



บทที่ 2

## ทฤษฎีเกี่ยวกับการสำรวจยูเรเนียม

### 2.1 ความนำ

ปริมาณยูเรเนียมในเปลือกโลกมีประมาณ 2 ส่วนในล้านส่วน สามารถวัดได้แทบทุกที่บนเปลือกโลก ปริมาณที่มีอยู่มากกว่า ทอง เงิน และปรอทมาก มีปริมาณเท่า ๆ กับดีบุก แต่มีปริมาณน้อยกว่าโคบอลต์ ตะกั่ว และโมลิบดีนัมเล็กน้อย หินบนเปลือกโลกเรานี้ทุก 500,000 กิโลกรัม จะมียูเรเนียมประมาณ 1 กิโลกรัม และมีทองเร็วมมากกว่ายูเรเนียมประมาณ 6 เท่า

ปริมาณยูเรเนียมในหินมีมากกว่าในน้ำมาก สำหรับในหินอัคนี (igneous rock) ที่มีซิลิกาสูง เช่น หินแกรนิตจะมียูเรเนียมประมาณ 4 ส่วนในล้านส่วน ส่วนในน้ำทะเลมี ยูเรเนียมประมาณ 2 ส่วนในพันล้านส่วน สำหรับในดิน และน้ำในแม่น้ำลำคลองโดยทั่วไปจะมียูเรเนียมปริมาณน้อยมาก

ยูเรเนียมมีความคล้ายกับธาตุโลหะอื่น ๆ กล่าวคือ จะไม่เกิดในรูปของโลหะอิสระแต่จะเกิดร่วมกับออกซิเจนและธาตุอื่น ๆ โดยปกติจะเกิดในรูปของยูเรเนียมออกไซด์ ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ยูเรนิไนต์ (Uraninite) หรือ แร่พิทช์เบลนด์ (Pitchblend) สำหรับแร่ยูเรเนียมอื่น ๆ ได้แก่ยูเรเนียมไฮดรรัสซิลิเกต (Uranium hydrous silicate) หรือ คอฟฟินไนต์ (Coffinite) และโปแตสเซียม ยูเรเนียม วานาเดต (Potassium uranium vanadate) หรือ คาร์โนไทต์ (carnotite) นอกจากนี้ยังมีแร่ยูเรเนียมชนิดอื่นอีกมากกว่า 100 ชนิด แต่ที่สำคัญมีเพียงไม่กี่ชนิดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียมที่มีอยู่ในแร่

### 2.2 การสำรวจยูเรเนียมในประเทศไทย\*

กรมทรัพยากรธรณีได้เริ่มศึกษาเกี่ยวกับ การสำรวจแหล่งแร่ กัมมันตภาพรังสีตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2493 ต่อมาได้ตรวจพบแร่ยูเรเนียมเกิด

\* ข้อมูลจาก IAEA

ร่วมกับคาสซิเตอร์ไรต์ (cassiterite) ในตะกอนลุ่มน้ำเขตจังหวัดอุทัยธานี ในปี พ.ศ. 2501 ต่อมาในปี พ.ศ. 2504 พบแร่ซามาร์สไคต์ (samarskite) ในลานแร่ดิบทุกทั่วไป และในปี พ.ศ. 2505 พบแร่เทอร์โบไนต์ (แร่ยูเรเนียมทุติยภูมิ) จำนวนเล็กน้อยในหินแกรนิตแปรรูป ในเขตจังหวัดสงขลา ต่อมาพบแร่ยูเรเนียมที่ อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2513 การค้นพบครั้งนี้ทำให้มีการเริ่มต้นสำรวจอย่างจริงจังเป็นครั้งแรก

ในช่วงเดือน สิงหาคม พ.ศ. 2519 ถึง เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2520 กรมทรัพยากรธรณี ร่วมกับ หน่วยงานหลายฝ่าย ได้เข้าร่วมโครงการสำรวจร่วมกับ International Atomic Energy Agency (IAEA) ในบริเวณแหล่งแร่ภูเวียง และ บริเวณใกล้เคียง การสำรวจทางอากาศในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้เริ่มทำในปี พ.ศ. 2522 ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 36800 ตารางกิโลเมตร

ระหว่างปี พ.ศ. 2524-2525 มีการสำรวจเฉพาะในเขตจังหวัด ชัยภูมิ และ ขอนแก่น โดยได้รับความช่วยเหลือจาก สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี และ IAEA การสำรวจใช้หลายวิธี เช่น วิธีทางธรณีเคมี ธรณีฟิสิกส์ และวิธีเรดิโอเมตริก โดยใช้หัววัดเรืองรังสีแบบผลึก NaI(Tl) ตีครดยนต์สำรวจในที่ต่าง ๆ ครอบคลุมพื้นที่ 8000 ตารางกิโลเมตร

ปี พ.ศ. 2526 กรมทรัพยากรธรณีได้เริ่มโครงการสำรวจยูเรเนียม ในบริเวณที่ราบสูงโคราชด้านทิศตะวันตก ครอบคลุมพื้นที่ 8000 ตารางกิโลเมตร ในเขตจังหวัด อุครธานี หนองคาย และขอนแก่น และในปีเดียวกันนี้ กรมทรัพยากรธรณี ได้เริ่มโครงการสำรวจ ระยะ 5 ปี การสำรวจครั้งนี้มี ทั้งการบินสำรวจ ทางรังสี และทางแม่เหล็ก (airborne radiometric and magnetic surveys) โดยครอบคลุมพื้นที่ทั้งประเทศ จากนั้นจึงจะเริ่มการสำรวจภาคพื้นดินต่อไป

### 2.3 ชนิดของแร่ยูเรเนียม (1)

นักธรณีวิทยาแบ่งแร่ยูเรเนียม ตามลักษณะการเกิดเป็นสองกลุ่ม คือ แร่ยูเรเนียมปฐมภูมิ (Primary uranium minerals) และแร่ยูเรเนียมทุติยภูมิ (Secondary uranium minerals)

#### 2.3.1 แร่ยูเรเนียมปฐมภูมิ

แร่ยูเรเนียมปฐมภูมิ คือ แร่ยูเรเนียมที่เกิดขึ้นจากภายในโลกพร้อมกับหินอัคนี โดยอยู่ในสภาพที่หลอมเหลวด้วยกิริยาอิกเนียส (Igneous

action) เมื่อเย็นลงจะแข็งตัวมีลักษณะเป็นสายแร่ แร่ยูเรเนียมปฐมภูมิจะคงลักษณะเดิมไว้ แร่พวกนี้มีสีค่อนข้างแก่ เช่น สีดำ หรือน้ำตาลดำ น้ำตาล และน้ำตาลปนเหลือง เป็นต้น แร่ที่เกิดในลักษณะนี้มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 4-10 แล้วแต่ผลหินที่ปนในแร่

แร่ยูเรเนียมปฐมภูมิที่สำคัญแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ:

2.3.1.1 แร่ยูเรเนียมปฐมภูมิที่เป็นออกไซด์  
แร่ชนิดนี้ที่สำคัญได้แก่ แร่พิทช์เบลนด์ และแร่ยูเรไนต์

(1) แร่พิทช์เบลนด์

แร่พิทช์เบลนด์เป็นแร่ยูเรเนียมที่สำคัญที่สุดในบรรดาสินแร่ยูเรเนียมเปอร์เซ็นต์สูง แหล่งแร่ชนิดนี้เท่าที่ค้นพบคือที่ แชรส์ แคนาดา เช็กโกสโลวาเกีย ตอนใต้ของประเทศออสเตรเลีย และที่สหรัฐอเมริกา แร่ชนิดนี้มี ไตรยูเรเนียม ออกตอกไซด์ ( $U_3O_8$ ) ประมาณ 50-80 เปอร์เซ็นต์ กำเนิดแบบอสัณฐาน (amorphous) ปกติมีสีดำปนเทา หรือดำปนน้ำเงิน มีความวาวคล้ายยาง หรือขี้ผึ้ง แต่มีบางแห่งที่ผิวด้านและผิว เมื่อบดให้ละเอียด ผงแร่จะมีสีดำ ดำแกมเขียว หรือดำปนเทา รอยแตกมีลักษณะโค้ง และเว้าคล้ายแก้วแตก ความแข็งประมาณ 5-6" มีความถ่วงจำเพาะ 6-8 หรืออาจสูงกว่า 8 ขึ้นกับผลหินหินที่ปนในแร่

แร่ชนิดนี้มักเกิดในสายแร่ซิลไฟด์ มีลักษณะเป็นก้อนหรือเป็นชิ้นบาง ๆ อยู่ในสายแร่ บางครั้งพบเป็นก้อนกลม มีผิวเรียบ แร่ส่วนที่อยู่ใกล้ผิวดินหรือโผล่ให้เห็นจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง สีส้ม หรือสีเขียว แร่ยูเรเนียมเหล่านี้จะแทรกตัวตามรอยแตกของหินที่อยู่ข้างเคียงกับแร่พิทช์เบลนด์เดิม

