

THE LIBRARY
COLLEGE OF EDUCATION
BANGKOK. THAILAND

การตรวจหาธาตุที่มีปริมาณน้อยในแร่ดิบจากแหล่งต่าง ๆ โดยวิธีวิเคราะห์
นิวตรอนแอคติเวชัน

ปริญญานิพนธ์

ของ

กนิย วิโรจน์อุไรเรือง

เสนอต่อวิทยาลัยวิชาการศึกษา
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
24 พฤษภาคม 2517

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำตัวนิติได้พิจารณาปัญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิตของ
วิทยาลัยวิชาการศึกษาได้

ศรี งามวิไล ประธาน
สม งามวิไล กรรมการ

พฤษภาคม 2517

ประกาศคุณูปการ

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้รับความกรุณาในการให้คำแนะนำอย่างดียิ่งจาก อาจารย์สุรีย์ แสงโสภา ประธานกรรมการที่ปรึกษา และอาจารย์วัลลภ บุญคง กรรมการที่ปรึกษา ทั้งยังได้รับความกรุณาเชื้อเพื่อจากท่านเลขาธิการสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ให้ใช้เครื่องมือของสำนักงานฯ ทำการวิจัยได้ นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้รับความกรุณาจาก กร.โพยม อรรถกานนท์ แห่งกรมทรัพยากรธรณี ที่ช่วยกรุณาจัดหาตัวอย่างแร่ดีบุกให้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านที่กล่าวมานี้อย่างสูง

อนึ่ง ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย ผู้วิจัยยังได้รับความช่วยเหลือแนะนำในหลาย ๆ ด้านอย่างดียิ่งจากคุณสมพร จงคำ และคุณสุรพงษ์ พิมพ์จันทร์ จึงนับเป็นส่วนช่วยให้ปริญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

กนกย์ วิโรจน์อุไรเรือง

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความมุ่งหมายในการศึกษาค้นคว้า	3
ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า	4
ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า	4
คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ	4
เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย	6
2 ทฤษฎี	9
ทฤษฎีการวิเคราะห์แบบแยกทีละขั้น	12
3 เครื่องมือและวิธีการดำเนินการ	22
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	22
วิธีการดำเนินการทดลอง	23
สถิติที่ใช้	30
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	32
5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	38
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	

ก่อนการค้นพบธาตุกัมมันตรังสีประดิษฐ์ (Artificial radioactivity) ของ Frederic " Irene Curie-Joliot ในปี 1933 การศึกษาวิเคราะห์ธาตุใช้วิธีการต่าง ๆ กัน เช่น Gravimetric, Spectrographic และ Mass Spectroscopy เป็นต้น วิธีการเหล่านี้พบว่าจะไม่ไคล ธาตุที่นำมาวิเคราะห์เพิ่มปริมาณน้อยกว่า 10^{-15} อะตอม (Lenihan and Thomson, 1965 : 6)

ต่อมาในปี 1936 George Hevesy และ H. Levi โคยิง (Bombard) ธาตุ Yttrium ที่ไม่บริสุทธิ์ด้วยนิวตรอนเพื่อหาปริมาณธาตุ Dysprosium ที่ปะปนอยู่โดยใช้ Radium-Beryllium neutron source (Lambie, 1963 : 17) การทดลองนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการวิเคราะห์แบบใหม่ คือการวิเคราะห์โดยวิธีทางนิวเคลียร์ที่เรียกว่า Activation Analysis ซึ่งจากนั้นก็ได้พัฒนาขึ้นมาเรื่อยพร้อมกับองค์ประกอบรากฐานที่สำคัญอีก 2 อย่าง คือ ต้นกำเนิดรังสี (Radiation Source) และเครื่องนับรังสี (Counting Equipment)

หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor) มีใช้กันแพร่หลายขึ้น ค่าใช้จ่ายก็ถูกลงด้วย นอกจากนั้นยังได้มีการประดิษฐ์เครื่องกำเนิดนิวตรอนขนาดเล็กราคาถูกลงกว่าปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor) มาก คือ Neutron howitzers ทางด้านเครื่องนับรังสีก็มีการปรับปรุงขึ้นอย่างรวดเร็ว องค์ประกอบทั้งสองอย่างนี้ทำให้การวิเคราะห์นิวตรอนแอคทีเวชัน (Neutron Activation Analysis = NAA) เจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ได้มีการนำไปใช้เป็นประโยชน์ในกันต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น

- ด้านอวกาศ - ศึกษาถึงส่วนประกอบพื้นผิวดวงจันทร์หรือดาวเคราะห์อื่น ๆ
- ด้านโลหวิทยา - วิเคราะห์หาสารที่ปนอยู่ในโลหะ
- ด้านธรณีวิทยา - วิเคราะห์แร่ต่าง ๆ

- ด้านอาชีววิทยา - ตรวจหาเขม่าดินปืนที่ยังตกค้างอยู่

สำหรับประเทศไทยได้ทำการติดตั้ง เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อการวิจัยเครื่องแรกขึ้นที่
สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (พปส) ถนนศรีรัชมยุช อำเภอบางเขน กรุงเทพมหานคร
เสร็จเรียบร้อย เมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2505 (สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ,
2506 : 5)

✓ การวิเคราะห์นิวตรอนแอคติเวชัน (Neutron Activation Analysis) เป็นวิธี
การที่ใช้กันมาก และนิยมใช้เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) เป็นตัวยิง (Bombarding
particle) เพราะ (Bowen and Gibbon, 1963)

1. ปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor) ผลิตเทอร์มัลนิวตรอน (Thermal
neutron) ได้มากและราคาไม่แพง

2. เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) มีความน่าจะเป็นไปได้
(Probability) ที่จะทำปฏิกิริยากับแก่นอะตอม (Nuclei) ของธาตุสูง (High
cross-section) เพราะเหตุที่ไม่มีประจุ และมีพลังงานต่ำมาก โอกาสที่จะชนเป้าจึงมีมาก

วิธีวิเคราะห์แบบนี้ใช้ตรวจหาธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ เพียง 10^3 อะตอมได้ (Lenihan
and Thomson, 1965 : 7) ดังนั้นผู้วิจัยได้นำเอาวิธีการนี้มาใช้ในการหาธาตุที่มีปริมาณน้อย
(Trace elements) ในแร่หินจากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศไทย

๔. สังกะสีเป็นธาตุโลหะตัวนำ สัญลักษณ์ Sn, อะตอมมิกนัมเบอร์ (Atomic number)
= 50, และน้ำหนักอะตอม (Atomic weight) = 118.70 มีไอโซโทป (Isotopes)
ที่เกิดในธรรมชาติถึง 10 ชนิด นับว่ามากกว่าธาตุชนิดอื่นใด ไอโซโทป (Isotope) ที่มี
แมสสัณเบอร์ (Mass number) 124 เป็นธาตุกัมมันตรังสี ให้งรังสีเบตา (Beta decay)
และมีครึ่งชีวิต (Half Life) ประมาณ 6×10^{15} ปี

แม้ว่าสังกะสีจะไม่ใช่ว่าธาตุหายากจริง ๆ (rare element) แต่ก็ไม่ไ้มีอุดม (abundant)
เหมือนธาตุอื่น ๆ ที่ไม่ค่อยรู้จักกันมากเท่า เช่น ลิเทียม (Lithium), วานาเดียม (Vanadium)
และทิตาเนียม (Titanium) สังกะสีมีในเปลือกโลกราว 40 กรัมต่อ 1 ตัน ขณะที่พบในดาวตก
(Meteorites) อุดมถึง 100 กรัมต่อตัน ประมาณ 15 และ 5 กรัม ต่อตันในช่วง (phase)

เหล็ก - นิกเกิล และ ไพรโอไลต์ - ซิลิเกต (Triolite Silicate) ตามลำดับ คัมบุก จึงเกิดอยู่ลึกในชั้นเหล็ก - นิกเกิลมากกว่าจะเกิดที่พื้นผิว เมื่อโลกแข็งตัวสารประกอบคัมบุกจึงเป็น กลุ่มสุดท้ายที่แข็งตัว ที่อุณหภูมิต่ำ มักจะเป็นพวกคัมบุกซิลไฟด์ ที่อุณหภูมิสูง ๆ เป็นพวกคัมบุกออกไซด์ สายแร่คัมบุกมักจะเกิดต่อเนื่องกับหินแกรนิต (Granite) หรือไม่ก็เกิดใกล้ ๆ กัน

(Britannica Encyclopedia, Vol. 22, 1970)

แร่คัมบุกของไทยเป็นประเภทออกไซด์ (SnO_2) หรือที่เรียกกันว่า Cassiterite มีสีคล้ายน้ำผึ้ง อาจจะจางอ่อนหรือเข้มไปทางน้ำตาล บางทีก็ออกทางม่วง ๆ จึงจะมีเปอร์เซนต์ ของคัมบุกสูง บางครั้งสีของแร่คัมบุกเข้มมาก ๆ เข้าจนดูคล้ายตาปลาเป็นสีดำก็มี แต่ถ้าพบให้เป็น เศษบาง ๆ แล้วจะมีสีน้ำตาลอ่อน ๆ และไม่ทึบแสง นอกจากนี้ยังพบมีสีเหลือง สีส้ม สีแดง ฯลฯ สำหรับแร่คัมบุกที่เกิดในช่วงสมัยระหว่างหินแกรนิต (Granite) กับหินปูนแล้ว ส่วนมากมัก จะมีเหล็กและแร่อื่นปนอยู่ด้วยเสมอ (อุตสาหกรรม, กระบวรกร กรมโลหกิจ, 2513 : 17 - 21) การพบแร่อื่น ๆ ปะปนด้วยนี้ ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพหลาย ๆ อย่างของแร่คัมบุก (P.G.J. Gueterbock and G.N. Nicklin, July 17, 1925 : 370 - 374) เช่น จุดหลอมเหลว (Melting point), ความแข็ง ฯลฯ เปลี่ยนไป แร่คัมบุกของไทยมีสีต่างกันมากมาย และสีก็เป็นคุณสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่ง ความต่างของสีแร่จึงอาจเกิดจากสาเหตุที่ซับซ้อนอื่น ๆ ปะปนอยู่ก็ได้ นอกจากเหตุผลทางเคมีวิทยาอื่น ๆ แล้ว จึงน่าจะได้มีการลองหาธาตุที่ปะปน ในแร่คัมบุกของไทยดู เพราะนอกจากจะทราบถึงชนิดและปริมาณของธาตุที่ปะปนเหล่านั้นแล้ว เรายัง อาจทราบได้อีกว่า แร่ชนิดใดมีคัมบุกมากน้อยเพียงใด อันอาจเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์หาแหล่ง แร่คัมบุก ซึ่งเป็นแร่ที่สำคัญยิ่งของประเทศไทย

ความมุ่งหมายในการศึกษาค้นคว้า

จุดมุ่งหมายในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ก็เพื่อตรวจหาชนิดและปริมาณของธาตุที่มีปริมาณน้อย (Trace elements) ในแร่คัมบุกสีต่างกันที่ได้จากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศไทย

ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า

1. จะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุที่มีปริมาณน้อย (Trace elements) ในแร่ที่มีลักษณะต่าง ๆ
2. เทคนิควิธีการและประสบการณ์ที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าและทดลอง สามารถจะนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาค้นคว้าต่อไปได้ และนอกจากนั้นยังอาจนำไปใช้ได้ในการเรียนการสอนวิชา Modern Physics และ Nuclear Physics ทั้งในระดับ ป.กศ.ชั้นสูง และปริญญาได้

ขอบเขตการศึกษาค้นคว้า

1. ศึกษาแร่คัสสิเทอไรต์ (Cassiterite) สี่ต่างกันจากแหล่งต่าง ๆ กันในประเทศไทย อย่างน้อย 13 ตัวอย่าง แร่เหล่านี้ได้จากกรมทรัพยากรธรณี
2. วิเคราะห์ทั้งปริมาณ (Quantitative) และคุณภาพ (Qualitative) โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบ Non-destructive neutron activation analysis เครื่องมือที่ใช้คือ Ge (Li) detector, Multichannel Pulse Height analyzer

คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ

Multichannel Pulse Height Analyzer หมายถึง เครื่องมือวัดพลังงานและปริมาณของไอโซโทป กัมมันตรังสี (Radioactive Isotopes) โดยการวิเคราะห์สัญญาณ (Pulse) ไฟฟ้าจากเครื่องตรวจจับรังสี

Non-destructive neutron activation analysis ในนิยามปฏิบัติการ หมายถึง เฉพาะ Thermal neutron activation analysis คือการนำสารตัวอย่างมาอบรังสีนิวตรอน เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ (Transmutation) เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุเดิม เมื่อวัดกัมมันตภาพรังสีที่ส่งออกมาแล้ว จึงทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างนั้นได้ อนึ่งวิธีการวิเคราะห์แบบนี้สารตัวอย่างจะไม่ถูกทำลายให้หมดไป

