



วิชาในชั้นนี้เกี่ยวกับ การคำนวณเพื่อหาข้อมูล เกี่ยวกับความสัมพันธ์ ระหว่าง โดส (Dose) ของนิวตรอน และ ฟลักซ์ (Flux) หรือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate) ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้โดยตรงจากการใช้ เทรสโวลต์คิคเทคเตอร์ (Threshold Detectors)

ข้อมูลที่สกัดได้ใช้ประกอบในการคำนวณ ได้แก่

- (1) ตารางและกราฟ คัทเฟอเรนเชียลครอสเซกชัน (Differential Cross Section) [1, 2, 3, 8]
- (2) สเปกตรัมของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู [6, 7]
- (3) ข้อมูลและกราฟแสดงความสัมพันธ์ของคัทเฟอเรนเชียลโดสและพลังงาน (Differential Dose - Energy Curve and Data) [5]

สเปกตรัมของนิวตรอนที่สกัดได้ เป็นสเปกตรัมในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบสระน้ำ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ จะปรากฏเป็นค่าเฉลี่ยของครอสเซกชัน (Cross-

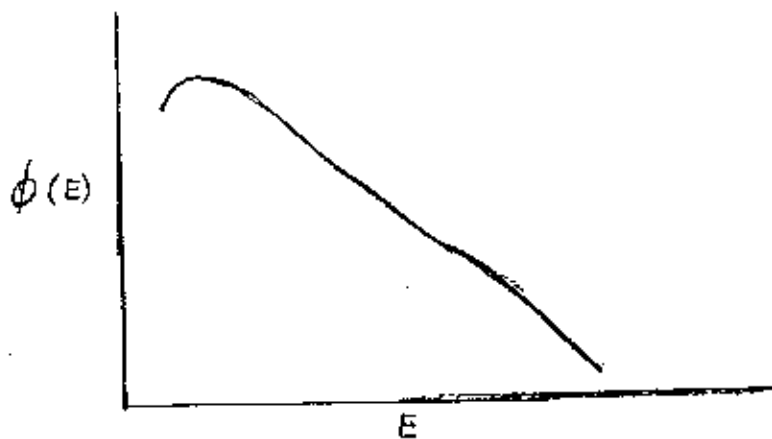
Section (σ) และโดส (Dose) (D)

โดยที่กราฟต่าง ๆ ที่ใช้ เป็นข้อมูล เป็นกราฟที่ได้จากการทดลอง การคำนวณ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการอินทิเกรต (Integration) จึงต้องใช้วิธีประมาณ (Approximation)

นิวตรอนฟลักซ์ (Neutron Flux) ความหมายของฟลักซ์ อาจจะได้เห็นได้ชัดเจนในกรณีที่มีนิวตรอนพุ่งเป็นลำขนาน (beam) ในกรณีนี้ ฟลักซ์ หมายถึงจำนวนนิวตรอนที่ผ่านพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ในเวลา 1 วินาที ถ้านิวตรอนทุกตัวมีความเร็วเท่ากัน อาจจะได้กล่าวได้ว่า ฟลักซ์ หมายถึงผลคูณของปริมาณความหนาแน่นของนิวตรอน (Neutron Density) และความเร็วของนิวตรอน

ในกรณีที่นิวตรอนอยู่ในน้ำ เช่น ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู การคิดหรือนิยามฟลักซ์ จะหมายถึง นิวตรอนที่ผ่านพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรทุกวินาทีไม่ว่าจะมีนิวตรอนวิ่งอยู่ทุกทิศทุกทาง จะต้องคิดว่าเป็นผลคูณของปริมาณความหนาแน่นและความเร็ว

โดยทั่วไป นิวตรอนจะปรากฏอยู่ มีความเร็วแตกต่างกัน ซึ่งหมายถึงมีพลังงานต่างกัน และเกิดขึ้นจาก สเปกตรัมของนิวตรอน



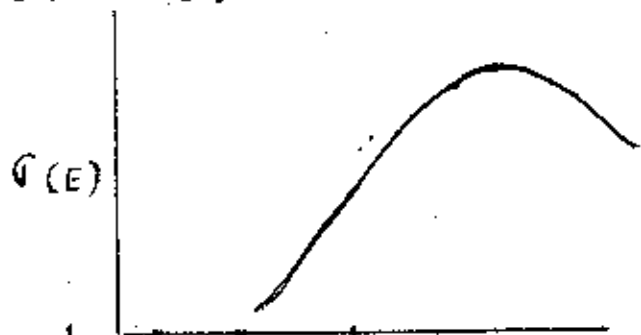
$\phi ( E )$  หมายถึงฟลักซ์เฟอเรนเชียลฟลักซ์ (Differential Flux) ซึ่งไม่นำไปปนกับฟลักซ์ทั้งหมด (Total Flux) หรือ อินทิเกรตฟลักซ์ (Integrated - Flux) ซึ่งหาได้จาก

$$\phi ( \text{Total} ) = \int_0^{\infty} \phi ( E ) dE$$

ในการกล่าวถึงทั่วไป เกี่ยวกับฟลักซ์นั้น มักหมายถึงฟลักซ์ทั้งหมด และในการวัดฟลักซ์ ผลที่ได้มักเป็นฟลักซ์ทั้งหมด การวัดนิวตรอน วัดที่ระดับพลังงานหนึ่ง คืออาศัยหลักการเกิดกัมมันตภาพรังสีจาก ธาตุที่ไวต่อนิวตรอน (Neutron Activation) สำหรับนิวตรอนที่มีพลังงานจาก 0.1 Mev ขึ้นไป อาจเรียกว่า นิวตรอนเร็ว (Fast Neutron) และมีธาตุที่เหมาะสมที่จะใช้ เป็นตัววัดนิวตรอนหลายธาตุ ดังต่อไปนี้