(2) แร่ยูเรไนต์

แร่ยูเรไนต์คือแร่ชนิดเดียวกับแร่พิทช์เบลนด์นั่นเองแต่มีลักษณะผลึกแบบระบบไอโซเมตริก มีสูตรทางเคมีเป็น  $UO_2$  (Uranous oxides) โดยทั่วไปที่พบมีสูตรอยู่ระหว่าง  $UO_2$  และ  $U_3O_8$  โดยปกติจะมี  $UO_2$  อยู่ด้วยเสมอ ปริมาณ  $U_3O_8$  มีประมาณ 65-85 เปอร์เซ็นต์ มักมีธาตุที่สำคัญเกิดร่วมเสมอ คือ ทอเรียม และธาตุแรเออร์ท (rare earths elements) เช่น ซีเรียม (Cerium) ความเข้มข้นของทอเรียมออกไซด์ ( $ThO_2$ ) ในทอเรียมยูเรไนต์ อาจสูงถึง 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในเพกมาไททิก ยูเรไนต์ (Pegmatitic uraninite) มี  $U_3O_8$  โดยเฉลี่ยประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสายแร่แบบ ไฮโดรเทอร์มอล ยูเรไนต์ (Hydrothermal vein

\* ตามสเกลความแข็งของโมห์ (Moh's hardness scale)

uraninite) ปกติมีทองเหลืองออกไซด์น้อยกว่า 0.25 เปอร์เซ็นต์ ส่วนธาตุพวก แร่เออร์ท นั้นจะมีอย่างน้อย 10 เปอร์เซ็นต์ และอาจมีความเข้มข้นสูงในแร่ ยูเรไนต์ที่มีกำเนิดแบบเพกมาไทติก

โดยปกติ ยูเรไนต์ และ นิกซ์เบลนด์ จะไม่เกิดร่วมกัน สำหรับ ยูเรไนต์นิยมเกิดในหินเพกมาไทต์ ส่วนนิกซ์เบลนด์นิยมเกิดในสายแร่ซิลไฟด์

#### 2.3.1.2. แร่ยูเรเนียมปฐมภูมิชนิดซิลิเกต

แร่ชนิดนี้ที่สำคัญได้แก่ แร่คอฟฟินไนต์ (coffinite) หรือแร่ที่มีสูตรเคมีระหว่าง  $U_2(SiO_4)_2$  และ  $U_2(OH)_4(SiO_4)$  แร่ชนิดนี้มี  $U_3O_8$  สูงสุดประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ มักเกิดร่วมกับสารพวกคาร์บอนาเซียส (carbonaceous material) โดยวิธีการแทนที่ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดที่สำคัญของแร่ชนิดนี้ และ ยังพบเกิดรวมอยู่กับแร่ชนิดต่าง ๆ ที่มีวานาเดียม (vanadiferous ores) แร่เหล่านี้มักมีสีดำ ส่วนแร่ยูเรเนียมที่ไม่เกิดร่วมกับวานาเดียม มักเป็นแร่ยูเรไนต์ สำหรับแร่คอฟฟินไนต์แทบจะไม่มีเลย ลักษณะของแร่คอฟฟินไนต์จะเป็นเม็ดละเอียดสีดำมีความวาวและมักเกิดร่วมกับสารประกอบที่มีคาร์บอนด์ (carbonaceous material) แร่ดังกล่าวทั้งสามมีคุณสมบัติไม่เรืองกับแสงอัลตราไวโอเล็ต

#### 2.3.1.3 ออกไซด์เชิงซ้อนต่าง ๆ (multiple complex oxides)

แร่ชนิดนี้นิยมเกิดร่วมกับออกไซด์เชิงซ้อน ของธาตุ ไนโอเบียม (Nb) แทนทาลัม (Ta) และไทเทเนียม (Ti) แร่ตระกูลนี้มีความ ถ่วงจำเพาะระหว่าง 4-7 มีสีตั้งแต่ค่อนข้างจางจนถึงเข้ม เช่นสีน้ำตาล แดงและสีดำรอยแตกไม่สม่ำเสมอและมีรอยเว้าคล้ายกระจกแตก ผิวด้าน นอกจะดำวาวและด้านคล้ายยางสน เมื่อบดละเอียดจะมีสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลออกแดง แร่ตระกูลนี้ที่สำคัญแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

(1) แร่ที่มีธาตุไนโอเบียมและแทนทาลัมเป็นองค์ประกอบ

แร่ชนิดนี้ที่สำคัญ คือ แร่เบทาไฟต์ (betafite) แร่ยูซีนไนต์ (euxenite) แร่ซามาสโคต์ (samaraskite) และแร่ไพรโอไรต์ (priorite) แร่กลุ่มนี้มีเพียงแร่เบทาไฟต์เท่านั้นที่ให้  $U_3O_8$  สูงสุดคือประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์

(2) แร่ที่มีธาตุไททาเนียมเป็นองค์ประกอบ

แร่ชนิดนี้ที่สำคัญ คือ แร่เดวิดโคต์ (davidite) และแร่แบรนเนอร์ไรต์ (brannerite) สำหรับแร่เดวิดโคต์มี  $U_3O_8$  ประมาณ 4-20 เปอร์เซ็นต์

### 2.3.2 แร่ยูเรเนียมทุติยภูมิ

แร่ยูเรเนียมทุติยภูมิคือแร่ที่มีกำเนิดมาจากการแปรเปลี่ยนหรือสลายตัวมาจากแร่ปฐมภูมิ อาจจะมีการผุพังหรือจากการสลายตัวทางเคมีแล้วละลายปนมากับน้ำใต้ดิน ทำให้เกิดแร่ยูเรเนียมชนิดใหม่ ซึ่งอาจจะเกิดอยู่ที่เดิม หรืออาจถูกพัดพาไปในลักษณะที่เป็นของเหลวร่วมกับแร่ธาตุอื่น ๆ แล้วตกตะกอนเป็นแร่ยูเรเนียม ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้มีแร่ยูเรเนียมที่เกิดโดยวิธีนี้หลายชนิด

แร่ที่เกิดลักษณะนี้มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ มีสีสด เช่น สีเหลือง สีส้ม และสีเขียว ปกติแร่ชนิดนี้จะเกิดอยู่ที่ดิน หรือเกิดบนผิวดิน มีลักษณะเป็นผงละเอียดมักเคลือบอยู่บนผิวของหิน หรือบนผิวของเม็ดทรายโดยการจับตัวของสารอินทรีย์ และอาจจะเกิดแทรกตามรอยแตกของหิน บางครั้งจะพบเกิดรวมกันเป็นหย่อมๆ หรือ เป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกัน ซึ่งลักษณะนี้เป็นลักษณะที่เกิดจากการทับถมกันเนื่องจากสลายน้ำ แร่พวกนี้เป็นแร่ที่มีความเข้มข้นของ  $U_{30}$  ต่ำกว่าแร่ยูเรไนต์ แต่เนื่องจากมักเกิดในบริเวณใกล้ผิวดิน จึงมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ไม่แพ้แร่ยูเรเนียมที่มีเปอร์เซ็นต์ยูเรเนียมสูง นอกจากนี้การพบแร่ชนิดนี้ยังทำให้เราสามารถติดตาม เพื่อหาแร่ยูเรเนียมปฐมภูมิได้ง่ายขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้เพราะแร่ปฐมภูมิมักอยู่ที่ระดับลึกลงไปในพื้นที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากแร่ยูเรเนียมปฐมภูมิสามารถละลายไปกับน้ำใต้ได้ง่าย ขณะเดียวกันก็จะรวมตัวกับสารประกอบชนิดต่าง ๆ ที่แร่ยูเรเนียมเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นจึงทำให้มีแร่ยูเรเนียมทุติยภูมิมากกว่า 150 ชนิด แต่ที่สำคัญมีเพียงไม่กี่ชนิด เช่น แร่วานาเดต ฟอสเฟต ซิลิเกต และคาร์บอเนต

#### 2.3.2.1 แร่ยูเรเนียมวานาเดต (uranium vanadate)

แร่ยูเรเนียมวานาเดตที่สำคัญมีสองชนิด คือ แร่คาร์โนไทต์ และแร่ทยูยามูไนต์ แร่ทั้งสองชนิดนี้เป็นแร่ที่สำคัญที่สุดของแร่ที่ถูกออกซิไดซ์โดยแร่ที่มีวานาเดียมเป็นองค์ประกอบ (oxidized vanadiferous ore) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแหล่งแร่ยูเรเนียมที่ ที่ราบสูงโคโลราโด สหรัฐอเมริกา การกำเนิดของแร่ทั้งสองชนิดนี้เป็นผลจากการออกซิเดชันของ primary uraninite-montroschite หรือ coffinite-montroschite การเกิดแร่ชนิดนี้ วานาเดียม มีบทบาทสำคัญมากในระหว่าง ออกซิเดชัน กล่าวคือ วานาเดียมจะรวมกับ ยูเรนิล ไอออน เป็น ยูเรนิล วานาเดต ซึ่งจะสลายตัวและทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียม แล้วเกิดเป็นแร่คาร์โนไทต์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่ถ้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมจะกลายเป็นแร่ ทยูยามูไนต์ ที่ละลายน้ำ

