

การศึกษาเปรียบเทียบการวิเคราะห์ยูเรเนียมด้วย เทคนิคอาบนิวตรอนและเทคนิคนับรอยฟิชชัน

อริษฐ์ สิรินันทวีทย์^{1*} และ เซาว์ รอดทองคำ²

¹ ศูนย์บริการเทคโนโลยีนิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ 16 ถนนวิภาวดีรังสิต กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 0-25795230 ต่อ 1621 e-mail: modjaab@yahoo.com

² สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ 16 ถนนวิภาวดีรังสิต จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

บทคัดย่อ

ได้ศึกษาเปรียบเทียบการวิเคราะห์ยูเรเนียมในตัวอย่างของแข็งด้วยเทคนิคอาบนิวตรอนและเทคนิคนับรอยฟิชชันโดยใช้สารมาตรฐานอ้างอิงชนิดต่างๆ ได้แก่ แร่ ถ้ำถ่านหินและดิน โดยอาบตัวอย่างด้วยอิพิเทอร์มัลนิวตรอนแล้ววัดความแรงรังสีแกมมาที่พลังงาน 74.5 keV. ที่เกิดจาก U-239 และที่พลังงาน 277.7 ที่เกิดจาก Np-239 พบว่าการวัดแกมมาจาก U-239 ให้ผลวิเคราะห์ที่แม่นยำในตัวอย่างที่มีปริมาณยูเรเนียมสูง เช่น แร่ การวัดแกมมาจาก Np-239 จะให้ผลวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำสูงและมีความไวดีกว่าวัดแกมมาจาก U-239 ในตัวอย่างที่มียูเรเนียมในระดับต่ำๆ หรือต่ำกว่า 10 พีพีเอ็ม แต่ใช้เวลาในการวิเคราะห์มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ยูเรเนียมด้วยเทคนิคอาบนิวตรอนโดยวัดแกมมาจาก Np-239 และเทคนิคนับรอยฟิชชันพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในระดับความเชื่อมั่นที่ 95 %

คำสำคัญ: วิเคราะห์ยูเรเนียม อาบนิวตรอน เทคนิคนับรอยฟิชชัน

The Comparison Study of Neutron Activation Analysis and Fission Track Technique for Uranium Determination

Alice Sirinuntavid^{1*} and Chouvana Rodthongkom²

¹ Nuclear Research and Development Division, Thailand Institute of Nuclear Technology, 16 Vibhavadi

Rangsit Road, Chatuchak, Bangkok 10900 e-mail: modjaab@yahoo.com

² Office of Atoms for Peace, 16 Vibhavadi Rangsit Road, Chatuchak, Bangkok 10900

Abstract

Comparison between Neutron Activation Analysis (NAA) and fission track technique for uranium determination in solid samples was studied by use of standard reference materials, i.e., ore, coal fly ash, soil. For NAA, the epithermal neutron was applied for activated irradiation.

Then, the 74.5 keV gamma from U-239 or 277.7 keV gamma from Np-239 was measured. For high Uranium content samples, NAA method with 74.5 keV gamma measurement, gave higher precision result than the 277.7 keV gamma measurement method. NAA method with 277.7 keV gamma measurement, gave higher sensitivity and precision result for low Uranium content samples and the uranium contained less than 10 ppm samples. Nevertheless, the latter procedure needed longer time for neutron irradiation and analysis procedure. In comparison the results of Uranium analysis between NAA and fission track, it was found that no significant difference within 95 % of confidence level.

Keywords: Uranium analysis, NAA, Fission track

คำนำ

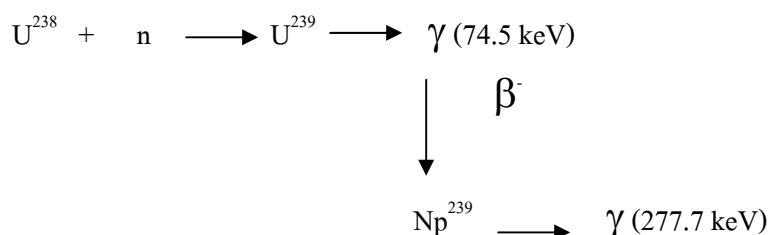
ยูเรเนียมเป็นธาตุที่มีในธรรมชาติที่มีมวลอะตอมหนักที่สุด ธาตุที่มีมวลอะตอมหนักกว่ายูเรเนียมเป็นธาตุที่ต้องสังเคราะห์ขึ้นในห้องทดลอง เนื่องจากเป็นธาตุที่มีปะปนอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ ซึ่งปรากฏในลักษณะ 3 ไอโซโทปดังนี้ U-234 มีในธรรมชาติ 0.0055 % U-235 มีในธรรมชาติ 0.720 % และ U-238 มีในธรรมชาติ 99.2745 % ทั้งสามไอโซโทปสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาหรือรังสีแอลฟา จึงจัดเป็นธาตุกัมมันตรังสีและเป็นโลหะหนัก ธาตุยูเรเนียมจึงเป็นธาตุที่เป็นพิษถ้าหากเข้าไปสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิต ทั้งมนุษย์ สัตว์ พืช ธัญญาหารต่างๆ และน้ำบริโภค องค์การอนามัยโลกได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพของน้ำดื่มและน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตอาหารให้มีปริมาณยูเรเนียมละลายอยู่ไม่เกิน 15 ppb (เดิมกำหนดไว้ 2 ppb) ดังนั้นจึงมีงานวิจัยศึกษาหาปริมาณยูเรเนียมระดับต่ำๆ ในสิ่งแวดล้อม ในอาหาร น้ำดื่ม และในปัสสาวะ เป็นต้น ซึ่งเป็นการศึกษาทางด้านการปนเปื้อนของยูเรเนียม แต่ในอีกด้านหนึ่ง คือทางด้านเศรษฐกิจ มีแร่ต่างๆ ที่มียูเรเนียมปะปนอยู่ และจะมีค่ามากถ้าหากมีปริมาณยูเรเนียมสูง เนื่องจากธาตุยูเรเนียมสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของปฏิกิริยาฟิชชัน แม้แต่ Pu-239 ซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงของปฏิกิริยาฟิชชันเช่นกันก็ผลิตจากตัวตั้งต้นคือ U-238 ดังนั้นยูเรเนียมจึงมีค่ามาก จึงมีการศึกษาหาวิธีวิเคราะห์ยูเรเนียมในปริมาณมากหรือในระดับเปอร์เซ็นต์เช่นกัน

เทคนิควิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมนั้นมีหลายวิธี เช่น เทคนิคสเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) ซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยการแยก หรือตรวจสอบพลังงานที่เปลี่ยนไปของนิวเคลียสอะตอม ไอออน หรือโมเลกุล พลังงานที่เปลี่ยนไปนั้นเนื่องจากการเกิดการคาย (emission) การดูดกลืน (absorption) หรือการกระเจิง (scattering) ของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าของอนุภาค เทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ที่สามารถใช้วิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมได้แก่ อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ยูเรเนียมโดยใช้เปลวไฟ (flame) เท่านั้น และไม่เป็น

ที่นิยมเนื่องจากมีความไวน้อย ส่วนเทคนิควิธี Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP) สามารถวิเคราะห์ยูเรเนียมได้ดีและไวกว่าเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี และเทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectroscopy Mass Spectrometry (ICP-MS) เทคนิคนี้มีความไวในการวิเคราะห์หายูเรเนียมสูงมาก และเป็นเทคนิคมาตรฐาน (standard method) หมายเลข 3125 ใน Standard Methods for Examination of Water and Waste Water 20th Edition 1998 เป็นการจรร่วมกันของสามหน่วยงานคือ American Public Health Association, American Water Works Association และ Water Environment Federation เทคนิคดังกล่าวนี้สามารถวิเคราะห์ยูเรเนียมตัวอย่างน้ำได้ดี ทั้งในน้ำดื่ม น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตอาหารและน้ำทิ้ง เนื่องจากระดับความเข้มข้นของยูเรเนียมในตัวอย่างน้ำเหล่านี้เป็นระดับ ppb จึงห้ามใช้ภาชนะที่เป็นแก้วในการปฏิบัติการวิเคราะห์ยูเรเนียมในตัวอย่างน้ำเหล่านี้ (เอกสารอ้างอิง 7) เนื่องจากยูเรเนียมในตัวอย่างจะถูกดูดกลืนโดยผิวแก้วในระดับ ppb เช่นกัน แม้ว่าจะเติมกรดในปริมาณที่สูง ก็ไม่สามารถลดปัญหานี้ได้ แต่ถ้าหากจะประยุกต์วิธีนี้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างของแข็งจะต้องย่อยตัวอย่างให้เป็นสารละลายก่อนจึงจะนำไปวิเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงไม่สะดวกนักสำหรับการใช้วิธีนี้วิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

ส่วนเทคนิคเชิงนิวเคลียร์ ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาภายในนิวเคลียส แตกต่างจากเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาภายนอกนิวเคลียส เทคนิคเชิงนิวเคลียร์ที่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียม ได้แก่ เทคนิคอาบนิวตรอน หรือเทคนิควิเคราะห์นิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation Analysis, NAA) และเทคนิคนับรอยฟิชชัน (Fission Track technique) ทั้งสองเทคนิคนี้มีความไวมากในการวิเคราะห์ยูเรเนียม ต้องอาศัยนิวตรอนเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส และอาศัยเครื่องมือในตรวจวัด (detect) ส่วนที่แตกต่างกันดังมีรายละเอียดบางประการนี้

เทคนิคอาบนิวตรอนหรือเทคนิควิเคราะห์นิวตรอนแอกติเวชันอาศัยประโยชน์จากปฏิกิริยานิวตรอนแกมมา (Neutron gamma reaction) โดยนำตัวอย่างอาบรังสีนิวตรอน แล้ววัดรังสีแกมมาที่เกิดขึ้น เช่นตัวอย่างที่ต้องการศึกษาหาปริมาณยูเรเนียม เมื่อนำไปอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกับสารมาตรฐานในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จะเกิดปฏิกิริยาต่างๆและปฏิกิริยานิวตรอนแกมมาดังนี้



การวัดความแรงรังสีแกมมาที่พลังงาน 74.5 keV. ที่เกิดจาก U-239 และที่พลังงาน 277.7 ที่เกิดจาก Np-239 สามารถใช้วิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมได้ โดยเทียบกับความแรงรังสีที่พลังงาน

เดียวกันกับสารมาตรฐาน เทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้วิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของแข็งเท่านั้น ส่วนตัวอย่างที่เป็นของเหลวหรือตัวอย่างน้ำนั้น ไม่เหมาะกับเทคนิคนี้

เทคนิคนับรอยฟิชชัน เนื่องจากยูเรเนียมเป็นธาตุที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ดีมากที่สุด โดย U-235 สามารถเกิดฟิชชันได้ง่ายกับเทอร์มัลนิวตรอน และ U-238 สามารถเกิดฟิชชันได้ดีกว่ากับอีพิเทอร์มัลนิวตรอนและนิวตรอนเร็ว เมื่อยูเรเนียมเกิดปฏิกิริยาฟิชชันหรือแตกตัวเป็นสองฟิชชันเฟรกเมนต์ ทั้งสองส่วนเป็นอนุภาคไอออนที่วิ่งไปในทิศตรงกันข้าม เมื่ออนุภาคไอออนวิ่งผ่านวัสดุฉนวนจะเหนี่ยวนำให้เกิดการทำลายพันธะเคมีของวัสดุฉนวน ตามแนวที่ไอออนวิ่งผ่าน เมื่อนำวัสดุนี้ไปทำการคัดรอยด้วยสารเคมีให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จะสามารถเห็นรอยที่เกิดจากอนุภาควิ่งผ่านได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา จำนวนที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นกับปริมาณยูเรเนียมในตัวอย่างที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน การนำตัวอย่างที่ประกอบด้วยวัสดุฉนวนหรือวัสดุบันทึกรอยไปอบรังสีนิวตรอนพร้อมกับสารมาตรฐานยูเรเนียมที่ประกอบด้วยวัสดุฉนวนชนิดเดียวกัน จะสามารถคำนวณปริมาณยูเรเนียมในตัวอย่างได้

การศึกษานี้เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของการวิเคราะห์ยูเรเนียมในตัวอย่างของแข็งด้วยเทคนิคอานิวตรอนและเทคนิคนับรอยฟิชชัน

