แหล่งแร่ตะกั่ว - สังกะสีของโลก

ถึงแม้ว่าจะพบมีแหล่งแร่ตะกั่ว - สังกะสี กระจายทั่วโลก แต่ผลผลิตซึ่งสามารถนำมาใช้ให้พอเพียงกับความต้องการของตลาดโลกนั้น มาจากบางบริเวณเท่านั้น แหล่งผลิตใหญ่ ๆ จึงมีเพียงไม่กี่แห่งเท่านั้น

ทวีปอเมริกาเหนือ เป็นบริเวณที่พบแหล่งแร่ตะกั่ว - สังกะสี บริเวณใหญ่โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณ Mississippi Valley ซึ่งรวมถึง ๓ มลรัฐด้วยกันที่เรียกว่า Tri - State district อันหมายถึงมลรัฐ Missouri, Oklahoma และ Kansas และรวมถึงบางส่วนของ Wisconsin ด้วย นอกจากนี้ยังมีแนวของแหล่งแร่สังกะสีเป็นแนวขนานกับแนวเทือกเขา Appalachians โดยเฉพาะในบริเวณ Mascot - Jefferson City ในมลรัฐ Tennessee และ Austinville ในมลรัฐ Virginia และมีแหล่งแร่ตะกั่วในระหว่างแนวแหล่งแร่สังกะสีนี้ทางด้านตะวันออกเฉียงใต้ของมลรัฐ Missouri ที่ Franklin มลรัฐ New Jersey และที่ Edwards มลรัฐ New York ทางบริเวณ Rocky Mountain ก็มีแหล่งแร่ตะกั่ว - สังกะสีที่มลรัฐ Colorado และแผ่เข้าไปมลรัฐ New Mexico และ Utah ที่ Coeur d'Alene district ในมลรัฐ Idaho เป็นบริเวณแหล่งแร่ตะกั่ว - สังกะสีที่สมบูรณ์มาก และแผ่เข้าไปในประเทศแคนาดา เป็นบริเวณที่เป็นเหมืองแร่ของตะกั่ว - สังกะสีที่สำคัญของทวีป คือที่ Manitoba ในประเทศแคนาดามีแหล่งแร่สังกะสี - ทองแดง บริเวณ Flin Flon และที่ Noranda ในรัฐ Quebec และที่ Gaspe, Buchans ในรัฐ New Foundland ก็มีแหล่งแร่ตะกั่ว - สังกะสีที่น่าสนใจ

เม็กซิโก มีแหล่งแร่ตะกั่ว - เงิน - สังกะสี ที่สมบูรณ์ในบริเวณกลางของประเทศตลอดแนวจนถึง Chihuahua และ Coahuila

ผลผลิตของตะกั่ว - สังกะสี ครึ่งหนึ่งที่ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกผลิตได้ มาจากแหล่งผลิตในทวีปนี้ทั้งสิ้น

แหล่งอื่น ๆ เช่นในทวีปอเมริกาใต้ ก็มีแหล่งแร่สำคัญหลายแห่งกระจัดกระจายในประเทศต่าง ๆ เช่น ประเทศเปรู โบลิเวีย และอาร์เยนตินา

ทวีปยุโรป มีแนวแหล่งแร่ที่เรียกว่า Mediterranean province ซึ่งหมายถึงแหล่งแร่ตั้งแต่ในประเทศสเปน รูมาเนีย และตูนีเซีย อีกแนวหนึ่งคือ Central European province ซึ่งรวมถึงแหล่งแร่ในประเทศเชคโกสโลวาเกีย เยอรมัน โปแลนด์ และสหราชอาณาจักร นอกจากนี้ยังมีแหล่งแร่ไม่ใหญ่นักทางตอนเหนือของทวีป ได้แก่แหล่งแร่ในประเทศสวีเดน นอร์เวย์ และฟินแลนด์ รวมทั้งบางส่วนใน Urals ด้วย

แนวของแหล่งแร่ตะกั่ว - สังกะสี ที่น่าสนใจอีกแนวหนึ่งคือ ในประเทศออสเตรเลีย และในพม่า นอกจากนี้ยังมีแหล่งอื่น ๆ อีก เช่นในบริเวณอินโดจีน ญี่ปุ่น ไซบีเรีย โรดีเซียใต้ และทางตะวันตกเฉียงใต้ของแอฟริกา

ธรณีวิทยา

แร่วิทยา (Mineralogy)

แร่ตะกั่วและสังกะสีชนิดที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ เป็นแร่สำคัญในการนำมาถลุงเป็นโลหะตะกั่วและสังกะสี เป็นแร่ชนิดที่มีลักษณะโครงสร้างไม่ยุ่งยาก สำหรับแร่ตะกั่วนั้นมีเพียง ๓ แร่ ส่วนแร่สังกะสีมี ๖ แร่ เป็นแร่พวกซัลไฟด์ และพวกส่วนประกอบของออกไซด์

แร่ตะกั่ว ๓ แร่ ที่มีความสำคัญคือ แร่กาลีนา (Galena) แร่เซอรัสไซท์ (Cerussite) และแร่แองกลีไซท์ (Anglesite) ดังมีลักษณะและส่วนประกอบของแร่ดังนี้คือ

แร่กาลีนา (Galena) มีสูตรเคมี PbS มีส่วนประกอบ Pb 86.6 %, S 13.4 % มักจะมีเงินปนอยู่ และอาจมีสังกะสี แคดเมียม พลวง สารหนู และบิสมัทปนอยู่ด้วย ระบบผลึกแบบ Isometric ($^4/m$, 3, $^2/m$-hexoctahedral) มักพบเป็นผลึกรูปสี่เหลี่ยมลูกเต๋า สีและสีผงเป็นสีเทาตะกั่ว มีความแข็ง ๒.๕ ความถ่วงจำเพาะ ๗.๔ - ๗.๖

ลักษณะเด่นชัดในการสังเกตแร่กาลีนา คือความมันวาวแบบโลหะ มักแสดงรอยแตก (cleavage) แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือผลึกแบบลูกเต๋า มีน้ำหนักมากผิดปกติ จะรู้สึกหนักมือ เนื้อแร่ออน ขูดเข้าได้ง่าย แม้แต่ด้วยเล็บมือ

แร่เซอรัสไซท์ (Cerussite) มีสูตรเคมี $PbCO_3$ ส่วนประกอบ PbO ๘๓.๕ %, CO_2 ๑๖.๕ % ระบบผลึกแบบ Orthorhombic ($^2/m$, $^2/m$, $^2/m$, dipyramidal) มีรูปผลึกได้หลายแบบ ไม่มีสี สีขาว หรือสีเทา ความแข็ง ๓ - ๓.๕ ความถ่วงจำเพาะ ๖.๕๕ มีความวาวแบบ adamantine luster มีลักษณะโปร่งแสง - โปร่งใส

ลักษณะเด่นชัดในการสังเกตแร่เซอรัสไซท์ คือเป็นแร่ที่ไม่มันวาวแบบโลหะที่มีน้ำหนักมาก เนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะถึง ๖.๕๕ ละลายได้ในกรดไนตริกอย่างเจือจาง อุ่นเล็กน้อย จะฟู่เป็นฟองซึ่งทำให้สามารถเห็นความแตกต่างจากแร่แองกลีไซท์

แร่แองกลีไซท์ (Anglesite) สูตรเคมี $PbSO_4$ ส่วนประกอบ PbO ๗๓.๖ %, SO_3 ๒๖.๔ % ระบบผลึก Orthorhombic ($^2/m$, $^2/m$, $^2/m$, - dipyramidal) ไม่มีสี สีขาว - เทา หรือสีเหลืองอ่อน ถ้ามีสิ่งเจือปนอาจทำให้เป็นสีเทาเข้ม ความแข็ง ๓.๐ ความถ่วงจำเพาะ ๖.๒ - ๖.๔ เมื่อเป็นผลึกจะมีความมันวาวแบบ adamantine แต่ถ้าไม่เป็นผลึกจะด้าน

ลักษณะเด่นชัดในการสังเกตแร่แองกลีไซท์ โดยความหนักของแร่ ความมันวาวแบบเพชร (adamantine) มักเกิดร่วมกับแร่กาลีนา ต่างกับแร่เซอรัสไซท์ที่ไม่เกิดฟองฟู่กับกรดไนตริก

นอกจากแร่ตะกั่วทั้ง ๓ แร่ ที่มีความสำคัญ มีคุณค่าทางเศรษฐกิจดังกล่าวแล้ว ยังมีแร่ตะกั่วอีกหลายชนิด แต่เป็นเพียงปริมาณไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่แร่ต่อไปนี้ คือ

ในกลุ่มแร่ตะกั่วซัลไฟด์ นอกจากแร่กาลีนา (PbS) แล้ว ยังมี

Betechtinite $Pb_2 (Cu, Fe)_2S_{15}$

Bournonite $Cu_2Pb_2 (SbS_3)_2$

Jamesonite $FePb_4 (Sb_3S_7)_2$

Seligmannite $Cu_2Pb_2 (AsS_3)_2$

Marrite $PbAg (AsS_3)$

Scleroclase $Pb (As_2S_4)$

Dufrenoysite $Pb_{16} (As_{16}S_{40})$

นอกจากนี้ยังมีแร่ตะกั่วซึ่งเกิดร่วมกับธาตุอื่น ๆ อีกดังเช่นในกลุ่มแร่ต่อไปนี้

Lead co-ordinated by oxygen :

