

การหาปริมาณของยูเรเนียมและทอเรียมในแร่โดยเทคนิคการนับกัมมันตภาพรังสี

ปริญญานิพนธ์

ของ

ปรีชาญ เกษศรี

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ตลิ่งชัน 22 พระโขนง กรุงเทพฯ 11 โทร 3821675 3816068

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

กุมภาพันธ์ 2522

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การหาปริมาณของยูเรเนียมและธอเรียมในแร่ โดยเทคนิคการนับกัมมันตรังสี

บทคัดย่อ

ของ

ปรีชาญ เกษศิริ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้า
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
14 กุมภาพันธ์ 2522

การหาปริมาณยูเรเนียมและทอเรียมในแร่ โดยเทคนิคการนับคีเลี่ยนิวตรอน

จุดมุ่งหมายของการวิจัยครั้งนี้ เพื่อหาปริมาณของยูเรเนียมและทอเรียมที่อยู่ในแหล่งแร่ต่าง ๆ ในประเทศไทย โดยใช้เทคนิคการนับคีเลี่ยนิวตรอน ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ที่สามารถทำได้รวดเร็ว และมีความแม่นยำพอสมควร จากการวิเคราะห์หินทราย 18 ตัวอย่าง และโมนาไซต์ 27 ตัวอย่าง พบว่าสามารถหาปริมาณของยูเรเนียมได้ในช่วง $208.7 - 26.5$ ppm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $8.83 - 13.96$ % และปริมาณทอเรียม $10.30 - 5.90$ % ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $6.14 - 6.43$ %

DETERMINATION OF URANIUM AND THORIUM IN ORES
BY DELAYED NEUTRON COUNTING TECHNIQUE

AN ABSTRACT

BY

PRECHARN DECHSRI

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

14 February 1979

Determination of Uranium and Thorium in Ores by Delayed Neutron Counting Technique.

The method of delayed neutron counting technique had been applied to the non-destructive analysis of Uranium and Thorium in ores. The Uranium and Thorium concentration in the sample was calculated from Delayed Neutrons whose activities correspond, within the error limits to those of standard ores. 18 samples of Thai Sand Stone and 27 samples of Thai Monazite were analysed. The limit of measurement obtained for Uranium was 2608.7 ± 26.5 ppm and for Thorium was 10.30 ± 5.90 %. The accuracy ranged from 8.83 ± 13.96 % for Uranium and 6.14 ± 6.43 % for Thorium.

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำวันสัปดาห์ได้พิจารณาปัญหานี้จนบัดนี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒไว้.

ไพฑูริย์ เกตุประสิทธิ์ ประธาน

สมเกียรติ อภิบาล กรรมการ

ประกาศนุญการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาให้คำแนะนำและร่วมมือในการวิจัย
ของประธานที่ปรึกษาอาจารย์จันการมย์ ขวเจริญพันธ์ นักนิเวศลิษฐ์เคมีแห่งสำนักงาน
พลังงานปรมาณูเพื่อสันติ และอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร. ท. สมเกียรติ กรีกทอง
แห่งภาควิชาเคมี มศว. ประสานมิตร จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. กรรติกา ศิริเสนา ผู้อำนวยการกองเคมี
และข้าราชการในสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำ
การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน.

ปรีชาญ์ เกษศรี

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
คำนำ	1
ความมุ่งหมายในการศึกษาวิจัย	2
ความสำคัญในการศึกษาวิจัย	2
ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	3
นิยามศัพท์เฉพาะ	3
เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย	5
2 ทฤษฎี	11
การเกิดคลื่นนิวตรอน	15
ปริมาณคลื่นนิวตรอน	16
3 เครื่องมือและวิธีดำเนินการ	19
เครื่องมือ	19
เครื่องให้กำเนิดนิวตรอน	19
หลักการทางานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู	20
เครื่องวัดคลื่นนิวตรอน	20
หลักการทางานของเครื่องวัด	21
วิธีดำเนินการวิจัย	24

บทที่	หน้า
4 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการวิจัย	27
สูตรทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ข้อมูล	27
ผลการวิจัย	28
ความเชื่อมั่นในการวิจัย	38
5 บทย่อ สรุปผล อภิปรายและขอเสนอแนะ	39
บทย่อ	39
สรุปผลการวิจัย	41
ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการวิจัย	42
อภิปรายผลการวิจัย	42
ขอควรระวังและขอเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม	46

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ปริมาณสุทธิของดีเอ็นเอนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน	5
2 ปริมาณดีเอ็นเอนิวตรอนจากเทอร์โมนัลฟิชชัน	6
3 ปริมาณดีเอ็นเอนิวตรอนจากพลาสมาฟิชชัน	6
4 Precursor ที่สลายตัวให้ดีเอ็นเอนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน	8
5 ปริมาณของข้อริเริ่มในสินแร่โมนาไซต์	10
6 จำนวนนับเปรียบเทียบของสารมาตรฐาน	28
7 แคคเมียมเรโซของสารมาตรฐาน	29
8 ปริมาณยูเรเนียมในหินทราย	32
9 ปริมาณยูเรเนียมในสินแร่โมนาไซต์	34
10 ปริมาณข้อริเริ่มในสินแร่โมนาไซต์	36
11 ปริมาณข้อริเริ่มและยูเรเนียมในสารมาตรฐาน	38
12 จำนวนนับเปรียบเทียบมาตรฐานที่ได้จากการทดลองกับผลการทดลอง ของ Gale	44
13 แคคเมียมเรโซที่ได้จากการทดลองและจากผลการทดลองของ Gale	44

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 Block diagram of Delayed Neutron Counter	22
2 Inside View of Delayed Neutron Counting Assembly	22
3 Outside View of Delayed Neutron Counting Assembly	23
4 ยูเรเนียม Calibration Curve	30
5 ทอเรียม Calibration Curve	31

คำนำ

ปัญหาเกี่ยวกับพลังงาน นับเป็นปัญหาสำคัญในยุคปัจจุบัน อันเนื่องมาจากน้ำมันซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสำคัญมีราคาเพิ่มสูงขึ้น ประกอบกับมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นจนมีแนวโน้มว่าปริมาณน้ำมันสำรองจะหมดลงไ้ในอนาคต ทำให้การค้นคว้าหาแหล่งพลังงานใหม่จากแหล่งต่าง ๆ กำลังเป็นสิ่งที่น่าสนใจทางวิทยาศาสตร์สนใจอยู่ในปัจจุบันนี้ สำหรับพลังงานนิวเคลียร์ซึ่งเป็นที่น่าสนใจและน่าจะนำมาใช้อย่างแพร่หลายนั้น คือพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของนิวเคลียส (Nuclear fission) ของธาตุหนักต่าง ๆ เช่น ยูเรเนียม, พลูโตเนียม ฯลฯ ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้สามารถจะเตรียมมาได้จากอะตอมของธาตุที่อยู่ในธรรมชาติเพียง 2 ธาตุ คือ ยูเรเนียมและซอเรียม ซึ่งมีไอโซโทป (Isotope) ในธรรมชาติดังนี้คือ ยูเรเนียม - 234 ยูเรเนียม - 235 ยูเรเนียม - 238 และ ซอเรียม - 232

ธาตุยูเรเนียมและซอเรียมนี้มีกระจายอยู่ตามแหล่งแร่ต่าง ๆ ทั่วโลก เช่น ออสเตรเลีย, คองโก ฯลฯ ในประเทศไทยจากการสำรวจทางธรณีวิทยาโดยกรมทรัพยากรธรณี พบว่ามีแหล่งแร่หลายแห่งพบธาตุยูเรเนียมและซอเรียม เช่น ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ บริเวณจังหวัดขอนแก่น พบว่ามีปริมาณของยูเรเนียม 0.002 - 0.08 % และซอเรียมไม่เกิน 0.01 % แต่มีบางแหล่งแร่ เช่น แหล่งแร่ประจุกีตหมา อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดขอนแก่น พบว่ามีปริมาณยูเรเนียม 0.04 - 0.57 % และมีปริมาณสำรองประมาณ 1800 ตัน ซึ่งสามารถจะนำมาดูลงเป็นโลหะบริสุทธิ์ เพื่อใช้ทำเชื้อเพลิงได้ (กฎหมาย อินทฤติ 2520 : 55 - 61)

ในการสำรวจหาปริมาณของยูเรเนียมและซอเรียมนี้ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีทางเคมี, วิธีทางนิวเคลียร์ ฯลฯ

ภายหลังการพบปฏิกิริยาแตกตัวโดย Fermi (Fermi. 1939 : 779) เมื่อปี ค.ศ. 1939 แล้ว Zel' dowich และ Khariton (Zel' dowich and Khariton

1940 : 345) ได้เสนอทฤษฎีการเกิดกัมมันตรังสี (Delayed Neutron) และต่อมา Roberts, Meyer และ Wang (Roberts and Others 1939 : 510) จึงได้พบกัมมันตรังสีที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Reaction) จริง

จากการศึกษาคุณสมบัติของกัมมันตรังสี พบว่าสามารถหาปริมาณของกัมมันตรังสีที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน เป็นปริมาณซึ่งถึงปริมาณของธาตุที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ โดย Amel (Amel. 1961 : 1689 - 1692) ได้นำเอาวิธีการนับกัมมันตรังสีมาใช้ในการหาปริมาณของธาตุที่สามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้เป็นอย่างดี

ในประเทศไทย อนงค์ นิลอบูล (M.L. Anong Nilubol. 1972:2) ได้ทำการศึกษาวិธีการหาปริมาณของธอเรียมในแร่ โดยเทคนิคการนับกัมมันตรังสี พบว่าสามารถหาปริมาณได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องใช้วิธีการทางเคมีมาเกี่ยวข้อง แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านของประสิทธิภาพอยู่ ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่า การหาปริมาณของยูเรเนียมและธอเรียมในแร่ โดยเทคนิคการนับกัมมันตรังสี ควรจะได้มีการศึกษาและพัฒนาให้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เพื่อประโยชน์ในการศึกษาวิธีต่อไป

ความมุ่งหมายในการศึกษาวิจัย

เพื่อหาปริมาณของยูเรเนียม (Uranium) และ ธอเรียม (Thorium) ที่มีอยู่ในสินแร่ในประเทศไทย

ความสำคัญในการศึกษาวิจัย

1. ทำให้ทราบถึงปริมาณของยูเรเนียมและธอเรียมที่มีอยู่ในแหล่งแร่ภายในประเทศไทย ซึ่งอาจนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งด้านการศึกษาและเศรษฐกิจ
2. เป็นการศึกษาหาข้อมูลและวิธีการ ซึ่งอาจนำไปใช้ในการศึกษาและวิจัยในระดับอุดมศึกษาสาขาที่เกี่ยวข้องกับวิชานิวเคลียร์ได้

ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1. กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย ได้มาจากแหล่งแร่ภายในประเทศไทย ซึ่งกรมทรัพยากรธรณี ได้ทำการสำรวจทางธรณีวิทยาแล้วพบว่ามีปริมาณของยูเรเนียมและทอเรียมอยู่
2. เป็นการศึกษาโดยวิธีการแบบ Nondestructive Neutron Bombardment Analysis เครื่องมือที่ใช้คือ BF_3 Detector และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear Reactor)
3. เป็นการศึกษาทางคานปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative Analysis) และคุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative Analysis)

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. Non-destructive Neutron Bombardment Analysis หมายถึงวิธีวิเคราะห์โดยการนำสารตัวอย่างไปอาบอนุภาคนิวตรอน เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ (Nuclear Transmutation) ไปเป็นไอโซโทป ของธาตุกัมมันตรังสี แล้วจึงวัดกัมมันตรังสีหรืออนุภาคที่สลายตัวออกมา โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อทำให้ธาตุกัมมันตรังสีที่ต้องการบริสุทธิ์เสียก่อน
2. Transmutation หมายถึงการเปลี่ยนแปลงจากธาตุหนึ่งไปเป็นอีกธาตุหนึ่งหรือจากไอโซโทปหนึ่งไปเป็นอีกไอโซโทปหนึ่ง ที่เป็นกัมมันตรังสี โดยการยิง (Bombard) อนุภาคนิวตรอนจากทาง ๆ จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear Reactor) ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ใช้นิวตรอน (Neutron) เป็นตัวกระตุกในการยิง
3. BF_3 detector and Single-channel Pulse Height Analyzer คือเครื่องมือที่ใช้วัดอนุภาคนิวตรอน ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้หมายถึงการวัดคลื่นนิวตรอน โดยการนับสัญญาณ (Pulse) ไฟฟ้า จากเครื่องตรวจจับอนุภาค
4. ค่าเปรียบเทียบมาตรฐาน (Calibration) หมายถึงการหาปริมาณหรือชนิดของธาตุที่ต้องการ โดยการนำไปเปรียบเทียบกับธาตุมาตรฐานที่ทราบทั้งชนิดและปริมาณแน่นอนแล้ว