$Al^{27} (n,d) Na^{24}$ ,  $In^{115} (n,n') In^{115m}$ ,  $Rh^{103} (n,n') Rh^{103m}$   
 $Ni^{58} (n,p) Co^{58}$ ,  $Np^{237} (n,f) F.P$ ,  $P^{31} (n,p) Si^{31}$ ,  $S^{32} (n,p) P^{32}$

แต่ละธาตุมีความไวที่จะทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแตกต่างกัน และแสดงโดย  
 ความสัมพันธ์เรียกว่า ครอส เซกชัน



รูปที่แสดงข้างบนนี้เป็นตัวอย่างที่ดีเพื่อเรเนเชอแลต ออสเซกชัน (Differential Cross Section) อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง ธาตุ กับ นิวตรอน อาจคิด  
 ได้จากสมการต่อไปนี้

$$R = \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ออะตอม (Reaction rate per atom)} = \int \sigma(E) \bar{\nu}(E) dE \quad (1)$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ออะตอม เป็นสิ่งที่ตรวจวัดได้จากการทดลองโดยการ  
 วัดกัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากการแตกตัว (Activation) อย่างไรก็ตาม สมการ

(1) ไม่ช่วยในหาผลจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้โดยตรง

ถ้านิยาม ค่าเฉลี่ย  $\bar{\nu}$  กับสมการต่อไปนี้ [9]

$$\bar{\nu} = \frac{\int \sigma(E) \nu(E) dE}{\int \sigma(E) dE} \quad (2)$$

$$\text{จะพบว่า } \bar{\nu} \times \text{ผลทั้งหมด} = R \quad (3)$$

วิธีที่ใช้กันแพร่หลายคือ อัตราสมการ (3) หากค่าผลทั้งหมด ไม่ทดลอง  
 หา R และเปิดตารางงานเอกสาร เพื่อหาค่า  $\bar{\nu}$  นำมาใช้

การปฏิบัติที่กล่าวนี้ ถ้าเป็นกรณีของนิวตรอนปานกลาง (Thermal Neutron)  
 ไม่ใ้ใครมีปัญหาคือ ๆ แต่กรณีของนิวตรอนเร็ว จะเกิดปัญหาเกี่ยวกับ สเปกตรัม ทั้งนี้เพราะ  
 สำหรับนิวตรอนเร็ว ซึ่งปรากฏเป็นตารางงานเอกสาร [4] ใ้หาจากตารางค่า

ตามสมการ (2) ซึ่งหมายความว่า จะต้องกำหนดกัมมันต์ภาพเพื่อเรนเจอร์สลับไว้ อย่างหนึ่ง  
 ด้านค่า  $\bar{\sigma}$  จากตารางมาใช้โดยตรง ในการทดลองมักจะมีปัญหาว่า สเปกตรัมหรือ  
 กัมมันต์ภาพเพื่อเรนเจอร์สลับในการทดลองมักจะไม่ตรงกับที่ตารางกำหนดไว้ ในตารางคือ  
 ค่ามวลจากกัมมันต์ภาพเพื่อเรนเจอร์สลับ ซึ่งเรียกกันว่า สเปกตรัมฟิชชัน (Fission Spectrum)  
 ซึ่งเป็นสเปกตรัมของนิวตรอน มักจะแตกต่างกันออกไป

นอกจากนี้ ถ้าใช้ธาตุหลาย ๆ ชนิดทำตัวสลับ ในเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณ  
 โคบอลต์  $\bar{\sigma}$  ของแต่ละธาตุจากตารางค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันออกไป และ  
 ทั่วไปค่ากัมมันต์ภาพของนิวตรอนเร็ว มีความหมายกำหนดไม่แน่นอน เพราะมีปริมาณมาก  
 น้อย ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้ธาตุใดเป็นตัววัด

ค่าเฉลี่ยทั่วทั้งโคบอลต์โดยอาศัย  $\bar{\sigma}$  เรียกว่า ฟิชชันอีควิววาเลนต์ฟลักซ์

(Fission Equivalent Flux)

เนื่องจาก  $\bar{\sigma}$  ได้มาจากกราฟค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมฟิชชัน

นอกเหนือความยุ่งยากที่กล่าวแล้วข้างต้น ยังมีปัญหาอีกว่า ในปัจจุบันนี้ ค่า  
 $\bar{\sigma}$  ยังไม่ใคร่แน่นอน ค่าที่ต่ำสุดสำหรับธาตุบางธาตุที่มีคุณสมบัติ เช่น กำมะถัน อลูมิ-  
 นีเยียม ยังอาจคลาดเคลื่อนได้ถึงร้อยละสิบ

