

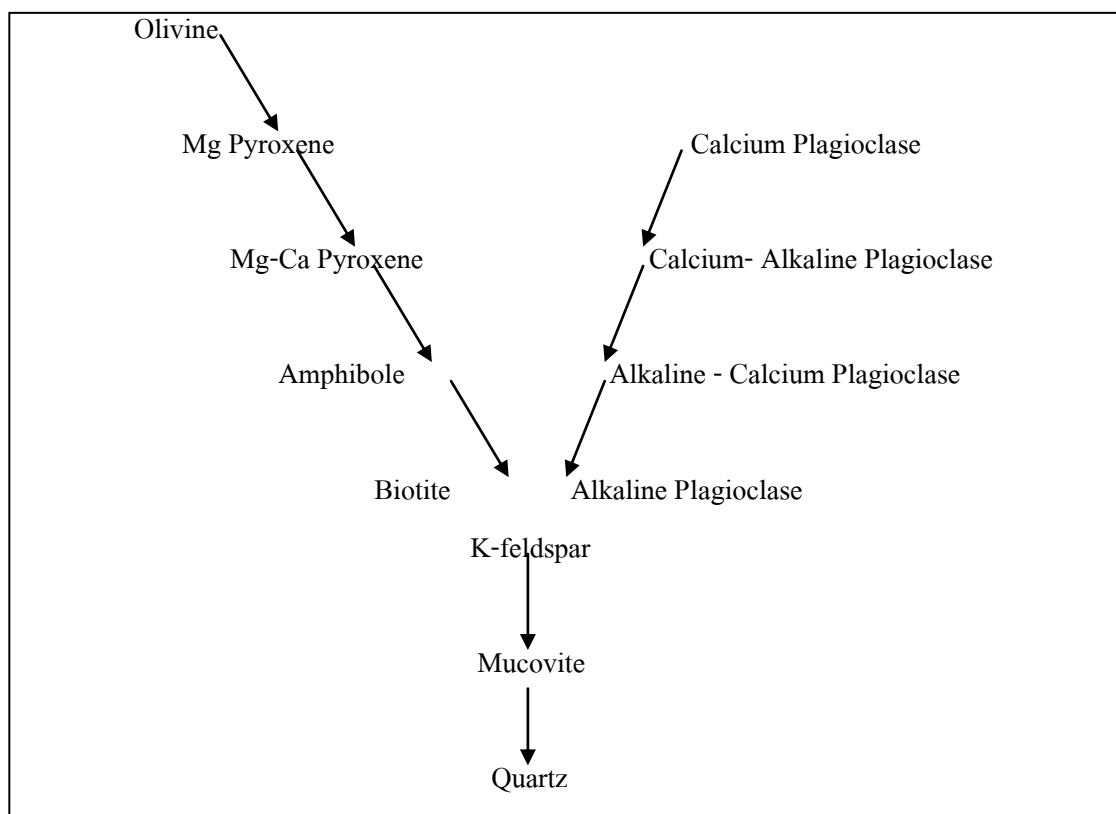
9.2 แหล่งแร่ที่สัมพันธ์กับหินอัคนีสีจางถึงสีเข้มปานกลาง(Deposit Associated with Intermediate Igneous Rocks)

9.2.1 บทนำ

ในบรรดาหินอัคนีที่โพลีให้เห็นบนผิวโลก ส่วนใหญ่แล้วมักเป็นพวกที่มีสีจางจนถึงเข้มปานกลางเป็นส่วนใหญ่ IUGS โดย Streickisen (1973) จึงได้เสนอแนะการจำแนกและการจัดแบ่งประเภทของหินอัคนีขึ้น

หินอัคนีชนิดต่างๆ นั้นเกิดมาจากหินหนืด (magma) โดยกระบวนการแยกลำดับส่วน (differentiation process) จากหินหนืดปฐมภูมิหลากหลายชนิด ณ ภายใต้สภาพทางกายภาพหนึ่ง และปริมาณสารภายนอกที่เข้ามาอยู่ในหินหนืด การที่หินข้างเคียงถูกกลืนเข้าไปในหินหนืดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีและทางแร่ อีกทั้งแนวทางการแยกลำดับส่วน อันเป็นผลมาจากความแตกต่างทางเคมีระหว่างหินทราย หินดินดาน หินปูน หินโคลไคไมต์ และเกลือระเหย ตลอดจนปริมาณน้ำที่อยู่ในหินข้างเคียง

การแยกลำดับส่วนของหินหนืดเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทั้งอุณหภูมิและความดัน Bowen (1928) เป็นคนแรกที่เสนอลักษณะการตกผลึกแร่จากหินหนืดตามรูป 9.2.1 ข้างล่างนี้



รูป 9.2.1 ปฏิริยาชุดของ Bowen แสดงการตกผลึกของแร่ ณ อุณหภูมิสูงกว่า (ด้านบน) ไปยังแร่ที่ตก ณ อุณหภูมิต่ำกว่า (ด้านล่าง) เมื่อหินหนืดเกิดการเย็นตัวลง

ในที่นี้เราแบ่งแหล่งแร่ใหญ่ๆ ที่สัมพันธ์กับหินอัคนีสีจางถึงเข้มปานกลางออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ (1) จากหินหนืด (2) จากสายคราหรือเพกมาไทต์ (3) จากสายกึ่งคราหรือเพกมาไทต์กับน้ำยาร้อน และ (4) จากสายน้ำยาร้อน

สำหรับพวกที่มาจากหินหนืด ได้แก่ พวกที่ส่วนประกอบคล้ายกับหินแกรนิต ซึ่งหลายคนอาจเรียกว่าหินแกรนิตอยด์ (granitoid) ซึ่งรวมถึงหินแกรนิต แกรโนไดโอไรต์ (granodiorite) และหินไดโอไรต์ (diorite) การตกผลึกจากหินหนืดจึงเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อเนื่องหลังจากที่อุณหภูมิของหินหนืดลดลง ซึ่งทำให้เราสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชั้น (หรือพวก) ดังได้กล่าวข้างต้น (ดูรูป 9.2.2)

พวกที่มาจากหินหนืด - พวกนี้มีอุณหภูมิการหลอมละลายสูงกว่าบริเวณที่มันอยู่ ณ ความดันต่างๆ รูป 9.2.2 (บน) แสดงความลึกและอุณหภูมิ ตลอดจนการหลอมละลายของหินหนืด ณ ส่วนประกอบต่างๆ

พวกที่มาจากสายคราหรือเพกมาไทต์ - พวกนี้แสดงถึงการปรากฏร่วมระหว่างผลึกแร่ของเหลวและก๊าซ โดยที่มีอุณหภูมิและความดันต่ำกว่าพวกที่มาจากหินหนืด ที่แสดงในรูป 9.2.2 ได้แก่ พื้นที่ระหว่าง BEBLIP กับเส้นโซลิดัสที่อ้อมตัวด้วยน้ำ

พวกที่มาจากสายกึ่งคราหรือกึ่งเพกมาไทต์กับน้ำยาร้อน - พวกนี้แสดงลักษณะสมดุลระหว่างผลึกกับของไหล ที่แสดงในรูป 9.2.2 ได้แก่ พื้นที่ระหว่างเส้นโซลิดัสกับเส้น XYZ

พวกที่มาจากน้ำยาร้อน - พวกสุดท้ายนี้เกิด ณ อุณหภูมิต่ำที่สุด และแสดงลักษณะสมดุลระหว่างผลึกแร่กับสารละลาย ซึ่งในรูป 9.2.2 ได้แก่ บริเวณที่อยู่เหนือเส้น XYZ ในปัจจุบันเน้นไปที่บริเวณใดก็ได้ที่น้ำที่แทรกเข้ามามีอุณหภูมิสูงกว่าหินข้างเคียง 50°C ดังนั้นตัวน้ำที่แทรกเข้ามาอาจมีอุณหภูมิต่ำเพียง 50°C ก็ได้

สำหรับนักสำรวจเราอาจสนใจคำว่า การแทรกซึม (pervasive) และการแยกตัว (discrete) ของการเกิดเป็นแหล่งแร่ (mineralization) คำแรกการเกิดเป็นแหล่งแร่แบบแทรกซึมอาจเหมาะสมกับพวกที่เกิดจากสายกึ่งครากับน้ำยาร้อนและสายน้ำยาร้อน ณ อุณหภูมิและความดันที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นหินโดยรอบ (host rocks) จึงถูกแทรกซึมโดยน้ำยาร้อนและก๊าซที่มีพลัง ส่วนอีกคำ การเกิดเป็นแหล่งแร่แบบแยกตัวนั้นอาจเป็นผลมาจากการตกผลึกจากของไหลในรูปสารละลายในบริเวณที่จำกัด

โดยทั่วไปการเกิดเป็นแหล่งแร่ที่สัมพันธ์กับหินแกรนิตอยด์นั้น ขึ้นอย่างมากกับ

- ก. ส่วนประกอบแรกเริ่ม (ปฐมภูมิ) ของหินหนืด
- ข. ความเร็วที่หินหนืดพุ่งขึ้นมา ณ เปลือกโลก (ซึ่งแสดงถึงอัตราในการเย็นตัว)
- ค. ปริมาณน้ำในหินหนืดขณะที่หินหนืดลอยตัวขึ้นมา (ซึ่งมาจากได้เปลือกโลกลึกลงไปหรืออยู่ ณ ที่ไม่ลึกนักในบริเวณที่ให้น้ำบาดาล และแสดงถึงอุณหภูมิของการตกผลึกของหินหนืด) และ
- ง. สภาพของหินและสภาพการแปรสัณฐานที่หินหนืดดันตัวขึ้นมา

ในรูป 9.2.2 (ซึ่งดัดแปลงจาก Strong, 1981) แสดงแนวคิดของการค้นคว้าขึ้นมาจากหินหนืด และสถานะการแข็งตัว ซึ่งนับว่ามีความสำคัญต่อนักสำรวจในการค้นหาแร่มาก

ในคู่มือเล่มนี้ จึงจัดแบ่งแหล่งแร่ที่สัมพันธ์กับหินแกรนิตอยด์หรือหินแกรนิตออกเป็น 7 ชนิด ดังนี้

- 1) แหล่งแร่แกรโนไฟล (Granophyle deposits) - มักอยู่ในรูปสายแร่ สายแร่ร่างแห รอยแตกแร่ ปะจุมวลไรเซนไรรูปทรง ซึ่งคล้ายกับพวกที่เกิดเป็นแหล่งแร่แบบแยกตัว
- 2) แหล่งแร่เพกมาไทต์ - เป็นสายแร่ขนาดใหญ่ที่เกิดร่วมกับชนิดแรก
- 3) แหล่งแร่ทองแดงลายดอก (Porphyry Copper Deposit) (รวมถึง โมลิบดีนัมและทองคำ) และ แหล่งแร่ดีบุกลายดอก (Porphyry Tin Deposit) ด้วย พวกนี้คล้ายกับพวกที่เกิดเป็นแหล่งแร่แบบแทรกซึม ซึ่งมักมีขนาดใหญ่ แต่ความสมบูรณ์ต่ำ แร่จึงฝังปะไปในตัวหิน
- 4) แหล่งแร่สกานด์ (Skarn หรือ Pyrometasomatic deposit) ซึ่งมักเกิดในบริเวณที่หินข้างเคียงสัมผัสกับหินอัคนีบาดาลหรือหินกึ่งภูเขาไฟ (snbvolcanics) และมักพบในสภาพแวดล้อมเดียวกับ 1) และ 3)

5) แหล่งแร่ทองคำ-เงิน ชนิดหลากหลายโลหะ (polymetallic) ซึ่งเกิด ณ อุณหภูมิต่ำ แหล่งแร่ตั้งแต่ 1) ถึง 5) นี้ เกิดมาจากหินแกรนิตอยด์ จนถึงหินกึ่งภูเขาไฟ โดยกระบวนการตั้งแต่จากหินหนืดถึงสายแร่ น้ำร้อน

- 6) แหล่งแร่มวลซัลไฟต์จากภูเขาไฟ (VMS) ซึ่งสัมพันธ์กับหินกึ่งภูเขาไฟ จำพวกสีเข้มปานกลาง แต่ไม่ค่อยมีผู้ทำรายละเอียดเท่าใด

แหล่งแร่ตั้งแต่ 1) ถึง 6) มักเกิดในบริเวณแนวคดโค้งขนาดใหญ่ (fold belts) แต่ก็มีการกำเนิดเป็นแหล่งแร่ดีบุก รวมถึงแทนทาลัม - โคบอลต์ - โมลิบดีนัม (และบางครั้งแหล่งแร่ทองแดงและโมลิบดีนัม) ในบางครั้งก็เกิดกับหินแกรนิตอยด์ในสภาวะไร้บรรพตรังสรรค์ (anorogenic setting) ซึ่งได้แก่

- 7) แหล่งแร่ดีบุก (ซึ่งอาจรวมถึงแหล่งแร่ทองแดง และ โมลิบดีนัม) ที่กำเนิดในหินแกรนิตที่สัมพันธ์กับหินอัคนีสีเข้มจัดแสดงชั้นและซับซ้อน และ
- 8) แหล่งแร่ดีบุกและแทนทาลัม - โคบอลต์ ที่เกิดในผนังหินแทรกดันรูปกรวย ที่สัมพันธ์กับหินแกรนิตแอลคาไลต์ที่เกิดในสภาพแวดล้อมของภูเขาไฟไรโอไลต์

คำอธิบายรูป 9.2.2 โดยละเอียด

รูปบน แสดงสภาพการกำเนิดของสารหลอมละลายแกรนิตอยด์ และแหล่งแร่ที่เกี่ยวข้อง ตัวเลขที่แสดงในรูปร้อยละแสดงถึงปริมาณน้ำ ลูกศรที่บ่งชี้แสดงเส้นทางโดยประมาณของการที่สารหลอมละลายเคลื่อนตัวขึ้นมา ส่วนลูกศรปะ หมายถึง การแยกลำดับส่วนของหินหนืดจากสารหลอมละลายที่มีสีเข้มมากกว่า คำว่า BEBLIP หมายถึงกลุ่มแคทไอออนที่เคลื่อนไหวได้ง่าย (mobile cation) ซึ่งได้แก่ Beryllium - Boron - Lithium & Phosphorus

รูปถ่าย แสดงภาพตัดขวางของเปลือกโลก ซึ่งชี้ให้เห็นถึงหินแกรนิตชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับรูปบน อักษรตัวใหญ่ในรูป (A, B, C, และ D) ส่วนสารหลอมละลายไดโอไรต์ - แกรโนไดโอไลต์ที่เกิดขึ้น ณ ที่ I และ II เคลื่อนตัวสู่ระดับต้นและแทรกดันเข้ามาในส่วนแข็งตอนบน (carapace) ของภูเขาไฟ โดยเริ่มจาก I ซึ่งมีปริมาณน้ำน้อยในสารหลอมละลาย จึงต้องการน้ำจากน้ำใต้ดินเข้ามาช่วย เพื่อทำให้เกิดแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกขนาดใหญ่ ซึ่งจัดเป็นจำพวกที่มีกำเนิดจากการ "พาความร้อน" (convective variety) ตามที่เสนอโดย McMillan & Panteleyev (1980) อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณน้ำมีมากในสารหลอมละลาย เช่นที่ II ก็อาจพอที่จะทำให้เกิดแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกขนาดใหญ่ได้เลย ซึ่งจัดเป็นจำพวก "กำเนิดจากหินหนืดโดยตรง"