ในทางนิวเคลียร์ จะใช้การเปรียบเทียบปริมาณหรือระดับพลังงานของอนุภาค หรือรังสีต่าง ๆ ที่สลายออกมา

5. แคดเมียม เรโซ (Cadmium Ratio) หมายถึงอัตราส่วนของรังสีหรืออนุภาคที่นับได้จากการนำธาตุชนิดเดียวกัน ไปอาบอนุภาคนิวตรอน โดยการใส่หุ้มด้วยแผ่นแคดเมียม และหุ้มด้วยแผ่นแคดเมียม ซึ่งจะวัดความสัมพันธ์ว่า

$$\text{แคดเมียม เรโซ} = \frac{\text{ปริมาณเค็ลยนิวตรอนที่เกิดจากธาตุซึ่งอาบอนุภาคนิวตรอนโดยไม่หุ้มด้วยแคดเมียม}}{\text{ปริมาณเค็ลยนิวตรอนที่เกิดจากธาตุเดียวกันซึ่งอาบอนุภาคนิวตรอนโดยหุ้มด้วยแคดเมียม}}$$

6. Interference หมายถึงการรบกวนทางรังสีที่เกิดจากธาตุที่ไม่ต้องการวัดรังสีต่อธาตุที่ต้องการวัดรังสี ซึ่งทำให้รังสีวัดได้มีปริมาณมากกว่าความเป็นจริง ในการวัดเค็ลยนิวตรอน ที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันของยูเรเนียมและธอเรียม อาจเกิดการรบกวนจากไนโตรเจน-11 ($N 11$) ซึ่งสลายตัวให้นิวตรอนมีครึ่งชีวิต (Half-life) 4.15 นาที

7. ครึ่งชีวิต (Half-life) หมายถึงระยะเวลาซึ่งธาตุกัมมันตรังสีสลายตัวให้รังสี หรืออนุภาคอื่น ๆ ออกมาจนเหลือปริมาณรังสีเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม หรือเหลือปริมาณอะตอมเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม

8. Precursor หมายถึงผลผลิต ที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน ซึ่งจะสลายตัวให้เค็ลยนิวตรอน แล้วกลายเป็นอะตอมของธาตุใหม่ซึ่งเสถียร

9. ฟาสต์ นิวตรอน (Fast Neutron) หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 0.1 MeV หรือมีความเร็วกว่า 1.8×10^7 เมตร/วินาที

10. เทอร์มัลนิวตรอน หรือสโลว์นิวตรอน (Thermal Neutron or Slow Neutron) หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่า 2 eV หรือมีความเร็วต่ำกว่า 2.2×10^3 เมตร/วินาที

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

Keepin, Wamett และ Zeigler (Keepin and Others. 1957 : 1044 - 1049) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดกัมมันตรังสีนิวตรอน จากปฏิกิริยาฟิชชัน โดยทำการวัดปริมาณของกัมมันตรังสีนิวตรอน ที่เกิดจากผลการแตกตัวของ ยูเรเนียม - 233, 235, 238., ซอเรียม - 232 และ พลูโทเนียม - 239, 240 เนื่องจากฟาส์นิวตรอน และเทอร์มัลนิวตรอน ได้ผลการทดลองดังนี้ คือ

ตาราง 1 ปริมาณสุทธิของกัมมันตรังสีนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน

Fission Nuclide	Absolute Yield (Delayed Neutron/ Fission for Pure Isotope)	
	Fast Fission	Thermal Fission
Th 232	0.0496 $\pm$ 0.0020	-
U 233	0.0070 $\pm$ 0.0004	0.0066 $\pm$ 0.0003
U 235	0.00265 $\pm$ 0.0005	0.00158 $\pm$ 0.0005
U 238	0.0412 $\pm$ 0.0077	- 0.0005
Pu 239	0.0063 $\pm$ 0.0003	0.0061 $\pm$ 0.0003
Pu 240	0.0080 $\pm$ 0.0006	-

Amel (Amel. 1962 : 1683 - 1692) ได้ศึกษาการเกิดกัมมันตรังสีนิวตรอนจากธาตุที่สามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ และมีไอโซโทปเสถียรในธรรมชาติ ได้ผลการทดลองดังนี้ คือ

ตาราง 2 ปริมาณกัมมันตภาพรังสีจากเทอร์โมลัมฟิชั่น

ไอโซโทป	กัมมันตภาพรังสี	กลุ่ม	ครึ่งชีวิต (วินาที)	ปริมาณสัมบูรณ์ของกัมมันตภาพรังสี- นิวตรอน คอพิงตัน (%)
U-238	0.0158 ± 0.0005	1	55.72 ± 1.28	0.052 ± 0.005
		2	22.72 ± 0.71	0.346 ± 0.018
		3	6.22 ± 0.23	0.310 ± 0.036
		4	2.30 ± 0.09	0.624 ± 0.026
		5	0.610 ± 0.083	0.182 ± 0.015
		6	0.230 ± 0.025	0.066 ± 0.008

ตาราง 3 ปริมาณกัมมันตภาพรังสีจากฟอสฟอรัส ฟิชั่น

ไอโซโทป	กัมมันตภาพรังสี	กลุ่ม	ครึ่งชีวิต (วินาที)	ปริมาณสัมบูรณ์ของกัมมันตภาพรังสี- นิวตรอนคอพิงตัน (%)
U-235	0.0165 ± 0.0005	1	54.51 ± 0.94	0.063 ± 0.005
		2	21.84 ± 0.54	0.351 ± 0.011
		3	6.00 ± 0.17	0.310 ± 0.028
		4	2.23 ± 0.06	0.672 ± 0.025
		5	0.469 ± 0.029	0.211 ± 0.015
		6	0.179 ± 0.017	0.043 ± 0.005
U-238	0.0412 ± 0.0017	1	52.38 ± 1.29	0.054 ± 0.005
		2	21.58 ± 0.39	0.564 ± 0.025
		3	5.00 ± 0.19	0.667 ± 0.087

ตาราง 3 (ต่อ)

ไอโซโทป	ดีเลย์นิวตรอนต่อฟิชชัน	กลุ่ม	ครึ่งชีวิต (วินาที)	ปริมาณสัมบูรณ์ของดีเลย์- นิวตรอนต่อฟิชชัน (%)
Th-232	0.0496 ± 0.0020	4	1.93 ± 0.07	1.599 ± 0.081
		5	0.490 ± 0.023	0.927 ± 0.060
		6	0.172 ± 0.009	0.309 ± 0.024
		1	56.03 ± 0.95	0.169 ± 0.012
		2	20.75 ± 0.66	0.744 ± 0.037
		3	5.74 ± 0.24	0.769 ± 0.108
		4	2.16 ± 0.08	2.212 ± 0.110
		5	0.571 ± 0.042	0.853 ± 0.073
		6	0.211 ± 0.019	0.213 ± 0.031

และพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดจะสามารถหาอายุเรเนี่ยมได้ต่ำสุด 10^{-7} กรัม และขอเริ่ม 10^{-4} กรัม

Hyde (Hyde. 1964 : 267) ได้กล่าวถึง Precursor ที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน และสลายตัวให้ดีเลย์นิวตรอน ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุดังนี้คือ As, Br, Kr, Rb, Sb และ I ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 4 Precursor ที่สลายตัวให้กัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาฟิชชัน

ธาตุ	มวลอะตอม	ครึ่งชีวิต (วินาที)	Pn. (% Precursor / total Precursor) ¹
As	85	2	11 ± 3
Br	87	55	2.9 ± 0.6
	88	16	5.9 ± 1.6
	89	44	9.5 ± 3.0
	90	1.6	15 ± 3
Kr	92	1.9	-
	93	1.2	-
Rb	92	5.3	-
	93	5.6	-
Sb	134	11	0.1
	135	1.5	0.4
I	137	24	3.0 ± 0.5
	138	6.0	2.1 ± 0.5
	139	2.0	4.5 ± 1.5

Gale (Gale. 1967 : 431 - 452) ได้นำเอาวิธีการตรวจนับดีเลย์นิวตรอน มาใช้ในการหาปริมาณของยูเรเนียมและทอเรียม ได้เป็นผลสำเร็จ ซึ่งสามารถหาปริมาณต่ำสุดของ ยูเรเนียม - 235 ได้ 10^{-10} กรัม (10^{-8} กรัม ยูเรเนียมธรรมชาติ) และ ทอเรียม - 232 10^{-6} กรัม. แคลคิเมียม เรโซ ของยูเรเนียม 43.0 ± 2.0 และ ทอเรียม 1.00 ± 0.02 การหาค่าเปรียบเทียบกับมาตรฐานโซยูเรเนียมระหว่าง 1 - 500 ไมโครกรัม และทอเรียม 0.5 - 100 มิลลิกรัม. จำนวนนับเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ-

ยูเรเนียม 430 ± 4 จำนวนนับต่อนาทีต่อไมโครกรัม และของซอเรียม 1.16 ± 0.02
 จำนวนนับต่อนาทีต่อไมโครกรัม ค่าผิดพลาดในการหาปริมาณของยูเรเนียมอยู่ระหว่าง $0.9 -$
 7.7% และของซอเรียมอยู่ระหว่าง $4.00 - 400 \%$

ในการทดลองพบว่าอาจเกิดการรบกวนจากสาเหตุต่อไปนี้ คือ

1. เกิดจากนิวเคลียสของธาตุอื่น ๆ ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน และให้
 ก็เลี่ยนวตรอน เช่นกัน
2. ก็เลี่ยนวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยา (n, P) และ (n, α)
3. นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยา (α, n)
4. เกิดการบัง (Shielded) ทกยอของธาตุอื่น ๆ ที่มี

Neutron-Capture Cross-section สูง ซึ่งจะมีผลต่อเทอร์มัลนิวตรอนขณะอายุรังสี

ในการวิจัยนี้ Gale สามารถแก้ไขปัญหการถูกรบกวนได้โดยปล่อยให้นิวตรอนที่
 เกิดรบกวนซึ่งส่วนใหญ่มีครึ่งชีวิตสั้น ๆ สลายตัวเสียก่อนที่จะนำไปวัดก็เลี่ยนวตรอน

การวิจัยในประเทศไทย

อนงค์ นิลอุบล (M.L. Anong Nilubol. 1975 : 2) ได้ทำการวิจัยหาปริมาณของ
 ซอเรียมในสินแร่ โดยเทคนิคการนับก็เลี่ยนวตรอนจากการวิจัย พบว่าสินแร่ที่มีปริมาณของ
 ซอเรียม $6 - 10 \%$ จะสามารถวิเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว ส่วนสินแร่ที่มีปริมาณซอเรียม
 ต่ำกว่า 1% จะทำได้ยากมีค่าความผิดพลาดสูง เนื่องจากประสิทธิภาพของ BF_3 detector
 ต่ำ และผลการวิจัยครั้งนี้ คือ

ตาราง 5 ปริมาณของซอเรียมในสินแร่โมนาไซต์

ตัวอย่างสินแร่	ปริมาณซอเรียม (%)
Monazite 34	10.1 ± 0.7
Sample No A	8.5 ± 0.9
Sample No 6.1	7.1 ± 0.8
Sample No 7.	8.8 ± 0.8
Sample No 9	7.2 ± 0.3
Sample No 10	7.5 ± 0.3
Sample No 11.1	8.0 ± 1.0
Sample No 12.2	8.0 ± 0.5
Sample No 9 B	8.2 ± 0.5
Sample No 13	7.5 ± 0.4
Sample No 12	8.1 ± 0.7
Sample No 11	8.2 ± 0.5
Sample No 2	7.3 ± 0.7
Sample No 8	0.07 ± 0.01
Sample No 4	0.04 ± 0.005
829/2510	6.9 ± 0.4
776/2510	8.4 ± 0.6

บทที่ 2

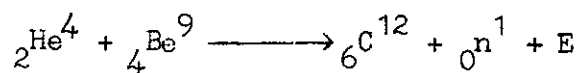
ทฤษฎี

ในการวิเคราะห์หาปริมาณของยูเรเนียมและธอเรียม โดยเทคนิคการนับกัมมันตภาพรังสีนิวตรอน จะต้องใช้อนุภาคนิวตรอนเป็นตัวยิงอะตอมของอนุภาคเหล่านั้น ซึ่งอนุภาคนิวตรอนมีแหล่งให้กำเนิดแตกต่างกันออกไปหลายแหล่ง คือ

1. แหล่งที่ใช้ในการหาต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron Sources)