## (1) แร่คาร์โนไทต์

แร่คาร์โนไทต์ คือ แร่โพแทสเซียม-ยูเรเนียม วานาเดต ( $K_2(UO_2)_2V_2O_8 \cdot 1-3H_2O$ ) เป็นแร่ยูเรเนียมปฐมภูมิที่สำคัญที่สุด แหล่งแร่คาร์โนไทต์มักพบยูเรเนียมเกิดร่วมกับไม้ที่กลายเป็นถ่านหิน (carbonized wood) และสารอื่น ๆ ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเสมอ ดังนั้นจึงมีประโยชน์อย่างมากในการค้นหาแหล่งแร่ยูเรเนียม ปกติแร่ชนิดนี้มีลักษณะเป็นผงละเอียด เนื้อแร่คล้ายดินมีสีเหลืองสด แร่ชนิดนี้ส่วนใหญ่เกิดแบบแทนที่ในเนื้อไม้หรืออาจเกิดแบบแทรกตัวในหินทรายที่น้ำซึมผ่านได้ (permeable sandstone) ส่วนที่พบเคลื่อนตามรอยแตกของหิน และซากกระดูกมีไม่มากนัก และมีปริมาณแร่ค่อนข้างน้อย แร่นี้มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 4 และมี  $U_2O_8$  ระหว่าง 50-55 เปอร์เซ็นต์

## (2) แร่ทยูยามูไนต์

แร่ทยูยามูไนต์ หรือแร่แคลเซียม-ยูเรเนียม วานาเดต มีสูตรทางเคมีคือ  $Ca(UO_2)V_2O_8 \cdot 5-8 H_2O$  ทั้งสองชนิดนี้มีกำเนิดเหมือนกันและต่างไม่เรืองแสงเมื่อกระทบแสงอัลตราไวโอเล็ต

## 2.3.2.2 แร่ยูเรเนียมฟอสเฟต (uranyl phosphates)

แร่ยูเรเนียมฟอสเฟตที่สำคัญมีแร่ ออทูไนต์ (autunite) เมตา-ออทูไนต์ (meta-autunite) ทอร์เบอไนต์ (torbernite) เมตา-ทอร์เบอไนต์ และแร่ซาลิไต์ แร่กลุ่มนี้มีลักษณะผลึกแบบ เทตะโกนอล นิยมเกิดในหินพ่อแม่ (parent rocks) ที่มีปริมาณฟอสเฟตสูง

## (1) แร่ออทูไนต์และแร่เมตา-ออทูไนต์

แร่ทั้งสองชนิดนี้ต่างเป็น แร่แคลเซียม-ยูเรเนียมฟอสเฟตที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ พบมากใน ยูเรนิเฟอรัส โฟฟาติก เพกมาไทต์ (uraniferous phosphatic pegmatite) สายแร่พิทช์เบลนด์ และแหล่งแร่ยูเรเนียมในหินทรายของที่ราบสูงโคโลราโด มีปริมาณยูเรเนียมน้อย หรือแทบจะไม่มีเลย แต่จะมีปริมาณฟอสเฟตที่เกิดจากหินอัคนีและ/หรือกระดูกของซากสัตว์ค่อนข้างสูง แร่ออทูไนต์มีสูตรทางเคมี คือ  $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10-12H_2O$  มีปริมาณ  $U_2O_8$  ประมาณ 63 เปอร์เซ็นต์ มีความวาวคล้ายแก้วหรือเปลือกหอยมุก มีสีเหลือง เขียวแกมเหลือง หรือเขียวอ่อน เมื่อกระทบแสงอัลตราไวโอเล็ตจะมีสีเขียวแกมเหลือง ความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.1-3.2 ความแข็งประมาณ 2-2.5 สำหรับแร่เมตา-ออทูไนต์จะแตกต่างจากแร่ออทูไนต์ตรงที่มีปริมาณน้ำน้อยกว่า คือมีเพียง 8 โมเลกุล โดยปกติ

แร่ทั้งสองชนิดนี้มักจะเกิดร่วมกับแร่ยูเรไนต์ และเกิดในลักษณะปะปนอยู่กับหินทราย หรือเกิดตามรอยแตกของหินแกรนิตที่แปรสภาพแล้ว (altered granite)

(2) แร่ทอร์เบอไนต์และแร่เมตา-ทอร์เบอไนต์  
แร่ทั้งสองชนิดนี้เป็นแร่ทองแดง-ยูเรเนียม ฟอสเฟตที่มีน้ำประจำตัว (hydrous copper-uranium phosphates) แร่ทอร์เบอไนต์มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  สำหรับแร่เมตา-ทอร์เบอไนต์มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  และอาจมีธาตุอาร์เซนิก (As) เกิดแทนที่ฟอสฟอรัส (P) จำนวนเล็กน้อย โดยปกติจะมี  $\text{U}_2\text{O}_5$  ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ แร่ทั้งสองชนิดนี้มีสีเขียวอ่อนหรือเขียวแก่ นิยมเกิดแบบกระจายอยู่ทั่วไปในยูเรนิเฟอร์รัส เพกมาไทติก และสายแร่พิทซ์เบลนด์ที่เกิดในธรรมชาติ ความวาวเป็นแบบแก้วหรือหอยมุก สำหรับแร่ทอร์เบอไนต์มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.2 ส่วนแร่เมตาทอร์เบอไนต์มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.5-3.7 ความแข็งของแร่ทั้งสองมีค่าเท่ากันคือประมาณ 2.5 ผลึกแร่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ นิยมเกิดเคลือบอยู่ตามรอยแตกของหินหรือแบบกระจายอยู่ทั่วไปในหินแกรนิต และซีสต์ นอกจากนี้ยังอาจพบในสายแร่ เช่นสายแร่ฟลูออไรต์

2.3.2.3 แร่ยูเรเนียมซิลิเกต (uranyl silicates)  
แร่ชนิดนี้ที่สำคัญคือแร่ยูราโนเพลน (uranoplane) หรือแร่แคลเซียมยูเรเนียม ซิลิเกต ที่มีน้ำประจำตัวมีสูตรทางเคมีที่ค่อนข้างซับซ้อน คือ  $\text{Ca}(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_4) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  แร่ชนิดนี้ให้  $\text{U}_2\text{O}_5$  สูงประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ เป็นแร่ที่สำคัญที่สุดโดยจะพบแพร่กระจายอยู่ทั่วไป มักพบเกิดในหินเพกมาไทต์ และแหล่งแร่ยูเรเนียมในหินทรายแบบที่ราบสูงโคโลราโด ลักษณะที่เกิดโดยทั่วไปเป็นแบบแทนที่หรือเคลือบตามรอยแตกของหินชนิดต่าง ๆ ปกติมีสีเหลืองอ่อน เหลืองปนเขียว หรือเหลืองออกส้ม มีผลึกในระบบโมโนคลินิก (monoclinic) มีลักษณะคล้ายเข็มโดยอาจแผ่เป็นวงกลมหรือตัดกันไปมา ความวาวคล้ายหอยมุกหรือขี้ผึ้ง มีความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วงประมาณ 3.68-3.86 ความแข็งประมาณ 2-3 เมื่อบดให้ละเอียดจะมีสีเหลืองอ่อน แร่ชนิดนี้จะไม่เรืองแสงเมื่อกระทบแสงอัลตราไวโอเล็ต แต่บางครั้งอาจเรืองแสงเป็นสีเขียวอ่อน มีเพื่อนแร่ที่สำคัญคือแร่อทุไนต์และแร่ทอร์เบอไนต์

2.3.2.4 แร่ยูเรเนียมคาร์บอเนต (uranyl carbonates)

แร่ชนิดนี้ที่สำคัญมีเพียงชนิดเดียวคือแร่ สคาโรคิงเจอไรต์

(scarroekingerite) มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{NaCa}_2(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_2(\text{SO}_4)\cdot 10\text{H}_2\text{O}$  แร่ชนิดนี้มีสีเหลืองหรือเหลืองแกมเขียว มีลักษณะผลึกในระบบ ออร์โธโรมบิก เมื่อคดเป็นผงมีสีเหลืองแกมเขียวคล้ายเนื้อแร่เดิม ความวาวคล้ายแก้วหรือหอยมุกซ์ ความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.51-2.55 มีความอ่อนมากคือมีความแข็งประมาณ 2.5 เมื่อกระทบแสงอัลตราไวโอเล็ตจะเรืองแสงเป็นสีเหลืองแกมเขียว แร่ชนิดนี้มี  $\text{U}_2\text{O}_5$  ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ นิยมเกิดแทรกอยู่ในดินหรือทรายและตามรอยแตกของหิน ลักษณะทั่วไปคล้ายเม็ดแก้วเขียวหรืออาจเป็นเกล็ดฝังอยู่ในดิน

#### 2.4 ชนิดของการสะสม (type of deposits)

พื้นที่ที่มีการทับถมของยูเรเนียมเรียกว่า แหล่งแร่ยูเรเนียม ลักษณะการเกิดแร่ยูเรเนียมอาจแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