Alamosite	$Pb_3Si_3O_9$
Larsenite	$Pb_2Zn_2(SiO_4)_2$
Pyromorphite	$Pb_2Pb_3(PO_4)_3$
Vanadinite	$Pb_2Pb_3(VO_4)_3Cl$
Carminite	$Pb_2Fe_4(AsO_4)_4(OH)_4$
Fornacite	$Pb_2(Cu,Fe)(CrO_4)(As,P)O_4(OH)$
Vauquelinite	$Pb_2Cu(CrO_4)(PO_4)(OH)$
Brackebuschite	$Pb_2(Mn,Fe)(VO_4)_2.H_2O$
Tsumebite	$Pb_2Cu(PO_4)(SO_4)(OH)$
As-tsumebite	$Pb_2Cu(AsO_4)(SO_4)(OH)$
Linarite	$PbCu(SO_4)(OH)_2$ (blue)
Pyrobelonite	$PbMn(VO_4)(OH)$
Descloizite	$Pb(Zn,Cu)(VO_4)(OH)$
Crocoite	$Pb(CrO_4)$
Wulfenite	$Pb(MnO_4)$
Massicot	PbO (yellow)
Plattnerite	PbO_2 (dark colloform)
Minium	Pb_2PbO_4 (red)

Lead co-ordinated by halides :

Cotunnite $PbCl_2$ ซึ่ง Cl นี้อาจถูกแทนที่โดย Br, I หรือ (OH) ดังนี้คือเป็น $PbBr_2$, Pb(OH)Cl หรือ Pb(OH)I

แร่สังกะสี ที่สำคัญได้แก่แร่ซิงค์เบลนด์ (Zincblende) หรือแร่สฟาเลอไรท์ (Sphalerite) แร่สมิทโซไนท์ (Smithsonite) แร่เฮมิมอร์ไฟท์ (Hemimorphite) หรือแร่คาลาไมน์ (Calamine) แร่ซิงค์ไซท์ (Zincite) แร่วิลเลมไมท์ (Willemite) และแร่แฟรงคลินไนท์ (Franklinite) ดังมีส่วนประกอบและลักษณะต่าง ๆ ดังนี้ คือ

แร่ซิงค์เบลนด์(Zincblende) หรือแร่สฟาเลอไรท์ (Sphalerite) หรือบางที่เรียก Black Jack มีสูตรเคมี ZnS ส่วนประกอบ Zn ๖๗ %, S ๓๓ % มักจะมีเหล็กประกอบอยู่ด้วย อาจมากที่สุดถึง ๓๖ % ซึ่งการที่จะมีเหล็กปนอยู่มากน้อยนั้นขึ้นกับอุณหภูมิขณะที่เกิด ถ้าหากอุณหภูมิยิ่งสูงก็จะมีเหล็กมากขึ้น จนถึง ๓๖.๕ % ของ FeS ใน solid solution ณ อุณหภูมิ 894° ซ. ดังนั้นปริมาณของเหล็กในแร่นี้อาจเป็นตัวบ่งอุณหภูมิของการกำเนิดแร่ และแร่สฟาเลอไรท์นี้ก็อาจใช้เป็น geologic thermometer ได้ นอกจากเหล็กแล้วยังอาจมีแมงกานีสและแคดเมียมใน solid solution แต่เป็นปริมาณน้อย

แร่สฟาเลอไรท์ มีระบบผลึกเป็น Isometric (4, $\bar{3}$, m - hextetrahedral) (ถ้าเป็น hexagonal ZnS เป็นแร่ wurtzite) ถ้าเป็นแร่บริสุทธิ์จะมีสีขาว หรือเขียวถ้าเกือบบริสุทธิ์ โดยมากมักพบเป็นสีเหลือง น้ำตาลเกือบดำ เนื่องจากมีเหล็กปน สีจะเข้มขึ้นถ้าหากมีปริมาณของเหล็กมากขึ้น อาจเป็นสีเหลือง น้ำตาลหรือดำ หรือแดงที่เรียกว่า ruby zinc มีความแข็ง ๓.๕ - ๔ ความถ่วงจำเพาะ ๓.๙ - ๔.๑

ลักษณะเด่นชัดในการสังเกตแร่นี้ คือจะมีลักษณะความวาวคล้ายยางสน (resinous luster) พวกที่มีสีเข้ม (พวก black jack) อาจบอกได้โดยสีผงซึ่งเป็นสีน้ำตาลอมแดง

แร่สมิทโซไนท์ (Smithsonite) (Dry - bone ore) มีสูตรเคมี $ZnCO_3$ ส่วนประกอบ ZnO 64.8 %, CO_2 35.2% อาจมี ferrous iron และ divalent manganese แทนที่บางส่วนของสังกะสี นอกจากนี้อาจมีแคลเซียม แมกเนเซียม แคดเมียม ทองแดง โคบอลท์ และตะกั่ว ปนอยู่ด้วยเป็นปริมาณน้อย ระบบผลึกเป็น Hexagonal - R ($\bar{3}$, $^2/_m$ - hexagonal - scalenohedral) โดยมากมีสีน้ำตาล หรืออาจใสไม่มีสี สีขาว เขียว น้ำเงิน หรือชมพู เป็นสีเหลืองถ้ามีธาตุแคดเมียมปนอยู่ด้วย เรียกเป็น turkey - fat ore สีผงเป็นสีขาว มีลักษณะโปร่งแสง มีความแข็ง ๔ - ๔.๕ (นับได้ว่าแข็งเป็นพิเศษสำหรับพวกแร่คาร์บอเนต) ความถ่วง-

จำเพาะ ๔.๓๐ - ๔.๔๕ ความวาวแบบ vitreous luster

ลักษณะเด่นชัดในการสังเกตแร่นี้ คือ จากความแข็ง น้ำหนัก และการที่แร่ทำปฏิกริยากับกรดไฮโดรคลอริกเย็น เกิดฟองฟู่ ซึ่งผิดจากแร่สังกะสีอื่น

แร่ที่มีความคล้ายคลึงกันคือแร่ไฮโดรซิงค์ไซท์ (Hydrozincite - $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$ แร่เฮมิมอร์ไฟท์ (Hemimorphite) หรือแร่คาลาไมน์ (Calamine) สูตรเคมี $Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2.H_2O$ ส่วนประกอบเป็น hydrous silicate zinc มี ZnO 67.5 %, SiO_2 25.0 %, H_2O 7.5 % อาจมีอลูมิเนียมและเหล็กปนอยู่ด้วยเล็กน้อย มีระบบผลึกแบบ Orthorhombic (m, m, 2 - pyramidal) ส่วนมากมีสีขาว หรือมีสีฟ้าอ่อน เขียวอ่อน เหลืองหรือน้ำตาล ลักษณะโปร่งใส - โปร่งแสง มีความวาวแบบ vitreous luster ความแข็ง ๔.๕ - ๕ ความถ่วงจำเพาะ ๓.๔ - ๓.๕ มีคุณสมบัติก่อให้เกิดประจุไฟฟ้าภายในผลึกแร่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (เป็นแร่ strongly pyroelectric)

แร่ซิงค์ไซท์ (Zincite) สูตรเคมี ZnO ส่วนประกอบ Zn 80.3 %, O 19.7 % มักจะมีแมงกานีส (divavent manganese) อยู่ด้วย ทำให้สีของแร่เปลี่ยนไป ระบบผลึกแบบ Hexagonal (6, m, m,- dihexagonal - pyramidal) สีแดงเข้ม สีส้ม - เหลือง (ถ้าเป็นแร่บริสุทธิ์ pure ZnO จะเป็นสีขาว) สีผงของแร่สีส้มเหลือง ความแข็ง ๔ - ๔.๕ ความถ่วงจำเพาะ ๕.๖ มีลักษณะโปร่งแสง ความวาวแบบ sub - adamantine

ลักษณะเด่นชัดในการสังเกตแร่นี้ โดยดูจากสีแร่และสีผงของแร่ และแร่นี้มักจะเกิดร่วมกับแร่แฟรงคลินไนท์ และแร่วิลเลมไมท์ แร่ซิงค์ไซท์ละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก

แร่วิลเลมไมท์ (Willemite) สูตรเคมี $Zn_2(SiO_4)$ ส่วนประกอบ ZnO 73.0 %, SiO_2 27.0 % มีแมงกานีสแทนที่สังกะสี เกิดเป็นแร่พวก manganiferous เรียกแร่ทรูสไทท์ (troostite) อาจมีเหล็กปนอยู่ด้วยเล็กน้อย ระบบผลึกแบบ Hexagonal - R (3- rhombohedral) สีเหลืองแกมเขียว แดงสด น้ำตาล สีขาวถ้าเป็นแร่บริสุทธิ์ มีความวาวแบบ vitreous - resinous มีลักษณะโปร่งใส - โปร่งแสง ความแข็ง ๕.๕ ความถ่วงจำเพาะ ๓.๙ - ๔.๒

แร่แฟรงคลินไนท์ (Franklinite) สูตรเคมี $(Zn, Fe, Mn)(Fe, Mn)_2O_4$ ส่วนประกอบส่วนใหญ่จะเป็น $ZnFe_2O_4$ ระบบผลึกแบบ Isometric ($^4/m, \bar{3}, ^2/m$ - hexoctahedral) สีดำ สีผงของแร่น้ำตาลแดงถึงน้ำตาลเข้ม มีความมันวาวแบบโลหะ ความแข็ง ๖ และความถ่วงจำเพาะ ๕.๑๕ มีคุณสมบัติในการดูดแม่เหล็กเล็กน้อย

ลักษณะเด่นชัดในการสังเกตแร่นี้ เนื่องจากแร่แฟรงคลินไนท์มีลักษณะคล้ายแร่แมกเนไตท์ แต่มีความสามารถดูดแม่เหล็กได้น้อยกว่า และสีผงของแร่เป็นสีน้ำตาลเข้ม และมักจะเกิดร่วมกับแร่วิลเลมไนท์ และแร่ซิงค์ไซท์

