร์ต่าง ๆ ในสมการ 2.1 ได้ด้วยรูปที่ ๑, ๒ ซึ่งแยกความสัมพันธ์เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า  
 $\sigma_{pe}$  และพลังงาน และความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงาน  $E$  และค่า  $n$  ในสมการ

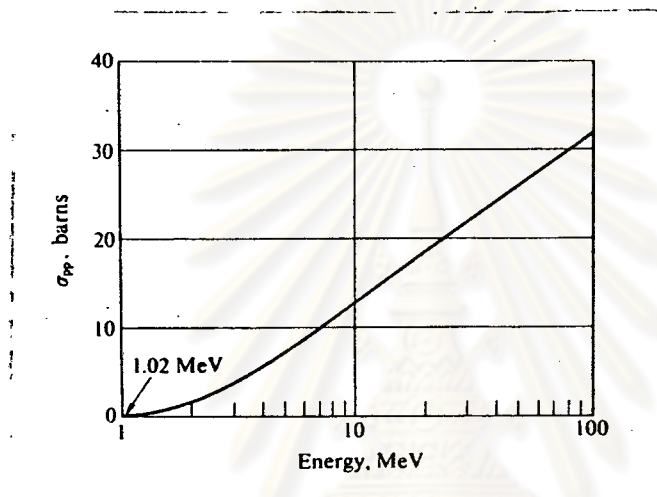


รูปที่ ๑ แสดงความสัมพันธ์ของค่าพลังงานกับค่า  $\sigma_{pe}$  ของตะกั่ว (๗)



รูปที่ ๒ แสดงความสัมพันธ์ของค่าพลังงานกับค่าของ  $n$  (๗)

๒.๒.๒ แพร์โปรดักชัน (pair production) คือ การที่รังสีแกมมาจะถูกดูดไว้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะเกิดโพสิตรอน (positron) และเนกาตรอน (negatron) ขึ้นมาแต่เนื่องจากการที่โพสิตรอนและเนกาตรอนยึดกันอยู่ได้ด้วยพลังงาน ๑.๐๒ MeV ดังนั้นแพร์โปรดักชันนี้จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อพลังงานของรังสีแกมมามากกว่า ๑.๐๒ MeV และถ้าพลังงานของรังสีแกมมายิ่งสูงขึ้นโอกาสที่จะเกิดก็ยิ่งจะสูงมากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์นี้ในรูปที่ ๓

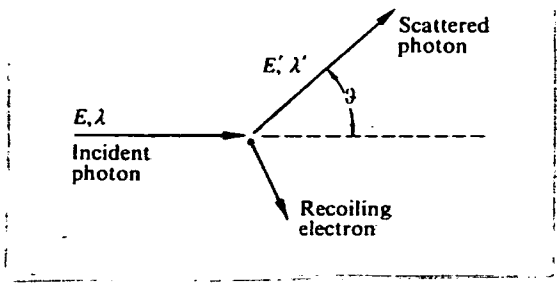


รูปที่ ๓ แสดงความสัมพันธ์ของ  $\sigma_{pp}$  กับพลังงาน

ค่าที่ใช้วัดอันตรกิริยานี้คือ  $\sigma_{pp}$  และได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\sigma_{pp} = Z^2 E^n \quad \text{-----2.2}$$

๒.๒.๓ คอมตันสแคตเตอร์ริง (compton scattering) คือ การที่รังสีแกมมาที่มีความยาวคลื่น  $\lambda$ , พร้อมด้วยพลังงานจำนวนหนึ่ง  $E$ , ริงมาชนกับอิเล็กตรอนแล้วทำให้อิเล็กตรอนกระเด็นจากตำแหน่งเดิมและรังสีแกมมาจะเบนออกจากทิศทางเดิมเป็นมุมหนึ่ง  $\theta$  พร้อมด้วยพลังงานที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็น  $E'$  พร้อมด้วยความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไป  $\lambda'$  ซึ่งค่านี้จะมีค่ามากกว่าความยาวคลื่นเดิม ซึ่งลักษณะของอันตรกิริยานี้ได้แสดงในรูปที่ ๔



รูปที่ ๔ แสดงทิศทางของรังสีแกมมาเมื่อเกิดแฟร์โปรดักชัน

การเปลี่ยนแปลงพลังงานนี้จะ เป็นไปตามกฎของการเปลี่ยนแปลงพลังงานและ โมเมนตัม และค่าที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะมีค่าเป็น

