

559.7373

วค ๓ ๗

๙๓

การออกแบบและการสร้างถังน้ำสำหรับเก็บกักน้ำฝนเพื่อใช้งาน

ปริญญานิพนธ์

ของ

พงษ์วุฒิ กวงศรี



เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

กุมภาพันธ์ 2530

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

164691

16 พย 2530

การออกแบบและการสร้างถังน้ำสำหรับเก็บน้ำก้นบ่อเพื่อใช้ในงาน

๒๓๓๖

ของ

พงษ์วุฒิ กวงศรี

เสนอคอมพิวเตอร์วิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

กุมภาพันธ์ ๒๕๓๐

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการสร้างถังน้ำสำหรับเก็บกักกำเนิดนิวตรอนไว้ใช้งาน

ซึ่งประกอบด้วย ถังน้ำทำด้วยเหล็กหนา 0.6 cm ลักษณะเป็นทรงกระบอก
เส้นผ่าศูนย์กลาง 112 cm สูง 123 cm และมีท่อต่าง ๆ สำหรับใส่กักกำเนิดนิวตรอน
และสารตัวอย่าง โดยมีกักกำเนิดนิวตรอนแบบ อเมอริเซียม - เบอริลเลียม ขนาด 5 Cu

นอกเหนือจากการสร้างถังน้ำสำหรับเก็บกักกำเนิดนิวตรอน ยังทำการทดลอง
วิเคราะห์สารด้วยวิธีนิวตรอนแอคทีเวชัน (NAA.) และวัดฟลักซ์นิวตรอนด้วยวิธี
แอคทีเวชัน โดยใช้แผ่นอินเดียมและแผ่นอลูมิเนียม วัดฟลักซ์เทอร์มัลนิวตรอนในถังน้ำ
ที่ระยะห่างจากกักกำเนิดนิวตรอน 3.2 cm ในท่อขวามือได้ $(3.23 \pm 0.12) \times 10^4$
 $n/cm^2 - sec$ ในท่อซ้ายมือได้ $(2.79 \pm 0.24) \times 10^4 n/cm^2 - sec$ และ
วัดฟลักซ์นิวตรอนเร็วในท่อสำหรับใส่กักกำเนิดนิวตรอนที่ระยะห่างจากกักกำเนิดนิวตรอน
1.5 cm ได้ $(3.04 \pm 0.25) \times 10^5 n/cm^2 - sec$ ในกรณีของการวิเคราะห์
สารเป็นการวิเคราะห์มังกานีสในสารตัวอย่าง มังกานีสซัลเฟต ปรากฏว่า ได้ส่วนผสม
มังกานีสในสารตัวอย่าง $33.42 \pm 1.35\%$ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริงมีความแตกต่างอยู่
2.75%

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A WATER TANK FOR A STORAGE
FACILITY OF NEUTRON SOURCE

AN ABSTRACT

BY

PHONGWOOT DUONGSRI

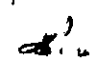
Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Education degree
at Srinakharinwirot University

February 1987

This thesis is primarily concerned with the construction of a neutron - source - storing water tank to be use for various purposes. The tank was made of iron, 0.6 cm thick, cylindrical in shape with a 112 cm diameter, 123 cm height and contained pipes for a 5 Ci americium - beryllium neutron source and sample irradiation.

Neutron flux determinations by activation were conducted by employing indium and aluminum foils. Thermal neutron flux in the tank at 3.2 cm from the neutron source in the right and left pipes were measured to be $(3.23 \pm 0.12) \times 10^{14}$ and $(2.79 \pm 0.24) \times 10^{14}$ n/cm² - sec, respectively. The fast neutron flux in the neutron source pipe at 1.5 cm from the neutron source was found to be $(3.04 \pm 0.25) \times 10^5$ n/cm² - sec. Determination of the manganese content in the manganese sulphate sample has been done and the result was $33.42 \pm 1.35\%$ which was good with in 2.75% error when compared with the actual value.

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำคณิศรและคณะกรรมการสอบ ได้พิจารณาปัญหานี้
ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาการศึกษาามหาบัณฑิต
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

คณะกรรมการที่ปรึกษา	คณะกรรมการสอบ
.....  Smols ประธาน	  Smols ประธาน
..... ศุภ/ 11702/53 กรรมการ	 ศุภ/ 11702/53 กรรมการ
	  กรรมการ

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยการได้รับความกรุณา ช่วยเหลือถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ และตรวจแก้ไขจาก รองศาสตราจารย์อรุณีย์ อินทศร ประธานกรรมการที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรีย์ แสงวงโสภา กรรมการที่ปรึกษา ทั้งยังได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์โช สาสัติน ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือในโรงงาน นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้รับความกรุณาจาก คุณสุรพงษ์ พิมพ์จันทร์ ที่ช่วยให้คำแนะนำ อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และห้องสมุดของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณอย่างสูงในความเมตตากรุณาของท่านที่กล่าวข้างต้นไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ คุณวาสนา อธิรัตนปัญญา คุณเกรียงไกร นิตยสุทธิ และเจ้าหน้าที่คนงานของโรงงาน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้คำแนะนำต่าง ๆ

พงษ์วุฒิ กวงศรี

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า	4
ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า	5
ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า	5
คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ	6
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2 ทฤษฎี -	13
ต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron Source)	13
ปฏิกิริยาที่เกิดจากอนุภาคนิวตรอน (Neutron Reaction)	16
นิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation)	22
หลักการวิเคราะห์ โดยวิธีนิวตรอน แอกติเวชัน (Neutron Activation Analysis)	27
การตรวจวัดนิวตรอน (Detection of Neutron)	28
3 ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย	30
การออกแบบและสร้างเตาสำหรับเก็บต้นกำเนิดนิวตรอน	30
การวัดรังสีแกมมา	34
การหาประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีแกมมา	39
การวัดสีกัมมันตภาพนิวตรอน	41
การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธี NAA.	43

บทที่	หน้า
4 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง	46
การคำนวณหาประสิทธิภาพของ เครื่องวัดรังสีแกมมา	46
การคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอน	50
ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธี NAA.	60
5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	63
สรุป	63
อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม	68

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	แสดงการแบ่งชนิดนิวตรอนตามช่วงพลังงานต่าง ๆ	2
2	แสดงค่า Q.F. ของรังสีชนิดต่าง ๆ	9
3	แหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐาน ผลิตเมื่อเดือนสิงหาคม ค.ศ. 1975	39
4	ความเข้มของรังสีชะงักการวัด	46
5	อัตราการสลายรังสีที่เครื่องวัดรังสีสามารถวัดได้ โดยห่างจากหัววัด 6.5 cm	47
6	ประสิทธิภาพของเครื่องวัดที่ระดับพลังงานต่าง ๆ	48
7	ประสิทธิภาพของเครื่องวัดที่ระดับพลังงานต่าง ๆ โดยห่างจากหัววัด 1.5 cm	49
8	ฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอนวัดจากท่อ A ซึ่งห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 3.2 cm	54
9	ฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอนวัดจากท่อ B ซึ่งห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 3.2 cm	55
10	ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ระยะห่างจากจุดกำเนิดนิวตรอน 1.5 cm	57
11	Activation Cross - section	59
12	มวลของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่บรรจุในภาชนะ	60
13	ข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดสารตัวอย่าง และสารมาตรฐาน	61
14	เปอร์เซ็นต์ของมังกานีสในสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้	62

บัญชีภาพประกอบ

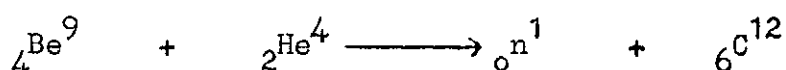
ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงการชนที่เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่นระหว่างนิวตรอนและนิวเคลียส ใน 2 ระบบอ้างอิง	17
2 แสดงแผนภาพของเวกเตอร์สำหรับความเร็วของนิวตรอนหลังการชนใน ระบบ -L และระบบ -C	19
3 ถังน้ำสำหรับเก็บตกกานิคนิวตรอน	32
4 ชุดภาชนะใส่สารตัวอย่าง ใช้สำหรับกรณีอานคัยเทอร์มัลนิวตรอน	33
5 ชุดภาชนะใส่สารตัวอย่าง ใช้สำหรับกรณีอานคัยนิวตรอนเร็ว	33
6 แสดงโคอะแกรมของเครื่องวัดรังสีแกมมา	35
7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน และเลขที่ช่อง	37
8 ตัวอย่างสเปกตรัมของรังสีแกมมา	38
9 กราฟแสดงระดับพลังงานต่าง ๆ ของตกกานิคนิวตรอนแบบอเมอริเนียม - เบอริลเลียม	42
10 หดอคใส่สารตัวอย่าง และสารมาตรฐาน	44
11 ประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีที่ระดับพลังงานต่าง ๆ เมื่อวัดที่ระยะห่าง จากหัววัด 6.5 cm	51
12 ประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีที่ระดับพลังงานต่าง ๆ เมื่อวัดที่ระยะห่าง จากหัววัด 1.5 cm	52
13 ภาคคักขวางของอลูมิเนียม ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ	58
14 ภาพถายถึงน้ำสำหรับเก็บตกกานิคนิวตรอน	64

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

โบเช (Bothe) และ เบคเกอร์ (Becker) สามารถผลิตนิวตรอนได้เป็นครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1930 โดยการใช้อนุภาค อัลฟา จากธาตุโปโลเนียม (Polonium) ยิงไปยัง เบอริลเลียม (Beryllium) ปฏิกริยาเกิดขึ้นดังสมการ



ครั้งแรกคิดว่ารังสีที่ได้มาเป็นรังสีแกมมา ต่อมาในปี ค.ศ. 1932 แชดวิก (Chadwick) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ได้แสดงให้เห็นว่ารังสีนี้แท้จริงคือ อนุภาคที่ไม่มีประจุ มีมวลขนาดเกือบ กับมวลของโปรตอน คือมีมวลประมาณ 1.008 amu. จึงเรียกอนุภาคที่ค้นพบใหม่นี้ว่า "อนุภาคนิวตรอน" เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคหนัก ไม่มีประจุ จึงไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก หรือ สนามไฟฟ้า และนิวตรอนก็ไม่ทำให้เกิดไอออน (Ionization) ปฏิกริยาต่าง ๆ กับสสาร จึงแตกต่างจากพวกอนุภาคที่มีประจุ ปฏิกริยาของนิวตรอนกับสสารส่วนมากมักเป็นการถูกกลืน (Absorption) หรือการกระเจิง (Scattering) ซึ่งปฏิกริยาการกระเจิง อาจเกิดได้ทั้งแบบยืดหยุ่น และไม่ยืดหยุ่น (Elastic and inelastic scattering) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการพิเศษโดยเฉพาะ สำหรับการศึกษาลักษณะของนิวตรอน ได้มีการจำแนกชนิดของนิวตรอนโดยแบ่งตามพลังงานของนิวตรอนในช่วงต่าง ๆ ดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงการแบ่งชนิดนิวตรอนตามช่วงพลังงานต่าง ๆ

ชนิดนิวตรอน	พลังงานของนิวตรอน
1. นิวตรอนช้า (Slow neutron)	0 - 1000 eV
1.1 นิวตรอนเย็น (Cold neutron)	< 0.002 eV
1.2 เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron)	$\approx$ 0.025 eV
1.3 เรสโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron)	1 - 1000 eV
2. นิวตรอนพลังงานปานกลาง (Intermediate energy neutron)	$\approx$ 1 - 500 keV
3. นิวตรอนเร็ว (Fast neutron)	$\approx$ 0.5 - 10 MeV
4. นิวตรอนพลังงานสูง (High energy neutron)	> 10 MeV

วิธีการที่ใช้ในการผลิตนิวตรอน มีหลายลักษณะ หลายวิธี ขึ้นอยู่กับจุดมุ่งหมายของงาน ว่าต้องการใช้นิวตรอนชนิดใด รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

นิวตรอนที่เกิดจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งเป็นต้นกำเนิดขนาดใหญ่จะสามารถให้ปริมาณนิวตรอนเป็นจำนวนมากและยาวนาน นอกจากนั้นยังให้พลังงานของนิวตรอนหลายช่วงหลายระดับ ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่นงานที่ได้ทำในประเทศไทยของ บรรจบ สุกประเสริฐ¹ โดยอาศัยเทอร์มัลนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูของ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (พปส.) วิเคราะห์ดินและ

¹บรรจบ สุกประเสริฐ การวิเคราะห์ดินและแร่ ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน

แร่ธาตุ ด้วยวิธีนิวตรอนแอคทีเวชัน สนั่น วีระพงษ์¹ ได้วิเคราะห์หาไทเทเนียม (Titanium) และเหล็กในดิน โดยใช้นิวตรอนเร็วจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เนาวรัตน์ เสรีเจริญสถิตย์² สามารถใช้ประโยชน์จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมาวิเคราะห์หาสารหนูในข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ในประเทศไทย สำหรับนิวตรอนที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาค ยังสามารถให้นิวตรอนพลังงานสูงถึงระดับ BeV³ ($1 \text{ BeV} = 10^3 \text{ MeV}$) ซึ่งเหมาะสำหรับใช้งานในกิจกรรมค้นคว้าวิจัยในระดับสูง นิวตรอนที่เกิดจากกัมมันตภาพรังสีขนาดเล็ก โดยเฉพาะจากปฏิกิริยา $\text{Be}^9 (\alpha, n) \text{C}^{12}$ เป็นที่นิยมและแพร่หลาย เนื่องจากประหยัดค่าใช้จ่าย สะดวกสบายในการใช้และง่ายต่อการรักษา ดังเช่น จิตปราณี เกียรติกุล⁴ ได้ศึกษาถึงความเหมาะสมของการอาบนิวตรอนจากกัมมันตภาพรังสีนิวตรอน พลูโตเนียม - เบอริลเลียม (Pu - Be) ขนาด 5 Ci เพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้งานต่อไป ที. โกโธ และคนอื่น ๆ⁵ แห่งมหาวิทยาลัยโกเบ โอซากา ประเทศญี่ปุ่น สามารถวิเคราะห์หาปริมาณอะลูมิเนียม (Aluminum) ฟอสฟอรัส (Phosphorus) ซัลเฟอร์ (Sulfur)

¹ สนั่น วีระพงษ์ การใช้นิวตรอนที่วิ่งเร็วจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูในการวิเคราะห์ไทเทเนียม และเหล็ก แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน 2515, หน้า 44

² เนาวรัตน์ เสรีเจริญสถิตย์ การวิเคราะห์สารหนูในข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ในประเทศไทย โดยใช้วิธีนิวตรอนแอคทีเวชัน 2520, หน้า 26

³ A. E. S. Green., Nuclear Physics, The McGraw - Hill Book Company, TOKYO, JAPAN, 1955, p. 87 - 88

⁴ จิตปราณี เกียรติกุล การศึกษาความเหมาะสมของการอาบรังสีด้วยกัมมันตภาพรังสีนิวตรอน พลูโตเนียม - เบอริลเลียม 2520, หน้า 1

⁵ T. Gotoh., N. Wakabayashi., Y. Kondo., Journal of Radioanalytical Chemistry, Vol. 42, 1978, p. 417 - 426

ใน ซิลิคอน (Silicon) และแมกนีเซียม (Magnesium) ใน โซเดียมไดออกไซด์ (NaO_2) โดยอาศัยนิวตรอนจากต้นกำเนิด พลูโตเนียม - เบอริลเลียม ขนาด 1 Ci ไอ. เซเลนค และคนอื่น ๆ¹ แห่งศูนย์ฝึกหัดและวิจัยนิวเคลียร์ แองการา ประเทศตุรกี สามารถใช้นิวตรอนจากต้นกำเนิด พลูโตเนียม - เบอริลเลียม ขนาด 5Ci มาวิเคราะห์หาอุณหภูมิ และซัลเฟอร์ ในสารตัวอย่างทางธรณีวิทยา (Geological sample) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาประยุกต์ไปใช้งานทางด้านอื่น ๆ อีก จากมูลเหตุดังกล่าวข้างต้น จึงเห็นว่า ควรนำต้นกำเนิดนิวตรอนขนาดเล็กซึ่งมีอยู่แล้ว ณ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร มาใช้ให้เป็นประโยชน์ โดยการสร้างอุปกรณ์ซึ่งเป็น ถังน้ำสำหรับเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนไว้ใช้งานต่อไป

ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า

1. เพื่อสร้างถังน้ำเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนสำหรับใช้งานทางด้านการผลิต ไอโซโทป (Isotope) และงานวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน (Neutron Activation Analysis, NAA)
2. เพื่อหาฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว (Fast neutron) ณ ตำแหน่งของ ท่อที่เก็บต้นกำเนิดนิวตรอน
3. เพื่อหาฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในถังเก็บต้นกำเนิดนิวตรอน
4. ทดลอง วิเคราะห์สารด้วยวิธี NAA. จากต้นกำเนิดนิวตรอน

¹I. Celenk., F. Ozek., J. Radioanal. Nucl. Chem. Letters. 85(2), 1984, p. 83 - 90

ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า

1. ใช้เป็นอุปกรณ์และแหล่งข้อมูลให้เด็กและผู้สนใจได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับนิวตรอน
2. ทำให้ทราบถึงปริมาณพลักซ์ของนิวตรอนเร็ว และพลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในถังเก็บกากกัมมันตรังสี
3. การศึกษาค้นคว้าจะนำไปใช้เป็นประโยชน์ในหัวข้อต่อไปนี้
 - 3.1 การศึกษาในเรื่อง นิวตรอนแอคติเวชัน
 - 3.2 การศึกษาและการผลิตไอโซโทป (Isotope) โดยเฉพาะไอโซโทปที่มีครึ่งชีวิต (Half life) สั้น ๆ ในช่วงเวลาที่ซึ่งจะใช้อำนวยความสะดวกในการวัดครึ่งชีวิต
 - 3.3 เทคนิคและวิธีการต่าง ๆ ที่ได้รับจากการศึกษา ซึ่งอาจนำไปใช้ในการศึกษาและวิจัย ในระดับอุดมศึกษาสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับนิวเคลียร์ได้

ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า

1. การศึกษาค้นคว้า มุ่งที่จะออกแบบและสร้างถังเก็บกากกัมมันตรังสี พร้อมทั้งหาพลักซ์ของนิวตรอน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในถัง
2. วัสดุที่ใช้กั้นนิวตรอน และลดความเร็วของนิวตรอนคือ น้ำขรรพกา
3. กากกัมมันตรังสีที่ใช้คือ อเมอริเซียม - เบอริลเลียม (Am - Be)
4. ทดลองความสามารถในการใช้งานของถังเก็บกากกัมมันตรังสีที่สร้างขึ้น ด้วยการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของนิวตรอนแอคติเวชัน

คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ

1. การออกแบบ หมายถึง การศึกษาค้นคว้าเพื่อกำหนดลักษณะและส่วนประกอบของถังเก็บต้นกำเนิดนิวตรอน
2. การสร้าง หมายถึง การนำเอาผลที่ได้จากการออกแบบมาประกอบกันเป็นชุดอุปกรณ์ แล้วสามารถนำมาใช้งานตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ได้
3. ไอโซโทป (Isotope) หมายถึง นิวเคลียสของธาตุที่มีเลขอะตอมเท่ากันหรือจำนวนโปรตอนเท่ากันแต่นิวตรอนไม่เท่ากัน
4. ครึ่งชีวิต (Half - life) หมายถึง ระยะเวลาซึ่งธาตุกัมมันตรังสีสลายตัวให้รังสีหรืออนุภาคออกมาจนเหลือปริมาณรังสีเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม หรือเหลือจำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนเดิม
5. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) หมายถึง การชนที่มีพลังงานจลน์ทั้งหมดก่อนและหลังการชนยังคงเท่าเดิม และนิวเคลียสที่เหลือจะต้องอยู่ภายใต้ภาวะปกติ
6. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) เป็นการชนแบบสูญเสียพลังงาน โดยพลังงานจลน์ทั้งหมดก่อนและหลังการชนไม่เท่ากัน และนิวเคลียสที่ถูกชนมักอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (Excited state)
7. ภาคตัดขวาง (Cross section)¹ หมายถึง โอกาสที่น่าจะเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาค เมื่อตกกระทบบนนิวเคลียสของเป้า ภาคตัดขวางมี 2 ชนิด คือ

7.1 ภาคตัดขวางจุลภาค (Microscopic cross section, σ) หมายถึง พื้นที่หรือบริเวณของนิวเคลียส ๆ หนึ่ง เมื่ออนุภาควิ่งไปชนแล้วเกิดปฏิกิริยา

¹S. Glasstone and A. Sesonske., Nuclear Reactor Engineering,
D. Van Nostrand Co., New York, 1967, p. 67 - 68

7.2 ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section, Σ)

ถ้าวัตถุที่ใช้เป็นเป้า มีจำนวนนิวเคลียส N นิวเคลียส ใน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผลคูณของ N กับ σ เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาค มีหน่วยเป็น cm^{-1}

$$\Sigma = N\sigma$$

8. วัสดุสำหรับลดความเร็ว (Moderator) หมายถึง วัสดุที่ทำให้นิวตรอนช้าลงโดยการนำเอาวัสดุเหล่านั้นมาวางทางเดินของนิวตรอน หรือวางคั่นกานิวตรอน ในวัสดุที่ใช้เป็นตัวลดความเร็ว เมื่อนิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียสของวัสดุลดความเร็วนิวตรอนจะไม่ถูกดูดกลืน แต่จะทำให้มันสูญเสียพลังงานและกระเจิง (Scatter) เท่านั้น วัสดุลดความเร็วที่ดี ได้แก่ วัสดุที่ทำให้นิวตรอนวิ่งช้าลงอย่างรวดเร็วโดยการชนเพียงไม่กี่ครั้ง เช่น พาราฟิน น้ำ น้ำหนักหนัก (Heavy water) และกราไฟท์ เป็นต้น

9. ฟลักซ์นิวตรอน (Neutron flux) หมายถึง จำนวนนิวตรอนเคลื่อนที่ตกถึงฉากกับพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ในเวลา 1 วินาที

10. สารตัวอย่าง หมายถึง สารที่ต้องการวิเคราะห์ธาตุที่ปะปนอยู่ในสารนั้น

11. สารมาตรฐาน หมายถึง สารที่เราทราบปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสารตัวอย่าง

12. การวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน (Neutron Activation Analysis, NAA) เป็นวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจากสารตัวอย่าง โดยการนำสารตัวอย่างอาบรังสีนิวตรอนให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียส กลายเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี แล้วนำมาวัดกัมมันตภาพรังสี ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุได้

13. การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ เป็นการวิเคราะห์หาชนิดของธาตุ รวมถึงการศึกษารังสีแกมมา และครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุในสารตัวอย่าง

14. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ เป็นการศึกษาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง

15. นิวตรอนโดส (Neutron dose) หมายถึง ปริมาณพลังงานของนิวตรอนที่คายให้แก่เนื้อวัตถุ

16. นิวตรอนโดสเรต (Neutron dose rate) หมายถึง ปริมาณพลังงานของนิวตรอนที่คายให้แก่เนื้อวัตถุ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

17. คูรี (Curie, Ci) ไอโซโทปกัมมันตรังสีใด มีการสลายตัวในอัตรา 3.7×10^{10} นิวเคลียส (หรือครั้ง) ต่อวินาที เราเรียกไอโซโทปกัมมันตรังสีนั้นว่า มีความแรงรังสี 1 คูรี

∴ ความแรงรังสี 1 Ci 3.7×10^{10} ครั้งต่อวินาที หรือ dps
คำว่า dps ย่อมาจาก disintegration per second

18. แกรก (Rad = radiation absorbed dose)¹ วัตถุใดที่ได้รับรังสีแล้วถูกกลืนพลังงานจากรังสีได้เท่ากับ 100 เออร์ก ต่อกรัมของวัตถุจะได้รับรังสีปริมาณ 1 แกรก โดยที่ 1 จูล (Joule) 10^7 เออร์ก (ergs) = 6.25×10^{18} eV

19. เรม (Rem = Roentgen equivalent man)¹ เป็นหน่วยที่ใช้ส่วนใหญ่ในงานการป้องกันรังสี การที่ต้องมีหน่วยนี้ขึ้นมาก็ด้วยเหตุผลที่ว่า ถึงแม้จะถ่ายเทพลังงานให้แก่เนื้อเยื่อของร่างกายจำนวนเท่ากันก็ตาม แต่ผลเสียหายทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของรังสีด้วย จึงสมการ

$$DE = D \times Q.F.$$

โดย DE = dose equivalent มีหน่วยเป็นเรม

D = absorbed dose มีหน่วยเป็นแรด

Q.F. = Quality factor ค่าแสดงคุณภาพของรังสีแต่ละชนิดตาม
ตาราง 2

¹G.F. Knoll., Radiation Detection and Measurement,
John Wiley & Sons, U.S.A., 1979, p. 76 - 77

ตาราง 2 แสดงค่า Q.F. ของรังสีชนิดต่าง ๆ

ชนิดของรังสี	Q.F.
β ที่มีพลังงานมากกว่า 0.03 MeV	1.0
γ และ X - Ray	1.0
β ที่มีพลังงานน้อยกว่า 0.03 MeV	1.7
α , n และ p	10.0

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เฟอร์มี (Fermi)¹ ได้เสนอแนะว่าสามารถควบคุมปฏิกิริยาแตกตัวแบบลูกโซ่ได้โดยใช้วัสดุ ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้นิวตรอนจากปฏิกิริยาแตกตัวมีความเร็วช้าลง ในค.ศ. 1943 เฟอร์มี และเพื่อนร่วมงานได้ประดิษฐ์เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเครื่องแรกสำเร็จ เครื่องปฏิกรณ์น้ำโซเดียม - 235 เป็นเชื้อเพลิง และใช้แกรไฟต์ (คาร์บอน) บริสุทธิ์เป็นวัสดุลดความเร็วช่วยควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา จากการที่สามารถควบคุมปริมาณนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาลูกโซ่ ทำให้สามารถนำพลังงานในการแตกตัวไปใช้เป็นประโยชน์ในทางสันติได้อย่างมากมาย เช่น การสร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อผลิตไฟฟ้า หรือใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับเรือดำน้ำ เรือเคินสมุทรขนาดใหญ่ เป็นต้น

¹R. Wehr., Physics of the Atom, Addison - Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1980, p. 419 - 422

สำหรับประเทศไทยมีความสนใจในการนำพลังงานนิวเคลียร์ เพื่อใช้ในทางสันติ ได้มีการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (พ.ส.) และสามารถเดินเครื่องครั้งแรกเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ. 2505¹ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ตั้งอยู่ในเขื่อนน้ำเขื่อนยาว 12.5 cm กว้าง 6.5 cm ลึก 8.5 cm บรรจุน้ำได้ 245 ตัน และปัจจุบันนี้ใช้เชื้อเพลิงแบบ ทริกา (TRIGA fuel element) มีส่วนผสมยูเรเนียม - 235 ความเข้มข้น 20% ให้กำลังสม่ำเสมอสูงสุด 2,000 กิโลวัตต์ (ความร้อน) ใช้น้ำบริสุทธิ์ เป็นทั้งตัวลดความเร็วนิวตรอนและสื่อระบายความร้อน ประโยชน์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์นี้ สามารถนำมาใช้ประยุกต์ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม การแพทย์ การผลิตสารไอโซโทปรังสี การวิเคราะห์งานเกี่ยวกับนิวเคลียร์ฟิสิกส์ รวมถึงใช้เป็นเครื่องมือในการฝึกหัดอบรมเจ้าหน้าที่ทางด้านเทคนิคต่าง ๆ และเป็นแหล่งข้อมูลสำหรับผู้สนใจที่ศึกษาค้นคว้า นอกจากการก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าว ยังมีการศึกษาค้นคว้า เกี่ยวกับนิวเคลียร์ในเรื่องต่าง ๆ มากมาย รวมถึงการศึกษาแหล่งกำเนิดรังสีและอนุภาคขนาดเล็กที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ด้วย

บุทช อัครมาส² ทำการทดลองหาฟลักซ์เทอร์มัลนิวตรอนที่ระยะต่าง ๆ ในน้ำ จากต้นกำเนิดขนาดเล็ก แบบอเมอริเซียม - เบอริลเลียม (Am - Be) ที่ให้ 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่า ฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอนจะลดลงเมื่อห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนมากขึ้น และลดลงค่อนข้างเร็ว จากระยะห่าง 1.5 เซนติเมตร มีฟลักซ์เทอร์มัลนิวตรอน 6.7×10^3 นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร - วินาที ที่ระยะ 10.5 เซนติเมตร มีฟลักซ์เทอร์มัลนิวตรอน 2.30×10^3 นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร - วินาที และที่ 19.5 เซนติเมตร ลดลงเหลือ $.393 \times 10^3$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร - วินาที

¹เอกสารครบรอบ 20 ปี ของสำนักงาน พ.ส. 2525, หน้า 50 - 55

²Y. Akkaramas., Neutron Measurement, Master's Thesis, Chulalongkorn University, 1968, p. 36 - 37

ปรีชา เทียนสมประสงค์¹ ทาการคำนวณหาค่าฟลักซ์เทอร์มัลนิวตรอนที่ระยะต่าง ๆ ในน้ำจากต้นกำเนิดนิวตรอนขนาดเล็ก แบบอเมอริเซียม - เบอริลเลียม ที่ให้ 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที โดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก (Two Group Diffusion Theory) ทฤษฎีการกระเจิงครั้งแรก (First Scattering Theory) และทฤษฎีเฟอร์มีเอจ (Fermi Age Theory) นามาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ ยุทธ อัครมาส ปรากฏว่า ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก ใช้อธิบายการกระจายของนิวตรอนในน้ำได้ดี ทฤษฎีการกระเจิงครั้งแรกพอที่จะใช้ทำนายได้ แต่ให้ผลไม่ดี สำหรับทฤษฎีเฟอร์มีเอจ ไม่สามารถใช้อธิบายการกระจายของนิวตรอนในน้ำได้

ทอง อัครธีรานนท์² ได้ศึกษาวัสดุต่างๆ หลายชนิด เพื่อใช้ในการป้องกันอันตรายจากนิวตรอน ซึ่งเกิดจากต้นกำเนิดนิวตรอนขนาดเล็ก แบบอเมอริเซียม - เบอริลเลียม ที่ให้ 2.2×10^6 นิวตรอน/วินาที เมื่อใช้น้ำขวางกั้นทางวิ่งนิวตรอนเป็นระยะทาง 46.53 cm จะสามารถป้องกันอันตรายจากนิวตรอนได้อย่างปลอดภัย ในระยะที่นิวตรอนโคสเรท มีค่าเพียง 1.97×10^{-7} Rem/sec หรือ 119.14 mRem/week (1 Rem = 10^3 mRem) ขณะที่นิวตรอนโคสเรทมีค่าน้อยกว่า 300 mRem/week ถือว่าไม่ก่อให้เกิดอันตราย เมื่อใช้พาราฟินที่มีความหนา 30.48 cm จะได้รับนิวตรอนโคสเรท 4.9×10^{-7} Rem/sec หรือ 296.36 mRem/week ซึ่งถือว่าไม่เป็นอันตราย สำหรับวัสดุผสมระหว่างพาราฟิน และแกรไฟต์ในอัตราส่วน 2 : 6 โดยปริมาตร ที่ความหนา 11.63 cm จะได้รับนิวตรอนโคสเรทไม่ถึง 5.14×10^{-11} mRem/week

ปรีชา เทียนสมประสงค์ การกระจายของนิวตรอนจากตัวกำเนิดขนาดเล็กในน้ำ
วิทยานิพนธ์ วศ.ม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2517, หน้า 57 - 60

ทอง อัครธีรานนท์ การป้องกันนิวตรอน วิทยานิพนธ์ กศ.ม. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร 2521, หน้า 61 - 63

จิตปรางค์ เกียรติกุล¹ ทำการศึกษาความเหมาะสมหรือความไวของสารในการ
 อารรังสีด้วยตัวกัมมันตภาพรังสีพลูโตเนียม - เบอริลเลียม (Pu - Be) ขนาด 5 Ci
 อัตราปล่อย 1.1×10^7 นิวตรอน/วินาที ซึ่งในการวิเคราะห์แมงกานีส (Manganese)
 และทังสเตน (Tungsten) ปรากฏว่า ที่ระยะห่างจากตัวกัมมันตภาพรังสี 7.8 cm
 ความไวของแมงกานีสคำนวณได้ 3.6×10^3 กรัม และทังสเตน คำนวณได้ 0.0143 กรัม
 ซึ่งเป็นน้ำหนักน้อยที่สุดที่เครื่องวัด (มีประสิทธิภาพ 2.59 %) จะสามารถวัดได้ นอกจากนี้
 ยังศึกษาเปรียบเทียบผลกัมมันตภาพรังสีจากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก
 กับผลกัมมันตภาพรังสีที่กระจายในน้ำ ผลปรากฏทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก ใช้อธิบาย
 การกระจายของนิวตรอนในน้ำได้ดีที่ระยะ 10 - 24 cm จากตัวกัมมันตภาพรังสี และอธิบายได้ดี
 ที่สุดที่ระยะประมาณ 14 cm

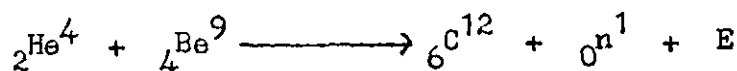
¹จิตปรางค์ เกียรติกุล การศึกษาความเหมาะสมของการอารรังสีด้วยตัวกัมมันตภาพรังสี
นิวตรอน พลูโตเนียม - เบอริลเลียม วิทยานิพนธ์ วศ.ม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

1. ต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron Source)

นิวตรอนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ให้นิวตรอนมีหลายชนิดแตกต่างกัน ดังนี้

1.1¹ นิวตรอนจากปฏิกิริยา อัลฟา - นิวตรอน¹ (α, n)

เป็นปฏิกิริยาที่ยิงอนุภาคอัลฟาเข้าชนนิวเคลียสของธาตุเบา ๆ ที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างนิวคลีออนต่ำ อนุภาคนิวตรอนในนิวเคลียสจะหลุดออกมาเป็นอิสระ และนิวเคลียสที่จับอนุภาคอัลฟาก็จะกลายเป็นอนุภาคใหม่ที่ใหญ่ขึ้น ปฏิกิริยาที่ธรรมดาที่สุดคือการใช้ เบอริลเลียม เป็นเป้า ดังสมการต่อไปนี้



โดยที่อนุภาคอัลฟา อาจได้มาจาก เรเดียม (Radium) โปโลเนียม (Polonium) หรือ อเมอริเซียม (Americium)

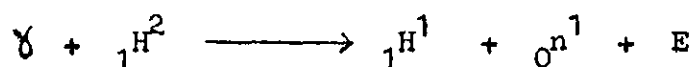
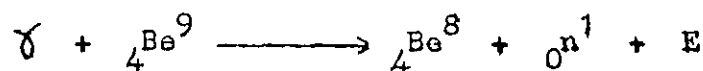
ต้นกำเนิดนิวตรอน ชนิดเรเดียม - เบอริลเลียม (Ra - Be) ให้อนุภาคนิวตรอนมีพลังงานประมาณจาก 1 Mev ถึง 13 Mev สำหรับ Ra - Be ขนาด 1 Ci จะให้นิวตรอนเร็วประมาณ 1.7×10^7 นิวตรอน/วินาที เนื่องจากครึ่งชีวิตของเรเดียมยาวประมาณ 1,600 ปี ทำให้ได้จำนวนนิวตรอนออกมาค่อนข้างคงที่และยาวนาน แตกก็มี

¹I. Kaplan., Nuclear Physics, Addison - Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1979, p. 560 - 561

ข้อเสียคือ มีรังสีแกมมาออกมาจำนวนมาก ซึ่งตรงกันข้ามกับต้นกำเนิด โปโลเนียม - เบอริลเลียม (Po - Be) ที่ให้รังสีแกมมาออกมามาก แต่โปโลเนียมมีครึ่งชีวิตสั้นเพียง 140 วัน และมีนิวตรอนออกมาประมาณ 3×10^6 นิวตรอน/วินาที ดังนั้นทุกวันนี้จึงนิยมใช้ต้นกำเนิดชนิด อเมอริเซียม - เบอริลเลียม (Am - Be) ที่ให้ฟลักซ์แกมมาออกมามาก ขณะเดียวกันก็ให้จำนวนนิวตรอนออกมาคงที่เป็นเวลานานเนื่องจากอเมอริเซียมมีครึ่งชีวิตถึง 470 ปี

1.2 นิวตรอนจากปฏิกิริยา แกมมา - นิวตรอน (γ, n)

