

วิธีการคำนวณ

ในบทนี้จะแสดงถึงวิธีการคำนวณหาความแรงรังสีของแท่งเชื้อเพลิงหลังจากระยะเวลาหนึ่ง ๆ จากเวลาที่ดับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เพื่อที่จะหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะทำการขนย้ายแท่งเชื้อเพลิง จากนี้จะหาความแรงรังสีของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง จะใช้ความแรงรังสีของแท่งเชื้อเพลิงที่มีความแรงรังสีสูงสุดเป็นหลักในการคำนวณหาความหนาของ คอนเทนเนอร์ ที่จะใช้ในการขนย้ายแท่งเชื้อเพลิง

ภายหลังจากดับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแล้ว แท่งเชื้อเพลิงจะยังคงแผ่รังสีออกมา ทั้งรังสีอัลฟา (Alpha Rays) รังสีเบตา (Beta Rays) และรังสีแกมมา (Gamma Rays) เนื่องจากปริมาณของฟิสชันโปรดักต์ ที่เกิดขึ้นมีจำนวนมาก ซึ่งฟิสชันโปรดักต์นี้เองจะแผ่รังสีออกมา ในการคำนวณจะพิจารณาถึงปริมาณการแผ่รังสีแกมมา ซึ่งอยู่ในรูปของ ดีเลย์ ฟิสชัน แกมมา เรดิเอชัน (Delay Fission Gamma Radiation) เนื่องจากรังสีแกมมา มีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่า รังสีอัลฟา และ รังสีเบตามาก

๔.๑ ดีเลย์ ฟิสชัน แกมมา เรดิเอชัน รังสีแกมมาที่ได้จากการแผ่รังสีของฟิสชันโปรดักต์สามารถจะจัดแบ่งออกเป็นกลุ่ม ๆ ตามพลังงานของรังสีแกมมา ได้ดังตารางที่ ๔.๑¹ และ การสลายตัวของ ฟิสชันโปรดักต์ ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ หลังจากดับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จะมีปริมาณของรังสีแกมมาแต่ละกลุ่ม ดังแสดงในกราฟรูปที่ ๔.๑²