ส่วนหินแกรนิตชนิดที่มีส่วนประกอบระหว่างพวก I และ II และแทรกดันเข้ามา ณ ระดับลึก B และ C มักเป็นหินแกรนิตมีไบโอไทต์เนื้อหยาบมาก (megacrystic) และแทรกดันเป็นปื้น หินแกรนิตขนาดใหญ่ในแนวบรรพตรังสรรค์ และปราศจากแหล่งแร่ เนื่องจากมีปริมาณน้ำน้อยหรือปราศจากการทำปฏิกิริยากับน้ำใต้ดิน จึงมักไม่ปรากฏการแตกหักเป็นชิ้นเหลี่ยม (brecciation) เพราะเกิดการแทรกดันจากที่ลึกเกินไป การแยกลำดับส่วนของสารหลอมละลายที่เกิดจากตำแหน่ง I และ II อาจก่อให้เกิดหินแกรนิตที่มีส่วนประกอบเหมือนกันได้

สำหรับหินแกรนิตมีมัสโคไวต์นั้นส่วนใหญ่มักเกิดมาจากการหลอมละลายบางส่วน (anatectic) ณ ตำแหน่ง III หรือแยกลำดับส่วนมาจาก II มีทั้งพวกที่แทรกดัน (discordant) ขึ้นหินขึ้นมาหรือบางครั้งก็แทรกตาม (concordant) เข้ามา แกรนิตพวกนี้มักมีปริมาณ BEBLIP มาก จึงมักเกิดตามยอดหรือส่วนบนของปื้นหินอัคนี (plutons & stocks) ขนาดใหญ่ๆ และมีช่วงเวลากการตกผลึกที่ยาวนานจนยังผลให้เกิดแหล่งแร่ SWUM (Sn-W-U-Mo) ที่สัมพันธ์กับหินแกรนิตที่เกิดขึ้น ณ ระดับตื้นมากกว่าแกรนิต มีมัสโคไวต์น้ำมากชนิดปกติ หินแกรนิตพวกนี้จึงยอมให้เกิดการเดือดครั้งที่สอง (second boiling) ได้จนเกิดการแตกหักเป็นชิ้นเหลี่ยม (brecciation) และเกิดเป็นหินเนื้อดอกเทียม (pseudo-porphyry) ซึ่งมัก ปรากฏมีลักษณะหลายอย่างคล้ายกับที่เกิดกับแหล่งแร่ทองแดงและโมลิบดีนัม อย่างไรก็ตามหินแกรนิตดังกล่าวอาจให้แหล่งแร่แกรนิตโทไฟล์ ณ ระดับลึกได้ถ้ามีปริมาณน้ำตอนแรกเริ่มเพียงพอ หรืออาจได้รับน้ำจากการพาความร้อนโดยน้ำจากหินตะกอนหรือจากหินแปร ณ ระดับความลึกปานกลาง เรามักพบสายแร่ครา (เพกมาไทต์) และไกรเซนมากมายเกิดร่วมกับหินแกรนิตมีมัสโคไวต์ (muscovite granite) สายแร่เหล่านี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการกระจายตัวของของไหล และธาตุที่เกี่ยวข้องโดยผ่านหินอัคนีและหินข้างเคียง อีกทั้งทำให้เกิดรูปแบบวงแร่ในหินด้วย

รูป 9.2.3 แบบจำลองอย่างง่ายของตัวแปร 2 ตัวจากหลายๆตัวซึ่งมีอิทธิพลต่อสภาพรรณิเคมีของธาตุต่างๆที่เกิดขึ้น
แหล่งแร่

ชนิดต่างๆในหินแกรนิตบางแหล่งจะถูกควบคุมด้วยสภาพทางธรณีวิทยา (ครึ่งล่างของภาพ) แสดงให้เห็น
ว่าทาง

ซ้ายจะเป็นธาตุพวกลิโธไฟร์ (ไอโอนิก) ขณะที่ทางขวาเป็นธาตุพวกแคลโคไฟร์ (โควาเลนต์ บอนด์)

สรุป สภาพหินแกรนิตอยด์

1. สภาพแนวคดโค้งใหญ่ (Fold Belt) (ดูรูป 9.2.3 และ 9.2.4 ประกอบ)

1.1 หินแกรนิตระดับลึก

ก) แหล่งแร่เกิดภายในแกรนิตอยด์ (Endogranitoid)

- หินไกรเซน เช่น albite greisen มีมากช่วงบนและ mica greisen มีมากช่วงล่าง

ข) แหล่งแร่เกิดภายนอกแกรนิตอยด์ (Exogranitoid)

- สายครา (pegmatites), หินแอบไฟลิต์ (aplites), สกานต์ (skarns), vein swarms

1.2 หินแกรนิตระดับลึกปานกลาง

ก) แหล่งแร่เกิดภายในแกรนิตอยด์

- greisen albitites และ

- greisen vein swarms

ข) แหล่งแร่เกิดภายนอกแกรนิตอยด์

- skarns, pipes, stockworks, vein swarms, และ carbonate replacements

1.3 หินกึ่งภูเขาไฟ

ก) แหล่งแร่สายสมบูรณ์ (lode deposits)

- โลหะหลากหลายชนิด (polymetallic) และมักถูกควบคุมด้วยโครงสร้าง

ค) แหล่งแร่เนื้อดอก

- การเกิดเป็นแหล่งแร่แบบแทรกซึม

1.4 หินภูเขาไฟ : แหล่งแร่สายสมบูรณ์

2. **สภาพฐานหินพรีแคมเบรียน (Precambrian basement)** ส่วนใหญ่เป็นหินจำพวกแกรนิตระดับลึก (ดูรูป 9.2.5 ประกอบ)

2.1 สายเพกมาไทต์ มีสายแร่เนื้อ และให้แร่จำพวก Sn-W-Li

2.2 สายไกรเซน ซึ่งให้แร่จำพวก Nb-Ta-Bi

3. **สภาพไร้บรรพตรังสรรค์ I (Anorogenic I)** ส่วนใหญ่เป็นหินอัคนีระดับตื้นจนถึงกึ่งภูเขาไฟ ซึ่งสัมพันธ์กับแร่จำพวก Sn & Nb

3.1 ได้แก่หินอัคนีแอลคาไลด์ และหินอัคนีสีจาง ซึ่งมีการแทรกดันหลายครั้ง

3.2 เช่น แหล่ง Jos Plateau (ไนจีเรีย) แหล่ง Rhodonia (บราซิล)

4. **สภาพไร้บรรพตรังสรรค์ II (Anorogenic II)**

ส่วนใหญ่สัมพันธ์กับบริเวณหินอัคนีสีเข้มจัดเป็นชั้นเชิงซ้อน จึงมักเป็นหินแกรนิตระดับลึก เช่น หินแกรนิต Lebowa (ใน Bushveld Complex ซึ่งมีทั้งแหล่งแร่ที่เกิดทั้งภายในและภายนอกหินแกรนิต เช่น แหล่งดีบุก แหล่งทองแดง และแหล่งโมลิบดีนัม

9.2.2 แหล่งแร่ดีบุก-ทั้งสะเตน-แกรโนไฟลด์ (ในแนวคดโค้งแปรสัณฐาน)(Sn-W-Granophyle Deposits in Fold Belts)

แหล่งแร่ดีบุก-ทั้งสะเตนซึ่งพบเห็นว่ามีกำเนิดในแนวคดโค้งแปรสัณฐานนี้มักเกิดร่วมอยู่กับแกรนิต"จริงๆ" (sensu stricto) และหินแกรนิตขาว(leuco-granites) ทั้งในแง่กาลเวลา(temporal) และสถานที่(spatial)ที่บางท่านเรียกรวมกันว่า "กาลวาศ" หินแกรนิตดังกล่าวมักเป็นแกรนิตที่เกิดอยู่ในระดับลึกถึงลึกปานกลาง(จนถึงตื้น) และมักประกอบด้วยกลุ่มธาตุแกรโนไฟด์ ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น และรวมทั้งธาตุหายาก (REE หรือ rare-earth elements) ด้วย

แหล่งแร่ชนิดนี้ประกอบด้วยแหล่งแร่ย่อย 4 ชนิดด้วยกัน คือ

- 1) แหล่งแร่ฟิงปะในหิน (Disseminated Deposits)
- 2) แหล่งแร่ไกรเซน (Greisen Deposits)
- 3) แหล่งแร่สาย และร่างแห (Vein & Stockwork Deposits) และ
- 4) แหล่งแร่สายสมบูรณ์ (Lode Deposits)

โดยทั่วไปแหล่งแร่ 1) และ 2) เป็นแหล่งแร่ที่เกิดในตัวแกรนิต (intragranitic) ส่วน 3) และ 4) เกิดได้ทั้งในตัวแกรนิตตรงขอบ (perigranitic) และนอกตัวแกรนิต (exogranitic) นอกเหนือจากแร่ดีบุก-ทังสเตนแล้ว ในปัจจุบันแหล่งแร่ดังกล่าวยังเป็นสินแร่สำคัญของแร่แทนทาลัม-โคลัมไบต์, นีโอเบียม (Nb), ลิเทียม (Li), โมลิบดีนัม (Mo), ควอร์ต และเฟลสปาร์อีกด้วย

หินแกรนิตส่วนใหญ่ที่พบเกิดอยู่ร่วมกับแหล่งแร่ดังกล่าวนี้มักมีสีจางและมีเนื้อผลึกที่ค่อนข้างหยาบจนถึงหยาบปานกลาง ในบางครั้งแสดงเนื้อดอก ซึ่งโดยมากประกอบด้วยเฟลสปาร์ (อาจถึง 60% โดยปริมาตร) และควอร์ต (30%) ที่เหลือเป็นแร่ไมก้า (แร่กลีบขาว-muscovite และแร่กลีบดำ-biotite) นอกจากนั้นอาจมีแร่ฮอนเบลนด์อยู่ด้วย

จากการศึกษา แกรนิตจากหลายแห่งของโลกพบว่า หินแกรนิตมีกำเนิดได้ใน 4 ลักษณะดังต่อไปนี้

- 1) จากการหลอมละลายบางส่วนในชั้นเปลือกโลกตอนล่าง (ใกล้ๆกับชั้นเนื้อโลก) หรือ "anatexis"
- 2) จากการหลอมละลายของแผ่นเปลือกโลกที่เกิดการมุดตัวลงไปข้างใต้ของอีกแผ่นหนึ่งหรือ "subduction"
- 3) จากการแยกลำดับส่วน "(หรือ differentiation)" จากหินหนืดชนิดบะซอลต์โทไลอิด (tho leiitic basalt) และ
- 4) จากการแปรสภาพขั้นสูง (high-grade metamorphism) ในบริเวณมิกมาไทต์ (migmatite)

ไม่ว่าหินแกรนิตหรือแกรนิตอยด์ทุกชนิดที่ให้นกำเนิดแหล่งแร่เสมอไป ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะเฉพาะทางธรณีเคมีของหินแกรนิต ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากลักษณะที่เกิดความสมบูรณ์ของธาตุที่ไม่เข้าพวกกัน (incompatible elements) จากสารหลอมละลายแรกเริ่มธรรมดาโดยผ่านกระบวนการตกผลึกลำดับส่วน (fractional crystallization หรือ magmatic differentiation theory) หรืออาจเกิดจากสารหลอมละลายที่รับช่วงเอาลักษณะพิเศษทางธรณีเคมี อันเป็นผลมาจากการหลอมละลายบางส่วนจากหินเดิม และต่อมาจึงเกิดวิวัฒนาการของหินหนืดเพื่อช่วยเพิ่มลักษณะผิดปกติจากเดิมขึ้นมา (geochemical heritage theory)

เป็นที่น่าสังเกตว่ามวลหินหนืดชนิดแกรนิตที่เคลื่อนตัวขึ้นมาจากที่ลึกๆ สู่เปลือกโลกระดับต้น อันเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการตกผลึกลำดับส่วน ดังนั้นสำหรับนักสำรวจเราจึงควรให้ความสำคัญของหินแกรนิตระดับต้น (high-level, highly evolved & post-kinematic granites) มากกว่าหินแกรนิตระดับลึก (Low-level, less-evolved & syn-kinematic granites)

แหล่งแร่ประเภทนี้มักเกิดร่วมกับหินแกรนิตสีขาว ซึ่งมีแร่ควอร์ตอยู่ด้วยมาก และมักมีกลุ่มธาตุที่เรียก แกรโนไฟล้อยู่ด้วย ซึ่งในที่นี้เราจัดแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- กลุ่มแคโทไอออนประจุใหญ่ เช่น Sn^{4+} , W^{6+} , U^{4+} & Mo^{6+} ซึ่งเรียกว่า "กลุ่ม SWUM"

- กลุ่มแคโทไอออนประจุเล็ก เช่น Be^{2+} , B^{3+} , Li^+ & P^{5+} ซึ่งเรียกว่า "กลุ่ม BEBLIP"
- และ - กลุ่มแอนไอออนเชิงซ้อน เช่น CO_3^{2-} , Cl^- , F^- รวมทั้ง As และ H_2O ด้วย ซึ่งเรียกว่า "กลุ่ม CCF"

สำหรับนักสำรวจแร่กลุ่มแรก ยังประกอบด้วยธาตุที่สำคัญทางเศรษฐกิจตัวอื่นอีก เช่น Nb, Ta, Bi, และ Ag ส่วนกลุ่มที่สองประกอบด้วยแร่ที่มักพบเห็นในหินไกรเซิน เช่น Na, Rb, Cs และ REE และกลุ่มสุดท้ายคือกลุ่มที่สามยังอาจรวมถึงพวกซิลไฟด์และไฮดรอกซิลเชิงซ้อนบางตัว (ดูรูป 9.2.5 และ 9.2.6) ซึ่งปัจจุบันเข้าใจว่าเป็นตัวกลางในการพาเอากลุ่มธาตุสองจำพวกแรกคือ SWUM & BEBLIP มา และยังเชื่อว่าทั้ง BEBLIP & CCF ยังแสดงบทบาทสำคัญในการควบคุมการเกิดสารหลอมละลาย (หรือหินหนืด) และการตกผลึกเป็นหินอัคนีบาดาลชนิดต่างๆ ด้วย ส่วนกลุ่มแรก (SWUM) เป็นพวกที่ทำให้เกิดแหล่งแร่มีค่าทางเศรษฐกิจเป็นส่วนใหญ่ รูป 9.2.7ก และ 9.2.7ข แสดงถึงบทบาทสำคัญที่อุณหภูมิ ความลึก (ความดัน) และปริมาณน้ำในหินหลอมละลายมีผลต่อการตกผลึกของแร่ธาตุเศรษฐกิจที่สำคัญๆ

นอกจากลักษณะเฉพาะทางธรณีเคมีและวิทยาแร่ (รูป 9.2.5) ของแกรนิตจะมีความสำคัญต่อการสำรวจแร่แล้ว นักสำรวจยังควรใส่ใจถึงพารามิเตอร์หรือปัจจัยตัวอื่นอีกด้วย ที่สำคัญคืออุณหภูมิและความดัน (รูป 9.2.7ก) ปริมาณออกซิเจนและสารระเหิด (volatiles) (รูป 9.2.7ข) ในสารหลอมละลายและการเปลี่ยนแปลงสภาพ (alteration) โดยเฉพาะพวกที่สามารถสังเกตได้ง่ายจากสนาม หรือภายใต้กล้องจุลทรรศน์