นอกจากแร่สังกะสีที่สำคัญ ๖ แร่ดังกล่าวมาแล้วนั้น ยังมีแร่สังกะสีกลุ่มอื่น ๆ อีกมากมาย ดังเช่น

๑. กลุ่มแร่สังกะสี sulfides, selenides และ sulfosalts;

นอกจากแร่สำคัญคือ zincblende หรือ sphalerite (ZnS) แล้ว ก็มี

Wurtzite	ZnS (hexagonal)
Matraite	ZnS (rhombohedral)
Erythrozincite	(Zn, Mn) S
Stilleite	ZnSe
Guadalcazarite	(Hg, Zn) (S, Se)
Tetrahedrite-tennantite series	$(Cu,Ag)^{+}_{20}(Fe^{2+}, Zn, Hg^{2+}, Ge, Sn)_4(As,Sb,Bi)^{3+}_8 S_{26}$
Voltzite	Zn (S,As)
Koesterite	$Cu_2Zn\ SnS_4$
Renierite	Cu_3 (Fe, Ge, Zn) $(S,As)_4$

๒. กลุ่มแร่สังกะสี oxides, hydroxides, etc : นอกจากแร่สำคัญคือ แร่ zincite(ZnO) และแร่ franklinite $(Zn, Mn)Fe_2O_4$ แล้วยังมี.-

Donathite	$(Fe^{2+}, Zn, Mg)(Cr, Fe^{3+})_2O_4$
Gahnite	$ZnAl_2O_4$
Hetaerolite	$ZnMn_2O_4$
Nigerite	$(Al, Fe)_{12}(Sn, Zn, Mg, Fe_3).O_{22}(OH)_2$
Woodruffite	$(Zn, Mn)_2Mn_5O_{12}.4H_2O$
Zincian dibrannite	$ZnMn_2O_3.2H_2O$
Chalkophanite	$ZnMn_3O_7.3H_2O$
Ordonezite	$ZnSb_2O_6$

๓. กลุ่มแร่สังกะสี tellurites etc :

Denningite	$(Mn, Ca, Zn)Te_2O_5$
Spiroffite	$(Mn, Zn)_2Te_3O_8$
Zemanite	$(Zn, Fe)_2(TeO_3)_3NaH_{2-x}H_2O$

๔. กลุ่มแร่สังกะสี carbonates : นอกจาก แร่ smithsonite $Zn(CO_3)$ แล้วยังมี

Zincian dolomite	$Ca(Mg, Zn)[CO_3]$
Hydrozincite	$Zn_5(OH)_6[CO_3]$
Rosasite	$(Zn, Cu)_2(OH)_2[CO_3]$
Aurichalcite	$(Zn, Cu)_5(OH)_3[CO_3]_2$
Loseyite	$(Mn, Zn)_7(OH)_{10}[CO_3]_2$

๕. กลุ่มแร่สังกะสี sulfates :

Zincosite	$Zn(SO_4)$
Poitevinite	$(Cu, Fe, Zn)(SO_4).H_2O$
Gunningite	$(Zn, Mn)(SO_4).H_2O$
Goslarite	$Zn(SO_4).7H_2O$
Bianchite	$(Zn, Fe)(SO_4).6H_2O$
Sommairite	$(Fe, Cu, Zn)(SO_4).7H_2O$
Zincian boothite	$(Cu, Zn)[SO_4].7H_2O$
Zincian fauserite	$(Mn, Zn)[SO_4].7H_2O$ (or $5H_2O$?)
Zincian roemerite	$(Fe^{2+}, Zn)Fe_2^{3+}[SO_4]_4.14H_2O$
Dietrichite	$ZnAl_2[SO_4]_4.22H_2O$
Ktenasite	$(Cu, Zn)_3(OH)_2[SO_4].2H_2O$
Moorreite	$(Mg, Zn, Mn)_8(OH)_{14}[SO_4].4H_2O$
Torreyite	$(Mg, Zn, Mn)_7(OH)_{12}[SO_4].4H_2O$
Zincian aluminite	$Zn_3Al_3(OH)_{13}[SO_4].2H_2O$
Glaukokerinite	$(Zn, Cu)_{10}Al_4(OH)_{30}[SO_4].2H_2O$ (?)
Zincian botryogen	$(Zn, Mg, Mn, Fe^{2+})Fe^{3+}(OH)[SO_4]_2.7H_2O$
Serpierite	$Ca(Cu, Zn)_4(OH)_5[SO_4]_2.3H_2O$
Zincian copiapite	$(Zn, Fe^{2+}, Mn)Fe_4^{3+}(OH)_2[SO_4]_6.18H_2O$

๖. กลุ่มแร่สังกะสี phosphates :

Hopeite	$Zn_3[PO_4].4H_2O$ (monoclinic)
Parahopeite	$Zn_3[PO_4]_2$ (tricl.)
Tarbuttite	$Zn_2(OH)[PO_4]$

Zincian rockridgeite	$ZnFe_3^{4+} (OH)_5 [PO_4]_3$
Scholzite	$CaZn_2 [PO_4]_2 \cdot 2H_2O$
Phosphophyllite	$(Zn, Fe)_3 [PO_4]_2 \cdot 4H_2O$
Spemcerite	$Zn_4 (OH)_2 [PO_4]_2 \cdot 3H_2O$
Fausite	$(Zn, Cu) Al_6 (OH)_8 [PO_4]_4 \cdot 5H_2O$
Veszelyite	$(Cu, Zn)_3 (OH)_3 [PO_4] \cdot 2H_2O$
Kehoeite	$Zn_{5:5} Ca_{2.5} [AlP (H_3)]_{16} O_{96} \cdot 16H_2O$ (analcite type-structure)

๗. กลุ่มแร่สังกะสี arsenites, arsenates, vanadates, tungstates :

Reinerite	$Zn_3 [AsO_3]_2$
Adamite	$Zn_2 (OH) [AsO_4]$ (orthorhomb.)
Paradamite	$Zn_2 (OH) [AsO_4]$ (triclin)
Stranskiite	$CuZn_2 [AsO_4]_2$
Chlorophoenicite	$(Zn, Mn)_5 (OH)_7 [AsO_4]$
Holdenite	$(Mn, Ca)_4 (Zn, Mg, Fe^{2+})_2 (OH)_5 [AsO_4]$
Austinite	$Ca Zn (OH) [AsO_4]$
Koettigite	$Zn_3 [AsO_4]_2 \cdot 8H_2O$
Legrandite	$Zn_2 (OH) [AsO_4] \cdot H_2O$
Zincian lavendulan	$(Ca, Na)_2 (Zn, Cu)_5 [AsO_4]_4 Cl_4 \cdot 4\text{-}5 H_2O$
Chadobaite	$(Na, K, Ca) (Mg, Zn, Mn)_2 H [AsO_4]_2 \cdot 4H_2O$
Mixite	$(Cu, Zn, Fe, Ca)_{10} Bi (OH)_8 [AsO_4]_5 \cdot 7H_2O$
Descloizite	$Pb (Zn, Cu) (OH) [VO_4]$
Mottramite	$Pb (Cu, Zn) (OH) [VO_4]$
Sanmartinite	$(Zn, Fe) [WO_4]$

๘. <u>กลุ่มแร่ซิลิกะสี silicates</u> นอกจากแร่สำคัญคือ Willemite $Zn_2 (SiO_4)$ และ Hemimorphite $Zn_4 (OH)_2 [Si_2O_7] . H_2O$ แล้วยังมี.-

Troostite	$(Zn, Mn)_2 [SiO_4]$
Roepperite	$(Fe^{2+}, Mn, Zn, Mg)_2 [SiO_4]$
Larsenite	$Pb\ Zn [SiO_4]$
Esperite	$(Ca, Pb)\ Zn [SiO_4]$
Hodgkinsonite	$MnZn_2 (OH)_2 [SiO_4]$
Zincian staurolite	$(Fe^{2+}, Mg, Zn)_2 (Al, Fe^{2+})\ O_{,}(O,OH)_2 [SiO_4]$
Fraipontite	$Zn_8Al_4 (OH)_8 [SiO_4]_{,} . 7H_2O$
Hemihedrite	$ZnPb_{10} (CrO_4)_6 F_2 [SiO_4]_2$
Macgovernite	$(Mn, Mg, Zn)_{15}(OH)_{14}O\ (AsO_4)_2 [SiO_4]_2$
Yeatmanite	$(Mn, Zn)_{16} Sb_2O_{13} [SiO_4]_4$
Hardystonite	$Ca_2\ Zn [Si_2O_7]$
Klinohedrite	$Ca_2 Zn_2 (OH)_2 [Si_2O_7] . H_2O$
Fowlerite	$Ca\ (Mn\ ,\ Zn)_4 [Si_5O_{15}]$
Zincian chkalovite	$Na_2\ Zn [Si_2O_6]$
Zincian schefferite	$Ca\ (Mg, Zn, Mn) [Si_2O_6]$
Zincian aegirine augite	$(Ca, Na)\ (Fe^{2+}, Zn, Mn, Mg, Fe^{3+}) - [(Si, Al)_2\ O_6]$ (jeffersonite)
Zincian cummingtonite	$(Mg, Fe^{2+}Zn, Mn)_7(OH)_2 [Si_8O_{22}]$
Zincian tremolite (actinolite)	$Ca\ (Mg, Fe^{2+}, Zn, Mn)_5\ (OH)_2 [Si_8O_{22}]$
Zincian magnesio-riebeckite	$Na_2\ (Mg, Zn, Mn)_3\ Fe^{3+}_2\ (OH)_2 [Si_8O_{22}]$

