IRN6000022

การคำนวณสองมิติการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1

สมชาย พงษ์เกษม และ สุนันทา ภัทรชาคร

กองฟิสิกส์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ถนนวิภาวดีรังสิต จตุจักร กทม. 10900

โทรศัพท์ 562-0117 โทรสาร 561-3013

บทคัดย่อ

ได้พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อใช้สำหรับการคำนวณสองมิติการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบทริกา เพื่อเป็นการทดสอบโปรแกรมสำเร็จรูปนี้ ได้สร้างค่ามาโครสคอปิคครอสเซคชัน 2 กลุ่ม สำหรับส่วนประกอบที่สำคัญต่างๆ ของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 เมื่อเดินเครื่องที่กำลัง 1 เมกกะวัตต์ แล้วคำนวณเอกซ์เซสรีแอคติวิตี และการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงสำหรับแกนปฏิกรณ์ที่มีแผนผังการจัดแกนหมายเลข 1-9 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปนี้ จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณเอกซ์เซสรีแอคติวิตีกับผลที่ได้จากการวัด ที่ได้จากสมุดบันทึกการเดินเครื่อง ปรากฏว่าผลการคำนวณให้ค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัด

2-Dimensional Fuel Burnup Calculation of TRR-1/M1

Somchai Pongkasem and Sunanta Patrashakorn

Physics Division, Office of Atomic Energy for Peace

Vibhavadi Rangsit Road, Chatuchak, Bangkok 10900

Tel. 562-0117, Fax. 561-3013

Abstract

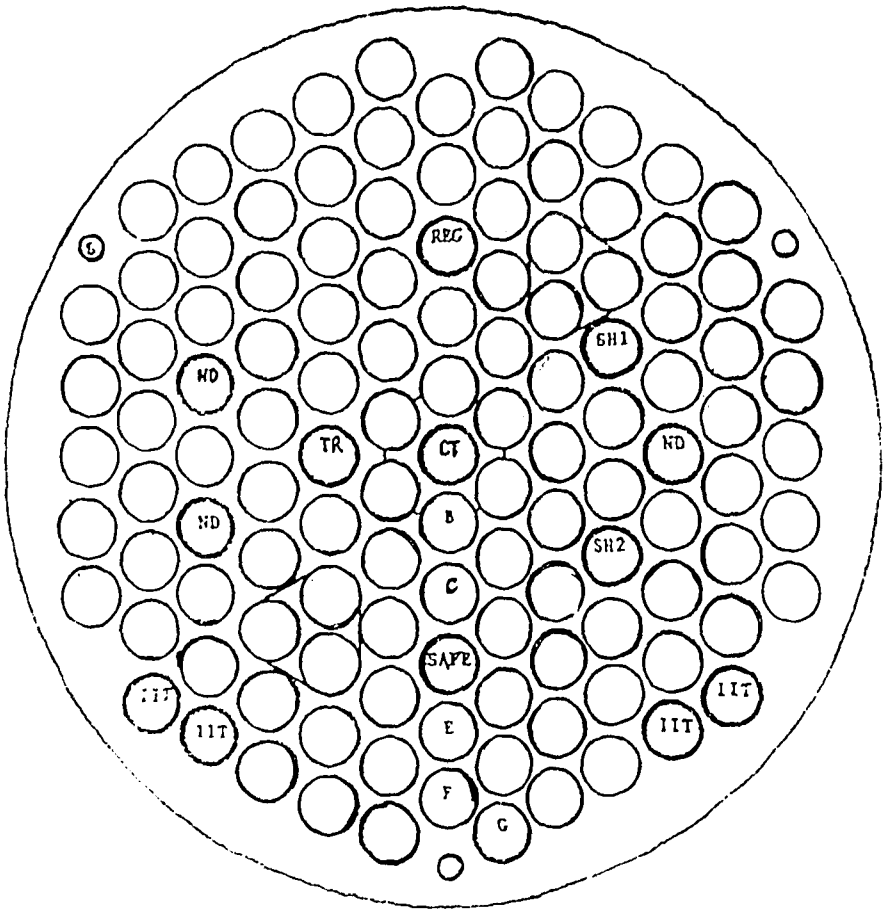
The program package for 2-dimensional burnup calculation for TRIGA reactor has been being developed. To verify this package, 2- group macroscopic cross sections at 1 MW for major components of the reactor core were generated. The calculations of excess reactivity and burnup for core loading no. 1-9 were performed by using this package. Comparing the calculated excess reactivities to the measured values obtained from the log book, the result indicates that the calculations are in good agreement with the measurements.