วิธีการวัดฟลักซ์อีกวิธีหนึ่ง ซึ่งแตกต่างจากที่กล่าวแล้วเล็กน้อย ใช้เอฟเฟกทีฟ  
 ครอสเซกชัน (Effective Cross Section) ถ้าจะเห็นได้จากสมการต่อไปนี้

$$R = \int_0^{\infty} \phi(E) \sigma(E) dE \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_{eff} = \frac{\int_{E_{eff}}^{\infty} \phi(E) \sigma(E) dE}{\int_{E_{eff}}^{\infty} \phi(E) dE} \quad (5)$$

$$R = \bar{\sigma}_{eff} \int_{E_{eff}}^{\infty} \phi(E) dE \quad (6)$$



$E_{off}$  หมายถึงพลังงานเกณฑ์หรือพลังงานขีดเริ่มต้น (Effective Threshold Energy) จากการใช้ตัวกรอง ดีคาร์บอเนต หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีความหนาแน่นสูงกว่าค่าพลังงานขีดเริ่มต้น (Threshold Energy) นั้น จากค่าพลังงานขีดเริ่มต้นที่แท้จริง

$$\int_{E_{off}}^{\infty} \phi(E) dE \quad \text{หมายถึงผลคูณทั้งหมด เหนือพลังงานขีดเริ่มต้น}$$

$$\text{ค่าที่ต่างกัน} \quad \int_0^{\infty} \phi(E) dE \quad \text{ซึ่งหมายถึงผลคูณทั้งหมด}$$

ผลคูณทั้งหมด จะมีความมากกว่า ผลคูณเหนือพลังงานขีดเริ่มต้น และ  $\bar{E}$  จะมีค่าต่ำกว่า  $\bar{E}_{off}$  แทน

$$\bar{E}_{off} \phi_{off} = \phi_{total} \bar{E} = R \quad (7)$$

โดยหลักการแล้ว การใช้วัสดุหลาย ๆ ชนิดเป็นพลังงานขีดเริ่มต้นที่แตกต่าง (Threshold Detectors) มีพลังงานขีดเริ่มต้นต่าง ๆ กัน ทำให้สามารถคำนวณหาผลคูณ ในช่วงพลังงานต่าง ๆ ได้ ซึ่งหมายถึงเป็นการรวมสเปกตรัมที่กว้าง ๆ ที่อาจเช่น การวัดผลเหนือพลังงานขีดเริ่มต้น วัดด้วยเครื่องตรวจจับ ๒ ชนิด ปรากฏผลดังต่อไปนี้

<u>Detector</u>	<u>Threshold</u>	$\phi_{off}$
A	10 Mev	$8 \times 10^{10}$
B	7 Mev	$5 \times 10^{10}$

อาจจะถือว่า มีผลคูณในช่วงพลังงาน 7 - 10 Mev เท่ากับ  $5 \times 10^{10}$  และ  $2 \times 10^{10}$  และผลคูณทั้งหมดจะเท่ากับผลคูณที่เครื่องตรวจจับอื่น ๆ ที่มีพลังงานขีดเริ่มต้นต่าง ๆ

อย่างไรก็ตาม ในทางการปฏิบัติจริง ๆ มีความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดได้หลายประการ ประการแรก  $E_{off}$  ขึ้นอยู่กับ สเปกตรัม ค่า  $E_{off}$  จากตารางในเอกสารต่าง ๆ มักมาจาก ฟังก์ชันสเปกตรัม สัมพันธ์กับ  $\bar{E}_{off}$  ที่ขึ้นกับสเปกตรัม และนอกจากนี้ยังมีอาจมีในแบบอื่นเช่นเดียวกับ  $\bar{E}$

ดังนั้นจะมีความตลาคเคลื่อนอยู่มาก การหาผลแปรผันใหม่ใช้เทรสไอโซค็อกเทค-  
เทอร์น ที่มีนิบมีใจกันอยู่มาก และใช้วิธีการคิดแปลงปรับปรุงวิธีการ ถึงขั้นค่าความหาผลแปร-  
ผันใหม่ โดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ช่วย

เทรสไอโซค็อกเทคเทอร์น ที่ใช้กันมาก มีรายละเอียดแสดงดังในตารางต่อไปนี้ [4]

Reaction	Half life	Effective Threshold energy	Experimental effective Cross-section
$Al^{27} (n,d)Na^{24}$	15.0 h	8.1 Mev	116 mb
$Mg^{24} (n,p)Na^{24}$	15.0 h	7.5 Mev	190 mb
$Al^{27} (n,p)Mg^{27}$	9.5 m	4.8 Mev	80 mb
$P^{31} (n,p)Si^{31}$	2.62 h	8.1 Mev	142 mb
$S^{32} (n,p)P^{32}$	14.3 d	2.9 Mev	300 mb
$U^{238} (n,f)F.P$	—	1.5 Mev	540 mb
$In^{115} (n,n')In^{115m}$	4.5 h	0.65 Mev	280 mb
$Hg^{207} (n,f)F.P$	—	0.75 Mev	1.5 b
$Pu^{239} (n,f)F.P$	—	1 Kev	1.8 b

จากตารางที่กล่าวมาข้างต้น ค่าที่ขีดจะหาได้จากกราฟวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยา  
ก่อกอสม และอาศัยกราฟเหล่านี้ จากตารางที่มีบันทึกไว้

มีวิธีการวัดได้โดยตรง ในทุกปฏิกิริยาที่วัดได้ เป็นความแรงของกัมมันต-  
ภาพรังสี ของไอโซค็อกเทคเทอร์น จำเป็นที่จะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $N$  ถึงที่กล่าวนี้  
ทำให้  $N$  เป็นจำนวนก่อกอสมกัมมันตรังสี ที่มีอยู่ ขณะใด ๆ ในไอโซค็อกเทคเทอร์น  
อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $N$  จะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{dN}{dt} = K - \lambda N \quad (8)$$

K หมายถึงอัตราการเกิดของผลิตภัณฑ์ที่มีชีวิต หรือสั้นทว่าคือ Reaction Rate นั้นเอง  $\lambda$  เป็นค่าคงที่ในการสลายตัว (Decay Constant) ถ้าเกิดสมดุลระหว่าง การเกิดและการสลาย หมายถึงว่า  $\frac{dN}{dt} = 0$  นั่นคือ  $K = \lambda N$  ในการวัดรังสีจากแผ่นธาตุที่แตกเคย โดยหลักการแล้วเป็นการวัด  $\lambda N$  แต่เนื่องจากเมื่อสมดุล  $\frac{dN}{dt} = 0, \lambda N = K$  จึงถือว่าเป็นการวัดอัตราการเกิดปฏิกริยากับ  $\lambda N$  หมายความว่า  $\frac{dN}{dt} = 0$  นี้ เรียกว่า กิจกรรมภาพที่อิ่มตัว (Saturation Activity) ส่วนกิจกรรมภาพ (Activity) ที่วัดได้ตรงจากแผ่นธาตุที่แตกเคยนั้นไม่ใช่กิจกรรมภาพที่อิ่มตัว ต้องนำไปคำนวณต่อ จึงจะได้กิจกรรมภาพที่อิ่มตัว

กิจกรรมภาพที่อิ่มตัว หมายถึง กิจกรรมภาพที่จะเกิดขึ้นจากไอที่มีปฏิกริยาระหว่างนิวตรอนกับแผ่นที่แตกเคย เป็นเวลานานมาก แต่ในการวัดนิวตรอนจริง ๆ มักไม่ใช่เวลาที่ให้เกิดปฏิกริยานี้จำนวนมากเกินไป เป็นการเสียเวลา นอกจากนั้น เมื่อนำที่แตกเคยออกจากนิวตรอน กิจกรรมภาพจะค่อย ๆ ลดลง เพราะการสลายตัว ต้องมีการคำนวณแก้ไขในเรื่องนี้ ทำให้  $A$  เป็นกิจกรรมภาพที่วัดได้จริง  $A_0$  เป็นกิจกรรมภาพที่อิ่มตัว

$$A_0 = \frac{A}{(1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2}} \tag{9}$$

$t_1$  เป็นช่วงเวลาที่เกิดปฏิกริยานิวตรอน (Irradiation time)

$t_2$  เป็นเวลาช่วงระหว่างนำออกจากนิวตรอน จนถึงอ่านค่ารังสี

ทองแดงแบบโคบอลต์เจนาว่า  $N$  คือจำนวนอนุภาคของกัมมันตรังสี

$\lambda N$  คือกิจกรรมภาพ หรือ  $A$  นั้นเอง

ตามสมการแล้วว่า

$$R = \frac{A}{\epsilon} \tag{10}$$

อัตราการเกิดปฏิกริยาของออกซิม =  $\frac{A}{\epsilon} \times \text{ครอส เซกชัน}$

แต่ในกรณีของแผ่นที่แตกเคยที่ใช่จริง ๆ มีหลายออกซิม ดังนั้นในการที่จะหาอัตราการเกิดออกซิม จะต้องทราบจำนวนออกซิมที่มีในแผ่นธาตุแล้วนำไปหารค่ากิจกรรมภาพที่อิ่มตัวทั้งหมด (Total saturation activity) เพื่อให้ได้กิจกรรมภาพที่อิ่มตัว

คือความ (Saturation activity per atom) หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อ  
อะตอม ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\text{จำนวนอะตอมต่อกรัมของธาตุใด ๆ} = \frac{N \rho}{A} \quad (11)$$

ในเมื่อ  $N$  คือ ค่าคงที่ของอาโวกาโดร (Avogadro Number)  $\rho$  คือความ  
หนาแน่น และ  $A$  คือ น้ำหนักอะตอม

$$\text{จำนวนอะตอมทั้งหมดของธาตุใด ๆ} = \frac{N}{A} \quad (12)$$

ในการใช้เครื่องวัดรังสี วัดหาความเข้มสนาม (Activity) ค่าที่วัดได้เป็น  
ค่าอัตราการนับ (count rate) ของเวลาประสิทธิภาพ (Efficiency)  
ของเครื่องวัดรังสีจึงจะหาความเข้มสนามได้

$$\text{Activity} = \frac{\text{count rate}}{\text{efficiency}} \quad (13)$$

นิวตรอนโดส (Neutron Dose) โดสที่ถูกดูดกลืน (Absorbed Dose)  
ในเนื้อวัตถุที่เข้าปฏิกิริยานิวตรอน หมายถึงพลังงานที่นิวตรอน กระทบให้แก่วัตถุที่ถูก  
ดูดกลืน จำนวน 1 rad หมายถึงการดูดกลืนพลังงานในแก๊สคือเป็นปริมาณ 100 เออร์ก  
ต่อกรัมของวัตถุ

สำหรับนิวตรอนเร็ว การคำนวณพลังงานแบบที่สําคัญในกรณีการชนระหว่างนิว-  
ตรอนกับไฮโดรเจนในวัตถุ ทั้งนี้ โดสจึงขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุที่เข้าปฏิกิริยานิวตรอน  
ว่ามีค่าแปรกของธาตุอะไรบ้าง

สำหรับวัตถุที่สําคัญ ๆ เช่น เบคอน หรือ กระดูก ไม่มีการทำเป็นตาราง  
แสดงไว้ [5] ว่า นิวตรอนพลังงานต่าง ๆ จะให้โดสแก่วัตถุนั้น ๆ มากน้อยเพียงไร  
ตารางเช่นนี้ไ้มาจากการคำนวณทางทฤษฎี มีประโยชน์ช่วยให้สามารถคำนวณ โดสได้  
จาก พลัง ของนิวตรอน

นิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบธรรมดา  
นิวตรอนบริเวณรอบ ๆ เครื่อง มีสเปกตรัมแตกต่างไปจากที่ชุมชนฝรั่งเศส [7]  
จัดทำการศึกษาทดลองหา สเปกตรัมรอบ ๆ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู และรายงานผลไว้เป็นข้อมูล  
ซึ่งมีประโยชน์ในการศึกษานิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นอันมาก



นวัตกรรมการคำนวณ เนื่องจากข้อจำกัดสำหรับนิวตรอนเร็ว มีความไม่แน่นอน สาเหตุมาจากสเปกตรัม วิทยาบทสั้น จึงมุ่งศึกษาเรื่องของสเปกตรัม โดยอาศัยข้อมูล และตารางค่า เลขที่สำคัญ ๆ ก็อาจไม่มีเป็นวัฏฏกันในการศึกษา

ก. สเปกตรัมของนิวตรอนเร็ว ๆ เครื่องปฏิกรณ์ แบบสระน้ำ [6,7]

ข. คณิตเพื่อเรนเจอร์ครอสเซกชัน (Differential Cross Section) ของธาตุต่าง ๆ [1,2,3,8]

ค. ข้อมูลและกราฟแสดงความสัมพันธ์ของคิฟเพื่อเรนเจอร์ครอส และพลังงาน (Differential Dose energy Curve and Data) [5]

ในขั้นแรก โดยอาศัยสเปกตรัมของนิวตรอน และ คิฟเพื่อเรนเจอร์ครอสเหล่านั้น ได้คำนวณค่า ครอสเซกชัน เฉลี่ย  $\bar{\sigma}$  โดยสมการต่อไปนี้คือ

$$\bar{\sigma} = \frac{\int \sigma(E) Q(E) dE}{\int \sigma(E) dE} \quad (14)$$

ถ้าจะหา จะมีความแตกต่างจากเดิมเชิงไรในค่า  $\bar{\sigma}$  เมื่อใช้สเปกตรัมของเครื่องปฏิกรณ์ เป็น  $\sigma(E)$  แทนที่จะใช้สเปกตรัมของนิวตรอนทั่วไป

ต่อไปอาศัยข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ของคิฟเพื่อเรนเจอร์ครอส และ พลังงานและนิวตรอนสเปกตรัม คำนวณค่า โครส เฉลี่ยจาก

$$\bar{D} = \frac{\int \sigma(E) D(E) dE}{\int \sigma(E) dE} \quad (15)$$

ผลจาก โครส เฉลี่ย นำไปคำนวณค่า  $\bar{D}/\bar{\sigma}$  ที่ระยะต่าง ๆ

ตารางที่ 1 ได้แสดงการนำตารางค่าคิฟของสเปกตรัมของนิวตรอนจาก 0.1 Mev ถึง 15 Mev มาทำกราฟที่กึ่งล็อก (semilog) ได้กราฟเส้นตรงแนว ยานค่า คิฟของสเปกตรัมจากกราฟ

ผลของกราฟ สเปกตรัมของนิวตรอนที่ระยะต่าง ๆ จาก 0 เซนติเมตรถึง 120 เซนติเมตร ที่พลังงานจาก 0.33 ถึง 10.9 Mev และคอยค่ากราฟตอนที่ เป็นเส้นตรง ของสเปกตรัมของนิวตรอน ที่ระยะเดียวกัน คอยค่าไปจนถึงพลังงาน 21 Mev ยานค่า  $N(E)$  จากกราฟได้ค่าตารางที่ 2 และตารางที่ 3



จากกราฟของสเปกตรัมของนิวตรอน ของธาตุต่าง ๆ มี

$S^{32}$  (n,p)  $P^{32}$ ,  $Al^{27}$  (n,d)  $Na^{24}$ ,  $P^{31}$  (n,p)  $Si^{31}$ ,  $In^{115}$  (n,n)  $In^{110m}$   
และ  $Np^{237}$  (n,f) F.P. ตามตารางที่ 4 กำนวณหาการสลายของธาตุนี้ เช่น  
ตามสมการ (14) โดยตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เป็นการร่างของไอโซ เช่นได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์  
ของครึ่งชีวิตเรซินเรซินและพลังงาน. มาตราเลขตามสมการ (15)