✓ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction) (McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology Vol. 9 : 198) คือปฏิกิริยา (Interaction) ระหว่าง Atomic nuclei และอนุภาค เมื่ออนุภาคเข้าใกล้นิวเคลียสในระยะ 10^{-12} cm. ในสภาวะการทดลองปกติ นิวเคลียสที่เป็นเป้า (Target nucleus) จะอยู่นิ่ง และปฏิกิริยาเริ่มด้วยการยิงเป้า (Target nucleus) นั้นด้วยอนุภาคนิวเคลียสชนิดหนึ่ง

Nuclear cross sections

ค่า Cross section ของปฏิกิริยานิวเคลียร์ใด ก็คือความน่าจะเป็นไปได้ (Probability) ที่จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์นั้น เมื่อยิงอนุภาคนิวเคลียสที่เป็นเป้า (Target nucleus) ที่มี N อะตอมในหนึ่งหน่วยพื้นที่ (มีการกระจายกระจายอย่างสม่ำเสมอ) และเมื่ออนุภาค ϕ ตัว หนึ่งพื้นที่นั้น 1 วินาทีแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ P ครั้งใน 1 วินาที จะได้

$$\sigma = P/\phi N$$

เมื่อ σ = ค่า Cross sections มีหน่วยเป็นพื้นที่ตามปกติวัดเป็นบาร์น

$$\text{กำหนด } 1 \text{ บาร์น} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

✓ การวิเคราะห์แบบคุณภาพ (Qualitative) และแบบปริมาณ (Quantitative) ในพื้นที่เป็นการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุที่มีปริมาณน้อย (Trace elements) ในแร่เกิดจากการตรวจหาโดยเครื่องมือทางนิวเคลียร์ และวิเคราะห์ด้วยวิธีทางนิวเคลียร์

Transmutation (McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, Vol. 14 : 61)

คือการเปลี่ยนจากธาตุอย่างหนึ่งไปเป็นธาตุอีกอย่างหนึ่ง จะโดยธรรมชาติหรือโดยการกระทำของมนุษย์ก็ได้ ทั้งนี้โดยการยิง (Bombard) ธาตุด้วยกระแสอิเล็กตรอน (Electrons), นิวตรอน (Deuterons) หรือ อนุภาคอัลฟา (Alpha particles) หรือนิวตรอน (Neutrons) จากปฏิกิริยาปรมาณู (Nuclear Reactor) ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ใช้นิวตรอนเป็นกระสุน

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

Marie Farnsworth และ Joseph Pekola (Symposium on Tin, June 23 1952 : 58 - 83) ได้รายงานไว้จากการวิจัยเรื่อง "The Determination of Small Amounts of Impurities in Tin" โดยวิธีการแบบ Destructive Method ตรวจหาธาตุที่มีปริมาณน้อย (Trace elements) ในตะกั่ว ธาตุที่ตรวจพบคือ Al, Bi, Cd, Co, Fe, Pb, Ni, Ag, และ Zn

Rudelli Rocca และ Baro (Modern Trends in Activation Analysis Vol. I :) พบว่าเราอาจจะวิเคราะห์หา ^{76}As และ ^{122}Sb จากแร่ตะกั่ว โดยวิธี Nondestructive NLA ได้โดยใช้ Ge (Li) Spectrometer เครื่องมือที่เขาใช้วัด มี Resolution 5.2 kev. ที่ 658 kev. ประกอบกับตัววัด Ge (Li) ขนาด 5 c.c. และ Multichannel analyzer ของ Nuclear data model 130 A การคำนวณหาปริมาณของ ^{122}Sb และ ^{76}As คำนวณจาก Photopeak ที่ 686 kev และ 657 kev ตามลำดับ เวลาที่ใช้ 100 นาที กลุ่มตัวอย่างเป็นตะกั่วที่ใช้บัตกรี ซึ่งมีปริมาณตะกั่วต่าง ๆ กัน ผ่านการอบรังสีฟลักซ์ $\text{Neutron flux } 10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เวลาที่ปล่อยให้สลายตัว (Decayed Time) 24 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าในกลุ่มตัวอย่างอื่นที่มีปริมาณพลวง (Antimony) สูงมาก จนตรวจปริมาณ Arsenic ไม่ได้ ซึ่งก็เป็นเครื่องชี้ให้เห็นว่าควรจะใช้เครื่องวัดที่มีประสิทธิภาพดียิ่งกว่านี้ จึงจะช่วยให้การวิเคราะห์ให้เกิดความแม่นยำและเที่ยงตรงยิ่งขึ้นได้ ในรายงานยังกล่าวด้วยว่า ธาตุอื่น ๆ ที่น่าจะมี เช่น Cu, Fe, Zn, Ag และ Na อาจเป็นผลกระทบกระเทือนต่อการตรวจหา Arsenic และพลวง (Sb) นี้ได้โดย

Lanfranco, G. (Met. Ital, 63 : No.5, 225 - 32, May, 1971)

ได้วิเคราะห์แร่ตะกั่วที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน (Neutron activation) และการแยกทางรังสีเคมี (Chemical separations) เพื่อการวิเคราะห์จะได้ง่ายขึ้น เขาแบ่งธาตุที่ปะปน (Impurities) ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ (1) Au, Ag, Ge, Co, Ni, Cu, Zn; (2) Fe, Ga, Tl, As, Hg; (3) Cd, In, Sb. ธาตุในกลุ่มที่ 1 และ 2 นำมาอบรังสี flux เท่ากับ 3×10^{13} thermal neutrons/cm²/sec, ธาตุในกลุ่มที่ 3

นำมาอาบรังสี flux 5×10^{12} thermal neutrons/cm²/sec. อัตราส่วนของ Thermal neutron กับ fast neutron ความคุมไว้ให้ = 1000 เพื่อลดผลของปฏิกิริยาที่รบกวน การวัดรังสีแกมมา (Gamma radioactivity) ใช้ Multichannel pulse-height analyzer สำหรับรังสีเบตา (Beta rays) วัดด้วยเครื่องนับไกเกอร์ มีลเลอร์ (Geiger - Muller - counter) ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative data) หาจากการเปรียบเทียบ แอคติวิตี (activity) ที่วัดได้กับค่าที่ทราบอยู่แล้วของธาตุที่จะนำมาพิจารณา ซึ่งมีอยู่ในกลุ่ม ผสมที่ถือเป็นมาตรฐานและอาบรังสีพร้อมกับตัวอย่างนั้น

Maenhaut, W., Adams, F., Hooto, J. (Anal. Chim. Acta 59, no.2, 209 - 15, Apr. 1972) ได้ใช้วิธีวิเคราะห์นิวตรอนแอคติเวชัน (Neutron activation analysis) วิเคราะห์หัตถุที่มีค่าความบริสุทธิ์สูง เช้าพบธาตุปริมาณน้อย (Trace elements) 18 ตัว

Filby, Royston H., Haller, William A. (Modern Trends in Activation Analysis, Vol. 1 : 339 - 46) ได้วิเคราะห์หินแร่และอุกกาบาต โดยใช้ Ge (Li) detectors วิธีวิเคราะห์นิวตรอนแอคติเวชันที่ใช้มี 3 ตอนต่าง ๆ กัน สำหรับกลุ่มธาตุที่ต่างกัน เขาอาบรังสีทั้งของตัวอย่างและสารมาตรฐาน โดยใช้เวลาน้อย ๆ แล้ววัด จะพบ Al, Mn, Na, V, Ti, Ca และในบางตัวอย่างจะพบ Mg เมื่ออาบรังสีนาน ๆ และปล่อยให้สลายตัว 1 เดือน ตรวจพบธาตุ Sb, Co, Zn, Sc, Cr, Eu, Th, U, Ba, Ta, Hf, และ Fe ในหินซิลิกา (Silica) ที่อาบรังสีและอุกกาบาต (Meteorite) แอคติวิตี (Activity) ของ ²⁴Na จะแรงมากจนรบกวนธาตุที่ได้จากปฏิกิริยา (n,p) หลายตัว แต่การสลายสาร ตัวอย่างและแยก Na โดยการแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้พบ K, Ga, Zn, La, Cu, Sr, Ba, Mn, และ Eu ได้

✓ วัลลภ บุญคง (การวิเคราะห์สแกนเดียม, Thai AEC, 61, 1972 : 20 - 25) ได้วิเคราะห์หาปริมาณสแกนเดียม (Scandium) ในตัวอย่างดินที่เก็บจากบริเวณเหมืองแร่ที่มุก การดำเนินการ ผู้วิจัยนำตัวอย่างดินจากเหมืองแร่ที่มุก ตัวอย่างดินเค็มและกึ่งเปรี้ยว รวมทั้งดิน บริเวณสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (พปส.) และตัวอย่างแร่ทองแดงมาอบให้แห้งที่ 105° c.

แล้วบดให้ละเอียดเข้ากันดี ใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 500 – 800 มิลลิกรัม บรรจุในขวดโพลีเอทิลีน นำตัวอย่าง (Sample) ไปอบนิวตรอนพร้อมสแกนเดียมมาตรฐาน (Standard) ที่ระบบท่อลมของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีฟลักซ์ (Flux) 3×10^{11} นิวตรอน/ตร.ซม. วินาที เป็นเวลา 5 วินาที สแกนเดียมมาตรฐาน (Standard) ได้จากการละลาย Sc_2O_3 50 ไมโครกรัม ในกรดไนตริกเข้มข้นจนกรดออกซาลิก (Oxalic acid) เล็กน้อย ปล่อยให้ตัวอย่างที่อบนิวตรอนไว้ 15 วัน เพื่อให้ธาตุที่มีครึ่งชีวิต (Half Life) สั้น ๆ หมดไป แล้วจึงนำปาวังสีแกมมาของ Sc-46 ควบ Multichannel analyser นำสเปกตรัม (Spectrum) ของสแกนเดียมที่วัดได้มาหาผลรวมของอัตรานับที่โฟโตพีค (Photopeaks) ทั้งสองของสแกนเดียม แล้วนำผลรวมที่โฟโตพีคทั้งสองของตัวอย่างมาคำนวณหาปริมาณ โดยเปรียบเทียบกับผลรวมของอัตรานับที่โฟโตพีคของสแกนเดียมมาตรฐาน ผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณสแกนเดียมในดินจากเหมืองแร่ดีบุกมีค่ากว่าดินในแถบอื่น ๆ ฉะนั้นถ้าวิเคราะห์พบว่าบริเวณใดมีปริมาณสแกนเดียมน้อยผิดปกติ ก็อาจตั้งข้อสังเกตได้ว่าบริเวณนั้นน่าจะเป็นแหล่งแร่ชนิดใดชนิดหนึ่ง

วัลคอก บุญคง ได้วิเคราะห์ไทแทนเนียม (Titanium) ในแร่อีลเมไนท์ (Ilmenite) และทางแร่ดีบุกด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน (การวิเคราะห์ไทแทนเนียม Thai AEC.- 61, 1972 : 26 - 29) ไทแทนเนียมเป็นธาตุที่ในธรรมชาติเกิดในรูปแร่อีลเมไนท์ (Ilmenite) และรูไทล์ (Rutile) ซึ่งมักปนอยู่กับแร่ดีบุก ถ้าแยกแร่ดีบุกจะได้แร่อีลเมไนท์และแร่รูไทล์เป็นผลพลอยได้เสมอ ผู้วิจัยนำตัวอย่างทางแร่ดีบุกหนัก 50 มิลลิกรัม บรรจุในขวดโพลีเอทิลีนขนาดเล็ก ปิดให้สนิท แล้วนำไปอบนิวตรอนที่ระบบท่อลมของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีฟลักซ์ 3×10^{11} นิวตรอน/ตร.ซม. - วินาที นาน 0.5 นาที ปล่อยให้ตัวอย่างที่อบนิวตรอนไว้นาน 2 นาที จึงเริ่มวัดรังสีด้วยตัววัด Ge (Li) ขนาด 26 ซม.³ และวิเคราะห์รังสีแกมมาด้วย Multichannel analyzer ขนาด 1024 ช่อง เป็นเวลานาน 100 วินาที มาตรฐานใช้ TiO_2 หนัก 10 มิลลิกรัม นำมาอบนิวตรอนและดำเนินการวัดรังสีแบบเดียวกับตัวอย่าง

✓ ตัวอย่างที่อบนิวตรอนแล้ววัดรังสีพบว่า นอกจากมีรังสีแกมมาขนาด 0.32 Mev. แล้วยังมีรังสีแกมมาจาก Mn - 56 พลังงานขนาด 0.84 และ 1.80 Mev. อยู่ด้วย ซึ่งรังสีแกมมาจาก Mn - 56 นี้ให้การรบกวนต่อการวัดรังสีของ Ti - 51 ต้องแก้การรบกวนนี้โดยวิธีเดียวกับการวิเคราะห์ยูเรเนียมเมื่อมีซีโอเรียมปน (Thai AEC - 40, 1970) จากการวิเคราะห์