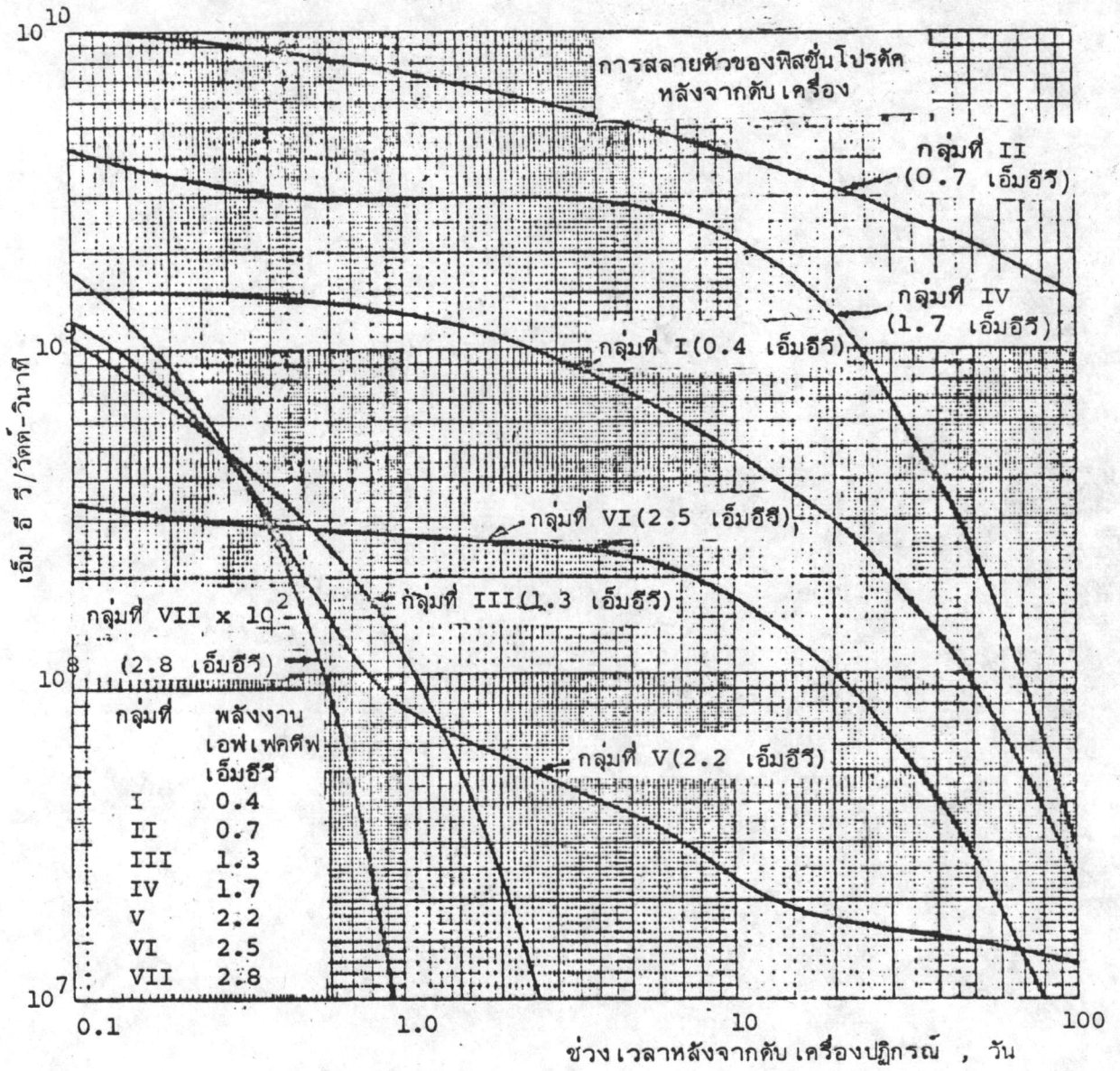
ตารางที่ ๔.๑

แสดงกลุ่มของรังสีแกมมาจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วตามระดับพลังงาน

กลุ่มที่	พลังงานของรังสีแกมมา เอ็ม อี วี/โฟตอน MeV/Photon)	พลังงานเอฟเฟกตีฟ (Effective Energy) เอ็ม อี วี / โฟตอน
I	0.1 - 0.4	0.4
II	0.4 - 0.9	0.7
III	0.9 - 1.35	1.3
IV	1.35 - 1.8	1.7
V	1.8 - 2.2	2.2
VI	2.2 - 2.6	2.5
VII	2.8	2.8

¹Rockwell, T., Reactor Shielding Design Manual D. Van Nostrand Company Inc., 1965 p.34.

²Ibid., p.35.



กราฟรูปที่ ๔.๑

แสดงการสลายตัวของ พินซ์นโปรตัก กลุ่มต่าง ๆ หลังจากตั้ง เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

แสดงข้อมูลของแท่ง เชื้อเพลิงชุดแกนก่อนดับเครื่อง ปปว-1

หมายเลข แท่งเชื้อเพลิง	น้ำหนักของ ยูเรเนียม-235 เมื่อเริ่มต้น กรัม	น้ำหนักของ ยูเรเนียม-235 เมื่อดับเครื่อง กรัม	น้ำหนักของ ยูเรเนียม-235 ที่เผาไหม้ไป ทั้งหมด กรัม	น้ำหนักของ ยูเรเนียม-235 ที่เผาไหม้ไป จาก 9ตค.17 จนดับเครื่อง เมื่อ14กค.18 กรัม	ช่วงเวลา ที่ใช้ เดินเครื่อง ปปว-1	
F - 1	169.698	143.202	26.496	1.633	27ตค.05 - 17พค.10	
F - 2	170.059	141.940	28.199	2.210	1มีย.10 - 14กค.18	
F - 3	169.984	139.271	30.713	2.647	27ตค.05 - 11เมย07	
F - 5	169.911	139.900	30.011	2.214	6พค.07 - 14กค.18	
F - 6	169.851	139.015	30.836	2.332	27ตค.05 - 17มค.07	
F - 10	169.983	136.524	33.459	2.536	27ตค.07 - 14กค.18	
F - 11	169.826	138.927	30.899	2.292	27ตค.05 - 11เมย07	
F - 12	169.926	135.878	34.048	2.762	6พค.07 - 14กค.18	
F - 14	169.992	141.842	28.150	2.349	27ตค.05 - 11เมย07	
F - 15	170.017	134.770	35.247	3.636	6ตค.07 - 14กค.18	
F - 16	170.028	136.633	33.395	3.419	27ตค.05 - 27กย.10	
F - 17	169.980	156.442	13.538	2.918	31ตค.10 - 14กค.18	
F - 18	170.012	158.057	11.955	3.228	27ตค.05 - 17พค.10	
F - 19	169.928	163.148	6.780	1.766	1มีย.10 - 14กค.18	
F - 20	170.073	159.677	10.396	2.802	27ตค.05 - 27กย.10	
F - 21	170.046	157.988	12.058	3.489	1พย.10 - 14กค.18	
F - 22	170.080	157.313	12.767	3.551	18กค.11 - 14กค.18	
HR - 1	85.040	81.044	3.996	1.247	18กค.11 - 14กค.18	
C - 1	101.979	79.605	22.374	1.830	27ตค.05 - 18กค.11	
C - 2	101.952	78.683	23.269	1.864	21มีย.13 - 14กค.18	
C - 3	101.962	80.197	21.765	1.880	20พย.05 - 28กย.10	
C - 4	101.997	79.803	22.194	1.656	27ตค.10 - 14กค.18	
			รวม	502.465	54.199	27ตค.10 - 14กค.18

