

หลักการคำนวณการลดลงของนิวตรอนและแกมมาในเกราะกำบังรังสี

3.1 วิธีต่างๆ ที่ใช้เป็นหลักในการคำนวณ

มีผู้พัฒนาและนำวิธีต่างๆ มาใช้ในการคำนวณตามลักษณะของปัญหา ผลการคำนวณที่ถูกต้องกับความเป็นจริงและต้องเหมาะสมกับเวลาและเศรษฐกิจ วิธีต่างๆ มีดังนี้

3.1.1 วิธีโมเมนต์ (moment method) สเปนเซอร์และฟาโน (Spencer & Fano จากสำนักงานมาตรฐานแห่งสหรัฐ ฯ (The International Bureau of Standard, USA.) เป็นผู้พัฒนาวิธีนี้ ใช้แก้ปัญหาการทะลุผ่านของแกมมา โดยคำนวณพลังงานและความลึกของการทะลุผ่านของแกมมาพลັกซ์จากแหล่งกำเนิดและที่เกิดเนื่องจกตัวกลาง และกระจายพลັกซ์นั้นเป็นอนุกรมของเลอจองด์โพลิโนเมียล

ในโคออร์ดิเนตเชิงมุม ซึ่งสามารถลดจำนวนตัวแปรจาก 3 ตัวแปร คือ ตำแหน่ง พลังงานและทิศทาง เป็นเพียง ตำแหน่งและพลังงานเท่านั้น วิธีนี้ใช้คำนวณแกมมาได้ดีกว่านิวตรอน เนื่องจากโอกาสการเกิดอันตรกิริยาแปรตามพลังงานอย่างรวดเร็วและมีข้อจำกัดว่าตัวกลางควรเป็นเนื้อเดียวกัน (uniform) และมีขนาดอนันต์ (infinite media) จึงไม่เหมาะในการแก้ปัญหาที่เกราะกำบังรังสีประกอบด้วยธาตุต่างชนิดกัน

3.1.2 วิธีมอนติ คาร์โล (monte carlo method) เป็นการประมาณลักษณะการฟุ้งกระจายของนิวตรอนและแกมมาในตัวกลาง คำนวณทางเดินของแต่ละอนุภาคที่เป็นตัวอย่าง นำสถิติมาใช้พิจารณาโอกาสการชนและทิศทางหลังชนของโฟตอน วิธีนี้ไม่มีข้อจำกัดไม่ว่าจะเป็นชนิดของอันตรกิริยาหรือรูปแบบของเกราะกำบังรังสี และจะให้ผลที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ว่าจะคำนวณตัวอย่าง (case) ได้มากน้อยเท่าใด แต่ไม่เหมาะที่จะคำนวณเกราะหนาๆ เนื่องจากต้องเพิ่มจำนวนตัวอย่าง และในทางปฏิบัติจะคำนวณได้ดีเมื่อทางเดินเฉลี่ยประมาณ 8-12 mfp. เท่านั้น

3.1.3 วิธีรีมูฟเวอ (removal method) เป็นวิธีที่ได้จากการทดลอง เมื่อนิวตรอนพลังงานสูงผ่านไปในตัวกลางจะรีมูฟจากลำรังสีเดิม และก่อให้เกิดรังสีเพิ่ม

ชั้น วิธีนี้ใช้ได้กับแหล่งกำเนิดที่ให้รังสีพลังงานสูง เช่น ปฏิกิริยาฟิชชัน เป็นต้น และ
 เกราะนั้นมีส่วนประกอบของน้ำหรือไฮโดรเจน (hydrogeneous shield) แต่ให้ผล
 คลากเคลื่อนในบริเวณที่นิวตรอนไม่สมมูลย์ คือ มีตัวดูดจับ (absorber) อยู่ใกล้เคียง

3.1.4 วิธีการแพร่กระจายโดยใช้พลังงานหลายกลุ่ม (Multigroup -
 Diffusion Method) พิจารณาตามทฤษฎีการแพร่กระจาย และมุ่งศึกษาที่นิวตรอน
 พลังงานปานกลางและเทอร์มัล หานิวตรอนฟลักซ์เชิงมุมจากสมการการแพร่กระจายของ
 นิวตรอน โดยเลอจองด์ โพลีโนเมียล แล้วอินทิเกรตตลอดช่วงพลังงานที่แบ่งไว้

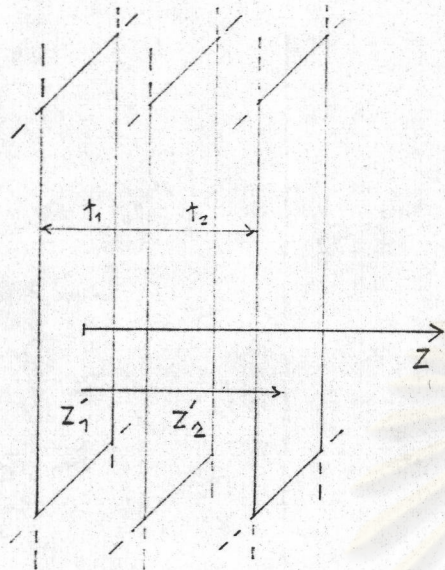
3.1.5 Discrete-Ordinate Method (S_n Method) คาร์สัน
 (Carlson) เป็นผู้พัฒนาวิธีนี้ซึ่งใช้กันมากมายวิธีหนึ่ง คล้ายกับวิธีการแพร่กระจายโดยใช้
 พลังงานหลายกลุ่ม แต่หาคำตอบจากสมการการแพร่กระจายของนิวตรอนโดยเลอจองด์
 โพลีโนเมียล ใช้ศึกษาการทะลุผ่านในเกราะลึกลับ ความถูกต้องในการคำนวณขึ้นกับ
 การแบ่งช่วง (mesh) ของพลังงานและมุมในการพิจารณา

3.1.6 วิธีรีมูฟเวล - ดีฟิวชัน (Removal - Diffusion Method)
 สปินเนย์ (K.T. Spinney) เป็นผู้เสนอวิธีนี้ เป็นการรวมวิธีรีมูฟเวลซึ่งเหมาะในการ
 พิจารณานิวตรอนความเร็วสูงและวิธีการแพร่กระจายโดยใช้พลังงานหลายกลุ่ม และ
 แหล่งกำเนิดรังสีในการคำนวณการแพร่กระจายมาจากผลที่นิวตรอนรีมูฟ วิธีนี้ใช้กับแหล่ง
 กำเนิดและเกราะกำบังรังสีหลายรูปทรง และใช้ได้กับเกราะที่ประกอบด้วยน้ำ ให้
 ความถูกต้องพอเหมาะแก่เวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในการศึกษาจึงเลือกวิธีนี้ และมีผู้
 พัฒนาเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์หลาย โปรแกรม เช่น RASH, SABINE, NIOBE,
 MAC-RAD เป็นต้น