Zinalsite	$(Zn, Al, Mg, Ca, Cu, Fe^{3+})_6 (OH)_8[(Si,Al)_4 O_{10}]$
Zincsilite	$Zn_3[Si_4 O_{10}] (OH)_2 \cdot 11H_2O$
Sauconite	$(Zn, Mg, Al, Ca, Na)_3(OH)_2[(Si,Al)_4 O_{10}] \cdot 4H_2O$
Hendrickxite	$K (Zn, Mn, Mg, Fe^{2+})_3 [Si_3AlO_{10}] (OH)_2$
Zincian serpentine	$(Mg, Fe^{2+}, Zn)_3 (OH)_4 [Si_2O_5]$
Karpinskyite	$Na_2 (Be, Zn, Mg) [Al_2Si_6O_{16}] (OH)_2$
Helvite	$(Mn, Zn, Fe^{2+})_8 S_2 [Be SiO_4]_6$
Genthelvite	$(Zn, Fe, Mn)_8 S_2 [BeSiO_4]_6$

แร่ตะกั่วกาลีนา และแร่สังกะสีซิงค์เบลนด์ มักเกิดร่วมกันเสมอ อาจพบบ้างที่เป็นแร่กาลีนาอย่างเดียว แต่แร่ซิงค์เบลนด์นอยแห่งที่พบว่าไม่มีแร่กาลีนาปนอยู่ด้วย ยกเว้นในแหล่งแร่พวก Oxidized ores ที่แร่ทั้งสองนี้ไม่เกิดร่วมกัน แร่กาลีนามักมีเงินปนอยู่ด้วย ถ้าหากไม่มีเงินปนเรียกเป็น "Soft Lead" ทั้งแร่กาลีนาและซิงค์เบลนด์นี้อาจมีทองอยู่ด้วย แคดเมียมก็มักเกิดร่วมกับสังกะสี ส่วนตะกั่วนั้นก็มักมีบิสมัทและพลวงร่วมด้วย แร่ไพไรท์และแร่คาลโคไพไรท์ รวมทั้งแร่เงินมักเกิดร่วมด้วยเสมอเช่นกัน

ธรณีเคมีของตะกั่วและสังกะสี

ตะกั่ว (Lead) และสังกะสี (Zinc) เป็นโลหะชนิดหนึ่งซึ่งจัดอยู่ในจำพวกโลหะพื้นฐาน (Base metal) ที่ใช้ในการประกอบอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยทองแดง, ตะกั่ว, สังกะสีและโลหะอื่น ๆ ในธรรมชาติตะกั่วและสังกะสีมีปะปนอยู่ทั่วไปทั้งในหิน, ดินและน้ำ ตลอดจนสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้ว ตะกั่วและสังกะสีจะมีปะปนอยู่ในหินอัคนี (Igneous Rock) บางชนิดในลักษณะของสารประกอบซัลไฟด์ (Sulphide) ทั้งนี้เป็นเพราะทั้งตะกั่วและสังกะสีมีคุณสมบัติเฉพาะตัวในการรวมตัวกับกำมะถันได้ง่าย เกิดเป็นสารประกอบซัลไฟด์ ได้แก่แร่ กาลีนา (Galena-PbS) และแร่สฟาเลอไรท์ (Sphalerite-ZnS) เป็นต้น

นอกจากนี้เรายังพบแร่ตะกั่วและสังกะสีเกิดอยู่ในรูปสารประกอบอย่างอื่นอีก เช่นเกิดในรูปของคาร์บอเนต ในลักษณะของแร่ทุติยภูมิ (Secondary ore) ได้แก่แร่เซอรัสไซท์ (Cerussite-$PbCO_3$) แร่สมิทโซไนท์ ($S_mithsonite-ZnCO_3$) เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วแร่ตะกั่วและสังกะสีนี้มักเกิดร่วมกันเสมอเว้นแต่ว่าเป็นแหล่งแร่พวก oxidized ores แร่ของโลหะทั้งสองนี้มักจะไม่เกิดร่วมกัน ทั้งนี้เพราะว่ามีคุณสมบัติทางเคมีต่างกันเมื่อถูกออกซิไดซ์แล้ว

๑. การแผ่กระจายของตะกั่วและสังกะสีบนเปลือกโลก

๑.๑ ในหินอัคนี (Igneous Rock)

สังกะสีมีคุณสมบัติทางเคมีที่สามารถเกิดร่วมกับแร่จำพวก Ferro-magnesium ในหินอัคนีโดย Zn^{+2} จะเข้าไปแทนที่ Fe^{+2} และ Mg^{+2} ในแร่จำพวก Ferro-magnesium silicate ส่วนตะกั่วก็มีคุณสมบัติทางเคมีที่สามารถเกิดร่วมกับแร่จำพวกเฟลสปาร์ (feldspar) บางชนิดโดย Pb^{+2} จะเข้าไปแทนที่ K^{+1} ในแร่ K-feldspar โดยที่ทั้งตะกั่วและสังกะสีมีคุณสมบัติดังกล่าวข้างบนนี้ ทำให้ในหินอัคนีชนิดต่าง ๆ มีปริมาณตะกั่วและสังกะสีอยู่มากน้อยต่างกัน ดังแสดงไว้ในตาราง8

๑.๒ ในหินชั้น (Sedimentary Rock)

การแผ่กระจายของตะกั่ว และสังกะสี ในหินชั้นมีค่าแตกต่างกันมากน้อยตามลักษณะของหินและคุณสมบัติทางเคมีเฉพาะตัวของโลหะทั้งสอง ดังแสดงไว้ในตาราง ๘

	เฉลี่ยใน crust	เฉลี่ยในหินอัคนี	หินอัคนี			
			หิน Ultramafic	หิน Mafic	หิน Intermediate	หิน Felsic
Pb	15	16	1	8	7	11
Zn	125	80	50	130	65	50
	4-20	5-20	100-400	50-300	50	Zn
	5-10	10-40	20-40	20	10	Pb
	Limestone และ dolomite	Sandstone	Blackshale	Shale	ในดิน Soil	
	หินชั้น					

ตาราง ๘ แสดงค่าการแผ่กระจายของตะกั่ว สังกะสี เป็น Ranges หรือค่าเฉลี่ยในหินชนิดต่างๆ กันเปรียบเทียบกับในดิน เป็น ppm. (part per million)

๑.๓ ในหินแปร (Metamorphic Rock)

ในขณะที่หินต่าง ๆ เปลี่ยนสภาพเป็นหินแปรโดยวิธีการใด ๆ ก็ตาม ซึ่งทำให้เกิดขบวนการผันกลับ (Retrogressive Metamorphic transformation) จำนวนตะกั่วและสังกะสีในหินแปรในขณะนี้ยังไม่ค่อยมีหลักฐานที่แน่นอน อย่างไรก็ตามสังกะสีจะพบอยู่ในโครงสร้างของแร่จำพวก ferro-magnesium silicate เช่น biotite, hornblende ส่วนตะกั่วนั้นจะพบอยู่ในโครงสร้างของแร่จำพวก K-feldspar ในบางครั้งเราก็พบว่าตะกั่ว-สังกะสีแยกตัวออกมาเป็นแร่ซัลไฟด์ได้เหมือนกันในหินแปร

๒. ตะกั่วและสังกะสีใน Supergene sulphide enrichment

โดยทั่วไปของแหล่งแร่จำพวกซัลไฟด์ มักพบว่าส่วนที่มีแร่สมบูรณ์ที่สุดจะอยู่บริเวณที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ ซึ่งจะเป็นบริเวณที่มีชั้นน้ำใต้ดินไหลผ่านแหล่งแร่นั้นในระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง บริเวณดังกล่าวนี้มักจะประกอบด้วยแร่ซัลไฟด์อันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของแร่ปฐมภูมิ (primary ore) กลายเป็นแร่ทุติยภูมิ (secondary ore) เชื่อกันว่าเกิดจากปฏิกริยาของสารละลายซึ่งไหลจากส่วนที่ถูกออกซิไดซลงมาข้างล่าง โดยสารละลายดังกล่าวนี้นำเอา metal ions จาก oxidized zone ลงมาทำปฏิกริยากับแร่เบื้องล่างกลายเป็น supergene sulphide - enrichment

สำหรับสังกะสีนั้น คือว่าแร่สฟาเลอไรท์ (sphalerite-ZnS) เป็นแร่ที่สำคัญที่สุดของโลหะสังกะสี และพบมากที่สุดในจำพวกแร่ซัลไฟด์ของสังกะสี ส่วนแร่ Wurtzite (ZnS) นั้นเป็นสังกะสีซัลไฟด์ซึ่งเป็นแบบ Hexagnal และพบเกิดเป็นส่วนน้อย กลุ่มแร่สังกะสีอีกจำพวกหนึ่งซึ่งมักเกิดร่วมกันได้แก่ แร่ซิงค์ไซท์ (Zincite-ZnO), แฟรงคลินไนท์ (Franklinite-$ZnO.Fe_2O_3$) วิลเลมไมท์ (Willemite Zn_2SiO_4) เป็นต้น กลุ่มแร่สังกะสีดังกล่าวนี้พบเกิดร่วมกันในหมู่เหมืองแร่สังกะสี ที่ Franklin Furnance, New Jersey สหรัฐอเมริกา แร่สังกะสีดังกล่าวข้างบนนี้จัดเป็นแร่ปฐมภูมิ (primary mineral)

