

논문

호주 원생대암에 배태된 금광상의 특성

Leon Bagas¹⁾ · 고 상 모²⁾

- 1) 서호주대학 지구환경학부
- 2) 한국지질자원연구원 광물자원연구본부

호주의 선캄브리아기 강괴는 서호주, 북호주 및 남호주 지역에 주로 분포한다(그림 1, Myers, 1990). 서호주와 북호주 강괴는 원생대 패터슨 조산운동(Paterson orogeny)에 의해 분리되었고, 서호주와 남호주 강괴는 1300-1100 Ma 알바니-프레셔 조산운동(Albany-

Fraser orogeny)에 의해 분리되었으며, 서호주 강괴의 서편 가장자리에서는 1080 Ma에 Pinjarra 조산대가 위치한다(그림 1). 이러한 선캄브리아기 지역과 지구조 단위는 현생대 "Tasmanides" 조산대의 서편에 위치한다(Direen and Crawford, 2003).

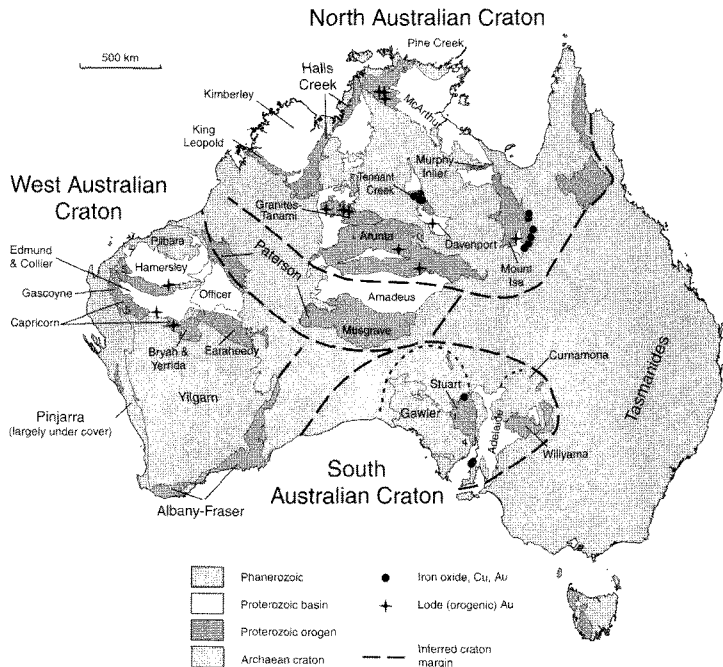


그림 1. 호주 현생대, 원생대 및 시생대 지역의 분포 및 원생대 금광상 분포(Jacques et al., 2002).

호주 원생대 진화를 설명하는 지구조환경은 수렴경계부 환경과 판내부지구조환경이다 (Betts and Giles, 2006). 산성마그마티즘이 섭입대 상위의 판가장자리와 보통 수반되지만 맨틀 플룸의 화성산물은 다양한 산성암질을 포함하며 따라서 전체적인 마그마 범위는 쌍모식 조성을 나타낸다(Ernst and Buchan 2003). 맨틀 플룸과 관련된 산성암질 마그마티즘의 예는 남호주 강괴에 있는 힐바라(Hilbara) 화강암계열로서 1590 Ma의 시기를 나타낸다 (Betts et al., 2002).

호주 강괴의 초기 지질학적 역사를 기록한 주요 지구동력학적 사건은 약 1800 Ma에 있었던 북호주 강괴와 서호주 강괴의 충돌로 시작되었다. 이는 호주 전역으로 확장된 조산운동 동안 일어났으며 Capricorn-Rudall-Stafford-Early Strangways 조산운동을 포함한다.

호주 원생대암에 배태된 금광상은 호주에서는 매우 풍부한 자원을 접하며 어떤 광상은 세계적으로도 대규모 광상에 속하기도 한다. 가장 일반적인 광상형은 조산대 및 관입활동과 관련된 광화계와 비조산마그마티즘과 관련된 광화계이다. 조산대 및 관입과 관련된 광화계는 1800-1765 Ma 사이 일어난 충돌 및 부가 사건의 결과로서 이 사건은 북호주 강괴와 남호주 강괴 및 서호주 강괴의 결합을 초래시켰다. 광화계는 일반적으로 화강암질암과 시간적으로 수반되거나 성인적 관계는 모호하다. 비조산 마그마티즘과 관련된 광상은 다양한 범위의 열수광상을 포함하며 가장 경제적인 광상형은 산화철-동-금 광상(Iron Oxide-Copper-Gold Deposit: IOCG)이다. 이 가장 대표적인 이 유형 광상은 남호주 강괴에 위치하는 올림픽댐(Olympic Dam) 광상이며 형성시기는 1580 Ma로 알려져 있다.

호주의 원생대 광물계 (Australia's Proterozoic mineral system)

호주에서는 상당한 양의 금 자원이 원생대암에 배태되며 올림픽댐 광상과 같은 몇몇 세계적 규모의 광상이 분포한다. Solomon 등(2000)은 호주의 원생대 광화계에 대해 상세한 보고를 한 바 있으며, 이 논문에서는 두 유형인 조산대 및 관입과 관련된 광화계와 열곡이나 비조산성 마그마티즘과 관련된 광화계로 구분하여 요약하였다(그림 1).

조산대 금광상 (Orogenic gold deposit)

조산대 금광상은 명백하게 금광상의 한 분류로서 Groves 등(1998)과 Goldfarb 등(2001)에 의해 정의 되었으며, 충돌과 부가 지구조운동과 시공간적으로 관련되어 있다. 이 유형 광상은 세계적으로 2100-1800 Ma(Goldfarb et al., 2001) 동안 형성되었다. 호주에서 이 유형 광상은 1795 Ma에 북호주 강괴, 서호주 강괴 및 남호주 강괴에서 형성되었으며, 이는 세 강괴에서의 충돌 및 부가 지구조를 반영한다. 이 유형 광상의 모암은 준 지각 심도에서 변형되고 변성 되었고 심부 지각구조에 영향을 받았으며, 화강암과 항상 공간적으로 수반되지는 않는다 (Goldfarb et al., 2001). 그러나 금 광화작용과 화강암의 성인적 및 시간적 관련성은 명확하게 설명되지 않고 있다.

북호주 강괴에서의 조산대 금광상은 Pine Creek 조산대, Granites-Tanami 조산대, Tennant Creek Inlier의 Tavenport 지역, Arunta 조산대에 위치한다. 1800 Ma 경에 Pine Creek 조산대, Granites-Tanami 조산

대와 Halls Creek 조산대 금광화작용과 마그마티즘이 북호주 강괴가 Halls Creek 조산대를 따라 발달하는 Kimberley 분지와와의 충돌 이후 광범위하게 형성되었다(Huston et al., 2007). 이는 이러한 지역에서의 금의 도입이 동시기의 지구조운동과 관련됨을 지시한다.

비조산 마그마티즘과 관련된 금광상 (Gold deposit associated with anorogenic magmatism)

비조산 마그마는 다양한 마그마틱 및 열수광상을 수반한다. 그러한 마그마는 불호정원소인 Ti, P, Y, Nb, K, Th, U, F, Ba, REE가 부화되어 있으며 고알루미나질 및 고알카리질 화강암을 생성하며 그라이젠 및 후기마그마 Sn, W, Zn, Cu, U 및 Nb 광화작용을 포함한다(Pirajno, 1992). 이 범주에 속하는 열수광상은 경제적으로 중요한 다금속 및 Au-Cu 광상과 IOCG형 광화계를 특징적으로 포함한다(Porter, 2000).

IOCG 형 광화계(Hizmann et al., 1992; Oreskes and Hitzman, 1993)는 호주에서는 거대한 규모의 올림픽담 광상이 대표적이다. 이 광상형은 일반적으로 Fe, P 및 F가 풍부하고 광범위한 알카리 변성교대작용이 초래되었다(Hizmann et al., 1992; Oreskes and Hitzman, 1993). 전형적으로 IOCG 열수계는 4-6km 지각 심부에서 형성되며 휘발성이 풍부한 알카리 마그마의 표출이다(Hizmann et al., 1992). 그들의 산상은 광범위한 형성시기범위(1800-1100 Ma)를 보이며 열개 사건과 로디니아(Rodinia) 초대륙의 부가 및 붕괴와 관련되는 것 같다(Unrug, 1997). 호주의 주요 광상생성기는 1700-1600 Ma이며(Solomon et al., 2000), 이 시기가 중요한 열수계를 형성시킨 시기로 해석된다. 이러한 열수계는 범지구적

사건의 일부이며(Thorkelson et al., 2001) 두꺼운 퇴적층 형성, 대륙 엣지성 및 비조산성 산성암질 마그마티즘을 초래시킨 열곡 또는 열개된 대륙 연변부 지구조환경을 가진다.

올림픽담 광상은 1.8% Cu, 500 g/t U₃O₈, 0.5 g/t Au 및 3.6 g/t Ag 품위의 광석을 기준으로 자원량은 600 Mt 이상으로 알려져 있으며(Reynolds, 2000), 세계적 자원량은 1% Cu, 0.5 g/t Au 및 400 g/t U₃O₈ 품위 기준 약 31,800 Mt이다(Williams et al., 2005). 이 지역에 분포하는 대부분의 선캄브리아기 암석은 마그마호의 후기 부가에 의해 진화된 것으로 생각되는 초생 원생대 지각으로 구성된다(Ferris et al., 2002). 이 암석들은 중기 원생대 Hiltaba 화강암 슈트에 의해 관입된다. Ferris 등(2002)은 화강암 관입과 수반된 마그마티즘이 대륙내부 배호 확장에 의한 것으로 해석하였다.

올림픽담 광상은 Hiltaba 화강암 슈트의 일부인 Roxby Downs 화강암(1590 Ma)체 내 발달된 올림픽담 각력복합체(Olympic Dam Breccia Complex: ODBC)에 배태되며, 이 화강암은 A형 화강암 계열에 속하는 조립질 섬상 화강암이다(Creaser, 1989; Reeve et al., 1990; Johnson and Cross, 1995). ODBC 및 Roxy Downs 화강암은 Stuart Shelf의 후기 원생대 및 캄브리아기 퇴적층 300m 하부에 정치되어 있다. 이 광상은 Cu, Au, Ag, U 및 REE를 함유하는 여러개의 적철석-석영 암맥상 각력암체로 특징된다. Au 및 Ag는 자연금속 상태로 산출하며, 주요 우라늄 광물은 코피나이트(coffinite), 우라니나이트 및 브래너라이트(brannerite)이고 REE 광물은 모나자이트, 제노타임 및 플로엔사이트(floencite)이다. REE 함량은 각력암의 적철석 함량에 비례한다. 광화된 각력암체는 폭 약 1.5km이고 연장이 약 5km로서 북동 방향으로 발달되며 중앙부 이질암상의 각력상인 적철석-석영 미세각력암으로

부터 가장자리로 갈수록 각력화된 화강암으로 이화된다. 이질암상의 각력암은 장경 10cm 이하의 압편으로 주로 구성되며 압편은 적철석, 화강암편(석영-적철석-견운모-능철석-녹니석 기질부), 형석, 능철석, 중정석, 황철석 및 화산 쇠설암편으로 구성된다. 이질각력암은 적철석 미세각력암과 세립질 괴상 적철석-석영 각력암으로 이화된다(Cross et al., 1993; Haynes et al., 1995). 각력의 형성은 천부에서 고압 유체의 대규모 유동으로 초래되는 것으로 해석하고 있다(그림 2). 광상의 상위부에 퇴적성 중정석 및 적철석의 존재는 지표 부근의 분기활동을 지시한다(Haynes et al., 1995).

열수변질작용은 광상 외곽의 단열이 발달된 화강암 내 녹니석-적철석대(흑운모-자철석)로부터 광상 중앙부 각력암체 내의 견운모-녹니석-적철석대와 견운모-적철석대로 변한다(Davidson, 2002). 광범위한 Fe-변성교대작용에 의해 광석들이 높은 Fe 함량을 나타내며 이는 광화유체가

염수로부터 유래됨을 지시한다(Mckibben and Hardie, 1997). 각력계 상위부의 붕괴가 유화 광물의 침전을 초래시켰다(Haynes et al., 1995). 두 가지 근원의 광화유체가 제안되었으며(Orekes and Einaudi, 1992), 첫째 마그마 기원의 초기 유체가 많은 양의 자철석을 형성시켰으며, 이 유체는 400°C의 고온과 높은 $\delta^{18}\text{O}$ (10%)를 나타내며, 둘째 후기 유체는 적철석을 형성시켰으며, 보다 낮은 온도(200-400°C)와 $\delta^{18}\text{O}$ (<9%)와 7-42 wt%의 광범위한 염 농도에 의해 특징된다.

Davidson(2002)은 올림픽담 광화작용은 높은 지열구배를 가지는 단층차폐(fault seal) 아래 초과압력 지역에서 유래된 금속을 함유한 염유체가 높은 투수성을 가진 단층이나 각력암을 따라 낮은 투수성을 가진 지역으로 상승하여 일어난 감압(decompression)과 관련된다(그림 2). Haynes 등(1995)은 심부원의 마그마수와 천부의 보다 차고 환원상태의 천수의 혼합에 의해

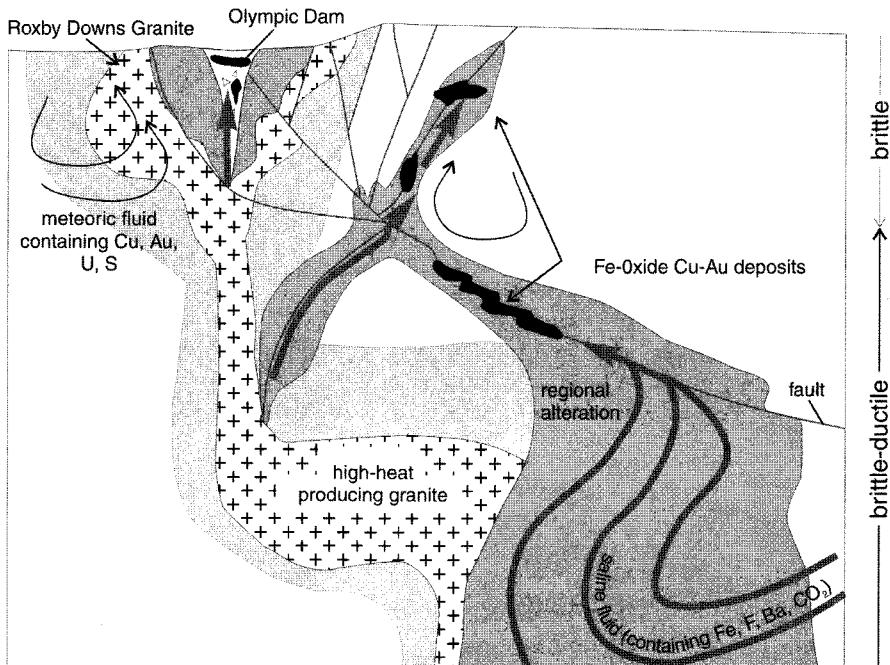


그림 2. 올림픽 담 광상의 형성 모델 (Davidson 2002; Solomon et al., 2000).

광화작용이 초래되었음을 제안 하였다. 이 모델에서는 지하수가 Cu-Au-U-S의 근원이며 Fe-F-Ba-CO₂를 가진 마그마수가 혼화하여 각력 암체에 공급 되는 과정을 포함한다.

토론 및 결론 (Discussion and conclusions)

1800-1750 Ma 동안 북호주, 남호주 및 서호주 강괴의 결합은 북호주 강괴에 많은 조산대형 금광상을 광범위한 지역에 형성시켰다(Bagas et al., 2008). 이러한 조산대형 금광상의 모암은 전형적으로 준지각 심도에서 변형작용과 변성작용을 받았으며 광화계는 산성 관입활동과 관련된다(Bagas et al., 2008).

Pine Creek(Rasmussen et al., 2006)과 Granites-Tanami 조산대(Bagas et al., 2007; Huston et al., 2007)에서의 금 광화작용과 마그마티즘은 거의 동시기(1800 Ma)이다.

IOCG형 광상은 인장성 환경에서 비조산성 쌍모식 알카리 마그마티즘과 관련된다. 이 광화계는 Fe, P, F이 풍부하며 모암은 알카리 변성교대작용이 광범위하게 초래된다(Hitzman et al., 1992; Orekes and Hitzman, 1993). 전형적으로 IOCG 열수계는 4-6km 심도에서 형성되며 휘발성이 우세한 알카리 마그마의 표출이다(Hitzman et al., 1992). 여러 IOCG 광상은 1800-1100 Ma의 광상생성기를 나타내며, 범지구적으로 일어난 열개사건과 초대륙의 붕괴 및 결합과 관련된다. 원생대 초대륙인 로디니아의 결합은 맨틀흐름에 단열달개 역할을 하여 열을 축적시킴으로써 지각응용 및 대륙지각의 열개를 초래시켜 지각 천부에 광역적인 열수계를 형성 시켰다. Barton 및 Johnson(1996)은 IOCG 광화작용은 원생대 및 현생대 확장환경에서 일반적으로 일어날 수 있음을 제안하였다. 이들은 이 유형 광상에 기여한 염수유체는 증발암

으로 유래되었다고 생각하였다. 그들은 증발암 원으로부터 형성 된 홀로세 열수 산화철광상과 저위도 지역에 분포한 중생대 IOCG 광상을 예로서 제시하였다. 이들이 제안한 증발암원 모델은 열수유체의 순환이 마그마 열원에 의해 초래되고 화성암류가 금속의 근원이며 금속의 이동이 증발암으로부터 공급된 염화물에 의해 지배된다는 것이다(그림 2). 부가적으로 광화작용과 수반된 광범위한 Na-변질작용은 증발암과 관련되며 많은 양의 Na를 열수유체에 공급하였다.

참고문헌

- Bagas, L. (2004) Proterozoic evolution and tectonic setting of the northwest Paterson Orogen, Western Australia. *Precambrian Res.* 128, 475-496.
- Bagas, L., Huston, D.L., Anderson, J. and Mernagh, T.P. (2007) Paleoproterozoic gold deposits in the Bald Hill and Coyote areas, Western Tanami, Western Australia. *Mineralium Deposita* 42, 127-144.
- Bagas, L., Anderson, J.A.C. and Bierlein, F.P. (2008) Palaeoproterozoic evolution of the Killi Formation and orogenic gold mineralization in the Granites Tanami Orogen, Western Australia. *Ore Geology Reviews.*
- Barton, M.D. and Johnson, D.A. (1996) Evaporitic source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology* 24, 259-262.
- Betts, P.G. and Giles, D. (2006) The 1800-1100 Ma tectonic evolution of Australia. *Precambrian Res.* 144, 92-125.

- Betts, P.G., Giles, D., Lister, G.S., Frick, R.L., 2002. Evolution of the Australian lithosphere. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49, 661-695.
- Creaser, R.A. (1989) Geology and petrology of Middle Proterozoic felsic magmatism of the Stuart Shelf, South Australia. LaTrobe University, Melbourne Australia Ph.D Thesis (Unpublished).
- Cross, K.C., Daly, S.J. and Flint, R.B. (1993) Mineralisation associated with the GRV and Hiltaba Suite Granitoids. Olympic Dam Deposit. In: Drexel, J.F., Preiss, W.V., Parker, A.J. (Eds.), *Geol. of South Aust. Bull.* 54, 132-138.
- Davidson, G.J. (2002) The shallow to mid-crustal family of iron oxide copper-gold deposits: size, alteration and mechanisms of formation. In: Cooke, D.R., Pongratz, J. (Eds.), *Giant ore deposits: characteristics, genesis and exploration*, CODES Special Publication 4, 79-102.
- Direen, N.G. and Crawford, A.J. (2003) The Tasman Line: where it is, what it is, and is it Australia's Rodinian breakup boundary? *Aust. J. Earth Sci.* 50, 491-502.
- Ernst, R.E. and Buchan, K.L. (2003) Recognizing mantle plumes in the geological record. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 31, 469-523.
- Ferris, G.M., Schwartz, M.P. and Heithersay, P. (2002) The geological framework, distribution and controls of Fe-oxide Cu-Au mineralisation in the Gawler Craton, South Australia. In: Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective*. PGC Publishing, Adelaide, 9-31.
- Goldfarb, R.J., Groves, D. I. and Gardoll, S. (2001) Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geol. Rev.* 18, 1-75.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. and Robert, F., (1998) Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.* 13, 7-27.
- Haynes, D.W., Cross, K.C., Bills, R.T. and Reed, M.H. (1995) Olympic Dam ore genesis: a fluid mixing model. *Econ. Geol.* 90, 281-307.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N. and Einaudi, M.T. (1992) Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits. *Precambrian Res.* 58, 241-287.
- Huston, D.L., Vandenberg, L.C., Wygralak, A., Mernagh, T., Bagas, L., Crispe, A., Lambeck, L., Cross, A., Fraser, G., Williams, N., Worden, K., Meixner, A., Goleby, B., Jones, L., Lyons, P. and Maidment, D. (2007) Lode gold mineralization in the Tanami region, northern Australia. *Miner. Depos.* 42, 175-204.
- Jaques, A.L., Jaireth, S. and Walshe, J.L. (2002) Mineral systems of Australia: an overview of resources, settings and processes. *Aust. J. Earth Sci.* 49, 623-660.

- Johnson, J.P. and Cross, K.C. (1995) U-Pb geochronological constraints on the genesis of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, south Australia. *Econ. Geol.* 90, 1046-1063.
- McKibben, M.A. and Hardie, L.A. (1997) Ore-forming brines in active continental rifts. In: Barnes, H.L. (Ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Third edition. John Wiley & Sons Inc., New York, 877-936.
- Myers, J.S. (1990) Precambrian tectonic evolution of part of Gondwana, southwestern Australia. *Geology* 18, 537-540.
- Oreskes, N. and Einaudi, M.T. (1992) Origin of hydrothermal fluids at Olympic Dam: preliminary results from fluid inclusions and stable isotopes. *Econ. Geol.* 87, 64-90.
- Oreskes, N. and Hitzman, M.W. (1993) A model for the origin of Olympic Dam-type deposits. *Geol. Assoc. Can. Spec. Pap.* 40, 615-633.
- Pirajno, F. (1992) *Hydrothermal Mineral Deposits*. Springer-Verlag, Berlin.
- Porter, T. (Ed.) (2000) *Hydrothermal iron-oxide, copper-gold & related deposits-a global perspective*. Aust. Min. Found. Adelaide.
- Rasmussen, B., Sheppard, S. and Fletcher, I.R. (2006) Testing ore deposit models using in situ UPb geochronology of hydrothermal monazite: Paleoproterozoic gold mineralization in northern Australia. *Geology* 34, 77-80.
- Reeve, J.S., Cross, K.C., Smith, R.N. and Oreskes, N. (1990) Olympic Dam copper-uranium-gold-silver deposit. In: Hughes, F.E. (Ed.), *Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea*. Australas. Inst. Min. Metall. Monog. Monogr. 14, 1009-1035.
- Reynolds, L.J. (2000) Geology of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag-REE deposit. In: Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and related deposits: a global Perspective*, Aust. Min. Foundation, Adelaide, 93-104.
- Solomon, M., Groves, D.I. and Jaques, A.L. (2000) The geology and origin of Australia's mineral deposits. Centre for Ore Deposits Research, University of Tasmania and the Centre for Global Metallogeny, University of Western Australia, 1001 p.
- Thorkelson, D.J., Mortensen, J.K., Davidson, G.J., Creaser, R.A., Perez, W.A. and Abbott, J.G. (2001) Early Mesoproterozoic intrusive breccias in Yukon, Canada: the role of hydrothermal systems in reconstructions of North America and Australia. *Precambrian Res.* 111, 31-55.
- Unrug, R. (1997) Rodinia to Gondwana: the geodynamic map of Gondwana supercontinent assembly. *Geol. Soc. Am. GSA Today* 7, 1-6.
- Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontbote', L., De Holler, A., Mark, G., Oliver, N.H.S. and Maschick, R. (2005) Iron oxide copper gold deposits: geology, spacetime distribution and possible modes of origin. *Econ. Geol.* 100th Anniv. Vol., 371-405