1. บทนำ

เครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเครื่องแรกของไทย ตั้งอยู่ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ได้เดินเครื่องครั้งแรกเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2505 เดิมแกนเครื่องเป็นแบบ MTR ต่อมาเมื่อปี พ.ศ. 2520 ได้มีการดัดแปลงแกนเครื่องเป็นแบบทริกา(TRIGA) ซึ่งมีลักษณะแกนปฏิกรณ์ฯดังแสดงในรูปที่ 1 เนื้อเชื้อเพลิงอยู่ในรูปยูเรเนียม-เซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (U-ZrH) โดยใช้ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะร้อยละ 20 และมีปริมาณยูเรเนียมในแท่งเชื้อเพลิง ร้อยละ 8.5 มีเหล็กปลอดสนิมเป็นสารหุ้มเชื้อเพลิง เรียกเชื้อเพลิงชนิดนี้ว่า 8.5/ 20 Standard ต่อมาสำนักงานฯ ต้องการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์ฯ โดยเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณยูเรเนียมมากกว่าเชื้อเพลิงแบบแรกประมาณ 2.5 เท่า เรียกเชื้อเพลิงแบบนี้ว่า 20/20 LEU การเปลี่ยนเชื้อเพลิงจะทำในลักษณะค่อยเป็นค่อยไป กล่าวคือ จะใช้เชื้อเพลิงแบบ LEU มาทดแทนเชื้อแบบ Standard ทุกครั้งที่มีความจำเป็นต้องเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงใหม่ จนกระทั่งในที่สุด จะได้แกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ใช้เชื้อเพลิงแบบ LEU ทั้งหมด

การคำนวณความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ฯในระยะแรก ซึ่งมีเชื้อเพลิงชนิดเดียวจะไม่ยุ่งยากมากนัก การคำนวณด้วยมือ หรือการใช้ คอมพิวเตอร์โคด 1 มิติ เช่น TRIGAP[1] ก็สามารถให้ผลการคำนวณดี แต่กรณีที่มีเชื้อเพลิงที่มีปริมาณยูเรเนียมต่างกันดังเช่นในกรณีนี้ การกระจายของกำลัง(Power) จะมีการเปลี่ยนแปลงมาก ตำแหน่งที่มีกำลังและอุณหภูมิสูงสุด จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเชื้อเพลิงแบบ LEU ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการเดินเครื่อง การจัดแกนจะต้องหลีกเลี่ยงมิให้ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดมีค่าเกินกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ฯ การศึกษาปัญหาเช่นนี้ไม่เหมาะที่จะใช้การคำนวณแบบ 1 มิติ จึงได้พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคำนวณ 2 มิติ เพื่อใช้คำนวณสภาวะวิกฤติ (Criticality) การกระจายของนิวตรอน การกระจายของกำลัง ตลอดจนการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ฯแบบทริกา ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ฯวิจัยที่มีอยู่ในหลายประเทศ หลังจากพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปแล้ว จำเป็นต้องมีการทดสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพของการทำงานของโปรแกรมสำเร็จรูปนี้ จึงได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปมาใช้สำหรับคำนวณการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1

