บทที่ 9
แบบจำลองแหล่งแร่
(Mineral Deposit Models)

นักสำรวจแร่ส่วนใหญ่มักตั้งแบบจำลองแหล่งแร่ไว้ในใจ เมื่อเขาเข้าไปสำรวจแร่ด้วยวิธีต่างๆสักพักใหญ่ในบางครั้งก็อาจคิดไว้ตั้งแต่เข้าถึงพื้นที่ในตอนแรก หรือบางครั้งก็คิดหลังเสร็จการสำรวจแล้ว ในที่นี้เพื่อให้ง่ายต่อการสำรวจแร่ เราจึงจัดแบ่งแบบจำลองแหล่งแร่ออกเป็น 3 แบบ ตามลักษณะและรูปแบบของหิน(forms & styles of rocks) และการเกิดเป็นแหล่งแร่(mineralization)เป็นหลัก คือแหล่งแร่ที่สัมพันธ์กับหินอัคนี หินตะกอน และหินแปร

9.1 แหล่งแร่ที่สัมพันธ์กับหินอัคนีสีเข้มถึงเข้มจัด (Deposits Associated with Mafic and Ultramafic Rocks)

หินอัคนีสีเข้มถึงเข้มจัดมักมีผู้ทำการศึกษาและได้รับความสนใจมาก ทั้งนี้เพราะหินอัคนีดังกล่าวนี้ผุดให้เราเห็นจากใต้โลกที่ลึกมาก ซึ่งอาจเป็นชุดหินที่มาจากส่วนบนๆ ของชั้นเนื้อโลก ดังนั้นการศึกษาหินจำพวกนี้ทำให้เราได้เข้าใจธรรมชาติ และกำเนิดของโลกเราในช่วงเริ่มต้น ว่าการเกิดเปลือกโลกเรามีวิวัฒนาการมาอย่างไรในขณะที่โลกเราเริ่มเย็นตัวลง มีการตกผลึกและการแยกลำดับส่วนอย่างไร ตลอดจนมีการผุพังของหินจนในที่สุดจึงได้ตะกอนรุ่นแรกๆ ได้อย่างไร เหล่านี้เป็นต้น

หินอัคนีสีเข้มถึงเข้มจัดนี้มักมีความสัมพันธ์ลึกซึ้งโดยตรงกับแหล่งแร่ต่างๆ เช่น แร่โครเมียมและนิเกิ้ล ซึ่งหินเหล่านี้มักประกอบด้วยแร่ที่เกิด ณ อุณหภูมิสูง ซึ่งได้แก่จำพวกเหล็กซิลิเกต หรือแมกนิเซียมซิลิเกต (Fe-silicates or Mg-silicates) และอาจพบแร่จำพวกอลูมินัมซิลิเกต (Al-silicates) เช่น แพลจิโอเคลสชนิดแคลเซียมหรือการ์เนตชนิดไพโรบ และแร่ออกไซต์บางประเภท เช่น สิปิเนลได้บ้าง

สำหรับนักสำรวจแร่มักใช้คำว่า หิน basic กับหิน mafic แทนที่กันได้ แต่ในปัจจุบันคำว่า basic และ mafic อาจไม่ใช่คำที่เหมือนกันทีเดียวนัก คำแรกใช้เรียกหินอัคนีชนิดนี้มีปริมาณซิลิกา (SiO_2) ค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 45-50% ส่วนคำหลังใช้เรียกหินอัคนีชนิดนี้มีปริมาณแร่สีเข้ม(mafic minerals)อยู่มาก โดยจัดให้มีดัชนีสี (colour index) อยู่ในช่วงประมาณ 60-90% ถ้ามีคำ prefix เติมหน้า เช่น Ultrabasic และ Ultramafic หมายถึงหินอัคนีที่มีปริมาณซิลิกาน้อยกว่า 45% และมีปริมาณแร่สีเข้มหรือดัชนีสีมากกว่า 90% ด้วยเหตุนี้เราจึงนิยมไม่จัดหินอะนอโทไซต์ไว้เป็นหินอัคนีจำพวกสีเข้มหรือเข้มจัดในแง่ของนักสำรวจทั่วไป

ลักษณะสำคัญของหินอัคนีสีเข้มหรือเข้มจัดอีกอย่างหนึ่ง คือ มักประกอบด้วยเนื้อหินสำคัญ 2 ชนิด คือ เนื้อผลึกสะสม (cumulate texture) ซึ่งหมายถึงเนื้อหินที่เกิดจากการสะสมตัวของแร่ที่ตกผลึก

ตาราง 9.1 การจำแนกลักษณะรูปร่างหินอัคนีสีเข้มถึงสีเข้มจัด (Naldret & Cabri, 1976)

โดยตรงจากหินหนืดโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงการตกผลึกในภายหลัง ซึ่งทำให้เราได้ผลึกที่มีลักษณะสมบูรณ์(panidiomorphic) จนถึงผลึกหน้ากึ่งสมบูรณ์(hypidiomorphic) ส่วนเนื้อหินอีกชนิดที่มักพบบ่อยก็คือ เนื้อผลึกรอยเท้าไก่ (spinifex หรือ chicken-tract texture) ซึ่งมักเป็นเนื้อหินที่มีการสานเกี่ยวกันของผลึกแร่โอลิวีนที่ยาวผิดปกติ โดยมักพบในหินละลายชนิดมี แมกนีเซียม(Mg)สูง ที่เรียก"โคมาติไอต์"(Komatiite) อันเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของแร่สีเข้มดังกล่าวในหินหนืด จนบางครั้งพบว่าอาจมีความยาวถึง 3 ซม (คำว่า spinifex ได้ชื่อมาจากหญ้าชนิดหนึ่งที่พบในประเทศออสเตรเลีย)

หินอัคนีสีเข้มถึงเข้มจัดนี้มักพบได้ในหลายสภาพแวดล้อมทางธรณีวิทยาที่แตกต่างกันแต่โดยทั่วไปแหล่งแร่ประเภทนี้อาจแบ่งอย่างง่ายออกเป็น 3 พวก ตามลักษณะธรณีเคมีได้แก่

(1) แร่จำพวกออกไซต์ เช่น แหล่งแร่โครไมต์ และแหล่งแร่พลาตินัม

(2) แร่จำพวกซัลไฟต์ เช่น แหล่งแร่นิเกิ้ล และแหล่งแร่ทองแดง

(3) แร่จำพวกแพลจิโอเคลส เช่น แหล่งแร่ไทแทเนียม

ซึ่งแหล่งแร่ต่าง ๆ เหล่านี้ได้แยกอธิบายในรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

ลักษณะธรณีเคมีของแร่เหล่านี้อาจเกิดซ้อนกันอยู่ในแหล่งแร่ที่มักพบในหินอัคนีในหลายๆ ลักษณะ(ดูตาราง 9.1) และอาจกล่าวได้ว่า แหล่งแร่จำพวกนี้มักสัมพันธ์ใกล้ชิดกับหินอัคนีบาดาล(เช่นหินอัคนีอัลคาไลต์) ในปล่องระเบิด หรือพนังหินรูปวงแหวน และมีอยู่น้อยจำพวกที่เกิดกับหินละลายสีเข้มจัด(เช่น แหล่งนิเกิ้ล) หรือสัมพันธ์กับหินละลายสีเข้มจัดที่มีสารระเหิด(volatiles)อยู่ด้วยมาก (เช่น หินคิมเบอร์ไลต์ หรือหินคาร์บอนาไตต์)

หลายคนเชื่อว่าเปลือกโลกในสมัยแรกๆ ตอนที่โลกเริ่มเย็นตัวใหม่ๆ (premoidal earth) นั้นมีลักษณะที่ค่อนข้างบางและมีหินหนืดพ่นก๊าซ(degassing)ออกมาได้มากทางปล่องของภูเขาไฟเกือบตลอดเวลา จนถึงช่วงอายุกลางมหายุคโปรติโรโซอิค จึงเกิดการระเบิดอย่างรุนแรงของภูเขาไฟเกือบทั่วทั้งโลก จนเกิดเป็นปล่อยไดจะทรีมใหญ่น้อยทั่วไปที่มีจุดกำเนิดในชั้นเนื้อโลกตอนบน ซึ่งมักเกิดในพื้นที่ที่บรรพตรังสรรค์ (orogeny) สิ้นสุดลง จนกลายเป็นพื้นที่สงบนิ่ง (cratonic areas) โดยที่ปล่องไดอะทรีมเหล่านี้มักสัมพันธ์กับแนวรอยเลื่อนฝังลึก (deeply extending faults) หรือบริเวณที่มีแนวรอยเลื่อนอย่างน้อยสองแนวตัดกัน จนทำให้เกิดช่องทางที่หินหนืดลึกๆ ใต้โลกผุดขึ้นมาสู่ผิวโลกในสมัยนั้นได้