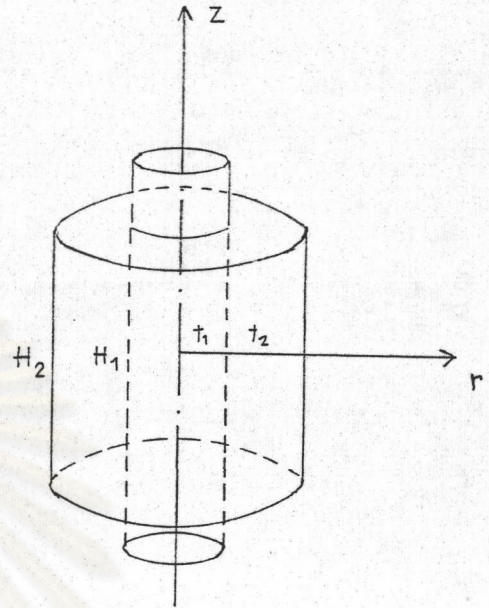
3.2 SABINE - 3

เป็นหนึ่งในหลายๆ โปรแกรมที่มีผู้พัฒนาตามหลักรีมูฟเวล - ดีฟิวชัน C. Ponti
 Preusch และ H. Schubart เป็นผู้เสนอในคศ. 1967 ต่อมาในปีคศ. 1969
 Ponti ได้พัฒนาเพิ่มเติมอีกเล็กน้อย

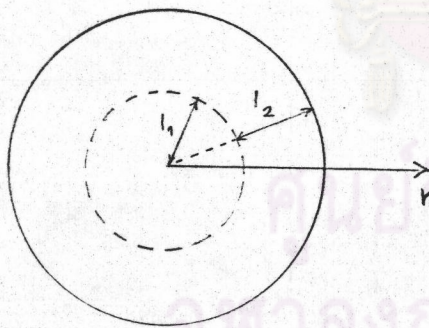
SABINE - 3 เป็นโปรแกรมในภาษาโฟรแทรน ใช้กับ คอมพิวเตอร์ IBM 7090
 หรือ 360 ประกอบด้วยโปรแกรมหลัก 49 สับรูทีน และ 20 ฟังก์ชัน แบ่งการคำนวณ



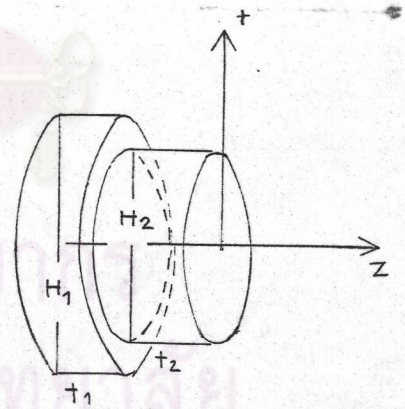
IGRC = 0



IGRC = 1



IGRC = 2



IGRC = 3

รูปที่ 3.1 รูปทรงแท่งกำเนิด ระนาบ ทรงกระบอก ทรงกลม และจาน

เป็น 3 ส่วนใหญ่ คือ จำนวนริ้วฟเวเลนัวตรอนฟลักซ์ 19 กลุ่มพลังงาน ดีฟิวชันฟลักซ์ 26 กลุ่มพลังงาน และ แกมมาฟลักซ์ 7 กลุ่มพลังงาน

รูปทรงของแหล่งกำเนิดและเกราะกำบังรังสี สำหรับคำนวณการแพร่กระจายของนิวตรอนมี 4 รูปทรง คือ ระนาบ (plane) ทรงกระบอก (cylindrical) ทรงกลม (spherical) และ จาน (disk) ส่วนรูปทรงของเกราะกำบังรังสี สำหรับคำนวณริ้วฟเวเลนัวตรอนและแกมมาฟลักซ์แหล่งกำเนิดมี 3 รูปทรง คือ แผ่นระนาบ (plane slabs) ชั้นทรงกระบอก (cylindrical shells) และชั้นทรงกลม (spherical shells) และรูปทรงของเกราะกำบังรังสีที่คำนวณแกมมาฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในเกราะกำบังรังสีมี 4 รูปทรง คือ แผ่นระนาบขนาดอนันต์ (infinite plane slabs) ชั้นทรงกระบอก (cylindrical shells) ชั้นทรงกลม (spherical shells) และจาน (disk)

จาก โปรแกรมนี้จะแบ่งชั้นของแหล่งกำเนิดเป็น 2 บริเวณ ส่วนชั้นของเกราะกำบังรังสีจะมีได้ไม่เกิน 20 บริเวณ และประกอบด้วยธาตุไม่เกินที่กำหนดในตาราง

ตารางที่ 3.1

กลุ่มพลังงานแกมมาที่ใช้ในโปรแกรม SABINE - 3

กลุ่มพลังงานแกมมา	ช่วงพลังงาน (เมกกะอิเล็กตรอน โวลต์)
1	0. - 1.0
2	1.0 - 2.0
3	2.0 - 3.0
4	3.0 - 5.0
5	5.0 - 7.0
6	7.0 - 8.5
7	8.5 - 10.0

ตารางที่ 3.๕

โครงสร้างกลุ่มพลังงานนิวตรอนที่ใช้ในโปรแกรม SABINE - 3

กลุ่มที่พิวขึ้น	พลังงานสูงสุด (MeV)	ช่วงกว้าง (lethargy)	กลุ่มรีฟเวอ	พลังงานสูงสุด (MeV)
0	18.0		1 2	18.0 16.5
1	14.918	.9	3 4 5 6 7 8 9 10 11	14.918 14. 13. 12. 11. 10. 9. 8. 7.
2	6.065	.5	12 13 14	6.065 5.2 4.4
3	3.68	.5	15 16	3.68 3.
4	2.23	.5	17	2.23
5	1.35	.5	18	1.35
6	.821	.5	19	.821
7	.498	.5		
8	.302	.5		
99	183.	.75		
10	86.5	1.		
11	31.8	1.		
12	11.7	1.		
13	4.31	1.		
14	1.58	1.		
15	589.8	1.		
16	214.	1.		
17	78.9	1.		
18	29.	1.		
19	10.7	.75		
20	5.04	.5		
21	3.06	.5		
22	1.85	.5		
23	1.12	.5		
24	.682	.5		
25	.414	.728		
26	.2	--		

ตารางที่ 3.3 รายการธาตุ 33 ธาตุ ที่อาจใช้ได้โปรแกรม SABINE - 3

Material	Id.no.	Material	Id.no.
Hydrogen	1	Iron	26
Deuterium	2	Cobalt	27
Lithium	3	Nickel	28
Beryllium	4	Copper	29
Boron	5	Zinc	30
Carbon	6	Zirconium	40
Oxygen	8	Molybdenum	42
Sodium	11	Cadmium	48
Magnesium	12	Indium	49
Aluminum	13	Tin	50
Silicon	14	Barium	56
Phosphorus	15	Dysprosium	66
Sulfur	16	Tungsten	74
Water	18	Gold	79
Potassium	19	Lead	82
Calcium	20	Uranium 235	235
Titanium	22	Uranium 238	238
Vanadium	23		
Chromium	24		
Manganese	25		