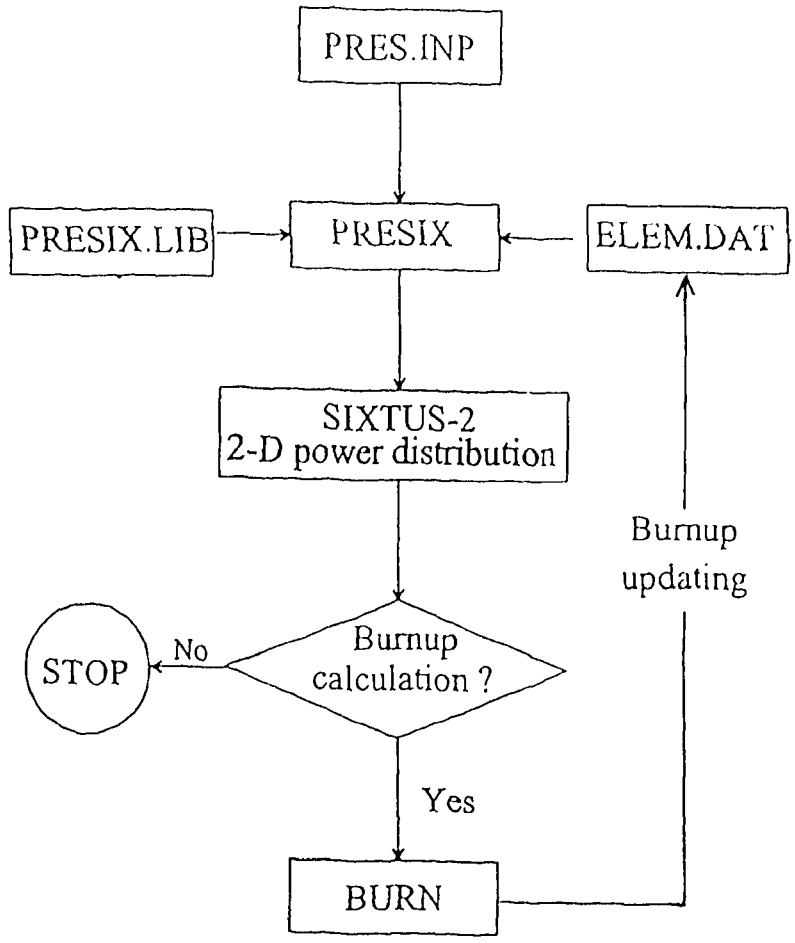
สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ คือต้องมีปริมาณเชื้อเพลิงมากพอ ซึ่งสามารถบอกได้ในเทอมของเอกซ์เซสรีแอคติวิตี (Excess reactivity) ในขณะเดินเครื่องจะต้องมีการบันทึกข้อมูลต่างๆ เช่น อุณหภูมิเชื้อเพลิง อุณหภูมิน้ำ และ ค่าเอกซ์เซสรีแอคติวิตี ฯลฯ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปคำนวณเอกซ์เซสรีแอคติวิตี และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1 เนื่องจากการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงไม่สามารถเปรียบเทียบกับการวัดได้โดยตรง จึงได้เปรียบเทียบเฉพาะเอกซ์เซสรีแอคติวิตีที่ได้จากการคำนวณ กับค่าที่อ่านจากเครื่องวัดซึ่งบันทึกไว้ในสมุดบันทึกการเดินเครื่องเท่านั้น



รูปที่ 1 แกนเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

1) เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ 486 DX2-66, RAM 16 MB, HD 300 MB
2) NDP FORTRAN Compiler Ver. 4.02
3) WIMS-D4 Code
4) Program Package for 2-D Burnup Calculation
5) ข้อมูลจากสมุดบันทึกการเดินเครื่อง (log book) ของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1

