

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/264131070>

Geology and Uranium Deposits of the Athabasca Basin, Saskatchewan

Article in *Economic and Environmental Geology* · December 2011

DOI: 10.9719/EEG.2011.44.6.541

CITATIONS

0

READS

730

4 authors, including:



[Myeong-Jong Yi](#)

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

108 PUBLICATIONS **1,582** CITATIONS

SEE PROFILE

캐나다 사스카툰주 아타바스카분지의 지질 및 우라늄광상

신동복^{1*} · 이명종² · 유영준³ · 조성준²

¹공주대학교 지질환경과학과, ²한국지질자원연구원, ³한국광물자원공사

Geology and Uranium Deposits of the Athabasca Basin, Saskatchewan

Dongbok Shin^{1*}, Myeong-Jong Yi², Young-June You³ and Seong-Jun Cho²

¹Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Kongju, 314-701, Korea

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

³Korea Resources Corporation, Dongjak-gu, Seoul 156-706, Korea

1. 서 언

오늘날 전 세계적인 에너지 자원 확보 경쟁은 국가 발전과 존망의 중요한 요소로서 범정부차원의 적극적이고 전략적인 대책과 투자가 필요한 상황이다. 특히, 2011년 현재 국내 총 전력생산의 약 40% 가량을 원자력이 차지하고 있고, 향후 원전 비중이 지속적으로 증대되어 2022년경에는 약 50% 까지 이를 것으로 예상되어 우라늄 원료 확보는 대단히 중요한 국가적인 현안이다.

국내에서는 지난 1980년대 중반까지 우라늄자원 확보를 위하여 옥천층군을 대상으로 지질조사 및 지화학 탐사, 항공 및 차량 방사능 탐사, 정밀 광상조사, 시추 탐사 등의 조사를 수행하였다. 최근에도 국내 유망 우라늄광화대에 대한 조사가 이루어지고 있으나 우라늄 광이 평균 0.04% U_3O_8 의 저품위로 재확인 되면서 아직까지 개발이 이루어지지 않고 있으며 현재까지 우라늄을 전량 수입에 의존하고 있다. 수년전부터는 외국계 회사가 국내 유망광화대에 대한 우라늄 탐사 및 개발에 관심을 가지고 추진 중에 있다.

우라늄 광상은 14개 유형이 알려져 있으며(OECD/NEA & IAEA, 2008), 현재 주로 생산되는 광상형은 부정합관련형, 각력복합체형, 사암형 등이다. 특히 부정합관련형 우라늄광상에 대한 적극적인 탐사 및 개발이 최근 캐나다를 중심으로 활발히 전개되고 있으며, 이와 관련 국내 기업들도 지난 2000년대 후반부터 칸

소시움을 형성하여 2011년 현재 캐나다 사스카툰(Saskatchewan)주 북서부에 위치한 아타바스카분지(Athabasca Basin)에 발달하는 부정합관련형 우라늄광상 탐사 및 개발에 적극적으로 참여하고 있는 상황이다. 이 지역 우라늄광상은 고품위이면서 세계 최대 규모의 매장량을 보여주며 캐나다 우라늄 생산의 중심을 이룬다. 가장 대표적인 광상으로는 시가레이크(Cigar Lake) 광상을 들 수 있는데 875 kt 광석이 평균 15% 품위를 보이며, 맥아더리버(McArthur River)는 1,017 kt 광석의 평균 품위가 22.28%에 이른다. 이들 두 광상을 포함한 아타바스카분지 내 현재까지 개발된 30여개 전체 우라늄광상의 품위는 1.97%로 보다 저품위이나 이는 캐나다와 호주의 다른 우라늄광상 보다 현저히 고품위를 나타낸다(Table 1).