3.3 แหล่งกำเนิดรีมูฟเวเลนิวตรอน

เมื่อพิจารณาลำขานานิวตรอนซึ่งประกอบด้วยนิวตรอนหลายพลังงาน ผ่านไปในตัวกลางหรือเกราะกำบังรังสีที่หนาขนาดๆ นิวตรอนพลังงานสูงจะรีมูฟ (removed) จากกลุ่มพลังงานเร็วขึ้นได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็น การถูกจับหรือการชนแล้วกระจายจนมีพลังงานต่ำลง โดยเฉพาะถ้าเกราะกำบังรังสีนั้นมีธาตุไฮโดรเจนหรือนิวไคลด์ของธาตุเบาเป็นส่วนประกอบ นิวตรอนจะชนเพียง 1 หรือ 2 ครั้งก็ทำให้รีมูฟอย่างรวดเร็ว และในขณะเดียวกันก็สามารถเกิดฟลักซ์เพิ่มได้ โอกาสการชนนี้เรียกว่า **Removal cross section**

จาก โปรแกรม **SABINE - 3** นี้ พิจารณาแหล่งกำเนิดนิวตรอนในการพิจารณา รีมูฟเวเลนิวตรอน ซึ่งต้องมีพลังงานสูงจากปฏิกิริยาแตกตัว (fission) โดยคำนวณ นิวตรอนในบริเวณแหล่งกำเนิดที่ 1 และ 2 วิธีเดียวกัน ดังนั้นก่อนการคำนวณต้องทราบ ความหนาแน่นของปฏิกิริยาแตกตัว

$$S_n(Q) = S_0 \chi_n \sqrt{F(Q)} \quad (3.3.1)$$

- เมื่อ S_0 เป็นความหนาแน่นของปฏิกิริยาแตกตัวที่ริมอกสุดของบริเวณนั้นมีหน่วย จำนวนฟิชชัน ต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อ วินาที
- χ_n เป็นสัดส่วนของฟิชชันนิวตรอนที่ถูกปล่อยออกมา มีพลังงานอยู่ในกลุ่มที่ n ตามแลนเบอร์กสเปคตรัม (Cranberg spectrum)
- $\sqrt{F(Q)}$ เป็นจำนวนนิวตรอนเฉลี่ยจากฟิชชัน 1 ครั้ง (สำหรับยูเรเนียมเท่ากับ 2.46)
- $F(Q)$ เป็นฟังก์ชันเฟรตามรูปทรงของแหล่งกำเนิด
- $S_n(Q)$ เป็นจำนวนนิวตรอนที่ถูกปล่อยออกมา มีพลังงานสอดคล้องกับกลุ่มพลังงาน n ต่อหน่วยปริมาตรและเวลา ที่จุด Q

3.4 การคำนวณรีมูฟเวเลนิวตรอนฟลักซ์

การคำนวณรีมูฟเวเลนิวตรอนฟลักซ์มีขั้นตอนการคำนวณดังปรากฏใน โปรแกรม SABINE - 3 ดังนี้

3.4.1 คำนวณ macroscopic removal cross section ดังนี้

$$\sum_R(IR, NR) = \frac{A_0 \cdot \rho \cdot x \cdot \sigma(J, NR)}{ATW} \quad (3.4.1)$$

หรือ

$$SREM(IR, NR) = \frac{A_0 \cdot DEN \cdot x \cdot SIGREM(J, NR)}{ATW} \quad (3.4.2)$$

เมื่อ $\left. \begin{array}{l} \sum_R(IR, NR) \\ SREM(IR, NR) \end{array} \right\}$ เป็น macroscopic removal cross section ของเกราะกำบังรังสี IR และกลุ่มพลังงาน NR

ρ, DEN เป็น ความหนาแน่นของเกราะกำบังรังสี

A_0 เป็น Avogadro's number = 6.024×10^{23}

ATW เป็น น้ำหนักอะตอมของธาตุ

x เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีธาตุนั้นเป็นส่วนประกอบในแต่ละบริเวณ

$\left. \begin{array}{l} \sigma(J, NR) \\ SIGREM(J, NR) \end{array} \right\}$ เป็น microscopic removal cross section ของธาตุนั้น J ในกลุ่มพลังงาน NR

3.4.2 คำนวณแหล่งกำเนิดที่ริมสุดของแหล่งกำเนิดบริเวณที่ 1 และ 2

จากปฏิกิริยาฟิชชัน

$$S_x = S_0 \cdot \chi_n \cdot 2.46 \quad (3.4.3)$$

เมื่อตัวแปรต่างๆ อธิบายในข้อ 3.3

3.4.3 จำนวนสัมประสิทธิ์ของ โพลีโนเมียลตามรูปทรง แผลงกำเนิด โดยพิจารณาทุกบริเวณตามกรณีต่างๆ ดังนี้

3.4.3.1 จำนวนสัมประสิทธิ์ของ โพลีโนเมียลซึ่งแทนการลดในแนวรัศมี (radial distribution) เมื่อกำหนดการกระจายเป็นจุด (pointwise)

ก. แผลงกำเนิดเป็นรูประนาบ โปรแกรมจะกำหนดจำนวนและค่าสัมประสิทธิ์ เท่ากับ 1

ข. แผลงกำเนิดเป็นรูปทรงกระบอกและทรงกลม เริ่มแรกจำนวนที่ละครึ่งเท่านั้น มีวิธีคำนวณดังนี้

กำหนดจุดที่ต้องการคำนวณในบริเวณ	=	N^2	=	$NWFRNR(IR)$
ปัญหาที่กำหนดความหนาของบริเวณ	=	T	=	$ZR(IR)$
ดังนั้น ความยาวของแต่ละช่วงระหว่างจุด	=	$DRHO$	=	$T / N^2 - 1$
กำหนดจำนวนสัมประสิทธิ์ที่ต้องการ	=	N^3	=	$NCRNR(IR)$
กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องการ	=	$Y(N)$	=	$YWFRNR(IR, N); N= 1, 2$

จากนั้นสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของ โพลีโนเมียล ซึ่งแทนลักษณะการลดของรังสีเนื่องจากรูปทรงของแผลงกำเนิดโดยใช้

ค. แผลงกำเนิดเป็นรูปจาน มีวิธีคำนวณเช่นเดียวกับกรณีของทรงกระบอกและทรงกลม แต่คำนวณจากความหนาของบริเวณเพียงครึ่งหนึ่งของความสูงของจานในบริเวณที่กำลังพิจารณา

