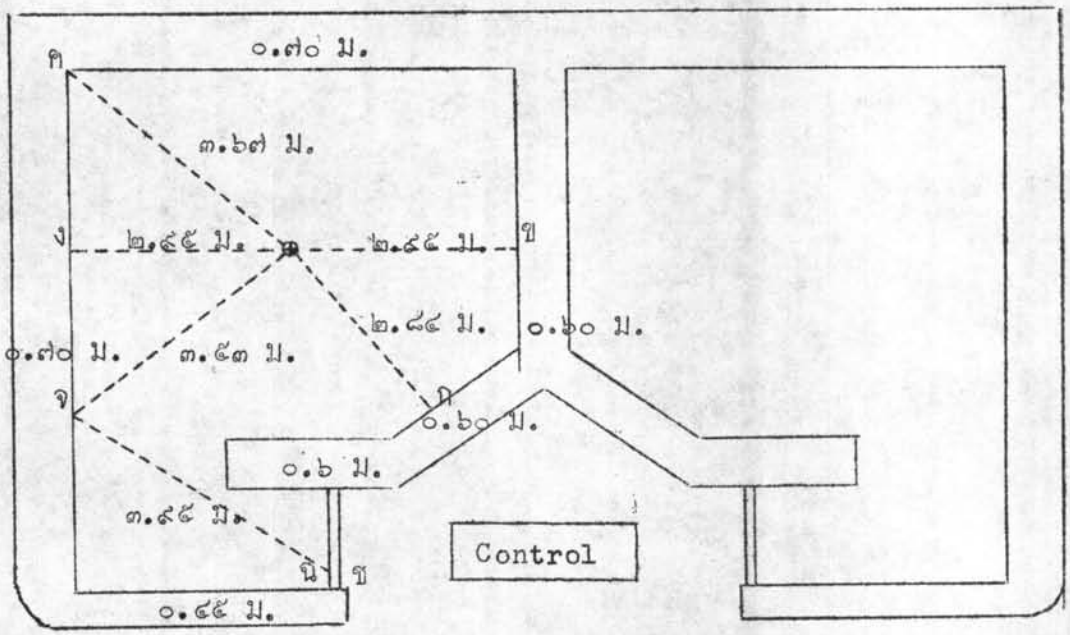
บทที่ ๔

ผลการทดลอง

รูป ๔.๑ แผนผังห้องโคบอลท์-๖๐ ห้องที่ ๑



ห้องที่ ๑ ปริมาณรังสีทั้งหมดที่ผิวของหุ่นจำลอง = ๘๕๒๘๔ R

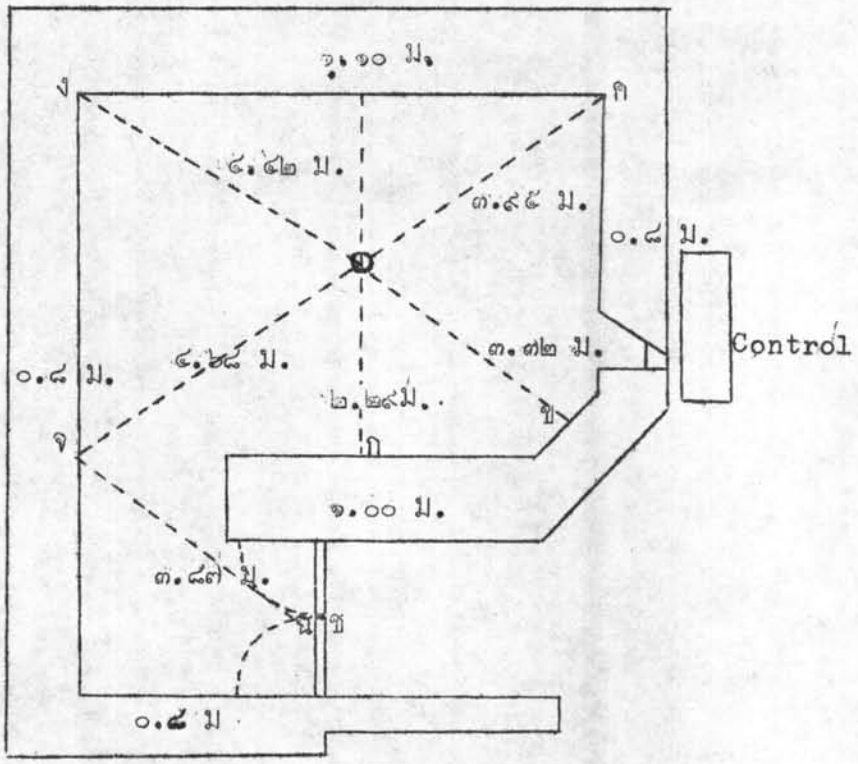
สอบเทียบเครื่องมือจาก TLD. มาตรฐานได้ = ๑.๔๔ mR/count

control TLD. = ๕๓.๕ counts

ตารางที่ ๔.๑ แสดงค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้จาก TLD-๑๐๐ ที่ติดตามผนัง เป็นมุมต่าง ๆ ภายในห้อง ๑

	มุมที่รังสีสะท้อน	d_1 (เมตร)	I_1(R)	I_2(R)
จุด ก.	๔๕°	๑.๘๒	๘๓.๘	๒๗๗.๖
	๙๐°	๒.๘๔	๑๘.๑	๑๔๕.๙
	๑๒๐°	๓.๒๘	๑๐.๔	๑๑๑.๘
จุด ข.	๔๕°	๑.๘๒	๘๕.๑	๒๘๑.๘
	๙๐°	๒.๙๕	๑๗.๔	๑๕๔.๕
	๑๒๐°	๓.๔๔	๑๐.๑	๑๑๙.๕
จุด ค.	๔๕°	๑.๘๒	๙๑.๒	๓๐๒.๑
	๙๐°	๓.๖๗	๑๑.๒	๑๕๒.๖
	๑๒๐°	๔.๐๔	๗.๕	๑๒๒.๔
จุด ง.	๔๕°	๑.๘๒	๘๔.๑	๒๗๘.๖
	๙๐°	๒.๙๕	๑๗.๒	๑๔๙.๗
	๑๒๐	๓.๔๑	๑๐.๑	๑๑๗.๔
จุด จ.	๙๐°	๓.๕๓	๑๑.๗	-
จุด ฉ.	-	-	๐.๑๒๙	-
จุด ช.	-	-	๐.๐๑๓	-

รูป ๔.๒ แผนผังห้องโคบอลท์-๖๐ ห้องที่ ๒



ห้องที่ ๒ ปริมาณรังสีทั้งหมดที่ผิวของหุ่นจำลอง = ๘๕๗๑๖ R

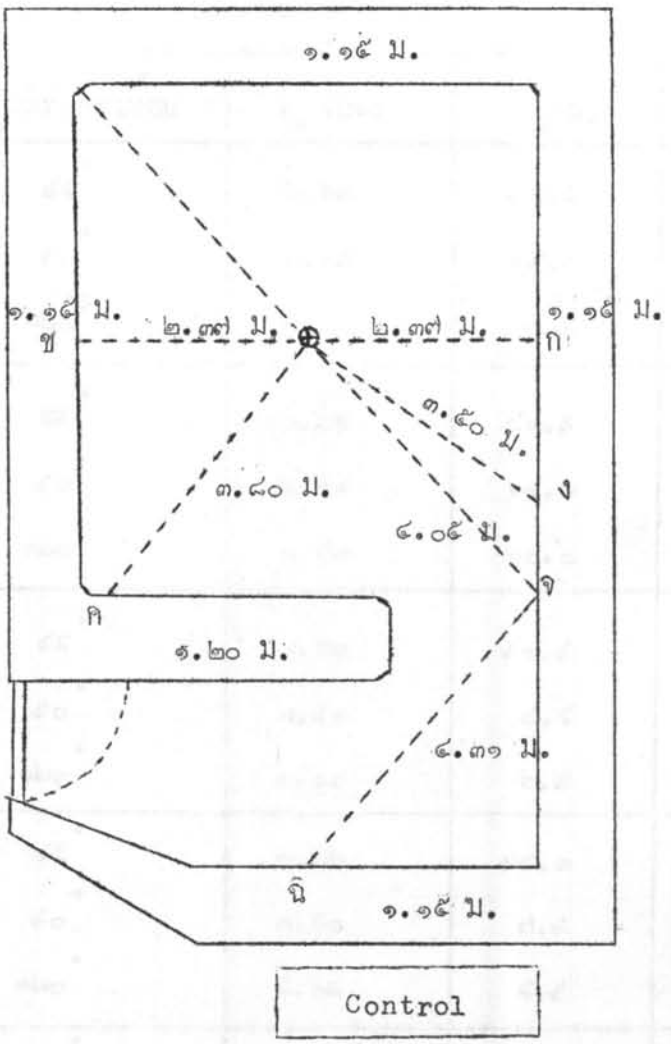
สอบเทียบเครื่องมือจาก TLD. มาตรฐานได้ = ๑.๔๐ mR/count

Control TLD. = ๔๔ counts

ตาราง ๔.๒ แสดงค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้จาก TLD -๑๐๐ ที่ติดตามผนัง เป็นมุมต่าง ๆ ภายใน ห้อง ๒