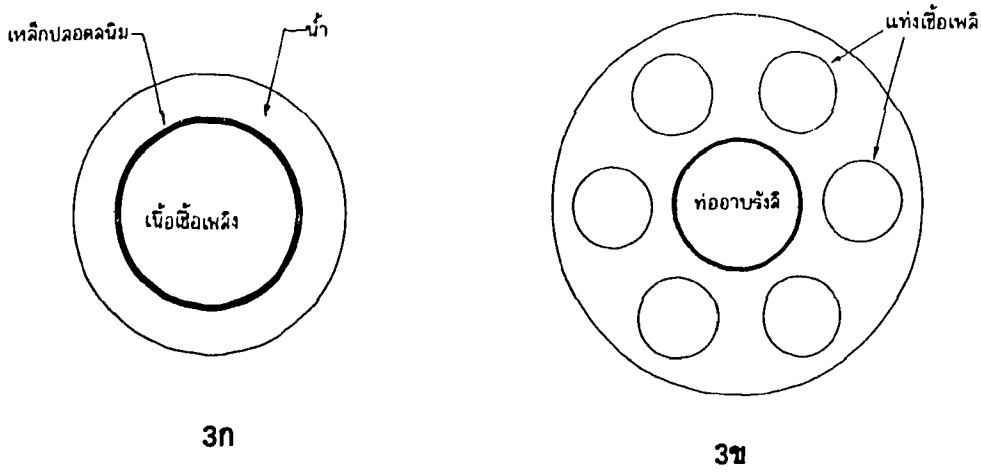


รูปที่ 2 แผนผังการทำงานของโปรแกรมสำเร็จรูป

แผนผังการทำงานของโปรแกรมสำเร็จรูป[2] ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนโดยสังเขปดังนี้

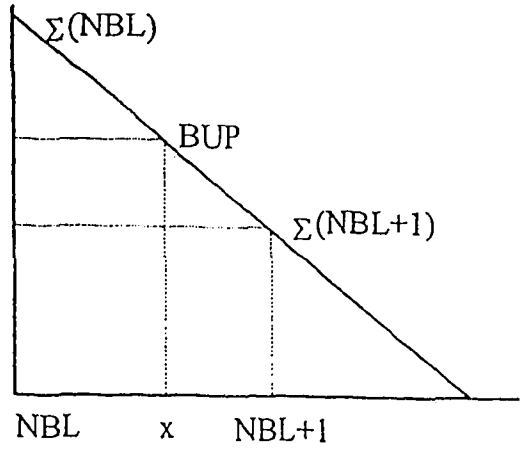
PRESIX.LIB เป็นไลบรารี(Library) ของค่านิวตรอนครอสเซคชันสำหรับส่วนประกอบต่างๆ ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ซึ่งได้แก่ แท่งเชื้อเพลิง แท่งควบคุม หัววัดรังสี และน้ำ เป็นต้น

แท่งเชื้อเพลิงของทริกามีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.75 ซม. ส่วนที่มีเนื้อเชื้อเพลิงจะสูงประมาณ 38 ซม. ตรงกลางแท่งเป็นเนื้อเชื้อเพลิงซึ่งห่อหุ้มด้วยเหล็กปลอดสนิม โมเดลในการคำนวณยูนิตเซล (Unit cell) ของแท่งเชื้อเพลิงได้แสดงไว้ในรูปที่ 3ก ส่วนประกอบที่ไม่ใช่แท่งเชื้อเพลิง เช่น ท่ออาบรังสีและหัววัดนิวตรอน จะถูกล้อมรอบด้วยแท่งเชื้อเพลิง 6 แท่ง โมเดลในการคำนวณยูนิตเซล ของส่วนประกอบเหล่านี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3ข ได้ใช้คอมพิวเตอร์โคด WIMS-D4[3] สร้างค่ามาโครสคอปิคครอสเซคชัน 2 กลุ่ม โดยมีพลังงานของเทอร์มัลนิวตรอน ตั้งแต่ 0-0.625 eV และ ฟาสท์นิวตรอน ตั้งแต่ 0.625 eV - 10 MeV