พบว่าในตัวอย่างทางแร่ที่มี TiO_2 ค่อนข้างสูง และในบางตัวอย่างเกิน 52 % ซึ่งเป็น
ความเข้มข้นสูงขนาดซื้อขายกัน

W. Maenhaut, F. Adams, J. Hoste (Radioanalytical Chemistry,
Journal, Vol. 14 no.2, April 1973, 295 - 315) ได้หาธาตุที่มีปริมาณน้อยในดินที่มี
ความบริสุทธิ์สูงถึง 99.9999 % และ 99.999 % ปริมาณที่ตรวจพบได้ มีค่าระหว่าง 0.02 ppb(Sc)
ถึง 200 ppb. (Fe) ธาตุที่พบมี Ag, An, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Mn, Mg, Na,
Ni, Sc, W และ Zn

วิธีวิเคราะห์แอกติเวชัน (Activation Analysis)

การวิเคราะห์หาธาตุปริมาณน้อยโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation Analysis) เพิ่งเป็นที่รู้จักกันดีเมื่อปีสิบปีมานี้เอง เป็นวิธีการวิเคราะห์น้ำหนักของธาตุชนิดใดชนิดหนึ่งในสารตัวอย่างด้วยการวัดรังสี (Activity) ที่เกิดจากการอาบด้วยนิวตรอน เนื่องจากไอโซโทปกัมมันตรังสีมีลักษณะการสลายตัวเป็นแบบเฉพาะตัว (เช่น ครึ่งชีวิต พลังงานของโฟตอน) ซึ่งสามารถที่จะตรวจสอบได้ การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) จึงอาจทำได้กับธาตุหรือไอโซโทปที่มีอยู่ในตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่ง วิธีการนี้จะมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อธาตุที่นำมาอาบรังสีนั้นมีโครอสเซกชันสูง (Cross section) และได้รับฟลักซ์ของนิวตรอนสูง (neutron flux) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพนี้ก็อาจพิจารณาจากความสามารถในการวัดรังสีที่ส่งออกมาจากการสลายตัวของไอโซโทปได้อย่างถูกต้องและแม่นยำด้วย

นิวตรอนแอกติเวชันนำมาใช้เป็นครั้งแรกในปี 1936 โดย ฟอนเฮฟวิซี และ เลวี (von Hevesy and Levi) (G. von Hevesy and H. Levi, Kgl. Danske Vidinshab Seldkab. Math. fys. Medd., 14 (Wo. 5), 1936 ; 15 (No. 11), 1938)

เพื่อวิเคราะห์หาดีสโพรเซียม (dysprosium) และยูโรเพียม (Europium) ในของผสมแรร์เอิร์ท (rare earth mixtures) โดยไม่ต้องใช้วิธีการแยกแบบเคมี จากนั้นก็มีการประยุกต์ไปใช้อย่างกว้างขวาง และมีการปรับปรุงขึ้นเรื่อย ความก้าวหน้าครั้งสำคัญในระยะสิบปีที่ผ่านมาขึ้นอยู่กับความสำเร็จในการสร้างปฏิกรณ์ปรมาณู (reactor) ซึ่งให้นิวตรอนฟลักซ์สูงมาก การใชปฏิกรณ์ฯ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนฯ ช่วยเพิ่มความไวขึ้นมากจนสามารถหาธาตุที่มีปริมาณเพียงหนึ่งใน 10^{13} ส่วนของธาตุบางอย่างได้ การวิเคราะห์อื่น ๆ ที่ไม่จำเป็นต้องใช้ความไว (sensitivity) มาก ก็อาจทำได้อย่างง่าย ๆ ด้วยการใส่เครื่องกำเนิดนิวตรอนสำหรับห้องปฏิบัติการซึ่งราคาค่อนข้างถูก ใช้ตรวจหาธาตุที่มีโครอสเซกชันสูง ๆ ได้

ความทั่วไป (General Considerations)

นิวเคลียสที่เป็นเป้า (target nucleus) อันหนึ่งอาจทำให้แปรเปลี่ยนไปได้โดยการยิงอนุภาคต่าง ๆ เข้าชน เช่น โปรตอน, นิวตรอน, ทริตอน (tritons), อนุภาคอัลฟา (Alpha-particle) และอื่น ๆ แต่มิฉะนั้นเพราะสาเหตุต่าง ๆ โดยทั่วไปมีความน่าจะเป็นไปได้ (Probability) ในการที่จะจับนิวตรอนเข้าได้คือ เฟอร์มี (Fermi) (E. Fermi et. al. Proc. Roy Soc. (London) A. 146, 483, 1934) ได้ตระหนักในข้อเท็จจริงนี้ ในปี 1934 เมื่อเขาสามารถผลิตสารกัมมันตรังสีเพิ่มขึ้นได้เป็นจำนวนมากด้วยการอาบรังสีธาตุด้วยเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) เทอร์มัลนิวตรอนทำได้โดยหุ้มทังกัsten นิวตรอนด้วยพารฟิน หรือน้ำ

อย่างไรก็ดีเราไม่สามารถกล่าวได้ว่า วิธีแอคติเวชันแอนาไลซิสจำกัดอยู่แค่ปฏิกิริยาที่เกิดจากนิวตรอนเท่านั้น การวิเคราะห์ธาตุบางอย่างด้วยรังสีนิวตรอนอาจไม่เหมาะสมเพราะเหตุผลบางประการ เช่น ค่าคงที่ของการสลายตัว (Decay constant) ที่ไม่พึงปรารถนา แอคติเวชันครอสเซกชันต่ำ ฯลฯ วิธีวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยโดยการแอคติเวชันอาจใช้โปรตอนหรือนิวตรอนจากไซโคลตรอน (Cyclotron) ก็ได้ เบียร์ดและคณะผู้ร่วมงาน D.B. Beard, R.G. Johnson, and W.G. Bradshaw, Nucleonics, 17 (No. 7), 90, (1959) ได้ใช้เทคนิคโฟตอนแอคติเวชัน (Photon activation) ในการวิเคราะห์ออกซิเจน (Oxygen) และคาร์บอน (Carbon) ที่มีปริมาณน้อยในเบริลเลียม (beryllium) ซีบอร์กและลิฟวิงกู๊ด (G.T. Seaborg and J.J. Livingood, J. Am. Chem. Soc., 60, 1784, 1938) ใช้วิธีแอคติเวชันแอนาไลซิสด้วยการอาบรังสีอนุภาคที่มีประจุตั้งแต่ปี 1938 เพื่อหาแกลเลียม (Gallium) บริเวณน้อยที่ปะปนอยู่ในเหล็กที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก อีกวิธีหนึ่งคือวิธีวิเคราะห์โปรตอนปริมาณน้อยในซิลิกอนด้วยวิธีโปรตอนแอคติเวชันแอนาไลซิส (R.A. Gill, British Atomic Energy Research Establishment Harwell. Report AERE C/R 2758, 1958)

เทอร์มัลนิวตรอนเป็นที่นิยมใช้กันมากกว่าอนุภาคที่มีประจุอื่น ๆ ในการแอคติเวชัน เพราะมีปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันน้อยที่สุด นอกจากนี้สาเหตุโดยทั่วไปก็ยังมีครอสเซกชันในการที่จะจับเทอร์มัลนิวตรอนสูง ผลจากเชลฟ์ - ชิลด์กิง ก็มีน้อย (Self-shielding effects),

ขนาดและรูปร่างของตัวอย่างจะเป็นอย่างใดก็ได้ และสามารถที่จะอาบรังสีตัวอย่างหลาย ๆ ตัวอย่างพร้อมกันได้

เพื่อให้ได้นิวตรอนฟลักซ์สูง การอาบรังสีในแอคติเวชันแอนาไลซิส มักทำในแท่งมากกว่าที่ท่อเทอร์มิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอาบรังสีเวลาสั้น ๆ ต้องใช้ระบบท่อลม (Pneumatic tube devices) ซึ่งออกแบบเป็นพิเศษให้ใส่และเอาตัวอย่างออกได้อย่างรวดเร็วไม่เกิดการรบกวนการทำงานของปฏิกรณ์ฯ เนื่องจากอัตราส่วนของนิวตรอนช้าและนิวตรอนเร็วแปรตามการเปลี่ยนตำแหน่งภายในปฏิกรณ์ฯ การรบกวนกันจากปฏิกิริยา (n, P) หรือ (n, α) จะขึ้นกับตำแหน่งที่อาบรังสี สิ่งเหล่านี้แตกต่างกันด้วยอัตราส่วนของนิวตรอนช้าต่อนิวตรอนเร็ว ยิ่งไปกว่านี้ยังแปรตามปฏิกรณ์แต่ละเครื่องด้วย ฉะนั้นในการอาบรังสีทุกครั้ง การรบกวนกันจากปฏิกิริยาอื่น ๆ จะไม่เท่ากัน

ปฏิกิริยาที่รบกวนนี้อาจนำมาใช้เป็นประโยชน์ได้ในบางครั้งในการผลิตนิวไคลด์กัมมันตรังสีบางชนิดซึ่งไม่อาจเกิดจากปฏิกิริยา (n, α) ได้ เช่นการอาบรังสีที่เกิดขึ้นมีในธรรมชาติ $(68\% \text{ Ni}^{58})$ ด้วยนิวตรอนจะให้ Co^{58} จากปฏิกิริยา $\text{Ni}^{58} (n, p) \text{Co}^{58}$ ปฏิกิริยานี้ใช้เป็นตัวคุม (monitor) ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว

ทฤษฎีการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน (Neutron Activation Analysis Theory)

หลักการ เมื่อสารชนิดหนึ่ง (Lenthzen and Thomson, 1965 : 41) ถูกนำไปอาบรังสี (irradiated or activated) ของอนุภาคนิวเคลียร์ที่ได้จากปฏิกรณ์ปรมาณู เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator) หรือแหล่งกำเนิดที่เหมาะสมอื่น ๆ อะตอมในสารนั้นบางอะตอมจะกระทบ (Interact) กับอนุภาคที่พุ่งเข้ามา (Bombarding Particle) และเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียร์ กลายเป็นไอโซโทปของธาตุเดิม หรือไอโซโทปของธาตุอื่นก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของอนุภาคที่พุ่งเข้ามา ส่วนมากไอโซโทปที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี (Radioisotope) ถ้าแต่ละไอโซโทปกัมมันตรังสีสามารถแยกออกจากกันได้ เราก็สามารถหาปริมาณอะตอมของธาตุเดิม (Parent Isotope) จากปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่วัดได้ ผลสำเร็จของการวิเคราะห์แบบแอคติเวชันขึ้นอยู่กับปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เลือกใช้

อะตอมของธาตุในสารธรรมชาติทั่วไปเป็นไอโซโทปที่เสถียร (Stable Isotope) ซึ่งอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ (Nuclear Transformation) ด้วยปฏิกิริยาหลาย ๆ แบบ เช่น (n, α) , (n, γ) , (n, p) , $(n, 2n)$, (p, n) , (p, α) , (d, p) , (d, n) , (d, γ) , (α, n) , (α, p) และ $(n, \text{fission})$ ในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแตกเคิเวชันนั้น เราใช้นิวตรอนเป็นกระสุนยิง ปฏิกิริยา (n, γ) และ (n, p) จะต้องใช้นิวตรอนที่มีพลังงานสูง ส่วน Thermal neutron ซึ่งมีพลังงานประมาณ 0.025 e.v. นั้นเหมาะที่จะใช้ในปฏิกิริยา (n, α) ปฏิกิริยานี้ไม่ทำให้อะตอมมีกัมมันตรังสีของธาตุนั้นเปลี่ยนไป คือไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นยังคงเป็นไอโซโทปของธาตุเดิม ปฏิกิริยา (n, α) จึงเป็นที่นิยมใช้มากกว่า

ในการศึกษาและวิเคราะห์ครั้งนี้เลือกใช้ปฏิกิริยา (n, α) ซึ่งมีหลักการดังนี้ นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า จึงมีโอกาสที่จะวิ่งชนและเกิดปฏิกิริยากับธาตุที่เป็นเป้า (Target element) ได้มากกว่าอนุภาคอื่นที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งจะถูกเบี่ยงเบนออกโดย Coulomb Force เมื่อ Neutron ถูกยิงเข้าไปชน Nucleus Nucleus จะจับ (Capture) Neutron นั้นไว้ ทำให้ตัวมันกลายเป็น Compound nucleus ซึ่งมีพลังงานสูงขึ้น และอยู่ใน Excited state Compound nucleus จะอยู่ใน excited state ชั่วระยะเวลาสั้น ๆ ประมาณ $10^{-12} - 10^{-20}$ sec. (Price, 1958 : 28) แล้วก็จะปล่อยพลังงานส่วนที่เกินออกมาในรูปของ α -particle, Photon (α -radiation)