วิธีการทดลอง

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอานิวตรอน

ได้ทดสอบการวิเคราะห์ยูเรเนียมด้วยสารมาตรฐานอ้างอิงชนิดต่างๆดังนี้ สารอ้างอิงที่เป็นดิน lake sediment รหัส SL-1 จาก International Atomic Energy Agency (IAEA) ซึ่งมียูเรเนียม 4.02 ± 0.32 ppm soil 7 จาก International Atomic Energy Agency (IAEA) มียูเรเนียม 2.2 ± 0.03 ppm สารอ้างอิงที่เป็นแร่โมนาไซต์ รหัส IGS 36 จาก Institute of Geological Sciences UK มียูเรเนียม 0.190 ± 0.036 % แร่พิตช์เบลนด์ รหัส 104-A จาก New Brunswick Laboratory USA มียูเรเนียม 0.00988 ± 0.0002 % สารอ้างอิงที่เป็นเถ้าถ่านหิน Coal Fly Ash รหัส 1633a จาก National Institute of Standards and Technology (NIST)) มียูเรเนียม 10.2 ± 0.1 ppm และ Coal Fly Ash รหัส Ech no. 12-1-03 จาก Czechoslovak Atomic Energy Commission Czechoslovakia มียูเรเนียมในช่วง 6.18 - 8.54 ppm และมีค่าเฉลี่ย 7.36 ppm นำสารมาตรฐานอ้างอิงเหล่านี้มาชั่งโดยใส่ในถุงที่เย็บจากแผ่นฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนบริสุทธิ์ ที่ผลิตสำหรับงานวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการอานิวตรอน โดยสถาบัน JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) ประเทศญี่ปุ่น เย็บเป็นถุงเล็กๆใส่สารมาตรฐานอ้างอิงดังกล่าวข้างต้นสองชั้น ติดสลากที่ชัดเจน

สารมาตรฐานยูเรเนียมเตรียมโดยนำสารประกอบยูเรเนียมออกไซด์ 99.97% NBL114 (New Brunswick Laboratory) มาละลายด้วยกรดไนตริก แล้วเตรียมเป็นสารละลายมาตรฐาน

ยูเรเนียม นำสารละลายมาตรฐานยูเรเนียมมาเปิดลงบนแผ่นฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนบริสุทธิ์ ทำให้แห้งด้วยความร้อนจากหลอดไฟอินฟราเรด แล้วเย็บเป็นถุงเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างข้างต้น

การอาบรังสีนิวตรอน อาบรังสีนิวตรอนในท่อที่มีแคดเมียมหุ้ม ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.-1/1 โดยอาบรังสีตัวอย่างซึ่งคือสารมาตรฐานอ้างอิงพร้อมกับสารมาตรฐานยูเรเนียมโดยใส่ในกระบอกอาบรังสีเดียวกันเป็นเวลา 20 นาที ทิ้งให้สลายตัวประมาณ 15 นาที ระหว่างรอการสลายตัว ตัดถุงชั้นนอกออกทิ้ง ใส่ในถุงเล็กๆใหม่ ปิดสติกแล้วจึงวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 74.5 keV. ของ U-239 ส่วนการศึกษาทดลองวิเคราะห์ยูเรเนียมจาก Np-239 ทำโดยอาบรังสีในท่อหุ้มแคดเมียมเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ทิ้งให้สลายตัว 2 วันแล้วจึงวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 277.7 keV. ของ Np-239 ที่มีค่าครึ่งชีวิต 2.35 วัน

ตัวอย่างที่วิเคราะห์เป็นตัวอย่างตะกอนดินได้นำรอบๆศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากจำนวน 7 ตัวอย่าง จากตำแหน่งต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3 เก็บตัวอย่างด้วยอุปกรณ์เก็บตะกอนได้น้ำ (grab) โดยหย่อนอุปกรณ์ดังกล่าวจากเรือเก็บตัวอย่าง แยกเอาเศษใบไม้ สาหร่ายและขยะออกจากตะกอน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำไปบดด้วยเครื่อง Centrifugal Ball Mill โดยตัวกรบดและลูกบดเป็นหินอาร์เกต (Argate) หลังจากนั้นจึงอบแห้งอีกครั้งหนึ่ง ตัวอย่างตะกอนได้น้ำนี้จะใช้วิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมทั้งสองวิธี เตรียมตัวอย่างโดยการชั่งตัวอย่างและวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมเช่นเดียวกับสารมาตรฐานอ้างอิงข้างต้น

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนับรอยฟิซชัน

นำสารมาตรฐานอ้างอิงต่างๆ และตัวอย่างตะกอนได้น้ำที่กล่าวมาข้างต้น มาวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมด้วยเทคนิคนับรอยฟิซชัน โดยนำมาอัดลงในช่องเล็กๆ 3 ช่องที่เจาะบนแผ่นพลาสติกอะคริลิกซึ่งใช้เป็นตัวยึดตัวอย่าง มีแผ่นไมก้าซึ่งเป็นวัสดุบดที่กรอบประกบปิดช่องทั้ง 3 อยู่ด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 1 แล้วปิดด้วยเทปใส ทั้งแผ่นไมก้าและแผ่นพลาสติกอะคริลิกก่อนนำมาใช้ จะทำการล้างก่อนด้วยกรดไนตริกที่เจือจาง 5 เท่าทิ้งไว้ 1 วัน แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง และทิ้งให้แห้ง

การเตรียมสารมาตรฐานจะเตรียมอย่างน้อย 5 จุดของความเข้มข้นยูเรเนียมที่ครอบคลุมความเข้มข้นของตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ โดยนำสารละลายมาตรฐานยูเรเนียมที่เตรียมได้ข้างต้น มาหยดบนผงสารประกอบกรดสเตียริก (stearic acid, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$) ที่ชั่งน้ำหนักแล้ว ซึ่งใช้เป็นตัวยึดและเป็นตัวยึดเหนี่ยว(binder)สารมาตรฐานยูเรเนียม โดยที่ปริมาณของสารละลายที่หยดลงไปไม่มากจนซึมผ่านผงกรดสเตียริกและทำให้สารละลายยูเรเนียมติดภาชนะที่บรรจุ ทำให้แห้งด้วยหลอดไฟอินฟราเรด จากนั้นนำผงดังกล่าวมาบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันด้วยกรบดอาร์เกต นำผงสารมาตรฐานยูเรเนียมที่มีความเข้มข้นต่างๆนี้มาอัดลงในช่องเล็กๆ 3 ช่องที่เจาะบนแผ่นพลาสติกอะคริลิก ที่มีแผ่นไมก้าประกบปิดเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างข้างต้น