$$E' = \frac{EE_e}{E(1 - \cos \theta) + E_e} \quad \text{-----2.3}$$

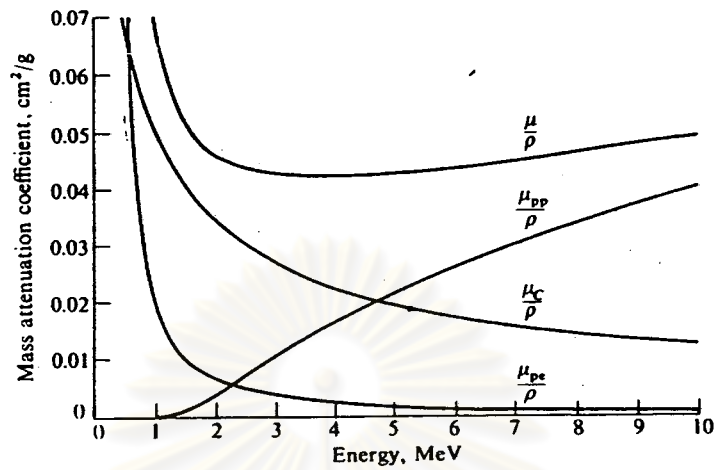
$$\lambda' = \lambda + \lambda_e(1 - \cos \theta) \quad \text{-----2.4}$$

$$\sigma_{pc} = ZE^m \quad \text{-----2.5}$$

$$\text{เมื่อ } \lambda_e = \frac{h}{m_e c} = 2.426 \times 10^{-10} \text{ cm} \quad \text{-----2.6}$$

$$E_e = m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV} \quad \text{-----2.7}$$

จากอันตรกิริยาทั้งสามนี้สามารถแสดง ค่า  $\sigma_{pc}$ ,  $\sigma_{pp}$  และ  $-\sigma_{pe}$  ที่สัมพันธ์ กับพลังงานได้ในรูปที่ ๔ และสรุปผลของอันตรกิริยาทั้งสามไว้ในตารางที่ ๑ ด้วย



รูปที่ ๕ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\sigma_{pe}$ ,  $\sigma_{pp}$ ,  $\sigma_{pc}$  กับพลังงานของตะกั่ว

ตารางที่ ๑ สรุปผลจากอันตรกิริยาทั้ง ๓ ของรังสีแกมมา กับวัสดุ<sup>(๓)</sup>

process	interacts with	products	cross section dependence	remarks
photoelectric effect	atom	$e^-$ , X-ray, Auger	$\sim Z^4 (h\nu)^{-3}$	$E = h\nu - E_b$
pair production	nucleus	$e^-$ , $e^+$ annihilation	$\sim Z^2 (h\nu)^n$	$E_+ + E_- = h\nu - 1.02$
compton scattering	free electron	$e^-$ , $\gamma$ -ray	$\sim Z (h\nu)^m$	$E = 0 \rightarrow h\nu$ $(1 + 1/2\alpha)$

เมื่อ  $\alpha = \frac{h\nu}{m_e c^2} \gg 1$

๒.๓ คุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมจะนำมาทำเกราะกำบังรังสีแกมมา

ในการเลือกวัสดุที่จะนำมาทำเกราะกำบังรังสีแกมมานั้น เราต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุเมื่อทำอันตรกิริยากับรังสีแกมมา และพิจารณาว่าเป็นวัสดุที่ทำได้ง่าย ราคาไม่แพงนัก ซึ่งตามปกติแล้วเรามักจะใช้ตะกั่วและเหล็ก แต่บางครั้งอาจใช้ทังสเตนหรือ ยูเรเนียมในกรณีที่ต้องการใช้เกราะกำบังที่บางมาก ๆ ซึ่งมักจะเป็นกรณีที่เป็นจริง ๆ เพราะจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก แต่ในที่นี้เราจะพิจารณาถึงคุณสมบัติเฉพาะวัสดุที่ทำได้ง่ายและใช้กันแพร่หลายอันได้แก่

๒.๓.๑ ตะกั่ว เป็นวัสดุที่ใช้ทำเกราะกำบังรังสีกันมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่น และอะตอมมีค่านับเบอร์สูงมาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมในการเป็นเกราะกำบังรังสีแกมมา แต่ยังมีข้อเสียที่จุดหลอมเหลวต่ำ ความอ่อนตัวสูง และความแข็งแรงก็น้อยกว่า ดังนั้นในกรณีที่ใช้ตะกั่วทำเป็นเกราะกำบังรังสีแล้ว เพื่อความแข็งแรงมักจะใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงทำเกราะ ชั้นนอกอีกที ซึ่งคุณสมบัติของตะกั่วนั้นได้สรุปไว้ในตารางที่ ๒

๒.๓.๒ เหล็ก เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำเกราะกำบังรังสีแกมมาเช่นกัน เนื่องจากราคาถูกกว่าการใช้ตะกั่วมาก แต่เนื่องจากเหล็กเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรนั้นสูงมาก เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ดังนั้นในกรณีที่ต้องการเคลื่อนย้ายเกราะกำบังรังสีแกมมาที่เป็นเหล็กอาจลำบาก

๒.๓.๓ ทังสเตน เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการป้องกันรังสีแกมมาที่ดี แต่ไม่มีใครนิยมกันนัก เนื่องจากราคาสูงมาก ทาได้ลำบาก แต่มักจะใช้ในกรณีที่ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง เพราะจุดหลอมเหลวของทังสเตนสูง