ถือว่าแกนของเครื่อง ปปว-๑ ชุดสุดท้าย ข้อมูลในตารางที่ ๔.๒ เดินที่จุดวิกฤต ๑ เมกะวัตต์ นาน ๓๘๘.๖ วัน แอคติวิตี (Activity) ของแกมมา หลังจากดับเครื่องปฏิกรณ์⁴ หาได้จาก

$$A_Y = \frac{1}{2} A_B = \frac{1}{2} 1.4P_0 \{ (\tau - T_0)^{-0.2} - \tau^{-0.2} \} \quad \text{คูรี}$$

เมื่อ

A_Y	= แอคติวิตีของรังสีแกมมา	คูรี
A_B	= แอคติวิตีของรังสีเบตา	คูรี
P_0	= กำลังงานที่เดินที่จุดวิกฤต	วัตต์
τ	= เวลาเริ่มเดินเครื่องถึงเวลาที่พิจารณา	วัน
T_0	= จำนวนเวลาที่เดินเครื่องที่จุดวิกฤต	วัน

สำหรับเครื่อง ปปว-๑

$$P_0 = 10^6 \quad \text{วัตต์}$$

$$T_0 = 388.6 \quad \text{วัน}$$

เมื่อเวลาหลังจากดับเครื่อง นาน ๑๐ วัน คือ $(\tau - T_0) = 10$ วัน

$$\text{ดังนั้น} \quad \tau = 10 + 388.6 = 398.6 \quad \text{วัน}$$

$$A_Y = 0.7 \times 10^6 (10^{-0.2} - 398.6^{-0.2}) \quad \text{คูรี}$$

$$= 7 \times 10^5 (0.631 - 0.302) \quad \text{คูรี}$$

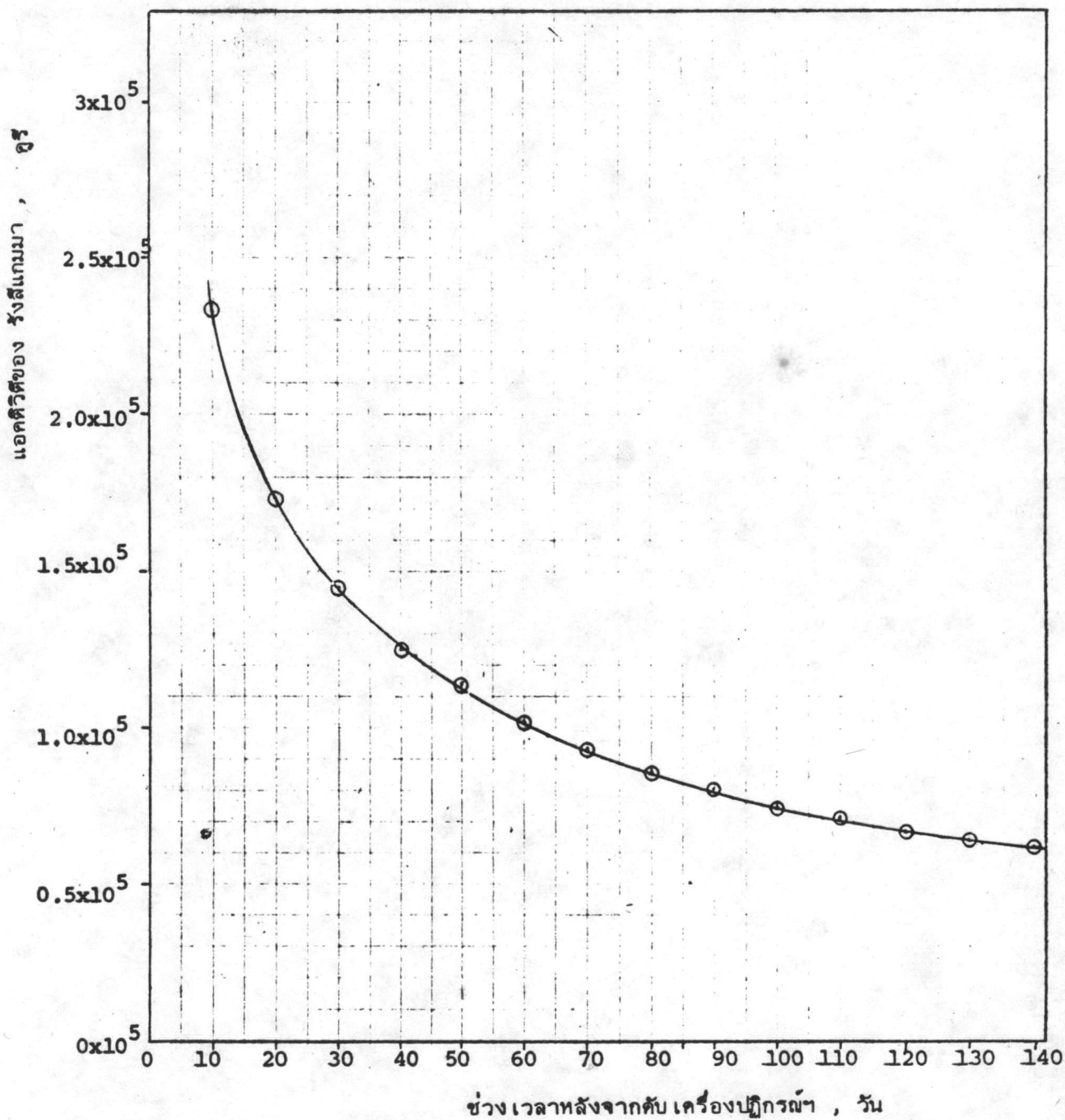
$$= 2.303 \times 10^5 \quad \text{คูรี}$$

