

บทที่ 3

การสำรวจธรณีวิทยา (Geological Investigation)

3.1 คำนำ: ลักษณะและตัวกำหนดทางธรณีวิทยา(Geological Features and Parameters)

ในการสำรวจแร่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้สำรวจต้องมีความรู้พื้นฐานทางด้านธรณีวิทยาเป็นอย่างดี ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องในการสำรวจ ความมั่นใจที่จะพบแหล่งแร่ ความรวดเร็วในเรื่องระยะเวลาการสำรวจ ซึ่งจะส่งผลให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการสำรวจได้มาก ซึ่งเป็นผลดีต่อผู้สำรวจเป็นอย่างยิ่ง เพราะการอยู่ในภาคสนามนานๆสร้างความวิตกกังวลหลายอย่างต่อผู้สำรวจ

ความรู้พื้นฐานที่ผู้ทำการสำรวจควรจะต้องรู้ นอกเหนือไปจากความเข้าใจในเรื่องดินและแร่, การเกิด, รูปแบบและธรรมชาติในการเกิด (ดูตาราง 3.1.1) ตลอดจนลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยา ล้วนแต่มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน สิ่งที่นักธรณีวิทยาและวิศวกรควรรู้ในภาคสนาม มีดังนี้

1. ตัวบ่งชี้ทางแร่ (Indicators of ore or Mineralogical indicator)
2. ตัวบ่งชี้ในหิน(Lithological Indicators)
3. ตัวบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์(Physiographical Guides or Geomorphological Indicators)
4. ตัวบ่งชี้ทางโครงสร้าง(Structural Guide)
5. การเปลี่ยนแปลงสภาพหินข้างเคียง(Wall-rock alternation)
6. ตัวบ่งชี้ทางการแปรสัณฐาน(Tectonic Indicators)
7. ความสัมพันธ์กับหินอัคนี(Magmatic Association)
8. การอยู่ใกล้กับแหล่งแร่เดิม(Proximity to known ore)

3.2 ตัวบ่งชี้โดยแร่ (Indicators of ores หรือ Mineralogical indicator)

ในการทำการสำรวจหาสินแร่ใดๆ ในบางครั้งก็เป็นการยากที่จะพบแร่เหล่านั้นตามธรรมชาติได้ตามต้องการ เพราะความแตกต่างของการเกิดแร่แต่ละตัวมักไม่เหมือนกัน แต่โดยส่วนมากแร่มักไม่เกิดอยู่ตามลำพัง (เว้นแต่เป็นการเกิดแบบกะเปาะแร่; Podiform) แต่มักเกิดร่วมกับแร่อื่นเสมอ ซึ่งบางครั้งการพบแร่อื่นที่มักเกิดร่วมกับมันก็อาจจะทำให้มั่นใจได้ว่าจะมีแร่ที่ต้องการได้ รวมถึงบางครั้งสินแร่บางชนิดก็ถูกถลุงมาจากแร่บางจำพวกเหมือนกัน

ตัวอย่างของแร่ (mineral) ที่มักสัมพันธ์กับสินแร่ (ore) เช่น

Cu: ทองแดงพบได้ในแร่, Chalcopyrite (CuFeS_2) มักเกิดร่วมกับแร่ pyrrhotite, galena, sphalerite, pyrite

ตาราง 3.1.1 การจำแนกแหล่งแร่ตามการเกิดที่ดัดแปลงจาก Lindgren (จาก Ridge, 1968)

Fe: เหล็ก พบได้ใน หิน Jasper, Chert และมักพบว่ามีแร่ Barite (BaSO_4) และ Fluorite (CaF_2) เกิดร่วมด้วยเสมอ

ตาราง 3.2.1 แสดงถึงชนิดของธาตุและแร่ที่ปรากฏในรูปสินแร่ที่สำคัญที่เกิดขึ้นได้ทั่วโลกถึงลงไป (ข้อมูลจาก Peters, 1987) และในบางครั้งพบว่าธาตุที่เกิดขึ้นในแหล่งแร่เป็นตัวพา (ธาตุแม่สื่อ) ไปสู่แหล่งแร่ได้ด้วย(ตาราง 3.2.2)

Pb, Zn: เป็นองค์ประกอบหลักของแร่ Galena (PbS), Sphalerite (ZnS) เกิดได้ร่วมกับกับแร่ calcite, marcasite

Hg: มักเกิดร่วมกับแร่ Stibnite (Sb_2S_3) และ scheelite (CaWO_4) และอาจมีแร่ topaz, cassiterite, fluorite, apatite เกิดร่วมด้วย

ในบางครั้งพบว่าตัวบ่งชี้แหล่งแร่อาจเป็นผลมาจากกระบวนการพื้นผิวที่กระทำต่อหินหรือสินแร่ที่โผล่ขึ้นมา ทำให้ได้สินแร่เกรอะกรัง(gossan) (ดูตาราง 3.2.3, รูป 3.2.1 ก ถึง 3.2.1 จ) แต่ถ้าแร่มีการหลงเหลืออยู่อาจมีการสะสมตัวเกิดเป็นแหล่งแร่พื้นผิวได้ (ดูตาราง 3.2.4 และรูป 3.2.2)