นำตัวอย่างและสารมาตรฐานที่เตรียมได้ข้างต้นมาบรรจุในกระบอกเดียวกันสำหรับอาบรังสี นำไปอาบรังสีนิวตรอนในท่อเปิดที่ไม่มีแคดเมียมหุ้ม ซึ่งจะมีความเข้มข้นของเทอร์มัลนิวตรอน 3.6×10^{11} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที และมีความเข้มข้นของอีพิเทอร์มัลนิวตรอน 1.9×10^9 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมงสำหรับตัวอย่างตะกอนได้น้ำและสารมาตรฐานอ้างอิงชนิดดินและเถาถ่านหิน ส่วนสารมาตรฐานอ้างอิงที่เป็นแร่จะใช้เวลาอาบประมาณ 2 ชั่วโมง การอาบรังสีในท่อนี้ทั้ง U-235 และ U-238 ในตัวอย่างจะเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน

หลังจากอาบรังสีแล้วจะทิ้งให้รังสีสลายตัวประมาณ 2 วัน จากนั้นแยกเอาแผ่นไมก้าออกทำความสะอาดด้วยน้ำสบู่เจือจางและตามด้วยกรดไนตริก แล้วนำการสักรอยฟิชชันให้ใหญ่ขึ้นด้วยการแช่กรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 1 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนหมดกรด นำแผ่นไมก้าไปประกอบเป็นสไลด์ แล้วนับรอยที่เป็นรูปข้าวหลามตัดโดยมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 500 เท่า ลักษณะรอยฟิชชันบนแผ่นไมก้าแสดงในรูปที่ 3 การนับรอยจะนับรอยในพื้นที่ขนาด 0.22×0.22 มม. จำนวน 30 พื้นที่แล้วนำมารวมกัน จะได้ค่าจำนวนรอยนี้ 3 ค่าจากช่อง 3 ช่องที่อัดตัวอย่างลงไป 3 ช่องบนแผ่นไมก้า นำจำนวนรอยทั้งสามค่านี้มาหาค่าเฉลี่ย จำนวนรอยที่ได้จากสารมาตรฐานยูเรเนียมความเข้มข้นต่าง ๆ นำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างจำนวนรอยกับความเข้มข้นยูเรเนียม ใช้กราฟเปรียบเทียบนี้คำนวณหาปริมาณยูเรเนียมในตัวอย่าง

สำหรับการแก้เบคกราวด์หรือการทำ blank correction สามารถทำได้โดยนำกรดเสตียริกที่ไม่ได้เติมสารใด ๆ มาเตรียมเช่นเดียวกับการตัวอย่าง

ผลการทดลองและวิจารณ์

สารมาตรฐานอ้างอิงชนิดต่างๆถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของเทคนิคเชิงนิวเคลียร์สองเทคนิค คือเทคนิคอาบนิวตรอนและเทคนิคนับรอยฟิชชัน เป็นเทคนิคที่ไม่ต้องทำลายตัวอย่าง หรือไม่ต้องย่อยตัวอย่างให้เป็นสารละลายก่อน จึงเหมาะกับตัวอย่างที่เป็นของแข็ง สารมาตรฐานอ้างอิงมีชนิดที่เป็นแร่สองตัวอย่างคือ แร่โมนาไซต์ (IGS-36) และพิตช์เบลนด์ (104-A) สารมาตรฐานอ้างอิงชนิดเถาถ่านหินมี Coal Fly Ash รหัส 1633a จาก National Institute of Standards and Technology (NIST) และ Coal Fly Ash รหัส Ech no. 12-1-03 จาก Czechoslovak Atomic Energy Commission Czechoslovakia สารมาตรฐานอ้างอิงชนิดที่เป็นดิน มี lake sediment รหัส SL-1 และ soil 7 จาก International Atomic Energy Agency (IAEA) ผลการวิเคราะห์ยูเรเนียมในสารมาตรฐานอ้างอิงเหล่านี้ด้วยเทคนิคอาบนิวตรอน แล้ววัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 74.5 keV. และที่พลังงาน 277.7 keV. แสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์ยูเรเนียมด้วยเทคนิคนับรอยฟิชชันนั้นแสดงในตารางที่ 3

ส่วนตารางที่ 4 แสดงผลวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมในตัวอย่างตะกอนได้น้ำจากศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากด้วยเทคนิคอาบนิวตรอนและเทคนิคนับรอยฟิชชัน