- (1) ธรรมชาติของหินที่เกิดเป็นแหล่งแร่
- (2) การตกตะกอน(ของหิน) โครงสร้าง(รอยแตก) หรือขบวนการที่สารละลายถูกพาไป
- (3) ธรรมชาติของต้นกำเนิดของสารละลาย สารละลายหลายชนิดทั้งที่เกิดจากแมกมาเรื่อยมาจนกระทั่งถึงน้ำฝน จะมีปริมาณของธาตุโลหะและอโลหะแตกต่างกัน มีสารละลายหลายตัวที่สามารถละลายยูเรเนียมที่ปนอยู่ในหินออกมาได้

ชนิดของการสะสมของแร่ยูเรเนียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

##### 2.4.1 การสะสมแบบหินตะกอน (deposits in sedimentary rock)

ลักษณะการทับถมแบบนี้จะมีลักษณะการวางตัวในแนวระดับหรือเกือบอยู่ในแนวระดับ (tabular bodies) ทั้งนี้เพราะลักษณะการเกิดของหินแบบนี้ เกิดจากการที่มีสายน้ำพัดมาตะกอนมา และในที่สุดก็ตกตะกอนและจับตัวกันจนกลายเป็นหินชั้นหรือหินตะกอน แต่มีแหล่งแร่บางแหล่งที่มีการวางตัวตัดชั้นหินทราย (roll bodies) อย่างไรก็ตามแร่ยูเรเนียมส่วนมากจะพบเกิดเป็นช่วง ๆ และมีขนาดไม่ค่อนแน่นอน บางแห่งอาจมีความหนาเพียง 5-6 เซนติเมตร แต่บางแห่งอาจมีความหนาหลายสิบเมตร และอาจกระจายอยู่ในบริเวณเพียงไม่กี่ตารางเมตร หรืออาจกระจายในเนื้อที่หลาย ๆ ตารางกิโลเมตร

แหล่งแร่ที่เกิดในลักษณะนี้ส่วนมากจะเกิดในหินทราย แต่มีบ้างที่เกิด



ในหินดินดาน ถ่านหินชนิดต่าง ๆ และในหินฟอสเฟต ดังนั้นในที่นี้จะขอกล่าว เฉพาะที่เกิดในหินทรายเท่านั้น

แหล่งแร่ยูเรเนียมแบบที่เกิดในหินทราย จะเกิดในหินทรายที่มีอายุ ตั้งแต่ Late Paleozoic จนถึง Tertiary ส่วนมากจะเกิดในหินทรายที่มี Formation เดียวเท่านั้น ลักษณะที่สำคัญของแหล่งแร่ยูเรเนียมแบบนี้คือจะ เกิดเฉพาะในหินทรายที่มีหินไนซ์สลับกับหินโคลนและมีถ้ำภูเขาไฟเกิดปนอยู่ทั่วไป หินทรายพวกนี้มักจะเป็นหินทรายที่มีปริมาณควออร์ทสูง และมีเฟลสปาร์ อย่างน้อย 25 เปอร์เซ็นต์ หรืออาจมีมากเท่าปริมาณควออร์ท ในชั้นหิน ทรายที่ให้แร่ยูเรเนียมมักจะมีซากพืช ซากกระดูกและไม้กลายเป็นหินปนอยู่กับ แร่เลมอ . แร่ยูเรเนียมที่เกิดแบบนี้ที่สำคัญคือ แร่ยูเรไนต์ คอปฟีไนต์และ คาร์โนไทต์ แร่เหล่านี้จะพบเกิดแทรกอยู่ในช่องว่างของหินทราย หรืออาจ เกิดแบบแทนที่เม็ดทรายหรือเนื้อไม้ และอาจเกิดเป็นตัวประสานระหว่างเม็ด ควออร์ทหรือเกิดตามรอยแตกในหิน เพื่อนแร่ที่พบเลมอคือ แร่พวกวานาเดียม และในบางแหล่งจะมีทองแดงเกิดร่วมด้วย ทองแดงจึงเป็นแร่พลอยได้ของ ยูเรเนียม

#### 2.4.2 การสะสมแบบเป็นสาย (vein-type deposits)

การเกิดแบบมีลักษณะเป็นสายนี้จะมีแนวโน้มที่จะวางตัวในแนวตั้ง หรือเกือบจะอยู่ในแนวตั้งและมักเกิดตัดผ่านหินตะกอน หินอัคนี และหินแปร การเกิดแบบนี้จะเกิดแทรกตามรอยแตกของหิน โดยอาจเกิดแทรกขึ้นมาจาก ส่วนที่อยู่ลึกมากจากผิวโลก หรืออาจเกิดจากการซึมผ่านลงไปจากผิวด้านบน สายแร่ยูเรเนียมส่วนใหญ่จะเกิดในลักษณะลารละลายที่ถูกทำให้ร้อน แล้วถูกดันขึ้นมา เบื้องบนตามรอยแตกของหิน บางครั้งยูเรเนียมอาจเกิดใน ลักษณะสายแร่ที่มีธาตุอื่นแทรกปนขึ้นมาด้วย เช่น ไนโอเบียม แทนทาลัม และ โทเทเนียม ส่วนแร่ควิโดต์ หรือแร่ยูเรเนียมโทเทเนต มีการทำเหมือง แร่ชนิดนี้เฉพาะในประเทศออสเตรเลียเท่านั้น โดยแร่ชนิดนี้จะเกิดในหินแปร ออกไซด์หลายชั้นเหล่านี้จะมีความต้านทานต่อการผุกร่อนและการกัดเซาะได้ สูง จึงมักเกิดการสะสมตัวอยู่ใต้พื้นธารน้ำ นิยมเรียกการสะสมตัวแบบนี้ว่า แบบลานแร่ (Placer type) แร่ที่เกิดในลักษณะนี้และมีการทำเหมืองแล้ว คือแร่ยูซีไนต์ (euxenite) แร่ที่เหมืองนี้เป็นแร่ที่ได้จากทรายใต้ น้ำ เชื่อ กันว่าแร่ยูซีไนต์เกิดจากการผุกร่อนของหินอัคนี ที่อยู่ทางต้นน้ำที่ไกลจากแหล่ง แร่มาก ๆ แล้วเกิดการตกตะกอนโดยเคลือบอยู่ที่ผิวทราย

แร่ยูเรเนียมที่เกิดเป็นสายแร่แต่ไม่ทนต่อการกัดเซาะมีแร่ที่สำคัญคือ แร่พิทซ์เบลนและแร่ยูเรไนต์ เพื่อนแร่ที่สำคัญซึ่งจะพบในระดับลึกลงไปได้แก่

ทอง เงิน ทองแดง ตะกั่วและ ฟลูออไรต์ ในแหล่งแร่ชนิดนี้มักจะไม่พบแร่  
 นิกซ์เบลนด์หรือแร่ยูเรไนต์เกิดอยู่บนผิวดินเลย ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อมีแร่ชนิด  
 นี้เกิดขึ้นบนผิวดินแล้วแร่ก็จะถูกกัดเซาะทำให้เกิดการผุกร่อนหรือเปลี่ยนเป็นแร่  
 ทุกติงกูมิโดยน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ดังนั้นเมื่อพบแร่ยูเรเนียมทุกติงกูมิซึ่งมักมี  
 ลีลด์แล้ว เราพอจะทำนายได้ว่า อาจมีแร่ยูเรเนียมปฐมภูมิอยู่ในระดับที่ลึกลง  
 ไปไม่ลึกนัก

#### 2.4.3 การสะสมแบบหินกรวดมนยุคเก่า (ancient conglomerate type deposits)

การสะสมตัวแบบนี้เป็นแหล่งแร่ที่สำคัญมากในประเทศต่าง ๆ นอก  
 จากประเทศอเมริกา แร่ที่เกิดในลักษณะนี้ส่วนมากเป็นแร่ นิกซ์เบลนด์ที่มีเม็ด  
 แร่ขนาดเล็ก มักเกิดในธารน้ำเก่าที่มีอายุมากกว่าครึ่งล้านปี หรือเกิดในยุค  
 พรีแคมเบรียน (Precambrian) แหล่งแร่ชนิดนี้มักเกิดร่วมกับทอง ดังนั้น  
 ยูเรเนียมจึงอาจเป็นแร่พลอยได้จากเหมืองทอง หรือทองอาจเป็นแร่พลอยได้  
 จากเหมืองยูเรเนียม

#### 2.4.4 แบบที่เกิดในหินอัคนี

โดยปกติหินอัคนีจะมีปริมาณยูเรเนียมสูงกว่าหินชนิดอื่นที่ไม่ใช่แหล่งแร่  
 หินอัคนีที่มีปริมาณยูเรเนียมมากที่สุดคือหินอัคนีที่มีสภาพเป็นด่าง (alkalic  
 igneous rocks) หินอัคนีที่มีเม็ดหยาบ (pegmatite) และหินอัคนีที่เป็นหิน  
 แกรนิต (granitic igneous rocks) หินชนิดนี้มีเม็ดแร่ค่อนข้างหยาบ มี  
 ปริมาณ ควอร์ตซ์ เฟลสปาร์และไมกาค่อนข้างมาก แหล่งแร่ยูเรเนียมแบบนี้  
 ถึงจะมีบริเวณกว้าง แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อย จึงไม่มีคัมค่าในทางเศรษฐกิจ