๒.๓.๔ ยูเรเนียม ในกรณีที่ใช้วัสดุ ชนิดนี้ทำเกราะกำบังรังสีแกมมานั้นจะเป็นกรณีที่ใช้ค่าใช้จ่ายสูงมาก ดังนั้นกรณีที่จะใช้วัสดุชนิดนี้มักจะเป็นกรณีที่เป็นจริง ๆ คือในกรณีที่ต้องการเกราะกำบังรังสีที่บางมาก ๆ เท่านั้น

๒.๓.๕ น้ำ เป็นวัสดุมาตรฐานที่ส่วนมากมักจะเป็นกรณีที่ต้องการใช้เกราะกำบังรังสีเป็นที่ระบายความร้อนจากต้นกำเนิดรังสีด้วย ซึ่งรายละเอียดของคุณสมบัติของน้ำอยู่ในตารางที่ ๓

๒.๓.๖ วัสดุอื่น ๆ คุณสมบัติก็คล้ายคลึงกันมาก พิจารณาจากตารางของค่าปิลอัพแฟคเตอร์ของธาตุต่าง ๆ ซึ่งส่วนมากกรณีอื่น ๆ นั้นมักจะเป็นกรณีที่ใช้ในการทดลองมากกว่า

ตารางที่ ๒ แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติของเหล็ก, ตะกั่ว และคอนกรีต<sup>(๓)</sup>

property	lead	iron	Ordinary concrete
density (g/cm <sup>3</sup> )	11.35	7.87	2.2-2.4
atomic number	82	26	11
atomic weight	207.19	55.85	-
melting point (°c)	327	1535	-
specific heat (J/g/°c)	0.13	0.46	0.8
thermal conductivity (J/cm/sec/°c)	0.339	0.67	0.01
coefficient of thermal expansion(/°c)	$2.95 \times 10^{-6}$	$11 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-6}$
hardness (Brinell)	4	100	-
Yield strength (psi)	860	25,000	-
Tensile strength (psi)	1900	40,000	<500
Creep (psi, 1 % in 10 years at 100°c)	127	15,000	
elongation ( %)	45	25	-
Young's modulus (psi)	$2 \times 10^{-6}$	$30 \times 10^{-6}$	
radiation damage	nil	small	negligible
corrosion resistance	good	fair	-



ตารางที่ ๓ แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติของน้ำ (๓)

property	Water
density ( $\text{g-cm}^3$ , $20^\circ\text{c}$ )	1
effective atomic number	7.4
electron number (per gram)	$3.34 \times 10^{23}$
hydrogen concentration ( $\text{atom cm}^{-3}$ )	$6.7 \times 10^{22}$
metting point ( $^\circ\text{c}$ )	0
boiling point ( $^\circ\text{c}$ )	100
specific heat ( $\text{J/g } ^\circ\text{c}$ )	4.18
thermal conductivity ( $\text{J/cm/sec/}^\circ\text{c}$ )	5.9
volume coefficient of thermal ( $/^\circ\text{c}$ )	$4.1 \times 10^{-4}$
radiation damage	small

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๒.๔ บิลอัพแฟคเตอร์ (build up factor)

ต้นกำเนิดรังสีแกมมามีค่าความเข้มของต้นกำเนิดรังสี  $\phi_0$  ให้รังสีแกมมาที่มีพลังงาน  $E_0$  แล้วอัตราการรับรังสี (exposure rate) จะมีค่าดังนี้

$$\text{อัตราการรับรังสี} = 0.0659 \phi_0 E_0 (\mu_a/\rho)_{\text{air}} \text{ mR/hr} \text{ ----} 2.8$$

ซึ่งถ้ารังสีแกมมาไปชนกับวัสดุ แล้วถูกดูดไว้หมดแล้วจะได้ค่าพลักซ์จากต้นกำเนิดจะลดลงในเทอมของเลขยกกำลัง (exponential term) ซึ่งพลักซ์จำนวนนี้คือ ปริมาณพลักซ์ที่ไม่ชนกับเนื้อวัสดุ (uncollided flux)  $\phi_u$

$$\phi_u = \phi_0 e^{-\mu_a x} \text{ 005012} \text{ -----} 2.9$$

แต่เนื่องจากอันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่อวัสดุต่าง ๆ นั้น เนื่องจาก คอมตันสแคทเตอร์รังสีจะมีผลให้รังสีแกมมาที่ชนกับอะตอมของวัสดุแล้วยังคงวิ่งทะลุออกมาด้วยส่วนหนึ่ง ซึ่งในทางปฏิบัติ นั้นการหาปริมาณพลักซ์ของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ด้านหลังชั้นวัสดุจะต้องพิจารณาถึงกรณีนี้เป็นสำคัญ และเป็นจุดยุ่งยากในการคำนวณด้วย ดังนั้นการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติเราจะกำหนดให้ใช้แฟคเตอร์หนึ่งคูณกับ  $\phi_u$  แล้วจะได้ปริมาณพลักซ์ที่ผ่านชั้นของวัสดุแล้ว (build up flux)  $\phi_b$  และแฟคเตอร์ที่ใช้ก็คือ บิลอัพแฟคเตอร์ (build up factor)  $B(\mu_a)$