เป็นที่น่าสังเกตว่าแหล่งแร่ดังกล่าวมักเกิดร่วมกับหินหนืด กระบวนการสะสมตัวจึงเกิดขึ้นมาก่อนการระเบิดหรือช่วงขณะนี้มีการระเบิด หลักฐานธรณีวิทยาในสนามทำให้เราเชื่อว่าแหล่งแร่ตามช่องระเบิดเหล่านี้เป็นผลมาจากการระเบิดภายในตัวหินอัคนีบาดาลเอง โดยมีการแปรสภาพแทนที่ (metasomatisan) กับหินข้างเคียงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

9.1.1 แหล่งแร่โครไมต์ (Chromite Deposits)

โดยทั่วไปแหล่งแร่โครไมต์เกิดได้ใน 2 แบบเด่นๆ ได้แก่ แบบชั้น (layered deposits) และแบบกะเปาะ (podiform deposits) ซึ่งทั้งสองแบบมีลักษณะทางเคมีของแร่โครไมต์ที่ต่างกัน(รูป 9.1.17 และ 9.1.18)

1) แหล่งแร่โครไมต์เป็นชั้น (Stratiform layered deposits) ซึ่งมักมีลักษณะใหญ่ และเกิดในบริเวณที่สงบตัว (craton) เช่น บริเวณ Bushveld Complex ในแอฟริกาใต้ บริเวณ Great Dyke ในประเทศซิมบาบเวย์, แหล่ง Stillwater ในรัฐมอนตานา (อเมริกา), แหล่ง Muskox ในรัฐนอทเวสเทอริทอรี(คานาดา) หรือแหล่ง Kemi ในฟินแลนด์ ซึ่งรายละเอียดของแต่ละแหล่งที่สำคัญได้แสดงไว้ในฐานข้อมูลหมายเลข 9.1

รูป 9.1.1 แสดงตำแหน่งที่ตั้งของแหล่งแร่โครไมต์สำคัญๆ ของโลก ส่วนรูป 9.1.2 ถึง 9.1.16 แสดงลักษณะธรณีวิทยาที่สำคัญของแหล่งแร่บางแหล่ง

2) แหล่งแร่โครไมต์กะเปาะ (Podiform Deposits) ซึ่งมักพบในบริเวณบรรพตรังสังค์แอลป์ (Alpine Orogeny) หรือพูดอย่างง่ายๆ คือ ตามแนวโอฟีโอไลต์นั่นเอง ซึ่งก็คือบริเวณแผ่นเปลือกโลกสองแผ่นเกิดการชนกัน ดังนั้นจึงมักพบร่องรอยของแผ่นสมุทรหลงเหลือและโผล่ให้เห็นได้บ้าง เช่น แถบเทือกเขา ยูราล แอลบาเนีย เตอร์กี ฟิลิปปินส์ กรีซ คิวบา นิวคาลีโดเนีย และยูโกสลาเวีย ซึ่งโดยมากมักมีอายุที่อ่อนกว่าตั้งแต่มหายุคพาลิโอโซอิค จนถึงยุคเทอร์เชียรี แต่ก็มีบ้างบางแหล่งที่มีสภาพก้ำกึ่งกัน (transitional type) (ดูรูป 9.1.8 ถึง 9.1.14)

ลักษณะเฉพาะของแหล่งแร่โครไมต์แบบที่ 2 พบสรุปได้ดังนี้

ก) แหล่งแร่มักเกิดในหินอัคนีสีเข้มถึงเข้มจัดที่มีการเปลี่ยนลักษณะอย่างรุนแรงโดยแรงเค้น(strongly sheared) จนกลายเป็นหินเทคโทไนต์(tectonites) ที่ถูกปะกบด้วยหินข้างเคียง ทั้งด้านบนและด้านล่างในลักษณะแนวสัมผัสรอยเลื่อน(fault contacts) หรืออาจเรียกรอยสัมผัสแปรสัณฐาน (tectonic contact) ได้ การเปลี่ยนลักษณะอาจรุนแรงจนหินอัคนีมีสภาพคล้ายเลนซ์ และมีโครงสร้างแบบโค้งดันเลื่อนตัว(nappe stracture)

ข) แหล่งแร่มักมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และมีขนาดไม่ใหญ่เลย

ค) การกระจายตัวของกะเปาะแร่อาจเป็นแบบเหลื่อมซ้อน(en echclon) หรือคล้ายขบวนรถไฟ มีทั้งที่มีการตัดขวางหินข้างเคียงหรือตัดตามการวางตัวมากกว่าที่จะเป็นลักษณะชั้นหินหนืดที่ติดกับผนังด้านข้างของหินเพอริโตไตต์

- ลักษณะแร่โครไมต์ มักมีลักษณะเป็นเม็ดใหญ่ๆ (xenocrystic หรือ xenomorphic) ซึ่งบางครั้งอาจมีความยาวถึง 1 ซม ก็มี
- เม็ดแร่มักเป็นก้อนกลมเป็นวงๆ (orbicular หรือ nodular) ที่แสดงเนื้อแร่ที่เปลี่ยนลักษณะ เช่น เนื้อแรงดึง (pull-apart textures) หรือแนวเส้น (lineations) ชัดเจน
- ส่วนประกอบของโครไมต์ มักมีเหล็ก, อะลูมินัม, ไทเทเนียม ตลอดจนอัลคาไลต์ผสมอยู่น้อย และมีลักษณะสัดส่วน Cr ต่อ Al ค่อนข้างกว้าง

รูป 9.1.1 แผนที่โลกแสดงบริเวณมุดตัว(แนวฟันปลา), บริเวณยกตัว (เส้นทึบ) และตำแหน่งแหล่งแร่โครไมต์สำคัญๆ

บางแหล่ง (Gasss, 1982)

รูป 9.1.2 แผนที่ธรณีวิทยาอย่างง่ายแสดงหินอัคนีซับซ้อนบูชเวล ในอาฟริกาใต้

ในฐานะข้อมูล 9.2 แสดงถึงลักษณะของแหล่งแร่จำพวกต่างๆ ซึ่งในแนวสุดท้ายเป็นพวกที่แสดงลักษณะกะเปาะจริงๆ เช่นที่แหล่ง Shurugwe (หรือที่เรียก Selukwe ในอดีต) ของประเทศซิมบาบเว (Zimbabwe) อันเป็นส่วนของแนวหินภูเขาไฟที่เรียกแนวหินเขียว (Greenstone Belt) ซึ่งแสดงลักษณะหลายอย่างที่คล้ายกับแหล่งแร่แบบเป็นชั้นๆ แต่แสดงลักษณะแนวสัมผัสแปรนสัณฐาน โดยรอยเลื่อนจนทำให้ทั้งมวลหินและกะเปาะแร่เกิดการเคลื่อนย้ายตัวเองไปจากเดิม ส่วนแหล่ง Vourinos และ Tiebaghi แสดงลักษณะของกะเปาะแหล่งแร่โครไมต์มากขึ้น ส่วนที่ประเทศเตอรกีอาจจัดว่าเป็นพวกที่แสดงกะเปาะได้ดีที่สุด โดยแหล่งแร่มีหลายขนาดนับตั้งแต่ขนาด 100 ตันไปจนถึง 10,000 ตัน ในบางครั้งนักธรณีวิทยา เช่น Gassard และคณะ (1981) ได้จำแนกแหล่งแร่โครไมต์แบบกะเปาะออกเป็น 3 รูปแบบโครงสร้าง ได้แก่ พวกตัดตามระนาบ (concordant) พวกกึ่งตัดตาม(subconcordant) และพวกตัดขวางระนาบ (discordant)

รูป 9.1.17 และ 9.1.18 แสดงลักษณะทางเคมีของแร่โครไมต์ที่แตกต่างกันระหว่างแหล่งแร่โครไมต์เป็นชั้นและแบบกะเปาะ

9.1.2 แหล่งแร่กลุ่มปลาตินัม (PGM Deposits)

PGM ย่อมาจากคำว่า Platinum Group Metals ซึ่งได้แก่แร่จำพวก rutenium (Ru), rhodium (Rh), palladium (Pd), osmium (Os), iridium (Ir) และ platinum (Pt) แหล่งแร่กลุ่มปลาตินัมนี้ไม่ค่อยพบบ่อยนัก และมักประกอบด้วยวิทยาแร่ซับซ้อนโดยที่มักอยู่ในรูปสารละลายสภาพของแข็ง (solid solution) ในสภาพซัลไฟด์โลหะหนัก เช่น แร่ไพโรไทต์ (pyrrhotite) เพนแลนด์ไดต์ (pentlandite) และไพไรต์ (pyrite) หรืออาจจอยู่ในรูปโลหะซัลไฟต์จำพวกปลาตินัมโดยตรง หรือเป็นโลหะผสมของปลาตินัมกับเหล็กในสภาพผลึกเจริญร่วม(intergrowth) ในบางครั้งพบว่าแหล่งแร่ดังกล่าวมักมีทองเกิดปะปนด้วยในปริมาณไม่มากนัก(traces of gold) แหล่งแร่กลุ่มปลาตินัมมักพบเห็นได้ในหินอัคนีสีเข้มจัดเกือบทุกชนิดและโดยเฉพาะหินที่เกิดร่วมกับแหล่งแร่โครไมต์ ซัลไฟต์ของนิเกิ้ล และทองแดง