โอกาสที่นิวตรอนจะวิ่งชนนิวเคลียสใดขึ้นอยู่กับ Cross section ซึ่งมีหน่วยเป็น Barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) โดยทั่วไปแล้วค่าของ Cross section จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของนิวตรอนลดลง (Livesey, 1966 : 359) ดังนั้น ปฏิกิริยานิวเคลียร์จะมีโอกาสเกิดขึ้นมากที่สุด ถ้าใช้ Thermal neutron เป็นตัวยิง โดยการวัดระดับพลังงานและปริมาณของอนุภาคเหล่านั้น เราสามารถหาปริมาณและชนิดของธาตุในสารนั้นได้

เทคนิคในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน มี 2 แบบ คือ

1. การวิเคราะห์แบบไม่อาศัยวิธีทางเคมี (Non-Destructive Neutron Activation Analysis) คือการนำสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกัน แล้วนำมาวัดรังสีเปรียบเทียบกัน
2. การวิเคราะห์แบบอาศัยวิธีทางเคมี (Destructive Neutron Activation Analysis) สารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้น บางทีก็เป็นส่วนผสมของธาตุหลาย ๆ อย่าง อาจมีการรบกวนซึ่งกันและกันได้ โดยเฉพาะที่มี Peak Energy ใกล้เคียงกัน ไม่อาจจำแนกได้โดยง่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีทางเคมี เช่น การตกตะกอน การสกัด การกลั่น และการแยกด้วย ion exchange resin เป็นต้น เมื่อแยกไอโซโทปกัมมันตรังสีได้บริสุทธิ์แล้วจึงทำการวัดรังสี

ในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันมีเงื่อนไขที่จำเป็นดังนี้ (Lenihan and Thomson, 1965 : 45)

1. ธาตุในสารที่จะวิเคราะห์จะต้องมีค่า neutron interaction cross section ที่เหมาะสม
2. แต่ละธาตุที่จะวิเคราะห์ต้องเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีซึ่งสลายตัวให้ γ -rays เมื่อถูก Activated ด้วยนิวตรอน
3. ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นต้องมี Half life ไม่มากหรือน้อยเกินไป
4. ธาตุที่จะวิเคราะห์ในสารนั้นต้องมีปริมาณมากพอ
5. ลักษณะทางนิวเคลียร์ของธาตุในขณะที่ยังไม่เป็นธาตุกัมมันตรังสี และผลที่เกิดขึ้นจาก Activation เป็นสิ่งที่ต้องทราบล่วงหน้า

อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี (Rate of Radioisotope Production)

เมื่อนำสารที่จะวิเคราะห์ไปอาบรังสี Thermal Neutron จะเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้น ในขณะที่ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะสลายตัวให้ γ -rays ออกมา ดังนั้นอัตราการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีได้ (Lapp and Andrews, 1954 : 353 - 354)

จะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{dN^*}{dt} = P - \lambda N^*$$

เมื่อ P = อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotope)

$$\frac{dN^*}{dt} = \text{อัตราการสลายตัวของ Radioisotope}$$

$$\lambda = \text{Decay Constant}$$

$$N^* = \text{จำนวนอะตอม Radioisotope ที่ผลิตได้}$$

ถ้าสารตัวอย่างถูกอาบรังสีเป็นระยะเวลา t , โดยที่ค่า P ไม่เปลี่ยนแปลง เราอาจหาค่า N_{t1}^* ได้โดยการแก้ Differential Equation จากสมการที่ (1) แบบง่าย ๆ ดังนี้

$$\text{จาก (1) ได้ } \frac{dN_{t1}^*}{dt_1} = P - \lambda N_{t1}^* \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{d}{dN_{t1}^*} (P - \lambda N_{t1}^*) = P - \lambda N_{t1}^*$$

$$\int \frac{d(P - \lambda N_{t1}^*)}{(P - \lambda N_{t1}^*)} = \int -\lambda dt_1$$

Integrate ทั้ง 2 ข้างได้

$$\int \frac{d(P - \lambda N_{t1}^*)}{(P - \lambda N_{t1}^*)} = \int -\lambda dt_1$$

$$\ln(P - \lambda N_{t1}^*) = -\lambda t_1 + C \quad (C = \text{Const.})$$

$$= -\lambda t_1 + \ln K \quad (C = \ln k = \text{Const.})$$

$$\ln \frac{(P - \lambda N_{t1}^*)}{K} = -\lambda t_1$$

$$e^{-\lambda t_1} = \frac{1}{K} (P - \lambda N_{t1}^*)$$

$$N_{t1}^* = \frac{P}{\lambda} - \frac{K}{\lambda} e^{-\lambda t_1} \dots\dots\dots (3)$$

เมื่อ $t_1 = 0$, $N_{t1}^* = 0$

$$0 = \frac{P}{\lambda} - \frac{K}{\lambda}$$

$$K = P \dots\dots\dots (4)$$

แทนใน (3) $N_{t1}^* = \frac{P}{\lambda} - \frac{P}{\lambda} e^{-\lambda t_1}$

$$N_{t1}^* = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) \dots\dots\dots (5)$$

ในทางปฏิบัติเราต้องการทราบปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่ N_{t1}^* ปล่อยออกมาต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสมมติให้ค่า Λ_{t1}

จาก (5) $N_{t1}^* = P (1 - e^{-\lambda t_1})$

$$\Lambda_{t1} = P (1 - e^{-\lambda t_1}) \dots\dots\dots (6)$$

สิ่งที่เราต้องการทราบต่อไปก็คือ P ซึ่งหาได้ดังนี้

เมื่อนำสารตัวอย่างไปอาบรังสีนิวตรอน โอกาสที่นิวตรอนหนึ่งอนุภาคจะชนและเกิดปฏิกิริยากับนิวเคลียสของธาตุในสารตัวอย่างหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Probability ที่จะเกิดปฏิกิริยาต่อ 1 Neutron} &= \frac{\text{พ.ท. หน้าตัดนิวเคลียสในเป้า}}{\text{พ.ท. ทั้งหมดของเป้า}} \\ &= \frac{\text{Nuclear Target Area}}{\text{Total Target Area}} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{Probability ที่จะเกิดปฏิกิริยาต่อ 1 นิวตรอน} = \frac{N\sigma}{a}$$

เมื่อ N = จำนวนนิวเคลียสทั้งหมดในเป้า

σ = Activation Cross Section for Thermal neutron

หน่วยเป็น Barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$)

a = พื้นที่ของเป้า

ถ้า ϕ เป็นจำนวน neutron ที่เข้าชนเป้าในแนวตั้งฉากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อวินาที

(Irradiation flux = neutron/cm²/sec) จะได้ว่า .-

$$\text{จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน 1 วินาที} = \frac{N\sigma}{a} \times \phi a$$

$$\therefore \text{อัตราการเกิด radioisotope} = P = N\sigma \phi \dots\dots\dots (7)$$

จำนวนอะตอมหรือนิวเคลียสทั้งหมดที่ถูกนำไปอาบรังสีหาได้จาก (Lyon, Jr., 1964 : 9)

$$N = \frac{N_0 w k}{\text{At Wt}} \dots\dots\dots (8)$$

เมื่อ N_0 = Avogadro's number = $6.0247 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$

w = น.น.ธาตุเป็นกรัม

k = Fractional Isotopic abundance

At.Wt. = atomic Weight

แทน (7) และ (8) ใน (5) ได้ :-

$$\therefore A_{t_1} = \frac{N_0 w k}{\text{at.Wt.}} \cdot \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_1})$$

$$A_{t_1} = \frac{6.02 \times 10^{23} w k \cdot \sigma \phi}{\text{At.Wt.}} \left(1 - e^{\frac{-0.693 \cdot t_1}{T_{1/2}}}\right) \dots\dots (9)$$

เมื่อ $\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$

$T_{1/2}$ = Half Life /

จากสมการ (9) จะเห็นว่า เราสามารถเปลี่ยนระยะเวลาการอาบรังสีเพื่อให้ได้ค่า Activity ตามที่ต้องการได้ เทอม $(1 - e^{-\lambda t_1})$ เรียกว่า Saturation Factor (Lyon, Jr., 1964 : 8)

ถ้าระยะเวลาในการอบรังสี $t_1 \gg T_{1/2}$ แล้ว $e^{-0.693 t_1/T_{1/2}} \rightarrow 0$

นั่นคือ Saturation Factor $\rightarrow 1$

ดังนั้นที่ Saturation Time (เวลาที่อัตราการผลิตและอัตราการสลายตัวของอะตอมไอโซโทปกันมันตรงสลับค่าเท่ากัน) ค่า Activity ของ Radioisotope จะมีค่าสูงสุดตามสมการ

$$\Delta = N \sigma \phi \dots\dots\dots (10)$$

อัตราการสลายตัวของไอโซโทปกันมันตรงสลับ (Rate of Radioisotope Decay)

จากการทดลองเราพบว่า ในการสลายตัวของไอโซโทปกันมันตรงสลับ จำนวนการสลายตัวต่อหนึ่งหน่วยเวลาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนอะตอมกันมันตรงสลับในขณะนั้น (Lapp, and Andrews, 1954 : 78) ถ้าจำนวนอะตอม N สลายตัวในระยะเวลา t เราจะได้ว่า

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta N}{\Delta t} &\propto N \\ \frac{\Delta N}{\Delta t} &= -\lambda N \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

เมื่อ λ = decay constant (disintegration constant)

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \text{Activity ของ radioisotope}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

Integrate ทั้ง 2 ข้าง $\int \frac{dN}{N} = \int -\lambda dt$

$$\ln N = -\lambda t + C \quad (C = \text{Constant})$$

$$= -\lambda t + \ln K \quad (C = \ln K = \text{Const.})$$

$$\ln \frac{N}{K} = -\lambda t$$

$$e^{-\lambda t} = \frac{N}{K} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$t = 0, \text{ ทำให้ } N = N_0$$

$$1 = \frac{N_0}{K}$$

$$K = N_0$$

$$\text{แทนค่า } K \text{ ใน (12) } \therefore N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \dots\dots\dots (13)$$

เมื่อ N = จำนวนอะตอมกัมมันตรังสีที่มีอยู่ภายหลังระยะเวลา t

N_0 = จำนวนอะตอมกัมมันตรังสีเมื่อเริ่มสลายตัว

e = Napierian-Logarithm base = 2.7182

ถ้าตั้งระยะเวลา t จำนวนอะตอมกัมมันตรังสีที่เหลืออยู่ $\frac{N_0}{2}$ ระยะเวลา t นี้เรียกว่าระยะเวลาครึ่งชีวิต (Half Life) เขียนแทนด้วย $T_{1/2}$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \exp(-\lambda T_{1/2})$$

$$\therefore \ln \frac{1}{2} = T_{1/2} \times (-\lambda)$$

$$T_{1/2} = \frac{-\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (14)$$

จาก (13) เราอาจเขียนได้ว่า

$$\lambda N = \lambda N_0 \exp. (-\lambda t)$$

$$\therefore A = A_0 \exp. (-\lambda t)$$

แทน λ จาก (14)

$$\therefore A = A_0 \exp. \left(\frac{-0.693 \cdot t}{T_{1/2}} \right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

/ เมื่อเรานำสารตัวอย่างออกมาจากการอาบรังสีนิวตรอน ในเครื่องปฏิกรณ์แล้ว ในบางกรณีเราอาจต้องปล่อยให้อะตอมกัมมันตรังสีสลายตัวชั่วระยะหนึ่ง เพื่อจัดการแผ่รังสีกลับ

(Overshadow) ของอะตอมกัมมันตรังสีที่เราไม่ต้องการ ดังนั้น ถ้าเราอาจรังสีเป็นเวลา t_1 และทิ้งไว้ให้สลายตัวเป็นเวลา t_2 ก่อนทำการวัดรังสี ค่า Activity ที่ได้อีก

$$\text{Activity} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{\text{At. Wt.}} \text{ wk } \sigma \phi \left[1 - \exp \left(\frac{-0.693 t_1}{T_{1/2}} \right) \right] \cdot \exp \left(\frac{-0.693 t_2}{T_{1/2}} \right) \dots \dots \dots (16)$$

จากการวัดค่า Activity แทนค่า $K, \sigma, \phi, T_{1/2}, \text{At. Wt.}, t_1, t_2$ แล้วเราสามารถทราบปริมาณของธาตุ (w) ได้

ในทางปฏิบัตินิยมใช้ Comparator Technique (Lyon, Jr., 1964 : 10) คือ การอาจรังสีสารตัวอย่าง พร้อมกับสารมาตรฐาน (Standard) เพื่อชั่งน้ำหนักผลจากอันอาจเกิดขึ้นในการอาจรังสี เช่น ค่า neutron flux ไม่คงที่ เป็นต้น

ถ้า w = น.น. ของสารตัวอย่าง

w_s = น.น. สารมาตรฐาน

A = Activity ของสารตัวอย่าง

A_s = Activity ของสารมาตรฐาน

โดยใช้สมการที่ (16) เราย่นได้

$$\frac{w}{w_s} = \frac{A}{A_s} \dots \dots \dots (17)$$

ดังนั้น ถ้าวัดปริมาณกัมมันตรังสีในสารตัวอย่าง ปริมาณกัมมันตรังสีในสารมาตรฐาน และชั่งน้ำหนักของสารมาตรฐาน เราก็สามารถกำหนดหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างได้

การเลือกสารมาตรฐาน ควรพิจารณาในสิ่งต่อไปนี้

1. สารควรบริสุทธิ์ ไม่มีสิ่งอื่นเจือปน
2. สารควรมีธาตุที่สามารถ Activated ได้เพียงธาตุเดียว
3. สารควรละลายได้ง่าย ในตัวทำละลาย
4. สารควรชั่งได้โดยง่าย

ระยะเวลาการฉายรังสี (Irradiation exposure time)

ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายรังสี (Coiliss, 1963 : ๖๗) ซึ่งขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้

1. ค่าความไว (Sensitivity) ที่เราต้องการ
2. Nuclear cross section ของธาตุที่นำเข้าไปฉายรังสี
3. Half life ของ Radioisotope ที่เกิดขึ้น.

