บทที่ 6

การหาปริมาณรังสีแกมม่า (dose rate) จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย โดยการคำนวณทางทฤษฎี

เพื่อให้รู้จักการประมาณ (approximation) หาปริมาณรังสี ณ ระยะต่าง ๆ จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเมื่อทราบข้อมูลที่สำคัญที่จำเป็นในการคำนวณอย่างง่าย ๆ และรวดเร็วโดยอาศัยค่าคงที่ต่าง ๆ จากหนังสือคู่มือ

ในการคำนวณต่อไปนี้ จะได้แสดงตัวอย่างการคำนวณเฉพาะห่อแกมม่า ส่วนห่ออื่นนั้นการคำนวณยุ่งยากขึ้นเพราะมีส่วนประกอบ (materials) หลายอย่าง การคำนวณอาศัยการสมมุติว่าแกนเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเป็นทรงกลม และแกนเชื้อเพลิงประกอบด้วย น้ำ อลูมิเนียม และเชื้อเพลิง (ยูเรเนียม – 235) ; ห่อแกมม่านี้มีน้ำ (H_2O) เป็นตัวขวางกั้น (shielding) เพื่อให้ง่ายในการคำนวณให้ build up factor มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นเราใช้สมการ (4.11) คือ

$$\phi(z) = \frac{S_v}{2\mu_v}\left(\frac{r}{r_0}\right) E_1 (\mu z) \quad \ldots\ldots\ldots (6.1)$$

โดยที่

$\phi(z)$ คือฟลักซ์ (flux) หรืออาจหาเป็น energy flux ของรังสีแกมมา ณ จุดสังเกตซึ่งห่างจากผิวของแกนเชื้อเพลิงเป็นระยะ z

S_v คือจำนวนโฟตอน (photon) ที่เกิดจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู มีหน่วยเป็น จำนวนโฟตอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที หรืออาจเป็นพลังงานของโฟตอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

μ_v คือ linear attenuation coefficient ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

μ = linear attenuation coefficient ของตัวขวางกั้น

$E_1(\mu Z)$ คือ first order exponential integral function ของ μZ

6.1 ข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูและข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็นในการคำนวณ

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเดินเครื่องด้วยกำลัง	1 เมกะวัตต์
นิวตรอนฟลักซ์โดยเฉลี่ย 6×10^2	นิวตรอน/(ซม.)^2 (วินาที)
ขนาดของแกนเชื้อเพลิง 30×38	ซม.สูง 60 ซม.
ปริมาตรของแกนเชื้อเพลิง 68,400	ลูกบาศก์เซนติเมตร

เมื่อให้แกนเชื้อเพลิงเป็นทรงกลมจะมีรัศมีประมาณ 25.37 เซนติเมตร แกนเชื้อเพลิงประกอบด้วยน้ำ, อลูมินัม และยูเรเนียมด้วยอัตราส่วนต่อปริมาตรของแกนเชื้อเพลิง 0.583, 0.415 และ 0.0018 ตามลำดับ

ในการคิดคำนวณต่อไปนี้ จะพิจารณาถึงรังสีแกมมาที่เกิดชนิด primary gamma rays ซึ่งง่ายในหลักการทางทฤษฎีแต่ยุ่งยากในการปฏิบัติ เพราะยังมีความซับซ้อนทางธรรมชาติของการแผ่รังสีชนิดนี้ ซึ่งรวมถึงพรอมท์ฟิชชัน (prompt fission), การสลายตัวของฟิชชันโปรดัค (fission product decay), การชนกันแบบอินอีลาสติค (inelastic scattering) และเคปเจอร์แกมมาเรย์ (capture gamma rays) ซึ่งเกิดขึ้นในแกนเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังรวมถึงช่วงของพลังงานด้วย

เพื่อให้ง่ายในการคำนวณซึ่งเป็นไปได้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบสระน้ำ ตามตำราของ Glasstone[1] ได้แบ่งช่วงของพลังงานออกเป็น 5 พวก คือ 1, 2, 4, 6, และ 8 MeV การเกิดพรอมท์ฟิชชั่นแกมม่าเรย์ และการสลายตัวของฟิชชั่นโปรดัค ดูในตารางที่ 6-1 และแคปเจอร์แกมม่าเรย์ของ Al และ H_2O (ซึ่งดูจาก H) ดูในตารางที่ 6-2