3.4.3.2 จำนวนสัมประสิทธิ์โพลีโนเมียลซึ่งแทนการลดในแนว Z (Z distribution) โปรแกรมจะคำนวณเฉพาะเมื่อกำหนดลักษณะการกระจายเป็นแบบจุดและเอ็กโพเนนเชียลเท่านั้น

ก. แผลงกำเนิดเป็นรูประนาบและจาน หลักการคำนวณเช่นเดิม แต่คิดตลอด ความหนาของบริเวณ

ข. แผลงกำเนิดเป็นรูปทรงกระบอก คิดความหนาครึ่งหนึ่งของความสูงของทรงกระบอก

3.4.4 คำนวนรีมูฟเวลนิวตรอนฟลักซ์ในเกราะกำบังรังสี

3.4.4.1 คำนวน minimum relaxation length

$$\lambda_{\min}(\text{IRS}) = 1 / \sum_R (\text{IR, NR})_{\max} \quad (3.4.4)$$

$$\text{LMIN}(\text{IRS}) = 1 / \text{SREM}(\text{IR, NR})_{\max} \quad (3.4.5)$$

เมื่อ $\lambda_{\min}(\text{IRS})$ } เป็น minimum relaxation length ของบริเวณ
 $\text{LMIN}(\text{IRS})$ } บริเวณแหล่งกำเนิด IRS

3.4.4.2 คำนวนหาตำแหน่งและจำนวนตำแหน่งที่จะคำนวณในขั้นต่อไป

จากข้อมูลจะต้องกำหนดค่าต่างๆ ในการคำนวณดังนี้

จำนวนช่วงที่แบ่งไว้ตลอดบริเวณ = NDNI(IR)

จำนวนช่วงที่ให้จุด 2 จุด ห่างกัน = NRNI(IR)

ดังนั้น จำนวนจุดที่ต้องคำนวณนิวตรอนฟลักซ์รีมูฟเวล = IPJ = NDNI/NRNI

และ ระยะระหว่างจุดที่คำนวณฟลักซ์ = DDP = ZR/IPJ

3.4.4.3 ขั้นตอนและวิธีคำนวณฟลักซ์ เมื่อแหล่งกำเนิดเป็นทรง

กระบอกและทรงกลม คำนวนฟลักซ์เนื่องจากแหล่งกำเนิดที่ละบริเวณโดยกำหนดจุด

เป็นจุดในเกราะกำบังรังสีที่ต้องการคำนวณฟลักซ์ ห่างจากแกนแหล่งกำเนิด = DP

ก. แบ่งช่วงการอินทิเกรตในแนว θ (range of θ numerical integration) จากแนวแกนรัศมีมีค่า = N

$$N = \frac{\theta_u - \theta_l}{\theta_o} + 1 \quad (3.4.6)$$

เมื่อ θ_u, θ_l เป็น upper limit และ lower limit ของการอินทิเกรต

$$\theta_0 = \frac{\pi}{12 M_\theta} \quad (3.4.7)$$

เมื่อ M_θ เป็นค่าจำนวนเต็มที่กำหนดตามค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้

ในการคำนวณเพิ่มค่า θ ทีละ $\Delta\theta$

$$\theta = \frac{\theta_u - \theta_L}{N - 1} \quad (3.4.8)$$

พิจารณาแหล่งกำเนิดบริเวณที่ 1 ค่า θ เริ่มจาก 0 ถึง $\tan^{-1} \frac{ZR_1}{\sqrt{DP^2 - ZR_1^2}}$

พิจารณาแหล่งกำเนิดบริเวณที่ 2 ค่า θ เริ่มจาก $\tan^{-1} \frac{ZR_1}{\sqrt{DP^2 - ZR_1^2}}$ ถึง $\tan^{-1} \frac{ZR_1 + ZR_2}{\sqrt{DP^2 - (ZR_1 + ZR_2)^2}}$

ข. แบ่งช่วงการอินทิเกรตในแนวรัศมี (range of R

numerical integration) ใช้หลักการเช่นเดียวกับแนว θ

โดยมี LUTH = upper limit of R numerical integration

LLTH = lower limit of R numerical integration

ถ้าแหล่งกำเนิดเป็นบริเวณที่ 1 LUTH = $DP \cos \theta$

$$LLTH = DP \cos \theta - \sqrt{ZR_1^2 - (DP \sin \theta)^2}$$

ถ้าแหล่งกำเนิดเป็นบริเวณที่ 2 LUTH = $DP \cos \theta + \sqrt{(ZR_1 + ZR_2)^2 - (DP \sin \theta)^2}$

$$LLTH = DP \cos \theta + \sqrt{ZR_1^2 - (DP \sin \theta)^2}$$

ค. คำนวณ path length ตามรูปทรงของเกราะกำบังรังสี

รังสีต่างๆ ในการคำนวณรัศมีฟิสิกส์และแกมมาจากแหล่งกำเนิด

ง. คำนวณผลรวมของ relaxation length

$$\lambda (NR) = \sum_{IR=J1}^{J2} \frac{1}{\Sigma(IR, NR)} \cdot X(IR) \quad (3.4.9)$$

$$BREL(NR) = \sum_{IR=J1}^{J2} SREM(IR, NR) \cdot TPATH(IR) \quad (3.4.10)$$

เมื่อ λ (NR) } เป็น relaxation length
 BREL(NR) }
 TPATH(IR) เป็น path length of region IR

J_1, J_2 เป็น บริเวณที่ตัดจากแหล่งกำเนิดที่พิจารณาและบริเวณชั้นของ
 เกลาะกำบังรังสี ตามลำดับ

จ. คำนวณการลดนิวตรอนเนื่องจากการกระจายในเชิง

รัศมี ในกรณีที่กำหนดการกระจายเป็น โพลี โนเมียลและเป็นจุด

$$\text{SVRHO}(I) = S_x (a_1 + a_2 \rho + a_3 \rho^2 + \dots) \quad (3.4.11)$$

เมื่อ SVRHO(I) เป็นจำนวนนิวตรอนหลังจากลดการลดในเชิงรัศมีแล้ว

a_1, a_2, \dots เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ โพลี โนเมียลที่แสดงการลดในเชิงรัศมีนี้

ρ เป็นระยะที่เพิ่มขึ้นในแนวรัศมี $= \sqrt{(DP - LLTH)^2 + 2DP \cdot LLTH(1 - \cos\theta)}$
 ในกรณีที่กำหนดการกระจายเป็นเอ็กโพเนนเชียล

$$\text{SVRHO}(I) = S_x e^{-K\rho} \quad (3.4.12)$$

เมื่อ K เป็นสัมประสิทธิ์การลดในลักษณะของเอ็กโพเนนเชียล

I เป็นกลุ่มพลังงานใดๆ ในการคำนวณริ้วฟเวเลนิวตรอนฟลักซ์

จ. แบ่งช่วงการอินทิเกรตแนว ϕ ตามลักษณะของแหล่งกำเนิด
 แหล่งกำเนิด ถ้าไม่กำหนดความสูงของทรงกระบอก ให้ $\phi = 1.56$ มิฉะนั้นหาค่า
 $\tan^{-1}(H/2R)$ แล้วอินทิเกรตตลอดความสูงของทรงกระบอก

$$\text{HFUNCT}(\phi, I) = \text{SVRHO}(I) \cdot \text{SVZ} \cdot e^{-\text{BRELPSI}(I)} \quad (3.4.13)$$