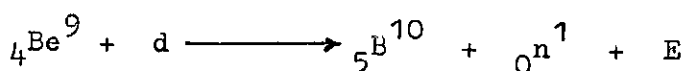
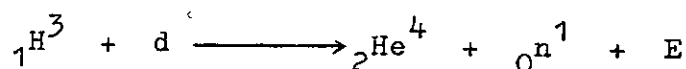
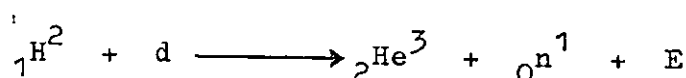
ปฏิกิริยานี้เช่นเดียวกับปฏิกิริยาในข้อ 1.1 แต่ใช้รังสีแกมมาเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาแทนอนุภาคอัลฟา ถ้ารังสีแกมมามีความเข้มมากขึ้นก็จะให้ฟลักซ์ของนิวตรอนมากขึ้นตาม นิวตรอนที่ได้จากต้นกำเนิดแบบนี้จะมีพลังงานค่าเฉลี่ยมากกว่าพวกที่ได้จากปฏิกิริยา (α, n) สมการปฏิกิริยาในกรณีนี้ คือ



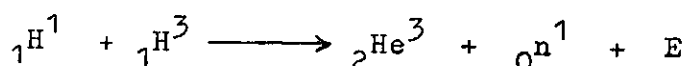
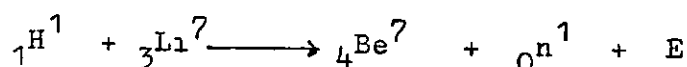
1.3 นิวตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาค (Neutron Generator)

ปฏิกิริยาแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ถูกเร่งจากเครื่องเร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูง วิ่งชนนิวเคลียสไฮโดรเจน บางชนิดที่ใช้เป็นเป้า จะเกิดปฏิกิริยาให้นิวตรอนออกมา ซึ่งมีปฏิกิริยา 2 ประเภท คือ

1.3.1 ปฏิกิริยาคิวเทรียม - นิวตรอน (d, n) เช่น

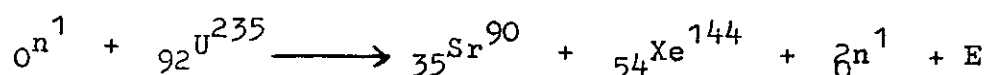


1.3.2 ปฏิกิริยาโปรตอน - นิวตรอน (p, n) เช่น



1.4 นิวตรอนจากปฏิกิริยาฟิชชัน¹ (Fission Reaction)

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียสของธาตุบางชนิดที่เกิดฟิชชัน ได้ เช่น ยูเรเนียม - 235, พลูโทเนียม - 239 จะเกิดการแตกตัวออกเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ พร้อมทั้งให้พลังงานจำนวนมหาศาล กับนิวตรอนจำนวนหนึ่งออกมาด้วย เช่น สมการ



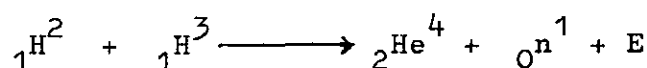
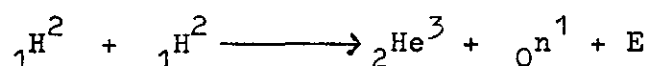
นิวตรอนจากปฏิกิริยาฟิชชันในเครื่องปฏิกรณ์ จะให้ฟลักซ์นิวตรอนเป็นจำนวนมากและยาวนาน คือ ประมาณ 10^{18} นิวตรอน/ม.² - วินาที มีพลังงานอยู่ในช่วงเทอร์มัล

¹A. E.S. Green., Nuclear Physics, The McGraw - Hill Book Company, TOKYO, JAPAN, 1955, p. 87, 294

ถึง 13 MeV แต่ส่วนมากจะอยู่ในช่วงเทอร์มัล หรือประมาณ 0.025 eV ในขณะที่นิวตรอนจากต้นกำเนิด (∞ , n) และเครื่องเร่งอนุภาควัยปฏิบัติการ ${}_1\text{H}^2(\text{d}, \text{n}) {}_2\text{He}^3$, ${}_1\text{H}^3(\text{d}, \text{n}) {}_2\text{He}^4$ ให้นิวตรอนน้อยกว่า 10^{11} นิวตรอน/ม.² - วินาที และ 10^{12} นิวตรอน/ม.² - วินาที ตามลำดับ¹

1.5 นิวตรอนจากปฏิกิริยาฟิวชัน (Fusion Reaction)

ปฏิกิริยาฟิวชันเกิดขึ้นเมื่อนิวเคลียสของธาตุเบา ๆ เช่น ไฮโดรเจนของไฮโดรเจน มารวมกันที่อุณหภูมิสูง ๆ แล้วเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนของฮีเลียม พร้อมทั้งให้พลังงานและนิวตรอนจำนวนหนึ่งออกมา เช่น สมการ



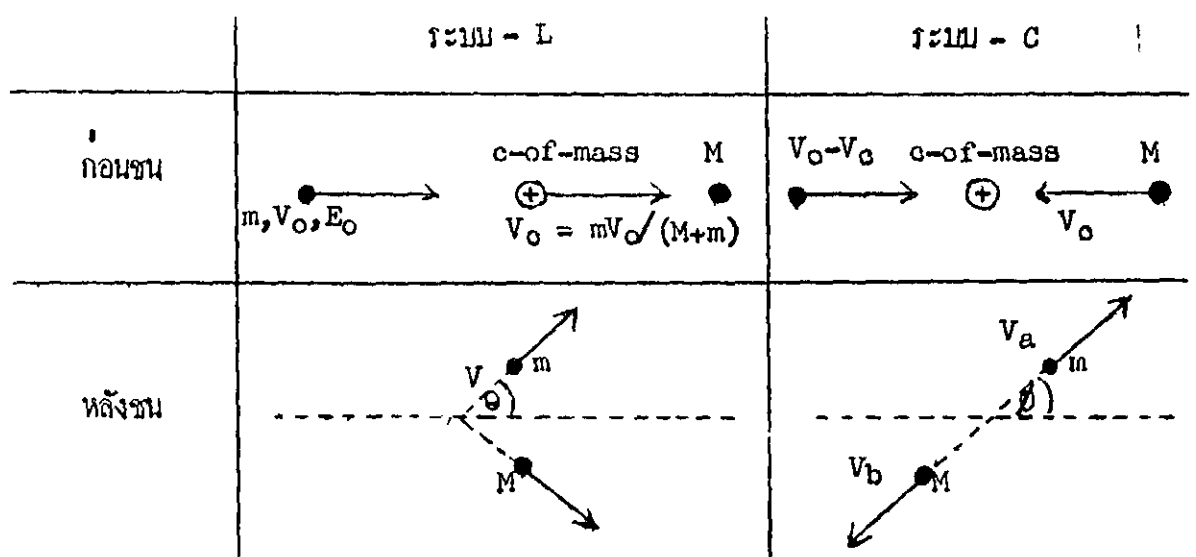
เนื่องจากปฏิกิริยานี้เกิดที่อุณหภูมิสูงมากประมาณ 10^8K ดังนั้นการนำปฏิกิริยานี้มาใช้เป็นประโยชน์ยังไม่สมบูรณ์ เพราะที่อุณหภูมิกำลังกล่าวสารที่ใช้เป็นภาชนะรองรับจะกลายเป็นไอ ดังนั้นจึงเลือกบรรจุไว้ที่ศูนย์กลางของหลอดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่มากล้อมรอบด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งนักวิทยาศาสตร์กำลังศึกษาค้นคว้าอยู่

2. ปฏิกิริยาที่เกิดจากอนุภาคนิวตรอน (Neutron Reaction)

นิวตรอนมีบทบาทสำคัญในเครื่องปฏิกรณ์ เพราะเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน นิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ จึงสามารถวิ่งผ่านอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอกนิวเคลียสเข้าไป และทำปฏิกิริยาโดยตรงกับนิวเคลียสได้ ปฏิกิริยาพวกนี้ที่นับว่าสำคัญก็คือการกระเจิง (Scattering) และการดูดกลืน (Absorption) อาจแยกปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้ ดังนี้

¹I. Kaplan., Nuclear Physics, Addison - Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1979, p. 623, 672 - 674

2.1 การกระเจิงของนิวตรอน อาจมีทั้งการกระเจิงแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น ในกรณีของการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น พลังงานจลน์บางส่วนของนิวตรอนตกกระทบบนนิวเคลียสที่ใช้ในการกระเจิงนิวเคลียสของเป้า แล้วนิวเคลียสที่ถูกกระแทกก็จะสลายให้แก๊มาออกมา ดังนั้นจึงต้องใช้พลังงานมากในการกระเจิงนิวเคลียส นิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ (ประมาณ 0.1 - 10 MeV) จึงมักมีการกระเจิงแบบยืดหยุ่นอย่างเด่นชัด ขณะที่นิวตรอนพลังงานมากกว่า 10 MeV จะมีการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นอย่างเด่นชัด แต่ในการกระเจิงแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น ผลลัพธ์คือนิวตรอนที่สูญเสียพลังงานไปและช้าลง โดยการกระเจิงแบบยืดหยุ่น มีบทบาทสำคัญต่อการทำให้นิวตรอนเร็วช้าลง ดังนั้นจึงศึกษาเพียงการกระเจิงแบบยืดหยุ่นนี้ อาศัยวิธีการแบบ 2 ระบบอ้างอิง คือ ระบบห้องทดลอง (Laboratory system) หรือระบบ -L ที่สมมติว่านิวเคลียสของเป้าอยู่นิ่งก่อนชนและมีนิวตรอนตกกระทบบเข้ามา และระบบศูนย์กลางมวล (Center of mass system) หรือระบบ -C ที่พิจารณาศูนย์กลางมวลของนิวตรอนและนิวเคลียสให้อยู่นิ่ง ทั้งนิวตรอนและนิวเคลียสพุ่งเข้าหากัน กระบวนการของการชนนี้อธิบายได้จากแรงดึงดูดของนิวเคลียสที่เคลื่อนที่ไปกับจุดศูนย์กลางมวล



ภาพประกอบ 1 แสดงการชนที่เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่นระหว่างนิวตรอนและนิวเคลียส ใน 2 ระบบอ้างอิง

ความสัมพันธ์ระหว่างระบบ -L และระบบ -C แสดงไว้ในภาพประกอบ 1 ในระบบ -L ก่อนชนนิวตรอนมวล m เคลื่อนเข้าหานิวเคลียสด้วยความเร็ว V_0 โมเมนตัม mV_0 และพลังงาน E_0 นิวเคลียสมวล M สถิตินิ่ง ดังนั้นอัตราเร็วของศูนย์กลางมวล V_c จะเป็น

$$V_c = \frac{V_0 m}{M + m}$$

ภายหลังชนนิวตรอนเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว V พลังงาน E ทำมุม θ กับแนวเดิม และนิวเคลียสวิ่งออกไปโดยทำมุมบางค่ากับทิศทางตอนเริ่มต้นที่นิวตรอนเข้ามา ในระบบ -C ก่อนชนนิวตรอนเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยอัตราเร็ว

$$V_0 - V_c = V_0 - V_0 \frac{m}{M + m} = V_0 \left(\frac{M}{M + m} \right)$$

และนิวเคลียสเคลื่อนที่ไปทางซ้ายด้วยอัตราเร็ว V_c โมเมนตัมทั้งหมดที่วัดในระบบ -C คือ

$$m \left(\frac{M V_0}{M + m} \right) + M \left(\frac{-V_0 m}{M + m} \right) = \frac{m M V_0}{M + m} - \frac{m M V_0}{M + m} = 0$$

ภายหลังการชนนิวตรอนเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว V_a ทำมุม ϕ กับแนวเดิม และเนื่องจากว่าโมเมนตัมทั้งหมดของคงที่ คือ ยังคงเป็นศูนย์ภายหลังการชน ดังนั้นนิวเคลียสต้องเคลื่อนออกไปทำมุม $(180^\circ + \phi)$ กับทิศทางของนิวตรอนที่เข้ามา ผู้สังเกตในระบบ -C เห็นผลที่ได้จากการชนคือการเปลี่ยนแปลงทิศทางของนิวตรอนและนิวเคลียส โดยทั้งสองแยกออกจากกันในทิศทางตรงข้าม พิจารณาการชนแบบยืดหยุ่นพลังงานจลน์ของคงที่

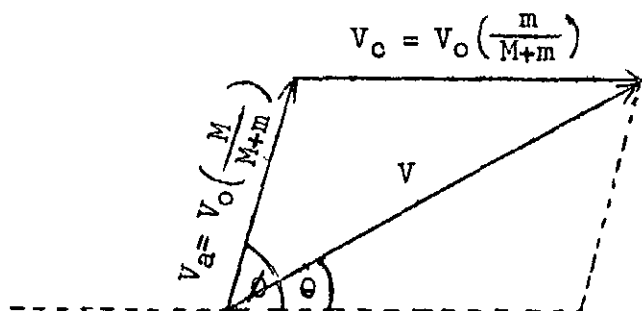
$$\frac{1}{2} m \left(\frac{M V_0}{M + m} \right)^2 + \frac{1}{2} M \left(\frac{m V_0}{M + m} \right)^2 = \frac{1}{2} m V_a^2 + \frac{1}{2} M V_b^2$$

และกฎการคงตัวของโมเมนตัม

$$m V_a - M V_b = 0$$

$$\text{จะได้ } V_a = \frac{M V_o}{M + m} ; V_b = \frac{m V_o}{M + m}$$

จะเห็นว่าขนาดความเร็วของนิวตรอน และนิวเคลียส หลังการชนคง เท่ากับความเร็วก่อนการชน ในระบบ -L นิวเคลียส เริ่มต้นจากอยู่นิ่ง ดังนั้นมีขนาดของความเร็วเปลี่ยน และทิศทางก็ไม่ได้มีทิศตรงข้ามกัน นิวตรอนที่กระเจิงออกไปด้วยมุม θ ความเร็ว V ซึ่งเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของความเร็วของนิวตรอน ในระบบ -C และความเร็วของศูนย์กลางมวล ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แสดงแผนภาพของ เวกเตอร์สำหรับความเร็วของนิวตรอนหลังการชนในระบบ -L และระบบ -C

การหาความเร็วของนิวตรอนหลังชน โดยการใชกฎของโคไซน์ (Law of Cosines)

$$v^2 = v_o^2 \left(\frac{M}{M+m} \right)^2 + v_o^2 \left(\frac{m}{M+m} \right)^2 + 2v_o^2 \left(\frac{M}{M+m} \right) \left(\frac{m}{M+m} \right) \cos \phi$$

ดังนั้นอัตราส่วนของพลังงานนิวตรอนหลังชน E ต่อพลังงานก่อนชนเริ่ม E_o คือ

$$\frac{E}{E_o} = \frac{v^2}{v_o^2} = \frac{M^2 + m^2 + 2Mm \cos \phi}{(M+m)^2}$$

เนื่องจาก M เป็นมวลของนิวเคลียสของเป้า $\simeq A$ และ m เป็นมวลของนิวตรอน $\simeq 1$ ดังนั้น

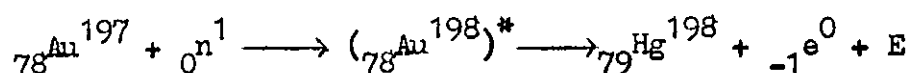
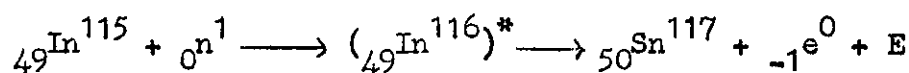
$$\frac{E}{E_o} = \frac{M^2 + m^2 + 2Mm \cos \phi}{m^2(M/m + 1)^2} = \frac{A^2 + 1 + 2A \cos \phi}{(A + 1)^2}$$

ถ้าสูญเสียพลังงานไปมากที่สุด ก็จะมี E ต่ำสุด ซึ่งจะปรากฏที่มุม $\phi = 180^\circ$ นั่นคือ

$$E_{\min} = E_o \frac{(A^2 + 1 - 2A)}{(A + 1)^2} = E_o \left(\frac{A - 1}{A + 1} \right)^2$$

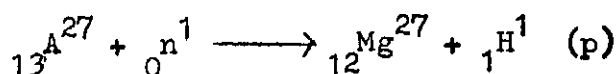
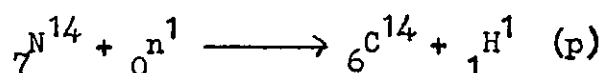
จะเห็นว่า การสูญเสียพลังงานของนิวตรอนในการชนแบบยืดหยุ่น ขึ้นอยู่กับค่า A สำหรับ $A = 1$ (นิวเคลียสของไฮโดรเจน) $E_{\min} = 0$ แสดงว่า นิวตรอนสูญเสียพลังงานทั้งหมดในการชนเพียงครั้งเดียว ดังนั้นในการทำให้นิวตรอนเร็วมีความเร็วช้าลงก็มักจะใช้นิวเคลียสของธาตุเบา ๆ เช่น ไฮโดรเจน (ในรูปของน้ำ) ลิเทียม (ในรูปของน้ำหนัก) และคาร์บอน กระบวนการทำให้นิวตรอนช้าลงจะต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนสุดท้ายอาจถูกจับหรือถูกกักกั้นหายไปนั่นเอง

2.2 กระบวนการจับนิวตรอน (Neutron Capture) เป็นกระบวนการที่นิวตรอนถูกจับไว้และมีรังสีแกมมาคายออกมา ส่วนมากนิวเคลียสที่เหลืออยู่จะเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีและมักจะสลายเบตาออกมา ภาคตัดขวางของการจับนิวตรอน (Capture cross - section) สำหรับนิวเคลียสเบาจะมีค่าทำสำหรับนิวตรอนช้า แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับนิวเคลียสที่หนักขึ้น และโดยทั่วไปภาคตัดขวางของการจับนิวตรอนยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของนิวตรอนด้วย ปฏิริยาชนิดนี้นิยมใช้มากที่สุดในการวิเคราะห์หาธาตุโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน ตัวอย่างเช่น

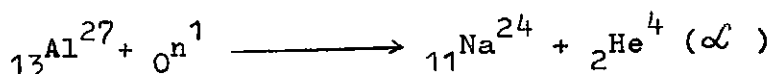
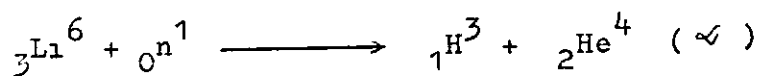