รูปที่ 3 โมเดลของยูนิตเซลที่ใช้ในการสร้างค่าครอสเซคชัน

เนื่องจากค่าครอสเซคชันของการเกิดปฏิกริยาต่างๆของเชื้อเพลิงเช่น ปฏิกริยาการดูดกลืน และปฏิกริยาการเกิดฟิสชัน จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิของเชื้อเพลิง สารหุ้มเชื้อเพลิง และ น้ำ ได้ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของสารเหล่านี้ในขณะเดินเครื่องที่กำลัง 1 เมกกะวัตต์ นอกจากนี้ค่าครอสเซคชันยังมีการเปลี่ยนแปลงไปกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ด้วย ดังนั้นจะเห็นว่า การคำนวณจะมีความยุ่งยากมาก เพราะทุกครั้งที่ใช้เชื้อเพลิงจะต้องคำนวณค่าครอสเซคชันของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง เพื่อความสะดวกในการคำนวณ จึงได้เตรียมค่าครอสเซคชันที่เปลี่ยนไปกับการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงโดยแบ่งออกเป็น 25 ช่วง (step) ซึ่งมีค่าการสิ้นเปลืองตั้งแต่ร้อยละ 0 - 40 กรณีที่พบว่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ระหว่าง ช่วง NBL และ ช่วง NBL+1 จะใช้วิธีการการเทียบอัตราส่วนโดยตรง (linear interpolation) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การหาครอสเซคชันโดยการเทียบอัตราส่วนโดยตรง

ค่าครอสเซคชันที่จุด x ใดๆ จะหาได้จาก

$$\Sigma(x) = \Sigma(NBL) + \frac{\Sigma(NBL+1) - \Sigma(NBL)}{BUR(MN,NBL+1) - BUR(MN,NBL)}(BUP(NODE) - BUR(MN,NBL)) \quad .....(1)$$

เมื่อ MN = ชนิดของเชื้อเพลิง (Standard, LEU)

BUR = % burnup ของเชื้อเพลิงในไลบรารี

BUP = % burnup ของเชื้อเพลิงในแท่งใดๆ

PRESIX module โมดูลนี้จะมีหน้าที่เตรียมค่ามาโครสคอปิกครอสเซคชัน 2 กลุ่ม สำหรับ SIXTUS-2 module โดยอ่านข้อมูลจาก

1) แฟ้มข้อมูล PRES.INP ซึ่งเป็นข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนแท่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ กำลังเครื่อง และรูปแบบการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ
2) แฟ้มข้อมูล ELEM.DAT ซึ่งเก็บประวัติแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง โดยจะบันทึกเป็นหมายเลขประจำแท่ง ซึ่งกำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต เมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงจะต้องบันทึกข้อมูลใช้ไว้ในหน่วย MWD และ % burnup
3) PRESIX.LIB ไลบรารี (Library) จะมีค่าครอสเซคชันของแท่งเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไปกับการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง และค่าครอสเซคชันของส่วนประกอบต่างๆของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ

หลังจากอ่านข้อมูลเหล่านี้แล้ว โมดูลนี้จะทำการคำนวณและเรียงค่าครอสเซคชันต่างๆ ให้อยู่ในรูปแบบ (Format) ที่เหมาะสมกับการใช้ SIXTUS-2 module

SIXTUS-2 module เริ่มแรกคอมพิวเตอร์โคด SIXTUS-2[4] พัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ แต่ในโปรแกรมสำเร็จรูปนี้จะใช้ SIXTUS-2/PC[5] เป็นโมดูลหนึ่งซึ่งจะใช้ค่าครอสเซคชันที่ได้จาก PRESIX module มาคำนวณสภาวะวิกฤติ การกระจายของนิวตรอนและกำลังของเครื่อง ปฏิกรณ์ฯ โมเดลในการคำนวณแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 · แกนเครื่องปฏิกรณ์ฯประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงในวง A, B, C, ..., G ได้แก่โหนด (node) หมายเลข 1-127 และความหนาของน้ำที่เป็นตัวสะท้อนนิวตรอนอีก 4 วง ได้แก่โหนดหมายเลข 128-331 ภายในแกนเครื่องจะมีแท่งควบคุมอยู่ที่ตำแหน่ง TR, REG, SH1, SH2, SAFE หัววัดนิวตรอนที่ตำแหน่ง ND และท่ออาบรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ตำแหน่ง IIT ในรูปที่ 1 และ 5