ส่วนแร่สังกะสีทุติยภูมิ (secondary mineral) นั้นพบในกลุ่มที่ถูกออกซิไดซ์แล้วใน supergene enrichment ได้แก่แร่สมิทโซไนท์ (Smithsonite-$ZnCO_3$) เฮมิมอร์ไฟท์หรือคาลาไมน์ (Hemimorphite or Calamine $Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2 \cdot H_2O$ และไฮโดรซิงค์-ไซท์ (Hydrozincite-$ZnCO_3 \cdot 2Zn(OH)_2$ แร่สังกะสีซัลไฟท์ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายเช่น สฟาเลอไรท์ (ZnS) เมื่อถูกออกซิไดซ์ จะกลายเป็นสังกะสีคาร์บอเนต ดังสมการข้างล่างนี้

$$ZnS + O_2 + H_2O + 2CaCO_3 = ZnCO_3 + 2HCO_3^- + SO_4^= + 2Ca^{++}$$

สังกะสีคาร์บอเนตละลายได้ยากจึงมักตกตะกอนเป็นแร่สมิทโซไนท์ ($ZnCO_3$) ส่วนสังกะสีซัลเฟตนั้นเป็นสารประกอบที่ละลายได้ง่าย ถ้าหากอยู่ในสภาวะที่เป็นด่างจะตกตะกอนเป็นสังกะสีคาร์บอเนต ดังนั้นจึงพบว่าสังกะสีคาร์บอเนตมักเกิดแทนที่หินปูนเสมอ มีข้อน่าสังเกตว่าถ้ามีแร่ตะกั่วและสังกะสีซัลไฟด์เกิดร่วมกัน เมื่อถูกออกซิไดซ์แล้วจะพบว่าแร่ตะกั่วคาร์บอเนต, เซอรัส-ไซท์ (Cerussite-$PbCO_3$) และตะกั่วซัลเฟต, แองกลีไซท์ (Anglesite-$PbSO_4$) นั้นจะพบอยู่ไม่ไกลจากแหล่งเดิมเท่าใดนัก เพราะว่าตะกั่วคาร์บอเนตและตะกั่วซัลเฟตนั้นละลายได้ยาก จึงตกตะกอนได้รวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกริยา ส่วนสังกะสีคาร์บอเนตจะพบอยู่ไกลออกไปจากแหล่งเดิม-เล็กน้อย ทั้งนี้เพราะว่าเป็นลักษณะพิเศษของสังกะสีอนุมูล (Zn^{++}) ซึ่งมี Mobility สูงเมื่อเทียบกับอนุมูลของตะกั่ว (Pb^{++}) นอกจากนี้เมื่อเกิดแร่สังกะสีคาร์บอเนต (สมิทโซไนท์) แล้ว พบว่ามักเกิดแร่ ไฮโดรซิงค์ไซท์ (Hydrozincite $ZnCO_3 \cdot 2Zn(OH)_2$ และแร่เฮมิมอร์ไฟท์หรือคาลา-ไมท์ (Hemimorphite or Calamine - $Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2H_2O$ ร่วมอยู่ด้วยเสมอ มีตัวอย่างที่น่าสนใจอยู่แห่งหนึ่งของแหล่งแร่สังกะสีที่ Goodspring มลรัฐเนวาดา สหรัฐอเมริกา พบว่าแร่ไฮโดรซิงค์ไซท์เกิดเป็นแร่สำคัญของแหล่งนี้ โดยเกิดจากการออกซิไดซ์ของแร่สฟาเลอไรท์ (ZnS) ทั้งพบว่าแร่ไฮโดรซิงค์ไซท์เกิดแทนที่หินโดโลไมท์ชุด Mississippi ลักษณะการเกิดแบบนี้มักพบในบริเวณที่มีภูมิอากาศแบบแห้งแล้งถึงทะเลทราย การเกิดแร่ไฮโดรซิงค์ไซท์ เชื่อกันว่าเกิดได้โดยปฏิกริยา ดังนี้

$$3CaCO_3 + 4H_2O + 3ZnSO_4 = 3CaSO_4 + 2H_2CO_3 + ZnCO_3 \cdot 2Zn(OH)_2$$

ข้อสังเกตที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือไม่ค่อยพบแร่สฟาเลอไรท์ใน supergene enrichement บ่อยนัก

สำหรับแร่ตะกั่วนั้น โดยมากพบเป็นแร่กาลีนา (Galena-PbS) นอกนั้นพบแร่ซัลไฟด์อื่น ๆ ของตะกั่วอีก เช่น บอร์โนไนท์ (Bournonite $PbCuSbS_3$) เจมส์โซไนท์ Jamesonite-$Pb_2 Sb_2 S_5$) เป็นต้น เหล่านี้เป็นตัวอย่างของแร่ตะกั่วแบบปฐมภูมิ ส่วนแร่ตะกั่วทุติยภูมิที่สำคัญ ๆ มีแร่แองกลีไซท์ (Anglesite-$PbSO_4$), เซอรัสไซท์ (Cerussite-$PbCO_3$) เป็นต้น

แร่ตะกั่วซัลไฟด์เมื่อถูกออกซิไดซ์แล้วมักจะตกตะกอนทันที ซึ่งผิดกับแร่สังกะสีซัลไฟด์ ทั้งนี้เพราะว่า mobility ของตะกั่ว Pb^{+2} ต่ำกว่า Zn^{+2} ดังนั้นตะกั่วคาร์บอเนตและตะกั่วซัลเฟตจึงละลายได้ยาก

การเกิดตะกั่วซัลเฟตนั้นเกิดได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด ดังปฏิกริยา

$$PbS + 2H_2CO_3 = Pb^{+2} + H_2S + 2HCO_3^-$$

$$H_2S + 2O_2 + Pb^{+2} + 2HCO_3^- = \underline{PbSO_4} + 2H_2CO_3$$

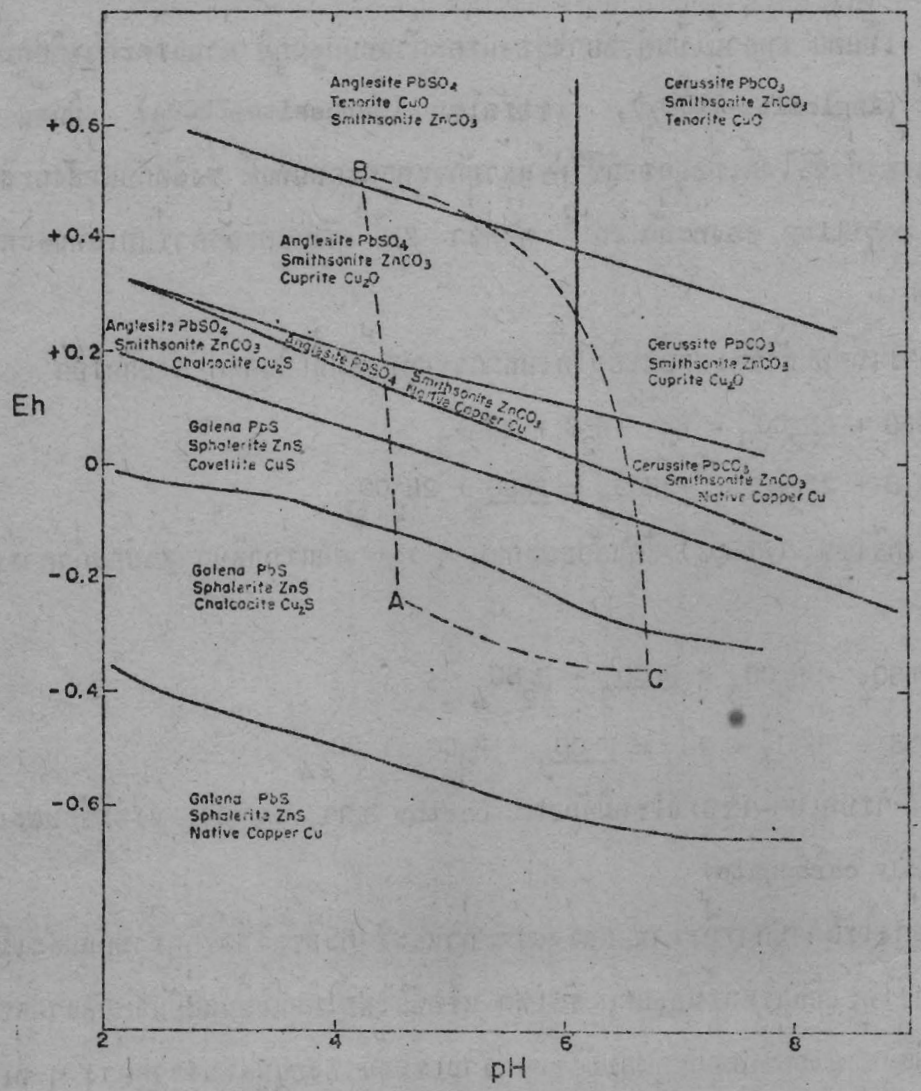
ทำให้เกิดแร่แองกลีไซท์ ($PbSO_4$) สีดำลักษณะกลม ๆ รอบก้อนแร่กาลีนา ส่วนตะกั่วคาร์บอเนตเกิดจากปฏิกริยา

$$PbSO_4 + H_2CO_3 = \underline{PbCO_3} + H_2SO_4$$

$$PbS + 2HCO_3^- + 2O_2 = \underline{PbCO_3} + H_2CO_3 + SO_4^=$$

จะพบว่าแร่ตะกั่วคาร์บอเนต-เซอรัสไซท์มีลักษณะ earthy ขาว, เหลือง, หรือมีลักษณะเป็นคล้าย ๆ เม็ดทราย (Sandy carbonate)