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการในการ

1. เครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือ Ge(Li) detector ซึ่งประกอบด้วย

1.1 หัววัด Ge(Li) (Lithium-drifted Germanium) ของ ORTEC

ขนาด 26 cc

1.2 Power supply model 459 ของ ORTEC

1.3 1024 channel analyzer ของ Nuclear Data ND - 110

1.4 Amplifier Model 716 A

1.5 Oscilloscope Type RM 503

1.6 IBM Electric type writer Model 72 ประกอบกับ ND - 316 autofinger

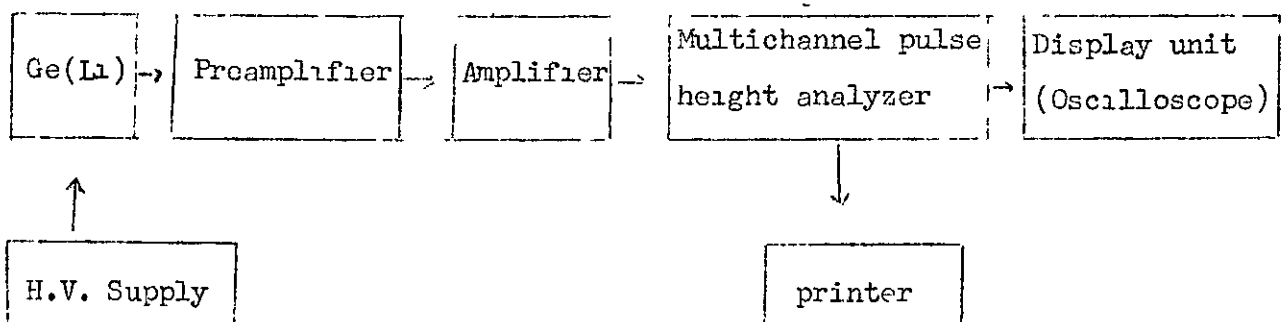
หลักการทำงานของ Ge(Li) detector

Ge(Li) detector เป็น Semiconductor detector หัววัดแบบ Coaxial cylinder มี Li หุ้ม Ge ใจกลาง Li จะแพร่ (diffuse) เข้าในผิวบาง ๆ ของ Ge ซึ่งเป็น p-type material ที่อุณหภูมิประมาณ 400° c (Science vol. 170, 1970 : 285) และจะทำให้เกิด n-p junction ขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นพอที่จะเกิดการไหล Lithium ions ก็จะมี Drift เข้าในสนามไฟฟ้า เมื่อรังสีแกมมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสีผ่านเข้าในหัววัดด้วยขนาดพลังงานหนึ่ง ๆ ก็จะทำให้เกิด Current pulse ของ Lithium ions ขนาดหนึ่ง รังสีแกมมาจึงเปลี่ยนเป็น Current pulse ได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม Current pulse ที่ได้นี้ยังมีความเข้มน้อย ต้องผ่าน preamplifier แล้วจึงเข้าสู่ amplifier

สมองอิเล็กทรอนิกส์แต่ละตัวเรียก Channel แต่ละ Channel จะทำหน้าที่เก็บ
จำนวนนับสัญญาณในช่วงหนึ่ง ๆ ไว้ เช่น สัญญาณ 99 - 100 volts เก็บที่ Channel
100, 70 - 71 volts เก็บที่ Channel 71 เป็นต้น สัญญาณเหล่านี้จะถูกสะสมไว้
ทุก Channel จะทำงานพร้อมกัน

ในการนำจำนวนนับออกจากสมองอิเล็กทรอนิกส์ อาจให้พิมพ์ออกมาโดยอัตโนมัติ
หรือแสดง Spectrum ทาง Oscilloscope ก็ได้ (สมพงษ์ ฉกรรกรณ,
โรเนียว : 13)

หลักการทำงานของเครื่องมืออาจแสดงเป็นแผนภาพได้ดังนี้



วิธีดำเนินการ

กลุ่มตัวอย่างที่นำมาศึกษาครั้งนี้ เป็นหัวแร่ดิบ 13 ตัวอย่าง โดยความเอื้อเฟื้อ
ของกรมทรัพยากรธรณี มีรายละเอียดดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงแหล่งที่มาและสีของแร่กัมพูชา

ตัวอย่างที่	ที่มา	สี	ตัวอย่างที่	ที่มา	สี
1	สงขลา	แดง	7	สงขลา	สีดินขาว
2	สุราษฎร์ธานี	น้ำตาลอ่อน	8	-	สีเหลืองแก่
3	-	สีดินเหลือง	9	น้ำตกพร้าว, จันทบุรี	ม่วงอ่อน
4	-	สีเทา	10	เหมืองทิมสะแก, ประจวบฯ	ม่วง
5	-	สีดิน	11	แม่สะเมิง, เชียงใหม่	ขาว
6	สงขลา	สีแกงอ่อน	12	เหมืองพิทักษ์, สงขลา	เทาอ่อน
			13	ร่อนพิบูลย์, นครศรีธรรมราช	เหลือง

จากกลุ่มตัวอย่าง 13 ตัวอย่างที่ นามาคำเนินการเป็น 2 ตอน คือ หาชนิดของธาตุปะปนที่มีปริมาณน้อย ๆ (Trace elements) หรือที่เรียกกันว่าวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) และหาปริมาณธาตุเหล่านั้น (Quantitative analysis) ก็จะกล่าวต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) มีวิธีการเป็นขั้น ๆ ดังนี้

1.1 ขั้นตอนเตรียมตัวอย่าง สารตัวอย่างที่ได้ขามีสีต่างกันดังตาราง 1 และเป็นก้อนแร่ขนาดต่าง ๆ กัน ไม่สะดวกในการวิเคราะห์ เพราะเนื้อแร่ต่างกัน เราต้องทำให้เป็นผงเนื้อละเอียดเข้ากันได้ดีขึ้น ซึ่งทำได้โดยบดให้ละเอียดในครก Diamonite ซึ่งมีความแข็งเป็นพิเศษ เมื่อใช้กรกน้บด แร่กัมพูชาจะบดละเอียดได้โดยง่ายและไม่มีเนื้อครกหลุดออกมาเจือปน แร่กัมพูชาที่บดแล้วใส่ขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท อนึ่งภายหลังการบดแต่ละสารตัวอย่าง ต้องล้างครกให้ดีด้วยกรดกัดทอง ($3\text{HCl} + \text{HNO}_3$) และทรายเพื่อป้องกัน

สารในตัวอย่างที่ไม่ต้องการเหลือค้างอยู่ติดปะปนกับสารตัวอย่างใหม่

สารตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมนี้ นำมาแบ่งซึ่งแล้วใส่ขวดโพลีเอทิลีนสำหรับ
อามรังสี สารตัวอย่างที่เหลือเก็บไว้หาปริมาณ เนื่องจากในขั้นนี้ เราจะหาชนิดของธาตุ
เท่านั้น น้ำหนักของสารตัวอย่างจึงไม่จำเป็นต้องเท่ากัน ชนิดของธาตุที่ปะปนหาได้จาก
พลังงานของรังสีแกมมาที่วัดได้และครึ่งชีวิต (Half Life) ของธาตุกัมมันตรังสีที่ให้
รังสีแกมมาพลังงานขนาดนี้ขอยกมา ปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้ประมาณตัวอย่างละ 50
มิลลิกรัม

1.2 ขั้นนำสารตัวอย่างเข้าอามนิวตรอน

แบ่งเป็น 2 ตอนดังนี้

1.2.1 ธาตุปะปนที่มีครึ่งชีวิตยาว - นำสารตัวอย่างที่เตรียม
แล้วเข้าอามนิวตรอนที่ท่อ MA - 3 ซึ่งมีเทอร์มัลฟลักซ์ (Thermal flux) ประมาณ
 8×10^{12} นิวตรอน ต่อ ซม.² ต่อวินาที ใช้เวลาอามประมาณ 6 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้
สลายตัว ประมาณ 1 สัปดาห์ เพื่อให้ธาตุปะปนที่มีครึ่งชีวิตสั้นสลายตัวหมดไป การ
รบกวนกันก็จะน้อยลง

1.2.2 ธาตุปะปนที่มีครึ่งชีวิตสั้น - นำสารตัวอย่างที่เตรียม
แล้วอีกชุดหนึ่งทดสอบอามนิวตรอนในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน เช่น 5 วินาที, 10 วินาที,
10 นาที เป็นต้น การอามนิวตรอนกระทำที่ท่อลม (Pneumatic tube) ซึ่งมี
เทอร์มัลฟลักซ์ประมาณ 3×10^{11} นิวตรอนต่อ ซม.² ต่อวินาที เวลาที่ปล่อยให้สลายตัว
ก็มากน้อยต่างกัน เช่นเมื่ออามนิวตรอน 5 วินาที แล้วรีบวัดรังสีทันทีที่จะได้ธาตุพวกครึ่งชีวิต
สั้นมาก ๆ ถ้าอาม 10 วินาที หรือ 10 นาที เวลาที่ปล่อยให้สลายตัวก็เป็น 1 นาที หรือ
1 วัน ธาตุปะปนที่หาได้ก็จะมีครึ่งชีวิตยาวขึ้นเป็นนาที ชั่วโมง และวัน ทั้งนี้เราต้อง
ทดสอบอามไปเรื่อย ๆ เพราะเหตุที่ไม่ทราบว่าเป็นสารตัวอย่างเหล่านั้นมีธาตุอะไรปะปน
อยู่บ้าง และมีครึ่งชีวิตเท่าใด ?