แหล่งแร่ที่สำคัญ ได้แก่ แหล่งแร่เมอร์เรนสกี้รีฟ (Merensky Reef) ดังแสดงในรูป 9.1.19 ซึ่งเป็นชั้นแร่โครไมต์อันมีชื่อเสียงของแหล่งบุชเวลด์(Bushveld Complex)ของแอฟริกาใต้(รูป 9.1.20) นอกจากนั้นยังได้แก่ที่ Sudbury, Stillwater (รูป 9.1.21) และ Great Dyke ส่วนแหล่งแร่กลุ่มนี้เชื่อกันว่าน่าจะเกิดเป็นลานแร่ (placers)ได้ถ้าอยู่ในแนวชุดหินโอฟิโอไลต์ อย่างใดก็ตามแม้จะเป็นแหล่งเป้าหมายที่น่าสนใจแต่ปัจจุบันก็ยังไม่มีผู้ใดสำรวจจริงจัง (underexplored target)

ตาราง 9.1.2 แสดงการจำแนกลักษณะการเกิด(occurrences)ของกลุ่มแร่ปลาตินัม ส่วนตาราง 9.1.3 และ 9.1.4 แสดงปริมาณสำรอง การผลิตและความสมบูรณ์ของแหล่งแร่ดังกล่าวในบางแหล่ง

9.1.3 แหล่งแร่นิเกิ้ล (Nickle Deposits)

สำหรับแหล่งแร่นิเกิ้ลที่สัมพันธ์กับหินอัคนีสีเข้มถึงเข้มจัดนั้น สามารถจัดแบ่งไว้ออกเป็น 2 จำพวก ตามลักษณะการเกิดที่แตกต่างกัน คือ

ก. พวกที่เกิดร่วมกับหินอัคนีบาดาล เช่น แหล่ง Sudbury ที่มีชื่อเสียงมากที่สุดในรัฐ Ontario ของคานาดา และแหล่ง Noril'sk I แถบเทือกเขายูราล ประเทศรัสเซีย ซึ่งชนิดหลังนี้เกิดอยู่ในหินแกบโบรที่มีความยาวถึง 12 กม และมีความกว้าง 30 ถึง 35 เมตร และจากการสำรวจพบว่าแหล่งมีสภาพเป็นรูปเลนซ์ใหญ่มาก

ข. พวกที่เกิดร่วมกับหินภูเขาไฟ โดยเฉพาะกับหินละลายโคมาติไอต์ (komatiite lava) โดยเกิดในหินดันไนต์-โคมาติไอต์ ในรัฐ Ontario ของคานาดา หรือบริเวณแถบแหล่งแร่ทองที่เรียก Eastern Goldfields ทางภาคตะวันตกของออสเตเรีย (ดูฐานข้อมูล 9.3) นอกจากนั้นยังพบบ้างแถบแอฟริกาใต้ อีกด้วย

รูป 9.1.22 แสดงปริมาณสำรองของแหล่งแร่นิเกิ้ลของประเทศผู้ผลิตรายใหญ่ ส่วนรูป 9.1.23 แสดงภาพตัดขวางของแหล่งนิเกิ้ลขนาดใหญ่ของโลกให้สังเกตว่าตัวแหล่งแร่อยู่ข้างใต้หินอัคนีสีเข้มจัดเพอริโดไทต์อายุพรีแคมเบรียน

อาจกล่าวได้ว่าแหล่งแร่ ซัสเบอรี่(Sudbury)อายุพรีแคมเบรียนของคานาดานี้จัดว่ามีความเป็นเอกลักษณ์มากที่สุด(รูป 9.1.24 ถึง 9.1.27) แม้ว่าจะมีการทำเหมืองมามากกว่า 100 ปี แต่กำเนิดของแหล่งแร่ก็ยังคลุมเครือ จนถึงปัจจุบัน แต่นักธรณีวิทยาจากทวีปอเมริกาเหนือส่วนใหญ่เชื่อว่าแหล่งแร่นิเกิ้ลที่นี่ถือกำเนิดมาจากการตกกระทบของอุกาบาต(meteorite impact) ซึ่งเรียกว่า "มหันตภัยดาวหาง" (astrobleme)

ส่วนแหล่งแร่โนริล(Noril'sk) มีลักษณะโครงสร้างหินอัคนีบาดาลเป็นชั้น (layer plutonics) เป็นรูปจานยักษ์(lopolith) โดยมีแร่นิเกิ้ลซัลไฟต์เกิดเป็นชั้นในส่วนล่างๆ ของหินอัคนีบาดาลนั้น โดยที่รอยสัมผัสกับผนังด้านล่างของสินแร่(footwall) เป็นหินภูเขาไฟอายุเพอร์โมไตรแอสซิกและหินตะกอนอายุเฟอร์โม-คาร์บอนิเฟอรัส (รูป 9.1.28)

หลายคนเชื่อว่าโอกาสที่จะพบแหล่งขนาดและประเภทเดียวกับซัดเบอรี่(Sudbury)นั้นคงมีไม่มากนัก ด้วยเหตุนี้แหล่งแร่นิเกิ้ลชนิดที่สัมพันธ์กับหินภูเขาไฟจึงดูเป็นที่จดจ้องของบรรดานักสำรวจมากกว่า โดยเฉพาะในบริเวณแถบแนวหินเขียวอาร์เคียน (Archaen Greenstone Belt) สำคัญๆ ของโลก

แหล่งแร่นิเกิ้ลซัลไฟต์อายุอาร์เคียน โดยเฉพาะที่เกิดที่ออสเตรเลีย(รูป 9.1.29 ก และ ข) อาจจำแนกออกเป็น 2 แบบต่างกัน คือ

ก) พวกที่เกิดร่วมกับหินละลายโคมาติไอต์ ซึ่งมักเรียกแหล่งลักษณะนี้ว่าแหล่งแบบคัมบาลดา (Kambalda-type) และ

ข) พวกที่เกิดร่วมกับหินดันไนต์ผลึกพอก(adcumulate dunite) ซึ่งมักเรียกแหล่งลักษณะนี้ว่าแหล่งแบบเมาต์คีท (Mount Keith-type)

เป็นที่น่าสังเกตว่าชนิดแรกมักมีลักษณะเป็นแหล่งเล็กๆ มีปริมาณสำรองน้อยกว่า 5 ล้านตัน แต่มีความสมบูรณ์ของแร่สูง (2-4% Ni)

ส่วนแหล่งที่สองเป็นแหล่งใหญ่ มีปริมาณสำรองมากกว่า 40 ล้านตัน แต่มีความสมบูรณ์ต่ำกว่าแหล่งชนิดแรก เช่น แหล่ง Mount Keith ซึ่งมีขนาด 290 ล้านตัน ณ ที่ความสมบูรณ์ 0.6% Ni และแหล่งแอกนิว (Agnew) ที่มีความสมบูรณ์แร่ 2.05% Ni และมีปริมาณถึง 45 ล้านตัน

แหล่งทั้งสองชนิดมักเกิดในแนวโค้งไปมาเหมือนกระดูกงู (keel-shaped) ในชั้นหินตะกอน-ภูเขาไฟยุคอาร์เคียนของแนวหินเขียว (ดูรูป 9.1.29ก) ของออสเตรเรีย โดยที่หินอัคนีมีทั้งที่เป็นสีเข้มถึงสีเข้มจัด ณ บริเวณชั้นหินแบบฉบับ มีความหนา 10 ถึง 12 กม และประกอบด้วย 3 หน่วยหินใหญ่ๆ คือ ก) หน่วยล่างสุด ประกอบด้วยหินบะซอลต์โทลิไอต์(tholeiite) ข) หน่วยหินบะซอลต์โคมาติไอต์ และหินบะซอลต์ที่มี Mg สูง วางตัวถัดมา และ ค) หน่วยหินตะกอนและหินภูเขาไฟสีจางวางตัวอยู่ด้านบน นอกจากนั้นยังมีแหล่งที่น่าศึกษาสำหรับนักสำรวจอีกแหล่งคือ แหล่งพาลาโบลในแอฟริกาใต้ ซึ่งปัจจุบันผลิตทองแดงความสมบูรณ์ต่ำที่มีปริมาณสำรองถึง 558 ล้านตัน (รูป 9.1.30)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น บางแหล่งก็เกิดอยู่ร่วมกับหินดันไนต์แปรสภาพผลึกใหญ่เป็นชั้นหนาๆ แต่ส่วนใหญ่มักเกิดกับหินละลายโคมาติไอต์ แต่การศึกษาในปัจจุบันกลับพบว่าแหล่งทั้งสองชนิดนี้อาจมีกำเนิดคล้ายๆ กัน และมีความเกี่ยวเนื่องกัน กล่าวคือ ความแตกต่างของทั้งสองแหล่งอาจเป็นเพียงที่อัตราในการเย็นตัวและตกผลึกเท่านั้นที่ต่างกัน หลายคนจึงเชื่อว่าน่าจะมีกำเนิดมาจากหินหนืดตัวเดียวกันก็ได้(comagmatic) และมักเรียกแหล่งชนิดแรกว่า "komatiitc-hosted deposit" และชนิดหลังว่า "komatiitic dunite-hosted deposit" แทนที่ชื่อเดิมที่เคยใช้เรียกคือ "volcanic peridotite-associated deposit" และ "intrusive dunite-associated deposit" ตามลำดับ