Ishihara (1977, ศาสตราจารย์จากกรมทรัพยากรธรณีญี่ปุ่น) อาจนับได้ว่าเป็นคนแรกซึ่งให้ความสำคัญกระจ่างในเรื่องปริมาณออกซิเจนในสารหลอมละลาย (หรือหินหนืด) ความจริงเขาได้รับอิทธิพลจากแนวความคิดของ ดร. โทยม อรัณยกานนท์ (Aranyakanon, 1964), ราชบัณฑิตศึกษาธรณีวิทยาเกี่ยวกับเรื่องหินแกรนิตและการกำเนิดแร่ดิบูกแบบหาดส้มแป้น (Haad Sompan-type mineralization) จังหวัดระนอง ซึ่งทำให้ Ishihara สามารถแบ่งหินแกรนิตในโลกอย่างง่าย ๆ ออกเป็น 2 ชุดใหญ่ๆ คือ แกรนิตชุดอิลมิไนต์ (ilmenite-series) และชุดแมกนีไทต์ (magnetite-series) (ดูรายละเอียดในตาราง 9.2.1) เขาค้นพบเห็นในญี่ปุ่นว่า การเกิดแหล่งแร่ดิบูกที่นั่นและในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีความสัมพันธ์กับหินแกรนิตชุดอิลมิไนต์ ส่วนแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกและโมลิบดีนัมมักสัมพันธ์หรือเกิดร่วมกับหินแกรนิตชุดแมกนีไทต์ เขายังเชื่อว่าที่

รูป 9.2.5 แผนที่ธรณีวิทยาอย่างง่าย รอบๆแหล่งแร่ชาตุนาซก (Bastnesite) ในรัฐแคลิฟอร์เนีย, อเมริกา
(Olson และคณะ,
1954)

รูป 9.2.6 กราฟแสดงอุณหภูมิ – ความดันของสารหลอมละลายและปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดหินแกรนิต เส้นทึบของ “granite” “tonalite” และ “amphibolite” เป็นเส้น solidus (จาก Wyllie, 1977) เส้น solidus (ประ) และเส้น liquidus (ทึบ) ของแร่ muscovite (Mu), Biotite (Bi), และ hornblende (Hb) จาก Burnham (1979) ส่วนรูปเล็กแสดงส่วนประกอบโดยทั่วไปของสารหลอมละลาย ณ อุณหภูมิ และความดันต่างๆ (Brown & Fyke, 1970) รูป 9.105 ผลของธาตุหรือสารประกอบต่างๆ ต่ออุณหภูมิการหลอมละลายหินแกรนิต ~ 2.75 กิโลบาร์ (ดัดแปลงจาก Luth 1976) และโปรตอน 1 กิโลบาร์ (Chorlton and Martin 1978)

รูป 9.2.7 ผลของธาตุหรือสารประกอบต่างๆ ต่ออุณหภูมิหลอมละลายหินแกรนิต ~ 2.75 กิโลบาร์ (ดัดแปลงจาก Luth 1976) และโปรตอน 1 กิโลบาร์ (Chorlton & Martin 1978)

ญี่ปุ่นแกรนิตที่ใดที่หนึ่งที่เกิดเฉพาะในยุคหนึ่งๆ จะเป็นแกรนิตชุดเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ในแง่การสำรวจแร่หินแกรนิตดังกล่าวจึงเป็นประโยชน์มากต่อการทำแผนที่

Ishihara (1977) ได้สรุปว่าไดบุกในสภาพหินหลอมละลายยังคงสภาพของประจุอยู่ในสภาพ tetravalent หรือ bivalent ได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจน (oxygen fugacity) ของการหลอมละลายนั้น ด้วยเหตุนี้ Sn^{4+} จึงเข้าไปแทนที่ Ti^{4+} หรือ Fe^{3+} ได้ ในแร่ที่มีไดบุกอยู่ด้วย เช่น สฟีน (sphene), อิลมีไนต์, แมกนีไทต์, แร่กาลีบด้า (biotite) และฮอนเบลนด์ (hornblende) ในสภาพที่เต็มไปด้วยออกซิเจน ด้วยเหตุนี้เมื่อไดบุกถูกนำไปใช้ในการเกิดแร่ดังกล่าวจนเกือบหมด จึงมีปริมาณไดบุก (จริงๆ) เหลืออยู่น้อยในสารหลอมละลายที่เหลือ

(residual melts) แต่ในสภาวะขาดออกซิเจน ดีบุกและธาตุ SWUM ตัวอื่นๆ ไม่สามารถเข้าไปอยู่ในแร่ได้ จึงเหลือค้างอยู่ในสารละลายส่วนที่เหลือต่อไปจนถึงภาวะอุณหภูมิหนึ่ง จึงตกผลึกเป็นแร่ดีบุก (cassiterite) ได้

ก่อนหน้านี้ศาสตราจารย์จากมหาวิทยาลัย La Trobe ในประเทศออสเตรเลีย 2 ท่านคือ Chappel & White (1974) (ดู Pacific Geology, 8, 173-174) ได้ทำการศึกษาหินแกรนิตในบริเวณออสเตรเลียตะวันออก (แถบ New England, New South Wales, และ Tasmania) และได้จำแนกหินแกรนิตออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ แกรนิตตะกอน (S-type granite) และแกรนิตอัคนี (I-type granite) ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว (ดูตาราง 9.2.2) พบว่าหินแกรนิตตะกอนสามารถเทียบเคียงได้กับหินแกรนิตชุดอลิไมต์ ส่วนหินแกรนิตอัคนีสามารถเทียบเคียงได้กับหินแกรนิตชุดแมกนีไทต์ของท่านศาสตราจารย์ Ishihara ได้

เมื่อทำการศึกษาแกรนิตในแถบบริเวณดังกล่าวในเวลาต่อมา Hine และคณะ (1978 ดู Contrib. Mineral. Petrol., 80, 189-200) และ Collin และคณะ (1982, ใน J. Geol. Soc. Austr., 25, 210-234) พบว่าในการกำเนิดเป็นแหล่งแร่ดีบุก (กลุ่มแร่ SWUM) ตัวอื่นๆ ไม่จำเป็นต้องสัมพันธ์กับแกรนิตชุดอลิไมต์ (หรือแกรนิตตะกอน) เสมอ แต่มักมีความใกล้ชิดกับหินแกรนิตชนิดที่ลำดับส่วนมาเป็นพิเศษ (special & more fractionated) จากหินแกรนิตเดิม ซึ่งอาจเป็นแกรนิตตะกอน (S-type) แกรนิตอัคนี (I-type) และแกรนิตไร้การแปรสัณฐาน (A-type) อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

ในสนาม นักสำรวจจึงจำเป็นต้องแยกแยะให้ออกว่าเรากำลังศึกษาแกรนิตอะไรอยู่ และจะมีโอกาสสัมพันธ์กับแหล่งแร่ชนิดใด

ในส่วนข้างล่างนี้ เป็นการสรุปโดยย่อของหินแกรนิต ประเภทต่างๆ

1) แกรนิตตะกอน (S-type granites)

- เนื้อหิน - โดยมากมักเป็นเนื้อวิวิธพันธ์ (heterogeneous) ในหินโผล่ และมีปริมาณของสารแปลกปลอมเหลือค้าง (residual inclusion) มากถึง 50% สารแปลกปลอมส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเกล็ด และบางครั้งแสดงริ้วลายขนาน (foliation)
- วิทยาแร่ - มักประกอบด้วยแร่จำพวกอะลูมิโน-ซิลิเกต เช่น การ์เนต คอรัเดียไรต์ ส่วนแร่ไบโอไทต์ (กาลีบดำ) มักมีขอบแดงๆ, แร่มีสโดไวต์ (กาลีบขาว) เค้น ส่วนแร่ฮอนเบลนด์ไม่มีและแร่โปแตสเฟลสปาร์เด่นกว่าแร่แพลจิโอเคลส
- ธรณีเคมี - มักให้ปริมาณแร่ทองเคมีที่เป็นคอร์รันดัม (corundum norm) ซึ่งแสดงถึงสถานะที่มีอลูมินัมมาก (peraluminous) และมีปริมาณ K_2O โอคริปไม่ใช่อิออนมากกว่า Na_2O

2) แกรนิตอัคนี (I-type granites)

- เนื้อหิน - โดยมากเป็นเนื้อเอกพันธ์ (homogeneous) ตลอดทั้งหินโผล่ และมักมีสารแปลกปลอมที่มีลักษณะกลม และไม่แสดงริ้วลายขนาน

- วิทยาแร่ - มักประกอบด้วยแร่ที่มี Ca เป็นองค์ประกอบ เช่น ฮอนเบลนด์ สฟีน และมักอะลาไนต์, ส่วนแร่ไบโอไทต์(กาลีบดำ) มักเป็นสีชอกโกเลตจนถึงดำ
- ธรณีเคมี - มักมีปริมาณ Na_2O มากกว่า K_2O และปราศจากปริมาณแร่ทางเคมีของคอร์นคัม

3) แกรนิตใต้การแปรสัณฐาน (A-type granite)

- เนื้อหิน - โดยมากเป็นเนื้อเอกพันธ์ คล้ายของแกรนิตอัคนี แต่แทบไม่พบสารแปลกปลอมเลย
- วิทยาแร่ - แร่โปแตสเซียมเฟลสปาร์ มักเป็นสีส้มแดงถึงชมพู ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการมีเหล็กออกไซด์ จึงจัดว่าเป็นหินแกรนิตจริงๆ เพราะปริมาณโปแตสเซียมเฟลสปาร์ โดยมากอยู่ในช่วง 30-50% และแร่กาลีบดำ (ไบโอไทต์) เป็นพวกแร่แอนไนต์ที่มีเหล็กสูง
- ธรณีเคมี - ในแง่ธาตุพบน้อย อาจสรุปได้ว่าประกอบด้วยแคโทไอออนประจุสูง เช่น Nb และ Ga

จากงานวิจัยแกรนิตของออสเตรเลียพบว่า การเกิดแหล่งแร่ดีบุก(และกลุ่มแร่ SWUM) อาจเกิดกับหินแกรนิตอะไรก็ได้ แต่สำหรับประเทศไทยพบว่าหินแกรนิตที่ให้แหล่งแร่ดีบุก-ทังสเตน มักเป็นหินแกรนิตตะกอน หรือแกรนิตชุดอลิเมนต์เป็นส่วนใหญ่ (ดูรายละเอียดในปัญญา จารศิริ และคณะ, 2539)

อย่างไรก็ตาม ธรณีเคมีของธาตุปริมาณน้อยอาจจัดได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ตรงไปตรงมาที่สุดใน การหาแหล่งแร่ดังกล่าวนี้ อัตราส่วนของธาตุสำคัญๆ ได้แก่ Rb/Sr, Rb/Ba, K/Rb, TiO_2/Sn , Rb/Sr-Sn และ TiO_2/Ta ในออสเตรเลียพบว่าถ้าแกรนิตมีปริมาณ Rb ประมาณ 400 ppm ก็ให้จัดว่าแกรนิตนั้นแสดงค่าที่อยู่ระหว่างพวกที่ตกผลึกลำดับส่วน (fractionated) ไปแล้ว กับพวกที่ไม่เป็นเช่นนั้น (non-fractionated)

แต่ก็นั่นแหละสำหรับนักสำรวจที่มีความชำนาญ เขาย่อมรู้ดีว่าหลักการดังกล่าวใช้กับการเกิดเป็นแหล่งแร่ดีบุกเนื้อดอก(tin porphyry) ของโบลิเวียไม่ได้ การตกผลึกลำดับส่วนย่อมเป็นที่ทราบกันดีว่ามีผลสำคัญต่อความสมบูรณ์ของดีบุก แต่ปริมาณดีบุกในตอนแรกเริ่มก็เป็นตัวกำหนดความสำคัญทางเศรษฐกิจด้วยเหมือนกัน

แหล่งแร่ดีบุก-ทังสเตน(และ Nb-Ta) หรือแกรโนไฟลด์ตัวอื่นๆ ไม่ได้มีการกระจายตัวอยู่ในทุกพื้นที่ที่มีหินแกรนิต และลักษณะการเกิดมีความแตกต่างกันไปในแต่ละทิศ

ก. แหล่ง Krusne-hory (ของ Erzgebirge) ในยุโรปกลาง (รูป 9.2.8 และ 9.2.9) เป็นแหล่งแร่ไกรเซนต์ที่สำคัญ หินแกรนิตที่โผล่ในพื้นที่เป็นแกรนิตแบบหนึ่งของ Erzgebirge Pluton ซึ่งเกิดในช่วงอายุ

รูป 9.2.8 แผนที่ยุโรปตะวันตกและกลาง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหินแกรนิตกับแหล่งแร่ดีบุก-ทังสเตน (Baumann และ คณะ, 1974)

รูป 9.2.9 แผนที่บริเวณแอตแลนติกแสดงการกระจายตัวของหินแกรนิตยุคเก่า (OG) และยุคใหม่ (YG) และการกระจายตัวของแหล่งแร่ดีบุก (Tischendorf และคณะ, 1965; Schust, 1968)

รูป 9.2.10 แผนที่ตะวันตกเฉียงใต้ของอังกฤษ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งแร่ดีบุก, ทองแดงและตะกั่ว ตลอดจนการกระจายตัวของแหล่งแร่เหล่านี้กับหินแกรนิต (Sawkins, 1984)

รูป 9.2.11 ภาพตัดขวางแสดงแหล่งแร่ดีบุกปฐมภูมิทางตะวันตกเฉียงใต้ของอังกฤษ (Hosking, 1969)

รูป 9.2.12 (บน) แผนที่ธรณีวิทยาแสดงการกระจายตัวของหินแกรนิตชนิดต่าง ๆ และแหล่งแร่ที่ปรากฏลักษณะเด่นในแถบ
เซนต์ออสเทล อังกฤษ
(ล่าง) แผนภาพแสดงลักษณะการวางตัวของสายแร่ (Bray & Spooner, 1983)

Hercynian (เฮอริไซเนียน) หรือ Variscan (วาริสกัน) ซึ่งครอบคลุมพื้นที่มากถึง 180x75 กม และแทรกดันเข้ามาในหินข้างเคียงซึ่งเป็นหินตะกอนน้ำลึกและมีการแปรสภาพอยู่ตั้งแต่พรีไกรเซน นอกจากนั้นยังมีพวกโลหะพื้นฐานซัลไฟด์, ซิงค์วาไลต์ (zinnwaldite), ฟลูออไรต์, โทฟาส (topaz) และทัวมาลีน(หรือทูรมาลี)

ข. แหล่งคอนวอลต์ (Great Britain) (ดูรูป 9.2.10 และ 9.2.11) จัดว่าเป็นแหล่งแร่สายสมบูรณ์ (vein lode deposits) ที่มีชื่อเสียงในอดีตโดยมีแกรนิตที่โผล่ให้เห็นเป็นบริเวณกว้าง 5 บริเวณ แต่ละบริเวณอาจมีแขนงแกรนิตเล็กๆ แยกโผล่ออกอีกต่างหาก แทรกดันเข้ามาในหินดีโวเนียนถึงคาร์บอนเฟอรัส จำพวกตะกอนเม็ด (ที่เรียก the killas) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะอย่างมракมาย เชื่อกันว่าแกรนิตที่โผล่นี้แท้จริง

แล้วคงเชื่อมต่อกันเป็นตัวยาวกันข้างใต้ลึกลงไปเป็นป็นหินอัคนีมวลไพศาล (batholith) ซึ่งน่าจะมีความยาวรวมกันประมาณ 400 กิโลเมตร ในตัวแกรนิตเองมีสายคราหรือเพกมาไทต์และแอบไพล์เล็กๆ ซึ่งไม่ให้แหล่งแร่มากมาย นอกจากนั้นยังมีพนักหินเนื้อดอก และแกรนิตผลึกละเอียด (ที่เรียก "elvans" หนาถึง 30 เมตร และยาวหลายกิโลเมตร) เอลแวนส์ (Elvans) นี้คือสายแร่เศรษฐกิจที่สำคัญของ (คอนวอลล์(Cornwall)ที่ใหแร่ดีบุกและทั้งสะสมมากมายมหาศาลและเกิดในตัวไกรเซนในสภาพสายแร่ร่างแหติดกับยอดและขอบแกรนิต และส่วนที่แทรกเข้าไปในหินข้างเคียง(Killias)ด้วย เป็นสินแร่สายสมบูรณ์ซับซ้อน ในรูป 9.2.12 แสดงถึงการกระจายตัวของแหล่งแร่รอบๆ แกรนิต St. Austell (เซนต์ ออสเทล) ที่มีชื่อของคอนวอลล์