อย่างไรก็ตามการที่เราพบแหล่งแร่ตะกั่วและสังกะสีซัลไฟด์เกิดร่วมกันและเมื่อแร่ทั้งสองชนิดนี้ถูกออกซิไดซ์เป็นแร่คาร์บอเนต, ซัลเฟต หรือซัลไฟด์ใหม่นั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในขณะเกิดปฏิกริยาเคมีซึ่งส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของความเข้มข้นของอนุมูลของธาตุต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง, ความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่เกิดขึ้น (pH), ค่า Redox-Potential หรือ Oxidation potential (Eh), อุณหภูมิและความกดดันของสภาพแวดล้อมนั้น ซึ่งพอจะสรุปลงได้ดังในรูป ๑ ซึ่งแสดงถึงสภาวะสมดุลย์ของสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ ๑ แสดงสมดุลย์ของ metal sulphides และ oxidation products ณ อุณหภูมิที่ 25°C และ 1 atmosphere total pressure โดยมี total dissolved carbonate = 10^{-15}, total dissolved sulphur = 10^{-1} (From R.M. Garrels, Geochim. et Cosmochim Acta, 5, 165, 1953)

พื้นที่ในสามเหลี่ยม ABC แสดงถึงสภาพแวดล้อมในธรรมชาติทั่ว ๆ ไป ส่วนพื้นที่อื่น ๆ จะเป็นสภาพแวดล้อมอันเหมาะสมของแร่ต่างชนิดกัน ตัวอย่างเช่นแร่สมิทโซไนท์ ($ZnCO_3$) นั้นสามารถเกิดขึ้นอยู่ในสมดุลย์ได้หลายสภาวะแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นกรดหรือเป็นด่างแต่ขึ้นอยู่กับค่า Eh ซึ่งถ้าค่านี้ต่ำกว่าระดับหนึ่งจะกลายเป็นสฟาเลอไรท์ (ZnS) ทันที ตรงกันข้ามกับตะกั่วซัลไฟด์เมื่อถูกออกซิไดซ์แล้ว จะกลายเป็นแองกลีไซท์ ($PbSO_4$) ในสภาวะที่เป็นกรด (pH ต่ำกว่า 6.4) แต่เมื่อค่า pH สูงกว่า 6.4 แล้วจะเกิดเป็นเซอรัสไซท์ ($PbCO_3$) และเมื่อค่า Eh ต่ำลงถึงระดับหนึ่งจะเป็นสภาพเหมาะสมของกาลีนา (PbS) ทันที ดังนี้เป็นต้น อย่างไรก็ตามภาพแสดงค่า Eh-pH ดังกล่าวนี้จัดทำขึ้นให้ใกล้เคียงธรรมชาติมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งในธรรมชาติจริง ๆ แล้วอาจมีสารอื่นเกิดปะปนทำให้สภาวะสมดุลย์ของแร่แต่ละตัวเปลี่ยนแปลงไปได้

<u>ธรณีเคมีของตะกั่ว-สังกะสีโดยสรุป</u>

<u>ตะกั่ว</u> (Pb)

ในหินอัคนี : โดยเฉลี่ย 16 ppm; ในหินเมฟิคหรือเบสิค (mafic or basic rock) ±12ppm. ในหินเฟลสิคหรือแอสิค (felsic or acid rock) 48 ppm.

ในหินชั้น : ในหินปูน 5-10 ppm. หินทราย 10-40 ppm. หินดินดาน 20 ppm. หินดินดานสีดำ 20-400 ppm.

ในดิน : โดยเฉลี่ย 10 ppm. และอยู่ในช่วง 2-200 ppm.

ในธุลีพืช (plant ash) 70 ppm.

ในน้ำจืด : 0.3 - 3 ppm.

ความสัมพันธ์กับธาตุ : กับพวกคาลโคไฟล์ (chalcophile) ซึ่งมักพบร่วมกับแร่ซัลไฟด์ตัวอื่นๆ ; กับแร่เงิน ในแหล่งแร่มีค่า ; กับแร่เหล็ก, สังกะสี ทองแดง และพลวง ในแหล่งซัลไฟด์ และกับโปแตสเซียม (K) ในแร่ประกอบหินพวกแร่ซิลิเกต

Rock minerals : แร่ไมก้า, แร่โปแตสเฟลสปาร์ (K - feldspar)

แร่ปฐมภูมิ : ได้แก่แร่กาลีนา

แร่ทุติยภูมิ : ได้แก่แร่เซอรัสไซท์ (cerussite), แร่แองกลีไซท์ (Anglesite) แร่ไพโรมอร์ไฟท์ (Pyromorphite $Pb_4(PbCl)(PO_4)_3$)

สภาพในดิน : (Soil phase) ไม่แน่ชัด เคยพบว่ามีตะกั่วมากกว่า 100 ppm. ในดินซึ่งมีสารอินทรีย์ ซึ่งเกิดจากพืชบางชนิด และเคยพบว่ามีตะกั่วสะสมมากในชั้นที่มีเหล็กมากในดินลูกรัง (lateritic soils)

สภาพของเหลว : (Aqueous phase) อาจเป็นไอโอนิค Pb^{++} (ionic Pb^{++})

ความเกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิต : โดยปกติตะกั่วมักเป็นพิษต่อพืช ในขณะที่ตะกั่วอยู่ในสภาพของไอโอนิค

Mobility : โดยทั่วไปแล้วต่ำ อาจถูกกำจัดโดยการทับถมของพวกสารอินทรีย์และไลม์โมไนท์ (limonite) แต่อาจมีค่าสูงในสภาพแวดล้อมที่เป็นคลอไรด์ (chloride (semiarid) environment)

การสำรวจโดยวิธีธรณีเคมี : ตะกั่วในดิน (residual soils) ที่มีค่าสูงนำไปสู่แหล่งตะกั่วที่มีค่าได้ เนื่องจากตะกั่วไม่ค่อยมีการเคลื่อนที่ (relative immobility) และการสำรวจอย่างคราว ๆ โดยการเก็บตัวอย่างน้ำและตะกอนตามห้วย แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วก็อาจนำไปหาแหล่งแร่ตะกั่วต่อไปได้

<u>สังกะสี</u> (Zn)

ในหินอัคนี : โดยเฉลี่ย 80 ppm. ในหินอุลตราเมฟิค (Ultramafic rock) 50 ppm. ในหินเมฟิค 130 ppm; ในหินเฟลสิค 60 ppm;

ในหินชั้น : ในหินปูน 4-20 ppm; หินทราย 5-20 ppm; หินดินดาน 50-300 ppm; หินดินดานสีดำ 100 - 1000 ppm;

ในดิน : โดยเฉลี่ย 50 ppm; หรืออยู่ในช่วง 10 - 300 ppm.

ในธุลีพืช (Plant ash) : 14000 ppm.

ในน้ำจืด : 1 - 200 ppb. (part per billion)

ความสัมพันธ์กับธาตุอื่น : กับแร่คาลโคไฟล์ (chalcophile) พวกทองแดง, เงิน, ทองคำ พลวง อาร์นิค และซีลีเนียม (Se) ในแหล่งแร่เบสเมตตัล (base metal) และแหล่งแร่โลหะมีค่าและร่วมกับแมกเนเซียม (Mg) ในแร่ซิลิเกตบางแร่

Rock minerals : Ferromagnesian minerals.

แร่ปฐมภูมิ : แรสฟาเลอไรท์ (sphalerite)

แร่ทุติยภูมิ : พวกแร่ซัลเฟต (sulphates) แร่คาร์บอเนต (carbonates) และไฮเดรตเทตซิลิเกต (hydrated silicates)

สภาพในดิน : ถูกดูดกลืนอยู่ในแร่ไลม์โมไนท์ และใน lattice positio: ของแร่ดิน (clay minerals)

สภาพของเหลว : Variable partition between floating organisms, soluble organic matter and ionic Zn^{++}

ความเกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิต : ธาตุสังกะสีเป็นอาหารที่จำเป็นยิ่งสำหรับพืชแทบทุกชนิด ด้วยเหตุนี้สาหร่ายที่เจริญเติบโตในห้วยหรือทะเลสาบจึงสามารถดูดส่วนของสังกะสีซึ่งละลายในน้ำได้ ในทางตรงกันข้ามสังกะสีก็จะเป็นพิษต่อพืชเช่นกัน ถ้าหากมีปริมาณมากเกินไป ในบางแห่งอาจมีพืชบางอย่างสามารถเป็นตัวชี้แสดงถึงบริเวณที่มีแร่สังกะสีได้ เช่นแหล่งแร่สังกะสีที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบว่ามีต้นไม้ชนิดหนึ่ง ใบสีม่วง ขึ้นอย่างมากมายบริเวณที่พบมีแร่สังกะสี

Mobility : สูงปานกลาง ถูกกำจัดโดยขบวนการสารอินทรีย์ และการตกตะกอนรวมกับไลม์โมไนท์

การสำรวจโดยวิธีธรณีเคมี : การสำรวจธรณีเคมีหาแหล่งแร่สังกะสี โดยวิธีเก็บตัวอย่างดินนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุสังกะสีในดิน ใช้ได้เป็นผลดี นอกจากนี้ยังอาจวิเคราะห์จากตัวอย่างพืชก็เป็นผลดีเช่นกัน แต่โดยทั่วไปแล้วจะวิเคราะห์จากตัวอย่างดินมากกว่า เนื่องจากมีปัญหาน้อยกว่าผลวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างพืช เนื่องจากสังกะสีมี mobility ค่อนข้างสูงจึงพบอยู่กระจายทั่วทั้งในน้ำบาดาล ในน้ำห้วย และในตะกอนทั่วไป