แนวทางการสำรวจ

การค้นพบแหล่งแร่นิเกิ้ลซัลไฟต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคตะวันตกของออสเตรเลียหลายแห่งทำได้โดยการตรวจพบเปลือกแร่แข็งหรือแหล่งแร่เกรอะกรัง(gossan) ที่ปิดทับแหล่งแร่โดยตรง ดังนั้นถ้าทราบถึงกำเนิดของแหล่งดังกล่าว และธรณีเคมีของพวกมัน ก็จะเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการแยกแยะแหล่งแร่ต่าง ๆ ดังกล่าวได้

ในกรณีที่ต้องการหาแหล่งแร่ซัลไฟต์ดังกล่าวในระดับลึกนั้น นักสำรวจแร่ควรมีความรู้เกี่ยวกับกำเนิดของธาตุ Ni ในหินอัคนีสีเข้มจัดเป็นอย่างดี ซึ่งโดยทั่วไปในหินสีเข้มจัดนั้น แร่โอลีวีนมักประกอบด้วยปริมาณ Ni อยู่เพียงเล็กน้อย(ประมาณ 0.05 ถึง 0.2%) ซึ่งทำให้เราไม่สามารถสกัดเอา Ni ออกมาใช้ได้คุ้มทุน แต่เมื่อหินได้รับอิทธิพลต่อกระบวนการพื้นผิว(surface process) ที่เกิดในสภาพที่ไม่แตกต่างไปจากกระบวนการเกิดศิลาแลง (lateritization) ซึ่งสามารถทำให้เกิดการสะสมตัวของแร่ธาตุจำพวก Ni ได้ในปริมาณที่มากถึง 3% หรือบางแห่งอาจถึง 7% (ดูหัวข้อถัดไปเรื่องแหล่งแร่อันเป็นผลมาจากการผุพัง)

การสะสมตัวของนิเกิ้ลในหินสีเข้มถึงเข้มจัดนี้มักเกิดในสภาพที่มีปริมาณซัลเฟอร์หรือ(กัมมะถัน)พอเพียงในหินหนืด ดังนั้นเมื่อถึงสภาพที่เหมาะสมทั้งทางเคมีและกายภาพ ก็จะเกิดการแยกตัวเอาแร่ซัลไฟต์ออกมาจากหินหนืด ก่อนที่แร่โอลิวีนจะดึงเอาธาตุ Ni ออกมาจากหินหนืด หรือหินหลอดละลาย (melt) ได้ จากการศึกษาทางศิลาวิทยาอย่างละเอียด โดยอาศัยเครื่องมือจำพวก Scanning Eleetron Microscope (หรือ SEM) ในแร่ที่ตกผลึกก่อนคือ แร่สปิเนล (spinels) แสดงว่าการสกัดแร่จำพวกซัลไฟต์ที่ไม่ผสมกับหินหนืดนี้สามารถเกิดได้ในหินอัคนีสีเข้มจัด แม้ว่าจะไม่พบแร่จำพวกซัลไฟต์ดังกล่าวในหินเลยก็ตาม การสะสมตัวของ Ni มักปรากฏที่ผนังด้านล่าง(footwall) ของรอยเลื่อนหรือรอยสัมผัสเสมอ ดังนั้นนักสำรวจจึงควรให้ความสำคัญต่อการวางตัวของหินอัคนีสีเข้มจัด โดยการศึกษาลักษณะโครงสร้างเนื้อหิน ตลอดจนลำดับชั้นแปรสัณฐานของหินด้วย

สำหรับตัวอย่างแหล่งแร่นิเกิ้ลที่สำคัญได้แสดงในฐานข้อมูล 9.3

9.1.4 แหล่งแร่ไทเทเนียม (Titanium Deposits)

หินอะนอโทไซต์(Anorthosite) อาจเรียกได้ว่าเป็นหินอัคนีสีเข้มจัด(ultramafic)ประเภทหนึ่งที่มีโทนสีขาว (leucocratic)มากที่สุดในบรรดาหินอัคนีที่เกิด ณ ช่วงอุณหภูมิสูงเหมือนกัน ซึ่งบางคนอาจเรียก หินลิวโคแกบโบร (leuco-gabbro) หรือหินลิวโคนอไรต์ (leuco-norite) ซึ่งมักประกอบด้วยแร่เฟลสปาร์จำพวกแคลเซียมแพลจิโอเคลส(An35-100) เป็นแร่หลักส่วนใหญ่ โดยมีแร่รอง (accessories) เช่น โอลิวีน และแร่แม่เหล็กที่มีไทเทเนียมเป็นองค์ประกอบ นอกจากนั้นก็อาจมีแร่เหล็กแดง (hematite) อยู่ด้วยได้

ในปัจจุบัน เชื่อกันว่าอาจเกิดสภาพที่ต่างกัน 2 สภาพคือ

ก) เกิดอยู่ร่วมกับ*หินอัคนีบาดาลแสดงชั้น (layered intrusives)* สีเข้มถึงเข้มจัดซึ่งมักปรากฏในส่วนบนของชั้นหิน และ

ข) เกิดในบริเวณที่เรียก *"anorthosite massif"* หรือมวลอะนอไซต์แผ่กว้าง

ในชนิดแรก หินอะนอโทไซต์มักเกิดจากการแยกตัวออกมาโดยตรงจากหินหนืด แร่แพลจิ-โอเคลสซึ่งเบากว่าหินหนืดจึงลอยตัวขึ้น และในที่สุดก็แข็งตัวปรากฏอยู่ชั้นบนๆ ของหินอัคนีสีเข้มจัดได้ เนื่องจากถ.พ.ของแร่น้อยกว่าหินหนืดโดยรวม

สำหรับชนิดที่สองส่วนใหญ่ประกอบด้วย แร่เฟลสปาร์จำพวกแพลจิโอเคลส ตั้งแต่แอนดีซีน (andesine)ไปถึงแลบราโดไลต์(labradolite) (An 35-65) และเกิดร่วมกับหินนอไรต์และหินอิลมิโน-นอไรต์(รูป9.1.25) โดยทั่วไปแหล่งแร่ดังกล่าวมักพบในบริเวณซีกโลกเหนือ (ดูรูป 9.1.31 และ 9.1.32) ซึ่งมักเกิดอยู่รวมกันเป็นกระจุก(clusters)ไปตามแนวยาวของหินอัคนีสีเข้มจัดในช่วงปลายมหายุคพรีแคมเบรียน (1.3$\pm$0.2 พันล้านปี) ดังนั้นจึงเชื่อกันว่ากำเนิดของแหล่งแร่น่าจะเป็นผลมาจากการแยกตัวออกไปของแผ่นทวีป (intracratonic rifting)โดยไม่มีกระบวนการบรรพตรังสรรค์(anorogenic)เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งอาจโดยการหลอมละลายบางส่วนของหินโทลิไอด์ (tholeite)ในชั้นเนื้อโลกตอนบน

โดยมากแหล่งแร่ไทเทเนียมขนาดใหญ่แทบทุกแห่ง มักเกิดในบริเวณมวลหินอะนอโทไซด์ (anorthosite massif) ดูเหมือนแหล่งใหญ่ที่สุดในปัจจุบันคือที่ Lac Tio ประเทศคานาดา (ดูหมายเลข 10 รูป 9.1.31) ในแง่ธรณีฟิสิกส์แหล่งแร่ไทเทเนียมมักให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กทางอากาศสูงเช่นที่ ผ่านแหล่ง Lac Tio) หินอะนอโทไซด์ที่มีแร่ไทเทเนียมมากนี้ มีอายุประมาณ 1.4 พันล้านปี ครอบคลุมขนาด 145x40 กม โดยที่ทางส่วนด้านตะวันออกเฉียงเหนือประกอบด้วยแหล่งสะสมของแร่เหล็กแดงอิลมิไน (ilmeno-hematite) แหล่งที่ใหญ่ที่สุดก็ได้แก่ที่แลคตีโอ(Lac Tio) ซึ่งมีขนาด 1.10x1.04 เมตร บนผิว และมีปริมาณสำรองถึง 115 ล้านตัน ณ ความสมบูรณ์ 32% TiO_2 และ 30% Fe สินแร่ที่สำคัญคือ แร่อิลมิไนต์ ซึ่งมักเกิดเป็นรูปผลึกยาวๆ เนื้อหยาบ และมีรอยแส้แยกตัว (exsolution blades) ของแร่เหล็กแดงด้วย สินแร่หลักมักมีความสมบูรณ์ของแร่อิลมิไนต์ (75%) และฮีมาไทต์ (20%) สูงและมีแร่รองที่สำคัญ เช่น pyrrhotite, pyrite chalcopyrite, pyroxeue และ feldspar