ตารางที่ 6-1

พรอมท์ฟิชชั่น (prompt fission) และฟิชชั่นโปรดัค (fission product) ของรังสีแกมม่าพลังงานช่วงต่าง ๆ ที่เกิดจากยูเรเนียม – 235[2]

Gamma - Ray Source	พลังงานโฟตอน (MeV)				
	1	2	4	6	8
พรอมท์ฟิชชั่น (MeV/fission)	3.45	3.09	1.04	0.26	-
ฟิชชั่นโปรดัค (MeV/fission)	5.16	1.74	0.32	-	-

---

[1] Samuel Glasstone and Alexander Sesonske, Nuclear Reactor Engineering (USAEC, Litton Educational Publishing, Inc., 1967), p.568-593

[2] Ibid.

ตารางที่ 6-2

ตารางอีควาเลนท์แคปเจอร์แกมม่าเรย์สเปคตรา
(Equivalent capture gamma - ray spectra)[3]

วัสดุ (materials)	พลังงานโฟตอน (MeV)				
	1	2	4	6	8
	MeV per Neutron Capture				
Aluminum	-	-	2.6	1.0	1.9
Hydrogen	-	2.2	-	-	-

6.2 วิธีการคำนวณ

ในการพิจารณาหาความแรงของแกนเชื้อเพลิง (S_v) ซึ่งสมมุติว่าโฟตอนกระจายออกมาอย่างสม่ำเสมอ (uniform) หาได้จากเมื่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเดินเครื่อง 1 watt จะทำให้เกิด 3.1×10^{10} ฟิชชั่นต่อวินาที ดังนั้นเมื่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยมีกำลัง 10^6 watt และมีปริมาตร 684,000 ซม.^{3} จะได้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู $= \frac{3.1\times10^{16}}{684,000}$ $\frac{\text{fission.}}{(\text{cm.}^3)(\text{sec})}$

$= 45.32\times10^{10}$ $\frac{\text{fission.}}{(\text{cm.}^3)(\text{sec})}$

---

[3] Ibid.

จากตารางที่ 6-1 เราก็สามารถหาความแรงของแกนเชื้อเพลิงที่เกิดจาก prompt fission และ fission product โดยโฟตอนพลังงานต่าง ๆ ได้คือ

$S_{v_{1\ MeV}} = 45.32 \times 10^{10} (3.45+5.16) = 390.2 \times 10^{10}$ MeV/(cm.^{3})(sec)

$S_{v_{2\ MeV}} = 45.32 \times 10^{10} (3.09+1.74) = 218.89 \times 10^{10}$ MeV/(cm.^{3})(sec)

$S_{v_{4\ MeV}} = 45.32 \times 10^{10} (1.04+0.32) = 61.64 \times 10^{10}$ MeV/(cm.^{3})(sec)

$S_{v_{6\ MeV}} = 45.32 \times 10^{10} (0.26) = 11.78 \times 10^{10}$ MeV/(cm.^{3})(sec)

$S_{v_{8\ MeV}} = 0$

จากตาราง 6-2 เราก็สามารถหาความแรงของแกนเชื้อเพลิงจาก capture gamma ray จากพลังงานต่าง ๆ ได้คือ

$$S_{v_{Al\ in\ 4\ MeV}} = \phi_{th} \cdot \Sigma_{a_{Al}} \cdot v.(2.6) \quad \text{MeV/neutron capture}$$

ϕ_{th} คือ thermal neutron flux $= 6 \times 10^{12}$ neutron/(cm.^{2})(sec)

$\Sigma_{a_{th}}$ คือ average macroscopic absorption cross section ของ aluminum มีค่า 0.0123 cm^{-1}

v คือปริมาตรของ Al ต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ดังนั้นได้

$S_{v_{Al\ in\ 4\ MeV}} = 7.96 \times 10^{10}$ MeV/(cm.^{3})(sec)

$S_{v_{Al\ in\ 6\ MeV}} = 3.06 \times 10^{10}$ MeV/(cm.^{3})(sec)