ในทำนองเดียวกัน สามารถหาค่า แอคติวิตีของรังสีแกมมา ในช่วงเวลาต่าง ๆ หลังจากดับเครื่อง ปปว-๑ ได้ดังตารางที่ ๔.๓

⁴Glasstone, S., Sesonske, A. Nuclear Reactor Engineering D. Van Nostrand Company Inc., 1967, p. 102.

แสดงความแรงรังสีแกมมา หลังจากดับเครื่อง ปปว-๑

ช่วงเวลาหลังจากดับเครื่อง ($\tau - T_0$) วัน	เวลาดังแต่เริ่มเดินเครื่อง จนถึงเวลาที่พิจารณา, τ วัน	แอกติวิตีของรังสีแกมมา A_γ คูรี
10	398.6	2.3033×10^5
20	408.6	1.7421×10^5
30	418.6	1.4526×10^5
40	428.6	1.2642×10^5
50	438.6	1.1277×10^5
60	448.6	1.0224×10^5
70	458.6	0.9378×10^5
80	468.6	0.8678×10^5
90	478.6	0.8086×10^5
100	488.6	0.7576×10^5
110	498.6	0.7132×10^5
120	508.6	0.6741×10^5
130	518.6	0.6392×10^5
140	528.6	0.6079×10^5
150	538.6	0.5759×10^5
160	548.6	0.5541×10^5
170	558.6	0.5376×10^5
180	568.6	0.5092×10^5
190	578.6	0.4894×10^5
200	588.6	0.4711×10^5
210	598.6	0.4541×10^5
220	608.6	0.4383×10^5
230	618.6	0.4235×10^5



กราฟรูปที่ ๔.๒

แสดง แอกติวิตี ของรังสีแกมมา หลังจากระยะเวลาหลังจากดับ เครื่องปฏิกรณ์

๔.๓ การคำนวณหาความแรงรังสีแกมมาของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง จาก ตารางที่ ๔.๓ และกราฟรูปที่ ๔.๒ ที่ระยะเวลา ๕๐ วัน หลังจากดับเครื่อง ปปว-๑ ความแรงรังสีแกมมาของแท่งเชื้อเพลิง จะมีค่าที่ไม่มากกว่าที่ ๑๐๐ วันขึ้นไปนัก คือการสลายตัวของฟิสชั่นโปรดัก จะมีการสลายตัวที่ละน้อย ดังนั้นจึงเลือกที่ระยะเวลา ๕๐ วันหลังจากดับเครื่องเป็นเวลาที่ย้ายแท่งเชื้อเพลิง ในกราฟรูปที่ ๔.๑ ที่ระยะเวลา ๕๐ วันหลังจากดับเครื่องจะมีรังสีแกมมาในกลุ่มที่ I, V และ IV อยู่ น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับรังสีในกลุ่มที่ II ดังนั้น จะถือว่ารังสีในกลุ่มที่ II เป็นรังสีแกมมาที่แผ่ออกจากแท่งเชื้อเพลิงนี้ และมีพลังงานเอฟเฟกต์ของรังสีแกมมา เท่ากับ ๐.๗ เอ็ม ฮี ริ

ที่ระยะเวลา ๕๐ วันหลังจากดับเครื่อง ปปว-๑ แอคติวิตีของรังสีแกมมา มีค่า $A_T = 0.8086 \times 10^5$ คูรี , จากตารางที่ ๔.๓

กำหนดให้ S_T เป็นความแรงรังสีแกมมาทั้งหมด โฟตอน/วินาที
 แอคติวิตี ๑ คูรี เท่ากับการสลายตัว ๓.๗(๑๐)^{๑๐} ครั้ง/วินาที