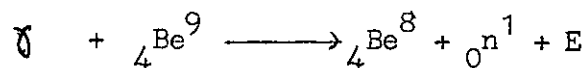
1.1 เกิดจากปฏิกิริยาอัลฟา - นิวตรอน (α, n)

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเมื่อมีรังสีอัลฟาทิงชนนิวเคลียสของไอโซโทปบางชนิด ที่ถือว่าเป็นเป้า แล้วจะให้นิวตรอนออกมา ตัวอย่างถ้าเอาไอโซโทปที่แผ่รังสีอัลฟา เช่น อเมอริเซียม - 243, พลูโตเนียม - 239 มาผสมกับไอโซโทปที่เป็นเป้าเช่นเบอริลเลียม แล้ววัดเป็นกอนจะได้นิวตรอนกำเนิดนิวตรอน ซึ่งให้นิวตรอนออกมา สมการที่เกิด คือ



1.2 เกิดจากปฏิกิริยาแกมมา - นิวตรอน (γ, n)

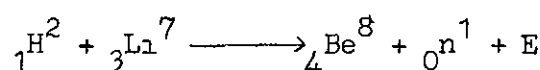
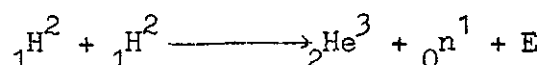
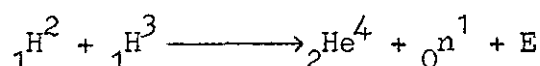
ปฏิกิริยานี้ก็เช่นเดียวกับปฏิกิริยาในข้อ 1.1 แต่ใช้รังสีแกมมาเป็นตัวทำให้อะตอมเกิดปฏิกิริยาแทนรังสีอัลฟา มีสมการการเกิดดังนี้ คือ



2. แหล่งที่เกิดจากเครื่องผลิตนิวตรอน (Neutron Generator)

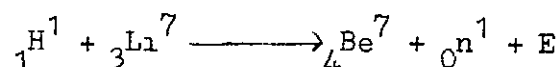
2.1 เกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เร็ว - นิวตรอน (d,n)

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคดิวเทอเรียม ซึ่งถูกเร่งจากเครื่องเร่งอนุภาคจนมีพลังงานสูงวิ่งชนนิวเคลียสของไอโซโทปบางชนิดที่มันเป็นเป้า จะเกิดปฏิกิริยาให้นิวตรอนออกมา ดังสมการ



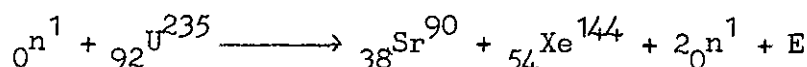
2.2 ปฏิกิริยาโปรตอน - นิวตรอน (p,n)

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกับข้อ 2.1 แต่เปลี่ยนกระสุนจากดิวเทอเรียมเป็นโปรตอน มีสมการการเกิดดังนี้ คือ



3. ปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Reaction)

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเมื่อนิวเคลียสของธาตุที่เกิดฟิชชันได้ (Fissionable material) เช่น ยูเรเนียม - 233, ยูเรเนียม - 235, พลูโตเนียม - 239 ถูกนิวตรอนวิ่งเข้าชนแล้วเกิดการแตกแยกออกเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ พร้อมทั้งให้พลังงานจำนวนมหาศาลกับนิวตรอนอีกจำนวนหนึ่งออกมาด้วย ดังสมการ

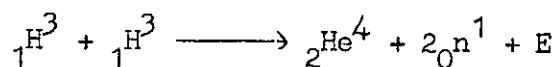
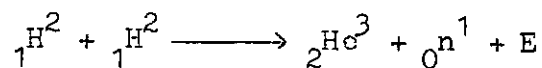


ปฏิกิริยาฟิชชันนี้ ถ้าเกิดในก้อนเชื้อเพลิงมากพอจะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) อันเป็นการที่การเกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อ ๆ ไปเรื่อย ๆ ซึ่งก็จะมีผล

ทำให้ได้พลังงานและนิวตรอนจำนวนมากสลายออกมาภายในช่วงเวลาอันสั้น ปฏิกิริยาฟิชชันนี้ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูและระเบิดปรมาณู

4. ปฏิกิริยาฟิวชัน (Fusion reaction)

ปฏิกิริยาฟิวชันเกิดขึ้นเมื่อนิวเคลียสของไฮโดรเจนของไฮโดรเจนมารวมกันที่อุณหภูมิสูง ๆ แล้วเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนที่เสถียร ซึ่งหนักกว่า พร้อมทั้งให้พลังงานและนิวตรอนจำนวนหนึ่งออกมาดังสมการ

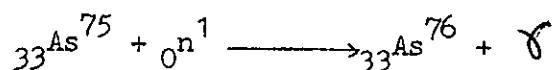


ปฏิกิริยาฟิวชันนี้เป็นหลักในการผลิตระเบิดไฮโดรเจนซึ่งให้พลังงานมหาศาล

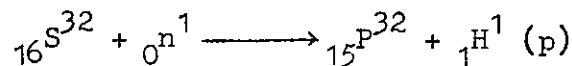
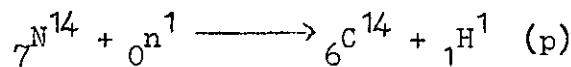
ปฏิกิริยาที่เกิดจากอนุภาคนิวตรอน (Neutron Reaction)

เมื่อนิวเคลียสของธาตุทำปฏิกิริยากับอนุภาคนิวตรอนจะเกิดปฏิกิริยาได้หลายแบบ ดังนี้ คือ

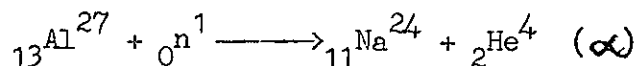
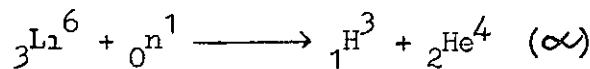
1. ปฏิกิริยานิวตรอน - แสมมา (n, γ) คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ อะตอมของธาตุจะเปลี่ยนไปเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุเดิม พร้อมทั้งปล่อยรังสีแกมมาออกมา โอกาสที่นิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียส จะขึ้นอยู่กับ Cross-section ของนิวเคลียส และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของนิวตรอนด้วย ปฏิกิริยาแบบนี้มีใช้มากที่สุดในการวิเคราะห์หาธาตุโดยวิธี Neutron Activation ดังตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น



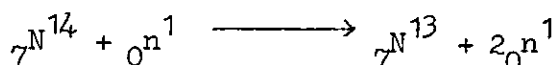
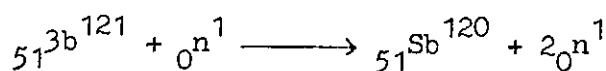
2. ปฏิกิริยานิวตรอน - โปรตอน (n, p) คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ อะตอมของธาตุจะเปลี่ยนไปเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุใหม่ พร้อมกับปล่อยอนุภาคโปรตอนออกมา นิวตรอนที่ใช้ทำปฏิกิริยานี้ต้องเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอที่จะเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ และทำให้โปรตอนหลุดออกมาจากนิวเคลียส ซึ่งนิยมใช้เป็นฟอสฟิวตรอน ปฏิกิริยานี้นิยมใช้ในการผลิตสารกัมมันตรังสีต่าง ๆ เพราะให้ไอโซโทปใหม่ออกมา ซึ่งสามารถแยกให้บริสุทธิ์ได้ง่าย ดังตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น



3. ปฏิกิริยานิวตรอน - อัลฟา (n, α) คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนเป็นไอโซโทปของธาตุใหม่ พร้อมทั้งปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาออกมา ปฏิกิริยานิวตรอน - อัลฟานี้ต้องใช้ฟอสฟิวตรอนเช่นเดียวกับปฏิกิริยานิวตรอน - โปรตอน จึงนิยมใช้ผลิตไอโซโทปใหม่เช่นกัน ดังตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น



4. ปฏิกิริยานิวตรอน - นิวตรอน ($n, 2n$) คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุเดิม พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมา ปฏิกิริยานี้ต้องใช้ฟอสฟิวตรอนเป็นตัวยิง ดังตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น

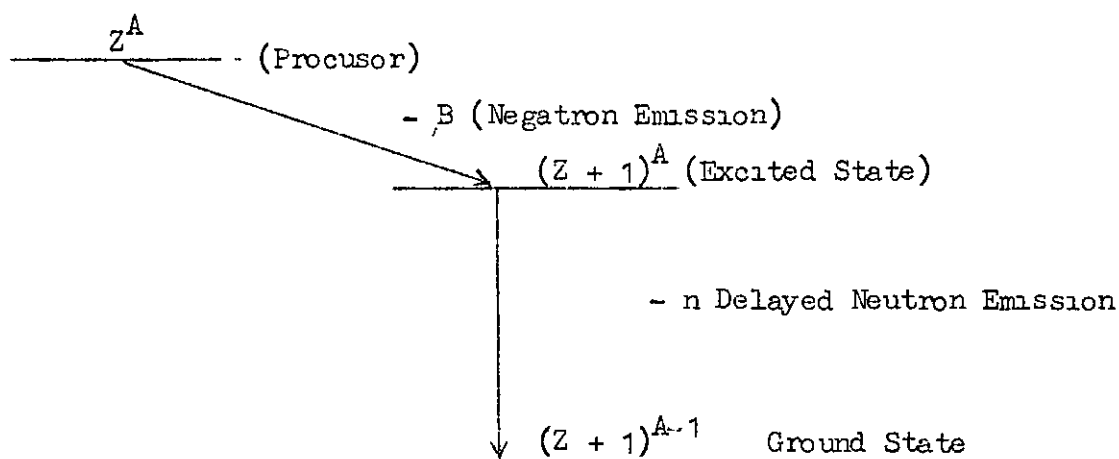


5. ปฏิกิริยานิวตรอน - ฟิชชัน คือปฏิกิริยาที่อนุภาคนิวตรอนถูกยิงเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วทำให้อะตอมแตกออกเป็น 2 ส่วน ดังกล่าวมาแล้ว และในการทดลองหาปริมาณของยูเรเนียมและพลูโตเนียมโดยเทคนิคการนับกัมมันตภาพรังสีก็อาศัยปฏิกิริยานี้ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ เป็นแหล่งให้อนุภาคนิวตรอน

การเกิดกัมมันตภาพรังสี

ธาตุต่าง ๆ อาจแปรเปลี่ยนไปเป็นธาตุอื่นได้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ และในธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic Number) ตั้งแต่ 90 ขึ้นไป เช่น พลูโตเนียม, ยูเรเนียม และธาตุทรานส์ยูเรเนียม (Transuranium) อื่น ๆ จะเกิดปฏิกิริยาชนิดหนึ่งซึ่งเมื่อถึงนิวเคลียสของธาตุเหล่านั้นกัมมันตภาพรังสีแล้ว นิวเคลียสจะแตกตัวให้อะตอมของธาตุ 2 ชนิด ที่มีเลขอะตอมลดลง และมีการปลดปล่อยอนุภาคต่าง ๆ ออกมา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาแตกตัวหรือปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Reaction) และเรียกธาตุที่เกิดขึ้นใหม่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาฟิชชันว่า Fission Products

Fission Products ที่เกิดขึ้นมีครึ่งอายุประมาณ 1 - 60 วินาที จะปลดปล่อยอนุภาคอิเล็กตรอน (Negatron Emission) ออกมา นิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่จะตกอยู่ในสถานะไม่เสถียร (Excited State) เพราะมีนิวตรอนสูงกว่าปกติ นิวเคลียสจะปลดปล่อยนิวตรอนออกมาเพื่อกลับลงสู่สถานะปกติ (Ground State) ซึ่งนิวตรอนที่ปลดปล่อยออกมานี้เรียกว่า กัมมันตภาพรังสี และเรียก Fission Products ว่า Precursor ถึงแผนภูมิการสลายตัว ก็คือ



ปริมาณทีเลี่ยนิวตรอน

การให้ทีเลี่ยนิวตรอนของธาตุที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน จะเป็นไปตามสมการ

$$N_{dn} = N_f \phi \sum \frac{a_i}{\lambda_i} \times (1 - e^{-\lambda_i t_b}) e^{-\lambda_i t_d} (1 - e^{-\lambda_i t_c})$$

(Amiel. 1962 : 1684)