9.1.5 แหล่งแร่มวลซัลไฟต์ภูเขาไฟ (Volcanogenic Massive Sulphide Deposits)

แหล่งแร่มวลซัลไฟต์ภูเขาไฟ หรือเป็นที่รู้จักกันในบรรดานักสำรวจแร่ว่า แหล่งแร่ VMS สำหรับนักธรณีวิทยาและนักสำรวจแร่โลหะส่วนใหญ่ ได้ให้ความสนใจแหล่งแร่ชนิดนี้มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแหล่งแร่ดังกล่าวประกอบด้วยมวลแร่ซัลไฟด์มีปริมาณแร่มากกว่า 60% ในตัวสินแร่ (ore body) และปราศจากเนื้อหินที่มีความเด่นชัด โดยส่วนใหญ่ลักษณะของสินแร่มักเป็นชั้นเล็กๆ ซึ่งโดยมากวางตัวตัดขวางชั้นหิน(stratabound) แต่ก็มีบ้างที่ตัดเข้ามาและขนานชั้นหิน (stratiform) โดยที่ชั้นแร่หรือแหล่งแร่มักถูกห้อมล้อมด้วยชั้นหินภูเขาไฟที่หนา

รูปร่างแหล่งแร่ดังกล่าวมักปรากฏเป็นรูปเลนซ์ และตัวสายแร่อาจสานเกี่ยวกันคล้ายหางเปีย (stringers)ข้างใต้ส่วนที่เป็นเลนซ์ และมักปรากฏการแปลงเปลี่ยนด้วยน้ำยาร้อน(hydrothermal alteration) โดยทั่วไปแหล่งแร่มักถูกปิดทับด้วยชั้นตะกอนซิลิกาบางๆ ซึ่งมักมีเหล็กและแมงกานีสอยู่ด้วย นอกจากนั้นอาจมีสายแร่แบไรต์ปรากฏเป็นรูปเลนซ์เกิดร่วมอยู่ด้วย ในบริเวณขอบหรือด้านบนของสายแร่ซัลไฟด์ เลนซ์สายแร่ซัลไฟด์มักแสดงการลำดับชั้นหินทางเคมี(chemical stratigraphy)ที่ชัดเจนด้วย โดยที่สายแร่มักมีทองแดงอยู่มากในบริเวณส่วนล่าง แต่ส่วนบนและขอบรอบๆขึ้นไปพบว่าปริมาณทองแดงลดลง และกลับมีปริมาณสังกะสี(และ/หรือตะกั่ว)เพิ่มขึ้น ในแหล่ง VMS มักเกิดโดยการพ่นจากใต้ทะเล(submarine exhalative) ซึ่งโดยมากมักเกิดบนพื้นทะเล เมื่อสารละลายน้ำยาร้อนถูกดันพุ่ง (discharge)ออกมา แม้แหล่งแร่VMSจะเกิดขึ้นมาในสภาพทางธรณีวิทยาที่ต่างกัน แต่ก็มีกลไกการเกิดคล้ายกันก็คือ การพุ่งจากใต้ทะเลคล้ายกัน โดยทั่วไปแหล่งแร่VMS ใหญ่ๆ ของโลก มักให้สินแร่ Pb & Zn เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นยังมี Cu & Ag เป็นแร่รอง ๆ ด้วย

แหล่งแร่ที่เกิดโดยการพ่นจากใต้ทะเลนี้ มักมีหินข้างเคียงเป็นตะกอนภูเขาไฟหนา ซึ่งบ้างก็มีหน่วยหินตะกอนเด่น บ้างก็มีหน่วยหินภูเขาไฟเด่น ดังนั้น Hutchison (1973) จึงสรุปว่าลักษณะหินใน

แหล่งแร่ สภาพการแปรสัณฐาน (tectonic setting) และลักษณะการเกิดแหล่งแร่จึงมีความเกี่ยวพันกันอย่างมาก ตามการจำแนกข้างล่าง (ตาราง 9.1.5ก)

ตาราง 9.1.5 ก การจำแนกชนิดแหล่งแร่ที่เกิดจากการพ่นจากใต้ทะเล(Klau & Large, 1980)

ชนิดหินล้อมรอบ	ลักษณะการแปรสัณฐาน	การจำแนกโดย Hutchison (1973)
หินภูเขาไฟสีเข้ม →	โอฟิโอไลต์ →	Cu-pyrite
	เกาะโค้งไม่สมบูรณ์ →	Zn-Cu
หินภูเขาไฟสีจาง →	เกาะโค้งสมบูรณ์ →	Pb-Zn-Cu
	แนวหินเขียว →	Zn-Cu
หินตะกอน →	รอยแยกในทวีป →	Pb-Zn-Cu

กลุ่มที่ใหญ่ที่สุด คือ แหล่งแร่ซัลไฟด์แบบมวล ซึ่งมักเกิดร่วมกับหินภูเขาไฟ และตะกอนภูเขาไฟ ส่วนแหล่งแร่ที่สะสมตัวอยู่กับตะกอนชั้นหนา อาจจัดแยกออกไปเป็นอีกพวกหนึ่งต่างห่าก เรียกแหล่งแร่พ่นเข้าตะกอน (sedimentary exhalative)

สำหรับแหล่ง VMS นี้ ชั้นหินภูเขาไฟที่ปิดล้อมแหล่ง(Volcanic host rocks) นี้อาจเป็นหินภูเขาไฟสีเข้มหรือสีจางก็ได้ (ดูตาราง 9.1.5 ข) แต่ในส่วนนี้เราอธิบายเฉพาะแหล่งที่เกิดอยู่กับหินภูเขาไฟสีเข้ม ซึ่งเราจัดให้มี 2 ประเภท ได้แก่

ก) *แบบไซปรัส (Cyprus-type)* ที่เกิดในชุดหินโอฟิโอไลต์ (Ophiolite) ซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณขอบแผ่นทวีปตะกอนมาสะสม (accretionary margins) หรือในบริเวณส่วนหลังเกาะโค้ง (back-arc) ที่แผ่นสมุทรดันเลื่อนขึ้นมา

ข) *แบบเบชชี่ (Besshi-type)* ที่เกิดอยู่ในหินบะซอลต์ชนิดโทลิไอต์(Tholeiite basalts) โดยมีหินภูเขาไฟสีจาง เช่น หินไรไอไลต์ พบรองลงมาซึ่งหินทั้งสองเกิดอยู่ในแนวเกาะโค้งที่ไม่สมบูรณ์

ตาราง 9.1.5 ข หินภูเขาไฟชนิดต่างๆ ที่เกิดร่วมกับแหล่งแร่มวลซัลไฟต์

หินที่ปิดล้อมแหล่ง	หินภูเขาไฟสีเข้ม		หินภูเขาไฟสีจาง		
1. ชั้นตะกอนภูเขาไฟ	โอฟิโอไลต์	บะซอลต์โทลิไอต์ ± หินภูเขาไฟสีจาง	หินคัลแอลคาไลต์	บะซอลต์-ไรโอไลต์	แนวหินเขียว
2. ลักษณะการแปรสัณฐาน	ขอบแผ่นตะกอนสะสมหรือส่วนหลังเกาะโค้ว	เกาะโค้วมหาสมุทรไม่สมบูรณ์	เกาะโค้วสมบูรณ์	แนวรอยแยกในเปลือกทวีป	แนวรอยแยกในหินอาร์เคียน
3. การเกิดแหล่งแร่	Cu (-Zn)-Au	Zn-Cu, Cu-Zn	Zn-Pb-Cu-Ag-Au(-Ba)	Zn-Pb-Cu-(-Ag-Sn)	Zn-Cu-Au
4. ตัวอย่าง	***Cyprus*** Oman Betts Cove Appenines Ergaru Maden	***Besshi*** Alpine Kieslager Joma Skorovas Lakken	***Kuroko*** Fiji Rosebery Aroca Buchans	***Bathurst*** New Castle Iberian pyrite belt Captain Flat-Woodlawn Skelefti-Vihanti	***Noranda*** Flin Flon Mattagami Mons Cupri