เมื่อ HFUNCT(ϕ, I) เป็นริ้วฟเวเลนิวตรอนฟลักซ์ ณ ช่วง ϕ ใดๆ ที่มีพลังงานในช่วง I

SVZ เป็น โพลี โนเมียลแสดงการลดเนื่องจากการกระจาย

$$SVZ = (b_1 + b_2 Z + b_3 Z^2 + \dots)$$

$$BRLPSI(I) = BREL(NR) \cdot \sec \psi$$

$$Z = R \cdot \tan^{-1} \psi$$

เมื่อ b_1, b_2, b_3, \dots เป็นสัมประสิทธิ์โพลิโนเมียลของการกระจายในแนว Z

ช. จากการอินทิเกรตตลอดแนว ψ และ R ตามลำดับ

จะได้

$$GFUNCT(R, I) = \int_{\text{all } \psi} HFUNCT(\psi, I) \cdot d\psi$$

เมื่อ $GFUNCT(R, I)$ เป็นริ้วฟเวเลนิวตรอนฟลักซ์ของช่วง R ใดๆ มีพลังงานอยู่ใน
กลุ่มพลังงานที่ I

$HFUNCT(\psi, I)$ เป็นริ้วฟเวเลนิวตรอนฟลักซ์ของช่วง ψ ใดๆ ที่มีพลังงานใน
กลุ่ม I เช่นเดียวกัน

$$FFUNCT(\theta, I) = \int_{\text{all } R} GFUNCT(R, I) \cdot dR$$

เมื่อ $FFUNCT(\theta, I)$ เป็นริ้วฟเวเลนิวตรอนฟลักซ์ช่วง θ ใดๆ มีพลังงานกลุ่มที่ I

$$\therefore FEERN(IRS, I) = \frac{1}{\pi} \int_{\text{all } \theta} FFUNCT(\theta, I) \cdot d\theta \quad \text{สำหรับทรงกระบอก} \quad (3.4.14)$$

$$FEERN(IRS, I) = \frac{1}{2} \int_{\text{all } \theta} FFUNCT(\theta, I) \cdot d\theta \quad \text{สำหรับทรงกลม} \quad (3.4.15)$$

เมื่อ $FEERN(IRS, I)$ เป็นริ้วฟเวเลนิวตรอนฟลักซ์เนื่องจากแหล่งกำเนิดบริเวณที่ IRS
กลุ่มพลังงานที่ I

3.4.4.4 ขั้นตอนและวิธีคำนวณฟลักซ์ เมื่อแหล่งกำเนิดเป็นระนาบ และจาก หลังจากกำหนดจุดในการคำนวณฟลักซ์แล้ว คำนวณฟลักซ์ที่ละบริเวณตามขั้นตอนดังนี้

ก. แบ่งช่วงการอินทิเกรตในแนว θ

สำหรับรูประนาบ พิจารณา θ จาก 0 ถึง 1.5708 ($\tan x/y ; x \gg y$)

สำหรับรูปจาน พิจารณา θ จาก $\tan \frac{-H/2}{DP}$ ถึง $\tan \frac{-1}{DP-ZR}$

ข. คำนวณ relaxation length

ค. แบ่งช่วงการอินทิเกรตในแนว R

สำหรับรูประนาบ LUTH = DP / cos θ

$$LLTH = (DP - ZR_1) / \cos \theta$$

สำหรับรูปจาน LUTH = (H / 2) . sin θ

ง. คำนวณฟลักซ์เนื่องจากการลดต่างๆ เมื่อกำหนด การกระจายในแนวรัศมีและความสูงเป็น โพลี โนเมียลและจุด

$$GFUNCT(\theta, I) = S_x (a_1 + a_2 \rho^2 + \dots) \cdot (b_1 + b_2 Z^2 + \dots) \cdot e^{-BREL(NR)} \quad (3.4.16)$$

เมื่อกำหนดการกระจายเป็นเอ็ก โปเนนเชียล

$$GFUNCT(\theta, I) = S_x \cdot e^{-K} \cdot e^{-BREL(NR)} \quad (3.4.17)$$

$$\text{ดังนั้นรีมูฟเวอริวฟลักซ์ FEERN}(IRS, I) = \frac{1}{2} \int_{\text{all } \theta} GFUNCT(\theta, I) \cdot d\theta \quad (3.4.18)$$

3.5 แหล่งกำเนิดคิฟิรขึ้นนิวตรอน

นิวตรอนพลังงานสูงผ่านในเกราะกำบังรังสี ก่อให้เกิดรีมูฟเวอริวฟลักซ์ ซึ่ง ถือเป็นส่วนหนึ่งของแหล่งกำเนิดในสมการการกระจาย เนื่องจากการแพร่กระจายและ ลดความเร็วของนิวตรอนจึงมีหลักการคำนวณดังนี้

ให้ $\phi_i^r(z)$ เป็นริ้วฟเวอพลักซ์กลุ่มพลังงานที่ i ที่จุด z
 \sum_i^a เป็น macroscopic absorption cross section ของกลุ่มพลังงานที่ i
 \sum_{ij} เป็น macroscopic total transfer cross section จากกลุ่ม i มีพลังงานสุดท้ายในกลุ่ม j

นิวตรอนบางส่วนถูกดูดจับไปในระบบ $= \phi_i^r(z) \sum_i^a$
 บางส่วนแพร่กระจายอยู่ในช่วงพลังงาน $= \phi_i^r(z) \sum_{ii}^\#$
 นิวตรอนที่มีพลังงานกลุ่ม i เกิดอันตรกิริยาอยู่ในกลุ่ม $j = \phi_i^r(z) \sum_{ij}$ ($j > i$)
 และนิวตรอนที่มีพลังงานกลุ่ม i แล้วริ้วฟออกไป $= \phi_i^r(z) \sum_i^r$
 ดังนั้นในสมการสมดุล จำนวนนิวตรอนต่อหน่วยปริมาตรและเวลาที่ออกจากกลุ่ม i มีค่าเท่ากับ $\phi_i^r(z) \cdot \sum_i^a + \phi_i^r(z) \cdot \sum_{ii}^\# + \phi_i^r(z) \sum_{ij}$