$$\phi_b = \phi_u B(\mu_a) \text{ -----} 2.10$$

ค่าบิลอัพแฟคเตอร์นี้เป็นค่าที่ขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมาที่วิ่งมาชนกับวัสดุ และจำนวนครั้งที่รังสีแกมมาได้ชนกับวัสดุหรือความหนาของเกราะกำบังรังสี ซึ่งในที่นี้เพื่อให้ง่ายเข้าเราจะบอกในเทอมของ จำนวนครั้งเฉลี่ยของการที่รังสีชนกับวัสดุซึ่งเราใช้สัญลักษณ์แทนด้วย MFP (mean free path) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\mu_a$  ซึ่งรายละเอียดของค่าบิลอัพแฟคเตอร์นี้ของแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ ๔ และ ๕ แล้ว

ตารางที่ ๔ แสดงค่าบิลอิฟแฟคเตอร์ของต้นกำเนิดรังสีชนิดแผ่นที่แผ่รังสีออกมาทิศทางเดียว (๗)

Material	E <sub>0</sub> MeV	H <sub>0</sub> a									
		0	1	2	4	7	10	15	20	25	30
Aluminium	0.255	(1.00)	(2.75)	(5.50)	(14.40)	(36.50)	(76.30)	(133.00)	(365.00)	(435.00)	(870.00)
	0.5	(1.00)	2.37	4.24	9.47	21.5	33.90	80.8	141.00	(217.20)	(310.39)
	1.0	(1.00)	2.02	3.31	6.57	13.10	21.20	37.90	53.50	(100.30)	(138.00)
	2.0	(1.00)	1.75	2.61	4.62	8.05	11.90	18.70	26.30	(132.39)	(40.42)
	3.0	(1.00)	1.64	2.32	3.78	6.14	8.65	13.00	17.70	(25.43)	(32.30)
	4.0	(1.00)	1.53	2.08	3.22	5.01	6.88	10.10	13.40	(16.85)	(20.48)
	6.0	(1.00)	1.42	1.85	2.70	4.06	5.49	7.97	10.40	(12.96)	(15.56)
	8.0	(1.00)	1.34	1.68	2.37	3.45	4.58	6.56	8.52	(10.37)	(12.47)
	10.0	(1.00)	1.28	1.55	2.12	3.01	3.96	5.63	7.32	(9.94)	(11.98)
	Water	0.255	(1.00)	3.09	7.14	23.00	12.90	166.00	456.00	982.00	(390.00)
0.5		(1.00)	2.52	5.14	14.30	38.80	77.60	178.00	334.00	(534.29)	(784.00)
1.0		(1.00)	2.13	3.71	7.68	16.20	27.10	50.40	82.20	(184.40)	(262.70)
2.0		(1.00)	1.83	2.77	4.88	8.46	12.40	19.50	27.70	(22.09)	(24.45)
3.0		(1.00)	1.69	2.42	3.91	6.23	8.63	12.80	17.00	(32.80)	(43.15)
4.0		(1.00)	1.58	2.17	3.34	5.13	6.94	9.97	12.90	(15.35)	(18.75)
6.0		(1.00)	1.46	1.91	2.76	3.99	5.18	7.09	8.85	(10.51)	(12.04)
8.0		(1.00)	1.38	1.74	2.40	3.34	4.25	5.66	6.95	(7.93)	(8.98)
10.0		(1.00)	1.33	1.63	2.19	2.97	3.72	4.90	5.98	(7.60)	(8.66)
Lead		0.5	(1.00)	1.24	1.42	1.69	2.00	2.27	2.65	2.73	(3.53)
	1.0	(1.00)	1.37	1.69	2.26	3.02	3.74	4.81	5.85	(6.60)	(7.49)
	2.0	(1.00)	1.39	1.76	2.51	3.66	4.84	6.81	9.09	(11.79)	(14.37)
	3.0	(1.00)	1.34	1.68	2.43	3.75	5.30	9.44	12.30	(16.44)	(21.41)
	4.0	(1.00)	1.27	1.56	2.25	3.61	5.44	9.80	16.30	(24.39)	(34.32)
	5.1	(1.00)	1.21	1.46	2.08	3.44	5.55	11.70	23.60	(36.47)	(57.11)
	6.0	(1.00)	1.18	1.40	1.97	3.34	5.69	13.30	32.70	(56.63)	(82.23)
	8.0	(1.00)	1.14	1.30	1.74	2.89	5.07	14.10	44.60	(83.77)	(136.31)
	10.0	(1.00)	1.11	1.23	1.58	2.52	4.34	12.50	39.20	(79.10)	(128.59)