เป็นที่ทราบกันดีว่าธาตุต่าง ๆ มักไม่เกิดอยู่อย่างโดดเดี่ยว แต่มักเกิดร่วมกับธาตุอื่น ๆ ในแหล่งกำเนิดที่เหมาะสม โดยขึ้นกับคุณสมบัติ และสภาวะการณ์ต่าง ๆ ที่เหมาะสมพอดี ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีก็ตาม ฉะนั้นในการที่จะสำรวจหาแร่ตัวหนึ่งตัวใด อาจจะสำรวจแร่หนึ่งซึ่งพบเห็นได้ง่ายกว่า หรือแผ่กระจายได้มากกว่า เพื่อนำไปหาซึ่งแร่ที่ต้องการได้ โดยอาศัยแร่ซึ่งเป็นตัวชี้ (indicator) ดังกล่าว การศึกษาทางธรณีเคมี จึงมีความสำคัญและเป็นประโยชน์ในการค้นหาแหล่งแร่ โดยอาศัยคุณสมบัติของการเกิดร่วมกันของแร่ธาตุต่าง ๆ นี้ ซึ่งได้แบ่งย่อยออกไปเป็นหลายหมวดหมู่ ในกรณีของธาตุตะกั่วและสังกะสี ได้ถูกจัดอยู่ในหมู่ธาตุต่างกัน คือธาตุตะกั่ว (Pb) จัดอยู่ในหมู่ของคาร์บอน(C) ซิลิกอน (Si) เยอร์เมเนียม (Ge) ดีบุก (Sn) และตะกั่ว ส่วนธาตุสังกะสีจัดอยู่ในหมู่ของสังกะสี (Zn) แคดเมียม (Cd) และปรอท (Hg)

ตะกั่วและสังกะสีมักพบเกิดร่วมกันเสมอ และร่วมกับแคดเมียมและทองแดง ธาตุอื่น ๆ ที่พบเกิดร่วมกับตะกั่วคือเงิน (Ag) แบเรียม (Ba) สตรอนเทียม (Sr) แวนนาเดียม (V) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) แกลเลียม (Ga) อินเดียม (In) ธอลเลียม (Tl) เยอร์เมเนียม (Ge) ดีบุก (Sn) อาร์ซีนิค (As) พลวง (Sb) บิสมัท (Bi) ซีลีเนียม (Se) ปรอท (Hg) เทลลูเรียม (Te) และโบรอน (B) กับฟลูออรีน (F) ธาตุต่าง ๆ เหล่านี้อาจใช้เป็นตัวชี้ในการหาแหล่งแร่ตะกั่ว แต่ที่ใช้ได้ผลดีในการสำรวจแร่ตะกั่วทางธรณีเคมีคือสังกะสี แคดเมียม เงิน ทองแดง แบเรียม อาร์ซีนิค และพลวง และโดยที่สารประกอบของตะกั่วตามธรรมชาติมักไม่ค่อยละลายน้ำ ดังนั้นในการที่จะวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเพื่อหาปริมาณของธาตุตะกั่วจึงไม่สู้ได้ผล

การกำเนิดของแหล่งแร่

การกำเนิดของแหล่งแร่ตะกั่วและสังกะสีนั้น ส่วนใหญ่แล้วมักจะเกิดร่วมกันโดยที่สังกะสีนั้นมักจะมีแคดเมียมปนอยู่ด้วย และตะกั่วก็มักจะมีเงินปนอยู่ด้วยเช่นกัน แบ่งลักษณะการกำเนิดของแหล่งแร่สังกะสี-ตะกั่ว ได้เป็น

1. Disseminated Sulphide Ores of The Kupferschiefer-Type แร่สฟาเลอไรท์ พบอยู่ในหินชุด Upper permian marl bed ซึ่งเรียกว่า Kupferschiefer หรือ marl slate ในยุโรปตอนกลาง เป็นการเกิดแบบ syngenetic sedimentary ของแร่จำพวกซัลไฟด์ อันนับเป็นการเกิดได้ยากมากในประวัติศาสตร์ของโลก ทั้งนี้เพราะว่าจะหาโอกาสที่จะมีท้องทะเลขนาดกว้างใหญ่ที่มีสภาพแบบ stagnant sea water อันทำให้เกิดสภาวะ reducing condition ขึ้นในท้องทะเลนั้น มีหินชั้นซึ่งมีธาตุจำพวก base-metal ได้แก่ทองแดง-ตะกั่ว-สังกะสี สะสมตัวอยู่บนฝั่งทวีปแล้วถูกขบวนการผุพังทำลายนำเอาธาตุเหล่านี้ไปสะสมตัวในรูปของซัลไฟด์คอมเพล็ค (sulphide-complex) อยู่ในทะเลดังกล่าว เมื่อท้องทะเลนี้ถูกยกตัวขึ้นมาจึงกลายเป็นแหล่งแร่ซัลไฟด์ของ ทองแดง-ตะกั่วและสังกะสี พบว่ามีสังกะสีอยู่สูงกว่า ๐.๕ % แผ่บริเวณกว้างประมาณ 2×10^4 ตารางกิโลเมตร โดยมีความหนาเฉลี่ยของชั้นมาร์ล ๑ ฟุต และประมาณว่ามีสังกะสีอยู่ประมาณ 10^8 ตัน (Wedephol,1964,1971)

2. Disseminations, Knots, and Concretions of Sphalerite in - Sandstones, Quartzites and Shales แหล่งแร่แบบนี้มักพบแร่กาลีนา, ทองแดง และเหล็กซัลไฟด์เกิดร่วมอยู่ด้วยเสมอ การเกิดของแหล่งแร่แบบนี้มักจะเกี่ยวข้องกับหินอัคนีจำพวก acidic-intermediate โดยมีสายแร่แทรกเข้าไปในชั้นหินเป็นแบบ fissure veins ตัวอย่างของการเกิดแบบนี้ เช่นที่ Maubach, ในเยอรมัน, ที่ Cape Breton Island และที่ Nova Scotia ใน Goldenville ประเทศแคนาดา เป็นต้น

3. Lead-Zinc Ore of The Mississippi Valley Type, เป็นการเกิดชนิดพิเศษแบบหนึ่งของแร่ตะกั่วและสังกะสี โดยที่แร่จะแผ่กระจายทั่วไปอยู่ในหินชั้นโดยเฉพาะหินปูน, หินโดโลไมท์, หิน chert (ที่มาจากหินปูน) หรือหิน calcareous shale โดยไม่มีหินอัคนีเข้ามาเกี่ยวข้อง แร่ส่วนใหญ่เกิดเป็นแร่กาลีนา (PbS) สฟาเลอไรท์ (ZnS) นอกนั้นเกิด

เป็นแร่ของตะกั่วและสังกะสีที่ถูกออกซิไดซ์เป็นพวกซัลเฟต, คาร์บอเนต หรือซิลิเกต ทั้งนี้จะมีเงินอยู่ในตะกั่วบ้างเล็กน้อยและมีแคดเมียม (Cd) ปนอยู่ในสฟาเลอไรท์บ้างเหมือนกัน

ตัวอย่างของแหล่งแร่แบบนี้เช่นที่ Moresnet ประเทศเบลเยียมและลักเซอมเบอร์ก, Alpine Trias ในออสเตรีย และที่ Mississippi Valley ในสหรัฐอเมริกา ซึ่งประกอบไปด้วยหินปูนของยุคพาลีโอโซอิคตั้งแต่ออโดวิเซียนจนถึงคาร์บอนิเฟอรัส บริเวณดังกล่าวนี้คลุมพื้นที่หลายมลรัฐ เช่น Arkansas, Missouri, Oklahoma, Kansas, Illinois, Wisconsin และ Iowa เป็นต้น

4. Skarn-Type Deposits เป็นการเกิดของแหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีอีกแบบหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการที่หินอัคนีที่เป็นตัวนำตะกั่วและสังกะสี ดันแทรกเข้ามาในหินชั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในหินอัคนีและในหินชั้น เกิดเป็นแหล่งแร่อยู่ระหว่างรอยสัมผัสของหินอัคนีและหินชั้น ในแหล่งแร่กำเนิดแบบนี้มักมีแร่ตะกั่ว-สังกะสี-ทองแดง-เงินรวมอยู่ด้วย

5. Franklinite-Willemite-Zincite Deposit เป็นการเกิดคล้ายแบบที่ ๔ โดยมีขบวนการที่สลับซับซ้อนกว่า มีสายแร่อยู่ระหว่างหิน Precambrian-crystalline limestone กับหิน gneisses ซึ่งเปลี่ยนมาจากหินอัคนี แหล่งแร่ชนิดนี้จัดเป็นแบบพิเศษ โดยมีแร่แฟรงคลินไนท์ วิลเลมไมท์ และซิงไซท์ซึ่งเป็นแร่สังกะสีสำคัญของแหล่งนอกจากนี้ยังมีแร่อื่น ๆ อีกมากมายรวมอยู่ในแหล่งนี้เช่น แร่แมงกานีส-ซิลิเกต, กาลีนา, อะปาไทท์, เป็นต้น การกำเนิดแบบนี้ได้ชื่อมาจากเหมือง Mine Hill และ Sterling Hill ที่รัฐนิวเจอซี สหรัฐอเมริกา

6. Veins and Replacement Deposits โดยเกี่ยวข้องกับหินอัคนีและหินชั้น แร่อาจจะเกิดเป็นลักษณะสายแร่หรือการแทรกตัวของแร่อยู่ในหินหลายชนิด แร่สำคัญ ๆ ที่เกิดแบบนี้ส่วนใหญ่เป็นซัลไฟด์ของตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และเงิน อาจมีแบไรท์เป็นกากแร่ได้ในบางแห่ง

7. Massive Sulphide Deposits การเกิดแบบนี้ส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับหินอัคนีพวกหินภูเขาไฟ และมีลักษณะเป็นชั้น ๆ (Strata-bound) ของแร่แทรกกระจายอยู่ในหิน ซึ่งอาจพบเห็นอยู่ทั่วไปตั้งแต่หินยุค Precambrian จนถึง Paleozoic ในหินยุคออน-