จาก
$$\sum_i^r = \sum_i^a + \sum_{ii}^\# + \sum_{i,i+1} + \sum_{i,i+2} + \dots$$

$$\sum_i^\# = \sum_i^r - [\sum_i^a + \sum_{i,i+1} + \dots]$$

$$= \sum_i^r - \sum_i^{out}$$

จากเทอมของแหล่งกำเนิดในสมการการกระจาย

$$s_1(z) = \phi^r(z) \sum^r - \sum_0^a \phi_0(z) + \phi_1(z) \sum_{1,1}^\#$$

$$s_2(z) = \phi_1(z) \sum_{1,1} + \phi_2^r(z) \sum_{2,2}^\#$$

$$\vdots$$

$$s_6(z) = \phi_1 \sum_{1,6} + \dots + \phi_6^r \sum_{6,6}$$

จากกลุ่มที่ 7 ($< 0.5 \text{ MeV}$) ไม่คิดริ้วฟเวอพลักซ์

$$i \geq 7 \quad s(z) = \phi_1 \sum_{1,1} + \phi_2 \sum_{2,2} + \dots + \phi_{i-1} \sum_{i-1,i}$$

โดย
$$\phi_i^r(z) = \phi_i^d(z) + \phi_i^r(z)$$

3.6 การคำนวณคิฟิวชันนิวตรอนฟลักซ์

โดยหาคำตอบจากสมการการแพร่กระจายหลายกลุ่ม(multigroup diffusion equation) พิจารณาที่แต่ละกลุ่มพลังงาน i

$$D \left[\phi''(r) + \frac{P}{r} \phi'(r) \right] - \sum_t \phi(r) + S(r) = 0 \quad (3.4.19)$$

เมื่อ $\phi(r)$ เป็นคิฟิวชันนิวตรอนฟลักซ์ ณ จุด r

D เป็นสัมประสิทธิ์การกระจาย (diffusion coefficient)

\sum_t เป็น macroscopic total cross section โอกาสที่เกิดอันตรกิริยาต่างๆ ที่ทำให้นิวตรอนกลุ่มพลังงาน i ลดจำนวนลง มีค่าเท่ากับ

$$\sum^{out} + DB^2 \quad (DB^2 = \sum_a)$$

P เป็นคิฟิวชันรูปทรงแหล่งกำเนิด โดย

$$P = 0 \quad \text{ระนาบ}$$

$$P = 1 \quad \text{ทรงกระบอก}$$

$$P = 2 \quad \text{ทรงกลม}$$

B^2 เป็นค่า buckling

3.6.1 สัมประสิทธิ์การกระจาย

ขึ้นกับคุณสมบัติที่นิวตรอนแพร่กระจายอยู่ ถ้าตัวกลางประกอบด้วยธาตุเดี่ยว ซึ่งมีน้ำหนักอะตอม A ดังนั้นค่าโคซายน์เฉลี่ยของมุมที่กระจัดกระจายเนื่องจากการชนต่อการชนแต่ละครั้งเมื่อวัดในระบบห้องทดลอง(laboratory system) มีค่า $\bar{\mu}_0$

$$\bar{\mu}_0 = 2/3 A \quad (3.4.20)$$

ในกรณีที่มีหลายธาตุ โดยมีโอกาสการกระจัดกระจายเนื่องจากการชน

$$\bar{\mu}_0 = \frac{\sum_i N_i \bar{\mu}_{i,s} (2/3 A)}{\sum_i N_i \bar{\mu}_{i,s}} \quad (3.4.21)$$

$$\text{จากสมการการแพร่กระจาย} \quad 1/D = 3 \left(\sum_t - \sum_s \bar{\mu}_0 \right) \quad (3.4.22)$$

$$D = 1/3 \sum_{tr}$$

เมื่อ Σ_t = Total Macroscopic cross section
 Σ_s = Macroscopic Scattering cross section
 Σ_{tr} = Transport Macroscopic cross section

3.6.2 กำหนดเงื่อนไขของสมการการแพร่กระจาย

กำหนดให้มี ฟลักซ์และกระแสการไหลของนิวตรอนนั้นต่อเนื่องที่ริมด้านใน

$$\begin{array}{l} \text{ดังนั้น Inner Boundary } a_0 D\phi + a_1 \phi + a_2 = 0 \\ \text{Outer Boundary } b_0 D\phi + b_1 \phi + b_2 = 0 \end{array}$$

จากนั้นแทนไปในสมการ $D\phi'' + u\phi = -V(x)$ จากภาคผนวก

จะได้ $U(R_e) = b_1/b_0$, $V(R_e) = b_2/b_0$

แต่ กำหนดให้ b_0 มีค่าเป็นศูนย์ไม่ได้ จึงให้ค่า $b_0 = 1$ ส่วน b_1, b_2 จะ
 ต้องเหมาะสมกับโปรแกรม จึงเลือก $b_1 = .5$, $b_2 = 0$

กำหนด $\phi(R_i) = \phi_0$, $\phi'(R_i) = 0$

และ $a_0 = 1$, $a_1 = 0$, $a_2 = 0$

3.6.3 Air Gaps.

จากโปรแกรมสำเร็จ SABINE -3 สามารถคำนวณฟลักซ์ที่ผ่านเกราะกำบัง
 รังสีที่มีอากาศอยู่ภายใน ในการคำนวณให้

เมื่อ r_1, r_2 เป็นตำแหน่งใดๆ

J_1, J_2 เป็นค่ากระแสการไหลสุทธิที่แต่ละด้านของ gap โดย

$$J(r) = -D\phi'(r)$$

แยกพิจารณา 2 ลักษณะ ดังนี้

ก. P Approximation

ในกรณีที่คำนวณ ความหนาของ gap ไม่มากเมื่อเทียบกับความกว้าง ดังนั้น
 จึงไม่คิดการไหลข้ามของนิวตรอนตามแนวขวาง โดยให้ฟลักซ์ต่อเนื่องตลอด gap และการ
 ลดของกระแสนิวตรอนตลอด gap ขึ้นกับรูปทรงเท่านั้น

$$\begin{array}{l} J_1/J_2 = (r_2/r_1)^P \\ \phi_1/2 - J_1 = \phi_2/2 - J_2 \quad f_p(q) \quad , \quad q = r_1/r_2 \end{array}$$

ระนาบ $P = 1$ $f_0(q) \geq 1$

$$\begin{aligned} \text{ทรงกระบอก} \quad P = 2 \quad f_1(q) &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sin^{-1} q}{q} + \sqrt{1 - q^2} \right) \\ \text{ทรงกลม} \quad P = 3 \quad f_2(q) &= 1 - (1 - q^2)^{3/2} \end{aligned}$$

ข. Different Treatment

ในกรณีที่คำนวณ air gap หนามาก พิจารณาการไหลซึมของนิวตรอนในแนวขวางของระนาบและทรงกระบอก ฟลักซ์และกระแสนิวตรอน ไม่ต่อเนื่องในแนว gap

$$\left. \begin{aligned} \phi_2 &= \alpha \phi_1 & ; \quad \alpha > 0 \\ J_2 &= \beta J_1 & ; \quad \beta \neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.4.23)$$