	มุมที่รังสีสะท้อน	d_1 (เมตร)	I_1 (R)	I_2 (R)
จุด ก.	๔๕°	๑.๔๑	๑๒๔.๔	๒๕๗.๒
	๙๐°	๒.๒๔	๒๔.๔	๑๕๖.๔
	๑๒๐°	๒.๗๔	๑๒.๘	๔๖.๒
จุด ข.	๔๕°	๑.๔๑	๑๒๕.๗	๒๔๔.๘
	๙๐°	๓.๓๒	๑๒.๕	๑๓๗.๘
	๑๒๐°	๓.๔๖	๔.๑	๑๐๔.๑
จุด ค.	๔๕°	๑.๔๑	๑๑๗.๔	๒๓๘.๖
	๙๐°	๓.๔๕	๔.๑	๑๔๑.๒
	๑๒๐°	๓.๔๖	๔.๖	๑๐๓.๓
จุด ง.	๔๕°	๑.๔๑	๑๓๑.๖	๒๖๑.๖
	๙๐°	๔.๔๒	๖.๓	๑๒๒.๕
	๑๒๐°	๓.๔๖	๗.๓	๘๗.๙
จุด จ.	๙๐°	–	๕.๓	–
จุด ฉ.	–	–	๐.๐๙๕	–
จุด ช.	–	–	๐.๐๐๘	–

รูป ๔.๓ แผนผังห้องโคบอลท์-๖๐ ห้องที่ ๓



ห้องที่ ๓ ปริมาณรังสีทั้งหมดที่ผิวของหุ่นจำลอง = ๖๒๘๓๐ R

สอบเทียบเครื่องมือจาก TLD. มาตรฐานได้ = ๑.๕๔ $^{mR}/_{count}$

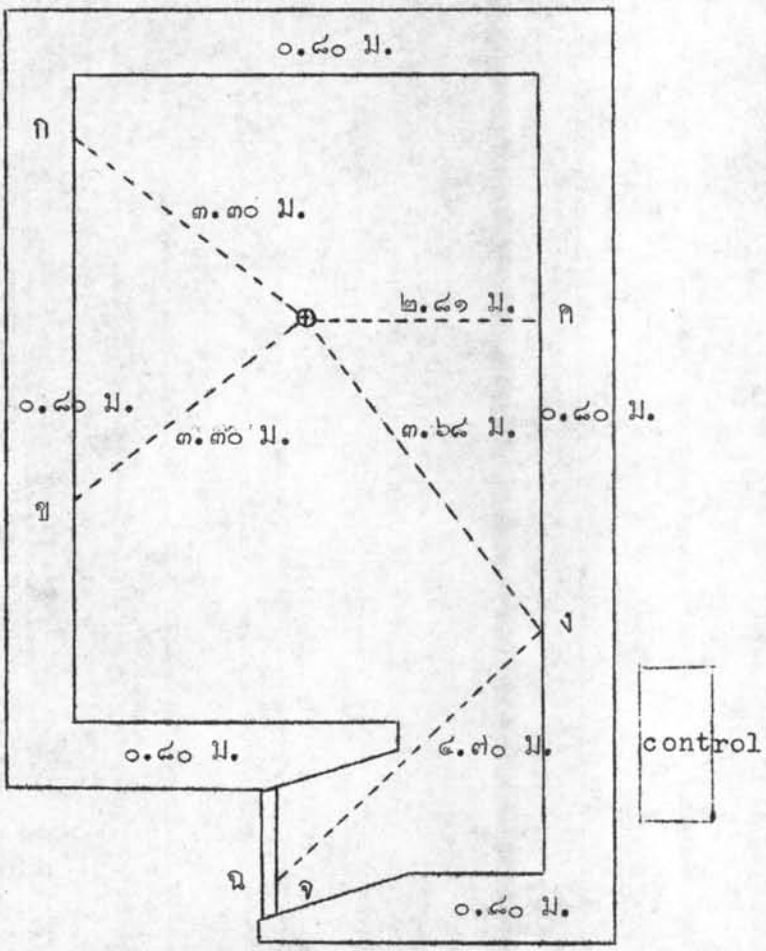
Control TLD. = ๑๕๒ counts

ตาราง ๔.๓ แสดงค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้จาก TLD -๑๐๐ ที่ติดตามผนัง เป็นมุมต่าง ๆ ภายในห้องที่ ๓

	มุมที่รังสีสะท้อน	d_1 (เมตร)	I_1(R)	I_2(R)
จุด ก.	๔๕°	๑.๖๒	๔๔.๕	๒๔๗.๔
	๙๐°	๒.๓๗	๑๔.๓	๘๐.๖
	๑๒๐°	๒.๗๓	๔.๘	๗๒.๔
จุด ข.	๔๕°	๑.๖๒	๘๓.๔	๒๒๐.๔
	๙๐°	๒.๓๔	๑๔.๖	๗๔.๔
	๑๒๐°	๒.๗๐	๑๐.๐	๗๓.๒
จุด ค.	๔๕°	๑.๖๒	๔๑.๔	๒๔๑.๒
	๙๐°	๓.๘๐	๘.๕	๑๒๒.๘
	๑๒๐°	๓.๐๐	๖.๔	๘๓.๖
จุด ง.	๔๕°	๑.๖๒	๔๘.๓	๒๕๗.๔
	๙๐°	๓.๕๐	๗.๔	๙๖.๖
	๑๒๐°	๔.๐๔	๕.๔	๙๕.๖
จุด จ.	๙๐°	๔.๐๕	๕.๔	-
จุด ฉ.	-	-	๐.๐๘๒	-
[1]จุด ช.	-	-	-	-

[1]จุด ช. ไม่ได้ทำการวัด เนื่องมาจากห้องโคบอลท์-๖๐ ห้องนี้ maze ลึกมาก

รูป ๔.๔ แผนผังห้องโคบอลท์-๖๐ ห้องที่ ๔



ห้องที่ ๔ ปริมาณรังสีทั้งหมดที่ผิวของหุ่นจำลอง = ๖๖๔๕๕ R

สอบเทียบเครื่องมือจาก TLD. มาตรฐานได้ = ๑.๖๗ mR/count

Control TLD. = ๔๗ counts

ตาราง ๔.๔ แสดงค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้จาก TLD -๑๐๐ ที่ติดตามผนัง เป็นมุมต่าง ๆ ภายในห้องที่ ๔

	มุมที่รังสีสะท้อน	d_1 (เมตร)	I_1 (R)	I_2 (R)
จุด ก.	๔๕°	๑.๖๖	๔๖.๗	[2]๑๗๕
	๙๐°	๓.๓๐	๔.๔	๑๐๘.๓
	๑๒๐°	๓.๗๗	๗.๒	๑๐๒.๗
จุด ข.	๔๕°	๑.๖๖	๑๐๐.๓	๖๖๓.๑
	๙๐°	๓.๓๐	๑๐.๑	๑๑๐.๓
	๑๒๐°	๓.๗๗	๗.๗	๑๐๙.๗
จุด ก.	๔๕°	๑.๖๖	๔๖.๕	๒๕๓.๑
	๙๐°	๒.๘๑	๑๒.๕	๙๘.๖
	๑๒๐°	๓.๒๔	๘.๖	๙๐.๖
จุด ง.	๔๕°	๑.๖๖	๙๗.๓	๒๕๕.๔
	๙๐°	๓.๖๘	๗.๖	๑๐๓.๑
	๑๒๐°	๓.๗๐	๗.๔	๑๐๐.๖
จุด จ.	๙๐°	-	๐.๑๔๔	-
จุด ฉ.	-	-	๐.๐๕๖	-

[2] ข้อมูลผิดพลาดเนื่องจากรังสีสะท้อนถูกบังด้วยขอบเตียง และ beam stopper

จากปริมาณรังสีที่วัดได้ทั้งหมดในแต่ละห้อง นำมาหาอัตราส่วนระหว่างปริมาณรังสีทั้งหมดที่ตกกระทบหุ่นจำลอง กับปริมาณรังสีที่สะท้อนออกมา โดยวัดที่ระยะ ๑ เมตร จากจุดจุดกึ่งกลางของรังสีตกกระทบ เรียกอัตราส่วนนี้ว่า "a"

$$a = \frac{\text{ปริมาณรังสีสะท้อนที่ ๑ เมตร จากจุดกึ่งกลางลำแสง}}{\text{ปริมาณรังสีในอากาศที่จุดกึ่งกลางของลำแสง}}$$

ค่า a นี้ จะทำการวัดที่มุมต่าง ๆ ของรังสีสะท้อน โดยวัดเป็นมุม ๔๕°, ๔๐° และ ๑๒๐°

ตาราง ๔.๕ ค่า "a" ห้อง ๑

มุมรังสีสะท้อน	จุด ก.	จุด ข.	จุด ค.	จุด ง.	"a" เฉลี่ย
๔๕°	๓.๒๕ x ๑๐$^{-๓}$	๓.๓๐ x ๑๐$^{-๓}$	๓.๕๔x๑๐$^{-๓}$	๓.๒๐x๑๐$^{-๓}$	๓.๓๔x๑๐$^{-๓}$
๔๐°	๑.๗๑ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๘๑ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๗๘x๑๐$^{-๓}$	๑.๗๖x๑๐$^{-๓}$	๑.๗๖x๑๐$^{-๓}$
๑๒๐°	๑.๓๑ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๔๐ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๔๓x๑๐$^{-๓}$	๑.๓๗x๑๐$^{-๓}$	๑.๓๗x๑๐$^{-๓}$