ในบางแห่ง หลักฐานที่ชัดเจนซึ่งแสดงถึงลักษณะการสะสมตัวเป็นแหล่งแร่ที่เกิดพร้อมกับการปะทุของภูเขาไฟ (synvolcanic origin) ของมวลแร่ซัลไฟต์ ได้แก่ ตะกอนถล่ม โครงสร้างการเปลี่ยนลักษณะ การตกตะกอนเรียงเม็ดในสายเลนซ์ไฟไรด์(ที่แสดงการสะสมตัวใหม่) การแตกหักเป็นชั้นภายในหินละลายรูปหมอน การเกิดพนังหินอัคนีที่แสดงขอบแข็ง (chilled margin) ภายในมวลแร่ซัลไฟด์และช่องแทรกหินละลายภายในตัวแหล่งแร่

ก. แหล่งแร่มวลซัลไฟด์ไซปรัส (Cyprus-type VMS Deposit)

ไซปรัสซึ่งเป็นชื่อเกาะแหล่งหนึ่งในทะเลเมดิเตอร์เรเนียนได้ถูกกำหนดให้เป็นชื่อแหล่งแร่มวลซัลไฟด์แบบนี้ เพราะมีการศึกษากันมาก และเป็นที่รู้จักกันดี (ตาราง 9.1.5) นอกจากนั้นแหล่งแร่แบบดังกล่าวยังพบเห็นที่เกาะนิวฟันแลนด์ (New Foundland) ของคานาดา, ฟิลิปปินส์, โอมาน(Oman), และสเปน ฯลฯ โดยมากมักพบในบริเวณแนวรอยแยกที่ทำให้ท้องทะเลแผ่กว้าง และในที่สุดก็ถูกดันเลื่อนขึ้นมา (obducted) อันเป็นผลมาจากแรงดันเข้าหากัน(convergent plate movement) ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักพบในบริเวณที่เป็นรอยตะเข็บธรณี(suture) ระหว่างแผ่นเปลือกโลกที่เชื่อมติดกัน

มวลสินแร่ซัลไฟด์มักถูกห้อมล้อมหรือเกิดอยู่ภายในหินอัคนีสีเข้มถึงเข้มจัดที่มักกลายสภาพเป็นหินสีเขียว(spilitized)ของหินภูเขาไฟที่มี โครงสร้างรูปหมอน (pillow structures) ซึ่งถูกพ่นออกมาจากเปลือกสมุทรแบบเงียบๆ ในทะเลลึก (quiet deep marine extrusions) หินอัคนีสีจางจำพวกไรโอไลด์แทบไม่พบเลย เช่นเดียวกับหินตะกอน แต่ถ้าพบหินตะกอนก็อาจเป็นพวกตะกอนน้ำลึก (pelagic) เช่น หินเชิร์ต(ที่มีซากแรดิโอลาเรีย) หิน(สินแร่)เหล็ก และหิน(สินแร่)แมงกานีส โดยที่บริเวณที่สินแร่สายสานเกี่ยวกัน มักถูกปิดล้อมด้วยหินภูเขาไฟที่แสดงลักษณะการแปลงเปลี่ยนแบบโปรไพลิติก (propylitic)

สำหรับแนวชุดหินโอฟิโอไลต์ ถ้ามีลำดับชั้นที่สมบุรณ์มักแสดงการลำดับชั้นเฉพาะ (ดูรูป 9.1.16) ซึ่งได้แก่ (จากชั้นบนสุดลงล่าง)

(1) ส่วนบนสุดของหินบะซอลต์รูปหมอน (pillow basalts) ซึ่งสลับกันหรือสอดแทรกด้วยหินตะกอนภูเขาไฟชิ้นเหลี่ยม และตะกอนทะเล(ลึก) โดยอาจแสดงการแปรสภาพหินน้ำหนักกดขั้นต่ำ (zeolite facies)

(2) ชั้นที่ประกอบด้วย พนังหินสีเข้มที่เกือบวางตัวในแนวดิ่ง และพบลักษณะการร่วมอยู่ด้วยกัน ซึ่งแสดงถึงชุดแร่หินแปรขั้นปานกลาง (green schist, จนถึง amphibolite facies ตามลำดับ)

(3) การลำดับชั้นที่แสดง กลุ่มหินอัคนีบาดาล (เช่น หิน trondhjemites) ที่มีการเกาะยึดของผลึกแร่ได้ดี และต่อลึกลงไปข้างล่าง มักแสดงลักษณะหินอัคนีสีเข้มจัดแบบมีริ้วลาย เช่น hartzburgite นอกจากนั้นก็มี dunite และ lherzolite ซึ่งพวกริ้วลายนี้เป็นผลเนื่องจากการตอบสนองต่อแรงที่มากระทำ

ซึ่งการลำดับชั้นเช่นนี้ หลายท่านเรียกว่า "Steimann Trinity" และมักเป็นการลำดับชั้นที่ไม่สมบูรณ์ แต่มักพบเห็นได้บ่อยครั้ง สำหรับนักสำรวจการกำหนดที่ตั้งที่เป็นบริเวณแหล่งแร่โครไมต์ชนิด

กระเปาะ ก็คือต้องหารอยต่อระหว่างทวีปที่สำคัญให้ได้ ซึ่งมักพบเห็นได้ตรงส่วนบนของหินเทคโทไนต์ (tectonite)

จากการวินิจฉัย พบว่าแหล่ง VMS มีลักษณะคล้ายกันหลายแหล่ง แม้จะไม่เหมือนทีเดียวนัก แต่ก็มีลักษณะการสะสมตัวของแร่โลหะเหมือนกับพวกที่เกิดตามพื้นท้องทะเลในแถบสันกลางสมุทรในลักษณะที่เรียกว่า "back smokers" (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในรูป 9.2.59 และ 9.2.60 ในหัวข้อถัดไป)

ข) แหล่งแร่มวลซัลไฟด์ภูเขาไฟ (แบบเบชชี/ไคซแลงเจอร์ (Besshi หรือ Kieslager-typer)

คำว่า "Besshi" ถูกตั้งโดย Kato(1937)นักธรณีวิทยาชาวญี่ปุ่น ให้ใช้เป็นชื่อเฉพาะสำหรับแหล่งแร่มวลทองแดงซัลไฟด์แสดงชั้นทองแดงขนาดเล็กๆ มากกว่า 100 แห่ง ปรากฏภายในแนวหินแปร Sanbagkawa ทางตอนใต้ของญี่ปุ่น ส่วนแนว Kieslager ในยุโรปก็มีลักษณะคล้ายกับที่เกิดในญี่ปุ่น

แหล่งแร่ VMS ทั้งสองแหล่งพบอยู่ภายในชั้นหินตะกอน/ภูเขาไฟ ซึ่งหินภูเขาไฟส่วนใหญ่เป็นหินบะซอลต์-แอนดิไซต์ และมีตะกอนภูเขาไฟบ้าง ซึ่งต่อมาถูกการแปรสภาพหินให้กลายเป็นหินชีสสีเขียว

ภายในตัวแหล่งแร่ มักเกิดขนานกับชั้นหิน (stratiform) และมีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายหนังสือปกอ่อน หนาไม่เกิน 7-8 เมตร แต่มีการแผ่กว้างออกไป เป็นร้อยเป็นพันเมตร แร่ไพโรต์จัดว่าเป็นแร่หลักที่เชื่อกันว่าเป็นตัวพา (carrier) เอาธาตุโคบอลต์ (Co) ซึ่งอาจมีปริมาณถึง 5,000 ppm และธาตุนิเกิ้ล (Ni) ในปริมาณถึง 500 ppm ได้ แร่พิโรไทต์ (pyrrhotite) อาจมีมากเป็นบางแห่ง โดยเฉพาะแถบผนังด้านล่างสายแร่ ทองแดงนับว่าเป็นธาตุผลผลิตที่สำคัญของแหล่งแร่ VMS แบบนี้ แต่ในบางแห่งธาตุที่สำคัญรองลงมาคือ สังกะสี ซึ่งอาจมีความสมบูรณ์ตัวแค่ 0.3 ถึง 2.0% ที่แตกต่างไปจากแหล่งแร่ VMS แบบไซปรัส คือ ๆไม่พบสายแร่แบบถักเปีย (stringer-type) เหมือนอยู่แบบไซปรัส

อาจกล่าวได้ว่า แหล่งแร่ VMS แบบนี้เป็นผลมาจากการสะสมตัวของแร่แบบน้ำลึก ที่เกิดขึ้นพร้อมๆกับการระเบิดของภูเขาไฟใต้ทะเล ซึ่งเป็นช่วงต่อ (transition) ระหว่างแหล่ง VMS แบบไซปรัสที่มีการสะสมบนพื้นมหาสมุทรที่กอปร์ด้วยหินบะซอลต์เป็นหลัก กับแหล่งแร่ VMS แบบคุโรโกะที่อยู่ติดชายฝั่ง ซึ่งอาจเป็นพวกปะทุบนบกหรือและในทะเลก็ได้ ซึ่งโดยมากมักเป็นเกาะโค้งไม่สมบูรณ์