เมื่อ

- N_{dn} = จำนวนอะตอมที่สลายตัวให้ทีเลี่ยนิวตรอน
 N_f = จำนวนอะตอมทั้งหมดของธาตุที่สามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ในสารตัวอย่าง
 ϕ = Fission Cross-section
 ϕ = Effective Neutron Flux
 a_i = Abundance ของทีเลี่ยนิวตรอนที่ผลิตโดยกลุ่ม i
 λ_i = ค่าคงที่การสลายตัวของทีเลี่ยนิวตรอนที่ผลิตโดยกลุ่ม i
 t_b = ระยะเวลาของการอบนุภาคนิวตรอน
 t_b = ระยะเวลาของการวัดทีเลี่ยนิวตรอน
 t_c = ระยะเวลาระหว่างการเตรียมเอาสารตัวอย่างซึ่งอบนิวตรอนแล้ว
 จะนำไปวัดทีเลี่ยนิวตรอน

Subscript i = กลุ่มของ Precursor ที่สลายตัวให้กัมมันตภาพรังสี ซึ่งแบ่งตามครึ่งชีวิต มีค่าตั้งแต่ 1 - 6

ปริมาณของกัมมันตภาพรังสีที่วัดได้จะเป็นไปตามสมการ

$$\sum n_i = F_s \sum_{i=1}^6 \int_0^{\infty} a_i \lambda_i e^{-\lambda_i t} dt$$

(Keepin. 1957 : 1407)

เมื่อ

$$\begin{aligned} \sum n_i &= \text{ปริมาณของกัมมันตภาพรังสีที่วัดได้สุทธิ} \\ F_s &= \text{ปริมาณของปฏิกิริยาฟิชชัน ทั้งหมดที่เกิดขึ้นขณะอบนิวตรอน} \\ \sum &= \text{ประสิทธิภาพของเครื่องวัดกัมมันตภาพรังสี} \end{aligned}$$

จะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^6 a_i = \int_0^{\infty} a_i \lambda_i e^{-\lambda_i t} dt = F_s \sum_{i=1}^6 a_i$$

$$\text{เมื่อ } \sum_{i=1}^6 a_i = \text{ปริมาณสัมบูรณ์ (Absolute Yield) ของกัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นต่อปฏิกิริยาฟิชชัน}$$

$$\text{ดังนั้น } \sum_{i=1}^6 a_i = n/F$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} n &= \text{ปริมาณกัมมันตภาพรังสี} \\ F &= \text{จำนวนปฏิกิริยาฟิชชันที่เกิดขึ้น} \end{aligned}$$

ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของธาตุที่สามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ เพื่อศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเครื่องวัด และคือไอโซโทปที่เกิขึ้นมี ครึ่งชีวิต ต่าง ๆ กัน ออกไปหลายกลุ่ม จึงนิยมใช้การเปรียบเทียบระหว่างสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน เนื่องจาก

$$\frac{\text{ปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{ปริมาณธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ปริมาณไอโซโทปจากสารตัวอย่าง}}{\text{ปริมาณไอโซโทปจากสารมาตรฐาน}}$$

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีดำเนินการ

เครื่องมือ

ในการวิเคราะห์หาปริมาณของยูเรเนียมและซอเรียม โดยเทคนิคการนับกัมมันตภาพรังสีนิวตรอน มีเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบดังนี้

1. เครื่องให้กำเนิดนิวตรอน
2. เครื่องวัดกัมมันตภาพรังสีนิวตรอน

เครื่องให้กำเนิดนิวตรอน

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ บางเขน เรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย - 1 / ปรับปรุงครั้งที่ 1 (Tha Research Reactor 1 / Modification 1) เป็นแบบ ทริกามารค์ III คัดแปลงสำหรับศึกษาในบอวลักษณะสภาวะนำ กำลังสูงสุดในการเดินเครื่องแบบ Steady State 2000 กิโลวัตต์ กำลังสูงสุดแบบพัลซิง (Pulsing) 2×10^6 กิโลวัตต์ ครึ่งละ 10.5 milli-seconds. ขณะทำการทดลองมีกำลัง 1000 กิโลวัตต์ และมี Neutron flux ประมาณ 1×10^{11} neutrons/cm²/sec

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย - 1 / ปรับปรุงครั้งที่ 1 มีส่วนประกอบสำคัญ คือ

1. แหล่งกำเนิดนิวตรอน (Neutron Source) โคแค Am-Be.
2. เชื้อเพลิงปรมาณู (Nuclear Fuel) โคแค ยูเรเนียม - 235 มีมวลวิกฤติ 2696 กรัม
3. แท่งควบคุมปฏิกิริยา (Control Rod) ประกอบด้วยแท่งประกอบที่มีเชื้อเพลิงบรรจุ 4 แท่ง และแท่งปรับระดับกำลัง (Regulating Rod) 1 แท่ง
4. ตัวลดความเร็วนิวตรอน (Moderator) และระบายความร้อน

(Coolant) ใช้น้ำบริสุทธิ์ (Demineralized Water)

หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ ปปว - 1/1 เป็นเครื่องให้กำเนิดนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบลูกโซ่ติดต่อกันไป โดยอาศัยการแตกตัวของเชื้อเพลิง ก๊าซยูเรเนียม - 235 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาฟิชชันกับนิวตรอน ทำให้อะตอมแตกออกจากกัน ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันนี้ จะมีนิวตรอน 2 - 3 ตัว หลุดออกมาด้วย นิวตรอนที่หลุดออกมาจะไปทำปฏิกิริยากับอะตอมอื่น ๆ ของยูเรเนียม - 235 จึงทำให้เกิดการแตกตัวและให้นิวตรอนต่อเนื่องกัน ผลสุดท้ายจะได้นิวตรอนเป็นจำนวนมาก

นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันจะมีพลังงานสูงมาก จนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับยูเรเนียม - 235 อะตอมอื่น ๆ ได้ จึงต้องใช้น้ำเป็นตัวลดความเร็ว เพื่อให้มีพลังงานลดลง น้ำที่ใช้ในเครื่อง ปปว - 1/1 จึงทำหน้าที่ 3 ประการ คือ

1. ลดความเร็วของนิวตรอน
2. ระบายความร้อน
3. ป้องกันอันตรายจากรังสี

จากปฏิกิริยาฟิชชันในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งให้อนุภาคนิวตรอน ดังนั้นจึงสามารถใช้นิวตรอนนี้เป็นตัวทำปฏิกิริยากับยูเรเนียมและขงเวเรียม ในสารตัวอย่าง เพื่อให้เกิดกัมมันตภาพรังสี นิวตรอน ซึ่งสามารถจะจับเป็นตัวซึ่งบ่งถึงปริมาณของธาตุเหล่านั้นได้เป็นอย่างดี

เครื่องวัดกัมมันตภาพรังสีนิวตรอน

ในการวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีนิวตรอนครั้งนี้ ใช้ BF_3 detector เป็นหัววัด ซึ่งเครื่องมือประกอบด้วย

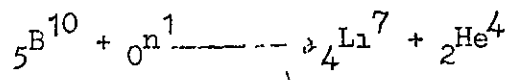
1. หัววัด BF_3 แอร์ 18 45 T จำนวน 5 หัว
2. 264 KEITHLEY High Voltage Supply
3. ORTEC Amplifier Pulse Height Analyzer model 486

4. ORTEC Scaler model 484

5. OAEP Timer model 8112

หลักการทำงานของเครื่องวัด

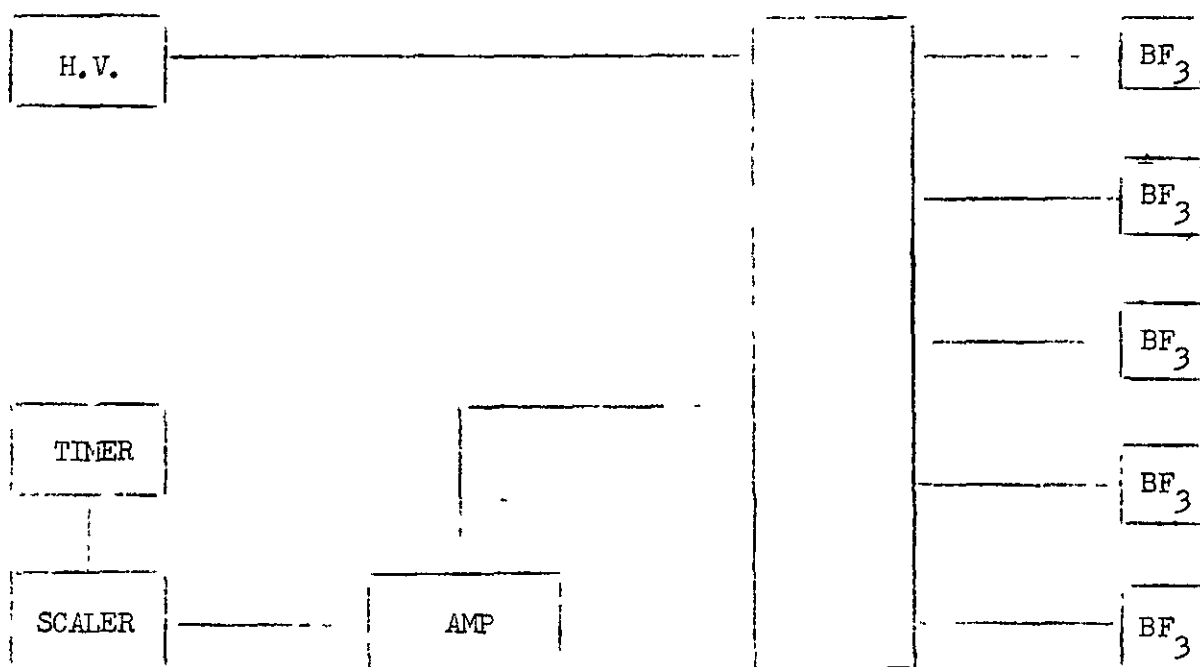
BE detector เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดเฉพาะอนุภาคนิวตรอนเท่านั้น มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกปลายปิดทั้งสองด้าน ภายในบรรจุก๊าซ BF_3 และเชื่อมต่อหัวท้ายด้วยอิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งขณะทำการวัดจะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ



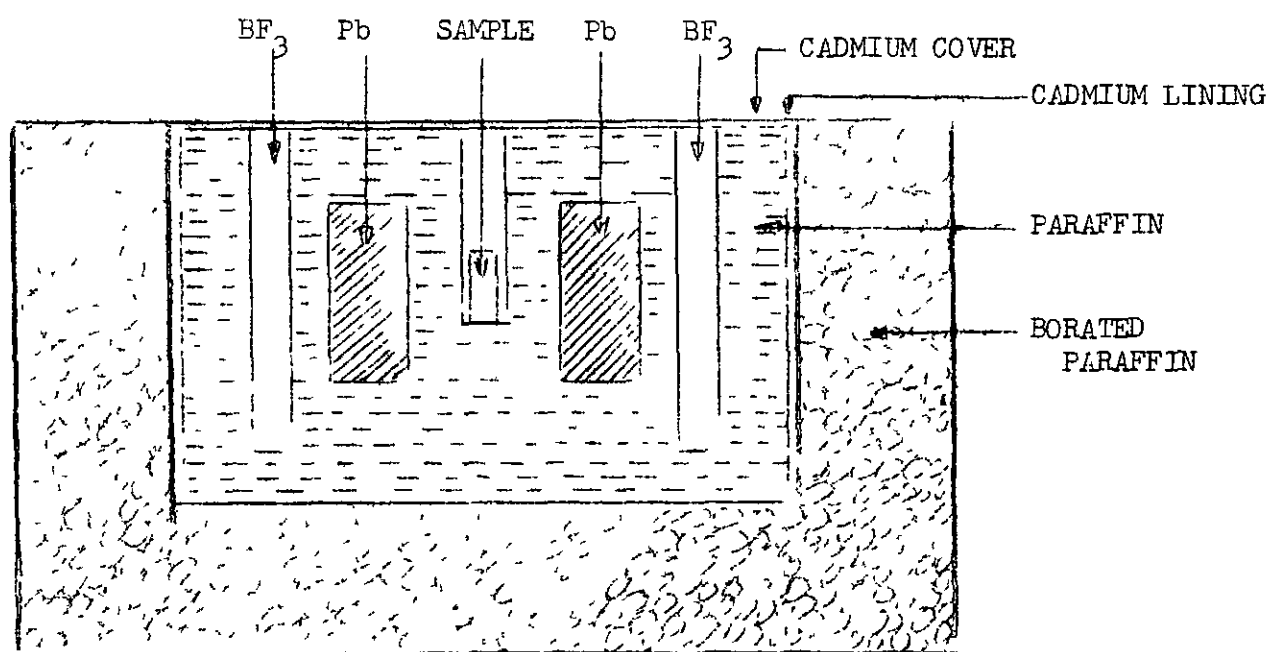
เมื่ออะตอมของโบรอน - 10 ถูกยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน ซึ่งในที่นี้คือ กัมมันตภาพรังสี จะเกิดปฏิกิริยา (n, α) ได้ ${}_2\text{He}^4$ เกิดขึ้น คืออนุภาคอัลฟา (α -particle) ซึ่งมีประจุบวก จะถูกลดความเร็ว (Quench) ท้ายอะตอมของฟลูออรีน (F) เพื่อให้มีความเร็วลดลง และเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ (Anode) ของหัววัด จะทำให้หัววัดครบวงจรไฟฟ้า เกิดสัญญาณไฟฟ้า (Pulse) ส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณ จำนวนสัญญาณที่ได้รับจะแปรตามปริมาณของกัมมันตภาพรังสีที่ไปยังธาตุโบรอนและเกิดปฏิกิริยา