ตารางที่ 1 เป็นผลการวิเคราะห์ยูเรเนียมด้วยเทคนิคอาบนิวตรอนโดยอาบรังสีนิวตรอนในท่อที่หุ้มแคดเมียม แคดเมียมมีความสามารถในการจับกับเทอร์มัลนิวตรอนได้ดีมาก ในท่ออาบนิวตรอนนี้จึงมีอิทธิพลของเทอร์มัลนิวตรอนสูงทำปฏิกิริยากับยูเรเนียมในตัวอย่าง ยูเรเนียม-238 มีความสามารถในการจับอิทธิพลของเทอร์มัลนิวตรอนได้ดีกว่าเทอร์มัลนิวตรอน ในขณะที่ธาตุอื่นๆเช่น โซเดียมมีความสามารถในการจับอิทธิพลของเทอร์มัลนิวตรอนได้ไม่ดีนัก แกมมาสเปกตรัมจากธาตุเหล่านี้จึงไม่รบกวนการวัดแกมมาจากยูเรเนียม-239 ยูเรเนียม-239ให้รังสีแกมมาที่มีความเข้ม (intensity) สูงที่พลังงาน 74.5 keV. มีค่าครึ่งชีวิต 23.5 นาที เนื่องจากค่าครึ่งชีวิตของยูเรเนียม-239สั้น ดังนั้นระยะเวลาการอาบไม่ควรจะใช้เวลานานนัก ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เวลาอาบ 20 นาที ถ้าหากอาบรังสีด้วยเวลาที่มากขึ้น ความเข้มของรังสีแกมมาจากยูเรเนียม-239จะมากขึ้น ขณะเดียวกันมีบางไอโซโทปของยูเรเนียม-239 สลายตัวระหว่างการอาบรังสี และมีรังสีจากไอโซโทปอื่นๆที่มีความแรงรังสีสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้เกิด dead time และสเปกตรัมของ compton effect ขณะวัดรังสีจะสูงมากขึ้น ซึ่งจะรบกวนการวัดรังสี วิธีลดอิทธิพลเหล่านี้คือจะต้องทิ้งให้สลายตัวไป หรือให้ decay time นานมากขึ้น กรณีหลังนี้จะเหมาะกับการวิเคราะห์ไอโซโทปที่มีค่าครึ่งชีวิตที่ค่อนข้างยาว คือเหมาะที่จะใช้วิเคราะห์โดยวัดแกมมาจาก Np-239 ที่มีค่าครึ่งชีวิต 2.35 วัน ดังนั้นผลวิเคราะห์จากตารางที่ 1 ที่วัดแกมมาจาก ยูเรเนียม-239 นั้น สามารถวิเคราะห์ยูเรเนียมที่มีปริมาณสูงๆคือ แร่โมนาไซต์ (IGS-36) และแร่พิตช์เบลนด์(104-A)ได้ดี ส่วนสารมาตรฐานอ้างอิงชนิดเถาถ่านหินและชนิดดิน ซึ่งมีปริมาณยูเรเนียมต่ำในระดับไม่เกิน 10 พีพีเอ็ม ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากความเข้มของสเปกตรัมที่พลังงาน 74.5 keV.จากสารมาตรฐานอ้างอิงสองชนิดหลังนี้ ไม่สูงกว่าแบคกราวด์นัก และที่แบคกราวด์ก็มีสเปกตรัมแกมมาที่พลังงานนี้ที่ 74.5 keV อยู่

จากตารางที่ 1 พิจารณาค่า RSD (Relative Standard Deviation) ของผลวิเคราะห์แร่โมนาไซต์ (IGS-36) ดีกว่าแร่พิตช์เบลนด์ เนื่องจาก IGS-36 มียูเรเนียมเข้มข้นมากกว่า จึงมีความเข้มสเปกตรัมแกมมาที่สูงกว่า โดย RSD% เท่ากับ $(SD/X) \times 100 \%$ ส่วนค่า T-test นั้นเท่ากับ $(|x - \mu| \times n^{1/2}) / SD$ โดยที่ μ คือค่ารายงานความเข้มข้นยูเรเนียมในสารมาตรฐานอ้างอิง n คือจำนวนตัวอย่างในที่คือ 6 ค่า T-test ที่ได้จากผลวิเคราะห์ในตารางที่ 1 ไม่เกินค่า T- critical value ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.57 ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % หรือค่า P value ที่ 0.05 และที่ degree of freedom(df.) เท่ากับ 5 (df. = n-1) ค่า T-test จากตารางที่ 1 มีค่าน้อยกว่า 2.57 แสดงว่าผลวิเคราะห์ที่ได้ไม่แตกต่างจากค่ารายงานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในการคำนวณ T-test ของ Ech 12-1-03 ค่ารายงานที่ใช้คือค่าเฉลี่ยที่เท่ากับ 7.36 พีพีเอ็ม

ค่า RSD บอกการกระจายมากน้อยของข้อมูล ค่า RSD ที่น้อยกว่าของผลวิเคราะห์ IGS-36 แสดงว่าผลวิเคราะห์ IGS-36 มีความแม่นยำมากกว่าผลวิเคราะห์แร่พิทช์เบลนด์ ค่า T-test บอกความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ว่าแตกต่างมากน้อยไปจากค่ารายงานมากน้อยเพียงไร ซึ่งในที่นี้ผลวิเคราะห์ IGS-36 มีความแตกต่างจากค่ารายงานมากกว่าผลวิเคราะห์แร่พิทช์เบลนด์ จากผลวิเคราะห์ยูเรเนียมในแร่ทั้งสองชนิดสามารถสรุปได้ว่าไม่แตกต่างจากค่ารายงาน เนื่องจากค่า T-test ต่ำกว่าค่า T-critical value ที่เท่ากับ 2.57 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 2 ซึ่งวิเคราะห์ยูเรเนียมโดยวัดแกมมาจาก Np-239 ซึ่งเกิดจาก U-239 สลายรังสีบีตา แล้วเกิด Np-239 ที่ค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 2.35 วัน เนื่องจาก Np-239 มีค่าครึ่งชีวิตที่ค่อนข้างยาว ทำให้วิธีวิเคราะห์นี้จึงสามารถเพิ่มเวลาการอาบรังสีให้มากขึ้นเป็น 10 ชั่วโมง เพื่อจะเพิ่มความไวในการวิเคราะห์ ให้สามารถวิเคราะห์ได้ดีในระดับประมาณ 10 พีพีเอ็ม อย่างไรก็ตามระยะเวลาการอาบรังสีและระยะเวลาสลายตัวสามารถปรับได้ ซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นของยูเรเนียมมีมากน้อยเพียงไร ในตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์สารมาตรฐานอ้างอิงต่างๆมีค่า RSD% ไม่แตกต่างกันนักคือประมาณเท่ากับ 5 ยกเว้น SL-1 และ Soil 7 มีค่า RSD% สูงเท่ากับ 11.56 และ 15.42 ตามลำดับ เนื่องจาก สารมาตรฐานอ้างอิงทั้งสองมีปริมาณยูเรเนียมต่ำมาก ผลวิเคราะห์จึงมีการกระจายมากจากค่า T-test ของทุกๆสารมาตรฐานอ้างอิงต่ำกว่าค่า T-critical value ที่ เท่ากับ 2.57 เมื่อ $df = 5$ และ $p \text{ value} = 0.05$ ซึ่งชี้บอกว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ผลการวิเคราะห์ยูเรเนียมในสารมาตรฐานอ้างอิงทุกตัวไม่แตกต่างจากค่ารายงานหรือค่ารับรองนั่นเอง และสามารถสรุปว่าการวิเคราะห์ยูเรเนียมด้วยวิธีอาบนิวตรอน โดยวัดและวิเคราะห์แกมมาจาก Np-239 นั้น ให้ผลวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำสูงและมีความไวดีกว่าวัดและวิเคราะห์แกมมาจาก U-239 โดยเฉพาะการวิเคราะห์ยูเรเนียมในระดับต่ำมากๆ หรือต่ำกว่า 10 พีพีเอ็ม