### 2.5 ธรณีเคมีของธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive element Geochemistry) (2)

ความคล้ายคลึง และ ความแตกต่างที่สำคัญ ของธรณีเคมีของธาตุ  
 กัมมันตรังสี กับพื้นฐานความเข้าใจเกี่ยวกับการวัดรังสีแกมมา เป็นส่วนสำคัญ  
 ของการสังเกตธรรมชาติแวดล้อมในการสำรวจหาแหล่งแร่ ยูเรเนียม

#### 2.5.1 ความสมบูรณ์ในหินบนเปลือกโลก (abundance in crustal rocks)

ตารางที่ 2.1 แสดงความเข้มข้นของ ธาตุกัมมันตรังสี 3 ชนิด  
 ได้แก่ยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมที่ปนอยู่ในหินทั่วไป จากตารางจะ  
 เห็นว่า ความเข้มข้นในหินอัคนีสูงขึ้นตามปริมาณของ ซิลิกา ที่รวมตัวกันใน  
 เฟสเพกมาไทต์เฟส (pegmatite phase) แต่เนื่องจากสัดส่วนของธาตุทั้ง 3

เกือบคงที่ และมักจะอยู่ในรูปออกไซด์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ จึงมีการก่อตัวเป็นผลึก ความแตกต่างทางธรณีเคมีจะเกิดขึ้นเมื่อแร่เหล่านั้นอยู่ในบริเวณที่มีการออกซิไดซ์สูง หรือถูกกัดกร่อนชะล้างสูง ยูเรเนียมในสถานะที่ 4 หรือ 6 แสดงตัวคล้ายทอเรียม โดยเฉพาะสถานะที่ 4 กับ ทอเรียมคล้ายกันมาก เมื่อรวมตัวกันจะเกิดแร่ลัษฐานเดียวกันหลายอนุกรม เช่น แร่ชนิดต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในหินแกรนิต หรือที่ถูกทำให้เข้มข้นในเพกมาไทต์

ตารางที่ 2.1 แสดงความเข้มข้นของยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ในหินชนิดต่าง ๆ

Rock type	K (%) average	U (ppm)		Th (ppm)		Th:U	
		average	range	average	range	average	range
Crustal average	2.1	3		12		4	
Mafic igneous	0.5	1	0.2-3	3	0.5-10	3	3-5
Inter. igneous	1-2.5	2.3	0.5-7	9	2-20	4	2-6
Acid igneous	4	4.5	1-12	18	5-20	4	2-10
Arenaceous sediments	1.4	1	0.5-2	3	2-6	3	
Argillaceous sediments	2.7	4	1-13	16	2-47	4	1-12
Limestones	0.3	2	1-10	2	-	1	
Black shales	2.7	8	3-250	16	-	2	wide
Laterites	low	10	3-40	50	8-132	5	wide
Metamorphics							depends on parent rock type

2.5.2 ธรณีเคมีของยูเรเนียม (uranium geochemistry)  
ยูเรเนียมในสถานะที่ 6 (hexavalent state) เมื่อละลายน้ำแล้วจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปยูเรนิล ( $UO_2^{++}$ ) ดังนั้นจึงถูกพัดพาไปกับกระแส น้ำใต้ดิน และไปตกตะกอนอยู่บริเวณอื่นที่ห่างไกลจากทอเรียม และโพแทสเซียม ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของยูเรเนียมเมื่อเทียบกับทอเรียมและโพแทสเซียมมีความสำคัญมากในการวินิจฉัยข้อมูลการสำรวจแบบทุติยภูมิ ซึ่งจะทำให้เรารู้ได้ว่า บริเวณใดควรจะเป็นแหล่งสะสมตัวของยูเรเนียม ในขณะที่ความเข้มข้นสัมบูรณ์ของธาตุรังสีที่วัดจากการสำรวจ อาจผันแปรได้มาก ขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น หินโผล่ (out crop) ระยะห่างระหว่างหินโผล่และเส้นทางที่เคลื่อนที่ผ่าน อัตราส่วนความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีที่พบ จะมีผลน้อยมากต่อองค์ประกอบที่ไม่สามารถควบคุมได้เหล่านี้ และยากจะบอกได้ว่ามี ยูเรเนียมอยู่ในบริเวณนั้นหรือไม่

เมื่อมียูเรเนียมที่หลอมละลายในสภาพแวดล้อม แบบ ซุปเปอร์ยีน

(Supergene) ยูเรเนียมสามารถถูกพัฒนาไปได้โดยทางกล แล้วตกตะกอนร่วมกับแร่หนักอื่น ๆ ปกติแล้วยูเรเนียมจะไหลไปกับสารละลายในรูป ยูเรเนียมเชิงซ้อน(uranyl complex) และเกิดร่วมกับ คาร์บอเนต ซัลเฟต และไอออนของคลอไรด์ ภายใต้สภาวะรีดิวซิง ไอออนของยูเรเนียมจะตกตะกอนในรูปสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนขั้นต้น(primary complex oxide compound) โดย สารอินทรีย์ ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีส สารประกอบเหล่านี้ไม่สามารถละลายน้ำภายใต้สภาวะออกซิไดซิง ยูเรเนียมทุกชนิดจะตกตะกอนโดยการระเหยของสารละลายร่วมกับ ทองแดง แคลเซียม โพแทสเซียม หรือโลหะอื่น ๆ แล้วกลายเป็นอนุมูล ฟอสเฟต อาซิเนต วานาเดต และซิลิเกต ตามปกติหินชนวนมักจะมีปริมาณยูเรเนียมค่อนข้างสูง อาจมีมากกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน เนื่องจากความสามารถในการละลายนี้คือความสามารถในการพาไปได้นั่นเอง ดังนั้นจึงทำให้การสะสมตัวของ ยูเรเนียมแพร่กระจายอยู่ทั่วไป ปกติแร่ยูเรเนียมทุกชนิดมีความสำคัญมากกว่าแบบปฐมภูมิ และมักพบเกิดแยกจากแหล่งแร่ปฐมภูมิ แต่ในบางบริเวณความเข้มข้นของยูเรเนียมทุกชนิดมีไม่มาก เพราะเพิ่งเกิดใหม่หรือมีการสะสมตัวยังไม่นาน

การวัดรังสีแกมมาจากนิวไคลด์ลูกของอนุกรมยูเรเนียม นิยมวัดจาก บิลมัท-214 คุณสมบัติที่สำคัญทางธรณีเคมี ของนิวไคลด์ต่าง ๆ ในอนุกรมนี้ที่สำคัญ คือ เรเดียม-226 และ เรดอน-222 ซึ่งเป็นนิวไคลด์ที่เกิดก่อนหน้า ตะกั่ว-214 และบิลมัท-214 ส่วนนิวไคลด์ตัวอื่น ซึ่งเกิดก่อน เรเดียม-226 ไม่สามารถถูกพาไปได้(immobile) เรเดียมถูกพาไปได้ในสารละลายที่ไม่มีซัลเฟต และในสารละลายที่เป็นกลาง หรือมีสภาพเป็นกรด ปกติยูเรเนียมจะเกิดร่วมกับยิบซัม สารประกอบที่ไม่มีน้ำ (anhydrite) แบไรต์ และไฮดรอกไซด์ของ เหล็ก แมงกานีส และอลูมิเนียม เนื่องจากเรดอนเป็น ก๊าซเฉื่อยและมีครึ่งชีวิตสั้น แต่สามารถละลายน้ำได้ดี จึงสามารถเคลื่อนผ่านชั้นหินที่ซึมผ่านได้(permeable rocks) และเคลื่อนตัวสู่ชั้นบรรยากาศเบื้องบน เนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ของ ยูเรเนียม เรเดียม และ เรดอน จึงมีผลทำให้เกิดสภาพไม่สมดุลย์ขึ้นในแหล่งแร่ และทำให้เกิดข้อผิดพลาด ในการประมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม ในแหล่งแร่ทุกชนิด

ตารางที่ 2.2 ความสามารถพาไปได้ของยูเรเนียม และทอเรียม ใน  
สภาวะแวดล้อมแบบ ออกซิไดซิง และ รีดิวซิง เมื่ออยู่ในสถานะวาเลนซ์แตก  
ต่างกัน