โดยกำหนดค่าให้บริเวณแรกและสุดท้ายต้องไม่เป็น gap และมี gap ชนิดนี้ไม่เกิน 3 แห่ง

3.6.4 Response Functions

ใน SABINE-3 นี้แบ่งการคำนวณ Response Function เป็น 3 ชนิด

ก. คำนวณโดสเรท , อัตราการเกิดปฏิกิริยา , ฟลักซ์ (Fast Flux หรือ Epithermal Flux) ซึ่งมีหลักการการคำนวณเช่นเดียวกัน

$$R(x) = \sum_{i=1}^{i_2} \phi_i(x) f_i \quad ; \quad 1 \leq i_1 \leq i_2 \leq 26 \quad (3.4.24)$$

เมื่อ f_i เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับพลังงานของสิ่งต่างๆ ที่ต้องการคำนวณ

ข. คำนวณความร้อนที่เกิด Heat Deposition และ แอคติเวชัน (Activation) การคำนวณเช่นเดียวกับข้อ ก. แต่ f_i กำหนดจากข้อมูลซึ่งขึ้นกับตำแหน่ง x

ค. คำนวณ Reaction Rate of Threshold detectors ในการคำนวณแบ่งกลุ่มพลังงานของริมูฟเวเลนิวตรอนละเอียดกว่าที่ฟิวชั่นนิวตรอน ดังนั้น SABINE-3 จึงเฉลี่ยค่า Macroscopic cross section ของเครื่องตรวจวัดเป็นกลุ่มใหญ่ (Broad Group)

$$\sum_{n \in i, R} = \frac{\sum_{n \in i} \sum_r \phi_n^r(x_R)}{\sum_{n \in i} \phi_n(x_R)} \quad i=1, 26 \quad (3.4.25)$$

เมื่อ \sum_n เป็น Macroscopic Cross Section ในกลุ่มริมูฟเวเลนิวตรอนที่ n

$\phi_n(x_R)$ เป็นริ้วฟเวอริวตรอนฟลักซ์ที่กึ่งกลางของบริเวณ R

ดังนั้น

$$T(x) = \sum_{i=1}^6 \phi_i(x) \quad i,R \quad (3.4.26)$$

3.7 แหล่งกำเนิดแกมมาฟลักซ์

SABINE แยกแหล่งกำเนิดแกมมาออกเป็น 2 ส่วนใหญ่

3.7.1 แกมมาจากแหล่งกำเนิดโดยตรง รวมทั้งแกมมาที่มาจากปฏิกิริยาฟิชชัน และกากกัมมันตรังสี

โดยพิจารณา แหล่งกำเนิดแกมมาที่อยู่ในกลุ่มพลังงาน g ที่ จุด Q ในบริเวณแหล่งกำเนิด (เมกะอิเลคตรอนโวลต์ ต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อ วินาที)

$$S_g(Q) = S_{0,g} G(Q) \quad (3.4.27)$$

เมื่อ $S_{0,g}$ เป็นปริมาณแกมมาจากแหล่งกำเนิด

$G(Q)$ เป็นฟังก์ชันแสดงรูปทรงของแหล่งกำเนิด

$$S_{0,g} = S_0 f_g + \sum_{i=L}^{26} \phi_{0,i} \cdot P_{i,g} + \sum_{i=L}^N \phi_{0,i} \quad q_{i,g} \quad (3.4.28)$$

เมื่อ S_0 เป็นความหนาแน่นของปฏิกิริยาฟิชชัน

f_g เป็นพลังงานของแกมมาที่เกิดจากฟิชชันแต่ละครั้ง ซึ่งมีพลังงานในกลุ่ม g (MeV/fission)

$\phi_{0,i}$ เป็นนิวตรอนฟลักซ์ทั้งหมดที่มีพลังงานในกลุ่ม i ที่ริมอกของแหล่งกำเนิด

L เป็นกลุ่มพลังงานเริ่มคำนวณแกมมาทุกชนิด

$$P_{i,q} = \sum_e N_e \sigma_{e,i}(n,\gamma) C_{e,g} \quad (3.4.29)$$

เมื่อ $\sigma_{e,i}(n,\gamma)$ เป็น microscopic (n,γ) cross section ของนิวตรอนกลุ่มพลังงาน และธาตุ e (barn)

$C_{e,g}$ เป็นจำนวนแกมมาที่มีพลังงานกลุ่ม g ที่ได้จากนิวตรอนที่ถูกดูดจับแต่ละครั้ง มีหน่วย เมกะอิเลคตรอนโวลต์ ต่อ การดูดจับ 1 ครั้ง ของธาตุ e

N_e เป็นความหนาแน่นของธาตุ e ในบริเวณนั้น

$$q_{i,g} = \sum_{j=0}^M \sum_e N_e \sigma_e^{in}(i,i+j) Q_e(i,j,g) \quad (3.4.30)$$

เมื่อ $\sigma_e^{in}(i, i+g)$ เป็น Microscopic inelastic transfer cross section ของ
 กลุ่มพลังงาน i ไปยังกลุ่ม $i+j$ ของธาตุ e (barn)
 $Q_e(i, j, g)$ เป็นกลุ่มพลังงานแกมมาที่ g ซึ่งมาจากการชนแล้วกระจายแบบ
 inelastic ของนิวตรอนกลุ่มพลังงาน i ไปยัง $i+j$ ของธาตุ e
 M เป็นจำนวนกลุ่มพลังงานของแกมมา โปรแกรมนี้มี 7 กลุ่ม

3.7.2 แกมมาจากเกราะกำบังรังสี SABINE พิจารณาแกมมาจากนิวตรอน
 ที่ถูกนิวไคลด์จับไว้ และจากอันตรกิริยาชนิด inelastic

$$S_g(x) = \sum_{i=L}^{26} \phi_i(x_1) \cdot p_{i,g} + \sum_{i=L}^N \phi_i(x_1) q_{i,g} \quad (3.4.31)$$

3.8 การคำนวณแกมมาฟลักซ์

มีขั้นตอนดังนี้

3.8.1 คำนวณ $p_{i,g}$ หรือ $q_{i,g}$ ตามคุณสมบัติของธาตุ (PGSIGA(N, IG))

3.8.2 คำนวณความเข้มของแหล่งกำเนิดที่ริมขอบของบริเวณแหล่งกำเนิดที่ 1

และ 2 ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \text{SGO1(IG)} &= \text{FEENO1(N)}. \text{PGSIGA(N, IG)} \\ \text{SGO2(IG)} &= \text{FEENO2(N)}. \text{PGSIGA(N, IG)} \end{aligned} \right\} \quad (3.4.32)$$

3.8.3 คำนวณสัมประสิทธิ์ของ โพลี โนเมียลซึ่งแทนการกระจายของแหล่งกำเนิด

ก. โพลี โนเมียลซึ่งแทนการลดลงตามแนวรัศมี เฉพาะเมื่อกำหนดเป็น (pointwise)

สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นระนาบ กำหนดจำนวนและค่าของสัมประสิทธิ์ = 1

สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นทรงกระบอกและทรงกลม ความหนา $T=ZR(I)$

สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นจาน ความหนา $T=0.5H(I)$

กำหนดจำนวนจุด = $NWFG(I) = N^2$

หาค่าสัมประสิทธิ์ได้เช่นเดียวกับที่คำนวณในรูปพหุนามนิวตรอนพลักซ์

ข. โพลีโนเมียลในแนว Z เมื่อกำหนดลักษณะการลคเป็น โพลีโนเมียล หรือเอ็กโพเนนเชียล

สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นระนาบและจาน $T=ZR(I)$

สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นทรงกระบอก $T=0.5H(I)$

วิธีการคำนวณเช่นเดียวกับ ก.