ตาราง ๔.๖ ค่า "a" ห้อง ๒

มุมรังสีสะท้อน	จุด ก.	จุด ข.	จุด ค.	จุด ง.	"a" เฉลี่ย
๔๕°	๓.๐x๑๐$^{-๓}$	๒.๔๑x๑๐$^{-๓}$	๒.๗๔x๑๐$^{-๓}$	๓.๐๕x๑๐$^{-๓}$	๒.๔๓x๑๐$^{-๓}$
๔๐°	๑.๘๓x๑๐$^{-๓}$	๑.๖๑x๑๐$^{-๓}$	๑.๖๕x๑๐$^{-๓}$	๑.๔๓x๑๐$^{-๓}$	๑.๖๓x๑๐$^{-๓}$
๑๒๐°	๑.๑๒ x๑๐$^{-๓}$	๑.๒๗x๑๐$^{-๓}$	๑.๒๑x๑๐$^{-๓}$	๑.๐๓x๑๐$^{-๓}$	๑.๑๖x๑๐$^{-๓}$

ตาราง ๔.๗ ค่า " a " ห้อง ๓

มุมรังสีสะท้อน	จุด ก.	จุด ข.	จุด ค.	จุด ง.	" a " ค่าเฉลี่ย
๔๕°	๓.๔๕ x ๑๐$^{-๓}$	๓.๕๑ x ๑๐$^{-๓}$	๓.๘๔ x ๑๐$^{-๓}$	๔.๑๐ x ๑๐$^{-๓}$	๓.๘๕ x ๑๐$^{-๓}$
๙๐°	๑.๒๘ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๒๗ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๔๔ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๕๔ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๕๖ x ๑๐$^{-๓}$
๑๒๐°	๑.๑๖ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๑๗ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๓๓ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๕๒ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๒๙ x ๑๐$^{-๓}$

ตาราง ๔.๘ ค่า " a " ห้อง ๔

มุมรังสีสะท้อน	จุด ก.	จุด ข.	จุด ค.	จุด ง.	" a " ค่าเฉลี่ย
๔๕°	[๓] -	๓.๔๐ x ๑๐$^{-๓}$	๓.๕๑ x ๑๐$^{-๓}$	๓.๘๐ x ๑๐$^{-๓}$	๓.๘๓ x ๑๐$^{-๓}$
๙๐°	๑.๖๐ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๖๔ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๔๖ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๕๔ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๕๖ x ๑๐$^{-๓}$
๑๒๐°	๑.๕๓ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๖๔ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๓๔ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๕๐ x ๑๐$^{-๓}$	๑.๕๐ x ๑๐$^{-๓}$

นำค่า a ทั้ง ๔ ห้อง ในแต่ละมุม มาหาค่าเฉลี่ยทั้งหมดแล้วเปรียบเทียบกับค่า a ในหนังสือ NCRP

ตาราง ๔.๙ เปรียบเทียบค่า " a " จากการทดลองกับค่า " a " จาก NCRP report no ๓๔

มุมรังสีสะท้อน	ค่า " a " จากการทดลอง	ค่า " a " จาก NCRP report no ๓๔
๔๕°	๓.๘๔ x ๑๐$^{-๓}$	๓.๖๐ x ๑๐$^{-๓}$
๙๐°	๑.๖๖ x ๑๐$^{-๓}$	๐.๙ x ๑๐$^{-๓}$
๑๒๐°	๑.๓๓ x ๑๐$^{-๓}$	-

[๓] ข้อมูลผิดพลาดเนื่องจากรังสีสะท้อนถูกบังด้วยขอบเตียงและ beam stopper

สาเหตุที่แตกต่างกันเนื่องจาก NCRP. วัดที่ ๑ เมตรจริง และในการทดลองครั้งนี้วัดตามระยะต่าง ๆ ตามผนังห้อง แล้วคิดตามที่ ๑ เมตร โดยใช้กฎกำลังสองผกผัน ซึ่งก็อาจคลาดเคลื่อนบ้าง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้ก็ใกล้เคียงกันมาก

ในการคำนวณเพื่อหาความหนาที่แท้จริงของผนังของห้องโคบอลท์-๖๐ แต่ละห้องปริมาณรังสีที่ใช้ (primary beam) ควรจะใช้เท่ากันหมด เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบในแต่ละห้อง ว่าการกั้นรังสีสะท้อนโดยใช้ผนังคอนกรีต จะมากเกินพอหรือน้อยกว่ากัน เป็นจำนวนเท่าใด โดยคิดปริมาณรังสีที่ใช้ในแต่ละห้องเท่ากับ - ๖๐,๐๐๐ R ใน ๑ สัปดาห์ และใน ๑ สัปดาห์ ทำงาน ๕ วัน เพราะฉนั้น ๑ วัน ปริมาณรังสีที่จะใช้เท่ากับ ๑๒,๐๐๐ R ถ้าคิดเฉลี่ยคนไข้ ๑ คน ได้รับปริมาณรังสีเฉพาะแห่ง (บริเวณที่เป็นมะเร็ง) เท่ากับ ๒๐๐ R ใน ๑ วัน ทำการรักษาคนไข้ได้ ๖๐ คน ซึ่งความเป็นจริง คนไข้ที่มารับการรักษาจากรังสีแกมม่าจากโคบอลท์-๖๐ ในแต่ละโรงพยาบาลจะมีประมาณ ๒๐ ถึง ๓๐ คน ต่อ ๑ วัน ยกเว้นห้อง ๑ ซึ่งเป็นโรงพยาบาลใหญ่ มีคนไข้ประมาณ ๕๐ คน ต่อ ๑ วัน

การคำนวณปริมาณรังสีที่ตกกระทบหุ่นจำลอง ให้เท่ากับ ๖๐,๐๐๐ R เหมือนกับทุกห้องนั้น สามารถคิดคำนวณได้ดังนี้ คือ ปริมาณรังสีสะท้อน (Scattered radiation) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณรังสี ณ ตำแหน่งที่ใช้รักษาคนไข้ ในที่นี้จะทำการคำนวณเฉพาะที่มุมสะท้อน ๔๐ องศา เมื่อรังสีตกกระทบผนัง และผ่านทะลุผนังไปนั้น จะเป็นระยะทางที่สั้นที่สุด เมื่อเทียบกับรังสีตกกระทบผนังเป็นมุม ๔๕° หรือ ๑๒๐° แล้วผ่านทะลุผนังไป ถ้าจากการวัดปริมาณรังสีที่ตกกระทบเป็นมุม ๔๐° ภายนอกผนังและทราบค่าว่า ปริมาณรังสีที่วัดได้มีค่าน้อยจนไม่เป็นอันตรายต่อเจ้าหน้าที่รังสีและบุคคลทั่วไป เพราะฉนั้นปริมาณรังสีที่ตกกระทบผนังเป็นมุม ๔๕° และ ๑๒๐° จะต้องมีค่าที่ผนังด้านนอกน้อยกว่าปริมาณรังสีที่ตกกระทบผนังเป็นมุม ๔๐° เพราะว่าระยะทางของรังสีที่ตกกระทบผนังเป็นมุม ๔๕° และ ๑๒๐° แล้วผ่านไปยังผนังด้านนอก ย่อมมีระยะทางมากกว่า

ตาราง ๔.๑๐ เปลี่ยนปริมาณของรังสีปฐมภูมิของห้องต่าง ๆ ไปที่ ๖๐,๐๐๐ R

ห้อง	ผนัง	ระยะทางจากจุดสะท้อน ถึงผนัง (เมตร)	ปริมาณรังสีที่ผิว (R)	ปริมาณรังสี - สะท้อนวัดจาก TLD. (R)	ปริมาณรังสี - สะท้อนที่ผิว (R)	ปริมาณรังสี - สะท้อน (R)
๑	จุด ก. ๔๐°	๒.๘๔	๘๖๔๕	๑๘.๑	๖๐๐๐๐	๑๓.๑
	จุด ข. ๔๐°	๒.๔๘	๘๖๔๕	๑๗.๔	๖๐๐๐๐	๑๒.๖
	จุด ง. ๔๐°	๓.๐๒	๘๖๔๕	๑๗.๒	๖๐๐๐๐	๑๒.๔
๒	จุด ก. ๔๐°	๒.๓๗	๘๕๗๑๖	๒๔.๔	๖๐๐๐๐	๒๐.๔
	จุด ข. ๔๐°	๓.๓๒	๘๕๗๑๖	๑๒.๕	๖๐๐๐๐	๘.๗
๓	จุด ก. ๔๐°	๒.๕๐	๖๒๘๓๐	๑๔.๓	๖๐๐๐๐	๑๓.๗
๔	จุด ก. ๔๐°	๒.๘๑	๖๖๔๕๕	๑๒.๕	๖๐๑๐๐	๑๑.๒

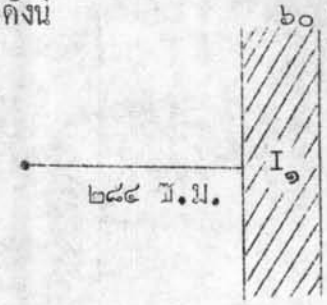
๔.๑ การคำนวณเพื่อหาความหนาของผนังห้องโคบอลท์-๖๐

เมื่อเปลี่ยนปริมาณรังสีทั้งหมดไปอยู่ที่ ๖๐,๐๐๐ R และทราบปริมาณรังสีสะท้อนที่ไปถึงผนังแต่ละด้านโดยการวัดจาก TLD. ทำให้สามารถคำนวณความหนาของผนังแต่ละด้านซึ่งเป็นค่าจริง ๆ ที่ได้จากการทดลอง เช่น ห้อง ๑ ในรูปที่ ๔.๑ จุด ก. มุมของรังสีสะท้อนเท่ากับ ๔๐° และระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของ phantom ถึงผนังที่ติดแทง TLD. เท่ากับ ๒๘๔ ซ.ม. ปริมาณรังสีสะท้อนที่วัดได้ ๑๓.๑ R (ตาราง ๔.๑๐) ผนังด้าน ก. หนา ๖๐ ซ.ม. [๔] จุดที่ต้องการให้ปริมาณรังสีลดลงเหลือ ๐.๑ R/week สำหรับเจ้าหน้าที่รังสีหรือ ๐.๐๑ R/week สำหรับบุคคลทั่วไป ซึ่งเป็นจุดที่เป็นค่าของ Maximum Permissible Dose (M.P.D.) คือจุดที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของ phantom เท่ากับ ๒๘๔ + ๖๐ ซ.ม. หรือบริเวณผนังด้านนอกของห้องโคบอลท์-๖๐ นั่นเอง ปริมาณรังสีที่-