นอกจากนั้นยังมีแหล่ง Storey's Cree (Sn, W) ใน Tasmania (ออสเตรเลีย) Sungei Lembing (Sn) ในมาเลเซีย, และแหล่งสะเมิง (เชียงใหม่) (ดูรูป 9.2.13)

ก. แหล่ง Panasquiera (โปตุเกส) เป็นแหล่งแร่ชนิดสายแร่แผ่น (sheeted vein) ชนิดพิเศษจำพวก W-Sn-Cu ที่เรียกว่าเป็นชนิดพิเศษเพราะสายแร่อยู่ในแนวเกือบระดับ จัดว่าเป็นแหล่งทั้งสะสมที่ใหญ่ที่สุดของยุโรป(ในสมัยก่อน) มีประวัติการผลิตมากถึง 100,000 ตัน (WO_3)

9.2.3 แหล่งแร่สายคราหรือเพกมาไทต์ (Pegmatite Deposits)

หินเพกมาไทต์หรือที่คนเหมืองโดยเฉพาะแถบทางใต้ของประเทศไทยเรียกสายครา เป็นหินอัคนีบาดาลจำพวกแกรนิตที่มีผลึกใหญ่มากเป็นพิเศษ โดยผลึกมีการสานเกี่ยวกันและมักเกิดขึ้นมาในลักษณะพนักหินหรือสายแร่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตรงขอบของหินแกรนิต โดยทั่วไปผลึกหลายผลึกมีขนาดใหญ่กว่า 1 ซม

ในที่นี้เราจำแนกหินเพกมาไทต์ออกเป็น 2 พวก ได้แก่

1) พวกที่อยู่ภายในหรือภายนอกตัวหินอัคนีบาดาล ซึ่งมีความใกล้ชิดกับหินอัคนีดังกล่าว แต่ไม่จำเป็นต้องมีส่วนประกอบอย่างหินแกรนิตนั้น บางท่านเรียกว่า "perigranite pegmatites" หรือสายคราแกรนิต และ

2) พวกที่เกิดในบริเวณที่หินมีการแปรสภาพอย่างมาก แต่ไม่มีความเกี่ยวข้องกับหินแกรนิต ซึ่งส่วนประกอบส่วนใหญ่กลับมีลักษณะคล้ายหินแกรนิต พวกหลังนี้เกิดได้ต่อเมื่อส่วนประกอบซึ่งได้แก่ กลุ่มแร่ควอร์ต-เฟลสปาร์ซึ่งเคลื่อนตัวได้ง่ายกว่ามาสะสมตัวในบริเวณช่องเปิดที่กว้างออก (dilation openings) ในตอนช่วงการแปรสภาพลำดับส่วน ทำให้ได้สายคราหรือเพกมาไทต์ที่ไม่มีแนว และอาจเรียก "homogeneous pegmatites" หรือสายคราเอกพันธ์

ส่วนพวกแรก (หรือ perigranite pegmatite) มักได้แก่ สารหลอมละลายซิลิกาซึ่งมีน้ำมาก จากหินหนืดสีเข้มปานกลางจนถึงสีขาว จึงเชื่อกันว่าเป็นสารหลอมละลายที่เหลือค้าง ซึ่งมีปริมาณซิลิกา อะลูมินา น้ำ สารฮาโลเจนส์ ตลอดจนแอลคาไลต์ และลิโทไฟล์ (lithophile) ซึ่งมักไม่ค่อยพบเห็นในหินอัคนีทั่วไป ลักษณะเด่นของหินคราหรือเพกมาไทต์พวกนี้คือ มักแสดงแถบภายในชัดเจน (distinct internal zoning) โดยทั่วไปมักพบเห็นเป็น 3 แถบใหญ่) คือ

- ก) แถบนอก (Border zone) ซึ่งเป็นช่วงต่อระหว่างหินรอบข้างกับตัวสายคราหรือเพกมาไทต์ โดยมากประกอบด้วยแร่ควอร์ต
- ข) แถบผนัง (Wall zone) โดยทั่วไปมีลักษณะทางแร่คล้ายแถบนอก แต่ประกอบด้วยผลึกที่หยาบกว่า แต่ไม่พบส่วนที่เหลือของหินรอบข้างในสนามมักพบว่า นอกเหนือจากแร่ควอร์ต แล้วยังประกอบด้วยแร่แฟลจิโอเคลสกับมัสโคไวต์ และ
- ค) แถบตอนกลาง (Intermediate Zone) พบว่ามักมีผลึกหยาบ จัดว่าเป็นส่วนสำคัญของมวลเพกมาไทต์ โดยมากประกอบด้วยแร่ควอร์ต เพอร์ไทต์(perthite), แฟลจิโอเคลส และแร่ธาตุทางเศรษฐกิจที่สำคัญ เช่น บีริล (Beryl- $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) และสปอดูมิน (spodumene- $\text{Li Al Si}_2\text{O}_6$), โพลูไซต์ (Cs-Al-silicate ที่มีน้ำ) ปีทาไลต์ (petalite- $\text{Li Al Si}_4\text{O}_{12}\text{X}$, แอมบริโกไนต์ (amblygonite- $\text{Li Al (F, OH, PO}_4\text{)}$ แทนทาไลต์ (tantalite- $(\text{Fe, Mn}) (\text{Nb, Ta})_2\text{O}_6$) และ
- ง) แถบใจกลาง (Core Zone) ส่วนใหญ่มักเป็นมวลแร่ควอร์ตในใจกลางสุด และอาจมีแร่บางตัวปรากฏทรอบได้ เช่น บีริล (beryl), แทนทาไลต์, ทัวมาลีน, และสปอดูมิน เป็นต้น (ดูรูป 9.2.15 ก, ข, และ ค)

เมื่อพิจารณาถึงกลุ่มแร่ที่มักปรากฏในสายเพกมาไทต์จนมีลักษณะเห็นเป็นแถบจากส่วนนอกจนมาถึงแถบใจกลาง อาจจัดแบ่งได้เป็น 9 กลุ่มดังนี้

1. (แถบนอก) - plagioclase + quartz + muscovite
2. ↓ - plagioclase + quartz
3. ↓ - quartz + perthite + plagioclase
4. ↓ - perthite + quartz
5. ↓ - quartz + plagioclase + perthite + spodumene + petalite + amblygonite
6. ↓ - quartz + spodumene + petalite
7. ↓ - quartz + microcline (+ perthite)
8. ↓ - quartz
9. (แถบใจกลาง) - lepidolite (= Li mica) + plagioclase + quartz + microcline

สำหรับแถบโครงสร้างของสายคราหรือเพกมาไทต์และการบานออก(centripetal)ของกลุ่มแร่ เชื่อกันว่าเป็นผลมาจากกระบวนการงอกเงยจากแถบนอกก่อนค่อยๆเข้าสู่แถบใจกลาง จะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่ กลุ่มแร่ภายในสุดมักแสดงถึงผลจากการหลอมละลาย เป็นหินแกรนิตอยด์ขั้นสุดท้ายที่มีปริมาณสารระเหิด ได้มาก (เช่น Li, Be, และ OH) และธาตุที่มักไม่เข้าไปมีส่วนร่วมในการเกิดเป็นแร่อุณหภูมิสูงในตอนแรก (เช่น Sn, Ta และ Wo) ยิ่งกว่านั้นสายคราหรือเพกมาไทต์จากหลายสายยังแสดงลักษณะเนื้อแทนที่ (replacement texture) ซึ่งพบเห็นตัดขวางแถบโครงสร้างสายคราหรือเพกมาไทต์เดิมในหลายแห่งพบว่าสาย คราที่แสดงเนื้อหินแทนที่มักมีผลึกละเอียดกว่าพวกที่สายคราที่ถูกเข้าไปแทนที่ ทำให้พบว่าในสายแร่ครามี

ลักษณะทางวิทยาแร่และโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่ซับซ้อนมาก เช่นที่เห็นแถบโรดิเชีย (ที่เรียก Bikita pegmatite) ervaand้าและคองโก ทางตอนกลางของแอฟริกา (ดูรูป 9.1.16, 9.1.17, และ 9.1.18)

แนวทางการสำรวจ

การสำรวจหาแหล่งแร่สายคราหรือเพกมาไทต์นั้นอาจยากมากกว่าแหล่งแร่แบบอื่น โดยเฉพาะในสายตาของนักสำรวจจากยุโรปและอเมริกา เพราะตำแหน่งของแหล่งแร่คาดการณ์ได้ยาก อีกทั้งมีรูปร่างก็ไม่แน่นอน - ในบางครั้งผู้สำรวจไม่ทราบด้วยซ้ำด้วย ขณะนี้ตัวเองอยู่ส่วนใดของสาย แม้จะเลยสายไปแล้วก็ตาม - ก็ไม่รู้ว่าจะเป็นส่วนบนหรือส่วนล่าง ! อย่างไรก็ตามในบริเวณที่มีการผุพังสูง เช่นประเทศไทย สายคราหรือสายเพกมาไทต์อาจหาได้ง่ายกว่า ถ้าอาศัยแร่หนัก ตามส่วนต่างๆที่เป็นที่ต่ำเช่น พื้นหุบเขา ลำน้ำ หรือเชิงเขา ในหลายแห่งเพราะอิทธิพลของการผุพังทำให้เกิดลานแร่ที่สะสมตัวมาจากการชะล้างสายเพกมาไทต์ที่ให้แร่ในส่วนที่อยู่สูงขึ้นไป (เช่น แหล่งแทนทาไลต์ในบราซิล แหล่งดีบุกในแอฟริกากลาง) สายครามักประกอบด้วยแร่มีค่าทางเศรษฐกิจมากกว่า 1 แร่ ดังนั้นในทางธรณีวิทยาจึงมีส่วนช่วยในการสำรวจ แต่อาจไม่เป็นผลดีต่อการแต่งแร่เท่าที่ควร เช่นกรณีแหล่งประกอบด้วย แร่ดีบุก-ทั้งสะเตน-แทนทาไลต์ เป็นต้น เพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการแต่งแร่

สำหรับสายแร่เพกมาไทต์ที่เกิดรอบหินแกรนิตตะกอน(S-type)มักแสดงแนวแร่ชัดเจน ในแถบจังหวัดทางใต้ของไทย เช่น ภูเก็ต พังงา ระนอง มักพบว่าสายเพกมาไทต์ที่อยู่ในหินแกรนิตมักเป็นสายเล็กๆ และได้แร่ทางเศรษฐกิจน้อยกว่าพวกที่แทรกคดเข้ามาในหินข้างเคียงที่เป็นตะกอนเม็ด (clastics) แต่แกรนิตประเภทนี้

อาจกล่าวได้ว่าสายคราหรือเพกมาไทต์ไม่ใช่เป้าหมายสำคัญของการสำรวจ มักจะเป็นแหล่งที่เล็ก และรูปร่างไม่แน่นอน (คาดการณ์ได้ยาก) แต่ก็อาจมีหลายแหล่งที่สายเพกมาไทต์ใหญ่มากพอทำเหมืองใหญ่ได้ เช่น แหล่งพะโต๊ะ (ชุมพร), แหล่ง Kamatiri (Zimbabwe), แหล่ง Gatumba (Rwanda) หรือแหล่ง Manono (Zaire) แหล่งหลังสุดนี้ผลิตแร่ดีบุกได้มากถึง 127,000 ตัน) สำหรับประเทศไทยปัจจุบัน สายคราหรือเพกมาไทต์เหมาะมากที่เป็นแหล่งผลิตแร่ฟอสฟอรัสทั้งชนิดโปแตสเซียมสูง และโซเดียมสูง เช่น ที่ทองผาภูมิ (กาญจนบุรี) สวนผึ้ง (ราชบุรี) ขุนยวม(แม่ฮ่องสอน)

รูป 9.2.16 การกระจายตัวของสายครามีแร่ธาตุหายากปรากฏในหรือรอบ ๆ หินแกรนิต ในคองโกและรวันด้า
(Varlamoff, 1972)

รูป 9.2.17 ชนิดของสายคราที่สำคัญ 2 ชนิด
ก) แทรกในรอยแตก และ
ข) เข้าแทนที่ (Guilbert & Park, 1986)

รูป 9.2.18 แผนที่และภาพถ่ายทางอากาศของสายครา Bikita ในประเทศโรดิเชีย ตอนกลางทวีปอาฟริกา(Pelletier, 1964)

9.2.4 แหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอก (Porphyry Copper Deposits)

โดยทั่วไป คำว่า "แหล่งทองแดงเนื้อดอก" ใช้กับแหล่งแร่ซึ่งมักให้กำเนิดแร่ทองแดงที่อยู่ในหินอัคนีสีค่อนข้างจาง ในปัจจุบันคำนี้กินความหมายกว้างขึ้นมากกว่าเดิมและมีความหมายครอบคลุมถึง "แหล่งแร่ทองแดง" ที่เกี่ยวข้องกับหินอัคนีที่ให้แร่ทองแดง ซึ่งมีความสมบูรณ์ต่ำ โดยที่สายแร่เกิดหลังหินที่มันอยู่ (epigenetic) โดยวิธีการทำเหมืองแบบเป็นมวล โดยปกติแหล่งแร่มักปรากฏอยู่ในรอบมหาสมุทรแปซิฟิก (ดูรูป 9.2.19)

Lowell (1974) ได้เสนอว่าแหล่งทองแดงเนื้อดอกที่สามารถทำเหมืองได้คุ้มทุน ควรเป็นแหล่งปริมาณมากกว่า 20 ล้านตัน ณ ความสมบูรณ์แร่ 0.1% Cu แต่ที่จัดว่าเป็นเหมืองทองแดงเนื้อดอกระดับโลก

ส่วนใหญ่มีปริมาณสำรองตั้งแต่มากกว่า 15 ล้าน จนถึง 3 พันล้านตัน และมีความสมบูรณ์ของทองแดงระหว่าง 0.8 ถึง 2% Cu แหล่งทองแดงที่ใหญ่จริงๆ เช่น ประมาณ 2 พันล้านตัน ณ ความสมบูรณ์ของทองแดงที่ 1.5% Cu สามารถผลิตโลหะทองแดงได้ถึง 20 ล้านตัน (ดูฐานข้อมูลหมายเลข 7)

นอกจากหินอัคนีดังกล่าวจะเป็นแหล่งแร่ทองแดงแล้ว ยังให้สินแร่ตัวอื่นอีก เช่น Mo, Au, Ag และ W เป็นต้น

รูป 9.2.19 แสดงปริมาณแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกที่พบในที่ต่างๆ ทั่วโลก ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กับแนวมุดตัวของแผ่นเปลือกโลกทั้งในอดีตและปัจจุบัน ซึ่งมีทั้งส่วนที่เป็นขอบทวีปคดกลืน (consuming margins) และที่เป็นแนวเกาะโค้ง (island arcs) ดังแสดงในรูป 9.2.20 (แต่ที่ยกเว้นก็คือที่ญี่ปุ่น เพราะไม่มีแหล่งแร่ใหญ่ๆ ดังกล่าว ปรากฏชัด) ในแต่ละแนวปริมาณแหล่งแร่ก็มีความแตกต่างในแง่ชนิดแร่เหมือนกัน เช่น แนวแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกของทวีปอเมริกาเหนือ (รูป 9.2.21 และ 9.2.22) มักพบปะปนกับแร่โมลิบดีนัม (รูป 9.2.23) และทั้งสะเตน (ถึงขนาดที่ในบางแห่งแร่สองตัวนี้กลับพบมากกว่าทองแดงเสียอีก) ส่วนในบริเวณแถบแปซิฟิกตะวันตกเฉียงใต้ แหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกมักเกิดร่วมกับแร่ทองคำด้วย เช่น ฟิลิปปินส์ หรือแอฟริกาใต้บางตัว เช่น ไพล์ไรต์ (รูป 9.2.24)

แหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกนี้มักเกิดร่วมกับหินอัคนีสีจางซึ่งเกิดระดับต้นถึงกึ่งภูเขาไฟ (ลึกลงกลาง) และอยู่ร่วมกับพนักหินแกรนิตและแทกรตาม หรือเกิด ณ บริเวณป็นหินอัคนีมวลไพศาลได้ (ตาราง 9.2.2) และในบริเวณนั้นมักพบมวลหินอัคนีหลายชุด กลุ่มพนักหิน หินเศษเหลี่ยม และพนักหินกรวด (pebble dike) นอกจากนั้นยังพบว่าตัวหินอัคนีและหินข้างเคียงมักเกิดการแตกหักมากมาย

อันเนื่องจากความจริงที่ว่าแหล่งแร่ทองแดงประเภทนี้มักเป็นพวกหินกึ่งภูเขาไฟ (subvolcanics) ดังนั้น แหล่งแร่ดังกล่าวจึงมักหนีไม่พ้นถูกปรับราบ (peneplained) เกือบหมด โดยเฉพาะบริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ด้วยเหตุนี้เราจึงมักพบแหล่งแร่ทองแดงลายดอกในแนวคดโค้งใหญ่ของมหายุคมีซิมิซีน (Mesozoic) จนถึงนิวซีน (Cenozoic) ส่วนพวกที่มีอายุโบราณชีวิน (Paleozoic) มักพบเห็นน้อยกว่า แต่ในประเทศไทยกลับพบเห็นช่วงปลายของโบราณชีวินจนถึงช่วงต้นของมีซิมิซีน และยังเป็นแหล่งในมหายุคพรีแคมเบรียนแทบยังไม่มีโอกาสพบได้เลย (และโดยเฉพาะประเทศไทย)

แหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกมักถูกล้อมรอบด้วยวงการแปลงเปลี่ยน (alteration halos หรือ zoning) เนื่องจากวิวัฒนาการโดยน้ำยาร้อนอย่างชัดเจน (ดูรูป 9.2.25 ถึง 9.2.30) ทำให้มีส่วนช่วยนักสำรวจต่อการตรวจค้น (และตามล่า) แหล่งแร่ดังกล่าวได้ง่าย รูป 9.2.25 แสดงวงการแปลงเปลี่ยน (เชิงแร่วิทยา) 4 วงด้วยกัน

รูป 9.2.19

รูป 9.2.20 แนวการกระจายตัวของแหล่งแร่ทองคำและโมลิบดีนัมที่สำคัญของโลก เปรียบเทียบกับขอบเขตของแผ่นเปลือกโลกและบรรพตมาลาของมหาสมุทรโซโซอิกและซีโนโซอิก

รูป 9.2.21 แผนที่โลกแสดงอาณาบริเวณและที่ตั้งแหล่งแร่ทองคำที่สำคัญๆ (ตัวเลขแสดงถึงแหล่งต่างๆ ในตาราง)

รูป 9.2.22 เหมืองและแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกของคอดีเลอแรน และสภาพธรณีแปรสัณฐาน

รูป 9.2.23 สายแร่ควอร์ตซ์มีโมลิบดีนัมเป็นร่างแห(stockworks) รูป 9.2.24 แผนภาพแสดงร่างแหในแหล่ง
แร่ทองแดง

ในหินแกรนิตซึ่งถูกการเปลี่ยนสภาพแบบไฟลิก เหมืองไคลแมกซ์ เนื้อดอก สายแร่ซัลไฟด์เกิดแบบสายแร่และฝังประใน
รัฐโคโลราโด (อเมริกา) เนื้อหินที่ถูกเปลี่ยนสภาพ

รูป 9.2.25 แผนภาพแหล่งแร่ทองคำแสดงวิวัฒนาการการเกิดแหล่งแร่จากน้ำยาร้อน (a) ก่อนเกิดการเปลี่ยน
สภาพ
แบบไฟริก และ (b) หลังจากการเปลี่ยนสภาพแบบไฟริก ตามแนวคิดของ Lowell – Guilbert

รูป 9.2.26 ภาพจำลองระบบสายแร่ร้อนเปรียบเทียบระหว่าง ระบบอโรแมกมาติกและระบบการไหลวนของของ
ไหล
(convection fluid flow)

รูป 9.2.27 ภาพจำลองแหล่งทองแดงเนื้อดอกชนิดป็นหินหลอมเหลว

9.2.28

รูป 9.2.28 ภาพจำลองแหล่งทองแดงเนื้อดอกมาตรฐาน (Sutherland Brown, 1976)

รูป 9.2.29 ภาพจำลองแหล่งทองแดงเนื้อดอกชนิดภูเขาไฟ (Sutherland Brown, 1976)

ซึ่งวงดังกล่าวมักจัดตัวเอง เป็นวงซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม แต่ที่พบส่วนใหญ่ มักไม่สมบูรณ์แบบ (เช่นที่เมืองเลย) เหมือนที่ปรากฏตามทฤษฎีจริงๆ จากวงในไปสู่วงนอกได้แก่

- 1) วง K-silicate ประกอบด้วย กลุ่มแร่ K-feldspar $\pm$ chlorite $\pm$ biotite $\pm$ anhydrite
- 2) วง Phyllic ประกอบด้วยกลุ่มแร่ quartz $\pm$ sericite $\pm$ pyrite $\pm$ chlorite $\pm$ illite $\pm$ rutile
- 3) วง Argillic ประกอบด้วยกลุ่มแร่ clay minerals $\pm$ pyrite $\pm$ chlorite $\pm$ biotite $\pm$ K-feldspar
- 4) วง Propylitic ประกอบด้วยกลุ่มแร่ chlorite $\pm$ pyrite $\pm$ calcite $\pm$ epidote

การเกิดเป็นแหล่งแร่มักปรากฏอยู่ในหินอัคนีบาดาลและส่วนของหินข้างเคียงโดยรอบ ดังนั้นแบบจำลองการเกิดแหล่งแร่ก็คือ แหล่งแร่กำเนิดจากน้ำหินหนืดล้วน (orthomagmatic water) หรือจากน้ำนอกหินหนืดพามา เช่น ตะกอนหรือน้ำใต้ดิน (convective water) (รูป 9.2.26) ซึ่งต้องการทั้งช่วงเวลาภายหลังการแทรกดันขึ้นมาแข็งตัวของหินหนืดก่อนเกิดการพาของน้ำจากหินหนืดหรือน้ำใต้ดิน ซึ่งในสภาวะต่อมาจึงเกิดการลดอุณหภูมิ จนเกิดการแปลงเปลี่ยน(alteration) ทั้งทางแร่และเนื้อหิน ณ ระดับอุณหภูมิหนึ่ง (ซึ่งโดยมากสูงกว่าอุณหภูมิของการแข็งตัวกลายเป็นหินตะกอน) ซึ่งในตอนนั้นแร่ทองแดงซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นแล้วจึงเกิดการจัดตัวเสียใหม่(remobilization) และรวมตัวกันใหม่จนมีความเข้มข้นขึ้นหรือมากขึ้น ส่วนการแปลงเปลี่ยนโดยน้ำใต้ดินอาจมีส่วนทำให้เกิดภาวะสมบูรณ์ยิ่งยวด (supergene enrichment) ดังนั้นทั้งสองกระบวนการจึงทำให้การเกิดเป็นแหล่งแร่สัมฤทธิ์ผลทั้งคู่ แม้จะตรงกันข้ามกันก็ตาม

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกรวมทั้งแร่เกิดร่วม เช่น โมลิบดีนัม มักเกิดสัมพันธ์กับการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก ซึ่งจากการศึกษาโดยละเอียด โดยเฉพาะแถบเทือกเขาแอนดิส (รูป 9.2.31) การแทรกดันของหินหนืดสัมพันธ์กับแนวเส้น โครงสร้าง(lineaments)ระดับลึก ทำให้เชื่อว่าแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกที่แสดงลักษณะการกระจายตัวในแนวเส้นตรงอาจเป็นผลเนื่องมาจากแหล่งแร่ทองแดงดังกล่าวมักเกิด ณ ระดับความลึกหนึ่งในแผ่นเปลือกโลกเท่านั้น (เช่น การหลอมละลายบางส่วน of แผ่นเปลือกโลก) เป็นที่น่าสังเกตว่าแหล่งแร่เกิดจำกัดเฉพาะในแนวหนึ่ง ซึ่งถูกกักเซาะลงไปไม่ลึกเหมือนที่เกิดกับที่มวลหินอัคนีที่เรียก "Coastal Range Batholith" ในรัฐแคลิฟอร์เนีย แต่ก็ยังลึกมากกว่าแนวเทือกภูเขาไฟที่อยู่ถัดไปในทิศตะวันออกในประเทศชิลี ซึ่งทำให้แหล่งชุกคามาดา(Chuquibambilla) (รูป 9.2.31) ของชิลีเป็นแหล่งทองแดงเนื้อดอกที่ใหญ่ที่สุดของโลกในทศวรรษปัจจุบัน

ปริมาตรแหล่งแร่ทองแดงใหญ่ๆ อื่นๆ (รูป 9.2.19 และ 9.2.21) เช่นบริเวณตั้งแต่แนวคอร์ดีลเลราในรัฐบริติชโคลัมเบียของแคนาดา (Canadian Cordillera), ฝั่งตะวันตกเฉียงใต้ของอเมริกา และเม็กซิโก, แนวบรรพตรังสรรค์แอปพาเลเชียน (Appalachian ฯลฯ), เกาะไค้งอาณาบริเวณแปซิฟิกตะวันตกเฉียงใต้, แนวเขาในยุโรปตะวันออก เช่น แหล่งบอร์(Bor) ของยูโกสลาเวีย และในรัสเซีย สำหรับประเทศไทยได้แก่แนวภูเขาไฟเก่า เลย-เพชรบูรณ์-เกาะช้าง

นอกเหนือจากแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกแล้วยังมีแหล่งแร่โมลิบดีนัมเนื้อดอกอีกด้วย โดยเฉพาะในแถบตะวันตกของทวีปอเมริกาเหนือ (รูป 9.2.32) โดยมีแหล่งที่มีชื่อเสียงคือแถบรัฐโคโลราโด (รูป 9.2.33) ซึ่งแหล่งแร่หลายแหล่งแสดงความสัมพันธ์กับหินแกรนิต (รูป 9.2.34) สำหรับแผนที่ธรณีวิทยาและภาพถ่ายทางของแหล่งแร่โคลแมกซ์(โคโลราโด) ได้แสดงไว้ในรูป 9.2.35 ส่วนชนิดแหล่งแร่โพลีดีนัมเนื้อดอกได้แสดงในตาราง 9.2.3 และรูปแบบการเกิดแหล่งแร่และแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกกับการแปรสัณฐานแสดงในรูป 9.2.36

9.2.5 แหล่งแร่ดีบุกเนื้อดอก (Porphyry Tin Deposits)

แหล่งแร่ดีบุกเนื้อดอกมักเกิดสัมพันธ์กับหินกึ่งภูเขาไฟ(subvolcanics) โดยเฉพาะในแถบคูรูโร (Ourura) ซึ่งเป็นปริมาณแร่ดีบุกของโบลิเวีย(รูป 9.2.37 และ 9.2.38) โดยที่ในหลายลักษณะมีความคล้ายคลึงกับแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอก (Sillitoe และคณะ, 1975) ซึ่งก็คือ มีปริมาณมากและมีความสมบูรณ์ของแร่ดีบุกประมาณ 0.2-0.3% Sn อีกทั้งมีลักษณะของการแปลงเปลี่ยนทางแร่คล้ายกัน(รูป 9.2.39) คือ มีวง sericitic อยู่ข้างในส่วนด้านนอกเป็นวง propylitic และ pyritic ยกเว้นที่ไม่พบคือวง potassic alteration เหมือนของแหล่งทองแดงเนื้อดอก เป็นที่น่าสังเกตว่านอกจากการแปลงเปลี่ยนและความใหญ่โตของแหล่งแร่ (large tonnage) แล้ว ลักษณะอื่น เช่น ความสัมพันธ์กับหินกึ่งภูเขาไฟ และหินกรวดเหลี่ยมจากการแปลงเปลี่ยนก็คล้ายกับแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกอีกด้วย ตัวอย่างที่ดีของแหล่งแร่ดังกล่าวได้แก่แหล่งโครอลกี (Chorolque deposit) และแหล่งโปโตชิ (Potosi) ของโบลิเวีย

ในแหล่งแร่ดีบุกดังกล่าว นอกจากแร่ดีบุกแล้วยังมีแร่โลหะหลายชนิดซึ่งมีแร่วิทยาซับซ้อนอยู่ด้วย โดยเฉพาะพวกเหล็ก ตะกั่ว สังกะสี และเงิน เป็นต้น

9.2.6 แหล่งแร่สกานต์ (Skarn Deposits)

คำว่า skarn (สกานต์)มาจากภาษาสวีเดน ใช้ในความหมายถึงแร่ซิลิเกตที่ไม่มีค่า (silicate gangue) เช่น แอมฟิโบล ไพรอกซีน และการ์เนตของแหล่งแร่เหล็กหรือซัลไฟด์ในยุคอาร์เคียน (ยุคที่เก่าที่สุดของมหายุคพรีแคมเบรียน) โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกที่เข้ามาแทนที่หินปูนและหินโดโลไมต์ ต่อมาคำนี้ได้ถูกใช้แพร่หลายครอบคลุมไปถึงหินจำพวกแคลซิลิเกต(calc-silicate)ซึ่งมีอายุเท่าใดก็ได้ แต่มีกำเนิดมาจากการเข้าแทนที่หินปูนและโดโลไมต์ ทั้งที่บริสุทธิ์และไม่บริสุทธิ์ (impure) โดยการเข้ามาทำปฏิกิริยาของ Si Al Fe & Mg สำหรับอเมริกาใช้คำว่า tactite ในความหมายเดียวกับ skarn (ดู AGI Glossary of Gology) แต่ไม่ค่อยได้รับความนิยมเท่า

ในที่นี้เราให้ความหมายของคำว่า "sharn" ว่าเป็นแหล่งแร่ที่เกิดจากการแปรสัมผัส โดยเฉพาะจากการสลับเปลี่ยนสภาพ (metasomatism) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอร้อนจากหินหนืด (magmatic emanation) กับหินคาร์บอเนตซึ่งเป็นหินข้างเคียงตัวหลัก ผลที่ได้มักทำให้เกิดวงแปรสภาพแบบสัมผัส (contact-metamorphic aureoles) รอบหินอัคนีอันเป็นที่รู้จักกันดีในบรรดาผู้นิยมหินแกรนิต ซึ่งอาจทำให้ได้หินผลึกค่อนข้างละเอียดมากสีเข้มที่เรียกซอนเฟลล์(hornfels) แต่กระบวนการแปรสภาพดังกล่าวนี้เป็นกระบวนการปิด ไม่มีการสูญเสียหรือรับสารจากระบบภายนอก เป็นการแปรสภาพคงรูปทางเคมี

ฐานข้อมูล 9.7 ตัวอย่างแหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกที่สำคัญ ๆ ของโลก

แหล่งที่มา :

ตาราง 9.2.2 ลักษณะของแหล่งแร่ทองคำเนื้อดอก 3 ประเภท

9.2.31

รูป9.2.32 ตำแหน่งของแหล่งแร่โมลิปดินัมที่สำคัญ
ทางฝั่งตะวันตกของทวีปอเมริกาเหนือ
ตารางบน แสดงตัวอย่างสำคัญของแหล่งแร่แบบ
Climax และQuartz monzonite(White และคณะ, 1981)
ตารางกลาง แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะบางอย่าง
ของแหล่งแร่โมลิปดินัมเนื้อออกทั้งแบบ Climax และ