ตารางที่ 3 เป็นผลการวิเคราะห์ยูเรเนียมด้วยเทคนิคนับรอยฟิชชัน จากการวิเคราะห์พบว่าในการอาบรังสีที่เวลาเท่ากันนั้น จำนวนรอยต่อพื้นที่แปรตามความเข้มข้นของยูเรเนียมเป็นเส้นตรงโดยไม่ขึ้นกับชนิดของตัวอย่าง เนื่องจากการแตกตัวของธาตุยูเรเนียมไม่ขึ้นกับอิทธิพลใดๆ หรือขึ้นกับองค์ประกอบใดๆในตัวอย่างนั้น นอกจากพลังงานของนิวตรอนที่เข้าทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของยูเรเนียม การแปรผันโดยตรงเป็นเส้นตรงโดยตลอดของจำนวนรอยกับความเข้มข้นของยูเรเนียม ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณยูเรเนียมได้โดยการเปรียบเทียบกันโดยตรง เช่นเดียวกับเทคนิคอาบนิวตรอน ในการศึกษาที่ใช้เวลาในการอาบนิวตรอนไม่เท่ากันในแต่ละชนิดตัวอย่าง โดยสารมาตรฐานอ้างอิงชนิดแรกใช้เวลาอาบรังสี 2 ชั่วโมง ส่วนสารมาตรฐานอ้างอิงชนิดถัดมา หิน ดิน และตัวอย่างตะกอนได้นำใช้เวลาอาบรังสี 6 ชั่วโมง

จากตารางที่ 3 ค่า T-test ของทุกสารมาตรฐานอ้างอิงมีค่าต่ำกว่าค่า T-critical ซึ่งเท่ากับ 2.57 ซึ่งชี้บอกว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ผลการวิเคราะห์ยูเรเนียมในสารมาตรฐานอ้างอิงทุกตัว

ไม่แตกต่างจากค่ารายงานหรือค่ารับรองอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อสังเกตค่า RSD% ของสารมาตรฐานอ้างอิง IGS-36 และ Soil7 มีค่าสูงกว่าสารมาตรฐานอ้างอิงตัวอื่นๆ เนื่องจากจำนวนรอยที่เกิดจาก IGS-36 มีความหนาแน่นมาก บางรอยมีบางส่วนซ้อนทับกับรอยอื่นๆ ทำให้การนับรอยค่อนข้างยาก จึงเป็นเหตุให้ผลวิเคราะห์ที่ได้มีการกระจายสูงกว่า ส่วนสารมาตรฐานอ้างอิง Soil 7 มีจำนวนรอยต่อในแต่พื้นที่ที่นับน้อย บางพื้นที่ไม่มีรอยฟิซชัน ซึ่งจะต้องนับเป็นศูนย์ จำนวนรอยที่น้อยไป จึงเป็นเหตุให้ผลวิเคราะห์ที่มีค่าการกระจายสูงได้เช่นกัน ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มเวลาอบรังสีสำหรับการวิเคราะห์ soil 7 และลดเวลาอบรังสีสำหรับการวิเคราะห์ IGS-36

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ยูเรเนียมโดยวิธีอาบนิวตรอนในตารางที่ 2 มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ยูเรเนียมโดยวิธีนับรอยฟิซชันในตารางที่ 3 ทำการศึกษาเปรียบเทียบโดยใช้วิธีทางสถิติคือ T-test two samples โดยที่

$$T = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{S_p \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)^{1/2}}$$

$$S_p = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

S_p คือ pooled variance $\bar{X}$ คือค่าเฉลี่ย (mean) S คือ ค่า SD 1 คือค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอาบนิวตรอนคือตารางที่ 2 คือค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนับรอยฟิซชันหรือคือตารางที่ 3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบในแต่ละชนิดสารมาตรฐานอ้างอิงได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4 จากตารางที่ 4 ค่า T-test ที่บอกความแตกต่างของการวิเคราะห์สองเทคนิคนั้น มีค่าน้อยกว่าค่า T-critical ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ค่า $df = 10$ ($df = n_1 + n_2 - 2$) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.23 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์ยูเรเนียมด้วยเทคนิคอาบนิวตรอนและเทคนิคนับรอยฟิซชันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในระดับความเชื่อมั่นที่ 95 %

จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนได้นำจากศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก เปรียบเทียบกันทั้งสองเทคนิคดังแสดงในตารางที่ 5 จะเห็นว่าค่าที่ได้ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละตัวอย่างทำการวิเคราะห์ซ้ำสองครั้ง จึงไม่ได้คำนวณค่า T-test ในกลุ่มตัวอย่างนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Igarashi Y., Yamakawa A., Seki R., and Ikeda N., Determination of Uranium in Japanese Human Tissues by the fission track method, Health Physics, 40, 707-712, 1989.
2. Fleischer R.L., P.B. Price and R.T. Woods, Nuclear – Particle- Track Identification in Inorganic Solids< Physical Review, 188, 563-567 , 1979

3. ดิเชลล์ สนวนบุรี, การวิเคราะห์ไอโซโทปยูเรเนียม-235 จากระอยฟิชชันแฟรกเมนต์บนแผ่นไมลาร์ เมื่ออาบรังสีเทอร์โมนิวตรอนความเข้มต่ำ, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530
4. International Atomic Energy Agency, Sampling and Analytical Methodologies for Instrumental Neutron Activation Analysis of Airborne Particulate Matter, 1992, P. 36-38
5. Lamarsh, J.R., Introduction to Nuclear Engineering, Addison-Wesley, New York, 1975
7. American Public health Association, American water Works Association, Water environment Federation, Standard Methods for the Examination of water and waste water 20th edition 1998
6. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตร Method Validation for Chemical Laboratories , วันที่ 6-7 กุมภาพันธ์ 2546 ศูนย์ฝึกอบรมและพัฒนาเทคนิควิทยาศาสตร์ กองศึกษาเคมีปฏิบัติ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
7. กัลยา วานิชย์บัญชา, การวิเคราะห์สถิติ : สถิติเพื่อการตัดสินใจ, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์ยูเรเนียมในสารมาตรฐานอ้างอิงต่างๆ 6 ครั้ง ด้วยเทคนิคอาบนิวตรอนและวัดที่รังสีแกมมาที่พลังงาน 74.5 keV.

คำรายงาน และครั้งที่ วิเคราะห์	IGS-36 แร่โมนาไซต์ (%)	104-A แร่พิตช์เบลนด์ (%)	1633-a Coal Fly Ash (ppm)	Ech 12-1-03 Coal Fly Ash (ppm)	SL-1 Lake sediment (ppm)	Soil 7 Soil (ppm)
คำรายงาน	0.190±0.036	0.00988±0.0002	10.2 ± 0.1	6.18-8.54	4.02±0.32	2.2±0.03
ครั้งที่ 1	0.182	0.00945	ND.	ND.	ND.	ND.
ครั้งที่ 2	0.196	0.00898	ND.	ND.	ND.	ND.
ครั้งที่ 3	0.186	0.00998	ND.	ND.	ND.	ND.
ครั้งที่ 4	0.203	0.00898	ND.	ND.	ND.	ND.
ครั้งที่ 5	0.198	0.0120	ND.	ND.	ND.	ND.
ครั้งที่ 6	0.188	0.0108	ND.	ND.	ND.	ND.
X + SD	0.192±0.0081	0.0100±0.0011				
RSD%	4.22 %	11 %				
ค่า T-test	0.61	0.27				

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์ยูเรเนียมในสารมาตรฐานอ้างอิงต่างๆ 6 ครั้ง ด้วยเทคนิคอาบนิวตรอนและวัดที่รังสีแกมมาที่พลังงาน 277.7 keV.

คำรายงาน และครั้งที่ วิเคราะห์	IGS-36 แร่โมนาไซต์ (%)	104-A แร่พิคซ์เบลนด์ (%)	1633-a Coal Fly Ash (ppm)	Ech 12-1-03 Coal Fly Ash (ppm)	SL-1 Lake sediment (ppm)	Soil 7 Soil (ppm)
คำรายงาน	0.190±0.036	0.00988±0.0002	10.2 ± 0.1	6.18-8.54	4.02±0.32	2.2±0.03
ครั้งที่ 1	0.180	0.00963	9.52	7.84	4.54	2.03
ครั้งที่ 2	0.192	0.0110	10.1	7.12	3.83	1.84
ครั้งที่ 3	0.179	0.00975	9.96	7.80	4.71	2.72
ครั้งที่ 4	0.186	0.00995	10.6	8.03	4.95	1.87
ครั้งที่ 5	0.197	0.0105	10.8	7.84	3.92	2.45
ครั้งที่ 6	0.204	0.00980	9.06	6.95	5.02	1.90
X + SD	0.189±0.010	0.0101±0.00053	10.01±0.59	7.59±0.41	4.49±0.51	2.14±0.33
RSD%	5.29%	5.25%	5.89%	5.40%	11.36%	15.42%
ค่า T-test	0.24	1.02	0.79	1.37	2.26	0.44

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ยูเรเนียมในสารมาตรฐานอ้างอิงต่างๆ 6 ครั้ง ด้วยเทคนิคนับรอยฟิชชัน

คำรายงาน และครั้งที่ วิเคราะห์	IGS-36 แร่โมนาไซต์ (%)	104-A แร่พิคซ์เบลนด์ (%)	1633-a Coal Fly Ash (ppm)	Ech 12-1-03 Coal Fly Ash (ppm)	SL-1 Lake sedimen t (ppm)	Soil 7 Soil (ppm)
คำรายงาน	0.190±0.036	0.00988±0.0002	10.2 ± 0.1	6.18-8.54	4.02±0.32	2.2±0.03
ครั้งที่ 1	0.182	0.0105	9.56	6.83	4.43	2.41
ครั้งที่ 2	0.209	0.0110	9.24	7.93	4.27	2.03
ครั้งที่ 3	0.170	0.00992	10.6	7.02	3.85	1.85
ครั้งที่ 4	0.176	0.00976	11.1	8.07	3.91	1.96
ครั้งที่ 5	0.194	0.00983	10.7	7.40	4.49	2.14
ครั้งที่ 6	0.212	0.0108	9.74	6.96	4.01	2.26
X + SD	0.191±0.0159	0.0103±0.00049	10.16±0.68	7.37±0.48	4.16±0.25	2.11±0.18
RSD%	8.32%	4.75%	6.69	6.51%	6.01%	8.53%
ค่า T-test	0.154	2.10	0.14	0.051	1.37	1.22

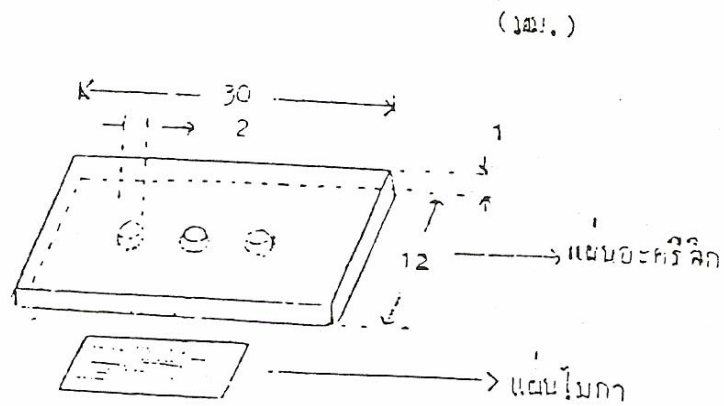
ตารางที่ 4 ค่าสถิติต่างๆจากศึกษาเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จากตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ค่าสถิติ	IGS-36 แร่โมนาไซต์ (%)	104-A แร่พิรเบลนด์ (%)	1633-a Coal Fly Ash (ppm)	Ech 12-1-03 Coal Fly Ash (ppm)	SL-1 Lake sediment (ppm)	Soil 7 Soil (ppm)
n_1	6	6	6	6	6	6
n_2	6	6	6	6	6	6
X_1	0.189	0.0101	10.01	7.59	4.49	2.14
X_2	0.191	0.0103	10.16	7.37	4.16	2.11
S_1	0.010	0.00053	0.59	0.41	0.51	0.33
S_2	0.0159	0.00049	0.68	0.48	0.25	0.18
S_p	0.0133	0.00051	0.636	0.446	0.402	0.266
T-test	0.26	0.68	0.41	0.85	1.42	0.19
T-critical (95 %)	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23

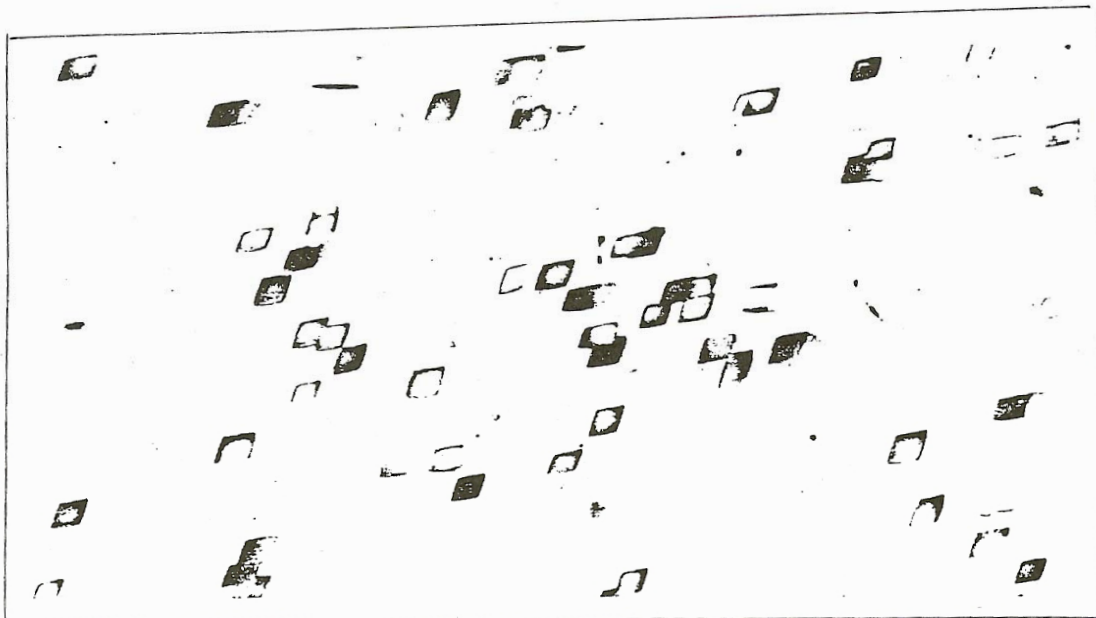
ตารางที่ 5 ผลวิเคราะห์ยูเรเนียมด้วยเทคนิคต่างๆในตัวอย่างตะกอนได้น้ำจากศูนย์วิจัยและพัฒนา

ธาตุหายาก

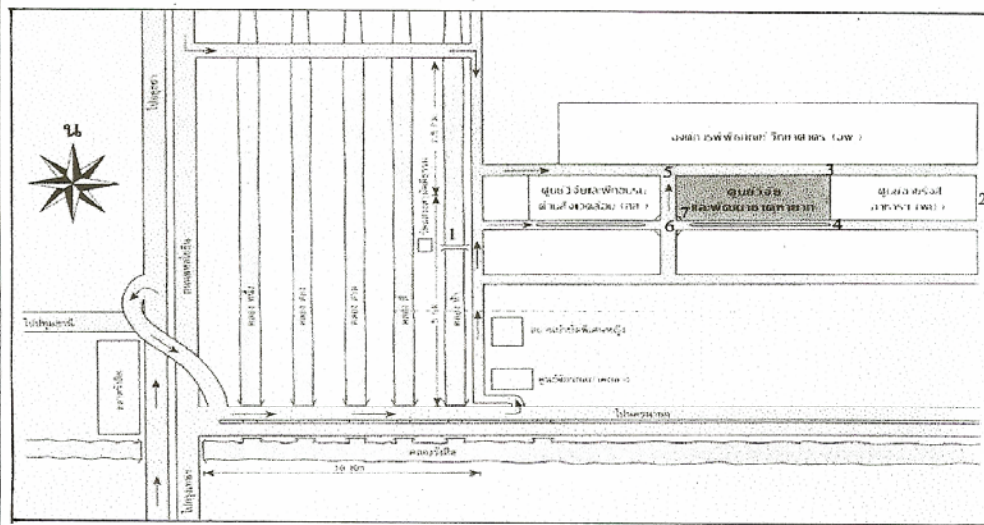
ตำแหน่งที่ เก็บตัวอย่าง	อาบนิวตรอนและ วัดแกมมาที่ 74.5keV	อาบนิวตรอนและ วัดแกมมาที่ 277.7 keV (ppm)	นับรอยฟิชชัน (ppm)
จุดที่ 1	ND	6.09±0.27	5.84±0.41
จุดที่ 2	ND	6.09±0.43	5.73±0.42
จุดที่ 3	ND	5.73±0.31	5.68±0.46
จุดที่ 4	ND	5.16±0.42	5.36±0.33
จุดที่ 5	ND	5.49±0.32	5.36±0.45
จุดที่ 6	ND	5.65±0.45	5.54±0.41
จุดที่ 7	ND	6.36±0.56	6.76±0.45



รูปที่ 1 แผ่นอะคริลิกที่เจาะเป็นช่อง 3 ช่องมีแผ่นไมก้าประกบปิดช่องอยู่ด้านหนึ่ง



รูปที่ 2 รอยรูปข้าวหลามตัดที่จากฟิซชันแฟรกเมนต์ชนแผ่นไมก้า ภาพขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งต่างๆในการเก็บตัวอย่างตะกอนใต้รอบๆและภายในศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

ตำแหน่งที่ 1 ห่างจากศูนย์ประมาณ 1 กิโลเมตร

ตำแหน่งที่ 2, 3, 4, 5, 6 ห่างกันประมาณ 250 เมตร

ตำแหน่งที่ 7 เป็นตำแหน่งบ่อน้ำบาดลที่เป็นบ่อน้ำดินอยู่ภายในศูนย์ ห่างจากจุดที่ 6 ประมาณ 8 เมตร