---

[๔] W.J. Meredith and J.B. Massey, Fundamental Physics of Radiology, p.๕๕๐

ระยะ ๒๘๔ + ๖๐ เท่ากับ ๓๔๔ ซ.ม. สามารถคำนวณได้ดังนี้



จากกฎกำลังสองผกผัน

$$\frac{I_1}{I_2} = \left[\frac{d_2}{d_1}\right]^2$$

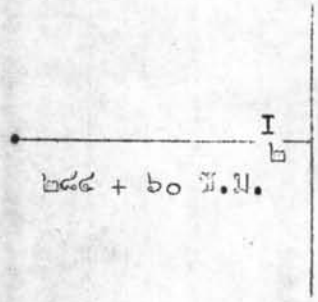
$I_1 = ๑๓.๑$ R

$d_1 = ๒๘๔$ ซ.ม.

$d_2 = ๓๔๔$ ซ.ม.

$$\frac{๑๓.๑}{I_2} = \left[\frac{๓๔๔}{๒๘๔}\right]^2$$

$I_2 = ๘.๔๑$ R

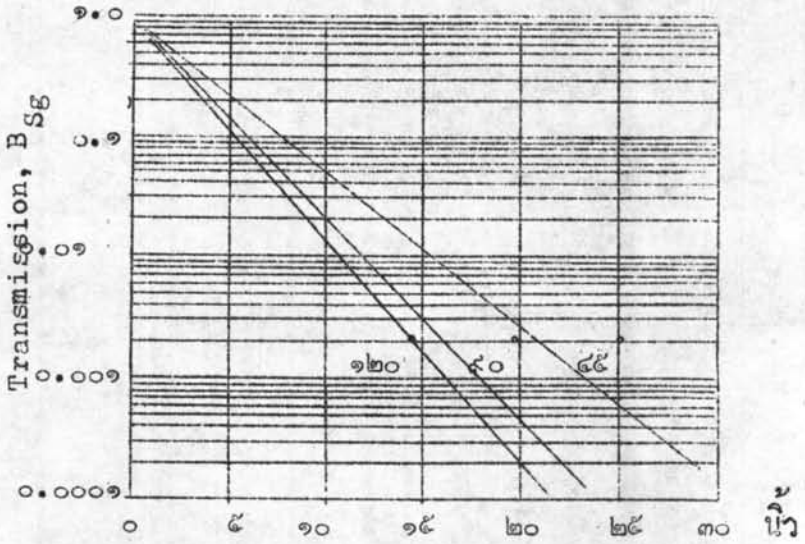


ถ้าต้องการลดปริมาณรังสีที่จุด I_2 ให้เหลือ ๐.๑ R/week ก็ทำได้โดยเอาคอนกรีตมากั้น การคำนวณหาความหนาของคอนกรีต สิ่งที่เกี่ยวข้องด้วยก็คือ [๕] occupancy factor และกราฟ transmission through concrete of gamma-rays ของรังสีสะท้อน ซึ่งกราฟนี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง transmission กับความหนาของคอนกรีต (ความหนาแน่น ๒.๓๕ gm/cm^3 หรือ ๑๔.๗ Lb/ft^3) ตามรูป ๔.๕

ที่จุด ก. ด้านนอกของผนัง มุมของรังสีสะท้อนเท่ากับ ๔๐° ปริมาณรังสีที่คิดว่าไม่มีคอนกรีตกั้นอยู่ เท่ากับ ๘.๔๑ R ต้องการลดให้เหลือ ๐.๑ R ต่อสัปดาห์ และผนังด้าน ก. เป็นห้องควบคุมเครื่องโคบอลท์-๖๐ ซึ่งมีเจ้าหน้าที่รังสีทำงานอยู่ตลอดเวลา ๘ ชั่วโมง ใน ๑ วัน ทำให้ occupancy factor, T = ๑

---

[๕] NCRP, report No ๓๔ Table ๔ , appendix C., p. ๖๐



รูป ๔.๕ Transmission through concrete (density ๒.๓๕ gm/cm^3) of Cobalt-๖๐ scattered radiation [๖]

เพราะฉะนั้น Transmission factor = $\frac{๐.๑}{๘.๙๑}$ = ๐.๐๑๑

จากกราฟรูปที่ ๔.๕ ของ Scattered radiation Transmission factor =๐.๐๑๑ จะต้องใช้คอนกรีต (ความหนาแน่น ๒.๓๕ gm/cm^3) หนา ๒๙.๒ ซ.ม. มากั้นเพื่อให้ปริมาณรังสีที่ผิวนอกของผนังคอนกรีตมีค่าเท่ากับ ๐.๑ R ต่อสัปดาห์ วิธีคำนวณความหนาของคอนกรีตอีกวิธีหนึ่ง คือ คำนวณจากปริมาณรังสีทั้งหมดที่ใช้ และระยะทางที่จะใช้คอนกรีตมากั้น ในรูปของ Transmission factor ของรังสีสะท้อน แล้วนำไปเปิดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Transmission factor (B_{Sg}) กับความหนาของคอนกรีต ในรูป ๔.๕

---

[๖] NCRP, report No ๓๔ , Appendix D., p. ๔๕

จาก [๗] $B_{Sg} = \frac{P}{aWT} \cdot \frac{๔๐๐}{F} \cdot (d_{Sec})^{๒} \cdot (d_{Sca})^{๒}$

B_{Sg} = ปริมาณรังสีที่รับได้ต่อสัปดาห์ มีหน่วยเป็นเรินเกนท์

a = อัตราส่วนของรังสีสะท้อนที่ระยะ ๑ เมตร กับรังสีตกกระทบกับผิวของ
= หุ่นจำลอง

P = ปริมาณรังสีที่ยอมให้ได้รับโดยไม่เป็นอันตราย ใน ๑ **สัปดาห์**

W = ปริมาณรังสีที่ใช้ใน ๑ **สัปดาห์**

T = Occupancy factor

F = พื้นที่ที่รังสีตกกระทบบนหุ่นจำลอง มีหน่วยเป็น ซ.ม.^{๒}

d_{Sec} = ระยะทางจากหุ่นจำลองถึงคนที่จะป้องกัน มีหน่วยเป็น เมตร

d_{Sca} = ระยะทางจากต้นกำเนิดรังสี ถึง หุ่นจำลอง มีหน่วยเป็น เมตร

ผนังด้าน ก. ของห้องที่ ๑ มุมของรังสีสะท้อนเท่ากับ ๔๐°

d_{Sca} = ๐.๗๕ เมตร

d_{Sec} = ๓.๔๔ เมตร

P = ๐.๑ เรินเกนท์/สัปดาห์

W = ๖๐,๐๐๐ เรินเกนท์/สัปดาห์

F = ๑๕ x ๑๕ ซ.ม.^{๒}

a = ๐.๔×๑๐^{-๓}

T = ๑

เพราะฉะนั้น $B_{Sg} = \frac{๐.๑}{๐.๔ \times ๑๐^{-๓} \times ๖๐,๐๐๐ \times ๑} \cdot \frac{๔๐๐}{(๑๕ \times ๑๕)} \cdot (๓.๔๔)^{๒} \cdot (๐.๗๕)^{๒}$