Quartz monzonite

ตารางล่าง แสดงชนิดของแหล่งแร่โมโนคลินัมแบ่งตาม
แหล่งกำเนิด

รูป 9.2.33 (บน) แผนที่แนวแร่โครไลโด
แสดงลักษณะโครงสร้างและหินอัคนีที่
สำคัญและตำแหน่งของแหล่งแร่โมลิปดินัม
ลายดอก(White และคณะ, 1981)

(ล่าง) แผนภาพตัดขวางแสดงความ
สัมพันธ์ระหว่างหินอัคนีบาดาลกับแหล่งแร่
ที่เกี่ยวข้องแถบ Urad-Henderson รัฐโคโลรา
โด (Wallace และคณะ, 1978)

รูป 9.2.34 ภาพตัดขวางอย่างง่ายของแหล่งแร่โมลิปดินัมของเหมืองสำคัญๆ ของโลกแสดงการเกิดโมลิปดินัมแบบ
ต่างๆ

รูป 9.2.35 (บน) ภาพตัดขวางแสดงลักษณะทางธรณีวิทยาและตัวแหล่งแร่(ore zones) ของแหล่งแร่โมลบดีนัม Climax, โคโลราโด

(กลาง) แผนที่ธรณีวิทยาอย่างง่าย ณ ระดับ 929 แสดงแนวตัดขวางของรูปบน (16 section)

(ล่าง) ภาพตัดขวางผ่านพื้นที่เหมือง Climax แสดงผนังหินแนวตั้งก่อนการเกิดแร่(preore dike) ที่ถูกทำให้โค้งและผนังหินแนวราบที่ถูกทำให้โค้งขึ้นเหนือพื้นที่อื่น Climax (White และคณะ, 1981)

ตาราง 9.2.3 ชนิดของแหล่งแร่โมลบดีนัมลายดอก-แบบไคลแมกซ์และแบบควอร์ตมอนโซไนต์ (White และคณะ, 1981)

รูป 9.2.36 แบบการเกิดแหล่งแร่โมลิบดีนัม
ชนิดแร่และทองแดงหลายชนิดในสภาพ
การแปรสัณฐานแบบแผ่นเข้าหากัน (Westra
& Keith, 1981)

การ

รูป 9.2.37 แผนที่ธรณิวิทยาอย่างง่ายแสดง

กระจายตัวของหินอัคนีชนิดต่าง ๆ
ตลอดจนตำแหน่งปล่องภูเขาไฟ
และเหมืองสำคัญ ๆ

รูป 9.2.38 แผนที่อย่างง่ายของสายแร่ดีบุก เลาลากัว(Llallagu) ในโบลิเวีย อเมริกาใต้

9.2.36

9.2.37

9.2.38

9.2.39

(isochemical metamorphism) แต่เมื่อไหร่ที่หินข้างเคียงประกอบด้วยแร่ที่ไม่อยู่เฉยทางเคมี เช่น แคลไซต์ โดโลไมต์ และแร่ดิน ก็มักได้หินใหม่ที่มีผลึกใหญ่ขึ้น ที่เรียก สกานต์ (skarn) และเกิดการสลับเปลี่ยนสภาพครั้งใหญ่ ทั้งในสภาพการแทนที่และแทรกเข้าไปตกผลึกในรอยแตก(รูป 9.2.40) เนื่องจากไอร้อนจากหินหนืด ซึ่งมักมีสารประกอบจำพวกก๊าซ เช่น F Cl หรือ OH และโลหะในรูปไอร้อนในหินหนืด (เช่น Cu, Fe, Pb, Zn, Mo, Sn, W, Au และ Ag) ตลอดจน Si เอง จนทำให้เกิดการโยกย้ายถ่ายเทสารดังกล่าวขึ้นได้ ซึ่งมัก

เป็นสารเหลือค้าง(residual melts หรือ liquids) จากการแข็งตัวของหินหนืด เข้าไปในส่วนที่เป็นรอยแตกหรือช่องว่าง ทั้งที่อยู่ในหินข้างเคียง หรือหินอัคนีเอง โดยเฉพาะในหินคาร์บอนेटช่องว่างใหญ่ๆ นี้ ก็คือ โพรงคาสต์ (karst opening) นั่นเอง ในที่สุดจึงได้ชนิดของแร่หินแปรต่างๆ แยกเป็นกลุ่มๆ เมื่อห่างจากหินแกรนิตหรือหินอัคนีสู่จากถึงสีเข้มปานกลางออกไป (รูป 9.2.41)

โดยทั่วไปเราแบ่งหินสกานต์ออกเป็น 2 พวก (รูป 9.2.40)

- (1) สถานันอกหินแกรนิต (Exogranitic skarns) จัดเป็นหินสกานต์ที่ไม่ได้เกิดภายในตัวหินอัคนี ซึ่งเป็นชนิดที่อาจจนถึงสีเข้มปานกลาง (ดังที่แสดงในรูป 9.2.42) จนบางท่านเชื่อว่าอาจไม่มีความสัมพันธ์กับหินแกรนิตที่อยู่ข้างใต้หรือมีก็น้อยมาก (อาจเป็นเพียงตัวให้ความร้อนเท่านั้น !)
- (2) สกานต์รอบหินแกรนิต (Perigranitic skarns) ซึ่งได้แก่หินสกานต์ที่เกิดบริเวณแนวสัมผัสกับหินแกรนิต จนบางครั้งเกิดอยู่ในหินข้างเคียงที่ติดกับหรือใกล้กับหินแกรนิต(exoskarn หรือ exocontact) หรือเกิดอยู่ในขอบในหินแกรนิตที่ติดกับหินข้างเคียง(endoskarn หรือ endocontact) โดยที่ชนิดหลังนี้เป็นผลมาจากการรับเอา Ca & Mg จากหินคาร์บอนेट

กรณีสกานต์รอบหินแกรนิตนี้ มักเกิดการตกผลึกใหม่เป็นหินแปรของพวกหินปูน หินโดโลไมต์ หรือหิน ดินปูน (marl) เสียก่อน ต่อมาจึงเกิดการปรากฏของแร่จำพวก Ca-Si และ Ca-Mg-Si และจึงเกิดแร่ซัลไฟด์ (ของพวก Cu Fe Zn Pb Mo และ Sn) ทั้งในหินอัคนีและหินคาร์บอนेट และเกิดแร่ออกไซด์ (ของพวก Sn, W และ Fe) ในส่วนที่เป็นสกานต์ เช่น ที่เหมืองอีรี (Ely) ในรัฐเนวาดา ดังที่แสดงในรูป 87 ซึ่งมีปริมาณสำรองถึง 200 ล้านตัน ณ ที่ความสมบูรณ์ของทองแดงที่ 0.8% Cu

แหล่งแร่สกานต์มักมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน โดยทั่วไปมีขนาดเล็ก และโดยมากเป็นแหล่งแร่ตัดขวางล้อมชั้น (stratabound) อันเป็นผลเนื่องจากการสลับชั้นระหว่างแร่ Ca น้อย กับแร่ Ca มาก (ดูรูป 9.2.43) อย่างไรก็ตามพบว่ามีแหล่งแร่โลหะหลายชนิดที่พบในสกานต์ เช่น

- 1) แหล่งแร่สกานต์เหล็ก (Fe Skarn) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแร่เหล็กดำ (แมกนีไทต์-magnetite) และแร่เหล็กแดง (ฮีมาไทต์-hematite) ซึ่งอาจมีแร่ไพไรต์ และแคลโคไพไรต์ (chalcopyrite) รวมอยู่ด้วย นอกจากนั้นยังพบแร่บางชนิดที่มีเหล็กในตัวอยู่แล้ว เช่น olivine, hedenburgite, andradite (การ์เนตตัวหนึ่ง) และ ilvaite เป็นต้น

ตัวอย่างแหล่งแร่เหล็กที่สำคัญ คือ ที่เทือกเขายูราล(Ural ในรัสเซีย), เกาะเอลบ้า(Albaของอิตาลี) สำหรับเมืองไทยมีแถบเขาทับควาย (ลพบุรี) และภูควายเหล็ก, ภูเหล็ก (จังหวัดเลย)

- 2) แหล่งแร่สกานต์ดีบุก (Sn-skarn) มีแร่ที่สำคัญ คือ แร่ดีบุก (cassiterite) และแร่เกิดร่วม เช่น แร่ตระกูลทังสแตน - scheelite, wolframite และแร่ที่มี Bi, Zn, และ F เป็นองค์ประกอบ

แหล่งสำคัญ เช่น แหล่งเอ็คส์จีเบิร์ก(Erzgebirge ในสาธารณรัฐเช็ก) แหล่งแทสมาเนีย (Tasmania) ในออสเตรเลีย, นามิเบีย (แอฟริกา), และฝรั่งเศส

ในไทยแหล่งแร่ทั้งสะเตนดอกหมอก (เป็น scheelite skarn ด้วย ณ อำเภอเวียงป่าเป้า จังหวัด เชียงราย) และแหล่งปิ่นเยาะ (จังหวัดยะลา) มีแร่ดีบุกซัลไฟด์ที่ชื่อมาลายาไต์ - Malayaite และแหล่งแร่สะเมิง (เชียงใหม่ เป็น scheelite-tungsten skarn ด้วย)

3) แหล่งแร่สแกนดีทั้งสะเตน (W-skarn) ซึ่งแร่ทั้งสะเตนในที่นี้คือ แร่ซีไลต์ (scheelite- CaWO_4) ซึ่งเกิดร่วมกับแร่ซัลไฟด์ของ Fe, Mo, Bi, Cu, และ Pb

แหล่งแร่สำคัญๆ เช่น ที่ Nevada & California (สหรัฐฯ), British Columbia (แคนาดา), แหล่ง King Island (Australia), แหล่ง Azegour (มอโรคโค) หรือบราซิลตะวันออกเฉียงเหนือ, สแกนดีแหล่ง Costabonne (เทือกเขา Pyrreness, ฝรั่งเศส) และแหล่ง Maykhura (รัสเซีย) (ดูรูป 9.2.44 และ 9.2.45)

4) แหล่งแร่สแกนดีโมลิบดีนัม (Mo-skarn) ให้สินแร่จากแร่โมลิบดีไนต์ (molybdenite) โดยมีแร่เพื่อน (associated minerals) ของ Fe, Cu, Zn และแร่ออกไซด์บางตัว

ปัจจุบันพบไม่มาก นับว่าเป็นเหมืองแร่เล็กๆ ที่ไม่สำคัญนัก

5) แหล่งแร่สแกนดีทองแดง (Cu-skarn) ส่วนใหญ่มีมากมาจากแร่แคลโคไพไรต์ (Cu Fe S_2) และทองแดง ซัลไฟด์ตัวอื่น (เช่น bornite malachite chalcocite ฯลฯ) และซัลไฟด์ของแร่ Fe, Zn และ Mo และเกิดร่วมกับออกไซด์แร่เหล็ก เช่น แร่เหล็กดำ และแร่เหล็กแดง

แหล่งที่สำคัญ คือ แหล่ง Ertsburg (เอสเบิร์ก) ของนิวินี, Roumania, ในเม็กซิโก และตะวันตกของอเมริกา (รูป 9.2.47)

ในไทยพบที่ภูทองแดง, ภูโล้น, ภูจีโก้ (เลย)

6) แหล่งแร่สแกนดีสังกะสี (Zn-skarn) ได้จากแร่สฟาเลอไรต์ (sphalerite หรือ ZnS) โดยเกิดร่วมกับแร่ซัลไฟด์ของ Pb และ Fe และออกไซด์ของ Fe เช่น แร่เหล็กดำ

แหล่งที่เป็นเหมืองแล้ว เช่น ที่ Coeur d'Alene, รัฐไอดาโฮ และนิวเม็กซิโก (สหรัฐฯ) (รูป 9.2.46), แหล่งที่เมืองออสโล (นอร์เวย์)

7) แหล่งสแกนดีตะกั่ว (Pb-skarn) จากสินแร่ของกาลีนา (Galena หรือ PbS) โดยเกิดร่วมกับออกไซด์ของ Fe เช่น แร่เหล็กดำ และซัลไฟด์ของ Fe, Zn, และ Cu

ปัจจุบันยังไม่ปรากฏเหมืองแร่ใหญ่ๆ

8) แหล่งแร่สแกนดีทอง-เงิน (Au-Ag skarn) ให้แร่โลหะเงิน และโลหะทอง โดยมีแร่เพื่อนที่สำคัญ คือ แร่อาซิโนไพไรต์ (arsenopyrite - FeAsS) - เป็นแร่ที่ไม่ค่อยพบมากเท่าใด แต่ที่ทำเหมืองแล้ว คือ ที่บริติชโคลัมเบีย (แคนาดา)

เมืองไทยพบอยู่บ้าง เช่น (แหล่งทองนาล้อม) ที่ปราจีนบุรี

9) แหล่งแร่สแกนดีกราไฟต์ (C-skarn) มักมาจากแร่แกรไฟต์ในหินแคลซิลิเกต โดยมากพบเป็นแหล่งเล็กๆ แต่มากพอควร

9.2.40-42

รูป 9.2.44 ภาพตัดขวางธรณีวิทยาแสดงการวางตัวของสายแร่ทัลก์ เหมือนไตรมอนส์ (Trimouns) เทือกเขาไพเรนีส ฝรั่งเศส

รูป 9.2.45 การเกิดวงแร่(zoning) และลำดับการเกิดแร่(paragenesis) ของเหมืองทั้งสแกนดิเนเวียที่สำคัญ ๆ

รูปใหญ่- Costabonne(Pyrenees, ฝรั่งเศส) ซึ่งตอนต้น -Mg-สแกนดิอูมิสูงเกิดในโคโลไมต์ ณ ที่อุณหภูมิประมาณ 500° ซ จากforsterite-calcite และความดัน 2Kb ($X_{\text{CO}_2} = 0.05$) และต่อมาถูกเสริมด้วย Ca สแกนดิ เช่นได้ diopside, andradite-spessartine และ scheelite ซึ่งต่อมาในตอนหลังในโซน garnet ได้แร่กานตชนิด Mn, และได้สายควอร์ตที่มีแร่ actinolite, scheelite และ sulfides ในโซน pyroxene และที่การเปลี่ยนสภาพย้อนกลับได้แร่ tremolite talc และ serpentine(Guy, 1979)

รูปเล็กบน- Maykhura ในรัสเซีย ซึ่งในช่วงต้นเกิด garnet-pyroxene ในหิน Ca สการ์ต ต่อมาในตอนหลัง garnet เปลี่ยนไปเป็นfeldspar & epidote และ pyroxene เปลี่ยนไปเป็น quartz และ actinolite ที่เกิดร่วมกับ scheelite, sulfides(pyrrhotite,chalcopyrite และ sphalerite) และมีแร่ดีบุก(cassiterite) บ้าง (Zharikor, 1970)

รูป 9.2.46 แผนที่ระนาบแสดง stope ของเหมืองลินซ์เบิร์ก, นิวเม็กซิโก แสดงการเกิดแหล่งแร่สการ์นเนื่องจากรอยเลื่อน

และยังแสดงว่ากลุ่มแร่สการ์นไม่ใช่มาจากผลที่เกี่ยวข้องกับการแปรสภาพสัมผัส และอาจมาจากกระบวนการ

เปลี่ยนสภาพแบบน้ำร้อนได้ (Titley, 1963)

รูป 9.2.47 ภาพตัดขวางเป็นหินบิงแฮม แสดงลำดับการตัดขวางของหินต่างๆในพื้นที่ (Atkinson and Einuadi, 1978) 1. thin

limestone; 2. quartzite and calcareous quartzite; 3. Interbedded calcareous siltstone, silty limestone, limestone;

4. Thick cherty limestone; สังเกตส่วนประกอบทางแร่และความสามารถในการให้น้ำผ่านจะเป็นตัวสำคัญในการ

กำหนดโซนการแปรสภาพของหิน qz=quartz; di=diopside; wo=wollastonite; ad=andradite garnet; tr=tremolite; ta=talc; cc=calcite; do=dolomite ในแผนภาพแสดงช่วงก่อนที่ andradite-magnetite-chalcopyrite จะแทนที่โซน wollastonite ในหินปูน และ actinolite-biotite-chalcopyrite-pyrite จะแทนที่ diopside quartzite.