ตารางที่ ๔ (ต่อ)

Material	E <sub>0</sub> MeV	μ <sub>02</sub>									
		0	1	2	4	7	10	15	20	25	30
Iron	0.5	(1.00)	1.98	3.09	5.98	11.7	19.20	35.4	55.60	(80.64)	(109.70)
	1.0	(1.00)	1.87	2.89	5.39	10.2	16.20	28.3	42.70	(61.07)	(83.13)
	2.0	(1.00)	1.76	2.43	4.13	7.25	10.90	17.6	25.10	(35.67)	(46.44)
	3.0	(1.00)	1.55	2.15	3.51	5.85	8.51	13.5	19.10	(24.51)	(30.71)
	4.0	(1.00)	1.45	1.94	3.03	4.91	7.11	11.2	16.00	(21.46)	(27.53)
	6.0	(1.00)	1.34	1.72	2.53	4.14	6.02	9.89	14.70	(20.42)	(27.06)
	8.0	(1.00)	1.27	1.56	2.23	3.49	5.07	8.50	13.00	(18.30)	(24.81)
	10.0	(1.00)	1.20	1.42	1.9	2.99	4.35	7.54	12.40	(18.45)	(25.43)
Tin	0.5	(1.00)	1.56	2.03	3.09	4.57	6.04	8.64	(14.20)	(15.10)	(18.70)
	1.0	(1.00)	1.64	2.30	3.74	6.17	8.85	13.70	18.80	(28.00)	(39.00)
	2.0	(1.00)	1.57	2.17	3.03	5.87	8.53	13.60	19.30	(38.00)	(50.00)
	3.0	(1.00)	1.46	1.96	3.13	5.23	7.91	13.30	20.10	(43.00)	(61.20)
	4.0	(1.00)	1.33	1.81	2.82	4.82	7.41	13.20	21.20	(52.00)	(100.00)
	6.0	(1.00)	1.26	1.57	2.37	4.17	6.94	14.80	29.10	(59.00)	(121.00)
	8.0	(1.00)	1.19	1.42	2.05	3.57	6.19	15.10	34.00	(81.00)	(199.00)
	10.0	(1.00)	1.14	1.31	1.79	2.99	5.21	12.50	33.40	(92.00)	(125.10)
Tungstan	0.5	(1.00)	1.28	1.50	1.84	2.24	2.61	3.12	(3.90)	(3.53)	(3.94)
	1.0	(1.00)	1.44	1.83	2.57	3.62	4.64	6.25	7.35	(6.60)	(7.49)
	2.0	(1.00)	1.42	1.85	2.72	4.09	5.27	8.07	10.60	(11.79)	(14.37)
	3.0	(1.00)	1.36	1.74	2.59	4.00	5.92	9.66	14.10	(16.44)	(21.41)
	4.0	(1.00)	1.29	1.62	2.41	4.03	6.27	12.00	20.90	(24.39)	(34.32)
	6.0	(1.00)	1.20	1.43	2.07	3.60	6.29	15.70	36.30	(56.63)	(82.23)
	8.0	(1.00)	1.14	1.32	1.81	3.05	5.40	15.20	41.90	(83.77)	(136.31)
	10.0	(1.00)	1.11	1.25	1.64	2.62	4.65	14.00	39.30	(79.10)	(128.59)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๔ (ต่อ)

Material	E <sub>0</sub> MeV	μ <sub>0a</sub>									
		0	1	2	4	7	10	15	20	25	30
Uranium	0.5	(1.00)	1.17	1.30	1.48	1.67	1.85	2.08	(3.40)	(3.53)	(3.94)
	1.0	(1.00)	1.31	1.56	1.98	2.50	2.97	3.67	(4.08)	(6.60)	(7.49)
	2.0	(1.00)	1.33	1.64	2.23	3.09	3.95	5.36	(6.48)	(11.79)	(14.37)
	3.0	(1.00)	1.29	1.58	2.21	3.27	4.51	6.97	9.88	(16.44)	(21.41)
	4.0	(1.00)	1.24	1.50	2.09	3.21	4.66	8.01	12.70	(24.39)	(34.32)
	6.0	(1.00)	1.16	1.36	1.85	2.96	4.80	10.8	23.00	(56.63)	(82.23)
	8.0	(1.00)	1.12	1.27	1.66	2.61	4.36	11.2	28.00	(83.77)	(136.31)
	10.0	(1.00)	1.09	1.20	1.51	2.26	3.75	10.5	28.50	(79.10)	(128.59)

\*หมายเหตุ ค่าที่อยู่ในวงเล็บ ( ) เป็นค่าที่ได้จากการคาดหวั้งโดยอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้เราใช้ interpolation & extrapolation technique

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕ แสดงค่าบิลท์แฟคเตอร์ของต้นกำเนิดรังสีชนิดจุด<sup>(๘)</sup>