ดังนั้นจำนวนสัญญาณที่นับได้ จึงแทนปริมาณของกัมมันตภาพรังสีที่เกิดปฏิกิริยาได้โดยตรง สภาวะของเครื่องมือวัดกัมมันตภาพรังสีที่ใช้ในการทดลอง

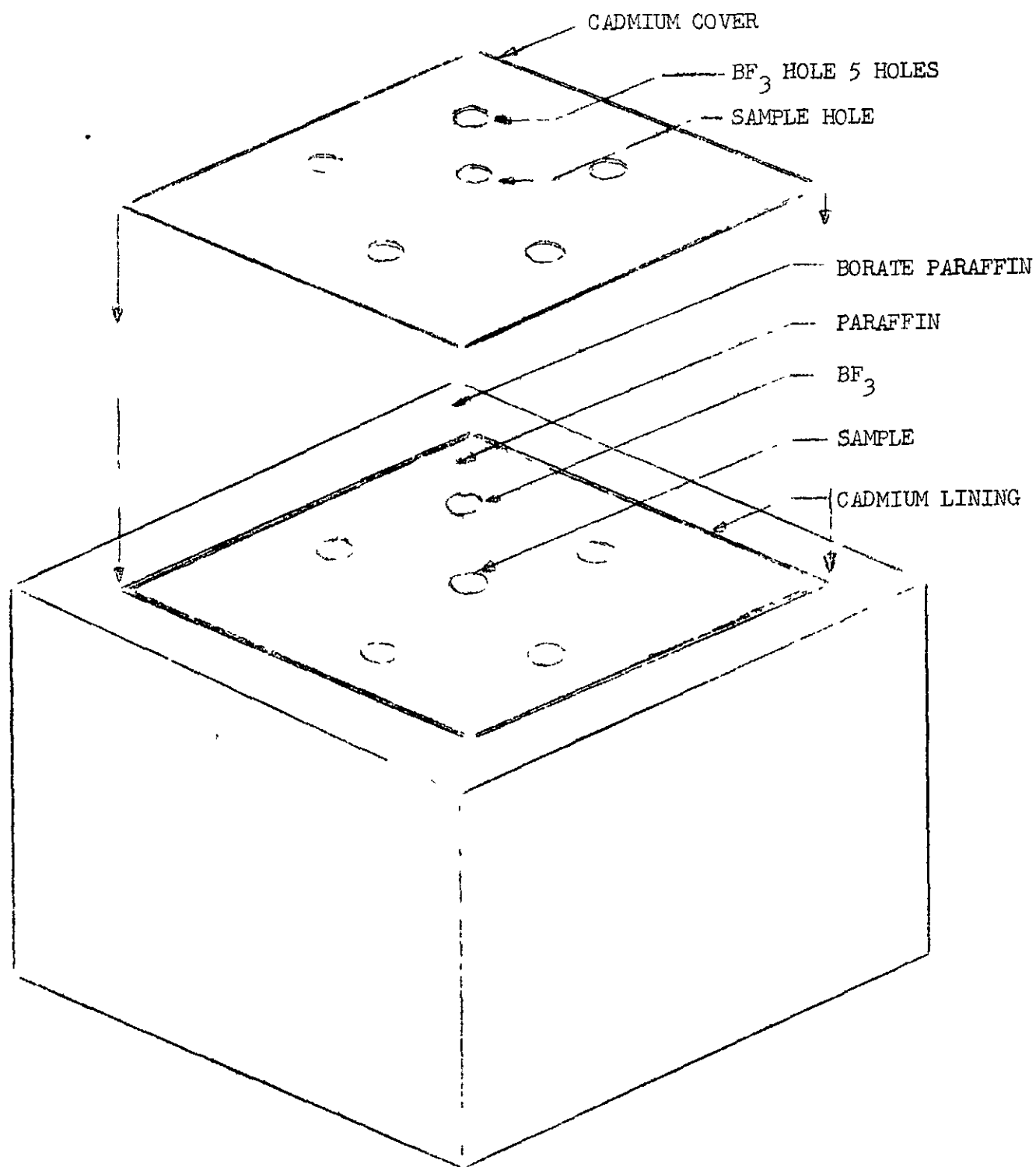
High Voltage Supply	2900 Volt.
Fine Gain	6
Coarse Gain	128
Lower Level	0
Threshold	0.4
Discriminator Mode	Integral
Lower Level Reference	Internal
Window	0



រូបភាព ១ BLOCK DIAGRAM OF DELAYED NEUTRON COUNTER



រូបភាព ២ INSIDE VIEW OF DELAYED NEUTRON COUNTING ASSEMBLY



ภาพประกอบ 3 OUTSIDE VIEW OF DELAYED NEUTRON COUNTING ASSEMBLY

วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองเพื่อหาปริมาณของคอเรียมและยูเรเนียมครั้งนี้ ได้รับสินแร่ตัวอย่างมาจากกรมทรัพยากรธรณี ซึ่งได้ทำการสำรวจเบื้องต้นทางธรณีวิทยาแล้ว ผู้วิจัยจึงได้นำเอาสินแร่ดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ เพื่อหาปริมาณของยูเรเนียมและคอเรียม โดยเทคนิคการนับคีเลอินวทรอน มีวิธีการดังต่อไปนี้ คือ

1. การเตรียมสารตัวอย่าง

นำสินแร่ตัวอย่างมาบดให้ละเอียด บรรจุลงในขวด โพลีเอทิลีน (Polyethylene) เป็นปริมาณ 1 – 2 กรัม ปิดฝาผนึกให้ติดแน่นควมรอน แล้วจึงนำไปดำเนินการขั้นตอนต่อไป

2. การนำสารอาบอนุภาคนิวตรอน

2.1 การนำสารตัวอย่างอาบเฉพาะปาส์นิวตรอน

นำขวดสินแร่ตัวอย่างหุ้มด้วยแผ่นแคดเมียมเพื่อกันเทอร์มัลนิวตรอนไปบรรจุลงในภาชนะเรียกว่า Rabbit นำไปอาบนิวตรอนในระบบหลอดลม (Pneumatic tube) เป็นเวลา 1 นาที โดยใช้เวลาจับเวลาขณะที่กัทโนมิท จากนั้นจึงนำเอาขวดสินแร่ตัวอย่างออกจากภาชนะและแผ่นแคดเมียมที่หุ้ม แล้วนำไปเตรียมวัดคีเลอินวทรอนภายในเวลา 20 วินาที

2.2 การนำสารตัวอย่างอาบเฉพาะเทอร์มัลนิวตรอน

นำขวดบรรจุสารตัวอย่างจากข้อ 2.1 ซึ่งพักทิ้งไว้จนสลายตัวหมดแล้วนำไปอาบอนุภาคนิวตรอนเหมือนตอน 2.1 โดยไม่ต้องหุ้มแผ่นแคดเมียม โดยใช้เงื่อนไขเดียวกัน ในการอาบนิวตรอน และการนำออกจากภาชนะ เพื่อเตรียมการวัดคีเลอินวทรอน

3. การวัดคีเลอินวทรอน

หลังจากนำขวดสินแร่ออกมาจากการอาบนิวตรอนและพักทิ้งไว้ 20 วินาที เพื่อให้คีเลอินวทรอนที่เกิดจากธาตุอื่น ๆ ซึ่งมีครึ่งอายุสั้น ๆ สลายตัวไปหมดแล้ว จึงนับคีเลอินวทรอนที่เกิดขึ้นเป็นเวลา 1 นาที

4. การหาค่าเปรียบเทียบมาตรฐาน

ใช้ยูเรเนียมหนักตั้งแต่ 0.1 – 5 มิลลิกรัม และธอเรียมหนักตั้งแต่ 1 – 250 มิลลิกรัม มีปริมาณต่างกัน 6 ระดับ ไปอบนิวตรอนตามวิธีการขอ 2.1 และขอ 2.2 วัดปริมาณที่เลี้ยวทรวงที่เกิดขึ้น นำค่าที่เลี้ยวทรวงที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างน้ำหนักของธาตุบริสุทธิ์ ต่อจำนวนที่เลี้ยวทรวง ได้เป็น Calibration Curve เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการ เปรียบเทียบกับสารตัวอย่างต่อไป

5. การหาแตกเมี่ยมเรโซ

เลือกเอาสารมาตรฐานจากขอ 4 ซึ่งให้แตกเมี่ยม เรโซ ได้ใกล้เคียงกันหลาย ๆ ครั้ง มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำเอาค่าแตกเมี่ยม เรโซ เฉลี่ยที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณของสารตัวอย่างต่อไป

6. การคำนวณ

โดยใช้สมการสำเร็จของ Gale (Gale. 1967 : 431 - 452)

$$C = KU + kTh \quad (1)$$

$$S = K \frac{U}{R} + k \frac{Th}{r} \quad (2)$$

จาก 1 และ 2 จะได้ว่า

$$U = \frac{(C/r) - S}{K \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right]} \quad (3)$$

$$Th = \frac{S - (C/R)}{k \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right]} \quad (4)$$

เมื่อ

U = ปริมาณของยูเรเนียม

Th = ปริมาณของธอเรียม

C = จำนวนนับของสารตัวอย่างที่อานิวตรอนโดยไม่หุ้มแคดเมียม

S = จำนวนนับของสารตัวอย่างที่อานิวตรอนโดยหุ้มแคดเมียม

K = จำนวนนับเปรียบเทียบมาตรฐานของยูเรเนียม (จำนวนนับต่อมิลลิกรัม)

k = จำนวนนับเปรียบเทียบมาตรฐานของธอเรียม (จำนวนนับต่อมิลลิกรัม)

R = แคดเมียม เรโซ ของยูเรเนียม

r = แคดเมียม เรโซ ของธอเรียม

บทที่ 4

การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการวิจัย

สูตรทางคณิตศาสตร์ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ข้อมูล

$$\text{การบวก} \quad (A \pm a) + (B \pm b) = (A + B) \pm \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\text{การลบ} \quad (A \pm a) - (B \pm b) = (A - B) \pm \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\text{การคูณ} \quad (A \pm a) \times (B \pm b) = (AB) \pm (AB) \sqrt{a^2/A^2 + b^2/B^2}$$

$$\text{การหาร} \quad (A \pm a) \div (B \pm b) = (A/B) \pm (A/B) \sqrt{a^2/A^2 + b^2/B^2}$$

เมื่อ

A, B = จำนวนนับ หรือค่าเฉลี่ย

a, b = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) หรือ
ค่าประมาณรากที่สองของจำนวนนับ