본 연구에서는 고품위 우라늄광상으로서 국내 기업

Table 1. Summary of uranium resources in major Paleozoic and Mesoproterozoic districts of northwestern Canada and Australia (data from Gandhi, 2007)

District	Ore (kt)	U (%)	U (t)
Athabasca Basin	29,811	1.97	587,063
Beaverlodge district	15,717	0.17	25,939
Thelon Basin	11,989	0.41	48,510
Hornby Bay basin	900	0.30	2,700
Kombolgie Basin	87,815	0.32	283,304
Paterson Terrane	12,200	0.25	30,500
Olympic Dam	2,877,610	0.03	863,283

*Corresponding author: shin@kongju.ac.kr

을 포함하여 세계적으로 많은 주목을 받고 있는 캐나다 부정합관련형 우라늄광화대인 아타바스카분지에 대한 지질 및 광상에 대해 소개하고 이를 통해 부정합관련형 우라늄광상에 대한 이해와 관심을 증대시키고자 한다.

2. 지 질

2.1. 분지 및 광상

캐나다 사스카툰주 북서부에서 알버타(Alberta)주에 걸쳐 분포하는 85,000 km² 면적의 아타바스카분지는 하부의 선캠브리아기 변성기반암과 상부의 원생대 역질사암으로 구성되어 있으며 광상은 두 지층 사이의 부정합면을 중심으로 발달하고 있다(Fig. 1). 아타바스카분지는 분지성장과정에서의 성장단층과 맨틀운동에 따른 광범위한 지각침하에 의해 발달된 것으로 암층서와 고수류 연구결과 4차례의 퇴적운동이 있었고, 원래 5-6 km의 충후를 이루었으나 침식에 의해 현재 최대 1.5 km 가량이 남아있다. 광상은 대부분 분지의 동쪽 연변부에 걸쳐 발달한다(Fig. 2)(Jefferson *et al.*, 2007).

캐나다에서 부정합관련형 우라늄광상과 직접적으로 연관되는 가장 오래된 분지는 퀘벡(Quebec) 중심부에 있는 오티쉬(Otish)분지로서 이 분지는 반려암(2,169 Ma: Hamilton and Buchan, 2007)이 관입하고 있다. 반면, 가장 젊은 원생대 분지로는 시블리층군(Sibley Group)(1,537-1,339 Ma: Davis and Sutcliffe, 1985; Franklin, 1978)을 들 수 있다. 우라늄광상으로 주목받

는 아타바스카분지를 포함한 실론(Thelon), 혼비베이(Hornby Bay) 및 엘루(Elu)분지는 1.78-1.5 Ga의 연령을 갖는다(Rainbird *et al.*, 2007). 가장 오래된 연령을 보이는 우라니나이트(1,541 Ma: Creaser and Stasiuk, 2007)는 아타바스카분지 상부의 더글라스(Douglas)층의 연대와 비슷하다. 그리고 맥아더리버와 수에씨(Sue C) 광상은 1,521-1,486 Ma, 시가레이크광상은 1,461 Ma에 해당한다(Fayek *et al.*, 2002b). 이들은 후기 변질작용과 우라늄 재이동(remobilization)이 일어난 시기인 1,350 Ma, 1,176 Ma, 900 Ma, 300 Ma 등의 연대를 보여주기도 한다(McGill *et al.*, 1993; Fayek *et al.*, 2002a). 우라늄 광화작용은 아마도 분지 생성 후 50 Ma 혹은 100 Ma 이상의 시간적 간격을 두고 일어난 것으로 보이며, 탐사의 주요 목표점으로는 구조적으로 재활성화 되었거나 열수변질이 발달된 곳이 될 수 있다.

2.2. 기반암 복합체

기반암은 시생대의 규장질 편마암과 고기 내지 중기 원생대의 변성역암과 규암 그리고 관입암 등으로 구성되며, 특히 흑연질 암석이 발달한다(Annesley *et al.*, 1997). 이들은 대부분 심한 습곡 및 변성작용을 받았다. 기반암내에는 우라늄이 부화된 화강암과 페그마타이트가 포함되어 산출되는데 이들은 변성퇴적암의 고변성 작용이나 부분용융 등에 의해 생성된 것으로 우라늄의 궁극적인 공급원 역할을 한다(Madore *et al.*, 2000).