---

[๗] NCRP, report No ๓๔ , Appendix B, p. ๕๗

$$B_{Sg} = ๐.๐๒๒$$

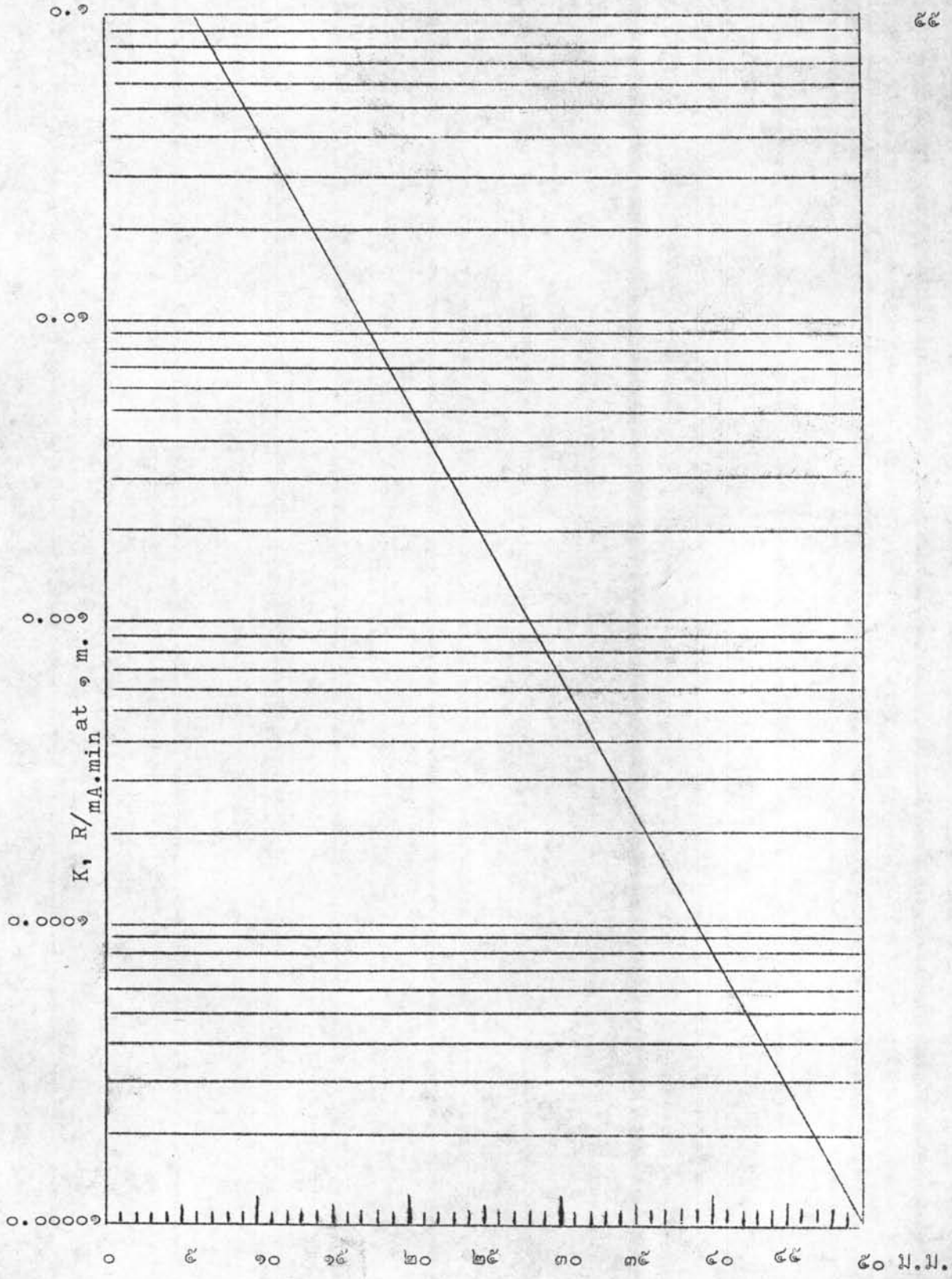
นำค่า Transmission factor (B_{Sg}) ไปหาค่าความหนาของคอนกรีต ตามกราฟ ในรูป ๔.๕ ได้ค่าความหนาของคอนกรีต เท่ากับ ๑๐ นิ้ว หรือ ๒๕.๔ ซ.ม.

๔.๒ ผลการคำนวณความหนาของคอนกรีตของผนังห้องโคบอลท์-๖๐

ตาราง ๔.๑๑ แสดงความหนาของผนังคอนกรีตจากผลการทดลองเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณและที่ก่อสร้างจริง

ห้อง	ผนัง มุมสะท้อน	ระยะทางจากหุ่นจำลองถึงผนังด้านนอกห้อง ^{60}Co (ซม.)	ปริมาณรังสีที่วัดได้จาก TLD.(R)	ความหนาของผนังคำนวณจาก TLD. (ซม.)	ความหนาของผนังคำนวณจาก Scatter(B_{Sg}) (ซม.)	ผนังห้อง ^{60}Co จริง หนา (ซม.)
๑	จุด ก.	๒๘๔ +๖๐	๘.๔๑	๒๕.๒	๒๕.๔	๖๐
๑	จุด ข.	๒๔๕+ ๖๐	๘.๓๒	๒๔.๒	๒๔.๒	๖๐
๑	จุด ง.	๒๔๕+ ๓๐	๘.๑๐	๒๕.๐	๒๓.๖	๓๐
๒	จุด ก.	๒๓๓+ ๑๑๐	๔.๓๕	๓๐.๕	๒๓.๖	๑๑๐
๒	จุด ข.	๓๓๒+ ๘๐	๘.๓๐	๒๕.๒	๒๑.๖	๘๐
๓	จุด ก.	๒๕๐+ ๑๑๕	๖.๓๔	๒๔.๒	๒๒.๓	๑๑๕
๔	จุด ก.	๒๘๑+ ๘๐	๖.๔๒	๒๗.๓	๒๓.๑	๘๐

ในการทดลองนี้ยังได้นำ TLD. ไปติดไว้ที่ประตูของห้องโคบอลท์-๖๐ ทั้งด้านนอกและด้านในห้อง ตรงตำแหน่งที่รังสีถูกหุ่นจำลองแล้วสะท้อนออกมาเป็นมุม ๔๐° มายังผนัง และจากผนังรังสีสะท้อนจะสะท้อนครั้งที่สอง มายังประตูซึ่งบุด้วยแผ่นตะกั่ว



รูปที่ ๔.๖ Attenuation in Lead of X-Rays ๐.๕MV.

---

[๒] NCRP, report No ๓๔ Appendix D, p. ๘๘

โดยคิดมุมตกกระทบของรังสีสะท้อนครั้งแรกบนผนังเท่ากับมุมสะท้อนของรังสีสะท้อนครั้งที่สอง ซึ่งจะสะท้อนมายังประตูที่บุด้วยแผ่นตะกั่ว ทั้งนี้ในการติด TLD. ที่ประตูทั้งสองด้าน มีความมุ่งหมายที่จะวัดปริมาณรังสีสะท้อนครั้งที่สองว่า มีปริมาณรังสีมาถึงประตูด้านในเท่าไร และผ่านทะลุตะกั่วได้เท่าไร

ในบางห้องปริมาณรังสีสะท้อนที่ไปถึงประตูด้านในมีค่าน้อยกว่า ๑๐๐ mR กรณีเช่นนี้ ประตูของห้องโคบอลท์-๖๐ ที่ใช้ไม่จำเป็นต้องบุด้วยแผนตะกั่ว ส่วนห้องที่ปริมาณรังสีสะท้อนมาถึงประตูด้านในมากกว่า ๑๐๐ mR ประตูที่ใช้จำเป็นต้องบุด้วยแผ่นตะกั่ว

การคำนวณความหนาของแผ่นตะกั่วที่ใช้บุประตู สามารถคำนวณได้จาก การพล็อต (plot) ระหว่าง out put ของรังสีเอกซ์ พลังงาน ๐.๕ MV. กับความหนาของแผ่นตะกั่วเป็น ม.ม. ตามกราฟรูป ๔.๖ ซึ่งเป็น attenuation ของตะกั่ว เมื่อรังสีเอกซ์พลังงาน ๐.๕ MV. วิ่งผ่าน เหตุที่สามารถใช้กราฟนี้แทน Transmission curve ของรังสีแกมมาจากโคบอลท์-๖๐ ได้ เพราะว่าพลังงานของรังสีแกมมาเมื่อสะท้อนไปถึงประตู มีพลังน้อยกว่า ๐.๕ MV. ซึ่งถือว่า [๙] รังสีสะท้อนที่มีพลังงานน้อยกว่ารังสีเอกซ์ พลังงาน ๐.๕ MV. รังสีสะท้อนที่ผ่านฉากกั้นรังสีจะมีคุณสมบัติในการถูกกั้นได้เหมือนกับรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเท่ากับ ๐.๕ MV.

โดยการคิดแบบ Transmission เช่น ในห้อง ๔ วัดปริมาณรังสีสะท้อนที่มาถึงประตูด้านใน โดยการใช้ TLD. ได้ ๑๒๕ mR (ปริมาณรังสีสะท้อนที่จุด จ. ในตาราง ๔.๔ มีค่า ๑๔๔ mR ปริมาณรังสีที่ผิวหุ่นจำลองเท่ากับ ๖๖,๔๕๕ R เปลี่ยนปริมาณรังสีมาที่ ๖๐,๐๐๐ R ปริมาณรังสีสะท้อนจะลดลงเหลือ ๑๒๕ mR)

ปริมาณรังสี ๑๒๕ mR ต้องการลดให้เหลือ = ๑๐๐ mR

เพราะฉะนั้นค่า transmission factor = $\frac{๑๐๐}{๑๒๕}$

= ๐.๗๘

---

[๙] NCRP, report No ๓๔, Appendix B, p. ๕๖

เพราะฉะนั้นค่า Transmission factor เท่ากับ ๐.๗๘ นำค่านี้ไปหาความหนาของแผ่นตะกั่วได้จากกราฟในรูป ๔.๖ ซึ่งเป็นการพล็อต (plot) ระหว่าง output ซึ่งมีหน่วยเป็น R/mA-min ที่ ๑ m. กับความหนาของตะกั่วเป็น ม.ม. ในการอ่านจะเลือกกราฟตรงบริเวณที่ตรงที่สุด เพื่อที่จะให้ได้ค่าที่ถูกต้อง เนื่องจากเส้นกราฟไม่ได้เริ่มที่ ๑ ในแกน y เพราะฉะนั้น ในการอ่านกราฟ เช่น Transmission factor เท่ากับ ๐.๗๘ จะเลือกอ่านกราฟบนแกน y ที่ ๐.๐๑ ซึ่งเป็นบริเวณเส้นตรงของกราฟก่อนจะได้ความหนาของตะกั่วเท่ากับ ๑๕.๖ ม.ม. แล้วจึงอ่านกราฟที่ ๐.๐๐๗๘ จะได้ความหนาของตะกั่วเท่ากับ ๑๖.๘ ม.ม. เพราะฉะนั้นความหนาของตะกั่วจริง ๆ ที่ใช้บุประตูเท่ากับ ๑๖.๘ ลบด้วย ๑๕.๖ ซึ่งเท่ากับ ๑.๒ ม.ม.

๔.๓ <u>การหาปริมาณรังสีสะท้อนบริเวณประตูด้านในของห้องโคบอลท์-๖๐ โดยวิธีคำนวณ</u>

จาก $^{10}E_S = a \cdot \frac{\dot{E}_U}{(d_{Sec})^2} \cdot \frac{1}{(d_{Sca})^2} \cdot \frac{F.t}{400}$

a = อัตราส่วนของรังสีสะท้อนต่อรังสีที่ตกกระทบหุ่นจำลอง

$\dot{E}_U$ = อัตราปริมาณรังสีจาก Source ตกกระทบหุ่นจำลอง (Useful beam)

d_{Sca} = ระยะทางจาก Source ถึงหุ่นจำลอง มีหน่วยเป็นเมตร

d_{Sec} = ระยะทางจากหุ่นจำลองถึงผนังที่รังสีสะท้อนไปถึง (ตำแหน่งที่จะทำการป้องกัน) มีหน่วยเป็นเมตร

F = พื้นที่ที่รังสีตกกระทบหุ่นจำลองมีหน่วยเป็น ซ.ม.^{2}

t = เวลาที่ใช้ในการ expose มีหน่วยเป็น ช.ม.

---

[10] NCRP, report No ๓๔, Appendix B, p. ๕๖

E_S = ปริมาณรังสีสะท้อนจากหุ่นจำลองที่มากระทบผนังเป็นระยะทาง d_{Sec} เมตร

ในการคิดปริมาณรังสีสะท้อนไปยังประตูนั้น ต้องคิดรังสีจากต้นกำเนิดแสงตกกระทบ - หุ่นจำลอง แล้วสะท้อนออกมายังผนัง ที่จุด จ. ตามรูป ๔.๗ ซึ่งมีระยะทางจากหุ่นจำลองถึงผนังเท่ากับ d_{Sec} เมตร ค่าปริมาณรังสีที่ได้ ที่ตกกระทบผนังที่จุด จ. จะมีค่าเท่ากับ E_S จากนั้นก็จะใช้ค่า ปริมาณรังสี E_S เป็นต้นกำเนิดของ - รังสีใหม่ สะท้อนไปยังประตู โดยมี d_{Sca} เป็นระยะทางจากหุ่นจำลองถึงผนังที่จุด จ. และ d_{Sec} จะเท่ากับระยะทางจากจุด จ. ถึงประตูด้านในของห้องโคบอลท์-๖๐ โดยพื้นที่ (F') ที่รังสีตกกระทบผนังที่ จุด จ. นั้น จะคิดจากความสูงของพื้นถึงเพดาน ของผนังด้านที่รังสีสะท้อนคูณกับความกว้างของผนังตามแนวนอน เป็นระยะทาง ๒ เมตร ค่า F' นี้เป็นค่าเฉลี่ย และจะได้ค่า E_S' เป็นค่าของปริมาณรังสีจริง ๆ ที่ไปถึงประตู ด้านในของห้องโคบอลท์-๖๐ การหาค่า E_S' ก็ใช้สูตรเกี่ยวกับการหาค่า E_S เพียงแต่ เปลี่ยนต้นกำเนิดแสง พื้นที่ที่แสงตกกระทบ ระยะทาง d_{Sca}' และ d_{Sec}' โดย

$$E_S' = a \cdot \frac{E_S}{(d_{Sec}')^2} \cdot \frac{1}{(d_{Sca}')^2} \cdot \frac{F'.t}{400}$$

แสดงได้จากรูป ๔.๘

๔.๔ <u>ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณรังสีที่สะท้อนมายังประตูด้านในของห้อง - โคบอลท์-๖๐ ของห้องที่ ๒</u>

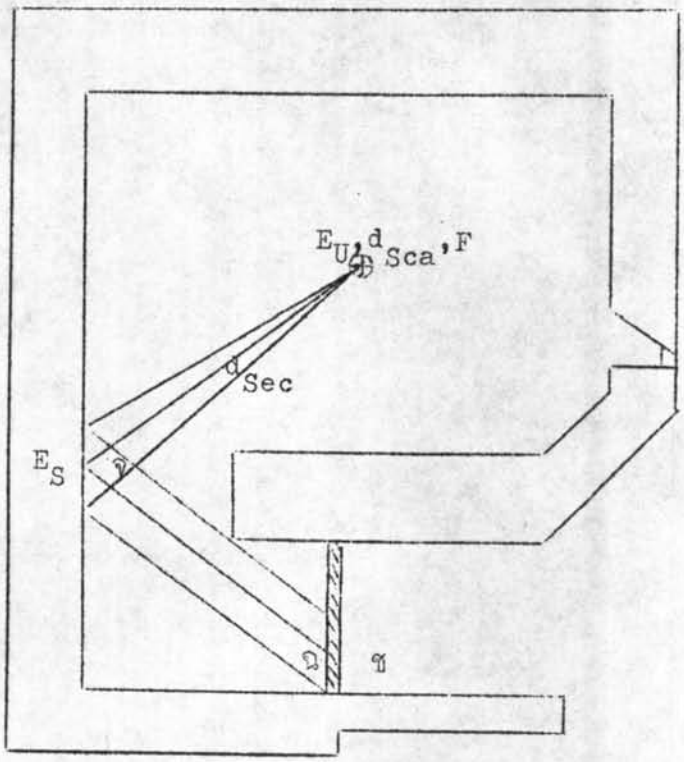
$$E_S = a \cdot \frac{\dot{E}_U}{(d_{Sec})^2} \cdot \frac{1}{(d_{Sca})^2} \cdot \frac{F.t}{400}$$

$\dot{E}_U = 60{,}000 \text{ R}$

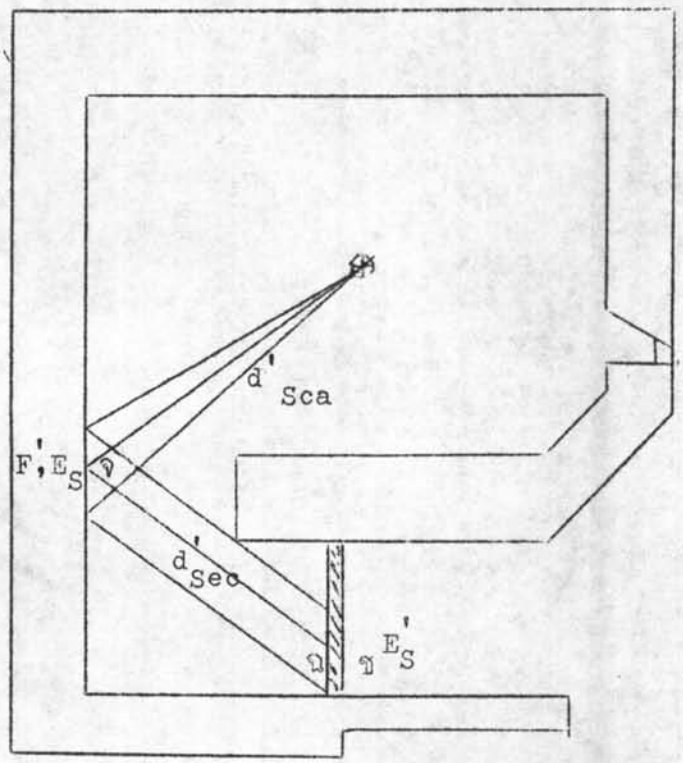
$a = 0.4 \times 10^{-3}$

$F = 15 \times 15 \text{ cm}^2$

$t = 10 \text{ hrs}$



รูป ๔.๙ การสะท้อนของรังสีปฐมภูมิ ไปยังผนังห้อง



รูป ๔.๘ การสะท้อนของรังสีสะท้อนครั้งที่ ๑ จากผนังไปยังประตู

d_{Sca} = ๐.๘ m

d_{Sec} = ๔.๖๔ m

$$E_S = ๐.๙ \times ๑๐^{-๓} \times \frac{๖๐,๐๐๐}{(๔.๖๔)^{๒}} \times \frac{๑}{(๐.๘)^{๒}} \times \frac{๖๒๕}{๔๐๐} \times ๑๐$$

$$= ๖๑.๖ \text{ R}$$

ปริมาณรังสีสะท้อนครั้งที่หนึ่งไปยังผนังมีค่าเท่ากับ ๖๑.๖ R ปริมาณรังสีนี้จะตกลงบนพื้นที่ F' ซึ่งมีค่าเท่ากับ ๖.๗๘ x ๖ เมตร^{๒} หรือ ๖๗๘ x ๖๐๐ ซ.ม.^{๒} และคิดพื้นที่ที่ผนัง (F') เป็นต้นกำเนิดรังสีใหม่ มีปริมาณรังสีเท่ากับ ๖๑.๖ R ปล่อยรังสีไปยังประตูด้านในของห้องโคบอลท์-๖๐

$$E'_S = a \cdot \frac{E_S}{(d'_{Sec})^{๒}} \cdot \frac{๑}{(d'_{Sca})^{๒}} : \frac{F' \cdot t}{๔๐๐}$$

$a = ๐.๙ \times ๑๐$

$E_S = ๖๑.๖$ R

$d'_{Sca} = ๔.๖๔$ m

$d'_{Sec} = ๓.๘๗$ m

$F' = ๖๗๘ \times ๖๐๐$ cm^{๒}

$t = ๑๐$ hrs

เพราะฉะนั้น $E'_S = ๐.๙ \times ๑๐^{-๓} \times \frac{๖๑.๖}{(๓.๘๗)^{๒}} \times \frac{๑}{(๔.๖๔)^{๒}} \times \frac{๖๗๘ \times ๖๐๐}{๔๐๐} \times ๑๐$

$= ๐.๐๘๖$ R

ปริมาณรังสีสะท้อนที่ไปถึงประตูห้องโคบอลท์-๖๐ ด้านในเท่ากับ ๐.๐๘๖ R ค่าที่คำนวณได้นี้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีสะท้อนที่วัดได้จาก TLD. และเพื่อความถูกต้องจะใช้วิธีวัดปริมาณรังสีสะท้อนโดยตรง โดยใช้เครื่องมือ -

Survey meter ทำการวัดอีกครั้งหนึ่ง โดยการเปิดประตูห้องโคบอลท์-๖๐ แล้วใช้เทปติดสวิทช์ที่ประตูของห้องโคบอลท์-๖๐ เหตุที่ต้องติดเทปที่สวิทช์ เพราะว่าเครื่องโคบอลท์-๖๐ จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อปิดประตูของห้องโคบอลท์-๖๐ เพื่อให้บานประตูกั้น - สวิทช์ในตำแหน่งที่ปิดพอดี ทั้งนี้เพื่อป้องกันอันตราย ในการวัดปริมาณรังสีบริเวณประตู จะใช้ Survey meter วัดตรงตำแหน่งเดียวกันกับที่ติด TLD.

การวัดปริมาณรังสีโดยใช้ Survey meter จำเป็นจะต้องสอบเทียบ - เครื่องมือที่ใช้วัดนี้ให้ได้มาตรฐานเสียก่อน เพื่อป้องกันการผิดพลาด

๔.๕ <u>การสอบเทียบเครื่องมือ Survey meter โดยใช้เรเดียม-๒๒๖ เป็นมาตรฐาน</u>

เรเดียม-๒๒๖ ที่ใช้เป็นมาตรฐานมีลักษณะเป็นแท่งกลม รูปทรงกระบอก หัวและท้ายมน มีขนาดยาว ๒๒.๕ ม.ม. เส้นผ่าศูนย์กลาง ๓.๐๕ ม.ม. มีเกลือ - เรเดียมบรรจุอยู่ในแท่งแพลตตินัม (Platinum) ซึ่งมีความหนา ๑.๐ ม.ม. แท่งเรเดียมที่ใช้มีขนาด ๒๐ มิลลิกรัม ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า exposure rate ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ดังนี้

[๑๑]เรเดียม-๒๒๖ มีค่า K - Factor = ๐.๘๒๕ $\frac{mR}{mg.hr}$ ที่ระยะ ๑ เมตร โดยแท่งเรเดียมจะหุ้มด้วย แพลตตินัมหนา ๐.๕ ม.ม. แสดงว่าเรเดียม-๒๒๖ หนัก ๑ มิลลิกรัม ที่ผิวของทรงกลม รัศมี ๑ เมตร โดยมีแท่ง Ra-๒๒๖ เป็นจุด - ศูนย์กลาง จะมีปริมาณรังสีเท่ากับ ๐.๘๒๕mR ต่อ ๑ ช.ม. ถ้า [๑๒] ความหนาของแพลตตินัมที่ใช้หุ้มเท่ากับ ๑.๐ ม.ม. ปริมาณรังสีที่ระยะ ๑ เมตร จะลดลง ๑๐ เปอร์เซ็นต์

---

[๑๑] W.J. MEREDITH, <u>Radium Dosage (The Manchester System)</u>; p.๔

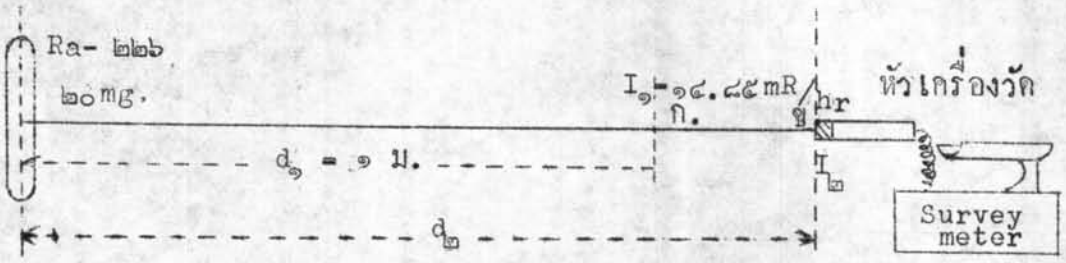
[๑๒] Harold Elford Johns, John Robert Cunningham, <u>The Physics of Radiology</u>; p. ๔๐

เพราะฉะนั้น เรเดียม-๒๒๖ จำนวน ๒๐ มิลลิกรัม มีแพลตตินัม หนา ๑.๐ ม.ม. หุ้มอยู่ จะมีปริมาณรังสี $= ๐.๘๒๕ \times ๒๐ \times \frac{๔๐}{๑๐๐}$ mR/hr

$= ๑๔.๘๕$ mR/hr

จากค่าปริมาณรังสีสะท้อนที่วัดได้โดยใช้ TLD. ติดบริเวณประตูด้านในของห้องโคบอลท์-๖๐ เมื่อทำหน่วยเป็น mR/hr แล้ว จะมีค่าอยู่ระหว่าง ๗ ถึง ๑๐ mR/hr เพราะฉะนั้น จึงต้องปรับเครื่องมือ Survey meter ให้อ่านได้แม่นยำที่ประมาณ ๑๐ mR/hr เพื่อที่ให้ค่าที่จะวัดมีความถูกต้องมากที่สุด

จากเรเดียม-๒๒๖ จำนวน ๒๐ มิลลิกรัม มีแพลตตินัม หนา ๑.๐ ม.ม. หุ้มอยู่ ที่ระยะ ๑ เมตร จากจุดกึ่งกลางของแท่งเรเดียม จะมีปริมาณรังสีเท่ากับ ๑๔.๘๕ mR/hr เมื่อต้องการปริมาณรังสีที่ ๑๐ mR/hr จึงต้องใช้กฎกำลังสองผกผัน เพื่อหาระยะทางที่สามารถวัดปริมาณรังสีได้เท่านี้



รูป ๔.๔ การสอบเทียบเครื่องมือ Survey meter กับ Ra-๒๒๖

จากรูป ๔.๔ d_1 เป็นระยะทาง ๑ เมตร ที่คำนวณได้ว่ามีปริมาณรังสี เนื่องมาจากแท่งเรเดียม-๒๒๖ จำนวน ๒๐ มิลลิกรัม มีค่าเท่ากับ ๑๔.๘๕ mR/hr ต้องการหาระยะทาง d_2 เมตร ที่มีปริมาณรังสีเท่ากับ ๑๐ mR/hr

เพราะฉะนั้น $\frac{I_1}{I_2} = \left[\frac{d_2}{d_1}\right]^2$

$d_2 = \left(\frac{๑๔.๘๕}{๑๐}\right)^{\frac{๑}{๒}}$

$= ๑.๒๑$ เมตร

เมื่อได้ค่า d_2 เท่ากับ ๑.๒๑ เมตร นำเอาหัวเครื่องวัด (Detector) ของ Survey meter ไปวางที่ระยะทาง ๑.๒๑ เมตร ห่างจากจุด กึ่งกลางของแท่งเรเดียม-๒๒๖ โดยวางแท่งเรเดียม-๒๒๖ ให้ตั้งฉากกับหัวเครื่องวัด แล้วเปิดเครื่อง Survey meter ถ้าเครื่อง Survey meter ไม่อ่านที่ ๑๐ mR/hr แสดงว่า Survey meter ที่ใช้อ่านมีความคลาดเคลื่อน จึงจำเป็นต้องปรับเครื่องมือให้อ่านได้ ๑๐ mR/hr เมื่อปรับ Survey meter ให้อ่านได้ถูกต้องแล้ว จึงนำ Survey meter ไปวัดปริมาณรังสีบริเวณประตูห้องโคบอลท์-๖๐

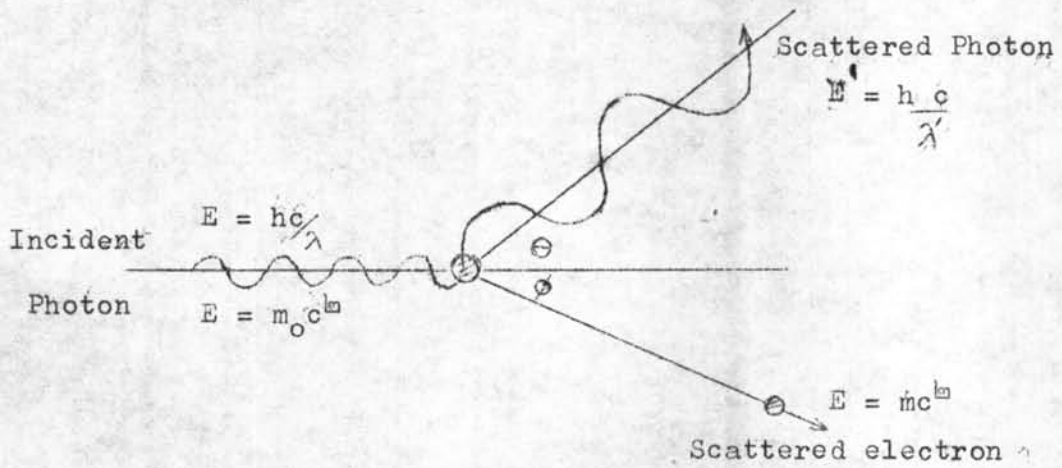
ตาราง ๔.๑๒ เปรียบเทียบปริมาณรังสีสะท้อนบริเวณประตูด้านในของห้องโคบอลท์-๖๐ เมื่อใช้ work load ๖๐,๐๐๐ R

ห้อง	ปริมาณรังสีที่สะท้อนที่ได้จากการคำนวณ (mR)	ปริมาณรังสีสะท้อนที่วัดได้จาก TLD. คิดเป็น mR	ปริมาณรังสีสะท้อนที่วัดได้จาก TLD. คิดเป็น mR/hr	ปริมาณรังสีสะท้อนที่วัดได้จาก Survey meter เป็น mR/hr
๑	๑๒๔	๔๔	๕.๑	๑.๖
๒	๘๒	๖๖	๖.๖	๖.๐
๓	-	-	-	๐.๒๐
๔	๑๒๗	๑๒๔	๔.๕	๒.๕

จากตาราง ๔.๓ ห้องที่ ๓ ไม่สามารถวัดค่าได้ เนื่องมาจาก maze ที่ใช้กั้นรังสีสะท้อนมายังประตู ซึ่งเป็นผนังคอนกรีต หนา ๑.๒๐ ม. มีระยะทางยาวมาก รังสีสะท้อนครั้งที่สอง จึงไม่สามารถสะท้อนถึงประตู ถ้ารังสีสะท้อนจะสะท้อนถึงประตูจะต้องเป็นการสะท้อนครั้งที่สาม ซึ่งในการทดลองนี้ห้องโคบอลท์-๖๐ ห้องที่ ๑, ๒ และ ๔ รังสีสะท้อนครั้งที่สองจะสะท้อนถึงประตูห้องทั้งหมด

๔.๖ วิธีคำนวณความหนาของแผ่นตะกั่ว ที่ใช้บุประตูห้องโคบอลท์-๖๐

ในการคำนวณความหนาของแผ่นตะกั่วที่ใช้บุประตู จำเป็นต้องทราบถึงพลังงานของรังสีสะท้อนที่ไปถึงประตู โดยคิดตามวิธี Compton's Scattering



รูป ๔.๑๐ แสดง Compton's scattering

จาก [๑๓]
$$E' = \frac{E}{๑ + \left[\frac{E}{m.c^{๒}}\right].(๑ - \cos\Theta)}$$

E' = พลังงานของรังสีสะท้อน

E = พลังงานของรังสีเริ่มแรก (primary beam or - Incident Photon)

---

[๑๓] Herman Cember, Introduction to Health Physics; p. ๑๓๑

ในกรณีของโคบอลท์-๖๐ ค่า E = ๑.๒๕ MeV.

m_0 = มวลของ Photon เมื่อหยุดนิ่ง

c = ความเร็วของแสง

m_0c^2 = ๐.๕๑๑ MeV.

θ = มุมของรังสีสะท้อนที่สะท้อนจากแนวเดิมของรังสีตกกระทบ

ในการสะท้อนครั้งแรก รังสีจาก primary beam จะสะท้อนจากหุ่นจำลองในทุกทิศทาง แต่ในการทดลองนี้จะคิดรังสีสะท้อนที่สะท้อนออกมาจากหุ่นจำลอง เป็นมุม ๔๐° กับรังสีจาก primary beam ที่ตกกระทบหุ่นจำลอง

$$\text{จาก } E' = \frac{E}{1 + \left[\frac{E}{m_0c^2}\right].(1 - \cos\theta)}$$

ค่า E ของโคบอลท์-๖๐ = ๑.๒๕ MeV.

θ = ๔๐°

m_0c^2 = ๐.๕๑๑ MeV.

$$E' = \frac{๑.๒๕}{1 + \left[\frac{๑.๒๕}{๐.๕๑๑}\right].(1 - \cos ๔๐^\circ)}$$

$$= ๐.๓๖๒ \text{ MeV.}$$

ค่า E' ที่ได้เป็นค่าของพลังงานของรังสีสะท้อน มุม ๔๐° ออกมาจากหุ่นจำลอง แล้วออกไปกระทบผนัง โดยรังสีสะท้อนที่ตกกระทบผนัง ทำมุมประมาณ ๖๐° กับผนังของห้องโคบอลท์-๖๐ ในห้องที่ ๑ แล้วสะท้อนออกมาเป็นมุมต่าง ๆ กัน ไปยังประตู แต่ในการทดลองนี้ จะคิดเฉพาะมุมที่รังสีตกกระทบผนังเท่ากับมุมที่รังสีสะท้อนออกจากผนังไปยังประตูเท่านั้น ตามรูป ๔.๑

---

[๑๔] Herman Cember, Introduction to Health Physics, p. ๑๓๑

เพราะฉะนั้น พลังงานของรังสีสะท้อนครั้งที่สองจากผนังไปยังประตูห้อง - โคบอลท์-๖๐ คิดได้จาก

$$E'' = \frac{E'}{1 + \left[\frac{E'}{m.c^2}\right] \cdot \left[1 - \cos\theta\right]}$$

$E' = 0.662$ MeV.

$\theta = 120^\circ$

$m.c^2 = 0.511$ MeV.

$$E'' = \frac{0.662}{1 + \left[\frac{0.662}{0.511}\right] \cdot \left[1 - \cos 120^\circ\right]}$$

$= 0.174$ MeV.

$= 174$ KeV.

พลังงานของรังสีสะท้อน จากการสะท้อนครั้งที่ ๒ มาถึงประตูมีค่าประมาณ ๑๗๕ KeV. จากพลังงานนี้ ทำให้สามารถหาความหนาของแผ่นตะกั่วที่ใช้บุประตูได้ โดยหาค่า - HVL. ของแผ่นตะกั่วที่พลังงานของโฟตอน ๑๗๕ KeV.

ที่พลังงาน ๖๐๐ KeV. ของโฟตอนมีค่า [๑๕] mass attenuation coefficient $(\frac{\mu}{\rho}) = 0.014$ cm^2/gm

โดยที่ μ = linear attenuation coefficient

มีหน่วยเป็น cm^{-1}

ρ = ความหนาแน่นของวัตถุที่ใช้นั้นมีหน่วยเป็น gm/cm^3

เนื่องจากแผ่นตะกั่วมีค่า $\rho = 11.34$ gm/cm^3

---

๑๕ Harold Elford Johns, John Cunningham; The Physics of Radiology, Table A-๑๓ p. ๗๘๖

เพราะฉะนั้น ค่า μ ของตะกั่วที่พลังงาน ๒๐๐ KeV. ของโฟตอนจะมีค่า

$$= ๑.๐๑๔ \times ๑๑.๓๔ \ cm^{๒}/gm \cdot gm/cm^{๓}$$

$$= ๑๑.๕ \ cm^{-๑}$$

จาก HVL. $= \frac{๐.๖๙๓}{\mu}$

ของตะกั่วที่โฟตอนพลังงาน ๒๐๐ KeV. $= \frac{๐.๖๙๓}{๑๑.๕}$ cm

$= ๐.๐๖$ cm

$= ๐.๖$ mm.

ในห้องที่ ๑ ปริมาณรังสีสะท้อนที่ประตูด้านใน วัดจาก TLD. มีค่าเท่ากับ ๙๔ mR โดยใช้ปริมาณรังสี (primary beam) ตกกระทบหุ่นจำลองทั้งหมด ๖๐,๐๐๐ R ในหนึ่งสัปดาห์ ถ้าใช้แผ่นตะกั่ว หนา ๐.๖ ม.ม. บุที่ประตูห้องโคบอลท์-๖๐ ปริมาณรังสีสะท้อนที่ผ่านประตูออกมานอกห้อง มีค่าเท่ากับ ๙๗ mR

เนื่องจากคณะกรรมาธิการป้องกันอันตรายจากรังสีระหว่างประเทศ ICRP (International Commission on Radiological Protection) ได้กำหนดไว้ว่า เจ้าหน้าที่รังสี ไม่ควรรับปริมาณรังสีเกิน ๑๐๐ mR ต่อสัปดาห์ เพราะฉะนั้น จากปริมาณรังสีสะท้อน ๙๔ mR ต่อหนึ่งสัปดาห์ ที่ประตูห้องโคบอลท์-๖๐ เมื่อไม่มีแผ่นตะกั่วบุ ก็นับว่าปลอดภัยพอ แต่เพื่อความปลอดภัยยิ่งขึ้น ก็ควรบุตะกั่วหนาประมาณ ๑ ม.ม. ที่ประตูห้องโคบอลท์-๖๐

ตาราง ๔.๑๓ เปรียบเทียบความหนาของแผ่นตะกั่วที่ใช้บุประตูห้องโคบอลท์-๖๐ ของโรงพยาบาลต่าง ๆ

ห้อง	มุมที่รังสีสะทอนตกกระทบผนัง	ปริมาณรังสีวัดที่ประตูด้านนอกวัดจาก TLD. (mR)	ปริมาณรังสีวัดที่ประตูด้านในวัดจาก TLD. (mR)	พลังงานของรังสีสะทอนที่ไปถึงประตูด้านใน (KeV)	ความหนาของแผ่นตะกั่วที่จะลดปริมาณรังสีสะทอนให้ลดลงครึ่งหนึ่ง (m.m.)	ความหนาจริงของแผ่นตะกั่วที่ใช้บุประตูห้องโคบอลท์-๖๐ (m.m.)
๑	๖๐°	๑๓	๔๔	๑๗๕	๐.๖	๓.๐
๒	๔๔°	๘	๖๖	๑๘๕	๐.๖	๘.๐
๓	-	-	-	-	-	ประตูบุด้วยแผ่นเหล็ก
๔	๕๐°	๖	๑๒๕	๑๙๖	๐.๖	๔.๐