2.3 ปฏิริยาการคายอนุภาค ปฏิริยานี้เกิดขึ้นเนื่องจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของเป้า ทำให้อนุภาคซึ่งอาจเป็นโปรตอน อัลฟา หรือนิวตรอนหลุดออกมา และนิวเคลียสที่เหลืออยู่อาจจะเป็นหรือไม่เป็นสารกัมมันตรังสีก็ได้ นิวตรอนที่ใช้ยิงต้องมีพลังงานเพียงพอทำให้อนุภาคหลุดออกมาจากนิวเคลียสของเป้า ดังนั้นจึงต้องใช้นิวตรอนเร็ว สำหรับปฏิริยามีดังนี้

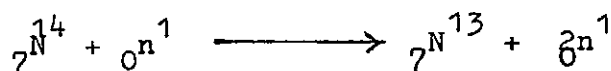
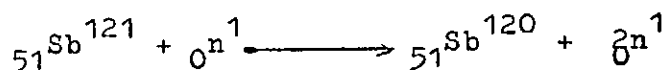
2.3.1 ปฏิริยานิวตรอน - โปรตอน (n, p) เช่น



2.3.2 ปฏิกิริยานิวตรอน - อัลฟา (n, α) เช่น



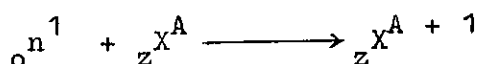
2.3.3 ปฏิกิริยานิวตรอน - นิวตรอน ($n, 2n$) เช่น



2.4 ปฏิกิริยานิวตรอน - ฟิชชัน คือ ปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วทำให้อะตอมของธาตุแตกออกเป็น 2 ส่วน กังที่กล่าวมาแล้ว

3. นิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation)

เมื่อวัตถุหรือสารถูกฉายด้วยนิวตรอนจะกลายเป็นสารกัมมันตรังสี ถ้าสารมีครึ่งชีวิตยาวนานหรือมีการสลายตัวช้าจะทำให้ความเข้มข้นของกัมมันตรังสียิ่งทวีขึ้นเมื่อมีการอาบนานขึ้น ไอโซโทปกัมมันตรังสีเหล่านี้ถูกผลิตขึ้นโดยนิวเคลียสจับนิวตรอนไว้ ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งเทอร์มัลนิวตรอน หรือนิวตรอนเร็วแล้วแต่ภาคักขวางสำหรับนิวตรอนของสารนั้น กังสมการ



อัตราการเกิดสารกัมมันตรังสีขึ้นอยู่กับสิ่งสำคัญต่าง ๆ กังนี้

3.1 ปริมาณของธาตุ รวมทั้งความอุดมของไอโซโทปในธรรมชาติ
(Natural isotopic abundance) ของธาตุนั้นๆ

3.2 ภาวศักขวาง หรือโอกาสในการจับนิวตรอนของธาตุนั้น

3.3 ระยะเวลาของการอาบรังสี

3.4 ฟลักซ์นิวตรอนที่ใช้ในการอาบ

ดังนั้น ถ้า

ϕ = ฟลักซ์นิวตรอน มีหน่วยเป็นนิวตรอน/ตาราง เซนติเมตร - วินาที

N = จำนวนนิว เคลียสทั้งหมดของ ธาตุที่จะนำไปอาบนิวตรอน

$\frac{dR}{dt}$ = อัตราการ เกิดปฏิกิริยานิว เคลียส

อัตราการ เกิดปฏิกิริยานิว เคลียส เป็นผลจากโดยตรงกับ ϕ และจำนวนนิว เคลียสทั้งหมด

ดังนั้น
$$\frac{dR}{dt} \propto \phi N$$

ค่าคงที่ของสัดส่วนนี้ก็คือ โอกาสที่จะ เกิดปฏิกิริยาต่อนิว เคลียสนั้นเอง ดังนั้น

$$\frac{dR}{dt} = \sigma_{aot} \phi N$$

ในขณะที่ไอโซโทปกัมมันตรังสีถูกสร้างขึ้น ไอโซโทปเหล่านี้จะสลายตัวด้วยค่าคงที่ของการสลายตัวเท่ากับ λ ด้วย ดังนั้น ถ้าในเวลา t ใด ๆ มีจำนวนกัมมันตภาพรังสีอยู่ R อัตราการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสีนี้ คือ $-\lambda R$ เพราะฉะนั้น สมการของอัตราการเกิดกัมมันตรังสีจะเปลี่ยนเป็น

$$\frac{dR}{dt} = \sigma_{aot} \phi N - \lambda R$$

และเมื่อ อินทิเกรตตลอดสมการ จะได้

$$R = \frac{\phi_{act} N \phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

เมื่ออานิวตรอนเป็นเวลา t แล้วหยุด การสลายตัวของไอโซโทปกับมันตรังสี
จะยังคงดำเนินไปเรื่อย ๆ ดังนั้น ที่ว่าผ่านไป t' หลังการอานิวตรอน

$$R = \frac{\phi_{act} N \phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t'} \quad (2.1)$$

และความแรงของรังสี (A) ในการสลายตัวต่อวินาทีจะเป็น

$$A = \lambda R = \phi_{act} N \phi (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t'} \quad (2.2)$$

เนื่องจาก
$$N = \frac{m N_o}{M} B$$

โดยที่ m = มวลทั้งหมดของสารที่นำไปอานิวตรังสี (กรัม)

N_o = เลขอาโวกาโดร (Avogadro number) ซึ่งเท่ากับ 6.022×10^{23} /โมล

M = น้ำหนักอะตอมหรือเลขมวลของสารก่อนอานิวตรังสี (กรัม)

B = ความอุดม (Abundance) ของ ไอโซโทปนั้น

ดังนั้น

$$A = \frac{m N_o}{M} B \phi \phi_{act} (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t'} \quad (2.3)$$

ในกรณีที่ t มากขึ้น ค่า $e^{-\lambda t}$ จะค่อย ๆ ลดลงไปสู่ศูนย์เมื่อ $t = \infty$ (infinity)

ความแรงของรังสีจะคงที่ ในสภาพเช่นนี้เราเรียกว่า การแอกติเวตถึงจุดอิ่มตัว (saturation) พบว่า เวลาของการแอกติเวตประมาณตั้งแต่ 2 เท่า ของครึ่งชีวิต ($2 T_{1/2}$) การแอกติเวตจะถึงจุดอิ่มตัว ดังนั้นในภาวะเช่นนี้ สมการ (2.2) จะเป็น

$$A_{\max} = N \phi \sigma_{\text{act}}$$

$$\text{หรือ } R_{\max} = \frac{N \phi}{\lambda} \sigma_{\text{act}}$$

$$\text{หรือ } R_{\max} = \frac{N \phi \sigma_{\text{act}} T_{1/2}}{0.693} ; \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

จะเห็นว่าเมื่อ N และ ϕ คงที่ จำนวนมากที่สุดของการก่อกัมมันตภาพรังสี ($R_{\max}$) นอกจากจะขึ้นกับ σ_{act} แล้วยังขึ้นกับค่า $T_{1/2}$ แสดงว่า ถ้าค่า σ_{act} หรือ/และ $T_{1/2}$ มีค่าน้อย $R_{\max}$ ก็ย่อมจะมีค่าน้อยตาม ดังนั้น วัสดุที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ เช่น Fe, Al ที่นำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในถังน้ำ อันตรายต่าง ๆ จากสารกัมมันตรังสีก็ย่อมลดน้อยลง

สำหรับในการวัดกัมมันตรังสี นอกเหนือจากประสิทธิภาพของเครื่องมือที่จะต้องคำนึงถึง ยังต้องพิจารณาถึงรังสีที่ปล่อยออกมาซึ่งมีพลังงานหลายระดับ แต่ละระดับจะมีโอกาสของการปล่อยรังสีออกมาแตกต่างกัน ซึ่งถ้าให้โอกาสของการปล่อยรังสีระดับพลังงานต่าง ๆ เท่ากับ P และประสิทธิภาพของเครื่องวัดเท่ากับ ϵ จะได้อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่เครื่องสามารถวัดได้ คือ

$$C = AP\epsilon \quad (2.4)$$

ดังนั้น สมการ 2.3 จึงกลายเป็น

$$\frac{C}{PE} = \frac{m \text{ No}}{M} B \phi \phi_{act} (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t'} \quad (2.5)$$

หรือ

$$m = \frac{C M e^{\lambda t'}}{PE B \text{ No } \phi \phi_{act} (1 - e^{-\lambda t})} \quad (2.6)$$

ถ้าทราบค่าที่อยู่ทางขวามือของสมการ (2.6) ก็สามารถคำนวณหาค่า m ได้
ค่าที่ได้ถูกต้องมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าทางขวามือ ดังนั้นอาจหลีกเลี่ยง
การใช้ค่าเหล่านี้ ในการหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง อาจใช้วิธีเปรียบเทียบกับค่า
มาตรฐานที่อามรังสีนิวตรอนพร้อมกัน และวัดรังสีภายใต้สภาวะแบบเดียวกันทุกอย่าง โดย
อาศัยสมการ (2.5) และถ้า

C_s = อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่เครื่องสามารถวัดได้ใน
สารมาตรฐาน

C_x = อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่เครื่องสามารถวัดได้ในสาร
ตัวอย่าง

m_s = น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน

m_x = น้ำหนักของธาตุ x ที่ต้องการหาปริมาณในสารตัวอย่าง

จะได้

$$\frac{C_s}{PE} = \frac{m_s \text{ No}}{M} \cdot B \phi \phi_{act} (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t'_s}$$

$$\frac{C_x}{PE} = \frac{m_x \text{ No}}{M} \cdot B \phi \phi_{act} (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t'_x}$$

เมื่อใช้เวลาในการวัดรังสี และเวลาก่อนวัดรังสีเท่ากันก็จะได้

$$\frac{C_x}{C_s} = \frac{m_x}{m_s} \quad (2.7)$$

และ

$$\frac{C_x}{C_s} = \frac{m_x e^{-\lambda t'_x}}{m_s e^{-\lambda t'_s}} \quad (2.8)$$

สำหรับกรณีที่ $t'_x \neq t'_s$

4. หลักการวิเคราะห์โดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน

การวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน เป็นวิธีสะดวกรวดเร็ว สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย ๆ อาจไม่จำเป็นต้องแยกสารที่วิเคราะห์ออกมาอย่างสมบูรณ์ นอกจากนั้นยังสามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) แต่วิธีการวิเคราะห์นี้ก็มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ธาตุได้ทุกธาตุในการทางธาตุ จะวิเคราะห์ได้เฉพาะธาตุที่ทำปฏิกิริยาแบบดูดกลืนหรือจับนิวตรอนเท่านั้น และไม่สามารถระบุได้ว่าธาตุที่วิเคราะห์นั้นอยู่ในรูปลักษณะใด ผลที่ได้จะอยู่ในรูปของปริมาณทั้งหมด การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ

4.1 การวิเคราะห์โดยไม่อาศัยวิธีทางเคมี (Non - Destructive Neutron Activation Analysis)

คือ การนำสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานเข้าอบรังสีนิวตรอนพร้อมกันหรือ อบในเวลาเท่ากัน แล้วนำมาวัดรังสีเปรียบเทียบกับ ในสถานะเหมือนกันทุกอย่าง แล้วคำนวณปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างโดยใช้สมการ (2.8) ซึ่งในการทดสอบใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในครั้งนี้ จะวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีการแบบนี้

4.2 การวิเคราะห์โดยอาศัยวิธีการทางเคมี (Destructive Neutron Activation Analysis)

สารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้น บางที่เป็นส่วนผสมของธาตุหลายชนิด ซึ่งอาจมีการรบกวนซึ่งกันและกัน โดย γ - ray peaks ใกล้เคียงกัน ไม่สามารถแยกได้ง่าย ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีทางเคมี เช่น การตกตะกอน การสกัดและการกลั่น เป็นต้น เมื่อแยกให้เหลือเพียงธาตุที่ต้องการแล้วจึงนำมาวิเคราะห์เหมือนแบบแรก

5. การตรวจวัดนิวตรอน (Detection of Neutron)

การตรวจวัดนิวตรอนเป็นปัญหาที่ซับซ้อนมากกว่าการตรวจวัดอนุภาคมีประจุ เพราะนิวตรอนไม่ทำให้เกิดไอออน (Ionization) ได้โดยตรง วิธีการตรวจวัดนิวตรอนมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับความต้องการหาฟลักซ์ของนิวตรอน หรือต้องการหาทั้งฟลักซ์และพลังงาน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความพร้อมของอุปกรณ์ และความปลอดภัยในระหว่างปฏิบัติงาน วิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นการหาฟลักซ์นิวตรอนด้วยวิธีแอคติเวชัน

การหาฟลักซ์นิวตรอนโดยวิธีแอคติเวชัน เป็นวิธีที่ใช้กันแพร่หลาย สารหรือธาตุที่ใช้อาบนิวตรอนนิยมทำเป็นแผ่นบาง ๆ (foil) เพื่อแก้ปัญหา ปรากฏการณ์บังตัวเองในการแอคติเวต หรือที่เรียกว่า "Self shielding effect" นอกจากนี้ธาตุที่ใช้ต้องมีภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยาการถูกกลืนนิวตรอนมากเพียงพอสำหรับการเกิดนิวเคลียสกัมมันตรังสีจากนิวตรอนทุกอนุภาค ทั้งยังทำให้รังสีมีความเข้มมากง่ายต่อการตรวจวัด ช่วงชีวิต (Life time) ของสารกัมมันตรังสีที่เกิดใหม่ก็จะต้องไม่สั้นมากจนไม่สามารถวัดทันหรือช่วงชีวิตไม่ยาวเกินไป จนดูเหมือนว่า อัตราการสลายน้อยมากจนวัดหาค่า หรือต้องใช้เวลานานในการอบนิวตรอน ธาตุที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ได้แก่ อินเดียม (Indium) ทอง มังกานีส และดิสโพรเซียม (Dysprosium) ธาตุซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ เหล่านี้สามารถนำมาใช้เหมือนเป็นเครื่องมือตรวจวัด โดยวางไว้ ณ ตำแหน่งที่ต้องการหาฟลักซ์นิวตรอน เพื่ออบรังสีนิวตรอนในช่วงเวลาหนึ่ง นิวเคลียสของธาตุจะถูกเหนี่ยวนำด้วยอนุภาคนิวตรอน

กลายเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี หลังจากนั้นนามาวัดหาคัมมันตภาพ โดยการนับการแผ่รังสี ด้วยเครื่องนับที่เหมาะสมกับรังสีนั้น ๆ แล้วสามารถหาฟลักซ์นิวตรอนได้ โดยอาศัยสมการ (2.5) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\phi = \frac{M C e^{\lambda t'}}{P \epsilon_m N_o B \sigma_{act} (1 - e^{-\lambda t})} \quad (2.9)$$

การหาฟลักซ์นิวตรอนด้วยวิธีแอคทีเวชัน สามารถหาฟลักซ์นิวตรอนทั้งเทอร์มัล นิวตรอน และนิวตรอนเร็ว สิ่งที่สำคัญต้องเลือกชนิดของแผ่น foil และเตรียม เครื่องมือในการตรวจวัดให้เหมาะสมรัดกุม ดังที่กล่าวข้างต้น

ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบและสร้างถังน้ำสำหรับเก็บกักน้ำเนคนิวตรอน

การสร้างถังน้ำสำหรับเก็บกักน้ำเนคนิวตรอน มีลักษณะดังภาพประกอบ 3 และมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1.1 ถังน้ำทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 112 cm สูง 123 cm ทำด้วยแผ่นเหล็กหนา 0.6 cm ทาสีป้องกันสนิมและทาสีหุ้มข้างนอก

1.2 ที่ยึดท่อสำหรับใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน กว้าง 5 cm ยาว 125 cm สูง 5 cm ทำด้วยเหล็กหนา 0.4 cm ทาสีกันสนิม

1.3 นอตสำหรับใช้ยึดที่ยึดท่อกับถังน้ำ

1.4 เชือก ใช้ชักรอกต้นกำเนิดนิวตรอน

1.5 รอก สำหรับชักรอก

1.6 ท่อสเตนเลส ใช้เป็นท่อชั้นนอกของต้นกำเนิดนิวตรอน มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 cm ยาว 125 cm

1.7 ท่อสเตนเลส ใช้ใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 cm ยาว 28 cm ใส่อยู่ในท่อชั้นนอก เมื่อบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนแล้ว ระยะทางจากปากท่อถึงต้นกำเนิดนิวตรอนเท่ากับ 21 cm

1.8 ขาตั้งใช้สำหรับยึดท่อที่ใช้เป็นทางในการชักรอกต้นกำเนิดนิวตรอน ขาตั้งซึ่งทำด้วยเหล็กทาสีกันสนิมนี้จะทำให้ท่อไม่ลอยตัวขึ้น และยึดท่อให้อยู่คงที่ในแนวตั้ง

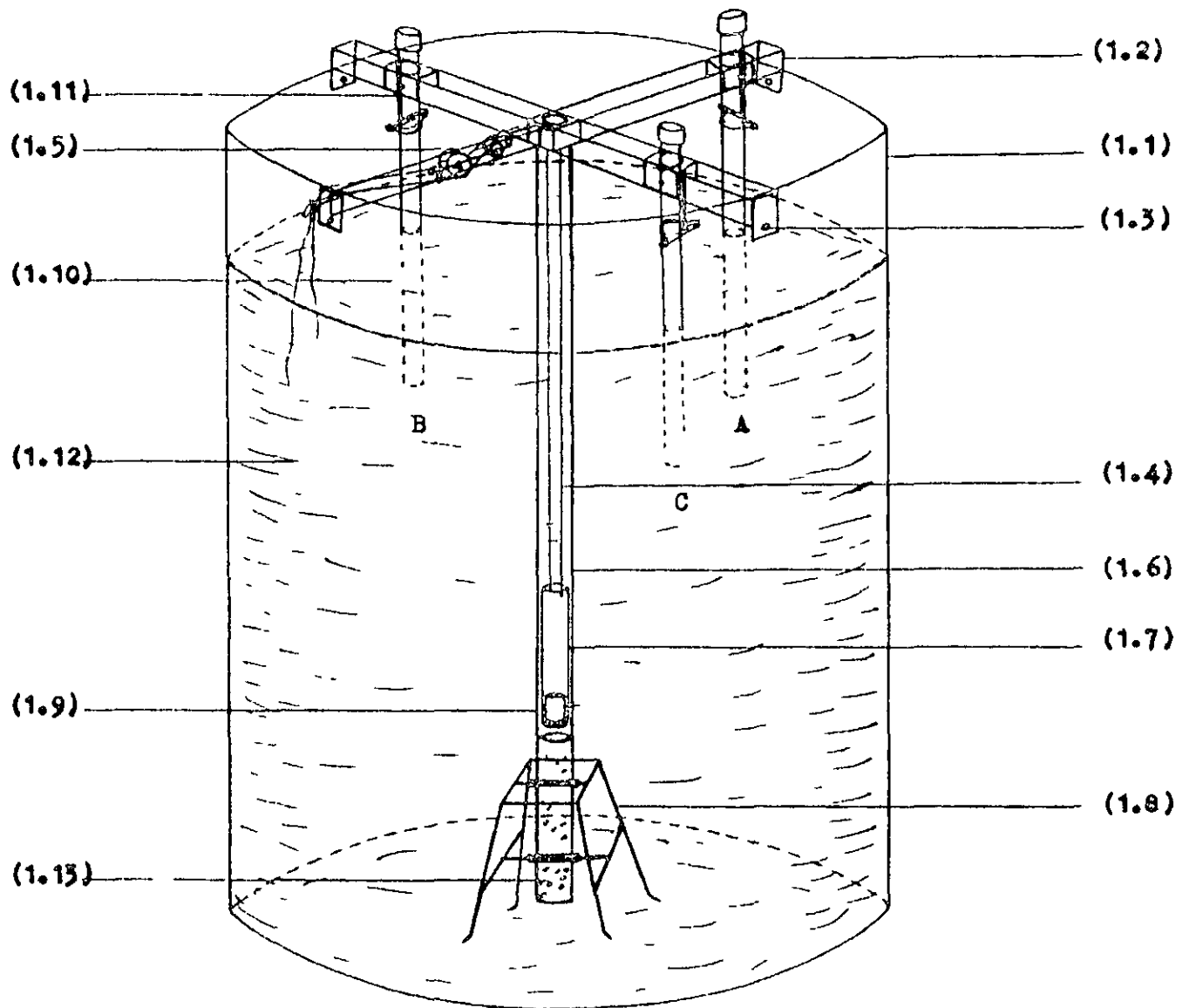
1.9 ต้นกำเนิดนิวตรอน แบบ อเมอริเซียม - เบอริลเลียม บรรจุในภาชนะทรงกระบอกซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 cm สูง 5 cm

1.10 ท่อ พี.วี.ซี. (P.V.C.) ใช้สำหรับใส่สารตัวอย่าง ในการอบนิวตรอน ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.3 cm ยาว 42 cm

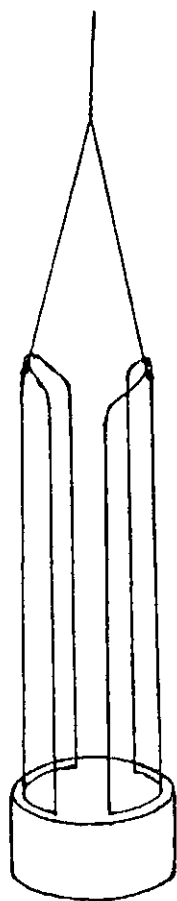
1.11 อุปกรณ์ปรับระดับท่อที่ใส่สารตัวอย่าง ซึ่งสามารถปรับตามระดับความลึกต่าง ๆ และเลื่อนให้ใกล้ไกล จากต้นกำเนิดนิวตรอนตามความต้องการ โดยมันอาจเป็นตัวยึคให้คงที่

1.12 น้ำใช้เป็นวัสดุลดความเร็วและเป็นวัตถุป้องกันอันตรายจากนิวตรอน

1.13 พาราฟิน ใช้สำหรับป้องกันไม่ให้นิวตรอนลงไปหาปฏิกิริยากับด้านล่างหรือกันถึง และเพื่อใช้เป็นท่อรับท่อใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน พาราฟินนี้มีความสูง 38 cm



ภาพประกอบ 3 ถังน้ำสำหรับเก็บก๊าซเกิดนิวตรอน

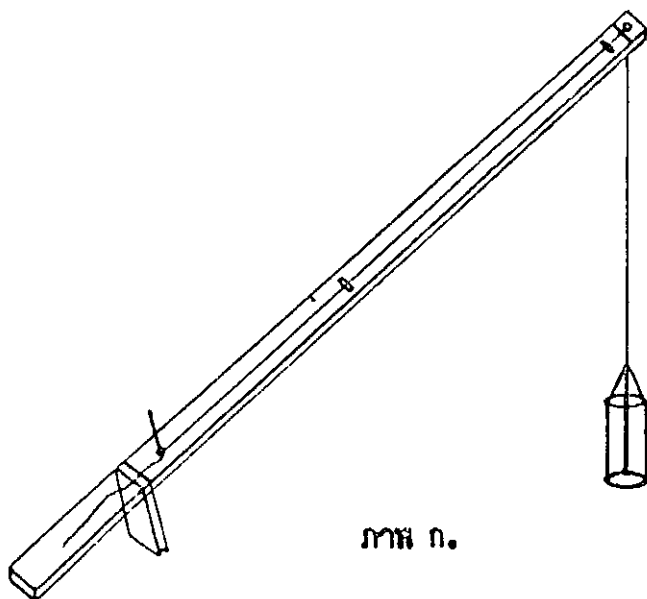


ภาพ ก.



ภาพ ข.

ภาพประกอบ 4 ชุดการะไ้สารตัวอย่าง ใช้สำหรับการนิยามกับเทอร์โมไดนามิกส์



ภาพ ก.



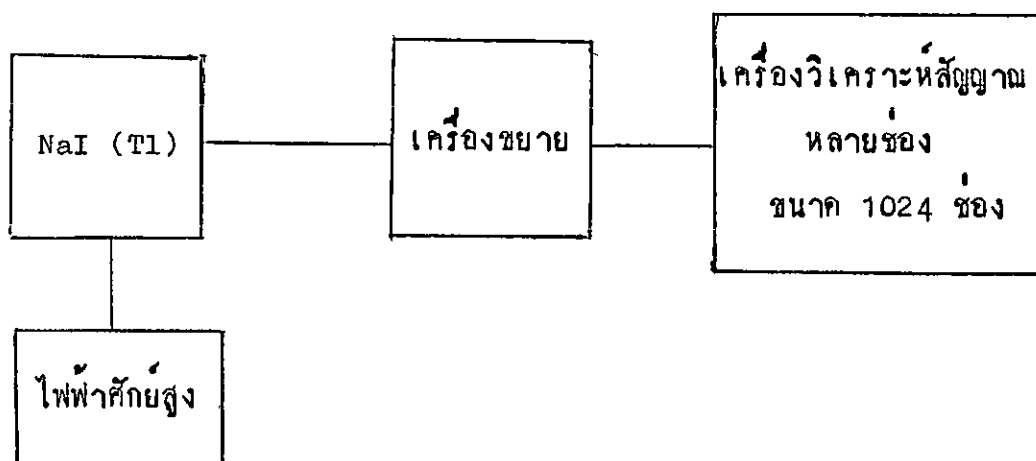
ภาพ ข.

ภาพประกอบ 5 ชุดการะไ้สารตัวอย่าง ใช้สำหรับการนิยามกับเทอร์โมไดนามิกส์

นอกจากนี้ ยังมีชุดของภาชนะที่สร้างขึ้นเพื่อให้ใส่สารตัวอย่างในการนำไปอบนิวตรอน ดังภาพประกอบ 4 และ 5 ภาพประกอบ 4 เป็นชุดของภาชนะเพื่อใช้ในการอบสารตัวอย่างด้วยเทอร์มิกนิวตรอน ประกอบด้วยภาชนะใส่สารตัวอย่าง ซึ่งทำด้วยพลาสติก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.4 cm สูง 1.7 cm ภาชนะนี้จะถูกนำไปวางไว้ในที่ที่รองรับ ดังภาพ ก. ซึ่งที่รองรับนี้ทำด้วยพลาสติก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 cm สูง 7 cm เพื่อนำไปใส่ที่อบนิวตรอน ภาพประกอบ 5 เป็นชุดของภาชนะใช้ในการอบสารตัวอย่างด้วยนิวตรอนเร็ว ชุดนี้ประกอบด้วยไม้ถือใช้สำหรับนำสารตัวอย่างไปอบนิวตรอน ทำด้วยไม้ยาว 68 cm กว้าง 3.5 cmหนา 1.1 cm นอกจากนี้ยังมีที่รองรับภาชนะใส่สารตัวอย่างทำด้วยพลาสติก มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 cm สูง 5 cm ถูกติดกันด้วยเชือก ดังภาพ ก. เชือกนี้สามารถปรับขนาดความยาวได้ตามความต้องการภาชนะใส่สารตัวอย่าง ภาพ ข. เป็นภาชนะอันเดียวกับภาชนะในภาพประกอบ 4 ข. ซึ่งสามารถใช้ร่วมกัน

2. การวัดรังสีแกมมา

2.1 เครื่องวัดรังสี ประกอบด้วยหัววัด ซึ่งเป็นผลึก NaI (Tl) ต่อกับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ และท่อบาง ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 แสดงโคอะแกรมของเครื่องวัดรังสีแกมมา

กลไกการทำงานของเครื่องมือชนิดนี้ คือ เมื่อรังสีแกมมาหรือโฟตอนเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของโซเดียมไอโอไดด์แล้ว จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นสามชนิด คือ ปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) แบบคอมป์ตัน (Compton effect) และแบบเกิดอิเล็กตรอนคู่ (Pair production) ในแต่ละกระบวนการพลังงานของรังสีแกมมาจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในอะตอมของโซเดียมไอโอไดด์ ซึ่งเป็นสารเรืองแสง (Phosphor) ที่ไวต่อปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก และแบบคอมป์ตัน พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่เกิดจากโฟโตอิเล็กทริก และแบบคอมป์ตัน จะเปลี่ยนเป็นพลังงานแสง เมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่สภาวะเดิม (Ground state) ถ้าเป็นปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก รังสีแกมมาจะถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้แก่อิเล็กตรอน ดังนั้น แสงที่เกิดขึ้นจึงเป็นปฏิกิริยากับพลังงานของรังสีแกมมา ถ้าเป็นปฏิกิริยาแบบคอมป์ตัน รังสีแกมมาจะถ่ายทอดพลังงานเพียงบางส่วนให้แก่อิเล็กตรอน ในการเกิดปฏิกิริยา 1 ครั้ง พลังงานแสงที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า (Voltage pulse) โดยหลอด

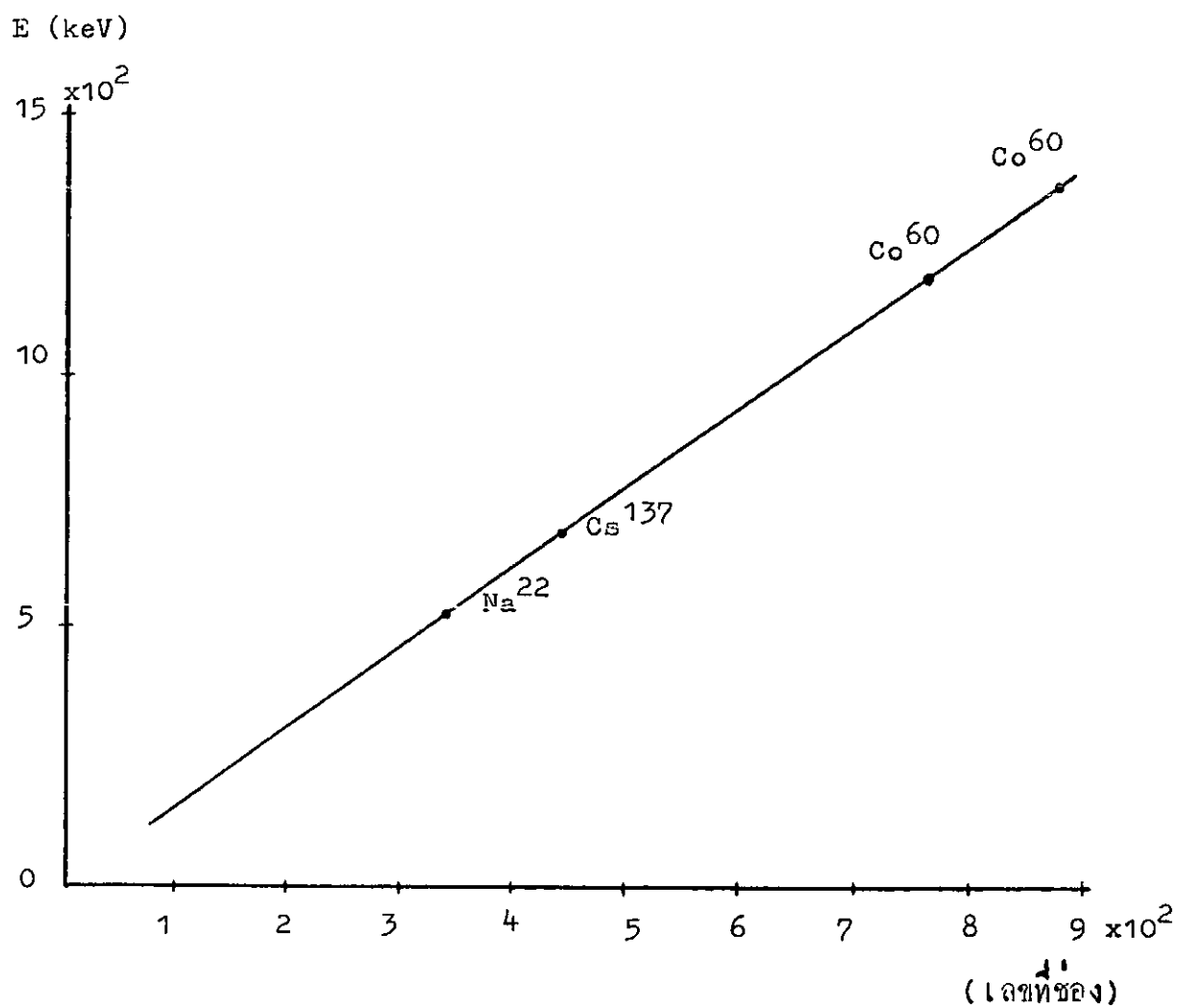
โฟโตมัลติพลายเออร์ แต่เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ โดยทั่วไปมักมีค่าต่ำจึงขยายให้ สัญญาณโตขึ้นโดยเครื่องขยาย แล้วส่งเข้าเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ (Pulse height analyzer) เลขที่ช่อง (Channel number) ต่าง ๆ จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับพลังงานของรังสีแกมมา เก็บรวบรวมข้อมูลด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ต่อไป

2.2 การหาเส้นคาลิเบรชัน พลังงาน (Energy Calibration Curve)

ทำโดยวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน โซเดียม - 22

ซีเซียม - 137 และโคบอลต์ - 60 ที่ให้พลังงาน 511.0 keV 661.6 keV

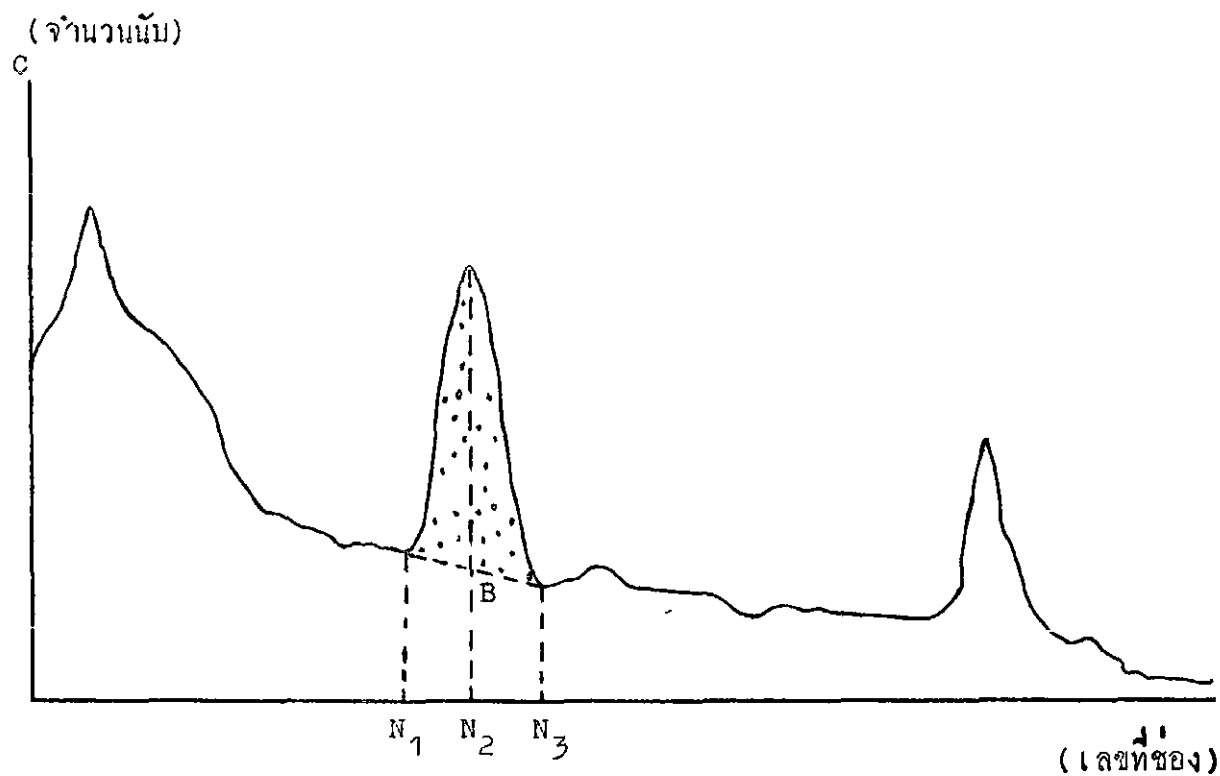
1173.2 keV และ 1332.4 keV ตามลำดับ แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานและเลขที่ช่อง ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน และเลขที่ช่อง

2.3 การหาพื้นที่ใต้พีค (Peak)

การคำนวณหาผลรวมของจำนวนนับ (Total Count) ซึ่งหาได้จาก
พื้นที่ใต้พีค คำนวณได้ดังนี้



ภาพประกอบ 8 ตัวอย่างสเปกตรัมของรังสีแกมมา

$$\text{ผลรวมของจำนวนนับ} = A - B$$

เมื่อ A คือ ผลรวมทั้งหมดของจำนวนนับของพีค

$C(N)$ คือ จำนวนนับในช่องที่ N

$$A = \sum_{N=N_1}^{N_3} C(N)$$

B คือ แบกกราวด์ (Background) หาได้จาก

$$B = \left[\frac{C(N_1) + C(N_3)}{2} \right] (N_3 - N_1)$$

ดังนั้น อัตราจนวนนับ (Count rate) ก็คือ อัตราการสลายกัมมันตภาพที่เครื่องสามารถวัดได้ คือ

$$C = \frac{\text{ผลรวมของจนวนนับ}}{\text{เวลาที่ใช้ในการวัด}}$$

3. การหาประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีแกมมา

การหาประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีแกมมา แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

3.1 พิจารณาเลือกแหล่งกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน (Standard source) ที่ทราบค่าความเข้มของกัมมันตภาพ ครึ่งชีวิต พลังงาน พร้อมทั้งเปอร์เซ็นต์ในการปล่อยรังสีแกมมา และเงื่อนไข ของการผลิตแหล่งกำเนิดรังสีอย่างละเอียด สำหรับในการทดลองนี้ใช้แหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐาน ดังตาราง 3

ตาราง 3 แหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐาน ผลิตเมื่อเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2518

แหล่งกำเนิด รังสีมาตรฐาน	ความเข้มของรังสีแกมมา A_0 (dps.)	ครึ่งชีวิต $T_{1/2}$ (y)	พลังงานของแกมมา E_γ (keV)	% แกมมายึด
Am^{241}	41.74×10^4	432.58	59.57	36.0
Cs^{137}	38.11×10^4	30.17	661.64	84.6
Co^{60}	38.74×10^4	5.27	1173.23	99.8
			1332.46	99.9
Na^{22}	40.99×10^4	2.60	1274.60	99.9

3.2 ทำการวัดรังสีแกมมา โดยวางแหล่งกำเนิดรังสี ณ ตำแหน่งที่ต้องการ ในการทดลองครั้งนี้วางห่างจากตัววัด 6.5 cm สำหรับกรณีหาประสิทธิภาพของเครื่องวัด เพื่อวัดฟลักซ์เทอร์โมอิเล็กตรอน และ 1.5 cm เพื่อวัดฟลักซ์นิวตรอนเร็ว บันทึกอัตรา จานวนนับ (c)

3.3 นำค่าที่ได้จากข้อ 3.1 มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสลาย (A) โดยอาศัยสมการ

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3.1)$$

เมื่อ t คือ ช่วงเวลาของการสลายจากเมื่อเริ่มผลิต จนถึงเวลาวัด
สัมประสิทธิ์การสลาย

λ คือ ค่าคงที่ของการสลาย มีค่าเท่ากับ $0.693/T_{1/2}$

นำค่าความเข้มสัมประสิทธิ์การสลายในปัจจุบัน และค่าที่วัดได้ในข้อ 3.2 มาคำนวณหา ประสิทธิภาพของเครื่องวัดที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ที่แหล่งกำเนิดรังสี ปลดปล่อยออกมา โดยอาศัยสมการที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 คือ

$$C = APE$$

$$\text{กัมมันตภาพ} \in = C/A.P \quad (3.2)$$

3.4 เขียนกราฟระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องวัด และระดับพลังงานของรังสี แกมมา โดยให้ประสิทธิภาพของเครื่องวัดเป็นแกนตั้ง ระดับพลังงานเป็นแกนนอน

4. การวัดฟลักซ์นิวตรอน

วิธีการทรวัดฟลักซ์นิวตรอนแบบแอคทีเวชัน เป็นวิธีที่อาศัยการหาปริมาณการของสารตัวอย่างซึ่งถูกเพิ่มยวณำ (Induced radioactivity) โดยใช้อุปกรณ์นิวตรอน แล้วนำมาคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนอีกทีหนึ่ง

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาฟลักซ์นิวตรอน

- (1) หลอดทผลาสติค ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.4 cm สูง 3 cm
- (2) แผ่นอินเดียม ขนาด $1 \times 2 \text{ cm}^2$ ใช้สำหรับวัดเทอร์มินิวตรอน
- (3) แผ่นอูรีเนียม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ใช้สำหรับวัด

นิวตรอนเร็ว

- (4) นาฬิกาจับเวลา

- (5) เครื่องวัดรังสีแกมมา ประกอบด้วยหัววัดผลึก NaI (Tl)

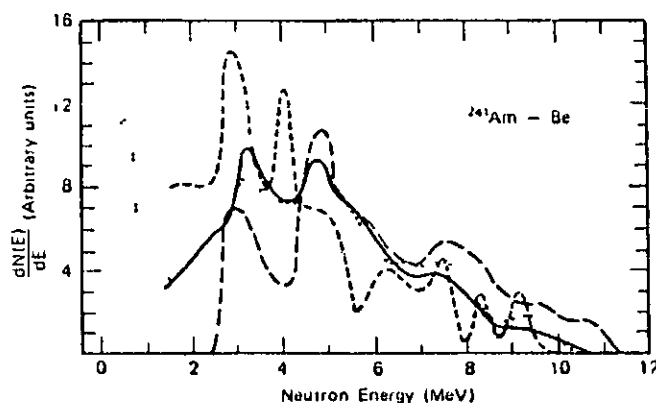
Model P - 2000 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ทน 1 นิ้ว เรสโซลูชัน

(Resolution) 7 ถึง 8.5 เปอร์เซ็นต์ ท้องจรรังภาพประมาณ 6 ในการทดสอบครั้งนี้ใช้ศักย์ไฟฟ้าสูง 1000 โวลต์

- (6) ทนกำเนิดนิวตรอน อเมอริเนียม - เบอริลเนียม ขนาด 5 Ci ปลอยนิวตรอนออกมา 1.1×10^7 นิวตรอน/วินาที พลังงานเฉลี่ย 4 MeV¹

- (7) ถังน้ำสำหรับเก็บทนกำเนิดนิวตรอนที่สร้างขึ้น รังภาพประมาณ 3

¹Proceedings of an advisory group meeting San Jose, Costa Rica
International Atomic energy Agency Vienna, February 1978, p. 9 - 13



ภาพประกอบ 9 กราฟแสดงระดับพลังงานต่าง ๆ ของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบอเมอริเซียม - เมอริดีเนียม (Experimental Reactor Physics, A. Profio. 1976 : 172)

4.2 ขั้นตอนของการตรวจวัดฟลักซ์นิวตรอน

- (1) ชั่งน้ำหนักหามวลของแผ่นอูมิเนียม และอินเดียม หากภาคการศึกษาทางค่าคงที่ของการสลาย ค่าความอุดม (Abundance) ของสารทั้งสองชนิดไว้
- (2) หย่อนที่รองรับที่มีแผ่นอินเดียม ลงในท่อสำหรับใส่สารตัวอย่างในระบับเกี่ยวกับกับต้นกำเนิดนิวตรอน ห่างกัน 3.2 cm เพื่อให้ไอพ่นของนิวตรอน สำหรับการวัดฟลักซ์นิวตรอนเร็วจะวางอูมิเนียมห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอน 1.5 cm โดยการหย่อนลงไปเพื่อให้ต้นกำเนิดนิวตรอน
- (3) นำแผ่น อูมิเนียม หรือแผ่นอินเดียม ที่อ่านนิวตรอนแล้วมาวัดหาอัตราจำนวนนับ บันทึกเวลาต่าง ๆ ให้ละเอียด
- (4) นำข้อมูลต่าง ๆ ข้างต้นมาคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอน โดยอาศัยสมการ (2.9) แล้วบันทึกไว้

- (5) ทำการทดลองตามข้อ (2) ถึงข้อ (4) หลาย ๆ ครั้ง นำค่าที่
ได้มาหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลิตภัณฑ์นิวตรอน
- (6) บันทึกค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของนิวตรอนผลิตภัณฑ์
พร้อมทั้งระยะระหว่างกันกำเนิดนิวตรอนกับตำแหน่งที่วัด

5. การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธี NAA.

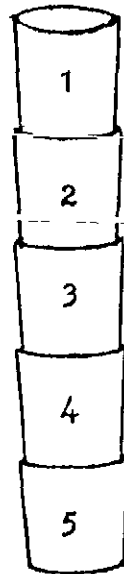
สำหรับการวิเคราะห์ครั้งนี้เป็นการทดสอบใช้ถึงน้ำสำหรับเก็บกักน้ำเกิดนิวตรอน
ที่สร้างขึ้นโดยการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบบไม่ทำลายด้วยวิธีทางเคมี (Non -
Destructive Neutron Activation Analysis) ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

5.1 ศึกษาคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ เช่น ศึกษา
ช่วงเวลาดังชีวิตไอโซโทปที่เกิดขึ้น หรือภาคกัมมันตรังสีสำหรับการเกิดปฏิกิริยานิวตรอน
ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเลือกตัววัดรังสี และกำหนดเวลาอบหรือวัดรังสีให้เหมาะสม
ในการทดลองครั้งนี้ เป็นการวิเคราะห์แมงกานีส (Mn) ในสารตัวอย่าง มังกานีสซัลเฟต
($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) มีแมงกานีสอยู่ 32.528 % สำหรับสารมาตรฐานใช้แมงกานีสไดออกไซด์
(MnO_2) มีส่วนประกอบของแมงกานีส 63.201 %

5.2 การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐานปฏิบัติดังนี้ นำหลอดพลาสติก
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 cm สูง 1.2 cm มาจำนวน 5 หลอด เขียนเลขที่ประจำตัว
หลอดแต่ละหลอด ซึ่งหมายเลขของหลอดบันทึกไว้อย่างละเอียดและถูกต้องตามที่
บรรจุสารตัวอย่างลงในหลอดที่ 1 2 4 และ 5 สำหรับหลอดที่ 3 บรรจุสารมาตรฐาน
จากนั้นนำมาซึ่งหาผลอีกครั้ง นำค่าที่ได้ไปหาผลต่างกับค่าที่ได้ในตอนแรก บันทึกผลต่าง
ที่ได้ไว้อย่างละเอียดและถูกต้อง ซึ่งค่านี้ก็คือมวลของสารที่บรรจุลงในหลอดนั่นเอง จากนี้

บิดฝาหลอดให้เรียบร้อยฉวยด้วยเครื่องฉวยให้ฝาหลอดกักแน่นกับหลอดเพื่อไม่ให้สิ่งอื่น
เข้าเจือปนหรือเนื้อสารหล่นหายไปได้

5.3 จากข้อ 5.2 นำหลอดทั้ง 5 มาเรียงลำดับ ดังภาพประกอบ 10
ใส่ลงในที่ทรงรับภาชนะใส่สารตัวอย่าง (ภาพประกอบ 4 ก.) จากนั้นหย่อนลงไป
เพื่อสำหรับใส่สารตัวอย่างให้อยู่ระดับเดียวกับก้านกำเนิดนิวตรอน และอยู่ห่างกัน 3.2 cm
เพื่อให้แอมเพอเมตริกนิวตรอน



ภาพประกอบ 10 หลอดใส่สารตัวอย่าง และสารมาตรฐาน

5.4 นำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่อานนิวตรอนแล้วมาวัดรังสี สำหรับ
เครื่องวัดรังสียังคงใช้ระบบการวัดเดิม แต่เปลี่ยนหัววัดให้ใหญ่ขึ้น ซึ่งมีขนาด $3'' \times 3''$
ที่มีประสิทธิภาพในการวัดดีกว่าแบบแรก ใช้ศักย์ไฟฟ้า 1000 โวลต์ บันทึกเก็บรวบรวม
ข้อมูลของแต่ละหลอดไว้

5.5 กำหนดหาอัตราการสลายกัมมันตภาพของแก๊สหลอด

5.6 กำหนดหาปริมาณรังสี และเปอร์เซ็นต์ของรังสีในสารแก๊สหลอด โดยใช้จากข้อ 5.2 และ 5.5 แทนลงในสมการ (2.8)

5.7 นำเปอร์เซ็นต์รังสีในสารตัวอย่างแก๊สหลอดมาหาลำเอียด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

5.8 ตรวจสอบความแม่นยำของการทดลอง โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง กับค่าเป็นจริง

บทที่ 4

การวิเคราะห์เชิงปริมาณและผลการทดลอง

1. การคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีแกมมา

เมื่อทำการคำนวณและวัดแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีมาตรฐาน ดังตาราง 3 ใน
บทที่ 3 ได้ผลดังตาราง 4 และ 5 ดังนี้

ตาราง 4 ความเข้มของรังสีขณะทำการวัด

แบบกำเนิด รังสีมาตรฐาน	ครึ่งชีวิต $T_{1/2}$ (Y)	ความเข้มของรังสีเมื่อ ก่อนเริ่มนับ A_0 (dps)	ความเข้มของรังสีขณะทำการวัด A (dps)
Am^{241}	432.58	41.74×10^4	41.00×10^4
Cs^{137}	30.17	38.11×10^4	29.04×10^4
Co^{60}	5.27	38.74×10^4	9.02×10^4
Na^{22}	2.60	40.99×10^4	2.14×10^4

ตาราง 5 อัตราการสลายรังสีที่เครื่องวัดรังสีสามารถวัดได้ โดยวางห่างจากหัววัด
6.5 cm

แหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐาน	ระดับพลังงาน E_γ (keV)	อัตราการสลายรังสีที่วัดได้ C (cps)
Am^{241}	59.57	2381.48
Cs^{137}	661.64	729.37
Co^{60}	1173.23	98.33
	1332.46	- 66.66
Na^{22}	1274.60	23.56

จากตาราง 3 4 และ 5 นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของหัววัดตามสมการ
(3.2) จะได้อัตราการวัด 6 และ 7

ตาราง 6 ประสิทธิภาพของเครื่องวัดที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

แหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐาน	ระดับพลังงาน E_γ (keV)	ประสิทธิภาพของเครื่องวัด ϵ (%)
Am^{241}	59.57	1.6134
Cs^{137}	661.64	0.2918
Co^{60}	1173.23	0.1092
	1332.46	0.0954
Na^{22}	1274.60	0.1102

สำหรับการหาประสิทธิภาพของเครื่องวัดเพื่อนำไปคำนวณฟลักซ์นิวตรอนเร็วได้ผล
ดังต่อไปนี้

ตาราง 7 ประสิทธิภาพของเครื่องวัดที่ระดับพลังงานต่าง ๆ โดยวางห่างจากหัววัด
1.5 cm.

แหล่งกำเนิด รังสีมาตรฐาน	อัตราการส่ายรังสีที่วัดได้ C (cps)	ระดับพลังงาน (keV)	ประสิทธิภาพของเครื่องวัด (%)
Au ²⁴¹	21130.73	59.57	14.31976
Cs ¹³⁷	6792.89	661.64	2.71775
Co ⁶⁰	737.57	1173.23	0.81881
	509.19	1332.46	0.56465
Na ²²	147.88	1274.60	0.69169

เนื่องจากพลังงานของรังสีแกมมาและประสิทธิภาพของเครื่องวัดมีความสัมพันธ์
เชิงเส้นโค้งแบบโพลีโนเมียล ซึ่งมีรูปแบบการทั่วไป ดังนี้

$$\epsilon(E_\gamma) = \sum_{n=0}^m A_n E_\gamma^n$$

ดังนั้น นำค่าจากตาราง 6 และ 7 ซึ่งแต่ละตารางมี 5 จุด มาแก้สมการ
โพลีโนเมียล และพิจารณาถึงอันดับ 3 จะได้

$$E = 1.8549 - 4.2630 \times 10^3 \times E_\gamma + 3.5248 \times 10^6 \times E_\gamma^2 - 3.6671 \times 10^{10} \times E_\gamma^3$$

และ

$$E = 16.4114 - 0.03689 \times E_\gamma + 3.01138 \times 10^5 \times E_\gamma^2 - 8.51499 \times 10^9 \times E_\gamma^3$$

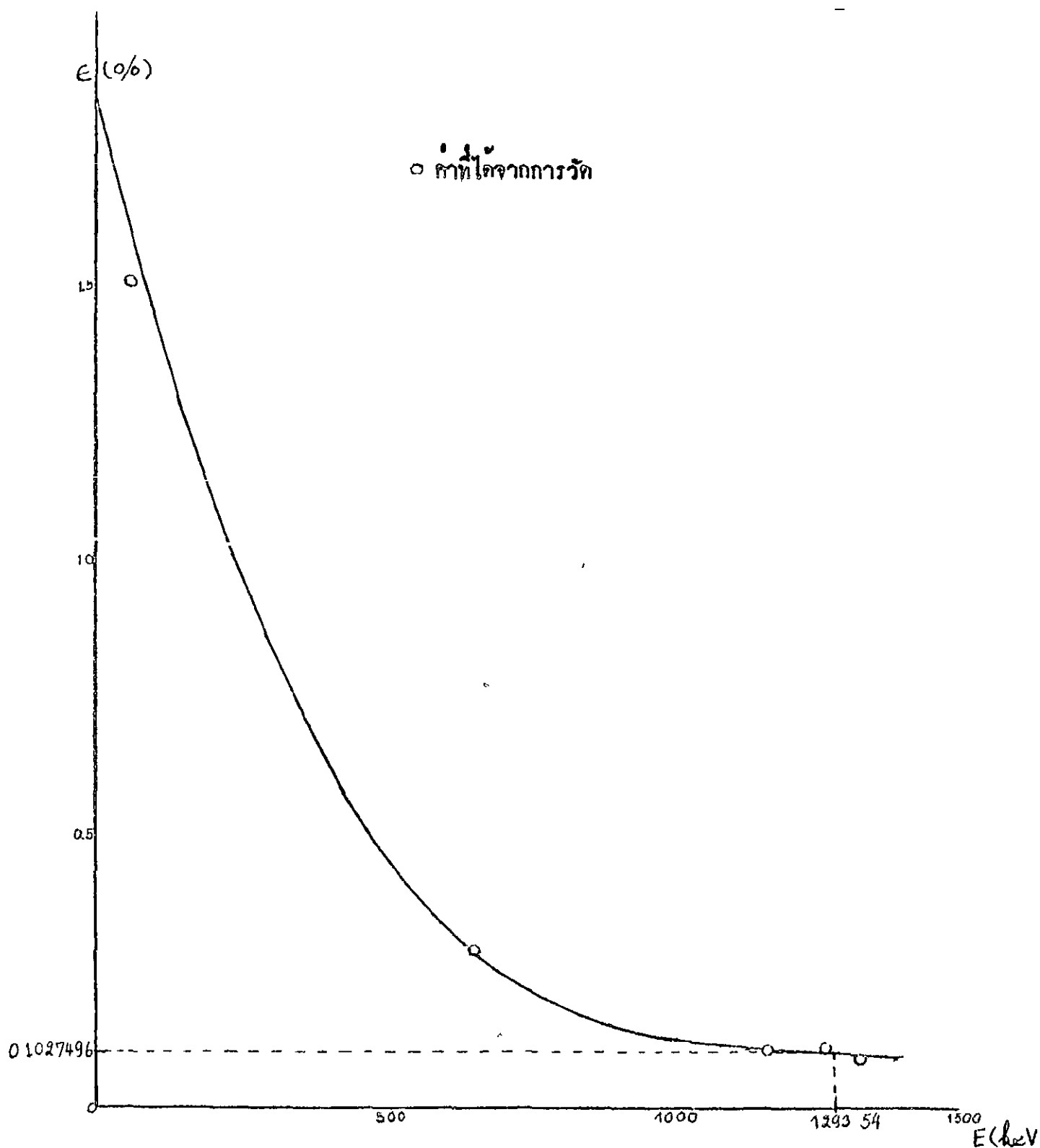
ตามลำดับ นำสมการนี้ไปเขียนกราฟ จะได้ถึงภาพประกอบ 11 และ 12

2. การคำนวณฟลักซ์นิวตรอน

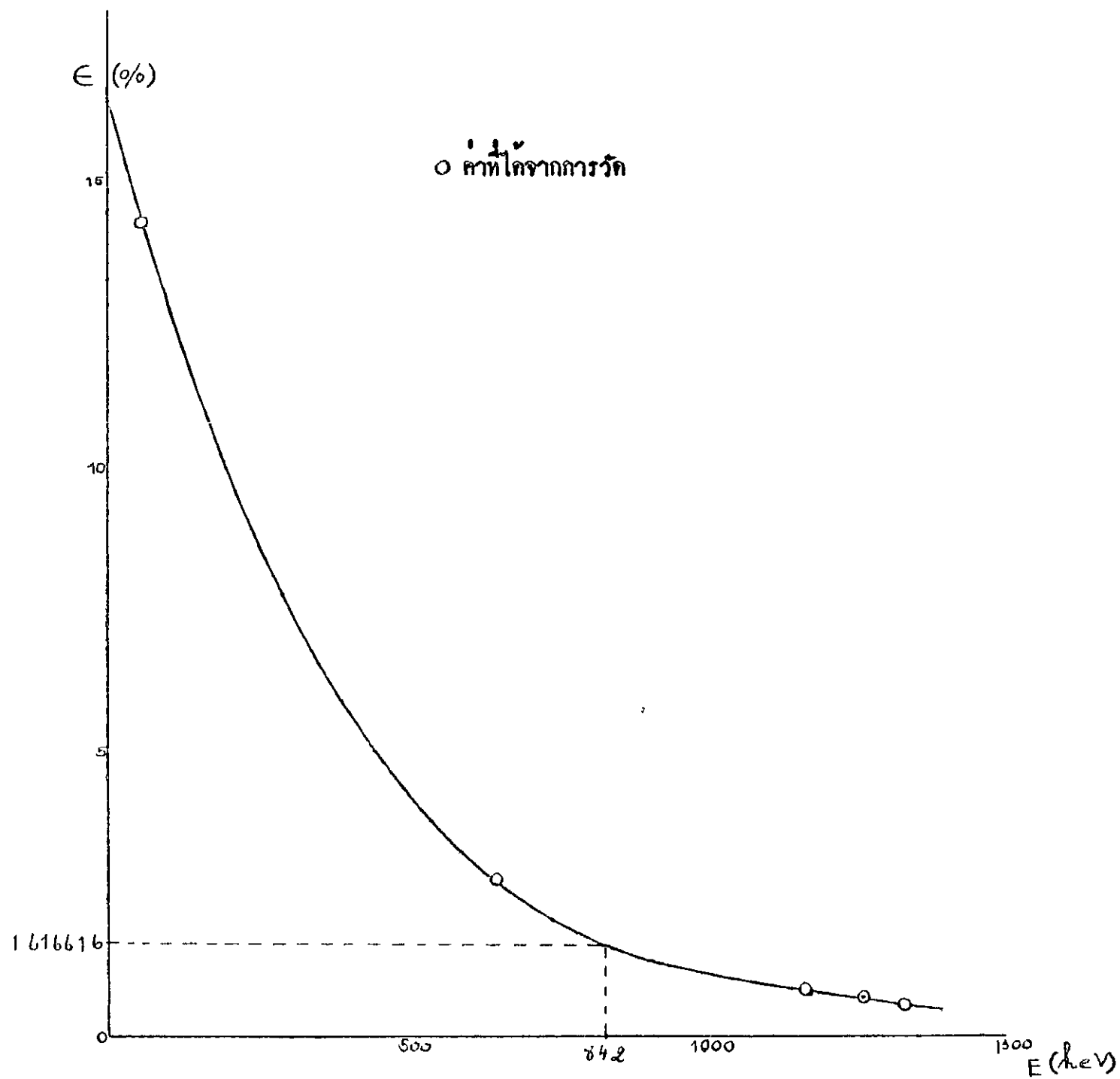
2.1 การคำนวณหาฟลักซ์เทอร์มัลนิวตรอน

อินเดียม - 115 (In^{115}) ทำปฏิกิริยา (n, γ) กับเทอร์มัลนิวตรอนจะได้
อินเดียม - 116 m (In^{116m}) มีครึ่งชีวิต 54 นาที $\sigma_{\text{act}} = 65$ บาร์น สลายตัวให้
แอมพลิงงาน 1293.54 keV 84.4 %, 1097.3 keV 56.2 % และได้อินเดียม - 116
(In^{116}) ครึ่งชีวิต 13 วินาที $\sigma_{\text{act}} = 52$ บาร์น จะเห็นว่าแอมพลิงงาน 1293.54 keV
เป็นระดับพลังงานที่น่าสนใจที่สุด เพราะมีค่ามากทั้งขวางและเปอร์ เซนตของการสลายตัวมากกว่า

ในการวัดฟลักซ์เทอร์มัลนิวตรอนในตอนแรกจะวัดที่หอ A (ภาพประกอบ 3)
ใช้เวลาอบนิวตรอน 3 ชั่วโมง ทั้งไว้นิวตรอน 2.5 นาที เพื่อให้อินเดียม - 116
สลายตัวหมด ทั้งนี้ วัดรังสีที่ได้จากอินเดียม - 116 m เท่านั้น โดยมีรายละเอียด
ดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 11 ประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีที่ระดับพลังงานต่าง ๆ เมื่อวัดที่ระยะห่างจาก
หัววัด 6.5 cm



ภาพประกอบ 12 ประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีที่ระดับพลังงานต่าง ๆ เมื่อวัดที่ระยะห่างจากหัววัด 1.5 cm

ครึ่งชีวิต	$T_{1/2}$	=	54 นาที
ดังนั้น ค่าคงที่ของการสลาย	λ	=	$0.693/54 \text{ (นาที)}^{-1}$ หรือ $0.01283 \text{ (นาดี)}^{-1}$
เวลายานทั้งหมด	t	=	3 ชั่วโมง หรือ 180 นาที
เวลาทิ้งไว้ก่อนวัด	t'	=	2.5 นาที
มวลของแผ่นอินเดียม	m	=	0.3090 กรัม
มวลอะตอมของอินเดียม	M	=	114.94
เลขอาโวกาโดร	N_0	=	6.02×10^{23} นิวเคลียส/โมล
เปอร์เซ็นต์ความอุดม	B	=	95.8 % หรือ (0.958)
เปอร์เซ็นต์ของการสลายตัวพลังงาน			1293.54 keV
	ϵ	=	84.4 % หรือ (0.844)

ประสิทธิภาพของเครื่องวัดที่ระดับพลังงาน 1293.54 keV ซึ่งอ่านจากกราฟ ภาพประกอบที่ 11 เท่ากับ

$$\epsilon = 0.1027496 \% \text{ หรือ } (10.27496 \times 10^{-4})$$

ภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยา (n, γ) กับเทอร์มินิวตรอน

$$\sigma_{act} = 65 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

และอัตราการสลายรังสีที่เครื่องสามารถวัดได้ $C = 2.48 \text{ cps}$

แทนลงในสมการ (2.9) จะได้เสถียรของเทอร์มินิวตรอนเท่ากับ

$$\phi = 3.25 \times 10^4 \text{ n / cm}^2 - \text{sec}$$

เมื่อทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง จะได้ผลทั้งการวาง 8

ตาราง 8 พลิกซ์ของเทอร์มัลนิวตรอนวัดจากแท่ง A ซึ่งห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน
3.2 cm

หมายเลข ทรงท	อัตราการสลายรังสีที่วัดได้ (cps)	พลิกซ์เทอร์มัลนิวตรอน (n/cm ² - sec)
1	2.48	3.25×10^4
2	2.37	3.11×10^4
3	2.46	3.23×10^4
4	2.61	3.42×10^4
5	2.39	3.13×10^4
		$(3.23 \pm 0.12) \times 10^4$

ตาราง 9 พลิกซ์ของเทอร์มัลนิวตรอนที่จากท่อ B ซึ่งห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 3.2 cm

รูปร่างท่อ	อัตราการสลายรังสีที่วัดได้ (cps)	พลิกซ์เทอร์มัลนิวตรอน ($n/cm^2 - sec$)
1	2.16	2.84×10^4
2	2.43	3.19×10^4
3	1.99	2.61×10^4
4	1.91	2.50×10^4
5	2.14	2.81×10^4
		$(2.79 \pm 0.24) \times 10^4$

2.2 การคำนวณหาพลิกซ์นิวตรอนเร็ว

การหาพลิกซ์นิวตรอนเร็วโดยวางแผนอุณหภูมิเนยมน้ำห่างจากแกนกำเนิด 1.5 cm
 ณ ตำแหน่งนี้จะมีทั้งเทอร์มัลนิวตรอนและนิวตรอนเร็ว ดังนั้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีทั้ง
 (n, γ) และ (n, p) อุณหภูมิเนยมน้ำ - 27 ทำปฏิกิริยา (n, p) ได้ มิกนีเซียม - 27
 แล้วให้เบก้า และแผนมการวัดพลังงาน 1013 keV 28 % และ 842 keV 71.8 %

ครึ่งชีวิต 9.5 นาที สำหรับปฏิกิริยา (n, γ) โดสมัมเนียม - 28 ให้อนุมาระดับพลังงาน 178 keV 100 % ครึ่งชีวิต 2.30 นาที

เนื่องจากค่าภาคตัดขวางสำหรับการเกิดปฏิกิริยา (n, p) มีค่าไม่มาก ถึงภาพประกอบ 13 และมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยา (n, γ) ดังนั้น ในการทดลองครั้งนี้จึงวางแผ่นโดสมัมเนียมอยู่ห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนเพียง 1.5 cm และเมื่อวัดครึ่งชีวิตจะวางห่างจากหัววัด 1.5 cm ใช้เวลาอ่านนิวตรอนทั้งสิ้น 120 นาที เลือกวัดที่ระดับพลังงาน 842 keV ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ครึ่งชีวิต} \quad T_{1/2} &= 9.5 \text{ นาที} \\ \text{ดังนั้น ค่าคงที่ของการสลาย} \quad \lambda &= 0.693/9.5 \text{ (นาที)}^{-1} \\ &\text{หรือ } 0.07295 \text{ (นาที)}^{-1} \end{aligned}$$

$$\text{เวลาอ่านทั้งหมด} \quad t = 120 \text{ นาที}$$

$$\text{เวลาตั้งไว้อ่อนวัด} \quad t' = 2 \text{ นาที}$$

$$\text{มวลของแผ่นโดสมัมเนียม} \quad m = 1.3919 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลอะตอมของโดสมัมเนียม} \quad M = 26.99$$

$$\text{เลขอาโวกาโดร} \quad N_0 = 6.02 \times 10^{23} \text{ โมเลกุล/โมล}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความอุดม} \quad B = 100 \% \text{ หรือ } (1)$$

เปอร์เซ็นต์ของการสลายตัวของพลังงาน 842 keV

$$P = 71.8 \% \text{ หรือ } (0.718)$$

ประสิทธิภาพของเครื่องวัดที่ระดับพลังงาน 842 keV ซึ่งอ่านจากกราฟภาพประกอบ 12 เท่ากับ

$$\epsilon = 1.616616 \% \text{ หรือ } (16.16616 \times 10^{-3})$$

ภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยา (n, p) ที่ระดับพลังงาน 4 MeV จากกราฟภาพประกอบ 13 เท่ากับ

$$\sigma_{\text{act}} = 5.2 \times 10^{-27} \text{ cm}^2$$

และอัตราการสลายรังสีที่เครื่องสามารถวัดได้ $C = 0.48 \text{ cps}$

แทนลงในสมการ (2.9) จะได้ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วเท่ากับ

$$\phi = 2.84 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 - \text{sec}$$

เมื่อทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง จะได้ผลดังตาราง 10

ตาราง 10 ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ระยะห่างจากจุดกำเนิดนิวตรอน 1.5 cm

ครั้งที่	อัตราการสลายรังสีที่วัดได้ (cps)	ฟลักซ์นิวตรอนเร็ว (n/cm ² - sec)
1	0.48	2.84×10^5
2	0.38	2.78×10^5
3	0.57	3.38×10^5
4	0.49	2.91×10^5
5	0.55	3.30×10^5
		$(3.04 \pm 0.25) \times 10^5$

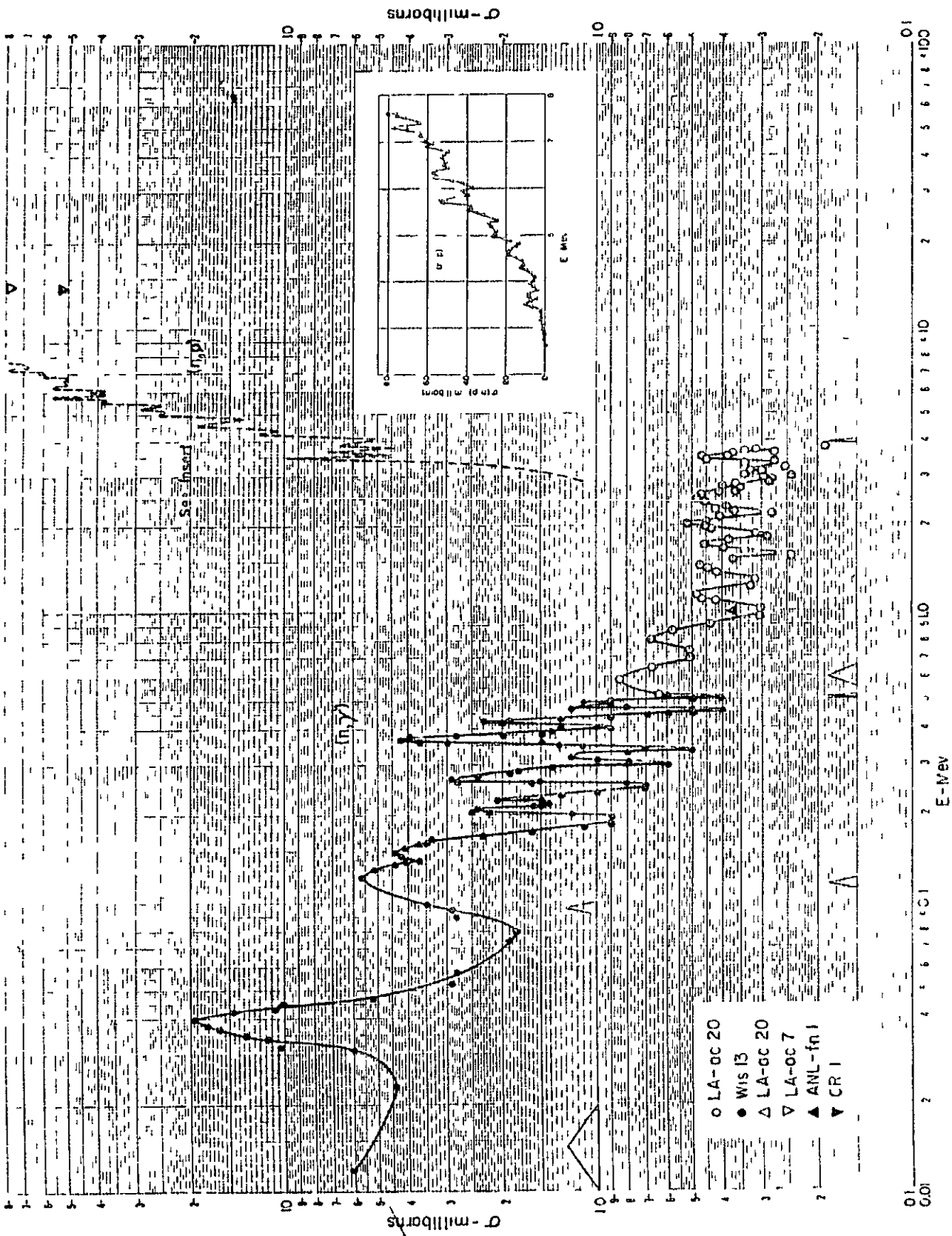


TABLE 11 Activation Cross-section

(Values are given in barns for 0.025 ev neutrons)

Element	σ_{act}	Half Life and mass number of activity formed	Element	σ_{act}	Half Life and mass number of activity formed
A	0.53	110 min A^{51}	Mg	0.050	5.6 min Mg^{27}
Ag	44	2.3 min Ag^{108}	Ni	13	2.59 hr Ni^{66}
	110	24 sec Ag^{110}	Mo	0.14	67 hr Mo^{99}
Al	0.21	2.4 min Al^{28}		0.20	15 min Mo^{101}
As	4.2	26.8 hr As^{76}	Na	0.49	15.0 hr Na^{24}
Au	94	2.7 days Au^{198}	Nd	3.3	1.7 hr Nd^{140}
Ba	0.5	80 min Ba^{130}	Ni	2.6	2.6 hr Ni^{66}
Bi	0.017	6.0 days Bi^{210}	Os	8	15 days Os^{190}
Br	2.9	4.4 hr Br^{80}		1.6	31.0 hr Os^{192}
	8.5	18 min Br^{80}	P	0.19	14.3 days P^{32}
	3.5	36 hr Br^{82}	Pb	6×10^{-4}	3.3 hr Pb^{206}
C	0.001	5700 yr C^{14}	Pd	11	13 hr Pd^{109}
Cd	0.2	48 min Cd^{111}		0.4	26 min Pd^{111}
	1.1	2.3 days Cd^{113}	Pt	1.1	18 hr Pt^{197}
	1.4	2.7 hr Cd^{117}		3.9	31 min Pt^{199}
Ce	1.0	33 hr Ce^{140}	Rb	0.12	17.5 min Rb^{86}
Cl	0.56	38 min Cl^{36}	Rh	140	44 sec Rh^{104}
Co	14	10.7 min Co^{60}		12	4.3 min Rh^{106}
Cr	11	26.5 days Cr^{51}	Ru	0.7	4 hr Ru^{106}
Cu	3.0	12.9 hr Cu^{64}	Sb	6.8	2.8 days Sb^{123}
	1.8	1.3 min Cu^{66}	Sc	12	85 days Sc^{44}
F	0.009	12 sec F^{18}	Se	3×10^{-4}	59 min Se^{81}
Fe	0.7	17 days Fe^{59}		0.5	17 min Se^{83}
Ga	1.4	20 min Ga^{70}	Si	0.12	170 min Si^{31}
	3.4	14.1 hr Ga^{72}	Sn	0.2	10 min Sn^{126}
Ge	0.45	82 min Ge^{76}	Sr	1.4	2.7 hr Sr^{87}
	0.2	12 hr Ge^{77}	Ta	0.030	16.4 min Ta^{182}
	0.030	59 sec Ge^{77}	Th	7.0	23.3 min Th^{231}
H	0.0006	12 yr H^1	Ti	0.8	9.3 hr Ti^{62}
Hf	10	46 days Hf^{181}		0.13	72 min Ti^{64}
Hg	3.0	44 days Hg^{203}		0.2	25 min Ti^{66}
	0.43	5.5 min Hg^{206}	Tl	0.14	6 min Tl^{81}
I	7	27 min I^{131}	V	1.5	3.9 min V^{51}
In	145	54 min In^{115}	W	40	25 hr W^{187}
Ir	200	1.1 min Ir^{192}	Xc	0.2	9.2 hr Xc^{133}
	130	19 hr Ir^{194}		0.15	3.9 min Xc^{137}
K	1.0	12.4 hr K^{42}	Y	1.2	61 hr Y^{90}
Kr	0.10	4.4 hr Kr^{83}		5.5	1.8 hr Yb^{177}
	0.060	78 min Kr^{87}	Zn	1.0	52 min Zn^{69}
La	8.4	40 hr La^{140}	Zr	0.2	17 hr Zr^{97}
Li	0.033	0.89 sec Li^8			
Lu	35	1.7 hr Lu^{176}			
	4000	6.7 days Lu^{177}			

3. ผลการวิเคราะห์หาค่ายวิธี NAA.

สารตัวอย่างมังกานีสซึ่งผลิตขึ้นในหลอดของน้ำรวมตัวอยู่ ประกอบด้วยมังกานีส ซัลเฟต ออกซิเจน และไฮโดรเจน โคบอลต์ - 55 (Mn^{55}) ทำปฏิกิริยา (n, γ) กับมังกานีส - 56 (Mn^{56}) มีภาคครึ่งทาง 13.2 นาที ให้แกมมาพลังงาน 846.75 keV 98.9 % ครึ่งชีวิต 2.57 ชั่วโมง ซัลเฟต - 36 (S^{36}) ทำปฏิกิริยา (n, γ) กับซัลเฟต - 37 (S^{37}) มีภาคครึ่งทาง 0.53 นาที ให้แกมมา พลังงาน 3103 keV ครึ่งชีวิต 5.05 นาที ออกซิเจน และไฮโดรเจน ในรูปของน้ำไม่ก่อปัญหาสำหรับการเกิดปฏิกิริยากับเทอร์มัลนิวตรอน ดังนั้น การหาพีค (peak) ที่มีระดับพลังงาน 846.75 keV ของมังกานีสจึงไม่มีปัญหาย่างยาก ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ตามตาราง 12 13 และ 14 โดยนำค่าจากตาราง 12 และ 13 แทนลงในสมการ (2.8) จะได้ผลตามตาราง 14

ตาราง 12 มวลของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่บรรจุในภาชนะ

หลอดที่	มวลภาชนะ (กรัม)	มวลภาชนะและสาร (กรัม)	สาร (กรัม)
1	0.54624	1.44763	0.90139
2	0.54375	1.47610	0.93235
3 (สารมาตรฐาน)	0.52553	1.70809	1.18256
4	0.60249	1.57138	0.96889
5	0.57228	1.47846	0.90618

ภาพ 13 ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าความเข้มและสามารถนำมาใช้

ลำดับ หมายเลข	Total count (1200 วินาที)	Background (1200 วินาที)	Peak Area (1200 วินาที)	อัตราการสลายรังสี (cps)	เวลาผ่านไป ก่อนวัด (วินาที)
1	16522	4247	12275	$10.23 \pm 1.47^*$	120
2	14524	3909	10615	$8.85 \pm 1.28^*$	2580
3 (สารมาตรฐาน)	25336	4376	20958	$17.47 \pm 0.83^*$	5040
4	14680	4244	10436	$8.70 \pm 1.32^*$	3810
5	14540	4063	10477	$8.73 \pm 1.30^*$	1350

* 1σ standard deviation ของค่าที่วัดได้เนื่องจาก counting statistics

ตาราง 14 เปอร์เซนต์ของมังกานีสในสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้

หอยกที่	มวลของ Mn ในสารตัวอย่าง (กรัม)	% ของ Mn ในสารตัวอย่าง
1	0.3028	33.60
2	0.3148	33.77
4	0.3194	35.03
5	0.2834	31.28
		$33.42 \pm 1.35\%$

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

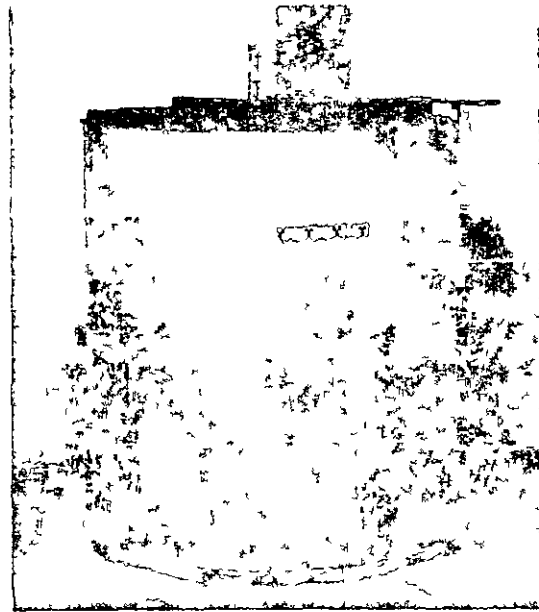
สรุป

การออกแบบและสร้างถังน้ำสำหรับ เก็บกักน้ำเนคนิวทอนนี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้าง เป็นอุปกรณ์ใช้ในการทดลองทางคานินว เคมีร์ฟิสิกส์ วิธีการในการสร้างแบ่งออกเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

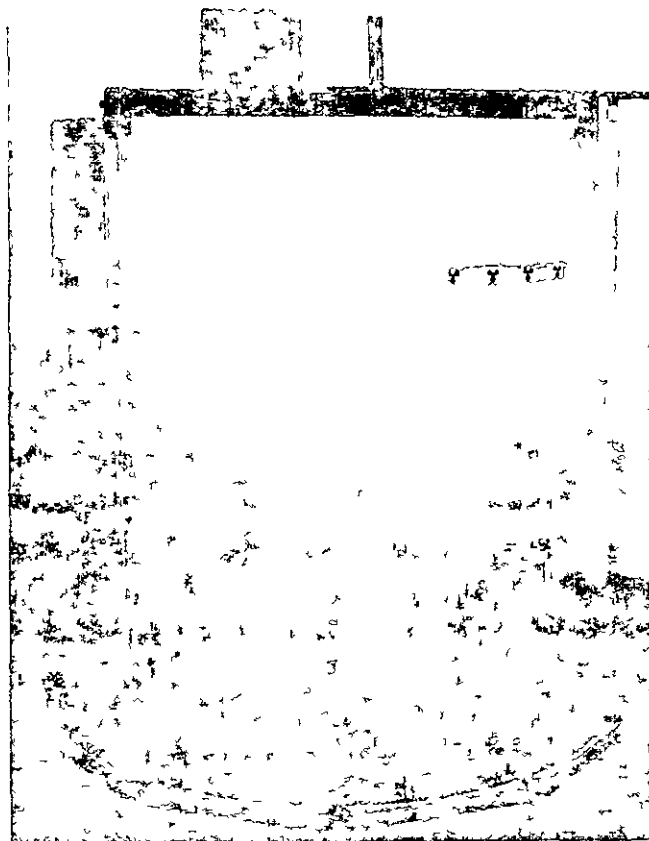
1. การออกแบบซึ่งจะต้องให้ไ้ขนาดพอเหมาะ สะดวกในการใช้งาน และปลอดภัยสำหรับผู้ใช้
2. การเลือกวัสดุในการก่อสร้าง จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยไว้ก่อน ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับนิวทอน และรังสีจากกัมมาเนคนิวทอนตลอดเวลา
3. การลงมือก่อสร้าง ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการสร้างถังน้ำ ขั้นตอนที่สองเป็นการสร้างอุปกรณ์ภายในถัง เช่น ท่อใส่สารตัวอย่าง ท่อใส่กัมมาเนคนิวทอน เป็นต้น
4. การเลือกเข้บายกัมมาเนคนิวทอนเข้าในท่อสำหรับใส่กัมมาเนคนิวทอน และการตรวจวัดรังสีรณ ๆ บริเวณถังน้ำเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่ก่อให้เกิดอันตรายกับผู้ใช้งาน และผู้ที่อยู่ใกล้เคียง สำหรับขั้นตอนนี้ได้รับการอนุเคราะห์จากเจ้าหน้าที่ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติมาทำการ เคลื่อนย้าย และตรวจวัดรังสีให้

เมื่อทำการก่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ได้ผลิตถังภาพประกอบ 14

สำหรับการตรวจวัดหลักกัมมาเนคนิวทอนภายในถังน้ำ ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และ 4 ได้ผลิตถังนี้ ผลิตเพื่อรณนิวทอนที่ระยะห่างจากกัมมาเนคนิวทอน



ก. ภาพถ่ายในระยะใกล้



ข. ภาพถ่ายในระยะใกล้

3.2 cm วัดจากท่อ A (ภาพประกอบ 3) มีค่าเท่ากับ $(3.23 \pm 0.12) \times 10^4$ n/cm² - sec วัดจากท่อ B มีค่าเท่ากับ $(2.79 \pm 0.24) \times 10^4$ n/cm² - sec
 ฟลักซ์นิวตรอนเร็ว วัดที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอน 1.5 cm ภายในท่อใส่ต้นกำเนิดนิวตรอน มีค่าเท่ากับ $(3.04 \pm 0.25) \times 10^5$ n/cm² - sec และในการวิเคราะห์มังกานีสในสารตัวอย่างมังกานีสซัลเฟต ได้ส่วนผสมของมังกานีส $33.42 \pm 1.35\%$

อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในการตรวจวัดฟลักซ์เทอร์มัลนิวตรอน เป็นการวัดที่ระยะใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนที่สุด สำหรับชุดเครื่องมือที่สร้างขึ้นซึ่งก็คือตำแหน่งที่จะให้เทอร์มัลนิวตรอนมากที่สุด ส่วนการวัดฟลักซ์นิวตรอนเร็วจะเป็นท้องว่างแผ่นอคูมีเนียมห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนเพียง 1.5 cm เพราะสาเหตุประการหนึ่งนอกเหนือจากประสิทธิภาพ คุณภาพ ของเครื่องวัดรังสีแล้ว ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้มีขนาดความแรงเพียง 5 Ci ซึ่งถือว่าไม่มากนัก สำหรับการวัดฟลักซ์นิวตรอนเร็ว ทางด้านการวิเคราะห์มังกานีสในสารตัวอย่างได้ส่วนผสมของมังกานีส $33.42 \pm 1.35\%$ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริง (32.528%) มีความแตกต่างอยู่ 2.75% นอกจากนั้น จากตาราง 14 ยังสังเกตเห็นว่า หลอดที่ 1 และหลอดที่ 5 ซึ่งเป็นหลอดที่อยู่บนสุดและล่างสุดตามลำดับ จะมีส่วนผสมของมังกานีสที่หาได้น้อยกว่าหลอดที่อยู่กลาง ๆ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากได้รับฟลักซ์เทอร์มัลนิวตรอนไม่เท่ากัน สำหรับนาอุปกรณ์หรือถึงนำสำหรับเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนไปใช้งาน ควรคำนึงถึงสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้

1. ในการใช้งานทุกครั้ง ระวังอย่าไม่ควรต่ำกว่าขอบด้งด้านบน 10 cm ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อชักต้นกำเนิดนิวตรอนขึ้นใช้งาน ต้นกำเนิดนิวตรอนจะอยู่ระดับลึกลงไปเพียง 21.5 cm ถ้าระดับนำต่ำกว่านี้อาจก่อให้เกิดอันตรายสำหรับผู้ใช้นี้

2. ดึงน้ำสำหรับเก็บคั้นกาเนคนิวตรอนที่สร้างขึ้นนี้ได้รับการตรวจวักระดับรังสีบริเวณรอบ ๆ ดึงน้ำจากเจ้าหน้าที่ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติแล้ว ปรากฏว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย ทั้งนี้ก็ไม่ควรประมาท โดยเฉพาะค่านบนของดึงเมื่อมีการอาบรังสีอยู่ ควรมีความระมัดระวัง

3. ควรวางหรือใส่สารตัวอย่างลง ณ ตำแหน่งที่ต้องการอาบนิวตรอนให้เรียบร้อยก่อนชักคั้นกาเนคนิวตรอนขึ้น

4. ในการนำสารที่อาบนิวตรอนแล้วไปวัดรังสีที่เครื่องวัด ซึ่งอยู่ชั้นสี่ของตึกจะต้องใช้เวลาอย่างน้อยประมาณ 2 นาที ดังนั้น สารที่จะนำไปอาบควรคำนึงถึงเรื่องนี้

5. สำหรับการหาพลั๊กซ์ของนิวตรอน ค่าที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากประสิทธิภาพของหัววัดที่หาได้ยังไม่ถูกต้องเพียงพอ โดยแหล่งกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานที่มีอยู่สลายรังสีแกมมาที่มีพลังงานไม่ครบทุกช่วงที่ต้องการ

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- จิตปราณี เกียรติกุล การศึกษาความเหมาะสมผลของการอาบรังสีด้วยทันทาเบกนิวตรอน
พลูโคเนียม - แอร์ลิเดียม วิทยานิพนธ์ วศ.ม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2520,
63 หน้า อักสาเนา
- บรรจบ สุขประเสริฐ การวิเคราะห์หินและแร่ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน วิทยานิพนธ์
วท.ม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2508, 48 หน้า อักสาเนา
- ประสาธ อุณณ์ ภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์ของการกระเจิงแบบยืดหยุ่น ณ 0.344 และ
1.408 MeV ของรังสีแกมมาจากยูโรเนียม - 152 โดยทองแดง วิทยานิพนธ์
กศ.ม. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร 2522, 102 หน้า อักสาเนา
- ปรีชา เทียนสมประสงค์ การกระจายของนิวตรอนจากตัวกำเนิดขนาดจุดในน้ำ
วิทยานิพนธ์ วศ.ม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2517, 61 หน้า อักสาเนา
- ปรีชาญ เกษศรี การหาปริมาณของยูเรเนียมและซอเรียมในแร่โดยเทคนิคการแอ็คทีเวชัน
นิวตรอน วิทยานิพนธ์ กศ.ม. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร 2522,
49 หน้า อักสาเนา
- เนาวรัตน์ เสรีเจริญสถิตย์ การวิเคราะห์สารหนูในข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ในประเทศไทย
โดยใช้วิธีนิวตรอนแอคติเวชัน วิทยานิพนธ์ วศ.ม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2520,
59 หน้า อักสาเนา
- ทนง อัครธีรานนท์ การป้องกันนิวตรอน วิทยานิพนธ์ กศ.ม. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ประสานมิตร 2521, 68 หน้า อักสาเนา
- ศรีชน วรศักดิ์โยธิน Radiation Physics (รังสีฟิสิกส์) ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2522, 236 หน้า
- สนั่น วีระพงษ์ การใช้นิวตรอนที่วิ่งเร็วจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ในการวิเคราะห์
ไทเทเนียม และเหล็กแบบนิวตรอนแอ็คทีเวชัน วิทยานิพนธ์ วท.ม. จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย 2515, 47 หน้า อักสาเนา

สุนันทา ภัทรชากร การกระจายของนิวตรอนความเร็วสูงและความเร็วต่ำรอบ ๆ

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู วิทยานิพนธ์ วศ.ม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2517, 47 หน้า อักษรนา

สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ วารสารครบรอบ 20 ปี พลส. โรงพิมพ์คุรุสภา

ลาดพร้าว 2525, 95 หน้า

อรุณีย์ แสงอรียาวิช นิวเคลียร์ฟิสิกส์ ภาพวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย

ศรีนครินทรวิโรฒ 2525, 371 หน้า

A.E.S. Green., Nuclear Physics, The McGraw - Hill Book Company,
TOKYO, JAPAN, 1955, 535 p.

D.J. Huglies and J.A. Harvey., Neutron cross section, McGraw - Hill
Book Company, New York, 1955, p. 96 - 99.

G.F. Knoll., Radiation Detection and Measurement, John Wiley &
Sons, U.S.A., 1979, 816 p.

I. Celenk, F. Ozek. "Simultaneous Neutron Activation Determination
of Alumina and Silica in Geological Samples Using A 5 Ci Pu - Be
Source," Journal Radioanal. Nucl. Chem, Letters 85/2/,
1984 83 - 90.

I. Kaplan., Nuclear Physics, Addison - Wesley Publishing Company,
Massachusetts, 1979, 770 p.

Radiological Health Handbook. U.S. Department of Health, Education,
and Welfare Washington, D.C. U.S.A., 1960, p.468.

S. Glasstone and A. Sesonske., Nuclear Reactor Engineering,
D. Van Nostrand Co., New York, 1967, 830 p.

S. Glasstone and M.C. Edlund., The Element of Nuclear Reactor
Theory, D. Van Nostrand Co., New York, 1952, 416 p.

T.A. Littlefield and N. Thorley., Atomic and Nuclear Physics,
Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., London, 1979, 487 p.

T. Gotoh, N. Wakabayashi, Y. Kondo. "An Example For Activation
Analysis by Low - Level Radioisotope Neutron Source," Journal
of Radioanalytical Chemistry, Vol. 42, 1978 417 - 426.

R. Wehr and Adair., Physics of the Atom, Addison - Wesley
Publishing Company, Massachusetts, 1980, 525 p.

Y. Akkaramas., Neutron Measurement, Master's Thesis, Chulalongkorn
University, 1968, 53 p.