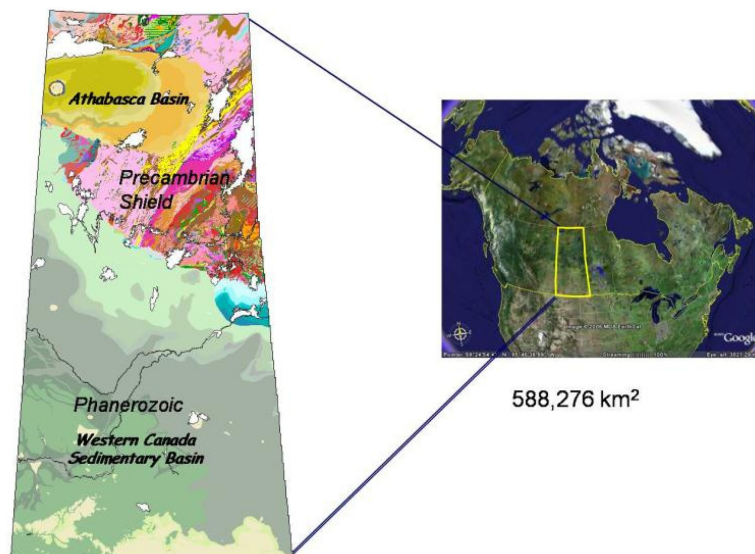


Fig. 1. Location of the Athabasca Basin in Canada.