ดังนั้น ความแรงรังสีแกมมาทั้งหมด หาได้จาก

$$S_T = 0.8086 \times 10^5 \times 3.7 \times 10^{10} \quad \text{โฟตอน/วินาที}$$

$$= 2.9918 \times 10^{15} \quad \text{โฟตอน/วินาที}$$

ให้ S_i แทน ความแรงรังสีของแท่งเชื้อเพลิงแท่งที่ i โฟตอน/วินาที
 B_i แทน น้ำหนักของยูเรเนียมที่ถูกเผาไหม้ไปของแท่งที่ i กรัม
 B_T แทน น้ำหนักของยูเรเนียมที่ถูกเผาไหม้ไปทั้งหมด กรัม

ดังนั้น

$$S_i = \frac{B_i}{B_T} S_T$$

จากตารางที่ ๔.๒ $B_T = 502.465$ กรัม

แท่งเชื้อเพลิงแท่งที่ F - 1 , $B_1 = 26.496$ กรัม

ดังนั้นความแรงรังสีแท่งที่ F - 1 , $S_1 = \frac{26.496}{502.465} (2.9918 \times 10^{15})$ โฟตอน/วินาที

$$= 1.5776 \times 10^{14} \quad \text{โฟตอน/วินาที}$$

ในกรณีที่แท่งเชื้อเพลิงถือว่าเป็นต้นกำเนิดที่เป็นเส้น ความแรงรังสี ต่อ ๑ หน่วยความยาว หาได้ จาก

$$S_{Li} = \frac{S_i}{L} \quad \text{โฟตอน/เซนติเมตร-วินาที}$$

เมื่อ L แทนความยาวของแท่งเชื้อเพลิง เซนติ เมตร

S_{Li} แทน ความแรงรังสีต่อ ๑ หน่วยความยาวของแท่งที่ i โฟตอน/ ซม.-วินาที

จากตารางที่ ๔.๒ ความยาวของแท่งเชื้อเพลิง ยาว ๒๔ นิ้ว หรือ เท่ากับ ๖๐.๙๖ เซนติเมตร
ความแรงรังสีของแท่งเชื้อเพลิงแท่งที่ F - 1, S_{L1}

$$\begin{aligned}
 S_{L1} &= \frac{S_1}{60.96} && \text{โฟตอน/ ซม.-วินาที} \\
 &= \frac{1.5776 \times 10^{14}}{60.96} && \text{โฟตอน/ ซม.-วินาที} \\
 &= 2.588 \times 10^{12} && \text{โฟตอน/ ซม.-วินาที}
 \end{aligned}$$

ผลของการคำนวณค่าความแรงรังสีของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง ดังตารางที่ ๔.๔

ความแรงรังสีมากที่สุด คือ แท่งที่ F - 15

$$\begin{aligned}
 S_{15} &= 2.0982 \times 10^{14} && \text{โฟตอน/วินาที} \\
 S_{L15} &= 3.4426 \times 10^{12} && \text{โฟตอน/ ซม.-วินาที}
 \end{aligned}$$

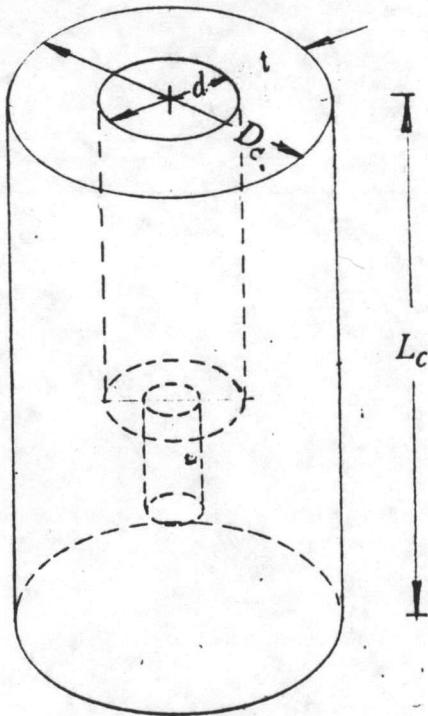
ตารางที่ ๕.๔

แสดงควมแรงรังสีของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง

หมายเลข แท่งเชื้อเพลิง	ความแรงรังสี S_i โพตรอน/วินาที	ความแรงรังสี เมื่อถือเป็น เมื่อถือว่าเป็นต้นกำเนิดรังสี ที่เป็นเส้น , S_{Li} โพตรอน/เซนติ เมตร-วินาที
F - 1	1.5775×10^{14}	2.5877×10^{12}
F - 2	1.6742×10^{14}	2.7463×10^{12}
F - 3	1.8286×10^{14}	2.9996×10^{12}
F - 5	1.7868×10^{14}	2.9311×10^{12}
F - 6	1.8395×10^{14}	3.0116×10^{12}
F - 10	1.9921×10^{14}	3.2678×10^{12}
F - 11	1.8397×10^{14}	3.0178×10^{12}
F - 12	2.0272×10^{14}	3.3254×10^{12}
F - 14	1.6760×10^{14}	2.7493×10^{12}
F - 15	2.0986×10^{14}	3.4426×10^{12}
F - 16	1.9883×10^{14}	3.2616×10^{12}
F - 17	0.8060×10^{14}	1.3221×10^{12}
F - 18	0.7118×10^{14}	1.1676×10^{12}
F - 19	0.4037×10^{14}	0.6622×10^{12}
F - 20	0.6189×10^{14}	1.0153×10^{12}
F - 21	0.7179×10^{14}	1.1777×10^{12}
F - 22	0.7602×10^{14}	1.2469×10^{12}
HR- 1	0.2375×10^{14}	0.3903×10^{12}
C - 1	1.3321×10^{14}	2.1852×10^{12}
C - 2	1.3854×10^{14}	2.2727×10^{12}
C - 3	1.2958×10^{14}	2.1258×10^{12}
C - 4	1.3214×10^{14}	2.1677×10^{12}

๔.๔ การคำนวณหาความหนาของคอนเทนเนอร์ ในการออกแบบคอนเทนเนอร์มีจุดมุ่งหมายที่สำคัญคือ ต้องการที่จะให้ความปลอดภัยต่อผู้ที่ทำการขนย้ายแท่งเชื้อเพลิง หรือ ในการขนส่งแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งในการขนส่งแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วนี้ จะอยู่ในกลุ่มของการขนส่ง วัสดุพิสไซล์พวกที่ II และเป็น สิบต่อ หรือ ภาชนะบรรจุ พวกที่ III - เหลือง ตามระเบียบปฏิบัติเกี่ยวกับการขนส่งวัสดุที่มีอันตรายของ ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ⁵ซึ่งกำหนดค่าดัชนีขนส่งสำหรับประเภทนี้ เมื่อขนส่งตามปกติ ค่าดัชนีขนส่งไม่เกิน ๑๐ และ ระดับรังสี ๗ จุดใด ๆ บนผิวนอกของคอนเทนเนอร์นั้น ๆ อยู่ระหว่าง ๔๐ ถึง ๒๐๐ มิลลิเรม/ชั่วโมง ดังนั้น ในการออกแบบคอนเทนเนอร์นี้ จะใช้ค่า โคลเรท ที่ระยะ ๑ เมตร จากผิวนอกของคอนเทนเนอร์ จะต้องมีความไม่เกิน ๑๐ มิลลิเรม/ชั่วโมง และระดับรังสีที่จุดใด ๆ บนผิวนอกคอนเทนเนอร์ต้องไม่เกิน ๒๐๐ มิลลิเรม/ชั่วโมง

ลักษณะรูปร่างของคอนเทนเนอร์ เนื่องจากขนาดของแท่งเชื้อเพลิงของเครื่อง ปปา-๑ มีขนาดโดยประมาณ $๓" \times ๓" \times ๒๔"$ จึงเลือกคอนเทนเนอร์เป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical Shape) ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๔.๓



โดยที่

- D_c = ขนาดผ่าศูนย์กลางภายนอก
- d = ขนาดผ่าศูนย์กลางภายใน
- t = ความหนาของคอนเทนเนอร์
- L_c = ความสูงของคอนเทนเนอร์

รูปที่ ๔.๓

แสดงรูปร่าง ของคอนเทนเนอร์

⁵ IAEA, Safety, Regulation for the Safe Transport of radioactive Materials Revised Ed. 1973. / Series Number 12 pp. 39, 56.

วัสดุ	ใช้ เหล็ก(Iron) และ ตะกั่ว (Lead)		
เหล็ก	ความหนาแน่น , ρ	= 7.85	กรัม/ลบ.ซม.
	ที่รังสีแกมมาพลังงาน ๐.๗ เอ็ม บี วี จากกราฟรูปที่ ๓.๑		
	แมส แอทเทนูเอชัน โคเอฟฟิเชียน (Mass attenuation coefficient) , μ/ρ	= 0.072	ซม. ^๒ /กรัม
ดังนั้น	μ	= 0.072 x 7.85 = 0.5652	ซม. ^{-๑}
ตะกั่ว	ความหนาแน่น ρ	= 11.35	กรัม/ลบ.ซม.
	แมส แอทเทนูเอชัน โคเอฟฟิเชียน=	0.0988	ซม. ^๒ /กรัม
	μ	= 0.0988 x 11.35 = 1.12138	ซม. ^{-๑}

คอนเทนเนอร์ ที่ออกแบบนี้จะใช้เหล็ก หุ้ม ภายนอก และ ภายใต ใน ระหว่างเหล็ก เป็น ตะกั่ว เนื่องจาก ตะกั่ว สามารถที่จะกัน รังสีได้ดี แต่ มีความแข็งแรงทางวัสดุ น้อยจึงใช้เหล็ก มาประกอบ เพื่อผลทางความแข็งแรงและ ผลในการหล่อขึ้นรูปคอนเทนเนอร์ด้วย ในการออกแบบ จะใช้ เหล็กที่มีความหนา $1/4$ นิ้ว

ขนาดผ่าศูนย์กลางภายใน , d

เส้นทะแยงมุมของพื้นที่หน้าตัดของแท่ง เชื้อเพลิง = $\sqrt{3^2 + 3^2} = 4.24$ นิ้ว = ๑๐.๗๗ ซม.