1.3 ขั้นการวัดรังสีแกมมา

จาก 1.2 นำสารตัวอย่างที่อามรังสีและปล่อยให้สลายตัวแล้ว มาวัดรังสีแกมมาโดยใช้ Ge(Li) detector โดยใช้เวลาวัดเท่ากันสำหรับตัวอย่างอันเดียวกัน บันทึกเวลาเริ่มวัดเสร็จ และช่วงเวลาที่ใช้ระยะเวลาการวัดอย่างละเอียด ลักษณะตำแหน่งการวาง (Geometry) ของสารตัวอย่างเป็นสิ่งสำคัญต้องอยู่ในลักษณะเดิมเสมอ เพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกันได้

หนึ่งในการวัดสารตัวอย่างแต่ละวัน ต้องวัดรังสีแกมมาของสารมาตรฐาน ด้วย เพื่อจะได้ทำ Calibration curve ซึ่งถ้าวัดที่ Coarse gain 20, fine gain 850, Conversion gain 1024 ก็ใช้ Co^{60} และ Cs^{137} เป็นสารมาตรฐาน ถ้าวัดที่ Coarse gain 50, fine gain max, Conversion gain 1024 ก็ใช้ Na^{22} , Yb^{169} เป็นสารมาตรฐาน ที่ใช้สารมาตรฐานต่างกัน เพราะที่ gain ต่างกันมีพลังงานช่วงหนึ่งเท่านั้นที่เหมาะสมจะใช้ทำ Calibration Curve ที่ gain สูงขึ้น ช่วงพลังงานที่วัดได้จะมีค่าน้อย ความชันของ Calibration curve จะน้อย ที่ gain ต่ำ ความชันจะมากขึ้น Calibration curve นั้น ก็จะใช้หาค่าพลังงานสูง ๆ ได้ดี

Calibration curve เป็นกราฟที่เขียนระหว่างพลังงานรังสีจากสารมาตรฐานที่ทราบค่ากับ Channel ที่พบรังสีนั้น วิธีการทำ Calibration curve จึงทำได้โดยเอาสารมาตรฐานนั้นเข้าวัดรังสี หาพลังงานของรังสีที่ photopeaks ต่างๆ ทราบได้จากหนังสือคู่มือ เมื่อเขียนกราฟระหว่างพลังงานกับ Channel ที่เกิด photopeaks นั้นแล้ว ก็จะได้กราฟเส้นตรง

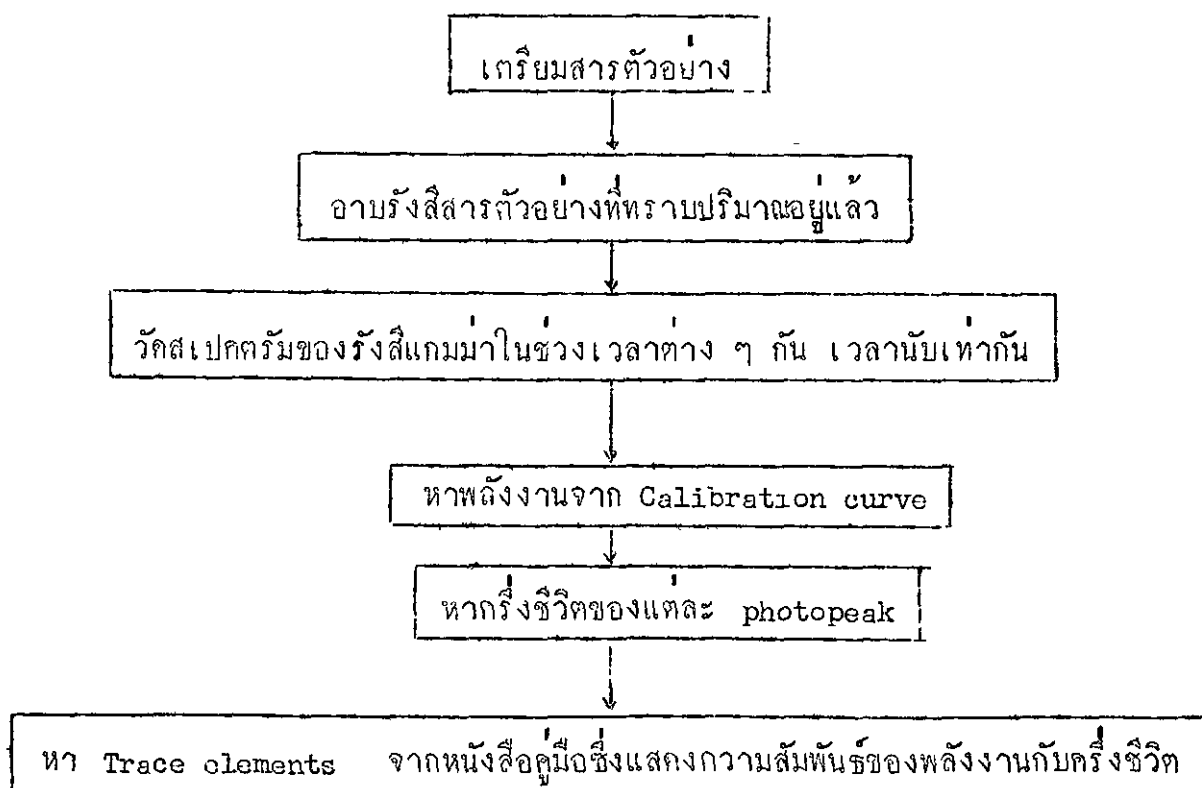
1.4 ขั้นการหาพลังงานรังสีแกมมาที่ photopeaks จาก Calibration curve
อ่านค่าพลังงานของรังสีแกมมาจาก Channels ที่เกิด photopeaks
ในสารตัวอย่างนั้นใน Calibration curve

1.5 ขั้นตอนการหาครึ่งชีวิต

เขียนกราฟระหว่างจำนวนนับ (Counts) ในหน่วยเวลาเดียวกันที่ photopick เดียวกันของสารตัวอย่างเกี่ยวกับ กับเวลาที่วัดที่ทิ้งช่วงมาหลาย ๆ ครั้ง จะได้กราฟเส้นตรงในกระดาษกราฟเซมิล็อก (Semi - log) ช่วงเวลาที่จำนวนนับลดลงจนเหลือครึ่งหนึ่งจะเป็นครึ่งชีวิต (Half Life) ของธาตุกัมมันตรังสีที่ปล่อยรังสีแกมมา นั้นออกมา

1.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ชนิดของธาตุ

จากครึ่งชีวิตและพลังงานที่อ่านได้จาก Calibration curve ของ photopick เกี่ยวกับ บำมาวิเคราะห์หาชนิดของธาตุได้จากหนังสือคู่มือ ซึ่งจะบอกให้ทราบว่าที่ครึ่งชีวิตเท่านั้น พลังงานของรังสีแกมมาขนาดเท่านั้นเป็นของธาตุอะไร จากลำดับขั้นทั้ง 6 อาจเขียนเป็นแผนผังได้ดังนี้



2. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis) มีลำดับขั้นดังนี้

2.1 ขั้นการเตรียมสารตัวอย่าง - เตรียมแบบเดียวกับ 1.1 แต่ตอนนี้ต้องระมัดระวังเรื่องน้ำหนักสารตัวอย่างมาก ในการวิจัยนี้ใช้สารตัวอย่างหนัก 50 มิลลิกรัม ทุกตัวอย่าง สารตัวอย่างเหล่านี้เราทราบแน่นอนแล้วว่ามีธาตุอะไรอยู่บ้างจากการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

2.2 ขั้นการเตรียมสารมาตรฐาน - โดยการสรุปจากเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย เราประมาณได้ว่ามีธาตุปริมาณน้อยปะปนอยู่ในสารตัวอย่างแต่ละตัวอย่างประมาณตัวละ 30 ppm. ยกเว้น Tantalum ซึ่งมีมากเป็นพิเศษ ในสารตัวอย่าง no. 4, 9, 10 และ 12 จากการทดลองใช้ Ta_2O_5 5 มิลลิกรัม อานิวตรอนพร้อมกัน สารตัวอย่าง no. 4 50 มิลลิกรัม โดยควบคุมเวลาการอบรังสีและเวลานับทุกอย่าง ผลปรากฏว่า ได้สเปกตรัมคล้ายกันมาก ทำเช่นเดียวกันกับ no. 9, 10, และ 12 ก็ประมาณได้ว่า no. 4, 9, 10, 12 มี Ta ประมาณ 10%, 2%, 5%, 5%

จากปริมาณธาตุที่ประมาณไว้เป็น ppm. และเปอร์เซ็นต์ ก็ทำเป็นอัตราส่วนออกมาได้ จึงนำธาตุต่าง ๆ ที่ผสมตามอัตราส่วนนี้มาคลุกกับดีบุกออกไซด์ในกรก Diamonite จะได้สารมาตรฐานในที่สุด ซึ่งสารมาตรฐานนี้ 50 มิลลิกรัม เช่นเดียวกับสารตัวอย่าง ต้องเอาสารตัวอย่าง 50 มิลลิกรัมนี้ 3 ชุดมาอานิวตรอนพร้อมกัน แล้ววัดรังสีแกมมาที่ได้ ถ้าสเปกตรัมมีลักษณะเหมือน ๆ กัน ก็แสดงว่าสารมาตรฐานที่เตรียมนี้คลุกเข้ากันดี ใช้ได้ ถ้าสเปกตรัมต่างกันมากก็แสดงว่าเราคลุกไม่ดี ต้องเตรียมสารมาตรฐานใหม่

✓ 2.3 ขั้นการอานิวตรอน - นำสารมาตรฐานและสารตัวอย่างอย่างละ 50 มิลลิกรัม มาอานิวตรอนพร้อมกัน เวลาที่ใช้ในการอานิวตรอนและปล่อยให้สลายตัวเท่าใดขึ้นอยู่กับครึ่งชีวิตของธาตุที่จะหา เช่น ครึ่งชีวิตยาวก็ใช้เวลาอานิวตรอนและปล่อยให้สลายตัวนาน ครึ่งชีวิตสั้นก็ใช้เวลาอานิวตรอนน้อย และสลายตัวน้อย

2.4 ขั้นการวัดรังสี - วัดแบคกราวด์ (Back ground) และทำ Calibration curve ก่อน จากนั้นจึงวัดรังสีของสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง โดยควบคุมลักษณะตำแหน่งการวาง (Geometry) ช่วงเวลาวัด มาตรการของเครื่องวัดทุกอย่างให้เหมือนกัน

สำหรับเวลาการวัดรังสี ถ้าเป็นพวกครึ่งชีวิตยาวมาก ๆ เช่นเป็นเดือน การวัดสารมาตรฐานก่อนหรือหลังสารตัวอย่างไม่ใช่สิ่งสำคัญ เพราะเวลาในการวัดต่างกัน น้อยมาก เมื่อเทียบกับครึ่งชีวิตของธาตุนั้น ๆ

ถ้าครึ่งชีวิตสั้นเป็นชั่วโมง เราจำเป็นต้องเปรียบเทียบแอกติวิตี (Activity) ที่เวลาเดียวกัน ซึ่งใช้สูตร

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (19)$$

เมื่อ A_0 = Activity เมื่อเริ่มวัด ($t = 0$)

A_t = Activity เมื่อเวลาผ่านไป t

λ = Decay constant

แต่ถ้าเป็นพวกครึ่งชีวิตสั้นเป็นนาฬิกา แม้จะเทียบแอกติวิตีที่เวลาเดียวกันเช่นกัน แต่ใช้สูตร (19) ไม่ได้ เนื่องจากเวลาในการวัดยาวเมื่อเปรียบเทียบกับครึ่งชีวิตของธาตุที่จะหา เวลาในการวัดจึงมีผลต่อแอกติวิตีกว

สูตรที่ใช้เป็นดังนี้

$$A_0 = \frac{\lambda \times \text{Counts}}{e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}} \quad (20)$$

เมื่อ A_0 = Activity เมื่อเริ่มวัด ($t = 0$) ใช้เปรียบเทียบกันได้

Counts = จำนวนนับที่ได้

λ = Decay constant ของธาตุที่จะหาปริมาณ

t_1 = เวลาที่เริ่มวัด

t_2 = เวลาที่สิ้นสุดการวัด

ตัวอย่างเช่น เริ่มวัดสารมาตรฐานใช้เวลาวัด 10 นาที และหลังจากนั้นอีก 5 นาที จึงวัดสารตัวอย่างโดยใช้เวลาวัด 10 นาที เช่นกัน

สำหรับสารมาตรฐาน $t_1 = 0$, $t_2 = 10$ นาที

สารตัวอย่าง $t_1 = 10 + 5 = 15$ นาที, $t_2 = 15 + 10 = 25$ นาที
 เช่นนี้ เมื่อคำนวณหา A_0 มาได้ทั้งของสารมาตรฐานและสารตัวอย่างก็จะเป็น A_0 ที่
 เวลาเดียวกัน จึงเปรียบเทียบกันได้

2.5 ขั้นตอนการคำนวณหาพื้นที่ของโฟโตพีค

รวมจำนวนนับทุกจุดในโฟโตพีคเดียวกันจาก Valley หนึ่ง ผ่านซอฟต์แวร์
 ลงสู่อีก Valley หนึ่ง ในสเปกตรัมของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่เวลานับเท่ากัน
 เวลาเริ่มต้นเดียวกัน ซึ่งก็คือการเปรียบเทียบ A_0 ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐานที่
 จุดต่าง ๆ บน photopeak ตาม 2.4 นั้นเอง หลังจากลบออกด้วยจำนวนนับของ Back
 ground ที่สมนัยกันแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นพื้นที่ photopeaks ของสารตัวอย่าง
 และสารมาตรฐาน

2.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ

เนื่องจากน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ในสารมาตรฐาน เราทราบอยู่แล้ว ฉะนั้น
 ก็อาจหาน้ำหนักของธาตุปะปนในสารตัวอย่างได้จากสูตรต่อไปนี้

$$W = W_s \times \frac{A}{A_s} \quad (21)$$

เมื่อ W = น้ำหนักของธาตุปะปนในสารตัวอย่างที่จะหา

W_s = น้ำหนักของธาตุปะปนนั้นในสารมาตรฐาน

A = พื้นที่ Photopeak ของสารตัวอย่าง

A_s = พื้นที่ Photopeak ของสารมาตรฐาน

สถิติที่ใช้ในการวิจัย

ในการหาค่าความผิดพลาดของผลวิเคราะห์ที่ได้ โดยเฉพาะในตอนที่วิเคราะห์
 เจริญปริมาณนั้น หากจากความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังนี้