Gamma Radiation (*3) Energy in Mev, (% yield)	Valence States (*4)	Grams Curie (*5)	Geochemical Mobility Environment (*6)	
			Oxi- dizing	Reduc- ing
0.09 (15), 0.06 (7), 0.03 (7)	4*, 6	$2.97 \times 10^6$	M	I
	4	$4.3 \times 10^{-5}$	I	I
1.01 (2), 0.77 (1), 0.04 (3)	3, 4, 5	$1.4 \times 10^{-9}$		
	3, 4, 6	$1.64 \times 10^2$	M	I
0.05 (28)	4	$5.3 \times 10^1$	I	I
0.19 (4)	2	1.0	M	M
	0*	$6.46 \times 10^{-6}$	M	M
	6	$3.15 \times 10^{-9}$		
0.35 (44), 0.24 (11), 0.29 (24), 0.05 (2) (*A)	2, 4	$3.03 \times 10^{-8}$		
	3, 5	$2.23 \times 10^{-8}$		
	6	$2.78 \times 10^{-15}$		
	2, 4	$1.28 \times 10^{-2}$		
0.05 (4)	3, 5	$8.0 \times 10^{-6}$		
	6	$2.24 \times 10^{-4}$		
	2, 4			
0.06 (24) (*B)	4	$2.11 \times 10^9$	I	I
	2	1.0	M	M
	3, 4	$1.4 \times 10^{-4}$		
	4	$2.63 \times 10^{-1}$	I	I
	2	$1.48 \times 10^{-3}$		
	0*	$2.49 \times 10^{-7}$		
0.30 (5), 0.24 (82), 0.18 (1), 0.12 (2) (*C)	6	$7.08 \times 10^{-10}$		
	2, 4	$1.68 \times 10^{-4}$		
	3, 5	$1.60 \times 10^{-5}$		
	6	$6.42 \times 10^{-16}$		
(*D)	1, 3	$2.73 \times 10^{-7}$		
	2, 4			
1.46 (11)	1			

Element	Atomic No.	Val- ence	Remarks
Uranium	92	+4 +6	Essentially insoluble in water. Soluble as sulphate, carbonate, or chlo- ride in which $U^{+6}$ exists as a complex divalent cation $(UO_2)^{+2}$ .
Thorium	90	+4	Essentially insoluble in water.
Radium	88	+2	Does not form minerals but may "co- crystallize" with insoluble Ba, Sr, Pb sul- phates. Silicate minerals in alkaline or neutral environments tend to strongly absorb radium.
Radon	86	0	One of the noble gases and forms no compounds.

### 2.5.3 ธรณีเคมีของทอเรียม (Thorium Geochemistry)

ยูเรเนียมและทอเรียมภายใต้สภาวะไฮเปอร์จีน (hypergene) จะมีความคล้ายคลึงกันมาก แต่เนื่องจากทอเรียมไม่สามารถชะล้างใต้สภาวะแบบซูเปอร์จีน จึงมีลักษณะสำคัญคือ มักเกิดร่วมกับแร่หนัก หรือเกิดในลานแร่ ในหินอัคนีตอนต้น (primary igneous rock) จะมีคาร์บอนเนตแทรกปนอยู่กับทอเรียมมาก ซึ่งเป็นตัวชี้ได้ว่ามีแร่หายากปนอยู่

### 2.5.4 ธรณีเคมีของโพแทสเซียม (Potassium Geochemistry)

ธรณีเคมีของของโปแตสเซียมเป็นที่รู้จักกันดีอยู่แล้ว แต่มีสิ่งหนึ่งอยากจะเน้นในที่นี้ก็คือ แร่ยูเรเนียมบางตัวนิยมเกิดร่วมกับ sodium metasomatism ภายใต้สภาวะนี้ ในช่วงต้นโซเดียมจะเข้าไปแทนที่โพแทสเซียมในหิน แล้วจับตัวเป็นแร่ ซึ่งอาจมีปริมาณมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นในบริเวณที่มีนัยสำคัญของความเป็นแหล่งแร่ยูเรเนียมสูง อัตราส่วนของ U:K จะลดลงมาก

## 2.6 ลักษณะการให้รังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีในธรรมชาติ (Radiation Characteristics of Geological and Cultural Sources)

ลักษณะการให้รังสีของหินและดินขึ้นกับความสมบูรณ์เริ่มต้นของธาตุรังสี และขึ้นกับการกำเนิดทางธรณีวิทยาของชั้นหิน การผุแปรและการผุสลายของยุคหินมีความสำคัญมาก การศึกษาการแพร่กระจายของธาตุรังสีเพื่อหาปริมาณโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียม จะถูกต้องได้ต่อเมื่อยูเรเนียมและทอเรียม อยู่ในสภาพสมดุลย์ทางรังสีกับลูกหลานทั้งหมด ที่ให้รังสีแกมมาของแต่ละอนุกรม ปกติดินและหินที่อยู่บนผิวโลก ในระดับลึกประมาณ 40-50 เซนติเมตร จะไม่อยู่ในสมดุลย์ทางรังสี

### 2.6.1 ยูเรเนียม และทอเรียมในหินอัคนี

ยูเรเนียม และทอเรียมในหินอัคนี มีความเข้มข้นสูงในแร่ประกอบหินพวก เซอร์คอน (zircon) สเฟิน (sphene) และอพาร์ไทต์ (apatite) ส่วนแร่ที่มีรังสีแรงอื่น ๆ จะแพร่กระจายในพื้นที่ค่อนข้างกว้าง แต่มีการกระจายที่ไม่แน่นอน ปกติความเข้มข้นของยูเรเนียม และทอเรียมจะแปรผันตามสภาพความเป็นกรด การผุสลายของหินอัคนีกลายเป็นหินแปร และหินตะกอน จะให้ยูเรเนียมออกมา และต่อมาจะมีการสลายตัวอีกครั้ง กลายเป็นหินตะกอนชนิดโคลนิตหนึ่ง ในสภาพที่มีการชะล้างสูง ยูเรเนียมจะถูกออกซิไดซ์ และแยกตัวออกจากแร่ธาตุที่ละลายน้ำได้ ส่วนแร่อื่น ๆ ที่เกิดร่วมกับ ยูเรเนียม และทอเรียม เช่น เซอร์คอน โมนาไซต์ และทอไรต์ มีความ

ต้านทานต่อการรวมตัวทางเคมี และต่อการสลายตัวทางกล จึงเกิดการสะสมตัวอยู่ในลานแร่ และมักเกิดร่วมกับแร่หนักในหินตะกอน

### 2.6.2 โปแทสเซียมในหิน (potassium in rocks)

ปริมาณโปแทสเซียมในหินบะซอลต์ จะผันแปรระหว่าง 0.15 - 2 เปอร์เซ็นต์ การคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปแทสเซียม ในหินตะกอนแทบจะไม่มี ความหมาย เพราะความเข้มข้นของ โปแทสเซียมในหินชุดเดียวกันมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ปกติหินอัคนีที่ไม่ค่อยมี ไมกา และเฟลสปาร์ จะมีความเข้มข้นของโปแทสเซียมต่ำมาก

## 2.7 ความสามารถละลายน้ำได้ของ ยูเรเนียม ทอเรียม และโปแทสเซียม (Solubility of Uranium and Thorium)

### 2.7.1 ความสามารถละลายน้ำได้ของ ยูเรเนียม และทอเรียม

ในสภาพแวดล้อมแบบซูปเปอร์ยีน ยูเรเนียม และทอเรียม มีพฤติกรรมต่างกันมาก ทอเรียมมีสถานะวาเลนซ์เดียว คือ +4 ดังนั้นทอเรียมจึงไม่มีโอกาสเปลี่ยนจากสภาพ ริคิวซิง เป็นออกซิไดซิง การที่มีทอเรียมเกิดในน้ำธรรมชาติ เนื่องจากมีการกระจายของแร่ธาตุที่เกิดร่วมกับทอเรียมละลายอยู่ในน้ำ แต่เรเดียม-228 (ลูกหลานตัวหนึ่งของทอเรียม) สามารถละลายน้ำได้ดี จึงละลายไปกับน้ำและแยกตัวออกไปจากทอเรียม และเนื่องจากมีครึ่งชีวิตเพียง 6.7 ปี ซึ่งเป็นช่วงที่สั้นมากเมื่อเทียบกับช่วงเวลาที่มีการผันแปรทางธรณีที่สั้นที่สุด ดังนั้นการเกิดการสะสมตัวใหม่อีกครั้ง จึงแทบไม่มีเรเดียม-228 เหลืออยู่เลย โดยนัยกลับกัน ยูเรเนียมเมื่ออยู่ในใกล้ ๆ ผิวโลกที่อยู่ในสภาพออกซิไดซิง จะเปลี่ยนจากสถานะวาเลนซ์จาก +4 เป็น +6 หรือ  $(UO_2)^{++}$  และเกิดเป็นสารประกอบได้หลายชนิดที่สามารถละลายน้ำได้ดี (ดูตารางที่ 2.2 ประกอบ) ผลจากความสามารถละลายน้ำได้ดีนี้เอง ที่ทำให้มียูเรเนียมบริเวณใกล้ผิวดิน แต่ความสามารถละลายน้ำของยูเรเนียมจะลดลงมากในบริเวณที่มี วานาเดต ฟอสเฟต และสารประกอบอินทรีย์มาก ส่วนเรเดียมมีครึ่งชีวิต 1620 ปี จึงมีเวลาในการเคลื่อนที่มากกว่าเรเดียม-228 ซึ่งมีครึ่งชีวิตเพียง 6.7 ปี

### 2.7.2 ความสามารถละลายน้ำได้ของโปแทสเซียม

(Solubility of Potassium)

โปแทสเซียมส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในดิน ประมาณ 90-98 เปอร์เซ็นต์ที่เกิดร่วมกับ ไมกา และเฟลสปาร์ ส่วนปริมาณที่เหลืออีกไม่กี่เปอร์เซ็นต์จะถูกชะล้างไปจากเม็ดแร่

## 2.8 การเคลื่อนที่ของเรดอน (Mobility of Radon)

ในอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียมและทอเรียม มีเรดอน อยู่ 3 ไอโซโทป ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยทั้ง 3 ไอโซโทป ต่างเป็นก๊าซเฉื่อย ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับธาตุอื่น ๆ ก๊าซเหล่านี้จะแทรกซึมจากชั้นใต้ผิวดินสู่เบื้องบน และสู่ชั้นบรรยากาศโดย 2 ลักษณะ คือ โดยการดิฟฟิวชัน และโดยการพา ลัมประสิทธิ์การดิฟฟิวชันของสารประกอบต่าง ๆ บนผิวโลก มีค่าน้อยมาก ดังนั้นการแทรกซึมโดยการดิฟฟิวชัน จึงจำกัดในช่วงประมาณ 20-30 เมตร สำหรับเรดอน-222 ส่วนเรดอน-220 มีการแทรกซึมในลักษณะนี้ได้ยาก เพราะมีครึ่งชีวิตสั้นมาก ส่วนแอกติโนนยิ่งไม่มีโอกาสแทรกซึมในลักษณะนี้เลย เพราะนอกจากมีครึ่งชีวิตสั้นมากแล้ว ยังมีความลุ่มบูรณ์เริ่มต้นที่น้อยมาก

ตารางที่ 2.3 แสดงไอโซโทป และ ค่าครึ่งชีวิตของเรดอน

Radon	Name	Longlived parent	half life
Radon-222	Radon	U-238	3.82 days
Radon-220	Thoron	Th-232	54.5 sec
Radon-219	Actinon	U-235	3.92 sec

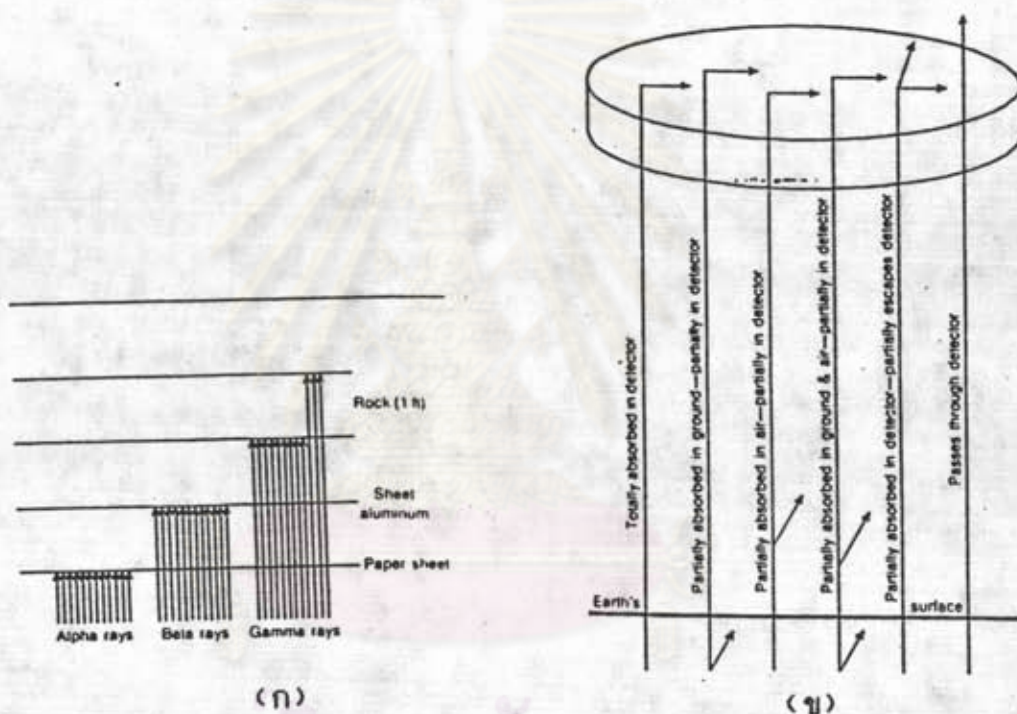
การวัดรังสีแกมมาจากนิวไคลด์ลูกของอนุกรมยูเรเนียม นิยมวัดจาก บิสมัท-214 คุณสมบัติที่สำคัญทางธรณีเคมี ของนิวไคลด์ต่าง ๆ ในอนุกรมนี้ที่สำคัญ คือ เรเดียม-226 และ เรดอน-222 ซึ่งเป็นนิวไคลด์ที่เกิดก่อนหน้า ตะกั่ว-214 และ บิสมัท-214 ส่วนนิวไคลด์ตัวอื่นที่เกิดก่อนเรเดียมเรเดียม-226 ไม่สามารถถูกพาไปได้ (immobile) เรเดียมถูกพาไปได้ในสารละลายที่ไม่มี ซัลเฟต และในสารละลายที่เป็นกลางหรือมีสภาพเป็นกรดปกติยูเรเนียมจะเกิดร่วมกับยิบซัม สารประกอบที่ไม่มีน้ำ (anhydrite) แบไรต์ และไฮดรอกไซด์ของเหล็ก แมงกานีส และ อลูมิเนียม เนื่องจากเรดอนเป็นก๊าซเฉื่อย และมีครึ่งชีวิตสั้น แต่สามารถละลายน้ำได้ดี จึงสามารถเคลื่อนผ่านชั้นหินที่ซึมผ่านได้ (permeable rocks) และเคลื่อนตัวสู่ชั้นบรรยากาศเบื้องบน จากความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ของยูเรเนียม เรเดียม และ



เรดอน จึงมีผลทำให้เกิดสภาพไม่สมดุลย์ขึ้นในแหล่งแร่ และทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการประมาณความเข้มข้นของ ยูเรเนียมในแหล่งแร่ทุติยภูมิ

## 2.9 ผลของสิ่งปกคลุมขนาดใหญ่ (The Effect of Overburden)

เนื่องจากรังสีแกมมาไม่สามารถทะลุผ่านชั้นหินได้มากกว่า 50 เซนติเมตร ดังนั้นการสำรวจโดยการวัดรังสีแกมมา จะให้ผลดีเมื่อชั้นหินโผล่พื้นผิวดินเกิน 30 เปอร์เซ็นต์ ถ้าหินโผล่ดังกล่าวอยู่ในแนวระดับและเป็นหินชุดเดียวกัน ข้อมูลที่ได้จะไม่สามารถบอกอะไรได้มากนัก แต่จะให้ข้อมูลที่ดีกว่าผิวที่มีการผุกร่อนตัดชั้นของชุดหินหลายชนิด



รูปที่ 2.1 (ก) ความสามารถทะลุทะลวงของรังสีชนิดต่าง ๆ  
 (ข) การดูดกลืนรังสีแกมมาขณะที่ผ่านผิวโลกสู่หัววัด

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่า สิ่งหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการสำรวจทางรังสีก็คือ ความสามารถพาไปได้ทางธรณีเคมีของสิ่งแวดล้อม (geochemical mobility environment) ธาตุหรือสารประกอบบางอย่างสามารถถูกพาไปได้ดีในสภาพแวดล้อมแบบ ริตวซิง แต่จะไม่ถูกพาไปได้ในสภาวะแวดล้อมแบบ ออกซิไดซิง โดยนัยกลับกันธาตุหรือสารประกอบบางอย่างสามารถถูกพาไปได้ดีในสภาพแวดล้อมแบบ ออกซิไดซิง แต่ไม่สามารถถูก

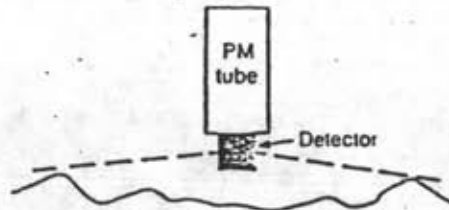
หาไปได้ในสภาพแวดล้อมแบบ ริดิวซิง ตารางที่ 2.2 แถวสุดท้ายแสดงความสามารถในการหาไปได้ทางธรณีเคมี ของสิ่งแวดล้อมที่มีต่อแต่ละนิวไคลด์ และจากตารางเดียวกันจะเห็นว่า ในแต่ละอนุกรมของยูเรเนียมและทอเรียม จะมีรังสีแกมมาหลายระดับพลังงาน ปกติจะเลือกวัดเพียงระดับพลังงานเดียวในแต่ละอนุกรม ในการสำรวจยูเรเนียม ระดับพลังงานที่เลือกวัดจะต้องคำนึงถึงหลักสำคัญสองประการ คือ (1) ระดับพลังงานที่เลือกจะต้องแยกจากระดับพลังงานต่าง ๆ ในอนุกรมทอเรียม และจากโพแทสเซียม-40 (2) ระดับพลังงานที่เลือกจะต้องมีเปอร์เซ็นต์ยิลด์สูง (เปอร์เซ็นต์ยิลด์หมายถึงจำนวนโฟตอนที่ปล่อยออกมาต่อการสลายตัว 100 ครั้ง)

ยอดรังสีแกมมาในอนุกรมยูเรเนียมที่มียิลด์สูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์มีเพียงไม่กี่ตัว คือ ทอเรียม-234 ยูเรเนียม-234 ตะกั่ว-214 และบิสมัท-214 ส่วนพวกที่มีระดับพลังงานต่ำ ๆ เช่น 0.09 MeV จากทอเรียม-234 และ 0.05 MeV จากยูเรเนียม-234 ไม่มีประโยชน์ เพราะมีการรบกวนมากจากแบคกราวด์ที่เกิดจากรังสีแกมมาพลังงานสูง แบคกราวด์ที่ไปรบกวนแถบรังสีที่พลังงานต่ำ ส่วนมากเกิดขึ้นเนื่องจากการกระเจิงคอมพ์ตัน (compton scattering)

#### 2.10 ระดับความสูงของหัววัด (Detector Elevation)

ในการสำรวจต้องคำนึงถึงระดับความสูงของหัววัดด้วย เช่น ข้อมูลที่ต้องการจากการวัดหินโผล่ขนาดเล็ก หรือในหน่วยหินหน่วยใดหน่วยหนึ่ง หัววัดควรอยู่สูงหรือห่างประมาณ 50-90 เซนติเมตร เพื่อจะได้วัดเฉพาะรังสีที่เกิดจากหินโผล่ หรือหน่วยหินชุดนั้นเท่านั้น แต่ถ้าเป็นชั้นหินขนาดใหญ่ควรวางหัววัดในตำแหน่งสูง หรือห่างมากขึ้น เพื่อจะได้คลุมบริเวณที่จะวัดให้มากที่สุด ในการสำรวจควรวางหัววัดให้สูง เช่น วางบนหลังคารถ ทั้งนี้เพื่อที่หัววัดจะได้คลุมพื้นที่ในการวัดได้ไกล และเพื่อเป็นการลดการรบกวนจากพื้นถนน ซึ่งอาจใช้วัสดุจากแหล่งอื่น

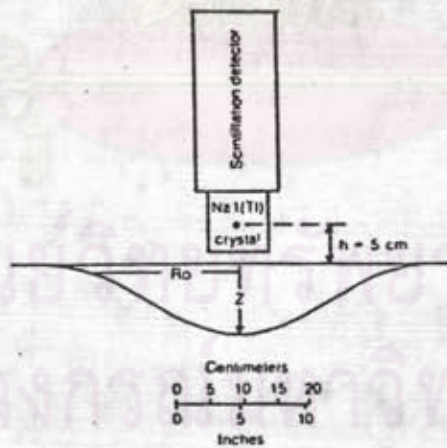
การสำรวจภาคพื้นดินทั้งโดยทางรถยนต์ และโดยทางเท้า จะต้องระวังเรื่องการเปราะเปื้อนรังสี หรือรังสีที่เกิดจากเหตุอื่น รถที่ใช้สำรวจจะต้องเก็บตัวอย่างหินหรือแร่ และสารรังสีที่ใช้เป็นตัวปรับเทียบ ดังนั้นควรจอดรถไว้ให้ห่างจากบริเวณที่สำรวจแบบจุดให้มาก ในการสำรวจควรสำรวจแบบครบรอบ คือ จุดเริ่มต้นกับจุดสุดท้ายควรเป็นจุดเดียวกัน หรือควรสำรวจแบบวกไปมาเพื่อคลุมพื้นที่ให้กว้าง เพื่อเป็นการเฉลี่ยผลของการแปรค่าเนื่องจากการให้หรือการดูดกลืนรังสี ผลจากน้ำขัง และการกำบังรังสี



**รูปที่ 2.2** ตำแหน่งหัววัดที่เกี่ยวข้องกับความขรุขระของพื้นผิว

**2.11 ขนาดของพื้นที่หรือปริมาตรของหินโผล่ (Effective Sample Size)**  
พื้นที่หรือปริมาตรของตัวอย่างที่จะวัด โดยแกมมา สเปกโตรมิเตอร์ ขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น

- (1) ความสูงของหัววัดจากพื้นที่ผิวที่จะวัด (ดูรูปที่ 4.2 ประกอบ)
- (2) พลังงานของรังสีแกมมา
- (3) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของพื้นผิว
- (4) การก้ำบังรังสีที่จะเข้าสู่หัววัด



**รูปที่ 2.3** แสดงรูปแบบของตัวอย่างประสิทธิภาพ เมื่อหัววัดอยู่สูงจากพื้นผิวแบบราบ 5 เซ็นติเมตร

ตำแหน่งวางหัววัดจะต้องคำนึงถึงขนาดของตัวอย่างที่จะวัด ถ้าวางหัววัดบนตัวอย่างที่มีลักษณะแบบราบ จะมีประสิทธิภาพในการวัดประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ถ้าวางหัววัดเหนือหินที่แบบราบเป็นระยะ 5 เซ็นติเมตร ขนาดของตัวอย่างและน้ำหนักจะมีผลต่อการวัดมาก ตารางที่ 2.4 แสดง

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน รัศมีทำการ และความลึกของตัวอย่าง จากตาราง จะเห็นว่าถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพจาก 60 เป็น 90 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตรของตัวอย่างจะต้องเพิ่มขึ้นประมาณ 10 เท่า

ตารางที่ 2.4 ... ค่า มวล รัศมี และความลึกของตัวอย่างที่มีประสิทธิผลต่อหัววัด เมื่อวางหัววัดสูงจากผิวพื้น 5 เซนติเมตร โดยถือว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีที่พลังงาน 1.76 และ 2.62 MeV มีค่าเท่ากับ  $0.123 \text{ cm}^{-1}$  และ  $0.111 \text{ cm}^{-1}$

Isotope	Kg/lbs	R <sub>0</sub> Cm/in	Z Cm/in
Bi-214	37/81	40/16	12/4.7
Tl-208	49/110	42/17	14/5.5

การใช้แกมมาสเปกโตรมิเตอร์ในการวัดในสนาม จะถูกต้องได้ต่อเมื่อ นิวไคลด์ต่าง ๆ ในอนุกรมยูเรเนียม และทอเรียมอยู่ในสมดุล และถือว่า อัตราส่วนของโพแทสเซียม-39 ต่อ โพแทสเซียม-40 ในธรรมชาติ มีค่าคงที่ การสำรวจจะประสบความสำเร็จหรือไม่ ขึ้นกับการเลือกสภาพสำรวจ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ดี อัตรานับที่วัดได้ในสนามขึ้นกับค่ามุมตัน (solid angle) ของสภาพแวดล้อมนั้น ๆ

ปกติสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้ในสนามจะปรับเทียบมุมตัน ให้มีค่าเท่ากับ  $2\pi$  เรเดียน ในสภาพภูมิประเทศที่ราบเรียบถือว่าเป็นมุมตันประมาณ  $2\pi$  แต่สำหรับสภาพภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบ จะต้องยกกระดานหัววัดให้สูงขึ้นกว่าในสภาพภูมิประเทศที่ราบเรียบเล็กน้อย เพื่อเป็นการชดเชยมุมตันที่ลดลง ถ้าสภาพภูมิประเทศขรุขระมาก การสมมุติให้มุมตันเป็นมุม  $2\pi$  ทำได้ยาก ดังนั้น ในสภาพภูมิประเทศแบบนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์บังคับลำรังสี (collimator)

#### 2.12 ระยะห่างระหว่างสถานี

ระยะห่างระหว่างสถานีในการสำรวจทางรังสี มีความคล้ายคลึงกับการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์อื่น ๆ กล่าวคือ จะขึ้นกับความสามารถในการแยกแยะทางธรณี (geological resolution) ดังนั้นระยะห่างระหว่างสถานีอาจแปรค่าได้ในช่วง 3-300 เมตร ขึ้นกับความสามารถในการแยกแยะทางธรณีของระบบวัด

## 2.13 การเก็บตัวอย่าง

เนื่องจากยูเรเนียมละลายน้ำได้ดี ดังนั้นในบริเวณผิวดินอาจมี ยูเรเนียมมากหรือน้อยกว่าปกติที่ควรจะมี ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ สภาพทางเคมี หรือสภาพทางธรณีวิทยาของแหล่งนั้น ๆ อย่างไรก็ตาม การเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ควรจะเก็บตัวอย่างที่ระดับลึกมากกว่า 20 เซนติเมตร เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงสภาพความไม่สมดุลย์ทางรังสี ซึ่งมีผลต่อการวัดปริมาณมาก เพราะในการวัดปริมาณเราถือว่าตัวอย่างที่นำมาวัดอยู่ในสมดุลย์ทางรังสี อีกสิ่งหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึง คือ จำนวนและปริมาณตัวอย่างควรจะมีมากพอ เพราะถ้าน้อยเกินไปจะทำให้มีโอกาสอยู่ในสภาพไม่สมดุลย์ได้สูง



ศูนย์วิทยพัรพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย