자원환경지질, 제48권, 제6호, 525-536, 2015
Econ. Environ. Geol., 48(6), 525-536, 2015
http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2015.48.6.525

pISSN 1225-7281
eISSN 2288-7962

페루 남동부 아뿌리막주 트라피체 동-몰리브데늄 광상의 지질 및 광화작용

양석준 · 허철호* · 김유동
한국지질자원연구원 광물자원연구본부 광물자원연구실

Geology and Mineralization in Trapiche Cu-Mo Deposit, Apurimac State in Southeastern Peru

Seok-Jun Yang, Chul-Ho Heo* and You-Dong Kim
Mineral Resources Research Department, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea
(Received: 2 November 2015 / Revised: 23 December 2015 / Accepted: 24 December 2015)

Trapiche project corresponds to the advanced exploration stage which is thought to be a part of various porphyry copper deposits occurring in the margin of Andahuyalas-Yauri metallogenic belt. This deposit is genetically related to the monzonitic porphyry intrusion and Oligocene breccia pipe. Mineralization consists of primary sulfides such as pyrite, chalcopyrite, bornite, and molybdenite and secondary sulfides such as chalcocite, covellite and digenite. It occurs malachite, tenorite and cuprite as copper oxide. As a result of lixiviation or enrichment process, mineralization shows untypical zonation structure. Breccia and porphyry areas characterize the vertical zonation patterns. In the northern area, lixiviation zone, secondary enrichment zone, transitional zone and primary mineralized zone are distributed in northern area. In the western area of deposit, oxidation zone and mixed zones are narrowly occurred. Inferred resources of deposit is estimated to be 920 Mt @ 0.41% Cu with the cut-off grade of 0.15%.

Key words : Trapiche, porphyry copper, Peru, geology, mineralization

트라피체 프로젝트는 현재 탐사단계 중 후기(Advanced exploration)단계의 프로젝트이며 안다우아일라스-야우리 광상구 연변에 나타나는 다양한 반암 광상 중 일부라고 볼 수 있다. 이 광상은 몬조나이트 반암의 관입과 관계가 있으며, 또한, 올리고세 각력 파이프와 밀접한 관계를 가지고 있는 광상이다. 광화작용은 일차 유화광물인 황철석, 황동석, 반동석 및 휘수연석으로 구성된다. 2차 유화광물인 휘동석, 코벨라이트, 다이게나이트가 산출되며 산화동으로서 공작석, 흑동석, 적동석등이 산출된다. 침출작용(lixiviation)이나 부화과정 결과로서, 광화작용은 비전형적인 누대구조를 보여주기도 한다. 각력과 반암이 나타나는 구역에서는 수직적인 누대구조를 보여주는데, 북쪽 인근에서는 침출대, 2차부화대, 전이대 및 초생광화대가 나타나고 광상의 서쪽에서는 산화대 및 혼합대가 좁게 나타난다. 광상의 추정자원은 920 Mt @ 0.41% Cu이며 한계품위는 0.15%로 산정하고 있다.

주요어 : 트라피체, 반암동, 페루, 지질, 광화작용

1. 서 론

화산호 같은 섭입대 환경 하에서는 금과 동의 발달이 유리하며(Rosenbaum *et al.*, 2005), 페루지역은 해양판인 나즈카판이 대륙판인 남아메리카판을 동쪽에서 약 200만년 동안 섭입하고 있다. 트라이아스기 후기

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

*Corresponding author: chheo@kigam.re.kr

(220±10 Ma)부터 시작된 조산활동은 아직도 진행되고 있다. 이로 인하여 페루에는 남서쪽부터 철, 동-몰리브덴-금, 동-연-아연-은, 주석-텅스텐-은-안티모니-비스무스 금속광화대가 대상으로 발달하고 있다(Stoll, 1965; Grant *et al.*, 1980). 16세기부터 페루 남동부 광화대에 대한 개발이 시작되었으며, 그 중 세계수준의 매장량을 보이는 곳도 있다(Clark *et al.*, 1990; Mlynarczyk and Williams-Jones, 2005).

한국지질자원연구원(KIGAM)-페루 지질광업제련연구소(INGEMMET)간의 2015년도 공동지질광상조사는 페루 남동부 아뿌리막(Apurimac) 반암동 광화대를 대상으로 수행되었다. 특히, 아뿌리막 지역에 부존하는 탐사단계의 후기에 있는 트라피체(Trapiche) 반암동 광상은 페루 브에나벤츄라 광업회사(Compania de Minas Buenaventura)에서 100% 지분을 보유하고 있으며, 1995년부터 2001년까지 진행된 대규모 탐사사업에 의해 발견되었으며, 가장 적절한 공정을 찾기 위해 다양한 선광제련 평가와 프로젝트의 타당성 평가를 수행하고 있다. 트라피체 프로젝트는 반암동광상으로 페루 남동부 아뿌리막(Apurimac)주의 아방까이(Abancay) 시에서 남쪽으로 약 100 km 지점에 위치하고 있다(Fig. 1). 첫 시추 작업은 2001년에 시작되었으며, 다양한 축척의 지표조사와 유도분극탐사 및 자력탐사 등의 물리탐사도 수행되었다. 지구물리 탐사는 2001~2012년 사이 간헐적으로 진행하였다. 자류철석-자철석 -황철석 - 황동석을 함유한 미유꾸초(Millucucho) 스카른으로 특징지어지는 자력 이상대를 발견하였다. 이러한 조사들로 의해 자원양은 920 Mt @ 0.41% Cu이며 한계품위는 0.15%로 산정하고 있다.

본 해설은 아직 탐사단계에 있는 트라피체 광상을 방문하여 조사한 내용과 Instituto De Ingenieros De Minas Del Per(Fernando *et al.*, 2013)에서 제공한

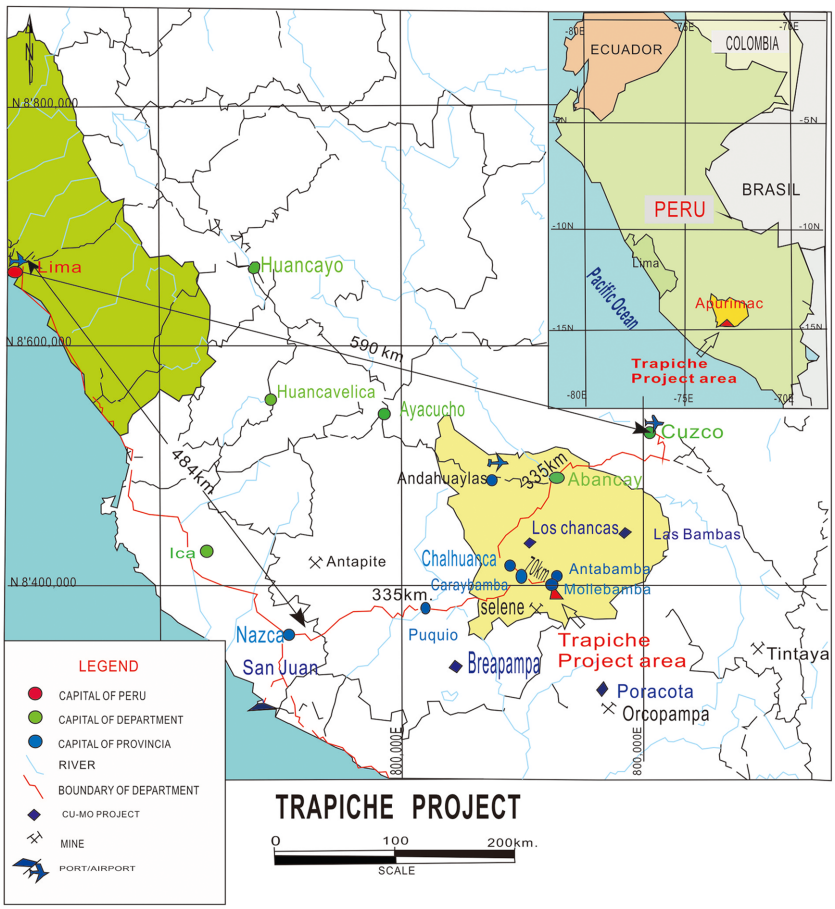

Fig. 1. Location map of Trapiche Cu-Mo deposit in Apurimac, Peru.

광상보고서 내용을 바탕으로 국내자원관련 유관기업에 소개할 목적으로 작성되었다.

2. 지　　질

트라피체 광상은 안다우아일라스(Andahuaylas)-야우리(Yauri) 광상생성구의 동쪽에 위치한다. 이 생성구에는 찬카스(Chancas), 꼬따밤바스(Cotabambas), 라스밤바스(Las Bambas) 등의 주요 반암 및 스카른 광상들이 위치한다(Fig. 2).

쥬라기 초기부터 백악기 후기에 걸쳐 생성된 퇴적암들을 기반암으로 하며, 이후에 흑색의 루타이트(lutite)와 실트암으로 구성된 피스테(Piste) 층, 루타이트, 사암, 석회암으로 구성된 쮸끼밤비야(Chuquibambilla) 층, 석영질 사암으로 구성된 소라야(Soraya) 층, 사암과 적색의 루타이트로 구성된 마라(Mara) 층, 그리고 석회암과 이회암으로 구성된 페로밤바(Ferrobamba)층 들이 순차적으로 퇴적되었다(Fig. 3).

관입암들은 주로 칼크-알칼리계 성분의 암석들로, 올리고세 하부의 암주(29.17 Ma)들이 관입하기 시작하면서, 반상 몬조니암(28.9 Ma)으로의 진화 과정에서 변질대를 형성시키고 광화작용을 초래시켰다. 플라이오세의 퇴적암과 관입암들은 부정합적으로 타카자(Tacaza)층군, 알파밤바(Alpabamba) 화산암층 및 마이오세-플라이오세 바로소(Barroso)층군(안산암질-현무암질 용암)에 해당되는 화산성 쇄설암인 석영안산암 - 안산암 층에 의해 피복되고 있다.

트라피체 광상 지역에는 북서 방향의 단층들이 우세

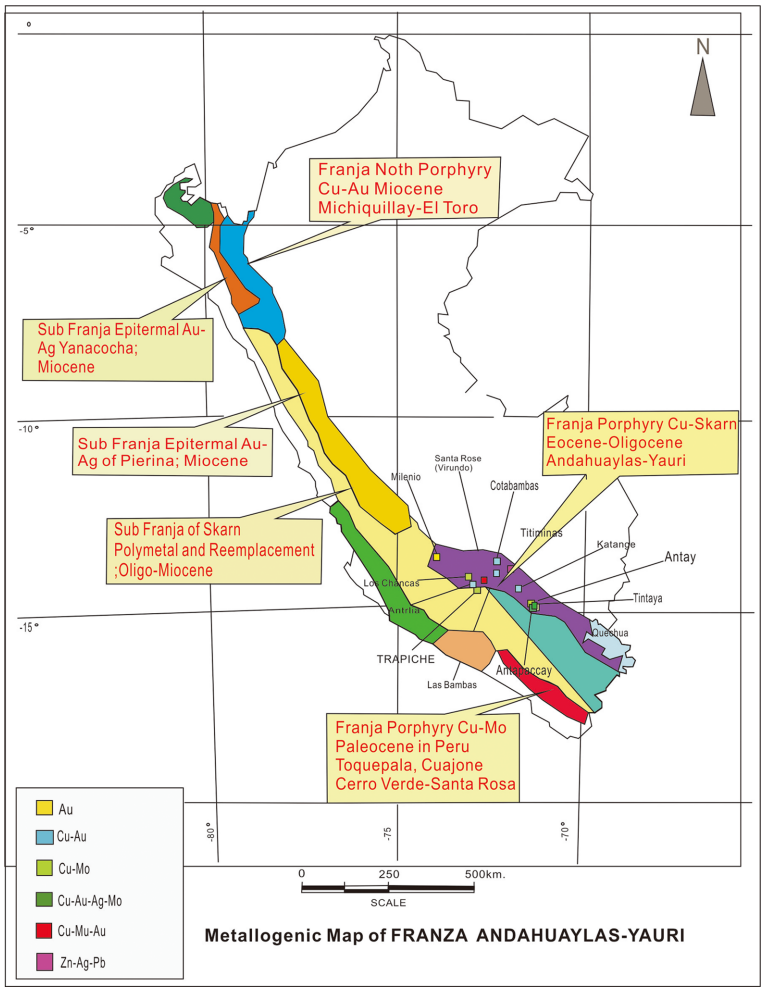

Fig. 2. Simplified metallogenic map of Peru. Trapiche deposit located in Andahuaylas-Yauri metallogenic province.

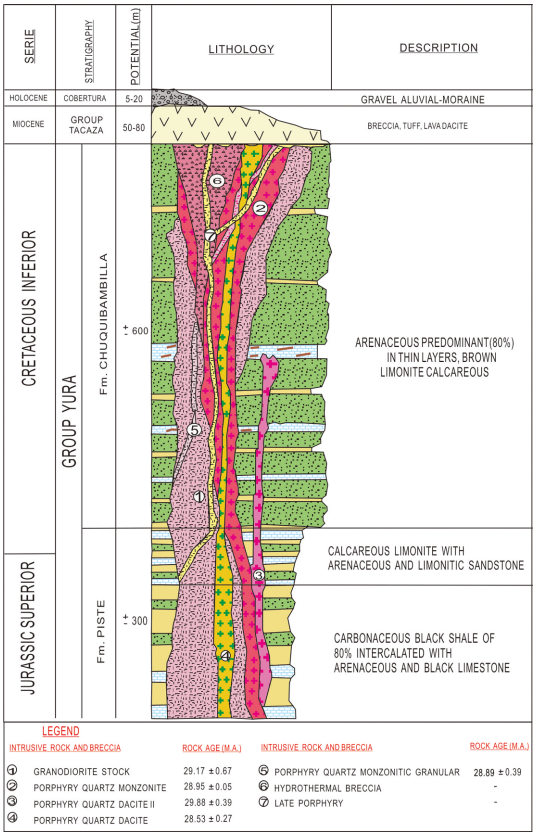

Fig. 3. Columnar structural section of Trapiche deposit.

하게 발달하고 있다(Fig. 4). 이 단층은 두 개의 분절로 나뉘는데, 두 개의 분절 사이에는 북서 방향의 연결 단층들이 발달한다. 이러한 연결 손상대의 발달 특징으로 볼 때 이는 좌수향 운동감각을 지시한다. 광화대는 이러한 연결 단층들과 관련이 있을 것으로 보고되고 있다. 거시 구조로는 다음과 같은 중요한 3가지 단열 및 단층 시스템으로 특징지어 진다. 1) 대규모의 북서-남동 방향의 안데스 시스템은 좌수향 운동 감각을 보이며, 세로 콜로라도(Cerro Colorado) 및 아르파오르코(ArpaOrco) 단층이 대표적이다. 2) 북동-남서 방향의 단층은 엘바라(El Abra) 및 센트럴(Central)단층으로 대표되는데, 각력상 파이프의 정치에 중요한 역할을 한 구조이다. 3) 동-서 방향의 단층은 트라피체(Trapiche) 및 깜빠멘토(Campamento) 단층으로 대표되며 남-북 방향의 단층은 미유꾸초(Millucucho) 및 각력 구역의 일부에서 잘 나타난다.

조사지역인 트라피체 광산 주변에는 북서-남동 방향의 단층들과 습곡들이 우세하게 발달한다(Fig. 4). 단층은 주로 북동-남서 방향으로 굴절되는데, 이는 이 단층이 경사이동측면으로 볼 때는 역단층성, 주향이동측면으로 볼 때는 좌수향의 운동감각을 가지는 경사이동단층으로 해석된다. 습곡축의 경우 주로 북서 또는 서북서 방향이며, 이는 북동 또는 북북동 방향의 압축력을 받았음을 지시한다. 이 지역에 나타나는 단층과 습곡들로 인해 이 지역은 압축력에 강하게 영향을 받은 지역으로 해석되며, 이러한 구조들은 한 번의 이벤트(북동-남서 방향 압축)에 의해 발달 했을 것으로 추정된다(Fig. 5).

이 지역에는 10개 이상의 반암동 광산들이 집중되는데, 이들은 주로 단층대 주변에 밀집되어 있다. 이는 이 지역의 단층들과 광화대가 연관이 있음을 지시하며, 특히 북서-남동 방향의 단층과 밀접한 연관이 있을 것으로 사료된다. 반암동 광산의 경우 주로 섭입대 환경과 밀접한 연관이 있으며, 압축력 환경에서 일시적으로 인장력 환경이 될 때 천부에 정치하고 있던 마그마 챔버에서 광화작용과 연관된 관입 등에 의해 광화대가 형성되는 것으로 보고되고 있다. 이를 미루어 볼 때, 이 지역에 우세하게 발달하는 북서 방향의 단층들이 일시적인 응력의 변화(압축환경→인장환경)를 겪으면서 광화대가 형성된 것으로 사료된다.

특히, 트라피체 광상의 광화작용과 가장 밀접한 연관이 있는 각력 파이프(breccia pipe)의 경우 북서-남동 방향의 두 단층 분절 사이에서 분포가 제어된 것을 볼 수 있다(Fig. 5). 이는 단층의 분절사이에서 발달하는 연결 손상대에 의해 형태가 제어된 것으로 해석된다. 추가적인 현장조사와 증거들이 수집 되어야겠지만, 광체의 형태와 단층의 기하학적 형태 등을 볼 때, 트라피체 광상의 광화작용은 북서-남동 방향의 단층 분절 사이의 연결부에 발달하는 동-서 방향의 인장단열에 의해 제어된 것으로 사료된다. 즉, 북서-남동 방향의 단층이 동-서 방향의 압축력에 의해 좌수향운동을 할 때, 연결 손상대내의 동-서 방향의 인장단열을 따라 광화작용이 일어났을 것으로 사료된다.

3. 광화작용

트라피체 광상은 동-몰리브데늄(Cu-Mo) 광화작용을 보이는 전형적인 반암형 광상으로서 광상의 형성은 석영-몬조나이트 반암 및 각력 파이프(breccia pipe)와 밀접한 관련이 있다. 광상의 형태는 북북서-동남동 방향

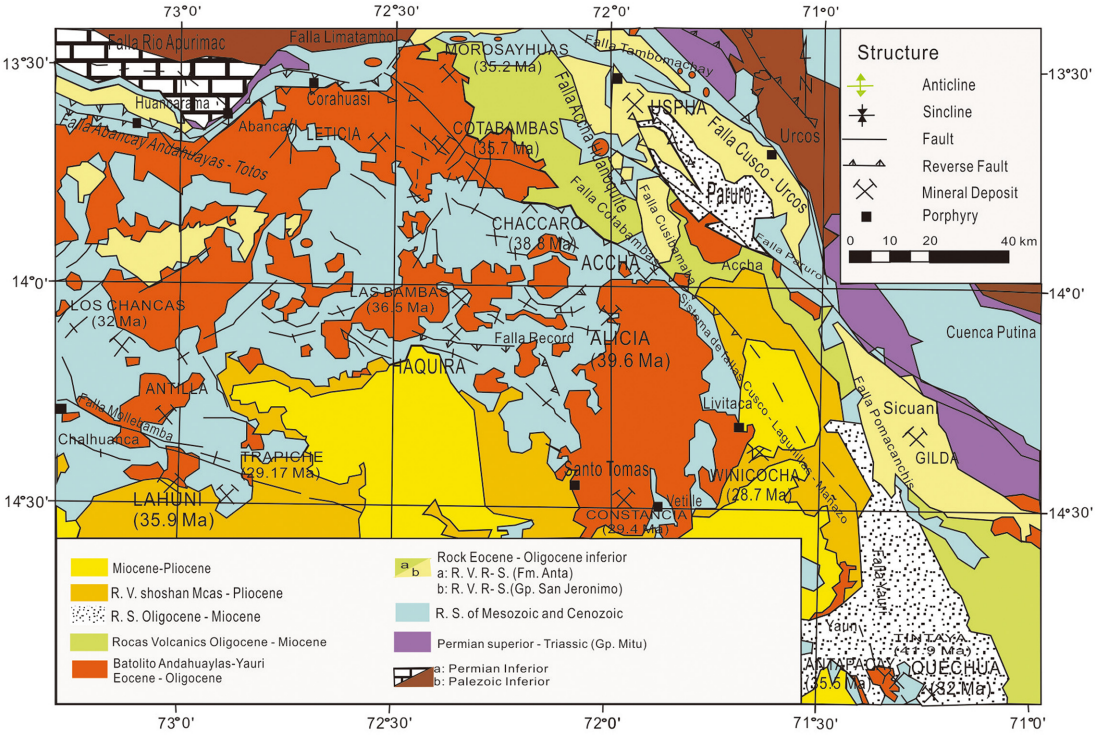

Fig. 4. Geological map showing the major structures and ore-deposits near the Trapiche Cu-Mo deposit.

의 장축을 가지는 타원형체 모양이이며, 그 크기는 2.1 km ×1 km로 심도는 약 500 m 까지 연장된다. 광체는 동쪽에서 서쪽으로 가면서 트라피체 동쪽(Trapiche Este) 반암 광체, 각력상 파이프 광체, 동 산화대로 나뉜다(Fig. 6).

북동쪽과 서쪽 경계에 분포하는 모암은 삐스테(Piste)층 및 쮸끼밤비야(Chuquibambilla) 층에 해당되는 암석으로서 사암, 실트암, 석회질 실트암 등으로 구성된다. 가장 오래된 암석으로는 반상화강섬록암으로서, 석영-정장석-흑운모로 구성되며 광석광물로는 황철석이 산포상으로 나타나며 황동석과 휘수연석이 소량 산출된다. 반상 석영 몬조나이트 반암은 기본적으로 변질과 광화작용을 가져온 암석이며, 석영-장석 기질내에 정장석, 사장석, 흑운모의 반정들을 보이는 반상조직을 보여주고 있다. 이러한 석영 몬조나이트 반암의 연령은 28.95 Ma로 측정되었다. 반암동 광화작용은 보통 산포상으로 나타나며, 석영 세맥들과 황동석, 황철석, 반동석 및 휘수연석의 유화광물들이 산출되고 있다. 그러한 석영 몬조나이트 반암의 정치는 이전에 결정화된 화강섬록암 진화단계의 전이상(transitional phase)으로 볼 수 있으며, 그 후에 약간의 변질작용과 광화작용을 수반하는 반상 석영 안산암(28.53 Ma)이 발달했다. 그 후 각력 파이프가 형성되었는데, 다음과 같은 다른 3가지 유형의 파이프가 형성되었던 것으로 사료된다(Fig. 6, 7 and 8).

1) 석영-자철석 각력파이프
2) 석영-황철석-휘수연석 각력파이프
3) 석영-전기석 각력파이프

각력상이나 반암형으로 나타나는 광화작용이 전체 체적상 대부분을 차지하는 광화작용으로 볼 수 있다. 후기 관입상으로는 반상 석영-몬조니암과 석영안산암 및 안산암이 대표적인데 반암은 곳에 따라 접촉 광화작용도 가져왔다. 광상의 서쪽 및 북서쪽 근처에서는 산화대 및 동의 혼합대가 나타나는데, 초생 유화물의 흔적이 관찰된다(Fig. 6, 7 and 8).

Cu-Mo 광화작용은 주로 1차 황화물이나 2차 동, 후생적으로 생긴 몰리브데늄과 소량의 산화동 등으로 형성되는데, 대부분의 체적을 차지하는 황화물은 각력파이프 내에 발달하며, 석영반암 몬조나이트나 산화대에도 나타난다. 각력 파이프의 광화작용은 주로 산포상

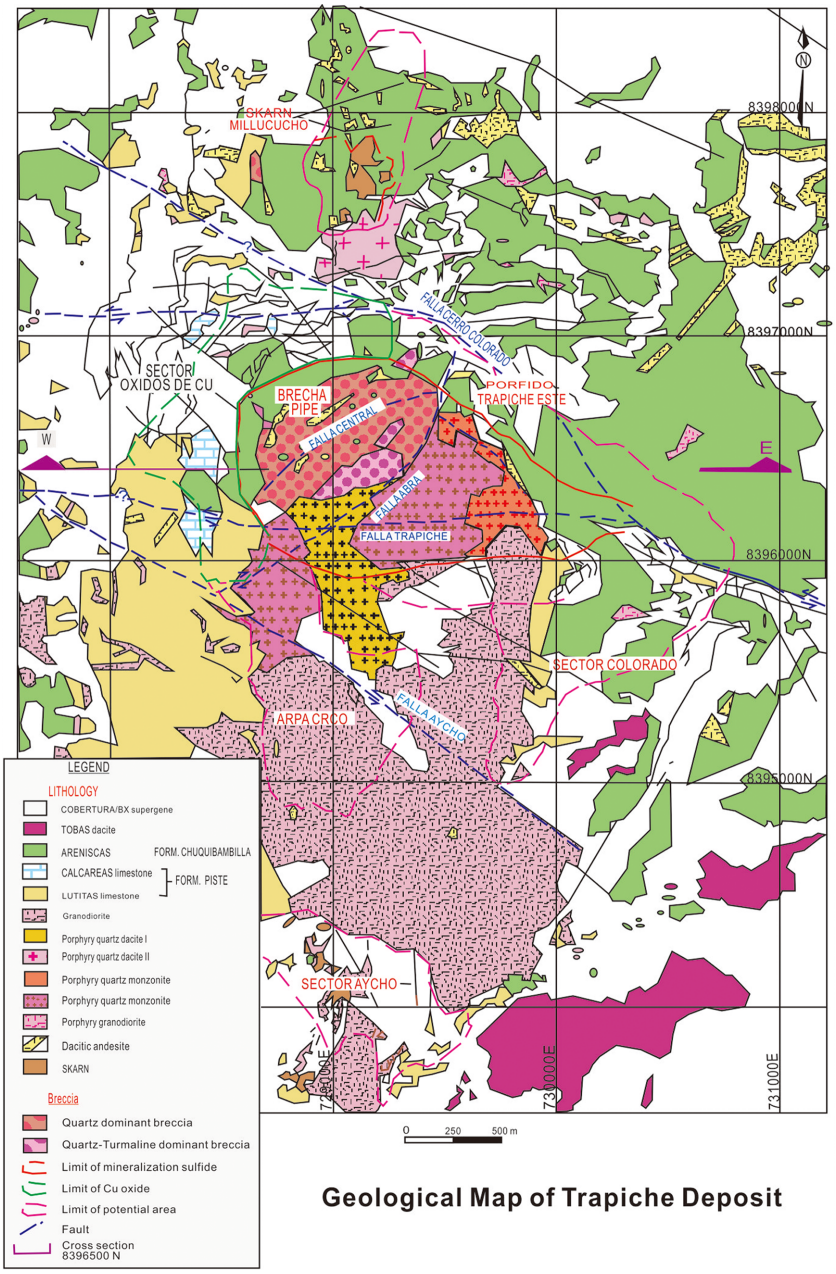

Fig. 5. Detailed geological map of Trapiche Cu-Mo deposit showing the relationship between NW-trending sinistral fault and plutonism.

형태나 기질내 발달하고 세맥상이나 산포상 형태의 각력들로 나타나기도 한다. 트라피체 광상에 발달하는 광화대를 요약하면 다음과 같다(Fig. 9).

1) 침출 구역(lixiviation zone))

침출(lixiviation)은 산화대와 달리 화학적 침전이 생긴 곳을 말하며, 지표의 산화침출 고품위대라고 볼 수 있는 구역이다. 상부층은 침출에 의한 광화작용이 있는 구역이며, 지표와 거의 평행하게 어느 정도 심부까지 발달하는 광화대이다. 이 구역은 특징적으로 주로 침철석, 적철석, 철백반석(jarosite), 동 산화물의 잔존

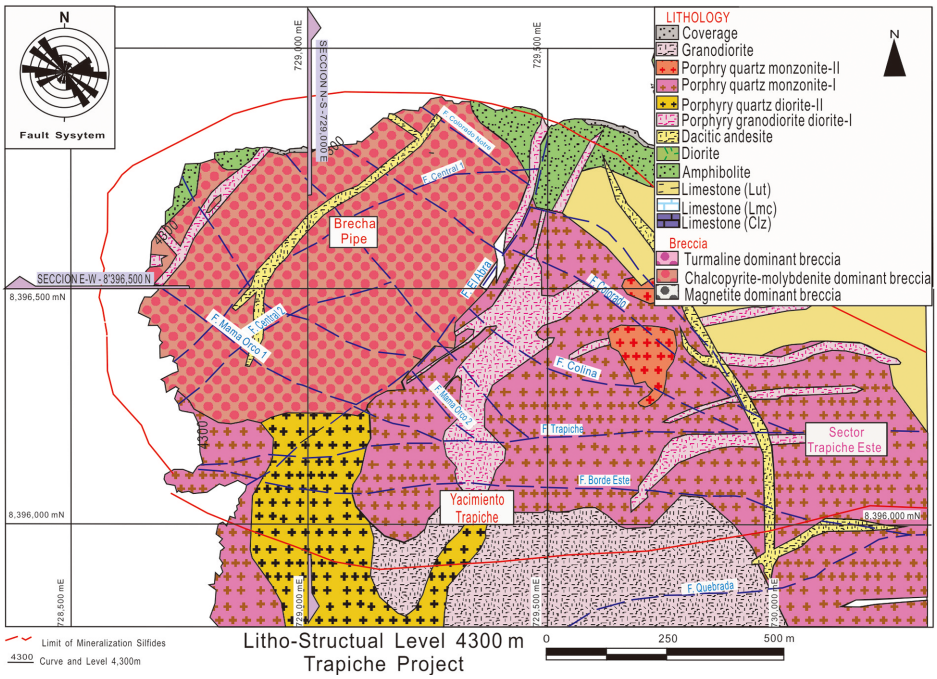

Fig. 6. Simplified map of Trapiche Cu-Mo deposit showing the lithology and structures.

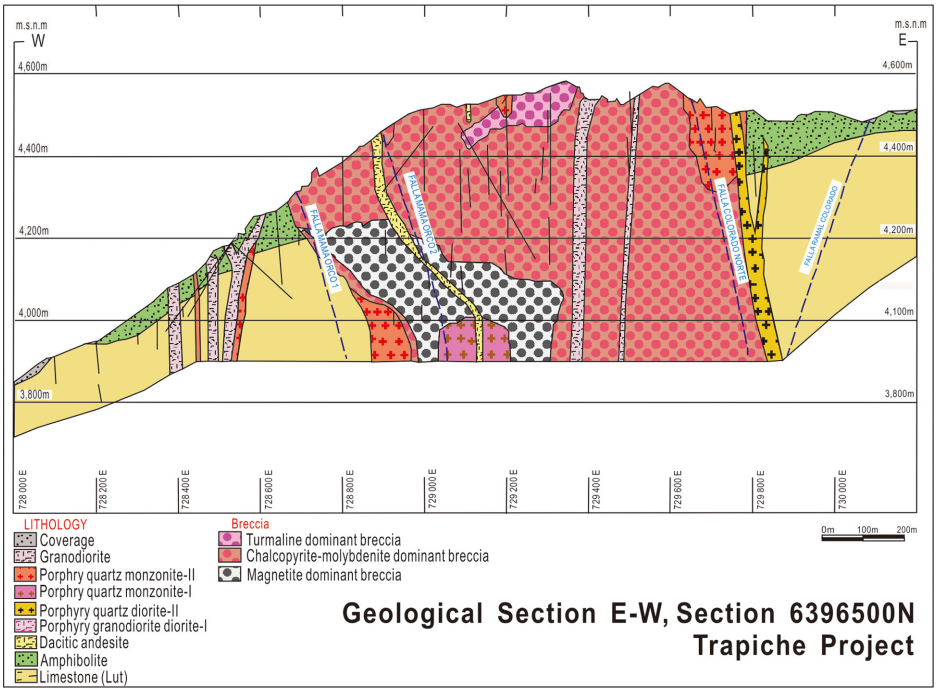

Fig. 7. E-W cross-section of Trapiche Cu-Mo deposit. Breccia pipe is divided into three types based on the mineral composition.

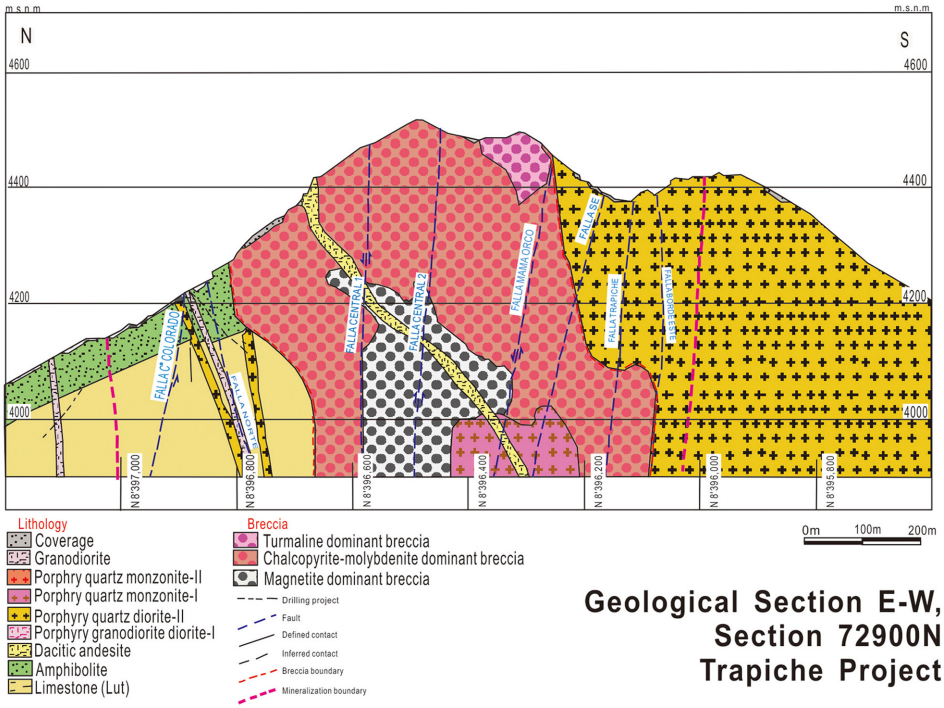

Fig. 8. N-S cross-section of Trapiche Cu-Mo deposit.

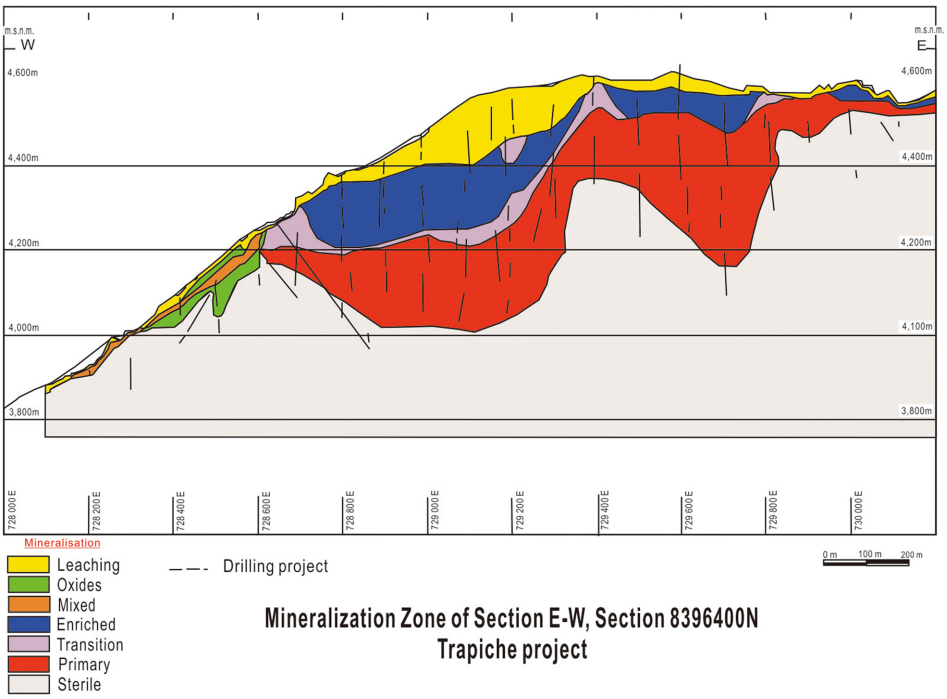

Fig. 9. E-W cross-section of Trapiche Cu-Mo deposit showing mineralized zone.

물 등으로 구성된다. 각력 파이프 내에서 침출구역은 침투성에 의해 형성되며, 그 두께는 20~120 m까지 발달한다. 반암에서 침출구역은 5~30 m까지 발달하며, 산화대에서는 침출구역은 다양한데, 10~40 m까지 발달한다.

2) 이차 부화대

이차 부화대는 주로 각력 파이프 내에 발달하며, 트라피체 동쪽의 반암 내에서도 소규모로 발달한다. 파이프 내에서 유화물은 휘동석, 코벨라이트, 다이게나이트 및 부분적으로 또는 완전히 황동석으로 교대되거나 황철석을 코팅하는 형태로 발달한다. Cc-Cv(휘동석-코벨라이트): Cp(황동석)의 비는 1:1.5 이며, 부화대의 두께는 50~200 m에 달한다. 반암에서는 반동석이 나타나기도 하는데, 이 때 Cc-Cv: Cp 비는 1:2 이다. 부화대의 두께는 20~125 m 까지이며, 사질 퇴적층에서 주로 발달한다.

3) 전이대

이차 광물과 부화대가 발달하는 각력대에 주로 나타나는데, 얇은 평행층과 작은 노듈로서 나타난다. 황동석과 표성기원(supergene)의 동유화물의 혼합이 특징이며, Cc-Cv: Cp 비는 1:3이다.

4) 초생 광화대

일차 광화작용은 각력 파이프의 최하부(Fig. 10a, b), 반암의 상부에서 나타나며, 황철석, 황동석, 소량의 반동석 및 휘수연석으로 구성된다. 부수광물로는 자철석, 자류철석, 석영, 경석고 및 방해석 등이 있다. 각력에서 황철석:황동석의 비율은 2.5이며, 100-300 m 깊이까지 발달한다. 반암에서는 1.5:1이며 두께는 300 m까지 발달한다. 반암에서는 석영-황동석-황철석을 함유한 세맥들이 나타나는 것이 특징이다(Fig. 10c, d).

5) 산화동대

산화동대는 각력대의 서쪽 및 북쪽에서 나타난다(Fig. 11). 산화동대의 광화작용에서 광석광물로는 흑동석, 적동석, 공작석, 남동석 및 크리소콜라 등이 나타나며, 휘동석, 코벨라이트 및 반동석의 잔존물들도 나타난다. 지표면과 평행하게 20~100 m까지 연장된다.

6) 혼합대

이 구역은 산화대와 거의 같은 위치에서 산화대와 거의 수평한 층준에 한정되며, 50~75 m까지 연장된다. 산화물과 동이 혼합되어 나타나는 것이 특징이다(Fig. 12).

각력 파이프와 서 트라피체 반암에 대하여 분류치(isovalue)를 통한 모델링이 수행되었다. 각력 파이프의 경우 광체의 크기를 900×400 m, 품위 >0.10% 동, 축 방향은 북동-남서, 가행최저품위는 크기를 600×300 m

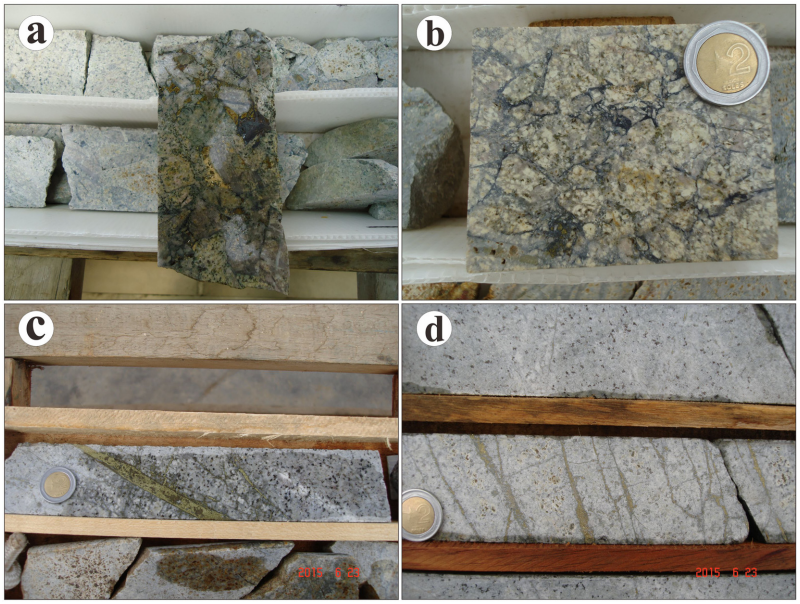

Fig. 10. Photos of core sample of Trapiche Cu-Mo deposit. (a) specularite and chalcopyrite in breccia pipe; (b) magnetite bearing veins in breccia pipe; (c) chalcopyrite bearing veins in porphyry; (d) epidote veins in porphyry.

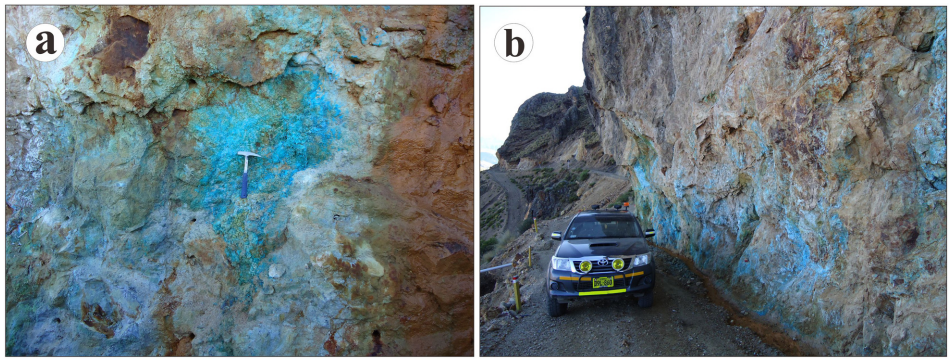

Fig. 11. (a) and (b) shows contact zone between breccia pipe and copper oxide ores.

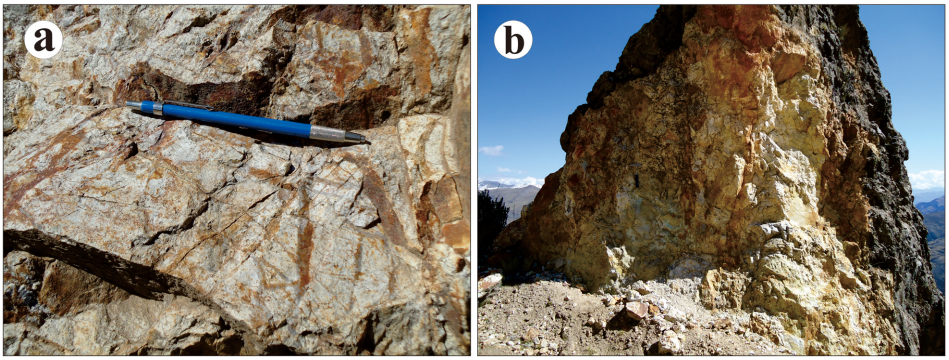

Fig. 12. Stockwork vein (a) and highly altered zone (b).

>0.5% Cu, 축 방향은 동-서로 설정했다. 여기에 300×110 m, 180×55 m의 품위 >0.7% Cu 작은 광체들을 추가로 설정했다. 서 트라피체 반암의 경우 가행최저품위를 >0.10% Cu, 크기: 300×150 m, 단면은 >0.5%, 170×150 m 로 가정하였다. 그 결과 Cu 분포는 가행최저품위를 0.10% Cu로 했을 때, 동-서 방향으로 신장된 타원체 모양을 보였으며, 평균 길이는 1.10 km, 너비는 0.80 km 이다(Fig. 13).

4. 변질작용

이 지역의 열수변질은 길이 2.5 km에 너비 2.0 km에 해당되는 지역에 분포되어 있으며, 주로 반암 및 각력파이프에 의해 형성되었다(Fig. 14).

각력 파이프의 변질작용은 수직적인 변화를 보여주고 있다. 중앙 심부에서는 칼크-나트륨(calc-sodic) 변질로서 석영-자철석-녹니석-녹섬석 등이 나타난다. 이 외에도 트라피체 광상지역에서는 다음과 같은 변질대들이 발달하고 있다; 석영, 정장석, 경석고, 흑운모 등의 광물로 구성된 약한 K-변질대(potassic alteration), 경제성이 높은 광화대; 녹니석과 황철석으로 구성된 녹니석질 변질대; 상부에서는 석영, 견운모, 일라이트로 구성된 필릭 변질대(phyllic alteration)가 중첩되어 발달하며, 경제성 있는 광화대; 강한 산화대를 형성시킨 상부의 점토질 변질대(argillic alteration)에서는 광화작용이 나타나지 않는다. 트라피체 동부에서 산출하는 석영 몬조나이트 반암은 초기에 형성된 K-변질대를 보여주는데, 필릭 변질대에서 나타나는 열극들과 중첩되어 나타나기도 한다. 광구지역의 서쪽, 북서쪽, 그리고 북쪽 주변에서 석회질 규산염의 퇴적물과 혼펠스가 발달하고, 관입한 화강섬록암에서는 약한 프로필리틱 변질대(prophylitic alteration)가 발달한다. 산화동은 서쪽이나 북쪽 모든 곳에서 복잡한 표성(supergene)과정의 결과로서 나타났으며, 일반적으로 산화물들은 스카른 지역이나 관입지역, 강한 점토질 변질대의 퇴적암 지역과 관계되어 나타난다.

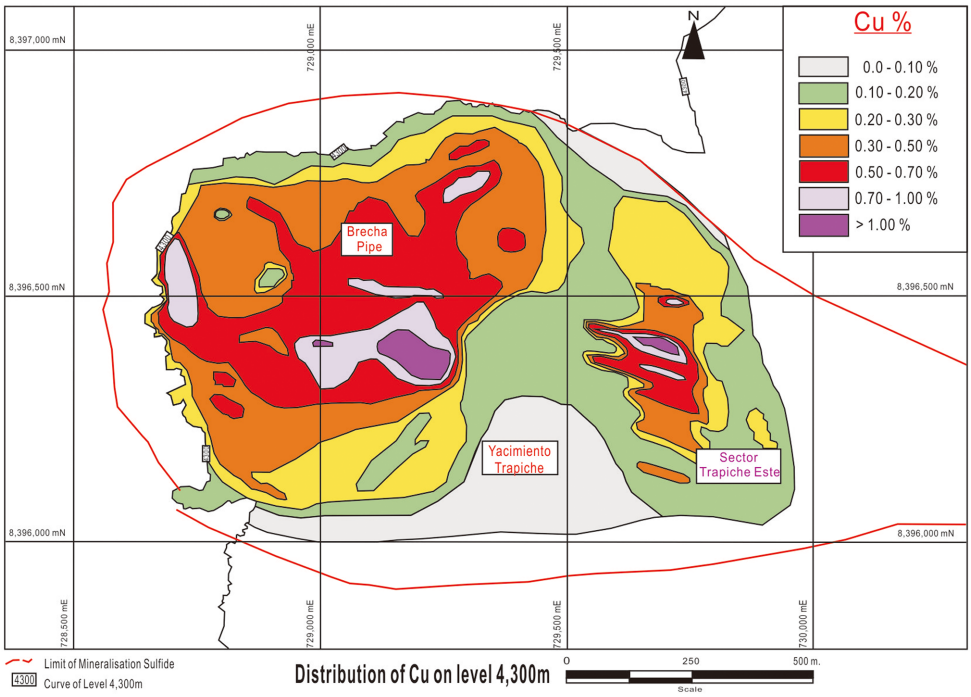

Fig. 13. Copper isovalue contours displaying its ellipse shape of Cu grades.

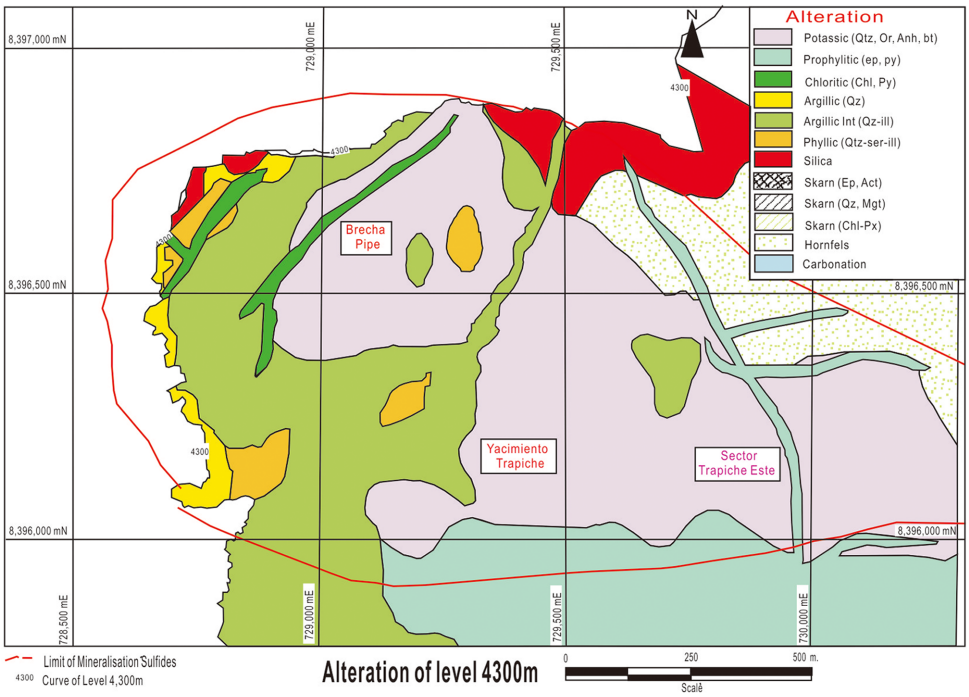

Fig. 14. Simplified map of Trapiche Cu-Mo deposit showing the alteration zones.

5. 결 론

트라피체 프로젝트는 현재 탐사단계 중 후기(Advanced exploration)단계의 프로젝트이며 안다우아일라스-야우리 광상구 연변에 나타나는 다양한 반암 광상 중 일부라고 볼 수 있다. 이 광상은 몬조나이트 반암의 관입과 관계가 있으며, 또한, 올리고세 각력 파이프와 밀접한 관계를 가지고 있는 광상이다. 광화작용은 일차 유화광물인 황철석, 황동석, 반동석 및 휘수연석으로 구성된다. 2차 유화광물인 휘동석, 코벨라이트, 다이게나이트가 산출되며 산화동으로서 공작석, 흑동석, 적동석등이 산출된다. 침출작용(lixiviation)이나 부화과정 결과로서, 광화작용은 비전형적인 누대구조를 보여주기도 한다. 각력과 반암이 나타나는 구역에서는 수직적인 누대구조를 보여주는데, 북쪽 인근에서는 침출대, 2차부화대, 전이대 및 초생광화대가 나타나고 광상의 서쪽에서는 산화대 및 혼합대가 좁게 나타난다. 광상의 추정자원은 920 Mt @ 0.41% Cu이며 한계품위는 0.15%로 산정하고 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 주요사업인 “해외/북한/북극권 광물자원탐사 및 부존잠재성 평가 (15-3217)” 과제에서 지원되었습니다. 또한, 트라피체 광상에 대한 자료를 제공해준 페루 지질광업제련연구소(INGEMMET) Jorge Acosta Ale와 Eder Villarreal Jaramillo, 허드배이 광산회사(Hudbay, Constancia mine)의 Carlos Salazar와 Engels Trejo에게 감사를 드린다.

References

Clark, A.H., Farrar, E., Kontak, D.J., Langridge, R.J., Arenas, M.J., France, L.J., McBride, S.L., Woodman, P.L., Wasteneys, H.A., Sandeman, H.A. and Archibald, D.A. (1990) Geologic and geochronologic constraints on the metallogenic evolution of the Andes of Southeastern Peru: Economic Geology, v.85, p.1520-1583.

Fernando Llosa Tejada, Javier Veliz Mamani, Braulio Ito Espinoza, 2013, Descubrimiento y Geologí Pófido Cu - Mo Trapiche Apuríac - Perú: Instituto De Ingenieros De Minas Del Perú., 13p.

Grant, J.N., Halls, C., Sheppard, S.M.F. and Avila, W. (1980) Evolution of the porphyry tin deposits of Bolivia, Min. Geol. Spec. v.8, p.151-173.

Mlynarczyk, M.S.J. and Williams-Jones, A.E. (2005) The role of collisonal tectonics in the metallogeny of the Central Andean tin belt: Earth and planetary Science Letters, v.240, p.656-667.

Rosenbaum, G., Giles, D., Saxon, M., Betts, P.G., Weinberg, R.F. and Duboz, C. (2005) Subduction of the Nazca Ridge and the Inca Plateau: Insights into the formation of ore deposits in Peru: Earth and planetary Science Letters, v.239, p.18-32.

Stoll, W.C. (1965) Metallogenic provinces of South America: mining magazine, 112, 22-33 and 90-99.