ใช้ ขนาดผ่าศูนย์กลางภายใน , d = 12.7 เซนติเมตร

ดังนั้น ขนาดรัศมีภายใน , r = 12.7/2 = 6.35 เซนติเมตร

การหาขนาดความหนาของตะกั่ว , t

จากบทที่ ๓ เมื่อกำหนดให้แท่งเชื้อเพลิงเป็นต้นกำเนิดรังสีที่เป็นเส้น ค่า เรดิเอชันฟลักซ์ จะมากที่สุดที่ระดับกึ่งกลางแท่งเชื้อเพลิง คือ มุม $\theta_1 = \theta_2$

จากสมการที่ (๓.๑๑)

$$\phi = \frac{S_L}{2\pi a} \{ A_{11}A_{21} F(\theta, b_{11}) + A_{12}A_{22} F(\theta, b_{22}) \}$$

ความสัมพันธ์ของ โดสเรท และ เรดิเอชันฟลักซ์ หาได้จาก

เมื่อ	ϕ	แทน เรดิเอชันฟลักซ์	โพตอน/ซม.-วินาที
	K	แทน คอนเวอร์ชัน แฟคเตอร์ (Conversion Factor)	
	D	แทน โดสเรท	มิลลิเรม/ชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 3-6 ที่ รังสีแกมมาพลังงาน ๐.๗ เอ็มอีวี

๑ มิลลิแรม/ชั่วโมง มีค่า อีควิวาเลน (EQUIVALENT) กับ
เรดิเอชันฟลักซ์ เท่ากับ 720 โฟตอน/ชม.^๒-วินาที

ดังนั้น $K = 720$

จากสมการ (๓.๑๑) จึงเขียนในเทอมของ โดสเรท ได้ดังสมการ (๔.๑)

$$D = \frac{S_L}{2\pi a K} \{ A_{11} A_{21} F(\theta, b_{11}) + A_{12} A_{22} F(\theta, b_{12}) \} \quad (๔.๑)$$

โดยที่

$$D = \text{โดสเรทในการออกแบบ} = 50 \quad \text{มิลลิแรม/ชั่วโมง}$$

$$S_L = \text{ความแรงรังสีของแท่งเชื้อเพลิงแท่งที่มากที่สุด คือ} \\ \text{แท่งที่ F-15} = 3.4426 \times 10^{12} \quad \text{โฟตอน/ชม.}^2\text{-วินาที}$$

$$a = 6.35 + 0.635 + t + 0.635 = 7.62 + t \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{L}{2a} = \tan^{-1} \frac{60.96}{(7.62+t)^2}$$

$$b_{11} = (1+\alpha_{11})\mu_1 t_1 + (1+\alpha_{21})\mu_2 t_2$$

$$b_{22} = (1+\alpha_{12})\mu_1 t_1 + (1+\alpha_{22})\mu_2 t_2$$



จากกราฟรูปที่ 3.2 - 3.3

	A_1	A_2	$-\alpha_1$	α_2
เหล็ก	9.5	-8.5	0.093	0.017
ตะกั่ว	1.9	-0.9	0.03	0.25

ดังนั้น

$$b_{11} = \{(1 - 0.093)0.5652 \times 2 \times 0.636\} + (1-0.03)1.12138t \\ = 0.651 + 1.08774t$$

$$b_{22} = \{(1 + 0.017)0.5652 \times 1.27\} + (1+0.25)1.12138t \\ = 0.730 + 1.401725t$$

แทนค่าในสมการ (๔.๑)

$$50 = \frac{3.4426 \times 10^{12}}{2(7.62+t)720} \{9.5 \times 1.9 F(\theta, b_{11}) + 8.5 \times 0.9 F(\theta, b_{22})\}$$

$$7.62 + t = \frac{3.4426 \times 10^{12}}{2\pi \times 720 \times 50} \{18.0 F(\theta, b_{11}) + 7.65 F(\theta, b_{12})\}$$

$$7.62 + t = 1.521963 \times 10^7 \{18.05 F(\theta, b_{11}) + 7.65 F(\theta, b_{12})\}$$

โดยการทดลองแทนค่า

เมื่อ ความหนา $t = 13$ เซนติเมตร

ด้านซ้ายมือ , $LS = 7.62 + 13 = 20.62$

$$b_{11} = 0.651 + 1.08774(13) = 14.79$$

$$b_{22} = 0.730 + 1.401725(13) = 18.95$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{60.96}{2(7.62 + 13)} = 55.92^\circ$$