ตารางที่ 7 เป็นการร่างของ  $D/D'$  ที่ระดับต่าง ๆ

ขอยุ่รูปแสดงของเรซินเรซิน โดยที่การคำนวณนี้ อาศัยวิธีการอินทิเกรตโดยวิธี

ประมาณ (Approximate Integration) และมีความคลาดเคลื่อนใน

ขอบเขตเกี่ยวกับกราฟและสเปกตรัม ซึ่งเกิดจากการลากเส้นกราฟ และค่าที่จะ

โยกย้ายกราฟ (Extrapolation) จึงหากค่า ที่เลขที่ใดอาจจะไม่แม่นยำนัก

แต่ก็แสดงให้เห็นแนวโน้มเชิง (trend) ของผลลัพท์โดยบังเอิญ

ตารางที่ 8 แสดงความเปลี่ยนแปลงของ  $D'$  ตามระยะทางต่าง ๆ ระยะครึ่งของ  
ปฏิกรณ์  $\lambda$  ค่า  $D'$  นี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่าง

ตารางที่ 9 เป็นการร่าง  $D/D'$  ผลปรากฏว่า สำหรับธาตุอื่น ๆ เมื่อระยะ  
ห่าง จะยิ่งลดน้อยลง แต่สำหรับ  $Np^{237}$  ค่าอัตราส่วนนี้จะมี ประมาณเท่ากับ  $2.65 \times 10^{15}$   
ถ้าความหนาแน่นของสารเกิดการเกิดปฏิกิริยาของนิวตรอนของ  $Np^{237}$  เองแล้วจะใช้เวลาโดยเร็ว

(Dose rate) ในเนื้อคน เป็น rad ต่อวินาที ฉะนั้น  $Np^{237}$  อาจจะเป็นประโยชน์  
ในการใช้เป็นที่ทดสอบ สำหรับวัดโรค ตราบเท่าที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา อาจหา  
โรคได้ โดยใช้เวลาที่พอเหมาะไม่ ซึ่งในกรณีของโรคที่ทดสอบอื่น ๆ จะใช้ไม่ได้ เพราะ  
ความเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง หรือเปลี่ยนแปลงตามสเปกตรัมของนิวตรอน

ในการใช้งานจริง ๆ ส่วนมากเราไม่ทราบรายละเอียด เกี่ยวกับสเปกตรัมของ  
นิวตรอน และไม่ทราบการวัดโรคได้ จากการใช้เทอร์สโตลคิกเทคเตอร์ (Threshold-  
detector) ความยาวเทอร์สโตลคิกเทคเตอร์นั้น จะมีค่าตามปกติโดย  $Np^{237}$

ข้อเสียของ <sup>NP 237</sup> ก็เป็นธาตุที่หายากและมีราคาแพง เพื่อมีความพอเพียง  
 ในปัจจุบันเป็นสารประกอบเคมีหลายอยู่ในกรด ไม่สะดวกต่อการทำเป็นคีตกเภสัช  
 เป็นต้นว่าสังกะสี <sup>NP 237</sup> มีธาตุไฮดรอกไซด์ต่ำกว่าคีตกเภสัชอื่น ๆ อาจจะเป็น  
 ไขขาว ธาตุอื่นที่มีธาตุไฮดรอกไซด์ต่ำ จะมีคุณสมบัติคล้าย <sup>NP 237</sup> ในทางที่ว่า มีค่าคงที่  
 ในชั้นดิวสเปกตรัม ธาตุที่นำสนใจศึกษาต่อไปคือโรดิยม (Rhodium) ซึ่งมีธาตุไฮดรอกไซด์  
 เช่นกัน.



ตารางที่ 1

ตารางแสดงการกระจายของอนุภาคที่มีพลังงาน

E ( Mev )	N( E ) Mev <sup>-1</sup>
0.5	$3.45 \times 10^1$
1.5	$3.07 \times 10^1$
2.5	$1.84 \times 10^1$
3.5	$1.03 \times 10^1$
4.5	$5.38 \times 10^{-2}$
5.5	$2.73 \times 10^2$
6.5	$1.34 \times 10^2$
7.5	$6.44 \times 10^3$
8.5	$3.03 \times 10^3$
9.5	$1.42 \times 10^3$
10.5	$6.40 \times 10^4$
11.5	$2.90 \times 10^4$
12.5	$1.30 \times 10^4$
13.5	$5.80 \times 10^5$
14.5	$2.65 \times 10^5$
15.5	$1.25 \times 10^5$
16.5	$5.35 \times 10^6$
17.5	$2.40 \times 10^6$
18.5	$1.10 \times 10^6$
19.5	$4.90 \times 10^7$
20.5	$2.25 \times 10^7$

ตารางที่ 2

สเปกตรัมของนิวตรอน ณ หัก ระยะทาง ๗ ห่างจากศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

E (Mev)	neutron spectrum neutron / cm <sup>2</sup> /sec/MeV/watt			
	0 cm.	10 cm.	20 cm.	40 cm.
.5	1.20 10 <sup>6</sup>	1.36 10 <sup>5</sup>	2.00 10 <sup>4</sup>	6.40 10 <sup>2</sup>
1.5	6.60 10 <sup>5</sup>	7.70 10 <sup>4</sup>	1.20 10 <sup>4</sup>	4.35 10 <sup>2</sup>
2.5	4.42 10 <sup>5</sup>	5.80 10 <sup>4</sup>	9.50 10 <sup>3</sup>	3.55 10 <sup>2</sup>
3.5	2.85 10 <sup>5</sup>	4.20 10 <sup>4</sup>	7.10 10 <sup>3</sup>	2.95 10 <sup>2</sup>
4.5	1.65 10 <sup>5</sup>	2.75 10 <sup>4</sup>	4.90 10 <sup>3</sup>	2.35 10 <sup>2</sup>
5.5	8.80 10 <sup>4</sup>	1.58 10 <sup>4</sup>	3.05 10 <sup>3</sup>	1.82 10 <sup>2</sup>
6.5	4.10 10 <sup>4</sup>	6.20 10 <sup>3</sup>	1.65 10 <sup>3</sup>	1.32 10 <sup>2</sup>
7.5	1.80 10 <sup>4</sup>	2.30 10 <sup>3</sup>	7.00 10 <sup>2</sup>	9.10 10 <sup>1</sup>
8.5	8.20 10 <sup>3</sup>	1.03 10 <sup>3</sup>	3.40 10 <sup>2</sup>	5.70 10 <sup>1</sup>
9.5	3.80 10 <sup>3</sup>	5.80 10 <sup>2</sup>	1.68 10 <sup>2</sup>	3.00 10 <sup>1</sup>
10.5	1.90 10 <sup>3</sup>	3.75 10 <sup>2</sup>	9.65 10 <sup>1</sup>	1.20 10 <sup>1</sup>
11.5	1.00 10 <sup>3</sup>	2.00 10 <sup>2</sup>	4.70 10 <sup>1</sup>	3.90 10 <sup>0</sup>
12.5	4.90 10 <sup>2</sup>	8.70 10 <sup>1</sup>	1.85 10 <sup>1</sup>	1.45 10 <sup>0</sup>
13.5	2.35 10 <sup>2</sup>	3.60 10 <sup>1</sup>	7.30 10 <sup>0</sup>	5.30 10 <sup>-1</sup>
14.5	1.15 10 <sup>2</sup>	1.50 10 <sup>1</sup>	2.92 10 <sup>0</sup>	2.00 10 <sup>-1</sup>
15.5	5.60 10 <sup>1</sup>	6.50 10 <sup>0</sup>	1.20 10 <sup>0</sup>	7.80 10 <sup>-2</sup>
16.5	2.75 10 <sup>1</sup>	2.80 10 <sup>0</sup>	4.90 10 <sup>-1</sup>	2.90 10 <sup>-2</sup>
17.5	1.30 10 <sup>1</sup>	1.22 10 <sup>0</sup>	2.05 10 <sup>-1</sup>	1.15 10 <sup>-2</sup>
18.5	6.20 10 <sup>0</sup>	5.30 10 <sup>-1</sup>	8.80 10 <sup>-2</sup>	4.30 10 <sup>-3</sup>
19.5	3.00 10 <sup>0</sup>	2.25 10 <sup>-1</sup>	3.80 10 <sup>-2</sup>	1.70 10 <sup>-3</sup>
20.5	1.45 10 <sup>0</sup>	9.60 10 <sup>-2</sup>	1.65 10 <sup>-2</sup>	6.40 10 <sup>-4</sup>

ตารางที่ 3

สเปกตรัมของนิวตรอนที่ระยะต่าง ๆ จากศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

E (Mev)	neutron spectrum		neutron/cm <sup>2</sup> /sec/Mev/watt	
	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm
0.5	$3.60 \times 10^1$	$2.70 \times 10^0$	$2.80 \times 10^{-1}$	$2.90 \times 10^{-2}$
1.5	$2.48 \times 10^1$	$1.85 \times 10^0$	$1.85 \times 10^{-1}$	$2.20 \times 10^{-2}$
2.5	$2.00 \times 10^1$	$1.58 \times 10^0$	$1.55 \times 10^{-1}$	$1.50 \times 10^{-2}$
3.5	$1.76 \times 10^1$	$1.43 \times 10^0$	$1.38 \times 10^{-1}$	$1.35 \times 10^{-2}$
4.5	$1.55 \times 10^1$	$1.33 \times 10^0$	$1.28 \times 10^{-1}$	$1.28 \times 10^{-2}$
5.5	$1.35 \times 10^1$	$1.22 \times 10^0$	$1.18 \times 10^{-1}$	$1.20 \times 10^{-2}$
6.5	$1.16 \times 10^1$	$1.08 \times 10^0$	$1.07 \times 10^{-1}$	$1.10 \times 10^{-2}$
7.5	$8.70 \times 10^0$	$8.40 \times 10^{-1}$	$8.65 \times 10^{-2}$	$9.00 \times 10^{-3}$
8.5	$6.40 \times 10^0$	$6.00 \times 10^{-1}$	$6.45 \times 10^{-2}$	$7.00 \times 10^{-3}$
9.5	$4.10 \times 10^0$	$3.45 \times 10^{-1}$	$4.25 \times 10^{-2}$	$5.00 \times 10^{-3}$
10.5	$2.00 \times 10^0$	$1.55 \times 10^{-1}$	$2.15 \times 10^{-2}$	$2.55 \times 10^{-3}$
11.5	$4.60 \times 10^{-1}$	$4.70 \times 10^{-2}$	-	-
12.5	$2.55 \times 10^{-1}$	$1.65 \times 10^{-2}$	-	-
13.5	$1.40 \times 10^{-1}$	$5.50 \times 10^{-3}$	-	-
14.5	$7.60 \times 10^{-2}$	$1.78 \times 10^{-3}$	-	-
15.5	$4.2 \times 10^{-2}$	$6.20 \times 10^{-4}$	-	-
16.5	$2.29 \times 10^{-2}$	$2.20 \times 10^{-4}$	-	-
17.5	$1.25 \times 10^{-2}$	$7.30 \times 10^{-5}$	-	-
18.5	$7.00 \times 10^{-3}$	$2.45 \times 10^{-5}$	-	-
19.5	$3.85 \times 10^{-3}$	$8.50 \times 10^{-6}$	-	-
20.5	$2.15 \times 10^{-3}$	$2.90 \times 10^{-6}$	-	-

ตารางที่ 4

การวัดการชนกันของนิวตรอนกับ S, Al, P, In & Np

Energy	Neutron Cross Section $\sigma(E)$ mb				
	$S^{32}(n,p)P^{32}$	$Al^{27}(n,d)Na^{24}$	$^{31}P^{31}(n,p)Si^{31}$	$^{115}In(n,n)^{115}In$	$^{237}Np(n,f)Fp$
0.5	-	-	-	10	400
1.5	-	-	-	170	1510
2.5	75	-	54	360	1500
3.5	185	-	90	310	1480
4.5	300	-	126	275	1400
5.5	290	-	132	215	1430
6.5	330	8	132	167	1670
7.5	343	28	132	130	2070
8.5	350	59	132	88	2300
9.5	375	81	132	55	2400
10.5	395	98	132	25	2400
11.5	385	116	132	10	2400
12.5	325	130	132	-	2450
13.5	275	130	132	-	2500
14.5	220	120	132	-	2550
15.5	180	104	132	-	2650
16.5	147	88	132	-	2700
17.5	120	74	132	-	2750
18.5	100	58	132	-	2800
19.5	85	45	132	-	2850
20.5	72	34	132	-	2850

ตารางที่ 5  
 ค่าเฉลี่ยของนิวตรอนของ S, Al, P, In & Np...

neutron spectrum	$\bar{\sigma}$ mb				
	$^{32}\text{S} (n,p)\text{P}$	$^{27}\text{Al} (n,d)\text{Na}$	$^{31}\text{P} (n,p)\text{Si}$	$^{115}\text{In} (n,n)\text{In}$	$^{237}\text{Np} (n,f)\text{FP}$
Fission spectrum	65.50	.547	33.00	170.00	1142
ระยะ 0 ท.น.	64.00	.703	31.50	153.00	1052
ระยะ 10 ท.น.	78.00	.820	37.80	167.00	1090
ระยะ 20 ท.น.	90.03	1.430	43.80	172.00	1137
ระยะ 40 ท.น.	126.60	4.580	57.80	179.00	1265
ระยะ 60 ท.น.	154.50	8.500	73.50	175.80	1390
ระยะ 80 ท.น.	167.00	9.030	83.20	178.50	1380
ระยะ 100 ท.น.	166.80	9.540	71.50	174.00	1375
ระยะ 120 ท.น.	165.50	10.120	70.03	171.00	1392

ตารางที่ 6  
 ค่าเฉลี่ยของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

ระยะทาง ท.น.	Dose เฉลี่ย rad/neut./cm <sup>2</sup> $\times 10^9$
Fission spectrum	2.76
0	2.67
10	2.79
20	2.90
40	3.22
60	3.42
80	3.52
100	3.52
120	3.50



ตารางที่ 7

ค่า  $\bar{D}/\bar{\sigma}$  ที่ระยะทาง ๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

สำหรับ S, Al, P, In และ Np

ระยะทาง T. H.	$\bar{D}/\bar{\sigma}$ rad/sec $\times 10^{16}$				
	<sup>32</sup> S(n,p) <sup>32</sup> P	<sup>27</sup> Al(n,d) <sup>24</sup> Na	<sup>31</sup> P(n,p) <sup>31</sup> Si	<sup>115</sup> In(n,n) <sup>115m</sup> In	<sup>237</sup> Np(n,f)FP
Fission spectrum	4.22	505	8.37	1.62	.241
0	4.17	380	8.48	1.75	.253
10	3.58	340	7.40	1.67	.256
20	3.22	203	6.61	1.69	.255
40	2.54	70.3	5.56	1.80	.254
60	2.21	40.3	4.65	1.94	.246
80	2.10	39.0	4.23	1.97	.255
100	2.11	36.9	5.03	2.01	.255
120	2.11	34.5	5.00	2.02	.255