3.3 ตัวบ่งชี้โดยหิน(Lithological Indicators)

นอกจากความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างสินแร่(ore)กับแร่(mineral)ที่สนใจแล้ว นักสำรวจหรือนักธรณีวิทยาต้องเข้าใจ และทราบถึงความสัมพันธ์ของแร่ต่างๆ ว่าเกิดในหินแบบใดได้บ้าง(ดูรูป 3.3.1 ถึง 3.3.3) ซึ่งจัดเป็นข้อมูลอย่างดีที่สุดสำหรับการสำรวจ เพราะจากแผนที่ทางธรณีวิทยาที่เรามีอยู่แล้ว ถ้าเราทราบว่าแร่ใดเกิดในที่ใดจะช่วยให้เราจำกัดพื้นที่ให้เล็กลงได้ ดังนั้นเราจึงเลือกพื้นที่ที่มีความน่าจะเป็นพบแร่ได้ค่อนข้างถูกต้องยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น

Pb มักเกิดในหิน limestone ยุค Ordovician

Sn, W มักเกิดในหิน granite แบบ s-type

F, Ba, Sb มักเกิดในหิน clastic sedimentary rock หรือหินตะกอนทะเลประสม

Ni, Cu, Cr มักเกิดในหิน mafic rock ถึง ultramafic

Au มักเกิดในหิน volcanic rock ที่เป็น shallow intrusion

Clay minerals มักพบว่ามีแหล่งอยู่ใกล้ๆ กับหิน felsic rocks เป็นต้น

3.4 ตัวบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์(Physiographical Guides หรือ Geomorphological Indicators)

การศึกษาให้เข้าใจถึงลักษณะรูปพรรณสัณฐานทางธรณีวิทยา(geomorphology) ที่ปรากฏให้เห็นได้ทั่วไป ก็สามารถช่วยให้เราเลือกบริเวณที่จะทำการสำรวจที่เข้าใกล้แหล่งแร่ได้ดียิ่งขึ้น การศึกษาทางด้านนี้สามารถทำได้โดยง่าย เช่น ศึกษาจากภาพถ่ายทางอากาศและภาพถ่ายดาวเทียม(ดูรายละเอียดในบทที่ 4) ซึ่งทำให้เราทราบได้ว่าบริเวณใดเป็นหินใดมีโครงสร้างธรณีวิทยา

เป็นอย่างไร เพราะหินแต่ละชนิดมักทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศหรือลักษณะของภูเขาที่มีรูปพรรณที่แตกต่างกัน จึงช่วยให้เราสำรวจแร่ได้ง่ายยิ่งขึ้น(ดูรูป 3.4.1)

ตาราง 3.1.2 การอยู่ร่วมกันของแร่สำคัญทางเศรษฐกิจในสภาวะใต้โลก (Peters, 1978) ในคอลัมน์แรกคล้ายใช้กับสินแร่สำคัญเชิงพาณิชย์ (commodity-ores mineral) พร้อมตัวอย่าง สินแร่เกิดร่วม(ore assemblage) แสดงในคอลัมน์ ที่สาม แร่ที่สำคัญจะแสดงด้วยตัวอักษรเอียง ในวงเล็บแสดงว่าพบในบางแหล่ง คอลัมน์ที่สี่เป็นแร่ที่มักเกิดร่วมในเนื้อหิน ส่วนคอลัมน์ที่ห้าแสดง ความสมบูรณ์ของของแหล่งที่ทำเหมืองได้(mining grade) ส่วนคอลัมน์สุดท้ายแสดงถึงบรรณานุกรม (ที่ใช้อ้างอิง)และสภาพแวดล้อมทางธรณีวิทยาที่ปรากฏ แหล่งอ้างอิงอื่นที่สำคัญได้แก่ USGS Prof. Paper 820 (Brobst & Pratt, 1973, Bentz & Martini (1968), Encyclopedia of Earth Sciences Vol. IV (Fairbridge, 1972) และ Handbook of Geochemistry (Wedepohl, 1958)

ตาราง 3.1.2 (ต่อ)

ตาราง 3.1.2 (ต่อ)

ตาราง 3.1.2 (ต่อ)

ตาราง 3.1.2 (ต่อ)

ตาราง 3.1.2 (ต่อ)

ตาราง 3.1.2 (ต่อ)

ตาราง 3.2.2 ชาติที่มักเกิดร่วมในแหล่งแร่ที่สามารถใช้เป็นแม่สื่อในการหาแหล่งแร่

หมายเหตุ: คำว่า “exogenetic” และ “endogenetic” เป็นคำที่นิยมใช้แพร่หลายในหมู่นักสำรวจจากทวีปยุโรปมากกว่าทวีปอเมริกาเหนือ
“exogenetic” เกิดอยู่ที่ผิวหรือใกล้ผิวโลก ส่วน “endogenetic” เกิดในระดับลึกกว่ามาก