จากกราฟรูปที่ 3.4

$$F(55.92, 14.79) = 1.1 \times 10^{-7}$$

$$F(55.92, 18.95) = 1.5 \times 10^{-9}$$

ด้านขวามือ , $RS = 1.521963 \times 10^7 \{(18.05 \times 1.1 \times 10^{-7}) + (7.65 \times 1.5 \times 10^{-9})\}$
 $= 1.521963 \times 10^7 \times 1.9969 \times 10^{-6}$
 $= 30.393$

ด้านซ้ายมือ ไม่เท่ากับด้านขวามือ สมมติใหม่ ให้ ความหนา , $t = 13.5$ เซนติเมตร

t ซม.	LS	θ องศา	b_{11}	b_{22}	$F(\theta, b_{11})$	$F(\theta, b_{22})$	RS
13	20.62	55.92	14.79	18.95	1.1×10^{-7}	1.5×10^{-9}	30.393
13.5	21.12	55.85	15.33	19.65	6.4×10^{-8}	7.5×10^{-10}	17.66
13.3	20.92	55.53	15.12	19.37	7.8×10^{-8}	3.7×10^{-10}	21.5

ได้ความหนาของตะกั่ว เท่ากับ ๑๓.๓ เซนติเมตร จะใช้ความหนาของตะกั่ว ๑๓.๕ เซนติเมตร เพื่อผลทางด้านความปลอดภัย คอนเทนเนอร์

ดังนั้น คอนเทนเนอร์ จะประกอบด้วย เหล็ก หนา ๐.๖๓๔ ซม.(๑/๔ นิ้ว) ทั้งภายนอก และภายใน ระหว่างเหล็ก เป็น ตะกั่ว หนา ๑๓.๕ เซนติเมตร

เซกโดสเรทที่ปรากฏที่ระยะจากผิวคอนเทนเนอร์ ๑ เมตร

$$\text{ดังนั้น } a = 7.62 + 13.5 + 100 = 121.12$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{60.96}{2 \times 121.12} = 14.125^\circ$$

$$b_{11} = 15.12$$

$$b_{22} = 19.37$$

$$F(14.13, 15.12) = 5.8 \times 10^{-8}$$

$$F(14.13, 19.37) = 7.6 \times 10^{-10}$$

$$D = \frac{3.4426 \times 10^{12}}{2\pi \times 121.12 \times 720} \{ (18.05 \times 5.8 \times 10^{-8}) + (7.65 \times 7.6 \times 10^{-10}) \}$$

$$= 6.2829 \times 10^6 \times 1.0527 \times 10^{-6}$$

$$= 6.614$$

มิลลิเรม/ชั่วโมง

ผลของ โดสเรทที่ระยะ ๑ เมตร จากผิวคอนเทนเนอร์ ของแท่งเชื้อเพลิงที่มีความแรงรังสีสูงสุด เท่ากับ ๖.๖๑๔ มิลลิเรม/ชั่วโมง ซึ่ง ต่ำกว่า ๑๐ มิลลิเรม/ชั่วโมง ที่จำกัดไว้ ดังนั้น คอนเทนเนอร์ ที่ได้ออกแบบมานี้ จะสามารถกั้นรังสีได้เพียงพอที่จะให้ความปลอดภัยต่อผู้ที่ จะทำการขนย้าย แท่งเชื้อเพลิง โดยการใช้ คอนเทนเนอร์นี้

เขตก่า โดสเรท ที่ปรากฏที่ผิวนอกคอนเทนเนอร์ เมื่อบรรจุแท่งเชื้อเพลิงที่มีความแรงรังสีสูงสุด คือ แท่งที่ F-15 ความแรงรังสี , $S_L = 3.4426 \times 10^{12}$ โฟตอน/ซม.-วินาที

$$\theta = \tan^{-1} \frac{L}{2a} = \tan^{-1} \frac{60.96}{2 \times 21.12} = 55.85^\circ$$

$$b_{11} = 15.33$$

$$b_{22} = 19.65$$

$$F(\theta, b_{11}) = F(55.85^\circ, 15.33) = 6.4 \times 10^{-8}$$

$$F(\theta, b_{22}) = F(55.85^\circ, 19.65) = 7.5 \times 10^{-10}$$

แทนค่า

$$D = \frac{3.4426 \times 10^{12}}{2\pi \times 21.12 \times 720} \{ (18.05 \times 6.4 \times 10^{-8}) + (7.65 \times 7.5 \times 10^{-10}) \}$$

$$= 3.603 \times 10^7 \times 1.161 \times 10^{-6}$$

$$= 41.83$$

มิลลิเรม/ชั่วโมง

ดังนั้น โดสเรทที่ผิวนอกของคอนเทนเนอร์ ระดับกึ่งกลางของแท่งเชื้อเพลิง เท่ากับ 41.83 มิลลิเรม/ชม.