3.8.4 คำนวณความเข้มของแหล่งกำเนิดทั้งหมด

สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นระนาบและจาน

$$SGO1(IG) = SGO1(IG) \left[AGZ_1 + AGZ_2 \cdot ZR(1) + AGZ_3 \cdot ZR^2(2) + \dots \right] + S_0 \cdot PGFIS(IG)$$

where $PGFIS(IG) = f_g$

สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นทรงกระบอกและทรงกลม

$$SGO1(IG) = SGO1(IG) \left[AGR_1 + AGR_2 \cdot ZR(2) + \dots \right] + S_0 \cdot PGFIS(IG)$$

$$\text{or } SGO1(IG) = SGO1(IG) \cdot e^{-K \cdot ZR(2)} + S_0 \cdot PGFI(IG)$$

3.8.5 คำนวณการแพร่กระจายของแหล่งกำเนิดในเกราะกำบังรังสี

สำหรับเกราะกำบังรังสีที่คำนวณแกมมาทฤษฎีรูประนาบ กำหนดค่าและจำนวนสัมประสิทธิ์=1

สำหรับรูปทรงกระบอกและจาน กำหนดสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลแทนการแพร่กระจาย

ของแกมมาจากเกราะกำบังรังสี
จำนวนจุดที่คำนวณ $= N_{PMAX} = \sum_{IR=3}^{NRM} \frac{NDNI(IR)}{NGSI(IR)}$
แหล่งกำเนิดแกมมาในเกราะกำบังรังสี ณ จุดนั้นๆ

$$GS(IP, IG) = \phi_{Dif} \cdot PGSIGA(N, IG)$$

แหล่งกำเนิดแกมมาในเกราะกำบังรังสี ณ บริเวณชั้นนั้น

$$GSL(IR, IG) = \phi_{Dif} \cdot PGSIGA(N, IG)$$

หาค่าสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลแทนการแพร่กระจายเช่นเดิม

3.8.6 คำนวณแกมมาฟังก์ชันที่จุดต่างๆ

ก. คำนวณ minimum relaxation length

ข. แบ่งช่วงการอินทิเกรตในแนว θ

ระนาบ	θ	จาก	0	-	1.56
งาน	θ	จาก	$\tan^{-1} =$		$\frac{H / 2}{DP-SUIRS 1}$
		ถึง	$\tan^{-1} =$		$\frac{H / 2}{DP-SUIRS 2}$

ค. คำนวณ relaxation length

ง. แบ่งช่วงการอินทิเกรตในแนวรัศมี เช่นเดียวกับการคำนวณริมูฟเวล

นิวตรอนฟลักซ์

จ. คำนวณบิลอับฟลักเตอร์ เลือกได้ 3 วิธี

NBU = 1 - วิธี interpolate ค่าของแต่ละธาตุ ซึ่งเหมาะกับเกราะที่หนามากๆ

NBU = 2 - วิธี Broder's formular เหมาะกับปัญหาที่เกราะมีขนาดบาง

$$B(t_N) = \sum_{n=1}^N B_n(t_n) - \sum_{n=1}^N B_n(t_{n-1})$$

NBU = 3 - วิธี Kitazume's formula เหมาะกับเกราะที่ประกอบด้วยธาตุที่มีคุณสมบัติต่างกันมากๆ

$$B(t_N) = B_N(t_N) + \left[B(t_{N-1}) - B_N(t_{N-1}) \right] Z_N$$

$$Z_N = (1 - \beta_{N,N-1}) \exp(-\alpha_{N,N-1} x_N + \beta_{N,N-1})$$

เมื่อ $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}$ เป็นสัมประสิทธิ์เฉพาะแต่ละธาตุ

ฉ. คำนวณแกมมาฟังก์ชันที่ต้องการทั้งหมด

กรณีเป็นระนาบและงานจะได้ฟังก์ชันคือ = FEEG(IRS,IG)

$$FEEG(IRS,IG) = 0.5 \int_{\text{all } \theta} \left(\int_{\text{all } R} BU.GSL(IR,IG).SNO1(IG)(a_1 + a_2 \rho + \dots) \cdot (b_1 + b_2 z^2 + b_3 z^4 + \dots) e^{-BRELR(IG)} \cdot \sin \theta \cdot dR \cdot d\theta \right)$$

กรณีทรงกระบอก

$$FEEG(IRS,IG) = \frac{1}{\pi} \int_{all \theta} \int_{all R} \left(\frac{BU \cdot SNO1(IG) \cdot CAPPRO(IRS,IG) \cdot e^{EKAPPA(IRS,IG) \cdot (a_1 + a_2 \rho + \dots)}}{(b_1 + b_2 z + b_3 z^2 + \dots) e^{-BRLPSI(IG) - BRELR(IG)}} \right) \sin \theta \, d\tau \, dR \, d\theta$$

กรณีทรงกลม

$$FEEG(IRS,IG) = \frac{1}{2} \int_{all \theta} \int_{all R} \left(\frac{BU \cdot SNO1(IG) \cdot CAPPRO(IRS,IG) \cdot e^{EKAPPA(IRS,IG) \cdot (a_1 + a_2 \rho + \dots)}}{e^{-BRELR(IG)}} \right) \sin \theta \, d\tau \, dR \, d\theta$$

3.8.7 คำนวณพลังงานแกมมาที่สะสม (heat deposition) และ โดส (dose)

$$dose = \emptyset(IRS,IG) \cdot CFG \tag{3.4.33}$$

เมื่อ CFG เป็นค่า conversion factor ของแกมมาที่กำหนดไว้

$$พลังงานสะสม = \mu_e \cdot \emptyset(IRS,IG) \cdot 1.6 \times 10^{13} \quad \text{วัตต์/ซม}^3 \tag{3.4.34}$$

และ $\emptyset(IRS,IG)$ เป็นค่าฟลักซ์ที่คำนวณได้