ที่ทำเหมืองแล้ว คือ แออบเกรนวิลล์ (Grenville) ของแคนาดา, ในไซบีเรีย, ศรีลังกา, อเมริกา-เม็กซิโก

แต่ก็มีแหล่งแร่คล้ายสกานต์ (skarn-like deposits) แต่ก็ไม่มี ความเกี่ยวข้องกับหินอัคนีแต่อย่างใด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สวีเดน อันเป็นชื่อที่กำเนิดมา คือ เป็นแหล่ง magnetite-manganese (หรือ Fe-Mn) เกิดใน

หินแปรอาร์เคียน และแหล่งสังกะสีที่มีชื่อของอเมริกา Franklin Furnace ในรัฐนิวเจอร์ซีย์ อันเป็นที่มาของแร่ franklinite (Fe, Zn, Mo) O. (Fe, Mn)2O3 - ซึ่งถือว่าเป็นแร่เหล็กดำมีสังกะสีมาก และอีกแร่คือ willemite (Zn, SiO4) (โดยได้ชื่อมาจากนักวิทยาศาสตร์วิลเลม I ของเนเธอร์แลนด์) แหล่งแร่ที่กล่าวมานี้พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ทั้งทางเนื้อหินและแร่วิทยากับกระบวนการสลับเปลี่ยนสภาพ(metasomatism)เลย เพราะไม่พบหินอัคนีปรากฏในบริเวณนั้นเลย แต่กลับพบว่าหินบริเวณนั้นเกิดการแปรสภาพไพศาลแทน หลายคนเชื่อว่าเป็นเพราะหินดั้งเดิม ซึ่งเป็นหินที่มาจากภูเขาไฟคงมีส่วนประกอบทางแร่เหมาะสมมากพอที่จะทำให้เกิดแหล่งแร่สแกนดีได้

แนวทางการสำรวจ

เป็นที่ยอมรับกันแน่ว่า แหล่งแร่สแกนดีมักไม่ให้สินแร่ขนาดใหญ่ และมีรูปร่างไม่แน่นอน อีกทั้งความสมบูรณ์ก็ไม่คงที่ ในแง่ของนักสำรวจจึงไม่เป็นที่ดึงดูดใจเท่าใด แต่บางครั้งก็อาจพบว่าแม้แหล่งจะเล็ก แต่ก็มีบ้างที่มีความสมบูรณ์มาก(แบบสุดขีด) เมื่อก่อนไทยเราก็กทำเหมืองทองแดงที่ทำแถบจังหวัดเลย ล้วนมาจากสแกนดีแทบทั้งสิ้น ทำให้การออกอาชญาบัตรของกรมทรัพยากรธรณีในปัจจุบัน เพื่อการสำรวจแร่ทองแดงของจังหวัดเลยไม่เคยขาดปีเลย

เป็นที่แน่ชัดว่าการสำรวจต้องอาศัยการศึกษาในภาคสนามอย่างละเอียด ตลอดจนทำการเก็บและตรวจสอบตัวอย่างตะกอนท้องน้ำและดินอย่างดี (แต่ต้องหลังจากทำการสำรวจเบื้องต้นแล้วพบว่ามีแร่) อาจจำเป็นต้องใช้ธรณีฟิสิกส์ภาคพื้นดินเข้าช่วย (ที่ดีมาก คือ วัดความเข้มสนามแม่เหล็ก-magnetometer) เพราะแหล่งสแกนดีมักให้แร่เหล็กดำ และเหล็กพิไรไรต์เสมอ และแน่นอนควรมั่นใจว่าเราสำรวจพบหินแกรนิตซึ่งมีการลำดับส่วนตั้งแต่หินแกรนิตไปจนถึงหินแกรโนไดโอไรต์ (หรือไดโอไรต์) และมีหินข้างเคียงเป็นหินคาร์บอนेट อีกทั้งต้องเชื่อมั่นว่ามีแนวรอยแตกเด่นชัดมากพอที่จะมีการเคลื่อนที่ของน้ำยาร้อนได้ (คือ ตัวสร้างระบบเปิดต้องมี)

แต่ด้วยที่มีความสมบูรณ์ไม่แน่นอน แกรมรูปร่างไม่มีระบบตายตัว จึงเป็นการยากสำหรับมืออาชีพทั้งหลาย เพราะเสียเงินค่าเจาะมากมาย

ในบริเวณแถบลาส ซานตอส(Las Santos) ซึ่งเป็นสแกนดีทั้งสะเตน มีปริมาณสำรองของแร่ทั้งสะเตน 2 ล้านตัน ต้องอาศัยหลุมเจาะคิดเป็นความยาวทั้งหมด 14,000 เมตร บนพื้นที่ตารางกิโลเมตรห่าง 30 เมตร เพื่อคำนวณหาปริมาณสำรอง (อยากทราบว่าเสียเงินเท่าใด ก็ลองเอา 2,500 บาท - 2,800 บาท ต่อเมตร ซึ่งเป็นค่าเจาะหลุมยาว 1 เมตร คูณดูก็ได้!)

9.2.7 แหล่งแร่มวลสินแร่ภูเขาไฟแบบคุโรโกะ (Kuroko-type VMS Deposits)

ในหัวข้อ 9.1.7 เราได้เสนอเรื่องราวเกี่ยวกับแหล่งแร่มวลสินแร่ภูเขาไฟแบบฝังปะที่เกิดขึ้นในหินภูเขาไฟ(ตะกอน)ซึ่งมีส่วนประกอบก่อนไปทางหินภูเขาไฟสีเข้ม ในส่วนนี้เราอธิบายถึงพวกที่เกิดขึ้นในหินภูเขาไฟ(ตะกอน) ซึ่งมีส่วนประกอบก่อนไปทางหินภูเขาไฟสีจางถึงสีเข้มปานกลาง ซึ่งมีแหล่งแร่ที่เด่นชัด

และศึกษากันมากที่แนวแร่คูโรโกะ(Kuroko Mineral Belt) ประเทศญี่ปุ่นในช่วง ค.ศ.1970-1980 (ดูรูป 9.2.48) ซึ่งเป็นแหล่งแร่ที่เกิดในสมัยไมโอซีน หลายคนจึงขนานนามแหล่งแร่ประเภทดังกล่าวนี้ว่า "แหล่งแร่แบบคูโรโกะ" ซึ่งความจริงมีอีกหลายแหล่งที่มีลักษณะการเกิดเป็นแบบเดียวกัน(ดูตาราง 9.2.4 และ 9.2.5) แต่มีอายุแก่กว่า เช่น พวกที่เกิดในแนวหินสีเขียว(Greenstone)ยุคอาร์เคียน หรือแหล่งบา-ทรัส(Bathrust)ในรัฐนิวบริตันสวิก(New Brunswick) ของแคนาดา และแนวแร่ไฟโรไคคาร์บอนิเฟอรัสของไอบีเรีย

แหล่งแร่แบบคูโรโกะที่มีหินเคมีย่อยข้างเป็นหินภูเขาไฟสีจางถึงเข้มปานกลางนี้มักประกอบด้วยมวลแร่ซิลไฟต์เป็นรูปเลนซ์ขนานไปตามชั้นหิน(stratiform) ซึ่งส่วนใหญ่มักปรากฏเป็นสายสานเกี่ยวกันเกิดอยู่ข้างใต้ แหล่งแร่แสดงลักษณะการลำดับชั้นที่ประหลาดเพราะมี Cu(ทองแดง) อยู่ในบริเวณส่วนล่าง และ Pb&Zn อยู่ในส่วนที่สูงกว่าและบริเวณขอบ นอกจากนั้นยังมีแร่แบไรต์และแร่ดินจากน้ำยาร้อนเกิดอยู่ตรงส่วนปลายของตัวแหล่งแร่ และมีแร่แบไรต์และหินเชิร์ตเหล็กสูงวางตัวปิดทับตัวแหล่งแร่

ก. แหล่งแร่ VMS แบบคูโรโกะ

ตามศัพท์แล้ว คำว่าคูโรโกะ (kuroko) เป็นคำผสมมาจากภาษาญี่ปุ่นว่า kuro(คูโร) แปลว่าดำ (black) และ ko(โกะ) แปลว่าสินแร่ (ore) แปลตามศัพท์จึงหมายถึงสินแร่สีดำ (ดูรูป 9.2.53) ซึ่งคงหมายรวมถึง มวลสินแร่ซิลไฟต์สีดำซึ่งประกอบด้วยแร่สังกะสีและตะกั่วจำพวก sphalerite & galena (Zn S และ Pb S ตามลำดับ) คำว่าคูโรโกะใช้ในความหมายที่กว้างๆ และยังรวมถึงคำว่า Oko (โอโกะ) ซึ่งหมายถึงสินแร่สีเหลือง เพราะมีแร่ chalcopyrite ($CuFeS_2$) และ keiko (ไคโกะ) ซึ่งหมายถึงสินแร่สีขาว เพราะมีแร่จำพวกซิลิกา(siliceous) รวมอยู่ด้วยในสายแร่ซึ่งประกอบด้วยสินแร่ไฟโรไคและควอร์ตในสายแร่ร่างแหได้มวลสินแร่กระบวนการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญคือการเกิดแร่โครไรต์(chloritization) และการเกิดแร่ไมก้าเคล็ดเล็ก(sericitization) และมักเกิดเฉพาะส่วนล่างของสายแร่ (footwall)

ในปัจจุบันเชื่อกันว่าแหล่งแร่แบบคูโรโกะเกิดขึ้นจนเป็นลักษณะเฉพาะของหินหนืดที่มีการพัฒนาไปมากในสภาวะการแปรสัณฐานแบบแนวเกาะโค้งสมบูรณ์(mature volcanic arc) และถูกห่อหุ้มด้วยหินข้างเคียงซึ่งเป็นพวกหิน 2 กลุ่ม (bimodal suites) จำพวกหินละลายหรือหินภูเขาไฟแคลแอลคาไลด์ (calc-alkaline volcanic) และหินตะกอนภูเขาไฟสีเข้มพวกโทไลอิต (tholeiite) โดยมีโลหะจำพวก Cu-Zn-Pb $\pm$ Au $\pm$ Ag เป็นหลัก

ลักษณะเด่นๆ ของแหล่งแร่แบบนี้ คือ เกิดเฉพาะในช่วงสมัยไมโอซีนตอนกลาง (Middle Miocene) เป็นแนวยาวถึง 800 กม ในหินภูเขาไฟที่เรียก Green Tuff หรือถ้ำภูเขาไฟเขียว (ดูรูป 9.2.48-2) โดยที่ในแนวดังกล่าวนี้ประกอบด้วยแหล่งแร่เล็กๆ ประมาณกว่า 100 แห่ง และกระจุกหรือหนาแน่นอยู่ประมาณ 8-9 กลุ่มเหมือง (mine camps) (ดูรูป 9.2.4.8-1) สำหรับสมมติฐานขั้นตอนการเกิดแหล่งแร่คูโรโกะที่โคซาก้าของญี่ปุ่นนี้ได้แสดงในรูป 9.2.49

ข. แหล่งแร่ VMS แนวอะบิทิบี (Abitibi Belt)

ในแคนาดา โดยเฉพาะแถบที่เรียกแนวอะบิทิบี (รูป 9.2.50-1) มักพบแถบหินสีเขียว (Abitibi Greenstone Belt) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกระดูกงู (keel) ซึ่งวางตัวอยู่ข้างใต้โดยหินภูเขาไฟสีเข้มกับสีจาง และมีหินภูเขาไฟสีเข้มจัด และตะกอนเกิดร่วมอยู่ด้วยบ้าง แหล่งแร่มวลหินแร่ภูเขาไฟ (VMS) แหล่งนี้มักเกิดอยู่ร่วมกับชุดหินภูเขาไฟที่มีการแยกลำดับส่วนแบบสมบูรณ์ที่ประกอบด้วยหินละลาย บะซอลต์จนถึงไรโอไลต์ และตะกอนภูเขาไฟ (รูป 9.2.48 ถึง 9.2.53) ในปัจจุบันแหล่งอะบิทิบีอาจจัดได้ว่าเป็นแหล่ง VMS ที่ใหญ่ที่สุดในบรรดาแหล่งแร่ยุคเก่า (primitive-type) ด้วยกัน นอกจากนี้แหล่งแร่ดังกล่าวจะให้แร่ทองแดงและสังกะสีแล้ว ยังให้แร่ดีบุกอีกด้วย การที่แหล่งแร่ดังกล่าวมักเกิดกันเป็นกลุ่มแหล่งแร่ภายในชั้นหินหน่วยหนึ่งหน่วยใดโดยเฉพาะ (รูป 9.2.50-2 และ 9.2.54) จึงทำให้มีลักษณะคล้ายกับของคุโรโกะ

ก. แหล่งแร่ VMS คาบสมุทรไอบีเรีย (Iberian Peninsula)

จากการศึกษาสภาพธรณีวิทยาของแนวแร่ไฟโรต์คาบสมุทรไอบีเรียของสเปนและโปรตุเกส แสดงว่าแหล่ง VMS นี้เกิดอยู่ภายในหินภูเขาไฟ 2 จำพวก ซึ่งมีหินสีจางเกิดเด่นกว่าในยุคคาร์บอนิเฟอรัส ในบางครั้งอาจเรียกชุดหินชั้นซ้อนหินภูเขาไฟซิลิเซียส ซึ่งมีหินชนวนและหินชีสต์ยุคโคริเนียนตอนบนวางตัวอยู่ข้างล่าง และถูกปิดทับด้วยหินทรายสกปรก (graywacke) ยุคคาร์บอนิเฟอรัสตอนบนของกลุ่มหิน Culm ตัวแหล่งแร่สำคัญเกิดอยู่ร่วมกับหินโดมภูเขาไฟไรโอไลต์และหินภูเขาไฟสีจางของชุดหินชั้นซ้อนหินภูเขาไฟซิลิเซียส แม้ว่าจะมีขนาดเด่นชัด แต่สายแร่ซิลไฟต์กลับมีโลหะพื้นฐานไม่มากนัก กล่าวคือ ความสมบูรณ์ของทองแดงตะกั่วสังกะสี (Cu+Pb+Zn) รวมกันไม่เกิน 3.5% แต่กลับให้แหล่งแร่กำมะถันที่สำคัญ โดยเฉพาะในศตวรรษที่ 19 จนถึงกลางศตวรรษที่ 20 การค้นพบแหล่งแร่ชื่อ Neves-Corvo ซึ่งมีปริมาณสำรองถึง 80 ล้านตัน ณ ที่ความสมบูรณ์ทองแดงถึง 10% อาจเป็นตัวกระตุ้นคลื่นลูกใหม่ของการสำรวจหาแหล่งแร่ดังกล่าวเพิ่มเติมในหมู่เหมืองเก่าเหล่านี้

อนึ่งสำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่าง Pb-Cu-Zn ได้แสดงไว้ในรูป 9.2.55, 9.2.56, 9.2.57 และ 9.2.58 นอกจากนั้นส่วนประกอบของน้ำยาร้อน เมื่อเทียบกับน้ำทะเลได้แสดงไว้ในตาราง 9.2.6 สำหรับวิวัฒนาการการเกิดแหล่งแร่ซิลไฟต์แบบปล่องในปัจจุบันและวิวัฒนาการการเกิดได้แสดงไว้ในรูป 9.2.59 ถึง 9.2.67