ถ้า $X = f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ = ค่าที่ได้

และค่าที่เบี่ยงเบน = σ

∴ ช่วงค่ากะแนนหรือตัวเลขที่ได้คือ $X \pm \sigma$

ถ้า Variance : $\sigma^2(X) = \left(\frac{\partial X}{\partial x_1}\right)^2 \sigma^2(x_1) + \left(\frac{\partial X}{\partial x_2}\right)^2 \sigma^2(x_2) + \dots$

ซึ่งถ้า $y = \frac{ax_1}{x_2}$ จะได้

$$\sigma^2(X) = \bar{x}^2 \frac{\sigma^2(x_1)}{\bar{x}_1^2} + \bar{x}^2 \frac{\sigma^2(x_2)}{\bar{x}_2^2}$$

$$\frac{\sigma^2(X)}{\bar{x}^2} = \frac{\sigma^2(x_1)}{\bar{x}_1^2} + \frac{\sigma^2(x_2)}{\bar{x}_2^2}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{เปอร์เซ็นต์ที่เบี่ยงเบนจาก } X &= \frac{\sigma(X)}{\bar{x}} \times 100 \\ &= 100 \times \sqrt{\frac{\sigma^2(x_1)}{\bar{x}_1^2} + \frac{\sigma^2(x_2)}{\bar{x}_2^2}} \quad \text{--- (22)} \end{aligned}$$

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis)

ธาตุที่วิเคราะห์ได้ในสารตัวอย่าง แบ่งเป็น 3 พวก คือ

- 1.1 ธาตุที่มีครึ่งชีวิต (Half Life) สั้น ๆ ในช่วงไม่เกินชั่วโมง
หาจากการอาบรังสีสารตัวอย่าง 5 วินาที ในท่อลม (Pneumatic tube) ซึ่งมี
Thermal flux ประมาณ 3×10^{11} neutrons/cm² sec. แล้ววัดรังสีโดย
Ge(Li) Detector ทันที
- 1.2 ธาตุที่มีครึ่งชีวิตเป็นวัน หาจากการอาบรังสีสารตัวอย่าง 10 นาที
ในท่อลม วัดรังสีโดย Ge(Li) Detector หลังจากปล่อยทิ้งไว้เมื่อนำออกจากท่อลมแล้ว
ประมาณ 1 วัน
- 1.3 ธาตุที่มีครึ่งชีวิตยาวเป็นเดือนหรือปี หาจากการอาบรังสีสารตัวอย่าง
ในท่อ MA.3 ซึ่งมี Thermal flux ประมาณ 8×10^{12} neutrons/cm² sec.
เวลาที่ใช้ในการอาบประมาณ 6 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้สลายตัวประมาณ 1 สัปดาห์ก่อน
เริ่มวัดรังสีด้วย Ge(Li)

ผลการวิเคราะห์มีดังนี้

ตาราง 4 การวิเคราะห์ธาตุที่ปะปนในสารตัวอย่างแร่ดิบทุกทั้งหมด

ธาตุ	นิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่ตรวจพบ	ครึ่งชีวิต	รังสีแกมมาที่ใช้ในการ วิเคราะห์
Aluminium	²⁸ Al	2.27 min	0.76, 1.77 Mev
Antimony	¹²⁴ Sb	60.9 d	0.714, 0.603 Mev
Arsenic	⁷⁶ As	26.5 hrs	0.65 Mev

ตาราง 4 . (ต่อ)

ธาตุ	นิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่ตรวจพบ	ครึ่งชีวิต	รังสีแกมมาที่ใช้ในการ วิเคราะห์
Bromine	82 Br	36 hrs	0.55 Mev
Chromium	51 Cr	27 d	0.320 Mev
Cobalt	60 Co	5.3 yrs	1.17, 1.33 Mev
Dysprosium	165m Dy	1.25 min	0.52 Mev
Gadolinium	161 Gd	3.7 min	0.36 Mev
Gallium	72 Ga	14.1 hrs	0.83 Mev
Hafnium	181 Hf	45 d	0.346, 0.48 Mev
Iron	59 Fe	45 d	1.29, 1.1 Mev
Manganese	56 Mn	2.582 hrs	0.84 Mev
Mercury	203 Hg	46.9 d	0.279 Mev
Potassium	42 K	12.8 hrs	1.56 Mev
Scandium	46 Sc	85 d	1.12, 0.888 Mev
Sodium	24 Na	15 hrs	1.37 Mev
Tantalum	182 Ta	115 d	1.15, 1.12, 1.22, 1.19 Mev
Terbium	160 Tb	72.3 d	0.216, 0.299 Mev
Titanium	51 Ti	5.75 min	0.3 Mev

2. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis)

ตาราง 6 พลังงานของรังสีแกมมาจากธาตุต่าง ๆ ที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

ธาตุ	นิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่ตรวจพบ	ครึ่งชีวิต	พลังงานของรังสีแกมมา ที่ใช้ในการวิเคราะห์
Aluminium	²⁸ Al	2.27 min	1.77 Mev
Antimony	¹²⁴ Sb	60.9 d	0.603 Mev
Arsenic	⁷⁶ As	26.5 hrs	0.65 Mev
Bromine	⁸² Br	36 hrs	0.55 Mev
Chromium	⁵¹ Cr	27 d	0.32 Mev
Cobalt	⁶⁰ Co	5.3 yrs	1.33 Mev
Dysprosium	^{165m} Dy	1.25 min	0.52 Mev
Gadolinium	¹⁶¹ Gd	3.7 min	0.36 Mev
Gallium	⁷² Ga	14.1 hrs	0.83 Mev
Hafnium	¹⁸¹ Hf	45 d	0.48 Mev
Iron	⁵⁹ Fe	45 d	1.1 Mev
Manganese	⁵⁶ Mn	2.582min	0.84 Mev
Mercury	²⁰³ Hg	46.9 d	0.279 Mev

ตาราง 6 (ต่อ)

ธาตุ	นิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่ตรวจพบ	ครึ่งชีวิต	พลังงานของรังสีแกมมา ที่ใช้ในการวิเคราะห์
Potassium	⁴² K	12.8 hrs	1.56 Mev
Scandium	⁴⁶ Sc	85 d	0.888 Mev
Sodium	²⁴ Na	15 hrs	1.37 Mev
Tantalum	¹⁸² Ta	115 d	1.22 Mev
Terbium	¹⁶⁰ Tb	72.3 d	0.299 Mev
Titanium	⁵¹ Ti	5.75 min	0.3 Mev
Tungsten	¹⁸⁷ W	24 hrs	0.48 Mev
Vanadium	⁵² V	3.7 min	1.433 Mev
Ytterbium	¹⁶⁹ Yb	31.8 d	0.198 Mev
Zinc	⁶⁵ Zn	245 d	1.11 Mev
Zirconium	⁹⁷ Zr	17 hrs	0.66 Mev

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาธาตุที่มีปริมาณน้อยในแร่คิงทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยวิธีการวิเคราะห์นิวตรอนแอคติเวชัน

แร่คิงทั้งหมดมี 13 ตัวอย่าง สีต่าง ๆ กัน เก็บจากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศไทย ทั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมทรัพยากรธรณี ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ หาธาตุที่มีครึ่งชีวิตสั้นเป็นนาที หรือชั่วโมง โดยการอาบรังสีสารตัวอย่างที่อุดม (Pneumatic tube) ทั้งนี้ใช้เวลาในการอาบและเวลาที่ทิ้งให้สลายตัวก่อนการวัดต่าง ๆ กัน สำหรับธาตุที่มีครึ่งชีวิตยาวเป็นเดือน หรือปี อาบรังสีสารตัวอย่างที่ต่อ MA 3 ราว 6 ชั่วโมง เวลาที่ทิ้งไว้ให้สลายตัวเป็นสัปดาห์ เครื่องมือที่ใช้วัดคือ Ge(Li) detector จากสเปกตรัมของรังสีแกมมาและครึ่งชีวิตที่ได้จากกราฟ ก็หาธาตุปริมาณน้อยที่ปะปนในสารตัวอย่างนั้น ๆ จากหนังสือคู่มือ (Hand book) ได้

การวิเคราะห์เชิงปริมาณ มีลำดับขั้นย่อ ๆ ดังนี้

1. เตรียมสารมาตรฐานให้มีลักษณะเหมือนสารตัวอย่างให้มากที่สุด โดยที่ทราบว่าการวิเคราะห์เชิงคุณภาพแล้วว่ามีธาตุอะไรปะปนอยู่บ้าง อัตราส่วนโดยประมาณเท่าใด เราก็อาจทำได้
2. อาบรังสีสารมาตรฐานและสารตัวอย่างที่มีลักษณะเหมือนกัน พร้อมกัน โดยควบคุมลักษณะตำแหน่งการวาง (Geometry) เวลาในการอาบ เป็นอย่างก็
3. ใช้ Ge(Li) detector วัดรังสี โดยควบคุม Geometry และเครื่องวัดให้มีลักษณะเหมือนกัน จะได้ Spectrum ที่สมนัยกันทั้งของสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน
4. เลือก photopeak ที่สมนัยกัน หาพื้นที่ใต้ peak นั้น ๆ ของสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน

ตาราง 7 แสดงปริมาณของธาตุที่ปะปนในตัวอย่างแร่ดิบๆ แต่ละตัวอย่างเป็น ppm.

ตัวอย่าง ธาตุ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Dy	85 ±19	2229 ±431	238 ±48	206 ±42	123 ±26	170 ±35	159 ±33	92 ±20	99 ±21	208 ±48	2 ±1	1033 ±202	76 ±17
V	45 ±11	19 ±6	197 ±40	--	118 ±25	7 ±17	76 ±15	--	43 ±10	--	37 ±9	338 ±67	123 ±26
Gd	--	--	14 ±5	41 ±10	39 ±10	10 ±4	10 ±4	15 ±5	15 ±5	4 ±2	12 ±4	193 ±39	14 ±5
Al	915 ±177	5718 ±1093	391 ±77	992 ±192	1938 ±382	1417 ±273	2348 ±450	1061 ±205	971 ±188	1050 ±203	351 ±69	1094 ±211	328 ±65
Ti	550 ±107	89 ±19	188 ±38	37 ±9	33 ±9	26 ±7	1 ±1	16 ±5	32 ±8	--	38 ±10	--	188 ±38
Mn	1228 ±236	540 ±105	3435 ±657	1960 ±376	861 ±167	69 ±16	13 ±4	1097 ±212	69 ±16	270 ±54	5 ±2	4017 ±768	17 ±5
W	384 ±171	4304 ±823	1222 ±236	7002 ±1337	6255 ±1195	777 ±151	194 ±40	1116 ±215	425 ±84	243 ±49	29 ±8	15977 ±3048	76 ±17
Br	559 ±109	2445 ±469	703 ±137	419 ±82	4848 ±927	213 ±43	19 ±6	336 ±66	299 ±60	93 ±20	23 ±6	3454 ±661	32 ±8
Ga	20 ±6	22 ±6	11 ±4	34 ±9	--	12 ±4	9 ±4	22 ±6	18 ±6	--	10 ±4	18 ±6	--

ตาราง 7 (ต่อ)

ธาตุ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
As	5221 ±634	2659 ±325	3712 ±452	60 ±11	37 ±8	1685 ±207	40 ±8	2881 ±347	39 ±8	36 ±7	23 ±6	92 ±15	17 ±5
Na	112 ±24	115 ±24	10 ±4	59 ±13	31 ±8	36 ±3	69 ±16	30 ±8	21 ±21	201 ±41	29 ±8	58 ±13	23 ±6
K	116 ±22	270 ±46	144 ±26	98 ±19	-	69 ±14	35 ±8	14 ±1	51 ±4	92 ±18	35 ±8	116 ±22	35 ±8
Zr	102 ±22	476 ±93	71 ±16	311 ±62	271 ±54	77 ±17	53 ±12	71 ±16	63 ±14	67 ±15	28 ±8	346 ±69	28 ±8
Ta	16 ±4	84 ±10	32 ±6	96218 ±636	125 ±13	9 ±3	6 ±3	4 ±2	9595 ±113	46436 ±344	4 ±2	30266 ±247	30 ±6
Sb	81 ±11	32 ±8	42 ±10	-	54 ±12	124 ±15	90 ±12	70 ±10	31 ±8	81 ±16	86 ±11	234 ±43	72 ±10
Fe	1133 ±86	396 ±65	279 ±47	39 ±9	133 ±24	742 ±58	31 ±6	1123 ±85	51 ±11	-	-	37 ±8	82 ±11
Se	5 ±2	31 ±8	1 ±1	9 ±3	27 ±7	7 ±3	6 ±3	3 ±2	14 ±5	1 ±1	2 ±1	27 ±7	12 ±4

ตาราง 7 (ต่อ)

ตัวอย่าง ธาตุ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Zn	31 ± 6	-	-	61 ± 14	-	-	79 ± 11	-	5 ± 2	50 ± 12	39 ± 7	-	39 ± 7
Tb	3 ± 2	6 ± 3	-	-	-	5 ± 2	-	-	-	-	2 ± 1	-	-
Yb	9 ± 3	6 ± 3	3 ± 2	22 ± 6	-	14 ± 4	-	8 ± 3	2 ± 1	12 ± 4	2 ± 1	10 ± 4	-
Hf	33 ± 6	26 ± 7	23 ± 6	6 ± 3	92 ± 20	91 ± 12	-	19 ± 5	2 ± 1	5 ± 2	51 ± 8	23 ± 7	12 ± 4
Hg	25 ± 5	3 ± 2	18 ± 5	20 ± 6	6 ± 3	7 ± 3	32 ± 6	7 ± 3	3 ± 2	17 ± 5	25 ± 5	-	5 ± 5
Cr	33 ± 6	366 ± 72	44 ± 11	-	64 ± 15	26 ± 6	17 ± 4	21 ± 5	10 ± 4	48 ± 12	11 ± 3	2316 ± 448	-
Co	20 ± 5	35 ± 9	15 ± 5	92 ± 20	5 ± 2	17 ± 4	13 ± 4	28 ± 6	27 ± 7	23 ± 7	16 ± 3	-	6 ± 3

5. เปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ที่สับนัยกันของสารตัวอย่าง กับสารมาตรฐาน ก็จะหาหน้าหนักของธาตุที่ปะปนในสารตัวอย่างได้

ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้

1. ธาตุปริมาณน้อยที่มีปะปนอยู่ในตัวอย่างแร่ดินบุก มี Dy, V, Gd, Al, Ti, Mn, W, Br, Ga, As, Na, K, Zr, Ta, Sb, Fe, Sc, Zn, Tb, Yb, Hf, Hg, Cr, Co

2. ปริมาณของธาตุปะปนในตัวอย่างแร่ดินบุก ปรากฏผลดังตาราง 7 และถ้า จัดลำดับธาตุปะปนที่มีเกิน 0.1 % ในแต่ละสารตัวอย่างแล้วจะได้ดังนี้

ตาราง 8

ตัวอย่างที่	สี	ที่มา	ธาตุที่พบปริมาณมากกว่า 0.1% ขึ้นไปเรียงตามลำดับ
1	แดง	สงขลา	As(0.50%), Fe(0.11%), Mn(0.1%)
2	น้ำตาลอ่อน	สุราษฎร์ธานี	Al(0.57%), W(0.43%), As(0.27%), Br(0.24%) Dy(0.22%)
3	ดินเหลือง	—	As(0.37%), Mn(0.34%), W(0.12%)
4	เทา	—	Ta(9.62%), W(0.7%), Mn(0.20%), Al(0.1%)
5	หิน	—	W(0.63%), Br(0.48%), Al(0.20%)
6	แดงอ่อน	สงขลา	As(0.17%), Al(0.14%)
7	ดินขาว	สงขลา	Al(0.23%)
8	เหลืองแก่	—	As(0.29%), Al(0.11%), W(0.11%), Mn(0.11%)
9	ม่วงอ่อน	จันทบุรี	Ta(0.96%), Al(0.10%)

ตาราง 8 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	สี	ที่มา	ธาตุที่พบปริมาณมากกว่า 0.1% ขึ้นไปเรียงตามลำดับ
10	ม่วง	ประจวบฯ	Ta(4.64%), Al(0.11%)
11	ขาว	เชียงใหม่	-
12	เทาอ่อน	สงขลา	Ta(3.03%), W(1.60%), Mn(0.40%), Br(0.35%) Cr(0.23%), Al(0.11%), Dy(0.10%)
13	เหลืองซีด	-	-

อภิปรายผล และขอเสนอแนะ

จากรายงานของ E.S. Hedges (Tin and its alloys, 1960:P8) ในการวิเคราะห์ดีบุกบริสุทธิ์ 99.9% พบว่า ในอินโคเนเซียม มีตะกั่วปะปนมากที่สุดประมาณ 0.033% เหล็ก 0.007% และทองแดง 0.006% ในอังกฤษ, อเมริกา, และญี่ปุ่นก็พบตะกั่วปะปนอยู่มากที่สุดเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบทองแดงด้วย แต่ที่ผู้วิจัยทำ ไม่พบทองแดงและตะกั่วเลย เนื่องจากตะกั่วมีแอตเวชันครอสเซกชันต่ำมาก ไม่เหมาะแก่การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ ทองแดงอาจจะน้อยมากจนไม่สามารถตรวจพบได้

ทั้งนี้จากการใช้เทคนิควิเคราะห์นิวตรอนแอคทีเวชันเช่นเดียวกัน และใช้เครื่องวัด Ge(Li) detector อย่างเดียวกันของ W. Maenhaut; F. Adams, J. Hoste (Radioanal Chem, Vol.14, 1973, 295-315) ก็เราจะไม่พบตะกั่วเช่นกัน ธาตุที่เราพบในตัวอย่างดีบุกความบริสุทธิ์สูง 99.9999% มี Ag, Au, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, In, La, Na, Ni, Sc, W และ Zn แต่ผู้วิจัยหาพบ Dy, V, Gd, Al, Th, Mn, W, Br, Ga, As, Na, K, Zr, Ta, Sb, Fe, Sc, Zn, Tb, Yb, Hf, Hg, Cr, Co

ข้อที่แตกต่างกัน คือ

1. ผู้วิจัยพบรากมากกว่า
2. หลาย ๆ ธาตุที่ผู้วิจัยพบ แต่ในการวิจัยของ Maenhaut ไม่พบ ส่วนข้อที่เหมือนกันคือ ไม่พบตะกั่วและทองแดง ซึ่งโดยเทคนิคทางเคมีพบมาก เหตุผลที่อาจเป็นไปได้ในอันที่จะทำให้เกิดความแตกต่างนี้คือ

1. ตัวอย่างดินที่ผู้วิจัยนำมาวิจัยเป็นเพียงแร่ดินุ่ ความบริสุทธิ์ย่อม น้อยกว่า 99.9999% ฉะนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะพบธาตุปะปนหลายชนิดกว่า

2. สายแร่ของอเมริกาและประเทศไทย ไม่ใช่สายแร่เดียวกัน

(อุตสาหกรรม, กระทรวง, กรมโลหกิจ, 2513 : 17 - 21) ธาตุที่พบปะปนในแร่ดินุ่ จึงอาจต่างกันได้เห็นได้ชัดก็คือ Ta ในสารตัวอย่างที่ 4 มีถึง $9.62 \pm 0.06\%$ มีความเชื่อถือได้มากกว่า 99% แต่ในบทวิจัยของ Maenhaut ไม่พบ Ta เลย

ส่วนในการวิเคราะห์เชิงปริมาณนั้นมีความผิดพลาดเชิงสถิติ (Statistical error) สูง เพราะมีเวลาทำเพียงครั้งเดียวและอัตรานับต่ำ

ข้อเสนอแนะ

1. ผู้วิจัยควรจะมีพื้นความรู้ทางเคมี, นิวเคลียร์ฟิสิกส์ และธรณีวิทยาพอสมควร เพราะจะเป็นประโยชน์ในการวิจัย สรุปผลและค้นคว้าในเรื่องที่จะวิจัยเป็นอย่างดี
2. ผู้วิจัยควรจะมีเวลาทำซ้ำวิจัยมาก ๆ เพื่อผลการวิจัยจะได้มี Statistical error น้อย เพราะทำซ้ำได้หลายครั้ง
3. เป็นที่น่าสังเกตตามตาราง 8 ว่า แร่ที่บิสีไททาหรือม่วง (no. 4, 9, 10 12) จะมี Ta มากเป็นพิเศษ แร่ที่ออกทางสีแดง (no. 1, 6) จะมี As มากเป็น พิเศษ ส่วนแร่สีขาว, (no. 11) และเหลืองซีด (no. 13) นั้น บิธาตุต่าง ๆ ปะปนเป็น จำนวนน้อยมาก นอกจากเหตุผลทางธรณีวิทยาเกี่ยวกับการก่อตัวของผลึกแร่ สายแร่ อุดหนุน ความก่อก่อตัวเป็นผลึกแล้ว สีของแร่ก็น่าจะมีส่วนสัมพันธ์กับธาตุที่ปะปนด้วย จึงควรจะได้มีการวิจัยต่อไป

បរិយាកាស

บรรณานุกรม

พลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, สำนักงาน พลังงานปรมาณูเพื่อสันติในประเทศไทย ฉบับที่ 3,
พ.ศ. 2505, 87 หน้า.

วัลลภ บุญคง การวิเคราะห์หัตถเลกเดียม วารสาร Thai AEC ฉบับที่ 61 :
20 - 25, 1972.

วิชา เศรษฐบุตร, กร. คีบก .ไทยวัฒนาพานิช, 2513, 220 หน้า.

ศัลักษณ์ หรรพจน์ท์ ประโยชน์ของกัมมันตรังสีในกานการวิเคราะห์ วิทยาศาสตร์
5 : 358 - 369, 2507.

อนงค์ นิธิมูล, ม.ศ. การวิเคราะห์แบบแอคทีเวชัน เอกสารสำนักงานพลังงาน
ปรมาณูเพื่อสันติ (โรเนียว) 8 หน้า.

การใช้รังสีวิเคราะห์สิ่งของ วิทยาศาสตร์ 10 : 777 - 781, 2508.

Chase, Grafton D., and Rabinowitz, Joseph L., Principles of Radioisotope
Methodology, Burges Publishing Co., Minnesota, 1962, 372 pp.

Corliss, William R., Neutron Activation Analysis, USAEC, Tennessee,
1963, 27 pp.

Curtiss, L.F., Introduction to Neutron Physics, D. Van Nostrand Co., Inc.,
Affiliated East-West press PVT. LTD., New Delhi, 1969, 380 pp.

Egelstaff, P.A., Thermal (slow) Neutron Scattering, Academic press,
London.

Enge, Herald A., Introduction to Atomic Physics, Addison-Wesley
publishing Co., 1973, 486 pp.

Farnsworth, Marie, and Pekota, Joseph, The Determination of Small
Amounts of Impurities in Tin, Symposium on Tin, A.S.T.M., New York,
N.Y., 1952. pp. 58-83.

- Gueterbock, P.G.E., and G.N. Nicklin, The Effect of Impurities on the Properties of Tin, Journal, Soc. Chem. Ind., July 17, 1925, pp. 370-374.
- Hermann, F., Kiesel, W; Kluger, F., Hecht, F. (Univ., Vienna), Neutron Activation Analytical Determination of a number of Trace Elements in Meteoritic Phases, Mikvochim. Acta; No.2. 1971, pp. 225-240.
- Kerr, Francis Michael, The Detection and Measurement of Trace Elements in Human Hair Using Neutron Activation, (Thesis), University of Ottawa, 1964, 74 pp.
- Lambert, D.A., Techniques for the Use of Radioisotope in Analysis, E. and F.N. Spon Ltd., London, 1963, 135 pp.
- Lapp, Ralph E., and Andrews, Howard L., Nuclear Radiation Physics, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1954, 502 pp.
- Loderer, Michael C; Hollander, Jack M., Perlman, Isadore, Table of Isotopes, John Wiley & Sons, Inc, New York, March, 1968, 594 pp.
- Lenihan, J.M.A.; and Thomson, Activation Analysis, Academic press, London, 1965, 211 pp.
- Livesey, Derek. L., Atomic and Nuclear Physics, Blaisdell Publishing Co., Massachusetts, 1966, 525 pp.
- Lot, Fernand, Radioisotopes in Service of man, UNESCO , 1959, 82 pp.
- Lyon, Jr.; William S., Guide to Activation Analysis, D. Vannoststrand Co., Inc., New York, 1964, 186 pp.
- Maenhaut, F. Adams; J. Hoste (Ghent,Belgium), Determination of Trace Impurities in Tin by Neutron Activation Analysis, Journal of Radio. Anal. Chem, Elsevier Sequoia S.A., Lausanne , 1973, pp. 295-316.
- Oldenberg, Otto, Introduction to Atomic and Nuclear Physics, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1961, 379 pp.
- Overman, Ralph T.; and Clark, Herbert M., Radioisotope Techniques, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1960, 476 pp.
- Price, William J., Nuclear Radiation Detection, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1958, 382 pp.
- U.S. Department of Commerce, Modern Trends in Activation Analysis, National Bureau of Standards Special Publication 312, Vol. I & II, 1969, 1334 pp.