BURN module โมดูลนี้จะทำหน้าที่คำนวรการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงแต่ละแท่งแล้วเก็บข้อมูลที่อัพเดท (update) แล้วไว้ในแฟ้มข้อมูลชื่อ ELEM.DAT ส่วนกำลังของเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง ซึ่งคำนวณได้จาก SIXTUS-2 module ซึ่งเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลชื่อ POWER.NOR การคำนวณการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง (BU) ของแท่งเชื้อเพลิงแท่งที่ j^{th} เมื่อระยะเวลา $d\ell$ คำนวณได้จาก

$$BU(t_n)_j = \sum_{\ell=1}^{n} \Delta BU(d_\ell) = \sum_{\ell=1}^{n} (P_j^\ell)(d_\ell)$$

$$= \sum_{\ell=1}^{n} (NP_j^\ell)(\bar{P})(d_\ell) \qquad \text{.....} \quad (2)$$

เมื่อ $t_n = \sum_{\ell=1}^{n} d_\ell$

P_j = กำลังของแท่งเชื้อเพลิง แท่งที่ j

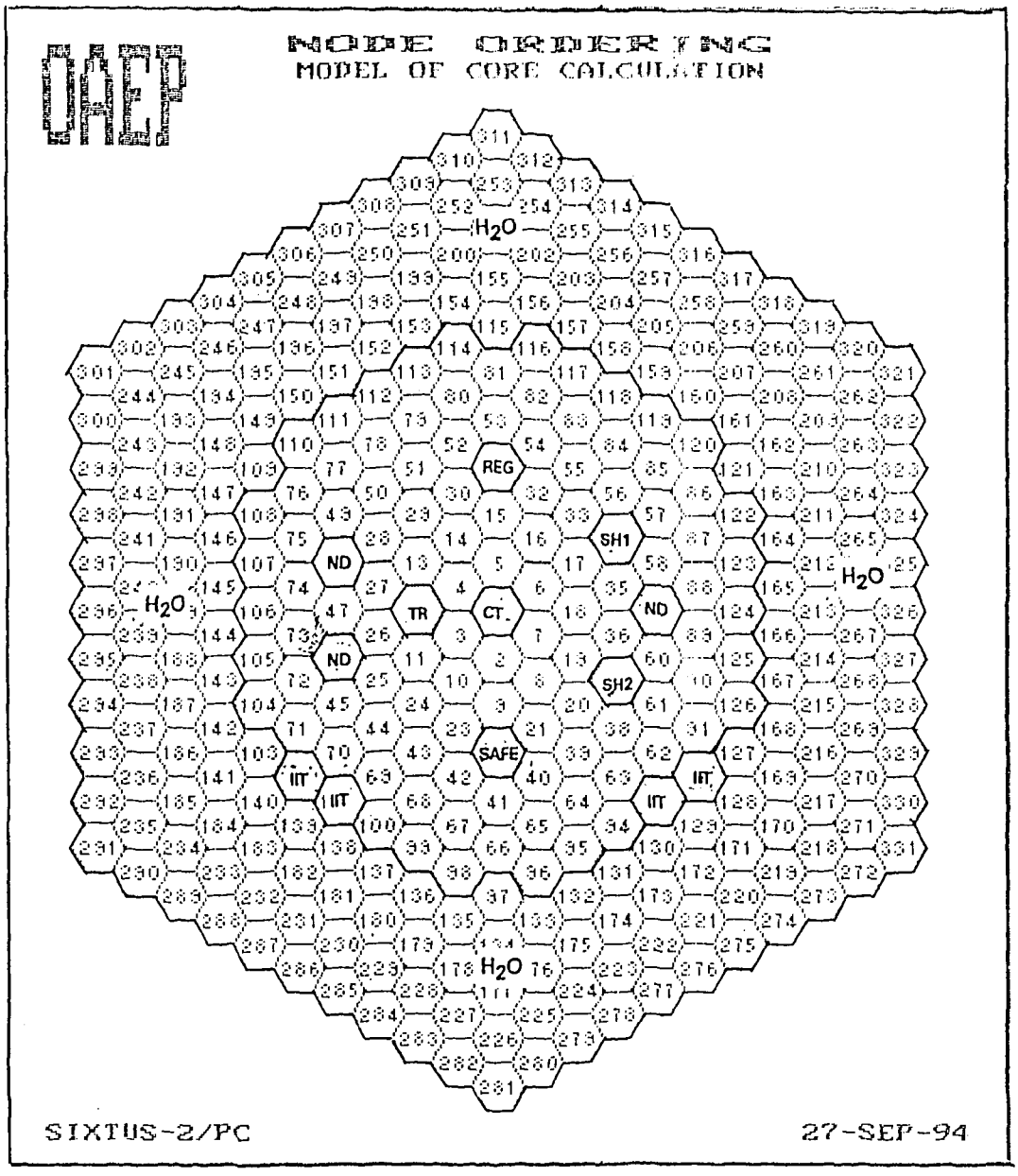
$\bar{P}$ = กำลังเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิง

NP_j^ℓ = Normalized power ของแท่งเชื้อเพลิง แท่งที่ j^{th} ที่ระยะเวลา d_ℓ

โดยทั่วไปเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1 จะทำงานสัปดาห์ละ 5 วันๆ ละ 7 ชั่วโมง ตั้งแต่วันจันทร์ถึงวันศุกร์ ในขณะเดินเครื่อง จะมีฟิสชันโปรดักส์เกิดขึ้นด้วย ฟิสชันโปรดักส์ที่สำคัญได้แก่ Xe-135 ซึ่งมี σ_a สูง(2.65×10^6 b) แต่เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1 มีเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ไม่สูงมาก และไม่ได้เดินต่อเนื่องกันเป็นเวลานาน ทำให้อิทธิพลของฟิสชันโปรดักส์มีไม่มากนัก อนึ่ง การเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม จะทำให้นิวตรอนฟลักซ์เปลี่ยนตามไปด้วย เพื่อให้การคำนวณทำได้ง่ายขึ้น สมมุติฐานในการคำนวณมีดังนี้

1) การเดินเครื่องสำหรับแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่มีแผนผังการจัดแกนหมายเลขเดียวกัน จะเป็นแบบต่อเนื่อง
2) ไม่มีฟิสชันโปรดักส์เกิดขึ้นระหว่างการเดินเครื่อง
3) แท่งควบคุมอยู่ในตำแหน่งสูงสุด

โมเดลสำหรับแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯที่ใช้ในการคำนวณได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 แล้วทำการคำนวณหาการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และเอกซ์เซสรีแอคติวิตี (ใช้สัญลักษณ์ว่า ρ_{ex} และมีหน่วยเป็นดอลลาร์ ($)) สำหรับแกนปฏิกรณ์ฯ หมายเลข 1 - 9 และเปรียบเทียบกับการวัด



รูปที่ 5 โมเดลการคำนวณแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ (หมายเลข 5)

3. ผลการคำนวณ

k_{eff} และ ρ_{ex}^{c} ($) จากการคำนวณ และ ρ_{ex}^{m} ($) จากการวัดของแกนปฏิกรณ์ฯหมายเลข 1-9 สรุปได้ดังนี้