ผลการวิจัย

1. จำนวนนับเปรียบเทียบของสารมาตรฐาน

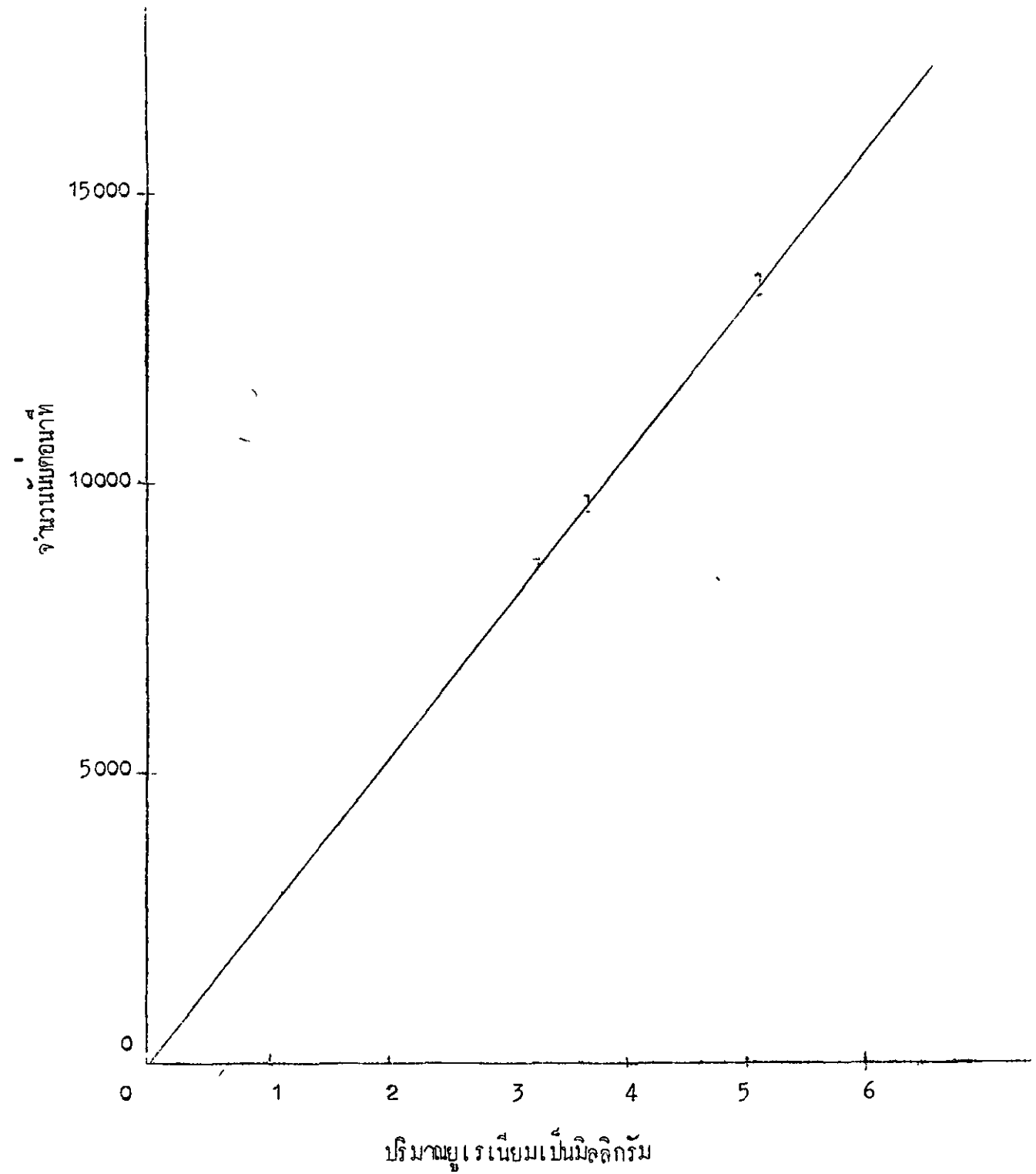
ตาราง 6 จำนวนนับเปรียบเทียบของสารมาตรฐาน
(จำนวนนับต่อ น้ำที่ต้มมีลิกรัม)

ครั้งที่	ยูเรเนียม	ทอเรียม
1	2523.4042 ± 50.2335	21.7500 ± 4.6637
2	2490.5660 ± 49.9056	21.7073 ± 4.6591
3	2500.0000 ± 50.0000	21.8605 ± 4.6755
4	2580.9056 ± 50.8420	21.6279 ± 4.6506
5	2482.1428 ± 49.8210	21.4063 ± 4.6267
เฉลี่ย	2516.2034 ± 50.1618	21.6704 ± 4.6551

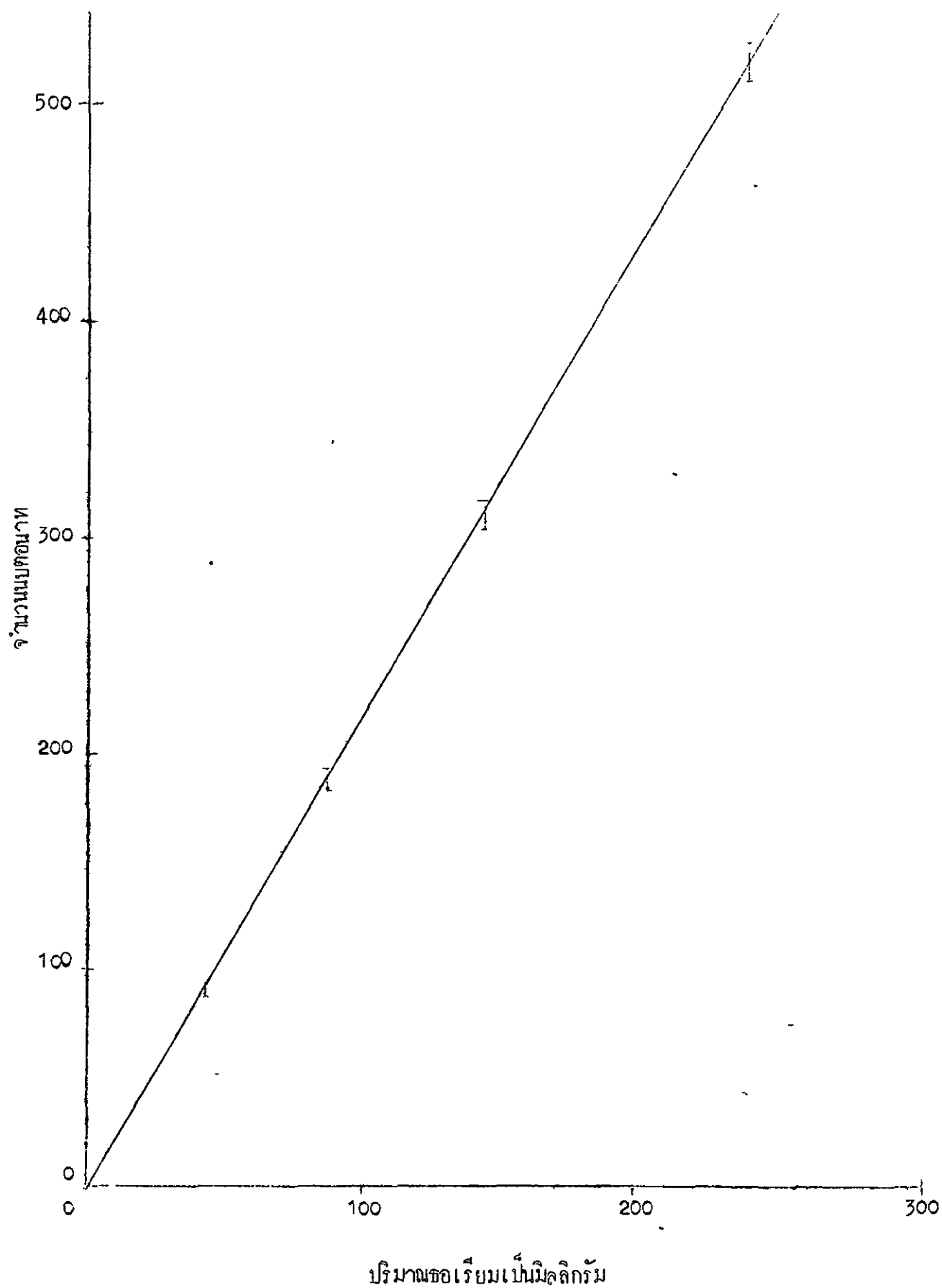
2. แคคเมียมเรโหของสารมาตรฐาน

ตาราง 7 แคคเมียมเรโหของสารมาตรฐาน

ครั้งที่	ยูเรเนียม	หคเมียม
1	30.8704 ± 1.5842	1.0521 ± 0.0505
2	35.6304 ± 1.8832	0.9228 ± 0.0430
3	36.8445 ± 2.0730	1.0222 ± 0.0484
4	38.2096 ± 2.1814	1.0318 ± 0.0499
5	35.7216 ± 1.9625	1.0022 ± 0.0477
เฉลี่ย	35.4554 ± 1.9367	1.0060 ± 0.0479



ภาพประกอบ 4 ยูเรเนียม CALIBRATION CURVE



ภาพประกอบ 5 ขอเรียม CALIBRATION CURVE

3. ปริมาณยูเรเนียมและธอริียมในสารตัวอย่าง

3.1 ปริมาณยูเรเนียมในหินทราย

ตาราง 8 ปริมาณยูเรเนียมในหินทราย (ppm)

ตัวอย่างสาร	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
PWI DDH2 No 5	107.6 ± 10.3	156.2 ± 15.1	164.4 ± 15.8	142.7 ± 13.7
PWI DDH2 No 6	20.7 ± 3.3	26.3 ± 3.8	32.6 ± 4.0	26.5 ± 3.7
PWI DDH3 No 6	31.5 ± 4.2	37.9 ± 4.6	38.8 ± 4.7	36.1 ± 4.5
PWI DDH3 No 7	1444.4 ± 128.2	1480.2 ± 131.4	1462.6 ± 129.8	1462.6 ± 129.8
PWI DDH3 No 8	285.0 ± 26.3	308.3 ± 28.3	300.0 ± 27.5	297.8 ± 27.4
PWI DDH3 No 9	1108 ± 11.0	132.9 ± 13.0	124.7 ± 12.2	122.8 ± 12.1
PWI DDH3 No 10	67.5 ± 7.2	68.7 ± 7.3	68.0 ± 7.2	68.1 ± 7.2
PWI DDH3 No 12	29.9 ± 4.1	37.8 ± 4.7	30.6 ± 4.1	32.8 ± 4.3
PWI DDH4 No 7	67.1 ± 7.3	71.8 ± 7.8	69.5 ± 7.6	69.5 ± 7.6
PWI DDH4 No 8	2569.7 ± 227.3	2648.8 ± 233.9	2607.6 ± 230.5	2608.7 ± 230.6
PWI DDH4 No 9	231.5 ± 21.5	245.3 ± 22.9	237.6 ± 22.1	238.1 ± 22.2

ตาราง 8 (ต่อ)

ตัวอย่างสาร	ค่า ครั้งที่ 1	ค่า ครั้งที่ 2	ค่า ครั้งที่ 3	ค่า ครั้งที่ 4
PWI DDM4 No 10	435.8 ± 39.5	464.7 ± 42.0	454.9 ± 41.2	451.8 ± 40.9
PWI DDM4 No 11.1	69.7 ± 7.5	72.0 ± 7.7	67.6 ± 7.3	69.8 ± 7.5
PWI DDH4 No 11.2	35.9 ± 4.8	45.7 ± 5.4	41.1 ± 4.7	41.9 ± 5.0
PWI DDH10 No 8	60.4 ± 6.6	67.4 ± 7.3	58.7 ± 6.5	62.2 ± 6.8
PWI DDH10 No 9	184.8 ± 17.6	202.5 ± 19.1	189.3 ± 17.9	192.2 ± 18.2
PWI DDH13 No 7	125.5 ± 12.2	128.2 ± 12.4	136.3 ± 13.0	129.7 ± 12.5
PWI DDH13 No 8	229.8 ± 21.4	261.3 ± 24.2	218.6 ± 20.5	236.6 ± 22.0

3.2 ปริมาณของยูเรเนียมและทอเรียมในสินแร่โมนาไซต์

ตาราง 9 ปริมาณยูเรเนียมในสินแร่โมนาไซต์ (%)

ตัวอย่างสินแร่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
M ₁	.1724 ± .0171	.1482 ± .0153	.1791 ± .0177	.1666 ± .0167
M ₂	.1144 ± .0123	.0991 ± .0111	.0967 ± .0109	.1034 ± .0114
M ₃	.1676 ± .0170	.1438 ± .0146	.1287 ± .0136	.1467 ± .0157
M ₄	.0684 ± .0083	.0931 ± .0102	.0802 ± .0092	.0807 ± .0092
M ₅	.1407 ± .0147	.1271 ± .0145	.1368 ± .0144	.1349 ± .0145
M ₆	.2566 ± .0249	.2674 ± .0259	.2544 ± .0247	.2595 ± .0252
M ₇	.1886 ± .0190	.1689 ± .0177	.1479 ± .0155	.1685 ± .0174
M ₈	.1237 ± .0137	.1077 ± .0122	.1052 ± .0119	.1122 ± .0140
M ₉	.1660 ± .0176	.1233 ± .0137	.1263 ± .0164	.1385 ± .0159
M ₁₀	.1218 ± .0125	.0965 ± .0110	.0949 ± .0107	.1044 ± .0114
M ₁₁	.1320 ± .0141	.1076 ± .0120	.1079 ± .0121	.1158 ± .0127
M ₁₂	.1335 ± .0144	.1228 ± .0133	.1121 ± .0134	.1228 ± .0143
M ₁₃	.0910 ± .0103	.1057 ± .0116	.1216 ± .0151	.1061 ± .0123

ตาราง 9 (ต่อ)