ตาราง 3.2.3 หินหรือแร่กระอกรัง(gossan) แสดงเนื้อหินและวัสดุที่ถูกชะล้างในแบบต่างๆ
 I เกิดอยู่ ณ ที่นั้น II เกิดอยู่บริเวณแถวนี้ และ III แปลกปลอมหรือพัดพามา (Blanchard, 1968)

รูป 3.2.1 ก รูปสเกตแสดง“หมอกเหล็กเหลือง” fringing limonite และ indegenous limonite จากการ
 ออกซิไดซ์ของแร่ไพไรต์ A: หินที่มีกำลังความเป็นกลางน้อย(หินอะลาสไกต์เนื้อดอกที่เปลี่ยนสภาพเป็นดินขาว) ทำให้
 เกิดเป็นสีจางรอบๆ ช่องเปิด(cavity) (จาก Blandchard & Boswell, 1928) B: หินที่มีกำลังความเป็น
 กลางปานกลาง(หินควอร์ตมอนโซไนต์ที่เปลี่ยนสภาพเป็นเซอร์ไรต์) มีวงสีจาง(bleached zone) ค่อนข้างแคบ
 รอบช่องเปิด C: หินที่มีกำลังความเป็นกลางสูง(หินดินดานเนื้อปูน)ซึ่งมีแร่เหล็กเหลืองเหลืองก้างติดกับช่องเปิดและมี
 fringing limonite ที่ขอบด้วย(Blanchard, 1939)

รูป 3.2.1 ข A: Boxwork ที่ได้จากการสลายตัวของแร่แคลโคไพต์แสดงเส้นसानเกียขนาดหยาบที่มีเส้น
सानเกียละเอียดอยู่ภายในช่องว่าง B & C อีกรูปแบบหนึ่งของ Boxwork จากแร่
bornite และ tetrahedrite ตามลำดับ (Blanchard, 1939) และ Blanchard &
Boswell, 1930)

รูป 3.2.1 ค Boxwork ที่สลายจากแร่ bornite แสดงเซลล์สามเหลี่ยมโค้ง (Blanchard, 1930)

รูป 3.2.1 ง “Cleavage” boxwork (ซ้าย) และ Diamond-mesh boxwork (ขวา) ซึ่งสลายมาจากแร่กาลีนา ซึ่งอย่างหลังสลายจาก “steel” galena ที่มีผลึกละเอียด ซึ่งเชื่อกันว่าน่าจะมาจาก cerrussite ซึ่งสลายต่อจาก galena อีกทีหนึ่ง (Blanchard & Boswell, 1934)

รูป 3.2.1 จ เปลือกแร่เหล็กเหลือง shrivelled ในช่องเปิด boxwork จากการออกซิไดซ์ของแร่ pyrrhotite (Blanchard, 1968)

รูป 3.2.1 ฉ Boxwork เหล็กเหลือง ซึ่งสลายตัวมาจากแร่ sphalerite แสดงเขต boxwork หยาบและแสดงเส้นสานเกี่ยวค้ำยกุหลาบ (Blanchard, 1968)

ตาราง 3.2.4 ตัวอย่างแหล่งสินแร่ที่สะสมตัวหรือโผล่ให้เห็นบริเวณพื้นผิวโลก (Peters, 1987)

ตาราง 3.2.4 (ต่อ)

ตาราง 3.2.4 (ต่อ)

รูป 3.2.2 ภาพตัดขวางผ่านสินแร่เหล็กสีลาแสงและเหล็กแดง ซึ่งแสดงถึงส่วนประกอบเชิงปริมาณธาตุที่แปรผันไป
ตามความลึก (Roorda & Queneau, 1973)

รูป 3.3.1 ภาพตัดขวางมองไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของแหล่งแร่แบบ manto เมือง Gilman (Red cliff, Batle Mt.) มณฑล Eagle เมือง Gilman รัฐโคโรลาโด อเมริกา แสดงถึงการเกิดเป็นแหล่งแร่เฉพาะในหินปูน และสินแร่มีการกระจายตัวเป็นวงแร่ชัดเจน (Radabuagh และคณะ, 1968)

รูป 3.3.2 แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสี Roseburg ใน Tasmania ออสเตรเลีย แสดงถึงการเกิดเป็นแหล่งแร่ระหว่างหินตะกอน
ภูเขาไฟ(ส่วนบน) และหินชีสต์(ส่วนล่าง) แหล่งแร่เกิดเฉพาะอยู่ภายในหินดินดาน

รูป 3.3.3 ภาพตัดขวางแสดงแหล่งแร่ทองแดง Kidd Creek ในรัฐออนตาริโอ (แคนาดา) แสดงถึงความสัมพันธ์
ระหว่างหินข้างเคียงกับสายแร่

รูป 3.4.1 แนวเส้นโครงสร้าง (linearment) ที่ตัดกันไปมาจนมีผลเกี่ยวข้องกับการเกิดแหล่งแร่ทองแดง
“Salt Lake” ณ เมือง Bigham สหรัฐอเมริกา ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงได้ด้วยภูมิประเทศที่มี
ลักษณะเป็นเส้นตรง สังเกตได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม (Peters, 1984)

3.5 ตัวบ่งชี้ในแง่โครงสร้าง(Structure guides)

การศึกษาทางด้านลักษณะโครงสร้างทางธรณีของหิน มีส่วนช่วยให้เราตัดสินใจ เลือกบริเวณที่ทำการสำรวจแหล่งแร่ได้ง่ายขึ้น(รูป 3.5.1) ซึ่งการศึกษาขั้นนี้ มักทำร่วมกับการศึกษาด้าน ภูมิศาสตร์(Morphology) พร้อมๆ กัน(รูป 3.5.2) ความเข้าใจทางด้านธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structure Geology) จึงทำให้เราทราบได้ว่า หากพบโครงสร้างแบบนี้ น่าจะพบแร่อยู่ใน บริเวณใดได้บ้าง(รูป 3.5.3 และ 3.5.4)

3.6 การเปลี่ยนสภาพหินข้างเคียง(Wall-rock Alteration)

ในบางครั้งเราไม่พบหินหรือลักษณะใดๆ บนพื้นผิวที่บ่งบอก(implicitly)ว่ามีแร่อะไรบ้าง ในบริเวณนั้น เพราะหินอาจถูกเปลี่ยนสภาพ(alteration) จนไม่เหลือร่องรอยเดิม(ดูตาราง 3.6.1) การเปลี่ยนสภาพหินมักเกิดจาก ขบวนการน้ำยาร้อน(hydrothermal process) ซึ่งเกิดจากการ ทำปฏิกิริยาระหว่างหินกับน้ำร้อน โดยกลุ่มแร่ที่ถูกเปลี่ยนแปลงคือ พวกแร่ซิลิเกตมีน้ำ(hydrous silicate) โดยที่การเปลี่ยนแปลงของหินจะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของหินเดิม, องค์ประกอบของหิน, องค์ประกอบในน้ำร้อน, อุณหภูมิและความดันของน้ำร้อนด้วย อาจกล่าวได้ว่า สิ่งที่เกิดจากการเปลี่ยนสภาพ(alteration) มักมีลักษณะเฉพาะที่บอกได้ว่า หินเดิมคือหินอะไรซึ่ง อาจช่วยให้เราทราบว่า ด้านล่างลึกลงไปนั้นหินน่าจะให้แหล่งแร่ใดหรือไม่และน่าจะมีแร่อะไรได้บ้าง

ชนิดของการเปลี่ยนสภาพหินอาจเกิดไม่เหมือนกันในทุกแห่ง ทั้งนี้แล้วแต่ สภาพแวดล้อมทางธรณีวิทยาของหินข้างเคียง และตัวน้ำยาร้อนเองเป็นตัวกำหนด แต่การเปลี่ยนสภาพที่มีผู้ศึกษามากคือ การเปลี่ยนสภาพจนเกิดเป็นแหล่งแร่ทองแดงลายดอกในหินอัคนีชนิดไดโอไรต์และ แกรโนไดโอไรต์(ดูรูป 3.6.1 และ 3.6.2, ดูรายละเอียดในบทที่ 9) ซึ่งการเปลี่ยนสภาพหินอาจเป็นได้ทั้ง การคัดสรร(selective) และแผ่กว้าง(pervasive) หรือเป็นสายแร่ร่างแหเล็ก (stockworks) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากหินที่มีสภาพความแตกสูง(เนื่องจากแรงมากระทำ) หรือมีความพรุนสูงทำให้ของไหลหรือน้ำยาร้อนผ่านเข้ามาได้ดี การเปลี่ยนแปลงอาจเกิดเป็นโซนแบบๆ ไม่กี่โซน ซึ่งเมื่อห่างจากโซนหรือวงการเปลี่ยนสภาพ หินอาจไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเลย(ดูรูป 3.6.3 และ 3.6.4)

การเปลี่ยนสภาพแบบคัดสรร(selective alteration) เป็นการเปลี่ยนสภาพในที่ จำกัดไม่แผ่กว้าง เกิดขึ้นเฉพาะแร่ จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงจากแร่หนึ่งไปเป็นอีกแร่หนึ่ง เช่น