$S_{v_{Al\ in\ 8\ MeV}} = 5.82 \times 10^{10}$ MeV/(cm.^{3})(sec)

ในทำนองเดียวกัน เมื่อ $\Sigma_{a_{H_2O}}$ มีค่า 0.0195 cm^{-1} จะได้

$$S_{v_{H_2O \text{ in 2 MeV}}} = 15 \times 10^{10} \text{ MeV/(cm}^3\text{)(sec)}$$

จากนั้นก็รวมความแรงของแกนเชื้อเพลิงแต่ละช่วงพลังงานเข้าด้วยกันได้

ความแรงของแกนเชื้อเพลิงที่เกิดจากโฟตอน 1 MeV = S_{v_1}

$$S_{v_1} = 390.2 \times 10^{10} \text{ MeV/(cm}^3\text{)(sec)}$$

ความแรงของแกนเชื้อเพลิงที่เกิดจากโฟตอน 2 MeV = S_{v_2}

$$S_{v_2} = 233.89 \times 10^{10} \text{ MeV/(cm}^3\text{)(sec)}$$

ความแรงของแกนเชื้อเพลิงที่เกิดจากโฟตอน 4 MeV = S_{v_4}

$$S_{v_4} = 69.6 \times 10^{10} \text{ MeV/(cm}^3\text{)(sec)}$$

ความแรงของแกนเชื้อเพลิงที่เกิดจากโฟตอน 6 MeV = S_{v_6}

$$S_{v_6} = 14.84 \times 10^{10} \text{ MeV/(cm}^3\text{)(sec)}$$

ความแรงของแกนเชื้อเพลิงที่เกิดจากโฟตอน 8 MeV = S_{v_8}

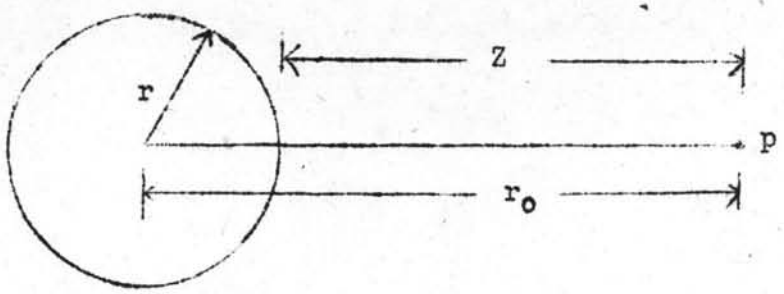
$$S_{v_8} = 5.82 \times 10^{10} \text{ MeV/(cm}^3\text{)(sec)}$$

ค่า μ_v ของเครื่องปฏิกรณ์เฉลี่ยประมาณ 0.1 cm^{-1}

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (7.1) หาค่า energy flux $\phi(Z)$ ออกมา โดยที่ ค่าคงที่ μ ของน้ำ (H_2O) , $E_1(\mu Z)$ และการเปลี่ยน MeV/(cm^2)(sec) เป็น rad/hr. ของช่วงพลังงานต่าง ๆ ดูได้จากหนังสือคู่มือ ก็จะได้ค่า dose rate ของรังสีแกมม่าที่ระยะต่าง ๆ ตามต้องการ

รายละเอียดการคำนวณมีดังต่อไปนี้

จากสมการ (7.1) $\phi(Z) = \frac{S_v}{2\mu_v} \left(\frac{r}{r_o}\right) E_1(\mu Z)$



รูปที่ 6-1 แสดงแกนเชื้อเพลิงและจุดสังเกต

รูปที่ 6-1 แสดงแกนเชื้อเพลิงทรงกลมรัศมี r ระยะจากจุดสังเกต P มายังจุดกึ่งกลางแกนเชื้อเพลิงยาว r_o ระยะจากจุดสังเกต P มายังผิวแกนเชื้อเพลิงยาว Z

$r = 25.37$ cm. $\qquad r_o = r + Z$

S_v ในสมการก็คือ S_{v_1} , S_{v_2} , S_{v_4} , S_{v_6} , และ S_{v_8} ซึ่งเกิดจากโฟตอนพลังงาน 1 , 2 , 4 , 6 , และ 8 MeV ตามลำดับ