9.2.8 แหล่งแร่ดีบุกในชุดหินอัคนีชั้นซ้อนสีเข้มจัดแสดงชั้น (Tin Deposits with Layered Ultramafics)

ในบริเวณหินอัคนีชั้นซ้อนบิวเวลด์ของแอฟริกาใต้ มีแหล่งดีบุกประมาณ 7-8 แหล่งเกิดร่วมอยู่ด้วย ซึ่งพบอยู่บริเวณหินแกรนิต (ที่เรียก Lebowa Granitoids) เชื่อกันว่าแหล่งดีบุกเหล่านี้จะเกิดภายในหินแกรนิต และมีสินแร่ดีบุกฝังปะไปทั่ว และอาจเกิดภายนอกหินแกรนิตในรูปสายแร่ หินกรวดเกล็ดจากรอยเลื่อนหรือตัวสายแร่

ตาราง 9.2.4 ปริมาณสำรองและความสมบูรณ์ของสินแร่ต่างๆของแหล่งแร่ VMS ที่สำคัญ

รูป 9.2.48.1 แผนที่แสดงการกระจายตัว
ของโดมหินตะลาเยไซด์และ
แหล่ง
แร่คูโรโกะ ในเมืองโคซากา
(ญี่ปุ่น)

รูป 9.2.48-2 (บน การกระจายตัวของแหล่งแร่โครโกะในหมวดหินกรีนทัฟ อนุยุคไมโอซีน
(ล่าง) ลำดับชั้นหินของหมวดกรีนทัฟ ณ ที่ต่าง ๆ (Sawkins, 1984)

รูป 9.2.53 ภาพตัดขวางแสดงชนิดหิน และชนิดแหล่งแร่ของแหล่งแร่คูโรโกะ

รูป 9.2.54 แผนที่ธรณีวิทยาแถบไครุนนา(Kiruna) แสดงตำแหน่งของแหล่งแร่เหล็กหมวดหินต่างๆแสดงการวางตัวของชั้นหินและอายุหินที่อ่อนขึ้นไปทางทิศตะวันออก (1. Kirunavaara 2. Luossavaara 3. Rektorn 4. Henry 5. Haukivaara 6. Nukutusvaara 7. Tuollovaara)

รูป 9.2.58(a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นของน้ำเกลือร้อนผสมกับน้ำเกลือที่ 10° ซ (Sato, 1972)

แสดงถึงน้ำยาร้อน หรือน้ำแร่ 3 แบบ

(b) การคำนวณแสดงลักษณะการลอยตัวและการตกตะกอนของซัลไฟด์ ตามรูปแบบน้ำยาร้อน 3 แบบ ของ Sato(1972)

ตาราง 9.2.6 ส่วนประกอบเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมของน้ำยาร้อนที่มีโลหะธรรมชาติบางตัวเมื่อเทียบกับน้ำทะเลปัจจุบัน

ข้อมูลจาก Salton Sea: Helgeson, (968); Red Sea:Shanks and Bischoff (1977); Kuroko: Pitsutha-Arond and Ohmoto (1983) (maximum concentration in fluid inclusions); Eas Pacific Rise (EPR), Seawater: Janecky and Seyfried (1984) (EPR, 21° N, average); Southern Juan de Fuca Ridge (SJFR): Von Dammand and Bischoff (1987) (SJRF, Plume vent)

รูป 9.2.59 การ์ตูนแสดงวิวัฒนาการของแหล่งแร่ซัลไฟด์แบบปล่องในปัจจุบัน (a modern mound-chimney sulphide deposit)
ข้อมูลจาก Hekinian and Forquet, (1985); Goldfarb และคณะ, (1983);
Jonasson และคณะ, (1986)

ปล่อง

(a)

modern“black
smoke” sulphide

chimney) ឃុំ ទ រ ួ ត ទ ា ក

Haymon and
Kastner (1981);
Haymon (1983).

(a)

รูป 9.2.66 วิวัฒนาการของการเกิดเป็นแหล่งแร่ซัลไฟต์ต่าง ๆ และขั้นตอนการแปรสัณฐานของขอบมหาสมุทรแอตแลนติก

ตอนเหนือ ช่วงอายุมหาสมุทรพาเลโอโซอิกตอนต้นถึงตอนกลาง (Hutchison, 1989)

ตาราง 9.2.7 ปฏิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสภาพหินบะซอลต์ไปเป็นกลุ่มแร่ทุติยภูมิมีน้ำปน ปริมาณโลหะพบน้อยใน

สารละลายถูกคำนวณโดยหลักที่ว่า ปริมาณ 50 ppm ได้หายไปจากน้ำหนักหินบะซอลต์ ซึ่งสามารถทำปฏิริยา

สารละลาย อัตราส่วนระหว่างน้ำทะเลกับหินบะซอลต์คำนวณจากน้ำหนักของน้ำทะเล (ที่มักมีปริมาณ Mg

ประมาณ 1,350 ppm) ให้กับน้ำหนักแมกนีเซียมและ/หรือน้ำที่เข้ากับตัวถูกระทำ

รูป 9.2.67 สรุปโดยย่อข้อมูลการทดลองของปฏิกิริยาระหว่างหินบะซอลต์กับน้ำทะเล แสดงถึงค่า pH ซึ่งเย็นจนแข็ง
ทำให้ได้

กลุ่มแร่จากการแปรสภาพสำหรับการทดลอง 14 วัน (สี่เหลี่ยมทึบ: Bischoff and Dickson, 1975;
วงกลมทึบ: Hajash, 1979;

สามเหลี่ยมทึบ: Seyfried and Bicschoff, 1979; สี่เหลี่ยม: Seyfried and Bicschoff, 1977; วงกลม:
Motti and Holland, 1978) เสนอไว้

A จำนวนจากข้อมูลของ Brewer (1982) และเส้น B จำนวนจากข้อมูลของ Ellis and Giggenbach (1971)

แหล่งบิวเวลด์ เชื่อกันว่าเกิดในสภาพไร้บรรพตรังสรรค์(anorogenic) และเกิดเป็นมวลหินแทรกตาม (sill) รูปเห็ดที่มีความหนาถึง 2,800 เมตร หินตระกูลแกรนิตเหล่านี้เกิดมาแล้วเมื่อ 1,950 ล้านปีมาแล้ว พร้อมๆ กับหินอัคนีซับซ้อนบิวเวลด์ ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการหลอมละลายบางส่วนของหินเปลือกโลก และในบางแห่งลำหินแกรนิต(granitic plug)และมวลหินอัคนีขนาดเล็กแทรกตัดตัวหินอัคนีแทรกตามรูปเห็ด (laccolith)อีกทีด้วยเหตุนี้หลายคนจึงเชื่อว่าการเกิดเป็นแร่ดีบุกมักมีสัมพันธ์กับมวลหินแกรนิตรุ่นหลัง หรือ "younger granites" มากกว่า

การเกิดเป็นแหล่งแร่ดีบุกในตัวหินแกรนิต เช่นที่ Zaaipiaats (ไซเพลตส์) ในกลุ่มเหมืองแร่ดีบุก ที่เรียกพอทไจเทอส์ซัส(Potgietersus) ประกอบด้วยแร่ดีบุกฝังปะในตอนส่วนบนของหินแกรนิตคู่กับแร่จำพวก Cu & Mo และก็อาจพบส่วนที่พบน้อยกว่า คือสายแร่แทนที่ ซึ่งมักมีรูปเลนซ์และ/หรือกรวยตลอดจนแนวรอยแตกอย่างมีระบบ

สำหรับแหล่งแร่ภายนอกหินแกรนิต มักเกิดในหินเดิมที่ล้อมรอบ โดยแหล่งแร่เกิดในแนวรอยแตกขนาดใหญ่ภายในชุดหินแกรนิตที่ชื่อ "Lease Granite" อนึ่ง การเกิดเป็นแร่ดีบุกภายนอกตัวหินแกรนิตพบเห็นได้ในหินชีส หินชนวน และตัวมวลแร่แกรโนไฟต์ รวมทั้งหินชีส หินภูเขาไฟเฟลไซต์ ที่วางตัวอยู่เหนือ Iowa Granite ด้วย

กลุ่มเหมืองนี้ได้การผลิตอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ ค.ศ.1905 (พ.ศ.2448) คาดว่ามีการขุดเอาแร่ขึ้นมาคิดเป็นประมาณถึง 100,000 ตัน ของสินแร่ดีบุกที่ผลิตมาจากแนวแหล่งพอทไจเทอส์ซัส (Potgietersus) นี้

9.2.9 แหล่งแร่ดีบุกในพั้งหินวงแหวน (Tin Deposits with Ring Complex)

โคนหินแกรนิต(ระดับต้นหรือ granitic plugs) ของไนจีเรีย (รูป 9.2.68 ขวา) ที่เรียก"ที่ราบสูงจอส" (Jos Plateau) และแถบรอนโดเนีย (Rondonia) ทางตะวันตกของบราซิล (รูป 9.2.68 ซ้าย) ประกอบด้วยแร่ดีบุกและสินแร่อื่นที่เกี่ยวข้องในปริมาณมากในรูป SnO₂ (หรือ cassiterite) ซึ่งต่อมาเกิดสะสมตัวในที่ลุ่มจนเกิดเป็นแหล่งลานแร่(placer deposits) ในพื้นที่ทั้งสองที่กล่าวมานี้ มักพบหินแกรนิต และหินภูเขาไฟสีจาง เกิดเป็นกลุ่มๆ จัดเรียงตัวกันเป็นแนวเกือบตรง จากการหาอายุหินพบว่ามีอายุอ่อนกว่าหินที่อยู่โดยรอบมาก เช่น ที่รอนโดเนีย อายุสินแร่ 900 ล้าน มีแต่หินโดยรอบมีอายุ 2,500 ล้านปี และที่ที่ราบสูงจอส อายุสินแร่ประมาณจูเรสซิก แต่หินรอบข้าง อายุถึงพรีแคมเบรียน ด้วยเหตุนี้ Grant (1981) จึงเชื่อว่าแกรนิตที่สัมพันธ์กับแหล่งแร่เหล่านี้จะเป็นหินแกรนิตไร้บรรพตรังสรรค์ และมีสภาพความเป็นแอลคาไลด์มาก โดยเฉพาะที่ที่ราบสูงจอสในไนจีเรีย ซึ่งมีพื้นที่ที่แกรนิตโผล่ตั้งแต่ 3 ตรกม จนถึง 900 ตรกม (ดูรูป 9.2.69) และหินแกรนิตที่นี้องค์ประกอบที่แตกต่างกันมากโดยเฉพาะว่าเกือบ 60% เป็นแกรนิตมีไบโอไทต์ และอีก 20% เป็นแกรนิตมีรีเบคไคต์ (riebeckite) แกรนิตมีแอมฟีโบล และแกรนิตมีฟายาไลต์ (ซึ่งนับว่าเป็นแกรนิตพวกที่เกิดได้ยาก)

อนึ่งสำหรับลักษณะและสภาพทางธรณีวิทยารอบๆแหล่งแร่ดังกล่าว มีความซับซ้อนมาก เพราะเชื่อกันว่าเริ่มต้นจากการปะทุอย่างรุนแรงของภูเขาไฟขนาดใหญ่ จนได้หินละลายไรโอไลต์ขนาดมหึมา

รวมทั้งหินตะกอนภูเขาไฟที่เกี่ยวข้องด้วย และมีหินแอนดิไซต์ และบะซอลต์อยู่บ้าง ต่อมาภูเขาไฟเหล่านี้เกิดการยุบตัว (subsidence) จึงรูดพื้นจากการกัดกร่อน หินละลายที่ปล่อยออกจากปล่องต่อมาแทรกดันออกมาตามรอยแตกวงแหวน (ring fractures) ที่มีรากลงไปถึงกระเปาะหินหนืด ณ ระดับลึก การปะทุของหินละลายไรโอไลต์เกิดขึ้นมาอีกหลายครั้งหลังจากเกิดการยุบตัวตามแนวรอยแตก/รอยเลื่อนวงแหวนนั้น

ในขั้นต่อมาจึงเกิดการแทรกดันของหินอัคนีบาดาล(รุ่นหลัง) โดยแทรกตัดเข้ามาในหินละลายไรโอไลต์ในลักษณะพนักหินสีจาง รูปกรวย หนาประมาณ 5 ซม ถึง 65 ซม และในช่วงปลายของวิวัฒนาการ การเกิดแหล่งแร่เป็นการแทรกดันของพนักหินวงแหวนซึ่งมีส่วนประกอบจำพวกหินแกรนิตแอลคาไลต์ เข้ามาตามแนวรอยแตกเกือบวงกลม และโดยการตะกรุยแทรกดัน (stoping) และในขั้นสุดท้ายจึงเกิดการแทรกดันของแกรนิตปกติถึงเบสที่มีมวลขนาดใหญ่ โดยเริ่มต้นจากการเกิดรอยเลื่อนวงแหวน แล้วจึงเกิดการทรุดตัว (cauldron subsidence)

สำหรับที่ราบสูงจอสไนไนจีเรียมีความสมบูรณ์สินแร่ประมาณ 5% ของดิบุกและโคลัมไบต์ โดยมาจากสายหินคราหรือเพกมาไตต์ ซึ่งสัมพันธ์กับ "หินแกรนิตเชิงซ้อนยุคเก่า" (Older Granite Complex) ซึ่งสัมพันธ์กับการแปรสัณฐานช่วง 700 ล้านปี หรือที่เรียกแพน-แอฟริกา (Pan-African Tectonic) สายคราดังกล่าวที่ให้แร่วางตัวในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ และดูเหมือนว่ามาสิ้นสุดตรงที่ราบสูงจอสไนเอง ซึ่งเป็นอาณาบริเวณที่มี "แกรนิตยุคใหม่" (Younger Granites) (รูป 9.2.68) เกิดอยู่และ ณ ที่นี้จึงเกิดเป็นแหล่งแร่ที่สะสมตัวโดยทางน้ำ (alluvial deposit)

สำหรับที่รอนโคเนียของบราซิล (รูป 9.2.69) แหล่งแร่ดิบุกเกิดในสายแร่ไกรเซน ซึ่งให้แร่ดิบุก (cassiterite) นอกจากนั้นยังมีแร่ธาตุหายากตัวสำคัญ เช่น Ta-Nb-W โดยเกิดร่วมอยู่กับแร่โทปาส(topaz) มากมาย ณ ที่นี้แหล่งแร่ก็จัดเป็นพวกลานแร่เหมือนกัน

แนวทางการสำรวจ

แม้แหล่งแร่ดังกล่าวอาจมีโอกาสพบน้อยในไทย เนื่องจากบริเวณเขตหินเก่าแก่ของเรามีขนาดเล็กและอยู่กระจัดกระจาย แต่ก็น่าสนใจในแง่การสำรวจ โดยเริ่มจากข้อมูลโทรสัมผัส ซึ่งเป็นภาพจากดาวเทียม เพื่อหาแนวรอยแตกรูปทรงกลม และเทียบสัมพันธ์กับข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งทำให้เราสามารถกำหนดตำแหน่งหินอัคนีบาดาลรูปทรงกลมได้อย่างดี ต่อมาจึงทำการตรวจสอบอย่างละเอียดเพื่อหาหลักฐานในสนาม ตามด้วยการเก็บตัวอย่างดินและตะกอนต่อน้ำ เพื่อหาทางพิสูจน์ว่ามีแร่ดิบุกหรือไม่ โดยดิบุกทำหน้าที่เป็นแร่แม่สื่อ (path finder minerals) นำเราไปสู่แร่ธาตุหายาก ซึ่งมีค่าทางเศรษฐกิจมากกว่ามากในปัจจุบัน