แร่ฮอนเบลนด์ เปลี่ยนแปลงไปเป็นแร่ไบโอไทต์ทุติยภูมิ

แร่ไบโอไทต์ เปลี่ยนแปลงไปเป็นแร่คลอไรต์หรืออีพิโดด

แร่เฟลสปาร์ชนิดแคลเซียมเปลี่ยนแปลงไปเป็นแร่เฟลสปาร์ชนิดโซเดียม

รูป 3.5.1 (บน)รูปตัดตามยาวแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสมบูรณ์ของดินกับการวางตัวของสายแร่
(ล่าง) สภาพแวดล้อมของการเกิดแหล่งแร่ซัลไฟด์มวลแน่นแบบต่างๆ ซึ่งมักถูกควบคุมด้วยโครงสร้าง

รูป 3.5.2 (บน) แนวเส้นหลักที่สัมพันธ์กับแนวแร่ (mineral belt) ตะวันตกเฉียงใต้ ของอเมริกา
(ล่าง) แนวโครงสร้างใหญ่ที่มีจุดตัด (intersection) เป็นจุดนำสำรวจแร่

รูป 3.5.3 (บน) ลำดับการเกิดเป็นแหล่งแร่ชนิดต่างๆที่ถูกควบคุมด้วยโครงสร้าง แหล่งแร่สายทองแดงและดีบุกเกิดในสายแร่เดียวกัน ของ คอนวอลล์ ถูกตัดโดยสายแร่สังกะสี-ทองแดง-เหล็กและตะกั่ว-เงิน และเหล็ก โดยการเกิดรอยเลื่อน

(ล่าง) สายแร่ซัลไฟด์สมบูรณ์มวลแน่น (massive sulfide lode) ของคอนวอลล์ซึ่งถูกตัดโดยแนวรอยเลื่อน Kettaneh & Badham, 1973)

รูป 3.5.4 (บน) ภาพตัดขวางแหล่งตะกั่ว-สังกะสีแสดงรูปแบบการกระจายตัวของสินแร่ต่างๆในสายแร่ที่ถูก
ควบคุมด้วยโครงสร้างหิน แห่ “Neues Lager” เยอรมัน

(ล่าง) ภาพตัดตามแนวยาวแหล่ง Esperunza ในเม็กซิโก สายแร่ San Rafael การหาระยะเคลื่อน
ตัวทำได้โดยการเชื่อมต่อช่องนำแร่ออก (shoots) เข้าด้วยกันมากกว่าหาจากหินแอนดิไซต์

ตาราง 3.6.1 การเปลี่ยนสภาพหินข้างเคียง ณ ระดับลึกแสดงถึงชนิดหิน สันแร่เกิดร่วม วงแร่ ณ แหล่งต่างๆ
(Peters, 1984)

รูป 3.6.1 รูปแบบธรรมเนียมของแหล่งทองแดงเนื้อคอก Kalamazoo-San Manuel (Chaffee, 1982)

รูป 3.6.2 แผนภาพแหล่งทองแดงเนื้อดอกแสดงระดับการกัดกร่อน (Lowell & Guilbert, และ Chaffee, 1982)

รูป 3.6.3 วงการเปลี่ยนสภาพ (alteration halo) ในหินอัคนีชนิดไดอะเบส (diabase) แหล่ง
Glen Lake เมือง Cobalt รัฐออนตาริโอ แคนาดา แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของธาตุต่างๆ
ในรูปออกไซด์ในแต่ละช่วงของวงการเปลี่ยนสภาพ 1 และ 2 ที่อยู่ใกล้กับสายแร่

รูป 3.6.4 วงการเปลี่ยนแปลงสภาพ (alteration halo) ในหินอัคนีชนิดไดอะเบส (diabase) แหล่ง
Glen Lake เมือง Cobalt รัฐออนตาริโอ แคนาดา แสดงถึงการกระจายตัวของธาตุหลักในแต่ละ
ช่วงของการเปลี่ยนแปลงสภาพ 1 และ 2 ที่อยู่ใกล้เคียงแร่

การตรวจดูลักษณะการเปลี่ยนสภาพแบบคัสดรนี้จึงสามารถทำได้จากการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ถ้ากรณีหินที่เกี่ยวข้องมีผลึกละเอียดหรือจุดศึกษาแคบมาก

ส่วนการเปลี่ยนแปลงอีกอย่างคือการเปลี่ยนสภาพแบบแผ่กว้าง ซึ่งเกิดขึ้นในพื้นที่กว้างขวางกว่ากินบริเวณมากกว่า และอาจอยู่ห่างจากจุดให้สินแร่ เป็นการเปลี่ยนแปลงไปทั้งหมด ดังนั้นจึงทำให้หินเปลี่ยนแปลงจากชนิดหนึ่งไปเป็นอีกชนิดหนึ่ง

นักสำรวจควรให้ความสำคัญของการเปลี่ยนสภาพหินให้มากเพราะจัดว่าเป็นอันที่ช่วยกำหนดแนวทางการเกิดแร่และรูปแบบการสำรวจแร่ได้มาก

ชนิดของการเปลี่ยนสภาพ (Types of Alteration) ที่สำคัญได้แก่

ก) Argillic (argilization) แร่ที่สำคัญคือ kaolinite และ montmorillonite ซึ่งอาจแบ่งออกเป็น 2 โซน คือ โซนปกติซึ่งมักประกอบด้วยแร่ดินบวม หรือ montmorillonite โซนด้านในเรียกว่า kaolinization (เป็นการเปลี่ยนสภาพที่ทำให้เกิดแร่ดินขาว) หรือบางครั้งเรียก “advanced argillic alteration” หรือ “dickite – kaolinite – pyrophyllite assemblage”.

ข) Phyllic (sericitization) แร่ที่สำคัญคือ sericite, quartz, และ pyrite นับว่าเป็นโซนหรือวงการเปลี่ยนสภาพที่พบบ่อยที่สุด และสังเกตได้ง่ายที่สุด

ค) Potassic (K-silicate) แร่ที่สำคัญคือ potassium feldspar (ทั้ง orthoclase or microcline) และ biotite โดยเกิดร่วมกับ hematite or magnetite, Sericite, และ anhydrite.

ง) Propylitic (propylitization). แร่ที่สำคัญคือ epidote, albite, chlorite, และ carbonate, อาจเกิดร่วมกับ sericite and pyrite อาจแบ่งย่อยได้เป็นอีกหลายชนิดแล้วแต่ว่าจะพบแร่อะไรเด่น ถ้ามีแร่ chlorite เค้น เรียกว่า chloritization ถ้ามีแร่ albite เค้น เรียกว่า albitization และถ้ามีแร่คาร์บอเนตเด่น เรียกว่า carbonatization.

จ) Silication (skarnification) เป็นกระบวนการทำให้เกิดสการ์รน์นั่นเอง (skarn or tectite) แร่ที่สำคัญได้แก่ garnet, diopside, wollastonite, และ amphiboles เกิดควบคู่แร่อื่นๆ เช่น magnetite pyrite และสินแร่ซัลไฟด์ นักสำรวจพึงระวังว่าต้องไม่สับสนกับคำว่า “Silicification” ซึ่งใช้ในความหมายของการเกิดแร่ควอร์ตหรือแจสเปอร์ (jasper) ในหิน

ฉ) Greisen (greisenization) เป็นการผสมกันหรือจับกลุ่มกันของแร่ muscovite, feldspars และ quartz และอาจมีแร่ topaz, fluorite, และ tourmaline รวมด้วย มักพบในหินแกรนิตหรือหินครา (pegmatite) ที่มีแร่ดีบุกและโมลิบดีนัมเกิดรวมอยู่ด้วย

ข) Bleaching เป็นการที่หินสีจางไป ซึ่งอาจเป็นการดีซ่ม “basket-term” เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลง(หรือเปลี่ยนสภาพ)ของหิน จึงมักนิยมใช้ในสนามมากกว่าและนักสำรวจร่วมสมัยใช้กันแพร่หลาย

คำว่า “marmitization” และ “msrblization” ซึ่งใช้ในความหมายเหมือนกัน คือกระบวนการในการตกผลึกของหินคาร์บอเนต (recrystallization in carbonate rock) โดยที่อาจมีความเกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดเป็นแหล่งแร่โดยตรงหรือไม่ก็ได้ แต่มักเป็นช่องทางให้หินมีความพรุนมากขึ้นเพื่อให้แร่ที่เข้ามาที่หลังซึมผ่านเข้ามา

3.7 ตัวบ่งชี้โดยการแปรสัณฐาน (Tectonic Indicators)

จากรูปแบบ(Model)การเกิดและลักษณะของแหล่งแร่ต่างๆ ซึ่งรายละเอียดของแหล่งแร่โดยที่บางส่วนจะกล่าวในหัวข้อต่อไป เมื่อนำข้อมูลจากภาคสนามและห้องปฏิบัติการมาแสดงโดยกำหนดตำแหน่งบนภาพหรือแผนที่ที่แสดงลักษณะการเกิดของแหล่งแร่โดยทฤษฎีการแปรสัณฐาน (ตาราง 3.7.1 และ 3.7.2) ทำให้เราสามารถกำหนดตำแหน่งพื้นที่เป้าหมายที่น่าจะมีแหล่งแร่ตลอดจนขั้นตอนในการเกิดสินแร่หลายชนิดในแหล่งเดียวกันได้ (รูป 3.7.1) โดยมักมักทำในพื้นที่บริเวณกว้างและทำในขั้นตอนที่มีการสำรวจบริเวณกว้าง (reconnaissance survey)

ในที่สุดเราจะได้รูปแบบการเกิดแหล่งแร่ด้วย (รายละเอียดแสดงในบทที่ 9) และเมื่อนำรูปแบบดังกล่าว มาศึกษาเปรียบเทียบกับรูปแบบการเกิดธรณีแปรสัณฐาน(รูป 3.7.2) ในประเทศไทยและบริเวณใกล้เคียงโดยดูจากชนิดและการกระจายตัวของหินแกรนิต จะพบว่าสามารถกำหนดตำแหน่งที่น่าจะพบแหล่งแร่ชนิดต่างๆ ลงในบริเวณต่างๆ ของประเทศซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการกำหนดพื้นที่บริเวณกว้างเพื่อสำรวจหาแหล่งแร่ชนิดหนึ่งๆ ต่อไป

3.8 ความสัมพันธ์กับหินอัคนี (Magmatic Association)

การศึกษาถึงลักษณะของหินหนืดทำให้ทราบถึงบริเวณที่แหล่งแร่เกิดว่าแตกต่างกันไปตามชนิดของหินหนืด(รูป 3.8.1 และ 3.8.2) ช่วยให้นักสำรวจเลือกบริเวณน่าสนใจที่จะทำการสำรวจได้ดียิ่งขึ้น (ดูรูป 3.8.3) ทำให้เราทราบว่าแร่เกิดได้อย่างไร(ดูรูป 3.8.4) และแหล่งกำเนิดแร่หลายอย่าง โดยเฉพาะแหล่งน้ำร้อนก็มีกำเนิดไม่มากนัก้อยจากหินหนืด(รูป 3.8.5) และมีการกระจายตัวอย่างไร (รูป 3.8.6) และมีอายุเท่าไร(รูป 3.8.7) และเพราะเหตุใดจึงเกิดมีความหลากหลายในแหล่งแร่ได้(รูป 3.8.8) สำหรับประเทศไทยหลายคนอาจสงสัยว่าทำไมแหล่งแร่ทองคำจึงเกิดร่วมกับแหล่งแร่ดีบุก-ทังสแตน เช่นที่พบเป็นลานแร่ในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ได้ แต่ถ้าศึกษาในรายละเอียดอาจตอบได้ว่าเนื่องจากแร่ทั้งสองมาจากแหล่งกำเนิดหินหนืดคนละชนิดและคนละช่วงอายุกันแต่จะจงมาอยู่ที่

เดียวกันได้ ซึ่งนักสำรวจควรให้ความสำคัญเรื่องการกำหนดแร่ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย มีการแบ่งแนวของหินแกรนิตออกเป็น แนวยาวทำให้มีความแน่นชัดในการสำรวจแร่ได้มากขึ้น

ตาราง 3.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งแรงงานชนิดกับการแปรสัณฐานเปลือกโลกแบบแผ่น

ตาราง 3.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสินแร่ การเกิดหลัก และสภาพการแปรสัณฐานของแร่ธาตุสำคัญในเชิงพาณิชย์
(แนวกึ่งแถวที่ 2)

รูป 3.7.1 ขั้นตอนการกำเนิดของหินแร่และแร่ต่างๆ (paragenesis) ในแหล่งแร่ซัลไฟด์โลหะพื้นฐาน
ชนิด Mississippi Valley (MSV) เมื่อเทียบกับลำดับขั้นการแปรสัณฐานและการชะล้างของ
หินข้างเคียง

รูป 3.7.2 แนวหินแกรนิตในประเทศไทยและบางส่วนของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ 3 แนว แนวตะวันออก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหินแกรนิตอัคนี (I – type) ช่วงอายุประมาณไทรแอสซิกที่สัมพันธ์กับแร่ทองแดง – เหล็ก – ทองคำ ส่วนแนวกลางและแนวตะวันตกสัมพันธ์กับแร่ดีบุก – ทั้งสะเตน และแร่ธาตุหายากซึ่งส่วนใหญ่เป็นหินแกรนิตตะกอน (S – type) ช่วงอายุไทรแอสซิกสำหรับแนวกลางและครีเตเชียส – เทอร์เชียรี สำหรับแนวตะวันตก (จาก Charusiri, 1989)

รูป 3.7.2 ก สภาพการแปรสัณฐานเปลือกโลก (crustal tectonics) กับการเกิดเป็นแหล่งแร่ชนิดต่างๆ
(บน: จาก Peters, 1987, ล่าง: จาก Sillitoe, 1972)

รูป 3.7.2 ข แผนภาพแสดงถึงสภาพการแปรสัณฐานเปลือกโลกและชื่อเรียกบริเวณสำคัญๆ ในแง่การแปร
สัณฐาน (Mitchell & Garson, 1986)

รูป 3.7.2 ค แนวของการเกิดแหล่งแร่ที่สัมพันธ์กับการแปรสัณฐานเปลือกโลก (Mitchell and Garson, 1976)

รูป 3.8.1 ธรรมเนียมประเพณีพื้นฐานกับการเกิดหินอัคนีชนิดต่างๆ (Ringwood, 1984)

รูป 3.8.2 รูปแบบการเกิดหินอัคนีแบบต่างๆ a) แกะโค้ง b) ของทวีป c) การชนกันของแผ่น (Thorpe, 1981)

รูป 3.8.3 ภาพจำลองแสดงความสัมพันธ์ของการเกิดแหล่งแร่กับการแทรกตัวของหินแกรนิตของแหล่ง
สการ์นในแหล่งแทเบง

รูป 3.8.4 ภาพจำลองแสดงการแทรกดันของหินหลอมเหลวที่พาแร่มาสะสมตัว(ดัดแปลงโดย A.J. Naldrett)

รูป 3.8.5 แหล่งกำเนิดหลายแบบของแหล่งแร่^๕น้ำยาร้อน

รูป 3.8.6 ตัวอย่าง Metallogenic Map แสดงการกระจายตัวของแร่ชนิดต่างๆ การกำเนิดแบบต่างๆ ในสภาพธรณีวิทยาของแต่ละชนิดในพื้นที่บริเวณแคริบเบียน (Kesler, 1978)

รูป 3.8.7 Metallogenic Epoch (ช่วงอายุประมาณแหล่งแร่) ของแร่ซัลไฟด์ แต่ละโหนดจะแทนช่วงเวลาการค้นตัวของแหล่งแร่ทองแดงชนิดโพไฟรีที่มีอายุ 50 – 100 ล้านปี ภาพนี้สอดคล้องกับการเกิดเกาะโกลังภูเขาไฟ 2 ครั้งในบริเวณแคริบเบียน (Kesler, 1978)

รูป 3.8.8 แผนที่ธรณีวิทยาแอ่งแทบง (Taebang Basin) เกาหลีสื่อแสดงตำแหน่งแหล่งแร่ต่างๆ

3.9 ความเข้าใกล้สินแร่ (Proximity to Known Ores)

จากข้อ 3.1.7 ข้างต้น หากนักธรณีวิทยาหรือผู้ทำการสำรวจ มีความเข้าใจอย่างลึกซึ้ง ก็ สามารถประมวลความรู้เข้าด้วยกันเป็นข้อมูลทางธรณีวิทยา และนำมาประกอบกับข้อมูลจากการ วิเคราะห์ขั้นตอนอื่นๆ เช่น ธรณีฟิสิกส์ และธรณีเคมี ก็ทำให้สามารถเลือก และเข้าใกล้พื้นที่ที่ศักยภาพ ของแหล่งแร่ได้ดียิ่งขึ้น

รูป 3.9.1 และ 3.9.2 เป็นตัวอย่างที่ดีสำหรับการศึกษาเรื่องความเข้าใกล้สินแร่ เพราะหลาย แหล่งแร่ก็มีธาตุบ่งชี้หรือธาตุแม่สื่อที่อยู่รอบ เช่น สินแร่หินควอร์ตไซต์ ในรูป 3.9.1 และธาตุ Bi ซึ่งมีความใกล้ชิดกับธาตุ Sn ในรูป 3.9.2 และเมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองแหล่งแร่หลายๆเข้า (ดูบทที่ 9) อาจสังเกตได้ว่าแบบจำลองบางแบบมีความต่อเนื่องกันหรือคาบเกี่ยวกันได้ (ดูรูป 3.9.3)

รูป 3.9.1 แผนที่แสดงการกระจายตัวของสินแร่เป็นวง (metal zonation) หรือวงสินแร่ เหมือน Eagle เมือง Gilman รัฐโคโลราโด อเมริกา ให้สังเกตว่าแร่ทองแดง – เงินอยู่วงใน (หรือด้านใน) แร่สังกะสี อยู่วงกลางและแร่ในหินควอร์ตไซต์อยู่วงนอก

รูป 3.9.2 ภาพตัดขวางของเหมืองดินบุก Altenberg ในเยอรมันแสดงค่าความผิดปกติของ Sn, Li, Bi, Ga, Mo สังกัดความสัมพันธ์ระหว่าง Sn และ Bi ณ ที่ระดับความสูง 500 เมตรจากระดับน้ำทะเล และเกิดในหินควอร์ตพอไฟรี แต่เมื่อลึกลงไปหินเปลี่ยนเป็นหินแกรนิตค่า Sn และ ธาตุอื่นเช่น Bi, Ga, และ Mo ก็ลดลงตาม แต่ค่า Li กลับไม่ลด

รูป 3.9.3 เปรียบเทียบแบบจำลองการเกิดแหล่งแร่ทองแดงหลายคอกระด้างแบบคอร์ดิลเลอร์ (Cordilleran model) ที่สัมพันธ์กับการเกิดแหล่งแร่แบบลานแร่โลหะพื้นฐานและสายแร่ทอง – เงิน บริเวณโกสัฟวโลก ซึ่งทำให้ Sillitoe (1972) ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองแหล่งแร่ทองแดงหลายคอกระด้างกับแหล่งมอลแร่ซัลไฟด์ (MSD) ที่อยู่ระดับตื้นกว่าที่หมู่เกาะฟิลิปปินส์