ตัวอย่างสินแร่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
M ₁₄	.2516 ± .0248	.2544 ± .0257	.1985 ± .0206	.2348 ± .0237
M ₁₅	.1261 ± .0135	.1169 ± .0129	.1303 ± .0139	.1244 ± .0134
M ₁₆	.0915 ± .0108	.1073 ± .0121	.0823 ± .0100	.0937 ± .0110
M ₁₇	.0861 ± .0103	.0855 ± .0101	.0957 ± .0109	.0891 ± .0104
M ₁₈	.1127 ± .0127	.1304 ± .0135	.1120 ± .0126	.1184 ± .0129
M ₁₉	.1717 ± .0184	.1677 ± .0177	.1585 ± .0172	.1660 ± .0178
M ₂₀	.1473 ± .0154	.1372 ± .0145	.1485 ± .0154	.1443 ± .0151
M ₂₁	.1849 ± .0186	.2210 ± .0218	.2227 ± .0217	.2095 ± .0207
M ₂₂	.1184 ± .0130	.0861 ± .0104	.1259 ± .0137	.1101 ± .0124
M ₂₃	.1296 ± .0137	.1670 ± .0172	.1552 ± .0163	.1506 ± .0157
M ₂₅	.0975 ± .0108	.0917 ± .0106	.0815 ± .0099	.0902 ± .0164
M ₂₆	.0945 ± .0107	.0847 ± .0100	.0996 ± .0110	.0929 ± .0106
Monazite Sale 1.	.0931 ± .0108	.1241 ± .0135	.1189 ± .0131	.1431 ± .0125
Export S.A. Sample	.0592 ± .0081	.1072 ± .0111	.1161 ± .0127	.0922 ± .0106

ตาราง 10 ปริมาณของปริมาณสินแร่โมนาไซต์ (%)

	ค่า ครั้งที่ 1	ค่า ครั้งที่ 2	ค่า ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
M ₁	7.0628 ± .4481	7.7896 ± .4882	7.0742 ± .4491	7.3088 ± .4618
M ₂	6.8285 ± .4294	7.1561 ± .4475	7.1592 ± .4477	7.0479 ± .4415
M ₃	7.0878 ± .4477	5.9308 ± .3801	7.0197 ± .4426	6.6794 ± .4235
M ₄	6.1988 ± .3956	5.7179 ± .3692	5.7789 ± .3739	5.8991 ± .3796
M ₅	7.0515 ± .4475	7.0442 ± .4466	7.2531 ± .4588	7.1163 ± .4510
M ₆	7.8756 ± .4982	7.9895 ± .5060	7.8163 ± .4949	7.8939 ± .4997
M ₇	7.6018 ± .4816	7.8700 ± .4459	7.6734 ± .4843	7.7151 ± .4706
M ₈	7.7657 ± .4831	8.3960 ± .5183	7.9029 ± .4904	8.0215 ± .4973
M ₉	8.6663 ± .5347	8.9272 ± .5487	8.0728 ± .5060	8.5554 ± .5298
M ₁₀	6.7426 ± .4299	7.3120 ± .4612	6.8815 ± .4369	6.9787 ± .4427
M ₁₁	7.7925 ± .4849	7.7297 ± .4806	8.0086 ± .4964	7.8436 ± .4873
M ₁₂	8.0138 ± .5026	7.1713 ± .4580	7.6099 ± .4793	7.5983 ± .4799
M ₁₃	6.5312 ± .4152	6.5028 ± .4141	6.5862 ± .4194	6.5417 ± .4162
M ₁₄	8.9990 ± .5574	10.2165 ± .6259	10.3433 ± .6320	9.8496 ± .6051

ตาราง 10 (ต่อ)

	ค่า เฉลี่ย 1	ค่า เฉลี่ย 2	ค่า เฉลี่ย 3	ค่า เฉลี่ย
M ₁₅	7.6034 ± .4720	8.0827 ± .4988	7.7105 ± .4782	7.7989 ± .4830
M ₁₆	7.9910 ± .4988	7.9801 ± .4991	7.9317 ± .4953	7.9703 ± .4806
M ₁₇	8.0838 ± .5009	7.5655 ± .4716	7.5548 ± .4713	7.7347 ± .4813
M ₁₈	8.2812 ± .5108	6.26179 ± .4006	8.2802 ± .5145	7.6077 ± .4753
M ₁₉	10.7722 ± .6545	9.5465 ± .5887	10.5887 ± .6551	10.3025 ± .6328
M ₂₀	7.5664 ± .4751	7.4304 ± .4673	7.4900 ± .4708	7.4968 ± .4711
M ₂₁	7.8084 ± .4874	7.7462 ± .4850	6.8660 ± .4360	7.4736 ± .4695
M ₂₂	7.7655 ± .4855	8.1514 ± .5064	8.2343 ± .5123	8.0504 ± .5014
M ₂₃	7.1498 ± .4544	8.0502 ± .5064	8.1696 ± .5129	7.7899 ± .5012
M ₂₅	7.2039 ± .4559	7.2536 ± .4585	7.5934 ± .4775	7.3503 ± .4640
M ₂₆	7.0721 ± .4463	7.3220 ± .4602	6.5099 ± .4149	7.3013 ± .4405
Monazite Sample 1	7.8156 ± .4835	7.9698 ± .4925	7.9706 ± .4942	7.9187 ± .4901
Export S.A. Sample	7.6716 ± .4795	6.4533 ± .4118	7.5283 ± .4731	7.2177 ± .4548

4. ความเชื่อมั่นในการวิจัย

ในการทดลองเพื่อหาความเชื่อมั่นของการวิจัยครั้งนี้ ใช้สารมาตรฐานของ National Bureau of Standards หมายเลข 7A เป็นสารเปรียบเทียบ ซึ่งมีปริมาณที่รายงานไว้ดังนี้คือ ซอเรียม 9.2 % และยูเรเนียม .35 % ในขณะทำการทดลองใช้สารหนัก 1.00455 กรัม ได้ผลการทดลองดังนี้ คือ

ตาราง 11 ปริมาณซอเรียมและยูเรเนียมในสารมาตรฐาน (%)

ธาตุ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ซอเรียม	8.8813 ± 0.5486	9.0937 ± 0.5613	8.8699 ± 0.5488	8.9483 ± 0.5529
ยูเรเนียม	0.1300 ± 0.0143	0.1491 ± 0.0160	0.1521 ± 0.0162	0.1437 ± 0.0155

จากตาราง 11 แสดงว่า

1. ซอเรียมที่หาได้จากการทดลอง จะมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณของซอเรียมที่รายงานไว้ในสารมาตรฐาน
2. ยูเรเนียมที่หาได้จากการทดลอง จะมีค่าน้อยกว่าปริมาณของยูเรเนียมที่รายงานไว้ในสารมาตรฐาน

บทที่ 5

บทย่อ สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

บทย่อ

ความมุ่งหมายในการวิจัย

เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ทางปริมาณของยูเรเนียมและธอเรียมในสินแร่ที่มีในประเทศไทย โดยเทคนิคการนับกัมมันตภาพรังสี

สารตัวอย่าง

สารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ เป็นสินแร่ภายในประเทศไทย ซึ่งได้รับจากกรมทรัพยากรธรณี

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ในการทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย - 1 / ปรับปรุงครั้งที่ 1 ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ เป็นแหล่งให้กำเนิดนิวตรอน และ BF_3 detector เป็นเครื่องวัดปริมาณของกัมมันตภาพรังสี

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เตรียมสารตัวอย่างซึ่งเป็นสินแร่ที่บดละเอียดแล้ว บรรจุลงในขวดเป็นปริมาณ 1 - 2 กรัม ปิดฝาและผนึกด้วยความร้อน
2. การนำสารไปฉายรังสี ใช้เวลา 60 นาที
 - 2.1 เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับเฉพาะฟอสฟอรัส จะหุ้มขวดสารตัวอย่างด้วยแผ่นแคดเมียม เพื่อกันเทอร์มัลนิวตรอน

2.2 เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับเทอร์มินัลนิวตรอน และฟาส์นิวตรอน จะไม่หุ้มหาค
สารตัวอย่างด้วยแผ่นแคดเมียม

2.3 หลังจากขบวนการในข้อ 2.1 และข้อ 2.2 แล้ว จะได้นำหุ้มห่
ตัวอย่างบรรจุลงใน Rabbit อีกครั้ง เพื่อป้องกันการชำรุดหรือแตกของหุ้มห่
เนื่องจากแรงดันของลม จึงนำสารไปอบอุณหภูมินิวตรอน

3. การวัดกัมมันตภาพรังสีนิวตรอน จะวัดปริมาณของกัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้น หลังจากการ
อบอุณหภูมินิวตรอน แล้วพักไว้ 20 วินาที โดยใช้เวลาในการวัด 60 วินาที เครื่องมือ
ที่ใช้วัดคือ BF_3 detector

4. การหาค่าเปรียบเทียบมาตรฐาน ใช้สารมาตรฐานที่มีปริมาณของยูเรเนียมและ
ทอเรียมแล้ว 6 ปริมาณ ไปอบนิวตรอน และนำม่วัดกัมมันตภาพรังสีนิวตรอน นำไปเขียนกราฟ
ระหว่างน้ำหนักของธาตุและจำนวนนับที่ได้ ใช้เป็นค่าเปรียบเทียบมาตรฐาน

5. การหาค่าแคดเมียม เรโซ เล็กเอาสารมาตรฐาน 1 ตัว ที่มีค่าแคดเมียม
เรโซ ใกล้เคียงกันมากที่สุดมาทำการวัดอีกหลาย ๆ ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยของแคดเมียม เรโซ
ที่ได้ทั้งหมด

6. การคำนวณหาปริมาณของยูเรเนียมและทอเรียม ใช้สูตรสำเร็จของ Gale
คือ

$$U = \frac{(C/r) - S}{K \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right]}$$

$$Th = \frac{S - (C/R)}{k \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right]}$$

สรุปผลการวิจัย

1. จำนวนนับเปรียบเทียบคอมมิลลิกรัมของธาตุมาตรฐาน
 ยูเรเนียม = 2516.203 ± 50.1618 จำนวนนับคอมมิลลิกรัม
 ทอเรียม = 21.6704 ± 4.6551 จำนวนนับคอมมิลลิกรัม
2. แคคไมยมเรโซของธาตุมาตรฐาน
 ยูเรเนียม = 35.4554 ± 1.9367
 ทอเรียม = 1.0060 ± 0.0479
3. ปริมาณของยูเรเนียมและทอเรียมในหินทราย
 3.1 ปริมาณยูเรเนียมสูงสุด 2608.7 ± 230.6 ppm และต่ำสุดที่สามารถวัดได้ 26.5 ± 3.7 ppm
 3.2 ทอเรียมมีปริมาณต่ำกว่าประสิทธิภาพของเครื่องวัดจะวัดได้
4. ปริมาณยูเรเนียมและทอเรียมในแร่โมนาไซต์
 4.1 ปริมาณยูเรเนียมสูงสุด 0.2595 ± 0.0252 % และต่ำสุด 0.0807 ± 0.0092 %
 4.2 ปริมาณทอเรียมสูงสุด 10.3025 ± 0.6328 % และต่ำสุด 5.8991 ± 0.3796 %
5. จำนวนตัวอย่างและปริมาณที่ใช้ในการทดลอง
 5.1 หินทราย 18 ตัวอย่าง ตัวอย่างละประมาณ 2 กรัม
 5.2 แร่โมนาไซต์ 27 ตัวอย่าง ตัวอย่างละประมาณ 1 กรัม
 แต่ละตัวอย่างทำการทดลอง 3 ครั้ง นำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย
6. ในการวิจัยครั้งนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านการหาปริมาณต่ำสุด เนื่องจากขณะทำการทดลองสารตัวอย่างจะสลายตัวให้รังสีแกมมาออกมาด้วย ดังนั้นการใช้ปริมาณของสารตัวอย่างมาก ๆ จะเป็นอันตรายต่อผู้ทำการทดลองได้

ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการวิจัย

1. ความผิดพลาดที่เกิดจาก Flux distribution ของนิวตรอนไม่คงที่ ทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองผิดพลาด จึงต้องใช้สารมาตรฐานที่รู้ปริมาณแน่นอนมาวัดค่าเฉลี่ยนิวตรอน และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก Calibration Curve ทุกครั้งที่ทำการทดลอง
2. ความผิดพลาดที่เกิดจากการนับอนุภาค (Nuclear Statistical Error) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของอนุภาคเป็นแบบ Random disintegration จะมีค่าเป็นขงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ประมาณรากที่สองของจำนวนที่นับได้
3. ความผิดพลาดที่เกิดจาก Self-shielding ของธอเรียมและยูเรเนียม
 ยูเรเนียม - 235. มี Thermal neutron cross-section 590 barn และ
 ธอเรียม - 232 มี Thermal neutron cross-section 7.5 barn ในการทดลอง
 จึงไม่ควร ให้ปริมาณยูเรเนียมเกิน 10^{-3} กรัม และธอเรียมเกิน 10^{-1} กรัม (Gale, 1967 : 440)
4. ความผิดพลาดเกิดจากการซังจึกเป็น Personal Error จะมีค่าความผิดพลาดโดยประมาณ $\pm 5\%$
5. ความผิดพลาดเกิดจาก Long Life Radioisotope ที่ตกค้างในบริเวณเครื่องวัด ทำให้ background ไม่คงที่ ก่อนการทดลองจึงต้องวัด background หลาย ๆ ครั้ง จนได้ค่าที่คงที่แล้วจึงดำเนินการทดลองต่อไป
6. ความผิดพลาดเกิดจากปฏิกิริยาแทรกซ้อนของธาตุอื่นที่สลายตัวให้นิวตรอนเช่นกัน ซึ่งส่วนใหญ่มีครึ่งชีวิตสั้น ๆ จึงแก้ไขโดยการปล่อยให้สลายตัวไปก่อนที่จะทำการวัด

อภิปรายผลการวิจัย

ในการทดลองเพื่อหาปริมาณของยูเรเนียมและธอเรียม ที่มีอยู่ในสินแร่ในประเทศไทย โดยเทคนิคการนับคีเลียมนิวตรอน ผลการทดลองปรากฏว่า

1. ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาปริมาณของยูเรเนียมและธอเรียม ค่าย-

วิธีนี้มีค่าใกล้เคียงกับวิธีการอื่น ๆ เช่น วิธีนิวตรอนแอคติเวชัน แต่ปริมาณต่ำสุดจะสูงกว่าวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน คือวิธีนิวตรอนแอคติเวชันจะหาปริมาณต่ำสุดได้ในระดับ 1 ppb แต่ด้วยวิธีการนี้จะหาปริมาณได้ต่ำสุดในระดับ 10 ppm และมีข้อจำกัดมากกว่า คือปริมาณสารตัวอย่าง ต้องไม่เกิน 10^{-3} กรัม และขอเริ่มไม่เกิน 10^{-1} กรัม มิฉะนั้นจะเกิด Self-shielding ทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในการทดลองใช้สาร 7 A เป็นสารทดลองให้มีปริมาณยูเรเนียม 3.5×10^{-5} กรัม จะได้ผลการทดลองมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง 41.06 %

2. ผลการทดลองที่ได้จากสารตัวอย่างเดียวกัน ในการทดลองแต่ละครั้งจะมีการกระจายค่อนข้างสูง อันเกิดจากการสลายตัวของกัมมันตรังสีนิวตรอนเป็นแบบ Random disintegration และประสิทธิภาพของหัววัด BF_3 ยังต่ำอยู่ จึงต้องทำการทดลองหลาย ๆ ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย

3. จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณของยูเรเนียมและขอเริ่มในหินทรายของบุญหมาย อินทุภักดิ์ (บุญหมาย อินทุภักดิ์ 2520 : 59) พบยูเรเนียมประมาณเฉลี่ย $0.002 - 0.08$ % และขอเริ่มไม่เกิน 0.07 % และจากผลการทดลองพบปริมาณสูงสุด 2608.7 ± 230.6 และขอเริ่มไม่สามารถวัดหาปริมาณได้ ซึ่งแสดงว่าแหล่งแร่หินนำมาทำการวิเคราะห์ครั้งนี้ มีปริมาณของธาตุทั้งสองอยู่ในเกณฑ์ค่าเฉลี่ยโดยทั่วไปของแหล่งแร่หินทราย

4. จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณของขอเริ่มในสินแร่ตัวอย่างของ มล. อนงค์ นิลอุบล (M.L. Anong Nilubol. 1975 : 10) จะหาขอเริ่มในระดับปริมาณ 6 - 10 % ได้รวดเร็ว และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์ประมาณ 5 % แต่ไม่สามารถวิเคราะห์หาขอเริ่มและยูเรเนียมได้พร้อมกัน ซึ่งจากผลการทดลองหาปริมาณของขอเริ่มในสินแร่โมนาไซต์ จะพบขอเริ่มเป็นปริมาณ 8.83 - 13.96 % และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 6 % ซึ่งผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของ มล. อนงค์ นิลอุบล

3. จำนวนนับเปรียบเทียบมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง จะมีค่าต่ำกว่าการทดลอง
ของ Gale (Gale 1967 : 431 - 452) ทั้งนี้ คือ

ตาราง 12 จำนวนนับเปรียบเทียบมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง กับผลการ
ทดลองของ Gale (จำนวนนับก่อนนำฟิสิกส์ลิกรัม)

ธาตุ	จากการทดลอง	จากผลการทดลองของ Gale
ยูเรเนียม	2516.2034 ± 50.1608	430000 ± 4000
ทอเรียม	21.6704 ± 4.6551	1160 ± 20

ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขณะทำการทดลองประสิทธิภาพของเครื่องวัดและ Neutron
Flux ขณะทำการทดลองต่ำกว่าที่ Gale ใช้ในการทดลอง จึงทำให้ผลที่ได้จากการ
ทดลองต่ำกว่าที่ Gale ได้เคยทดลองไว้

4. แคดเมียมเรโซ ที่ได้จากกาการทดลองและจากรายงานของ Gale มีผล
ดังนี้คือ

ตาราง 13 แคดเมียมเรโซ ที่ได้จากกาการทดลองและจากผลการทดลอง
ของ Gale

ธาตุ	จากการทดลอง	จาก Gale
ยูเรเนียม	35.4554 ± 1.9354	43 ± 2
ทอเรียม	1.0060 ± 0.0479	1.00 ± 0.02

ค่าแควมเข้มเรโซ ของขอเริ่มจากการทดลองครั้งนี้ เท่ากับผลจากรายงานของ Gale เนื่องจากขอเริ่มจะเกิดปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสที่วอดอนเท่านั้น และค่าแควมเข้มเรโซ ของยูเรเนียมจากการทดลองจะต่ำกว่าจากรายงานของ Gale เนื่องจากความหนาของ แผ่นแควมเข้มต่างกัน คือในการทดลองใช้แผ่นแควมเข้มหนาเพียง 1.1 ม.ม. แต่ Gale ใช้แผ่นแควมเข้มหนา 5 ม.ม. และ Neutron Flux ที่ใช้ในการทดลองมีอัตราส่วนของ ฟอสฟอรัสที่วอดอนต่อเทอร์มัลนิวตรอน ต่างจากการทดลองที่ Gale ทำการทดลอง จึงทำให้ แควมเข้มเรโซต่างกัน

ขอควมระวังและขอเสนอแนะ

1. ในการทดลอง ควรใช้ สารตัวอย่างให้มีปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่สามารถจะเป็นได้ เพื่อป้องกันอันตรายจากรังสีแกมมาที่เกิดขึ้น อาจมีอันตรายแก่ผู้ทำการทดลองจนถึงแก่เสียชีวิตได้ และยังป้องกันการเกิด Self-shielding เนื่องจากสารมีปริมาณมากเกินไป อีกด้วย
2. ควรปรับปรุงระบบ การทดลอง โดยใช้ระบบการส่งผ่านขดสารตัวอย่างจาก เตาปฏิกรณ์มาสู่เครื่องวัดโดยตรง แทนการให้ผู้ทำการทดลองเป็นผู้นำขดสารตัวอย่าง จากห้องไปสู่เครื่องวัด เพื่อให้เกิดความสะดวกและปลอดภัยแก่ผู้ทำการทดลอง
3. ในขณะที่ทำการทดลองควรตรวจสอบ Neutron Flux บ่อย ๆ เช่นทุกช่วง 30 นาที หรือดีกว่านั้น เพื่จะได้ทำให้ผลการทดลองถูกต้อง เนื่องจาก Neutron Flux ขณะทำการทดลองกับขณะหาค่าเปรียบเทียบมาตรฐานมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน
4. ควรมีการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องวัดให้สูงขึ้น โดยเพิ่มจำนวนหัววัด BF_3 หรือเพิ่มขนาดความยาวของหัววัด BF_3 ยาวขึ้นเพื่อให้ได้ปริมาณของสัญญาณเพิ่มขึ้น ซึ่งจะ มีผลให้การวิเคราะห์หาปริมาณของยูเรเนียมและขอเริ่มมีความแม่นยำสูงขึ้น

បរិយាកាស

บรรณานุกรม

- คณัย วิโรจไกรเรือง การตรวจหาธาตุที่มีปริมาณน้อยในแร่ดิบจากแหล่งต่าง ๆ โดยวิธีวิเคราะห์นิวตรอนแอคติเวชัน ปรินญาณิพนธ์ กศ.ม. วิทยาลัยวิชาการศึกษา ประสานมิตร 2517, 44 หน้า อักส่าเนา
- บุญหมาย อินทุฤทธิ แร่ยูเรเนียม เอกสารเสริมหลักสูตรนิเวศวิทยา กองเสริมหลักสูตรนิเวศวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม 2520, 76 หน้า
- ประวิตร ชูศิลป์ การวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนและวิตามินซีในกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่มีความดิบสุกต่าง ๆ ภายหลังอบรังสีแกมมา ปรินญาณิพนธ์ กศ.ม. วิทยาลัยวิชาการศึกษา ประสานมิตร 2515, 70 หน้า อักส่าเนา
- เขาวเรศ เจริญจิตต์ การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนไขมันความชื้นและที่เถ้า รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงกลิ่นหืนในปลาหุเค็มที่ฉายรังสี ปรินญาณิพนธ์ กศ.ม. วิทยาลัยวิชาการศึกษา ประสานมิตร 2517, 98 หน้า อักส่าเนา
- วิฑิต เกษกูปต์ "ระเบิดนิวตรอน" วิทยาศาสตร์ 1 : 27-32 มกราคม 2521
- รายงานการประชุมคณะกรรมการพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ครั้งที่ 1/2521 ณ ห้องประชุม คึกบัณูชาการชั้น 4 สำนักนายกรัฐมนตรี 16 มีนาคม 2521
- สุชน เสงี่ยมยานนท์ การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นพิษในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน ปรินญาณิพนธ์ กศ.ม. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร 2518, 105 หน้า อักส่าเนา
- Amiel, Saadia and others. Analytical Aspects of Delayed Neutron Emission. Israel Atomic Energy Commission, Soreq Research Establishment, October, 1962. Microfilms. No. IA-784.

Amiel, Saadia. Analytical Applications of Delayed Neutron Emission.
in Fissionable Elements Analytical Chemistry, 13 : 1683 - 1692,
December 1962.

Amiel, Saadia and others "New Methods of Radioactivation Analysis
Based on Delayed Neutron Emission and Secondary Reactions"
presented at the Symposium on Programming and Utilization of
Research Reactors. Vienna, 1961.

Amiel, Saadia. Physics and Chemistry of Fission Proceeding of a
Symposium. Viena 1969. Microfilms No. STI/PUB/234.

Along Nilubol, M.L. An Analysis of Uranium and Thorium. Office of
Atomic Energy for Peace, Bangkok Thailand, Unpublished Report,
1972. 4 p.

Along Nilubol, M.L. Determination of Thorium in Ores by Delayed
Neutron Counting : A Preliminary Investigation at TRR-1 Office
of Atomic Energy for Peace Bangkok Thailand, February 1975. 15 p.

Fermi, Enrico and others, Physical Review 55 : 799, 1939.

Gale, N.H. Development of Delayed Neutron Technique as Rapid and
Precise Method for Determination of Uranium and Thorium at Trace
Level in Rock and Mineral with Application to Isotope Geochronology,
Radioactive Dating and Methods of Low-Level Counting. Proceedings of
a Symposium IAEA. Vienna, 431 - 452, 1967. Microfilms No STI/PUB/
152.

- Chase, Grafton D. and Joseph. L. Robinowitz., Principle of Radioisotope Methodology. 5 th ed. Minneapolis 15. Minnessota, Burgess Publishing Company, 1965. 663 p.
- Herrman, G. "Absolute Counting of Radionuclides" The International Journal of Applied Radiation and Isotopes. 16 : 301 - 318, August 1965.
- Herrman, G. Recent Work on Delayed Fission. Neutrons at the University Delayed Fission Neutrons Proceedings of a Panel. IAEA. Vienna, 147 - 166, 1968.
- Hyde, Earl K. Radiochemistry of Thorium. National Academic Science, National Research Council, Nuclear Science. 1960, Microfilm No. 3004.
- Hyde, Earl K. The Nuclear Properties of Heavy Element III. Fission Phenomena. Engle Wood, New Jersey. Practice Hall Inc. 1964. 355 p.
- Keepin, G.R. and others. "Delayed Neutrons from Fissionable Isotopes of Uranium, Plutonium and Thorium." Physical. Review 4 : 1044 - 1049, August 1957.
- Roberts, R. and others. Physical Review. 55 : 510, 1939.
- Zel'dowich, Ya. B., Yu. B. Khariton., Uspekhi fis nauk. 4 : 354, 1940.