Material	E <sub>0</sub> MeV	$\mu_a$							
		0	1	2	4	7	10	15	
Water	0.5	(1.00)	2.63	4.29	9.05	20.0	35.9	74.9	
	1.0	(1.00)	2.26	3.39	6.27	11.5	18.00	30.8	
	2.0	(1.00)	1.84	2.63	4.28	6.96	9.87	14.4	
	3.0	(1.00)	1.69	2.31	3.57	5.51	7.48	10.8	
	4.0	(1.00)	1.58	2.10	3.12	4.63	6.19	8.54	
	6.0	(1.00)	1.45	1.86	2.63	3.76	4.36	6.78	
	8.0	(1.00)	1.36	1.69	2.30	3.16	4.00	5.47	
	10.0	(1.00)	(1.29)	(1.54)	(2.25)	(3.00)	(3.90)	(5.00)	
	Lead	0.5	(1.00)	1.24	1.39	1.63	1.87	2.08	(3.00)
		1.0	(1.00)	1.38	1.68	2.13	2.80	3.40	4.20
2.0		(1.00)	1.40	1.76	2.41	3.36	4.35	5.94	
3.0		(1.00)	1.36	1.71	2.42	3.55	4.82	7.18	
4.0		(1.00)	1.28	1.56	2.18	3.29	4.69	7.97	
6.0		(1.00)	1.19	1.40	1.87	2.97	4.69	9.53	
8.0		(1.00)	1.14	1.30	1.69	2.61	4.18	9.08	
10.0		(1.00)	1.11	1.24	1.54	2.27	3.54	7.70	
Iron	0.5	(1.00)	2.07	2.94	4.87	8.31	12.4	20.6	
	1.0	(1.00)	1.92	2.74	4.57	7.81	11.6	18.9	
	2.0	(1.00)	1.69	2.35	3.76	6.11	8.78	13.7	
	3.0	(1.00)	1.58	2.13	3.32	5.26	7.41	11.4	
	4.0	(1.00)	1.48	1.90	2.95	4.61	6.46	9.92	
	6.0	(1.00)	1.35	1.71	2.48	3.81	5.35	8.39	
	8.0	(1.00)	1.27	1.55	2.17	3.27	4.58	7.33	
	10.0	(1.00)	1.22	1.44	1.95	2.89	4.07	6.70	

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕ (ต่อ)

Material	E <sub>0</sub> MeV	μ <sub>0a</sub>							
		0	1	2	4	7	10	15	
Tin	0.5	(1.00)	(1.70)	(2.30)	(3.45)	(5.34)	(7.25)	(10.00)	
	1.0	(1.00)	1.65	2.24	3.40	5.18	7.19	10.50	
	2.0	(1.00)	1.58	2.13	3.27	5.12	7.13	11.00	
	3.0	(1.00)	1.39	1.80	2.69	4.31	6.30	11.00	
	4.0	(1.00)	(1.48)	(1.97)	(2.98)	(4.72)	(6.72)	(11.20)	
	6.0	(1.00)	1.27	1.57	2.29	3.72	5.77	11.00	
	8.0	(1.00)	(1.22)	(1.45)	(2.02)	(3.27)	(5.15)	(10.30)	
	10.0	(1.00)	1.16	1.33	1.77	2.81	4.53	9.68	
	Uranium	0.5	(1.00)	(1.17)	(1.28)	(1.45)	(1.60)	(1.73)	(2.50)
		1.0	(1.00)	1.30	1.53	1.90	2.32	2.70	3.60
2.0		(1.00)	1.33	1.62	2.15	2.87	3.56	4.89	
3.0		(1.00)	1.29	1.57	2.13	3.02	3.99	5.94	
4.0		(1.00)	1.25	1.49	2.02	2.94	4.06	6.47	
6.0		(1.00)	1.18	1.37	1.82	2.74	4.12	7.79	
8.0		(1.00)	1.13	1.27	1.61	2.39	3.65	7.36	
10.0		(1.00)	1.10	1.21	1.45	2.12	3.21	6.58	

\*หมายเหตุ ค่าที่อยู่ในวงเล็บ ( ) เป็นค่าที่ได้จากการคาดหวั้งโดยอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้เราใช้ interpolation & extrapolation technique

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับค่าในตารางที่ ๕ นั้นจะนำมาใช้ในการคำนวณของกรณีต้นกำเนิดรังสีรูปร่างอื่น ๆ อีกด้วยวิธีการ อินทิเกรชัน (integration) จากต้นกำเนิดรังสีชนิดจุดให้เป็นต้นกำเนิดรังสีที่มีรูปร่างแตกต่างกันไป ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ Taylor ได้เขียนค่าปดอัมแพคเตอร์นี้ให้อยู่ในเทอมคณิตศาสตร์เพื่อให้สะดวกในการคำนวณ ซึ่งในที่นี้จะอยู่ในลักษณะสมการ

$$B(\mu a) = A_1 e^{-\alpha_1 \mu a} + A_2 e^{-\alpha_2 \mu a} \quad \text{-----2.11}$$

โดยที่  $A_2 = 1 - A_1$  และตารางที่ ๖ จะแสดงรายละเอียดไว้ดังนี้

ตารางที่ ๖ แสดงค่า  $A_1$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  ของวัสดุ (๖)

Material	$E_0$ MeV	$A_1$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Aluminium	0.5	10.4000	0.1200	0.0190
	1.0	8.0000	0.1100	0.0440
	2.0	5.5000	0.0820	0.0930
	3.0	4.5000	0.0740	0.1160
	4.0	3.8000	0.0660	0.1300
	6.0	3.1000	0.0640	0.1520
	8.0	2.3000	0.0620	0.1500
	10.0	2.2500	0.0600	0.1280
Water	0.5	24.0000	0.1380	0.0100
	1.0	11.0000	0.1040	0.0300
	2.0	6.4000	0.0760	0.0920
	3.0	5.2000	0.0620	0.1080
	4.0	4.5000	0.0560	0.1170



ตารางที่ ๖ (ต่อ)

Material	$E_0$ MeV	$A_1$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Water	6.0	3.6000	0.0500	0.1240
	8.0	3.0000	0.0450	0.1280
	10.0	2.7000	0.0420	0.1300
lead	0.5	1.6500	0.0320	0.2960
	1.0	2.4500	0.0450	0.1780
	2.0	2.6000	0.0710	0.1030
	3.0	2.1500	0.0970	0.0770
	4.0	1.6500	0.1230	0.0640
	6.0	0.9600	0.1750	0.0590
	8.0	0.6700	0.2040	0.0670
	10.0	0.5000	0.2140	0.0800
Iron	0.5	10.0000	0.0948	0.0120
	1.0	8.0000	0.0895	0.0400
	8.0	5.5000	0.0788	0.0700
	3.0	5.0000	0.0740	0.0750
	4.0	3.7500	0.0750	0.0820*
	6.0	2.9000	0.0825	0.0750
	8.0	2.3500	0.0833	0.0546
	10.0	2.0000	0.0950	0.0116
Tin	0.5	6.0000	0.0833	0.0300
	1.0	4.5000	0.0800	0.1300
	2.0	4.0000	0.0800	0.1420
	3.0	3.3000	0.0920	0.1300

ตารางที่ ๖ (ต่อ)

Material	$E_0$ MeV	$A_1$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Tin	4.0	2.8000	0.1100	0.1100
	6.0	1.7000	0.1440	0.0400
	8.0	1.2000	0.1700	0.0000
	10.0	0.8200	0.1850	0.1000
Concrete	0.5	12.5000	0.1110	0.0060
	1.0	9.9000	0.0880	0.0290
	2.0	6.3000	0.0690	0.0580
	3.0	4.7000	0.0620	0.0730
	4.0	3.9000	0.0590	0.0790
	6.0	3.1000	0.0590	0.0830
	8.0	2.8000	0.0570	0.0860
	10.0	2.6000	0.0500	0.0840
Tungsten	0.5	4.3000	0.0453	0.0390
	1.0	3.3000	0.0430	0.1480
	2.0	2.9000	0.0690	0.1880
	3.0	2.7000	0.0860	0.1340
	4.0	2.0500	0.1180	0.0700
	6.0	1.2000	0.1710	0.0
	8.0	0.7000	0.2050	0.0520
	10.0	0.6000	0.2120	0.1440

\* หมายเหตุ ค่าที่อยู่ในวงเล็บ ( ) เป็นค่าที่ได้จากการคาดหวั้งโดยอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้เราใช้ extrapolation technique เพื่อให้สะดวกแก่การคำนวณและเพื่อให้ง่ายเข้าในการจัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางที่ ๗ แสดงค่าความเป็นไปได้ของปริมาณรังสีจะขึ้นกับวัสดุ ( $\mu|_p$ ) (๗)

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 <sub>2</sub> O	.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.

\* หมายถึง ค่าที่เก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลของโปรแกรม NUGS1

ตารางที่ ๘ แสดงค่าความเป็นไปได้ของปริมาณรังสีจะถูกดูดไว้ด้วยวัสดุต่าง ๆ (๗)

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 <sub>2</sub> O	.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.

\* หมายถึง ค่าที่เก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลของโปรแกรม NUGSI

สำหรับค่าบิลล์แพคเตอร์นี้มีอยู่ ๒ กรณีคือ

๒.๔.๑ กรณีชั้นวัสดุ ๑ ชั้น ก็จะสามารถหาค่าได้จากสมการ 2.11

๒.๔.๒ กรณีชั้นวัสดุมากกว่า ๑ ชั้น เราไม่สามารถใช้ค่าบิลล์จะมีสูตรการหาแตกต่างกันไป  
ในที่นี้เราพิจารณากรณีของ Kitazume(๑๑)

$$\begin{aligned}
 B(t_N) &= \sum_{i=1}^N B_i(t_i) - \sum_{i=2}^N B_i(t_{i-1}) \\
 &= B_N(t_N) + \sum_{i=1}^{N-1} B_i(t_i) - \sum_{i=2}^N B_i(t_{i-1}) \\
 \therefore B(t_N) &= B_N(t_N) + \sum_{i=1}^{N-1} \{B_i(t_i) - B_{(i+1)}(t_{i-1})\} \quad \text{-----2.12}
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $N$  เป็นจำนวนชั้นของวัสดุ,  $i$  เป็นดัชนีแสดงชั้นของวัสดุ,  $t$  เป็นค่า MFP ของวัสดุแต่ละชั้น โดยที่ค่าบิลล์แพคเตอร์ของแต่ละชั้นนั้นก็ใช้สมการ 2.11 เช่นกัน ซึ่งเมื่อเราได้ค่าปริมาณรังสีที่ผ่านชั้นของวัสดุแล้วก็สามารถหาอัตราการรับรังสีได้จากสมการ 2.3 ซึ่งจากค่านี้เองที่ใช้พิจารณาค่าความปลอดภัยของมนุษย์ ที่อยู่หลัง เกราะกำบังรังสี

## ๒.๕ ผลของรังสีต่อมนุษยชาติ

เนื่องจากเมื่อรังสีกระทบกับสิ่งใด ๆ แล้วจะทำให้โมเลกุลภายในของสิ่งเหล่านั้นเกิดการไอออไนเซชัน ทำให้โมเลกุลภายในเปลี่ยนแปลงสภาพตัวเองใหม่ในสภาพที่แตกต่างไปจากเดิม ซึ่งจะยังผลเสียมาสู่สิ่งต่าง ๆ เหล่านั้นเป็นอย่างมาก เช่น อาจทำให้วัสดุสูญเสียคุณสมบัติจากเดิมไป หรือในกรณีของสิ่งที่มีชีวิตการเปลี่ยนแปลงก็จะเป็นอันตรายในระดับต่าง ๆ ดังนั้น อันตรายจากรังสีนั้นจะมีมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่

๒.๕.๑ ปริมาณของรังสีที่ได้รับ

๒.๕.๒ อัตราการรับรังสี

๒.๕.๓ ชนิดของรังสี

๒.๕.๔ ชนิดของสารรังสี

๒.๕.๕ ความไวของสารรังสีต่ออวัยวะส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย

ในที่นี้เราจะพิจารณาถึงความปลอดภัยของมนุษย์ที่ได้รับรังสีและเป็นอันตราย เป็นจุดสำคัญในการพิจารณา ดังนี้คือ

ช่วงระยะเวลาที่เมื่อร่างกายได้รับรังสีแล้วจะเกิดอันตรายจากรังสีโดยที่ถือว่าอัตราการรับรังสีนั้นเป็นการรับรังสีทั้งตัว

ตารางที่ ๔ แสดงช่วงระยะเวลา และปริมาณรังสีที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์

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	gastrointestinal Syndrome
200-1,000	10-30 day	bone marrow syndrome.
less than 200	a few weeks before the unirradiated control animals	radiating life shortening

เมื่อมีการใช้รังสีมากขึ้นจึงมีสถาบันต่าง ๆ ได้ทำการวิจัยถึงระดับรังสีที่ปลอดภัยต่อมนุษยชาติและถือว่า ผลวิจัยนี้เป็นมาตรฐานที่ยึดถือกันทั่วโลก โดยในเมืองไทยเราเองก็ถือเอาผลทางการวิจัยของสถาบัน International Commission on Radiological Protection (ICRP) เป็นหลักโดยการสรุปไว้ดังนี้ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ นั้นอยู่ในตารางที่ ๑๐ แล้วค่าเหล่านี้มีชื่อเรียกว่า ค่าระดับรังสีที่ปลอดภัย (Maximum permissible dose) MPD. โดยที่ทาง ICRP แบ่งบุคคลออกเป็น ๒ กลุ่มด้วยกันคือ

- (๑) บุคคลที่มีอายุมากกว่า ๑๘ ปี และทำงานที่ต้องเกี่ยวข้องกับทางรังสี
- (๒) บุคคลทั่ว ๆ ไป

ตารางที่ ๑๐ แสดงรายละเอียดของ MPD ต่ออวัยวะส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย

Organ or tissue	MPD for adults exposed in the course of their work	Dose limits for member of the public
gonad, red bone marrow whole body	3 rems in a quarter of year 5 rems in a year or if necessary 5 (N-18) rems when N is age in years	0.5 rems in a year
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

ในที่นี่เรายึดถือค่าที่ปลอดภัยสำหรับบุคคลทั่วๆไปคือเรถือค่า  $0.5 \text{ mR/hr}$ . ในกรณี  
ซีเราจะถือเอาระดับรังสีที่ปลอดภัยต่อมนุษยชาติ