Core No.	STEP	1	2	3	4	5	6	7
1	MWD	0	3	20	40	61.23		
	K_{eff}	1.03386	1.03360	1.02851	1.02493	1.02164		
	ρ_{ex}^{c}	4.68	4.62	3.96	3.47	3.02		
	ρ_{ex}^{m}	4.37	4.0	2.60	2.1	1.6		
2	MWD	61.23	80	100	120	137.53		
	K_{eff}	1.03448	1.03170	1.02961	1.0272	1.02623		
	ρ_{ex}^{c}	4.76	4.39	4.11	3.86	3.65		
	ρ_{ex}^{m}	4.55	4.23	3.94	3.65	3.36		
3	MWD	137.53	160	180	200	224.54		
	K_{eff}	1.02489	1.02301	1.02128	1.01922	1.01611		
	ρ_{ex}^{c}	3.47	3.21	2.98	2.69	2.25		
	ρ_{ex}^{m}	3.39	2.88	2.61	2.34	2.00		
4	MWD	224.54	250	271.99				
	K_{eff}	1.02719	1.02411	1.02148				
	ρ_{ex}^{c}	3.76	3.39	3.01				
	ρ_{ex}^{m}	3.24	2.90	2.64				
5	MWD	271.99	290	310	330	350	370	391.87
	K_{eff}	1.03289	1.03021	1.02763	1.02538	1.02359	1.02172	1.01962
	ρ_{ex}^{c}	4.55	4.19	3.82	3.54	3.29	3.29	2.75
	ρ_{ex}^{m}	3.71	3.49	3.25	1.01	2.79	2 55	2.30
6	MWD	391.87	410	430	455.98			
	K_{eff}	1.02359	1.02192	1.01983	1.01698			
	ρ_{ex}^{c}	3.29	3.06	2.66	2.37			
	ρ_{ex}^{m}	2.66	2.39	2.15	1.86			
7	MWD	455.98	480	500	520	548	566.12	
	K_{eff}	1.02290	1.02130	1.01828	1.01617	1.01410	1.01306	
	ρ_{ex}^{c}	3.20	2.98	2.67	2.27	1.99	1.83	
	ρ_{ex}^{m}	2.79	2.54	2.32	2.12	1.83	1.66	
8	MWD	566.12	259.84					
	K_{eff}	1.01165	1.0100					
	ρ_{ex}^{c}	1.64	1.41					
	ρ_{ex}^{m}							
9	MWD	553.84	612	626				
	K_{eff}	1.01898	1.01743	1.01657				
	ρ_{ex}^{c}	2.66	2.39	2.33				
	ρ_{ex}^{m}	2.24	2.04	1.90				

4. บทวิจารณ์และสรุปผล

โดยทั่วไป ผลการคำนวณเอกซ์เซสรีแอคติวิตีมีความสอดคล้องกับผลการวัด ยกเว้นแกนปฏิกรณ์ฯ หมายเลข 1 ซึ่งมีการปรับเทียบแท่งควบคุมสองครั้ง ที่มีความแตกต่างกันมาก คาดว่ามีความคลาดเคลื่อนในการปรับเทียบ นอกจากนี้ พบว่าผลการคำนวณจะมีค่าต่ำกว่าผลการวัด ทั้งนี้เนื่องมาจากสมมุติฐานที่ว่า ไม่มีฟิสชันโปรดักส์เกิดขึ้นในระหว่างเดินเครื่อง ขั้นตอนต่อไปสำหรับการวิจัย คือศึกษาอิทธิพลของฟิสชันโปรดักส์ที่มีส่วนทำให้เอกซ์เซสรีแอคติวิตีลดลง ซึ่งคาดว่าหลังจากพิจารณาส่วนนี้แล้ว จะทำให้ผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับการวัดมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูป ชื่อ Program Package for 2-D Burnup Calculation ซึ่งได้รับการสนับสนุนด้านเงินทุนวิจัย จากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (Research Contract no.6704/RB/R1)

6. เอกสารอ้างอิง

1. I.Mele, M. Ravnik, TRIGAP-A COMPUTER PROGRAMME FOR RESEARCH REACTOR CALCULATION, IJS-DP-3238, Dec., 1985.

2. S. Patrashakorn, Progress Report on Program Package for 2-D Burnup Calculation, June, 1994.

3. WIMS-D4 Program Manual, NEA Data Bank, Bat. 4591191 Gif Suf Yvette, Cedex, France.

4. J.J Arkuszeski, SIXTUS-2, A Two Dimensional Multigroup Diffusion Theory Code in Hexagonal Geometry, EIR- Bericht, Nr. 470(1982)

5. S. Patrashakorn, S Pongkasem, SIXTUS-2/PC A Two Dimensional Multigroup Diffusion Theory Code in Hexagonal Geometry, August, 1993.