แนวทางการสำรวจแหล่งแร่

ก. แบบไซปรัส

1. แหล่งแร่เกิดภายในหินภูเขาไฟ ซึ่งเป็นสายบนๆ ของชุดหินโอฟิโอไลต์ โดยมากมักเป็นหินละลายบะซอลต์ที่เกิดอยู่ร่วมกับหินกรวดเหลี่ยมภูเขาไฟ
2. แหล่งแร่มักถูกวางปิดทับด้วยหินละลายที่ปราศจากสินแร่
3. การกระจายตัวของแหล่งแร่ มักเกิดสัมพันธ์กับแนวรอยเลื่อน

4. ในพื้นที่ที่แหล่งแร่ไม่แสดงความสัมพันธ์กับแนวรอยเลื่อน (เช่น ที่ไซปรัส) กับมักมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างเป็นระบบ เช่น ระยะระหว่างตัวแหล่งแร่แต่ละแหล่ง มักห่างประมาณ 5 กม (Spooner;1977)
5. ในสภาพภูมิอากาศถึงแห้งแล้งแบบทะเลทราย เช่น แถบตะวันออกกลาง แหล่งแร่ VMS บริเวณใกล้กับผิวดินแหล่งแร่ซัลไฟด์สามารถตรวจสอบได้จากก้อนแร่ออกไซด์ที่เรียก gossan (กอสแซน)
6. ในพื้นที่ที่เคยมีประวัติการทำเหมืองมานาน เช่น แถบตะวันออกกลาง ก้อนแร่เกรอะกรัง (gossan) ที่เกิดอยู่บนสินแร่เป็นแนวทางที่สำคัญ และ
7. จากการศึกษาของ Pantazis & Govett (1973) พบว่า ข้อมูลบางสถิติบางอย่างเกี่ยวกับ Cu, Zn, Ni และ Co ในลักษณะ discriminant functions และ determinative functions ในหินละลายสีเข้มรูปหมอน ที่ล้อมรอบแหล่งแร่มาเตียติ (Mathiati deposit) ในไซปรัสให้คำผิดปกติเป็นรัศมีกว้างถึง 1 กม รอบๆ เหมือง ทำให้อาจใช้เป็นตัวช่วยหาแหล่งแร่ในแถบใกล้เคียงได้

ข. แบบเบชชี/ไคซแลงเจอร์

1. หินที่เกิดก่อนโดยรอบ (host rocks) มักเป็นหินตะกอนภูเขาไฟ เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งหินภูเขาไฟส่วนใหญ่เป็นหินบะซอลต์ถึงแอนดิไซต์ และอาจมีหินตะกอนจำพวกหินเพลลิติก (pelitics) และหินทรายสกปรกปนควอร์ตบ้าง
2. ลักษณะดังแหล่งแร่ (ore body) โดยทั่วไป แสดงชั้นชัดเจน และแผ่กว้างเป็นผืนหรือแผ่นเป็นพื้นที่เป็นร้อยเป็นพันเมตร ทำให้ได้ขนาดของพื้นที่สำรวจกว้างกว่าแหล่งชนิดอื่น และ
3. แหล่งแร่มักมีปริมาณโคบอลต์ (Co) มาก ซึ่งอาจสูงถึง 5000 ppn และนิเกิ้ล (Ni) (ซึ่งสูงถึง 500 ppm) ได้ ทำให้นักสำรวจส่วนใหญ่ใช้ธาตุ 2 ตัวนี้เป็นธาตุแม่สื่อ (path finders) สำหรับหาแหล่งแร่ VMS แบบนี้
4. อายุของแหล่งและชุดหินเหล่านี้อยู่ในช่วงมหายุคพาลิโอโซอิก และอาจถึงปลายมหายุคโปรติโรโซอิกได้

ฐานข้อมูล9.4และ9.5แสดงตัวอย่างแหล่งแร่มวลซัลไฟต์ภูเขาไฟแบบไซปรัสและเบชชีที่สำคัญๆของโลก

9.1.6 แหล่งแร่คาร์บอนาไตต์ (Carbonatite)

แม้แหล่งแร่ดังกล่าวจะไม่เคยมีใครค้นพบเลยในประเทศไทย แต่เมื่อพิจารณาถึงความสำคัญแล้ว ก็น่าศึกษาอยู่บ้าง คำว่า "คาร์บอนาไตต์" อาจมีความหมายว่าหินจำพวกคาร์บอเนตที่มีกำเนิดมาจากหินหนืด และเกิดร่วมอยู่กับชุดหินคิมเบอร์ไรต์ (Kimberlite) และหินแอลคาไลต์สีเข้มและจาง หินคาร์บอ

นาไตต์ อาจแบ่งอย่างง่ายออกเป็น 2 พวก ได้แก่ โซไวต์ (sovite) ซึ่งหมายถึงหินคาร์บอนาไตต์ที่มีแร่แคลไซต์เป็นแร่หลัก และเราเฮาไกต์(rauhaugite) ซึ่งได้แก่หินคาร์บอนาไตต์ที่มีแร่โดโลไมต์เป็น แร่หลัก

หินคาร์บอนาไตต์ซึ่งมักมีโครงสร้างเป็นรูปแตรหรือกรวยที่มีด้ามยาวๆ เท่านั้นที่ประกอบด้วย คาร์บอเนตที่มาจากหินหนืด นอกนั้นส่วนใหญ่เป็นผลเนื่องจากการสลับเปลี่ยนกับหินข้างเคียง (metasomatism) ด้วยเหตุที่มีลักษณะคล้ายแตรจึงเรียกกระบวนการสลับเปลี่ยนแบบนี้ว่า "การเกิดแตร"(fenitization) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา การสลับเปลี่ยน CO_2 และ F จากปล่องไปยังหินข้างเคียง ผลที่ได้จึงทำให้เกิดหินผสม ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหินข้างเคียงเป็นหลัก ดังนั้นในส่วนของหินหนืดที่เป็นแกรนิตและไนส์ซิก จึงเกิดการแปลงเปลี่ยน (altered) ไปเป็นหนินที่ประกอบด้วยแร่เฟลสปาร์จำพวก criptoperthite, แร่ไพรอคซีนมี Na, แร่แอลไบต์, และแร่แอมพิโบลมี Na แต่ถ้าเป็นหินที่ค่อนไปทางสีเข้ม (more mafic rocks) มักให้แร่จำพวกไพรอคซีน (ชนิด aegirine augite และ aegirine), แร่เฟลสปาร์แอลคาไลด์ และแร่เนฟพิลีน เป็นต้น

แร่ทางเศรษฐกิจที่สำคัญ ได้แก่ แร่อะทาไทต์ (แร่จำพวกฟอสเฟตตัวหนึ่ง), แร่ไพโรคลอร์ (Ca Na Nb_2 O_6 F หรือ A_2 B_2 X_7 ซึ่ง A = Na, Ca, Ba, Sr, U; ส่วน B = Na, Ta, Ti และ X = O, F), แร่แม่เหล็ก (magnetite) และแร่ธาตุหายาก (เช่น Ln), แร่สตรอวนเทียไนต์, แร่โมนาไซต์, ธาตุที่สำคัญ เช่น Mo, Cu, Th และ U เป็นต้น

หินคาร์บอนาไตต์มักถูกนักธรณีวิทยาจัดว่าเป็นหินยกเว้น ซึ่งพบมากในทวีปอเมริกาและทวีปอาฟริกา โดยเฉพาะแถบคานาดา บราซิล อาฟริกาตะวันออกและใต้ เชื่อกันว่าแหล่งแร่ดังกล่าวเกิดเฉพาะในบางช่วงอายุเท่านั้น เช่น ในคานาดา พบว่ามักเกิดในช่วง

1,700 ล้านปี แถบทะเลสาปซุปพีเรีย

1,050 ล้านปี แถบทะเลสาปซุปพีเรีย

570 ล้านปี หุบเขาขนาบรอยเลื่อนออตตาวา (Ottawa Graben)

120 ล้านปี หุบเขาขนาบรอยเลื่อนออตตาวา เอท โอกา (Ottawa Graben et Oka)

โดยที่ 2 ช่วงหลังนี้ จากหลักฐานทางธรณีสัณฐานเชื่อว่า ช่วง 570 ล้านปี เป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนลักษณะการแปรสัณฐานที่เรียก Pan African ส่วนช่วง 120 ล้านปี เป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนลักษณะการแปรสัณฐานตอนแยกตัวจากแผ่นดินกอนวานา (Gondwana Brcaking)

หนังสือที่เกี่ยวกับแหล่งแร่และหินคาร์บอนาไตต์ที่ดี ตลอดจนลักษณะการกระจายตัว ได้แก่ หนังสือชื่อ Carbonatites แต่งโดย O.F. Tuttle & J. Gittins (1966) - Interseience Publication, New York (591 หน้า) อนึ่งสำหรับแหล่งคาร์บอนาไทต์ที่สำคัญของโลกมี 2 แห่งคือ

9.1.7 แหล่งแร่คิมเบอร์ไลต์ให้เพชร (Diamondiferous kimberlites)

แหล่งแร่คิมเบอร์ไรต์เป็นหินอัคนีบาดาลสีเข้มจัดซึ่งถูกแปลงเปลี่ยนให้เป็นกลุ่มแร่คาร์บอเนต กลุ่มแร่เซอร์เพนทีน และกลุ่มแร่ไมก้า ซึ่งเกิดจากปล่องระเบิด(diatremes) และพนังหินแทรกชั้น(dykes) โดยอาจมีหินคาร์บอนาไทต์และแลมโปรไอต์เกิดร่วมอยู่ด้วย หินดังกล่าวนี้อาจเข้ามาถึงชั้นเนื้อโลก และลำดับส่วนจากหินหนืดที่เกิด ณ ที่ลึกมาก รูป 9.1.33 แสดงการกระจายตัวของหินคิมเบอร์ไลต์และแลมโปรไอต์ ซึ่งปัจจุบันเชื่อว่าเป็นแหล่งกำเนิดของเพชร(รูป 9.1.34) ตาราง 9.1.6 แสดงการผลิตเพชรของโลกปี ค.ศ. 1994

แหล่งแร่คิมเบอร์ไลต์ประกอบด้วยแร่เฉพาะบางตัว ซึ่งอาจใช้ในการสำรวจได้เป็นอย่างดี คือ แร่อิลมิไนต์ชนิดแมกนิเซียมสูง ซึ่งแร่ดังกล่าวอาจมีธาตุ MgO สูงถึง 10% และมีสูตร (Fe, Mg, Mn) TiO_3 และแร่การ์เนต 3 ชนิดประกอบกัน ได้แก่ แร่ไพโรบ(pyrope = Mg-Al garnet), แร่แอลมานดีน (almandine - Fe^{2+} - Al - garnet) และแร่อูวาโรไวต์ (uvarovite = Ca - Cr - garnet)

หินคิมเบอร์ไลต์ที่อยู่ในปล่องอาจไม่แสดงเนื้อเดียวกันทั้งหมด และมักได้รับอิทธิพลการแปลงเปลี่ยนอยู่เสมอ และหลายครั้งที่พบหินคิมเบอร์ไลต์ที่เกิดมาก่อนเป็นหินแปลกปลอม (autolith) นอกจากนั้นก็ยังพบหินเอคโคลไจต์ (eclogite) (ซึ่งมีแร่การ์เนตและไพรอคซีน) แร่ไคยาไนต์ และแร่เพชรรูปออคตาฮีดรอนที่ไม่แสดงแนวเจริญของผลึก (growth lines) และมีผิวที่เป็นรูๆ)

หินคิมเบอร์ไลต์ที่อยู่ในปล่องมักเปลี่ยนรูปร่างและพื้นที่ภาคตัดขวางได้จากแตรไปเป็นพนังหินแทรกชั้น(รูป 9.1.35 ก และ ข) ซึ่งอาจเห็นเพียงลำเดียวหรือสองลำก็ได้ แหล่งแร่คิมเบอร์ไลต์เกิดได้ทั่วโลก รูป 9.1.33 แสดงการกระจายตัวของแหล่งแร่ที่ให้เพชร เช่น ในแอฟริกาใต้(รูป 9.1.36) ไซบีเรีย (รูป 9.1.37) บราซิล และออสเตรเลีย (รูป 9.1.38 และ 9.1.39) เป็นต้น การเกิดก็คล้ายกับของคาร์บอนาไตต์ คือ นิยมเกิดเป็นช่วงๆ เช่น 2,300-2,100 ล้านปี 1,800-1,150 ล้านปี 700 ล้านปี และ 90 ล้านปี เป็นต้น

เพชรในหินคิมเบอร์ไลต์มักแสดงเป็นรูปลูกเต๋า โดยมีรูปผลึกเป็นแบบออตตาฮีดรอล ความแข็ง ~ 10 ถ.พ. ระหว่าง 3.50-3.53 ดัชนีหักเห ~ 2.42 ความสามารถกระจายแสงได้ถึง 5 เท่า ของแก้ว ในทางพาณิชย์ มักนิยมขายเป็นแบบอัญมณีชนิดอื่น คือ ขายเป็นกะรัต(carat = 0.2 กรัม) คือถ้าอัญมณีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม มีค่า 10 กะรัตโดยน้ำหนัก และเมื่อนำมาตัดหรือเจียระไนจะได้มุมสวยงาม (ดูรูป 9.1.34)

แนวการสำรวจแร่

จวบจนปัจจุบันเป็นที่เชื่อกันว่าหินคิมเบอร์ไลต์(รูป 9.1.40)จัดเป็นหินต้นกำเนิดที่เป็นเอกลักษณ์มาก สำหรับเพชร แต่ยังมีการค้นพบเพชรในหินแลมโพรไฟร์(lamprophyres รูป 9.1.41) ในช่วงต้น ค.ศ. 1970 (พ.ศ.2513) กลับเป็นที่ยอมรับกันเพิ่มเติมว่าหินอัคนีที่มีต้นกำเนิดจากเนื้อโลกลึกลงไปที่มีการแทรกดันขึ้นมาบนผิวโลกมีศักยภาพในการให้เพชรอย่างมาก

แต่ก็ไม่ใช่หินคิมเบอร์ไลต์จากปล่องจะมีเพชรทั้งหมด เฉพาะส่วนบนๆ เท่านั้นที่ให้เพชรในปริมาณมากกว่าส่วนล่างๆ(รูป 9.1.42) จากบริเวณหินคิมเบอรไลต์ 100 แห่ง พบว่าเพียง 20 แห่ง (คิดเป็นร้อยละ 5) เท่านั้น ที่จัดว่าเป็นแหล่งให้เพชร

สินแร่เพชรจัดว่าเป็นสินแร่ที่มีปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่มีการทำเหมืองแร่มา ที่สำคัญก็คือหลังจากการสำรวจถ้าพบว่าความสมบูรณ์ของเพชรมีเพียง 10 กะรัต ต่อสินแร่ 100 ตัน (หรือคิดเป็น 0.02 ppm) ก็สามารถทำเหมืองแล้วคุ้มทุน ด้วยเหตุนี้ในการสำรวจและประเมินค่าดูจะเป็นเรื่องที่ทำได้ยากมาก (เพราะมีความเสี่ยงสูง)การเก็บตัวอย่างและการตรวจหาเพชรจึงทำได้ยาก(ต้องอาศัยความชำนาญจริง ๆ) เพราะจากสถิติพบว่าเพียงหนึ่งในสิบของปล่องคิมเบอร์ไลต์เท่านั้นที่สามารถทำเหมืองได้ อนึ่งสมบัติและสภาพการแปรสัณฐานของหินให้เพชรได้แสดงใน ตาราง 9.1.6

เทคนิคการสำรวจแร่โดยอาศัยวิทยาแร่ ดูจะเป็นเครื่องมือชิ้นสำคัญในการสำรวจหาแหล่งเพชร เนื่องจากเพชรจัดเป็นแร่ที่หาได้(ยอด)ยาก จึงจำเป็นต้องหาแร่ชนิดอื่นมาเป็นเครื่องมือแทน เช่น แร่พริโคร-อิลมีไนต์ (picro-ilmenite) และแร่ไพโรบ การขุดเจาะหลุมสำรวจ(pitting) บนพื้นที่สี่เหลี่ยมจตุรัสที่ค่อนข้างกว้าง โดยเก็บตัวอย่างแต่ละพื้นที่ขนาดประมาณ 1/4 ถึง 1/100 ตรม เพื่อนำมาล้างและตรวจหาแร่เพื่อนบางตัว การเลือกพื้นที่สำรวจจำเป็นต้องอาศัยการศึกษาอย่างจริงจังเกี่ยวกับการกระจายตัวของปล่อง การวิเคราะห์แผนที่ธรณีวิทยา ภาพจากดาวเทียม ภาพถ่ายทางอากาศ และแผนที่ธรณีฟิสิกส์ทางอากาศ นอกจากนั้นยังต้องมีการตรวจสอบลักษณะรอยแตกที่เป็นวงกลม(circular lineaments) และแนวรอยเลื่อนหลักอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันการศึกษาด้วยวิธีธรณีเคมีจัดว่าไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร

ในการศึกษาและสำรวจหาเพชรพบว่าปล่องที่อยู่รวมกันถ้ายิ่งใหญ่ก็ยิ่งให้เพชรในปริมาณมาก และมีความสมบูรณ์มาก อนึ่ง ฐานข้อมูลที่เกี่ยวกับแหล่งเพชรและคาร์บอนาไทต์ขนาดใหญ่ๆของโลกได้แสดงในฐานข้อมูลที่ 9.6

ตาราง 9.1.6 สมบัติและสภาพการแปรสัณฐานสำหรับหินที่ให้เพชร

ฐานข้อมูลที่ 9.6 ตัวอย่างสำคัญๆ ของแหล่งเพชรและหินคาร์บอร์นาไทต์