ตารางที่ 6-3

แสดงการคำนวณหา dose rate ของรังสีแกมม่าที่ระยะจากจุดกึ่งกลางท่อแกมม่าไปยังผิวหน้าแกนเชื้อเพลิง 63 เซนติเมตร

พลังงานของโฟตอน (MeV)	$\phi(Z)$ $\left[\text{MeV}/(\text{cm}^2)(\text{sec})\right]$	dose rate (rads/sec)
1	1.25×10^{10}	6

ตารางที่ 6-3 (ต่อ)

พลังงานของโฟตอน (MeV)	$\phi(Z)$ $\left[MeV/(cm^2)(sec)\right]$	dose rate (rads/sec)
2	3.81×10^{10}	15
4	4.03×10^{10}	13
6	1.52×10^{10}	4.46
8	8.2×10^{9}	2.29
dose rate รวมของรังสีแกมม่าที่ระยะ 63 ซม. จากผิวแกนเชื้อเพลิง เท่ากับ 40.75 rads/sec		

ตารางที่ 6-4

แสดงการคำนวนหา dose rate ของรังสีแกมม่าที่ระยะจากจุดกึ่งกลางท่อแกมม่าไปยังผิวหน้าแกนเชื้อเพลิง 73 เซนติเมตร

พลังงานของโฟตอน (MeV)	$\Phi(z)$ $\left[MeV/(cm.^2)(sec)\right]$	dose rate (rads/sec)
1	4.57×10^{9}	2.2
2	1.86×10^{10}	7.58
4	2.33×10^{10}	7.68
6	9.21×10^{9}	2.7
8	5.2×10^{9}	1.43
dose rate รวมของรังสีแกมม่าที่ระยะ 73 ซม. จากผิวแกนเชื้อเพลิงเท่ากับ 21.59 rads/sec		

ตารางที่ 6-5

แสดงการคำนวณหา dose rate ของรังสีแกมม่าที่ระยะจากจุดกึ่งกลางท่อแกมม่าไปยังผิวหน้าแกนเชื้อเพลิง 83 เซนติโมตร

พลังงานของโฟตอน (MeV)	$\phi(z)$ $\left[\text{Mev}/(\text{cm})^2(\text{sec})\right]$	dose rate (rads/sec)
1	1.84×10^9	.88
2	9.16×10^9	3.74
4	1.36×10^{10}	4.47
6	5.78×10^9	1.69
8	3.36×10^9	.914

dose rate รวมของรังสีแกมม่าที่ระยะ 83 ซม. จากผิวแกนเชื้อเพลิง เท่ากับ 11.694 rads/sec

ตารางที่ 6-6

แสดงการคำนวณหา dose rate ของรังสีแกมม่าที่ระยะจากจุดกึ่งกลางท่อแกมม่าไปยังผิวหน้าแกนเชื้อเพลิง 93 เซนติเมตร

พลังงานของโฟตอน (MeV)	ϕ (Z) $\left[\text{MeV}/(\text{cm}^2)(\text{sec})\right]$	dose rate (rads/sec)
1	7.58×10^8	.365
2	4.72×10^9	1.923
4	8.04×10^9	2.65
6	3.65×10^9	1.07
8	2.22×10^9	.6

dose rate รวมของรังสีแกมม่าที่ระยะ 93 ซม. จากผิวหน้าของแกนเชื้อเพลิง เท่ากับ 6.608 rads/sec

ตารางที่ 6-7

เปรียบเทียบผลการคำนวณและทดลองหาปริมาณรังสี (dose rate)
ของรังสีแกมม่า ในท่อแกมม่า ณ ระยะต่าง ๆ ห่างจากผิวของแกนเชื้อเพลิง

ระยะห่างจากผิวหน้าของแกนเชื้อเพลิง (เซนติเมตร)	dose rate จากการคำนวณ (rads/sec)	dose rate จาก Fricke dosimeter (rads/sec)
63	37	41
73	22	22
83	13	12
93	9	7

จากตารางที่ 6-7 จะเห็นว่าในการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อหา dose rate ของรังสีแกมม่าจากเครื่องปฏิกรณ์เมื่อมีน้ำเป็นตัวขวางกั้นและให้แกนเชื้อเพลิงกลมก็ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลอง