

การวิเคราะห์วิธีวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์ผ่านทอง
สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปปว.-1/1

ANALYSIS OF NEUTRON FLUX MEASUREMENT USING
GOLD FOIL ACTIVATION TECHNIQUE AT TRR-1/M1

สิริมา สระใบบาท
SIRIMA SABAIBANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-SC-M-000-000

การวิเคราะห์วิธีวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์แผ่นทอง
สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปว.-1/1

ANALYSIS OF NEUTRON FLUX MEASUREMENT USING
GOLD FOIL ACTIVATION TECHNIQUE AT TRR-1/M1

สิริมา สะไบบาง
SIRIMA SABAIBANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2557

KMITL-2014-SC-M-030-006

**ANALYSIS OF NEUTRON FLUX MEASUREMENT USING
GOLD FOIL ACTIVATION TECHNIQUE AT TRR-1/M1**

SIRIMA SABAIBANG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2014

KMITL-2014-SC-M-030-006

COPYRIGHT 2014

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์วิธีวัดฟลักซ์ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์แผ่นทอง สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปว.-1/1
นักศึกษา	นางสาวสิริมา สะไบบาง
รหัสประจำตัว	53650612
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ชนาธิป ทิพยกุล

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยไทย (เครื่องปฏิกรณ์ปว.-1/1) ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์กับการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเทคนิคการวัดด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์ใช้แผ่นทองคำ แผ่นทองคำหุ้มแคดเมียมและแผ่นอะลูมิเนียมเป็นตัววัดนิวตรอนฟลักซ์ใน 3 ช่วงพลังงานคือเทอร์มัลนิวตรอน อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน และนิวตรอนเร็ว และการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้นำโปรแกรม MCNPX ซึ่งใช้เทคนิคมอนเตคาร์โลมาใช้ การศึกษานี้ทำการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม MCNPX กับผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งท่ออบรังสีซีทีซึ่งจัดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองได้สร้างแบบจำลองที่ศึกษาผลกระทบของค่านิวตรอนฟลักซ์ที่เปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนความหนาของวัสดุแต่ละชนิดด้วย ผลการทดลองการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MCNPX ได้ค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ อีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ และนิวตรอนเร็วฟลักซ์ดังนี้ 1.79×10^{13} 8.59×10^{12} และ 3.50×10^{12} neutron/cm²s ตามลำดับ และผลจากการวัดด้วยเทคนิคก่อกัมมันต์พบว่าค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ อีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์และนิวตรอนเร็วฟลักซ์เท่ากับ 4.68×10^{13} 3.21×10^{12} และ 3.93×10^{12} neutron/cm²s ตามลำดับและเมื่อเปรียบเทียบของทั้ง 2 วิธี จะพบว่ามีความแตกต่างของเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ อีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ และนิวตรอนเร็วฟลักซ์ที่ 61.75% 167.38% และ 10.81% ตามลำดับ

คำสำคัญ : เทคนิคการก่อกัมมันต์, โปรแกรมเอ็มซีเอ็นพี, เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยไทย

Thesis Title	Analysis Of Flux Measurement Using Gold Foil Activation Technique At TRR-1/M1
Student	Sirima Sabaibang
Student ID	53650612
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Sarai Lekchaum
Thesis Coadvisor	Dr. Chanatip Tippayakul

ABSTRACT

This study aims to perform the analysis of the foil activation technique which is the standard flux measurement method in Thai Research Reactor – 1/Modification 1 (TRR-1/M1) and also to compare the technique with the computer simulation. The foil activation technique uses gold foil, gold foil covered with cadmium and aluminum foil to measure the neutron flux in three energy ranges, i.e., thermal neutron, epi-thermal neutron and fast neutron. The neutron flux simulation was performed by the MCNPX computer program which uses the Monte Carlo method. The analysis compared the result of the MCNPX simulation with the result of the actual foil activation measurement for the central thimble which is located in the center of reactor core. In the analysis, the sensitivity of the measured neutron flux as a function of the foil thickness was studied. The thermal neutron flux, epi-thermal neutron flux and fast neutron flux from the MCNPX simulation were 1.79×10^{13} , 8.59×10^{12} and 3.50×10^{12} neutron/cm²s respectively. On the other hand, the thermal neutron flux, epi-thermal neutron flux and fast neutron flux from the foil activation measurement were 4.68×10^{13} , 3.21×10^{12} and 3.93×10^{12} neutron/cm²s respectively. When comparing both results, the differences of thermal neutron flux, epi-thermal neutron flux and fast neutron flux were found to be 67.8%, 167.4% and 10.8% respectively.

keywords : gold foil activation technique, MCNPX, TRR-1/M1

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาและวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากข้าพเจ้าได้รับความช่วยเหลือ ชี้นำจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่านดังมีรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ที่ควรให้คำชี้แนะ สั่งสอน ชัดกลางงานวิจัยเพื่อให้งานวิจัยออกมาสมบูรณ์มากที่สุด ตลอดจนคอยชี้นำการดำเนินชีวิตภายในรั้วสถาบันแห่งนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.ชนาริพ ทิพยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาวิธีการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งช่วยเปิดโลกทัศน์ของข้าพเจ้าในเทคโนโลยีนิวเคลียร์แก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ คุณนรินทร์ ผู้จัดการศูนย์เครื่องปฏิกรณ์ ดร.แสนสุข ดร.กนกรัตน์ คุณสุนันท์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องปฏิกรณ์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ที่ให้ความเมตตาในการเข้าไปทำวิจัยภายในสถาบัน และคอยให้คำปรึกษา แนะนำ การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้นำ และเสนอแนะแนวทางการแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภายในสาขาวิชาฟิสิกส์ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณ บิดา มารดา น้องสาว และบุคคลในครอบครัวของข้าพเจ้า ตลอดจนเพื่อนสนิทของข้าพเจ้า ที่คอยเป็นกำลังใจ แรงผลักดัน ให้ข้าพเจ้าทำงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

นางสาวสิริมา สะไบบาง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	IX
สารบัญตาราง	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 บทนำ	7
2.2 โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์	11
2.2.1 สระน้ำของเครื่องปฏิกรณ์ปว.-1/1	12
2.2.2 ส่วนประกอบของแกนเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์สนับสนุนเครื่องปฏิกรณ์	12
2.2.3 แผ่นเพลท และแผ่นความปลอดภัย	15
2.2.4 วัสดุเชื้อเพลิงและแท่งเชื้อเพลิง (Fuel)	18
2.2.4.1 คุณสมบัติของเนื้อเชื้อเพลิงและวัสดุหุ้มเนื้อเชื้อเพลิง	23
2.2.4.2 คุณสมบัติโลหะการของยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์	23
2.2.4.3 ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไฮไดรด์	26
2.2.5 แท่งควบคุม (Control rod)	29
2.2.6 แหล่งกำเนิดนิวตรอน (Neutron source)	29
2.2.6.1 นิวตรอน	29
2.2.6.2 แหล่งกำเนิดนิวตรอน	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.6.3 การจำแนกนิวตรอน	32
2.2.6.4 แหล่งกำเนิดนิวตรอนจากภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์	36
2.2.7 สะพานยึดเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor bridge)	39
2.2.8 เทอร์มัลคอลัมน์ และวอยแท็งก์ (Thermal column and Void tank)	39
2.2.9 ท่อนำนิวตรอน (Neutron beam ports)	40
2.2.10 สะพานเครื่องมือทดลอง (Instrument Bridge)	40
2.2.11 ที่เก็บเชื้อเพลิง (Fuel Storage Racks)	40
2.2.12 ท่ออาบรังสี	42
2.2.12.1 ท่ออาบรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์	42
2.2.12.2 ท่ออาบรังสีนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์	43
2.2.12.3 ท่ออาบรังสีโรตารี	43
2.2.12.4 ท่ออาบรังสีระบบนิวเมตริก	44
2.2.12.5 ท่ออาบรังสีท่อเปือก	47
2.2.12.6 ท่ออาบรังสีทั่วไป	48
2.2.12.7 ท่ออาบรังสีวอยแท็งก์	48
2.2.12.8 ท่ออาบรังสีพิเศษ	48
2.2.13 ระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1	49
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจัดการเครื่องปฏิกรณ์	50
2.3.1 ภาคตัดขวาง	51
2.3.2 ฟิชชัน	53
2.3.2.1 กลไกการเกิดฟิชชัน	54
2.3.2.2 ปฏิริยาฟิชชันกับนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่อง	55
2.3.2.3 ปฏิริยาการจับนิวตรอน	56
2.3.3 การออกแบบแกนเครื่องปฏิกรณ์	57
2.3.4 หลักการสับเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิง	61
2.3.5 สถานะที่เหมาะสมกับการเดินเครื่องปฏิกรณ์	65
2.4 โครงสร้างรหัสคอมพิวเตอร์เอ็มซีเอ็นพีเอ็กซ์ (MCNPX)	67
2.4.1 Title card	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 เซลล์การ์ด (Cell card)	69
2.4.3 การ์ดพื้นผิว (Surface card)	70
2.4.4 การ์ดกำหนดรายละเอียดอื่นๆ	70
2.4.4.1 Problem type หรือ Mode type	72
2.4.4.2 Tally specification	72
2.4.4.3 การ์ดสมบัติของวัสดุ (Material Specification Cards)	72
2.4.5 การประมวลผลแบบจำลองบนโปรแกรม MCNPX	74
2.4.6 ข้อมูลจำเพาะของ MCNPX	75
2.5 การวิเคราะห์เชิงกัมมันตรังสี (Neutron Activation Analysis)	77
2.5.1 การเลือกปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เหมาะสม	78
2.5.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับอาบรังสี	83
2.5.3 วัสดุที่หุ้มหรือภาชนะบรรจุ	83
2.5.4 การวิเคราะห์เชิงกัมมันตรังสี	83
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	90
3.1 การศึกษาการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการวัดนิวตรอนฟลักซ์	90
3.1.1 ความสัมพันธ์การตั้งแท่งควบคุมกับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1	92
3.2 วิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดยการประมวลผลการวิเคราะห์กัมมันต์ด้วยแบบจำลอง MCNPX	98
3.2.1 โปรแกรมที่เกี่ยวข้อง และการตั้งค่าคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลแบบจำลอง	98
3.2.2 วิธีการสร้างแบบจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ของโปรแกรม MCNPX	100
3.2.2.1 เพิ่มความหนาของแผ่นทองระหว่าง 500 – 800 μcm . และประมวลผลการจับนิวตรอนภายในแผ่นทอง	116
3.2.2.2 เพิ่มชุดคำสั่ง Tally Multiplier ในแบบจำลอง	120
3.2.2.3 ประมวลผลปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ในแต่ละระดับพลังงาน	122
3.2.2.4 แบ่งช่วงน้ำภายในท่ออาบรังสีซีที	124
3.2.2.5 เพิ่มชุดคำสั่ง SDn , FSn	129

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2.6	133
สร้างแบบจำลองแผ่นทองหุ้มด้วยดลัับแคดเมียม เพื่อทดสอบการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์	
3.2.2.7	134
สร้างแบบจำลองแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อหาค่านิวตรอนเร็วฟลักซ์	
3.2.2.8	141
สร้างแบบจำลองตามขนาดการทดลองวัดนิวตรอนฟลักซ์	
3.3	142
วิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดย Gold foil activation	
3.3.1	143
คุณสมบัติของวัสดุสำหรับวัดนิวตรอนฟลักซ์	
3.3.2	145
วิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยแผ่นทอง ดลัับแคดเมียม และแผ่นอะลูมิเนียม ภายในท่ออาบรังสีซีที	
3.3.3	149
การวัดเทอร์มัลนิวตรอนด้วยหัววัดนิวตรอนภายในเครื่อง ปปว.-1/1	
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	152
4.1	152
วิธีการประมวลผลการวิเคราะห์การก่อกัมมันต์ด้วยแบบจำลอง MCNPX	
4.1.1	154
ประมวลผลการจับนิวตรอนภายในแผ่นทอง โดยเพิ่มความหนาของ แผ่นทอง ระหว่าง 500 – 800 μcm .	
4.1.2	161
ประมวลผลหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วย Tally Multiplier ในแบบจำลอง	
4.1.3	167
ประมวลผลการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอน ในแต่ละระดับพลังงาน	
4.1.4	170
ประมวลผลปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของน้ำที่อยู่ภายในท่ออาบรังสีซีที เฉพาะช่วงความสูงของแผ่นทอง โดยเพิ่มชุดคำสั่ง SDn , FSn	
4.1.5	175
ประมวลผลปริมาณอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์โดยการสร้าง แบบจำลองแผ่นทองหุ้มด้วยดลัับแคดเมียม	
4.1.6	177
ประมวลผลปริมาณนิวตรอนเร็วฟลักซ์ โดยสร้างแบบจำลอง แผ่นอะลูมิเนียม	
4.2	180
วิเคราะห์ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดย Gold foil activation	
4.2.1	180
การวิเคราะห์การวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยเครื่องแกมมาสเปคโตรมิเตอร์	
4.2.2	185
การวิเคราะห์เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ด้วยหัววัดนิวตรอน (SPND)	
4.3	186
เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทั้งสองวิธี	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	191
5.1 วิจารณ์ผลการวิจัย	191
5.1.1 การวิเคราะห์นิวตรอนฟลักซ์จากแบบจำลองด้วยโปรแกรม MCNPX	191
5.1.1.1 ผลการจับนิวตรอนภายในแผ่นทองที่ความหนาระหว่าง 500 – 800 μcm .	192
5.1.1.2 ผลการประมวลผลอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วย Tally Multiplier	192
5.1.1.3 ผลการประมวลผลการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอน ในแต่ละระดับพลังงาน	192
5.1.1.4 ผลการประมวลผลปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของน้ำที่อยู่ ภายในอาบรังสีซีที	192
5.1.1.5 ผลการประมวลผลแบบจำลองแผ่นทองหุ้มแคดเมียม เพื่อหาค่าอิฟิเลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์	192
5.1.1.6 ผลการประมวลผลแบบจำลองแผ่นแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อหาค่านิวตรอนเร็วฟลักซ์	193
5.1.2 ผลการทดลองการอาบรังสีภายในท่ออาบรังสีซีที	193
5.1.3 ผลการเปรียบเทียบการวัดและวิเคราะห์การวัดนิวตรอนฟลักซ์ ด้วยแบบจำลองโปรแกรม MCNPX และการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายใน ท่ออาบรังสีซีที	193
5.2 สรุปผลการวิจัย	194
5.3 ข้อเสนอแนะ	195
เอกสารอ้างอิง	196
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. MCNP OVERVIEW	
ภาคผนวก ข. Continuous-Energy and Discrete Neutron Data Libraries Maintained by X-1 NAD	
ภาคผนวก ค. ENDF/B REACTION TYPES	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	4
2.1 คุณสมบัติเฉพาะของแท่งเชื้อเพลิง ภายในเครื่อง ปปว.-1/1	24
2.2 แสดงรายละเอียดของแท่งควบคุม	31
2.3 การแยกแยะแหล่งกำเนิดนิวตรอนของแอลฟา – เบริลเลียม	33
2.4 แสดงการจำแนกชนิดของนิวตรอน	35
2.5 รายละเอียดของการเกิดฟิชชันโดยนิวไคลด์ต่างๆ	54
2.6 แสดงค่า Power Peaking ที่เกิดขึ้นเมื่อจัดแกนในรูปแบบต่างๆ	63
2.7 สมบัติบางประการของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เมื่อทำปฏิกิริยากับเทอร์มัลนิวตรอน	66
2.8 รายละเอียดชุดคำสั่งของการ์ดพื้นผิว	71
2.9 รายละเอียดของการ์ด Tally	73
2.10 สมการการคำนวณของ Tally ต่างๆ	74
2.11 เงื่อนไขการเขียนชุดคำสั่งโปรแกรม MCNPX	76
2.12 เปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของปฏิกิริยานิวเคลียร์และปฏิกิริยาเคมี	79
2.13 ปฏิกิริยาการก่อกัมมันตภาพด้วยนิวตรอน	81
2.14 ปฏิกิริยาอนุภาคมีประจุ	82
2.15 ปฏิกิริยาโฟโตนิวเคลียร์	82
3.1 หาความหนาของแผ่นทอง 500 -800 μcm .	117
3.2 กำหนดความหนาเพื่อหาระนาบการตัดเพลท	123
3.3 ตารางไอโซโทปทอง	143
3.4 ตารางไอโซโทปแคดเมียม	144
3.5 ตารางไอโซโทปของอะลูมิเนียม	145
4.1 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.27×10^{-04} เซนติเมตร	155
4.2 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.54×10^{-04} เซนติเมตร	155
4.3 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.80×10^{-04} เซนติเมตร	155
4.4 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.06×10^{-04} เซนติเมตร	156
4.5 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.33×10^{-04} เซนติเมตร	156
4.6 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.60×10^{-04} เซนติเมตร	156
4.7 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.86×10^{-04} เซนติเมตร	156

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.8 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.12×10^{-04} เซนติเมตร	157
4.9 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.38×10^{-04} เซนติเมตร	157
4.10 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.65×10^{-04} เซนติเมตร	157
4.11 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.91×10^{-04} เซนติเมตร	157
4.12 ค่าปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ทั้งสามค่าพลังงานเฉลี่ย	159
4.13 อัตราส่วนนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นภายในแผ่นทอง	160
4.14 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.27×10^{-04} เซนติเมตร	162
4.15 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.54×10^{-04} เซนติเมตร	162
4.16 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.80×10^{-04} เซนติเมตร	162
4.17 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.06×10^{-04} เซนติเมตร	163
4.18 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.33×10^{-04} เซนติเมตร	163
4.19 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.60×10^{-04} เซนติเมตร	163
4.20 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.86×10^{-04} เซนติเมตร	163
4.21 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.12×10^{-04} เซนติเมตร	164
4.22 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.38×10^{-04} เซนติเมตร	164
4.23 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.65×10^{-04} เซนติเมตร	164
4.24 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.91×10^{-04} เซนติเมตร	164
4.25 การกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนภายในแผ่นทอง	168
4.26 ผลการประมวลโปรแกรม MCNPX ของแผ่นทอง	172
4.27 แสดงผลการประมวล โปรแกรม MCNPX ของน้ำภายในท่อซีที	173
4.28 การกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนภายในแผ่นทองหุ้มคลัทช์แคดเมียม	176
4.29 การกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนของแผ่นอะลูมิเนียม	179
4.30 บันทึกน้ำหนักรวบรวมสำหรับวัดนิวตรอนฟลักซ์	181
4.31 บันทึกเวลาการอบรังสีภายในท่ออบรังสีซีที	182
4.32 การนับวัดทางรังสีโดยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์	183
4.33 ผลการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์จากการทดลอง	184
4.34 ผลการทดลองการวัดเทอร์มัลนิวตรอนด้วยหัววัดนิวตรอน	185
4.35 ผลการคำนวณเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ วัดด้วยหัววัดนิวตรอน	186

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.36 ผลการคำนวณความหนาแผ่นทอง ปี 2555	186
4.37 ผลการจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ ตามแบบการทดลองปี 2555	187
4.38 ผลการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ต่อกำลังของเครื่องปฏิกรณ์จากแบบจำลองปี 2555	187
4.39 ผลการเปรียบเทียบการวัดนิวตรอนฟลักซ์ ปี 2555	188
4.40 อัตราการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ ปี 2555	188
4.41 ผลการคำนวณความหนาแผ่นทอง ปี 2556	188
4.42 ผลการจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ ตามแบบการทดลองปี 2556	189
4.43 ผลการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์จากแบบจำลองปี 2556	189
4.44 อัตราการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ ปี 2556	189
4.45 ผลการเปรียบเทียบการวัดนิวตรอนฟลักซ์ ปี 2556	190
4.46 ผลการเปรียบเทียบเทอร์มัลนิวตรอนด้วยหัววัดนิวตรอน gold foil activation และแบบจำลอง MCNPX ที่กำลังเครื่อง 1,200 kW	190
5.1 ผลการวัดและวิเคราะห์การวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในท่ออบรังสีซีที	193
5.2 ผลการจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์	194
5.3 ผลการเปรียบเทียบ	194
5.4 ผลการเปรียบเทียบการวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ทั้ง 3 วิธี	194

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ก.ภาพอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ขณะกำลังก่อสร้าง	8
2.1 ข.ภาพทางอากาศของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (ขณะนั้น)	8
2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA MARK III ถูกติดตั้งใหม่	9
2.3 โครงสร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยไทย	11
2.4 ภาพมุมมองของสระน้ำของเครื่อง ปปว.-1/1	13
2.5 ภาพมุมมองของสระ เมื่อนำประตูลูมิเนียมกั้นสระน้ำ	14
2.6 แกนเครื่องปฏิกรณ์	15
2.7 ลักษณะแผ่นเพลทด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์	16
2.8 ตำแหน่งต่างๆของแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1	17
2.9 ลักษณะแผ่นเพลทด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์	18
2.10 แผ่นเพลทความปลอดภัย	19
2.11 แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1	20
2.12 แสดงการแบ่งแท่งเชื้อเพลิงออกเป็น 3 ส่วน	21
2.13 แท่งเชื้อเพลิงที่บรรจุ Thermocouples ไว้ภายในใช้ในการวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์	22
2.14 โครงสร้างโมเลกุลของเซอร์โคเนียมไฮไดรด์	23
2.15 กราฟช่วงต่างๆของระบบเซอร์โคเนียม – ไฮโดรเจน	25
2.16 แผนผังขั้นตอนการผลิตเนื้อเชื้อเพลิงชนิดไฮไดรด์	28
2.17 ตำแหน่งของเนื้อเชื้อเพลิงและสารควบคุมภายในแท่งควบคุม	30
2.18 ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1	31
2.19 ลำนิวตรอนที่กำลังวิ่งเข้าชนเป้า	37
2.20 แสดงช่วงพลังงานของนิวตรอนฟลักซ์ในช่วงพลังงานต่างๆ	38
2.21 แสดงปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ กับพลังงาน (MeV) ภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเทอร์มัลนิวตรอน และชนิดนิวตรอนเร็ว	39
2.22 ภาพสะพานแขวนเครื่องปฏิกรณ์ด้านบนสระน้ำเครื่องปฏิกรณ์	41
2.23 ภาพตำแหน่งเทอร์มัลคอตัมน์ และวอยแท็งค์ ภายในเครื่องปฏิกรณ์	42
2.24 ที่เก็บเชื้อเพลิงภายในสระน้ำเครื่องปฏิกรณ์	42
2.25 ท่ออาบรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26	45
2.27	46
2.28	46
2.29	47
2.30	48
2.31	49
2.32	50
2.33	52
2.34	52
2.35	53
2.36	55
2.37	57
2.38	59
2.39	60
2.40	61
2.41	64
2.42	68
2.43	70
2.44	74
2.45	75
2.46	76
2.47	76
2.48	85
2.49	85
3.1	91
3.2	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	95
3.4	96
3.5	97
3.6	98
3.7	99
3.8	100
3.8	100
3.8	100
3.8	100
3.9	102
3.10	102
3.11	105
3.11	105
3.11	105
3.11	105
3.12	106
3.12	106
3.12	106
3.13	109
3.13	109
3.13	109
3.13	109
3.14	111
3.14	111
3.14	111
3.14	111
3.15	113
และศูญญาภาศล้อมรอบแบบจำลอง	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 ผลการจำลองทรงกระบอกน้ำล้อมรอบท่ออาบรังสีซีที และสุญญากาศล้อมรอบแบบจำลองบนโปรแกรม MCNPX	115
3.16 ก.ผลการจำลองในระนาบ XY	115
3.16 ข.ผลการจำลองในระนาบ YZ	115
3.16 ค.ผลการจำลองในระนาบ ZX	115
3.17 การแบ่งช่วงแผ่นทอง	121
3.17 ก. ภาพแบบจำลองการแบ่งช่วงแผ่นทอง	121
3.17 ข. ผลการจำลองบนโปรแกรม MCNPX	121
3.18 ภาพแบบจำลองการแบ่งช่วงน้ำภาพท่ออาบรังสีซีที	125
3.19 ผลการจำลองแผ่นทองคำที่มีน้ำล้อมรอบบนโปรแกรม MCNPX	128
3.19 ก.ผลการจำลองในระนาบ XY	128
3.19 ข.ผลการจำลองในระนาบ YZ	128
3.19 ค.ผลการจำลองในระนาบ ZX	128
3.20 แบบจำลองท่ออาบรังสีซีทีที่เพิ่มแผ่นระนาบ 13 และ 14	130
3.21 ภาพแบบจำลองแผ่นทองหุ้มแคดเมียมภายในท่ออาบรังสีซีที	134
3.22 ผลการจำลองแผ่นทองคำหุ้มด้วยดลั้บแคดเมียมบนโปรแกรม MCNPX	137
3.22 ก.ผลการจำลองในระนาบ XY	137
3.22 ข.ผลการจำลองในระนาบ YZ	137
3.22 ค.ผลการจำลองในระนาบ ZX	137
3.23 ภาพแบบจำลองแผ่นอะลูมิเนียมภายในท่ออาบรังสีซีที	138
3.24 ผลการจำลองแผ่นอะลูมิเนียมบนโปรแกรม MCNPX	140
3.24 ก.ผลการจำลองในระนาบ XY	140
3.24 ข.ผลการจำลองในระนาบ YZ	140
3.24 ค.ผลการจำลองในระนาบ ZX	140
3.25 ขนาดแผ่นฟอยล์ทองคำ ที่ใช้ในการวัดค่าเทอร์มัลนิวตรอน	142
3.26 ขนาดแผ่นของฟอยล์ทองคำและดลั้บแคดเมียม ที่ใช้วัดค่าอิพิลเทอร์มัลนิวตรอน	142
3.27 ขนาดแผ่นอะลูมิเนียม ที่ใช้วัดค่านิวตรอนเร็ว	142
3.28 แผ่นทองคำบาง	146

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.29 แผ่นอะลูมิเนียม	146
3.30 อูงพลาสติกใสสำหรับใส่แผ่นฟอยล์ทองคำและปิดผนึกด้วยเครื่องปิดผนึกพลาสติก	146
3.31 การใส่แผ่นทองคำในคลับแคดเมียม	147
3.32 วัสดุสำหรับทดลองที่ใส่ของพลาสติกและปิดผนึกเรียบร้อย	147
3.33 ผลค่านับวัดได้โฟโตพีคที่พลังงานประมาณ 412 KeV	149
3.34 ผลค่านับวัดได้โฟโตพีคที่พลังงานประมาณ 1,368 KeV	149
3.35 ขั้นตอนการเตรียมหัววัดนิวตรอนสำหรับการวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์	150
3.35 ก. นำหัววัดนิวตรอนติดบนแผ่นอะลูมิเนียม	150
3.35 ข. เปิดเครื่องวัดกระแส เตรียมความพร้อมก่อนการทดลอง	150
3.36 หย่อนแผ่นอะลูมิเนียมที่ติดหัววัดนิวตรอนลงท่ออาบรังสีซีที	151
4.1 การแบ่งช่วงภายในแผ่นทอง	154
4.2 ผลจากการประมวลการแบ่งช่วงแผ่นทองในช่วงพลังงานเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์	158
4.3 ผลจากการประมวลการแบ่งช่วงแผ่นทองในช่วงพลังงานอีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์	158
4.4 ผลจากการประมวลการแบ่งช่วงแผ่นทองในช่วงพลังงานนิวตรอนเร็วฟลักซ์	159
4.5 อัตราส่วนเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในแผ่นทอง	161
4.6 ผลจากการประมวลการเกิดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ภายในช่วงแผ่นทอง	165
4.7 ผลจากการประมวลการเกิดอีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ภายในช่วงแผ่นทอง	166
4.8 ผลจากการประมวลการเกิดนิวตรอนเร็วฟลักซ์ภายในช่วงแผ่นทอง	166
4.9 ลักษณะของแผ่นทองสำหรับประมวลผลการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอน	167
4.10 แสดงการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนในแต่ละระดับพลังงาน	170
4.11 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนของแผ่นทองคำ	171
4.12 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนของน้ำภายในท่ออาบรังสี	174
4.13 การกระจายตัวเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ในช่วงของน้ำภายในท่ออาบรังสีซีที	174
4.14 การกระจายตัวอีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ในช่วงน้ำภายในท่ออาบรังสีซีที	174
4.15 การกระจายตัวนิวตรอนเร็วฟลักซ์ ในช่วงน้ำภายในท่ออาบรังสีซีที	175
4.16 แสดงการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนในแผ่นทองที่หุ้มด้วยคลับแคดเมียม	177
4.17 แสดงการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนในแผ่นอะลูมิเนียม	178

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของประเทศไทย เริ่มเดินเครื่องครั้งแรก เมื่อวันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ.2505 นับเป็นเวลามากกว่า 50 ปี ที่เริ่มมีการใช้เทคโนโลยีด้านนิวเคลียร์ในประเทศไทย ในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเดิมได้มีการพัฒนาและปรับปรุงเรียกชื่อรุ่นว่า “เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยไทย 1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 : ปปว.-1/1” โดยลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์วิจัยเป็นรูปทรงกระบอกกวางติดตั้งอยู่ภายในสระน้ำขนาดใหญ่ที่ใช้น้ำเป็นสารระบายความร้อน และสารหน่วงนิวตรอน (เพื่อลดปฏิกิริยาฟิชชัน) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันภายในเครื่องปฏิกรณ์เกิดจากนิวตรอนเร็วจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน (เบริลเลียม) ทำปฏิกิริยาฟิชชันกับเนื้อเชื้อเพลิงชนิดยูเรเนียมเซอร์-ไฮไดรด์ (UZrH) ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งหากต้องการทราบจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนที่อยู่ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ต้องกระทำโดยการทดลองวัดนิวตรอนฟลักซ์ ซึ่งขั้นตอนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันใช้วิธีการวิเคราะห์กัมมันต์แผ่นวัสดุ (Foil Activation) ในการหาจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นภายในบริเวณต่างๆของแกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้แผ่นทองคำ (Au) และแผ่นอะลูมิเนียม (Al) ออบรังสีนิวตรอนภายในท่อออบรังสีตำแหน่งต่างๆ ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยที่แต่ละตำแหน่งภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์มีความเหมาะสมในการออบนิวตรอนที่แตกต่างกันไป จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อวิเคราะห์จำนวนของนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนภายในสารตัวอย่างที่ใช้ออบรังสีนิวตรอน และทำการคำนวณค่าหาจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ในท่อออบรังสีตำแหน่งนั้นๆ เพื่อจะได้ทราบค่าจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ในบริเวณท่อนั้นๆ ผลที่ได้จากการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ จะนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์เชิงกัมมันตรังสี (Neutron Activation Analysis) เพื่อวิเคราะห์หาชนิดของธาตุที่ต้องการทราบ รวมทั้งการออบนิวตรอนเพื่อผลิตสารไอโซโทปทางการแพทย์ นอกจากนี้ยังใช้ในการออบอัญมณีเพื่อเพิ่มมูลค่าซึ่งอาศัยการออบนิวตรอนที่ระยะเวลานาน เพื่อเปลี่ยนสมบัติบางประการให้อัญมณีมีสีสันสรรสวยงามมากขึ้น

จากวิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่กล่าวมาจะพบว่าความหนาของแผ่นทองที่แตกต่างจะส่งผลให้ค่าฟลักซ์ที่วัดได้มีค่าไม่เท่ากันหรือไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าผลที่ได้จากการวัดนั้นถูกต้องหรือไม่ ทำให้มีแนวคิดสร้างแบบจำลองการวัดและวิเคราะห์นิวตรอนฟลักซ์ด้วยแผ่นทองโดยโปรแกรมเอ็มซีเอ็นพีเอ็กซ์ (MCNPX) คำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล เพื่อหาค่านิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นต่อความหนาของแผ่นทอง และนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดและวิเคราะห์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ ในขั้นแรกของการ

ศึกษาวิจัยเริ่มจากสร้างแบบจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์แผ่นทอง เพื่อสร้างแบบจำลองที่เหมือนการทดลองจริงภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ลักษณะของแบบจำลองสร้างแผ่นทองอยู่ภายในท่ออาบรังสีซีที (CT) เป็นท่อที่อยู่ตำแหน่ง A1 ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ด้วยการจำลองแผ่นทองตามขนาดความหนา 1 แผ่น ซึ่งแบ่งช่วงตามความหนาของแผ่นทองช่วงเท่าๆกัน บรรจุลงในบริเวณกึ่งกลางท่ออาบรังสีซีทีที่กึ่งกลางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.81 ซม. โดยมีน้ำล้อมรอบอยู่ภายในท่อ จากนั้นนำท่อซีทีไปอาบรังสีนิวตรอนที่ตำแหน่ง A1 ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อศึกษาจำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านแผ่นทองในแต่ละช่วง

A.R. Yavar , H. Khalafi และคณะ^[1] ได้ทำวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของฟลักซ์นิวตรอนภายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยประเทศมาเลเซีย ด้วยโปรแกรมเอ็มซีเอ็นพี พบว่า แบบจำลองที่ใช้หาค่าของพารามิเตอร์ฟลักซ์นิวตรอน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยวิธี INAA ได้ค่าเฉลี่ยของนิวตรอนฟลักซ์ทั้ง เทอร์มัลนิวตรอน อิพิลเทอร์มัลนิวตรอน และนิวตรอนเร็ว สอดคล้องกันทั้งสองวิธี

Luka Snoj, Matjaz Ravnik^[2] ได้ทำการศึกษา การจำลองด้วยโปรแกรมเอ็มซีเอ็นพีสามารถสร้างแบบจำลองในสามมิติ และสามารถคำนวณค่าจากการแบบจำลองเพื่อหาค่าพลังงานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้

L.Sonj, A Trkov และคณะ^[3] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์การกระจายตัวของนิวตรอนฟลักซ์สำหรับการคำนวณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย โดยใช้ชุดทดสอบอะลูมิเนียม และแผ่นทองคำ ทดสอบในท่ออาบรังสีท่อต่างๆภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA และเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมเอ็มซีเอ็นพี ซึ่งผลจากการวัดและคำนวณมีค่าความแตกต่างกัน 10%

Koster-Ammerlaan MJ และคณะ^[4] ได้ทำการศึกษาการวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยชุดทดสอบสารละลาย Au-Cr-Mo ผลการทดสอบปรากฏว่าได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับชุดทดสอบ Zr-Au เดิม และชุดทดสอบสารละลาย Au-Cr-Mo มีขั้นตอนเตรียมชุดทดสอบไม่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับชุดทดสอบ Zr-Au

R.G.Abrefah , B.J.B. Nyarko และคณะ^[5] ได้ทำการทดลองด้วยแผ่นแคมเมียม เพื่อหา นิวตรอนฟลักซ์ภายในท่ออบรังสีนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์กานา-1 พบว่านิวตรอนฟลักซ์ในแนวแกนตั้งเพิ่มขึ้นสูงสุดที่กึ่งกลางท่ออาบรังสี และลดลงเรื่อยๆเมื่ออยู่ปลายท่ออาบรังสีทั้งสองด้าน และในแนวแกนนอนจะเพิ่มขึ้นจากกึ่งกลางไหลภายในท่ออาบรังสีทั้งสองด้านตามแนวแกนตั้งและแกนนอน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้าง การจัดการ และวัฏจักรนิวตรอน ภายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1

1.2.2 เพื่อศึกษาการจัดตำแหน่งแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ต่อการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน

1.2.3 เพื่อศึกษาและออกแบบการเขียนแบบจำลองวัตนิวตรอนฟลักซ์ด้วยวิธีคำนวณมอนติคาร์โล โดยใช้โปรแกรมเอ็มซีเอ็นพี (MCNP)

1.2.4 เพื่อศึกษาการวัดและวิเคราะห์นิวตรอนฟลักซ์ ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์ด้วยแผ่นทองภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการจัดการแกนเครื่อง ปปว.-1/1 และศึกษาลักษณะคุณสมบัติตำแหน่งท่ออบรังสีซีที

1.3.2 ศึกษาวัฏจักรนิวตรอนที่เกิดขึ้นภายในแกนเครื่อง ปปว.-1/1

1.3.3 ศึกษาการเขียนแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมเอ็มซีเอ็นพี ด้วยการคำนวณแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo N-Particle Transport Code : MCNP)

1.3.4 ศึกษาการวิเคราะห์วิธีวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์แผ่นทอง ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1

1.3.5 ทำการจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดยการสร้างแบบจำลองเอ็มซีเอ็นพี และศึกษาผลการวิเคราะห์ของค่านิวตรอนฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนความหนาของแผ่นทอง

1.3.7 ทำการทดลองการวัดฟลักซ์ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์แผ่นทอง และเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองแบบจำลองนิวตรอนฟลักซ์

1.3.8 สรุปผลการทดลอง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการวิจัย

ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยรวมทั้งสิ้น 3 ปี 10 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2553 ถึง เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2557 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงาน	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ปี 2553												
1.ศึกษาค้นคว้าการจัดการแทนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1												
ปี 2554												
2.ศึกษาการคุณสมบัติจำเพาะของแท่งเชื้อเพลิง และอบรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1												
3.ศึกษาการวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์ด้วยแผ่นทอง (ฟ่งทฤษฎี และวิธีการทดลอง)												
ปี 2555												
4.ศึกษาการใช้เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์ด้วยแผ่นทอง												
5.ศึกษาการเขียนโปรแกรม เอ็มซีเอ็นพี (MCNP)												
6.สร้างรูปทรงของแบบจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยแผ่นทอง												
7.ทดสอบแบบจำลองนิวตรอนฟลักซ์ และปรับแก้ไขแบบจำลอง												

ปี 2556																			
8.วิเคราะห์แบบจำลองนิเวศรอนฟลักซ์																			
9.เตรียมและนำเสนอผลงานทางวิชาการ I-SEEC 2013 จังหวัดกาญจนบุรี วันที่ 18-20 ธันวาคม พ.ศ. 2556																			
10.ทำการทดลองการวัดนิเวศรอนฟลักซ์ด้วยเทคนิคการกัมมันต์แผ่นทอง																			
11.เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างแบบจำลองเอ็มซีเอ็นพี กับ การวัดนิเวศรอนฟลักซ์ด้วยเทคนิคการกัมมันต์แผ่นทอง																			
12.สรุปผลการทดลอง																			
ปี 2557																			
13.สรุปผล																			

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงองค์ประกอบต่างๆ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 และมีความรู้ความเข้าใจการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ และสามารถอธิบายขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ได้

1.5.2 สามารถเขียนโปรแกรมเอ็มซีเอ็นพีได้ และสร้างแบบจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในท่ออาบรังสีซีทีได้ และสามารถถ่ายทอดขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเอ็มซีเอ็นพีอย่างง่ายให้แก่ผู้ที่สนใจได้

1.5.3 สามารถอธิบายวัฏจักรนิวตรอนภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ได้

1.5.4 สามารถอธิบายการเกิดเทอร์มัลนิวตรอน อิพิลเทอร์มัลนิวตรอน และนิวตรอนเร็วภายในท่ออาบรังสีซีทีได้

1.5.5 สามารถเปรียบเทียบแบบจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ กับการวิเคราะห์วิธีวัดฟลักซ์ด้วยเทคนิคการก่อกัมมันต์ด้วยแผ่นทอง

1.5.6 สามารถมีความรู้และความเข้าใจถึงความปลอดภัยที่จะนำเทคโนโลยีนิวเคลียร์จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยไปใช้ประโยชน์ในด้านการศึกษา งานวิจัย และอุตสาหกรรม ได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เป็นเวลากว่า 50 ปี ที่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยได้อยู่คู่ประเทศไทย ได้ทำประโยชน์ในด้านการวิจัย การผลิตไอโซโทปรังสีเพื่อการรักษา การอาบอัญมณีเพื่อเพิ่มมูลค่า เป็นต้น หากมองย้อนกลับไปในวันที่เริ่มก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยสามารถลำดับเหตุการณ์ได้ดังนี้

17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2497 คณะรัฐมนตรี (สมัยรัฐบาลจอมพล ป. พิบูลสงคราม) ได้แต่งตั้ง “คณะกรรมการเกี่ยวกับพลังงานปรมาณู” ให้ทำหน้าที่เจรจา และขอคำปรึกษาจากคณะผู้แทนรัฐบาลประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมี พล.อ.ท. มณี มหาสันตนะ เวชยันตรังสฤษฎ์ เป็นประธานกรรมการ ถือเป็นก้าวแรกของการเริ่มต้นศึกษาพลังงานนิวเคลียร์ในประเทศไทย

6 – 8 ธันวาคม พ.ศ. 2497 คณะกรรมการเกี่ยวกับพลังงานปรมาณูได้เริ่มเจรจา กับผู้แทนรัฐบาลประเทศสหรัฐอเมริกา

13 มีนาคม พ.ศ. 2499 ได้มีการลงนาม “ความตกลงสำหรับการร่วมมือระหว่างรัฐบาลแห่งอาณาจักรไทยกับรัฐบาลแห่งสหรัฐอเมริกา เกี่ยวกับการใช้พลังงานปรมาณูทางพลเรือน” ทำเนียบรัฐบาล พระนคร ความตกลงดังกล่าวมีผลบังคับใช้จนถึงวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2504

15 ตุลาคม พ.ศ. 2500 รัฐบาลไทยขึ้นสัตยาบันสารรับรองธรรมนูญทางทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) จึงนับได้ว่าประเทศไทยเป็นประเทศสมาชิกที่ 58 ของทบวงการฯ

13 พฤษภาคม พ.ศ. 2503 คณะรัฐมนตรี มีมติอนุมัติให้คณะกรรมการพลังงานปรมาณูเพื่อสันติทำสัญญาว่าจ้างบริษัทประมวลก่อสร้าง จำกัด ทำการก่อสร้างอาคารเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

15 มิถุนายน พ.ศ. 2503 คณะกรรมการพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ลงนามทำสัญญาว่าจ้างบริษัทประมวลก่อสร้างจำกัด ก่อสร้างอาคารปฏิกรณ์ปรมาณู มูลค่า 14 ล้านบาท สัญญาสิ้นสุดวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2504

25 เมษายน พ.ศ. 2504 รัฐบาลประกาศใช้พระราชบัญญัติพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ 2504 และพระราชบัญญัติจัดระเบียบราชการสำนักนายกรัฐมนตรี (ฉบับที่ 8) พ.ศ. 2504 ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 78 ตอนที่ 36 นับเป็นการจัดตั้งสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติสังกัดสำนักนายกรัฐมนตรีมาตรา 5 แห่งพระราชบัญญัติพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ 2504 ให้คณะกรรมการ พ.ป.ส. ประกอบด้วย ประธานกรรมการ และกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทางวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ แพทยศาสตร์ เกษตรศาสตร์ และนิติศาสตร์ ไม่เกิน 10 คน

3 มกราคม พ.ศ. 2505 ทำสัญญาเช่าวัสดุนิวเคลียร์พิเศษเพื่อใช้ทำแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จากคณะกรรมการพลังงานปรมาณูสหรัฐอเมริกา วัสดุนิวเคลียร์พิเศษ คือ ยูเรเนียมที่เสริมสมรรถนะ

ของยูเรเนียม-235 ร้อยละ 90 จำนวน 5.35 กิโลกรัม

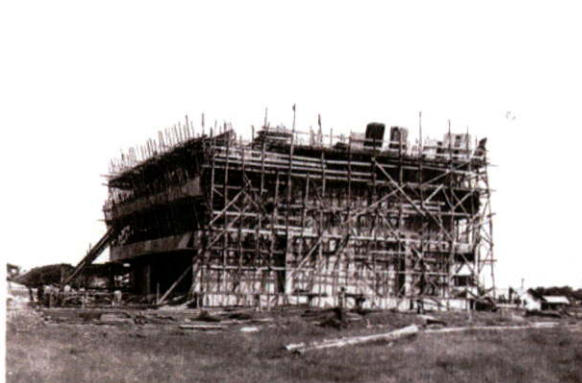
9 เมษายน พ.ศ. 2505 ฯพณฯ นายกรัฐมนตรี จอมพล สฤษดิ์ ธนะรัชต์ ประกอบพิธีวางศิลาฤกษ์อาคารสำหรับติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู และกำหนดเรียกชื่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูว่า เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 (ปพว.-1) และใช้ในภาคภาษาอังกฤษว่า Thai Research Reactor-1 (TRR-1) ดังรูปที่ 2.1 ก และ 2.1 ข

25 กรกฎาคม พ.ศ. 2505 สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติในนามของรัฐบาล โดยสถานเอกอัครราชทูตไทย ณ กรุงวอชิงตัน เป็นผู้ดำเนินกิจการ ชื่อว่า สดุนิวเคลียร์พิเศษ จากคณะกรรมการพลังงานปรมาณูสหรัฐอเมริกา

1. พลูโตเนียม 80 กรัม เพื่อใช้ในพลูโตเนียม-เบริลเลียม ต้นกำเนิดนิวตรอน

2. ยูเรเนียม 3.68 กรัม เสริมสมรรถนะของยูเรเนียม-235 ร้อยละ 90 เพื่อใช้ใน

Fission Chamber จำนวน 2 เครื่อง (Westinghouse Type WL 6376)



ก.



ข.

ที่มา : สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ

รูปที่ 2.1 ก. ภาพอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ขณะกำลังก่อสร้าง

รูปที่ 2.1 ข. ภาพทางอากาศของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (ในขณะนั้น)

27 ตุลาคม พ.ศ. 2505 นักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ส่วนเครื่องปฏิกรณ์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 บรรลุขั้นวิกฤตครั้งแรกในประเทศไทย เมื่อเวลา 18.32 น. โดยใช้เวลาดำเนิน 8 ชั่วโมงครึ่ง

5 กันยายน พ.ศ. 2511 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว พร้อมด้วยสมเด็จพระเจ้าลูกยาเธอเจ้าฟ้าชิราลงกรณ์ เสด็จพระราชดำเนินทอดพระเนตรกิจการของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2513 สมเด็จพระเจ้าลูกเธอเจ้าฟ้าสิรินธรเทพรัตนราชสุดาฯ และ

สมเด็จพระเจ้าลูกเธอเจ้าฟ้าจุฬาภรณวลัยลักษณ์ฯ เสด็จทอดพระเนตรการปฏิบัติงานของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ พร้อมด้วยอาจารย์และนักเรียนโรงเรียนจิตรลดา

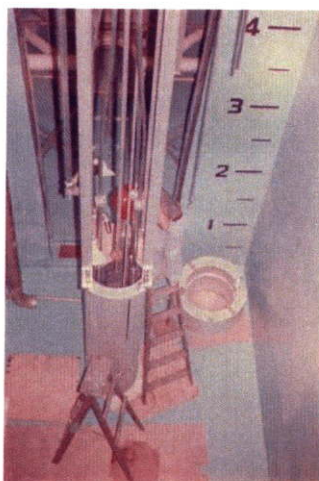
14 กันยายน พ.ศ. 2518 สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ทำสัญญาสั่งซื้อและติดตั้งระบบเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูใหม่กับบริษัทเจเนอรัล อะตอมมิก เป็นแบบ TRIGA MARK III ซึ่งกำหนดชื่อไทยว่า “เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1” ดังรูปที่ 2.2

7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2520 เจ้าหน้าที่ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ร่วมมือกับเจ้าหน้าที่ของบริษัทเจเนอรัลอะตอมมิก บรรจุแท่งเชื้อเพลิงมาตรฐานเข้าในแกนเครื่องปฏิกรณ์ บรรลุสภาพวิกฤตเมื่อเวลา 21.41 น. ใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 11 ชั่วโมง

10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2521 สมเด็จพระเจ้าลูกเธอเจ้าฟ้าจุฬาภรณวลัยลักษณ์ฯ เสด็จทอดพระเนตรการปฏิบัติงานของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

1 มกราคม พ.ศ. 2534 ปิดทำการซ่อมบำรุงเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.-1/1 และทาสีบ่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

28 กันยายน พ.ศ. 2535 เริ่มเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.-1/1 หลังการปิดซ่อมบำรุงเมื่อ 1 มกราคม พ.ศ. 2534



ที่มา : สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ

รูปที่ 2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA MARK III ถูกติดตั้งใหม่

26 กรกฎาคม พ.ศ. 2534 สมเด็จพระเจ้าลูกเธอเจ้าฟ้าสิรินธรเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จทรงนำคณะอาจารย์และนักเรียน โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าทัศนศึกษา ณ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

3 ตุลาคม พ.ศ. 2545 พระราชบัญญัติปรับปรุงกระทรวง ทบวงกรม พ.ศ.2545 กำหนดให้สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ เปลี่ยนชื่อเป็น “สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ”

21 เมษายน พ.ศ. 2549 จัดตั้งสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) เมื่อวันที่ 21 เมษายน พ.ศ. 2549 ซึ่งเป็นหน่วยงานที่แยกออกมาจากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ โดยจัดตั้งตามพระราชกฤษฎีกาจัดตั้งสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) พ.ศ. 2549

จากประวัติตามขั้นต้นที่กล่าวมาแล้วนั้น ได้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนิวเคลียร์เป็นอย่างมาก ซึ่งถือได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์-1/1 เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ที่ทำหน้าที่สนับสนุนงานวิจัยและพัฒนาในหน่วยงานต่างๆ และภายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 มีข้อมูลพื้นฐานการออกแบบแกนเครื่องปฏิกรณ์ , แท่งเชื้อเพลิง , แท่งควบคุม , ระบบไฮโดรริกภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น โดยนำข้อมูลเหล่านี้มาประมวลเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ในภาวะที่ปลอดภัย

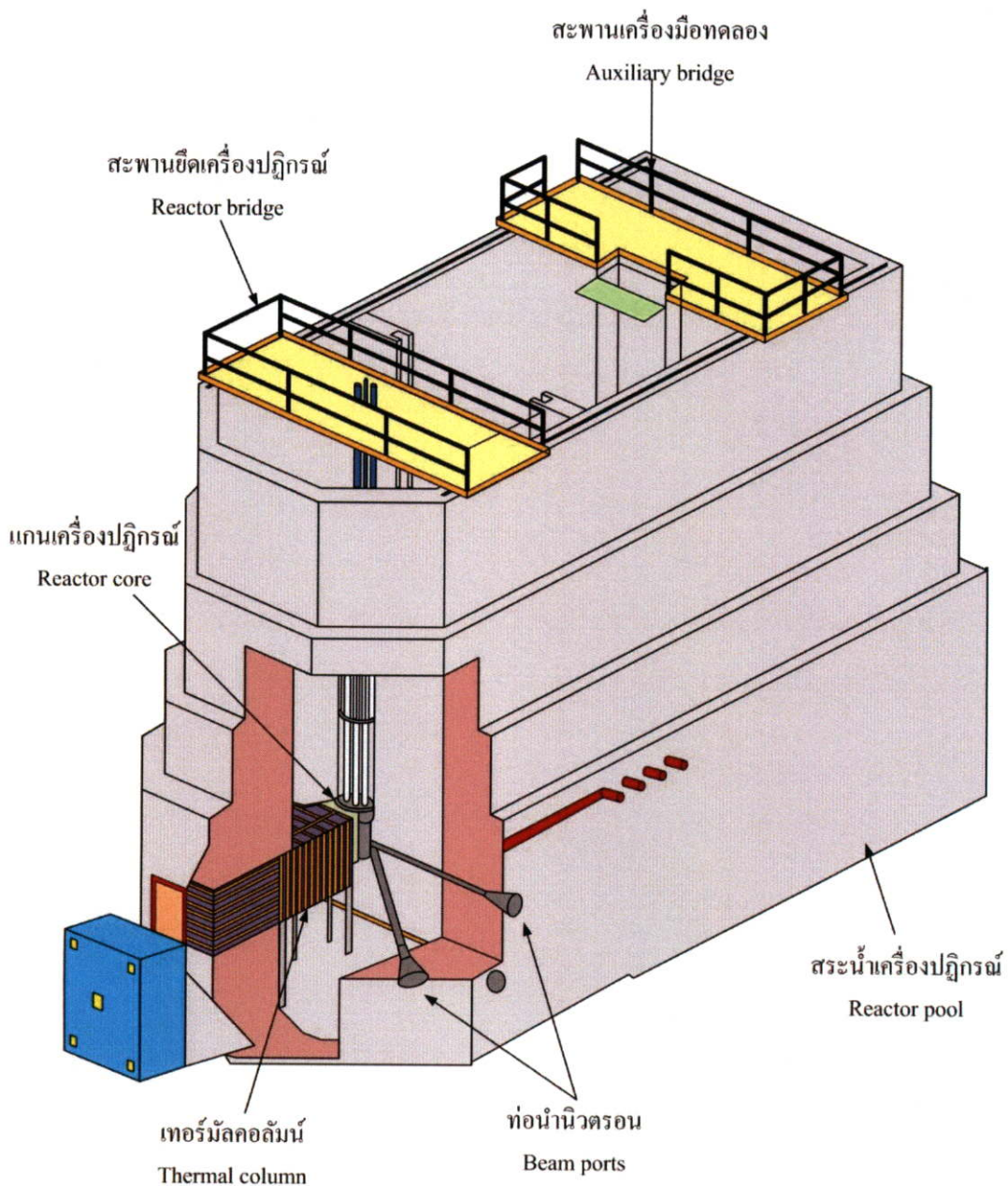
ข้อมูลทั่วไปของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 (TRR-1/M1)

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 อยู่ภายในสระน้ำแบบเปิดถูกจัดให้อยู่ในประเภท TRIGA-Mark III (Training Research Isotope Production General Atomic : TRIGA) ใช้น้ำมวลเบา (light water) เป็นสารระบายความร้อน , สารหน่วงนิวตรอน รวมทั้งเป็นตัวกำบังรังสี มีท่อนำนิวตรอนจำนวน 4 ท่ออยู่ภายในสระน้ำ ในปี พ.ศ. 2518 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ปปว.-1 ได้ถูกพัฒนาและทำการเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงจากเครื่องปฏิกรณ์ประเภท MTR-type (เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดแผ่น) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูชนิดเชื้อเพลิงแบบแท่ง (Rod type) และมีชื่อเรียกใหม่ว่า เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย 1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว.-1/1 : TRR-1/M1) ได้เริ่มเดินเครื่องอีกในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2519 โดยเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 หลังจากที่ได้รับ การปรับปรุงแล้วมีกำลังการเดินเครื่องอยู่ที่ 1.3 เมกะวัตต์ ตั้งอยู่ภายในสระน้ำแบบเปิด และใช้การระบายความร้อนภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ด้วยการส่งผ่านความร้อนตามธรรมชาติ ถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่อุณหภูมิต่ำ และนำความร้อนที่ได้จากการถ่ายเทไปยังหอระบายความร้อนที่อยู่บริเวณด้านข้างของอาคารเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนประกอบหลักเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ที่ใช้ในการศึกษาและวิจัยในด้านต่างๆ ประกอบด้วย ท่อนำนิวตรอนจำนวน 4 ท่อ , มีท่อสำหรับใช้ทดสอบสารตัวอย่างภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ทั้งบริเวณในแกนและนอกแกน , มีระบบนิวเมตริก (ท่อลม) สำหรับส่งหลอดทดลองจากห้องทดลองไปยังแกนเครื่องปฏิกรณ์ในตำแหน่ง G22 ในส่วนรายละเอียดต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.2 โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์^[6]

โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์ถูกออกแบบเพื่อตอบสนองการใช้งานกลไกภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ทางเทอร์มัลไฮโดรริก และนิวเทอร์นิกภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ หากสังเกตโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์จะมีบางส่วนที่ใช้ประโยชน์ในการศึกษานิวตรอนที่เกิดขึ้นภายใน

แกนเครื่องปฏิกรณ์ จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นโครงสร้างโดยรอบของเครื่องปฏิกรณ์ โดยจะอธิบายให้หัวข้อต่อไป



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยไทย

2.2.1 สระน้ำของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1

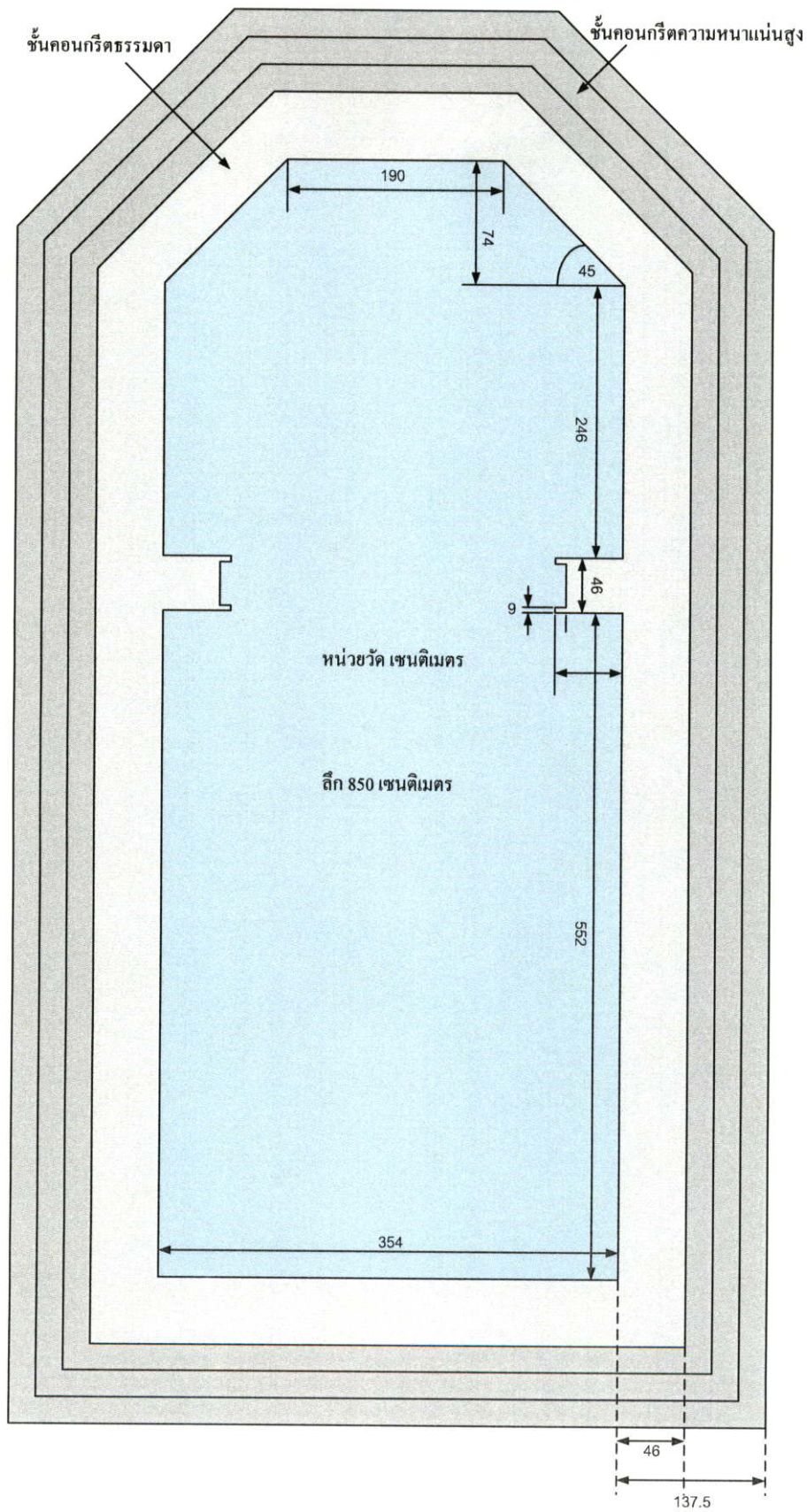
จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นภาพโครงสร้างด้านบนของสระน้ำของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ลักษณะของสระน้ำเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยใช้ประตูอะลูมิเนียมเป็น

ตัวกันทั้งสองฝั่ง ดังรูปที่ 2.5 ในส่วนแรกเป็นสระหลักสำหรับตั้งเครื่องปฏิกรณ์และทำการทดลองต่างๆ ยาว 3.54 เมตร กว้าง 3.2 เมตร และลึก 8.5 เมตร จะเรียกว่า “สระเล็ก” และในส่วนที่สองของสระ ยาว 5.52 เมตร กว้าง 3.54 เมตร และลึก 8.5 เมตร จะเรียกว่า “สระใหญ่” ผนังของสระถูกก่อด้วยคอนกรีตสองชั้นซึ่งทั้งสองชั้นมีความหนาแน่นของมวลคอนกรีตที่แตกต่างกัน ผนังด้านในก่อด้วยคอนกรีตมวลธรรมดา ส่วนผนังด้านนอกก่อด้วยคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงเพื่อป้องกันอันตรายทางรังสี ความหนาของผนังคอนกรีตประมาณ 0.46 เมตร ซึ่งวัดจากบริเวณด้านบนของสระน้ำลง 2 เมตร และถัดจาก 2 เมตร จากด้านบนสระจะเพิ่มความหนาของผนังคอนกรีตเป็น 0.915 เมตร ในบริเวณกันสระน้ำซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์ติดตั้งอยู่จะมีความหนาประมาณ 1.375 เมตร กระบวนการของเทคอนกรีตรวมทั้งการผสมเนื้อคอนกรีตจะต้องได้รับการดูแลและควบคุมเป็นอย่างดี เพื่อให้โครงสร้างมีรูรั่ว หรือมีความหนาแน่นที่ไม่ถูกต้อง ซึ่งกระบวนการทางคอนกรีตได้อยู่ภายใต้การดูแลอย่างใกล้ชิดจากผู้เชี่ยวชาญของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ในส่วนของผนังด้านในของสระและพื้นสระ ถูกทาสีด้วยสีที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถทนต่อรังสีปริมาณสูง และยังเป็นการป้องกันผิวคอนกรีตที่อาจทำปฏิกิริยากับน้ำได้ ซึ่งสีที่ใช้ทามักเป็นสีฟ้า เพื่อให้สะดวกต่อการตรวจสอบสิ่งปลอมแปลงที่อยู่ภายในสระ รวมทั้งสามารถตรวจสอบการเกิดตะไคร้ที่อาจจะส่งผลต่อการเดินเครื่องปฏิกรณ์ได้ ระดับน้ำที่อยู่ภายในสระจะถูกตรวจสอบคุณภาพอย่างสม่ำเสมอและตรวจสอบระดับของน้ำให้อยู่ในระดับ 8 เมตรเสมอ (คิดเป็นปริมาตรน้ำ 245 ลบ.ม.) เพื่อความปลอดภัยในการเดินเครื่องปฏิกรณ์

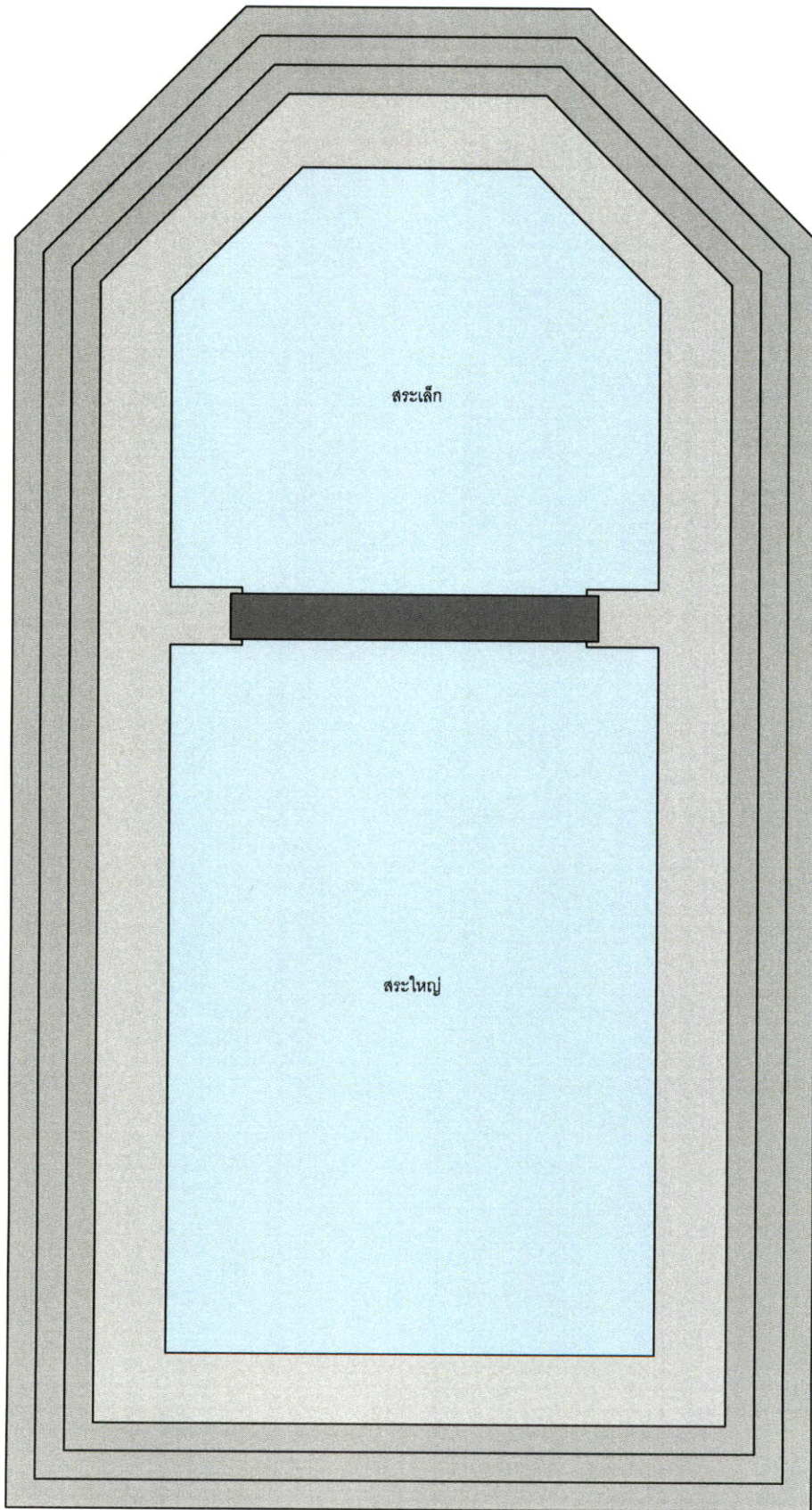
2.2.2 ส่วน ประกอบของแกนเครื่องปฏิกรณ์ และอุปกรณ์สนับสนุนแกนเครื่องปฏิกรณ์

(Reactor core support and Reactor core shroud assembly)

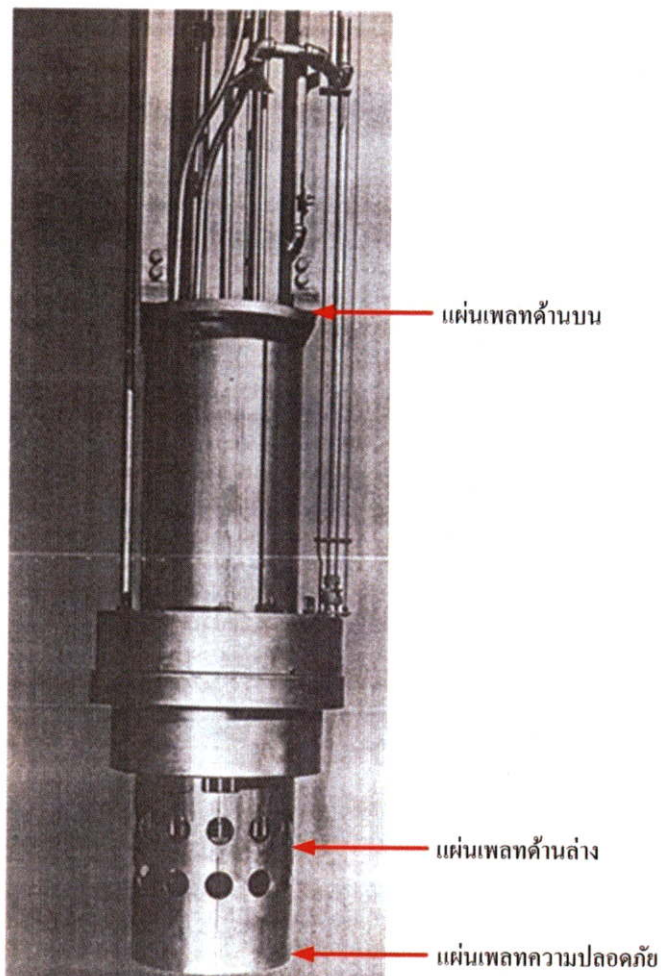
แกนเครื่องปฏิกรณ์ถูกยึดด้วยแท่งอะลูมิเนียม 2 แท่งกับสะพานยึดเครื่องปฏิกรณ์ ลักษณะของแกนเครื่องเป็นรูปทรงกระบอกอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 2.6 มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 cm. (19 in.) โดยภายในทรงกระบอกจะมีเพลท 2 เพลท (เพลทมีลักษณะเป็นรังผึ้ง) อยู่บริเวณด้านบนและด้านล่างของทรงกระบอกทำหน้าที่ยึดแท่งเชื้อเพลิง แท่งควบคุม และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในแกนเครื่องปฏิกรณ์ แผ่นเพลทได้รับการออกแบบให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้แผ่นเพลททั้งสองแผ่นที่อยู่ภายในทรงกระบอกและ มีแผ่นอะลูมิเนียมความปลอดภัย (Safety Plate) อยู่ถัดจากด้านล่างของแกนเครื่องปฏิกรณ์ทำหน้าที่ยึดแท่งควบคุมให้อยู่ในตำแหน่งและป้องกันไม่ให้แท่งควบคุมเลื่อนหลุดจากแกนเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 2.4 ภาพมุมมองของสระน้ำของเครื่อง ปปว.-1/1



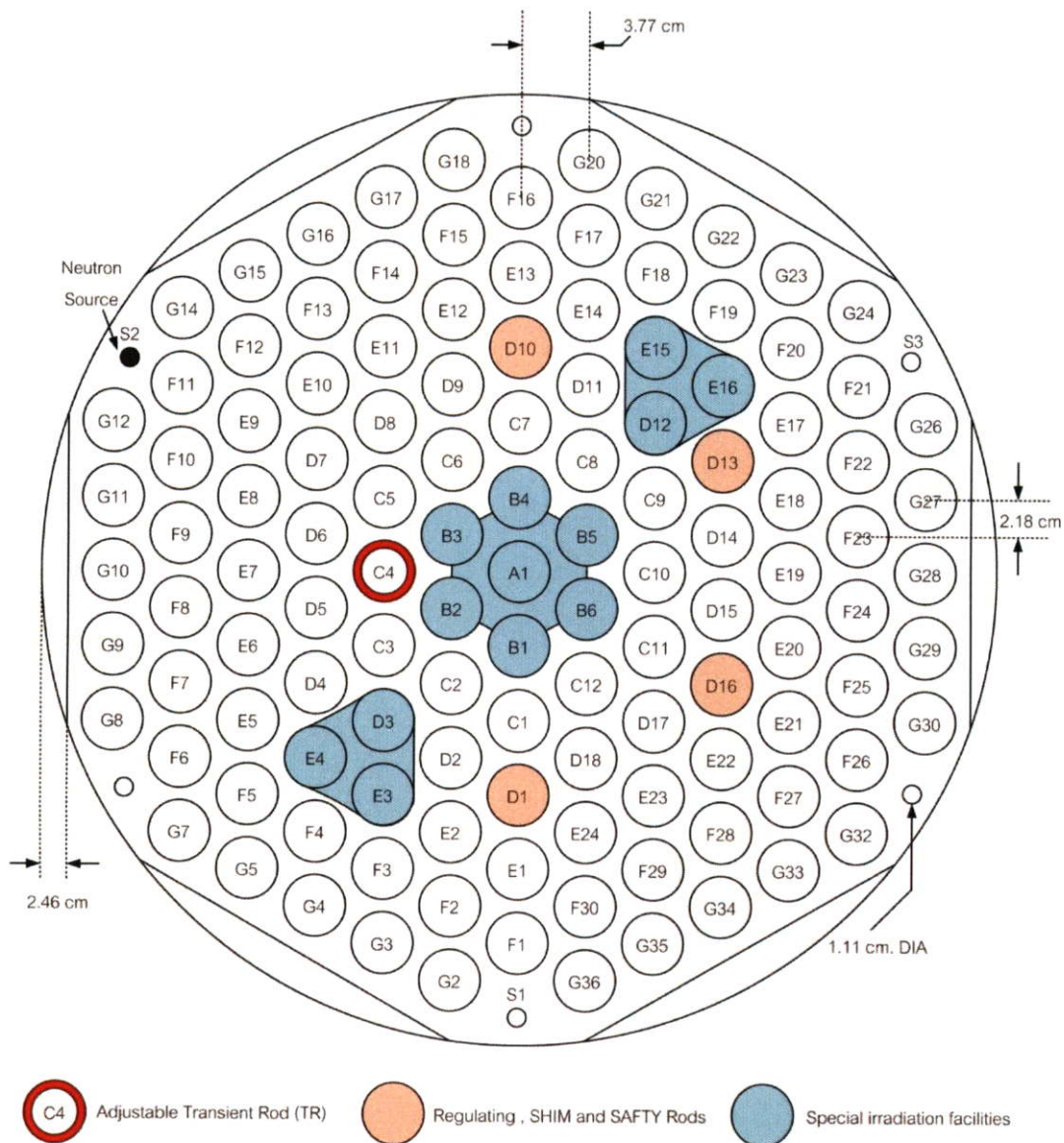
รูป 2.5 ภาพมุมมองของสระ เมื่อนำประตูอะลูมิเนียมกั้นสระน้ำ



รูปที่ 2.6 แกนเครื่องปฏิกรณ์ ^[6,p16]

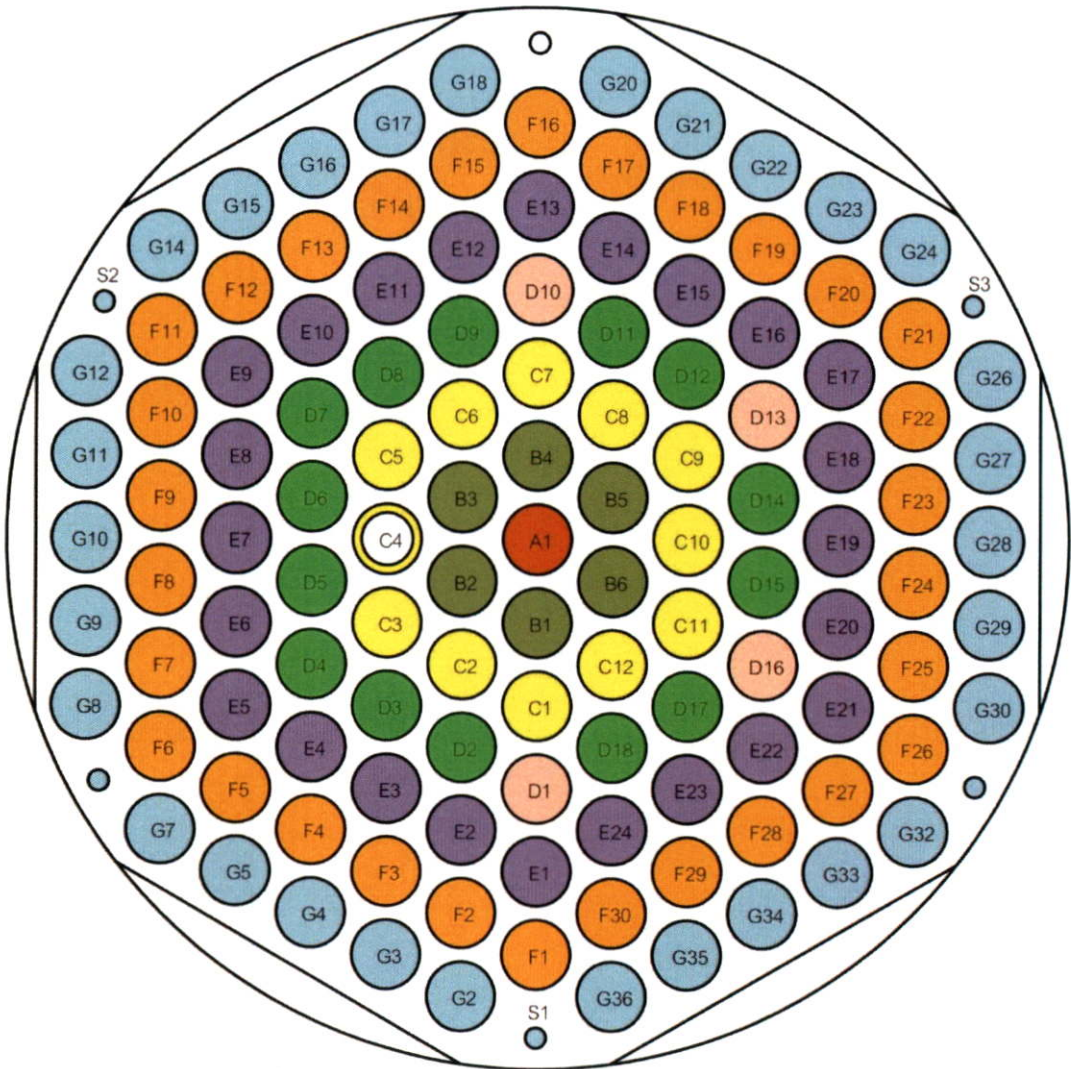
2.2.3 แผ่นเพลท และแผ่นความปลอดภัย

ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์มีแผ่นเพลทที่สำคัญอยู่ 3 แผ่น คือ แผ่นเพลทด้านบน , แผ่นเพลทด้านล่าง และแผ่นเพลทความปลอดภัย ทั้งสามแผ่นทำจากอะลูมิเนียม จากรูปที่ 2.7 แสดงภาคตัดขวางของแผ่นเพลทด้านบน แสดงถึงตำแหน่งการวางแหล่งกำเนิดนิวตรอน แท่งเชื้อเพลิง แท่งควบคุม ท่อนิวเมตริก และท่ออาร์กภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ แผ่นเพลทด้านบนถูกติดตั้งอยู่ในบริเวณด้านบนของถังแกนเครื่องปฏิกรณ์ ขนาดของแผ่นเพลทบนหนา 2.54 cm. (1 in.) มีช่องจำนวน 121 ช่อง และแต่ละช่องมีขนาด 3.81 cm. (1-1/2 in.) ช่องทั้งหมดจัดอยู่ในรูปทรงหกเหลี่ยม นอกจากนี้ระยะห่างของแต่ละช่องจะห่างในระนาบที่เท่าๆกันเพื่อให้มีการให้ความร้อนได้ดี



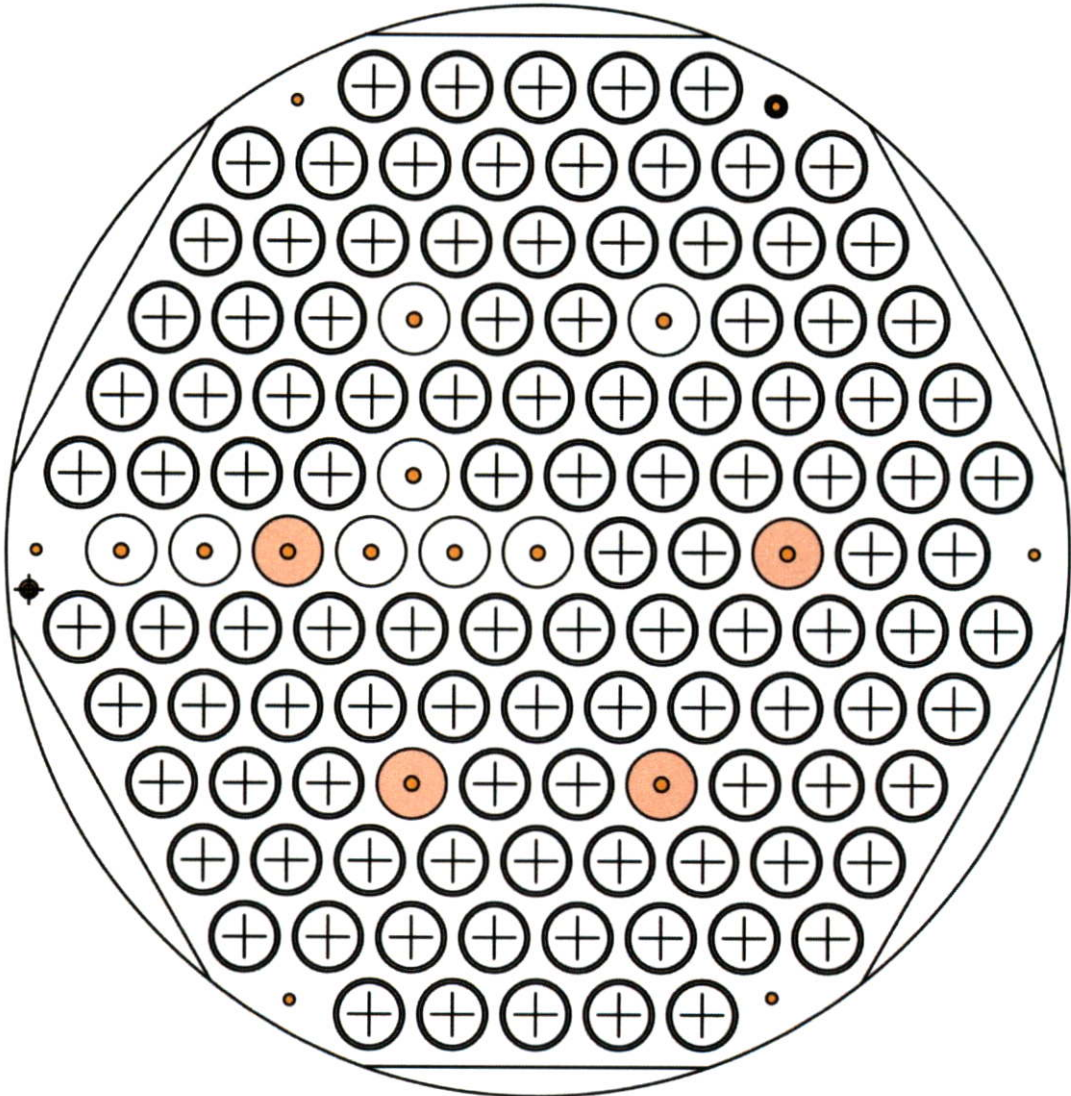
รูปที่ 2.7 ลักษณะแผ่นเพลทด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์

เมื่อดูจำนวนช่องบนแผ่นเพลทจะทำการจัดเรียงเป็นวงๆ นับจากวงในสุดมาจนถึงวงนอกสุด (วง A – วง G) มีจำนวน 7 วง ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางแผ่นเพลทมีผลต่อการทำปฏิกิริยาฟิชชัน โดยแท่งเชื้อเพลิงที่มีปริมาณเนื้อเชื้อเพลิงอยู่มากจะถูกจัดอยู่ตำแหน่ง วง B หากมีปริมาณของเนื้อเชื้อเพลิงที่ลดลงจะอยู่สลับไปอยู่ในวง C หรือวงถัดๆ ไป เรียกการสลับตำแหน่งของแท่งเชื้อเพลิงภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ว่า “การจัดการเครื่องปฏิกรณ์” และในแต่ละปีจะมีการจัดการเครื่องปฏิกรณ์ใหม่ เพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด



รูปที่ 2.8 ตำแหน่งต่างๆของแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.1/1

แผ่นเพลทแผ่นต่อมาจะถูกติดตั้งอยู่บริเวณด้านล่างของถังแกนเครื่องปฏิกรณ์ มีความหนา 3.18 cm. (1-1/2 in.) ดังรูปที่ 2.9 โดยลักษณะทั่วไปจะคล้ายคลึงกับแผ่นเพลทด้านบน นอกจากนั้น ยังทำหน้าที่รับน้ำหนักของแกนเครื่องปฏิกรณ์ทั้งหมดไว้อีกด้วย แผ่นเพลทด้านล่างจะถูกยึดให้ติดกับถังแกนเครื่องปฏิกรณ์เพื่อไม่ให้หมุน แผ่นเพลทด้านล่างยังเชื่อมกับแผ่นความปลอดภัยที่อยู่ด้านล่างมาจากแผ่นเพลทล่างลงมา 30 cm. เพื่อป้องกันไม่ให้แท่งควบคุมหลุดหรือไหลออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 2.10

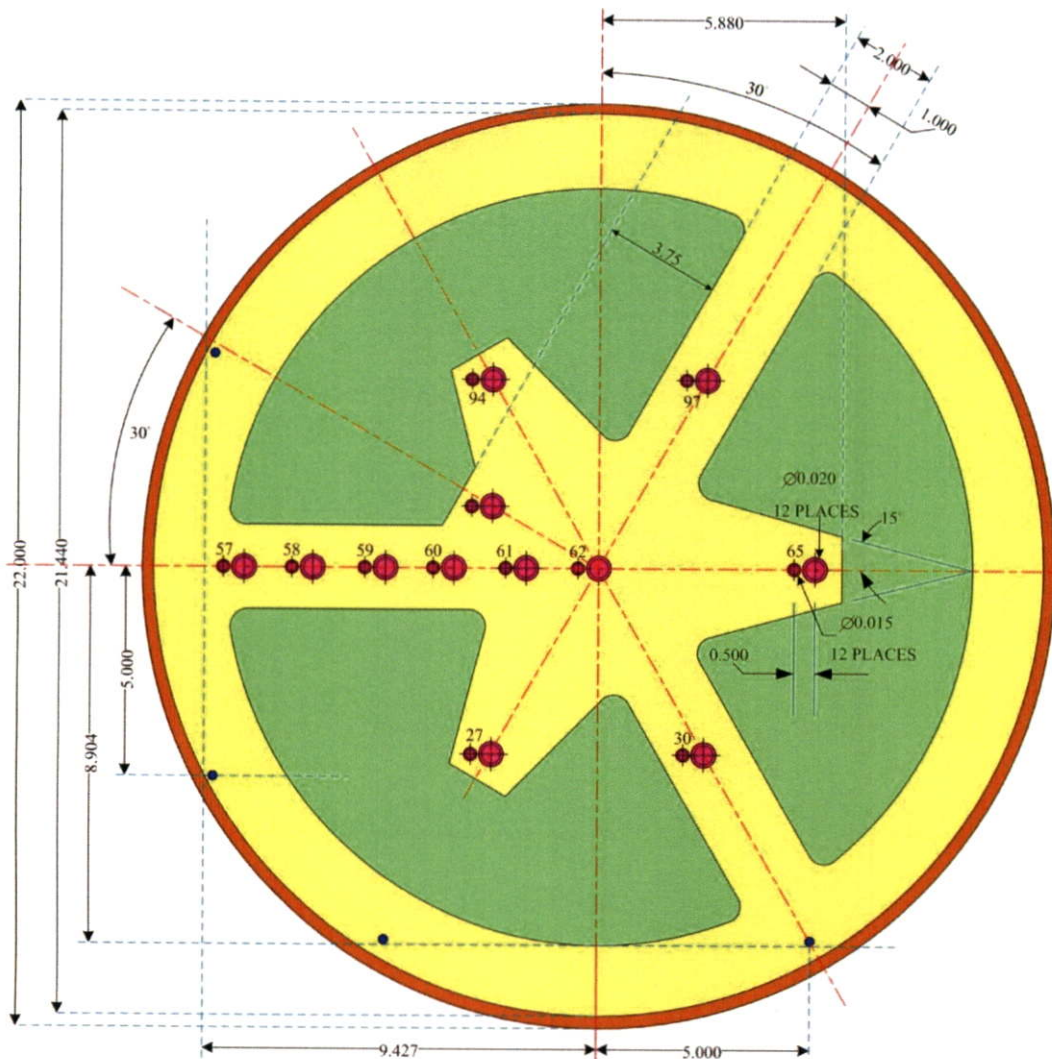


รูปที่ 2.9 ลักษณะแผ่นเพลทด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ใช้รองรับแท่งต่างๆภายในแกนเครื่อง

2.2.4 วัสดุเชื้อเพลิงและแท่งเชื้อเพลิง (Fuel)

เชื้อเพลิงประกอบด้วยหลายไอโซโทปที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน โดยเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณวิจัยจะใช้เชื้อเพลิง U-235 เป็นหลัก แท่งเชื้อเพลิงเหล่านี้วางอยู่บนแผ่นยึดแท่งเชื้อเพลิงด้านล่าง และปลายด้านบนของแท่งเชื้อเพลิงสอดทะลุแผ่นแผ่นยึดเชื้อเพลิงแผ่นบน เพื่อจัดให้แท่งเชื้อเพลิงอยู่ในลักษณะตั้งตรงอยู่ภายในถังปฏิกรณ์ จำนวนของแท่งเชื้อเพลิงในแต่ละแกน จะมีจำนวนแตกต่างกัน

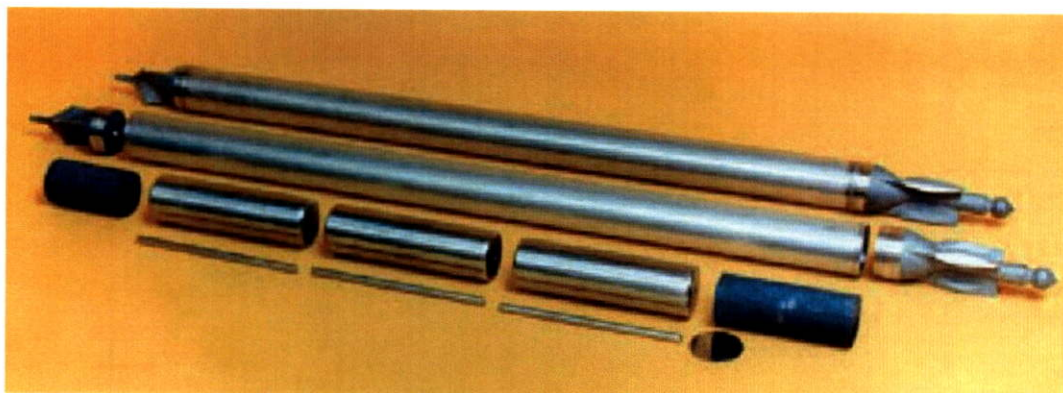
ในเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณวิจัยแท่งเชื้อเพลิงมีลักษณะของเนื้อเชื้อเพลิงเป็น U-ZrH (Uranium-Zirconium hydride) มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 1.5 in. ยาวประมาณ 30 in. ส่วนบนและล่างเป็นแกรไฟต์



รูปที่ 2.10 แผ่นเพลทความปลอดภัย ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของแท่งควบคุม และป้องกันไม่ให้แท่งควบคุมไหลออกจากแกนเครื่อง

เชื้อเพลิงชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษในการยับยั้งปฏิกิริยาฟิชชันได้เมื่ออุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงสูงขึ้นอย่างทันทีทันใด (Prompt Negative Temperature Coefficient) ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของเชื้อเพลิงชนิดนี้ จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ชนิดนี้มีความปลอดภัยสูงมาก มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,250 องศา แต่เพื่อความปลอดภัยจะตั้งให้ทำงานอยู่ในอุณหภูมิไม่เกิน 600 องศา หากเกิดจากที่ตั้งไว้เครื่องหยุดการทำงานโดยอัตโนมัติ สามารถทำงานแบบทวีกำลังได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อแท่งเชื้อเพลิง เชื้อเพลิง U-ZrH มีความสามารถในการหน่วงนิวตรอนความเร็วสูงตั้งแต่เริ่มเกิดในเนื้อเชื้อเพลิง ในบางครั้งจึงเรียกเชื้อเพลิงชนิดนี้ว่า Fuel-Moderator Element เนื้อเชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์คิดเป็นปริมาณ U-235 ที่ได้รับการเสริมสมรรถนะไม่เกินร้อยละ 20หนักประมาณ 6,702.571 กรัม ดังรูปที่ 2.11 เมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงตามรูปข้างต้นมาแยกส่วนประกอบ จะพบการแบ่ง

แท่งเชื้อเพลิงออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันโดยตลอดความยาวตลอดของเนื้อเชื้อเพลิง 38.1 cm. และระหว่างเชื้อเพลิงท่อนที่สามกับแกรไฟต์ด้านล่างจะมีโมรีดิส (moly disk) คั่นอยู่เพื่อช่วยในการยึดหยุ่นของเชื้อเพลิงในแท่ง ดังรูปที่ 2.12 นอกจากนี้ในแท่งเชื้อเพลิงบางแท่งจะมีการใส่เทอร์โมคัปเปิลเพื่อใช้วัดอุณหภูมิภายในแท่งเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.13



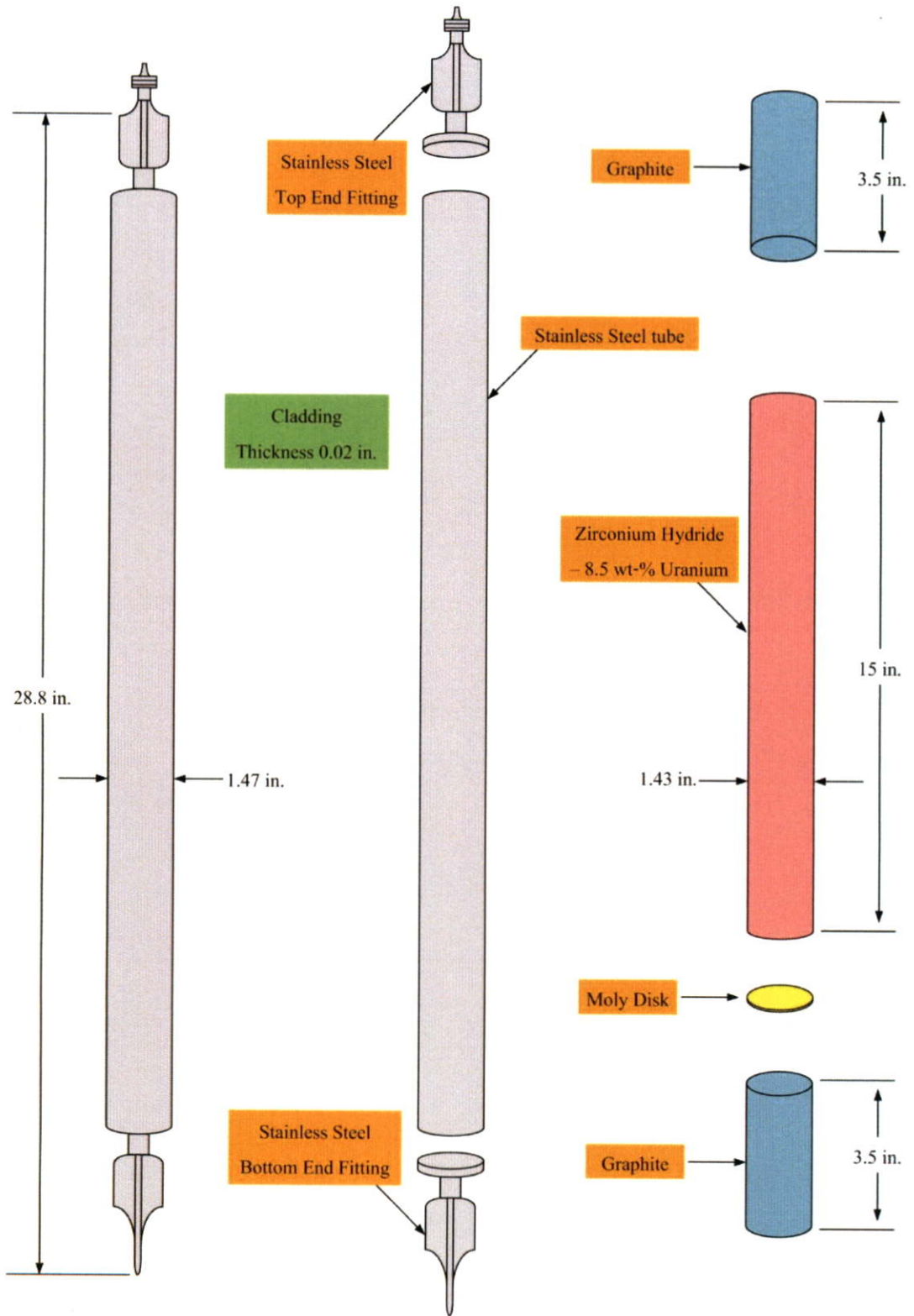
รูปที่ 2.11 แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.-1/1
มีขนาดความยาวของแท่ง 75.18 cm. เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.73 cm.

ปัจจุบันแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ภายในแกนเครื่องปว.-1/1 มี 2 ชนิด คือ

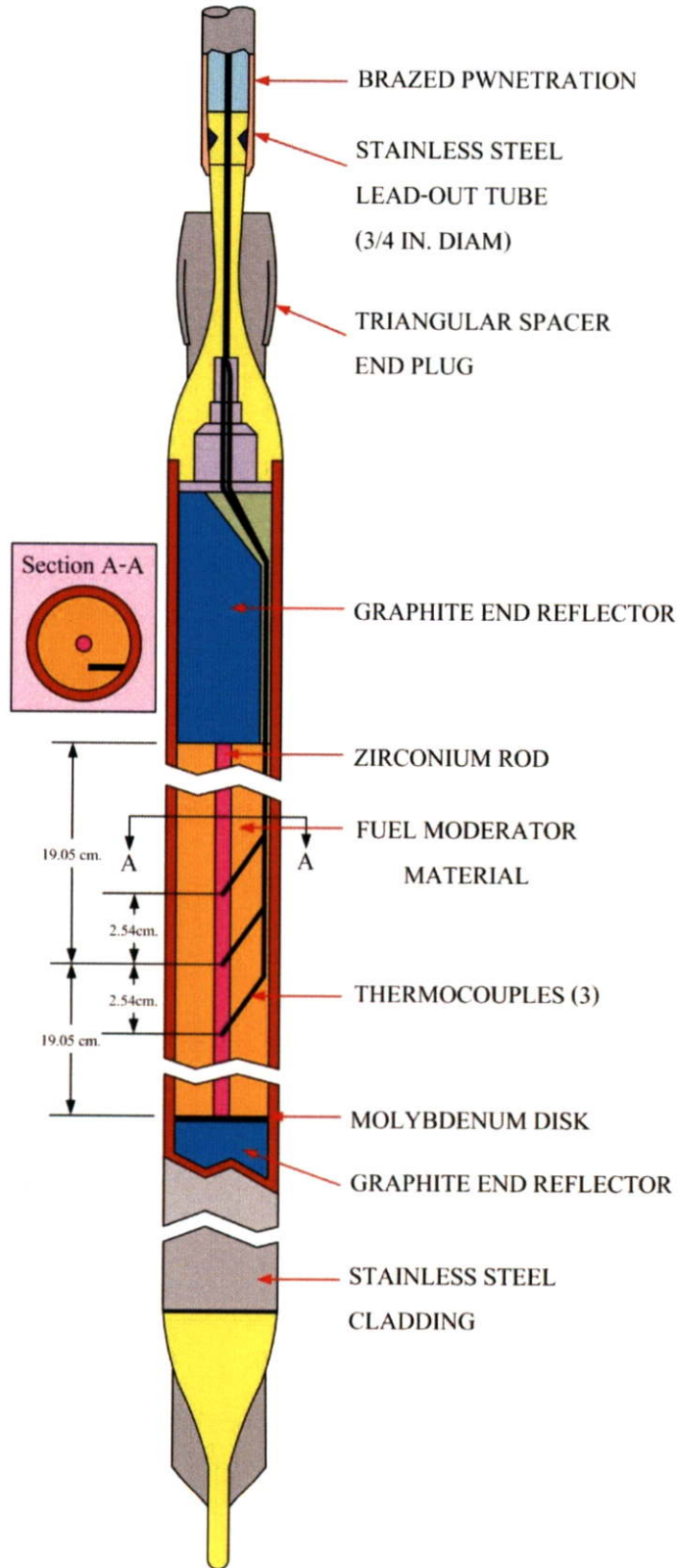
1. ชนิดที่มีปริมาณยูเรเนียมต่อปริมาณสารประกอบยูเรเนียมเซอร์โคเรเนียมไฮไดรด์ 8.5%
2. ชนิดที่มีปริมาณยูเรเนียมต่อปริมาณสารประกอบยูเรเนียมเซอร์โคเรเนียมไฮไดรด์ 20%

โดยทั้งสองชนิดมีการเสริมสมรรถนะของยูเรเนียม (มีปริมาณของ U-235 ต่อปริมาณยูเรเนียมทั้งหมด) ประมาณ 20% ของเนื้อเชื้อเพลิงยูเรเนียม และปริมาณของยูเรเนียมที่ผสมกับยูเรเนียมเซอร์โคเรเนียมมีทั้ง U-235 และ U-238 เมื่อนำมาเทียบกับเนื้อเชื้อเพลิงทั้งหมดแล้ว เนื้อเชื้อเพลิงที่เป็นยูเรเนียม U-235 และ U-238 มีปริมาณน้อยมากอยู่ในเนื้อเชื้อเพลิง

แท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ภายในเครื่อง ปว.-1/1 จะถูกระบุด้วยตัวเลขเฉพาะเพื่ออำนวยความสะดวกการนำมาใช้งาน ในบรรจุแท่งเชื้อเพลิงครั้งแรกของการเดินเครื่องปฏิกรณ์จะบรรจุแท่งเชื้อเพลิงที่มีสารประกอบยูเรเนียมเซอร์โคเรเนียมไฮไดรด์ 8.5% หลังจากนั้นจะเริ่มนำแท่งเชื้อเพลิงที่มียูเรเนียมเซอร์โคเรเนียมไฮไดรด์ 20% เข้าแทนที่ในบางตำแหน่ง จะทำให้ได้การจัดแกนใหม่เป็นแกนหมายเลข 2 และจะทำการสับเปลี่ยนตำแหน่ง หรือบรรจุแท่งเชื้อเพลิง 20% ทำเช่นนี้จนมีแท่งเชื้อเพลิงที่มี UZrH 20% ครบทุกตำแหน่ง และรายละเอียดของเนื้อเชื้อเพลิงที่ใช้ ปว.-1/1 ได้ในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.12 แสดงการแบ่งแท่งเชื้อเพลิงออกเป็น 3 ส่วน

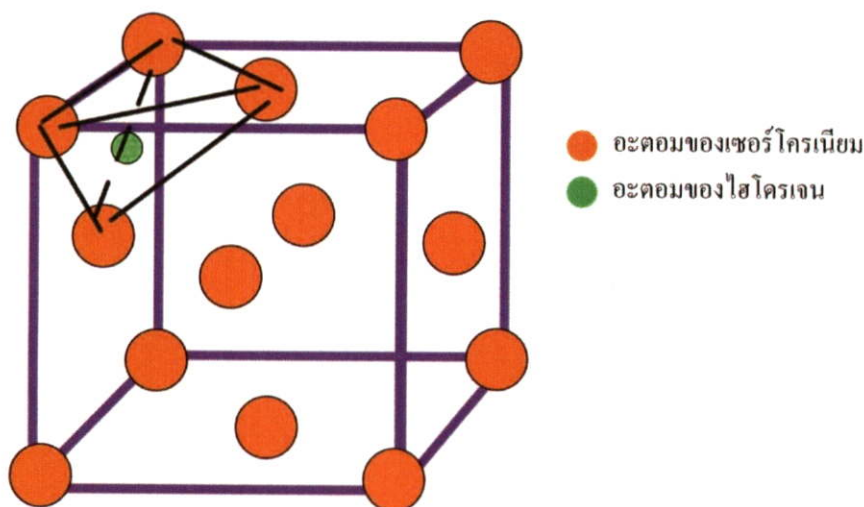


รูปที่ 2.13 แท่งเชื้อเพลิงที่บรรจุ Thermocouples ไว้ภายใน
ใช้ในการวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์

2.2.4.1 คุณสมบัติของเนื้อเชื้อเพลิงและวัสดุหุ้มเนื้อเชื้อเพลิง

ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA ได้ใช้เนื้อเชื้อเพลิงที่ถูกพัฒนาขึ้นให้มีความปลอดภัยสูง โดยต้องคำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา (temperature coefficient of reactivity) ถ้ามีการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นเนื้อเชื้อเพลิงที่ได้ใช้นี้ จะทำการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาบางส่วน เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับเนื้อเชื้อเพลิงทั้งหมด ซึ่งเนื้อเชื้อเพลิงที่ใช้ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA คือ ยูเรเนียมเซอร์โคเรียมไฮไดรด์ (UZrH) โดยในเนื้อเชื้อเพลิงบางส่วนได้รับการเสริมสมรรถนะของยูเรเนียม ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของยูเรเนียมไฮไดรด์ดังรูปที่

2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างโมเลกุลของเซอร์โคเรียมไฮไดรด์ ^[7,p1409]

โดยอะตอมของเซอร์โคเรียม (วงกลมใหญ่, สีเทา) อยู่ในรูปแบบ Face – center – cubic และอะตอมของไฮไดรเจน (วงกลมขนาดเล็ก) อยู่ภายในโครงสร้างอะตอมเซอร์โคเรียม

2.2.4.2 คุณสมบัติโลหะการของยูเรเนียมเซอร์โคเรียมไฮไดรด์

คุณสมบัติของยูเรเนียมไฮไดรด์ที่นำมาใช้ สามารถแบ่งได้ 4 ช่วงด้วยกัน ในแต่ละช่วงของเซอร์โคเรียม และยูเรเนียมทุกไอโซโทป ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้

1. ช่วงแอลฟา (Alpha-phase) : ที่อุณหภูมิต่ำไฮไดรเจนที่อยู่ในสถานะของแข็ง จะมีลักษณะของโครงสร้างเป็นรูปหกเหลี่ยมและมีแลคทิกแอลฟา-เซอร์โคเรียมบรรจุอยู่ในโครงสร้าง

2. ช่วงบีตา (Beta-phase) : ในสถานะของแข็งของไฮไดรเจน จะถูกทำละลายในน้ำ ในอุณหภูมิสูง และแลคทิกเป็น body-center cubic zirconium

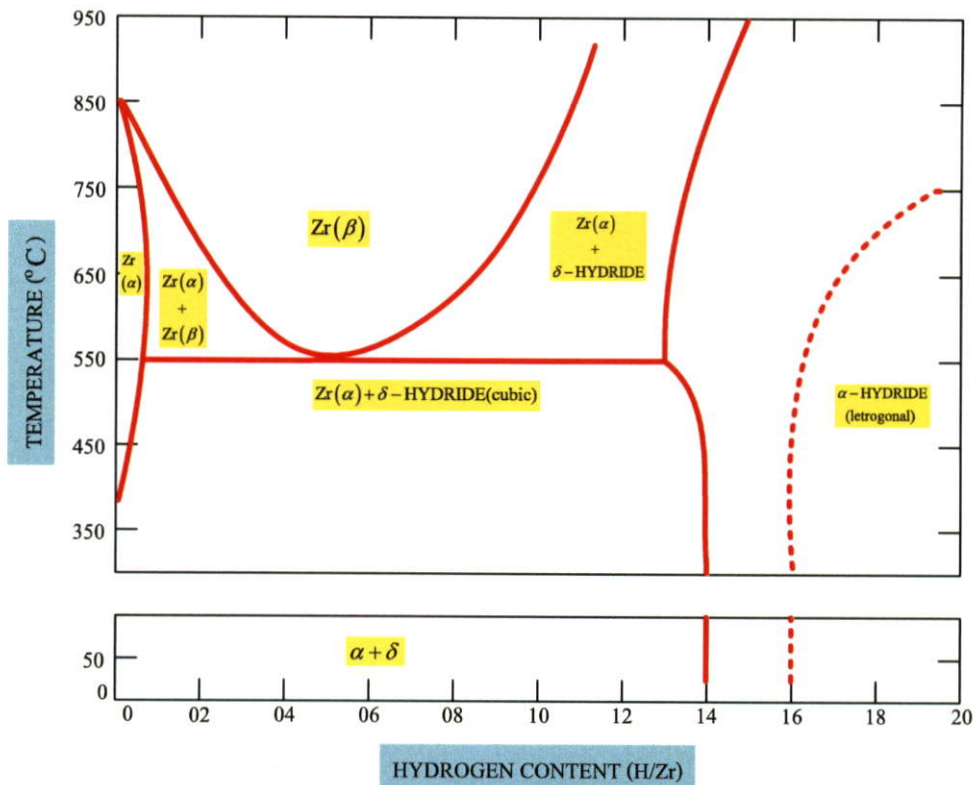
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเฉพาะของแท่งเชื้อเพลิง ภายในเครื่อง ปปว.-1/1^[6,p38]

Fuel-Moderator Material	Nominal Value	
	Uranium content	8.5 wt-%
Uranium weight	~38gm	~98 gm
H/Zr ratio	1.6	1.6
Erbium content	0	0.5 %
Enrichment (U-235)	20%	
Diameter	3.63 cm (1.43 in)	
Length	38.1 cm (15 in)	
Graphite End Reflectors	Upper	Lower
	Diameter	3.63 cm (1.43 in.)
Length	8.89 cm (3.5 in.)	8.89 cm (3.5 in.)
Molybdenum Disk	Diameter	
	3.63 cm (1.43 in.)	
Cladding	Thickness	
	0.76 cm (0.03 in.)	
End Fixture and Spacer	Material	
	Type 304 SS	
Overall Element	Wall thickness	
	0.051 cm (0.020 in.)	
Overall Element	Material	
	Type 304 SS	
Overall Element	OD	
	3.73 cm (1.47 in.)	
Overall Element	Length	
	73.15 cm (28.8 in.)	
Overall Element	Weight	
	3.2 kg (7 lb)	3.5 kg 7.7 lb

ที่มา : Safety Analysis Report for Thai Research Reactor -1/Modification 1 Chapter 5 p.35

3. ช่วงเซลล์ต้า (Delta-phase) : ลักษณะของไฮโดรเจนเป็นแบบ face-center cubic (ช่วง Delta-prime จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 240 °C จากช่วงเซลล์ต้า)

4. ช่วงอีต้า (Eta-phase) : โครงสร้างของไฮโดรเจนมีลักษณะเป็นผลึก ด้วยอัตราส่วน c/z < 1 และขยายเกินจนถึงช่วงเซลล์ต้าถึง ZrH₂ ช่วงอีต้าไม่มีช่วงความสมดุลมากนัก และจากช่วงเซลล์ต้าที่ได้จากปฏิกิริยา martensitic ซึ่งปรากฏเป็นโครงสร้างแบบคู่



รูปที่ 2.15 กราฟช่วงต่างๆของ ระบบเซอร์โคเรเนียม-ไฮโดรเจน^[6,p41]

เมื่อดูที่ยูเรเนียมจะพบว่าถูกดูดกลืนทำให้หายไปจากระบบไฮโดรด์ (hydriding) บางส่วน และในระหว่างที่ยูเรเนียมถูกดูดกลืนจะมีการกระจายตัวของการดูดกลืนสม่ำเสมอ ผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของยูเรเนียมในเซอร์โคเรเนียมไฮโดรด์ คือการเปลี่ยนแปลงขอบเขตของช่วงต่างๆของเซอร์โคเรเนียมไฮโดรด์ เมื่อมีอุณหภูมิลดลงเล็กน้อย ตัวอย่างเช่นอุณหภูมิของโลหะผสมจาก 547 °C ลดลงเหลือ 541 °C

องค์ประกอบของไฮโดรด์ (H/Zr > 1.5) จะมีช่วงเดี่ยว (เดลต้า หรือ อีต้า) และไม่อยู่ภายใต้ช่วงเทอร์มัลบนวัฏจักรเทอร์มัล สำหรับองค์ประกอบของไฮโดรด์ ZrH_{1.6} มีความสมดุลของไฮโดรเจนที่ความดันบรรยากาศค่าหนึ่งที่ประมาณ 750 °C แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงที่ โดยไม่สร้างแรงกดดันสูงจากก๊าซภายในแท่งเชื้อเพลิง

เกี่ยวกับ UErZrH มียูเรเนียมที่ได้รับการเสริมสมรรถนะที่ได้ถูกเพิ่มเข้าไปในเนื้อเชื้อเพลิงยูเรเนียมเซอร์โคเรเนียมไฮโดรด์ (U-ZrH) ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อเนื้อเชื้อเพลิง ซึ่งการเสริมสมรรถนะจะทำให้เนื้อเชื้อเพลิงมีจุดเดือดที่สูงและความดันไอค่อนข้างต่ำ เพื่อให้ผสมกับเนื้อเชื้อเพลิงยูเรเนียมเซอร์โคเรเนียมอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ไม่สามารถแยกเนื้อเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะออกจากเนื้อเชื้อเพลิงยูเรเนียมเซอร์โคเรเนียมได้

การเสริมสมรรถนะของยูเรเนียมไม่สามารถแยกจากเนื้อเพลิงที่อุณหภูมิและเวลาที่เกี่ยวข้องกับอัตราการขยายตัวที่ดำเนินไป ค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายตัวอยู่ที่ $10^{-13} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ที่ 800°C ระยะการขยายตัวอยู่ที่ 0.1 มิลลิเมตรต่อปีที่อุณหภูมิประมาณนี้ ดังนั้นสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 จะเดินเครื่องในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าที่กำหนดไว้ เพื่อให้เนื้อเชื้อเพลิงมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน นอกจากนี้ปฏิกิริยาเมื่อมีนิวตรอนวิ่งเข้าชนกับเนื้อเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะจะได้ผลผลิต (n, γ) ไม่มีการหดตัวของเนื้อเชื้อเพลิง

สามารถคำนวณความหนาแน่นในการออกแบบเชื้อเพลิงของ TRIGA ได้เมื่อทราบอัตราส่วนของ H/Zr มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 1.6 ดังสมการที่ (2.1) และคำนวณหาค่าความหนาแน่นของ UZrH สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

$$\rho_{ZrH} = \frac{1}{(0.176 + 0.0042X)} \quad (2.1)$$

$$\rho_{UZrH} = \frac{1}{\left(\frac{w_U}{\rho_U}\right) + \left(\frac{w_{ZrH}}{\rho_{ZrH}}\right)} \quad (2.2)$$

เมื่อ	ρ_{ZrH}	คือ	ค่าความหนาแน่นของ เซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (gm/cm^3)
	ρ_{UZrH}	คือ	ค่าความหนาแน่นของ ยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (gm/cm^3)
	X	คือ	อัตราส่วนของ ไฮโดรเจน ต่อ เซอร์โคเนียม
	w_U	คือ	น้ำหนักของยูเรเนียม (g)
	ρ_U	คือ	ค่าความหนาแน่นของยูเรเนียม
	w_{ZrH}	คือ	น้ำหนักของยูเรเนียมไฮไดรด์ (g)

2.2.4.3 ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไฮไดรด์ ^[7,p1417]

(Hydride fuel fabrication)

จากรูปอัตราส่วนของไฮโดรเจนส่วนด้วยเซอร์โคเนียมในรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่ามีขนาดของเฟสหลายเฟสที่กว้าง มีเฟส $(\text{U}_{0.31}\text{Zr})\text{H}_{1.6}$ เมื่อนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงจะมีค่าใช้จ่ายสูง เริ่มต้นของการผลิตเชื้อเพลิงเริ่มจากการเตรียมเนื้อเชื้อเพลิงผสมระหว่างยูเรเนียม-เซอร์โคเนียม เพื่อไปผสมกับไฮโดรเจน ซึ่งในขั้นตอนการผสมต้องมีความระมัดระวัง ในการผสมไฮโดรเจนต้องทำในอุณหภูมิที่คงที่ผ่าน 3 เฟส ต่อไปนี้ เฟสแรกอัลฟา-เซอร์โคเนียม ($\alpha\text{-Zr}$) จากนั้นจะผ่านไปยังเฟสที่สอง คือ เบต้า-เซอร์โคเนียม ($\beta\text{-Zr}$) โดยนำไฮไดรด์สองเฟสและนำมา

ทำให้เป็นเฟสเดียว ซึ่งจัดอยู่ในเฟสที่สาม เดลต้า (δ) และการเปลี่ยนแปลงของปริมาณในกระบวนการนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เซอร์โคเรเนียมมีความหนาแน่นของอะตอมในเฟสเบต้า-เซอร์โคเรเนียม อยู่ที่ 16% และมีความหนาแน่นมากกว่าในเฟสเดลต้า ซึ่งจะหมายถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณเนื้อเชื้อเพลิง เมื่อนำไฮโดรด์มาผสมจากปริมาณที่เท่ากัน นอกจากนี้โครงสร้างผลึกที่มีการเปลี่ยนแปลงจากเดิม

ดังรูปที่ 2.16 เป็นการแสดงการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง (U-Zr) H_x พร้อมสำหรับบรรจุในวัสดุหุ้มเนื้อเชื้อเพลิง ยูเรเนียมในของ Hexfluoride ที่มาจากการเสริมสมรรถนะของยูเรเนียมจะเปลี่ยนรูปเป็น tetrafluoride และได้ก๊าซไฮโดรเจน อีกทั้งมี HF ต้องจัดการสถานะของ H_2 อยู่ในความดัน 1 บรรยากาศและมีอุณหภูมิประมาณ $500^\circ C$ โดยผง UF_4 ถูกเก็บไปด้านล่างของเตาหลอมเพื่อลดปฏิกิริยา (เรียกว่า ระเบิดปรมาณู) เมื่อเพิ่ม Ca หรือ Mg เข้าในเนื้อเชื้อเพลิง UF_6 จะทำให้เนื้อเชื้อเพลิงรับปฏิกิริยาเหลือ UF_4



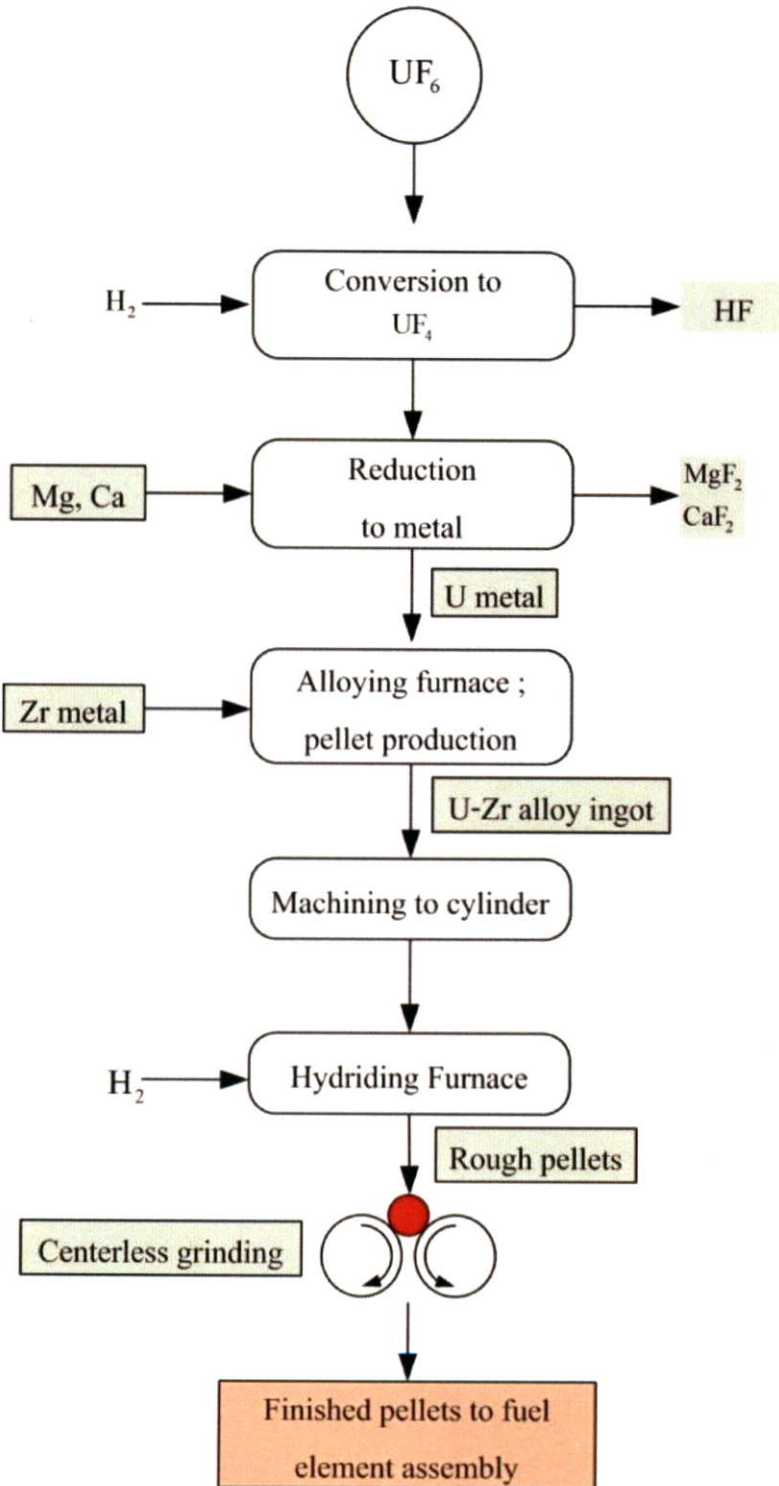
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อนที่อุณหภูมิสูงจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเพื่อไม่ให้อุณหภูมิลดลง และอุณหภูมิสูงสุดของขั้นตอนที่กล่าวมาขั้นต้นคือ จุดหลอมเหลวของยูเรเนียม ($1,132^\circ C$) ผลผลิตที่ได้เมื่อนำ Ca เข้าไปผสมจะได้ CaF_2 เป็นตะกอนลอยอยู่ด้านบนของโลหะเหลว ทำให้สามารถแยกได้ง่าย และในขั้นตอนนี้ได้ยูเรเนียมบริสุทธิ์

โลหะผสมจะทำการหลอมยูเรเนียมพร้อมกับเซอร์โคเรเนียมในปริมาณที่เหมาะสมจะกระทำภายในเตาหลอม ในขั้นนี้จะทำให้แคลเซียมกลายเป็นไอ และ CaF_2 แยกเป็นตะกอน และกลายเป็นรูปของเหลว โลหะผสมเมื่อหลอมเป็นเนื้อเดียวกันจะปล่อยมาจากเบ้าหลอมและไหลสู่แม่พิมพ์หรือให้โลหะเย็นตัวนำออกจากพิมพ์แล้วทำความสะอาดเพื่อเตรียม hydriding การทำความสะอาดเพื่อนำออกไซด์ และ ไนไตรด์ออกจากพื้นผิวเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก เพราะเมื่อนำไปเจือไฮโดรเจนแล้วจะทำให้ไฮโดรเจนไม่สามารถเจือได้มากถ้าพื้นผิวของเม็ดเชื้อเพลิงไม่สะอาด ขั้นตอนการทำความสะอาดมีขั้นตอนดังนี้

1. ล้างด้วย trichloroethylene
2. ตรวจสอบรอยรอบๆเม็ดเชื้อเพลิง
3. ล้างใน HNO_3 และ HF
4. ลงในน้ำกลั่น , แอลกอฮอล์

การเพิ่มไฮโดรเจนเข้าไปในเม็ดเชื้อเพลิงต้องกระทำอย่างระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกตัวของไฮโดรด์ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณดังที่กล่าวมาขั้นต้น ขั้นตอนของการเพิ่มไฮโดรเจนทำดังนี้ ให้ความร้อนแก่เม็ดเชื้อเพลิงที่ $\sim 800^\circ C$ และเพิ่มไฮโดรเจน ~ 100 Torr เพื่อให้มีความสมดุลระหว่างสองเฟส เบต้า-เซอร์โคเรเนียม / เดลต้า (β -Zr / δ) เพิ่มเข้าไป 130 Torr

ที่อุณหภูมิเดียวกัน ก๊าซไฮโดรเจนมีขนาดเล็กทำให้สามารถดูดซึมได้ง่าย แต่ถ้าดูดซึมมากเกินไป
เสี่ยงต่อการแตกร้าวของเม็ดเชื้อเพลิงได้



รูปที่ 2.16 แผนผังขั้นตอนการผลิตเนื้อเชื้อเพลิงชนิดไฮโดรด์^[7,p1418]

2.2.5 แท่งควบคุม (Control rod)

เป็นวัสดุที่ดูดกลืนนิวตรอนได้ดีมีลักษณะเป็นแท่งทำหน้าที่เคลื่อนที่ขึ้นและลงได้ตามความต้องการ เพื่อใช้ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน ดังรูปที่ 2.17 เนื่องจากเป็นแท่งที่ใช้ดูดกลืนนิวตรอนการเคลื่อนที่ขึ้นและลง จะมีผลทำให้ Multiplication factor (k) ของระบบเปลี่ยนแปลง ถ้านำแท่งควบคุมขึ้นจะทำให้ค่า k มีค่าเพิ่มขึ้น ถ้านำแท่งควบคุมลงค่า k จะมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่าแท่งควบคุมเป็นตัวควบคุมการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ ทั้งในการเริ่มเดินเครื่อง (Started up) และหยุดการทำงาน (Shut down) หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาขึ้น โดยการปรับตั้งระยะความสูงของแท่งควบคุมในระยะที่เหมาะสม นอกจากนี้แท่งควบคุมจะถูกปรับตั้งเพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในภาวะวิกฤต หรือทำงานที่ระดับกำลังหนึ่ง วัสดุส่วนใหญ่ที่มักนำมาทำเป็นแท่งควบคุม เช่น คาร์บอน โบรอน แคดเมียม เป็นต้น

สำหรับแท่งควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของไทยจะมีลักษณะและขนาดคล้ายแท่งเชื้อเพลิงแต่มีส่วนบนเป็น Boron Carbide (B4C) ซึ่งใช้เป็นตัวดูดจับนิวตรอน และส่วนล่างจะเป็นเนื้อเชื้อเพลิงยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ แท่งควบคุมชนิดนี้มีจำนวน 4 แท่งคือ SAFE SH1 SH2 และ REG สำหรับแท่งควบคุมชนิด TR จะไม่มีเนื้อเชื้อเพลิง

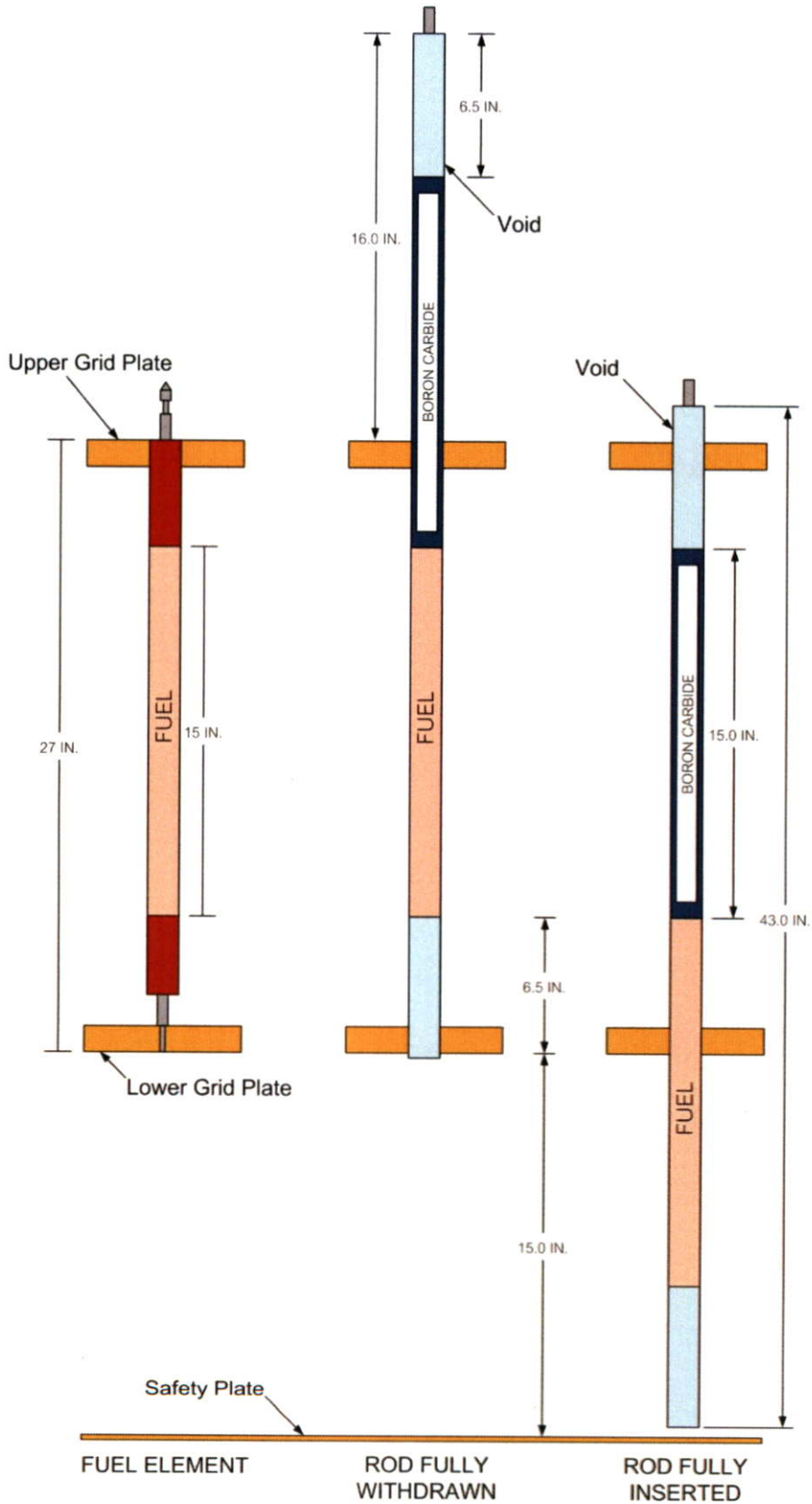
แท่ง RR, SH1, SH2 และ SA สามารถแบ่งช่วงของแท่งควบคุมออกได้ 3 ช่วง ในช่วงบนของแท่ง(6.5 in.)จะว่างเปล่าไม่มีเนื้อสารใดภายใน ถัดมาเป็นเนื้อโบรอนคาร์ไบด์ (Boron carbide) (15 in.) ทำหน้าที่ดูดกลืนนิวตรอน และลดการเกิดปฏิกิริยาภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู และในช่วงล่างจะเหมือนกับช่วงบน และแท่ง ST ยาว 93.35 cm. เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.18 cm. เป็นแท่งอากาศตลอดทั้งแท่ง รายละเอียดดังตารางที่ 2.2

2.2.6 แหล่งกำเนิดนิวตรอน (Neutron source)

แหล่งกำเนิดนิวตรอนของเครื่องปว.-1/1 เป็น Am-Be (Americium Beryllium) มีความแรงรังสี 3 คูรี มีครึ่งชีวิต 458 ปี แหล่งกำเนิดนิวตรอนใช้เป็นตัวจุดชนวนปฏิกิริยาฟิชชัน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ หลังจากเกิดปฏิกิริยา ลูกโซ่แล้วต้นกำเนิดนิวตรอนก็ไม่มีคามจำเป็นต้องใช้แต่ยังคงติดตั้งอยู่ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ และอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมในการทำให้เกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.18

2.2.6.1 นิวตรอน

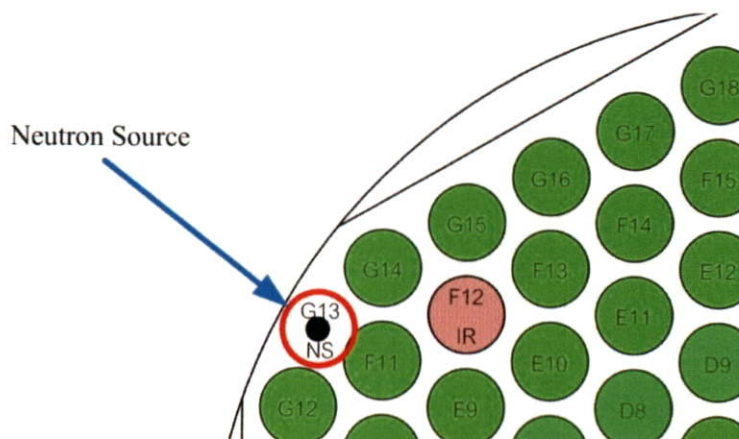
ในปี ค.ศ.1930 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ โบเทอ (Bothe) และเบคเคอร์ (Becker) ทดลองยิงอนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของธาตุโพโลเนียม (Po) เข้ากระทบกับแผ่นเบริลเลียม (Be) แล้วพบว่า มีรังสีชนิดหนึ่งเกิดขึ้น เป็นรังสีที่ไม่มีประจุและมีอำนาจทะลุทะลวงสูง สามารถเคลื่อนที่ผ่านตะกั่วหนา 200 มิลลิเมตรได้ ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ทั้งสองคาดว่าเป็นรังสีแกมมาพลังงานสูง



รูปที่ 2.17 ตำแหน่งของเนื้อเชื้อเพลิงและสารควบคุมภายในแท่งควบคุม

ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดของแท่งควบคุม ^[6,p71]

	Safety Transient	Shim, Safety, And Regulating
<u>Cladding</u>		
Material	Al	Type 304 SS
OD	3.18 cm. (1.25 in.)	3.43 cm. (1.35 in.)
Wall thickness	0.071 cm. (0.028 in.)	0.051 cm. (0.020 in.)
Length	93.35 cm. (36.75 in.)	109.5 cm. (43.13 in.)
<u>Absorber</u>		
Material	Boron Carbide	(solid form)
OD	3.02 cm. (1.19 in.)	3.32 cm. (1.31 in.)
Length	38.1 cm. (15 in.)	36.20 cm. (14.25 in.)
<u>Follower</u>		
Material	Air	U-ZrH
OD	3.18 cm. (1.25 in.)	3.34 cm. (1.31 in.)
Length	53.02 cm. (20.88 in.)	38.1 cm. (15 in.)



รูปที่ 2.18 ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1

ในการศึกษาต่อมา ลูกสาวของมารี คูรี ชื่อไอเรน คูรี (Irene Curie) และสามี เฟรเดอริก (Ferderic) และอธิบายว่า อนุภาคโปรตอนพลังงานสูงที่เกิดขึ้นจากอนุภาคนิวตรอน แชนดวิกทำการทดลองให้อนุภาคนิวตรอนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน แล้ววัดความร้อนของอนุภาคโปรตอนที่

เกิดขึ้น จากนั้นจึงคำนวณมวลของอนุภาคนิวตรอน จากกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม พบว่าอนุภาคนิวตรอนมีมวลใกล้เคียงกับอนุภาคโปรตอน โดยมีค่าประมาณ 1.0067 เท่า ของมวลโปรตอน ดังนั้นจากการทดลองของโบเทอและเบคเคอร์ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

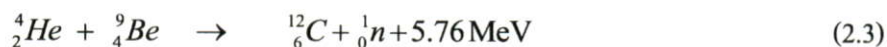
2.2.6.2 แหล่งกำเนิดนิวตรอน ^[8,p145]

นิวตรอนจะถูกผลิตได้ 2 กระบวนการ คือ 1. การระดมยิงนิวเคลียร์ 2. การแบ่งแยกปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยส่วนใหญ่ภายในห้องปฏิบัติการขนาดเล็กจะใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์ แต่ในทางกลับกันจำนวนนิวตรอนภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้นจำนวนมากก็จริง

แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่เคลื่อนที่ได้โดยใช้หลักการระดมยิงนิวเคลียร์นั้นมี 2 แบบ คือ

1. โดยอาศัยแหล่งกำเนิดสารกัมมันตรังสี
2. โดยอาศัยเครื่องเร่งอนุภาคที่มีประจุโดยอาศัยความต่างศักย์สูง

อุปกรณ์ที่ใช้แหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีนั้นจะเรียกทั่วไปว่า “ปืนใหญ่นิวตรอน” (howitzer) หรือ ถ้านำก้อนยูเรเนียมมาหุ้มรอบแหล่งกำเนิดนิวตรอนซึ่งเป็นทิวูณจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้น โดยผ่านการแบ่งแยกนิวเคลียส อุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่า “เครื่องปฏิกรณ์ได้วิกฤต” แหล่งกำเนิดนิวตรอนมีส่วนประกอบของผงเบริลเลียมผสมกับตัวปลดปล่อยรังสีแอลฟาในรูปคล้ายเม็ดขยานิวตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมาโดยปฏิกิริยา (α, n) ของเบริลเลียมเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ปฏิกิริยาที่ผลิตนิวตรอนอื่นๆ คือ



ในแต่ละปฏิกิริยานี้จำเป็นต้องอาศัยแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีของอนุภาคที่ใช้ระดมยิง หรือ โฟตอนธาตุอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องก็มีโบรอนและลิเทียม ซึ่งจะปลดปล่อยนิวตรอนออกมาเมื่อถูกระดมยิงด้วยอนุภาคแอลฟา แหล่งกำเนิดแอลฟาเพื่อใช้ในวัตถุประสงค์นี้ประกอบด้วย Ra-226, Ra-DEF, Po-210, Th-228, Pu-239 และ Ac-227 ซึ่งสามารถแยกแยะแหล่งกำเนิดนิวตรอนได้ดังตารางที่ 2.3

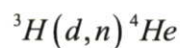
แหล่งกำเนิดนิวตรอนพลูโทเนียม – เบริลเลียมนั้นเป็นแหล่งกำเนิดที่มีครึ่งชีวิตยาวนาน สามารถผลิตนิวตรอนได้สูง ฟลักซ์แกมมาต่ำ และราคาไม่สูงมากนัก แฮตซ์ (Hertz) ได้รายงานว่แหล่งกำเนิดนิวตรอนเหล่านี้ผลิตภายในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ลอซอลามอส โดยวิธีของเทต (Tate) และคอฟฟินเบอร์รี่ (Coffinberry) ได้นำเอาพลูโทเนียมและเบริลเลียมมาเผาด้วยกันในบ้ำของเบริลเลียมออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบให้ความร้อนออกมาผลลัพท์ที่ได้จากการเกิดของผสมคือ PuBe_{13} ส่วนวิธีของริชมอนด์ (Richmond) และ เวลล์ (Well) ได้พัฒนาขึ้นภายในห้องปฏิบัติการโมลด์ เมืองไมอามิสเฟอรัค มลรัฐโอไฮโอ โดยใช้วิธีจนถึงปี ค.ศ.1960 ได้นำเม็ดพลูโทเนียมเข้ามาแทนที่มวลของเบริลเลียมและหุ้มด้วยภาชนะแทนทาลัมและนำเอาภาชนะโลหะ

ตารางที่ 2.3 การแยกแยะแหล่งกำเนิดนิวตรอนของแอลฟา – เบริลเลียม [8,p144]

แหล่งกำเนิด	ครึ่งชีวิต	ผลิตผล (n/s/Ci)	ฟลักซ์นิวตรอน ที่ 1 เมตร (n/cm ² /s)	รังสีแกมมาที่ให้ (mr-h-m/Ci)
²²⁶ Ra:Be	1620 y	1.2×10 ⁷	95	850
Ra – DEF:Be	21 y	2.6×10 ⁶	20.7	22
²¹⁰ Po:Be	138 d	2.6×10 ⁶	20.7	0.1
²²⁸ Th:Be	1.9 y	1.8×10 ⁷	143	575
²³⁹ Pu:Be	24360 y	2.2×10 ⁶	17.5	3.7
²²⁷ Ac:Be	22 y	1.8×10 ⁷	143	146

ไรส์นิมหุ้มอีกชั้นหนึ่ง ปืนใหญ่นิวตรอนประกอบด้วยแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่หุ้มด้วยพาราฟินหรือน้ำภายในภาชนะพลาสติก อะลูมิเนียม หรือ โลหะไรส์นิม จะมีปล่องหรือช่องที่เจาะทะลุถึงแหล่งกำเนิดนิวตรอน รวมทั้งจะมีการเตรียมพื้นที่และตำแหน่งใช้สำหรับวางสารตัวอย่างเพื่ออาบรังสีนิวตรอน หรือจะทำไว้เพื่อเป็นตัวผลิตลำนิวตรอน พาราฟินและน้ำนั้นอุดมไปด้วยโปรตอน ดังนั้นใช้เป็นตัวลดระดับพลังงานของนิวตรอนได้ดีเป็นอย่างยิ่ง โดยการที่นิวตรอนเร็วจะชนกับโปรตอนพร้อมกับสูญเสียพลังงานจนไปอย่างรวดเร็วท้ายที่สุดก็จะวิ่งช้ากลายเป็นเทอร์มัลนิวตรอน

ตัวกำเนิดนิวตรอนซึ่งใช้เพื่อการผลิตนิวตรอนนั้นราคายังไม่สูงมาก โดยเครื่องชนิดนี้จะเป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่จะให้อนุภาคควิเทอร์อนพลังงานสูงออกมา เมื่อให้อนุภาคเหล่านี้ชนกับเป้าของ ³H – เซอร์โคเรเนียมไฮไดรด์ (Zr³H₄) จะให้นิวตรอนออกมาตามปฏิกิริยา



ซึ่งลักษณะของแหล่งกำเนิดนิวตรอนสามารถผลิตนิวตรอนได้ถึง 10⁸ ตัวต่อวินาที นิวตรอนฟลักซ์ที่ได้จะสูงกว่าเครื่องปืนใหญ่นิวตรอนประมาณ 10 ถึง 50 เท่า

2.2.6.3 การจำแนกชนิดของนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ มวล 1.008665 amu เป็นองค์ประกอบของนิวเคลียส ยกเว้นอะตอมของไฮโดเจน เมื่ออยู่ในนิวเคลียส นิวตรอนจะเป็นอนุภาคที่อยู่ตัว แต่เมื่ออยู่เป็นอิสระ จะสลายตัวให้อนุภาคบีตาและโปรตอน ด้วยครึ่งชีวิต 12.8 วินาที ดังสมการ



จำแนกนิวตรอนนั้นอาศัยพลังงานและความเร็วของนิวตรอนเป็นหลัก ดังนี้ และเขียนเป็นตารางการจำแนกได้ดังตารางที่ 2.4

1. นิวตรอนช้า (slow neutron) หมายถึง อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ 1 keV อาจจำแนกได้เป็น

- เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) มีพลังงานเฉลี่ย 0.025 eV ที่ 20 °ซ.
- เรโซแนนซ์นิวตรอน (resonance neutron) หรือ อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วง 0.025-100eV

2. นิวตรอนเร็ว (fast neutron) หมายถึง อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 1 keV อาจจำแนกได้เป็น

- นิวตรอนปานกลาง (intermediate neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วง 1-500 keV
- นิวตรอนพลังงานสูง (high energy neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วง 0.5-20 MeV
- นิวตรอนสัมพัทธภาพ (relativistic neutron) มีพลังงานสูงกว่า 20 MeV

การจำแนกเทอร์มัลนิวตรอนถูกจำแนกจากค่าพลังงานเฉลี่ยมีค่าเท่ากับค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลอากาศ ณ อุณหภูมิห้อง พลังงานของนิวตรอนเหล่านี้จะกระจายแบบแมกซ์เวลล์ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีจลน์ เทอร์มัลนิวตรอนเป็นนิวตรอนที่เคลื่อนที่ช้าเกิดจากนิวตรอนเร็วถูกทำให้ช้าลงด้วยกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการชนหลายครั้งกับนิวเคลียส

อันตรกิริยาของนิวตรอนเกิดจากนิวตรอนมีคุณสมบัติเป็นตัวกลางทางไฟฟ้าจึงไม่มีกำแพงที่จะป้องกัน ไม่ให้ทั้งเทอร์มัลนิวตรอนและนิวตรอนเร็ววิ่งเข้าชนกับนิวเคลียสของอะตอมซึ่งนิวตรอนอาจจะทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสแบบยึดหยุ่นหรือไม่ยึดหยุ่นก็ได้ หรือจะถูกจับด้วยนิวเคลียสก็ได้

การกระเจิงแบบยึดหยุ่น เป็นการกระเจิงเบื้องต้นของการทำให้นิวตรอนลดความเร็วลง ในการชนแบบยึดหยุ่นนี้ค่าพลังงานทั้งหมดและโมเมนตัมรวมทั้งหลายของนิวตรอนและนิวเคลียสจะมีค่าคงที่ นั่นคือไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเลย ธาตุที่ใช้ทำเป็นตัวลดระดับพลังงานนิวตรอนนี้ส่วนใหญ่จะใช้คาร์บอนและไฮโดรเจน การชนของนิวตรอนกับไฮโดรเจนนั้นจะเป็นการชนแบบยึดหยุ่น คาร์ที่ไฮโดรเจนมีประสิทธิภาพสูงในการใช้เป็นการลดระดับพลังงานเนื่องจากมวลของไฮโดรเจนมีความใกล้เคียงกับนิวตรอนมาก และพาราฟิน น้ำ รวมทั้งสารที่มีไฮโดรเจนเข้มข้นก็เหมาะที่จะใช้เป็นตัวลดพลังงานนิวตรอน

การเลี้ยวเบนของนิวตรอนโดยผลึกจะเกี่ยวข้องกับการกระเจิงแบบยึดหยุ่นชนิดพิเศษที่เรียกว่า “การกระเจิงเอกพันธ์” ซึ่งการกระเจิงแบบนี้จะพิจารณาการชนของนิวตรอนเป็นแบบคลื่น การกระเจิงแบรคค์ของโฟตอน จะเป็นตัวอย่างของการกระเจิงแบบเอกพันธ์ ซึ่งสามารถจะประยุกต์ใช้สมการของแบรคค์ได้ คือ $n\lambda = 2d \sin \theta$ ความยาวคลื่น λ คือความยาวคลื่นเดอบรอกของนิวตรอน

ตารางที่ 2.4 แสดงการจำแนกชนิดของนิวตรอน ^[9,p236]

ชื่อ	พลังงาน	อันตรกิริยาหลัก	หมายเหตุ
เทอร์มัลนิวตรอน	0.025 eV ที่ 29 °C	การจับ	ความเร็วเฉลี่ย = 2200 m/s การกระจายพลังงานเป็นแบบแมกซ์เวลล์
ขนาดกลาง	> 0.025 - 1 keV	การกระเจิงแบบยืดหยุ่นและการจับ	การดูดกลืนเป็นไปตามกฎ 1/v และแสดงบอดการดูดกลืน
เร็ว	< 1 keV	การกระเจิงแบบยืดหยุ่น	นิวตรอนส่วนใหญ่จะปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียสด้วยพลังงานช่วงนี้
สัมพันธภาพ	>20 MeV	การแตกเป็นเสี่ยง	มวลสัมพันธภาพจะมีค่ามากกว่ามวลนิ่ง

การกระเจิงเรโซแนนซ์แบบไม่ยืดหยุ่น การกระเจิงแบบนี้จะทำให้พลังงานทั้งหมดของระบบการชนสูญหายในปฏิกิริยาแบบ $(n, n'\gamma)$ เมื่อ n เป็นนิวตรอนที่ตกกระทบ n' เป็นเทอร์มัลนิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียสซึ่งอาจจะเป็นนิวตรอนตัวเดิมหรือตัวใหม่ก็ได้ซึ่งส่วนต่างของพลังงานที่แตกต่างนั้นจะอยู่ในรูปของโฟตอน การทำให้นิวตรอนเคลื่อนที่ช้าลงด้วยคาร์บอนนั้นก็เป็นแบบคล้ายๆกับที่กระบวนการกล่าวมา

ปฏิกิริยาการจับนิวเคลียสส่วนใหญ่เมื่อจับนิวตรอนเข้าไปแล้วจะทำให้พลังงานเพิ่มขึ้น 8 MeV บวกกับพลังงานจลน์ของนิวตรอน ดังนั้นนิวเคลียสผสมที่เกิดขึ้นจากการจับนิวตรอนเข้าไปจะอยู่ในสถานะพลังงานสูง ซึ่งการที่จะเข้าสู่ภาวะเสถียรได้อีกนั้นจะเกิดขึ้นโดยการปลดปล่อยอนุภาคหรือโฟตอนออกมา ปฏิกิริยาการจับแบบนี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนที่ตกกระทบ

1. ปฏิกิริยาเทอร์มัลนิวตรอนเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปพลังงานของนิวเคลียสที่เพิ่มขึ้นเพียง 8 MeV ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคภายในหลุดออกมาได้ด้วยเหตุนี้จึงเป็นปฏิกิริยาการกักกัมมันต์ แบบ (n, γ) เลขอะตอม Z คงเดิม แต่เลขมวล A จะเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ดังสมการ



2. นิวตรอนพลังงานขนาดกลาง การจับนั้นแม้ว่าจะส่งผลให้เป็นแบบกักกัมมันต์ดังข้อ (2.5) แต่นิวเคลียสผสมที่เกิดขึ้นอาจจะมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยวและปลดปล่อยอนุภาคออกมา เช่น โฟตอน ดิวเทรอน หรือ อนุภาคแอลฟาออกมา ปฏิกิริยาแบบนี้ส่งผลให้เกิดธาตุใหม่รวมเรียกว่า “การแปรธาตุตัวอย่างของปฏิกิริยา (n, p) ” คือ



ปฏิกิริยาแบบ (n, α)



3. นิวตรอนเร็ว มีพลังงานจลน์สูงถึง 10 MeV จะทำให้นิวเคลียสมีพลังงานเพิ่มถึง 18 MeV ในขณะที่พลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างนิวคลีออนมีค่าเพียง 8 MeV ด้วยเหตุนี้อนุภาคทั้งสองอนุภาคอาจถูกปลดปล่อยออกมา ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยา $(n, 2n)$



4. นิวตรอนสัมพัทธภาพ จะมีนิวคลีออนหลายตัวที่จะถูกขับออกมาจากนิวเคลียสได้ด้วยนิวตรอนที่มีพลังงานสูงขนาดนี้ ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้เช่น $(n, 3n)$ และ $(n, 2np)$

ในแต่ละแบบของอันตรกิริยานิวตรอนก็จะมีการชนแบบอื่นๆ และสัดส่วนของการชนยังส่งผลให้ปฏิกิริยาเฉพาะในแต่ละแบบ จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของภาคตัดขวางในปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง

2.2.6.4 แหล่งกำเนิดนิวตรอนจากภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์⁽¹⁰⁾

โดยทั่วไปนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ มีเพียงนิวคลีอิดกัมมันตรังสี ที่มีครึ่งชีวิตสั้นมาก ที่ผลิตขึ้นมาเพียงไม่กี่นิวคลีอิดเท่านั้นที่สลายตัวให้นิวตรอน เช่น ${}^{17}N$ และ 5He ดังนั้นจึงจำแนกแหล่งกำเนิดนิวตรอนได้ตามปฏิกิริยานิวเคลียร์ดังนี้

1. จากแหล่งกำเนิดนิวตรอน (Neutron Source) ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยตำแหน่งของการวางแหล่งกำเนิดนิวตรอนจะวางให้อยู่บริเวณขอบของแผ่นเพลทใกล้กับสารระบายความร้อน เพื่อป้องกันการเกิดของนิวตรอนที่มีมากจนเกินไป

2. ปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยให้อนุภาคแอลฟา คิวเทอรอน โปรตอน หรือรังสีแกมมา ทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับธาตุที่เหมาะสม เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา (α, n) , (d, n) , (p, n) , (γ, n)

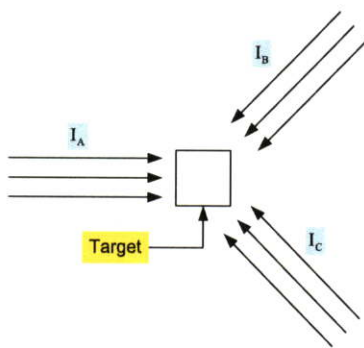
3. ปฏิกิริยาฟิชชัน เมื่อธาตุหนักๆ เช่น ${}^{238}U$ เกิดฟิวชัน จะให้นิวตรอนเร็วที่อาจมีพลังงานตั้งแต่ระดับ keV จนมากกว่า 10 MeV โดยมีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 2 MeV แหล่งปฏิกิริยาฟิชชันที่สำคัญคือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) ซึ่งนิวตรอนที่เกิดขึ้นจะลดพลังงานลงโดยการชนกับสารหน่วงนิวตรอน (moderator) และนิวตรอนวิ่งเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เกิดปฏิกิริยาฟิชชันลูกโซ่ให้นิวตรอนออกมามากมาย หากเป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบวิจัย ก็จะมีช่องให้นิวตรอนผ่านออกไปยังบริเวณที่จะทำการวิจัย นิวตรอนที่ผลิออกมาจากแกนเครื่องปฏิกรณ์อาจเรียกอีกชื่อว่า นิวตรอนฟลักซ์ เมื่อดูจากคำนิยามจะพบว่า นิวตรอนฟลักซ์คือ ความเข้มของรังสีนิวตรอน วัดจากจำนวนนิวตรอนที่ผ่านพื้นที่ ขนาด 1 หน่วย ใน 1 หน่วยเวลา และความหนาแน่นของลำนิวตรอนจำนวนหนึ่งวิ่งเข้าชนเป้า สามารถเขียนสมการต่อ cm^3/sec ได้ดังนี้

$$F = \sum_i I \tag{2.9}$$

เมื่อ F ความหนาแน่นของลำนิวตรอน
 \sum_i เป็นค่าผลรวมของภาคตัดขวางทั้งหมด
 I ความเข้มของรังสีนิวตรอน

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.19 ถ้าวัตถุที่เป็นเป้าขนาดเล็กถูกสมมติให้ถูกชนด้วยลำนิวตรอนมีค่าพลังงานเดียวกัน แต่ในความเป็นจริงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพลังงานของนิวตรอนที่วิ่งเข้าชนมีหลายค่าพลังงาน สามารถเขียนสมการรวมของพลังงานที่เกิดขึ้นในสมการ (2.9) ได้ดังนี้

$$F = \sum_i (I_A + I_B + I_C + \dots) \tag{2.10}$$



รูปที่ 2.19 ลำนิวตรอนที่กำลังวิ่งเข้าชนเป้า ^[10,p61]

สมมติให้มีพลังงานเข้าไปกระตุ้นนิวตรอน โดยเขียนนำสมการ $I = nv$ มาแทนในสมการ (2.10) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$F = \sum_i (n_A + n_B + n_C + \dots)v \tag{2.11}$$

เมื่อ n_A, n_B และ n_{\dots} คือความหนาแน่นของนิวตรอนในบริเวณนั้นๆ ที่แตกต่างกันระดับพลังงาน และ v ความเร็วของนิวตรอน เมื่อนำค่านิวตรอนต่างๆ $n_A + n_B + n_C + \dots$ มารวมกันจะเท่ากับ n แทนเข้าไปในสมการ (2.11) ได้สมการ

$$F = \sum_i nv \tag{2.12}$$

และปริมาณ nv ในสมการ (2.12) ซึ่งเรียกว่า นิวตรอนฟลักซ์ (Neutron Flux : ϕ) สามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ϕ ได้สมการดังนี้

$$\phi = nv \tag{2.13}$$

เมื่อ ϕ คือ ความหนาแน่นของนิวตรอนมีหน่วยเป็น
 จำนวนนิวตรอนต่อพื้นที่ต่อหน่วยเวลา
 n คือ จำนวนนิวตรอนต่อหน่วยปริมาตร
 v คือ ความเร็วของนิวตรอน มีหน่วยเป็นระยะทางต่อหน่วยเวลา (m/s)

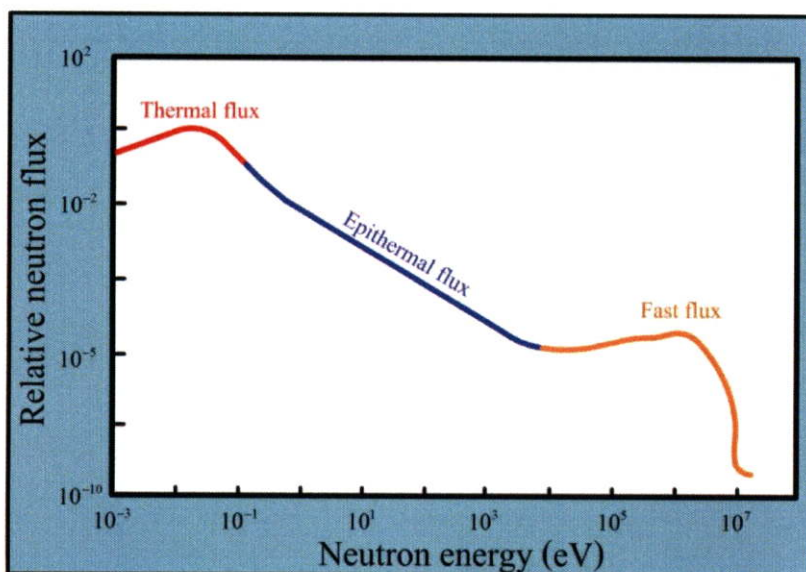
นำสมการ (2.13) แทนค่าในสมการ (2.12) จะเขียนสมการใหม่ได้

$$F = \Sigma_f \phi \quad (2.14)$$

แต่เนื่องจาก นิวตรอนฟลักซ์วิ่งเข้ามาชนเป้าทุกทิศทุกทางสามารถเขียนสมการได้ใหม่ว่า

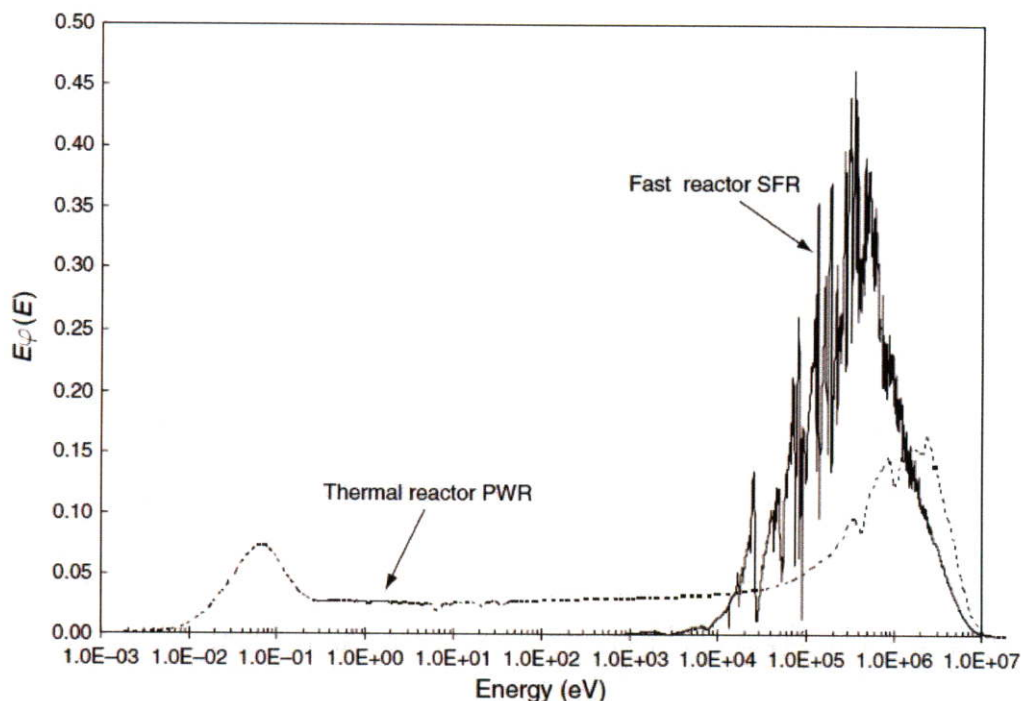
$$\phi_{\text{Total}} = \phi_1 + \phi_2 = n_1 v_1 + n_2 v_2 \quad (2.15)$$

และจำนวนความหนาแน่นนิวตรอนฟลักซ์มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาฟิชชันที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 2.20 แสดงช่วงพลังงานของนิวตรอนฟลักซ์ในช่วงพลังงานต่างๆ

จากรูปที่ 2.20 และ 2.21 กล่าวมาในข้างต้นในแถบพลังงานของนิวตรอนภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเทอร์มัลนิวตรอนและแบบนิวตรอนเร็ว ซึ่งช่วงของพลังงานของนิวตรอนที่เกิดขึ้นภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน โดยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเทอร์มัลใช้นิวตรอนในช่วงนิวตรอนเร็วเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันกับแท่งเชื้อเพลิง U-235 และหลังจากการเกิดปฏิกิริยาจะลดพลังงานลงเป็นเทอร์มัลนิวตรอนวิ่งเข้าชนกับแท่งเชื้ออีกครั้ง แต่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนิวตรอนเร็วใช้นิวตรอนเร็วเป็นตัวทำปฏิกิริยาและจะไม่มีการลดพลังงานของนิวตรอนลงทำให้มีนิวตรอนเร็วอยู่ภายในแกนเป็นจำนวนมาก และความแตกต่างของทั้งสองชนิดอีกประการหนึ่งคือ สารระบายความร้อน โดยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเทอร์มัลนิวตรอนใช้น้ำเป็นสารระบายความร้อน ส่วนภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนิวตรอนเร็วใช้ก๊าซฮีเลียมในการระบายความร้อนภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 2.21 แสดงจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ กับพลังงาน (MeV) ^[11,p72]
 ภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเทอร์มัลนิวตรอน และชนิดนิวตรอนเร็ว

2.2.7 สะพานยึดเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor bridge)

โครงสร้างของสะพานทำหน้าที่สำหรับยึดเครื่องปฏิกรณ์ โครงสร้างของสะพานทำจากเหล็กเชื่อมมีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถูกติดตั้งอยู่ด้านบนของสระน้ำ หน้าที่ของสะพานนอกจากทำหน้าที่ยึดเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ตำแหน่งที่กำหนดแล้ว ยังทำหน้าที่สนับสนุนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ในด้านการศึกษาวิจัยภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ และยังใช้ซ่อมบำรุงเครื่องปฏิกรณ์ได้ง่าย

ตัวสะพานมีความกว้าง 1.8 เมตร ยาว 4.2 เมตร ในบริเวณกึ่งกลางสะพานมีแกนยึดเครื่องปฏิกรณ์กับสะพานไว้ บริเวณพื้นด้านหลังของสะพานมีลูกล้อเชื่อมติดอยู่ ใช้สำหรับเคลื่อนย้ายเครื่องปฏิกรณ์จากสระเล็กไปขึ้นสระใหญ่ ในการเคลื่อนย้ายแกนเครื่องปฏิกรณ์จะถูกควบคุมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.22

2.2.8 เทอร์มัลคอลัมน์ และวอยแท็งก์ (Thermal column and Void tank)

เทอร์มัลคอลัมน์ จัดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำบังรังสีจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยเทอร์มัลคอลัมน์ ถูกติดตั้งอยู่ในบริเวณก้นสระน้ำ ตรงกับแกนเครื่องปฏิกรณ์ จัดได้ว่าบริเวณนั้นเป็นบริเวณที่มีปริมาณรังสีสูง ทำให้เทอร์มัลคอลัมน์กำบังรังสีลดปริมาณรังสีที่เกิดขึ้น ขนาดของเทอร์มัลคอลัมน์ มีขนาด 150 cm. x 150 cm. x 240 cm. ทำจากบล็อกแกรไฟต์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการลดปริมาณรังสีได้ดี ลักษณะของเทอร์มัลคอลัมน์ จะเป็นดังรูปที่ 2.23

วอยแท็งค์ถูกติดตั้งอยู่ระหว่างแกนเครื่องปฏิกรณ์กับเทอร์มัลคอลลัมน์ ทำหน้าที่ลดความเร็วและความร้อนของนิวตรอนที่ถูกส่งไปยังท่อนิวตรอนบีท ความร้อนในเหลือจากวอยแท็งค์จากถูกส่งไปยังเทอร์มัลคอลลัมน์ รูปทรงของวอยแท็งค์สี่เหลี่ยมผืนผ้า พื้นผิวด้านที่อยู่ตรงข้ามกับแกนเครื่องปฏิกรณ์จะโค้งไปตามรูปทรงของแกนเครื่องปฏิกรณ์ และพื้นผิวอีกด้านอยู่ติดกับเทอร์มัลคอลลัมน์ วอยแท็งค์นอกจากทำหน้าที่ลดความเร็วของนิวตรอนแล้ว ยังทำหน้าที่ยึดท่อนิวตรอนบีททั้ง 4 ท่อ ให้อยู่ในระดับเดียวกับแกนเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อนำนิวตรอนไปใช้ในการศึกษา และถ่ายภาพนิวตรอน ดังรูป 2.23 ที่แสดงให้เห็นโครงสร้างวอยแท็งค์

2.2.9 ท่อนำนิวตรอน (Neutron beam ports)

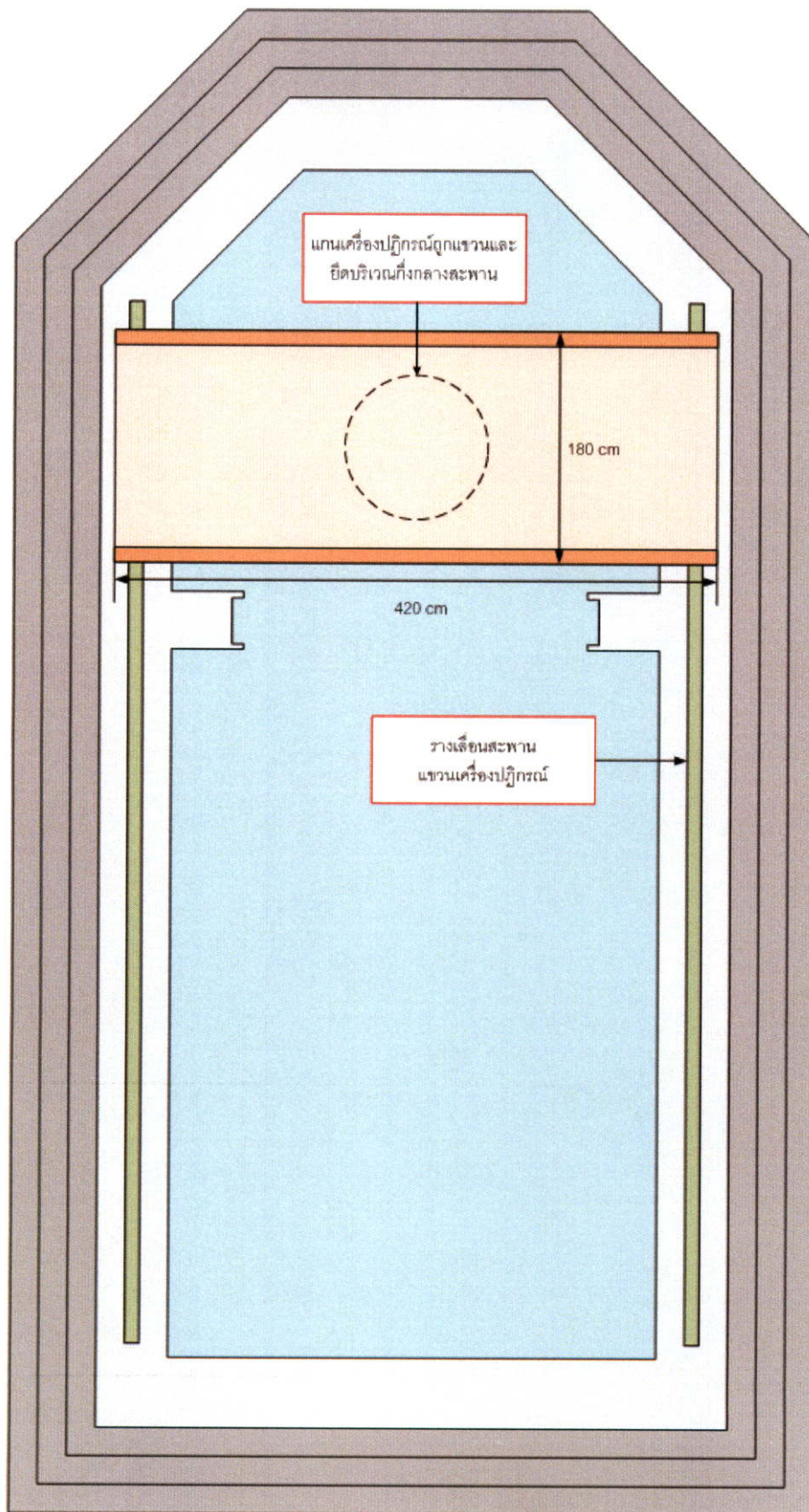
ท่อนำนิวตรอนถูกติดตั้งในอยู่ตรงตำแหน่งเดียวกับแกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยท่อนำนิวตรอนจะพาดผ่านวอยแท็งค์ออกไปยังนอกสระเครื่องปฏิกรณ์ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ปว.-1/1 มีท่อนำนิวตรอนจำนวน 4 ท่อ ในแต่ละท่อจะนำนิวตรอนไปใช้ในการศึกษาวิจัย และถ่ายภาพวัตถุด้วยรังสีนิวตรอน ท่อนำนิวตรอนมี 2 แบบ โดยแบ่งตามขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อคือ ท่อขนาด 20 cm. (8 in.) และท่อขนาด 15 cm. (6 in.) ท่อนำนิวตรอนทำจากอะลูมิเนียมผสม 6061 คุณสมบัติพิเศษสามารถลดปริมาณความแรงรังสีสู่ภายนอก ตำแหน่งของท่อนิวตรอนวางอยู่ในทิศเหนือ 2 ท่อ และวางอยู่ในทิศใต้ 2 ท่อ ดังแสดงรูปในรูปที่ 2.23

2.2.10 สะพานเครื่องมือทดลอง (Instrument Bridge)

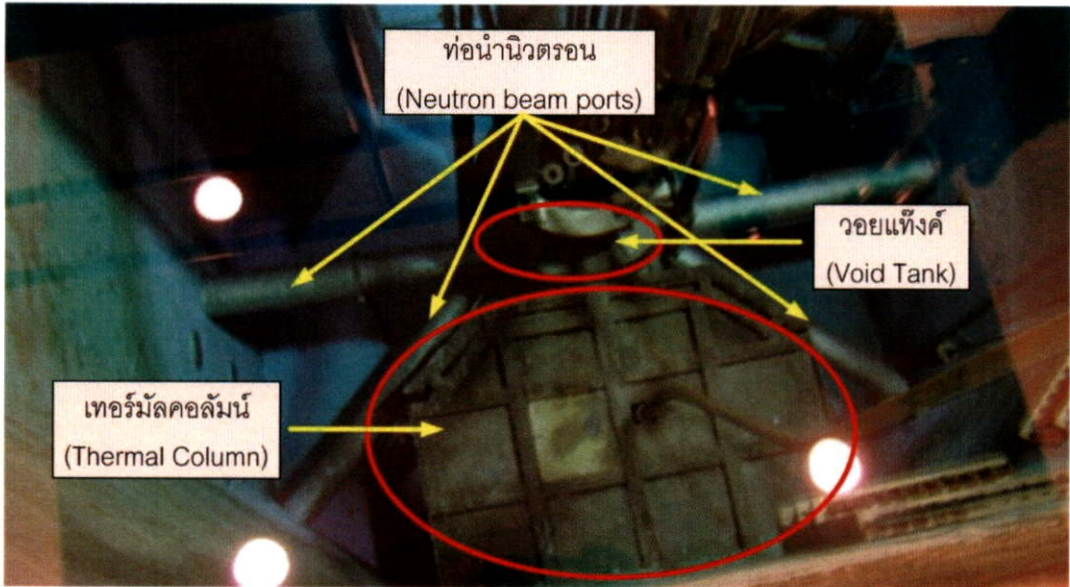
นอกจากสะพานสำหรับยึดเครื่องปฏิกรณ์ด้านบนของสระแล้ว ยังมีสะพานสนับสนุนการทดลองภายในเครื่องปฏิกรณ์อีก 1 สะพาน คือ สะพานเครื่องมือทดลอง ทำจากเหล็กยาว 4.40 เมตร กว้าง 1.84 เมตร ทำหน้าที่ยึดอุปกรณ์สำหรับอบรังสีภายนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ ลักษณะการทำงานคล้ายสะพานยึดเครื่องปฏิกรณ์ดังรูปที่ 2.3

2.2.11 ที่เก็บเชื้อเพลิง (Fuel Storage Racks)

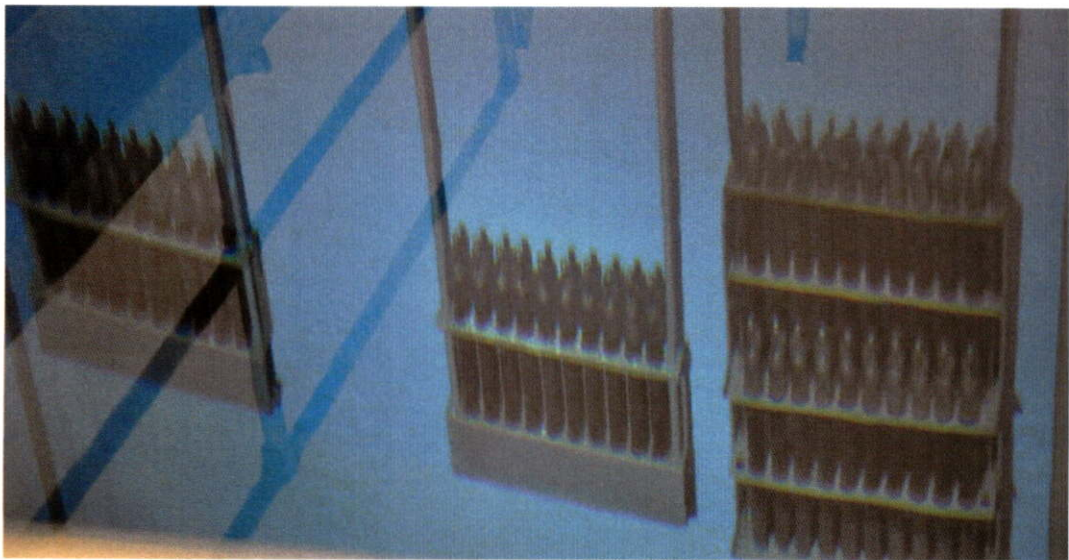
ที่เก็บเชื้อเพลิงทำมาจากอะลูมิเนียม ถูกติดตั้งอยู่ใต้น้ำตามแนวผนังของสระน้ำ สามารถจัดเก็บแท่งเชื้อเพลิงได้จำนวน 10 แท่ง ซึ่งจะจัดเก็บไว้ชั่วคราวเพื่อนำไปใช้อีกครั้งหรือรอการจัดการกากกัมตรังสี ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.22 ภาพสะพานแขวนเครื่องปฏิกรณ์ด้านบนสระน้ำเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 2.23 ภาพตำแหน่งเทอร์มัลคอลัมน์ และวอยแท็งก์ ภายในสระน้ำเครื่องปฏิกรณ์



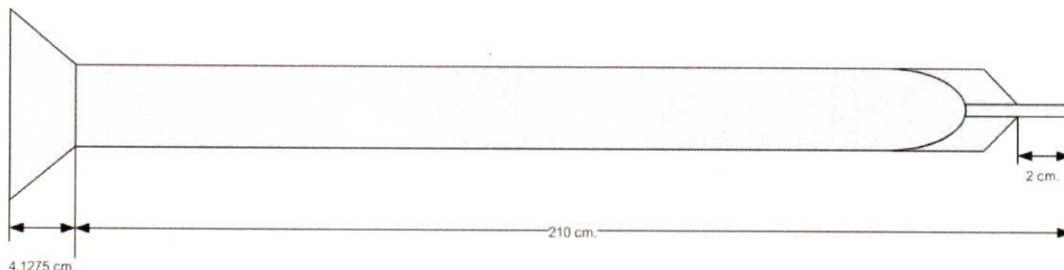
รูปที่ 2.24 ที่เก็บแท่งเชื้อเพลิงภายในสระน้ำเครื่องปฏิกรณ์

2.2.12 ท่ออาบรังสี

2.2.12.1 ท่ออาบรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์

ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์นอกจากมีแท่งเชื้อเพลิง และแท่งควบคุมแล้วนั้น ยังมีท่ออาบรังสีภายในแกนเครื่องติดตั้งอยู่ภายในแกน ซึ่งภายในแกนเครื่อง ปปว.-1/1 มีท่ออาบรังสีภายในแกนจำนวน 8 ท่อ ซึ่งท่ออาบรังสีภายในแกนเครื่องทำจากอะลูมิเนียมซึ่งเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.81 cm. (1-1/2 in.) ดังรูปที่ 2.25 และในแต่ละท่อจะมีความหนาแน่นของนิวตรอนฟลักซ์ไม่เท่ากัน

ขึ้นอยู่กับระยะและตำแหน่งของการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ ตัวอย่างสารที่ต้องการอบรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ต้องถูกบรรจุภายในหลอดโพลีเอทิลีนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 3.50 cm. เพื่อให้การเคลื่อนที่ของหลอดสารทดลองได้สะดวก



รูปที่ 2.25 ท่ออบรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์

2.2.12.2 ท่ออบรังสีภายนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์

ท่ออบรังสีภายนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ถูกติดตั้งอยู่บนสะพานเครื่องยึดเครื่องปฏิกรณ์ โดยท่ออบอยู่รอบๆเครื่องปฏิกรณ์ ท่ออบรังสีภายนอกแกนเครื่องทำจากอะลูมิเนียม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.81 cm. (1-1/2 in.) และความยาวของท่อยาวถึงสะพานยึดเครื่องปฏิกรณ์ สามารถขยายท่ออบรังสีไปพร้อมๆการเคลื่อนย้ายแกนเครื่องปฏิกรณ์ ท่ออบรังสีภายนอกแกนสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ

1. ท่ออบรังสีหุ้มแคมเมียม เพื่อให้การอบรังสีได้นิวตรอนในช่วง อิพิลเทอร์มัล นิวตรอน และ นิวตรอนเร็ว
2. ท่ออบรังสีหุ้มกราไฟต์ เพื่อให้ได้นิวตรอนในช่วง เทอร์มัลนิวตรอน จนถึง นิวตรอนเร็ว

ท่ออบรังสีภายนอกสามารถเพิ่มจำนวนท่อ หรือถอดออกได้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งท่ออบรังสีนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ในขณะนี้ มีจำนวน 5 ท่อ ประกอบด้วย A4 , A1 , CA2 , CA3 และ TA

2.2.12.3 ท่ออบรังสีโรตารี (Rotary specimen rack)

ท่ออบรังสีโรตารีหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า ท่อ Lazy Susan หรือเรียกย่อๆว่า ท่อ LS มีลักษณะรูปทรงเป็นรูปโดนัทล้อมรอบแกนเครื่องปฏิกรณ์ ท่อ LS ใช้ในการอบรังสี ไอโซโทป หรือทำการวิเคราะห์นิวตรอน สามารถอบรังสีสารตัวอย่างได้ 41 ช่องในเวลาพร้อมๆกัน โครงสร้างของท่อ LS มีส่วนประกอบใหญ่ๆ 6 ส่วนด้วยกัน

1. ท่ออบรังสี LS เป็นชุดท่อที่อยู่รอบๆแกนเครื่อง ปปว.-1/1
2. สามารถบรรจุหลอดทดลองที่บรรจุสารตัวอย่างเพื่ออบรังสีภายในท่อได้ง่าย

3.สามารถส่งหลอดทดลองจากท่อที่อยู่บนสะพานยึดเครื่องปฏิกรณ์ไปยังท่ออาบได้ง่าย

4.ท่ออาบรังสี LS ถูกติดตั้งในแนวตั้ง

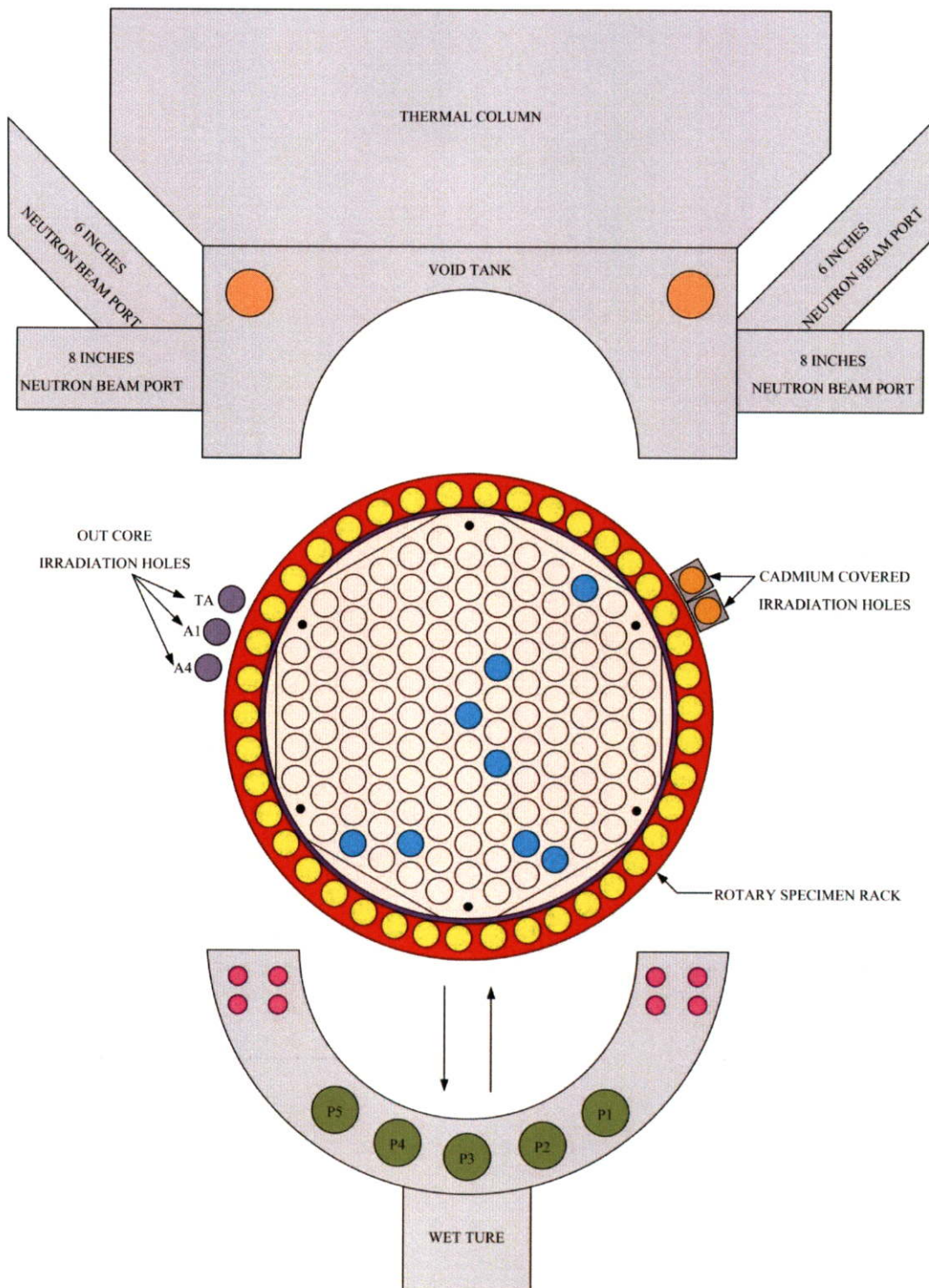
5.ท่ออาบรังสี LS ถูกควบคุมการทำงาน หรือ ทำการทดลองภายในท่อบนสะพานยึดเครื่องปฏิกรณ์

6.สารที่ต้องการอาบรังสีต้องถูกบรรจุในภาชนะที่มิดชิด

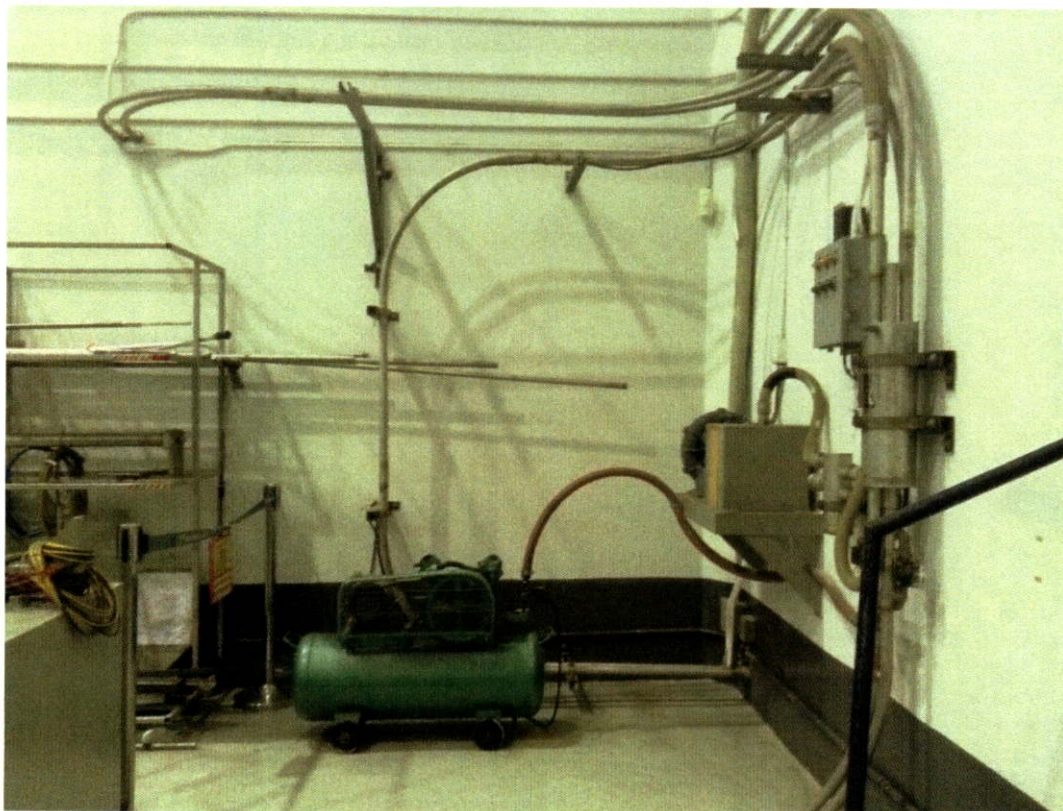
ท่ออาบรังสี LS ทำจากอะลูมิเนียม มีช่อง 41 ช่องสำหรับใช้อาบรังสี โดยลักษณะของช่องด้านบนจะเปิดเพื่อให้สามารถบรรจุหลอดทดลองภายในช่อง ส่วนด้านล่างของท่อเป็นท่อปลายปิดเพื่อไม่ให้หลอดทดลองหลุดออกจากตำแหน่ง เมื่อมีความต้องการทดลองภายในท่อ LS จะทำการเลื่อนวงล้อของท่อขึ้นเพื่อบรรจุหลอดทดลอง และเลื่อนลงไปยังตำแหน่งของแกนเครื่องปฏิกรณ์ เพื่ออาบรังสีต่อไป

2.2.12.4 ท่ออาบรังสีระบบนิวเมตริก (Pneumatic sample transfer system)

ท่ออาบรังสีระบบนิวเมตริก ใช้ส่งสารตัวอย่างเพื่ออาบรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ (อาจเรียกท่ออาบรังสีระบบนิวเมตริก สั้นๆว่า ท่อ 'rabbit' ซึ่งทำการเชื่อมต่อระหว่างห้องทดลองกับแกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้ระบบลมในการเคลื่อนย้ายสารตัวอย่าง มีเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อส่งประมาณ 6 cm. และเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดทดลองไม่เกิน 3 cm. อยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ 13 cm. ในการอาบรังสีแต่ละครั้ง จะอาบไม่เกิน 10 นาที) ท่อ rabbit จะวางท่ออยู่ในแนวตั้ง ซึ่งขนานกับแกนเครื่อง ดังรูปที่ 2.27 และ 2.28 เมื่อหลอดทดลองเคลื่อนที่มาตามท่อส่งผ่านผนังสระน้ำและต่อไปยังแกนเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งท่อที่ใช้สำหรับการอาบรังสีระบบนิวเมตริกอยู่ในตำแหน่ง G22 บนแกนเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 2.29



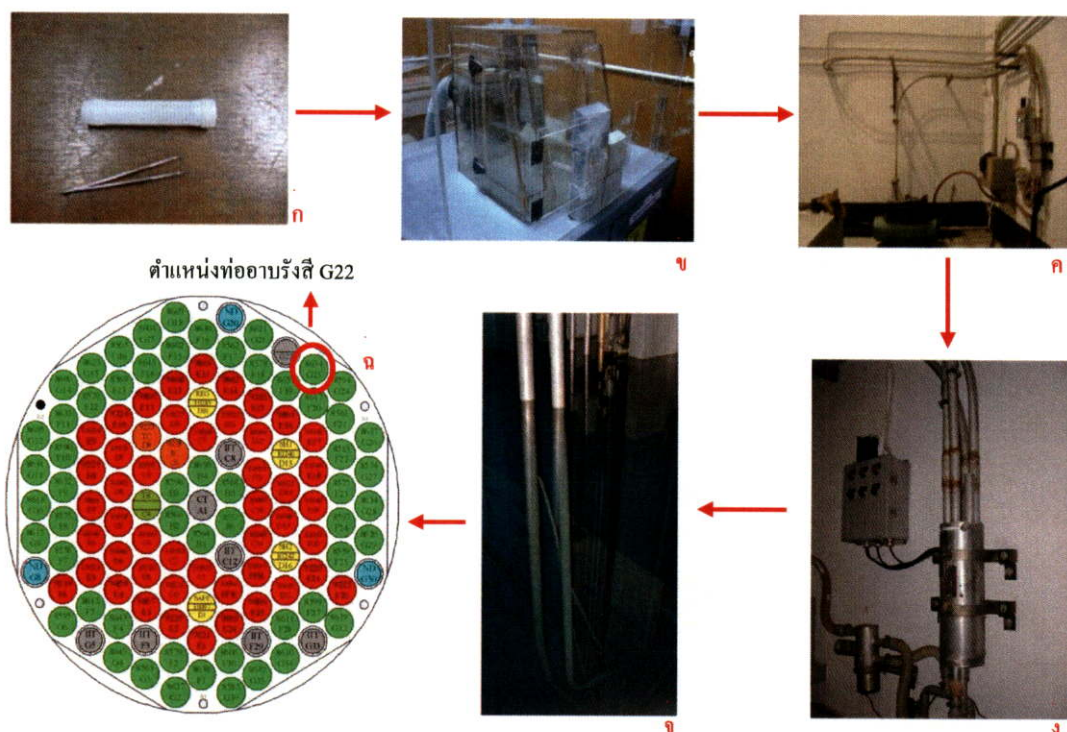
รูปที่ 2.26 แสดงตำแหน่งที่อบรังสีภายนอกแกนเครื่องปว.-1/1



รูปที่ 2.27 ระบบอบรังสีด้วยลมภายในเครื่องปฏิกรณ์ปปว.-1/1



รูปที่ 2.28 ทิศทางของท่ออบรังสีด้วยลม มีทิศทางขนานไปกับแกนเครื่องปฏิกรณ์ และลงไปยังตำแหน่งของท่ออบรังสีที่ ตำแหน่ง G22 ของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1



รูปที่ 2.29 แผนผังการทำงานระบบออบรังสีด้วยลมของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1

อธิบายขั้นตอนการทำงานระบบออบรังสีด้วยลม รูปที่ 2.29

รูป ก เตรียมสารตัวอย่างใส่ในหลอดโพลีเอทิลีน โดยสารตัวอย่างต้องอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของก้นหลอดโพลีเอทิลีน

รูป ข นำหลอดโพลีเอทิลีนมาวางที่ตำแหน่ง

รูป ค ระบบจะทำการบีบลมเพื่อดูดหลอดโพลีเอทิลีนไปตามท่อ

รูป ง ชุดควบคุม เป็นตัวควบคุมการทำงาน สามารถตั้งค่าแบบคู่มือและแบบอัตโนมัติ นอกจากนี้ยังเป็นตัวควบคุมการดูดหลอดโพลีเอทิลีนจากชั้น 2 และ 4 ไม่ให้สลับหรือส่งกลับผิดชั้น

รูป จ หลอดโพลีเอทิลีนจะลงไปตามท่อขนานไปกับแกนเครื่องปฏิกรณ์

รูป ฉ หลอดโพลีเอทิลีนจะลงไปยังตำแหน่งออบรังสีที่ตำแหน่ง G22

ระยะเวลาในการออบรังสีจะขึ้นกับปริมาณของสารตัวอย่างที่ต้องการออบ รวมทั้งตำแหน่งของการออบรังสี ซึ่งระบบการออบรังสีด้วยลมมักจะออบรังสีไม่นานนัก

2.2.12.5 ท่อออบรังสีท่อเปียก (Wet tube)

ท่อเปียกเป็นท่อพิเศษที่ใช้ในการออบรังสี ลักษณะของท่อเป็นรูปครึ่งวงกลมเพื่อออบรังสีเพียงด้านเดียว ท่อเปียกติดตั้งอยู่บนสะพานสนับสนุนแกนเครื่องปฏิกรณ์ และท่อเปียกมีท่อ

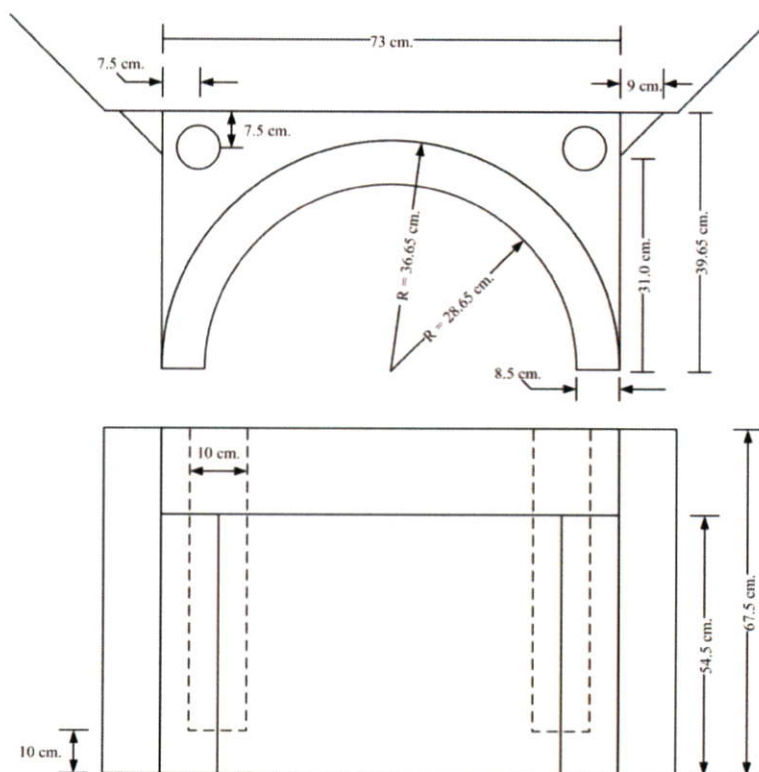
ขนาดใหญ่ 5 ท่อมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 cm. และท่อขนาดเล็กจำนวน 8 ท่อ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 cm. ดังรูปที่ 2.26

2.2.12.6 ท่ออาบรังสีทั่วไป (Standard Neutron Irradiation Facility : SNIF)

ท่ออาบรังสีมาตรฐานมีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำมาจากอะลูมิเนียม ใช้ในการอาบรังสีนิวตรอนเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของอะตอม SNIF มีโครงสร้างติดอยู่กับท่อเปียกจะนำมาติดตั้งแทนท่อเปียกเมื่อต้องการใช้ SNIF ในการทดลอง

2.2.12.7 ท่ออาบรังสีวอยแท็งค์ (Irradiation tubes in void tank)

ท่ออาบรังสี Void tank มีท่อ 2 ท่อ ที่ใช้ในการอาบรังสี สามารถแบ่ง 2 ท่อ ด้วยทิศทางที่ถูกติดตั้งท่อที่ติดตั้งในทิศเหนือ เรียกว่า Void North (VN) และท่อที่ถูกติดตั้งในทิศใต้ เรียกว่า Void South (VS) ทำจากอะลูมิเนียม ติดตั้งอยู่ในแนวตั้ง ขนานกับแกนเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 2.30 ท่ออาบรังสีวอยแท็งค์มักใช้ในการอาบรังสีพลอยหรือเพชร เพื่อเพิ่มมูลค่าของพลอยหรือเพชร



รูปที่ 2.30 ท่ออาบรังสีวอยแท็งค์

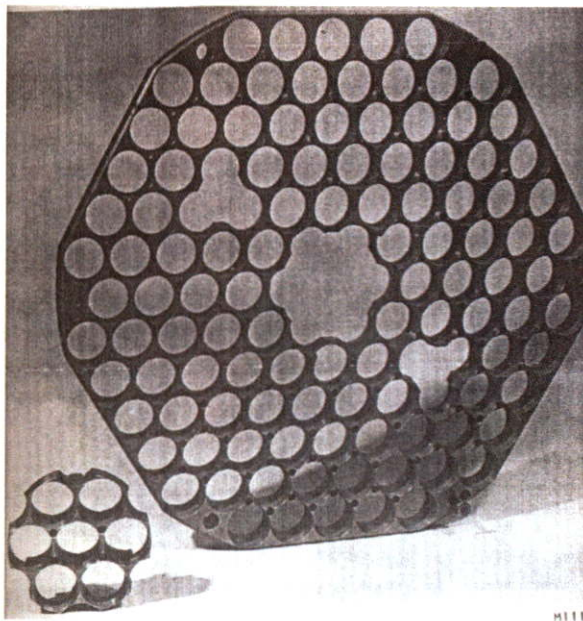
2.2.12.8 ท่ออาบรังสีพิเศษ (Special irradiation facilities)

ท่ออาบรังสีพิเศษ เป็นท่อที่เกิดจากการถอดโครงสร้างของแผ่นเพลทด้านบนบริเวณกึ่งกลางของแผ่นออกจำนวน 6 ช่อง เป็นรูปหกเหลี่ยมมีขนาด 10.20 cm. (4 in.) จุดประสงค์

เพื่อต้องการอาบรังสีที่มีความเข้มสูง นอกจากถอดตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นเพลทด้านบนแล้ว ยังสามารถถอดเป็นรูปสามเหลี่ยมขนาด 5 cm. (2 in) ได้อีก 2 ช่อง ดังรูปที่ 2.7 โดยถอดแท่งเชื้อเพลิงตำแหน่งนั้นออก 3 แท่ง เพื่อใช้ในการทดลองหาปริมาณความหนาแน่นของนิวตรอน พลิกซ์ ลักษณะของการถอดแผ่นเพลทดังรูปที่ 2.31

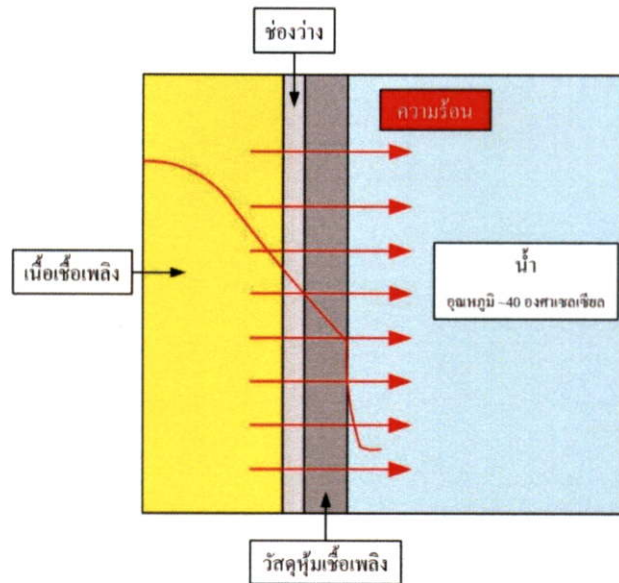
2.2.13 ระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1

เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยต้องการใช้ประโยชน์จากนิวตรอนพลิกซ์เท่านั้น พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น ต้องระบายออกไปจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อน สำหรับเครื่องปปว.-1/1 ใช้ระบบการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural Convection) โดยน้ำที่ร้อนจะลอยตัวสูง ขึ้นสู่ผิวน้ำและจะถูกดูดออกไปด้วยเครื่องสูบน้ำ (ระบบปฐมภูมิ) ด้วยอัตราความเร็วประมาณ 1,060 แกลลอนต่ออนาที (หรือประมาณ 68 ลิตรต่อวินาที) ผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) และระบายความร้อนสู่บรรยากาศ โดยใช้หอระบายความร้อน (Cooling Tower)



รูปที่ 2.31 แผ่นเพลทด้านบน สามารถถอดออกเพื่ออาบรังสีได้

กระบวนการถ่ายเทความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงเริ่มจากความร้อนในเนื้อเชื้อเพลิงแพร่ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันออกมาสู่บริเวณช่องว่างและวัสดุหุ้มเนื้อเชื้อเพลิง และถูกน้ำที่รอบๆ แท่งเชื้อเพลิงพาความร้อนที่แพร่ออกมาจะลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำและเข้าสู่ระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ต่อไป ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แผนภาพแสดงการถ่ายเทความร้อนจากเนื้อเชื้อเพลิงสู่น้ำรอบแท่งเชื้อเพลิง

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจัดการเครื่องปฏิกรณ์

เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคที่มีพลังงานวิ่งชนกับนิวเคลียสที่เป็นเป้า (target) แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส และอนุภาคซึ่งอาจจะเป็นตัวเดิมหรือตัวใหม่ที่หลุดออกมา (ejected particles) อนุภาคที่วิ่งเข้าชน ถ้าเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุก็สามารถเข้าชนนิวเคลียสได้โดยง่าย แต่ถ้าเป็นอนุภาคมีประจุ จะต้องถูกต่อต้านจากแรงคูลอมบ์ ซึ่งเรียกว่ากำแพงศักย์ (potential barrier) เฉพาะอนุภาคที่มีพลังงานสูงกว่ากำแพงศักย์นี้ จึงจะผ่านเข้าทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสได้

สมการของปฏิกิริยานิวเคลียร์

ถ้าอนุภาค ${}_Z^A a$ วิ่งเข้าชนเป้านิวเคลียส ${}_Z X^A$ และปฏิกิริยานิวเคลียร์กัน เกิดผลผลิตเป็นนิวเคลียส ${}_Z Y^A$ และอนุภาค ${}_Z b^A$ พร้อมกับพลังงานสมดุล (Q-Value) สมการของปฏิกิริยานิวเคลียร์สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$${}_Z^A a + {}_Z X^A = {}_Z Y^A + {}_Z b^A + Q \text{ หรือ } X(a,b)Y$$

ค่า Q เป็นผลต่างระหว่างพลังงานจลน์ของอนุภาคก่อนและหลังปฏิกิริยา ซึ่งก็คือผลต่างของ rest mass energy ของอนุภาคก่อนเกิดปฏิกิริยา และหลังปฏิกิริยา ถ้าค่า Q เป็นบวก แสดงว่าปฏิกิริยานั้นให้พลังงานออกมา (exothermic nuclear reaction) ถ้าค่า Q เป็นลบแสดงว่าต้องให้พลังงานเข้าไป ถึงจะเกิดปฏิกิริยา (endothermic nuclear reaction)

2.3.1 ภาคตัดขวาง (cross section)

เมื่อนิวตรอนเข้าชนกับตัวกลางแล้วจะเกิดอันตรกิริยาใดนั้น ขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนและชนิดของตัวกลาง โดยอาจบอกได้ด้วยค่าภาคตัดขวาง (cross section) ซึ่งหมายถึงค่าคงที่แสดงแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ง่าย ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma = \pi R^2 \quad (2.16)$$

เมื่อ σ คือ ภาคตัดขวางจุลทรรศน์ (microscopic cross section)
 R คือ รัศมีนิวเคลียส

จากสมการข้างต้นกล่าวได้ว่า σ เป็นพื้นที่ของนิวเคลียส เพื่อการเกิดอันตรกิริยานั้นๆ มีหน่วย cm^2 หรือ บาร์น (barn, b) เมื่อ 1 บาร์น = 10^{-24} cm^2 โดยแต่ละอันตรกิริยาของตัวกลางต่างชนิดกัน จะมีภาคตัดขวางไม่เท่ากัน เช่น

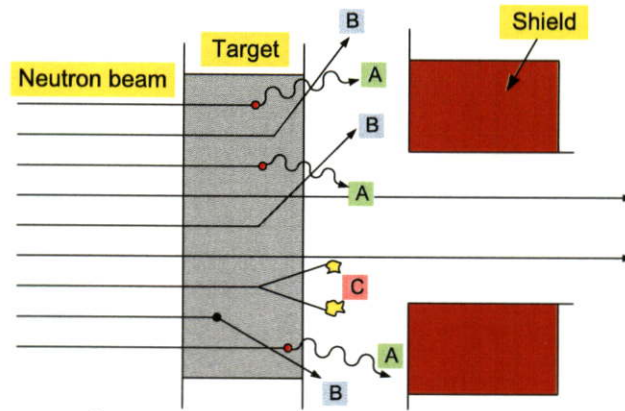
${}^1\text{H}(n, \gamma){}^2\text{H}$	σ	=	0.33	บาร์น
${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$	σ	=	1.70	บาร์น
${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$	σ	=	4.01×10^3	บาร์น
${}^{113}\text{Cd}(n, \gamma){}^{114}\text{Cd}$	σ	=	2.1×10^4	บาร์น

เนื่องจาก σ เป็นโอกาสของการเกิดอันตรกิริยาต่ออะตอม แต่ละประเภทของอันตรกิริยาก็มีโอกาสที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน และมีอันตรกิริยาเกิดขึ้นได้หลายแบบ ดังนั้นภาคตัดขวางจุลทรรศน์รวม (total microscopic cross section, σ_t) จะได้จากผลรวมของ σ เนื่องจากอันตรกิริยาแบบต่างๆ ดังนี้

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_c + \sigma_f \quad (2.17)$$

เมื่อ $\sigma_s, \sigma_c, \sigma_f$ เป็นภาคตัดขวางจุลทรรศน์ของอันตรกิริยาการกระเจิงนิวตรอน การจับนิวตรอนและการเกิดฟิชชัน เพื่อพิจารณาภาคตัดขวางของทุกอะตอมในตัวกลาง โดย N เป็นจำนวนอะตอมของตัวกลางต่อ cm^2 ค่าตัดขวางมหัพรรณ (macroscopic cross section, Σ) คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \Sigma &= N\sigma \text{ cm}^{-1} \\ \Sigma_t &= N\sigma_t \text{ cm}^{-1} \end{aligned} \quad (2.18)$$

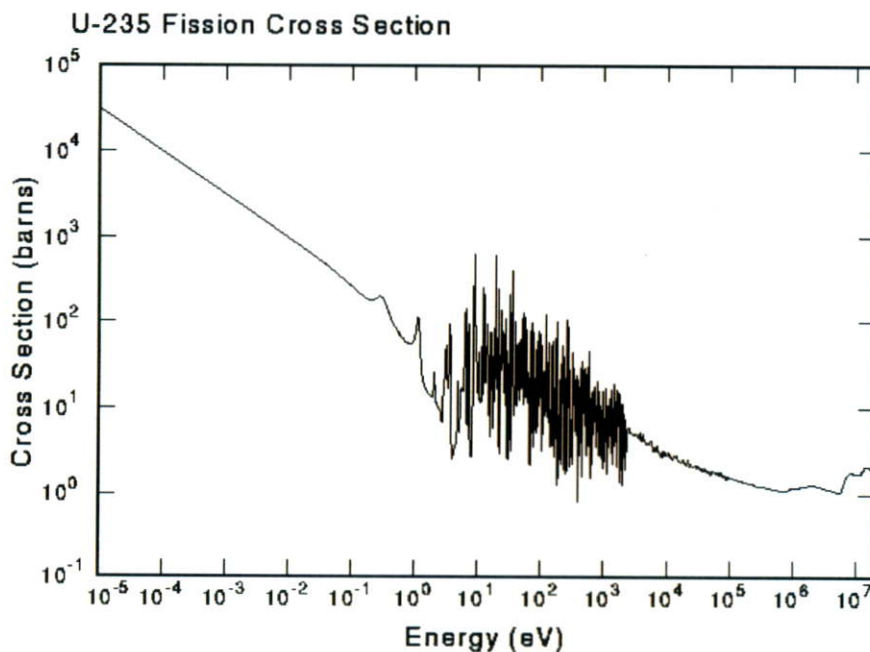


รูปที่ 2.33 อันตรกิริยาของนิวตรอนเมื่อผ่านตัวกลาง

- A - จับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา
- B - นิวตรอนกระเจิงแบบยืดหยุ่น
- C - นิวตรอนทำให้เกิดฟิชชัน

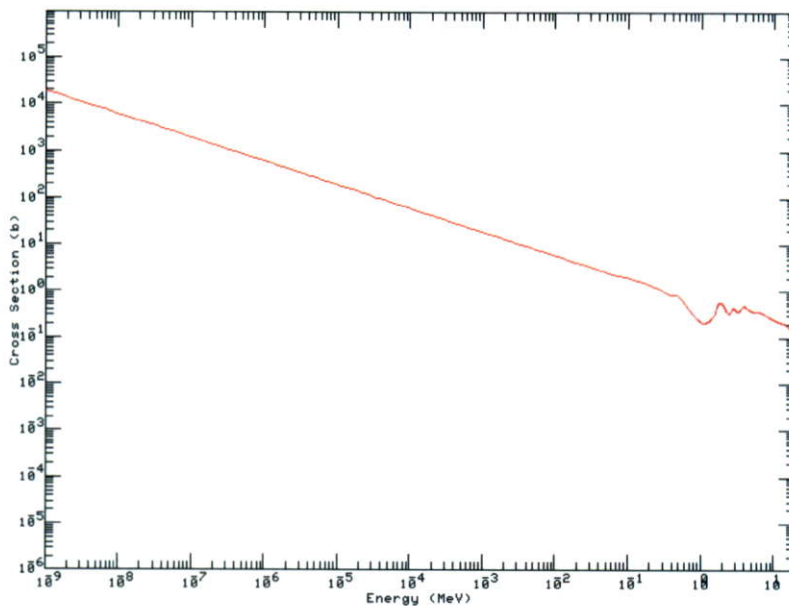
ค่า Σ สำหรับอนุภาคมีความหมายคล้ายคลึงกันกับค่า μ ของรังสีแกมมา ดังนั้นวิธีอิสระเฉลี่ย (mean free path, λ) ของอนุภาคนิวตรอน ดังรูปที่ 2.33 ซึ่งหมายถึง ระยะทางเฉลี่ยที่นิวตรอนเคลื่อนที่เพื่อทำอันตรกิริยา โดยมีความสัมพันธ์กับภาคตัดขวางมหัพคูณรวม ดังสมการ

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma_r} \quad (2.19)$$



ที่มา : <http://t2.lanl.gov/tour/sch002.html>

รูปที่ 2.34 ภาคตัดขวางปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235



รูปที่ 2.35 ภาคตัดขวางปฏิกิริยาการดูดกลืนของ B-10

จากรูปที่ 2.34 และ 2.35 แสดงความสัมพันธ์ของภาคตัดขวางกับนิวตรอนที่ผ่านธาตุต่างๆ จะเห็นว่าในรูปที่ 2.34 ในช่วงที่นิวตรอนที่พลังงานต่ำ หรือที่เราเรียกว่า เทอร์มัลนิวตรอน จะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาฟิชชันกับ U-235 ได้ดีกว่านิวตรอนในช่วงพลังงานอื่น ในส่วนของนิวตรอนเร็ว จะทำปฏิกิริยาฟิชชันได้ดีใน U-238 (U-238 จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ Fast Reactor) และในรูปที่ 2.5 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนนิวตรอนของ B-10 ซึ่งจะทำให้การดูดกลืนนิวตรอนในช่วงของเทอร์มัลนิวตรอน และทำการยับยั้งไม่ให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ และ B-10 จะถูกนำเป็นสารประกอบในการทำแท่งควบคุม และนอกจากนี้ยังอยู่ในรูปของสารละลายซึ่งจะถูกใช้ภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ PWR เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาฟิชชันมากเกินไปจนความจำเป็น

2.3.2 ฟิชชัน

ฟิชชัน หมายถึงปฏิกิริยาที่ทำให้นิวเคลียสแยกออกเป็นส่วนที่มีมวลใกล้เคียงกัน ฟิชชันจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ

ฟิชชันที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (spontaneous fission) นิวเคลียสเกิดฟิชชันโดยได้รับพลังงานกระตุ้น เช่น การเกิดฟิชชันตามธรรมชาติ ^{250}Cm , ^{254}Cf , ^{256}Fm

ฟิชชันที่เกิดขึ้นการกระตุ้น (induced fission) นิวเคลียสจะเกิดฟิชชันได้ก็ต่อเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้น มักเกิดกับธาตุหนักๆ ที่มีนิวคลีออนมากกว่า 130 พลังงานที่กระตุ้นให้เกิดฟิชชันขึ้นอยู่กับจำนวนนิวคลีออน ถ้ามีจำนวนประมาณ 130 ต้องใช้พลังงานประมาณ 100 MeV ถ้ามีจำนวนนิวคลีออนประมาณ 200 จะต้องใช้พลังงาน 30 MeV และสำหรับธาตุหนักๆ ($A > 230$) ใช้

พลังงานน้อยกว่า 10 MeV โดยทั่วไป ฟิชชันเกิดกับนิวไคลด์หนักที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคต่างๆ แต่ ฟิชชันที่สำคัญและนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากเป็นฟิชชันของนิวตรอนกับ ^{232}Th , ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดของการเกิดฟิชชันโดยนิวไคลด์ต่างๆ [12,p230]

นิวไคลด์	^{232}Th	^{233}U	^{234}U	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu
นิวไคลด์เชิงประกอบหลังจากการจับนิวตรอน [$^{A+1}\text{X}^*$]	^{233}Th	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{239}U	^{240}Pu
พลังงานยึดเหนี่ยว (MeV)	5.4	7.0	5.0	6.8	5.2	6.6
พลังงานเพื่อกระตุ้นให้เกิดฟิชชัน (MeV)	5.9	5.5	5.4	5.75	5.9	5.5
เกิดฟิชชันโดยเทอร์มัลนิวตรอน		X		X		X

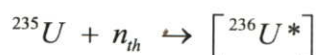
เมื่อมาจำแนกการเกิดฟิชชันตามสิ่งกระตุ้นได้ดังนี้

- เทอร์มัลฟิชชัน (thermal fission) เป็นฟิชชันที่เกิดจากการกระตุ้นของเทอร์มัลนิวตรอน มักเกิดขึ้นกับ ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu
- ฟิชชันโดยนิวตรอนเร็ว (fast fission) เป็นฟิชชันที่เกิดจากการกระตุ้นของนิวตรอนเร็ว เกิดขึ้น ^{234}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{232}Th
- ฟิชชันโดยอนุภาคมีประจุ (charged particle fission) เป็นฟิชชันที่เกิดจากการกระตุ้นของอนุภาคที่มีประจุ เช่น แอลฟา คิวเทอรอน โปรตอน โดยอนุภาคเหล่านี้ต้องมีพลังงานสูง จึงสามารถกระตุ้นให้เกิดฟิชชันได้
- โฟโตฟิชชัน (photo fission) เป็นฟิชชันที่เกิดจากการกระตุ้นของรังสีแกมมา

2.3.2.1 กลไกการเกิดฟิชชัน

ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันที่สำคัญ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาฟิชชันของ ^{235}U เมื่อถูกกระตุ้นด้วยเทอร์มัลนิวตรอนจากทฤษฎีนิวเคลียสเชิงประกอบ อธิบายขั้นตอนการเกิดฟิชชันดังนี้

1. ^{235}U จับเทอร์มัลนิวตรอน แล้วเกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ [$^{236}\text{U}^*$] ที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ($n_h =$ เทอร์มัลนิวตรอน)

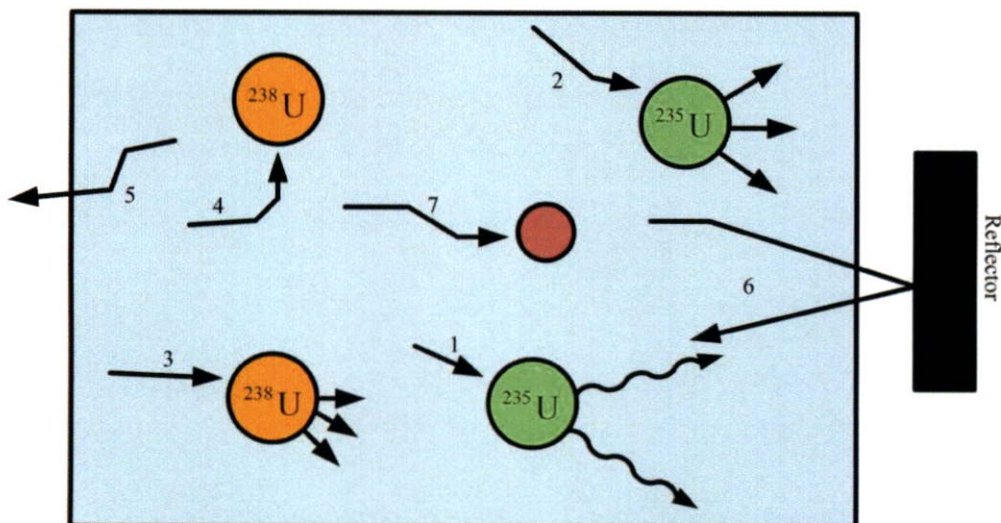


2. ในช่วงเวลาสั้นๆ ($t_{1/2} \approx 10^{-14}$ วินาที) นิวเคลียสเชิงประกอบจะปรับตัวเข้าสู่สถานะพื้นซึ่งอาจจะทำได้โดยการให้รังสีแกมมา หรือการเกิดฟิชชัน โดยค่าภาคตัดขวางของ

กระบวนการทั้งสอง $\sigma_{(n,\gamma)} = 100$ บาร์น และ $\sigma_{(n,f)} = 582$ บาร์น แสดงว่านิวเคลียสเชิงประกอบ [$^{236}\text{U}^*$] จะสลายตัวในสัดส่วนที่ให้งังสีแกมมา 1 นิวไคลด์ ต่อการเกิดฟิชชัน 6 นิวไคลด์ โดยประมาณ

2.3.2.2 ปฏิริยาฟิชชันกับนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์

ปฏิริยาฟิชชันภายในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เกิดขึ้นได้ เมื่อมีนิวตรอนเข้าทำปฏิริยาอย่างต่อเนื่อง สำหรับการเกิดฟิชชัน 1 ครั้ง จะได้นิวตรอน 2-3 อนุภาค แต่นิวตรอนเหล่านี้ อาจจะมีพลังงานลดลง จากผลการกระเจิงไปหรือถูกดูดกลืนไปโดยตัวกลางต่างๆ จึงมีเพียงบางอนุภาคเท่านั้น ที่สามารถทำปฏิริยาอย่างต่อเนื่องไปได้และให้นิวตรอนออกมาอีก ปฏิริยาฟิชชันภายในเครื่องปฏิกรณ์เกิดจากนิวตรอนเร็วเป็นตัวเริ่มทำปฏิริยา กระบวนการเกิดปฏิริยาฟิชชันดังกล่าวที่ 2.36 ซึ่งอธิบายดังนี้



รูปที่ 2.36 การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

โดยนิวตรอนอาจทำ (1, 2), ปฏิริยากับ ^{235}U , (3, 4) ทำปฏิริยากับ ^{238}U , (5) กระเจิงออกจากเครื่องปฏิกรณ์, (6) สะท้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ หรือ (7) ถูกดูดกลืนไว้โดยตัวกลางต่างๆ

จากรูปที่ 2.35 สามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

1. ^{235}U จับเทอร์มัลนิวตรอน เป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ [$^{236}\text{U}^*$] ซึ่งจะปลดปล่อยให้งังสีแกมมาออกมา
2. นิวตรอนเร็ววิ่งเข้าชนกับเนื้อเชื้อเพลิง ^{235}U ทำให้เกิดปฏิริยาฟิชชัน แล้วให้เทอร์มัลนิวตรอนออกมา 2-3 อนุภาค อีกทั้งปลดปล่อยรังสีต่างๆออกมาบางส่วน

3. นิวตรอนที่มีพลังงานมากกว่า 1 MeV สามารถทำให้ ^{238}U เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน และให้นิวตรอนเร็ว

4. ^{238}U จับนิวตรอนแล้วเปลี่ยนเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ [$^{239}\text{U}^*$] ซึ่งจะสลายตัวให้อนุภาคบีตาเป็น ^{239}Np และ ^{239}P ตามลำดับ

5. นิวตรอนชนกับอะตอมของตัวกลางต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ (เช่น สารหน่วงนิวตรอน) ให้มีพลังงานลดลง เปลี่ยนทิศทางหรืออาจจะหลุดออกจากปฏิกรณ์

6. นิวตรอนที่มีพลังงานลดลง อาจจะสะท้อนกลับสู่เครื่องปฏิกรณ์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ที่กล่าวมา

7. นิวตรอนอาจจะดูดกลืนโดยสารต่างๆ ที่ปะปนในเชื้อเพลิง

2.3.2.3 ปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (Neutron Capture)

ภายในเครื่องปฏิกรณ์มีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลายปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับนิวตรอนมี 3 ประเภท คือ

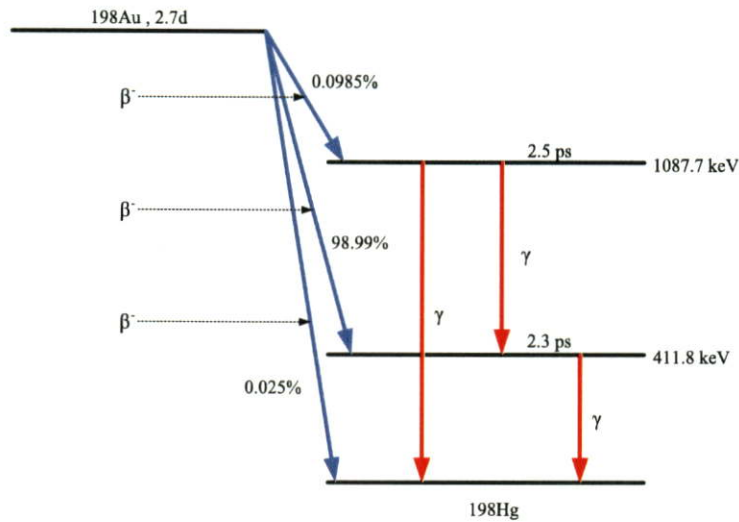
1. การกระเจิงของนิวตรอน (Neutron scattering)
2. การจับนิวตรอน (Neutron capture)
3. ปฏิกิริยาฟิชชัน (Nuclear fission)

ภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจศึกษาการจับนิวตรอนภายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยไทย ซึ่งการจับนิวตรอนเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ชนิดหนึ่ง ที่เกิดจากนิวตรอนวิ่งเข้าชนกับธาตุหนักซึ่งนิวตรอนที่วิ่งเข้าชนไม่มีประจุไฟฟ้า ทำให้สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับธาตุได้ง่ายเหมือนโปรตอน การจับนิวตรอนมีความสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์นิวเคลียส (nucleosynthesis) เพื่อสร้างนิวเคลียสของอะตอมใหม่ขึ้นจากนิวคลีออนเดิม (โปรตอนและนิวตรอน) ธาตุที่อยู่ในช่วงการสังเคราะห์นิวเคลียสมีเลขอะตอมตั้งแต่ 6 (คาร์บอน : C) ถึง 98 (แคลิฟอร์เนียม : Cf) การเกิดสังเคราะห์ของธาตุหนักเหล่านี้ อาจเกิดได้ทั้งปฏิกิริยาฟิชชัน ฟิชชัน และบางครั้งมีการสลายปลดปล่อยอนุภาคเบตาเกิดขึ้นด้วย และกระบวนการเกิดมี 2 กระบวนการ คือ วิธีกะทันหัน (r-process) และวิธีช้า (s-process) และนิวเคลียสของมวลอะตอมที่ใหญ่กว่า 56 ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ เช่น ปฏิกิริยาฟิชชัน แต่สามารถเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนได้ ปฏิกิริยาการจับนิวตรอนสามารถแบ่งการเกิดได้ 2 ปฏิกิริยา ดังนี้

1. ปฏิกิริยาการจับนิวตรอนในจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ขนาดเล็ก

นิวตรอนฟลักซ์ที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์เกิดจากนิวตรอนวิ่งแล้วถูกจับด้วยนิวเคลียสของธาตุนั้นๆ ดังอย่างเช่น ทองคำที่อยู่ตามธรรมชาติมีเลขไอโซโทป 197 (Au-197) เมื่อถูกฉายรังสีด้วยนิวตรอน ไอโซโทปของทองจะเปลี่ยนเป็น 198 (Au-198) สลายตัวทางรังสีอย่างรวดเร็วไปสู่

สถานะพื้นของ Au-198 โดยการปล่อยรังแกมมาออกมาดังรูปที่ 2.37 และสามารถเขียนสมการได้ดังนี้



รูปที่ 2.37 การลดระดับชั้นพลังงานของ Au-198 เมื่อทำปฏิกิริยาการจับนิวตรอน

ซึ่งการจับนิวตรอนที่เกิดภายในมักเกิดช่วงในเทอร์มัลนิวตรอน ซึ่งสามารถเรียกกระบวนการนี้ได้ว่า การจับเทอร์มัล (Thermal capture) ซึ่งไอโซโทป Au-198 จะปลดปล่อยรังสีเบต้า และสลายตัวเป็นไอโซโทปปรอท Hg-198 เกิดจากการเพิ่มของเลขอะตอมมา 1 อะตอมของกระบวนการจับนิวตรอน

2.ปฏิกิริยาการจับนิวตรอนที่มีจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ขนาดใหญ่

เป็นปฏิกิริยาที่มักเกิดกับนิวตรอนที่มีความหนาแน่นสูงเมื่อนิวเคลียสไม่มีเวลาสลายตัวทางรังสีระหว่างที่เกิดการจับนิวตรอน เลขมวลจึงเพิ่มตามจำนวนในขณะที่เลขอะตอมเท่าเดิม หลังจากการสลายตัวของนิวเคลียสที่ไม่เสถียรสูงจะมีการสลายตัวของบีตาของนิวเคลียสที่มีเสถียรภาพ

2.3.3 การออกแบบแกนเครื่องปฏิกรณ์^[6]

การออกแบบแกนเครื่องปฏิกรณ์ต้องคำนึงถึงปริมาณของเนื้อเชื้อเพลิง ^{235}U เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการจัดแกน ปัจจุบันแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปรว.-1/1 ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิง 2 แบบ คือ แท่งเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะยูเรเนียม 8.5% และ 20% สำหรับหลักการการจัดแกนเครื่องปรว.-1/1จะกล่าวในส่วนถัดไป

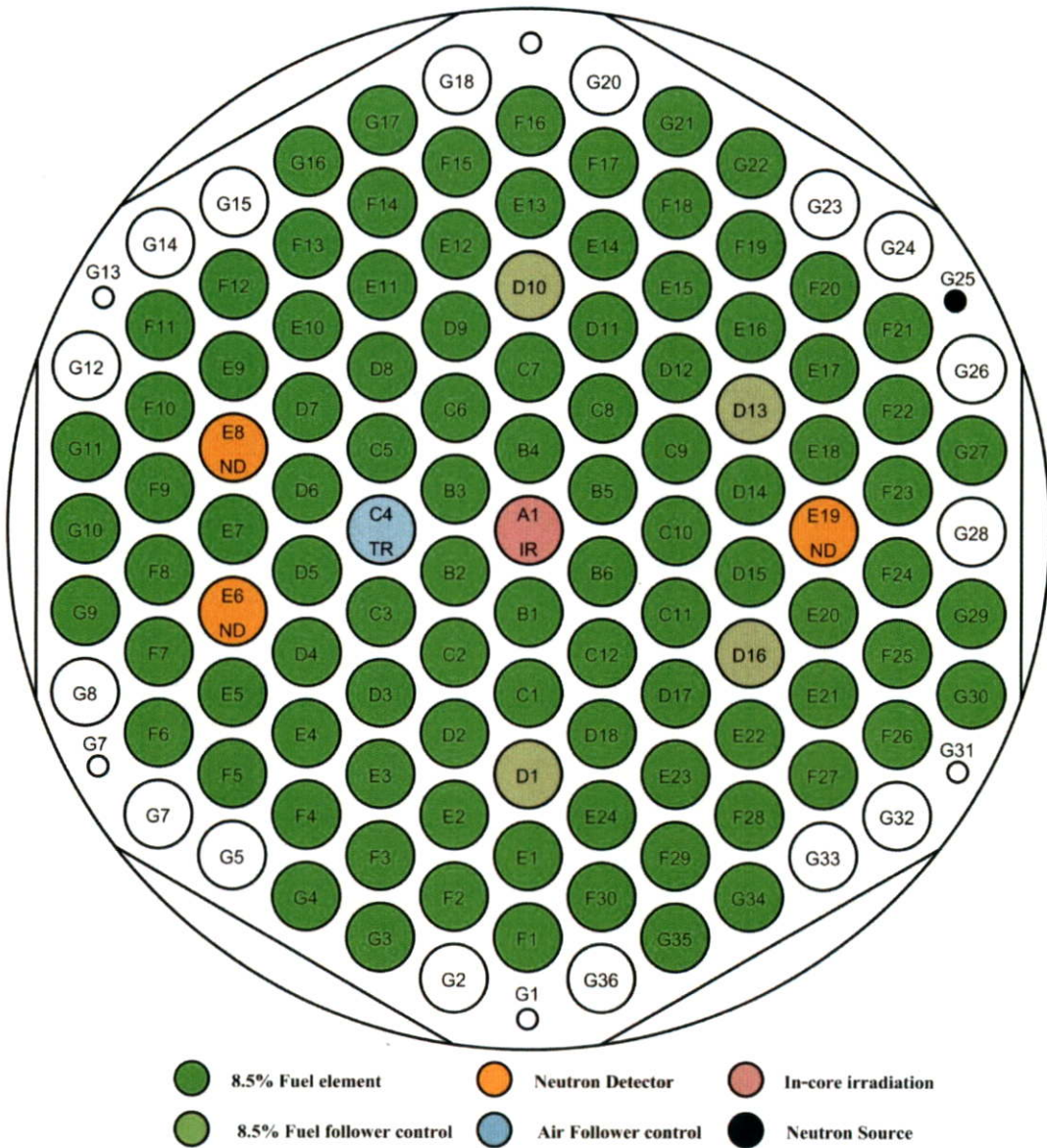
ลักษณะการจัดวางแท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ ปรว.-1/1 ได้แบ่งตำแหน่งของแกนเครื่องปฏิกรณ์ออกเป็นวงๆ โดยกำหนดให้วงในสุดเป็นวง A และวงถัดเป็น B จนถึงวง G เพื่อ

สะดวกในระบุตำแหน่งของแท่งเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.8

หลักการในการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ปว.-1/1 จะพิจารณาจากรูปแบบแกนที่เป็นไปได้สามแบบหลักๆ คือ

- 1) เชื้อเพลิงทั้งหมดในแกนเครื่องปว.-1/1 เป็นเชื้อเพลิงแบบเสริมสมรรถนะ 8.5%
- 2) เชื้อเพลิงในแกนเครื่องปว.-1/1 มีทั้งเชื้อเพลิงแบบเสริมสมรรถนะ 8.5% และ 20%
- 3) เชื้อเพลิงทั้งหมดในแกนเครื่องปว.-1/1 เป็นเชื้อเพลิงแบบเสริมสมรรถนะ 20%

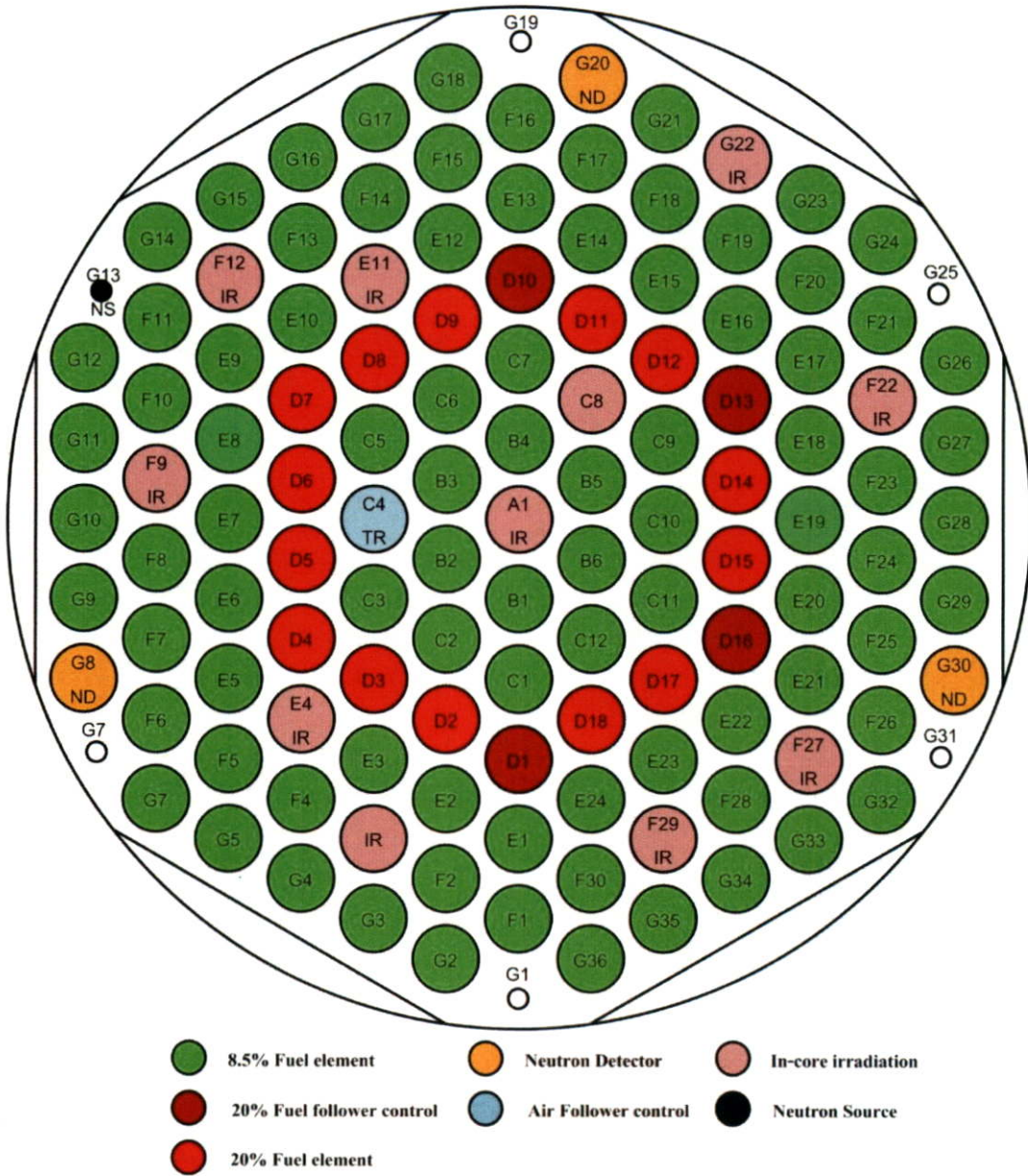
ในการพิจารณารูปแบบแกนทั้งสามข้างต้นเนื่องจากเมื่อเริ่มต้นแกนเครื่องปว.-1/1 นั้นเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ใช้ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์เป็นเชื้อเพลิงแบบเสริมสมรรถนะ 8.5% (แกนรูปแบบที่ 1) ต่อมาได้มีการนำเชื้อเพลิงแบบเสริมสมรรถนะ 20% เข้ามาใช้แทนที่แท่งเชื้อเพลิงแบบเสริมสมรรถนะ 8.5% บางแท่ง (แกนรูปแบบที่ 2) เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงแบบเสริมสมรรถนะ 20% มีปริมาณ U-235 ที่มากกว่า และในอนาคตเชื้อเพลิงแบบเสริมสมรรถนะ 8.5% จะถูกแทนที่ด้วยเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 20% ทั้งหมด (แกนรูปแบบที่ 3) รูปแกนทั้ง 3 แบบและคำอธิบายดังแสดงในรูปที่ 2.38-2.40



รูปที่ 2.38 การจัดแกนแบบ 8.5BG

- การจัดแกนแบบ 8.5BG

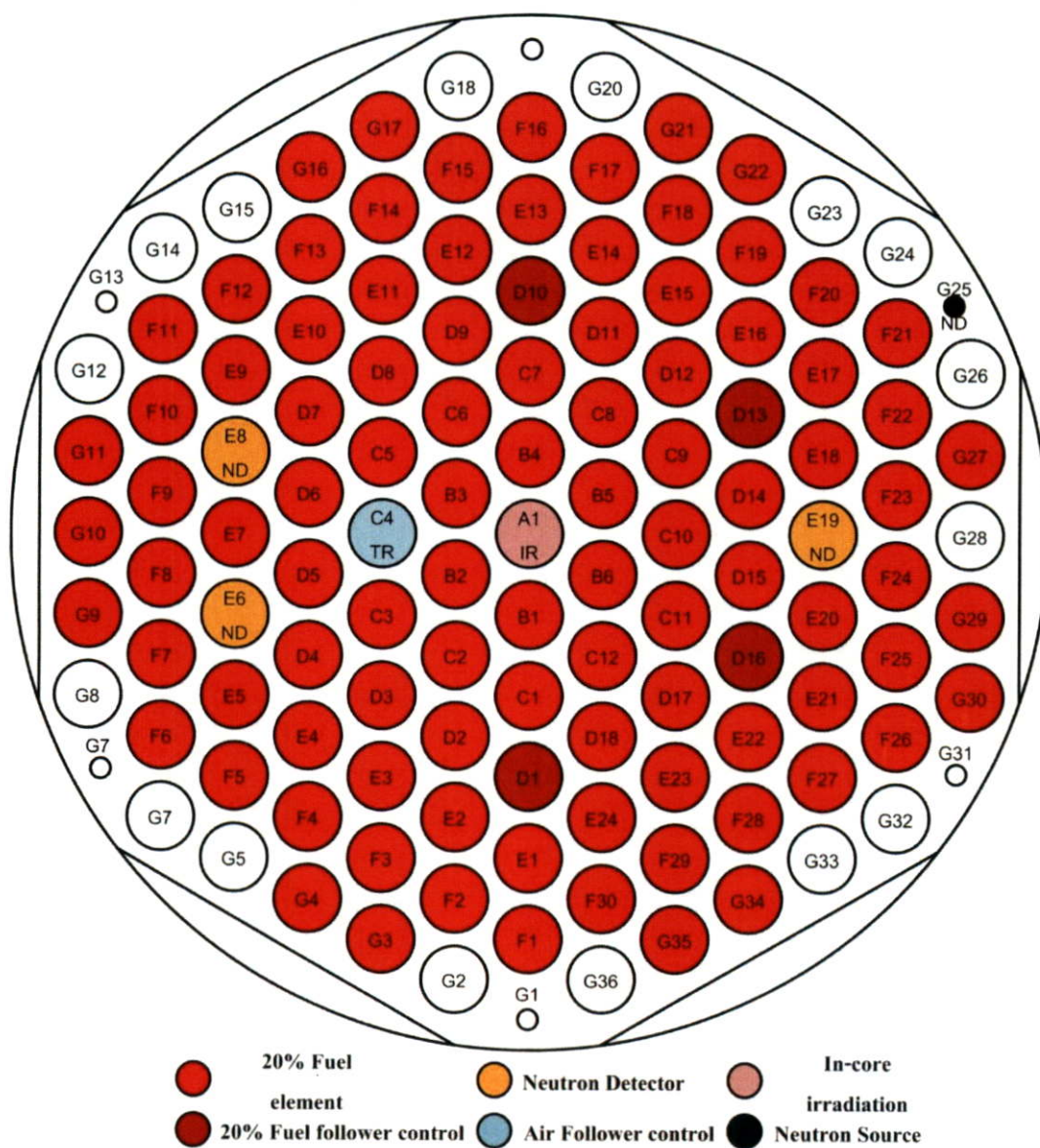
เป็นการจัดแกนแบบแรกโดยให้ทุกตำแหน่งของแกนเครื่องปฏิกรณ์ (ตั้งวงในสุด วง B ถึงวงนอกสุด วง G) ใส่แท่งเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะ 8.5% จำนวน 100 แท่งรวมทั้ง FFCR และภายในแกนเครื่องมีหัววัดนิวตรอน 3 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.39 การจัดแกนแบบ D20

- การจัดแกนแบบ D20

เป็นตัวอย่างของแกนเครื่องปว.-1/1 ที่ใช้เชื้อเพลิงผสม 2 แบบ โดยนำแท่งเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะ 20% บรรจุในตำแหน่งวง D นอกนั้นบรรจุแท่งเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 8.5% ในตำแหน่งที่เหลือ รวมทั้งสิ้น 105 แท่งนับรวม FFCRs ด้วย และภายในแกน D20 มีหัววัดนิวตรอน 3 ตำแหน่ง และท่ออบรังสีภายในแกนเครื่องจำนวน 12 ท่อ (รวมท่อนิวเมตริก) ดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.40 การจัดแกนเครื่องแบบ 20BG

- การจัดแกนแบบ 20BG

เมื่อมีการสับเปลี่ยนเชื้อเพลิงแบบเสริมสมรรถนะ 8.5% ออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์จนหมดทำให้ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์มีแต่แท่งเชื้อเพลิงที่แบบเสริมสมรรถนะ 20% ทั้งแกน ดังรูปที่ 2.40

2.3.4 หลักการการสับเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิง⁶¹

ในการสับเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงภายในเครื่องปฏิกรณ์จะกระทำเมื่อแกนเครื่องปฏิกรณ์ได้เดินเครื่องไปในช่วงเวลาหนึ่ง ทำให้กำลังของเครื่องต่ำลง หรือปฏิกิริยาฟิชชันภายในแกนเครื่องลดน้อยลงจำเป็นต้องมีการสับเปลี่ยนตำแหน่งของแท่งเชื้อเพลิงภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยนำแท่งเชื้อเพลิงแท่งใหม่ใส่แทนในบางตำแหน่ง

ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกำลังจะค่อยๆสับเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงลงไปที่ละแท่งจนกว่าแท่งเชื้อเพลิงที่เตรียมไว้จะหมดจึงจะหยุดเดินเครื่องปฏิกรณ์ และทำการเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงใหม่ทั้งหมด ปริมาณของแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ ระยะเวลาการเดินเครื่อง และวัตถุประสงค์ของการทำงาน

การสับเปลี่ยนตำแหน่งเพื่อให้เกิดความปลอดภัยจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแท่งเชื้อเพลิง โดยอาจใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ เช่น รหัสคอมพิวเตอร์ MVP เป็นต้น การสับเปลี่ยนหรือใส่แท่งเชื้อเพลิงลงไปใหม่นั้นต้องใส่ในปริมาณที่เหมาะสมตามแผนที่วางไว้ เพื่อมิให้เกิดจุดที่ร้อนจัด (hot spot) เกินค่าความปลอดภัยขึ้นภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์

การจัดวางตำแหน่งของแท่งเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะที่แตกต่างกันมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ในบริเวณตรงกลางของเครื่องปฏิกรณ์จะเกิดปฏิกิริยาฟิชชันเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีจำนวนนิวตรอนหนาแน่นมาก และจำนวนนิวตรอนจะค่อยๆลดลงสู่ภายนอก หรือบริเวณรอบนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่ำที่สุด หากต้องการเพิ่มปฏิกิริยาฟิชชันนอกแกนให้มีอัตราการเกิดที่สูงขึ้น จะส่งผลให้ปฏิกิริยาฟิชชันบริเวณตรงกลางเครื่องปฏิกรณ์มีเกิดขึ้นมากเกินความจำเป็น และอาจส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ต่างๆได้ ดังนั้นจึงจัดวางแท่งเชื้อเพลิง U-235 ที่เสริมสมรรถนะที่ต่ำไว้กึ่งกลางแกนเครื่องปฏิกรณ์ และที่เสริมสมรรถนะสูงถัดมา เพื่อให้มีอัตราการสิ้นเปลืองที่สม่ำเสมอตลอดทั้งแกนเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันที่เท่าๆกัน และไม่มีจุดใดจุดหนึ่งในแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ร้อนสูงเกินปกติ ลักษณะการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 2.41

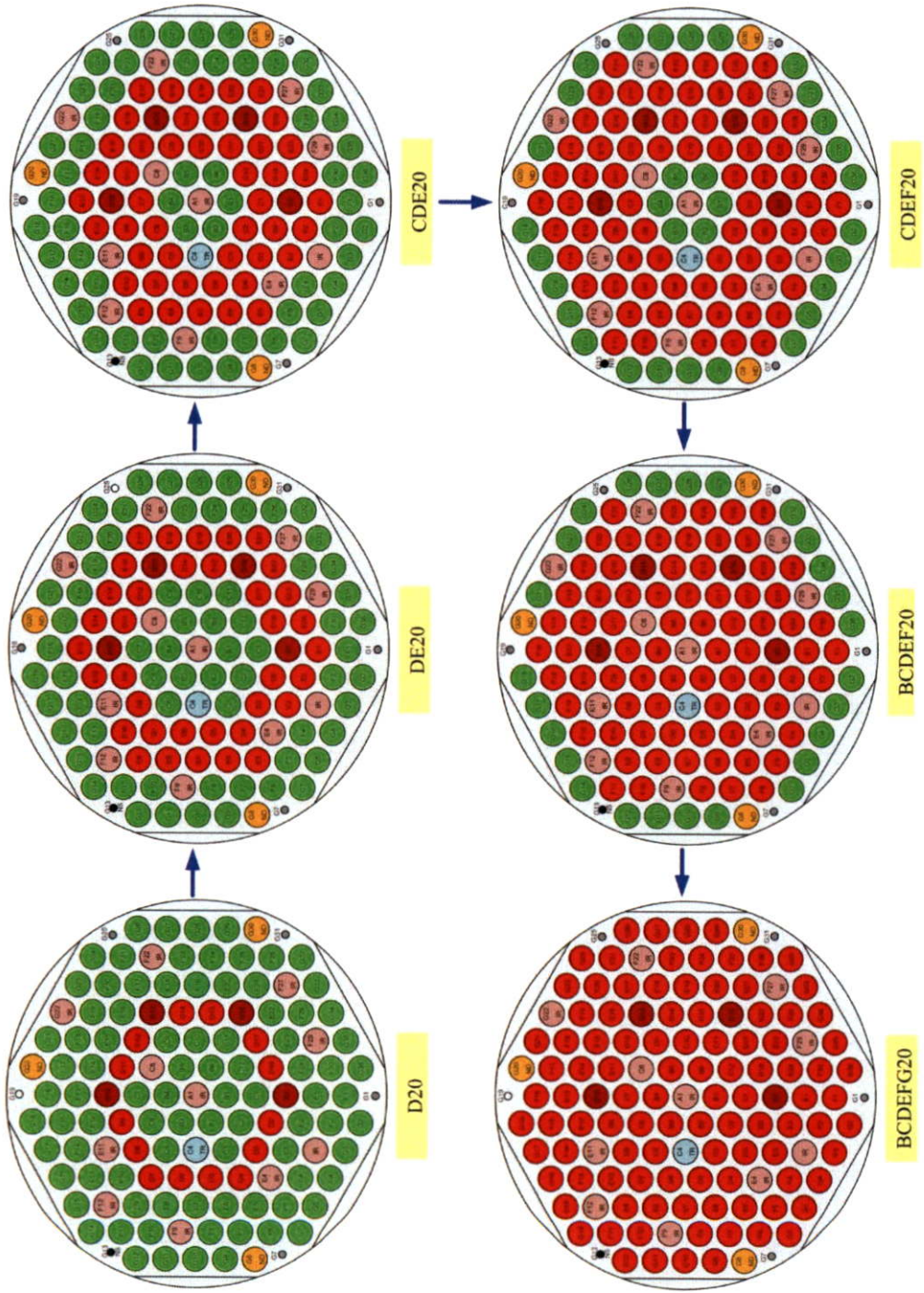
ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์-1/1 จึงพิจารณาลำดับการจัดวางแท่งเชื้อเพลิงแบบเสริมสมรรถนะ 20% ที่ใช้เข้ามาแทนที่แท่งเชื้อเพลิงแบบเสริมสมรรถนะ 8.5% แบบต่างๆกัน (ดังแสดงในรูปที่ 2.41) การสับเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์-1/1 ทำตามเอกสารความปลอดภัย³ โดยเริ่มต้นจากกรณีในทุกตำแหน่งในแกนใส่แท่งเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะ 8.5% ซึ่งเป็นการจัดแบบ 8.5BG จากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะ 20% ใส่แทนที่แท่งเชื้อเพลิงความเข้มข้น 8.5% ในตำแหน่งวง D ซึ่งได้การจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ตามแบบ D20 จากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงที่มีเข้มข้น 20% ใส่แทนแท่งเชื้อเพลิงความเข้มข้น 8.5% ในตำแหน่งวง E ซึ่งจะได้การจัดแกนใหม่เป็นแบบ DE20 เมื่อเชื้อเพลิงถูกใช้ในการปฏิกิริยาไปได้ระยะเวลาหนึ่งจะทำให้ปริมาณของเชื้อเพลิงลดลงจะย้ายแท่งเชื้อเพลิงจากวง D ไปแทนแท่งเชื้อเพลิงในวง C และแท่งเชื้อเพลิงในวง E จะถูกย้ายเข้ามาแทนวง D จากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงใหม่ที่เสริมสมรรถนะ 20% ใส่ในตำแหน่งวง E แทน ซึ่งเรียกการจัดแกนในรูปแบบ CDE20 ขึ้นต่อมาเพิ่มแท่งเชื้อเพลิงใหม่ที่เสริมสมรรถนะ 20% ในวง F ซึ่งจะได้รูปแบบ CDEF20 และย้ายแท่งเชื้อเพลิงจากวง C แทนที่แท่ง

เชื้อเพลิงวง B จะได้รูปแบบ BCDEF20 และสุดท้ายใส่แท่งเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะ 20% ในวง G จะทำให้แท่งเครื่องปฏิกรณ์ใช้เชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะของ U-235 20% เรียกการจัดแบบ BCDEF20 และในทุกๆครั้งที่มีการจัดแท่งเครื่องปฏิกรณ์จะมีการคำนวณค่า Power peaking ของเครื่องอยู่เสมอ เพื่อให้แท่งเครื่องปฏิกรณ์เกิดจุดที่มีค่าความร้อนสูงมากเกินไปเพื่อความปลอดภัยของแท่งเครื่องปฏิกรณ์ทุกรูปแบบการจัดแท่งต้องอยู่บนพื้นฐานที่ไม่ให้อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงสูงเกินค่าที่กำหนด ดังตารางที่ 2.6 แสดงค่า Power peaking ที่ได้จากการคำนวณที่เกิดขึ้นในแท่งรูปแบบต่างๆในรูป 2.41

จากตารางที่ 2.6 พบว่า หากจัดแท่งเครื่องปว.-1/1 ตามลำดับดังกล่าวข้างต้น ค่า Power peaking factor จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อมีการจัดแบบ D20 ดังนั้น จึงใช้ค่า Power peaking factor สูงสุดที่เกิดขึ้นในแท่ง D20 เป็นขีดจำกัดค่า Power peaking factor สำหรับการจัดแท่งเครื่องปว.-1/1 และสร้างความมั่นใจได้ระดับหนึ่งว่าหากทำการจัดแท่งเครื่องปว.-1/1 ตามลำดับที่แสดงในรูป 2.41 แล้วจะไม่มีแท่งรูปแบบใดที่ให้ค่า Power peaking factor เกินขีดจำกัดในการจัดแท่ง

ตารางที่ 2.6 แสดงค่า Power Peaking ที่เกิดขึ้นเมื่อจัดแท่งในรูปแบบต่างๆ^[6,p94]

Core Loading Pattern	Hot Rod Power Factor (F_{HR})	Axial Peaking (F_z)	$F_{HR} \times F_z$	Peak Location
D20	1.894	1.268	2.400	D12
DE20	1.649	1.281	2.112	D12
CDE20	1.765	1.304	2.302	C9
CDEF20	1.665	1.269	2.114	C9
BCDEF20	1.870	1.264	2.364	B6
BCDEFG20	1.759	1.270	2.233	B1



รูปที่ 2.41 ขั้นตอนการจัดการแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1

2.3.5 สภาวะที่เหมาะสมกับการเดินเครื่องปฏิกรณ์

นอกจากจำนวนนิวตรอนแล้ว ปริมาณเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ทำให้นิวตรอนที่เกิดขึ้นจากฟิชชันเท่ากับนิวตรอนที่ถูกใช้ไป และปฏิกิริยาฟิชชันยังคงดำเนินต่อไปได้ เรียกว่า ขนาดวิกฤต (critical size) หรือมวลวิกฤต

สภาพวิกฤต (criticality) ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์บอกได้ด้วยค่าปัจจัยทวีคูณ (multiplication factor, K_∞) ของนิวตรอน เมื่อในระบบมีจำนวนนิวตรอน N_i และชั่วรุ่น (generation) ต่อไปมีจำนวนนิวตรอน N_{i+1} ดังนั้น K_∞ คำนวณได้จากสมการที่ (2.20)

$$K_\infty = \frac{N_{i+1}}{N_i} \quad (2.20)$$

หากเริ่มพิจารณาตั้งแต่ 1 เทอร์มัลนิวตรอน ทำให้ ^{235}U เกิดฟิชชัน แล้วได้จำนวนพrompt นิวตรอนเฉลี่ยต่อฟิชชัน (average number of prompt neutron per fission, ν) แตกต่างกันตามชนิดของเชื้อเพลิง เช่น ^{235}U มีค่า $\nu = 2.5$ และ ^{239}Pu มีค่า $\nu = 3.0$ แต่นิวตรอนที่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง อาจก่อให้เกิดฟิชชันหรือกระบวนการอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยา (n, γ) ดังนั้น จำนวนพrompt นิวตรอนประสิทธิผล (effective number of prompt neutron, η) ที่เกิดขึ้นเมื่อเทอร์มัลนิวตรอนทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง จึงมีค่าน้อยกว่า ν ตารางที่ 2.7 เช่น สำหรับ ^{235}U บริสุทธิ์มีค่า $\nu = 2.5$ และ $\eta = 2.1$ ค่าของ η ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเชื้อเพลิง โดยมีความสัมพันธ์กับภาคตัวขวางดังนี้

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_a} = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_\gamma + \sigma_f} \quad (2.21)$$

$$\eta = \nu \frac{\sum_f}{\sum_a} \quad (2.22)$$

เมื่อ $\Sigma = N\sigma$ และเมื่อพิจารณาเชื้อเพลิงยูเรเนียม ซึ่งประกอบด้วย ^{235}U และ ^{238}U ค่าของ η แสดงได้ดังนี้

$$\eta = \nu \frac{N_{235}\sigma_{f235}}{N_{235}\sigma_{a235} + N_{238}\sigma_{a238}} \quad (2.23)$$

$$\eta = \nu \frac{\sigma_{f235}}{\sigma_{a235} + (N_{238}/N_{235})\sigma_{a238}} \quad (2.24)$$

เมื่อ	Σ_f	ภาคตัดขวางมหัพภาคของฟิชชัน (Macroscopic fission cross section)
	Σ_a	ภาคตัดขวางมหัพภาคของการดูดกลืน (Macroscopic absorption cross section)
	N_{235}	จำนวนอะตอมของ ^{235}U ต่อ ซม. ³
	N_{238}	จำนวนอะตอมของ ^{238}U ต่อ ซม. ³
	σ_{f235}	ภาคตัดขวางจุลพัทธ์ของฟิชชัน (microscopic fission cross section) ของ ^{235}U มีค่า 582 บาร์น

σ_{a235} ภาคตัดขวางจุลทรรศน์ของการดูดกลืน (microscopic absorption cross section) ของ ^{235}U มีค่า 680 บาร์น

σ_{a238} ภาคตัดขวางจุลทรรศน์ของการดูดกลืน (microscopic absorption cross section) ของ ^{238}U มีค่า 2.8 บาร์น

ν จำนวนพรมตนิวตรอนเฉลี่ยต่อฟิชชัน มีค่า 2.5 สำหรับ ^{235}U สำหรับยูเรเนียมธรรมชาติ มีปริมาณ ^{235}U เพียง 0.72% หรือ

$$N_{238} / N_{235} = 139 \quad (2.25)$$

เมื่อแทนค่าในสมการ (2.24) เพื่อคำนวณค่า η ของยูเรเนียมธรรมชาติ จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \eta &= 2.5 [582 / \{ 680 + (139 \times 2.8) \}] \\ &= 1.36 \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.7 สมบัติบางประการของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เมื่อทำปฏิกิริยากับเทอร์มัลนิวตรอน ^[12,p246]
($E = 0.025\text{eV}$)

นิวไคลด์	σ_a	σ_γ	σ_f	η	ν
^{233}U	578.8	47.1	531.1	2.287	2.492
^{235}U	680.8	98.6	582.2	2.068	2.418
^{239}Pu	1011.3	268.8	742.5	2.108	2.872
^{241}Pu	1377	369	1009	2.145	2.927

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Lamarsh, J.R. 1977. Introduction to Nuclear engineering

นิวตรอนเร็วที่เกิดขึ้นจากฟิชชันมีพลังงานระหว่าง 0-10 MeV โดยมีพลังงานเฉลี่ย 1.5 -2 MeV ดังนั้น นิวตรอนที่มีพลังงานมากกว่า 1 MeV ก็สามารถทำให้ ^{238}U เกิดฟิชชันได้ จำนวนนิวตรอนจึงเพิ่มขึ้นด้วยค่าปัจจัยฟิชชันโดยนิวตรอนเร็ว (fast fission factor, ϵ) โดยที่

$$\epsilon = \frac{\text{อัตราการผลิตนิวตรอนเร็วทั้งหมด}}{\text{อัตราการผลิตนิวตรอนเร็วโดยเทอร์มัลนิวตรอน}} \quad (2.26)$$

จากนั้นนิวตรอนจำนวน $\eta \cdot \epsilon$ จะเข้าสู่กระบวนการลดพลังงานเป็นเทอร์มัลนิวตรอน ซึ่งจะมีบางนิวตรอนถูกดูดกลืนไปโดยตัวกลางต่างๆ สัดส่วนของนิวตรอนที่ไม่ถูกดูดกลืน บอกได้ด้วยค่าโอกาสหลุดพ้นเรโซแนนซ์ (resonance escape probability, p) จึงทำให้ได้เทอร์มัลนิวตรอนจำนวน $\eta \cdot \epsilon \cdot p$ ที่อาจถูกจับโดยเชื้อเพลิง สารหล่อเย็น และ โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์ เทอร์มัลนิวตรอนที่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงเท่านั้นที่จะนำมาพิจารณา ซึ่งบอกได้ด้วยค่าปัจจัยการใช้ประโยชน์เทอร์มัลนิวตรอน (thermal utilization factor, f) โดยที่

$$f = \frac{\text{อัตราการคูณก่อกำเนิดเทอร์มัลนิวตรอนโดยเชื้อเพลิง}}{\text{อัตราการคูณก่อกำเนิดเทอร์มัลนิวตรอนทั้งหมด}} \quad (2.27)$$

ดังนั้น จำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นโดยเทอร์มัลนิวตรอน 1 อนุภาค ปฏิกรณ์ฟิชชัน มีค่าเท่ากับ $\eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f$ และจากความหมายของ K_∞ ในสมการ (2.20) จะได้ว่า

$$K_\infty = \frac{\eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f}{1}$$

$$K_\infty = \eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f \quad (2.28)$$

ปัจจัยการทวีคูณนิวตรอน จึงอาจเรียกว่า สูตรสี่ปัจจัย (four factor formula) โดยค่า η ขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงอย่างเดียว (สมการที่ 2.21) ส่วน ϵ, p, f ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและความเข้มข้นของเชื้อเพลิง รวมทั้งสภาพกายภาพกระจายของเชื้อเพลิงกับสารหน่วงนิวตรอน เช่น $\epsilon = 1.3$ สำหรับเชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติ และ $\epsilon \approx 1$ เมื่อเชื้อเพลิงและสารหน่วงนิวตรอนมีการแจกแจงแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous distribution) ค่า K_∞ ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่เป็นอนันต์ ซึ่งพิจารณาว่าไม่มีนิวตรอนสูญหาย แต่ในสภาพที่เป็นจริง จะมีนิวตรอนบางส่วนที่รั่วไหลไปจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ ถ้า P เป็นโอกาสที่ไม่เกิดการรั่วไหล (non-leakage probability) ปัจจัยการทวีคูณประสิทธิผล (effective multiplication factor, K_{eff}) จึงมีความสัมพันธ์กับ K_∞ ดังนี้

$$K_{eff} = PK_\infty \quad (2.29)$$

เมื่อ $K_{eff} = 1$ ระบบอยู่ในสภาวะวิกฤต (critical) เกิดสมดุลระหว่างจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นกับการคูณก่อกำเนิดไป ในสภาวะนี้ ปฏิกรณ์เดินเครื่องเป็นปกติ

$K_{eff} > 1$ ระบบอยู่ในสภาวะเหนือวิกฤต (supercritical) เพื่อเริ่มเดินเครื่องปฏิกรณ์ โดยจำนวนนิวตรอนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

$K_{eff} < 1$ ระบบอยู่ในสภาวะต่ำกว่าวิกฤต (sub-critical) เพื่อหยุดเดินเครื่องปฏิกรณ์ โดยจำนวนนิวตรอนจะลดลงเรื่อยๆ

2.4 โครงสร้างรหัสคอมพิวเตอร์เอ็มซีเอ็นพีเอ็กซ์ (MCNPX)^[13]

รหัสคอมพิวเตอร์เอ็มซีเอ็นพี (Monte Carlo N-Particle:MCNP) ถูกออกแบบด้วยวิธีการคำนวณมอนติ คาร์โล คือ ขั้นตอนวิธี (Algorithms) ที่ใช้สำหรับการจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ หรือ การคำนวณทางคณิตศาสตร์ ด้วยการสุ่มตัวอย่าง โดยพิจารณาจาก probability distribution function (pdf's) ซึ่งตัวอย่างที่ได้จากการสุ่ม นั้นจะมีรูปแบบที่เหมาะสมเสมอ เช่น [0,1] และมีการสะสมค่าให้ตรงกัน โดยจะใช้พีชคณิต ในการจัดการผลที่ได้จากการสุ่ม ซึ่งวิธีนี้ได้รับการพิสูจน์แล้วว่า มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่มีหลาย มิติ หรือเงื่อนไขที่ซับซ้อน

รหัสเอ็มซีเอ็นพี ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ลอสอลามอส (Los Alamos National Laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งพัฒนาจากรหัสคอมพิวเตอร์เอ็มซีเอ็นพีเดิม ซึ่งใช้

ในการคำนวณและสร้างแบบจำลองต่างๆที่เกิดขึ้นภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งสามารถจำลองได้ทั้งนิวตรอน, โฟตอน, อิเล็กตรอน และโฟตอนเนื่องจากนิวตรอน (coupled neutron, photon, electron transport) โดยประสิทธิภาพจะสัมพันธ์กับวิธีการเชิงตัวเลขที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถึงแม้ว่าจะไม่สามารถยืนยันการเป็นจำนวนสุ่มที่แท้จริงได้ แต่จากผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าคุณภาพคำตอบของโปรแกรม MCNP มีค่าความแตกต่างกับการคำนวณด้วยโปรแกรมอื่นๆ และค่าที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ ข้อดีของ โปรแกรม MCNPจะมีขั้นตอนการประมวลผลที่เร็วกว่าวิธีการอื่นๆโดยมีฐานข้อมูล ที่มีมาตรฐานและได้รับการปรับปรุงอยู่เสมอ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำโปรแกรม MCNP มาใช้ในงานวิจัยต่างๆ และมีไฟล์ที่บรรจุตารางข้อมูล โอกาสการเกิดอันตรกิริยาของอนุภาคที่ถูกจำลองอย่างละเอียด

- โครงสร้างไฟล์อินพุต MCNPX

ภายในไฟล์อินพุต MCNPX จะใส่ข้อมูลระนาบของวัตถุ , ลักษณะเฉพาะของสาร , แหล่งกำเนิดนิวตรอน และค่าต้องการทราบจากการจำลอง รูปร่างที่ได้จากการจำลองจาก cell card โดยสามารถรับข้อมูลที่เป็นสาร และสุญญากาศได้

ไฟล์อินพุต MCNPX แบ่งได้สามส่วนใหญ่ๆ ดังนี้ ชุดคำสั่งคุณสมบัติของสาร (Cell Card) , ชุดคำสั่งพื้นผิว (Surface Card) และชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะของสาร (Data Card) โดยชุดคำสั่ง (Card) แต่ละชนิดจะเขียนให้จบภายในหนึ่งบรรทัด และในแต่ละบรรทัดไม่ควรเขียนเกิน 80 ตัวอักษร โครงสร้างของไฟล์อินพุตดังรูปที่ 2.42

```
Title Card
Cell Cards
.....
.....
Blank Line Delimiter
Surface Cards
.....
.....
Blank Line Delimiter
.....
.....
Blank Line Terminator (optional)
```

รูปที่ 2.42 โครงสร้างคำสั่งอินพุตโปรแกรม MCNPX

2.4.1 Title card

Title card เป็นชื่อไฟล์อินพุต เพื่อบ่งบอกความเฉพาะของไฟล์นั้นๆ โดย title card จะอยู่บรรทัดแรกของไฟล์ สามารถตั้งชื่อได้ไม่เกิน 80 ตัวอักษร (หากตั้งเกินกว่า 80 ตัวอักษร จะทำให้การประมวลผลของเอ็มซีเอ็นพีผิดพลาด) และหากไม่ได้ใส่ title card ไว้เมื่อระบบทำการ

ประมวลผลจะถือว่าบรรทัดแรกสุดเป็นชื่อไฟล์นั้น ส่งผลให้การคำนวณของระบบเกิดความผิดพลาด

2.4.2 เซลล์ การ์ด (Cell Card)

ในส่วนถัดมาจาก Title Card หนึ่งบรรทัด เราจะเรียกว่า เซลล์ การ์ด (Cell Card) โดยเป็นส่วนของการระบุโครงสร้าง ชนิดของธาตุ ซึ่งมีรูปร่างเหมือนของจริงทุกประการ รูปร่างที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละชนิด เราจะเรียกว่า “เซลล์” รูปแบบของโครงสร้างเซลล์การ์ดมีดังนี้

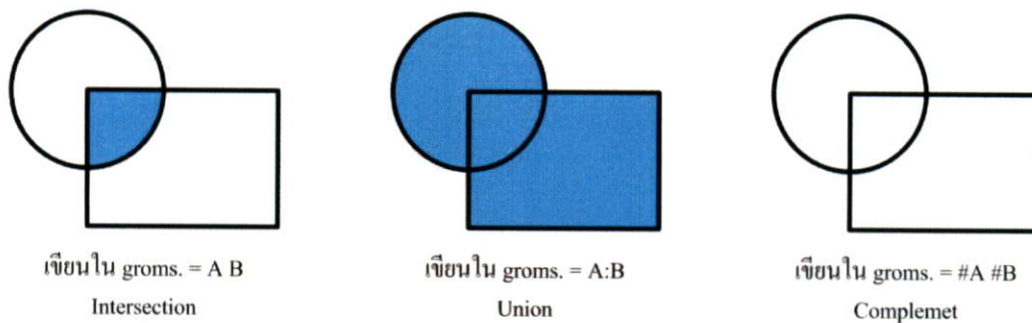
โครงสร้าง	j	m	d	geom.	Params
เมื่อ	j	เป็นหมายเลขของเซลล์ (Cell Number) สามารถกำหนดหมายเลขได้ตั้งแต่ 1-9999			
	m	เป็นหมายเลขคุณสมบัติของเซลล์ (Material Number) โดยคุณสมบัติเหล่านี้จะถูกกำหนดในการ์ดที่ชื่อว่า Mm card (ถ้าเป็นเลข 0 หมายถึงสุญญากาศหรืออากาศ : m = 0)			
	d	เป็นค่าความหนาแน่นของเซลล์ -ถ้าเป็นสุญญากาศไม่ต้องใส่หมายเลข -ถ้าใช้เครื่องหมายบวก = ความหนาแน่นของอะตอม มีหน่วย atom/b-cm -ถ้าใช้เครื่องหมายลบ = ความหนาแน่นของมวล มีหน่วย g/cc			
	groms	ใช้กำหนดขอบเขตของเซลล์แต่ละเซลล์ โดยใช้หมายเลขของการ์ดพื้นผิว (Surface card) เป็นตัวกำหนดขอบเขต และใช้ Boolean operator เพื่อสร้างเซลล์ให้มีรูปทรงเรขาคณิต			
	params	ใช้บอกรายละเอียดของเซลล์ อาจจะใช้ข้อมูลที่เป็นคำสำคัญของเซลล์นั้นๆ			

ในการกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของเซลล์และเลขคุณสมบัติของเซลล์ ใช้เลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 1 – 99999 เป็นตัวกำหนดขอบเขต ซึ่งแต่ละพื้นผิวของเซลล์จะมีเครื่องหมายบวก (+) หรือลบ (-) เพื่อกำหนดทิศทางของพื้นผิวนั้นๆ และเพื่อให้พื้นผิวของทุกพื้นผิวประกอบกันเป็นเซลล์หนึ่งเซลล์ขึ้นมาได้จำเป็นต้องใช้การรวมกันทางเรขาคณิต ดังรูปที่ 2.43 สำหรับเอ็มซีเอ็นพีใช้ Boolean operator ในการรวมของเซลล์ ที่ประกอบด้วย

1.intersection operator ซึ่งในขั้นตอนการป้อนข้อมูลจะไม่ใส่เครื่องหมายใดๆ แต่จะเว้นระยะระหว่างหมายเลขพื้นผิวไว้ 1 วรรค

2.union operators เป็นการป้อนข้อมูลเพื่อให้เห็นว่าพื้นผิว ตั้งแต่ 2 ผิวขึ้นไปมีความสัมพันธ์กัน โดยใส่เครื่องหมายโคลอน (:) เพื่อแสดงความสัมพันธ์

3.complement operator เป็นการป้อนข้อมูลเพื่อแสดงว่าหมายเลขของเซลล์ (j) ไม่นำมาคำนวณ โดยใส่เครื่องหมายสี่เหลี่ยม (#) หน้าหมายเลขของเซลล์



รูปที่ 2.43 การใช้ Boolean operator ในคำสั่งเซลล์การ์ดของโปรแกรม MCNPX

2.4.3 การ์ดพื้นผิว (Surface Card)

ถัดจากเซลล์การ์ดจะเป็นส่วนของการ์ดพื้นผิว โดยการ์ดพื้นผิวจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของรูปร่างของพื้นผิวเซลล์ ซึ่งสามารถจำลองด้วยโปรแกรมเอ็มซีเอ็นพี โดยการกำหนดความโค้งของพื้นผิวได้หลายรูปแบบ ตั้งแต่รูปร่างแบบง่ายๆ เช่น แนวระนาบในแกน (x,y,z), ทรงกลม, ทรงกระบอก ไปจนถึงรูปทรงเรขาคณิตรูปทรงยากๆ เช่น hyperboloid, paraboloid, ellipsoid เป็นต้น โครงสร้างการเขียนของการ์ดพื้นผิวมีดังนี้

โครงสร้าง	j	a	n	list
-----------	---	---	---	------

เมื่อ j ค่าหมายเลขของพื้นผิว (Surface Number) เขียนอยู่ในเลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 1-9999
a กำหนดค่าพิกัด x, y, z ลักษณะขอบเขตหรือระนาบของพื้นผิว
(coordinate transformation) ดังตารางที่ 2.8
n กำหนดระยะขอบเขตและรูปร่างของพื้นผิวเซลล์

2.4.4 การ์ดกำหนดรายละเอียดอื่น ๆ (data cards)

นอกจากการ์ดที่ได้กล่าวมาในขั้นต้นแล้วนั้น ยังมีการ์ดอีกประเภททำหน้าที่เป็นกำหนดรายละเอียดอื่น ๆ นอกจาก cell cards และ surface cards ได้กำหนดไว้ เพื่อให้รายละเอียดในการจำลองมีความสมบูรณ์มากที่สุด ประกอบด้วย ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการ์ดที่ต้องใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์เท่านั้น

1. Problem type
2. Geometry cards
3. Variance reduction
4. Source specification
5. Tally specification
6. Material and cross section specification
7. Energy and thermal treatment
8. Problem cutoffs

ตารางที่ 2.8 รายละเอียดชุดคำสั่งของการ์ดพื้นผิว

Mnemonic	Type	Description	Equation	Card Entires
P PX PY PZ	Plane	General	$Ax + By + Cz + D = 0$ $x - D = 0$ $y - D = 0$ $z - D = 0$	ABCD
SO S SX SY SZ	Sphere	Centered at Origin General Centered on X-axis Centered on Y-axis Centered on Z-axis	$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$ $(x - \bar{x}) + (y - \bar{y}) + (z - \bar{z}) - R^2 = 0$ $(x - \bar{x}) + y^2 + z^2 - R^2 = 0$ $x^2 + (y - \bar{y}) + z^2 - R^2 = 0$ $x^2 + y^2 + (z - \bar{z}) - R^2 = 0$	$\frac{R}{\bar{x} \bar{y} \bar{z}}$ $\bar{x} R$ $\bar{y} R$ $\bar{z} R$
C/X C/Y C/Z CX CY CZ	Cylinder	Parallel to X-axis Parallel to Y-axis Parallel to Z-axis on X-axis on Y-axis on Z-axis	$(y - \bar{y}) + (z - \bar{z}) - R^2 = 0$ $(x - \bar{x}) + (z - \bar{z}) - R^2 = 0$ $(x - \bar{x}) + (y - \bar{y}) - R^2 = 0$ $y^2 + z^2 - R^2 = 0$ $x^2 + z^2 - R^2 = 0$ $x^2 + y^2 - R^2 = 0$	$\bar{y} \bar{z} R$ $\bar{x} \bar{z} R$ $\bar{x} \bar{y} R$ R R R
K/X K/Y K/Z KX KY KZ	cone	Parallel to X-axis Parallel to Y-axis Parallel to Z-axis on X-axis on Y-axis on Z-axis	$\sqrt{(y - \bar{y}) + (z - \bar{z})} - t(x - \bar{x}) = 0$ $\sqrt{(x - \bar{x}) + (z - \bar{z})} - t(y - \bar{y}) = 0$ $\sqrt{(x - \bar{x}) + (y - \bar{y})} - t(z - \bar{z}) = 0$ $\sqrt{y^2 + z^2} - t(x - \bar{x}) = 0$ $\sqrt{x^2 + z^2} - t(y - \bar{y}) = 0$ $\sqrt{x^2 + y^2} - t(z - \bar{z}) = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$ $\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$ $\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$ $\bar{x} t^2 \pm 1$ $\bar{y} t^2 \pm 1$ $\bar{z} t^2 \pm 1$
SQ	Ellipsoid Hyperboloid Paraboloid	Axis not parallel To X-, Y-, or Z-Axis	$A(x - \bar{x})^2 + B(y - \bar{y})^2 + C(z - \bar{z})^2$ $+ 2D(x - \bar{x}) + 2E(y - \bar{y})$ $+ 2F(z - \bar{z}) + G = 0$	ABCDE FGXYZ
GQ	Cylinder Cone Hyperboloid Paraboloid	Axis not parallel To X-, Y-, or Z-Axis	$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz$ $+ Fzx + Gz + Hy + Jz + K = 0$	ABCDE FGHIJK
TX TY TZ	Ellipsoid Circular torus Axis is parallel to X-, Y- or Z-Axis		$(x - \bar{x})^2 / B^2 + \left(\sqrt{(y - \bar{y}) + (z - \bar{z})} - A \right)^2 / C^2 - 1 = 0$ $(y - \bar{y})^2 / B^2 + \left(\sqrt{(x - \bar{x}) + (z - \bar{z})} - A \right)^2 / C^2 - 1 = 0$ $(z - \bar{z})^2 / B^2 + \left(\sqrt{(x - \bar{x}) + (y - \bar{y})} - A \right)^2 / C^2 - 1 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} A B C$ $\bar{x} \bar{y} \bar{z} A B C$ $\bar{x} \bar{y} \bar{z} A B C$

2.4.4.1 Problem type หรือ Mode Card

เนื่องจากการคำนวณแบบมอนติ คาร์โล ด้วยโปรแกรม MCNPX สามารถใช้ในการจำลองได้ทั้งนิวตรอน โฟตอน และอิเล็กตรอน ดังนั้นผู้ที่ใช้งานต้องการจำลองรังสีชนิดใดสามารถเลือกและป้อนข้อมูลด้วยโหมดการ์ดดังต่อไปนี้

โครงสร้าง	MODE	$x_1 \dots x_i$
-----------	------	-----------------

เมื่อ x_i

- N สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของนิวตรอน
- P สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของโปรตอน
- E สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

2.4.4.2 Tally specification

การ์ด Tally เป็นการ์ดพิเศษใช้สร้างเงื่อนไขในการนับวัดปริมาณรังสี คือ ผู้ใช้สามารถกำหนดได้ทั้งชนิดของรังสีที่ต้องการนับวัด และลักษณะของจุดที่ต้องการนับวัด เช่น นับวัดที่พื้นผิวของตัวกลาง, นับวัดภายในตัวกลาง และนับวัดจุดที่สนใจ รวมทั้งคุณสมบัติของรังสีชนิดนั้น เช่น จำนวนของโฟตอน, ฟลักซ์ของรังสีที่ต้องการทราบ และพลังงานการดูดกลืนภายในเซลล์นั้นๆ โดยสามารถเลือกใช้คำสั่งนับวัดปริมาณรังสีได้จากตารางที่ 2.9

ในกรณีที่ต้องการนับวัดปริมาณรังสีในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งมากกว่าหนึ่งครั้ง เช่น ต้องการหาจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ภายในเซลล์สองครั้ง คำสั่งที่จะใช้คือ F4 แต่ด้วยโปรแกรม MCNPX ที่ใช้เป็นรหัสคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรน 77 (FORTRAN 77) การใช้ F4 สองครั้ง ทำให้โปรแกรมไม่เข้าใจคำสั่งที่ป้อนเข้าไป แต่สามารถใช้คำสั่งนับซ้ำกันได้โดยการใส่ตัวเลขใดก็ได้หน้าเลข 4 เช่น F14, F24 หรือ F224 ซึ่งการนับวัดจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ภายในเซลล์จะเหมือนการใช้ F4 ทุกประการ โดยแต่ละ Tally มีสมการการคำนวณดังตารางที่ 2.10

2.4.4.3 การ์ดสมบัติของวัสดุ (Material Specification Cards)

รายละเอียดของการ์ดในส่วนนี้ เป็นการ์ดที่กำหนดไอโซโทปิก (isotopic composition) ที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุในเซลล์ และยังเป็นตัวกำหนดโอกาสการเกิดอันตรกิริยาภายในตัวด้วย ซึ่งมีโครงสร้างดังนี้

โครงสร้าง	Mn	ZAID ₁ fraction ₁
		ZAID ₂ fraction ₂

ตารางที่ 2.9 รายละเอียดของการ์ด Tally

Mnemonic	Tally Type	Particles pl	Fn Units	*Fn Units
F1: pl	surface current	N or P or N,P or E	#	MeV
F2: pl	average surface flux	N or P or N,P or E	#/cm ²	MeV/cm ²
F4: pl	average flux in a cell	N or P or N,P or E	#/cm ²	MeV/cm ²
FMESH4: pl	track-length tally over 3D mesh	N or P or E	#/cm ²	MeV/cm ²
F5a: pl	flux at a point or ring	N or P	#/cm ²	MeV/cm ²
FIP5: pl	pin-hole flux image	N or P	#/cm ²	MeV/cm ²
FIR5: pl	planar radiograph flux image	N or P	#/cm ²	MeV/cm ²
FIC5: pl	cylindrical radiograph flux image	N or P	#/cm ²	MeV/cm ²
F6: pl	energy deposition	N or P or N,P	MeV/g	Jerks/g
F7: pl	Fission energy deposition in a cell	N	MeV/g	Jerks/g
F8: pl	pulse height distribution in a cell	P or E or P,E	pulses	MeV

ตารางที่ 2.10 สมการการคำนวณของ Tally ต่างๆ

Tally	Score	Physical Quantity	Unit
F1	w	$J = \int dE \int dt \int dA \int d\Omega \hat{\Omega} \cdot \hat{n} \Psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$	particles
F2	$\frac{W}{ \mu A}$	$\bar{\phi}_s = \frac{1}{A} \int dE \int dt \int dA \int d\Omega \Psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$	particles/cm ²
F4	$W \frac{T_l}{V}$	$\bar{\phi}_v = \frac{1}{V} \int dE \int dt \int dV \int d\Omega \Psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$	particles/cm ²
F5	$\frac{W \cdot p(\Omega_p) e^{-\lambda}}{R^2}$	$\phi_p = \int dE \int dt \int d\Omega \Psi(\vec{r}_p, \hat{\Omega}, E, t)$	particles/cm ²
F6	$W T_l \sigma_t(E) H(E) \frac{\rho_a}{m}$	$H_t = \frac{\rho_a}{m} \int dE \int dt \int dV \int d\Omega \sigma_t(E) H(E) \Psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$	MeV/g
F7	$W T_l \sigma_t(E) Q \frac{\rho_a}{m}$	$I_f = \frac{\rho_a}{m} Q \int dE \int dt \int dV \int d\Omega \sigma_f(E) \Psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$	MeV/g
F8	W_C put in bin E_D	pulses	pulses

เมื่อ Mn หมายถึงเลขวัสดุของเซลล์ที่มีความสัมพันธ์กับตัวกลางภายในเซลล์กลาง
 ZAID ค่าแสดงคุณสมบัติของตัวกลางโดยอ้างอิงเลขอะตอมของตัวกลางนั้นๆ ซึ่งจะ
 แสดงในรูปแบบดังนี้ ZZZAAA.mnX หรือ ZZZAAA

โดย	ZZZ	เลขอะตอม (atomic number)
	AAA	มวลอะตอม (atomic mass)
	mn	คำชี้ตำแหน่งของฐานข้อมูลในโปรแกรม (library identifier)
	X	ระดับของข้อมูล ; C ตารางพลังงานของนิวตรอน , D ตารางเนื่องจากปฏิกิริยา

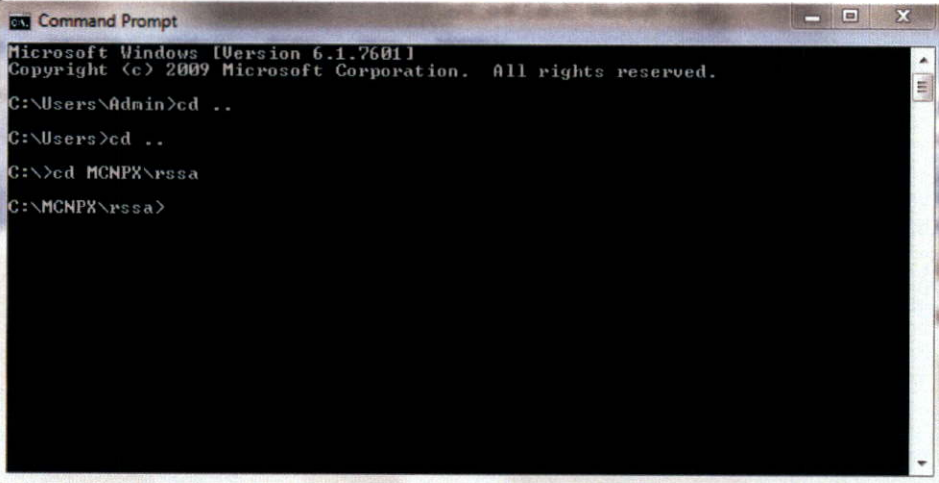
Fraction อัตราส่วนของอะตอมภายในตัวกลาง (atomic fraction) คิดเป็นร้อยละให้จำนวนเต็มหนึ่ง ซึ่งในการคิดแบ่งได้ 2 แบบคือ

หากด้านหน้ามีเครื่องหมาย + หมายถึงอัตราส่วนของโมเลกุลสาร

หากด้านหน้ามีเครื่องหมาย - หมายถึงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสาร

2.4.5 การประมวลผลแบบจำลองบนโปรแกรม MCNPX

ในการประมวลผลแบบจำลองบนโปรแกรมเอ็มซีเอ็นพีจำเป็นต้องมีการติดตั้งโปรแกรมลงบนเครื่องคอมพิวเตอร์ก่อน และประมวลผลแบบจำลองผ่านโปรแกรม Command prompt ดังรูปที่ 2.44



```

C:\Users\Admin>cd ..
C:\Users>cd ..
C:\>cd MCNPX\rssa
C:\MCNPX\rssa>

```

รูปที่ 2.44 หน้าต่างโปรแกรม Command prompt สำหรับประมวลผลแบบจำลอง MCNPX

ในการประมวลผลแบบจำลองโปรแกรมเอ็มซีเอ็นพีแบ่งการประมวลเป็นสองแบบ

1. สร้างรูปทรงของชิ้นส่วนที่ต้องการศึกษา (Plot geometry) โดยเขียนคำสั่งดังนี้ และหน้าจอการแสดงผลแบบจำลองดังรูปที่ 2.45

mcnpx i=ชื่อไฟล์.in ip (กด Enter)

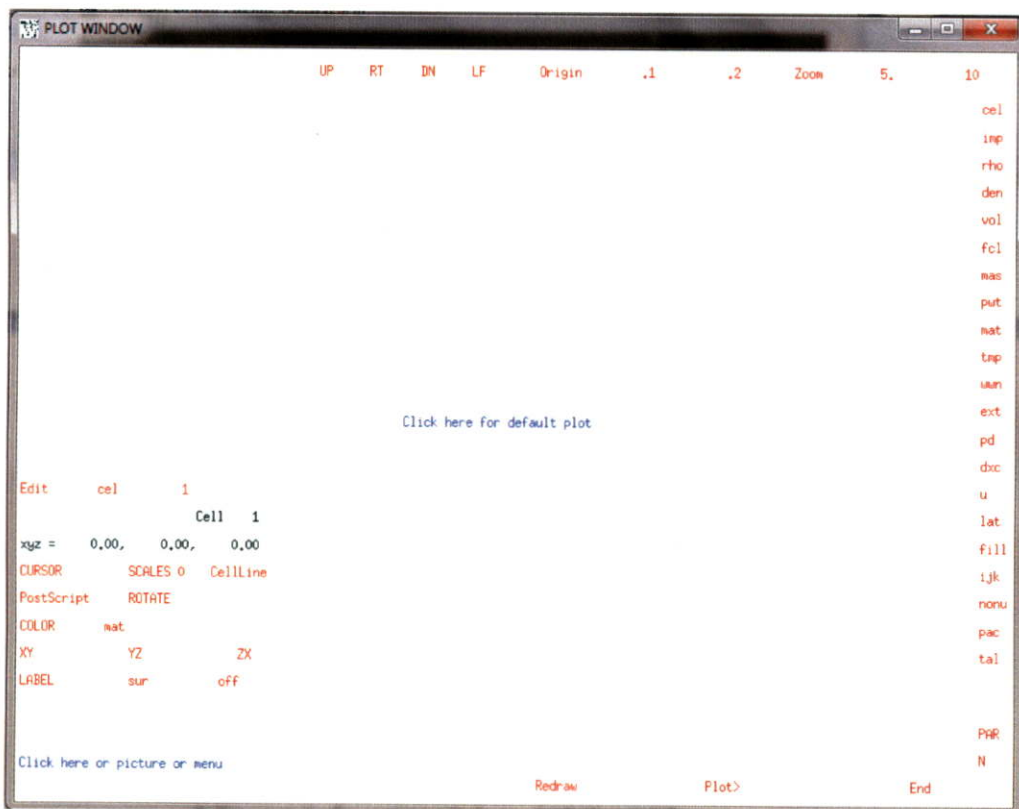
2. ประมวลผลแบบจำลองของโปรแกรมเพื่อต้องการทราบผลที่ต้องการศึกษา

mcnpx i=ชื่อไฟล์.in o=ชื่อไฟล์.ou (กด Enter)

หากไฟล์ที่ทำการประมวลผลมีข้อผิดพลาด หรือระนาบที่กำหนดมีการทับหรือผิดรูปร่างจะมีข้อความเตือน (Fatal Error) ขึ้นบนหน้าต่าง โปรแกรม putty หรือ command prompt เมื่อมีข้อความดังกล่าวปรากฏขึ้นจะส่งผลให้โปรแกรมหยุดการจำลองและคำนวณไฟล์นั้น นอกจาก fatal error แล้วยังมีคำเตือน Warning อีกหนึ่งข้อความทำหน้าที่เตือนปัญหาข้อมูลที่ป้อนผิด หรือเว้นบรรทัดไม่ถูกต้อง แต่ยังสามารถประมวลผลแบบจำลองต่อไปได้ แต่ถ้าไฟล์ที่ทำการประมวลผลไม่มีข้อผิดพลาดไฟล์ที่ได้จากการประมวลผล โปรแกรมจะมีทั้งหมดสองไฟล์ ประกอบไปด้วยไฟล์ผลการคำนวณ (ชื่อไฟล์.ou , ชื่อไฟล์.ru) โดยไฟล์ .ou จะบันทึกผลการคำนวณของโปรแกรม MCNPX

2.4.6 ข้อมูลจำเพาะของ MCNPX

ในการเขียนชุดคำสั่งในการรันต่างๆที่กล่าวมานั้น สามารถใช้ตัวอักษรอังกฤษได้ทั้งพิมพ์ใหญ่และพิมพ์เล็ก หรือใหญ่ผสมกันได้ ถ้าเว้นบรรทัดเพื่อแยกชุดคำสั่งออกจากได้ สามารถใช้ตัวอักษร “c” คั่นเพื่อระบุว่าบรรทัดนั้นว่างเปล่าไม่มีชุดคำสั่งใดๆ



รูปที่ 2.45 หน้าต่างแสดงรูปทรงของแบบจำลองบนหน้าจอ

โครงสร้างการเขียนชุดคำสั่งของชุดคำสั่งคุณสมบัติของสาร (Cell Card) , ชุดคำสั่งพื้นผิว (Surface Card) และชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะของสาร (Data Card) มีลักษณะการเขียนที่คล้ายกัน โดยทั้งสามชุดสามารถใส่เลขชุดคำสั่งได้ห้าหลักตั้งแต่ 1-99999 แต่คำสั่งแต่ละชุดต้องเว้นระยะห่างกัน

1 บรรทัดหรืออาจมากกว่านั้น และในแต่ละบรรทัดสามารถเขียนอักษรได้ไม่เกิน 80 ตัวอักษร นอกจากนี้ในการเขียนชุดคำสั่งไม่สามารถใช้ปุ่ม tab ได้ หากมีการกดปุ่ม tab จะส่งผลให้ไฟล์ไม่สามารถประมวลผลแบบจำลองได้ (ขึ้น Fatal Error และสามารถดูตัวอย่าง fatal error ได้ในรูปแบบที่ 2.46 และ 2.47 นอกจากข้อกำหนดที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีเงื่อนไขการเขียนชุดคำสั่งดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 เงื่อนไขการเขียนชุดคำสั่งโปรแกรม MCNPX

ตัวอักษร	ตำแหน่งการใช้	รายละเอียด
C	เขียนอยู่หน้าสุดของบรรทัด เพื่อให้บรรทัดนั้นเป็นบรรทัดเปล่าไม่ต้องคำนวณ	สามารถเขียนข้อความหลัง C เพื่อบอกรายละเอียด เช่น ชื่อชุดคำสั่ง, แบ่งช่วงของคำสั่ง
\$	ใส่หลังสุด ต่อจากชุดคำสั่งนั้นๆ	เพื่อเขียนคำอธิบายบรรทัดว่าเป็นคำสั่งอะไร หรือเป็นสารอะไร
&	ใส่หลังข้อมูล	ใช้เมื่อต้องการให้คำสั่งมีความต่อเนื่องในบรรทัดต่อไป
blank	ในคอลัมน์ 1-5	เป็นบรรทัดเปล่า หรือต้องการให้มีการแบ่งชุดคำสั่งที่ชัดเจน

ตัวอย่าง Fatal error

```
*****
fatal error.  rssa missing: CT.sc

warning.  total nu is now the default for fixed-source problems.
warning.   1 materials had unnormalized fractions. print table 40.
imcn  is done
xact  is done
```

รูปที่ 2.46 Fatal error เพราะไม่พบไฟล์ rssa ทำให้ไม่สามารถรันโปรแกรมต่อได้

```
fatal error.  no m card for material no.   2
          12025.70c   6.0887e-005
fatal error.  mixed atom and weight fractions.

warning.  total nu is now the default for fixed-source problems.

bad trouble in imcn   in routine rhoden
atomic weight of 0 is zero. consider awtab card.
```

รูปที่ 2.47 Fatal Error เพราะไม่พบข้อมูลชุดที่ 2 ทำให้ไม่ทราบค่าน้ำหนักและไอโซโทปของธาตุในกรณีนั้น

2.5 การวิเคราะห์เชิงกัมมันตรังสี (Neutron Activation Analysis) ^[14]

การวิเคราะห์เชิงกัมมันตรังสี จะใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยการนำสารตัวอย่างไปอาบรังสี ซึ่งจะทำให้เกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากไอโซปเสถียรหรือไม่เสถียรซึ่งคงอยู่ภายในสารตัวอย่าง นิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านี้สามารถวิเคราะห์ได้จากคุณสมบัติที่ปลดปล่อยออกมาเช่น

1. ชนิดของรังสี
2. พลังงานของรังสี
3. ความเข้มของรังสี
4. ค่าครึ่งชีวิต (Half life)

หลักการเบื้องต้นของการวิเคราะห์เชิงกัมมันตรังสีนั้นเริ่มในปี ค.ศ. 1936 โดยเฮวีซี และลีวาย (Hevesy และ Levi) ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของดิสโพรเซียม (dysprosium : Dy) ในสารตัวอย่างอิตเทรียม (yttrium : Y) ดิสโพรเซียมในสารตัวอย่างจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสารกัมมันตรังสี เมื่อระดมยิงด้วยนิวตรอนจากแหล่งกำเนิด Ra-Be สองปีต่อมา ซีบอร์ก และ ลีฟิงกู๊ด (Seaborg และ Living Good) ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณแกลเลียมในสารตัวอย่างเหล็ก โดยการระดมยิงด้วยดิวเทอรอน ความไวของการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นตามขนาดของนิวตรอนฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ถึงแม้ว่าอนุภาคที่มีประจุ รังสีแกมมา และนิวตรอนขนาดพลังงาน 14 MeV อาจจะใช้การระดมยิง ในปัจจุบันนิยมใช้เทอร์มัลนิวตรอนในการอาบรังสีสารตัวอย่าง

แหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ในการอาบรังสีของสารตัวอย่าง ต้องคำนึงถึงความเข้ม ระดับพลังงาน และคุณลักษณะเฉพาะตัว สำหรับการศึกษาวิจัยในฉบับนี้ใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนเป็นแหล่งกำเนิดรังสี โดยแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีขนาดใหญ่มักนิยมใช้ นิวตรอนที่มาจากเครื่องปฏิกรณ์ เพราะภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีนิวตรอนที่หลายระดับพลังงาน สามารถดูรายละเอียดของนิวตรอนได้ในหัวข้อที่ 2.2.6.1

การวิเคราะห์เชิงกัมมันตรังสีเป็นที่สนใจ เพราะมีความไวในการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก สามารถประยุกต์ใช้ในสาขาวิชาต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง ตั้งแต่สาขาวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม อุตสาหกรรม สรรวจแร่ธาตุ วงการแพทย์ การเตือนภัยทางธรรมชาติ รวมทั้งการพิสูจน์หลักฐาน การวิเคราะห์เชิงกัมมันตรังสีประกอบด้วยหลักการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

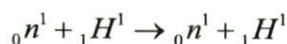
1. การเลือกปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เหมาะสม
2. การเตรียมตัวอย่างเพื่ออาบรังสี
3. การอาบรังสีสารตัวอย่าง
4. การนับรังสีสารตัวอย่าง
5. การวิเคราะห์ผลจากการนับ

2.5.1 การเลือกปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เหมาะสม

ประเภทของปฏิกิริยานิวเคลียร์ สามารถแบ่งได้ 6 ชนิด ดังนี้

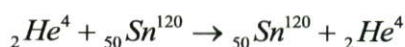
1. การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

เป็นการกระเจิงแบบที่เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกัน เช่น โปรตอนกับนิวตรอน ลักษณะการชนแบบลูกบิลเลียด ไม่มีการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาวะตื่นเต้นตัวของนิวเคลียส แต่มีการแลกเปลี่ยน เช่น การลดพลังงานนิวตรอนเมื่อชนสารประกอบไฮโดรเจน



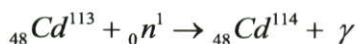
2. การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

เป็นการกระเจิงที่เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดต่างกันมาก พลังงานจลน์ของอนุภาคก่อให้เกิดสภาวะตื่นเต้นตัวของนิวเคลียสที่ถูกชน ซึ่งจะพยายามกลับเข้าสู่สภาวะที่เสถียร (ground state) โดยการให้รังสีแกมมาออกมา ตัวอย่างเช่น การใช้รังสีแอลฟากระเจิงกับเป้าดีบุก เพื่อหาระดับพลังงานของสภาวะตื่นเต้นตัวของดีบุก



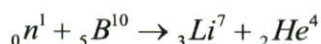
3. การจับอนุภาคไว้แล้วให้รังสี (radiative capture)

อนุภาคถูกจับไว้แล้วนิวเคลียสมีสภาวะตื่นเต้นตัว ต่อมาจึงสลายตัวให้รังสีแกมมาเพื่อลดระดับพลังงานลงสู่สถานะเสถียร ตัวอย่างเช่น การจับนิวตรอนแล้วเกิดรังสีแกมมาจับพลัน (prompt gamma)



4. การจับอนุภาคแล้วปล่อยอนุภาค (Capture with particle ejection)

เป็นปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น เมื่อนิวเคลียสจับอนุภาคแล้วจะปล่อยอนุภาคอีกตัวหนึ่งออกมา นิวเคลียสจะได้อยู่สภาวะตื่นเต้นตัว และสลายตัวให้รังสีต่างๆ ออกมาเพื่อสู่สภาวะเสถียร เช่น (n, α) , (n, p) , (n, d) , (α, p) , (α, n) เป็นต้น



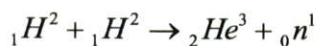
5. การแตกตัวแบบฟิชชัน (Fission)

นิวเคลียสของธาตุบางชนิดเมื่อถูกยิงด้วยนิวตรอนหรืออนุภาคบางชนิด นิวเคลียสจะถูกทำให้แตกออกเป็นสองเสี่ยง เรียกว่า ผลผลิตฟิชชัน (fission product หรือ fission fragment) พร้อมกับปล่อยอนุภาคต่างๆ เช่น p หรือ n ออกมา



6. การแตกตัวแบบฟิวชัน

การรวมตัวของนิวเคลียสธาตุเบาเช่นไฮโดรเจน เป็นปฏิกิริยาสำหรับผลิตนิวตรอนในเครื่องเร่งอนุภาค คือ D-D reaction และ D-T reaction



และเราสามารถเขียนสรุปข้อแตกต่างระหว่างปฏิกิริยานิวเคลียร์ กับปฏิกิริยาทางเคมี เพื่อให้เห็นถึงข้อแตกต่างของปฏิกิริยาทั้งสองรูปแบบได้ดังตารางที่ 2.12

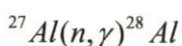
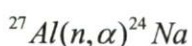
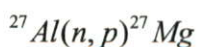
ในการเลือกปฏิกิริยานิวเคลียร์มีข้อควรพิจารณาดังนี้

1. ควรก่อให้เกิดกัมมันตภาพสูงภายในช่วงการอาบรังสีที่เหมาะสม
2. ไอโซโทปที่เกิดขึ้นควรมีค่าครึ่งชีวิตของสารตัวอย่างที่เหมาะสม ($T_{1/2} > \text{นาท}$)
3. ชนิดและพลังงานของรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากไอโซโทปไม่ควรทำให้มีการนับมีความยุ่งยาก

ตารางที่ 2.12 เปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของปฏิกิริยานิวเคลียร์และปฏิกิริยาเคมี [12,p230]

ปฏิกิริยานิวเคลียร์	ปฏิกิริยาเคมี
-กล่าวถึงระดับอะตอมและมีการเปลี่ยนแปลงของอะตอม	-กล่าวถึงระดับ โมเลกุล เช่น การเปลี่ยนแปลงมวล แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับอะตอม
-การเปลี่ยนแปลงพลังงาน วัดในหน่วย eV, MeV	-การเปลี่ยนแปลงพลังงาน วัดในหน่วย J/mol (96 kJ/mol = 1 eV/atom)
-เกิดนิวไคลด์ใหม่ ซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นธาตุเดิม	-อะตอมของธาตุไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะเปลี่ยนเฉพาะพันธะ
-ให้พลังงานสูง เช่น ${}^{235}\text{U}$ 1 กรัม เกิดฟิชชันให้พลังงาน 8.4×10^7 kJ	-ได้พลังงานน้อยกว่าปฏิกิริยานิวเคลียร์มาก เช่น เผาถ่านหิน 1 กรัม ให้พลังงาน 33.9 kJ

ในขั้นแรกหากไม่ทราบเกี่ยวกับชนิดของสารตัวอย่างควรจะเริ่มด้วยการอาบนิวตรอน เพราะนิวตรอนจะถูกดูดกลืนโดยไอโซโทปเป็นส่วนใหญ่ แต่ถ้าทราบองค์ประกอบของสารตัวอย่างแล้วจะเลือกปฏิกิริยาที่ดีที่สุดสำหรับการระบุชนิดไอโซโทป ซึ่งบางครั้งมีปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ไอโซโทปเดียวกันหลายปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่นการระดมยิงอะลูมิเนียมด้วยนิวตรอนเร็วอาจจะวัดได้ด้วยปฏิกิริยาที่แตกต่างกันคือ



ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เหมาะสมไม่ได้ขึ้นอยู่กับไอโซโทป และอนุภาคที่ระดมยิงเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$ เป็นปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา ในการวิเคราะห์ปริมาณอะลูมิเนียมในบางตัวอย่างแต่ถ้าในตัวอย่างมีซิลิกอนผสมอยู่ในอะลูมิเนียม ปฏิกิริยา $^{27}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$ ก็จะทำให้เกิด ^{28}Al และก่อให้เกิดการแทรกสอดต่อการวัด ถ้าซิลิกอนคงอยู่แล้ว ก็ควรเลือกใช้ปฏิกิริยา $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ หรือ $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$

ปฏิกิริยาที่ถูกเลือกนำมาใช้มากที่สุดคือ ปฏิกิริยา (n, γ) ซึ่งสามารถเกิดได้ทุกไอโซโทป แต่โดยทั่วไปภาคตัดขวางของปฏิกิริยา (n, γ) จะสูงกับเทอร์มัลนิวตรอนมากกว่านิวตรอนเร็ว อันตรกิริยาอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยา (n, α) และ $(n, 2n)$ ยกเว้นบางปฏิกิริยาที่คายความร้อนเช่น (n, α) สามารถเกิดขึ้นกับนิวตรอนเร็วเพียงอย่างเดียว ดังในตารางที่ 2.13 ให้แสดงปฏิกิริยานิวตรอนสำหรับการระบุชนิดหลายๆธาตุ

อนุภาคที่ประจุสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาทำให้เป่าธาตุไอโซโทปบริสุทธิ์ได้เช่นเดียวกับอนุภาคนิวตรอน แต่มีข้อด้อยตรงที่ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาคุกคลินพลังงาน กล่าวคือ จะต้องอาศัยเครื่องเร่งอนุภาคในการทำอนุภาคในการทำให้อนุภาคที่มีประจุมีพลังงานจลน์สูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจึงจะทำให้ปฏิกิริยานิวเคลียร์เกิดขึ้นได้ ดังในตารางที่ 2.14 แสดงให้เห็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของเป่าบางชนิด

การก่อกัมมันตรังสีด้วยโฟตอน จะเสริมการก่อกัมมันตภาพด้วยนิวตรอนและอนุภาคที่มีประจุโฟตอนที่อาจใช้ได้ดีกว่านิวตรอนในบางกรณี ตัวอย่างเช่นผลลัพธ์จากการก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอนจะให้ไอโซโทปที่มีครึ่งชีวิตสั้นเกินไป หรือปลดปล่อยรังสีบีตา หรือรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำเกินไป ภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยาโฟโตนิวเคลียร์โดยทั่วไปจะต่ำกว่าใช้นิวตรอนและอนุภาคที่มีประจุดังตารางที่ 2.15 ได้แสดงรายละเอียดหลายปฏิกิริยาที่จะใช้ในการก่อก่อให้เกิดการวิเคราะห์แบบก่อกัมมันตภาพรังสีโฟตอน

ตารางที่ 2.13 ปฏิกิริยาการก่อกัมมันตภาพด้วยนิวตรอน [14,p525]

Element	Symbol	Reaction	Threshold energy (MeV)	Half-life of product	Main radiation emitted and its energy (MeV)
Aluminum	Al	$^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$	(-) ⁺	2.3 min	$\beta^- (2.85), \gamma (1, 78)$
		$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	1.9	9.46 min	$\beta^- (1.75), \gamma (0.84, 1.013)$
		$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	3.27	15 h	$\beta^- (1.389), \gamma (1.369, 2.754)$
Arsenic	As	$^{78}\text{As}(n,\gamma)^{76}\text{As}$	(-)	26.4 h	$\beta^- (2.97), \gamma (0.559)$
		$^{78}\text{As}(n,\alpha)^{72}\text{Ga}$	(-)	14.1 h	$\beta^- (3.15), \gamma (0.835)$
		$^{78}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$	8.27	17.9 d	$\beta^- (3.15), \gamma (0.835)$
Cadmium	Cd	$^{110}\text{Cd}(n,\gamma)^{111\text{m}}\text{Cd}$	(-)	48.6 min	$e^-, \gamma (0.247)$
		$^{110}\text{Cd}(n,p)^{110\text{m}}\text{Ag}$	2.12	235 d	$\gamma (0.658)$
Calcium	Ca	$^{48}\text{Ca}(n,\gamma)^{49}\text{Ca}$	(-)	8.8 min	$\gamma (3.07), \beta (1.95)$
Chlorine	Cl	$^{37}\text{Cl}(n,\gamma)^{38}\text{Cl}$	(-)	37.2 min	$\beta^- (4.91), \gamma (1.6, 2.17)$
		$^{37}\text{Cl}(n,p)^{37}\text{S}$	3.6	5 min	$\beta^-, \gamma (3.09)$
Copper	Cu	$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	11.01	9.76 min	$\gamma (0.511)$
Fluorine	F	$^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$	1.57	7.15 s	$\gamma (6.13)$
Gold	Au	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	(-)	2.7 d	$\beta^- (0.962), \gamma (0.412)$
		$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$	7.36	6.18 d	$\beta^-, \gamma (0.356)$
Iodine	I	$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$	(-)	25 min	$\beta^- (2.12), \gamma (0.441)$
Iron	Fe	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	(-)	45.5 d	$\beta^-, \gamma (1.095, 1.292)$
		$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	2.98	2.57 d	$\beta^-, \gamma (0.847)$
Lead	Pb	$^{208}\text{Pb}(n,2n)^{207\text{m}}\text{Pb}$	7.45	0.885 s	$\gamma (0.570)$
Mercury	Hg	$^{200}\text{Hg}(n,2n)^{199\text{m}}\text{Hg}$	8.11	43 min	$\gamma (0.158)$
		$^{196}\text{Hg}(n,\gamma)^{197}\text{Hg}$	(-)	65 h	$\gamma (0.077)$
		$^{202}\text{Hg}(n,\gamma)^{203\text{m}}\text{Hg}$	(-)	46.9 d	$\gamma (0.279)$
Nickel	Ni	$^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$	12.09	36 h	$\beta^+, \gamma (0.511, 1.37)$
Nitrogen	N	$^{14}\text{N}(n,2n)^{13}\text{N}$	11.31	10 min	$\gamma (0.511)$
Oxygen	O	$^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$	10.2	7.1 s	$\gamma (6.13)$
Phosphorus	P	$^{31}\text{P}(n,\alpha)^{28}\text{Al}$	2	2.3 min	$\beta^-, \gamma (1.78)$
Potassium	K	$^{39}\text{K}(n,2n)^{38}\text{K}$	13.41	7.7 min	$\gamma (0.511, 2.17)$
Silicon	Si	$^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$	3.99	2.3 min	$\gamma (1.78)$
Sliver	Ag	$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110}\text{Ag}$	(-)	24 s	$\gamma (0.66)$

ตารางที่ 2.14 ปฏิกิริยาอนุภาคมีประจุ [14,p526]

Element	Symbol	Reaction	Threshold energy (MeV)	Half-life of product	Main radiation emitted and its energy (MeV)
Boron	B	$^{10}\text{B}(\alpha, n)^{13}\text{N}$	-	10 min	β^+, γ (0.511)
		$^{10}\text{B}(p, \gamma)^{11}\text{C}$	0.40	20.4 min	β^+, γ (0.511)
		$^{11}\text{B}(p, n)^{11}\text{C}$	2.76		
Carbon	C	$^{12}\text{C}(p, n)^{12}\text{N}$	18.12	11 ms	
Nitrogen	N	$^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$	2.88	20.4 min	
Oxygen	O	$^{16}\text{O}(\alpha, d)^{18}\text{F}$	35	109.8 min	
Sodium	Na	$^{23}\text{Na}(\alpha, n)^{26m}\text{Al}$	4.62	6.7 s	β^+, γ (0.511)
Aluminum	Al	$^{27}\text{Al}(\alpha, n)^{30}\text{P}$	3.38	2.55 min	β^+, γ (0.511)
Copper	Cu	$^{63}\text{Cu}(\alpha, n)^{66}\text{Ga}$	7.69	9.45 h	
Phosphorus	P	$^{31}\text{P}(d, p)^{32}\text{P}$	-	14.3 d	β^- ($E_{\text{max}} = 1.17$)
Iron	Fe	$^{54}\text{Fe}(d, n)^{55}\text{Co}$	-	18.2 h	β^+, γ (0.511, 0.93)

ที่มา : MEASUREMENT AND DETECTION OF RADIATION (Second Edition) P.526

ตารางที่ 2.15 ปฏิกิริยาโฟโตนิวเคลียร์ [14,527]

Element	Symbol	Reaction	Threshold energy (MeV)	Half-life of product	Main radiation emitted and its energy (MeV)
Carbon	C	$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{N}$	18.7	20.4 min	β^+, γ (0.511)
Fluorine	F	$^{19}\text{F}(\gamma, n)^{18}\text{F}$	10.5	109.8 min	β^+, γ (0.511)
Nitrogen	N	$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$	10.5	10 min	β^+, γ (0.511)
Oxygen	O	$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$	15.7	2.03 min	β^+, γ (0.511)
Copper	Cu	$^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$	10.8	9.7 min	β^+, γ (0.511)
		$^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$	9.9	12.8 h	β^+, γ (0.511)
Silver	Ag	$^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$	9.4	24 min	β^+, γ (0.511)
Sodium	Na	$^{23}\text{Na}(\gamma, n)^{22}\text{Na}$	12.4	2.62 y	γ (0.511)
Lead	Pb	$^{204}\text{Pb}(\gamma, n)^{203}\text{Pb}$	8.4	52.1 h	γ (0.279)

ที่มา : MEASUREMENT AND DETECTION OF RADIATION (Second Edition) P.527

2.5.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับอาบรังสี

สารตัวอย่างควรได้รับการเตรียมอย่างเหมาะสม และบรรจุในภาชนะก่อนที่จะอาบรังสี และบุคคลที่เตรียมสารตัวอย่างจะต้องระมัดระวังอย่างสูงที่จะไม่ทำให้เกิดการเจือปนเกิดขึ้น วิธีการก่อกัมมันภาพนั้นมีความไวสูงมากในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุน้อยๆ ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการเคมี ถ้าสารตัวอย่างถูกวางไว้บนโต๊ะในช่วงเวลาหนึ่งแล้วจะทำให้มีฝุ่นเกาะอันจะทำให้มีสิ่งแปลกปลอมหรือแม้แต่การใช้มือไปสัมผัสสารตัวอย่าง ก็จะเป็นสาเหตุให้เกลือจากฝ่ามือปะปนกับสารตัวอย่างเมื่ออาบรังสีไปแล้ว จะแสดงให้เห็นการคงอยู่ของโซเดียมและคลอรีน ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งแปลกปลอม ควรเตรียมตัวอย่างในกล่องที่แห้งและสะอาด และบุคคลที่เตรียมตัวอย่างควรที่จะใส่ถุงมือพลาสติกที่สะอาดรวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้เตรียมสารตัวอย่าง เช่น มีด ปากคีบ ฯลฯ จะต้องสะอาดด้วย

ตัวอย่างที่เป็นของแข็งควรทำความสะอาดผิวด้วยของเหลวที่เหมาะสม เพื่อให้สิ่งที่เจือปนหลุดออก หลังจากนั้นให้ทำการชั่งน้ำหนักและเพื่อให้เกิดความแม่นยำสูงสุด ควรทำการชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างอย่างอีกหนึ่งครั้งหลังจากการอาบรังสีและวัดรังสีเรียบร้อยแล้ว

สำหรับตัวอย่างของเหลวหรือน้ำที่ไม่สามารถทำความสะอาดได้ ดังนั้นควรเตรียมภายในภาชนะบรรจุที่สะอาดเพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งแปลกปลอมจากผนังของภาชนะบรรจุ สำหรับตัวอย่างที่เป็นของเหลวต้องระมัดระวังการสูญเสียตัวอย่างเมื่อมีการเทของเหลวเข้าและออกจากภาชนะในตัวอย่างที่เป็นผงนั้นจะต้องทำการคลุกเคล้าสารตัวอย่างจนเป็นเนื้อเดียวกัน

2.5.3 วัสดุที่หุ้มหรือภาชนะบรรจุ

วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นโพลีเอทิลีน ซิลิกา และแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งโพลีเอทิลีนไม่สามารถทนต่อรังสีและความร้อน ทำให้แตกหักได้ง่ายเมื่อได้รับขนาด $10^{21} - 10^{22}$ นิวตรอน/ม² หลอดโพลีเอทิลีนจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหลายๆขนาด เพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองภายในห้องปฏิบัติการ และยังทำความสะอาดได้ง่ายและมีฝาปิดหลอดที่มิดชิด ภาชนะที่ทำด้วยซิลิกานั้นไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้เท่ากับหลอดโพลีเอทิลีนเพราะว่าไม่ค่อยบริสุทธิ์จึงกลายเป็นสารกัมมันตรังสีและปิดให้มิดชิดลำบาก สำหรับแผ่นอะลูมิเนียมจะมีประโยชน์สำหรับห่อหุ้มของแข็ง แต่ก็จะเป็นสารกัมมันตรังสีโดยปฏิกิริยา $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$ และ $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ ปฏิกิริยาหลังจะก่อปัญหาให้มากกว่า เนื่อง ^{24}Na มีครึ่งชีวิต 15 ชั่วโมง ในขณะที่ ^{28}Al มีครึ่งชีวิตเพียง 2.3 นาที

2.5.4 การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตรังสี^[14]

การวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตรังสีสามารถแบ่งการนำมาใช้ประโยชน์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน (Instrumental Neutron Activation Analysis, INAA)

การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุ และปริมาณธาตุ ในตัวอย่าง โดยการทำให้ไอโซโทปเสถียร กลายเป็นไอโซโทปรังสี ซึ่งจะสลายตัวกลับเป็น ไอโซโทปเสถียร โดยการปลดปล่อยรังสีที่มีพลังงานจำเพาะของแต่ละไอโซโทปออกมา

ตัวอย่างที่อาบนิวตรอน (neutron irradiation) จะทำให้นิวเคลียสของธาตุในตัวอย่าง ดูดกลืนนิวตรอน แล้วกลายเป็นสารกัมมันตรังสี เรียกว่า นิวไคลด์รังสี (radionuclide) หรือ ไอโซโทปรังสี (radioisotope) ซึ่งมีการสลายตัว โดยปลดปล่อยรังสีแอลฟา รังสีบีตา หรือ รังสีแกมมา ที่มีพลังงานของรังสี และครึ่งชีวิตของไอโซโทปที่เป็นค่าจำเพาะ

ซึ่ง INAA เป็นการวิเคราะห์โดยอาศัยข้อมูลพื้นฐาน นิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นภายในแกน เครื่องปฏิกรณ์ , ภาควัดกลางของสารตัวอย่าง , ไอโซโทป และปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง เพื่อหา ปริมาณของสารไอโซโทปหลังจากการอาบรังสี

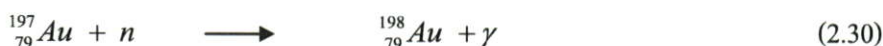
2.การวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ (Flux Measurement Experiment)

การวัดนิวตรอนฟลักซ์ สามารถทำการวัดได้ 2 วิธีด้วยกันคือ

1. ใช้หัววัดนิวตรอนหย่อนลงไปวัด ณ ตำแหน่งที่ต้องการทราบค่านิวตรอนฟลักซ์ ซึ่งวิธีนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากบางครั้งไม่สามารถวัดค่าในบริเวณที่ต้องการทราบค่าฟลักซ์ได้

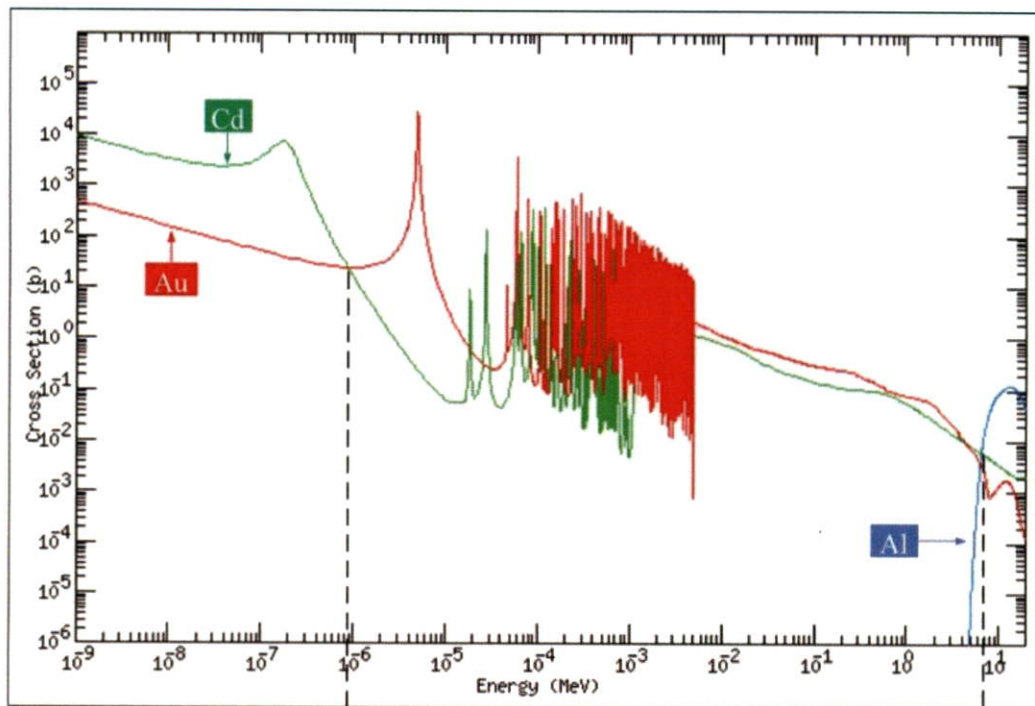
2. Foil Activation Techniques วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ หลักการก็คือการเลือกใช้สาร ที่เหมาะสม นำไปอาบนิวตรอน ณ ตำแหน่งที่ต้องการทราบค่านิวตรอนฟลักซ์ แล้วนำสารตรวจวัด นี้มาวัดรังสี ทำให้ทราบค่ากัมมันตภาพรังสี และจะสามารถนำไปคำนวณหาค่านิวตรอนฟลักซ์ได้

สารตรวจวัดที่เลือกใช้ ควรเป็นสารบริสุทธิ์ที่มีขนาดบาง มีค่า Cross section ค่อนข้างสูง และมีค่าครึ่งชีวิตที่ไม่ยาวเกินไป เพราะจะทำให้ต้องอาบนิวตรอนเป็นเวลานาน การทดลองครั้งนี้ จะใช้แผ่นทองเป็นตัวตรวจวัด Thermal Neutron Flux และ Epithermal Neutron Flux โดยดูจากรูป ที่ 2.48 และ 2.49 จะเห็นว่า Au และ Al มีช่วง cross section ที่เหมาะสมกับการวัดนิวตรอนฟลักซ์ ตามปฏิกิริยา $^{197}\text{Au} (n, \gamma) ^{198}\text{Au}$ ดังสมการ



เมื่อนำแผ่นทองไปอาบนิวตรอน กัมมันตภาพรังสีส่วนใหญ่จะเกิดเนื่องจากเทอร์มัล นิวตรอน และอีพิเทอร์มัลนิวตรอน ดังนั้นเพื่อเป็นการแยกกัมมันตภาพรังสีที่เกิดเนื่องจากเทอร์มัล นิวตรอนออกจาก กัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากอีพิเทอร์มัลนิวตรอนจำเป็นต้องใช้แคดเมียม (Cd) ที่มี cut off อยู่ที่ประมาณ 0.4 eV เป็นตัวแยก

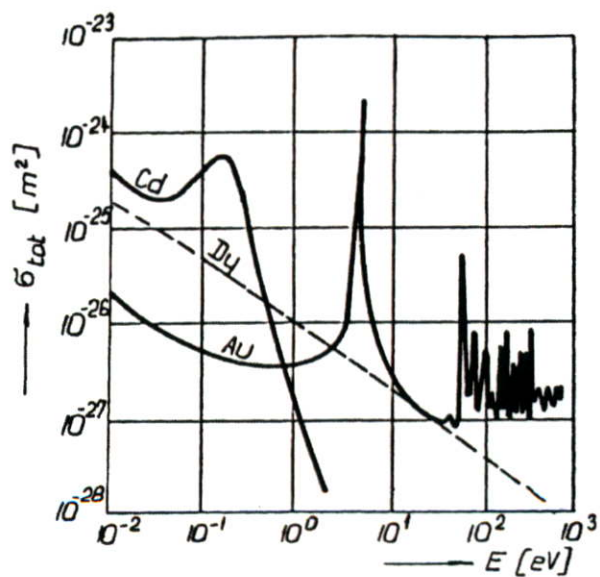
ส่วนการวัด นิวตรอนเร็วฟลักซ์จะต้องใช้แผ่นอะลูมิเนียม (Al) เป็นตัวตรวจวัด เมื่อนำแผ่น อะลูมิเนียมไปอาบนิวตรอน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากเทอร์มัลนิวตรอน คือ $^{27}\text{Al} (n, \gamma) ^{28}\text{Al}$ ในการวัด นิวตรอนเร็วฟลักซ์จะสนใจเฉพาะปฏิกิริยาที่เกิดจากนิวตรอนเร็ว และจะใช้ปฏิกิริยา $^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na}$ เป็นตัวตรวจวัด



Cutoff Energy ~ 0.4 eV

Cutoff Energy ~ 2 MeV

รูปที่ 2.48 แสดงความสัมพันธ์ของ Cross Section ของ อะลูมิเนียม และแคดเมียม กับช่วงพลังงานของนิวตรอน



รูปที่ 2.49 Microscopic Cross Section ของทอง(Au) และแคดเมียม(Cd) ต่อค่าพลังงาน

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยวิธี Foil Activation จะมีความเกี่ยวเนื่องกับค่ากัมมันตภาพรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากสารหรือวัสดุที่นำไปอาบนิวตรอน ตามสมการ

$$A = \lambda N \quad (2.31)$$

โดยที่ A ความแรงรังสี หน่วย แบคเคอเรล(Bq)
 λ ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant)
 N จำนวนอะตอมของวัสดุที่ใช้อาบนิวตรอน

การวัดนิวตรอนฟลักซ์จึงวัดได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงจำนวนอะตอมของสารหรือวัสดุที่นำไปอาบนิวตรอน

อัตราการเปลี่ยนแปลงจำนวนอะตอม = อัตราการเกิดใหม่ของอะตอม - อัตราการสูญเสียจำนวนอะตอม

ซึ่งก็คือ การเปลี่ยนจำนวนอะตอมที่เกิดจากการสลายตัว จะเท่ากับ นิวตรอนที่ดูดกลืนไว้ในสารตั้งต้น ลบด้วยจำนวนอะตอมที่สลายตัวออกจากสารใหม่ ดังสมการ

$$\frac{dN^{198}}{dt} = \phi \sigma N_0^{Au-197} - \lambda N^{Au-198} \quad (2.32)$$

โดยที่ σ คือ ค่า Cross section และ ϕ คือ นิวตรอนฟลักซ์
 จากสมการที่ (2.31) จึงได้ว่า

$$N = \frac{N_0 \phi \sigma}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}] \quad (2.33)$$

เมื่อ tr ระยะเวลาที่ใช้ในการอาบนิวตรอน

ดังนั้นค่า กัมมันตภาพรังสี ที่ได้หลังจากการอาบนิวตรอนแล้วจึงได้ดังนี้

$$A_{tr} = N_0 \phi \sigma [1 - e^{-\lambda t}] \quad (2.34)$$

เมื่อ A_{tr} ค่ากัมมันตภาพรังสีหลังการอาบรังสีเสร็จแล้ว
 หน่วยเป็น การสลายตัวต่อวินาที (dps)

N_0 จำนวนอะตอมของสารที่นำมาอาบนิวตรอน

σ ค่า Microscopic Cross Section หน่วยเป็น cm^2

ϕ นิวตรอนฟลักซ์ หน่วยเป็น นิวตรอนต่อ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$

λ ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant)

tr ระยะเวลาที่ใช้ในการอาบนิวตรอน

จากสูตรการหาค่า กัมมันตภาพรังสี

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.35)$$

จึงได้ว่า

$$A_{td} = A_{tr} e^{-\lambda t} \quad (2.36)$$

เมื่อ A_{td} ค่ากัมมันตภาพรังสีที่วัดได้หลังปล่อยทิ้งไว้ให้อะตอมสลายตัว
 td ระยะเวลาที่ปล่อยทิ้งไว้ให้อะตอมสลายตัวไป

ดังนั้นเมื่อรวมสมการ ที่ (2.33), (2.34) และ (2.35) เข้าด้วยกันจึงได้สมการเป็นดังนี้

$$A_{td} = N_0 \phi \sigma [1 - e^{-\lambda t}] e^{-\lambda t} \quad (2.37)$$

โดยที่ $\phi \sigma$ เป็นค่าฟลักซ์ และ Cross section ซึ่งคิดเฉพาะช่วงที่เป็นเทอร์มัลนิวตรอน และอีพิเทอร์มัลนิวตรอนเท่านั้น โดยปกติค่า $\phi \sigma$ ที่ได้จะมาจากทุกช่วงพลังงาน แต่เนื่องจากค่า Cross section ของช่วงนิวตรอนเร็วมีค่าต่ำเพราะฉะนั้นจึงไม่นำมาคิด ดังสมการ

$$\phi \sigma = \phi_{th} \sigma_{th} + \phi_{epi} I \quad (2.38)$$

เมื่อ I ค่า Cross section ของช่วง Epithermal เรียกว่า Resonance Integral
 ดังนั้นจะได้สมการของค่า กัมมันตภาพรังสีรวมทั้งหมดเป็น ดังสมการ

$$A_{td(total)} = N_{Au} [\phi_{th} \sigma_{th} + \phi_{epi} I] [1 - e^{-\lambda t}] e^{-\lambda t} \quad (2.39)$$

เมื่อนำแผ่นทองหุ้มด้วยแคดเมียม กัมมันตภาพรังสีจะเกิดเนื่องจากอีพิเทอร์มัลนิวตรอน เป็นส่วนใหญ่ จึงสามารถเขียนสมการใหม่แยกออกมาจากสมการ (2.36) ได้

ดังสมการ

$$A_{td(epi)} = N_{Au} \phi_{epi} I [1 - e^{-\lambda t}] e^{-\lambda t} \quad (2.40)$$

ซึ่งในความเป็นจริงเมื่อใช้แผ่นทองที่มีความหนา จะทำให้ได้ค่าฟลักซ์น้อยกว่าความเป็นจริง เนื่องจากเกิดการดูดกลืนนิวตรอนโดยแผ่นทอง ที่เรียกว่า เกิด Self Shielding ค่าความหนานั้น จะทำให้ค่าอีพิเทอร์มัลฟลักซ์ผิดพลาด จึงจำเป็นต้องมีค่าแก้ไขเพื่อให้ได้ค่าอีพิเทอร์มัลฟลักซ์ (Gr) ที่ถูกต้อง

ดังนั้นค่า I ในสมการที่ (2.37) จะใช้เป็นค่า Effective Resonance Integral (I_{eff}) ดังสมการ

$$I_{eff} = Gr * I \quad (2.41)$$

เมื่อ Gr Self Shielding Factor ; $0 < Gr < 1$

I Resonance Integral

สำหรับนิวตรอนเร็วฟลักซ์เมื่อนำแผ่นอะลูมิเนียมไปอบรังสีแล้ว ต้องทำการทิ้งไว้เพื่อให้ปฏิกิริยา $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$ สลายตัวหมดไป และจะสามารถหานิวตรอนเร็วฟลักซ์ได้จากปฏิกิริยา

$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ ดังสมการ

$$A_{td(fast)} = N_0 \phi_f \sigma_f [1 - e^{-\lambda t}] e^{-\lambda t} \quad (2.42)$$

เมื่อ σ_f ค่า microscopic activation cross section ของปฏิกิริยา $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$

การคำนวณค่านิวตรอนฟลักซ์ นั้นจะกระทำหลังจากที่นำสารตรวจวัด ซึ่งได้แก่แผ่นทอง สำหรับการหาเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ และอีพิเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ส่วนแผ่นอะลูมิเนียม สำหรับการหานิวตรอนเร็วฟลักซ์ ไปอบนิวตรอนแล้วนำไปทำการวัดรังสี ทำให้ทราบอัตราการ

นับวัดรังสี และจากข้อมูลนี้ทำให้สามารถคำนวณหาเทอร์มัล อีพิเทอร์มัลและฟาสต์นิวตรอนฟลักซ์ได้จาก

$$A_{(dps)} = \frac{cps}{Eff * f} \quad (2.43)$$

เมื่อ $A_{(dps)}$ กัมมันตภาพรังสี หน่วย สลายตัวต่อวินาที (dps)
 Eff ประสิทธิภาพของเครื่องวัดสเปกโตมิเตอร์
 cps จำนวนนับต่อวินาที
 f decay fraction ของแกมมาพลังงานที่วัด

การคำนวณค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ (ϕ_{th}) นำสมการที่ (2.38) และ (2.39) มาเขียนใหม่เพื่อให้ได้สมการที่สมบูรณ์ เป็นดังนี้

$$\phi_{th} \sigma_{th} + \phi_{epi} = \frac{A_{(bare)}}{N_{Au1} [1 - e^{-\lambda_{r1}}] e^{-\lambda_{d1}}} \quad (2.44)$$

$$\phi_{epi} I = \frac{A_{(Cd)}}{N_{Au2} [1 - e^{-\lambda_{r2}}] e^{-\lambda_{d2}}} \quad (2.45)$$

นำสมการที่ (2.44) ลบออกจากสมการที่ (2.43) จะได้ดังนี้

$$\phi_{th} = \frac{1}{\sigma_{th}} \left[\frac{A_{(bare)}}{N_{Au1} (1 - e^{-\lambda_{r1}}) e^{-\lambda_{d1}}} - \frac{A_{(Cd)}}{N_{Au2} (1 - e^{-\lambda_{r2}}) e^{-\lambda_{d2}}} \right] \quad (2.46)$$

แทนค่าสมการที่ (2.42) ลงในสมการ (2.45) ได้สมการเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ (ϕ_{th}) ที่สมบูรณ์ ดังสมการ

$$\phi_{th} = \frac{1}{Eff * f * \sigma_{th}} \left[\frac{CPS_{(bare)}}{N_{Au1} (1 - e^{-\lambda_{r1}}) e^{-\lambda_{d1}}} - \frac{CPS_{(Cd)}}{N_{Au2} (1 - e^{-\lambda_{r2}}) e^{-\lambda_{d2}}} \right] \quad (2.47)$$

การคำนวณค่าอีพิเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ (ϕ_{epi}) จากสมการที่ (2.39) เขียนใหม่ได้ดังสมการ

$$\phi_{epi} = \frac{A_{(Cd)}}{N_{Au2} I [1 - e^{-\lambda_{r2}}] e^{-\lambda_{d2}}} \quad (2.48)$$

$$= \frac{CPS_{(Cd)}}{Eff * f * N_{Au2} I (1 - e^{-\lambda_{r2}}) e^{-\lambda_{d2}}} \quad (2.49)$$

การคำนวณค่า นิวตรอนเร็วฟลักซ์ (ϕ_f) จากสมการที่ (2.41) เขียนใหม่ได้ดังสมการ

$$\phi_f = \frac{CPS}{Eff * f * N_{Al} \sigma_f (1 - e^{-\lambda_r}) e^{-\lambda_d}} \quad (2.50)$$

3.การผลิตสารไอโซโทปเพื่อใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม และทางการแพทย์

โดยนำสารตั้งต้นมาอาบนิวตรอน ตัวอย่าง เช่น ไมโครสเฟียร์อิตเทรียม-90 (yttrium-90 microspheres) ที่ใช้ในการบำบัดรักษามะเร็งตับก็ผลิตมาจากการนำเอา yttrium-89 มาอาบนิวตรอน ไอโซโทปรังสีอีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้ประโยชน์อยู่ อย่างกว้างขวางในเวชศาสตร์นิวเคลียร์ก็คือ เทคนีเชียม-99 (technetium-99) ซึ่งเกิดจากการสลายกัมมันตรังสีของ โมลิบดีนัม-99 (molybdenum-99) ซึ่งเป็นผลผลิตการแบ่งแยกนิวเคลียส (fission products) สามารถผลิตโดยใช้โลหะแผ่นบาง ยูเรเนียม-235 (U-235 foil) มาอาบนิวตรอนแล้วนำมาแยกเอา molybdenum-99 ออกจากผลผลิตการแบ่งแยกนิวเคลียสอื่น ๆ ในฮอตเซลล์ (hot cell) ซึ่งเป็นตู้ระบบผลิตสารไอโซโทปรังสี

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยก็สามารถนำมาใช้ในกระบวนการของอุตสาหกรรมได้ เช่น การใช้วิธีการยิงเพื่อให้เกิดการแปรธาตุด้วยนิวตรอน (neutron transmutation doping) มาทำให้ผลึกซิลิกอน มีสภาพการนำไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อนำมาใช้เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ทางอิเล็กทรอนิกส์ ในเครื่องปรมาณูนิวเคลียร์ที่ใช้ในการทดสอบวัสดุต่าง ๆ ก็ใช้วัสดุที่จะทดสอบมาอาบนิวตรอนเพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เช่น โลหะบางชนิดจะเกิดการเปราะแตกง่ายหรือไม่ หรือพวกโลหะผสมต่าง ๆ ที่ทนต่อการแตกหักง่ายเพื่อศึกษานำมาใช้เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูกำลัง เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยต้องอยู่ภายใต้การควบคุมของทบวงการนิเวศวิทยาระหว่างประเทศ (IAEA) โดยมีการตรวจสอบความปลอดภัย (safety inspections) และพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ (safeguards) ทั้งนี้เพราะเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยมีศักยภาพพอที่จะพัฒนาไปทำอาวุธนิวเคลียร์ได้ การทดลองระเบิดนิวเคลียร์ของอินเดียในปี 1974 ก็เป็นผลมาจากการใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยขนาดใหญ่ ๆ ในการผลิตพลูโทเนียม โดยที่ไม่ได้มีการควบคุมจากนานาชาติ

โดยในการผลิตสารไอโซโทปจำเป็นต้องมีข้อมูลพื้นฐาน จำนวนของธาตุที่ต้องการอาบรังสี , ภาควัดค่างของสาร , ไอโซโทปของสาร และจำนวนของนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อให้ปฏิกิริยาของไอโซโทปที่เหมาะสมกับการใช้งาน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้จะมีวิธีการดำเนินงานเป็นไปตามขั้นตอนคือ การศึกษาการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการวัดนิวตรอนฟลักซ์ วิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดยการประมวลผลการวิเคราะห์ ก่อกัมมันต์ด้วยแบบจำลอง MCNPX วิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดย Gold foil activation ดังมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการวัดนิวตรอนฟลักซ์

ขั้นตอนที่ 2 วิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดยการประมวลผลการวิเคราะห์ก่อกัมมันต์ด้วยแบบจำลอง MCNPX

ขั้นตอนที่ 3 วิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดย Gold foil activation

3.1 การศึกษาการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการวัดนิวตรอนฟลักซ์

ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปว.-1/1 มีท่ออาบรังสีภายในแกน จำนวน 10 ท่อ ซึ่งในแต่ละท่อมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนไม่เท่ากัน ซึ่งท่ออาบรังสีที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้สนใจท่ออาบรังสีซิติ ในตำแหน่ง A1 ถูกจัด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของแกนเครื่องปฏิกรณ์ ท่ออาบรังสีซิติที่ถูกใช้ในงานอาบรังสีทางการแพทย์ เพิ่มมูลค่าอัญมณี และใช้ในการศึกษาวิจัย เมื่อวัดระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดนิวตรอนถึงจุดศูนย์กลางของท่ออาบรังสีซิติได้ประมาณ 0.2243 เมตร ทำมุม 28 องศา เมื่อเทียบกับแกน x

เมื่อคำนวณหาความเร็วของนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนถึงท่ออาบรังสีนิวตรอน โดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับพลังงาน ซึ่งในแต่ละระดับพลังงานจะสามารถคำนวณค่าความเร็วของนิวตรอนจากสมการพลังงานจลน์ได้ดังนี้

1. เทอร์มัลนิวตรอน มีค่าพลังงานเฉลี่ย 0.025 eV

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

เมื่อ E_k พลังงานจลน์ในหน่วยจูล (J)

v ความเร็วในหน่วย m/s

m มวลของนิวตรอน kg

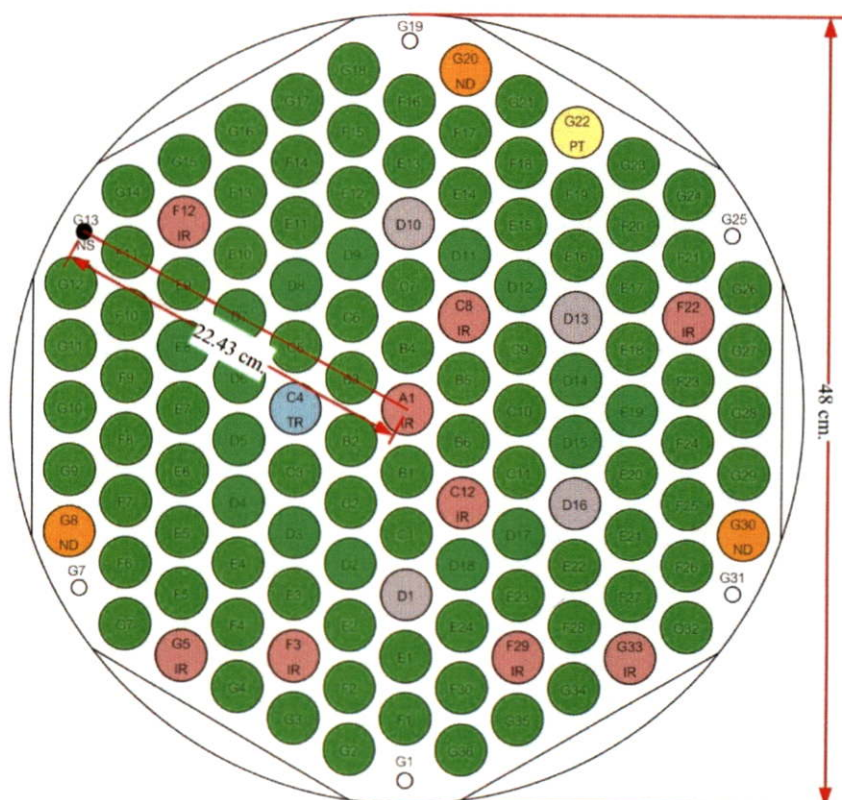
จะคำนวณหาค่าความเร็วของนิวตรอนได้คือ

$$v^2 = \frac{2E_k}{m} \quad (3.2)$$

แทนค่า $E_{k(J)} = E_{(eV)} \times 1.6021 \times 10^{-19} (J / eV)$ ในสมการ (3.2)

$$\begin{aligned}
 v^2 &= \frac{2 \times E_{(eV)} \times 1.6021 \times 10^{-19} (J/ev)}{m} \\
 &= \frac{2 \times 0.025 eV \times 1.6021 \times 10^{-19} (J/ev)}{1.67 \times 10^{-27} kg} \\
 &= 4796706.587 m/s \\
 v &= 2190.1385 m/s = 2.19 \times 10^3 m/s = 2.19 km/s
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

ดังนั้นความเร็วของเทอร์มินัลนิวตรอน = 2.19 km/s



รูปที่ 3.1 วัดระยะห่างระหว่างท่ออาร์รังสีซีที (A1) กับแหล่งกำเนิดนิวตรอน (G13)

2. อิพิลเทอร์มินัลนิวตรอน มีค่าพลังงานเฉลี่ย 0.025 – 100 eV

แทนค่า $E_{k(J)}$ ของอิพิลเทอร์มินัลนิวตรอนในสมการ (3.3)

$$v^2 = \frac{2 \times 100 eV \times 1.6021 \times 10^{-19} (J/ev)}{1.67 \times 10^{-27} kg}$$

$$= 1.9187 \times 10^{10} m/s$$

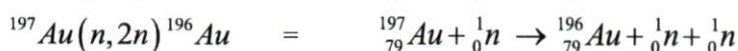
$$v = 138517.147 m/s = 1.39 \times 10^5 m/s = 1.39 \times 10^2 km/s$$

ดังนั้นความเร็วของอิพิลเทอร์มินัลอยู่ในช่วงระหว่าง 2.19 – 1.39 x 10² km/s

3. นิวตรอนเร็ว มีค่าพลังงานเฉลี่ย < 100 eV และมีความเร็วที่ < 1.39 x 10² km/s

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาที่กัมมันต์ด้วยนิวตรอนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์นิวตรอนฟลักซ์ด้วยแผ่นทอง จะพบว่าวัสดุที่ใช้ในการอบรังสีมีทั้งหมด 3 ชนิด คือ แผ่นทอง (Au) แคดเมียม (Cd) และแผ่นอะลูมิเนียม (Al) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการปฏิกิริยาที่กัมมันต์ด้วยนิวตรอนได้ดังนี้

แผ่นทอง (Au)



แคดเมียม



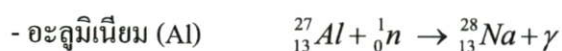
แผ่นอะลูมิเนียม



พิจารณาปฏิกิริยานิวตรอนที่เกิดขึ้นกับวัสดุทั้งสามชนิดมีปฏิกิริยาที่สนใจสามปฏิกิริยาดังนี้



เป็นปฏิกิริยาเทอร์มัลนิวตรอนที่มักเกิดกับนิวตรอนที่ค่าพลังงานไม่สูงมากนัก และมีการสลายตัวทางรังสี 2.7 วัน ทำให้เหมาะสมในการนำมาใช้วัดเทอร์มัลนิวตรอน และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นปลดปล่อยรังสีแกมมาทำให้สามารถวิเคราะห์ทางรังสีด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ที่ค่าพลังงาน 412 keV



ใช้วัดนิวตรอนเร็ว ดังรูปที่ 2.48 และมีการสลายตัวทางรังสี 15 ชั่วโมง ทำให้สะดวกในการนับวัดทางรังสี นอกจากนี้ปฏิกิริยาของอะลูมิเนียมมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาทำให้สามารถวิเคราะห์ทางรังสีด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ที่ค่าพลังงาน 1,396 keV



มีคุณสมบัติการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอน เมื่อนำไปหุ้มแผ่นทองคำ จะทำให้แผ่นทองสามารถวัดค่าอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนได้ มีการสลายตัวทางรังสี 48.6 นาที

3.1.1 ความสัมพันธ์การตั้งแท่งควบคุมกับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ปว.-1/1

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นกับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ การเกิดจำนวนนิวตรอนฟลักซ์จะมีจำนวนมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแท่งควบคุมภายในเครื่องปฏิกรณ์

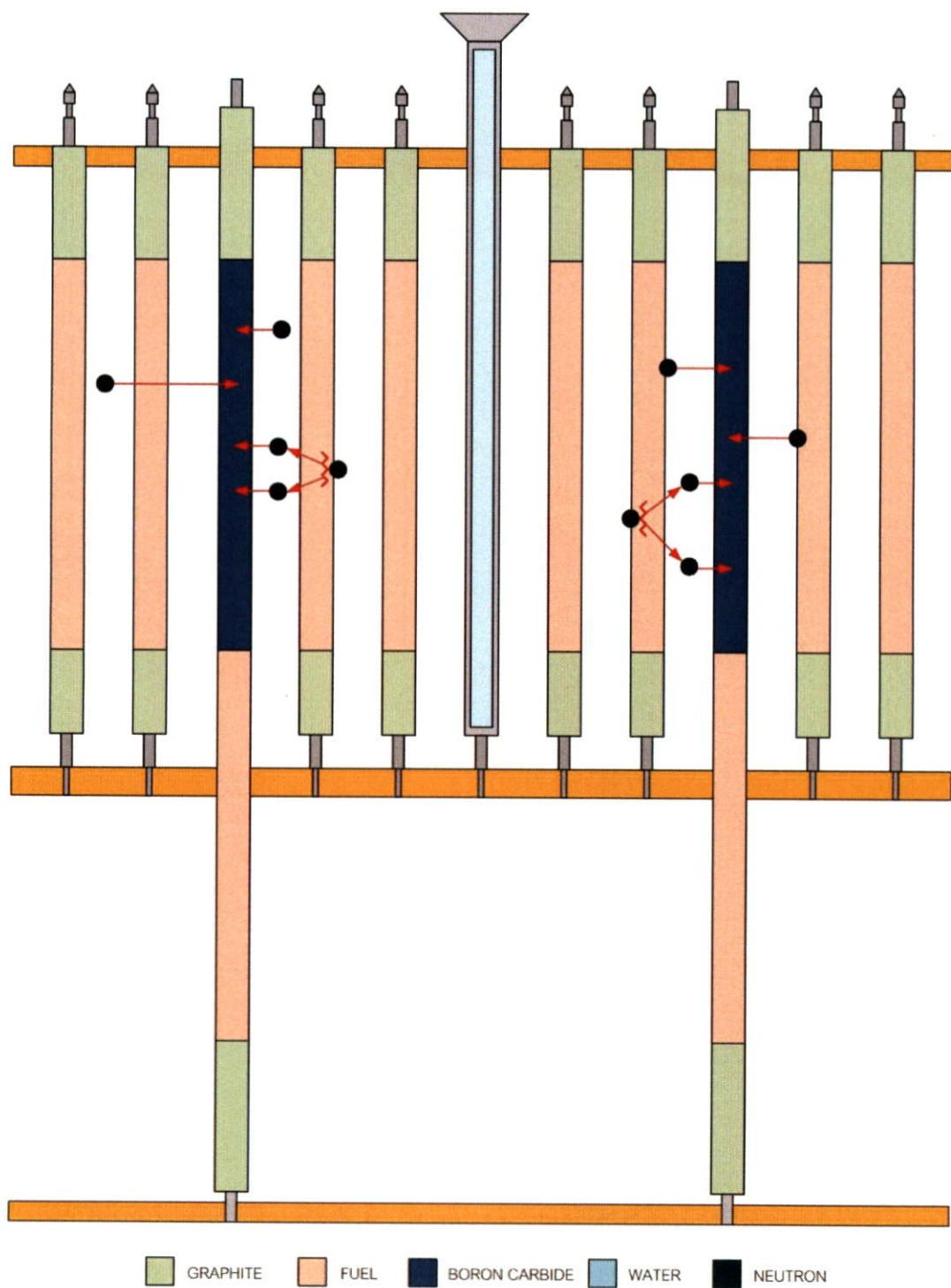
ค่าระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ปว.-1/1 ขณะเดินเครื่องได้มาจากการวัดจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นโดย หัววัดนิวตรอนที่อยู่ในตำแหน่ง G8, G20 และ G30 ของแกนเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะวัดนิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแกนเครื่องและแปลงค่าเป็นกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ในขณะนั้น ซึ่งการวัดกำลังของเครื่องจากหัววัดนิวตรอนจำเป็นต้องมีการปรับระดับความสูงของหัววัดตามระยะเวลาหรือหากมีการเปลี่ยนแปลงใดๆเกี่ยวกับแกนเครื่องเพื่อให้หัววัดอยู่ในจุดที่มีสมดุลกันทั้งสามหัววัด ซึ่งกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ขึ้นอยู่กับจำนวนนิวตรอนฟลักซ์

Neutron flux \approx Power Reactor

และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของจำนวนนิวตรอนฟลักซ์กับตำแหน่งของแท่งควบคุมได้ดังนี้

เมื่อเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะดับเครื่อง นิวตรอนที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนจะถูกดูดกลืนด้วยแท่งควบคุมซึ่งทำจากวัสดุโบรอนคาร์ไบด์ ทำให้นิวตรอนไม่สามารถวิ่งเข้าทำปฏิกิริยากับแท่งเชื้อเพลิงภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ได้มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อเนื่อง ดังรูปที่ 3.2 และกำลังของเครื่องที่ได้เป็นเข้าใกล้ค่า 0 MW

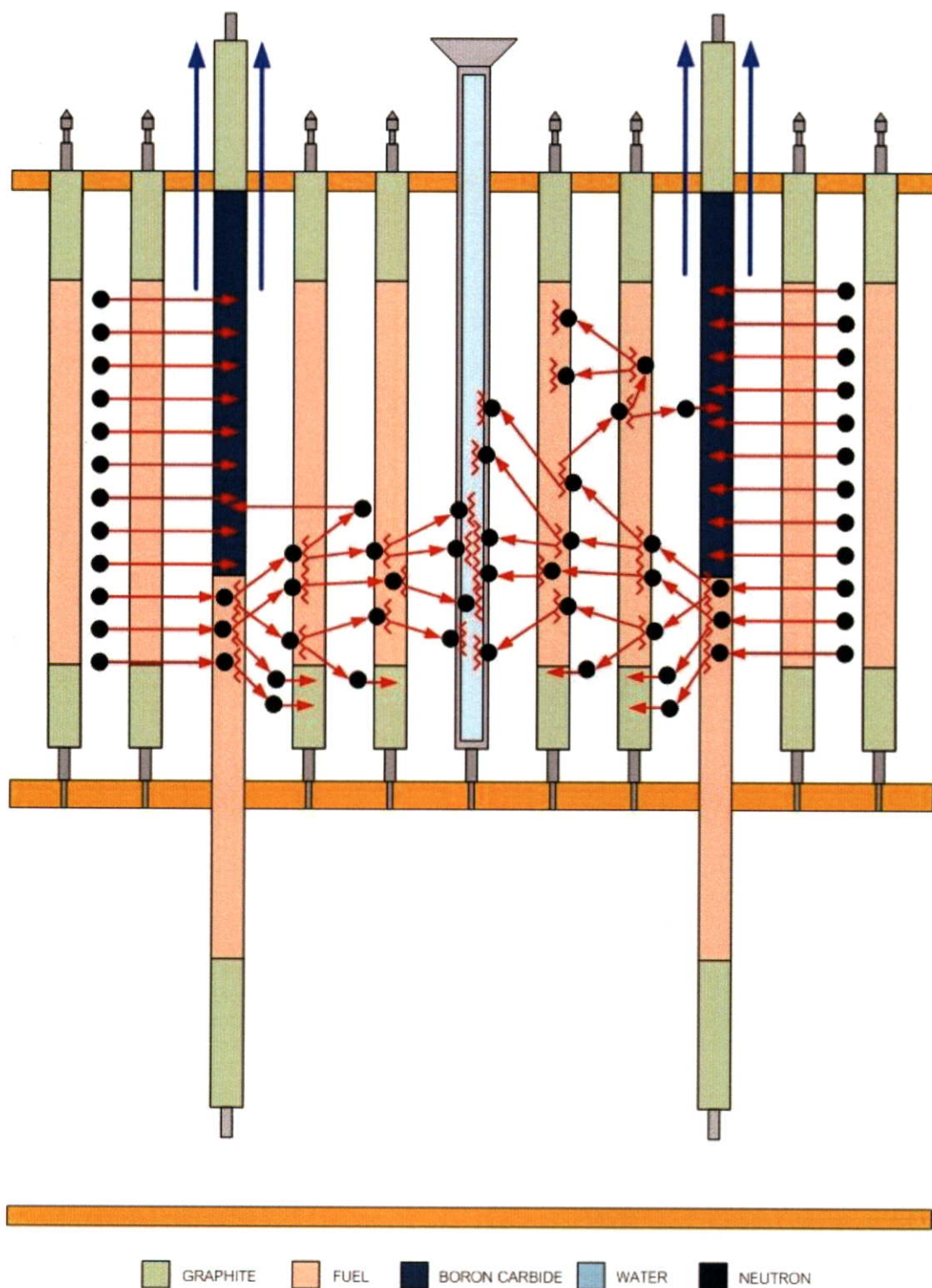
เมื่อเครื่องปฏิกรณ์เริ่มเดินเครื่อง เจ้าหน้าที่เริ่มดึงแท่งควบคุมทั้ง 5 แท่งขึ้นในระยะเท่ากันๆ ทำให้แท่งควบคุมในช่วงที่มีโบรอนคาร์ไบด์ถูกแทนที่ด้วยช่วงที่มีเนื้อเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 3.3 ทำให้วัสดุดูดจับนิวตรอนภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์มีน้อยลง นิวตรอนที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนจะเริ่มวิ่งเข้าทำปฏิกิริยากับแท่งเชื้อเพลิงได้มากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ภายในแกนเครื่องปลดปล่อยนิวตรอน และพลังงานจากปฏิกิริยาออกมาบางส่วน แต่ในช่วงเริ่มเดินเครื่องปฏิกรณ์แท่งควบคุมช่วงที่มีเนื้อเพลิงยังอยู่ในระดับที่สูงไม่มากนัก ทำให้นิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยายังไม่มาก เพราะนิวตรอนที่ปล่อยออกมาส่วนใหญ่ยังถูกดูดกลืนด้วยโบรอนคาร์ไบด์อยู่ส่งผลให้กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ในสภาวะเริ่มเดินเครื่องมีกำลังต่ำ



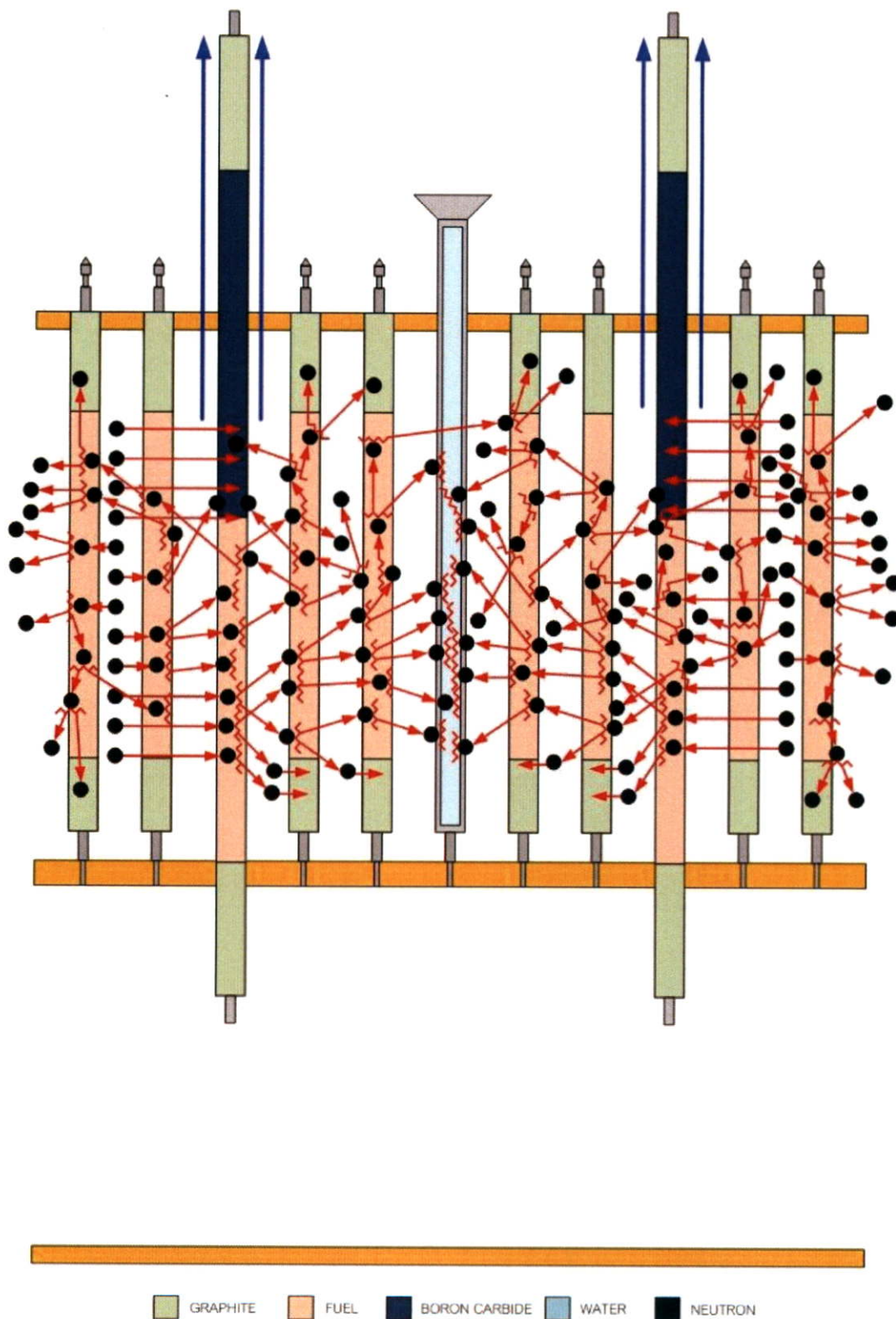
รูปที่ 3.2 นิวตรอนที่อยู่ในสภาวะดับเครื่องปฏิกรณ์

จากนั้นทำการดึงแท่งควบคุมเพิ่มขึ้นเพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะเดินปกติ ซึ่งนิวตรอนที่วิ่งเข้าทำปฏิกิริยากับแท่งเชื้อเพลิงจะมีจำนวนมากขึ้นทำให้นิวตรอนฟลักซ์ที่ได้จำนวนเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3.4 และคงที่อยู่ในสภาวะปกติ จำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นเท่ากับนิวตรอน

ฟลักซ์ที่ถูกดูดกลืนหรือหายออกจากไปแกนเครื่องปฏิกรณ์ กำลังของเครื่องที่ได้อยู่ที่ 1.2 MW เป็นระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ที่เดินตามปกติ



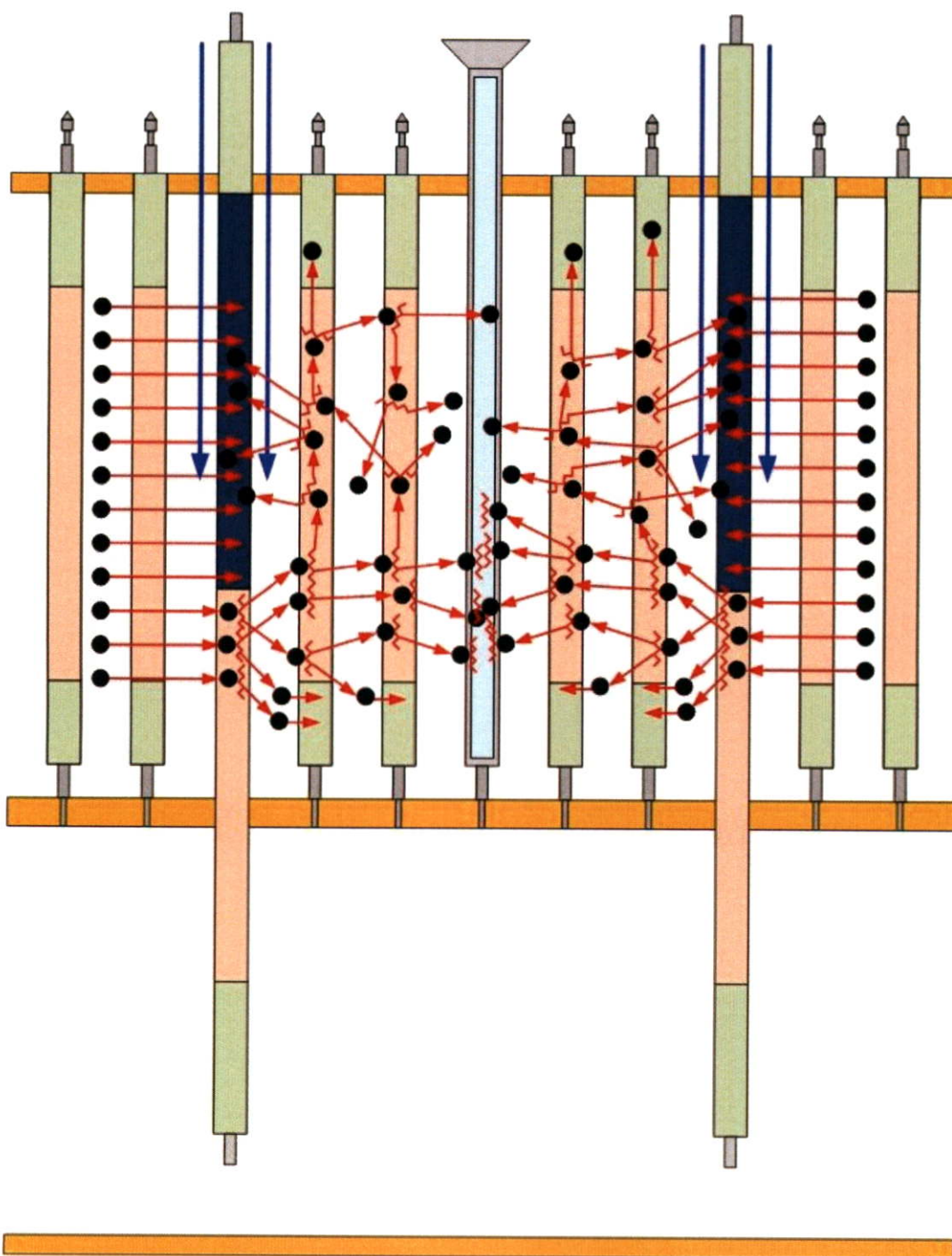
รูปที่ 3.3 นิวตรอนในสภาวะเริ่มเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.4 นิวตรอนในสถานะเดินเครื่องปกติ

เมื่อเดินเครื่องไประยะเวลาหนึ่งจนครบระยะเวลาของการเดินตามปกติจะเริ่มทำการลดระดับของแท่งควบคุมเพื่อลดปฏิกิริยาลูกโซ่ของนิวตรอน ดังรูปที่ 3.5 จนนิวตรอนฟลักซ์ถูก

ดูดกลืนด้วยโบรอนคาร์ไบด์จำนวนนิวตรอนฟลักซ์ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ลดลงจนไม่สามารถคงสถานะของปฏิกิริยาลูกโซ่ไว้ได้ และกำลังเครื่องลดลงเข้าใกล้ 0 MW เครื่องปฏิกรณ์เข้าสู่สภาวะหยุดการเดินเครื่องปฏิกรณ์ประจำวัน



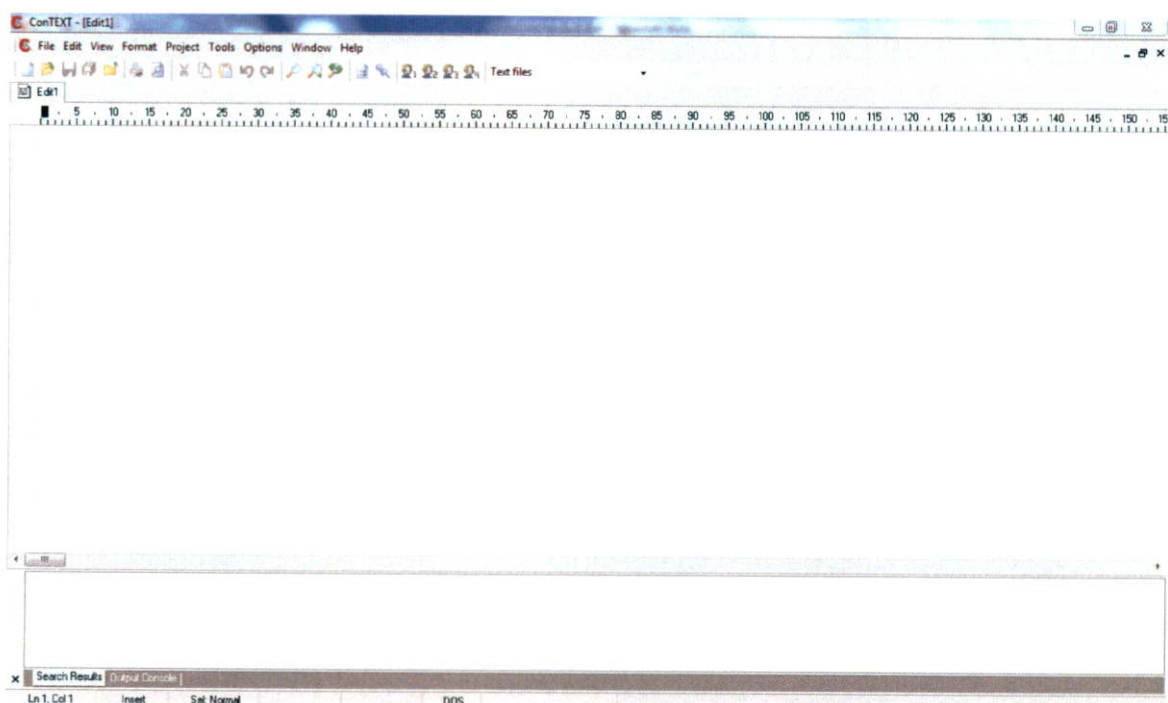
GRAPHITE FUEL BORON CARBIDE WATER NEUTRON

รูปที่ 3.5 นิวตรอนในสภาวะหยุดเดินเครื่องปฏิกรณ์

3.2 วิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดยการประมวลผลการวิเคราะห์ที่ก่อกัมมันต์ด้วย แบบจำลอง MCNPX

ในงานศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 โดยสนใจการอาบรังสีด้วยวิธีการก่อกัมมันต์ภายในท่ออาบรังสีที่ด้วยแผ่นทองซึ่งการประมวลผลการวิเคราะห์ที่ก่อกัมมันต์ด้วยแบบจำลอง MCNPX ซึ่งก่อนที่จะเริ่มต้นการสร้างแบบจำลองควรมีการติดตั้งโปรแกรมบางโปรแกรมเสียก่อน เพื่อรองรับการทำงาน และสามารถแสดงผลการจำลองออกมาเป็นรูปภาพ โดยโปรแกรมที่จำเป็นที่ใช้ร่วมกับโปรแกรมเอ็มซีเอ็นพี

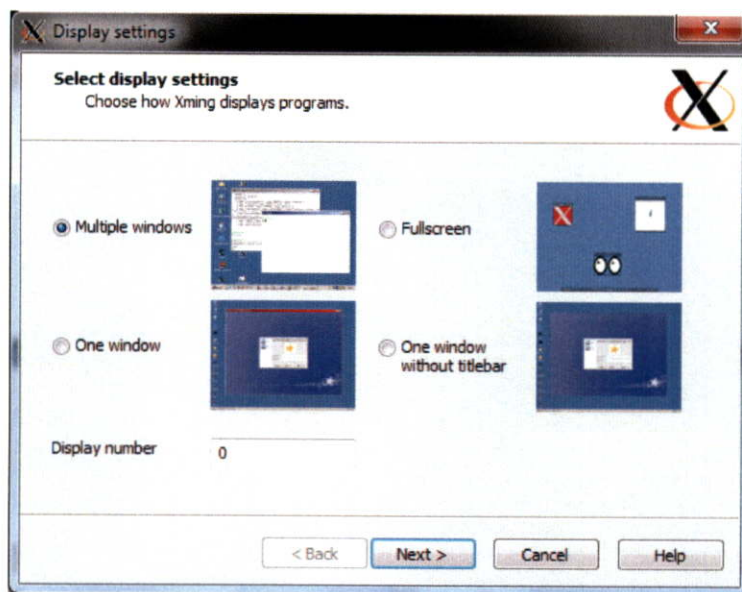
3.2.1 โปรแกรมที่เกี่ยวข้อง และการตั้งค่าคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลแบบจำลอง



รูปที่ 3.6 หน้าต่างโปรแกรม Context

1. Context เป็นโปรแกรม Freeware ใช้สำหรับเปิดไฟล์อินพุต และ Output ลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับโปรแกรม Notepad แต่ โปรแกรม Context มีการจัดเรียงบรรทัดที่เป็นระเบียบ ทำให้สะดวกในการเขียนโปรแกรม ลักษณะหน้าต่างโปรแกรม Context ดังรูปที่ 3.6

2. โปรแกรม XLaunch โดย Xming เป็นโปรแกรม Freeware ลักษณะการทำงานของโปรแกรมจะทำหน้าที่ควบคุมการแสดงผลต่างๆบนหน้าจอ โดยการเปิดหน้าต่างโปรแกรม XLaunch อยู่ภายในแฟ้ม Xming ดังรูปที่ 3.7 โดยกดปุ่ม Next 3 ครั้งไม่ต้องเซตค่าใดๆเพิ่ม และกดปุ่ม Finish สิ้นสุดการตั้งค่าหน้าจอ



รูปที่ 3.7 หน้าต่างโปรแกรม XLaunch เพื่อกำหนดการแสดงผลบนหน้าจอ

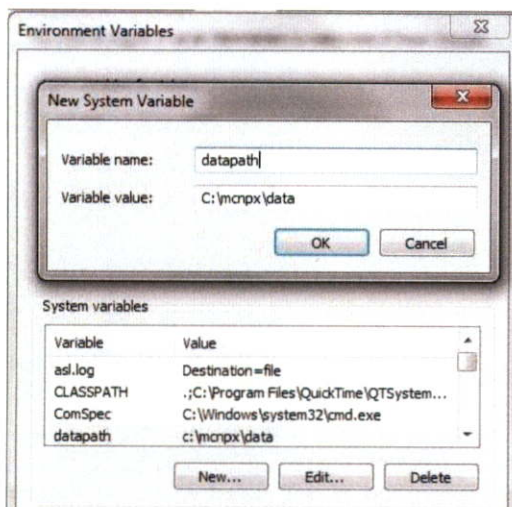
3. โปรแกรม MCNPX ทำการติดตั้งโฟลเดอร์โปรแกรมจำนวน 2 โฟลเดอร์บนไดรฟ์ของคอมพิวเตอร์ ควรเลือกติดตั้งในที่ที่สะดวกต่อการสืบค้นด้วย Command prompt วิธีการตั้งค่าโปรแกรม MCNPX มีดังนี้

Set path ของ โปรแกรม MCNPX

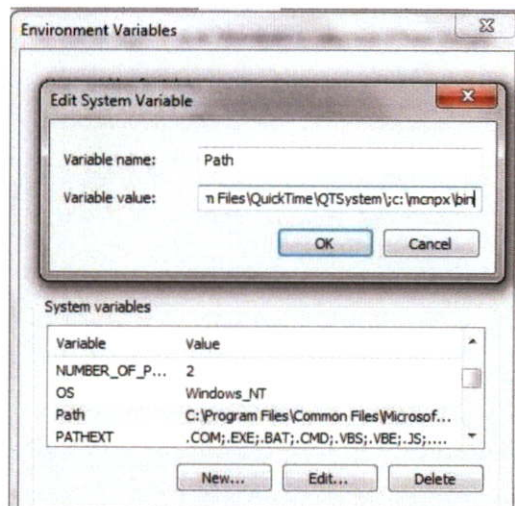
1. เข้าเมนู Control Panel > System and Security > System > Advanced system settings > Environment Variables
2. สร้าง System variables ใหม่ สำหรับตั้งค่า datapath คลิกเลือก New แล้วกรอกข้อมูลดังรูปที่ 3.8 ก. ซึ่งไดรฟ์ที่กรอกควรเป็นที่อยู่ของโฟลเดอร์ (ชื่อไดรฟ์ : \mcnpx\data)
3. Edit path แล้วกรอกค่า bin ดังรูปที่ 3.8 ข. (;ชื่อไดรฟ์ : \mcnpx\bin)
4. สร้าง System variables ใหม่ สำหรับตั้งค่าการแสดงผลบนหน้าจอ คลิกเลือก New แล้วกรอกข้อมูลดังรูปที่ 3.8 ค.
5. เมื่อตั้งค่าเสร็จให้ทำการ Restart คอมพิวเตอร์ 1 ครั้ง เพื่อค่าต่างๆที่ตั้งไว้ทำงานได้อย่างสมบูรณ์

คำสั่งพื้นฐานในการประมวลผลแบบจำลอง MCNPX บน Command prompt

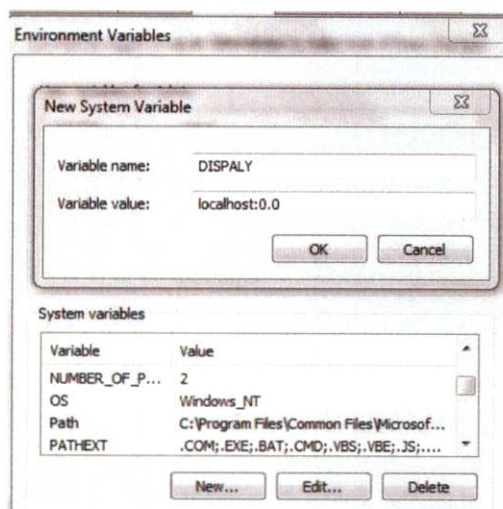
- >ls ดูรายละเอียดภายในไดเรกทอรี
- >cd ... (change directory) เปลี่ยนไดเรกทอรีไปไดเรกทอรีก่อนหน้าหรือ >cd ชื่อไดเรกทอรี ย้ายไปยังไดเรกทอรีใหม่ตามชื่อไดเรกทอรีที่กำหนด
- >mkdir สร้างไดเรกทอรีใหม่
- >pwd ดูรายละเอียดว่าขณะนี้อยู่ที่ตำแหน่งใด ในไดเรกทอรี



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 3.8 การตั้งค่าโปรแกรม MCNPX ใน Environment Variables

ก. ตั้งค่าโฟลเดอร์ data บน Environment Variables

ข. ตั้งค่าโฟลเดอร์ bin บน Environment Variables

ค. ตั้งค่าการแสดงผลหน้าจอ บน Environment Variables

3.2.2 วิธีการสร้างแบบจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ ของโปรแกรม MCNPX

ในการสร้างแบบจำลองเอ็มซีเอ็นพีสำหรับหาค่านิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่อง ปว.-1/1 ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาด้วยการสร้างแบบจำลองแผ่นทองคำ (Gold foil) อยู่ภายในท่ออบรังสีซีที เป็นตัววัดค่านิวตรอน ฟลักซ์ ซึ่งตำแหน่งของท่ออบรังสีซีที อยู่กึ่งกลางของเครื่อง ปว.-1/1

การสร้างแบบจำลองวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยแผ่นทองคำ ต้องสร้างแบบจำลองให้เหมือนจริงมากที่สุด โดยตำแหน่งของท่ออบรังสีซีที อยู่ในตำแหน่ง A1 ของแกนเครื่อง ปปว.-1/1 และให้แผ่นทองคำวางอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของท่ออบรังสีซีที ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของเครื่อง ปปว.-1/1 พอดี ขนาดของแผ่นทองคำมีขนาดรัศมี 0.25 เซนติเมตร หนัก 2.50 มิลลิกรัม หนา 6.5971×10^{-4} เซนติเมตร ความหนาของแผ่นทองคำคำนวณจากสมการ

$$\text{Gold foil thickness(cm.)} = \frac{\text{Gold foil weight(mg.)} \times 0.001}{\text{Gold density (g} \cdot \text{cm}^{-3}) \times \pi \times r^2(\text{cm}^2)} \quad (3.1)$$

โดย	Gold foil weight	น้ำหนักแผ่นทองคำ (mg.)
	Gold density	ค่าความหนาแน่นของทองคำ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	r^2	รัศมีของแผ่นทองคำ (cm^2)

ลักษณะของท่ออบรังสีซีที เป็นทรงกระบอกกลวงมีรัศมีภายใน 1.7018 เซนติเมตร และรัศมีภายนอก 1.9050 เซนติเมตร ยาว 39 เซนติเมตร (ความยาวของท่ออบรังสีซีทีที่ใช้ในการจำลองอยู่ในระยะเท่ากับความยาวของเนื้อเชื้อเพลิงภายในแท่งเชื้อเพลิง) และท่ออบรังสีซีทีถูกล้อมรอบด้วยสุญญากาศ (void) เป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร โดยขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองแผ่นทองคำมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างแบบจำลองแผ่นทองคำ

ขั้นตอนที่ 2 สร้างน้ำล้อมรอบแผ่นทองคำภายในท่ออบรังสีซีที

ขั้นตอนที่ 3 สร้างท่ออบรังสีซีทีห่อหุ้มน้ำที่ล้อมรอบแผ่นทองคำ

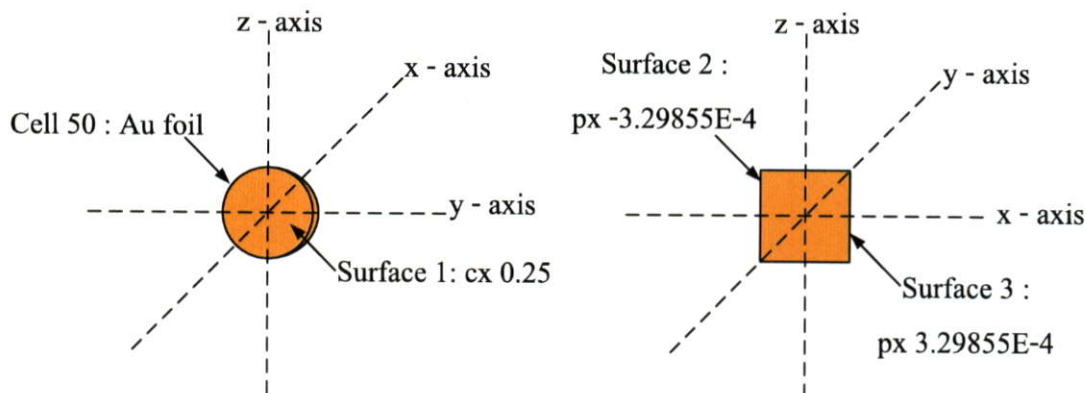
ขั้นตอนที่ 4 สร้างทรงกระบอกน้ำล้อมรอบท่ออบรังสีซีที และสุญญากาศล้อมรอบแบบจำลอง

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดให้นิวตรอนวิ่งเข้าชนแผ่นทองคำ และคำนวณปริมาณอัตราส่วนของการเกิดปฏิกิริยาจากพื้นผิวแผ่นทองคำ

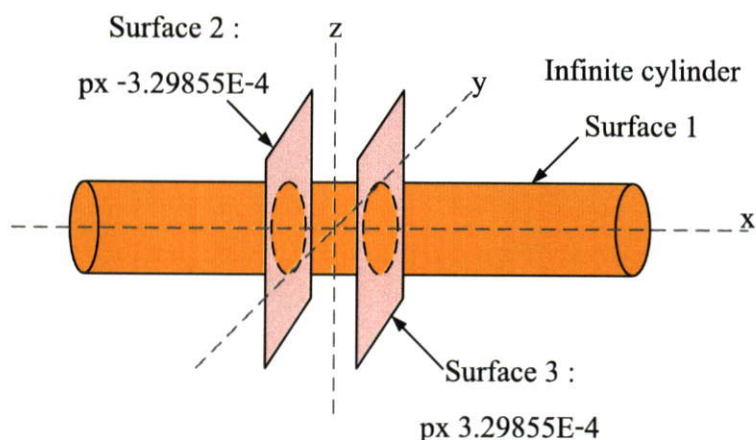
โดยในแต่ละแบบจำลองจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1. สร้างแบบจำลองแผ่นทองคำ

ลักษณะของแผ่นทองคำที่ใช้สร้างแบบจำลองเป็นทรงกระบอก มีรัศมี 0.25 เซนติเมตร หนา 6.5971×10^{-4} เซนติเมตร ซึ่งมาจากการคำนวณในสมการ 3.1 ความหนาของทองคำ $19.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ รูปทรงของแผ่นทองคำดังรูปที่ 3.9 จากรูปจะบอกรายละเอียดการตัดแผ่นระนาบบนแกน x,y,z



รูปที่ 3.9 แสดงรูปทรงและตัวระนาบบนแกน x,y,z ของแผ่นทองคำ



รูปที่ 3.10 แสดงตำแหน่งของแผ่นเพลทตัดทรงกระบอกของแผ่นทองคำ

ในการสร้างทรงกระบอกในระนาบแกน x ใช้คำสั่ง cx โดย c ย่อมาจาก cylindrical และ x มาจากระนาบแกน x ซึ่งตัวเลขที่ตามหลัง cx เป็นเลขความยาวของรัศมีทรงกระบอก อย่งไรก็ดีในการคำนวณของเอ็มซีเอ็นพีความยาวของทรงกระบอกเป็นอนันต์ ทำให้จำเป็นต้องกำหนดแผ่นเพลทมาตัดด้านข้างของทรงกระบอกทั้งสองด้าน เพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.10 ได้สร้างทรงกระบอกในแกน x ที่มีขนาดรัศมี 0.25 เซนติเมตร นำแผ่นเพลทตัดแกน x ในตำแหน่ง $-3.29855E-4$ และ $3.29855E-4$ ซึ่งจะได้ความหนา 6.5971×10^{-4} เซนติเมตร ซึ่งชุดคำสั่งที่ใช้สำหรับแผ่นเพลทคือ px โดย p ย่อมาจาก plane และ x มาจากแกน x สามารถเขียนเป็นชุดคำสั่งพื้นผิว (Surface card) ได้ดังนี้

c surface card

c Au Foil

1 cx 0.25

2 px -3.29855E-4

3 px 3.29855E-4

ในสองบรรทัดอธิบายถึงเป็นชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวของแผ่นทองคำ และบรรทัดถัดมาสามารถอธิบายได้ดังนี้

- | | |
|------------------|---|
| 1 cx 0.25 | เลข 1 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 1 โดยกำหนดสร้างทรงกระบอกที่มีขนาดรัศมี 0.25 เซนติเมตร |
| 2 px -3.29855E-4 | เลข 2 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 2 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกที่แกน x ตำแหน่ง -3.29855E-4 เซนติเมตร |
| 3 px 3.29855E-4 | เลข 3 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 3 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 2 ตัดทรงกระบอกที่แกน x ตำแหน่ง 3.29855E-4 เซนติเมตร |

เมื่อกำหนดรูปทรงของแผ่นทองคำแล้ว จะนำรูปทรงที่ได้มาเขียนเป็นรูปทรงของแผ่นทองคำในชุดคำสั่งเซลล์การ์ด (cell card) ซึ่งแต่ละเซลล์ที่เขียนขึ้นจะเป็นตัวแทนของรูปทรงนั้นๆ ดังเช่นแผ่นทองคำเราจะเรียกว่า cell 50 ซึ่งสามารถเขียนชุดคำสั่งดังนี้

c cell cards

c Au Foil

50 1 -19.3 -1 2 -3 vol=1.29534x10⁻⁴

imp:n=1 \$ Au foil

ในสองบรรทัดแรกเป็นการอธิบายว่าเป็นชุดคำสั่งเซลล์การ์ด และเป็นการสร้างรูปทรงของแผ่นทองคำ สำหรับบรรทัดที่สามมีคำอธิบายดังนี้

- | | |
|-------|---|
| 50 | เลขสำหรับเรียกแผ่นทองคำ |
| 1 | เลขชุดคำสั่งรายละเอียดของสาร (materials card) ซึ่งแผ่นทองมีเลขชุดคำสั่งอยู่ใน m = 1 |
| -19.3 | ค่าความหนาแน่นเชิงมวลของทองคำมีหน่วย g•cm ⁻³
(ถ้าเลขความหนาแน่นเป็นเชิงมวลต้องใส่เครื่องหมายลบ แต่ถ้าเป็นค่าความหนาแน่นเชิงอะตอม หน่วย atom/b-cm ไม่ต้องใส่เครื่องหมายลบ) |
| -1 | สร้างทรงกระบอกที่มีขนาดรัศมี 0.25 เซนติเมตร |
| 2 | ตัดทรงกระบอกที่แกน x ตำแหน่ง -3.29855E-4 เซนติเมตร |

-3 คัดทรงกระบอกที่แกน x ตำแหน่ง 3.29855E-4 เซนติเมตร

vol= 1.29534x10⁻⁴ ค่าปริมาตรของแผ่นทองคำ

มาจากการคำนวณด้วยสมการ $\pi r^2 h$

หลังจากสร้างแผ่นทองคำในส่วนของชุดคำสั่งเซลล์การ์ด และชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิว ยังมีชุดคำสั่งอีก 1 ชุด ที่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลองของโปรแกรมเอ็มซีเอ็นพี คือ ชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะ (Material Data Card) ในการสร้างแบบจำลองของโครงการวิจัยนี้ใช้แผ่นทองคำ สัญลักษณ์ทางวิทยาศาสตร์ Au มีเลขอะตอม 79 และน้ำหนักอะตอม 179 นอกจากนี้แผ่นทองคำที่ใช้เป็นแผ่นทองคำอย่างเดียวน่าจะมีเจือปนสารอื่นซึ่งคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเขียนในชุดคำสั่งให้เขียนเป็น 1.00 และใช้ .70 c ต่อท้าย สามารถเขียนเขียนชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะได้ดังนี้

c Material Data Cards

m1 79197.70c -1.00 \$ Au

ในบรรทัดแรกของชุดคำสั่งนี้บอกถึงว่าเป็นชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะของสาร และบรรทัดถัดมาสามารถอธิบายได้ดังนี้

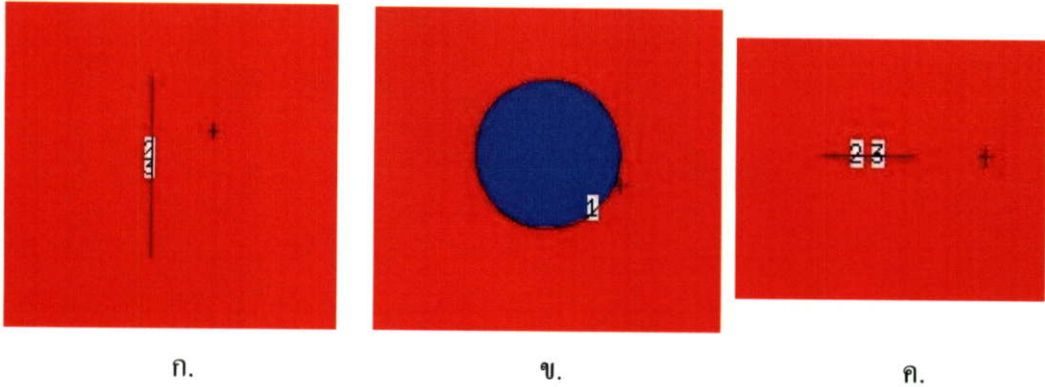
m1	ชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะชุดที่ 1
79	เลขอะตอมของทอง
197	เลขไอโซโทปเสถียรของทอง
.70c	ค่าจากตารางพลังงานนิวตรอนที่อุณหภูมิ 296.3 °K
-1.00	ทองคำ 100 เปอร์เซ็นต์ (เครื่องหมายลบมาจากสัดส่วนน้ำหนักของสารนั้นๆ)

เมื่อนำทั้งสามชุดคำสั่งมารวมกันจะได้ชุดแบบจำลองแผ่นทองคำ และรูปจากการประมวลผลจากโปรแกรม MCNPX ดังรูปที่ 3.11 ก. , 3.11 ข. และ 3.11 ค.

```

c cell cards
c Au Foil
50 1 -19.3 -1 2 -3 vol=1.29534x10-4                      imp:n=1 $ Au foil
c surface card
c Au Foil
1 cx 0.25
2 px -3.29855E-4
3 px 3.29855E-4
c Material Data Cards
m1            79197.70c                      -1.00            $ Au

```



รูปที่ 3.11 ผลการจำลองแผ่นทองคำปน โปรแกรม MCNPX

ก. ผลการจำลองในระนาบ XY

ข. ผลการจำลองในระนาบ YZ

ค. ผลการจำลองในระนาบ ZX

ขั้นตอนที่ 2. สร้างน้ำล้อมรอบแผ่นทองคำภายในท่ออาบรังสีซีที

เมื่อสร้างแบบจำลองแผ่นทองคำตามขั้นตอนที่ 1 ในขั้นตอนต่อไปสร้างแบบจำลองน้ำล้อมรอบแผ่นทองคำภายในท่ออาบรังสีซีที โดยแบบจำลองน้ำมีลักษณะรูปทรงกระบอก อยู่บนระนาบแกน z มีปริมาตร 354.83901 ลบ.ซม. และรัศมีทั้ง 1.70180 เซนติเมตร มีความยาว 39 เซนติเมตร สามารถเขียนเป็นชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิว และรูปของแบบจำลองดังรูปที่ 3.12 ก.

21 cz 1.70180 \$ inner radius 1

c Upper and Bottom CT tube

202 pz 19.9500 \$ upper plane

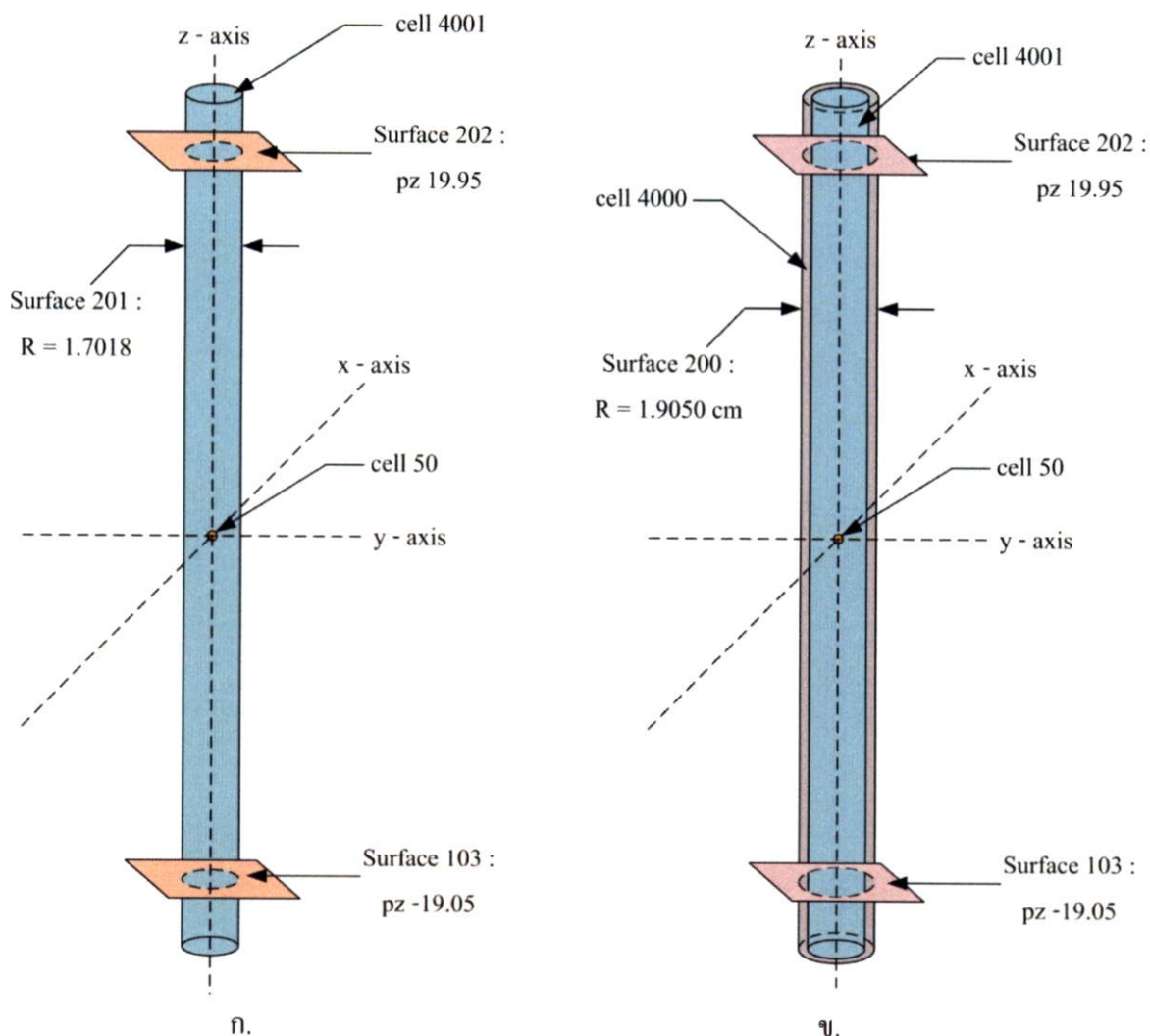
103 pz -19.0500 \$ bottom plane

จากคำสั่งการ์ดพื้นผิวของแบบจำลองของน้ำภายในท่ออาบรังสีซีทีอยู่ในการ์ดชุดที่ 201 202 และ 103 โดยการ์ดชุดที่ 201 เป็นรูปทรงกระบอกที่สร้างอยู่บนระนาบแกน z และการ์ดชุดที่ 202 และ 103 เป็นแผ่นเพลทที่ตัดทรงกระบอกในระนาบแกน z สามารถอธิบายได้ดังนี้

201 cz 1.70180 เลข 201 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 201 โดยกำหนดสร้างทรงกระบอกที่มีขนาดรัศมี 1.70180 เซนติเมตร

202 pz 19.9500 เลข 202 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 202 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกของการ์ดคำสั่งชุดที่ 201 ที่แกน z ตำแหน่ง 19.9500 เซนติเมตร

103 pz -19.0500 เลข 103 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 103 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 2 ตัดทรงกระบอกของการ์ดคำสั่งชุดที่ 21 ที่แกน z ตำแหน่ง 19.0500 เซนติเมตร



รูปที่ 3.12 ภาพแบบจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในท่ออาบซีที

รูป ก. ภาพแบบจำลองน้ำล้อมรอบแผ่นทองคำภายในท่ออาบรังสีซีที

รูป ข. ภาพแบบจำลองท่ออาบรังสีซีทีที่หุ้มน้ำล้อมรอบแผ่นทองคำ

เมื่อกำหนดขนาดของรูปทรงน้ำล้อมรอบแผ่นทองคำได้แล้ว นำข้อมูลจากชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวมาเขียนชุดคำสั่งเซลล์การ์ด และกำหนดให้ทรงกระบอกน้ำที่ล้อมรอบแผ่นทองคำมีชื่อเรียกว่า cell 4001

```
4001 3 9.9966E-002 24 -201 103 -202 #1 vol=354.83901 $ Water in rod
```

สามารถอธิบายชุดคำสั่งเซลล์การ์ดได้ดังนี้

4001

เลขสำหรับเรียกเซลล์ทรงกระบอกน้ำที่ล้อมรอบแผ่นทองคำ

3	เลขชุดรายละเอียดของสารซึ่งของน้ำมีเลขอยู่ในชุดคำสั่ง m = 3
9.9966E-002	ค่าความหนาแน่นเชิงอะตอมของน้ำ
-201	สร้างทรงกระบอกที่มีรัศมี 1.70180 เซนติเมตร
103	ตัดทรงกระบอกที่แกน z ที่ตำแหน่ง -19.0500 เซนติเมตร
-202	ตัดทรงกระบอกที่แกน z ที่ตำแหน่ง -19.9500 เซนติเมตร
#1	ไม่เกี่ยวข้องกับ cell 1
vol=354.83901	ค่าปริมาตรของทรงกระบอกน้ำคำนวณจากสมการ $\pi r^2 h$

หลังจากสร้างทรงกระบอกน้ำล้อมรอบแผ่นทองคำในชุดคำสั่งเซลล์การ์ด และชุดคำสั่งเซลล์การ์ด ทำการสร้างชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะของสาร โดยน้ำเป็นธาตุประกอบมีธาตุ 2 ชนิด คือ ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

m3 8016.70c 3.3322E-002 \$ Water
1001.70c 6.6644E-002

สามารถอธิบายชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะของสารได้ดังนี้

- บรรทัดที่หนึ่ง

m3 ชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะชุดที่ 3
8 เลขอะตอมของออกซิเจน
016 เลขไอโซโทปเสถียรของออกซิเจน
.70c ค่าจากตารางพลังงานนิวตรอนที่อุณหภูมิ 296.3 °K
3.3322E-002 สัดส่วนของออกซิเจนใน 1 โมเลกุลน้ำ

- บรรทัดที่สอง

1 เลขอะตอมของไฮโดรเจน
001 เลขไอโซโทปของไฮโดรเจน
.70c ค่าจากตารางพลังงานนิวตรอนที่อุณหภูมิ 296.3 °K
6.6644E-002 สัดส่วนของไฮโดรเจนใน 1 โมเลกุลน้ำ

เมื่อนำชุดคำสั่งทั้ง 2 ชุด มารวมกันจะได้ชุดคำสั่งแผ่นทองคำที่มีน้ำล้อมรอบ และได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3.13 ก. , 3.13 ข. และ 3.13 ค. ดังนี้

c cell cards	
c Au Foil	
1 1 -19.3 -1 2 -3	vol=3.10723E-5 \$ Au foil
4001 3 9.9966E-002 24 -201 103 -202 #1	vol=354.83901 \$ Water in rod
c Surface cards	
c Au Foil	
1 cx 0.25	\$ Au foil

2 px -3.29855E-04			
3 px 3.29855E-04			
c Water in CT rod			
201 cz 1.70180		\$ Inner IR	
202 pz 19.95		\$ upper plane	
103 pz -19.0500		\$ bottom plane	
c Material Data Cards			
m1	79197.70c	-1.00	\$ Au
m3	8016.70c	3.3322E-002	\$ Water
	1001.70c	6.6644E-002	

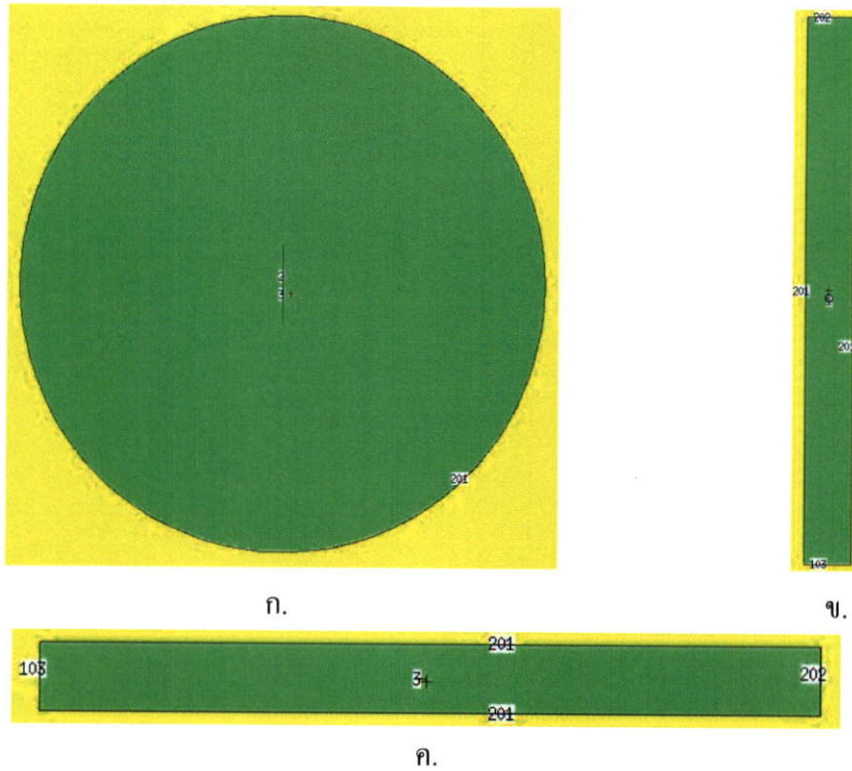
ขั้นตอนที่ 3. สร้างท่ออาบรังสีซีทีหุ้มน้ำล้อมรอบแผ่นทองคำ

หลังจากสร้างแผ่นทองคำและน้ำที่ล้อมรอบแผ่นทองคำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 ขั้นตอนต่อไปทำการสร้างท่ออาบรังสีซีทีที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกกลวงอยู่บนระนาบแกน z มีรัศมี 1.9050 เซนติเมตร ยาว 39 เซนติเมตร และทำจากอะลูมิเนียม ซึ่งสามารถเขียนชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวได้ และการตัดเพลทบนภาพแบบจำลองดังรูปที่ 3.12 ข. ดังนี้

200	cz 1.9050	\$ outer radius IR
c	Upper and Bottom CT tube	
202	pz 19.9500	\$ upper plane
103	pz -19.0500	\$ bottom plane

จากคำสั่งการ์ดพื้นผิวของแบบจำลองท่ออาบรังสีซีทีอยู่ในการ์ดชุดที่ 200 202 และ 103 โดยการ์ดชุดที่ 200 เป็นรูปทรงกระบอกที่สร้างอยู่บนระนาบแกน z และการ์ดชุดที่ 202 และ 103 เป็นแผ่นเพลทที่ตัดทรงกระบอกในระนาบแกน z สามารถอธิบายได้ดังนี้

200 cz 1.9050	เลข 200 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 200 โดยกำหนดสร้างทรงกระบอกที่มีขนาดรัศมี 1.9050 เซนติเมตร
202 pz 19.9500	เลข 202 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 202 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกของการ์ดคำสั่งชุดที่ 200 ที่แกน z ตำแหน่ง 19.9500 เซนติเมตร
103 pz -19.0500	เลข 103 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 103 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 2 ตัดทรงกระบอกของการ์ดคำสั่งชุดที่ 21 ที่แกน z ตำแหน่ง 19.0500 เซนติเมตร



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองแผ่นทองคำที่มีน้ำล้อมรอบบนโปรแกรม MCNPX

- ก. ผลการจำลองในระนาบ XY
- ข. ผลการจำลองในระนาบ YZ
- ค. ผลการจำลองในระนาบ ZX

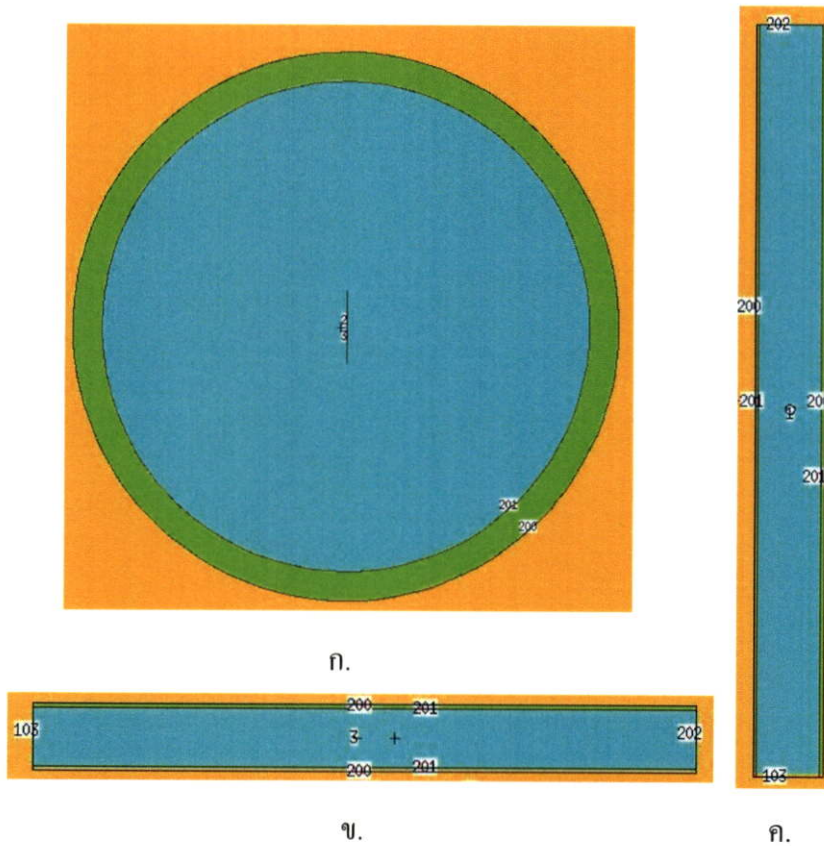
เมื่อกำหนดขนาดของรูปทรงของท่อออบรังสีซีทีได้แล้ว นำข้อมูลจากชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวมาเขียนชุดคำสั่งเซลล์การ์ด และกำหนดให้ท่อออบรังสีซีทีที่มีน้ำล้อมรอบแผ่นทองคำมีชื่อเรียกว่า cell 4000

```
4000 2 6.0535E-002 201 -200 103 -202 imp:n=1 $ Al tube
```

สามารถอธิบายชุดคำสั่งเซลล์การ์ดได้ดังนี้

4000	เลขสำหรับเรียกเซลล์ท่อออบรังสีซีที
2	เลขชุดรายละเอียดของสารที่ทำท่อออบรังสีซีทีคืออะลูมิเนียม
เลขอยู่ใน	
	ชุดคำสั่ง m = 2
6.0535E-002	ค่าความหนาแน่นเชิงอะตอมของอะลูมิเนียม
201	เริ่มสร้างทรงกระบอกที่ระยะ 1.70180 เซนติเมตร
-200	สร้างทรงกระบอกที่รัศมี 1.9050 เซนติเมตร

m2	12024.70c	4.8094E-004	12025.70c	6.0887E-005	\$ AI
	12026.70c	6.7036E-005	13027.92c	5.9305E-002	
	14028.70c	3.2398E-004	14029.70c	1.6404E-005	
	14030.70c	1.0889E-005	22046.70c	1.3731E-006	
	22047.70c	1.2530E-006	22048.70c	1.2667E-005	
	22049.70c	9.4400E-007	22050.70c	9.2684E-007	
	24050.70c	2.1984E-006	24052.70c	4.2395E-005	
	24053.70c	4.8067E-006	24054.70c	1.1966E-006	
	25055.70c	1.4965E-005	26054.70c	5.9062E-006	
	26056.70c	9.1816E-005	26057.70c	2.1022E-006	
	26058.70c	2.8029E-007	29063.70c	6.0351E-005	
	29065.70c	2.6899E-005			
m3	8016.70c	3.3322E-002	\$ Water		
	1001.70c	6.6644E-002			



รูปที่ 3.14 ผลการจำลองท่ออาบรังสีซีทีที่หุ้มน้ำล้อมรอบแผ่นทองคำบน โปรแกรม MCNPX

ก. ผลการจำลองในระนาบ XY

ข. ผลการจำลองในระนาบ ZX

ค. ผลการจำลองในระนาบ YZ

ขั้นตอนที่ 4. สร้างทรงกระบอกน้ำล้อมรอบท่ออาบรังสีซีที และสูญญากาศล้อมรอบแบบจำลอง

ในขั้นตอนนี้ทำการจำลองทรงกระบอกสูญญากาศซึ่งล้อมรอบท่ออาบรังสีซีทีมี ลักษณะทรงกระบอกอยู่บนระนาบแกน z มีรัศมี 3 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.10 สามารถเขียนเป็นชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวและแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.15

c Sphere

30 cz 3.00

11 pz 30.00 \$ Top water surface

12 pz -30.00 \$ Bottom water surface

จากคำสั่งการ์ดพื้นผิวของทรงกระบอกสูญญากาศอยู่ในการ์ดชุดที่ 30 11 และ 12 โดยการ์ดชุดที่ 30 เป็นรูปทรงกระบอกที่สร้างอยู่บนระนาบแกน z และการ์ดชุดที่ 11 และ 12 เป็นแผ่นเพลทที่ตัดทรงกระบอกในระนาบแกน z สามารถอธิบายได้ดังนี้

30 cz 3.00	เลข 30 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 30 โดยกำหนดสร้างทรงกระบอกที่มีขนาดรัศมี 3.00 เซนติเมตร
11 pz 30.00	เลข 11 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 11 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกของการ์ดคำสั่งชุดที่ 30 ที่แกน z ตำแหน่ง 30.00 เซนติเมตร
12 pz -30.00	เลข 12 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 12 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกของการ์ดคำสั่งชุดที่ 30 ที่แกน z ตำแหน่ง -30.00 เซนติเมตร

เมื่อกำหนดขนาดของรูปทรงของทรงกระบอกน้ำล้อมรอบท่ออาบรังสีซีที นำข้อมูลจากชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวมาเขียนชุดคำสั่งเซลล์การ์ด และกำหนดให้ทรงกระบอกน้ำมีชื่อเรียกว่า cell 4002 และชุดคำสั่งสูญญากาศที่อยู่ล้อมรอบทรงกระบอกน้ำ มีชื่อเรียกว่า cell 1000

c Water out IR

4002 3 9.9966E-002 -30 -11 12 (200:202:-103) vol=846.6018 imp:n=1 \$ outWater

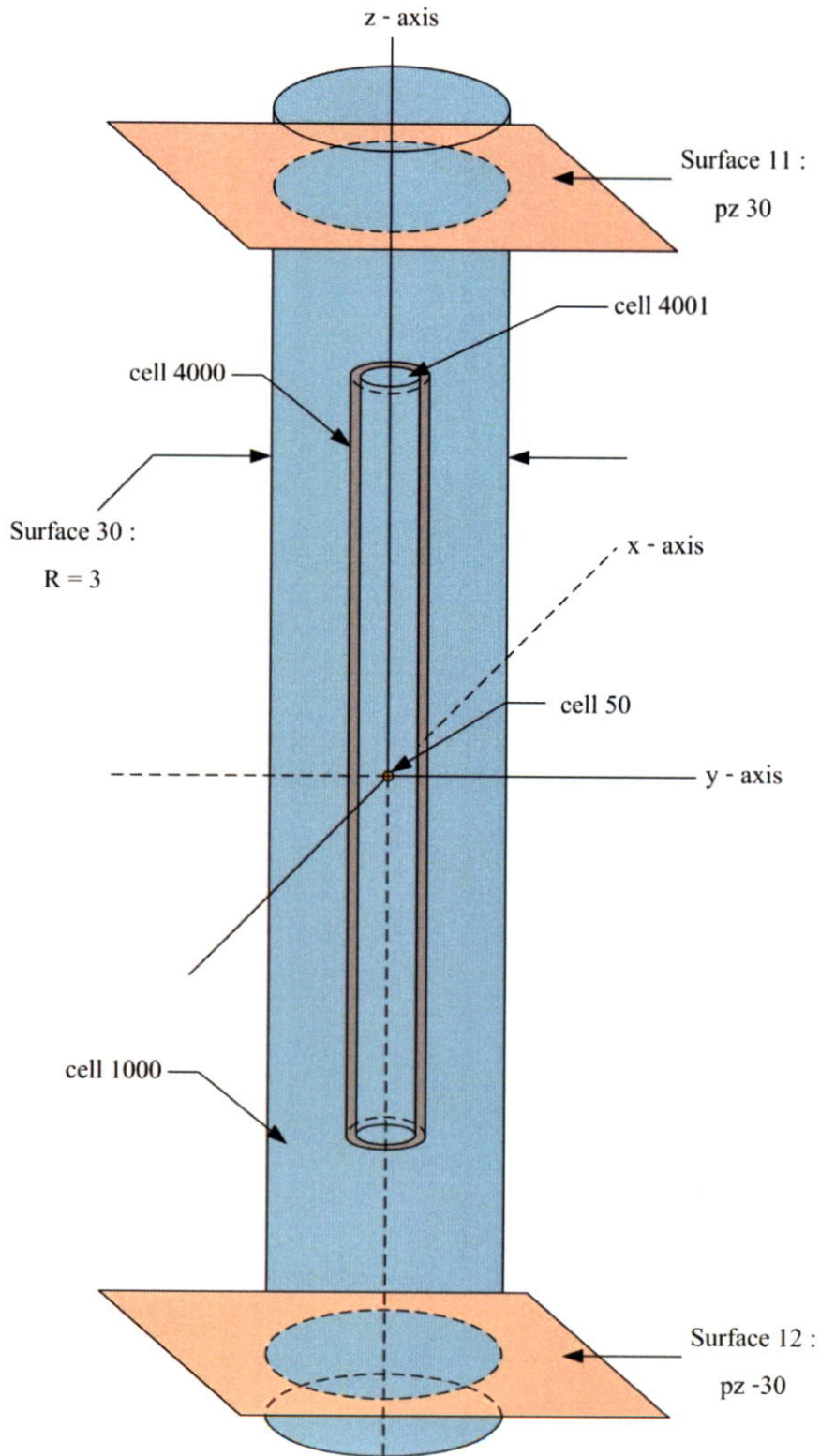
c Sphere

1000 0 (30:11:-12) imp:n=0 \$ Sphere

จะสามารถอธิบายชุดคำสั่ง cell 1000 ได้ดังนี้

- ทรงกระบอกน้ำล้อมรอบท่ออาบรังสีซีที

4002	เลขสำหรับเรียกเซลล์ทรงกระบอกน้ำล้อมรอบท่ออาบรังสีซีที
3	เลขชุดรายละเอียดของสารซึ่งของน้ำมีเลขอยู่ในชุดคำสั่ง m = 3
9.9966E-002	ค่าความหนาแน่นเชิงอะตอมของน้ำ
-30	สร้างทรงกระบอกที่รัศมี 3 เซนติเมตร
-11	ตัดทรงกระบอกที่แกน z ที่ตำแหน่ง 30.00 เซนติเมตร



รูปที่ 3.15 ภาพแบบจำลองทรงกระบอกน้ำล้อมรอบที่อาบรังสีซีที และสุญญากาศล้อมรอบ
แบบจำลอง

12 คัดทรงกระบอกที่แกน z ที่ตำแหน่ง -30.00 เซนติเมตร
 (200:202:-103) ไม่เกี่ยวข้องกับเซลล์ท่ออาบรังสีซีที cell 4001
 vol=846.6018 ปริมาตรของทรงกระบอกน้ำ

- สูญญากาศล้อมรอบแบบจำลอง

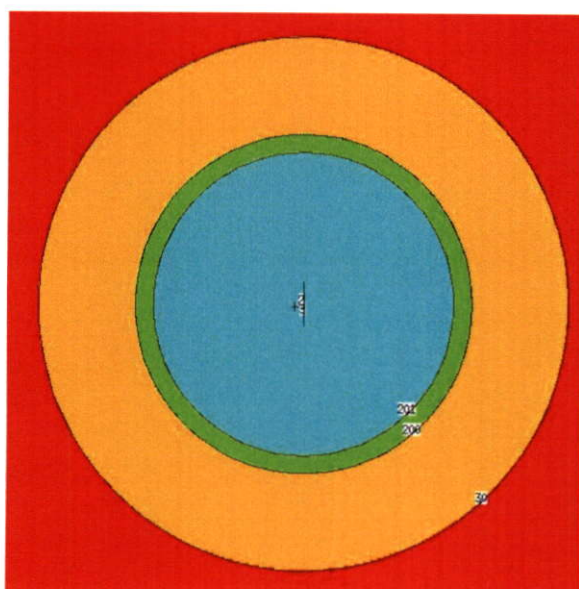
1000 เลขสำหรับเรียกสูญญากาศที่อยู่รอบแบบจำลอง
 0 เลขชุดรายละเอียดของสารของสูญญากาศ
 (ถ้าเป็นศูนย์ไม่จำเป็นต้องมีชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะของสาร)
 (30:11:-12) ไม่เกี่ยวข้องกับทรงกระบอกน้ำ cell 4002

ในส่วนของคุณค่าสั่งข้อมูลจำเพาะของเซลล์ 4002 สามารถใช้ร่วมกับเซลล์ 4000 ได้ และ
 เซลล์ 1000 ไม่มีชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะ และเมื่อนำข้อมูลชุดคำสั่งทั้ง 4 ส่วนมารวมกันจะได้คำสั่ง
 ดังต่อไปนี้ และเมื่อนำไปประมวลผลบนโปรแกรมได้รูปดังรูปที่ 3.16 ก. , 3.16 ข. และ 3.16 ค.

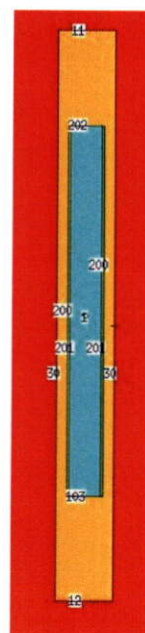
```

c cell cards
c Au Foil
1 1 -19.3 -1 2 -3      vol=3.10723E-5                    imp:n=1 $ Au foil
4001 3 9.9966E-002 #1 -201 103 -202      vol=355                    imp:n=1 $ WIR
4000 2 6.0535E-002 201 -200 103 -202                    imp:n=1 $ Al tube
c Water out IR
4002 3 9.9966E-002 -30 -11 12 (200:202:-103) vol=846.6018 imp:n=1 $ outWater
c Sphere
1000 0 (30:11:-12)                    imp:n=0 $ Sphere
c Surface cards
c Au Foil
1 cx 0.25                    $ Au foil
2 px -3.29855E-04
3 px 3.29855E-04
c Water in rod
201 cz 1.70180                    $ inner radius 5
200 cz 1.9050                    $ outer radius IR
202 pz 19.95                    $ upper plane
103 pz -19.0500
c Sphere
30 cz 3.00
11 pz 30.00                    $ Top water surface
12 pz -30.00                    $ Bottom water surface
c Material Data Cards
m1        79197.70c                    -1.00                    $ Au
m2        12024.70c                    4.8094E-004                    12025.70c                    6.0887E-005                    $ Al
  
```

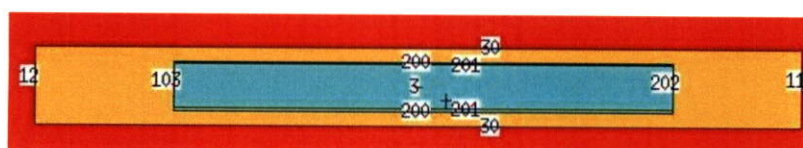
	12026.70c	6.7036E-005	13027.92c	5.9305E-002
	14028.70c	3.2398E-004	14029.70c	1.6404E-005
	14030.70c	1.0889E-005	22046.70c	1.3731E-006
	22047.70c	1.2530E-006	22048.70c	1.2667E-005
	22049.70c	9.4400E-007	22050.70c	9.2684E-007
	24050.70c	2.1984E-006	24052.70c	4.2395E-005
	24053.70c	4.8067E-006	24054.70c	1.1966E-006
	25055.70c	1.4965E-005	26054.70c	5.9062E-006
	26056.70c	9.1816E-005	26057.70c	2.1022E-006
	26058.70c	2.8029E-007	29063.70c	6.0351E-005
	29065.70c	2.6899E-005		
m3	8016.70c	3.3322E-002	\$ Water	
	1001.70c	6.6644E-002		



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 3.16 ผลการจำลองทรงกระบอกน้ำล้อมรอบที่อาคารรังสีซีที และศูนย์กลางล้อมรอบแบบจำลองบนโปรแกรม MCNPX

ก. ผลการจำลองในระนาบ XY

ข. ผลการจำลองในระนาบ YZ

ค. ผลการจำลองในระนาบ ZX

ขั้นตอนที่ 5. กำหนดให้นิวตรอนวิ่งเข้าชนแผ่นทองคำ และคำนวณปริมาณอัตราส่วนของการเกิดปฏิกิริยาจากพื้นผิวแผ่นทองคำ

เมื่อสร้างแบบจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในท่ออาบรังสีซีทีตามขั้นตอนที่ 1-4 ขั้นตอนต่อไปเป็นการใช้คำสั่งเพื่อกำหนดให้นิวตรอนวิ่งเข้าชนกับท่ออาบรังสีซีที โดยวัดจำนวนนิวตรอนที่วิ่งบนแผ่นทองและน้ำภายในท่ออาบรังสีซีที ซึ่งสามารถเขียนคำสั่งได้ดังนี้

```
nps 5e8
mode:n
ssr
f2:n 2 3
f4:n 50 4000 4001
e2 1e-6 1 10
e4 1e-6 1 10
```

สามารถเขียนคำอธิบายได้ดังนี้

nps 5e8	กำหนดให้นิวตรอนวิ่งผ่านตัวกลาง 5×10^8 ครั้ง
mode : n	จำลองการเคลื่อนที่ของนิวตรอน
ssr	ข้อมาจาก surface source read หมายถึงอ่านข้อมูลจากแหล่งกำเนิดที่กำหนด ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้อ่านจะเป็นข้อมูลจากไฟล์ wssa ซึ่งอยู่ภายนอก
f2 : n 2 3	วัดจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่พื้นที่ผิว surface 2 และ 3
f4 : n 50 4000 4001	วัดจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ภายในเซลล์ 50, 4000 และ 4001
e2 1e-6 1 10	วัดค่าพลังงานของจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่พื้นผิวของ f2 ที่ระดับพลังงาน 1×10^{-6} eV , 1 keV และ 10 keV
e4 1e-6 1 10	วัดค่าพลังงานของจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ภายในเซลล์ของ f4 ที่ระดับพลังงาน 1×10^{-6} eV , 1 keV และ 10 keV

3.2.2.1 เพิ่มความหนาของแผ่นทอง ระหว่าง 500 – 800 μcm . และประมวลผลการจับนิวตรอนภายในแผ่นทอง

นำแบบจำลองที่ได้จากการสร้างในหัวข้อที่ 3.2.2 เป็นแบบจำลองเริ่มต้นในการประมวลผล นอกจากเพิ่มความหนาของแผ่นทอง จะทำการแบ่งช่วงความหนาออกเป็น 5 ช่วงเท่าๆกัน เพื่อดูการจับนิวตรอนในแต่ละช่วงของแผ่นทอง โดยเริ่มจากคำนวณหาความหนาของแผ่นทอง ดังตารางที่ 3.1 และได้ไฟล์อินพุตสำหรับประมวลผลจำนวน 11 ไฟล์

ตารางที่ 3.1 หาความหนาของแผ่นทอง 500 -800 μcm .

แผ่นที่	ความหนาของแผ่นทอง (cm.)	แบ่งช่วงช่วงละ	ระยะเพลทสำหรับแบ่งช่วงแผ่นทอง (cm.)					
			เพลทที่ 1	เพลทที่ 2	เพลทที่ 3	เพลทที่ 4	เพลทที่ 5	เพลทที่ 6
1	5.28E-04	1.06E-04	-2.64E-04	-1.58E-04	-5.28E-05	5.28E-05	1.58E-04	2.64E-04
2	5.54E-04	1.11E-04	-2.77E-04	-1.66E-04	-5.54E-05	5.54E-05	1.66E-04	2.77E-04
3	5.81E-04	1.16E-04	-2.90E-04	-1.74E-04	-5.81E-05	5.81E-05	1.74E-04	2.90E-04
4	6.07E-04	1.21E-04	-3.03E-04	-1.82E-04	-6.07E-05	6.07E-05	1.82E-04	3.03E-04
5	6.33E-04	1.27E-04	-3.17E-04	-1.90E-04	-6.33E-05	6.33E-05	1.90E-04	3.17E-04
6	6.60E-04	1.32E-04	-3.30E-04	-1.98E-04	-6.60E-05	6.60E-05	1.98E-04	3.30E-04
7	6.86E-04	1.37E-04	-3.43E-04	-2.06E-04	-6.86E-05	6.86E-05	2.06E-04	3.43E-04
8	7.12E-04	1.42E-04	-3.56E-04	-2.14E-04	-7.12E-05	7.12E-05	2.14E-04	3.56E-04
9	7.39E-04	1.48E-04	-3.69E-04	-2.22E-04	-7.39E-05	7.39E-05	2.22E-04	3.69E-04
10	7.65E-04	1.53E-04	-3.83E-04	-2.30E-04	-7.65E-05	7.65E-05	2.30E-04	3.83E-04
11	7.92E-04	1.58E-04	-3.96E-04	-2.37E-04	-7.92E-05	7.92E-05	2.37E-04	3.96E-04

จากตารางที่ 3.1 นำระยะของเพลทที่ 1 – 7 มากำหนดระยะในชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิว โดยสามารถเขียนคำสั่งของแผ่นที่ 1 ได้ดังนี้

1 cx 0.25

เลข 1 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 1 โดยกำหนดสร้างทรงกระบอกที่มีขนาดรัศมี 0.25 เซนติเมตร

2 px -2.64E-04

เลข 2 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 2 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกที่แกน x ตำแหน่ง -2.64E-04 เซนติเมตร

3 px -1.58E-04

เลข 3 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 3 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกที่แกน x ตำแหน่ง -1.58E-04 เซนติเมตร

4 px -5.28E-05

เลข 4 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 4 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกที่แกน x ตำแหน่ง -5.28E-04 เซนติเมตร

5 px 5.28E-05

เลข 5 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 5 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกที่แกน x ตำแหน่ง 5.28 E-04 เซนติเมตร

6 px 1.58E-04

เลข 6 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 6 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกที่แกน x ตำแหน่ง 1.58E-04 เซนติเมตร

7 px 2.64E-04

เลข 7 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 7 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกที่แกน x ตำแหน่ง 2.64E-04 เซนติเมตร

เมื่อนำชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวทั้ง 6 การ์ดมาสร้างแบบจำลองแผ่นทองที่แบ่งช่วง จะได้ดังรูปที่

3.17 ก. และ 3.17 ข. และกำหนดให้แต่ละช่วงของแผ่นทองมีชื่อเรียกดังนี้

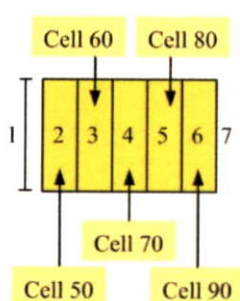
ช่วงที่ 1 cell 50 ระยะ -2.64E-04 ซม. ถึง -1.58E-04 ซม.

ช่วงที่ 2 cell 60 ระยะ -1.58E-04 ซม. ถึง -5.28E-05 ซม.

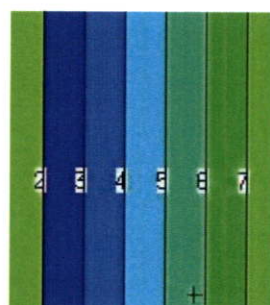
ช่วงที่ 3 cell 70 ระยะ -5.28E-05 ซม. ถึง 5.28E-05 ซม.

ช่วงที่ 4 cell 80 ระยะ 5.28E-05 ซม. ถึง 1.58E-04 ซม.

ช่วงที่ 5 cell 90 ระยะ 1.58E-04 ซม. ถึง 2.64E-04 ซม.



ก.



ข.

รูปที่ 3.17 การแบ่งช่วงแผ่นทอง

ก. ภาพแบบจำลองการแบ่งช่วงแผ่นทอง

ข. ผลการจำลองบนโปรแกรม MCNPX

นำระยะต่างๆข้างต้นมากำหนดขอบเขตของแต่ละเซลล์ในชุดคำสั่งเซลล์การ์ด และกำหนดตำแหน่งการประมวลผลภายใน Tally F2 และ F4 ซึ่ง F2 ประมวลผลในชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิว 2, 7 และ F4 ประมวลผลในเซลล์ที่ 50, 60, 70, 80 และ 90 สามารถเขียนคำสั่งได้ดังนี้

c Flux measurement simulation

c cell cards

c Au Foil

50 1 -19.3 -1 2 -3

vol=3.10723E-5

imp:n=1 \$ Au foil 1

60 1 -19.3 -1 3 -4

vol=3.10723E-5

imp:n=1 \$ Au foil 2

```

70 1 -19.3 -1 4 -5          vol=3.10723E-5    imp:n=1 $ Au foil 3
80 1 -19.3 -1 5 -6          vol=3.10723E-5    imp:n=1 $ Au foil 4
90 1 -19.3 -1 6 -7          vol=3.10723E-5    imp:n=1 $ Au foil 5

c Irradiation tubes
4001 3 9.9966E-002 -201 103 -202 #50 #60 #70 #80 #90          imp:n=1 $ WIR
4000 2 6.0535E-002 201 -200 103 -202          imp:n=1 $ Al tube
4002 3 9.9966E-002 -30 -11 12 (200:202:-103) vol=846.6018    imp:n=1 $ outWater

c Sphere
1000 0 (30:11:-12)          imp:n=0 $ Cylindrical

c Surface cards

c Irradiation tubes
201 cz 1.70180              $ inner radius 5
200 cz 1.9050              $ outer radius IR
202 pz 19.95               $ upper plane
103 pz -19.0500           $ bottom plane

c Cylindrical
30 cz 3.00

c Au Foil
1 cx 0.25                  $ Au foil
2 px -2.63884E-04
3 px -1.58330E-04
4 px -5.27768E-05
5 px 5.27768E-05
6 px 1.58330E-04
7 px 2.63884E-04
11 pz 30.00               $ Top water surface
12 pz -30.00             $ Bottom water surface

c Run Neutron
nps 5e8
mode:n
ssr
f2:n 2 7
f4:n 50 60 70 80 90 400 401 402 403 4001 4000
e2 1e-6 1 10
e4 1e-6 1 10

c Material Data Cards
m1      79197.70c          -1.00          $ Au
m2      12024.70c         4.8094E-004    12025.70c      6.0887E-005    $ Al
        12026.70c         6.7036E-005    13027.92c      5.9305E-002
        14028.70c         3.2398E-004    14029.70c      1.6404E-005
        14030.70c         1.0889E-005    22046.70c      1.3731E-006
        22047.70c         1.2530E-006    22048.70c      1.2667E-005

```

	22049.70c	9.4400E-007	22050.70c	9.2684E-007
	24050.70c	2.1984E-006	24052.70c	4.2395E-005
	24053.70c	4.8067E-006	24054.70c	1.1966E-006
	25055.70c	1.4965E-005	26054.70c	5.9062E-006
	26056.70c	9.1816E-005	26057.70c	2.1022E-006
	26058.70c	2.8029E-007	29063.70c	6.0351E-005
	29065.70c	2.6899E-005		
m3	8016.70c	3.3322E-002	\$ Water	
	1001.70c	6.6644E-002		

3.2.2.2 เพิ่มชุดคำสั่ง Tally Multiplier ในแบบจำลอง

ชุดคำสั่ง Tally Multiplier มักถูกใช้ควบคู่กับชุดคำสั่ง Tally F1, F2, F4 และ F6 โดยเป็นการคำนวณค่าพลังงานอย่างต่อเนื่องในชุดคำสั่ง ซึ่งประกอบไปด้วยการดูดกลืนนิวตรอน ค่าเฉลี่ยความร้อน (MeV/collision) ผลผลิตของรังสีแกมมา ผลรวมของปฏิกิริยาฟิชชัน ปฏิกิริยาฟิชชัน ν และปฏิกิริยาฟิชชัน Q (MeV/fission) มีรายละเอียดการเขียนชุดคำสั่งดังนี้

FMn	(bin set 1) (bin set 2) T
n	เลข tally ที่ต้องการหาผลการจำลอง
(bin set 1)	((multiplier set 1) (multiplier set 2) ... (attenuator set))
T	ไม่รวมทุกชุดคำสั่ง รวมทุกชุดคำสั่ง
ชุดคำสั่งลดทอน	C -1 m_1 px_1 m_2 px_2
ชุดคำสั่งทวีคูณ	C m (reaction list 1) (reaction list 2)
ชุดคำสั่งทวีคูณพิเศษ	C -k
C	ค่าคงตัวคูณ
-1	ระบุมากกว่าตัวคูณ
m	เลขชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะของสาร
px	ความหนาแน่นของความหนาวัสดุ ถ้าความหนาแน่นเชิงอะตอมให้เป็นบวก ความหนาแน่นเชิงมวลให้เป็นลบ
k	ตัวคูณพิเศษ
(reaction list i)	ผลรวมและผลผลิตของ ENDF หรือตัวเลขปฏิกิริยาพิเศษ
ถ้า C เป็นเครื่องหมายลบแสดงว่าเป็นการคำนวณใน Tally F4 เท่านั้น	

เมื่อนำมาเขียนในแบบจำลองจะได้ชุดคำสั่งดังต่อไปนี้

FM4 -1 1 102


```

nps 5e8
mode:n
ssr
f2:n 2 7
f4:n 50 60 70 80 90 400 401 402 403 4001 4000
FM -1 1 102
e2 1e-6 1 10
e4 1e-6 1 10
c Material Data Cards
m1      79197.70c      -1.00      $ Au
m2      12024.70c      4.8094E-004      12025.70c      6.0887E-005      $ Al
        12026.70c      6.7036E-005      13027.92c      5.9305E-002
        14028.70c      3.2398E-004      14029.70c      1.6404E-005
        14030.70c      1.0889E-005      22046.70c      1.3731E-006
        22047.70c      1.2530E-006      22048.70c      1.2667E-005
        22049.70c      9.4400E-007      22050.70c      9.2684E-007
        24050.70c      2.1984E-006      24052.70c      4.2395E-005
        24053.70c      4.8067E-006      24054.70c      1.1966E-006
        25055.70c      1.4965E-005      26054.70c      5.9062E-006
        26056.70c      9.1816E-005      26057.70c      2.1022E-006
        26058.70c      2.8029E-007      29063.70c      6.0351E-005
        29065.70c      2.6899E-005
m3      8016.70c      3.3322E-002      $ Water
        1001.70c      6.6644E-002

```

ชุดคำสั่ง Tally Multiplier

3.2.2.3 ประมวลผลจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ในแต่ละระดับพลังงาน

นำแบบจำลองแผ่นทองจากหัวข้อที่ 3.2.2 มาเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นทอง โดยมีความหนาตั้งแต่ $5.28\text{E-}04$ ถึง $7.92\text{E-}04$ เซนติเมตร ซึ่งจะได้ไฟล์อินพุตสำหรับประมวลผล 11 ไฟล์ และคำนวณหาความหนาของแผ่นทองสำหรับกำหนดคาร์ดพื้นผิวแต่ละแผ่น ดังตารางที่ 3.2 และเพิ่มชุดคำสั่งระดับพลังงานนิวตรอนแทนที่ชุดคำสั่งระดับพลังงานของจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่ e4 ประมวลผลจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ในเซลล์ 50 และ 4001

ตารางที่ 3.2 จำนวนความหนาเพื่อหาระนาบการตัดเพลท

แผ่นที่	ความหนาของแผ่นทอง (cm.)	ระยะเพลทสำหรับแบ่งช่วงแผ่นทอง (cm.)	
		เพลทที่ 1	เพลทที่ 2
1	5.28E-04	-2.64E-04	2.64E-04
2	5.54E-04	-2.77E-04	2.77E-04
3	5.81E-04	-2.90E-04	2.90E-04
4	6.07E-04	-3.03E-04	3.03E-04
5	6.33E-04	-3.17E-04	3.17E-04
6	6.60E-04	-3.30E-04	3.30E-04
7	6.86E-04	-3.43E-04	3.43E-04
8	7.12E-04	-3.56E-04	3.56E-04
9	7.39E-04	-3.69E-04	3.69E-04
10	7.65E-04	-3.83E-04	3.83E-04
11	7.92E-04	-3.96E-04	3.96E-04

สามารถเขียนชุดคำสั่งที่เพิ่มระดับพลังงานของจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ มีดังนี้

c cell cards

c Au Foil

50 1 -19.3 -1 2 -3 vol=3.10723E-5 imp:n=1 \$ Au Foil

c Irradiation tubes

4001 3 9.9966E-002 -201 103 -202 #50 vol=354.83901 imp:n=1 \$ Inner water

4000 2 6.0535E-002 201 -200 103 -202 imp:n=1 \$ Al tubes

4002 3 9.9966E-002 -30 -11 12 (200:202:-103) vol=845.6018 imp:n=1 \$ Outerwater

c Sphere

1000 0 (30:11:-12) imp:n=0 \$ Cylindrical

c Surface cards

c Irradiation tubes

200 cz 1.9050

201 cz 1.7018

202 pz 19.95

103 pz -19.05

c Au Foil

1 cx 0.35

2 px -2.63884E-04

3 px 2.63884E-04

c Cylindrical

30 cz 3.00

11 pz 30.00

12 pz -30.00

c Run Neutron
nps 5e8
mode:n
ssr
F4:n 50 4001

ชุดคำสั่งระดับพลังงานของ
จำนวนนิวตรอนฟลักซ์

↓

E4	1.00E-09	2.00E-09	5.00E-09	1.00E-08	2.00E-08	5.00E-08	1.00E-07	2.00E-07
	5.00E-07	1.00E-06	2.00E-06	5.00E-06	1.00E-05	2.00E-05	5.00E-05	1.00E-04
	2.00E-04	5.00E-04	1.00E-03	2.00E-03	5.00E-03	1.00E-02	2.00E-02	5.00E-02
	1.00E-01	2.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.00E+00	5.00E+00	1.00E+01	2.00E+01

c Material Data Cards

m1	79197.70c	-1.00	\$ Au		
m2	12024.70c	4.8094E-004	12025.70c	6.0887E-005	\$ Al
	12026.70c	6.7036E-005	13027.92c	5.9305E-002	
	14028.70c	3.2398E-004	14029.70c	1.6404E-005	
	14030.70c	1.0889E-005	22046.70c	1.3731E-006	
	22047.70c	1.2530E-006	22048.70c	1.2667E-005	
	22049.70c	9.4400E-007	22050.70c	9.2684E-007	
	24050.70c	2.1984E-006	24052.70c	4.2395E-005	
	24053.70c	4.8067E-006	24054.70c	1.1966E-006	
	25055.70c	1.4965E-005	26054.70c	5.9062E-006	
	26056.70c	9.1816E-005	26057.70c	2.1022E-006	
	26058.70c	2.8029E-007	29063.70c	6.0351E-005	
	29065.70c	2.6899E-005			
m3	8016.70c	3.3322E-002	\$ Water		
	1001.70c	6.6644E-002			

3.2.2.4 แบ่งช่วงน้ำภายในท่อออบรังสีซีที

นำแบบจำลองในขั้นตอน 3.2.2 มาทำการแบ่งช่วงของน้ำภายในท่อออบรังสีซีที โดยแบบจำลองน้ำมีลักษณะรูปทรงกระบอก อยู่บนระนาบแกน z ทำการแบ่งเป็นทรงกระบอกน้ำเป็นส่วน 5 ส่วนด้วยกัน ให้มีปริมาณเท่าๆกัน เพื่อดูการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันของนิวตรอนกับน้ำของแต่ละส่วน ซึ่งในแต่ละส่วนมีปริมาณ 70.967802 ลบ.ซม. และรัศมีทั้ง ส่วน มีดังนี้ 0.76107, 1.07631, 1.31820, 1.52214 และ 1.70180 เซนติเมตร มีความยาว 39 เซนติเมตร สามารถเขียนเป็นชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวได้ดังนี้

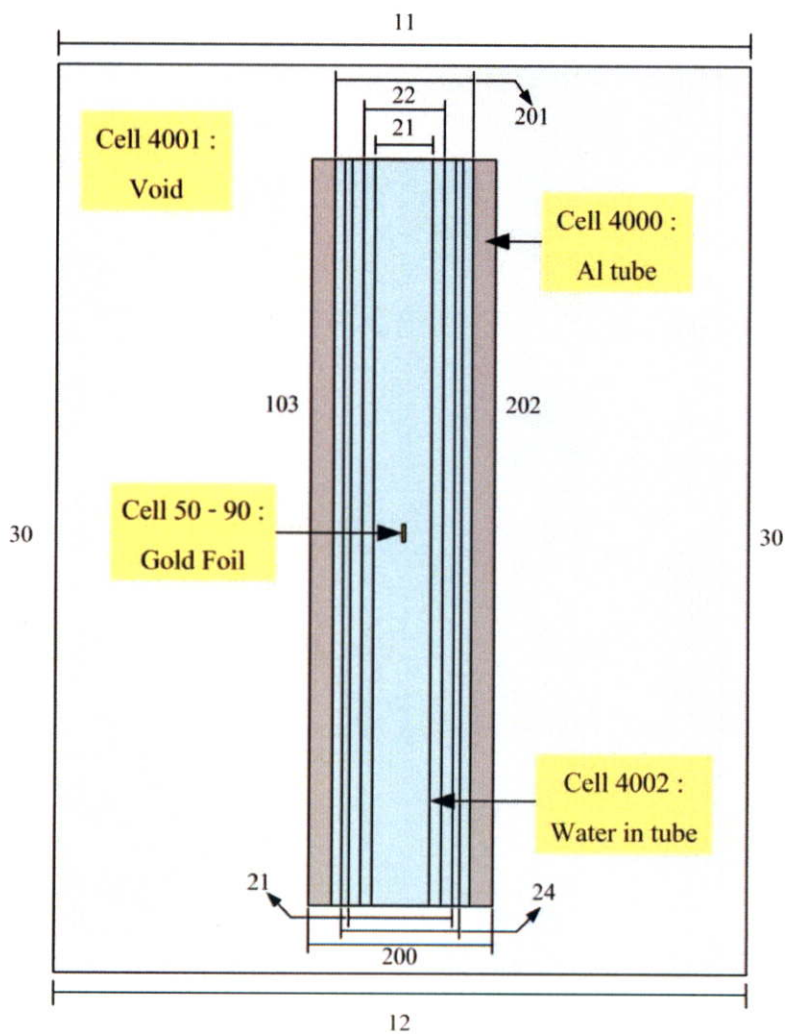
c Surface cards

c Au Foil

1 cx 0.25

\$ Au foil

- 2 px -3.29855E-4
- 3 px 3.29855E-4
- c Irradiation tubes
 - 21 cz 0.76107 \$ inner radius 1
 - 22 cz 1.07631 \$ inner radius 2
 - 23 cz 1.31820 \$ inner radius 3
 - 24 cz 1.52214 \$ inner radius 4
 - 201 cz 1.70180 \$ inner radius 5
- c Upper and Bottom CT tube
 - 27 pz 19.9500 \$ upper plane
 - 28 pz -19.0500 \$ bottom plane



รูปที่ 3.18 ภาพแบบจำลองการแบ่งช่วงน้ำภาพท่ออานรังสีซีที

จากคำสั่งการ์ดพื้นผิวของแบบจำลองของน้ำภายในท่อซีทีอยู่ในการ์ดชุดที่ 21, 22, 23, 24, 201, 27 และ 28 โดยการ์ดชุดที่ 21, 22, 23, 24 และ 201 เป็นรูปทรงกระบอกที่สร้างอยู่บนระนาบแกน z และการ์ดชุดที่ 27 และ 28 เป็นแผ่นเพลทที่ตัดทรงกระบอกในระนาบแกน z ซึ่งจะได้ดังรูปที่ 3.18 และสามารถอธิบายชุดคำสั่งได้ดังนี้

21 cz 0.76107	เลข 21 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 21 โดยกำหนดสร้างทรงกระบอกอนันต์ที่มีขนาดรัศมี 0.76107 เซนติเมตร
22 cz 1.07631	เลข 22 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 22 โดยกำหนดสร้างทรงกระบอกอนันต์ที่มีขนาดรัศมี 1.07631 เซนติเมตร
23 cz 1.31820	เลข 23 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 23 โดยกำหนดสร้างทรงกระบอกอนันต์ที่มีขนาดรัศมี 1.31820 เซนติเมตร
24 cz 1.52214	เลข 24 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 24 โดยกำหนดสร้างทรงกระบอกอนันต์ที่มีขนาดรัศมี 1.52214 เซนติเมตร
201 cz 1.70180	เลข 25 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 201 โดยกำหนดสร้างทรงกระบอกอนันต์ที่มีขนาดรัศมี 1.70180 เซนติเมตร
27 pz 19.9500	เลข 27 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 27 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกทั้ง 5 เลเยอร์ ที่แกน z ตำแหน่ง 19.9500 เซนติเมตร
28 pz -19.0500	เลข 28 คือชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวชุดที่ 28 ซึ่งนำแผ่นเพลทแผ่นที่ 1 ตัดทรงกระบอกทั้ง 5 เลเยอร์ ที่แกน z ตำแหน่ง -19.0500 เซนติเมตร

สามารถเขียนคำสั่งประมวลผล และรูปจากการประมวลผลด้วยโปรแกรม MCNPX ดังรูปที่ 3.19 ก. , 3.19 ข. และ 3.19 ค. ได้ดังนี้

c cell cards		
c Au Foil		
50 1 -19.3 -1 2 -3	vol=1.29534E-5	imp:n=1 \$ Au foil 1
60 1 -19.3 -1 3 -4	vol=1.29534E-5	imp:n=1 \$ Au foil 2
70 1 -19.3 -1 4 -5	vol=1.29534E-5	imp:n=1 \$ Au foil 3
80 1 -19.3 -1 5 -6	vol=1.29534E-5	imp:n=1 \$ Au foil 4
90 1 -19.3 -1 6 -7	vol=1.29534E-5	imp:n=1 \$ Au foil 5
c Irradiation tubes		
400 3 9.9966E-002 -21 103 -202 #50 #60 #70 #80 #90	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR1
401 3 9.9966E-002 21 -22 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR2
402 3 9.9966E-002 22 -23 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR3
403 3 9.9966E-002 23 -24 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR4

```

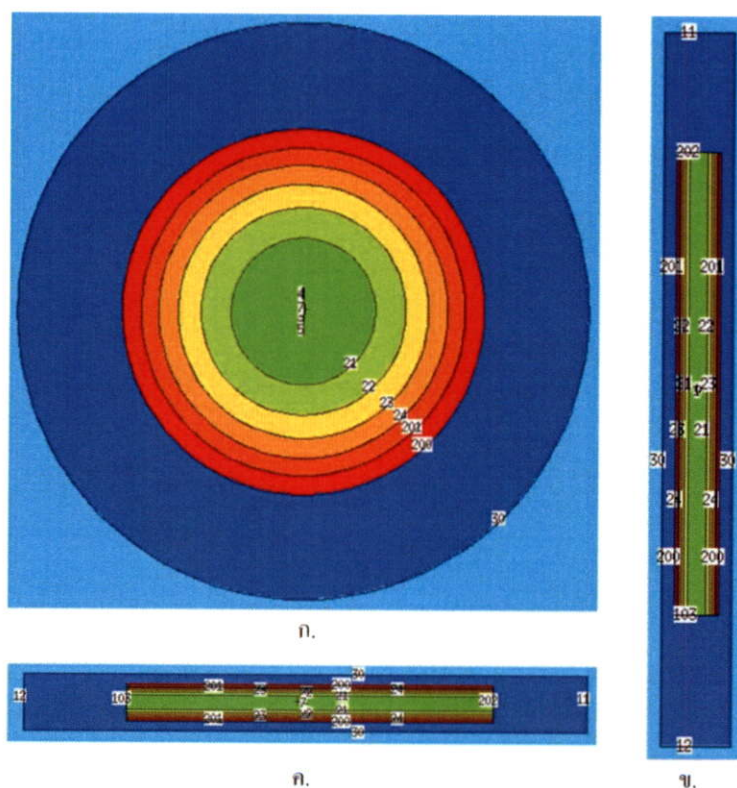
4001 3 9.9966E-002 24 -201 103 -202          vol=70.967802      imp:n=1 $ WIR5
4000 2 6.0535E-002 201 -200 103 -202          imp:n=1 $ Al tube
4002 3 9.9966E-002 -30 -11 12 (200:202:-103)  vol=846.6018      imp:n=1 $ outWater
c Sphere
1000 0 (30:11:-12)          imp:n=0 $ Cylindrical

c Surface cards
c Irradiation tubes
21 cz 0.76107                $ inner radius 1
22 cz 1.07631                $ inner radius 2
23 cz 1.31820                $ inner radius 3
24 cz 1.52214                $ inner radius 4
201 cz 1.70180               $ inner radius 5
200 cz 1.9050                $ outer radius IR
202 pz 19.95                 $ upper plane
103 pz -19.0500              $ bottom plane
c Cylindrical
30 cz 3.00
c Au Foil
1 cx 0.25                    $ Au foil
2 px -3.29855E-04
3 px -1.97913E-04
4 px -6.59710E-05
5 px 6.59710E-05
6 px 1.97913E-04
7 px 3.29855E-04
11 pz 30.00                  $ Top water surface
12 pz -30.00                 $ Bottom water surface
13 pz -0.25
14 pz 0.25

c Run Neutron
nps 5e8
mode:n
ssr
f2:n 2 7
f4:n 50 60 70 80 90
f14:n 4001 403 402 401 400
E0      1.00E-09 2.00E-09 5.00E-09 1.00E-08 2.00E-08 5.00E-08 1.00E-07 2.00E-07
        5.00E-07 1.00E-06 2.00E-06 5.00E-06 1.00E-05 2.00E-05 5.00E-05 1.00E-04
        2.00E-04 5.00E-04 1.00E-03 2.00E-03 5.00E-03 1.00E-02 2.00E-02 5.00E-02
        1.00E-01 2.00E-01 5.00E-01 1.00E+00 2.00E+00 5.00E+00 1.00E+01 2.00E+01

```

c Material Data Cards					
m1	79197.70c	-1.00	\$ Au		
m2	12024.70c	4.8094E-004	12025.70c	6.0887E-005	\$ Al
	12026.70c	6.7036E-005	13027.92c	5.9305E-002	
	14028.70c	3.2398E-004	14029.70c	1.6404E-005	
	14030.70c	1.0889E-005	22046.70c	1.3731E-006	
	22047.70c	1.2530E-006	22048.70c	1.2667E-005	
	22049.70c	9.4400E-007	22050.70c	9.2684E-007	
	24050.70c	2.1984E-006	24052.70c	4.2395E-005	
	24053.70c	4.8067E-006	24054.70c	1.1966E-006	
	25055.70c	1.4965E-005	26054.70c	5.9062E-006	
	26056.70c	9.1816E-005	26057.70c	2.1022E-006	
	26058.70c	2.8029E-007	29063.70c	6.0351E-005	
	29065.70c	2.6899E-005			
	m3	8016.70c	3.3322E-002	\$ Water	
1001.70c		6.6644E-002			



รูปที่ 3.19 ผลการจำลองแผ่นทองคำที่มีน้ำล้อมรอบบนโปรแกรม MCNPX

ก. ผลการจำลองในระนาบ XY

ข. ผลการจำลองในระนาบ YZ

ค. ผลการจำลองในระนาบ ZX

3.2.2.5 เพิ่มชุดคำสั่ง SDn , FSn

จากแบบจำลองแผ่นทองที่สร้างตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.2.2.3 นำมาประยุกต์โดยเพิ่มแผ่นระนาบที่แกน z ขนาด 0.25 เซนติเมตร และเพิ่มชุดคำสั่ง SDn และ FSn ซึ่งทั้งสองชุดข้อมูลที่เพิ่มเข้าไปนั้น ต้องการจำลองการจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นภายในแผ่นทองที่แบ่งช่วงและจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในน้ำภายในท่ออาบรังสีซีที ในช่วงระนาบเดียวกับแผ่นทอง

จากรูปที่ 3.20 เพิ่มแผ่นระนาบ 13 และ 14 ในแกน z เพื่อเป็นระนาบชั่วคราวในการหาจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ภายในน้ำช่วงระนาบทั้งสอง โดยทั้งสองระนาบจะนำมาใช้ควบคู่กับคำสั่ง FSn และ SDn ซึ่งสามารถเขียนคำสั่งในชุดการ์ดคำสั่งดังนี้

13 pz -0.25

14 pz 0.25

การ์ดคำสั่ง FSn และ SDn เป็นการ์ดคำสั่งพิเศษที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณของนิวตรอนฟลักซ์ในพื้นที่นั้นๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

การ์ดคำสั่ง FSn (Tally Segment Card สำหรับใช้ใน tally types 1, 2, 4, 6, 7) จัดอยู่ในการ์ดคำสั่งพิเศษ Tally Specification ทำหน้าที่แบ่งเลขออร์ชั่วคราวเพื่อหาผลการจำลองของแต่ละเลขออร์ รายละเอียดการเขียนคำสั่งมีดังนี้

FSn SI ... Sk

n เลข tally ที่ต้องการหาผลการจำลอง

S แผ่นระนาบที่แบ่งเลขออร์บนแผ่นจำลอง

เมื่อนำมาเขียนในแบบจำลองแผ่นทองเขียนได้ดังนี้

FS 14 -13 -14 T

FS14 คำนวณหาจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นที่ tally 14

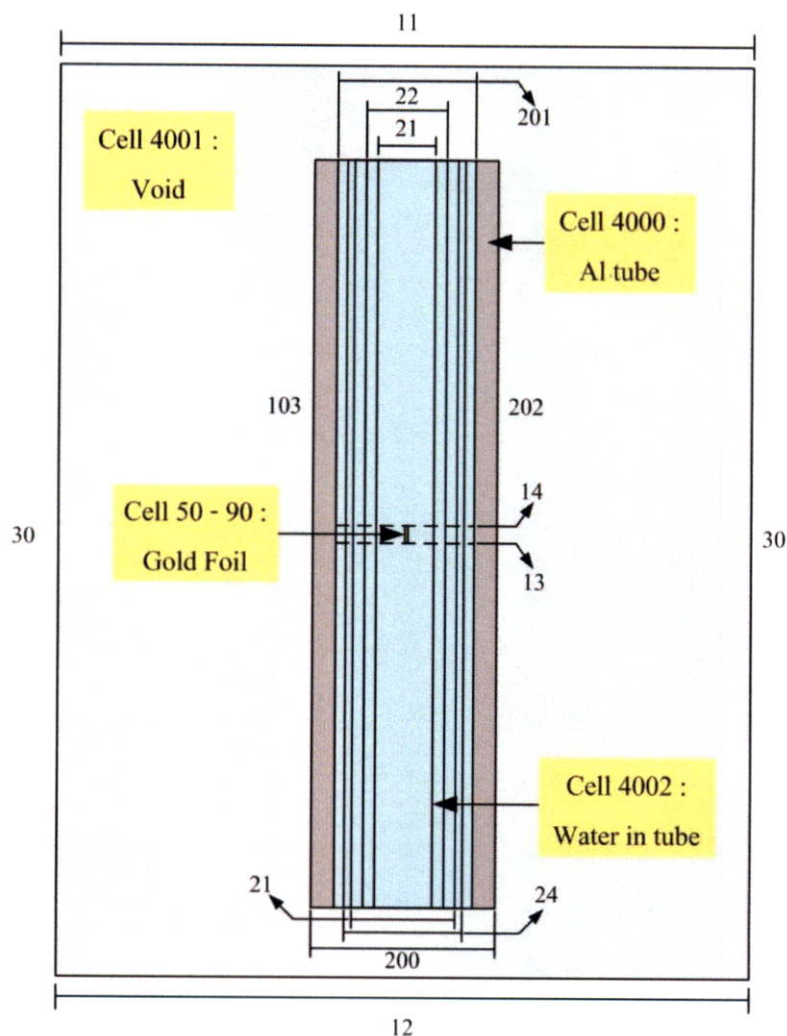
-13 หาจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่อยู่ในระนาบ 13

-14 หาจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่อยู่ในระนาบ 14

T หาจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์การ์ดที่กำหนดไว้ใน tally 14

เมื่อแบ่งเลขออร์ชั่วคราวในแบบจำลองแผ่นทอง ขั้นตอนต่อมาคำนวณหาปริมาตรพื้นที่แต่ละเลขออร์เพื่อนำมาใช้ในการ์ดคำสั่ง SDn ซึ่งมีรายละเอียดของการ์ดดังนี้

การ์ดคำสั่ง SDn (Segment Divisor Card สำหรับใช้ใน tally types 1, 2, 4, 6, 7) จัดอยู่ในการ์ดคำสั่งพิเศษ Tally Specification ใช้ควบคู่กับการ์ดคำสั่งพิเศษที่ขึ้นต้นด้วย F ทำหน้าที่บอกปริมาตร หรือ พื้นที่ภายใน เซลล์และพื้นผิว ของสิ่งที่สนใจ รายละเอียดการเขียนคำสั่งดังนี้



รูปที่ 3.20 แบบจำลองท่ออบรังสีซีทีที่เพิ่มแผ่นระนาบ 13 และ 14

SD_n	$(D11 D12 \dots D1m) (D21 D22 \dots D2m) \dots (Dk1 Dk2 \dots Dkm)$
n	เลข tally ที่ต้องการบอกปริมาตร พื้นที่ หรือ พื้นที่ผิว
k	หมายเลขของเซลล์การ์ด/การ์ดพื้นที่ บน tally F_n และผลรวมปริมาตรทั้งหมด T
m	จำนวนเลเยอร์ที่ถูกแบ่งบนการ์ดคำสั่ง FS_n และผลรวมปริมาตรทั้งหมดของเลเยอร์ T
D_{ij}	พื้นที่, ปริมาตร หรือมวลของ j_{ih} เรียงตามแนวเมตริก i_{ih} ซึ่งต้องสังเกตว่าเป็นเซลล์การ์ด หรือการ์ดพื้นที่ ของ tally ไດ

เมื่อนำมาเขียนในแบบจำลองแผ่นทองเขียนได้ดังนี้

SD14 34.2095 0.90983 35.84713 354.8391
 34.2122 0.90989 35.84997 354.8391
 34.2092 0.90982 35.84682 354.8391

34.2096 0.90983 35.84729 354.8391

34.2103 0.90972 35.84803 354.8391

SD14 บอกริมาตรพื้นที่/พื้นผิว ของ tally 14

34.2095 0.90983 35.84713 354.8391 บอกริมาตรช่วงของน้ำที่เซลล์ 4001 โดยเริ่ม
เรียงปริมาตรจากใต้ระนาบ 13 , ระหว่างระนาบ 13 และ 14 , เหนือระนาบ 14 และปริมาตรของน้ำ
ภายในท่ออับรังสีซีทีทั้งหมด

34.2122 0.90989 35.84997 354.8391 บอกริมาตรช่วงของน้ำที่เซลล์ 403

34.2092 0.90982 35.84682 354.8391 บอกริมาตรช่วงของน้ำที่เซลล์ 402

34.2096 0.90983 35.84729 354.8391 บอกริมาตรช่วงของน้ำที่เซลล์ 401

34.2103 0.90972 35.84803 354.8391 บอกริมาตรช่วงของน้ำที่เซลล์ 400

สามารถเขียนชุดคำสั่งสำหรับประมวลผลได้ดังนี้

c cell cards		
c Au Foil		
50 1 -19.3 -1 2 -3	vol=1.29534E-5	imp:n=1 \$ Au foil 1
60 1 -19.3 -1 3 -4	vol=1.29534E-5	imp:n=1 \$ Au foil 2
70 1 -19.3 -1 4 -5	vol=1.29534E-5	imp:n=1 \$ Au foil 3
80 1 -19.3 -1 5 -6	vol=1.29534E-5	imp:n=1 \$ Au foil 4
90 1 -19.3 -1 6 -7	vol=1.29534E-5	imp:n=1 \$ Au foil 5
c Irradiation tubes		
400 3 9.9966E-002 -21 103 -202 #50 #60 #70 #80 #90	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR1
401 3 9.9966E-002 21 -22 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR2
402 3 9.9966E-002 22 -23 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR3
403 3 9.9966E-002 23 -24 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR4
4001 3 9.9966E-002 24 -201 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR5
4000 2 6.0535E-002 201 -200 103 -202		imp:n=1 \$ Al tube
4002 3 9.9966E-002 -30 -11 12 (200:202:-103)	vol=846.6018	imp:n=1 \$ outWater
c Sphere		
1000 0 (30:11:-12)	imp:n=0	\$ Cylindrical
c Surface cards		
c Irradiation tubes		
21 cz 0.76107		\$ inner radius 1
22 cz 1.07631		\$ inner radius 2
23 cz 1.31820		\$ inner radius 3
24 cz 1.52214		\$ inner radius 4
201 cz 1.70180		\$ inner radius 5
200 cz 1.9050		\$ outer radius IR

```

202 pz 19.95          $ upper plane
103 pz -19.0500      $ bottom plane
c Cylindrical
30 cz 3.00
c Au Foil
1 cx 0.25            $ Au foil
2 px -3.29855E-04
3 px -1.97913E-04
4 px -6.59710E-05
5 px 6.59710E-05
6 px 1.97913E-04
7 px 3.29855E-04
11 pz 30.00         $ Top water surface
12 pz -30.00        $ Bottom water surface
13 pz -0.25
14 pz 0.25

c Run Neutron
nps 5e8
mode:n
ssr
f2:n 2 7
f4:n 50 60 70 80 90
f14:n 4001 403 402 401 400
fs      14 -13 -14 T

sd14  34.2095 0.90983 35.84713 354.8391
      34.2122 0.90989 35.84997 354.8391
      34.2092 0.90982 35.84682 354.8391
      34.2096 0.90983 35.84729 354.8391
      34.2103 0.90972 35.84803 354.8391

E0      1.00E-09 2.00E-09 5.00E-09 1.00E-08 2.00E-08 5.00E-08 1.00E-07 2.00E-07
      5.00E-07 1.00E-06 2.00E-06 5.00E-06 1.00E-05 2.00E-05 5.00E-05 1.00E-04
      2.00E-04 5.00E-04 1.00E-03 2.00E-03 5.00E-03 1.00E-02 2.00E-02 5.00E-02
      1.00E-01 2.00E-01 5.00E-01 1.00E+00 2.00E+00 5.00E+00 1.00E+01 2.00E+01

c Material Data Cards
m1      79197.70c      -1.00          $ Au
m2      12024.70c      4.8094E-004    12025.70c      6.0887E-005    $ Al
      12026.70c      6.7036E-005    13027.92c      5.9305E-002
      14028.70c      3.2398E-004    14029.70c      1.6404E-005
      14030.70c      1.0889E-005    22046.70c      1.3731E-006
      22047.70c      1.2530E-006    22048.70c      1.2667E-005
    
```

sd14	34.2095	0.90983	35.84713	354.8391
	34.2122	0.90989	35.84997	354.8391
	34.2092	0.90982	35.84682	354.8391
	34.2096	0.90983	35.84729	354.8391
	34.2103	0.90972	35.84803	354.8391

ชุดคำสั่ง SDn , FSn ที่เพิ่มใน
ชุดคำสั่งประมวลผล



	22049.70c	9.4400E-007	22050.70c	9.2684E-007
	24050.70c	2.1984E-006	24052.70c	4.2395E-005
	24053.70c	4.8067E-006	24054.70c	1.1966E-006
	25055.70c	1.4965E-005	26054.70c	5.9062E-006
	26056.70c	9.1816E-005	26057.70c	2.1022E-006
	26058.70c	2.8029E-007	29063.70c	6.0351E-005
	29065.70c	2.6899E-005		
m3	8016.70c	3.3322E-002	\$ Water	
	1001.70c	6.6644E-002		

3.2.2.6 สร้างแบบจำลองแผ่นทองหุ้มด้วยคลัทช์แคดเมียม เพื่อทดสอบการดูดกลืนเทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์

นำแบบจำลองในขั้นตอนที่ 3.2.2 มาประยุกต์ใช้โดยการสร้างคลัทช์แคดเมียมหุ้มแผ่นทอง กำหนดให้ขนาดของคลัทช์แคดเมียมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.98 เซนติเมตร หนา 0.235 เซนติเมตร และกำหนดขนาดของน้ำที่ล้อมรอบแผ่นทองในคลัทช์แคดเมียมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.76 เซนติเมตร หนา 0.2136 เซนติเมตร สามารถเขียนคำสั่งในชุดการ์ดพีเอ็นพี, การ์ดคำสั่งจำเพาะของแคดเมียมและรูปแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.21

c Water in Cd

31 cx 0.4793

32 px -0.1068

33 px 0.1068

c Cd cover

41 cx 0.4900

42 px -0.1175

43 px 0.1175

c Material Data Cards

m4 48106.70c -0.0125 48108.70c -0.0089 \$ Cd

48110.70c -0.1249 48111.70c -0.1280

48112.70c -0.2413 48113.70c -0.1222

48114.70c -0.2873 48116.70c -0.0749

เมื่อกำหนดขนาดของคลัทช์แคดเมียมแล้วนำมาเขียนในเซลล์การ์ดกำหนดให้คลัทช์แคดเมียมเป็น cell 62 และน้ำที่อยู่ภายในคลัทช์แคดเมียมเป็น cell 61 สามารถเขียนคำสั่งได้ดังนี้

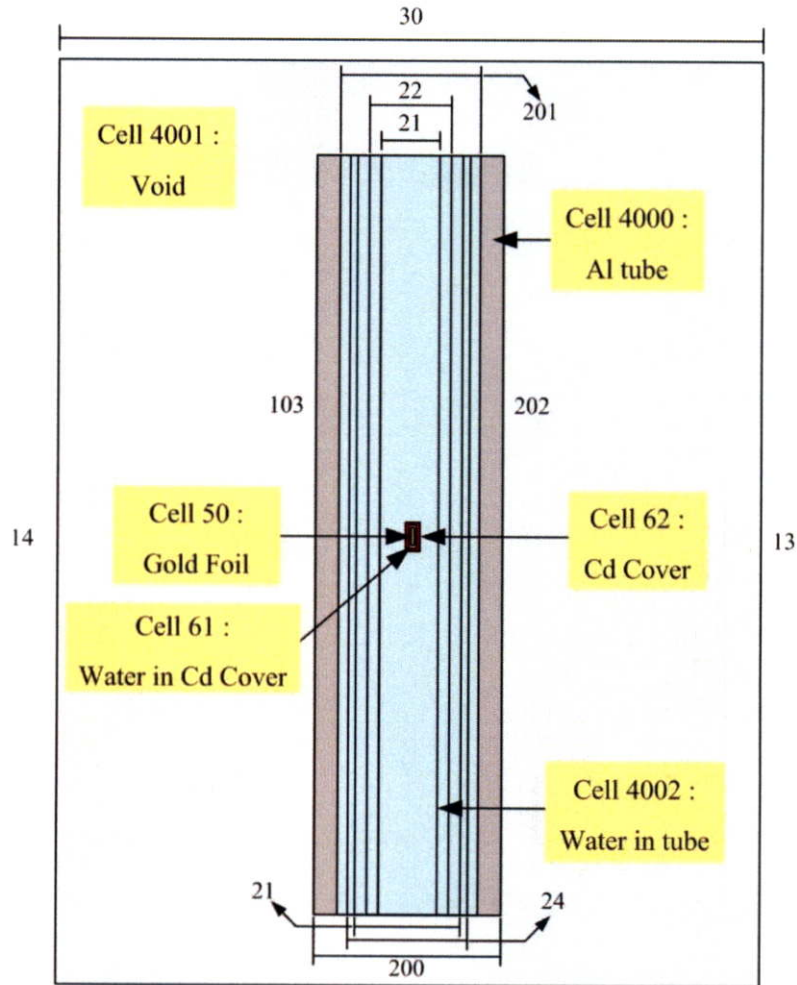
c Cd cover

61 3 9.99966E-002 -31 32 -33 #50 vol=0.15416

imp:n=1 \$ Water in Cd

62 4 -8.65 -41 42 -43 #50 #61 vol=0.023102

imp:n=1 \$ Cd



รูปที่ 3.21 ภาพแบบจำลองแผ่นทองหุ้มแคดเมียมภายในท่ออบรังสีซีที

สามารถเขียนคำสั่งประมวลผล และรูปจากการประมวลผลด้วยโปรแกรม MCNPX ดังรูป
ที่ 3.22 ก. , 3.22 ข. และ 3.22 ค. ได้ดังนี้

c cell cards		
c Au Foil		
50 1 -19.3 -1 2 -3	vol=1.29534E-5	imp:n=1 \$ Au foil 1
c Cd cover		
61 3 9.99966E-002 -31 32 -33 #50	vol=0.15416	imp:n=1 \$ Water in Cd
62 4 -8.65 -41 42 -43 #50 #61	vol=0.023102	imp:n=1 \$ Cd
c Irradiation tubes		
400 3 9.9966E-002 -21 103 -202 #50 #61 #62	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR1
401 3 9.9966E-002 21 -22 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR2
402 3 9.9966E-002 22 -23 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR3
403 3 9.9966E-002 23 -24 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR4
4001 3 9.9966E-002 24 -201 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR5
4000 2 6.0535E-002 201 -200 103 -202		imp:n=1 \$ Al tube

```

4002 3 9.9966E-002 -30 -91 92 (200:202:-103) vol=846.6018      imp:n=1 $ outWater
c Sphere
1000 0      (30:91:-92)                                     imp:n=0 $ Cylindrical

c Surface cards
c Irradiation tubes
21 cz 0.76107      $ inner radius 1
22 cz 1.07631      $ inner radius 2
23 cz 1.31820      $ inner radius 3
24 cz 1.52214      $ inner radius 4
201 cz 1.70180     $ inner radius 5
200 cz 1.9050      $ outer radius IR
202 pz 19.95       $ upper plane
103 pz -19.0500    $ bottom plane

c Cylindrical
30 cz 3.00

c Au Foil
1 cx 0.25
2 px -2.96869E-04
3 px 2.96869E-04

c Water in Cd
31 cx 0.4793
32 px -0.1068
33 px 0.1068
c Cd cover
41 cx 0.4900
42 px -0.1175
43 px 0.1175

c Cylindrical
91 pz 30.00      $ Top water surface
92 pz -30.00     $ Bottom water surface

c Run Neutron
nps 5e8
mode:n
ssr
f2:n 2 3
sd2 0.19635 0.19635
fl2:n 32 33 42 43
sd12 0.7217 0.7217 0.7543 0.7543
f4:n 50
fl4:n 4001 403 402 401 400

```

จุดคำสั่งกลับแคดเมียม
หากต้องการเปลี่ยนขนาดให้เปลี่ยน
แทนที่ c Cd cover เป็นต้นไป



f24:n 61 62							
E0	1.00E-09	2.00E-09	5.00E-09	1.00E-08	2.00E-08	5.00E-08	1.00E-07 2.00E-07
	5.00E-07	1.00E-06	2.00E-06	5.00E-06	1.00E-05	2.00E-05	5.00E-05 1.00E-04
	2.00E-04	5.00E-04	1.00E-03	2.00E-03	5.00E-03	1.00E-02	2.00E-02 5.00E-02
	1.00E-01	2.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.00E+00	5.00E+00	1.00E+01 2.00E+01
c Material Data Cards							
m1	79197.70c	-1.00	\$ Au				
m2	12024.70c	4.8094E-004	12025.70c	6.0887E-005	\$ Al		
	12026.70c	6.7036E-005	13027.92c	5.9305E-002			
	14028.70c	3.2398E-004	14029.70c	1.6404E-005			
	14030.70c	1.0889E-005	22046.70c	1.3731E-006			
	22047.70c	1.2530E-006	22048.70c	1.2667E-005			
	22049.70c	9.4400E-007	22050.70c	9.2684E-007			
	24050.70c	2.1984E-006	24052.70c	4.2395E-005			
	24053.70c	4.8067E-006	24054.70c	1.1966E-006			
	25055.70c	1.4965E-005	26054.70c	5.9062E-006			
	26056.70c	9.1816E-005	26057.70c	2.1022E-006			
	26058.70c	2.8029E-007	29063.70c	6.0351E-005			
	29065.70c	2.6899E-005					
m3	8016.70c	3.3322E-002	\$ Water				
	1001.70c	6.6644E-002					
m4	48106.70c	-0.0125	48108.70c	-0.0089	\$ Cd		
	48110.70c	-0.1249	48111.70c	-0.1280			
	48112.70c	-0.2413	48113.70c	-0.1222			
	48114.70c	-0.2873	48116.70c	-0.0749			

นอกจากนี้สร้างแบบจำลองตลับแคดเมียมที่มีความหนาเพิ่มขึ้น 10% และลดลง 10% เพื่อดู
กระทบที่เกิดขึ้นในการดูดกลืนเทอร์มินิวตรอนฟลักซ์ โดยกำหนดให้ตลับแคดเมียมมีขนาดดังนี้

- ตลับแคดเมียมที่มีความหนาเพิ่มขึ้น 10% มีความหนา 0.2585 เซนติเมตร

- ตลับแคดเมียมที่มีความหนาลดลง 10% มีความหนา 0.2115 เซนติเมตร

สามารถกำหนดชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวได้ดังนี้

c Cd cover max

c Cd cover min

41 cx 0.4900

41 cx 0.4900

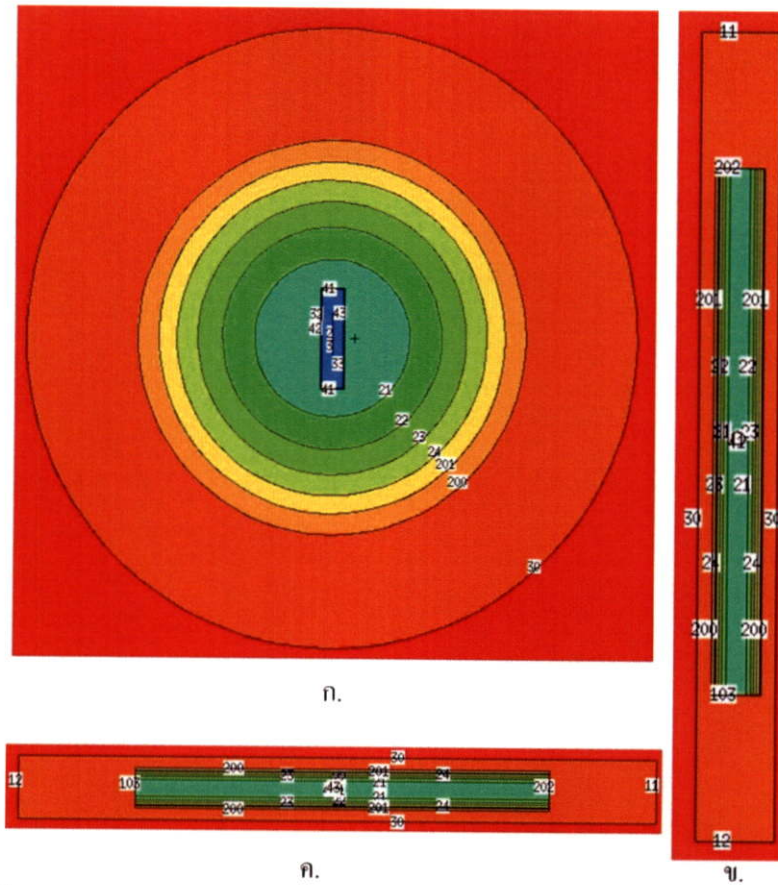
42 px -0.12925

42 px -0.1080

43 px 0.12925

43 px 0.1080

โดยนำคำสั่งการ์ดพื้นผิวข้างต้นไปแทนที่คำสั่งเดิมและทำการประมวลผลบนโปรแกรม
MCNPX ต่อไป



รูปที่ 3.22 ผลการจำลองแผ่นทองคำหุ้มด้วยดลัมแคดเมียมบนโปรแกรม MCNPX

ก. ผลการจำลองในระนาบ XY

ข. ผลการจำลองในระนาบ YZ

ค. ผลการจำลองในระนาบ ZX

3.2.2.7 สร้างแบบจำลองแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อหาค่านิวตรอนเร็วฟลักซ์

นำแบบจำลองในขั้นตอนที่ 3.2.2 มาประยุกต์ใช้โดยการสร้างแผ่นอะลูมิเนียม แทนที่แผ่นทอง กำหนดให้มีความกว้าง 1.01 ซม. ยาว 1.01 ซม. และหนา 0.115 ซม. สามารถเขียนคำสั่งในชุดการ์ดพื้นผิวและรูปแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.23

ชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิว

C Al

1 px 0.0575

\$ Al foil

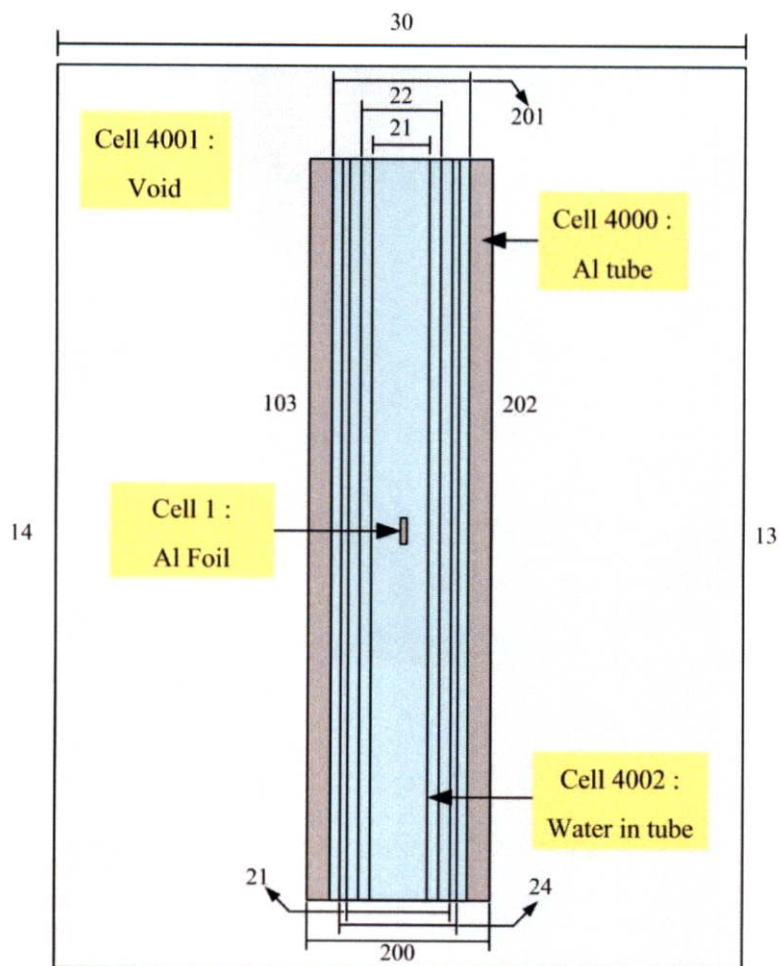
2 px -0.0575

3 py 0.5050

4 py -0.5050

5 pz 0.5050

6 pz -0.5050



รูปที่ 3.23 ภาพแบบจำลองแผ่นอะลูมิเนียมภายในท่ออบรังสีซีที

เมื่อกำหนดขนาดของแผ่นอะลูมิเนียมได้แล้วนำมาสร้างเซลล์แผ่นอะลูมิเนียมในชุดคำสั่งเซลล์การ์ด โดยกำหนดให้เซลล์การ์ดของแผ่นอะลูมิเนียมเป็น cell 1 สามารถเขียนชุดคำสั่งได้ดังนี้

c Cell Card

1 1 -2.70 -1 2 -3 4 -5 6 vol=0.1173 imp:n=1 \$ Al Foil

สามารถเขียนคำสั่งชุดประมวลผลบนโปรแกรม MCNPX และได้รูปจากการประมวลผลดังรูปที่ 3.24 ก. , 3.24 ข. และ 3.24 ค.

c cell cards		
c Al Foil		
1 1 -2.70 -1 2 -3 4 -5 6	vol=0.1173	imp:n=1 \$ Al Foil
c Irradiation tubes		
400 2 9.9966E-002 -21 103 -202 #01	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR1
401 2 9.9966E-002 21 -22 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR2
402 2 9.9966E-002 22 -23 103 -202	vol=70.967802	imp:n=1 \$ WIR3

```

403 2 9.9966E-002 23 -24 103 -202          vol=70.967802      imp:n=1 $ WIR4
4001 2 9.9966E-002 24 -201 103 -202      vol=70.967802      imp:n=1 $ WIR5
4000 1 6.0535E-002 201 -200 103 -202      imp:n=1 $ Al tube
4002 2 9.9966E-002 -30 -31 32 (200:202:-103) vol=846.6018  imp:n=1 $ outWater

c Sphere
1000 0 (30:31:-32)                          imp:n=0 $ Cylindrical
    
```

c Surface cards

c Irradiation tubes

```

21 cz 0.76107          $ inner radius 1
22 cz 1.07631          $ inner radius 2
23 cz 1.31820          $ inner radius 3
24 cz 1.52214          $ inner radius 4
201 cz 1.70180         $ inner radius 5
200 cz 1.9050          $ outer radius IR
202 pz 19.95           $ upper plane
103 pz -19.0500        $ bottom plane
    
```

c Cylindrical

```
30 cz 3.00
```

c Al

```

1 px 0.0575
2 px -0.0575
3 py 0.5050
4 py -0.5050
5 pz 0.5050
6 pz -0.5050
    
```

\$ Al foil

ชุดคำสั่งแผ่นอะลูมิเนียม
หากต้องการเปลี่ยนขนาดให้เปลี่ยน
แทนที่ c Al เป็นต้นไป

c Cylindrical

```

31 pz 30.00          $ Top water surface
32 pz -30.00         $ Bottom water surface
    
```

c Run Neutron

nps 5e8

mode:n

ssr

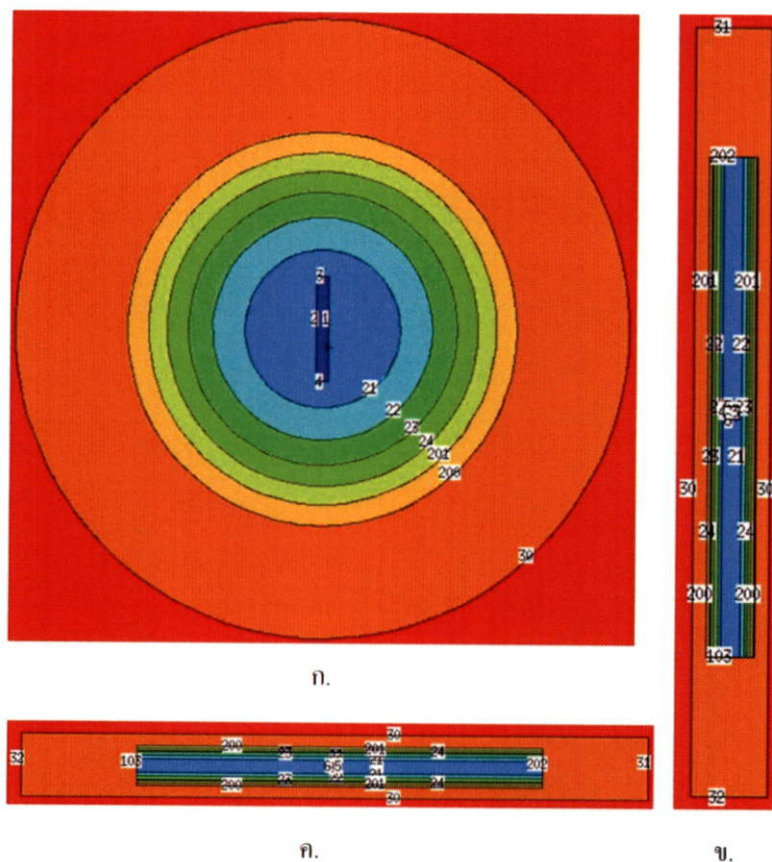
f4:n 1

f14:n 4001 403 402 401 400

```

e0      1.00E-09  2.00E-09  5.00E-09  1.00E-08  2.00E-08  5.00E-08  1.00E-07  2.00E-07
        5.00E-07  1.00E-06  2.00E-06  5.00E-06  1.00E-05  2.00E-05  5.00E-05  1.00E-04
        2.00E-04  5.00E-04  1.00E-03  2.00E-03  5.00E-03  1.00E-02  2.00E-02  5.00E-02
        1.00E-01  2.00E-01  5.00E-01  1.00E+00  2.00E+00  5.00E+00  1.00E+01  2.00E+01
    
```

c Material Data Cards					
m1	12024.70c	4.8094E-004	12025.70c	6.0887E-005	\$ Al
	12026.70c	6.7036E-005	13027.92c	5.9305E-002	
	14028.70c	3.2398E-004	14029.70c	1.6404E-005	
	14030.70c	1.0889E-005	22046.70c	1.3731E-006	
	22047.70c	1.2530E-006	22048.70c	1.2667E-005	
	22049.70c	9.4400E-007	22050.70c	9.2684E-007	
	24050.70c	2.1984E-006	24052.70c	4.2395E-005	
	24053.70c	4.8067E-006	24054.70c	1.1966E-006	
	25055.70c	1.4965E-005	26054.70c	5.9062E-006	
	26056.70c	9.1816E-005	26057.70c	2.1022E-006	
	26058.70c	2.8029E-007	29063.70c	6.0351E-005	
	29065.70c	2.6899E-005			
m2	8016.70c	3.3322E-002	1001.70c	6.6644E-002	\$ Water



รูปที่ 3.24 ผลการจำลองแผ่นอะลูมิเนียมบน โปรแกรม MCNPX

ก. ผลการจำลองในระนาบ XY

ข. ผลการจำลองในระนาบ YZ

ค. ผลการจำลองในระนาบ ZX

นอกจากนี้สร้างแบบจำลองแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาเพิ่มขึ้น 20% และลดลง 20% เพื่อดูกระทบที่เกิดขึ้นในการนับวัดนิวตรอนเร็วฟลักซ์ โดยกำหนดให้แผ่นอะลูมิเนียมมีขนาดดังนี้

- แผ่นอะลูมิเนียม มีความหนาเพิ่มขึ้น 20% มีค่าเท่ากับ 0.138 ซม.

c Al

1 px 0.0690 \$ Al foil

2 px -0.0690

3 py 0.5050

4 py -0.5050

5 pz 0.5050

6 pz -0.5050

- แผ่นอะลูมิเนียม มีความหนาลดลง 20% มีค่าเท่ากับ 0.092 ซม.

c Al

1 px 0.0460 \$ Al foil

2 px -0.0460

3 py 0.5050

4 py -0.5050

5 pz 0.5050

6 pz -0.5050

โดยนำชุดคำสั่งข้างต้นแทนที่ให้ชุดคำสั่งการ์ดพื้นผิวและทำการประมวลผลศึกษาผลกระทบต่อไป

3.2.2.8 สร้างแบบจำลองตามขนาดการทดลองวัดนิวตรอนฟลักซ์

เมื่อศึกษาการประมวลผลแบบจำลองในกรณีต่างๆ ไปแล้วนั้นขั้นต่อไปทำการประมวลผลแบบจำลองเหมือนการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในท่ออาบรังสีซีที โดยนำขนาดและน้ำหนักของวัสดุของผลการทดลองปี 2555 และ ปี 2556 มาใช้สร้างแบบจำลองและประมวลผลต่อไป

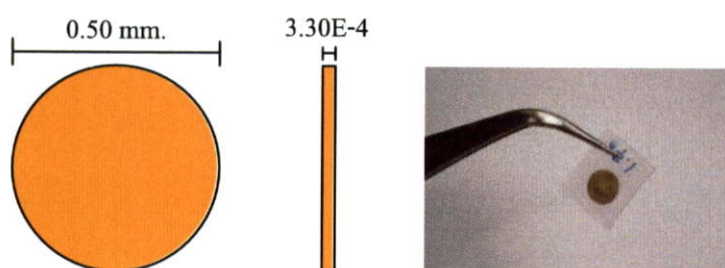
ปี 2555 แผ่นทองแผ่นที่ 1 น้ำหนัก 2.67 กรัม แผ่นทองแผ่นที่ 2 (หุ้มคลัทช์แคดเมียม) น้ำหนัก 2.25 กรัม และแผ่นอะลูมิเนียม 0.2786 กรัม

ปี 2556 แผ่นทองแผ่นที่ 1 น้ำหนัก 1.60 กรัม แผ่นทองแผ่นที่ 2 (หุ้มคลัทช์แคดเมียม) น้ำหนัก 1.70 กรัม และแผ่นอะลูมิเนียม 0.2765 กรัม

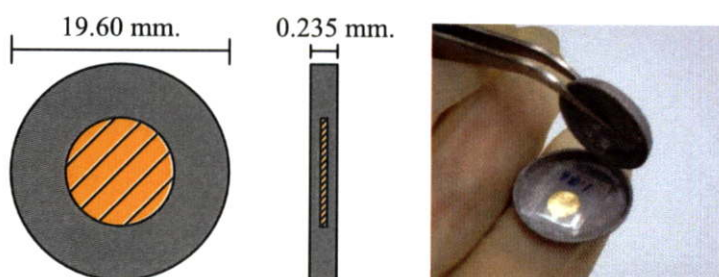
นำผลจากการประมวลบนโปรแกรม MCNPX มาคำนวณ และเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับผลการทดลองภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ต่อไป

3.3 วิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดย Gold foil activation

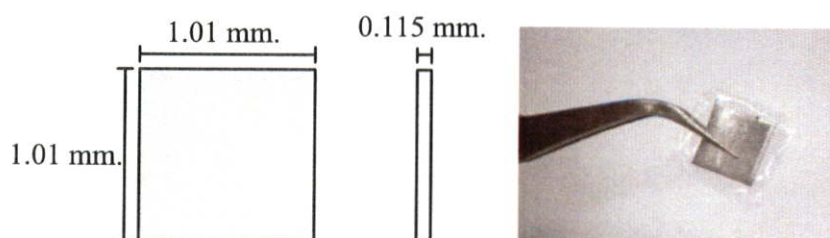
การสร้างแบบจำลองวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยแผ่นทองในขั้นแรกต้องทราบรัศมีของแผ่นทอง และน้ำหนักของแผ่นทองก่อน ด้วยการนำไปชั่งแบบเครื่องชั่งแบบดิจิตอล และวัดด้วยเวอร์เนีย จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าความหนาของแผ่นทองเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง การวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยวิธีการ Gold foil activation เป็นวิธีการวัดโดยการใส่แผ่นฟอยล์ทองคำชนิดบางในการวัดเทอร์มัลนิวตรอน ดังรูปที่ 3.25, ใช้แผ่นทองคำบางโดยหุ้มด้วยคลัทช์แคดเมียมในการวัดอีพิเทอร์มัลนิวตรอน ดังรูปที่ 3.26 และใช้แผ่นอะลูมิเนียมขนาดเล็กวัดนิวตรอนเร็ว ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.25 ขนาดแผ่นฟอยล์ทองคำ ที่ใช้ในการวัดเทอร์มัลนิวตรอน



รูปที่ 3.26 ขนาดแผ่นของฟอยล์ทองคำและคลัทช์แคดเมียม ที่ใช้วัดอีพิเทอร์มัลนิวตรอน



รูปที่ 3.27 ขนาดแผ่นอะลูมิเนียม ที่ใช้วัดนิวตรอนเร็ว

3.3.1 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับวัดนิวตรอนฟลักซ์

1. ทองคำ (Au)

ทองคำ เป็นธาตุลำดับที่ 79 ของตารางธาตุ และสัญลักษณ์ของทองคำคือ Au (มาจากภาษาละตินว่า aurum) จัดอยู่ในกลุ่มธาตุโลหะชนิดหนึ่ง ทองคำเป็นธาตุโลหะทรานซิชันสีเหลืองทองมันวาวเนื้ออ่อนนุ่ม สามารถนำมายืดและตีเป็นแผ่นได้ ทองคำไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีส่วนใหญ่ และตารางไอโซโทปของทองคำดูจากในตารางที่ 3.3

ข้อมูลจำเพาะของทองคำ

มวลอะตอม	196.96655 กรัม/โมล
ความหนาแน่น	19.3 กรัม/ซม. ³
จุดหลอมเหลว	1337.33 เคลวิน (1064.18 °C)
จุดเดือด	3129 เคลวิน (2856 °C)
ความต้านทานทางไฟฟ้า (20 °C)	22.14 nΩ · m
การนำความร้อน (300 เคลวิน)	318 W/(m · k)

ตารางที่ 3.3 ตารางไอโซโทปทอง

iso	NA	Half-life	DM	DE(MeV)	DP
¹⁹⁵ Au	syn	186.10 d	ε	0.227	¹⁹⁵ Pt
¹⁹⁶ Au	syn	6.183 d	ε	1.506	¹⁹⁶ Pt
			β ⁻	0.686	¹⁹⁶ Hg
¹⁹⁷ Au	100%	¹⁹⁷ Au เสถียรเมื่อมีนิวตรอน 118			
¹⁹⁸ Au	syn	2.69517 d	β ⁻	1.372	¹⁹⁸ Hg
¹⁹⁹ Au	syn	3.169 d	β ⁻	0.453	¹⁹⁹ Hg

หมายเหตุ :

NA : Natural abundance

DP : Decay product

DM : ผลผลิตจากปฏิกิริยา

Syn : Synthetic radioisotope

DE : Decay energy

2.แคดเมียม (Cadmium : Cd)

แคดเมียมเป็นธาตุลำดับที่ 48 ของตารางธาตุ สัญลักษณ์ของแคดเมียมคือ Cd เป็นธาตุโลหะทรานซิชัน เป็นธาตุที่มีพิษหากได้รับเข้าสู่ร่างกาย นำมาใช้ประโยชน์ในการทำแบตเตอรี่ คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของแคดเมียม คือ ดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนที่มีพลังงานน้อยกว่า 0.4 eV ฉะนั้นจะทำให้สามารถวัดอิมัลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ และนิวตรอนเร็วฟลักซ์ได้ และตารางไอโซโทปของแคดเมียมดูจากในตารางที่ 3.4

ข้อมูลจำเพาะของทองคำ

มวลอะตอม	112.411 กรัม/โมล
ความหนาแน่น	8.65 กรัม/ซม. ³
จุดหลอมเหลว	594.22 K (321.07 °C)
จุดเดือด	1040 K (767 °C)
ความต้านทานทางไฟฟ้า (22 °C)	72.7 nΩ · m
การนำความร้อน (300 K)	96.6 W/(m · k)

ตารางที่ 3.4 ตารางไอโซโทปแคดเมียม

iso	NA	Half-life	DM	DE(MeV)	DP
¹¹⁰ Cd	12.49%	Cd เสถียร โดยมี 62 นิวตรอน			
¹¹¹ Cd	12.8%	Cd เสถียร โดยมี 63 นิวตรอน			

3.อะลูมิเนียม (Aluminum : Al)

อะลูมิเนียมเป็นธาตุลำดับที่ 13 ของตารางธาตุ สัญลักษณ์ของอะลูมิเนียมคือ Al มีลักษณะมันวาวและอ่อนดัดง่าย มีคุณสมบัติเด่นคือ แข็งแรง, น้ำหนักเบา และต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากชั้นออกไซด์ป้องกัน อะลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่ทำให้เกิดประกายไฟ คุณสมบัติไอโซโทปของอะลูมิเนียมดูจากในตารางที่ 3.5

ข้อมูลจำเพาะ

มวลอะตอม	26.98153 กรัม/โมล
ความหนาแน่น	2.70 กรัม/ซม. ³
จุดหลอมเหลว	933.47 K (1064.18 °C)
จุดเดือด	2792 K (2856 °C)
ความต้านทานทางไฟฟ้า (20 °C)	26.50 nΩ · m
การนำความร้อน (300 K)	23.1 W/(m · k)

ตารางที่ 3.5 ไอโซโทปของอะลูมิเนียม

iso	NA	Half-life	DM	DE(MeV)	DP
²⁶ Al	syn	7.17×10 ⁵ y	β^+	1.17	²⁶ Mg
			ϵ	-	²⁶ Mg
			γ	1.8086	-
²⁷ Al	100%	Al เสถียร โดยมี 14 นิวตรอน			

3.3.2 วิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยแผ่นทอง ตลับแคดเมียม และแผ่นอะลูมิเนียม ภายในท่ออารังสีซีที

การทดลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์สิ่งที่สำคัญที่สุดในการทดลองคือ การเตรียมวัสดุสำหรับทดลอง หากมีความผิดพลาดในขนาดหรือน้ำหนักจะให้เป็นอันตรายต่อเครื่องปฏิกรณ์ และผู้ทดลอง ดังนั้นก่อนที่จะทำการทดลองควรตรวจสอบ และศึกษาให้มั่นใจว่าวัสดุชิ้นนั้นๆ จะมีส่งผลเสียต่อเครื่องปฏิกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการทดลองวัดนิวตรอนฟลักซ์

1. แผ่นทองคำ
2. ตลับแคดเมียม
3. แผ่นอะลูมิเนียม
4. ไม้บรรทัดเหล็ก
5. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดระดับ 10⁻² มิลลิกรัม
6. คีมขนาดเล็ก
7. คีมยาว
8. เครื่องปิดผนึกพลาสติก และถุงพลาสติกใส
9. เชือกเอ็น ต้องเป็นเอ็นที่เหนียวไม่ขาดง่าย และไม่ทำปฏิกิริยากับนิวตรอน หรือรังสี

ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์

10. มีดคัดเตอร์
11. นาฬิกาจับเวลา
12. กระดาษกาวหรือเทปใสที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับนิวตรอน หรือรังสีภายในแกน

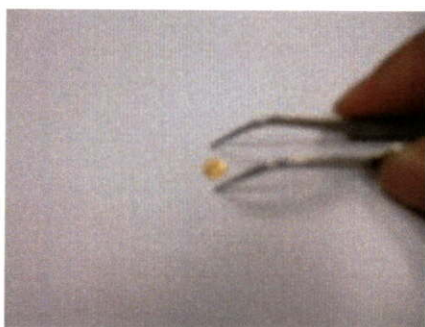
เครื่องปฏิกรณ์

13. เครื่องนับวัดรังสีชนิด Gamma Spectrometer พร้อมต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน
ขั้นตอนการเตรียมวัสดุสำหรับการทดลองมีดังนี้

1. เตรียมแผ่นทองคำบาง และแผ่นอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.28 และ รูปที่ 3.29 ทำการชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่ง

2. ทำการคัดเลือกแผ่นทองคำที่มีความสมบูรณ์ ไม่มีรอยขาดหรือบุ และมีน้ำหนักใกล้เคียงกัน จำนวน 2 แผ่น เพื่อใช้วัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ และอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ และเลือกแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความสมบูรณ์จำนวน 1 แผ่น เพื่อใช้วัดนิวตรอนเร็วฟลักซ์

*หมายเหตุ ใช้แผ่นทองคำที่มีความหนาประมาณ 5×10^{-4} เซนติเมตร สำหรับวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.28 แผ่นทองคำบาง



รูปที่ 3.29 แผ่นอะลูมิเนียม



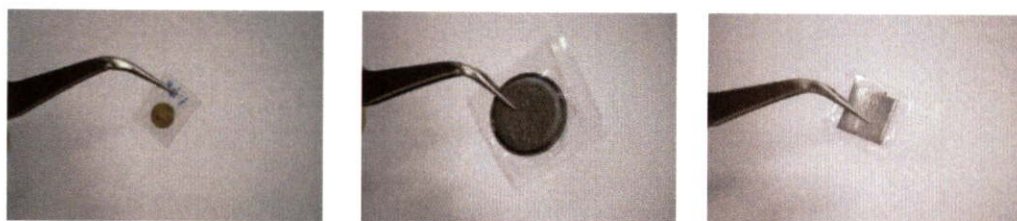
รูปที่ 3.30 ถุงพลาสติกใสสำหรับใส่แผ่นทองคำและปิดผนึกด้วยเครื่องปิดผนึกพลาสติก

3. ตัดถุงพลาสติกใสเป็นรูปซองขนาดเล็ก ให้ขนาดพอดีกับแผ่นทองคำ และแผ่นอะลูมิเนียม และนำวัสดุทั้งสองชิ้นใส่ในซองพลาสติก แยกวัสดุละช่อง จากนั้นปิดผนึกซองด้วยเครื่องปิดผนึกดังรูปที่ 3.30 และตรวจสอบว่าผนึกที่ปิดรอบซองปิดสนิทหรือไม่ เพื่อไม่ให้วัสดุหายในระหว่างทดลอง

4. นำแผ่นทองคำจำนวน 1 แผ่นมาบรรจุในตลับแคดเมียม ดังรูปที่ 3.31 ปิดตลับด้วยเทปใสเพื่อไม่ให้แผ่นทองคำหลุดออกจากตลับ จากนั้นนำตลับแคดเมียมใส่ในซองพลาสติกขนาดพอดีกับตลับและปิดผนึกให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.31 การใส่แผ่นทองคำในตลับแคดเมียม



รูปที่ 3.32 วัสดุสำหรับทดลองที่ใส่ของพลาสติกและปิดผนึกเรียบร้อยแล้ว

5. สำหรับการอาบรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ได้เลือกไม้บรรทัดเหล็กในตลับวัสดุเพื่อทดลอง ซึ่งใช้ไม้บรรทัดเหล็กที่มีความยาว 60 เซนติเมตร

- นำแผ่นทองคำแผ่นที่ 1 ติดที่ไม้บรรทัดเหล็กด้วยเทปใสที่ระยะ 19 เซนติเมตร จะเป็นระยะที่ตรงกับกึ่งกลางของแกนเครื่องปฏิกรณ์พอดี

- นำแผ่นทองคำแผ่นที่ 2 ที่อยู่ในตลับแคดเมียม ติดที่ไม้บรรทัดเหล็กด้วยเทปใสที่ระยะ 19 เซนติเมตร

- นำแผ่นอะลูมิเนียมติดที่ไม้บรรทัดเหล็กด้วยเทปใสที่ระยะ 19 เซนติเมตร

6. จดหมายเลขแผ่นทองคำในตาราง และไม้บรรทัดเหล็ก

7. ผูกเส้นเอ็นที่ด้านบนไม้บรรทัดเหล็ก โดยความยาวของเส้นเอ็นประมาณ 8-9 เมตร ขั้นตอนการอาบรังสีภายในที่อาบรังสีซีซีทีมีขั้นตอนดังนี้

1. หากยังไม่มีการเดินเครื่องปฏิกรณ์ ให้ทำการติดเครื่องเดินที่กำลัง 100 kW
2. หย่อนไม้บรรทัดเหล็กที่ติดแผ่นทองคำแผ่นที่ 1 ลงในท่ออาบรังสีซีซีที
3. เริ่มจับเวลาเมื่อไม้บรรทัดเหล็กกระทบกับท่ออาบรังสี และกำลังของเครื่องอยู่ในสภาวะคงที่ 100 kW

4. อาบรังสีเป็นเวลา 20 นาที เมื่อครบเวลานับทีเวลาและให้นำไม้บรรทัดเหล็กออกจากท่ออาบรังสีไปเก็บในอุปกรณ์กำบังรังสีนอกบ่อเครื่องปฏิกรณ์

5. หย่อนไม้บรรทัดเหล็กที่ติดแผ่นทองคำแผ่นที่ 2 ลงในท่ออาบรังสีซีซีที

6. เริ่มจับเวลาเมื่อไม่บรรทัดเหล็กกระทบกับท่ออาบรังสี และกำลังของเครื่องอยู่ในสภาวะคงที่ 100 kW

7. อาบรังสีเป็นเวลานาน 20 นาที เมื่อครบเวลายับเวลาที่เวลาและให้นำไม้บรรทัดเหล็กออกจากท่ออาบรังสีไปเก็บในอุปกรณ์กำบังรังสีนอกบ่อเครื่องปฏิกรณ์

8. หย่อนไม้บรรทัดเหล็กที่ติดแผ่นอะลูมิเนียม ลงในท่ออาบรังสีทันที

9. เริ่มจับเวลาเมื่อไม้บรรทัดเหล็กกระทบกับท่ออาบรังสี และกำลังของเครื่องอยู่ในสภาวะคงที่ 100 kW

10. อาบรังสีเป็นเวลานาน 20 นาที เมื่อครบเวลายับเวลาที่เวลาและให้นำไม้บรรทัดเหล็กออกจากท่ออาบรังสีไปเก็บในอุปกรณ์กำบังรังสีนอกบ่อเครื่องปฏิกรณ์

11. พักไม้บรรทัดเหล็กที่ติดแผ่นทองแผ่นที่ 1 และ 2 เป็นเวลา 3-10 วัน และพักไม้บรรทัดที่ติดแผ่นอะลูมิเนียมเป็น 1-2 วัน เพื่อให้มีการสลายตัวทางรังสีของวัสดุสามชิ้น

12. เมื่อครบกำหนดของการพัก ใช้เครื่องวัดรังสีไอเกอร์รุ่นเลอว์ วัดความแรงรังสีที่เหลืออยู่ หากอยู่ปริมาณที่ปลอดภัยให้แกะเทปที่ติดไม้บรรทัดเหล็กใช้ที่คีบจับแผ่นทองคำ และแผ่นอะลูมิเนียมใส่ถุงพลาสติกใส ใส่ชั้นละ 1 ถุง ทำเครื่องหมายบอกตำแหน่งบนของพลาสติก

13. แจ้งเจ้าหน้าที่ฟิสิกส์สุขภาพเพื่อขออนุญาตแผ่นทองคำหรือแผ่นอะลูมิเนียมทั้งหมดออกจากพื้นที่ควบคุม และนำไปนับวัดต่อไป

ขั้นตอนการนับวัดทางรังสีสำหรับแผ่นทองคำ และแผ่นอะลูมิเนียมมีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดระบบนับวัดชนิด แกมมาสเปกโตรมิเตอร์

2. นำแผ่นทองคำหรือแผ่นอะลูมิเนียมวางในที่วางสารตัวอย่างของระบบนับวัดชนิดแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ที่ระยะห่างจากหัววัด 5 เซนติเมตร

3. ทำการนับวัดเป็นเวลา 600 วินาที และตรวจสอบค่า dead time จากการวัด หากมีค่า dead time สูงกว่า 10% ให้เพิ่มระยะห่างจากหัววัดครั้งละ 5 เซนติเมตร และทำการนับวัดซ้ำเป็นเวลา 600 วินาที จนกว่าค่า dead time จะต่ำกว่า 10% และบันทึกระยะห่างจากหัววัดที่ได้ในตาราง

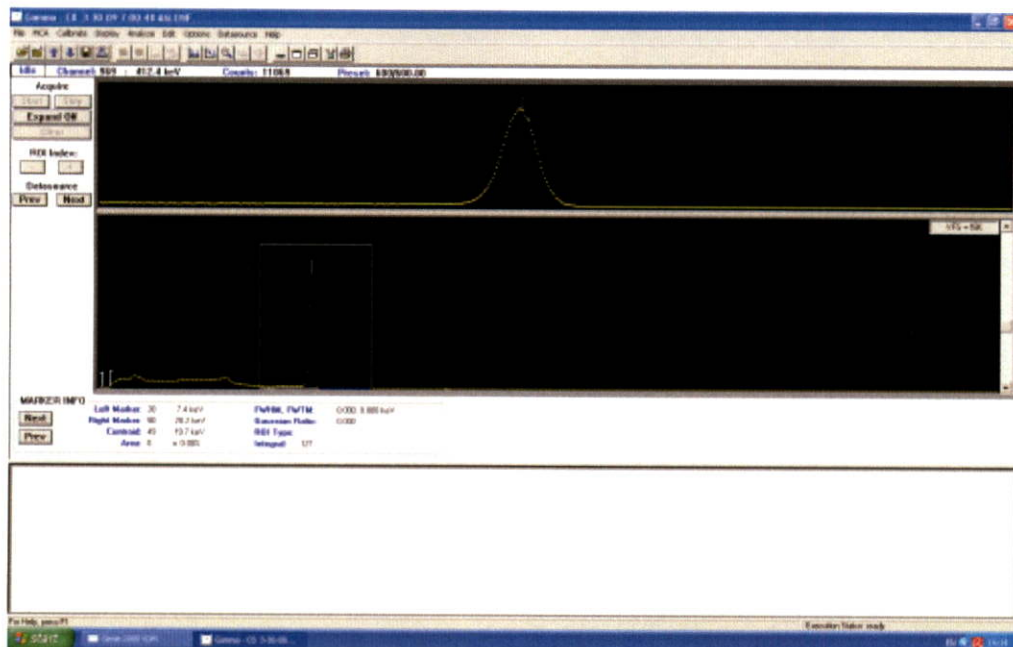
- ระยะห่างจากหัววัดที่ได้ในข้อ 3. เมื่อครบเวลาการนับ 600 วินาทีแล้ว หากจำนวนการนับวัดมีค่าน้อยกว่า 10000 counts ให้เพิ่มเวลาการวัดครั้งละ 100 วินาที จนกว่าจำนวนการนับวัดมีค่ามากกว่า 10000 counts

4. บันทึกจำนวนค่านับวัดได้โฟโตพีคที่พลังงานประมาณ 412 KeV สำหรับแผ่นฟอยล์ทองคำและที่พลังงานประมาณ 1,368 KeV สำหรับแผ่นอะลูมิเนียม รูปที่ 3.33 และ รูปที่ 3.34

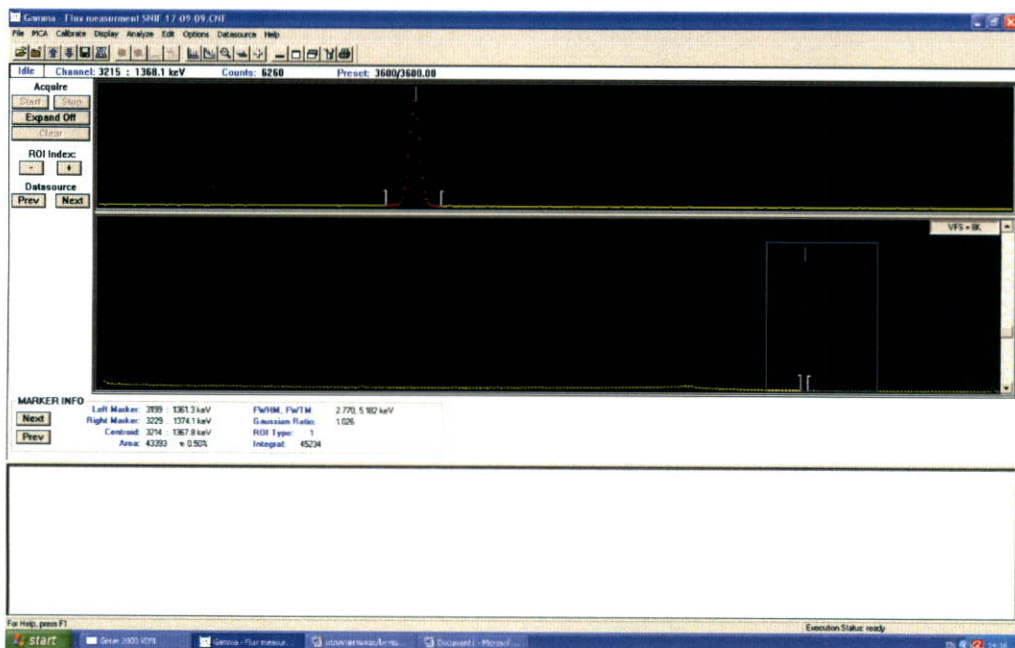
5. หาประสิทธิภาพของระบบนับวัดชนิดแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

6. คำนวณนิวตรอนฟลักซ์แต่ละค่าพลังงาน บันทึกค่าที่คำนวณได้ในตาราง

7. เปรียบเทียบค่านิวตรอนฟลักซ์ที่ได้จากแบบจำลอง MCNPX กับ ค่านิวตรอนฟลักซ์จากค่าการทดลอง และอภิปรายผลในบทที่ 4



รูปที่ 3.33 ผลค่านับวัดได้โฟโตพีกที่พลังงานประมาณ 412 KeV



รูปที่ 3.34 ผลค่านับวัดได้โฟโตพีกที่พลังงานประมาณ 1,368 KeV

3.3.3 การวัดเทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์ด้วยหัววัดนิวตรอนภายในเครื่อง ปว.-1/1

การใช้หัววัดนิวตรอนทำการวัดจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์ ปว.-1/1 เป็นอีกวิธีที่ใช้วัดแต่มีข้อจำกัดของการวัดที่สามารถวัดนิวตรอนฟลักซ์ได้เฉพาะช่วงพลังงานเทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์เท่านั้น ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

อุปกรณ์การทดลองการวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ด้วยหัววัดนิวตรอน

1. หัววัดชนิด SPND (Self Powered Neutron Detector)
2. เครื่องวัดกระแสที่มีความละเอียดระดับ 10^{-12} A (picoammeter)
3. แผ่นอะลูมิเนียมสำหรับยึดหัววัดชนิด SPND
4. เส้นลวดเอ็น

ขั้นตอนการทดลองการวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ด้วยหัววัดนิวตรอน

1. นำหัววัดนิวตรอนติดกับแผ่นอะลูมิเนียมแล้วพันด้วยเทปพันสายไฟ โดยให้กึ่งกลางของหัววัดนิวตรอนอยู่ที่ตำแหน่งสูง 7.5 นิ้วจากด้านล่างสุดของแผ่นอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.25



ก.

ข.

รูปที่ 3.35 ขั้นตอนการเตรียมหัววัดนิวตรอนสำหรับการวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

- ก. นำหัววัดนิวตรอนติดบนแผ่นอะลูมิเนียม
 - ข. เปิดเครื่องวัดกระแส เตรียมความพร้อมก่อนการทดลอง
2. ทำการต่อปลายอีกข้างของหัววัดนิวตรอนเข้ากับเครื่องวัดกระแส โดยต่อขั้วบวกเข้ากับแกนกลางของสายหัววัดนิวตรอน และต่อสาย GND
 3. ผูกเส้นลวดเอ็นเข้ากับแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อช่วยในการหย่อนแผ่นอะลูมิเนียมลงในท่ออาบรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์
 4. เปิดเครื่องวัดกระแสและทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อปรับสภาพเครื่องให้เข้าสู่สภาวะการใช้งานดังรูปที่ 3.26
 5. ตรวจสอบว่าท่ออาบรังสีซีที ไม่มีตัวอย่างหรืออุปกรณ์ใดๆ อยู่ภายในหากมีอยู่ให้นำออกก่อนการทดลอง
 6. ทำการหย่อนแผ่นอะลูมิเนียมลงในท่ออาบรังสีซีที โดยดึงให้แผ่นอะลูมิเนียมมีระยะสูงจากตำแหน่งล่างสุดของท่ออาบรังสี 5 นิ้ว ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.36 หยอนแผ่นอะลูมิเนียมที่ติดหัวคานิวตรอนลงท่ออาบรังสีซีที

7. เดินเครื่องปฏิกรณ์ที่กำลังต่างๆดังนี้

7.1 เดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่กำลัง 10 kW รอให้กระแสที่อ่านได้จากเครื่องวัดมีค่าคงที่ (ประมาณ 5 นาที) และบันทึกค่ากระแสที่อ่านได้

7.2 เพิ่มกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่กำลัง 100 kW รอให้กระแสที่อ่านได้จากเครื่องวัดมีค่าคงที่ (ประมาณ 5 นาที) และบันทึกค่ากระแสที่อ่านได้

7.3 เพิ่มกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่กำลัง 500 kW รอให้กระแสที่อ่านได้จากเครื่องวัดมีค่าคงที่ (ประมาณ 5 นาที) และบันทึกค่ากระแสที่อ่านได้

7.4 เพิ่มกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่กำลัง 1,000 kW รอให้กระแสที่อ่านได้จากเครื่องวัดมีค่าคงที่ (ประมาณ 5 นาที) และบันทึกค่ากระแสที่อ่านได้

7.5 เพิ่มกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่กำลัง 1,200 kW รอให้กระแสที่อ่านได้จากเครื่องวัดมีค่าคงที่ (ประมาณ 5 นาที) และบันทึกค่ากระแสที่อ่านได้

8. เปรียบเทียบผลการวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ด้วยแบบจำลอง MCNPX , การวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วย Gold foil activation และการวัดด้วยหัวคานิวตรอน

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการทดลองและวิเคราะห์ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ คือวิธีการประมวลผลการวิเคราะห์ที่ก่อกัมมันต์ด้วยแบบจำลอง MCNPX การวัดและวิเคราะห์ผลด้วยวิธี Gold foil activation และการเปรียบเทียบผลการวัดและวิเคราะห์ระหว่างแบบจำลอง MCNPX กับ Gold foil activation ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 วิธีการประมวลผลการวิเคราะห์การก่อกัมมันต์ด้วยแบบจำลอง MCNPX

ในการวิเคราะห์ผลจากการแบบจำลอง MCNPX ผลที่ได้จากประมวลผลมาจากการสมการคำนวณหาฟลักซ์ดังต่อไปนี้

$$\phi(\vec{r}, E, t) = \int d\Omega \Psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t) [\phi(\vec{r}, E, t) d\vec{r} dE] \quad (4.1)$$

เป็นสมการหาปริมาณฟลักซ์รวมประกอบด้วยปริมาณ $d\vec{r}$ และ \vec{r} , ค่าพลังงาน dE และ E , เวลาในการคำนวณ ดังตารางที่ 2.10 ใช้สำหรับคำนวณ Tally F2, F4 และ F5 (ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะ tally F2 และ F4) ดังสมการ

$$F2 \quad \bar{\phi}_s = \frac{1}{A} \int dE \int dt \int dA \int d\Omega \Psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t) \quad (4.2)$$

$$F4 \quad \bar{\phi}_v = \frac{1}{V} \int dE \int dt \int dV \int d\Omega \Psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t) \quad (4.3)$$

โดย	ϕ_s	ปริมาณฟลักซ์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว
	ϕ_v	ปริมาณฟลักซ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์
	W	น้ำหนักของอนุภาค
	Ψ	ฟลักซ์เชิงมุมที่ความไกล่เคียงกับทฤษฎีเครื่องปฏิกรณ์
		$\Psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t) = v n(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$ เมื่อ n คือความหนาแน่นของอนุภาค (particles/cm ³ /MeV/steradian) และ v คือ ความเร็ว (cm/sh) ดังนั้นหน่วยของ Ψ คือ particles/cm ² /sh/MeV/steradian
	A	พื้นที่ผิว (cm ²) (คำนวณด้วยใส่ในไฟต์อินพุทโดยผู้ทำการทดลองเอง)
	V	ปริมาตร (cm ³) (คำนวณด้วยใส่ในไฟต์อินพุทโดยผู้ทำการทดลองเอง)
	μ	$\hat{\Omega} \cdot \hat{n}$ มุมโคไซน์ระหว่างพื้นผิวปกติ \hat{n} กับอนุภาควิถีโค้ง $\hat{\Omega}$
	\vec{r}	ตำแหน่งเวกเตอร์ของอนุภาค (cm.)
	$\hat{\Omega}$	ทิศทางของเวกเตอร์
	E	พลังงาน (MeV)

t เวลา (sh ; 1 sh = 10^8 sh)

ในการคำนวณในช่วงพลังงานและเวลาที่ปรับเปลี่ยนในการวัด E และ T ถ้าไม่มีการ์ด E จะข้ามการคำนวณในการวัดนี้ไป การคำนวณใน Tally 2 และ 4 ซึ่งใน Tally 2 ทำการคำนวณเฉพาะปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ในพื้นที่ผิวของแบบจำลอง และ Tally 4 ทำการคำนวณปริมาณนิวตรอนฟลักซ์เฉพาะในเซลล์ของจำลองซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้

- Track Length Estimate of Cell Flux (F4)

ค่าเฉลี่ยของอนุภาคฟลักซ์ภายในเซลล์ มาจากสมการ (4.3) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{\phi}_V &= \frac{1}{V} \int dE \int dt \int dV \int d\Omega \Psi(\bar{r}, \hat{\Omega}, E, t) \\ &= \frac{1}{V} \int dE \int dV \int d\Omega \int dt v n(\bar{r}, \hat{\Omega}, E, t) \\ &= \frac{1}{V} \int dE \int dV \int dt v N(\bar{r}, E, t)\end{aligned}$$

เมื่อ $N(\bar{r}, E, t) = \int d\Omega n(\bar{r}, \hat{\Omega}, E, t)$ คืออนุภาคที่ไม่ต้องคำนึงถึงพจน์อื่นในสมการกำหนดให้ ds เป็นหน่วยความแตกต่างของระยะเวลาในการคำนวณ และสังเกตว่า $ds = vdt$ แทนในสมการจะได้

$$\bar{\phi}_V = \frac{1}{V} \int dE \int dV \int ds N(\bar{r}, E, t)$$

ปริมาณ $N(\bar{r}, E, t) ds$ จะคิดว่าเป็นความหนาแน่นภายในเซลล์ จะถูกประเมินผลด้วยการเฉลี่ยการไหลของฟลักซ์ภายในเซลล์ โปรแกรม MCNP คำนวณ $\bar{\phi}_V$ จนได้ผลสุดท้าย $W \frac{T_l}{V}$ สำหรับทุกอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ การแบ่งเวลาและพลังงานของ $\bar{\phi}_V$ ขึ้นอยู่กับความยาวของเวลาและพลังงานที่ถูกกำหนด และการแบ่งช่วงพลังงานหลายๆช่วงค่อนข้างเชื่อถือได้เพราะภายในเซลล์มีหลายช่วงทำให้สามารถนับวัดได้ง่าย

- Surface Flux (F2)

การหาปริมาณฟลักซ์เฉลี่ยบนพื้นผิว ในสมการ (4.2) คำนวณผลบนขนาดของพื้นผิวที่มีขนาดเล็ก ในขณะที่ความหนาของเซลล์ δ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดย $A\delta$ และความหนาของวัตถุที่ต้องการทราบวิ่งผ่านพื้นที่นั้น $\frac{\delta}{|\hat{\Omega} \cdot \hat{n}|}$ ดังนั้น

$$\begin{aligned}\bar{\phi}_S &= \lim_{\delta \rightarrow 0} \bar{\phi}_V \\ &= \lim_{\delta \rightarrow 0} W \frac{T_l}{V} \\ &= \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{W \delta}{A\delta |\hat{\Omega} \cdot \hat{n}|} \\ &= \frac{W}{|\mu| A}\end{aligned}$$

สำหรับอนุภาคบนพื้นผิว $\frac{1}{|\mu|}$ มีขนาดใหญ่ และการคำนวณ MCNP มีความใกล้เคียงกับการไหลของฟลักซ์บนพื้นผิว และ โปรแกรม MCNP ตั้งค่า $|\mu| = 0.05$ เมื่อ $|\mu| < 0.10$ เพราะการคำนวณค่า F2 มีค่าความไม่แน่นอนของการคำนวณบนพื้นผิว

4.1.1 ประมวลผลการจับนิวตรอนภายในแผ่นทองโดย เพิ่มความหนาของแผ่นทองระหว่าง 500 – 800 μcm .

อุปกรณ์การทดลอง

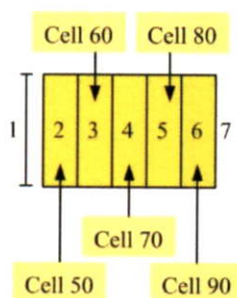
1). โปรแกรมประมวล MCNPX

2). คอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง

ขั้นตอนการทดลอง

1). กำหนดให้แผ่นทองมีความหนา 5.27×10^{-04} cm. แบ่งช่วงความหนาของแผ่นทองเป็น 5 ช่วงเท่าๆกัน

2). เขียนคำสั่ง Tally F2 เพื่อหาปริมาณนิวตรอนฟลักซ์บริเวณพื้นผิว ϕ_s ของแผ่นทองที่พื้นผิวหมายเลข 2 และ 7 และเขียนคำสั่ง Tally F4 เพื่อหาปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ $\bar{\phi}$ ภายในเซลล์ของแผ่นทอง ที่เซลล์ 50 60 70 80 และ 90 ลักษณะของแผ่นทองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การแบ่งช่วงภายในแผ่นทอง

3). กำหนดย่านพลังงานเทอร์มัลนิวตรอน อิพิลเทอร์มัลนิวตรอน และนิวตรอนเร็วตามลำดับ

4). ประมวลผลบนโปรแกรม MCNPX เพื่อหาปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ที่พื้นผิวดังสมการ (4.2) และปริมาตรนิวตรอนฟลักซ์ภายในเซลล์ดังสมการ (4.3) บันทึกผลการวิเคราะห์ลงในตารางที่ 4.1 ผลที่ได้จากการประมวลพื้นผิว 2 และ 7 อยู่ในช่องที่ 1 และ 7 ของตาราง และผลจากการประมวลของเซลล์ 50 60 70 80 และ 90 อยู่ในช่อง 2 3 4 5 และ 6 ของตาราง

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.27×10^{-04} เซนติเมตร

527.768 μ m	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
	-2.64E-04	-2.11E-04	-1.06E-04	0.00E+00	1.06E-04	2.11E-04	2.64E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	7.16E-04	4.74E-04	4.75E-04	4.78E-04	4.76E-04	4.75E-04	7.16E-04
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	3.18E-04	2.12E-04	2.11E-04	2.12E-04	2.13E-04	2.12E-04	3.19E-04
นิวตรอนเร็ว	9.90E-05	6.54E-05	6.52E-05	6.53E-05	6.53E-05	6.53E-05	9.91E-05
Total Energy	1.13E-03	7.52E-04	7.51E-04	7.56E-04	7.54E-04	7.53E-04	1.13E-03

5). ทำซ้ำในข้อที่ 1). – 4). โดยเปลี่ยนความหนาของแผ่นทองเป็น 5.54×10^{-04} cm. , 5.80×10^{-04} cm. , 6.06×10^{-04} cm. , 6.33×10^{-04} cm. , 6.60×10^{-04} cm. , 6.86×10^{-04} cm. , 7.12×10^{-04} cm. , 7.38×10^{-04} cm. , 7.65×10^{-04} cm. และ 7.91×10^{-04} cm. ตามลำดับ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.2 – 4.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.54×10^{-04} เซนติเมตร

554.156 μ m	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
	-2.77E-04	-2.22E-04	-1.11E-04	0.00E+00	1.11E-04	2.22E-04	2.77E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	7.16E-04	4.98E-04	4.98E-04	5.02E-04	5.00E-04	4.99E-04	7.15E-04
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	3.18E-04	2.22E-04	2.22E-04	2.22E-04	2.23E-04	2.22E-04	3.19E-04
นิวตรอนเร็ว	9.90E-05	6.86E-05	6.85E-05	6.86E-05	6.86E-05	6.85E-05	9.91E-05
Total Energy	1.13E-03	7.89E-04	7.88E-04	7.93E-04	7.91E-04	7.90E-04	1.13E-03

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.80×10^{-04} เซนติเมตร

580.545 μ m	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
	-2.90E-04	-2.32E-04	-1.16E-04	0.00E+00	1.16E-04	2.32E-04	2.90E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	7.16E-04	5.21E-04	5.22E-04	5.26E-04	5.24E-04	5.22E-04	7.15E-04
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	3.18E-04	2.33E-04	2.32E-04	2.33E-04	2.33E-04	2.33E-04	3.18E-04
นิวตรอนเร็ว	9.90E-05	7.19E-05	7.18E-05	7.18E-05	7.18E-05	7.18E-05	9.91E-05
Total Energy	1.13E-03	8.27E-04	8.26E-04	8.30E-04	8.29E-04	8.27E-04	1.13E-03

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.06×10^{-04} เซนติเมตร

606.933 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
	-3.03E-04	-2.43E-04	-1.21E-04	0.00E+00	1.21E-04	2.43E-04	3.03E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	7.16E-04	5.45E-04	5.44E-04	5.48E-04	5.46E-04	5.44E-04	7.15E-04
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	3.18E-04	2.44E-04	2.42E-04	2.43E-04	2.44E-04	2.43E-04	3.18E-04
นิวตรอนเร็ว	9.89E-05	7.52E-05	7.50E-05	7.51E-05	7.51E-05	7.51E-05	9.91E-05
Total Energy	1.13E-03	8.65E-04	8.62E-04	8.66E-04	8.65E-04	8.63E-04	1.13E-03

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.33×10^{-04} เซนติเมตร

633.322 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
	-3.17E-04	-2.53E-04	-1.27E-04	0.00E+00	1.27E-04	2.53E-04	3.17E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	7.15E-04	5.68E-04	5.68E-04	5.71E-04	5.69E-04	5.68E-04	7.14E-04
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	3.18E-04	2.56E-04	2.54E-04	2.54E-04	2.55E-04	2.54E-04	3.18E-04
นิวตรอนเร็ว	9.89E-05	7.84E-05	7.83E-05	7.84E-05	7.83E-05	7.83E-05	9.91E-05
Total Energy	1.13E-03	9.03E-04	9.00E-04	9.04E-04	9.02E-04	9.00E-04	1.13E-03

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.60×10^{-04} เซนติเมตร

659.710 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
	-3.30E-04	-2.64E-04	-1.32E-04	0.00E+00	1.32E-04	2.64E-04	3.30E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	7.16E-04	5.92E-04	5.91E-04	5.95E-04	5.93E-04	5.91E-04	7.15E-04
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	3.18E-04	2.67E-04	2.65E-04	2.64E-04	2.65E-04	2.64E-04	3.18E-04
นิวตรอนเร็ว	9.89E-05	8.17E-05	8.16E-05	8.16E-05	8.16E-05	8.16E-05	9.91E-05
Total Energy	1.13E-03	9.41E-04	9.37E-04	9.41E-04	9.40E-04	9.37E-04	1.13E-03

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.86×10^{-04} เซนติเมตร

686.098 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
	-3.43E-04	-2.74E-04	-1.37E-04	0.00E+00	1.37E-04	2.74E-04	3.43E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	7.16E-04	6.16E-04	6.14E-04	6.19E-04	6.16E-04	6.15E-04	7.14E-04
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	3.18E-04	2.78E-04	2.75E-04	2.75E-04	2.76E-04	2.75E-04	3.18E-04
นิวตรอนเร็ว	9.89E-05	8.49E-05	8.48E-05	8.49E-05	8.48E-05	8.49E-05	9.91E-05
Total Energy	1.13E-03	9.78E-04	9.74E-04	9.78E-04	9.77E-04	9.75E-04	1.13E-03

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.12×10^{-04} เซนติเมตร

712.487 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
	-3.56E-04	-2.85E-04	-1.42E-04	0.00E+00	1.42E-04	2.85E-04	3.56E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	7.15E-04	6.39E-04	6.38E-04	6.42E-04	6.41E-04	6.39E-04	7.14E-04
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	3.18E-04	2.89E-04	2.86E-04	2.86E-04	2.86E-04	2.86E-04	3.18E-04
นิวตรอนเร็ว	9.89E-05	8.82E-05	8.81E-05	8.81E-05	8.81E-05	8.81E-05	9.91E-05
Total Energy	1.13E-03	1.02E-03	1.01E-03	1.02E-03	1.02E-03	1.01E-03	1.13E-03

ตารางที่ 4.9 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.38×10^{-04} เซนติเมตร

738.875 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
	-3.69E-04	-2.96E-04	-1.48E-04	0.00E+00	1.48E-04	2.96E-04	3.69E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	7.15E-04	6.63E-04	6.61E-04	6.66E-04	6.64E-04	6.62E-04	7.14E-04
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	3.17E-04	2.99E-04	2.96E-04	2.96E-04	2.97E-04	2.96E-04	3.18E-04
นิวตรอนเร็ว	9.89E-05	9.14E-05	9.14E-05	9.14E-05	9.14E-05	9.14E-05	9.91E-05
Total Energy	1.13E-03	1.05E-03	1.05E-03	1.05E-03	1.05E-03	1.05E-03	1.13E-03

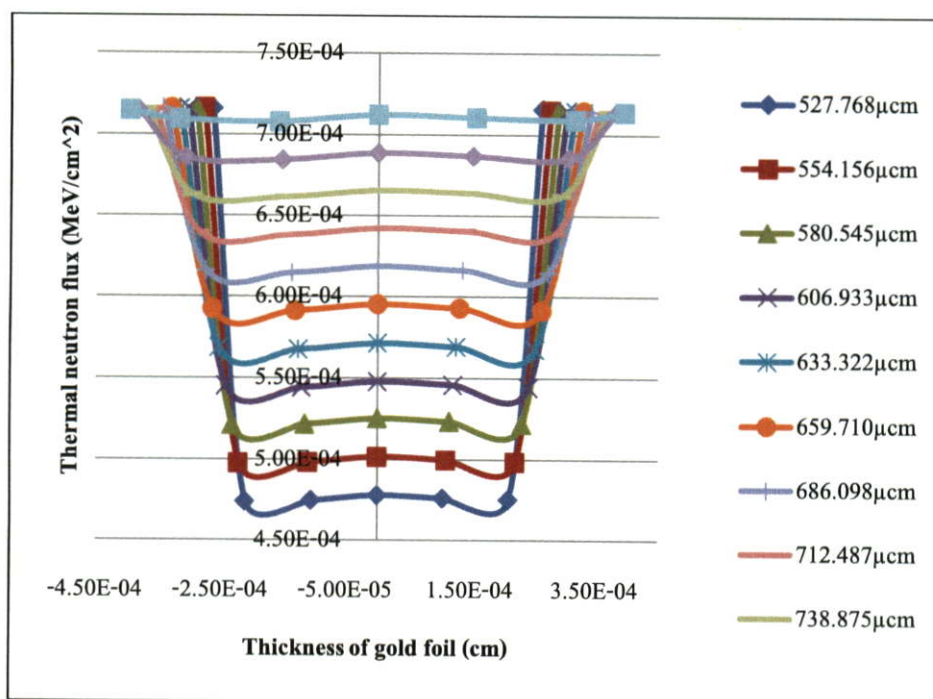
ตารางที่ 4.10 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.65×10^{-04} เซนติเมตร

765.264 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
	-3.83E-04	-3.06E-04	-1.53E-04	0.00E+00	1.53E-04	3.06E-04	3.83E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	7.15E-04	6.86E-04	6.84E-04	6.89E-04	6.87E-04	6.86E-04	7.14E-04
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	3.17E-04	3.10E-04	3.07E-04	3.06E-04	3.07E-04	3.07E-04	3.18E-04
นิวตรอนเร็ว	9.89E-05	9.47E-05	9.46E-05	9.47E-05	9.46E-05	9.47E-05	9.91E-05
Total Energy	1.13E-03	1.09E-03	1.09E-03	1.09E-03	1.09E-03	1.09E-03	1.13E-03

ตารางที่ 4.11 ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.91×10^{-04} เซนติเมตร

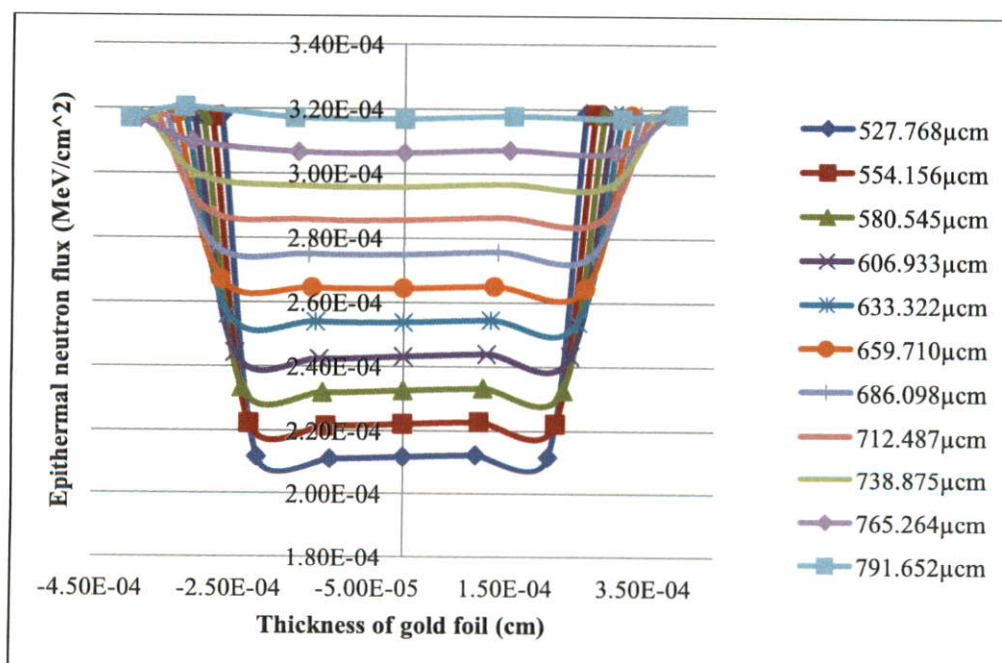
791.652 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
	-3.96E-04	-3.17E-04	-1.58E-04	0.00E+00	1.58E-04	3.17E-04	3.96E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	7.14E-04	7.09E-04	7.08E-04	7.12E-04	7.10E-04	7.09E-04	7.14E-04
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	3.17E-04	3.20E-04	3.17E-04	3.17E-04	3.18E-04	3.17E-04	3.18E-04
นิวตรอนเร็ว	9.89E-05	9.80E-05	9.79E-05	9.79E-05	9.79E-05	9.79E-05	9.92E-05
Total Energy	1.13E-03	1.13E-03	1.12E-03	1.13E-03	1.13E-03	1.12E-03	1.13E-03

6). นำข้อมูลการประมวลผลของค่านิวตรอนฟลักซ์แต่ละค่าความหนามาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์กับความหนาของแผ่นทองดังแสดงในรูปที่ 4.2



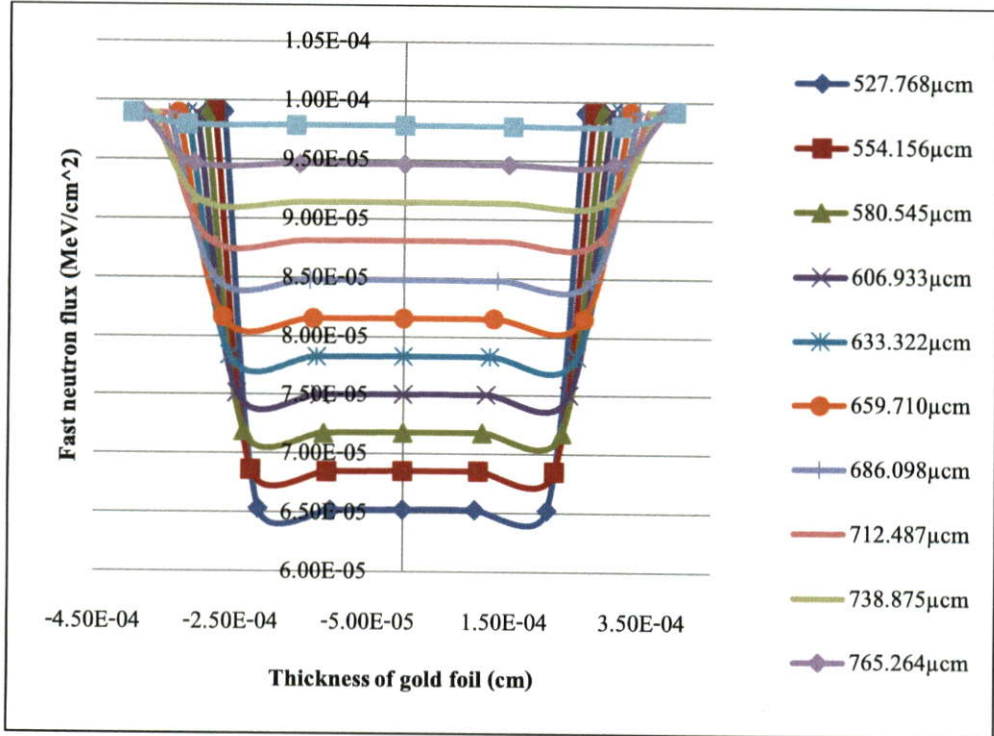
รูปที่ 4.2 ผลจากการประมวลผลการแบ่งช่วงแผ่นทองในช่วงพลังงานเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

7). ทำซ้ำในข้อ 6). แต่เปลี่ยนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์กับความหนาของแผ่นทองดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลจากการประมวลผลการแบ่งช่วงแผ่นทองในช่วงพลังงานอีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

8). ทำซ้ำในข้อ 6). แต่เปลี่ยนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างนิวตรอนเร็วฟลักซ์กับความหนาของแผ่นทองคำแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลจากการประมวลการแบ่งช่วงแผ่นทองในช่วงพลังงานนิวตรอนเร็วฟลักซ์

9). ทำการวิเคราะห์ปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของแผ่นทองที่ระนาบ 2 และ 7 ดังรูปที่ 4.1 โดยใช้สมการ

$$I_{sum} = \frac{I_2 + I_7}{2} \tag{4.5}$$

จะได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ทั้งสามค่าพลังงานเฉลี่ย

ความหนาแผ่นทอง (เซนติเมตร)	เทอร์มัลนิวตรอน	อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
5.27768E-04	7.15662E-04	3.18406E-04	9.90522E-05
5.54156E-04	7.15385E-04	3.18092E-04	9.90522E-05
5.80545E-04	7.15397E-04	3.18201E-04	9.90914E-05
6.06933E-04	7.15292E-04	3.18233E-04	9.90285E-05
6.33322E-04	7.14857E-04	3.18222E-04	9.90285E-05
6.59710E-04	7.15128E-04	3.18251E-04	9.90154E-05
6.86098E-04	7.14896E-04	3.18138E-04	9.90154E-05
7.12487E-04	7.14659E-04	3.18032E-04	9.90265E-05

ตารางที่ 4.12 ค่าปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ทั้งสามค่าพลังงานเฉลี่ย (ต่อ)

ความหนาแน่นของ (เซนติเมตร)	เทอร์มัลนิวตรอน	อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
7.38875E-04	7.14480E-04	3.17735E-04	9.90265E-05
7.65264E-04	7.14145E-04	3.17605E-04	9.90265E-05
7.91652E-04	7.14098E-04	3.17747E-04	9.90523E-05

10). นำค่าจากตารางที่ 4.12 มาคำนวณหาอัตราส่วนของปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดภายในแบบจำลองแผ่นทองจนถึงพื้นผิวของแผ่นทอง คำนวณจากสมการ

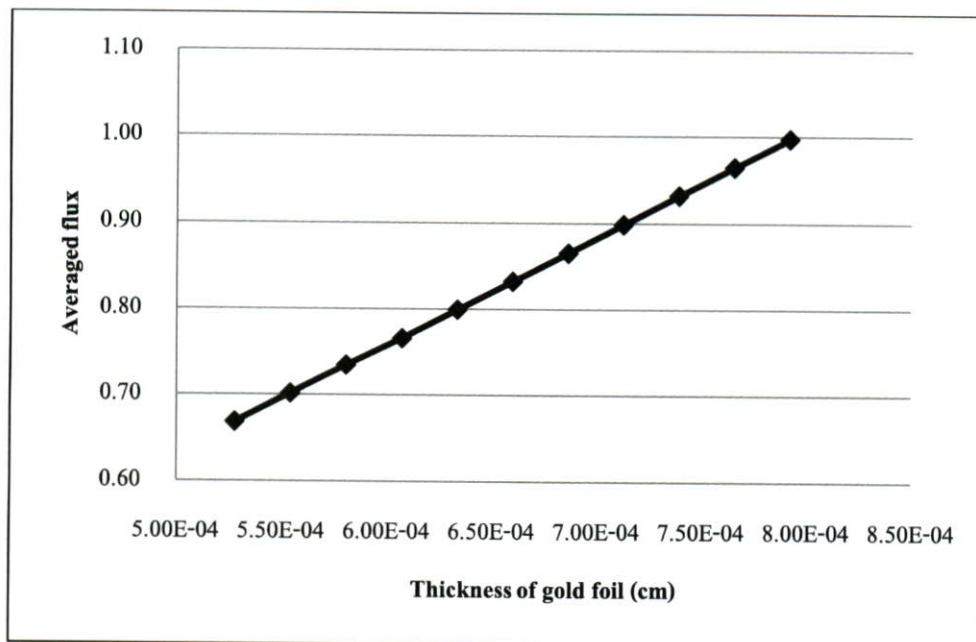
$$\text{อัตราส่วนนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นภายในแผ่นทอง} = \frac{I_{F4(sum)}}{I_{F2(sum)}} \quad (4.6)$$

จะได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 อัตราส่วนนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นภายในแผ่นทอง

ความหนาแน่นของ (เซนติเมตร)	อัตราส่วนนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในแผ่นทอง		
	เทอร์มัลนิวตรอน	อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
5.27768E-04	6.68164E-01	6.66109E-01	6.59196E-01
5.54156E-04	7.01401E-01	6.98779E-01	6.92157E-01
5.80545E-04	7.34596E-01	7.31113E-01	7.24834E-01
6.06933E-04	7.66076E-01	7.64060E-01	7.58264E-01
6.33322E-04	7.99428E-01	7.97407E-01	7.91235E-01
6.59710E-04	8.32349E-01	8.30982E-01	8.24086E-01
6.86098E-04	8.65329E-01	8.64274E-01	8.57051E-01
7.12487E-04	8.98591E-01	8.97716E-01	8.90018E-01
7.38875E-04	9.31816E-01	9.31252E-01	9.22982E-01
7.65264E-04	9.64431E-01	9.64808E-01	9.55949E-01
7.91652E-04	9.97293E-01	9.97473E-01	9.88657E-01

11). นำอัตราส่วนเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในแผ่นทองกับความหนาแน่นของแผ่นทองจะได้ดังรูปกราฟดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 อัตราส่วนเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในแผ่นทอง

12). หาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอัตราส่วนที่เกิดขึ้นเฉพาะในช่วงพลังงานเทอร์มัลนิวตรอน ฟลักซ์มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ประมาณ 33%

4.1.2 ประมวลผลหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วย Tally Multiplier ในแบบจำลอง

อุปกรณ์การทดลอง

1). โปรแกรมประมวลผล MCNPX

2). คอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง

ขั้นตอนการทดลอง

1). กำหนดให้แผ่นทองมีความหนา 5.27×10^{-4} cm.

2). เขียนคำสั่ง Tally F4 เพื่อหาปริมาณนิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ย $\bar{\phi}_v$ ภายในเซลล์ของแผ่นทองที่เซลล์ 50 60 70 80 และ 90 ลักษณะของแผ่นทองดังรูปที่ 4.1

3). เขียนคำสั่ง Tally Multiplier (อัตราการเกิดนิวตรอนฟลักซ์) ในคำสั่งแบบจำลอง โดยใช้คำสั่ง FM4 -1 1 102 และมีการคำนวณภายในโปรแกรม MCNPX ดังนี้

สำหรับชุดคำสั่ง Tally Multiplier : FMn ใช้สมการดังต่อไปนี้

$$FMn = C \int \phi(E) R_m(E) dE \quad (4.7)$$

เมื่อ	$\phi(E)$	การกระจายตัวของพลังงาน (particle/cm ²)
	$R(E)$	ตัวคูณที่ขึ้นอยู่กับฐานข้อมูลของโปรแกรม MCNPX
	C	ค่าคงตัว
	m	หมายเลขการ์ดคำสั่งข้อมูลจำเพาะของวัสดุ

4). ประมวลผลปริมาณนิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์แผ่นทองด้วยสมการ (4.3) และ อัตราการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยสมการ (4.7) บันทึกผลการวิเคราะห์หลังในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.27×10^{-04} เซนติเมตร

527.768 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)				
	-2.11E-04	-1.06E-04	0.00E+00	1.06E-04	2.11E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	2.34E-03	2.34E-03	2.35E-03	2.34E-03	2.34E-03
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	7.77E-04	7.40E-04	7.48E-04	8.13E-04	9.08E-04
นิวตรอนเร็ว	1.67E-07	1.67E-07	1.67E-07	1.67E-07	1.67E-07
Total Energy	3.12E-03	3.08E-03	3.10E-03	3.16E-03	3.25E-03

5). ทำซ้ำในข้อที่ 1). - 4). โดยเปลี่ยนความหนาของแผ่นทองเป็น 5.54×10^{-04} cm. , 5.80×10^{-04} cm. , 6.06×10^{-04} cm. , 6.33×10^{-04} cm. , 6.60×10^{-04} cm. , 6.86×10^{-04} cm. , 7.12×10^{-04} cm. , 7.38×10^{-04} cm. , 7.65×10^{-04} cm. และ 7.91×10^{-04} cm. ตามลำดับ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.15 – 4.24 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.15 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.54×10^{-04} เซนติเมตร

554.156 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)				
	-2.22E-04	-1.11E-04	0.00E+00	1.11E-04	2.22E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	2.46E-03	2.46E-03	2.47E-03	2.46E-03	2.46E-03
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	8.10E-04	7.73E-04	7.62E-04	8.16E-04	9.38E-04
นิวตรอนเร็ว	1.76E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07
Total Energy	3.27E-03	3.23E-03	3.23E-03	3.28E-03	3.40E-03

ตารางที่ 4.16 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 5.80×10^{-04} เซนติเมตร

580.545 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)				
	-2.32E-04	-1.16E-04	0.00E+00	1.16E-04	2.32E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	2.58E-03	2.57E-03	2.58E-03	2.58E-03	2.57E-03
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	8.56E-04	7.89E-04	7.72E-04	8.26E-04	9.55E-04
นิวตรอนเร็ว	1.84E-07	1.84E-07	1.83E-07	1.83E-07	1.83E-07
Total Energy	3.43E-03	3.36E-03	3.36E-03	3.40E-03	3.53E-03

ตารางที่ 4.17 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.06×10^{-04} เซนติเมตร

606.933 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)				
	-2.43E-04	-1.21E-04	0.00E+00	1.21E-04	2.43E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	2.69E-03	2.69E-03	2.70E-03	2.69E-03	2.68E-03
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	8.90E-04	8.19E-04	7.73E-04	8.25E-04	9.68E-04
นิวตรอนเร็ว	1.92E-07	1.92E-07	1.92E-07	1.92E-07	1.92E-07
Total Energy	3.58E-03	3.51E-03	3.47E-03	3.51E-03	3.65E-03

ตารางที่ 4.18 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.33×10^{-04} เซนติเมตร

633.322 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)				
	-2.53E-04	-1.27E-04	0.00E+00	1.27E-04	2.53E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	2.81E-03	2.80E-03	2.81E-03	2.80E-03	2.80E-03
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	9.34E-04	8.69E-04	8.22E-04	8.62E-04	9.84E-04
นิวตรอนเร็ว	2.01E-07	2.00E-07	2.00E-07	2.00E-07	2.00E-07
Total Energy	3.74E-03	3.67E-03	3.63E-03	3.67E-03	3.78E-03

ตารางที่ 4.19 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.60×10^{-04} เซนติเมตร

659.710 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)				
	-2.64E-04	-1.32E-04	0.00E+00	1.32E-04	2.64E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	2.92E-03	2.92E-03	2.93E-03	2.92E-03	2.91E-03
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	9.65E-04	8.97E-04	8.36E-04	8.72E-04	9.93E-04
นิวตรอนเร็ว	2.09E-07	2.09E-07	2.08E-07	2.08E-07	2.08E-07
Total Energy	3.89E-03	3.82E-03	3.77E-03	3.79E-03	3.91E-03

ตารางที่ 4.20 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 6.86×10^{-04} เซนติเมตร

686.098 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)				
	-2.74E-04	-1.37E-04	0.00E+00	1.37E-04	2.74E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	3.04E-03	3.03E-03	3.04E-03	3.03E-03	3.03E-03
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	9.96E-04	9.27E-04	8.65E-04	8.99E-04	1.02E-03
นิวตรอนเร็ว	2.17E-07	2.17E-07	2.17E-07	2.17E-07	2.17E-07
Total Energy	4.04E-03	3.96E-03	3.91E-03	3.93E-03	4.05E-03

ตารางที่ 4.21 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.12×10^{-04} เซนติเมตร

712.487 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)				
	-2.85E-04	-1.42E-04	0.00E+00	1.42E-04	2.85E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	3.16E-03	3.15E-03	3.16E-03	3.15E-03	3.14E-03
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	1.00E-03	9.58E-04	8.94E-04	9.25E-04	1.05E-03
นิวตรอนเร็ว	2.26E-07	2.25E-07	2.25E-07	2.25E-07	2.25E-07
Total Energy	4.16E-03	4.11E-03	4.05E-03	4.07E-03	4.20E-03

ตารางที่ 4.22 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.38×10^{-04} เซนติเมตร

738.875 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)				
	-2.96E-04	-1.48E-04	0.00E+00	1.48E-04	2.96E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	3.27E-03	3.27E-03	3.28E-03	3.27E-03	3.26E-03
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	1.04E-03	1.03E-03	8.91E-04	9.10E-04	1.08E-03
นิวตรอนเร็ว	2.34E-07	2.34E-07	2.33E-07	2.33E-07	2.34E-07
Total Energy	4.31E-03	4.30E-03	4.17E-03	4.18E-03	4.34E-03

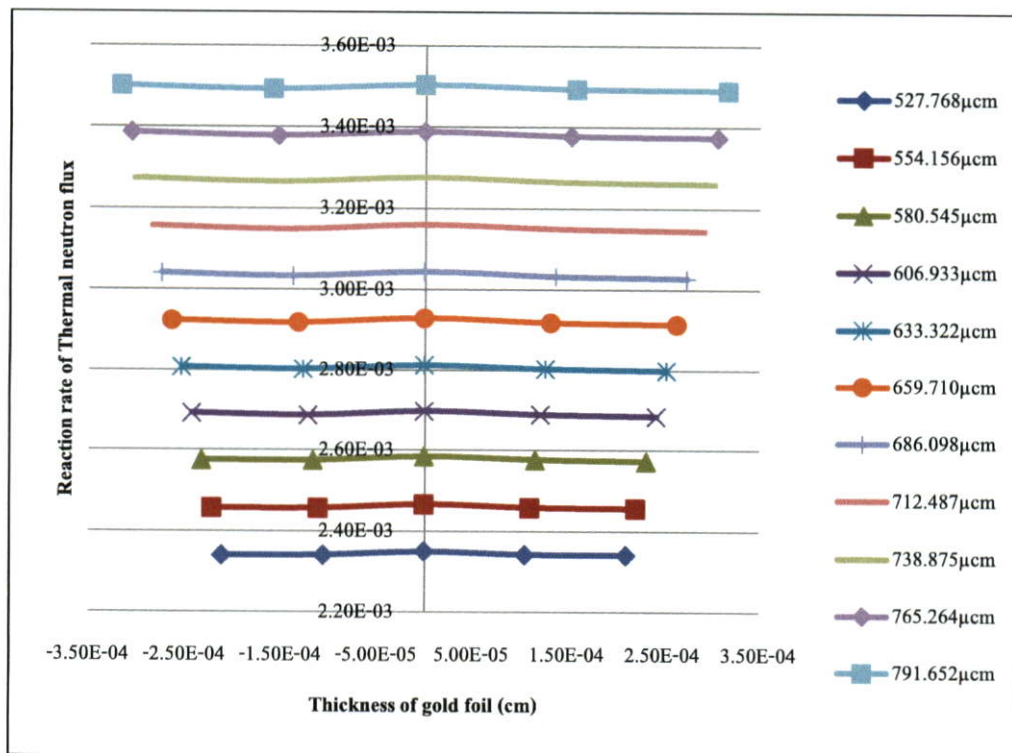
ตารางที่ 4.23 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.65×10^{-04} เซนติเมตร

765.264 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)				
	-3.06E-04	-1.53E-04	0.00E+00	1.53E-04	3.06E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	3.39E-03	3.38E-03	3.39E-03	3.38E-03	3.37E-03
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	1.07E-03	1.06E-03	9.20E-04	9.38E-04	1.11E-03
นิวตรอนเร็ว	2.42E-07	2.42E-07	2.42E-07	2.42E-07	2.42E-07
Total Energy	4.46E-03	4.44E-03	4.31E-03	4.32E-03	4.48E-03

ตารางที่ 4.24 ผลการวัดการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ที่ความหนา 7.91×10^{-04} เซนติเมตร

791.652 μ cm	ระยะช่วงของแผ่นทอง(cm)				
	-3.17E-04	-1.58E-04	0.00E+00	1.58E-04	3.17E-04
เทอร์มัลนิวตรอน	3.50E-03	3.49E-03	3.50E-03	3.49E-03	3.49E-03
อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	1.10E-03	1.09E-03	9.49E-04	9.65E-04	1.14E-03
นิวตรอนเร็ว	2.51E-07	2.50E-07	2.50E-07	2.50E-07	2.50E-07
Total Energy	4.60E-03	4.59E-03	4.45E-03	4.46E-03	4.63E-03

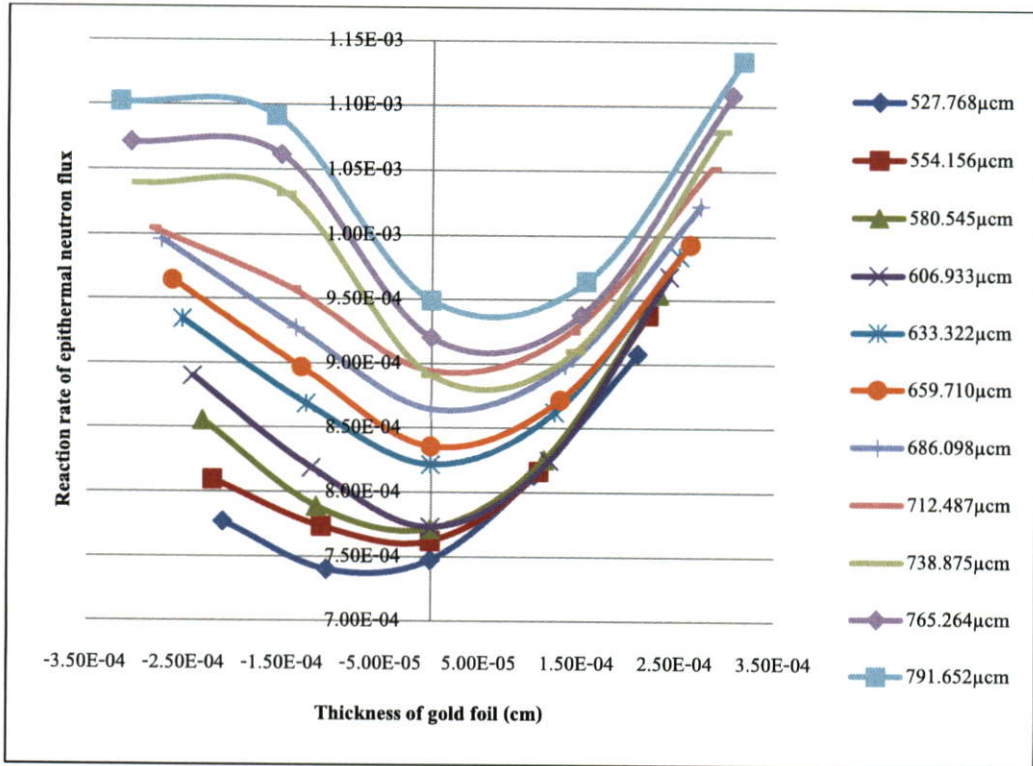
6). นำข้อมูลการประมวลผลของค่านิวตรอนฟลักซ์แต่ละค่าความหนามาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์กับความหนาของแผ่นทองคำแสดงในรูปที่ 4.6



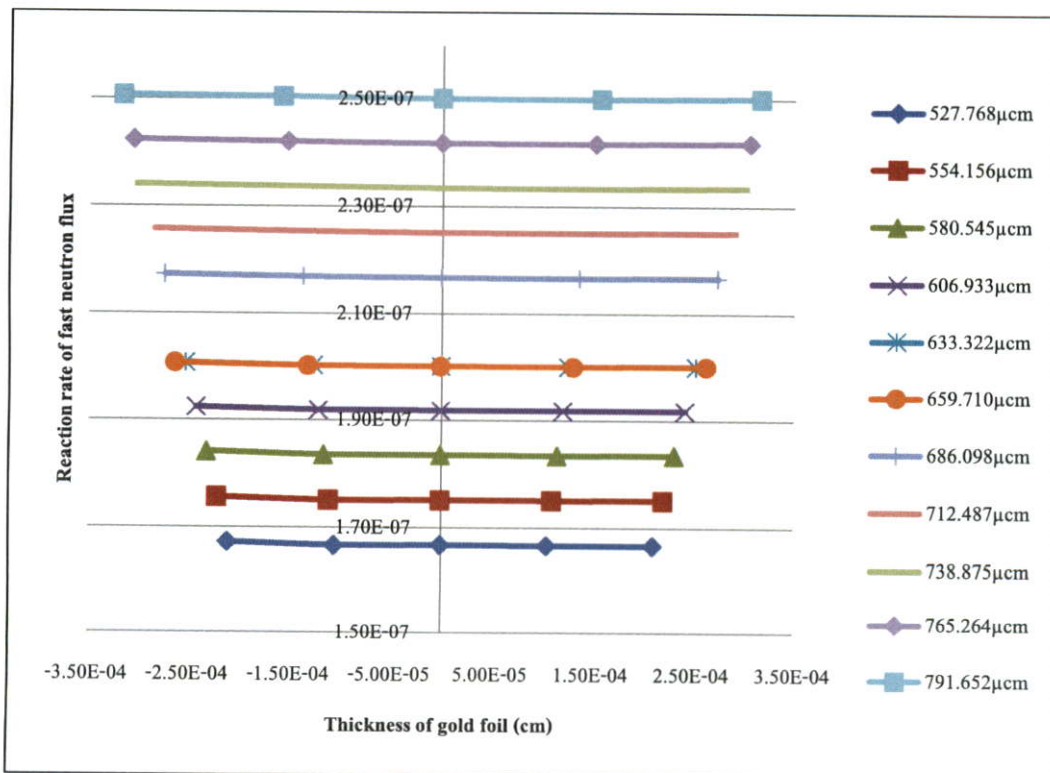
รูปที่ 4.6 ผลจากการประมวลผลการเกิดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ภายในช่วงแผ่นทอง

7). ทำซ้ำในข้อ 6). แต่เปลี่ยนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์กับความหนาของแผ่นทองคำแสดงในรูปที่ 4.7

8). ทำซ้ำในข้อ 6). แต่เปลี่ยนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดนิวตรอนเร็วฟลักซ์กับความหนาของแผ่นทองคำแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ผลจากการประมวลการเกิดอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ภายในช่วงแผ่นทอง



รูปที่ 4.8 ผลจากการประมวลการเกิดนิวตรอนเร็วฟลักซ์ภายในช่วงแผ่นทอง

4.1.3 ประมวลผลการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนในแต่ละระดับพลังงาน อุปกรณ์การทดลอง

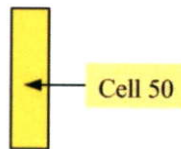
1). โปรแกรมประมวลผล MCNPX

2). คอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง

ขั้นตอนการทดลอง

1). กำหนดให้แผ่นทองมีความหนา 5.54×10^{-04} cm.

2). เขียนคำสั่ง Tally F4 เพื่อหาปริมาณนิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ย $\bar{\phi}$ ภายในเซลล์ ที่เซลล์ 50 ลักษณะของแผ่นทองดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ลักษณะของแผ่นทองสำหรับประมวลผลการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอน

3). กำหนดย่านพลังงานที่ต้องการประมวล ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้ $1.00\text{E}-09$, $2.00\text{E}-09$, $5.00\text{E}-09$, $1.00\text{E}-08$, $2.00\text{E}-08$, $5.00\text{E}-08$, $1.00\text{E}-07$, $2.00\text{E}-07$, $5.00\text{E}-07$, $1.00\text{E}-06$, $2.00\text{E}-06$, $5.00\text{E}-06$, $1.00\text{E}-05$, $2.00\text{E}-05$, $5.00\text{E}-05$, $1.00\text{E}-04$, $2.00\text{E}-04$, $5.00\text{E}-04$, $1.00\text{E}-03$, $2.00\text{E}-03$, $5.00\text{E}-03$, $1.00\text{E}-02$, $2.00\text{E}-02$, $5.00\text{E}-02$, $1.00\text{E}-01$, $2.00\text{E}-01$, $5.00\text{E}-01$, $1.00\text{E}+00$, $2.00\text{E}+00$, $5.00\text{E}+00$, $1.00\text{E}+01$ และ $2.00\text{E}+01$ ตามลำดับ

4). ประมวลผลปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ภายในเซลล์แผ่นทองด้วยสมการ (4.3) บันทึกผลการวิเคราะห์ลงในตารางที่ 4.14

5). ทำซ้ำข้อ 1). – 4). โดยเปลี่ยนความหนาของแผ่นทองเป็น 5.54×10^{-04} cm. , 5.80×10^{-04} cm. , 6.06×10^{-04} cm. , 6.33×10^{-04} cm. , 6.59×10^{-04} cm. , 6.86×10^{-04} cm. , 7.12×10^{-04} cm. , 7.38×10^{-04} cm. , 7.65×10^{-04} cm. และ 7.91×10^{-04} cm. ตามลำดับ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.25

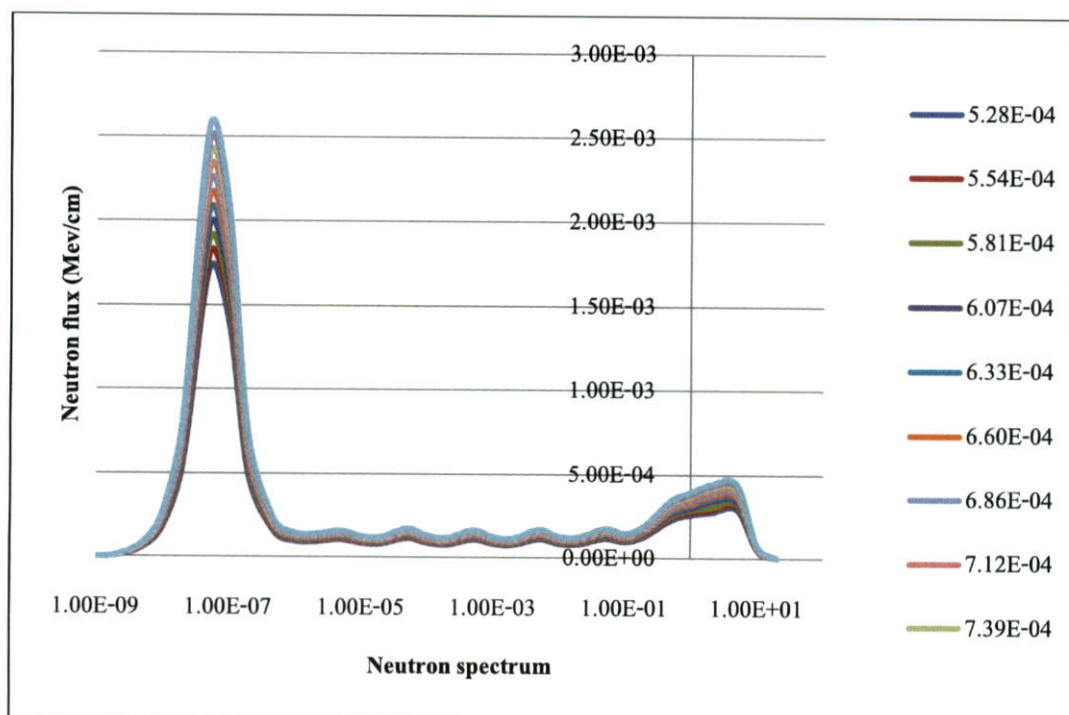
6). นำข้อมูลการประมวลผลของปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของทุกย่านพลังงานแต่ละความหนา มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของความหนาของแผ่นทอง กับย่านพลังงานนิวตรอน ดังแสดงในรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.25 การกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนภายในแผ่นทอง

การกระจายตัวของ พลังงานนิวตรอน	ความหนาของแผ่นทอง (เซนติเมตร)					
	5.28E-04	5.54E-04	5.81E-04	6.07E-04	6.33E-04	6.60E-04
1.00E-09	2.87E-06	3.01E-06	3.22E-06	3.37E-06	3.51E-06	3.65E-06
2.00E-09	8.53E-06	8.95E-06	9.35E-06	9.83E-06	1.02E-05	1.07E-05
5.00E-09	5.73E-05	6.01E-05	6.29E-05	6.57E-05	6.86E-05	7.13E-05
1.00E-08	1.79E-04	1.88E-04	1.97E-04	2.05E-04	2.14E-04	2.23E-04
2.00E-08	5.41E-04	5.68E-04	5.95E-04	6.22E-04	6.48E-04	6.74E-04
5.00E-08	1.72E-03	1.80E-03	1.89E-03	1.97E-03	2.06E-03	2.14E-03
1.00E-07	1.41E-03	1.48E-03	1.55E-03	1.62E-03	1.69E-03	1.76E-03
2.00E-07	4.91E-04	5.15E-04	5.43E-04	5.68E-04	5.92E-04	6.17E-04
5.00E-07	1.51E-04	1.58E-04	1.65E-04	1.73E-04	1.80E-04	1.88E-04
1.00E-06	9.85E-05	1.03E-04	1.08E-04	1.13E-04	1.18E-04	1.23E-04
2.00E-06	9.42E-05	9.89E-05	1.04E-04	1.08E-04	1.13E-04	1.18E-04
5.00E-06	1.08E-04	1.13E-04	1.19E-04	1.24E-04	1.29E-04	1.34E-04
1.00E-05	8.70E-05	9.13E-05	9.55E-05	9.98E-05	1.04E-04	1.08E-04
2.00E-05	8.29E-05	8.70E-05	9.12E-05	9.53E-05	9.95E-05	1.04E-04
5.00E-05	1.17E-04	1.23E-04	1.29E-04	1.35E-04	1.41E-04	1.46E-04
1.00E-04	8.85E-05	9.29E-05	9.74E-05	1.02E-04	1.06E-04	1.10E-04
2.00E-04	7.98E-05	8.37E-05	8.77E-05	9.17E-05	9.57E-05	9.97E-05
5.00E-04	1.11E-04	1.16E-04	1.22E-04	1.28E-04	1.33E-04	1.39E-04
1.00E-03	8.46E-05	8.89E-05	9.31E-05	9.73E-05	1.01E-04	1.06E-04
2.00E-03	7.85E-05	8.25E-05	8.64E-05	9.03E-05	9.41E-05	9.80E-05
5.00E-03	1.14E-04	1.20E-04	1.26E-04	1.32E-04	1.37E-04	1.43E-04
1.00E-02	8.67E-05	9.10E-05	9.53E-05	9.96E-05	1.04E-04	1.08E-04
2.00E-02	8.48E-05	8.90E-05	9.32E-05	9.75E-05	1.02E-04	1.06E-04
5.00E-02	1.19E-04	1.25E-04	1.31E-04	1.37E-04	1.43E-04	1.50E-04
1.00E-01	9.97E-05	1.05E-04	1.10E-04	1.15E-04	1.20E-04	1.25E-04
2.00E-01	1.33E-04	1.39E-04	1.46E-04	1.52E-04	1.58E-04	1.64E-04
5.00E-01	2.32E-04	2.44E-04	2.55E-04	2.67E-04	2.79E-04	2.90E-04
1.00E+00	2.64E-04	2.78E-04	2.91E-04	3.04E-04	3.18E-04	3.31E-04
2.00E+00	2.78E-04	2.91E-04	3.06E-04	3.43E-04	3.58E-04	3.73E-04
5.00E+00	2.98E-04	3.13E-04	3.27E-04	3.42E-04	3.57E-04	3.73E-04
1.00E+01	5.30E-05	5.57E-05	5.83E-05	6.10E-05	6.36E-05	6.63E-05
2.00E+01	3.31E-06	3.48E-06	3.64E-06	3.81E-06	3.97E-06	4.14E-06

ตารางที่ 4.25 (ต่อ) การกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนภายในแผ่นทอง

การกระจายตัวของ พลังงานนิวตรอน	ความหนาของแผ่นทอง (เซนติเมตร)				
	6.86E-04	7.12E-04	7.39E-04	7.65E-04	7.92E-04
1.00E-09	3.79E-06	3.94E-06	4.08E-06	4.22E-06	4.36E-06
2.00E-09	1.11E-05	1.15E-05	1.19E-05	1.24E-05	1.28E-05
5.00E-09	7.40E-05	7.68E-05	7.96E-05	8.24E-05	8.49E-05
1.00E-08	2.33E-04	2.42E-04	2.51E-04	2.60E-04	2.69E-04
2.00E-08	7.01E-04	7.28E-04	7.54E-04	7.80E-04	8.07E-04
5.00E-08	2.23E-03	2.31E-03	2.39E-03	2.48E-03	2.56E-03
1.00E-07	1.83E-03	1.90E-03	1.97E-03	2.04E-03	2.11E-03
2.00E-07	6.41E-04	6.66E-04	6.90E-04	7.15E-04	7.40E-04
5.00E-07	1.95E-04	2.02E-04	2.10E-04	2.17E-04	2.24E-04
1.00E-06	1.28E-04	1.33E-04	1.38E-04	1.43E-04	1.48E-04
2.00E-06	1.22E-04	1.27E-04	1.32E-04	1.36E-04	1.41E-04
5.00E-06	1.39E-04	1.44E-04	1.50E-04	1.55E-04	1.60E-04
1.00E-05	1.13E-04	1.17E-04	1.21E-04	1.25E-04	1.29E-04
2.00E-05	1.08E-04	1.12E-04	1.16E-04	1.20E-04	1.24E-04
5.00E-05	1.52E-04	1.58E-04	1.64E-04	1.70E-04	1.76E-04
1.00E-04	1.15E-04	1.19E-04	1.24E-04	1.28E-04	1.33E-04
2.00E-04	1.04E-04	1.08E-04	1.12E-04	1.16E-04	1.19E-04
5.00E-04	1.44E-04	1.50E-04	1.56E-04	1.61E-04	1.67E-04
1.00E-03	1.10E-04	1.14E-04	1.18E-04	1.23E-04	1.27E-04
2.00E-03	1.02E-04	1.06E-04	1.10E-04	1.14E-04	1.18E-04
5.00E-03	1.49E-04	1.54E-04	1.60E-04	1.66E-04	1.72E-04
1.00E-02	1.12E-04	1.17E-04	1.21E-04	1.25E-04	1.30E-04
2.00E-02	1.10E-04	1.14E-04	1.19E-04	1.23E-04	1.27E-04
5.00E-02	1.56E-04	1.62E-04	1.68E-04	1.73E-04	1.79E-04
1.00E-01	1.30E-04	1.35E-04	1.40E-04	1.45E-04	1.50E-04
2.00E-01	1.71E-04	1.78E-04	1.84E-04	1.91E-04	1.97E-04
5.00E-01	3.02E-04	3.14E-04	3.25E-04	3.37E-04	3.49E-04
1.00E+00	3.44E-04	3.57E-04	3.71E-04	3.84E-04	3.97E-04
2.00E+00	3.88E-04	4.03E-04	4.18E-04	4.33E-04	4.47E-04
5.00E+00	3.88E-04	4.03E-04	4.18E-04	4.32E-04	4.47E-04
1.00E+01	6.89E-05	7.16E-05	7.42E-05	7.69E-05	7.95E-05
2.00E+01	4.31E-06	4.47E-06	4.64E-06	4.80E-06	4.97E-06



รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนในแต่ละระดับพลังงาน

4.1.4 ประมวลผลปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของน้ำที่อยู่ภายในท่ออับรังสีซีที โดยเฉพาะช่วงความสูงของแผ่นทอง โดยเพิ่มชุดคำสั่ง SDn , FSn

อุปกรณ์การทดลอง

- 1). โปรแกรมประมวลผล MCNPX
- 2). คอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง

ขั้นตอนการทดลอง

- 1). กำหนดความหนาของแผ่นทอง 6.6×10^{-4} cm. แบ่งช่วงภายในแผ่นทองเป็น 5 ช่วงเท่าๆกัน
- 2). แบ่งช่วงน้ำภายในท่ออับรังสีซีทีเป็น 5 ช่วงเท่าๆกัน โดยในแต่ละช่วงมีปริมาตร 70.96780 ลบ.ซม. และแต่ละช่วงความรัศมีดังต่อไปนี้ 0.76107 ซม. , 1.07631 ซม. , 1.31820 ซม. , 1.52214 ซม. และ 1.70180 ซม. ตามลำดับ
- 3). เขียนคำสั่ง Tally F4 เพื่อหาปริมาณนิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ย $\bar{\phi}$ ภายในแผ่นทอง ที่เซลล์ 50 60 70 80 และ 90 ลักษณะของแผ่นทองดังรูปที่ 4.1 และหาปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ภายในเซลล์ของน้ำที่แบ่งช่วงที่เซลล์ 400 401 402 403 และ 4001 ตามลำดับ
- 4). กำหนดย่านพลังงานที่ต้องการประมวล ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้ 1.00E-09, 2.00E-09, 5.00E-09 , 1.00E-08, 2.00E-08, 5.00E-08, 1.00E-07, 2.00E-07, 5.00E-07, 1.00E-06, 2.00E-06, 5.00E-06, 1.00E-05, 2.00E-05, 5.00E-05, 1.00E-04, 2.00E-04, 5.00E-04, 1.00E-03, 2.00E-03,

5.00E-03, 1.00E-02, 2.00E-02, 5.00E-02, 1.00E-01, 2.00E-01, 5.00E-01, 1.00E+00, 2.00E+00, 5.00E+00, 1.00E+01 และ 2.00E+01 ตามลำดับ

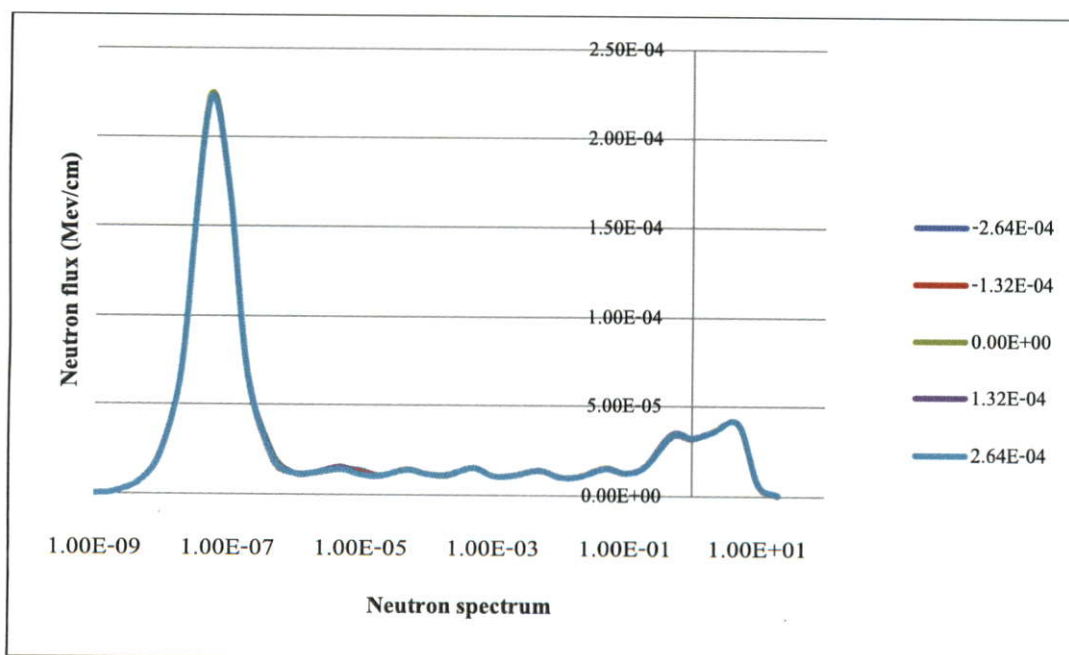
5). ประมวลผลปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ภายในเซลล์แผ่นทองและในเซลล์น้ำภายในท่ออาบรังสีซีทีด้วยสมการ (4.3) บันทึกผลการวิเคราะห์ลงในตารางที่ 4.26 และ 4.27

6). นำข้อมูลการประมวลผลของปริมาณนิวตรอนฟลักซ์แต่ละช่วงของแผ่นทองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของระยะช่วงแผ่นทองกับย่านพลังงานนิวตรอน ดังแสดงในรูปที่ 4.11

7). นำข้อมูลการประมวลผลของปริมาณนิวตรอนฟลักซ์แต่ละช่วงของน้ำภายในท่ออาบรังสีซีทีมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของน้ำภายในท่ออาบรังสีซีทีกับย่านพลังงานนิวตรอนแสดงในรูปที่ 4.12

8). วิเคราะห์การกระจายตัวนิวตรอนฟลักซ์ของน้ำภายในท่ออาบรังสีซีทีในช่วงพลังงานเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ โดยนำข้อมูลจากตารางที่ 4.27 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระจายตัวของเทอร์มัลนิวตรอนกับระยะช่วงของน้ำภายในท่ออาบรังสีซีทีดังแสดงในรูปที่ 4.13

9). วิเคราะห์การกระจายตัวนิวตรอนฟลักซ์ของน้ำภายในท่ออาบรังสีซีทีในช่วงพลังงานอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ โดยนำข้อมูลจากตารางที่ 4.27 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระจายตัวของอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนกับระยะช่วงของน้ำภายในท่ออาบรังสีซีทีดังแสดงในรูปที่ 4.14



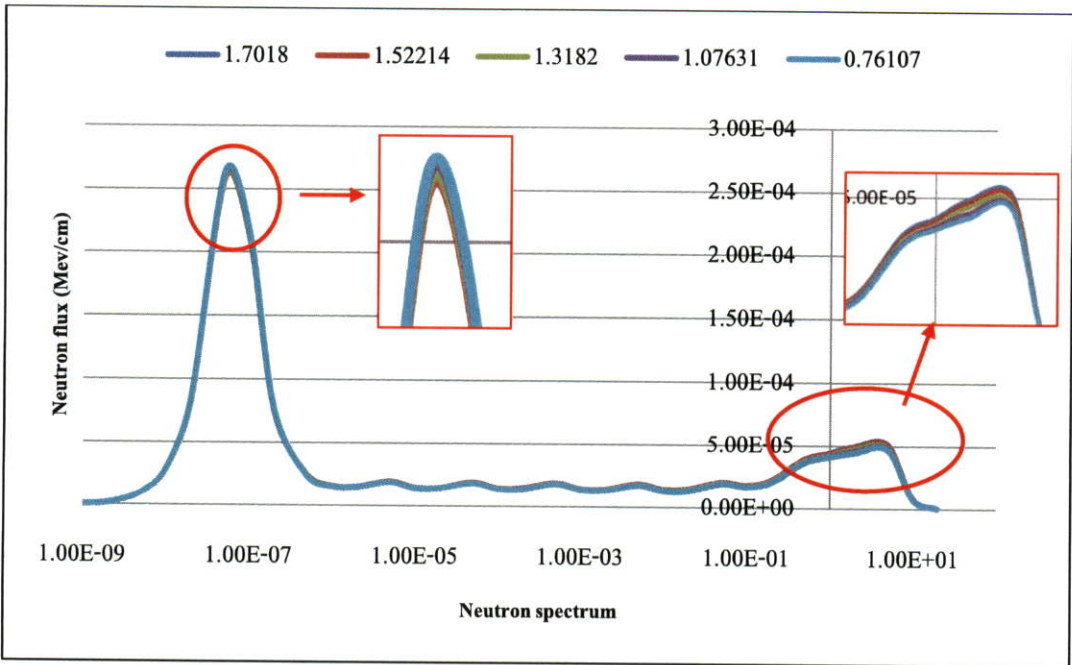
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนของแผ่นทองคำ

ตารางที่ 4.26 ผลการประมวลโปรแกรม MCNPX ของแผ่นทอง

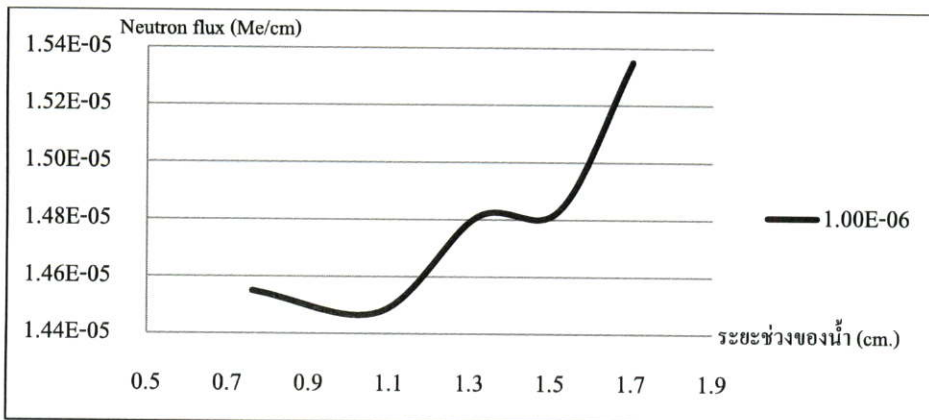
การกระจายตัวของ พลังงานนิวตรอน	ระยะช่วงของแผ่นทอง (เซนติเมตร)				
	-2.64E-04	-1.32E-04	0.00E+00	1.32E-04	2.64E-04
	(50)	(60)	(70)	(80)	(90)
1.00E-09	2.68789E-07	2.42478E-07	2.30649E-07	2.30649E-07	2.30649E-07
2.00E-09	1.14644E-06	1.15051E-06	1.16183E-06	1.16183E-06	1.16183E-06
5.00E-09	7.67681E-06	7.62410E-06	7.63692E-06	7.63606E-06	7.62752E-06
1.00E-08	2.38798E-05	2.37715E-05	2.35858E-05	2.34436E-05	2.32703E-05
2.00E-08	6.94749E-05	6.94777E-05	6.95812E-05	6.95885E-05	6.98197E-05
5.00E-08	2.19896E-04	2.19972E-04	2.21148E-04	2.19491E-04	2.19226E-04
1.00E-07	1.73482E-04	1.73460E-04	1.73709E-04	1.73897E-04	1.73908E-04
2.00E-07	6.64813E-05	6.53320E-05	6.53941E-05	6.56310E-05	6.54963E-05
5.00E-07	1.81934E-05	1.85036E-05	2.11150E-05	2.01196E-05	1.90188E-05
1.00E-06	1.16632E-05	1.16720E-05	1.16738E-05	1.16646E-05	1.16370E-05
2.00E-06	1.19559E-05	1.18796E-05	1.18589E-05	1.19121E-05	1.20305E-05
5.00E-06	1.40464E-05	1.40496E-05	1.50383E-05	1.52555E-05	1.39681E-05
1.00E-05	1.32854E-05	1.24347E-05	1.11259E-05	1.10682E-05	1.10588E-05
2.00E-05	1.05667E-05	1.05543E-05	1.04444E-05	1.04034E-05	1.05216E-05
5.00E-05	1.39597E-05	1.39570E-05	1.39342E-05	1.39219E-05	1.38976E-05
1.00E-04	1.15245E-05	1.14554E-05	1.14630E-05	1.14449E-05	1.14442E-05
2.00E-04	1.09270E-05	1.08190E-05	1.08005E-05	1.09998E-05	1.11115E-05
5.00E-04	1.50980E-05	1.50980E-05	1.50390E-05	1.51208E-05	1.51248E-05
1.00E-03	1.05229E-05	1.05274E-05	1.05274E-05	1.05274E-05	1.05257E-05
2.00E-03	1.08710E-05	1.08535E-05	1.08513E-05	1.08513E-05	1.08513E-05
5.00E-03	1.37804E-05	1.37565E-05	1.37829E-05	1.38573E-05	1.38484E-05
1.00E-02	1.01194E-05	1.01301E-05	1.01511E-05	1.01649E-05	1.01665E-05
2.00E-02	1.03773E-05	1.03984E-05	1.03937E-05	1.03689E-05	1.03586E-05
5.00E-02	1.48844E-05	1.50537E-05	1.52458E-05	1.51874E-05	1.51918E-05
1.00E-01	1.25066E-05	1.25066E-05	1.25453E-05	1.25946E-05	1.25946E-05
2.00E-01	1.64215E-05	1.64215E-05	1.64215E-05	1.63926E-05	1.63927E-05
5.00E-01	3.42457E-05	3.29738E-05	3.30442E-05	3.32026E-05	3.32334E-05
1.00E+00	3.20722E-05	3.17171E-05	3.17939E-05	3.18618E-05	3.20420E-05
2.00E+00	3.53296E-05	3.52452E-05	3.51794E-05	3.51796E-05	3.51909E-05
5.00E+00	4.01222E-05	4.01134E-05	4.01706E-05	4.00614E-05	4.00496E-05
1.00E+01	6.20046E-06	6.20046E-06	6.24712E-06	6.34430E-06	6.34430E-06
2.00E+01	2.61037E-07	2.61037E-07	4.03277E-07	6.22773E-07	6.22773E-07
total	9.41241E-04	9.37611E-04	9.41698E-04	9.40207E-04	9.37965E-04

ตารางที่ 4.27 แสดงผลการประมวลโปรแกรม MCNPX ของน้ำภายในท่อซีที

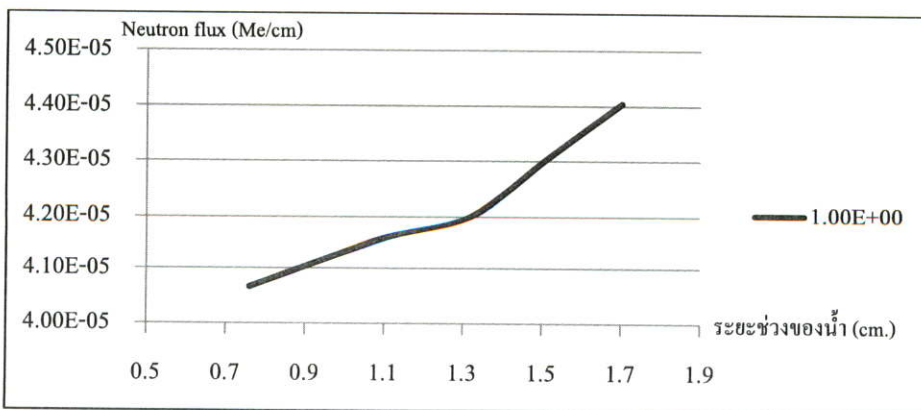
การกระจายตัวของ พลังงานนิวตรอน	ระยะความกว้างของแบบจำลอง (เซนติเมตร)				
	1.70180 (4001)	1.52214 (403)	1.31820 (402)	1.07631 (401)	0.76107 (400)
1.00000E-09	4.96019E-07	4.91880E-07	4.95280E-07	4.87048E-07	5.02539E-07
2.00000E-09	1.49823E-06	1.45831E-06	1.43388E-06	1.41726E-06	1.45881E-06
5.00000E-09	9.54725E-06	9.20164E-06	9.28101E-06	9.32112E-06	9.33235E-06
1.00000E-08	2.84942E-05	2.82547E-05	2.81222E-05	2.84123E-05	2.84121E-05
2.00000E-08	8.34985E-05	8.26674E-05	8.28529E-05	8.34375E-05	8.41016E-05
5.00000E-08	2.58970E-04	2.59088E-04	2.60325E-04	2.62432E-04	2.63831E-04
1.00000E-07	2.11440E-04	2.12312E-04	2.13602E-04	2.14858E-04	2.16217E-04
2.00000E-07	7.55002E-05	7.53293E-05	7.51458E-05	7.63088E-05	7.68985E-05
5.00000E-07	2.45651E-05	2.39999E-05	2.38320E-05	2.33918E-05	2.31799E-05
1.00000E-06	1.53506E-05	1.48336E-05	1.48098E-05	1.44770E-05	1.45497E-05
2.00000E-06	1.46861E-05	1.42066E-05	1.41336E-05	1.40809E-05	1.41621E-05
5.00000E-06	1.89498E-05	1.88915E-05	1.85084E-05	1.83899E-05	1.83236E-05
1.00000E-05	1.39965E-05	1.39600E-05	1.38104E-05	1.35022E-05	1.35595E-05
2.00000E-05	1.41275E-05	1.39312E-05	1.39352E-05	1.37235E-05	1.36274E-05
5.00000E-05	1.88635E-05	1.85027E-05	1.81164E-05	1.80826E-05	1.77039E-05
1.00000E-04	1.41868E-05	1.38684E-05	1.36147E-05	1.35632E-05	1.34591E-05
2.00000E-04	1.42578E-05	1.39755E-05	1.37076E-05	1.34485E-05	1.31834E-05
5.00000E-04	1.86062E-05	1.82013E-05	1.78085E-05	1.76959E-05	1.76984E-05
1.00000E-03	1.39870E-05	1.35091E-05	1.32534E-05	1.32142E-05	1.30670E-05
2.00000E-03	1.37172E-05	1.34663E-05	1.30857E-05	1.29887E-05	1.28479E-05
5.00000E-03	1.81301E-05	1.78279E-05	1.73078E-05	1.70771E-05	1.66756E-05
1.00000E-02	1.38668E-05	1.33418E-05	1.29828E-05	1.28844E-05	1.25371E-05
2.00000E-02	1.43256E-05	1.38415E-05	1.34997E-05	1.31216E-05	1.27968E-05
5.00000E-02	1.99923E-05	1.93466E-05	1.88587E-05	1.86096E-05	1.85933E-05
1.00000E-01	1.76080E-05	1.74004E-05	1.71342E-05	1.67495E-05	1.62925E-05
2.00000E-01	2.19217E-05	2.13456E-05	2.09392E-05	2.05107E-05	1.99341E-05
5.00000E-01	3.92251E-05	3.81596E-05	3.73327E-05	3.65956E-05	3.61479E-05
1.00000E+00	4.40469E-05	4.30918E-05	4.19955E-05	4.15013E-05	4.06662E-05
2.00000E+00	4.95191E-05	4.84575E-05	4.74019E-05	4.55548E-05	4.40647E-05
5.00000E+00	5.11768E-05	5.00267E-05	4.84581E-05	4.74233E-05	4.68316E-05
1.00000E+01	8.01545E-06	8.04372E-06	7.92114E-06	7.75923E-06	7.51055E-06
2.00000E+01	2.33148E-07	2.53407E-07	2.51689E-07	2.28659E-07	2.45457E-07
total	1.16280E-03	1.15129E-03	1.14396E-03	1.14125E-03	1.13841E-03



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนของน้ำภายในท่ออาบรังสี

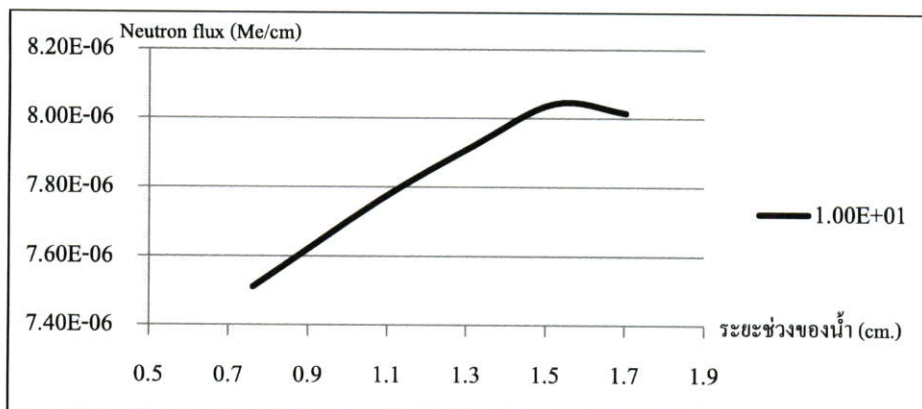


รูปที่ 4.13 การกระจายตัวเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ในช่วงของน้ำภายในท่ออาบรังสีซีที



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวอีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ในช่วงน้ำภายในท่ออาบรังสีซีที

10). วิเคราะห์การกระจายตัวนิวตรอนฟลักซ์ของน้ำภายในห้องอบรังสีซีทีในช่วงพลังงานนิวตรอนเร็วฟลักซ์ โดยนำข้อมูลจากตารางที่ 4.27 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระจายตัวของนิวตรอนเร็วฟลักซ์กับระยะช่วงของน้ำภายในห้องอบรังสีซีทีดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การกระจายตัวนิวตรอนเร็วฟลักซ์ ในช่วงน้ำภายในห้องอบรังสีซีที

4.1.5 ประมวลผลปริมาณอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์โดยการสร้างแบบจำลองแผ่นทองหุ้มด้วยตะกั่วแคดเมียม

อุปกรณ์

- 1). โปรแกรมประมวลผล MCNPX
- 2). คอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง

ขั้นตอนการทดลอง

1). กำหนดความหนาของแผ่นทอง 6.60×10^{-4} เซนติเมตร หุ้มด้วยตะกั่วแคดเมียมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.98 เซนติเมตร หนา 0.235 เซนติเมตร

2). เขียนคำสั่ง Tally F4 เพื่อหาปริมาณของนิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ย $\bar{\phi}$ ภายในเซลล์ของแผ่นทองที่เซลล์ 50

3). กำหนดย่านพลังงานที่ต้องการประมวล ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้ $1.00E-09, 2.00E-09, 5.00E-09, 1.00E-08, 2.00E-08, 5.00E-08, 1.00E-07, 2.00E-07, 5.00E-07, 1.00E-06, 2.00E-06, 5.00E-06, 1.00E-05, 2.00E-05, 5.00E-05, 1.00E-04, 2.00E-04, 5.00E-04, 1.00E-03, 2.00E-03, 5.00E-03, 1.00E-02, 2.00E-02, 5.00E-02, 1.00E-01, 2.00E-01, 5.00E-01, 1.00E+00, 2.00E+00, 5.00E+00, 1.00E+01$ และ $2.00E+01$ ตามลำดับ

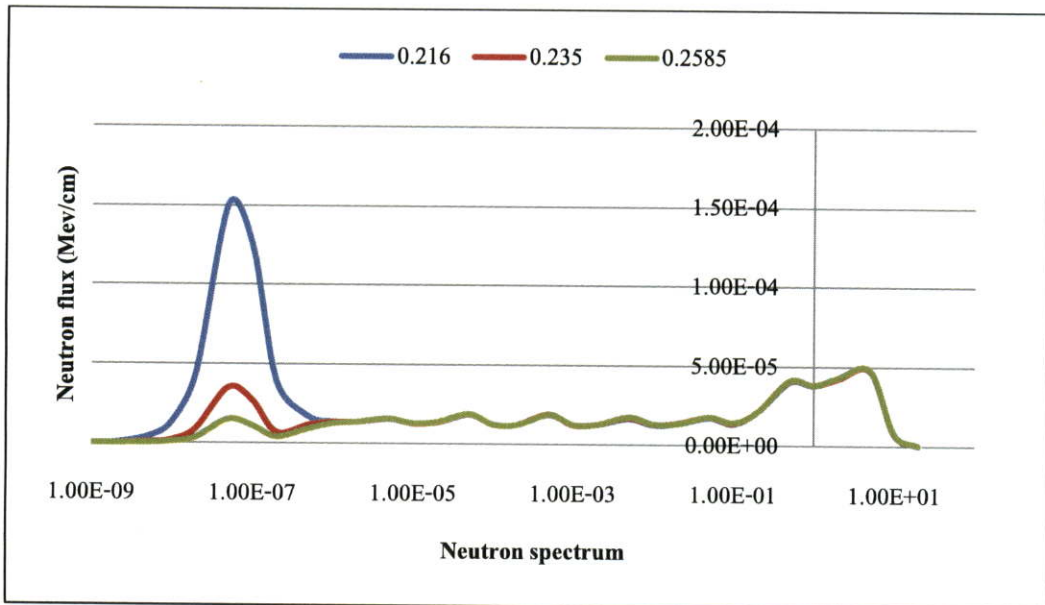
4). ประมวลผลปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ภายในเซลล์แผ่นทองด้วยสมการ (4.3) บันทึกผลการวิเคราะห์ลงในตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 การกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนภายในแผ่นทองหุ้มคลังแคดเมียม

การกระจายตัวของ พลังงานนิวตรอน	ปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของแผ่นทองหุ้มคลังแคดเมียมที่ความหนา (เซนติเมตร)		
	0.2160	0.2350	0.2585
1.00000E-09	3.79992E-07	8.20786E-08	1.63498E-08
2.00000E-09	6.04179E-07	9.51416E-08	4.15783E-08
5.00000E-09	4.26811E-06	6.43375E-07	1.90675E-07
1.00000E-08	1.35826E-05	1.99406E-06	1.09749E-06
2.00000E-08	4.46589E-05	9.32116E-06	3.69588E-06
5.00000E-08	1.50946E-04	3.52003E-05	1.51312E-05
1.00000E-07	1.24233E-04	2.73403E-05	1.12006E-05
2.00000E-07	3.91202E-05	6.96678E-06	4.24719E-06
5.00000E-07	1.72863E-05	1.17097E-05	9.29119E-06
1.00000E-06	1.41292E-05	1.35779E-05	1.27329E-05
2.00000E-06	1.38980E-05	1.37200E-05	1.36484E-05
5.00000E-06	1.58696E-05	1.59092E-05	1.58680E-05
1.00000E-05	1.31130E-05	1.28041E-05	1.29040E-05
2.00000E-05	1.38343E-05	1.37578E-05	1.37556E-05
5.00000E-05	1.89378E-05	1.89541E-05	1.90567E-05
1.00000E-04	1.28503E-05	1.25067E-05	1.24863E-05
2.00000E-04	1.25452E-05	1.25186E-05	1.23756E-05
5.00000E-04	1.90861E-05	1.92482E-05	1.88766E-05
1.00000E-03	1.27614E-05	1.24206E-05	1.25850E-05
2.00000E-03	1.30653E-05	1.27964E-05	1.27799E-05
5.00000E-03	1.68808E-05	1.73376E-05	1.77651E-05
1.00000E-02	1.30085E-05	1.32261E-05	1.32950E-05
2.00000E-02	1.38006E-05	1.38482E-05	1.35463E-05
5.00000E-02	1.77410E-05	1.79781E-05	1.79870E-05
1.00000E-01	1.39814E-05	1.40181E-05	1.43473E-05
2.00000E-01	2.16032E-05	2.14511E-05	2.14845E-05
5.00000E-01	4.05085E-05	4.10491E-05	4.11213E-05
1.00000E+00	3.83795E-05	3.83882E-05	3.82556E-05
2.00000E+00	4.28125E-05	4.24928E-05	4.29340E-05
5.00000E+00	4.78747E-05	4.79605E-05	4.80205E-05
1.00000E+01	7.66517E-06	7.65708E-06	7.76203E-06
2.00000E+01	4.97688E-07	4.97688E-07	4.97688E-07
total	8.29924E-04	5.27471E-04	4.78997E-04

5). ทำซ้ำข้อที่ 1). - 4). โดยเปลี่ยนความหนาของตลับแคดเมียมเป็น 0.2160 เซนติเมตร และ 0.2585 เซนติเมตร บันทึกผลลงในตารางที่ 4.28

6). นำข้อมูลการประมวลผลของปริมาณนิวตรอนฟลักซ์แต่ละความหนาของตลับแคดเมียม มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของแผ่นทองหุ้มตลับแคดเมียม กับย่านพลังงานนิวตรอน ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนในแผ่นทองที่หุ้มด้วยตลับแคดเมียม

4.1.6 ประมวลผลปริมาณนิวตรอนเร็วฟลักซ์ โดยสร้างแบบจำลองแผ่นอะลูมิเนียม อุปกรณ์

1). โปรแกรมประมวลผล MCNPX

2). คอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง

ขั้นตอนการทดลอง

1). กำหนดความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมให้มีความกว้าง 1.01 ซม. ยาว 1.01 ซม. และหนา 0.115 ซม.

2). เขียนคำสั่ง Tally F4 เพื่อหาปริมาณของนิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ย $\bar{\phi}_v$ ภายในเซลล์ของแผ่นอะลูมิเนียมที่เซลล์ 50

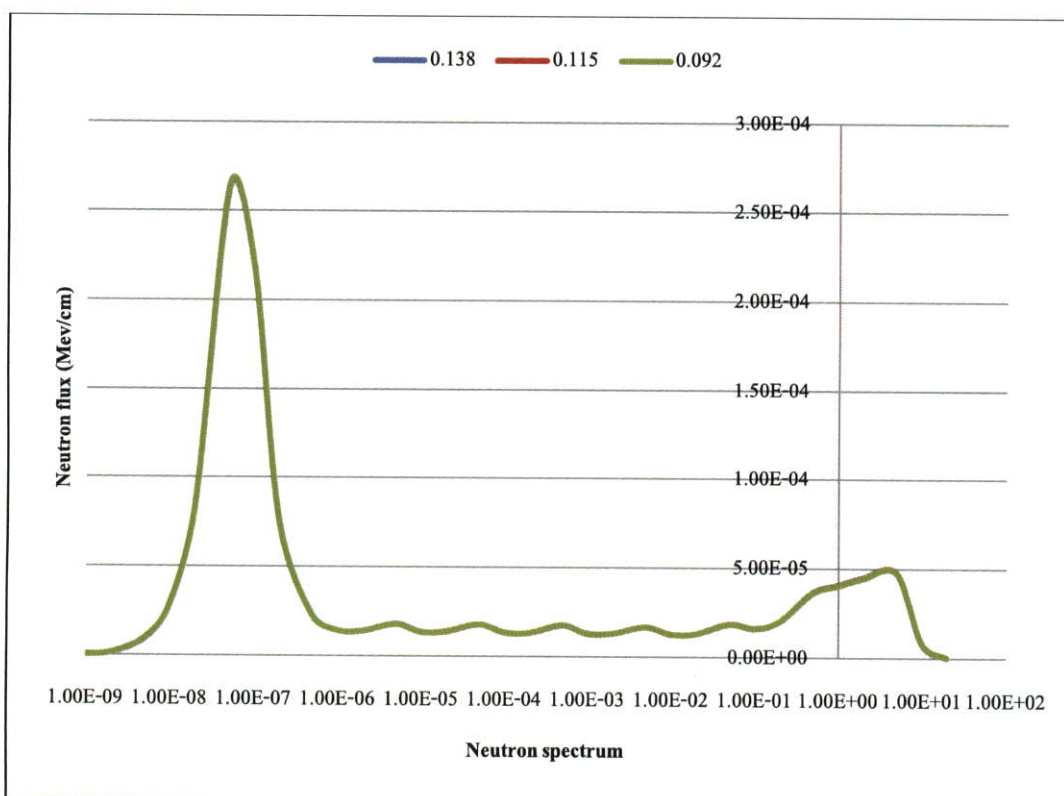
3). กำหนดย่านพลังงานที่ต้องการประมวล ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้ 1.00E-09, 2.00E-09, 5.00E-09, 1.00E-08, 2.00E-08, 5.00E-08, 1.00E-07, 2.00E-07, 5.00E-07, 1.00E-06, 2.00E-06, 5.00E-06, 1.00E-05, 2.00E-05, 5.00E-05, 1.00E-04, 2.00E-04, 5.00E-04, 1.00E-03, 2.00E-03, 5.00E-03, 1.00E-02, 2.00E-02, 5.00E-02, 1.00E-01, 2.00E-01, 5.00E-01, 1.00E+00, 2.00E+00,

5.00E+00, 1.00E+01 และ 2.00E+01 ตามลำดับ

4). ประมวลผลปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ภายในเซลล์แผ่นอะลูมิเนียมด้วยสมการ (4.3) บันทึกผลการวิเคราะห์ลงในตารางที่ 4.29

5). ทำซ้ำข้อที่ 1). – 4). โดยเปลี่ยนความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมเป็น 0.092 ซม. และ 0.138 ซม. บันทึกผลลงในตารางที่ 4.29

6). นำข้อมูลการประมวลผลของปริมาณนิวตรอนฟลักซ์แต่ละความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของแผ่นอะลูมิเนียม กับย่านพลังงานนิวตรอน ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนในแผ่นอะลูมิเนียม

ตารางที่ 4.29 การกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนของแผ่นอะลูมิเนียม

การกระจายตัวของ พลังงานนิวตรอน	ความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม (เซนติเมตร)		
	0.092	0.115	0.138
1.00E-09	4.99511E-07	5.36740E-07	5.40525E-07
2.00E-09	1.52778E-06	1.49794E-06	1.48124E-06
5.00E-09	9.50192E-06	9.37429E-06	9.25050E-06
1.00E-08	2.82638E-05	2.82853E-05	2.80985E-05
2.00E-08	8.36771E-05	8.36242E-05	8.36632E-05
5.00E-08	2.64758E-04	2.64478E-04	2.63658E-04
1.00E-07	2.16901E-04	2.17035E-04	2.17302E-04
2.00E-07	7.63452E-05	7.60682E-05	7.61037E-05
5.00E-07	2.28298E-05	2.28933E-05	2.30349E-05
1.00E-06	1.43226E-05	1.43530E-05	1.43488E-05
2.00E-06	1.38795E-05	1.39715E-05	1.38334E-05
5.00E-06	1.79226E-05	1.78621E-05	1.80330E-05
1.00E-05	1.34117E-05	1.34435E-05	1.35308E-05
2.00E-05	1.38579E-05	1.37397E-05	1.38341E-05
5.00E-05	1.79267E-05	1.79531E-05	1.80138E-05
1.00E-04	1.32898E-05	1.34304E-05	1.34728E-05
2.00E-04	1.32315E-05	1.31258E-05	1.31240E-05
5.00E-04	1.76934E-05	1.76557E-05	1.75801E-05
1.00E-03	1.28654E-05	1.29242E-05	1.29765E-05
2.00E-03	1.30445E-05	1.30241E-05	1.30158E-05
5.00E-03	1.67600E-05	1.68116E-05	1.68026E-05
1.00E-02	1.28085E-05	1.27090E-05	1.26731E-05
2.00E-02	1.29671E-05	1.30384E-05	1.30452E-05
5.00E-02	1.85057E-05	1.85930E-05	1.85825E-05
1.00E-01	1.61742E-05	1.61129E-05	1.62395E-05
2.00E-01	2.02191E-05	2.02533E-05	2.01857E-05
5.00E-01	3.62538E-05	3.64641E-05	3.66328E-05
1.00E+00	4.03184E-05	4.05430E-05	4.06159E-05
2.00E+00	4.46068E-05	4.48018E-05	4.49914E-05
5.00E+00	4.72633E-05	4.74671E-05	4.75013E-05
1.00E+01	8.02804E-06	8.00374E-06	7.98848E-06
2.00E+01	2.32341E-07	2.20216E-07	2.17722E-07
total	1.13989E-03	1.14029E-03	1.14037E-03

4.2 วิเคราะห์ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดย Gold foil activation

การวิเคราะห์ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์โดย gold foil activation แบ่งการวิเคราะห์ได้ 2 วิธี คือ การวิเคราะห์การวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์และการวิเคราะห์เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ด้วยหัววัดนิวตรอน (SPND) ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์การวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

การวิเคราะห์ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 จำเป็นต้องการเตรียมเครื่องมือ และวัสดุที่ดีเพื่อความปลอดภัยต่อเครื่องปฏิกรณ์ ผลจากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์มาจากการทดลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ของปี 2555 และ 2556 ซึ่งการเตรียมการทดลองมีขั้นตอนแบบเดียว แต่ผลการวัดนิวตรอนฟลักซ์มีความแตกต่างกันเพราะการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งการเตรียมอุปกรณ์และผลการทดลองทั้ง 2 ปี มีดังนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการทดลองวัดนิวตรอนฟลักซ์

- 1). แผ่นทองคำ 2 แผ่น
- 2). คลิปแคดเมียม 1 คลิป
- 3). แผ่นอะลูมิเนียม 1 แผ่น
- 4). ไม้บรรทัดอะลูมิเนียม 3 อัน
- 5). เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดระดับ 10^{-2} มิลลิกรัม 1 เครื่อง
- 6). คีมขนาดเล็ก 1 อัน
- 7). คีมยาว 1 อัน
- 8). เครื่องปิดผนึกพลาสติก 1 เครื่อง และถุงพลาสติกใส
- 9). เชือกเอ็นความยาวประมาณ 8-9 เมตร (เป็นเอ็นที่เหนียวไม่ขาดง่าย และไม่ทำปฏิกิริยากับนิวตรอนหรือรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์)
- 10). มีดคัตเตอร์ 1 อัน
- 11). นาฬิกาจับเวลา 1 เรือน
- 12). กระดาษกาวหรือเทปใส (ที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับนิวตรอน หรือรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์)
- 13). Gamma Spectrometer 1 เครื่อง

ขั้นตอนการทดลอง

- 1). เตรียมแผ่นทอง คลิปแคดเมียม และแผ่นอะลูมิเนียม โดยตรวจสอบความสมบูรณ์ และความสะอาดของวัสดุทั้งสามชนิด นำแผ่นทองและแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งบนเครื่องชั่งน้ำหนักบันทึกน้ำหนักลงในตารางที่ 4.30 โดยเลือกแผ่นทองแผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2 ให้มีน้ำหนักใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.30 บันทึกน้ำหนักวัสดุสำหรับวัดนิวตรอนฟลักซ์

ชนิดของวัสดุ	แผ่นทอง แผ่นที่ 1 (มิลลิกรัม)	แผ่นทอง แผ่นที่ 2 (มิลลิกรัม)	แผ่นอะลูมิเนียม (มิลลิกรัม)
ปี 2555	2.67	2.25	2.65
ปี 2556	1.60	1.70	2.67

2). แผ่นทองแผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2 ใช้สำหรับวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ และอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ แผ่นอะลูมิเนียมใช้สำหรับวัดนิวตรอนเร็วฟลักซ์

3). นำแผ่นทองที่ผ่านการคัดเลือกทั้งสองแผ่นและแผ่นอะลูมิเนียมมาใส่ถุงพลาสติกใสที่ตัดให้มีขนาดพอดีกับวัสดุทั้งสองชนิด ปิดผนึกถุงพลาสติกด้วยเครื่องปิดผนึก ตรวจสอบรอบรอยปิดผนึกสนิท ไม่ขาด และพอดีกับวัสดุหรือไม่

4). นำแผ่นทอง 1 แผ่น บรรจุในตลับแคดเมียม ปิดตลับแคดเมียมด้วยเทปใสเพื่อป้องกันแผ่นทองหลุดออกจากตลับ จากนั้นนำตลับแคดเมียมใส่ในช่องพลาสติกขนาดพอดีกับตลับและปิดผนึกให้เรียบร้อย

5). สำหรับการอบรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ได้เลือกไม้บรรทัดอะลูมิเนียมเพื่อติดวัสดุ เพราะมีการสลายตัวทางรังสีได้เร็ว โดยใช้ไม้บรรทัดอะลูมิเนียมที่มีความยาว 30 เซนติเมตร

- นำแผ่นทองคำแผ่นที่ 1 ติดที่ไม้บรรทัดอะลูมิเนียมด้วยเทปใสที่ระยะ 19.05 ซม. จะเป็นระยะที่ตรงกับกึ่งกลางของแกนเครื่องปฏิกรณ์พอดี

- นำแผ่นทองคำแผ่นที่ 2 หุ้มตลับแคดเมียม ติดที่ไม้บรรทัดอะลูมิเนียมด้วยเทปใสที่ระยะ 19.05 ซม.

- นำแผ่นอะลูมิเนียมติดที่ไม้บรรทัดอะลูมิเนียมด้วยเทปใสที่ระยะ 19.05 เซนติเมตร

7). จดหมายเลขแผ่นทองคำบนไม้บรรทัดอะลูมิเนียม

8). ผูกเส้นเอ็นที่ด้านบนไม้บรรทัดอะลูมิเนียม ใช้ความยาวของเส้นเอ็นประมาณ 8-9 เมตร

9). หากยังไม่มีเครื่องเดินเครื่องปฏิกรณ์ ให้ทำการติดเครื่องเดินที่กำลัง 100 kW หย่อนไม้บรรทัดอะลูมิเนียมที่ติดแผ่นทองคำแผ่นที่ 1 ลงในท่ออบรังสีซีทีเริ่มจับเวลาเมื่อไม้บรรทัดอะลูมิเนียมกระทบกับปลายท่ออบรังสี และกำลังของเครื่องอยู่ในสถานะคงที่ 100 kW อบรังสีเป็นเวลานาน 20 นาที เมื่อครบเวลานับที่กเวลาในตารางที่ 4.31 นำไม้บรรทัดอะลูมิเนียมออกจากท่ออบรังสีไปเก็บในอุปกรณ์กำบังรังสีนอกบ่อเครื่องปฏิกรณ์

10). ทำซ้ำข้อที่ 9). โดยเปลี่ยนเป็นไม้บรรทัดอะลูมิเนียมติดแผ่นทองคำแผ่นที่ 2 ลงในท่ออบรังสีซีที และเวลาอบรังสีนาน 40 นาที

11.) ทำซ้ำข้อที่ 9). โดยเปลี่ยนเป็นไม้บรรทัดอะลูมิเนียมติดแผ่นอะลูมิเนียม ลงในท่ออบรังสีซีทีและเวลาอบรังสีนาน 20 นาที ที่กำลังเครื่องปฏิกรณ์ 500 kW

ตารางที่ 4.31 บันทึกเวลาการอบรังสีภายในท่ออบรังสีซีที

ปีการทดลอง	แผ่นฟอยล์ 1				แผ่นฟอยล์ 2			
	เวลาเริ่มต้น	เวลาสิ้นสุด	ระยะเวลา (นาท)	ระดับกำลัง (kW)	เวลาเริ่มต้น	เวลาสิ้นสุด	ระยะเวลา (นาท)	ระดับกำลัง (kW)
2555	15:06	15:26	0:20	100	10:02	10:42	0:40	100
2556	14:06	14:26	0:20	100	11:02	11:42	0:40	100

ปีการทดลอง	แผ่นอะลูมิเนียม			
	เวลาเริ่มต้น	เวลาสิ้นสุด	ระยะเวลา (นาท)	ระดับกำลัง (kW)
2555	10:28	10:48	0:20	500
2556	13:28	13:48	0:20	500

12). พักไม้บรรทัดอะลูมิเนียมที่ติดแผ่นทองแผ่นที่ 1 และ 2 เป็นเวลา 3-10 วัน และพักไม้บรรทัดที่ติดแผ่นอะลูมิเนียมเป็น 1-2 วัน เพื่อให้มีการคลายตัวทางรังสีของวัสดุสามชิ้น

13). เมื่อครบกำหนดของการพัก ใช้เครื่องวัดรังสีไกเกอร์มุนเลอร์ วัดความแรงรังสีที่เหลืออยู่ หากอยู่ปริมาณที่ปลอดภัยให้แกะเทปที่ติดไม้บรรทัดอะลูมิเนียมใช้ที่คีมจับแผ่นทองคำและแผ่นอะลูมิเนียมใส่ถุงพลาสติกใส ใส่ชั้นละ 1 ถุง ทำเครื่องหมายบอกตำแหน่งบนซองพลาสติก

14). แจ้งเจ้าหน้าที่ฟิสิกส์สุขภาพเพื่อขอนำแผ่นทองคำหรือแผ่นอะลูมิเนียมทั้งหมดออกจากพื้นที่ควบคุม และนำไปนับวัดต่อไป

15). เปิดระบบนับวัดชนิด แกมมาสเปกโตรมิเตอร์

16). นำแผ่นทองคำแผ่นที่ 1 วางในที่วางสารตัวอย่างของระบบนับวัดชนิดแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ที่ระยะห่างจากหัววัด 5 เซนติเมตร ทำการนับวัดเป็นเวลา 600 วินาที และตรวจสอบค่า dead time จากการวัด

* หากมีค่า dead time สูงกว่า 10% ให้เพิ่มระยะห่างจากหัววัดครั้งละ 5 เซนติเมตร และทำการนับวัดซ้ำเป็นเวลา 600 วินาที จนกว่าค่า dead time จะต่ำกว่า 10% และบันทึกระยะห่างจากหัววัดที่ได้ลงในตารางที่ 4.32

* ระยะห่างจากหัววัดที่ได้ในข้อ 16. เมื่อครบเวลาการนับ 600 วินาทีแล้ว หากจำนวนการนับวัดมีค่าน้อยกว่า 10000 counts ให้เพิ่มเวลาการวัดครั้งละ 100 วินาที จนกว่าจำนวนการนับวัดมีค่ามากกว่า

10000 counts

17). ทำซ้ำข้อ 16). โดยเปลี่ยนการนับวัดเป็นแผ่นทองแผ่นที่ 2 และแผ่นอะลูมิเนียมตามลำดับ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.21

18). บันทึกจำนวนค่านับวัดได้โฟโตพีคที่พลังงานประมาณ 412 KeV สำหรับแผ่นฟอยล์ทองคำและที่พลังงานประมาณ 1,368 KeV สำหรับแผ่นอะลูมิเนียม บันทึกผลลงในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.32 การนับวัดทางรังสีโดยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

ปีการทดลอง	แผ่นฟอยล์ 1				แผ่นฟอยล์ 2			
	ระยะห่างจากหัววัด (ซม.)	เวลาที่เริ่มวัด	ระยะเวลาที่นับวัด (วินาที)	ค่านับวัดที่พลังงาน 412 KeV	ระยะห่างจากหัววัด (ซม.)	เวลาที่เริ่มวัด	ระยะเวลาที่นับวัด (วินาที)	ค่านับวัดที่พลังงาน 412 KeV
2555	5	15:33	600	413563	5	13:36	600	382796
2556	5	14:45	600	671245	5	14.55	600	426221

ปีการทดลอง	แผ่นอะลูมิเนียม			
	ระยะห่างจากหัววัด (ซม.)	เวลาที่เริ่มวัด	ระยะเวลาที่นับวัด (วินาที)	ค่านับวัดที่พลังงาน 1,368 KeV
2555	0	15:08	600	161528
2556	0	13.10	600	152578

19). คำนวณปริมาณเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ อีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ และนิวตรอนเร็วฟลักซ์ จากแผ่นทองแผ่นที่ 1 แผ่นทองแผ่นที่ 2 และแผ่นอะลูมิเนียม ตามลำดับ โดยคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

- เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

$$\phi_{th} = \frac{1}{Eff * f * \sigma_{th}} \left[\frac{CPS_{(bare)}}{N_{Au1} (1 - e^{-\lambda_{tr1}}) e^{-\lambda_{td1}}} - \frac{CPS_{(Cd)}}{N_{Au2} (1 - e^{-\lambda_{tr2}}) e^{-\lambda_{td2}}} \right] \quad \dots(4.8)$$

-อีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

$$\phi_{epi} = \frac{CPS_{(Cd)}}{Eff * f * N_{Au2} I (1 - e^{-\lambda_{tr2}}) e^{-\lambda_{td2}}} \quad (4.9)$$

-นิวตรอนเร็วฟลักซ์

$$\phi_f = \frac{CPS}{Eff * f * N_{Al} \sigma_f (1 - e^{-\lambda_{tr}}) e^{-\lambda_{td}}} \quad (4.10)$$

โดย	N_{Au1}	จำนวนอะตอมของแผ่นทองแผ่นที่ 1
	N_{Au2}	จำนวนอะตอมของแผ่นทองแผ่นที่ 2
	N_{Al}	จำนวนอะตอมของแผ่นอะลูมิเนียม
	σ	ค่า Microscopic Cross Section หน่วยเป็น cm^2
	λ	ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant)
	tr	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบนิวตรอน
	td	ระยะเวลาที่ปล่อยทิ้งไว้ให้อะตอมสลายตัวไป
	Eff	ประสิทธิภาพของเครื่องวัดแกมมาสเปกโตรมิเตอร์
	cps	จำนวนนับต่อวินาที
	f	decay fraction ของแกมมาพลังงานที่วัด

แทนค่าลงในสมการ (4.8) (4.9) และ (4.10) บันทึกผลการคำนวณลงในตารางที่ 4.33

ตารางที่ 4.33 ผลการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์จากการทดลอง

ปีการทดลอง	นิวตรอนฟลักซ์ ($neutron/cm^2s$)		
	เทอร์มัลนิวตรอน	อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
ปี 2555	1.776×10^{13}	2.480×10^{12}	1.273×10^{13}
ปี 2556	4.684×10^{13}	3.214×10^{12}	3.929×10^{12}

21). คำนวณหาอัตราการดูดกลืนของคลัทแคดเมียม คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$Cd\ Ratio(Au) = \frac{(\phi_{th} \times \sigma_{th}) + (\phi_{epi} \times I_{eff})}{(\phi_{epi} \times I_{eff})} \quad (4.11)$$

คำนวณ ค่า Cd ratio (Au) ปี 2555 ได้ 2.28

ค่า Cd ratio (Au) ปี 2556 ได้ 3.33

22). หาอัตราส่วนระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ กับนิวตรอนเร็วฟลักซ์ คำนวณจากสมการ

$$\text{อัตราส่วน} = \frac{\phi_{th}}{\phi_f} \quad (4.12)$$

คำนวณค่าอัตราส่วนได้ดังนี้

$$\text{ปี 2555} = 1.40$$

$$\text{ปี 2556} = 11.9216$$

4.2.2 การวิเคราะห์เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ด้วยหัววัดนิวตรอน (SPND)

การวิเคราะห์เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ด้วยหัววัดนิวตรอน เป็นอีกวิธีที่ใช้วิเคราะห์จำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นภายในเครื่อง ปปว.-1/1 โดยมีอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองดังนี้
อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการทดลองวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ด้วยหัววัดนิวตรอน

1. หัววัดชนิด SPND (Self Powered Neutron Detector)
2. เครื่องวัดกระแสที่มีความละเอียดระดับ 10^{-12} A (picoammeter)
3. แผ่นอะลูมิเนียมสำหรับยึดหัววัดชนิด SPND
4. เส้นลวดเอ็น

ขั้นตอนการทดลอง

1. เตรียมหัววัดนิวตรอนให้พร้อมกับการใช้งาน ตรวจสอบความสมบูรณ์ของสายไฟนำหัววัดนิวตรอนติดกับแผ่นอะลูมิเนียมแล้วพันด้วยเทปพันสายไฟ โดยให้กึ่งกลางของหัววัดนิวตรอนอยู่ที่ตำแหน่งสูง 7.5 นิ้วจากด้านล่างสุดของแผ่นอะลูมิเนียม ต่อปลายอีกข้างของหัววัดนิวตรอนเข้ากับเครื่องวัดกระแส โดยต่อขั้วบวกเข้ากับแกนกลางของสายหัววัดนิวตรอน และต่อสาย GND
2. ผูกเส้นลวดเอ็นเข้ากับแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อช่วยในการหย่อนแผ่นอะลูมิเนียมลงในท่ออาบรังสีภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์
3. เปิดเครื่องวัดกระแสและทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อปรับสภาพเครื่องให้เข้าสู่สภาวะการใช้งาน และตรวจสอบว่าท่ออาบรังสีที่ ไม่มีตัวอย่างหรืออุปกรณ์ใดๆ อยู่ภายในหากมีอยู่ให้นำออกก่อนการทดลอง
4. ทำการหย่อนแผ่นอะลูมิเนียมลงในท่ออาบรังสีที่ โดยดึงให้แผ่นอะลูมิเนียมมีระยะสูงจากตำแหน่งล่างสุดของท่ออาบรังสี 5 นิ้ว
5. เดินเครื่องปฏิกรณ์ตามตารางการทดลองและบันทึกผลลง ตารางที่ 4.34

ตารางที่ 4.34 ผลการทดลองการวัดเทอร์มัลนิวตรอนด้วยหัววัดนิวตรอน

กำลังเครื่องปฏิกรณ์ (kW)	เดินเครื่อง (นาที)	ค่ากระแสที่อ่านได้ (nA)
10	5	2.072
100	5	21.350
500	5	102.630
1,000	5	209.100
1,200 kW	5	232.900

6. นำค่ากระแสที่อ่านได้จากตารางที่ 4.34 มาคำนวณหาค่าเทอร์มัลนิวตรอนด้วยสมการและบันทึกผลการคำนวณลงในตารางที่ 4.35

$$\text{Thermal neutron flux} = \text{current (nA)} \times \text{constant detector} \quad (4.13)$$

โดย constant detector = 9.42×10^{-21}

ตารางที่ 4.35 ผลการคำนวณเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ วัดด้วยหัววัดนิวตรอน

กำลังเครื่องปฏิกรณ์ (kW)	เทอร์มัลนิวตรอน ($neutron/cm^2s$)
10	2.200×10^{11}
100	2.266×10^{12}
500	1.089×10^{13}
1,000	2.200×10^{13}
1,200 kW	2.472×10^{13}

4.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทั้งสองวิธี

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ นำผลของพลังงานของนิวตรอนในย่านที่สนใจมาเปรียบเทียบกันหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิด ขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

1). กำหนดขนาดแผ่นทองจากการคำนวณด้วยน้ำหนักด้วยสมการ (4.13) ซึ่งแผ่นทองแผ่นที่ 1 2.67 mg. , แผ่นทองแผ่นที่ 2 น้ำหนัก 2.25 mg. และแผ่นอะลูมิเนียม 0.2786 g. บันทึกค่าลงในตารางที่ 4.36

$$\text{Gold foil thickness(cm.)} = \frac{\text{Gold foil weight(mg.)} \times 0.001}{\text{Gold density (g} \cdot \text{cm}^{-3}) \times \pi \times r^2(\text{cm}^2)} \quad (4.13)$$

โดย Gold foil weight น้ำหนักแผ่นทองคำ (mg.)
 Gold density ค่าความหนาแน่นของทองคำ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
 r^2 รัศมีของแผ่นทองคำ (cm^2)

ตารางที่ 4.36 ผลการคำนวณความหนาแน่นแผ่นทอง ปี 2555

แผ่นทอง	น้ำหนัก (มิลลิกรัม)	ความหนา (เซนติเมตร)
แผ่นที่ 1	2.67	7.0459×10^{-4}
แผ่นที่ 2	2.25	5.9374×10^{-4}

2.) เขียนคำสั่ง Tally F4 เพื่อหาปริมาณนิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ย $\bar{\phi}_v$ ภายในเซลล์ของแผ่นทองที่เซลล์ 50

3.) กำหนดย่านพลังงานเทอร์มัลนิวตรอน อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน และนิวตรอนเร็วตามลำดับ

4.) ประมวลผลบนโปรแกรม MCNPX เพื่อหาปริมาณนิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์ดังสมการ (4.3) บันทึกผลการวิเคราะห์ลงในตารางที่ 4.37

5.) นำผลการจำลอง $\phi_{Tally F4}$ จากตารางที่ 4.37 มาคำนวณเพื่อหาปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นต่อกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ดังสมการ (4.14) และบันทึกผลการคำนวณลงในตารางที่ 4.38

$$\phi = \text{Reactor Power} \times 3.467 \times 10^{10} \times \phi_{Tally F4} \quad (4.14)$$

โดย ϕ จำนวนนิวตรอนฟลักซ์ หน่วย $neutron/cm^2s$

Reactor Power กำลังเครื่องปฏิกรณ์ หน่วย เมกะวัตต์ (MW)

$\phi_{Tally F4}$ จำนวนนิวตรอนฟลักซ์จากการจำลอง หน่วย $1/cm^2$

ตารางที่ 4.37 ผลการจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ ตามแบบการทดลองปี 2555

วัสดุ	$\phi_{Tally F4} (1/cm^2)$		
	เทอร์มัลนิวตรอน	อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
แผ่นทอง แผ่นที่ 1	7.13158×10^{-4}	3.13244×10^{-4}	9.77559×10^{-5}
แผ่นทอง แผ่นที่ 2	9.85351×10^{-4}	2.91621×10^{-3}	8.81535×10^{-4}
แผ่นอะลูมิเนียม	6.98981×10^{-4}	3.22650×10^{-4}	9.99346×10^{-5}

ตารางที่ 4.38 ผลการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ต่อกำลังของเครื่องปฏิกรณ์จากแบบจำลองปี 2555

	$\phi (neutron/cm^2s)$		
	เทอร์มัลนิวตรอน	อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
แผ่นทอง แผ่นที่ 1	2.96702×10^{13}	1.30322×10^{13}	4.06704×10^{12}
แผ่นทอง แผ่นที่ 2	4.09945×10^{13}	1.1361×10^{13}	3.66754×10^{13}
แผ่นอะลูมิเนียม	2.9768×10^{13}	1.3424×10^{13}	3.440×10^{12}

6.) นำผลการคำนวณตารางที่ 4.38 มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลอง gold foil activation กับผลการจำลองโปรแกรม MCNPX โดยค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ใช้ผลจากแผ่นทองแผ่นที่ 1 ค่าอีพิลเทอร์มัลนิวตรอนใช้ผลจากแผ่นทองแผ่นที่ 2 และค่านิวตรอน

เร็วฟลักซ์ใช้ผลจากแผ่นอะลูมิเนียม เปรียบเทียบผลการทดลองปี 2555 ในตารางที่ 4.22 บันทึกผลเปอร์เซ็นต์ความคาดเคลื่อนลงในตารางที่ 4.39

ตารางที่ 4.39 ผลการเปรียบเทียบการวัดนิวตรอนฟลักซ์ ปี 2555

	เทอร์มัลนิวตรอน	อิพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
ผลการเปรียบเทียบ (%)	67.06	358.09	-72.75

7). ทำการประมวลผลแบบจำลองซ้ำข้อที่ 1). – 4). โดยเขียนคำสั่ง Tally Multiplier เพิ่มเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาในแผ่นทองที่ 1 และแผ่นทองที่ 2 บันทึกผลลงในตารางที่ 4.40

8). คำนวณหา Cd ratio โดยนำค่าหาด้วยสมการต่อไปนี้

$$Cd\ ratio = \frac{\text{Reaction of thermal neutron flux}_{Au1}}{\text{Reaction of epithermal neutron flux}_{Au2}} \quad (4.15)$$

บันทึกค่าที่คำนวณได้ลงในตารางที่ 4.38

ตารางที่ 4.40 อัตราการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ ปี 2555

	เทอร์มัลนิวตรอน	อิพิลเทอร์มัลนิวตรอน	ϕ_{Au1} / ϕ_{Au2}
ปี 2555	1.0945×10^{-4}	2.7307×10^{-4}	0.4008

9). ทำการประมวลผลแบบจำลองผลการทดลองปี 2556 โดยทำซ้ำข้อที่ 1). – 4). แต่เปลี่ยนน้ำหนักของวัสดุ แผ่นทองแผ่นที่ 1 น้ำหนัก 1.60 mg. แผ่นทองแผ่นที่ 2 น้ำหนัก 1.70 mg. และแผ่นอะลูมิเนียมหนัก 0.2675 กรัม บันทึกผลการคำนวณความหนาแผ่นทองลงในตารางที่ 4.41

10). บันทึกผลจากการประมวลโดยโปรแกรม MCNPX ลงในตารางที่ 4.42

ตารางที่ 4.41 ผลการคำนวณความหนาแผ่นทอง ปี 2556

แผ่นทอง	น้ำหนัก (มิลลิกรัม)	ความหนา (เซนติเมตร)
แผ่นที่ 1	1.60	4.2221×10^{-4}
แผ่นที่ 2	1.70	4.4860×10^{-4}

ตารางที่ 4.42 ผลการจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ ตามแบบการทดลองปี 2556

	$\phi_{Tally F4} (1/cm^2)$		
	เทอร์มัลนิวตรอน	อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
แผ่นทอง แผ่นที่ 1	4.29270×10^{-4}	1.87784×10^{-4}	2.68894×10^{-4}
แผ่นทอง แผ่นที่ 2	6.98981×10^{-5}	2.06561×10^{-4}	2.93327×10^{-4}
แผ่นอะลูมิเนียม	6.98981×10^{-4}	3.22650×10^{-4}	9.99346×10^{-5}

11). นำผลการจำลอง $\phi_{Tally F4}$ จากตารางที่ 4.42 มาคำนวณเพื่อหาปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นต่อกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ดังสมการ (4.14) และบันทึกผลการคำนวณลงในตารางที่ 4.43

ตารางที่ 4.43 ผลการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์จากแบบจำลองปี 2556

	$\phi (neutron/cm^2s)$		
	เทอร์มัลนิวตรอน	อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
แผ่นทอง แผ่นที่ 1	1.7859×10^{13}	7.8126×10^{12}	1.1187×10^{13}
แผ่นทอง แผ่นที่ 2	2.9080×10^{12}	8.5938×10^{12}	1.2204×10^{13}
แผ่นอะลูมิเนียม	2.9768×10^{13}	1.3424×10^{13}	3.5045×10^{12}

12). ทำการประมวลผลแบบจำลองซ้ำข้อที่ 1). – 4). โดยเขียนคำสั่ง Tally Multiplier เพิ่มเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาในแผ่นทองที่ 1 และแผ่นทองที่ 2 บันทึกผลลงในตารางที่ 4.44

ตารางที่ 4.44 อัตราการเกิดนิวตรอนฟลักซ์ ปี 2556

	เทอร์มัลนิวตรอน	อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	ϕ_{Au1} / ϕ_{Au2}
ปี 2556	2.1168×10^{-4}	2.9026×10^{-4}	7.2929

13). คำนวณหา Cd ratio โดยนำค่าหาด้วยสมการ (4.15) และบันทึกผลลงในตารางที่ 4.44

14). นำผลการคำนวณตารางที่ 4.42 มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลอง gold foil activation กับผลการจำลองโปรแกรม MCNPX โดยค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ใช้ผลจากแผ่นทองแผ่นที่ 1 ค่าอีพิลเทอร์มัลนิวตรอนใช้ผลจากแผ่นทองแผ่นที่ 2 และค่านิวตรอนเร็วฟลักซ์ใช้ผลจากแผ่นอะลูมิเนียม เปรียบเทียบผลการทดลองปี 2556 ในตารางที่ 4.43 บันทึกผลเปอร์เซ็นต์ความคาดเคลื่อนลงในตารางที่ 4.45

ตารางที่ 4.45 ผลการเปรียบเทียบการวัดนิวตรอนฟลักซ์ ปี 2556

	เทอร์มัลนิวตรอน	อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
ผลการเปรียบเทียบ (%)	-67.87	167.38	-10.81

15). นำผลการทดลองการวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ด้วยหัววัดนิวตรอน ตารางที่ 4.35 เฉพาะที่กำลังการเดินเครื่อง 1,200 kW เปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม MCNPX ตารางที่ 4.43 และผลการทดลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วย gold foil activation ตารางที่ 4.44 บันทึกผลลงในตารางที่ 4.46 โดยนำผลแบบจำลอง MCNPX เป็นตัวเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้งสองวิธี

ตารางที่ 4.46 ผลการเปรียบเทียบเทอร์มัลนิวตรอนด้วยหัววัดนิวตรอน gold foil activation และแบบจำลอง MCNPX ที่กำลังเครื่อง 1,200 kW

	แบบจำลอง MCNPX	Gold foil activation	%	หัววัดนิวตรอน	%
เทอร์มัลนิวตรอน	1.79×10^{13}	4.69×10^{13}	67.87	2.47×10^{13}	27.77

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยไทย ปปว.-1/1 การเกิดนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 การวิเคราะห์ห่อกัมมันต์ด้วยแบบจำลอง และการวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยวิธี foil activation ซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ต่อไปนี้

5.1 วิจัยผลการวิจัย

จากการศึกษาการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์พบว่า การเกิดนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ ในการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์แต่ละครั้งจะคำนึงถึงการกระจายตัวของนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ให้มีการกระจายตัวสม่ำเสมอภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยบริเวณวง A – D จะมีการกระจายตัวของนิวตรอนฟลักซ์มาก เพราะในวง A-D บรรจุแท่งเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะยูเรเนียม 20% อยู่ตามตำแหน่งต่างๆอยู่หลายตำแหน่ง ทำให้มีการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันในบริเวณดังกล่าวมาก และในวงถัดมา วง E – G บรรจุแท่งเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะยูเรเนียม 8.5% ทำให้มีการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันน้อยลง และในบริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้กับขอบนอกของแกนเครื่องปฏิกรณ์มากกว่าจึงทำให้นิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นสามารถวิ่งหลุดออกจากแกนเครื่อง หรือลดระดับพลังงานลงทำให้ไม่สามารถวิ่งเข้าทำปฏิกิริยาฟิชชันกับเนื้อเชื้อเพลิงยูเรเนียมได้อีกครั้ง และในขณะนี้การจัดการแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1 ได้ดำเนินการจัดการอยู่ในขั้นที่ CDE20 - CDEF20

นอกจากนี้ภายในท่ออาบรังสีซีทีซึ่งอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของแกนเครื่องปฏิกรณ์ (ตำแหน่ง A1) เป็นตำแหน่งที่มีปริมาณของนิวตรอนฟลักซ์เป็นจำนวนสูงสุดภายในแกนซึ่งจะเป็นตำแหน่งหลักสำหรับการวัดนิวตรอนฟลักซ์ ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยการห่อกัมมันต์เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้วัดนิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการศึกษาการหาค่านิวตรอนฟลักซ์ 2 วิธีด้วยกันดังนี้

5.1.1 การวิเคราะห์นิวตรอนฟลักซ์จากแบบจำลองด้วยโปรแกรม MCNPX

การวิเคราะห์นิวตรอนฟลักซ์จากแบบจำลองแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ด้วยโปรแกรม MCNPX ทำโดยการจำลองวิธีการวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยเทคนิคการห่อกัมมันต์ด้วยแผ่นทอง เพื่อหาค่านิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นภายในท่ออาบรังสีซีที และได้แบ่งช่วงพลังงานของนิวตรอนที่ต้องการศึกษาได้ดังนี้ เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ (< 0.025 eV) อีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ (0.025 eV – 1 keV) และนิวตรอนเร็วฟลักซ์ (> 1 keV) ซึ่งมีกำลังการเดินเครื่องปฏิกรณ์ 1.2 MW นอกจากนี้ยังศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่อาจมีผลกระทบต่อค่านิวตรอนฟลักซ์จากการวัดดังนี้

5.1.1.1 ผลการจับนิวตรอนภายในแผ่นทองที่ความหนาระหว่าง 500 – 800 μcm .

จากการประมวลผลพบว่าความหนาของแผ่นทองมีผลต่ออัตราการจับนิวตรอน โดยนิวตรอนวิ่งเข้าชนแผ่นทองจะเกิดปฏิกิริยาจับนิวตรอนภายในแผ่นทองและปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา และเมื่อมีแผ่นทองความหนามากขึ้นค่าอัตราการจับนิวตรอนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอัตราการจับนิวตรอนที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความหนาจาก 500 μcm . เป็น 800 μcm . พบว่าอัตราการจับนิวตรอนเพิ่มขึ้น 33%

5.1.1.2 ผลการประมวลผลอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วย Tally Multiplier

จากการประมวลผลพบว่าความหนาของแผ่นทองมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการจับเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ภายในแผ่นทอง แต่สำหรับอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์มีอัตราการจับของนิวตรอนฟลักซ์อยู่มาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานนิวตรอนในย่านพลังงานนี้มีการจับนิวตรอนภายในแผ่นทองได้ยากเพราะมีอัตราเกิดการดูดกลืนของนิวตรอนที่ไม่สม่ำเสมอ

5.1.1.3 ผลการประมวลผลการกระจายตัวของพลังงานนิวตรอนในแต่ละระดับพลังงาน

ทำการประมวลผลที่ความหนาระหว่าง 500 – 800 μcm . พบว่าพลังงานในช่วงเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์มีการกระจายตัวของนิวตรอนเป็นอย่างมาก พลังงานในช่วงอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ และนิวตรอนเร็วฟลักซ์มีการกระจายตัวได้น้อย แสดงให้เห็นว่าแผ่นทองสามารถจับนิวตรอนในช่วงพลังงานเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ได้ดีกว่าช่วงพลังงานอื่น

5.1.1.4 ผลการประมวลผลปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของน้ำที่อยู่ภายในอาบรังสีซีที

ทำการประมวลผลในช่วงน้ำที่ระเหยความสูงเท่ากับความสูงของแผ่นทอง พบว่านิวตรอนฟลักซ์ที่อยู่ในน้ำรอบๆแผ่นทองมีปริมาณสูงกว่านิวตรอนฟลักซ์ภายในแผ่นทอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่นิวตรอนฟลักซ์ภายในแผ่นทองจะได้รับมาจากการวิ่งของนิวตรอนมาจากเชื้อเพลิงผ่านน้ำซึ่งอยู่ภายนอกและลดลงตามลำดับจากระยะทางจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน

5.1.1.5 ผลการประมวลผลแบบจำลองแผ่นทองหุ้มแคดเมียม เพื่อหาค่าอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

จากการประมวลผลพบว่าดลั๊บแคดเมียมที่หุ้มแผ่นทองมีผลต่อการวัดนิวตรอนฟลักซ์ โดยคุณสมบัติบางประการของแคดเมียมส่งผลให้ดูดกลืนพลังงานนิวตรอนในย่านเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ยิ่งดลั๊บแคดเมียมมีขนาดหนามากขึ้นเท่าใดจะทำให้ดูดกลืนย่านเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์มากขึ้นเท่านั้น และทำให้แผ่นทองสามารถวัดค่าอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ได้มากขึ้นอีกด้วย

5.1.1.6 ผลการประมวลผลแบบจำลองแผ่นแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อหาค่านิวตรอนเร็วฟลักซ์

จากการประมวลผลพบว่า การเพิ่มความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมไม่มีผลต่อการวัดนิวตรอนเร็วฟลักซ์มากนัก เมื่อเปลี่ยนความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม เพิ่ม 20% และลด 20% ผลที่ได้มีค่าความแตกต่างไม่มากเท่าใด

5.1.2 ผลการทดลองการอบรังสีภายในท่ออบรังสีซีที

ผลจากการวัดและวิเคราะห์การวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในท่ออบรังสีซีที ได้ผลดังตารางที่

5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดและวิเคราะห์การวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในท่ออบรังสีซีที

ปีการทดลอง	นิวตรอนฟลักซ์ ($neutron/cm^2s$)		
	เทอร์มัลนิวตรอน	อิพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
ปี 2555	1.776×10^{13}	2.480×10^{12}	1.273×10^{13}
ปี 2556	4.684×10^{13}	3.214×10^{12}	3.929×10^{12}

ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันเป็นอย่างมากเนื่องจากการทำการทดลองทั้งสองปีมีการจัดการแกนเครื่องปฏิกรณ์ ปบว.-1/1 ที่ไม่เหมือนกันทำให้ค่าที่วัดได้จึงมีค่าแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาผลการวัดทั้งสองปีจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ใหม่ปฏิกิริยาฟิชชันจะเพิ่มขึ้นส่งผลให้นิวตรอนฟลักซ์มีปริมาณมากขึ้นด้วย

5.1.3 ผลการเปรียบเทียบการวัดและวิเคราะห์การวัดนิวตรอนฟลักซ์ด้วยแบบจำลองโปรแกรม MCNPX และการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในท่ออบรังสีซีที

ทำการสร้างแบบจำลองตามขนาดผลการทดลอง ปี 2555 และ 2556 ซึ่งผลการจำลองดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการจำลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์

ปีการทดลอง	ϕ ($neutron/cm^2s$)		
	เทอร์มัลนิวตรอน	อิพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
ปี 2555	2.97×10^{13}	1.14×10^{13}	3.44×10^{12}
ปี 2556	1.79×10^{13}	8.59×10^{12}	3.06×10^{12}

ผลที่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของวัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลองโดยผลการทดลองของปี 2555 มีความหนามากกว่าปี 2556 ทำให้สามารถจับเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ได้มากกว่าของปี 2556 และเมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าคาดเคลื่อนกับค่าการทดลองภายในท่ออาบรังสีซีทีในตารางที่ 5.1 ได้ผลดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบการวัดนิวตรอนฟลักซ์

ปีการทดลอง	เทอร์มัลนิวตรอน	อีพิลเทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว
ปี 2555	67.1	358.1	-72.75
ปี 2556	-67.9	167.4	-10.9

จากผลที่ได้ในตารางที่ 5.3 ค่าความคาดเคลื่อนของเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์อยู่ในช่วง 67% ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีค่าความไม่แน่นอนของการเปรียบเทียบวิธีการทั้งสองอยู่ที่ 60% แต่สำหรับค่าอีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์มีค่าคาดเคลื่อนที่สูงเนื่องมาจากการวัดค่าอีพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์วัดค่าได้ยากทำให้ค่าที่ได้มีความผิดพลาดสูงและสำหรับค่านิวตรอนเร็วฟลักซ์เมื่อมาเปรียบเทียบได้ค่าไม่แตกต่างกันมากเท่าใดแสดงว่าการจำลองแผ่นอะลูมิเนียมให้ผลการวิเคราะห์ได้ดี

นอกจากนี้ทำการเปรียบเทียบผลการวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ด้วยหัววัดนิวตรอนฟลักซ์ที่กำลังการเดินเครื่องปฏิกรณ์ 1.2 MW กับการทดลองสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้น ได้ผลดังตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเทียบผลระหว่างแบบจำลอง MCNPX กับหัววัดนิวตรอนมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ Gold foil activation แสดงว่าผลการจำลองด้วย MCNPX ให้ผลการจำลองค่อนข้างไม่แตกต่างกับการทดลองจริงมากนัก

ตารางที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบการวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ทั้ง 3 วิธี

	แบบจำลอง MCNPX	Gold foil activation	%	หัววัดนิวตรอน	%
เทอร์มัลนิวตรอน	1.79×10^{13}	4.69×10^{13}	67.87	2.47×10^{13}	27.77

5.2 สรุปผลการวิจัย

ผลจากการประมวลแบบจำลองด้วยโปรแกรม MCNPX และผลการทดลองภายในท่ออาบรังสีซีทีที่ได้ผลค่าความคาดเคลื่อนที่เปอร์เซ็นต์สูงเนื่องมาจากการทดลองที่ได้จากการอาบรังสีอาจมีการผิดพลาดในช่วงการทำารทดลอง หรือการหักให้วัสดุทดลองสลายตัวทางรังสีนานจนเกินไป

ทำให้การนับวัดทางรังสีนับวัดการปลดปล่อยรังสีแกมมาจากวัสดุได้น้อยตามไปด้วย และนอกจากนี้การออกแบบรูปร่างของแบบจำลอง การกำหนดค่าปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ และการกำหนดย่านพลังงานนิวตรอนที่ต้องการหาอาจมีผลต่อการประมวลด้วยโปรแกรม MCNPX หากไม่ได้รับการตรวจสอบ และออกแบบให้ดีอาจทำให้ค่าที่ประมวลผิดพลาดได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

- การหาปริมาณอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ของแบบจำลองโปรแกรม MCNPX ทำได้ยาก เพราะย่านพลังงานดังกล่าวมีปริมาณน้อยหรือแผ่นทองที่ใช้จะจับนิวตรอนในช่วงพลังงานนี้ได้ น้อย ดังนั้นหากมีการศึกษาและวิจัยต่ออาจจะหาวัสดุชนิดอื่นมาใช้ในการหาค่าอิพิลเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ได้ง่ายมาใช้ในการสร้างแบบจำลองแทน แบบจำลองแผ่นทองหุ้มด้วยแคดเมียม

- ขนาดของแผ่นทองที่ใช้การอาบรังสีควรเลือกขนาดที่พอดี และไม่เล็กขนาดมาใช้ในการทำการทดลอง

- จากผลการทดลองการวัดนิวตรอนฟลักซ์ภายในท่ออาบรังสีซีที พบว่าค่าที่ได้จากการนับวัดทางรังสีอาจมีความผิดพลาด ดังนั้นในการทำการทดลองครั้งต่อไปอาจจะต้องมีการทำซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ได้ทราบผลที่มีความถูกต้องมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.R. Yavar , H.Khalafi , Y.Kasesaz , S.Sarmani , R.Yahaya , A.K.Wood , K.S.Khoo.
“Verification of MCNP simulation of neutron flux parameters at TRIGA MK II reactor of Malaysia”, Applied Radiation and Isotopes Vol.70 pp. 2488–2493, 2012
- [2] Luka Snoj, Matjaž Ravnik. “Power Peaking in Mixed TRIGA Cores” , 102.1-102.9.
International Conference Nuclear Energy for New Europe. Slovenia.
- [3] L. Snoja, A Trkova, R. Jaćimović, P. Rogana, G. Žerovnika, M. Ravnika. “**Analysis of neutron flux distribution for the validation of computational methods for the optimization of research reactor utilization**”, Applied Radiation and Isotopes Vol.69 pp. 136–141,2011
- [4] M J J Koster-Ammerlaan, M A Bacchi, P Bode, E A De Nadai Fernandes. “**A new monitor for routine thermal and epithermal neutron fluence rate monitoring in k_0 INAA**”, Applied Radiation and Isotopes Vol.66 pp. 1964–1969, 2008
- [5] R.G. Abrefah, B.J.B. Nyarko, E.H.K. Akaho, S. Anim Sampong, R.B.M. Sogbadji. “**Axial and radial distribution of thermal and epithermal neutron fluxes in irradiation channels of the Ghana Research Reactor-1 using foil activation analysis**”, Annals of Nuclear Energy Vol.37 pp.1027–1035, 2010.
- [6] Thailand Institute of Nuclear Technology. **Safety Analysis Report for Thai Research Reactor-1 /Modification 1 (TRR-1/M1)**. Revision 2.
- [7] D. Olandera, E. Greenspana, H. D. Garkischb, B. Petrovic, “**Uranium–zirconium hydride fuel properties**”, Nuclear Engineering and Design Vol.239 pp. 1406 – 1424, 2009
- [8] ชวัช ชิตตระกา. การตรวจ และการวัดรังสี. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2541.
- [9] Grafton D. Chase and Joseph L. Rabinowitz. **Principles of Radioisotope Methodology**. 3 rd ed. Burgess Publishing Company. 1967.
- [10] John R. Lamarsh. **Introduction to Nuclear engineering**. 3 rd ed. New York : Addison-Wesley, 2001.
- [11] Elmer E. Lewis. **Fundamentals of Nuclear Reactor Physics**. 1 st ed. Massachusetts : Academic Press, 2008.

- [12] นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. **วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545.
- [13] X-5 Monte Carlo Team. **MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code**, Version 5. Los Alamos National Laboratory, 2008.
- [14] Nicholas Tsoufanidis. **Measurement and Detection of Radiation**. Hemisphere Publishing Corporation, 1983.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

MCNP OVERVIEW

CHAPTER 1 - MCNP OVERVIEW

WHAT IS COVERED IN CHAPTER 1

Brief explanation of the Monte Carlo method
Summary of MCNP features
Introduction to geometry

Chapter 1 provides an overview of the MCNP Monte Carlo code with brief summaries of the material covered in-depth in later chapters. It begins with a short discussion of the Monte Carlo method. Five features of MCNP are introduced: (1) nuclear data and reactions, (2) source specifications, (3) tallies and output, (4) estimation of errors, and (5) variance reduction. The third section explains MCNP geometry setup, including the concept of cells and surfaces.

I. MCNP AND THE MONTE CARLO METHOD

MCNP is a general-purpose, continuous-energy, generalized-geometry, time-dependent, coupled neutron/photon/electron Monte Carlo transport code. It can be used in several transport modes: neutron only, photon only, electron only, combined neutron/photon transport where the photons are produced by neutron interactions, neutron/photon/electron, photon/electron, or electron/photon. The neutron energy regime is from 10^{-11} MeV to 20 MeV for all isotopes and up to 150 MeV for some isotopes, the photon energy regime is from 1 keV to 100 GeV, and the electron energy regime is from 1 KeV to 1 GeV. The capability to calculate k_{eff} eigenvalues for fissile systems is also a standard feature.

The user creates an input file that is subsequently read by MCNP. This file contains information about the problem in areas such as:

the geometry specification,
the description of materials and selection of cross-section evaluations,
the location and characteristics of the neutron, photon, or electron source,
the type of answers or tallies desired, and
any variance reduction techniques used to improve efficiency.

Each area will be discussed in the primer by use of a sample problem. Remember five “rules” when running a Monte Carlo calculation. They will be more meaningful as you read this manual and gain experience with MCNP, but no matter how sophisticated a user you may become, never forget the following five points:

1. Define and sample the geometry and source well.
2. You cannot recover lost information.
3. Question the stability and reliability of results.
4. Be conservative and cautious with variance reduction biasing.
5. The number of histories run is not indicative of the quality of the answer.

The following sections compare Monte Carlo and deterministic methods and provide a simple description of the Monte Carlo method.

A. Monte Carlo Method vs. Deterministic Method

Monte Carlo methods are very different from deterministic transport methods. Deterministic methods, the most common of which is the discrete ordinates method, solve the transport equation for the average particle behavior. By contrast, Monte Carlo obtains answers by simulating individual particles and recording some aspects (tallies) of their average behavior. The average behavior of particles in the physical system is then inferred (using the central limit theorem) from the average behavior of the simulated particles. Not only are Monte Carlo and deterministic methods very different ways of solving a problem, even what constitutes a solution is different. Deterministic methods typically give fairly complete information (for example, flux) throughout the phase space of the problem. Monte Carlo supplies information only about specific tallies requested by the user.

When Monte Carlo and discrete ordinates methods are compared, it is often said that Monte Carlo solves the integral transport equation, whereas discrete ordinates solves the integro-differential transport equation. Two things are misleading about this statement. First, the integral and integro-differential transport equations are two different forms of the same equation; if one is solved, the other is solved. Second, Monte Carlo “solves” a transport problem by simulating particle histories. A transport equation need not be written to solve a problem by Monte Carlo. Nonetheless, one can derive an equation that describes the probability density of particles in phase space; this equation turns out to be the same as the integral transport equation.

Without deriving the integral transport equation, it is instructive to investigate why the discrete ordinates method is associated with the integro-differential equation and Monte Carlo with the integral equation. The discrete ordinates method visualizes the phase space to be divided into many small boxes, and the particles move from one box to another. In the limit, as the boxes get progressively smaller, particles moving from box to box take a differential amount of time to move a differential distance in space. In the limit, this approaches the integro-differential transport equation, which has derivatives in space and time. By contrast, Monte Carlo transports particles between events (for example, collisions) that are separated in space and time. Neither differential space nor time are inherent parameters of Monte Carlo transport. The integral equation does not have terms involving time or space derivatives.

Monte Carlo is well suited to solving complicated three-dimensional, time-dependent problems. Because the Monte Carlo method does not use phase space boxes, there are no averaging approximations required in space, energy, and time. This is especially important in allowing detailed representation of all aspects of physical data.

B. The Monte Carlo Method

Monte Carlo can be used to duplicate theoretically a statistical process (such as the interaction of nuclear particles with materials) and is particularly useful for complex problems that cannot be modeled by computer codes that use deterministic methods. The individual probabilistic events that comprise a process are simulated sequentially. The probability distributions governing these

events are statistically sampled to describe the total phenomenon. In general, the simulation is performed on a digital computer because the number of trials necessary to adequately describe the phenomenon is usually quite large. The statistical sampling process is based on the selection of random numbers—analogous to throwing dice in a gambling casino—hence the name “Monte Carlo.” In particle transport, the Monte Carlo technique is pre-eminently realistic (a numerical experiment). It consists of actually following each of many particles from a source throughout its life to its death in some terminal category (absorption, escape, etc.). Probability distributions are randomly sampled using transport data to determine the outcome at each step of its life.

Event Log

1. Neutron scatter, photon production
2. Fission, photon production
3. Neutron capture
4. Neutron leakage
5. Photon scatter
6. Photon leakage
7. Photon capture

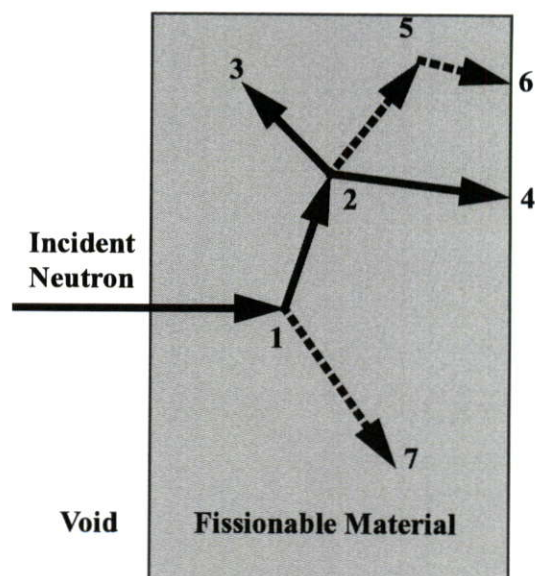


Figure 1-1.

Figure 1-1 represents the random history of a neutron incident on a slab of material that can undergo fission. Numbers between 0 and 1 are selected randomly to determine what (if any) and where interaction takes place, based on the rules (physics) and probabilities (transport data) governing the processes and materials involved. In this particular example, a neutron collision occurs at event 1. The neutron is scattered in the direction shown, which is selected randomly from the physical scattering distribution. A photon is also produced and is temporarily stored, or banked, for later analysis. At event 2, fission occurs, resulting in the termination of the incoming neutron and the birth of two outgoing neutrons and one photon. One neutron and the photon are banked for later analysis. The first fission neutron is captured at event 3 and terminated. The banked neutron is now retrieved and, by random sampling, leaks out of the slab at event 4. The fission-produced photon has a collision at event 5 and leaks out at event 6. The remaining photon generated at event 1 is now followed with a capture at event 7. Note that MCNP retrieves banked particles such that the last particle stored in the bank is the first particle taken out.

This neutron history is now complete. As more and more such histories are followed, the neutron and photon distributions become better known. The quantities of interest (whatever the user requests) are tallied, along with estimates of the statistical precision (uncertainty) of the results.

ภาคผนวก ข.

ตารางพลังงานนิวตรอน

Continuous-Energy and Discrete Neutron Data Libraries

Maintained by X-1 NAD

Appendix G - MCNP Data Libraries Neutron Cross-Section Libraries

Table G.2 - Continuous-Energy and Discrete Neutron Data Libraries Maintained by X-1 NAD

ZAID	AWR	Library Name	Source	Eval Date (K)	Temp (K)	Length Words	Emax NE (MeV)	GPD	Nu	CP	DN	UR
** Re-187 **												
75187.72c	185.35	endf70i	B-VII.0	1990	900.0	298130	41293	20.0	no	no	no	yes
75187.73c	185.35	endf70i	B-VII.0	1990	1200.0	275177	38014	20.0	no	no	no	yes
75187.74c	185.35	endf70i	B-VII.0	1990	2500.0	221116	30291	20.0	no	no	no	yes
Z = 77 ***** iridium *****												
** Ir-0 **												
77000.55c	190.563	misc5xs[7]	LANL/T	1986	300.0	43071	3704	20.0	no	no	no	no
** Ir-191 **												
77191.49c	189.32	uresa	B-VI.4	1995	300.0	83955	8976	20.0	yes	no	no	yes
77191.65c	189.32	endf66e	B-VI.4:X	1995	3000.1	64690	6116	20.0	yes	no	no	yes
77191.66c	189.32	endf66c	B-VI.4:X	1995	293.6	90082	9290	20.0	yes	no	no	yes
77191.70c	189.32	endf70i	B-VII.0	2006	293.6	431865	9337	20.0	yes	no	yes	no
77191.71c	189.32	endf70i	B-VII.0	2006	600.0	424153	8373	20.0	yes	no	yes	no
77191.72c	189.32	endf70i	B-VII.0	2006	900.0	420114	7868	20.0	yes	no	yes	no
77191.73c	189.32	endf70i	B-VII.0	2006	1200.0	416369	7400	20.0	yes	no	yes	no
77191.74c	189.32	endf70i	B-VII.0	2006	2500.0	408633	6433	20.0	yes	no	yes	no
** Ir-193 **												
77193.49c	191.305	uresa	B-VI.4	1995	300.0	82966	8943	20.0	yes	no	no	yes
77193.65c	191.305	endf66e	B-VI.4:X	1995	3000.1	69056	6751	20.0	yes	no	no	yes
77193.66c	191.305	endf66c	B-VI.4:X	1995	293.6	88688	9205	20.0	yes	no	no	yes
77193.70c	191.305	endf70i	B-VII.0	2006	293.6	385638	9733	20.0	yes	no	yes	yes
77193.71c	191.305	endf70i	B-VII.0	2006	600.0	380566	9099	20.0	yes	no	yes	yes
77193.72c	191.305	endf70i	B-VII.0	2006	900.0	376446	8584	20.0	yes	no	yes	yes
77193.73c	191.305	endf70i	B-VII.0	2006	1200.0	374846	8384	20.0	yes	no	yes	yes
77193.74c	191.305	endf70i	B-VII.0	2006	2500.0	368575	7600	20.0	yes	no	yes	yes
Z = 78 ***** platinum *****												
** Pt-0 **												
78000.35c	193.414	rmccsa	LLNL	<1985	0.0	15371	1497	20.0	yes	no	no	no
78000.35d	193.414	drmccs	LLNL	<1985	0.0	6933	263	20.0	yes	no	no	no
78000.40c	193.414	endl92	LLNL	<1992	300.0	43559	5400	30.0	yes	no	no	no
78000.42c	193.414	endl92	LLNL:X	<1992	300.0	43559	5400	30.0	yes	no	no	no
Z = 79 ***** gold *****												
** Au-197 **												
79197.50c	195.274	endf5p	B-V.0	1977	293.6	139425	22632	20.0	no	no	no	no
79197.50d	195.274	dre5	B-V.0	1977	293.6	4882	263	20.0	no	no	no	no
79197.55c	195.274	rmccsa	LANL/T	1983[4]	293.6	134325	17909	20.0	yes	no	no	no
79197.55d	195.274	drmccs	LANL/T	1983[4]	293.6	7883	263	20.0	yes	no	no	no
79197.56c	195.274	newxs	LANL/T	1984	293.6	122482	11823	30.0	yes	no	no	no

May 22, 2008

**Appendix G - MCNP Data Libraries
Neutron Cross-Section Libraries**

Table G.2 - Continuous-Energy and Discrete Neutron Data Libraries Maintained by X-1 NAD

ZAID	AWR	Library Name	Source	Eval Temp		Length	Emax						
				Date (K)	(K)	Words	NE (MeV)	GPD	Nu	CP	DN	UR	
** Au-197 **													
79197.56d	195.274	newxsd	LANL/T	1984	293.6	38801	263	20.0	yes	no	no	no	
79197.60c	195.274	endf60	B-VI.1	1984	293.6	161039	17724	30.0	yes	no	no	no	
79197.66c	195.274	endf66c	B-VI.1	1984	293.6	377905	39417	30.0	yes	no	no	no	
79197.70c	195.274	endf70i	B-VII.0	2006	293.6	410653	43287	30.	yes	no	no	no	
79197.71c	195.274	endf70i	B-VII.0	2006	600.0	380853	39562	30.	yes	no	no	no	
79197.72c	195.274	endf70i	B-VII.0	2006	900.0	362389	37254	30.	yes	no	no	no	
79197.73c	195.274	endf70i	B-VII.0	2006	1200.0	350733	35797	30.	yes	no	no	no	
79197.74c	195.274	endf70i	B-VII.0	2006	2500.0	315437	31385	30.	yes	no	no	no	
Z = 80 ***** mercury *****													
** Hg-0 **													
80000.40c	198.867	endl92	LLNL	<1992	300.0	29731	2507	30.0	yes	no	no	no	
80000.42c	198.867	endl92	LLNL:X	<1992	300.0	29731	2507	30.0	yes	no	no	no	
** Hg-196 **													
80196.24c	194.282	la150n	LANL	1998	293.6	153206	1690	150.0	yes	no	yes	no	
80196.70c	194.282	endf70i	B-VII.0	2004	293.6	153203	1690	150.0	yes	no	yes	no	
80196.71c	194.282	endf70i	B-VII.0	2004	600.0	153084	1678	150.0	yes	no	yes	no	
80196.72c	194.282	endf70i	B-VII.0	2004	900.0	153144	1684	150.0	yes	no	yes	no	
80196.73c	194.282	endf70i	B-VII.0	2004	1200.0	153133	1683	150.0	yes	no	yes	no	
80196.74c	194.282	endf70i	B-VII.0	2004	2500.0	152765	1646	150.0	yes	no	yes	no	
** Hg-198 **													
80198.24c	196.266	la150n	LANL	1998	293.6	172481	3205	150.0	yes	no	yes	no	
80198.70c	196.266	endf70i	B-VII.0	2004	293.6	172593	3227	150.0	yes	no	yes	no	
80198.71c	196.266	endf70i	B-VII.0	2004	600.0	171712	3139	150.0	yes	no	yes	no	
80198.72c	196.266	endf70i	B-VII.0	2004	900.0	170873	3055	150.0	yes	no	yes	no	
80198.73c	196.266	endf70i	B-VII.0	2004	1200.0	170653	3033	150.0	yes	no	yes	no	
80198.74c	196.266	endf70i	B-VII.0	2004	2500.0	169673	2935	150.0	yes	no	yes	no	
** Hg-199 **													
80199.24c	197.259	la150n	LANL	1998	293.6	173336	4126	150.0	yes	no	yes	no	
80199.70c	197.259	endf70i	B-VII.0	2004	293.6	173234	4135	150.0	yes	no	yes	no	
80199.71c	197.259	endf70i	B-VII.0	2004	600.0	172904	4102	150.0	yes	no	yes	no	
80199.72c	197.259	endf70i	B-VII.0	2004	900.0	172354	4047	150.0	yes	no	yes	no	
80199.73c	197.259	endf70i	B-VII.0	2004	1200.0	171983	4010	150.0	yes	no	yes	no	
80199.74c	197.259	endf70i	B-VII.0	2004	2500.0	171045	3916	150.0	yes	no	yes	no	
** Hg-200 **													
80200.24c	198.25	la150n	LANL	1998	293.6	192339	2560	150.0	yes	no	yes	no	
80200.70c	198.25	endf70i	B-VII.0	2004	293.6	193447	2718	150.0	yes	no	yes	no	
80200.71c	198.25	endf70i	B-VII.0	2004	600.0	193286	2698	150.0	yes	no	yes	no	

May 22, 2008

Appendix G - MCNP Data Libraries Neutron Cross-Section Libraries

Table G.2 - Continuous-Energy and Discrete Neutron Data Libraries Maintained by X-1 NAD

ZAID	AWR	Library Name	Source	Eval Temp		Length Words	Emax						
				Date (K)	(K)		NE (MeV)	GPD	Nu	CP	DN	UR	
** Cd-0 **													
** Cd-106 **													
48106.65c	105	endf66e	B-VI.4	1996	3000.1	121059	10194	20.0	no	no	no	no	yes
48106.66c	105	endf66b	B-VI.4	1996	293.6	151365	12949	20.0	no	no	no	no	yes
48106.70c	104.996	endf70d	B-VII.0	2006	293.6	162351	11429	20.0	yes	no	no	no	no
48106.71c	104.996	endf70d	B-VII.0	2006	600.0	158318	10925	20.0	yes	no	no	no	no
48106.72c	104.996	endf70d	B-VII.0	2006	900.0	155607	10586	20.0	yes	no	no	no	no
48106.73c	104.996	endf70d	B-VII.0	2006	1200.0	153815	10362	20.0	yes	no	no	no	no
48106.74c	104.996	endf70d	B-VII.0	2006	2500.0	148663	9718	20.0	yes	no	no	no	no
** Cd-108 **													
48108.65c	106.977	endf66e	B-VI.4	1996	3000.1	112404	11496	20.0	no	no	no	no	yes
48108.66c	106.977	endf66b	B-VI.4	1996	293.6	141658	14744	20.0	no	no	no	no	yes
48108.70c	106.977	endf70d	B-VII.0	2006	293.6	105800	10759	20.0	no	no	no	no	yes
48108.71c	106.977	endf70d	B-VII.0	2006	600.0	101003	10226	20.0	no	no	no	no	yes
48108.72c	106.977	endf70d	B-VII.0	2006	900.0	97542	9841	20.0	no	no	no	no	yes
48108.73c	106.977	endf70d	B-VII.0	2006	1200.0	95398	9603	20.0	no	no	no	no	yes
48108.74c	106.977	endf70d	B-VII.0	2006	2500.0	88363	8821	20.0	no	no	no	no	yes
** Cd-110 **													
48110.65c	108.959	endf66e	B-VI.4:X	1996	3000.1	105350	10737	20.0	no	no	no	no	yes
48110.66c	108.959	endf66b	B-VI.4:X	1996	293.6	133785	13902	20.0	no	no	no	no	yes
48110.70c	108.959	endf70d	B-VII.0	2006	293.6	151540	15899	20.0	no	no	no	no	yes
48110.71c	108.959	endf70d	B-VII.0	2006	600.0	144693	15135	20.0	no	no	no	no	yes
48110.72c	108.959	endf70d	B-VII.0	2006	900.0	140205	14633	20.0	no	no	no	no	yes
48110.73c	108.959	endf70d	B-VII.0	2006	1200.0	135460	14103	20.0	no	no	no	no	yes
48110.74c	108.959	endf70d	B-VII.0	2006	2500.0	127383	13200	20.0	no	no	no	no	yes
** Cd-111 **													
48111.66c	109.952	endf66b	B-VI.3	1995	293.6	153808	16016	20.0	no	no	no	no	no
48111.70c	109.951	endf70d	B-VII.0	2006	293.6	262831	24227	20.0	yes	no	no	no	yes
48111.71c	109.951	endf70d	B-VII.0	2006	600.0	247992	22372	20.0	yes	no	no	no	yes
48111.72c	109.951	endf70d	B-VII.0	2006	900.0	239831	21352	20.0	yes	no	no	no	yes
48111.73c	109.951	endf70d	B-VII.0	2006	1200.0	233471	20557	20.0	yes	no	no	no	yes
48111.74c	109.951	endf70d	B-VII.0	2006	2500.0	216368	18419	20.0	yes	no	no	no	yes
** Cd-112 **													
48112.65c	110.942	endf66e	B-VI.4	1996	3000.1	101915	11153	20.0	no	no	no	no	yes
48112.66c	110.942	endf66b	B-VI.4	1996	293.6	130334	14515	20.0	no	no	no	no	yes
48112.70c	110.942	endf70d	B-VII.0	2006	293.6	182703	20483	20.0	no	no	no	no	yes
48112.71c	110.942	endf70d	B-VII.0	2006	600.0	173495	19391	20.0	no	no	no	no	yes
48112.72c	110.942	endf70d	B-VII.0	2006	900.0	168155	18787	20.0	no	no	no	no	yes

May 22, 2008

Appendix G - MCNP Data Libraries
Neutron Cross-Section Libraries

Table G.2 - Continuous-Energy and Discrete Neutron Data Libraries Maintained by X-1 NAD

ZAID	AWR	Library Name	Source	Eval Date	Temp (K)	Length Words	Emax NE (MeV)	GPD	Nu	CP	DN	UR
** Mg-25 **												
12025.74c	24.771	endf70a	B-VII.0	2001	2500.0	46503	1609 20.0	yes	no	no	no	no
** Mg-26 **												
12026.70c	25.759	endf70a	B-VII.0	2001	293.6	37892	1235 20.0	yes	no	no	no	no
12026.71c	25.759	endf70a	B-VII.0	2001	600.0	37781	1221 20.0	yes	no	no	no	no
12026.72c	25.759	endf70a	B-VII.0	2001	900.0	37788	1222 20.0	yes	no	no	no	no
12026.73c	25.759	endf70a	B-VII.0	2001	1200.0	37765	1219 20.0	yes	no	no	no	no
12026.74c	25.759	endf70a	B-VII.0	2001	2500.0	37756	1218 20.0	yes	no	no	no	no
Z = 13 ***** aluminum *****												
** Al-27 **												
13027.21c	26.75	100xs[3]	LANL/T:X	1989	300.0	35022	1473 100.0	yes	no	no	no	no
13027.24c	26.75	la150n	B-VI.6	1997	293.6	214549	3148 150.0	yes	no	yes	no	no
13027.42c	26.75	endl92	LLNL	<1992	300.0	32388	1645 30.0	yes	no	no	no	no
13027.50c	26.75	rmccs	B-V.0	1973	293.6	54162	2028 20.0	yes	no	no	no	no
13027.50d	26.75	drmcchs	B-V.0	1973	293.6	41947	263 20.0	yes	no	no	no	no
13027.60c	26.75	endf60	B-VI.0	1973	293.6	55427	2241 20.0	yes	no	no	no	no
13027.61c	26.75	actib	B-VI.8	2000	77.0	220073	3038 150.0	yes	no	yes	no	no
13027.62c	26.75	actia	B-VI.8	2000	293.6	220418	3081 150.0	yes	no	yes	no	no
13027.64c	26.75	endf66d	B-VI.6	1997	77.0	213659	3037 150.0	yes	no	yes	no	no
13027.66c	26.75	endf66a	B-VI.6	1997	293.6	214004	3036 150.0	yes	no	yes	no	no
13027.70c	26.75	endf70a	B-VII.0	2005	293.6	235689	5563 150.0	yes	no	yes	no	no
13027.71c	26.75	endf70a	B-VII.0	2005	600.0	235031	5481 150.0	yes	no	yes	no	no
13027.72c	26.75	endf70a	B-VII.0	2005	900.0	234551	5421 150.0	yes	no	yes	no	no
13027.73c	26.75	endf70a	B-VII.0	2005	1200.0	234415	5404 150.0	yes	no	yes	no	no
13027.74c	26.75	endf70a	B-VII.0	2005	2500.0	233800	5327 150.0	yes	no	yes	no	no
13027.91c	26.75	actib[6]	B-VI.8	2000	77.0	220104	3038 150.0	yes	no	yes	no	no
13027.92c	26.75	actia[6]	B-VI.8	2000	293.6	220449	3081 150.0	yes	no	yes	no	no
Z = 14 ***** silicon *****												
** Si-0 **												
14000.21c	27.844	100xs[3]	LANL/T:X	1989	300.0	76399	2883 100.0	yes	no	no	no	no
14000.42c	27.844	endl92	LLNL	<1992	300.0	16696	855 30.0	yes	no	no	no	no
14000.50c	27.844	endf5p	B-V.0	1976	293.6	98609	2440 20.0	yes	no	no	no	no
14000.50d	27.844	dre5	B-V.0	1976	293.6	69498	263 20.0	yes	no	no	no	no
14000.51c	27.844	rmccs	B-V.0	1976	293.6	88129	1887 20.0	yes	no	no	no	no
14000.51d	27.844	drmcchs	B-V.0	1976	293.6	69498	263 20.0	yes	no	no	no	no
14000.60c	27.844	endf60	B-VI.0	1976	293.6	104198	2824 20.0	yes	no	no	no	no
** Si-28 **												
14028.24c	27.737	la150n	LANL	1997	293.6	264892	7417 150.0	yes	no	yes	no	no

ภาคผนวก ค.

ENDF/B REACTION TYPES

APPENDIX G - MCNP DATA LIBRARIES

Appendix G is divided into eight sections. Section I lists some of the more frequently used ENDF/B reaction types that can be used with the FMn input card, Sections II through VII provide details about the data libraries available for use with MCNP, and Section VIII is a list of references. Information about any specific data library, as well as other useful information, can be found on the following Data Team web site: <http://www-xdiv.lanl.gov/PROJECTS/DATA/nuclear/nuclear.html>

	<u>Page</u>
I. ENDF/B Reaction Types	G-1
II. $S(\alpha, \beta)$ Data for Use with the MTm Card	G-5
III. Neutron Cross Section Libraries	G-7
IV. Multigroup Data	G-12
V. Photoatomic Data	G-15
VI. Photonuclear Data	G-30
VII. Dosimetry Data	G-32
VIII. References	G-46

I. ENDF/B REACTION TYPES

The following partial list includes some of the more useful reactions for use with the FMn input card and with the cross-section plotter (see pages 3-99 and B-14.) The complete ENDF/B list can be found in the ENDF/B manual.¹ The MT column lists the ENDF/B reaction number. The FM column lists special MCNP reaction numbers that can be used with the FM card and cross-section plotter.

The nomenclature between MCNP and ENDF/B is inconsistent in that MCNP often refers to the number of the reaction type as R whereas ENDF/B uses MT, but they are the same. The problem arises because MCNP has an MT input card used for the $S(\alpha, \beta)$ thermal treatment. However, the nomenclature between Monte Carlo transport and Deterministic transport techniques can be radically different. See Reference 2 on page G-46 for more information.

Generally only a subset of reactions is available for a particular nuclide. Some reaction data are eliminated by MCNP in cross-section processing if they are not required by the problem. Examples are photon production in a MODE N problem or certain reaction cross sections not requested on an FM card. FM numbers should be used when available rather than MT numbers. If an MT number is requested, the equivalent FM number will be displayed on the legend of cross-section plots.

APPENDIX G - MCNP DATA LIBRARIES
 ENDF/B REACTION TYPES

Neutron Continuous-energy and Discrete Reactions:

<u>MT</u>	<u>FM</u>	<u>Microscopic Cross-Section Description</u>
1	-1	Total (see Note 1)
2	-3	Elastic (see Note 1)
16		(n,2n)
17		(n,3n)
18		Total fission (n,fx) if and only if MT=18 is used to specify fission in the original evaluation.
	-6	Total fission cross section. (equal to MT=18 if MT=18 exists; otherwise equal to the sum of MTs 19, 20, 21, and 38.)
19		(n,f)
20		(n,n'f)
21		(n,2nf)
22		(n,n' α)
28		(n,n'p)
32		(n,n'd)
33		(n,n't)
38		(n,3nf)
51		(n,n') to 1 st excited state
52		(n,n') to 2 nd excited state
.		.
90		(n,n') to 40 th excited state
91		(n,n') to continuum
101	-2	Absorption: sum of MT=102-117 (neutron disappearance; does not include fission)
102		(n, γ)
103		(n,p)
104		(n,d)
105		(n,t)
106		(n, ³ He)
107		(n, α)

In addition, the following special reactions are available for many nuclides:

202	-5	total photon production
203		total proton production (see Note 2)
204		total deuterium production (see Note 2)
205		total tritium production (see Note 2)
206		total ³ He production (see Note 2)
207		total alpha production (see Note 2)
301	-4	average heating numbers (MeV/collision)
	-7	nubar (prompt or total)
	-8	fission Q (in print table 98, but not plots)

S(α,β):

<u>MT</u>	<u>FM</u>	<u>Microscopic Cross-Section Description</u>
1		Total cross section
2		Elastic scattering cross-section
4		Inelastic scattering cross-section

Neutron and Photon Multigroup:

<u>MT</u>	<u>FM</u>	<u>Microscopic Cross-Section Description</u>
1	-1	Total cross section
18	-2	Fission cross section
	-3	Nubar data
	-4	Fission chi data
101	-5	Absorption cross section
	-6	Stopping powers
	-7	Momentum transfers
n		Edit reaction n
202		Photon production
301		Heating number
318		Fission Q
401		Heating number times total cross section

Photoatomic Data:

<u>MT</u>	<u>FM</u>	<u>Microscopic Cross-Section Description</u>
501	-5	Total
504	-1	Incoherent (Compton + Form Factor)
502	-2	Coherent (Thomson + Form Factor)
522	-3	Photoelectric with fluorescence
516	-4	Pair production
301	-6	Heating number

Electrons (see Note 3):

<u>MT</u>	<u>FM</u>	<u>Microscopic Cross-Section Description</u>
	1	de/dx electron collision stopping power
	2	de/dx electron radiative stopping power
	3	de/dx total electron stopping power
	4	electron range
	5	electron radiation yield
	6	relativistic β^2
	7	stopping power density correction
	8	ratio of rad/col stopping powers
	9	drange
	10	dyield

APPENDIX G - MCNP DATA LIBRARIES
ENDF/B REACTION TYPES

11	rng array values
12	qav array values
13	ear array values

Notes:

1. At the time they are loaded, the total and elastic cross sections from the data library are thermally adjusted by MCNP to the temperature of the problem, if that temperature is different from the temperature at which the cross-section set was processed (see page 2-29). If different cells have different temperatures, the cross sections first are adjusted to zero degrees and adjusted again to the appropriate cell temperatures during transport. The cross-section plot will *never* display the *transport* adjustment. Therefore, for plotting, reactions 1 and -1 are equivalent and reactions 2 and -3 are equivalent. But for the FM card, reactions -1 and -3 will use the zero degree data and reactions 1 and 2 will use the transport-adjusted data. For example, if a library evaluated at 300° is used in a problem with cells at 400° and 500°, the cross-section plotter and MT = -1 and MT = -3 options on the FM card will use 0° data. The MT = 1 and MT = 2 options on the FM card will use 400° and 500° data.
2. The user looking for total production of p, d, t, ³He and ⁴He should be warned that in some evaluations, such processes are represented using reactions with MT (or R) numbers other than the standard ones given in the above list. This is of particular importance with the so-called "pseudolevel" representation of certain reactions which take place in light isotopes. For example, the ENDF/B-V evaluation of carbon includes cross sections for the (n,n'³α) reaction in MT = 52 to 58. The user interested in particle production from light isotopes should check for the existence of pseudolevels and thus possible deviations from the above standard reaction list.
3. Two electron transport libraries, el and el03, are maintained. The electron transport algorithms and data in MCNP were adapted from the ITS code.³ The el library was developed and released in 1990 in conjunction with the addition of electron transport into MCNP4; the electron transport algorithms and data correspond (roughly) to that found in ITS version 1. The el03 library⁴ was developed and released in 2000 in conjunction with upgrades to the electron physics package; these upgrades correspond (roughly) to that of ITS version 3. The MT numbers for use in plotting the cross-section values for these tables should be taken from the Print Table 85 column headings and are not from ENDF.