กว่านี้พบเสมอแถวประเทศฟิลิปปินส์, ญี่ปุ่น และมาเลเซียตะวันตก ซึ่งส่วนใหญ่เกิดอยู่ในส่วนที่เรียกว่า island arc อันประกอบด้วยชั้นหินหลายชนิดหนามากพวก pillow lava, volcanic breccia, tuff และพวก fine-grained sediments แร่ส่วนใหญ่ของการเกิดแบบนี้ได้แก่แร่ซัลไฟด์ของตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และเงิน

จะเห็นได้ว่ามักจะพบแร่ตะกั่วและสังกะสีเกิดร่วมกันเสมอ โดยอาจมีเพื่อนแร่พวกทองแดง เงิน แคดเมียม แบเรียม อาร์ซินิค พลวง บิสมัท โมลิบเดนัม ปรอท ปนอยู่ด้วย ในแหล่งแบบ Franklinite-Willemite-Zincite deposit พบว่ามีปริมาณแมงกานีสสูงมาก โดยเกิดเป็นรูปของแมงกานีส-ซิลิเกต

ในการสำรวจทางธรณีเคมีเพื่อหาแหล่งแร่สังกะสี อาจสังเกตได้โดยการที่พบว่ามีปริมาณของธาตุสังกะสีและแคดเมียมมากผิดปกติในดิน ตะกอน ท้องห้วย น้ำธรรมชาติและในพืช หรืออาจสังเกตจากปริมาณของตะกั่วก็ได้ พวกทองแดง เงิน แบเรียม แมงกานีส อาร์ซินิค และพลวง อาจเป็นตัวชี้ได้ในกรณีของการกำเนิดแบบ vein and massive sulphide type deposits ในบางบริเวณพวก skarn type deposits อาจอาศัยพวกโมลิบเดนัม ทังสะเตนและบิสมัทเป็นตัวชี้ได้ภายใต้สภาวะการที่เหมาะสม พวก franklinite deposits ก็อาจอาศัยการที่พบว่ามีปริมาณของแมงกานีสมากผิดปกติในหินหรือในดิน ปรอทเป็นตัวชี้ที่ดีในกรณีของ vein and massive sulphide deposits

ในบริเวณที่เป็นแหล่งแร่สังกะสี จะพบว่ามีปริมาณของธาตุสังกะสีและแคดเมียมขึ้นสูงผิดปกติ ในน้ำใต้ดินหรือน้ำผิวดินร่วมกับธาตุ chalcophile ตัวอื่น ๆ รวมทั้งที่พบเป็น Wads, limonites และ precipitates ของน้ำพุร้อนและใน bogs บางแห่งก็พบว่ามีปริมาณของสังกะสีขึ้นสูง เนื่องจากขบวนการผุพังเน่าเปื่อยของสิ่งมีชีวิต สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้อาจใช้เป็นตัวนำทางไปสู่แหล่งกำเนิดของสังกะสีได้

<u>ตัวอย่างชนิดและการกำเนิดของแหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสี</u>

แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสี อาจแบ่งได้เป็นหลายชนิด แต่พอสรุปได้ว่าเกิดจากขบวนการ Contact metasomatism เป็นแบบ Contact metasomatic deposits ตัวอย่างที่ Hanover

และ Magdalena, New Mexico สหรัฐอเมริกา

<u>การเกิดแบบ Cavity fillings</u> : แบ่งออกเป็น

๑. แบบ Fissure veins ตัวอย่างที่ San Juan, Colorado สหรัฐอเมริกา และที่ประเทศพม่า

๒. แบบ Breccia ตัวอย่างที่ Jefferson City และ Mascot ใน Tennessee สหรัฐอเมริกา

๓. แบบ Cave fillings ตัวอย่างที่บริเวณ Mississippi Valley

๔. แบบ Pitches and flats ตัวอย่างที่บริเวณ Upper Mississippi Valley.

<u>การเกิดแบบ Replacement</u> แบ่งออกเป็น

๑. แบบ Massive ตัวอย่างที่ Leadville, Colorado; Bingham และ Tintic, Utah; Sullivan mine, British Columbia ในสหรัฐอเมริกา ที่ Flin Flon, Manitoba ประเทศแคนาดา ที่ Cerro de Pasco ประเทศเปรู Santa Eulalia และ Sierra Mojada ประเทศเม็กซิโก และที่ Trepca, Sbroia ในประเทศยูโกสลาเวีย

๒. แบบ Replacement lodes ตัวอย่างที่ Park City, Utah; Coeur d' Alene, Idaho และ Franklin Furnace, New Jersey ในสหรัฐอเมริกา

๓. แบบ Disseminated เช่นที่ Tri-State-district, southeastern Missouri สหรัฐอเมริกา

<u>การเกิดแบบ Surficial oxidation</u> เช่นที่ Northern Mexico

วิธีการสำรวจแร่ตะกั่วและสังกะสี

การสำรวจแร่ตะกั่วและสังกะสีนั้น อาศัยคุณสมบัติที่ว่าตะกั่วและสังกะสีมักจะเกิดร่วมกันในหลาย ๆ สภาพแวดล้อม อาจกล่าวการสำรวจหาแร่ทั้งสองชนิดนี้ได้โดยอาศัยขั้นตอนของการสำรวจดังนี้

๑. การสำรวจขั้นมูลฐาน

๒. การสำรวจทางธรณีเคมี

๓. การสำรวจทางธรณีฟิสิคส์

๔. การสำรวจโดยอาศัยเครื่องมืออื่น ๆ

๑. การสำรวจขั้นมูลฐาน

เป็นการสำรวจขั้นต้นซึ่งส่วนใหญ่เพื่อหาข้อมูลทางธรณีวิทยาของบริเวณที่น่าสนใจ อาจกระทำได้โดยอาศัยการแปลภาพถ่ายทางอากาศออกมาเป็นแผนที่ธรณีวิทยาแล้วเข้าไปตรวจด้วยการสำรวจภาคสนามเพื่อหาข้อมูลทางธรณีวิทยาและธรณีวิทยาแหล่งแร่พร้อมกันไป จากนั้นแปลความหมายสภาพทางธรณีวิทยาแหล่งแร่ของบริเวณที่เหมาะสมสำหรับในการสำรวจขั้นต่อไป ซึ่งเป็นการสำรวจขั้นรายละเอียดขึ้นไปอีกรวมถึง

๑.๑ การหาข้อมูลทางธรณีวิทยาเพิ่มเติม

๑.๒ การทำรายละเอียดแผนที่ภูมิประเทศและแผนที่ธรณีวิทยาของแหล่งแร่

๑.๓ การสำรวจด้านธรณีเคมีซึ่งส่วนใหญ่เป็นการสำรวจวิเคราะห์ดิน, และดินทรายท้องน้ำ

๑.๔ การสำรวจธรณีฟิสิคส์ซึ่งรวมถึงการสำรวจแบบ Magnetic, electromagnetic, resistivity, induced polarization.

๑.๕ การสำรวจด้วยวิธี Pitting, trenching.

๑.๖ การเจาะสำรวจ

ขั้นตอนต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างบนนี้ ตามข้อเท็จจริงแล้วเราอาจจะทำการสำรวจข้ามขั้นตอนไปบ้างก็ย่อมกระทำได้ โดยเฉพาะการสำรวจธรณีฟิสิคส์ซึ่งอาจกระทำได้เฉพาะบางวิธีตามความเหมาะสม ไม่จำเป็นต้องทำทุกอย่าง ทั้งนี้เพราะว่าเสียค่าใช้จ่ายสูง อนึ่งการสำรวจธรณีฟิสิคส์และธรณีเคมีมักกระทำร่วมกัน

๒. <u>การสำรวจธรณีเคมีและธรณีฟิสิคส์</u>

การสำรวจทั้งสองวิธีนี้มักกระทำร่วมกันโดยอาศัย Traverse lines ร่วมกันเพื่อประโยชน์ในการแปลความหมายของผลการสำรวจ การหา base lines และ Traverse มักทำโดยใช้กล้อง Theodolite

๒.๑ <u>การสำรวจธรณีเคมี</u> ส่วนใหญ่จะอาศัยการเก็บตัวอย่างดินทรายท้องน้ำ (Stream sediment samples) และตัวอย่างดิน (Soil samples) ตามจุดที่กำหนด นำตัวอย่างที่ได้นั้นไปวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาปริมาณของธาตุ Cu,Pb,Zn จากนั้นนำผลวิเคราะห์ทางเคมีมารวบรวมและแปลความหมาย เมื่อได้ผลแล้วจะเขียนเป็นแผนที่ธรณีเคมีซึ่งส่วนมากจะเป็นแผนที่แสดงปริมาณของธาตุตามจุดต่าง ๆ ออกมาเป็น contour lines.

๒.๒ <u>การสำรวจธรณีฟิสิคส์</u> เป็นการสำรวจเพื่อหาปริมาณของธาตุ Cu,Pb,Zn ตามจุดต่าง ๆ ซึ่งจะให้ความรู้ในด้านปริมาณของธาตุลึกลงไปในดินหรือหินมากกว่าการสำรวจด้วยวิธีธรณีเคมี การสำรวจทางธรณีฟิสิคส์มีหลายวิธีจะไม่ขอกล่าวในรายละเอียดทางเทคนิค จะกล่าวเฉพาะวิธีซึ่งเหมาะสมสำหรับการสำรวจแร่จำพวกโลหะมูลฐาน (base metals) เช่น

๒.๒.๑. Electrical survey

๒.๒.๒. Self potential survey

๒.๒.๓. Electromagnetic survey

๒.๒.๔. Induced polarization survey