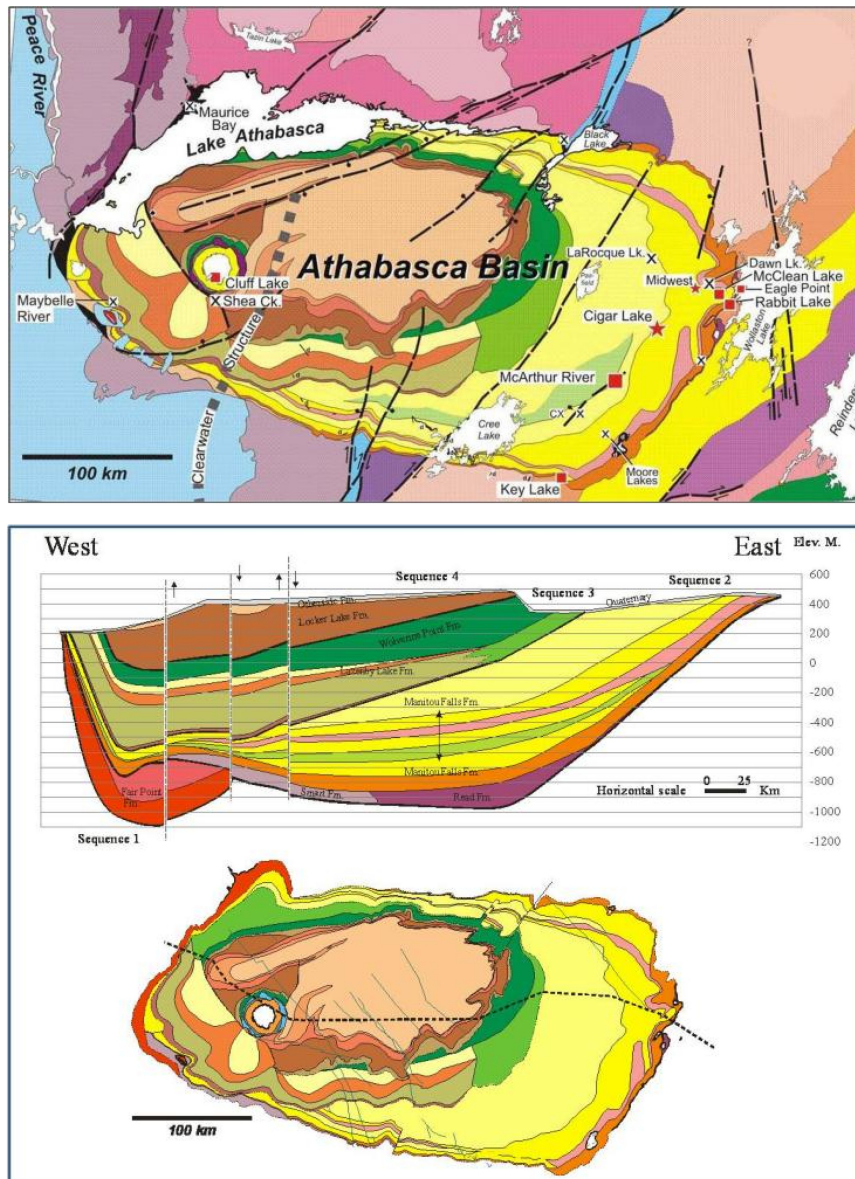


Fig. 2. Geological setting with unconformity-associated U occurrences (above) and lithostratigraphic cross section (below) of the Athabasca Basin (modified from Ramaekers *et al.*, 2007).

주요 우라늄 광물로는 우라니나이트, 모나자이트, 저어콘 및 인회석 등이 있으며, U 외에도 K, Th 및 희토류 원소가 풍부하다(Jefferson *et al.*, 2007). 이들 방사성원소의 붕괴에 의한 열은 광화열수유체의 유동을 촉진시킨 것으로 여겨진다. 흑연질 기반암층은 아타바스카분지에서 가장 중요한 전도체로서 아타바스카 외에도 실론, 콤볼기에(Kombolgie)분지 등에 있는 우라늄광체를 탐사하는데 중요한 열석로서, 변성작용이 집

중되는 구조적으로 약대에 속한다(Thomas *et al.*, 2000). 전도성이 좋을수록 더 좋은 U 광체가 발달하고, 전도성과 광상의 크기 및 품위가 상호 밀접한 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다(Powell, 2007).

2.3. 부정합면

부정합면의 주요 특징으로는 비교적 평편하며 대륙 내 분지에 발달하였으며, 변성작용은 받지 않았고 후

기 고기 원생대 내지 중기 원생대의 연령을 갖는다. 하성작용에 의해 생성된 것으로 대부분 역질 사암으로 구성되어 있다. 이 곳에는 속성작용에 의한 적색층이 발달한다(Ramaekers, 1990; Gall, 1994). 부정합면 부근의 층서는 붉은 적철석과 고령토를 주로 구성되는 고기 표토가 덮고 있으며, 심부로 내려가면서 녹색의 녹니석-일라이트질 암석을 지나 점차 신선한 기반암에 이르게 된다. 부정합면은 측면으로 높은 투수성과 다공성을 갖고 있어 유체가 잘 흐르게 하고 이에 따라 변질작용을 촉진시킴으로써 적철석 외에도 일라이트(K), 녹니석(Fe, Mg) 및 우라늄광물이 형성되기도 한다(Fig. 3a, b).

2.4. 사암층

아타바스카분지에 보존된 쇄설성 퇴적물들은 대체적

으로 95% 이상의 석영과 대부분이 디카이트(dickite)인 3% 미만의 점토질 기질로 구성되어 있고(Fig. 4b) (Wasyliuk, 2002), 소량의 역암내지 이암이 발달한다(Fig. 4c, d). 이들은 평편하고 외관상 비변성대의 특징을 보이나(그림 4a) 광범위한 변질대가 발달되어 있다. 항공 및 지화학탐사 결과 전체적으로 우라늄이 결핍되어 있고(<1 ppm), 부분적으로 Th 이상대가 관찰된다. 역질 사암은 표토나 다금속 우라늄광상 상부에 놓여 있는 것으로 산화환경에 노출되어 육상기원 적색층이 길고 복잡한 속성작용과 열수변질작용을 거치면서 형성되었다(Campbell *et al.*, 2007).

퇴적층 중에 울버린포인트(Wolverine Point)층은 국지적으로 보존되어 있는 염수층으로 인해 뚜렷한 전도성을 나타내며, 방사능도 높은 수치를 보여주는데, 이는 광범위한 우라늄질 인산염 고결물 때문인 것으로



Fig. 3. Core samples of uranium ores consisting mainly of hematite and chlorite developed along the unconformity plane.

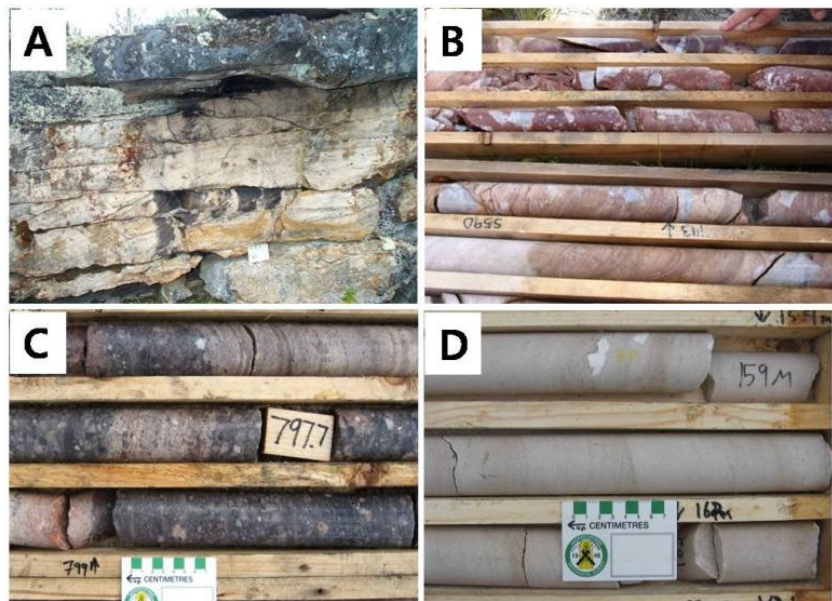


Fig. 4. Outcrop (A) and core samples (B-D) of sandstone, conglomerate, and mudstone constituting the Athabasca Basin.

여겨진다. 이 지층은 전도성과 반대수층 특성으로 인해 하부에 존재할 수 있는 전도성 흑연질대, 광화대 및 변질대에 대한 지구물리학적 및 지화학적 탐사를 방해하는 역할을 하기도 한다(Jefferson *et al.*, 2007).

2.5. 재활성 단층

아타바스카분지에 있는 단층들은 다양한 특징과 배열을 이루며 발달하는데, 이 가운데는 좌수향 또는 우수향, 확장 또는 수축, 그리고 연성 혹은 취성단층 등이 있으며, 이들은 광역적 규모에서는 잘 드러나지 않더라도 광상규모에서는 중요하다(Jefferson *et al.*, 2007). 이 지역 광상에서는 원래 연성의 광역단층이 반복적인 취성 재활성작용을 겪었고, 수직방향의 변위는 수 십 m 규모이지만 이들은 광화유체의 이동에 필수적인 요소이다. 아타바스카분지에서 가장 큰 규모의 재활성단층은 부정합면에 수 백 m 가량의 변위를 야기시키기도 하며, 이들 단층은 아타바스카분지의 충후, 퇴적상 및 고수류 방향의 변화와 공간적으로 밀접한 관계를 가지며 발달한다(Ramaekers *et al.*, 2007).

3. 광 상

전 세계적으로 대표적인 부정합관련형 우라늄광상인 아타바스카분지의 우라늄광상은 우라니나이트를 주로 하는 콩깍지모양(pod), 맥상 및 반괴상 교대암체 형태로 상부의 원생대 역질 사암층과 하부의 변성 기반암 사이 부정합면 부근에 산출되는 것으로 광체의 발달위치와 수반되는 원소에 따라 다음과 같이 세 가지로 분류된다.

3.1. 사암을 모암으로 한 다금속 광상(polymetallic deposit)

분출형(egress type) 열수변질작용을 수반하는 다금속광상은 부정합면의 직하부와 부정합면 그리고 상부 사암층 내부로 광체가 발달한 경우로 부정합면을 중심으로 렌즈형 광체가 형성되거나, 부정합면 상위의 사암층으로 발달하는 단층의 연장부를 따라 수직적인 핫대형광체(perched ore)가 발달하는데(Fig. 5a) 최근까지도 이들 핫대모양 광화대가 단지 광체를 찾기 위한 길

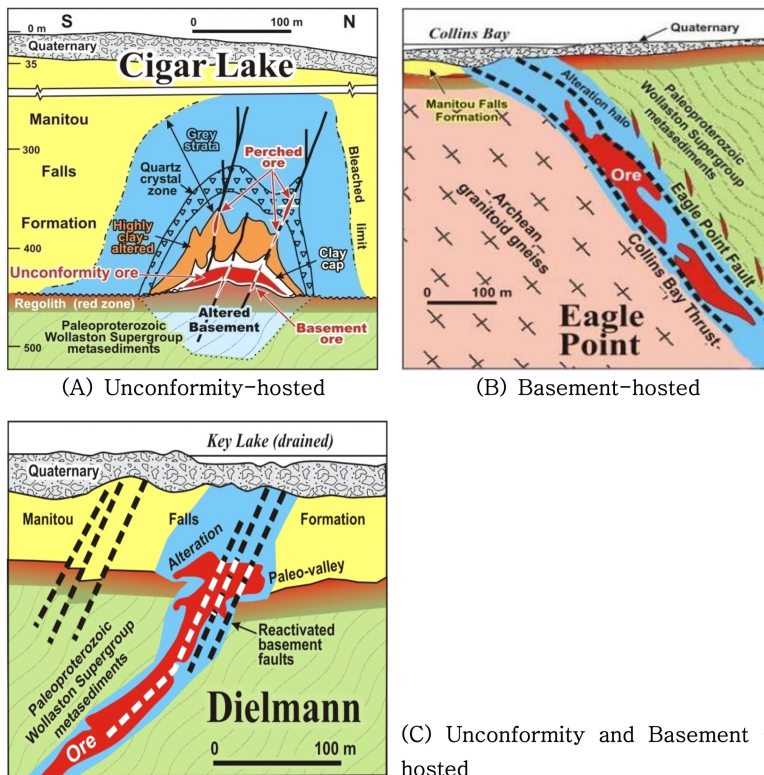


Fig. 5. Examples of three end-member shapes and positions of unconformity-associated U deposits in the Athabasca Basin (modified from Thomas *et al.*, 2000 and Andrade, 2002).

잡이 역할을 하는 것으로 인식했으나 이곳이 실제 광체의 목표가 된다는 사실이 쉬크리크(Shea Creek) 지역에 대한 조사에서 밝혀진 바 있다(UEX, 2005). 이들은 고품위광체(1-15% U_3O_8)가 저품위 변질대(< 1% U_3O_8)에 의해 둘러싸인 형태를 이루며 부정합면을 기반으로 상부에 우라늄광체, 점토덮개암, 열수변질대 및 강력한 용해대와 붕락구조 등이 발달하는 특징을 보여준다(Fig. 5a). 특히 변질 후광대는 부정합면 상부로 200 m 가량 발달하기도 한다. 대표적인 사례인 시가레이크 광상은 1.9 km 연장과 50-100 m 넓이, 20 m 두께로 위로 볼록한 형태를 이루며 발달한다. 이 광상에서는 우라늄 외에도 다량의 Ni, Co, Cu, As, Mo 및 희토류 원소들이 흔히 수반된다.

3.2. 기반암에 배태된 단금속 광상(monometallic deposit)

이 유형의 광상은 부정합면 하부 기반암을 모암으로 하는 소위 “잠두(blind)” 광상에 해당하고 최근 우라늄 탐사의 주 대상이 되고 있다. 이들은 단일광물로 구성되어 있고, 희토류 함량도 적으며, 단단한 모암으로 둘러싸인 특징을 보인다. 기반암을 덮고 있는 상부 사암층과 부정합면으로부터 유래된 유체가 기반암내 단층을 따라 유입되는 잠입형(ingress type)으로서 단층대를 따라 변질대가 형성되고 이 변질대 내에 광체를 배태한다(Fig. 5b). 대표적 사례로 이글포인트(Eagle Point)를 들 수 있는데 콜린스베이(Collins Bay) 돔 상부의 흑연질 변성이질암 기반암에서 리델(Riedel) 전단대와 같은 단층이 네트워크로 발달하면서 광체형성에 기여하였다. 이러한 유형의 광상탐사는 원래 기반암에서의 광체의 생성 심도와 이후 상부 덮개암 퇴적층의 침식 두께에 대한 고려가 요구되고 있다.

3.3. 기반암과 부정합면에 걸쳐 배태된 다금속 광상(polymetallic deposit)

키레이크(Key Lake)의 디엘만(Dielmann)과 개트너(Gaertner) 광상은 기반암과 상부 사암층에서 모두 다금속광상의 특성을 보여준다. 대부분의 광체는 점토변질대에 의해 경계를 이루며 기반암쪽으로 뿌리와 같이 확장되고 신장되면서 비스듬하게 발달하는 T-형의 단면을 나타내며, 분출형(egress type) 광상의 특징을 보여준다(Fig. 5c). 이 광상은 기반암 하부로부터 유래된 유체가 기반암층의 재활성화된 단층대를 따라 상승하면서 광체를 형성하고 상부 사암층으로 유체가 확장 연장되면서 변질대와 광체가 발달하는 특성을 보인다.



Fig. 6. Core samples from alteration zone consisting of various altered minerals such as chlorite, illite, and dickite.

4. 변질작용

아타바스카분지 부정합관련형 광상에서 변질광물 및 변질특성, 지화학적 특성 및 모암의 종류는 우라늄 광체 탐사의 중요한 기준이 된다. 특히 지구물리탐사 및 주요 원소를 이용한 지화학적 특성분석은 분지에서의 변질양상을 평가하는데 활용될 수 있다. 심지어 500 m 이상의 심부에 위치한 경우라도 석영이 우세하고 U이 결핍된 사암에 대해 매질의 저항, 밀도, U과 K 함량 등을 종합적으로 해석함으로써 이들의 주요 변질특성을 파악하기도 한다(e.g. Percival, 1989; Thomas *et al.*, 2000). 변질시료들은 대부분 심하게 파쇄되어 있으며 주요 광물로는 녹니석, 일라이트, 디카이트, 수도아이트(sudoite), 드라바이트(dravite) 등이 산출된다(Fig. 6).

아타바스카분지에서의 열수변질작용은 변질대의 지하학적 형태에 따라 ‘분출형(egress type)’과 ‘잠입형(ingress type)’ 두 가지로 나누어지고, 변질대의 형태나 변질특성이 달라진다. 전자는 부정합면 상부 사암층에 우라늄광체와 변질대가 발달된 경우이고 후자는 하부 기반암내에 발달한 경우이다. 이 두 변질대는 광상과 공간적으로 관련되나 시간적으로 꼭 관련되는 것은 아니다.

4.1. 분출형(Egress-type) 일라이트-고령토-녹니석 변질대

분출형 변질작용은 두 개의 명백한 단층 유형인 1) 석영 용해작용+일라이트, 2)규화대+후기 일라이트+고령토+녹니석+드라바이트 변질대로 양분된다. 아타바스카분지에서 대부분의 분출형광상의 상부를 덮고 있는 지층은 전형적으로 석영 및 저어콘의 용해와 최고 90%에 이르는 부피 감소를 보여준다(Percival, 1989).

반면, 맥아더리버에서는 부분적인 광화 이전의 강한 석영 용해와 부피 감소를 수반하는 초기 규화작용이 두드러진다. 분출형 변질대는 다금속광상 상부 뿐 아니라 부정합면을 관통하는 단금속광상인 맥아더리버 상부에 발달되기도 한다.

키레이크의 디엘만 광체부근에서는 규화작용은 미미하지만 후기 고령토와 전기석의 일종인 드라바이트가 초기 일라이트를 중첩하여 발달하고, 시가레이크를 둘러싼 강한 분출형 점토변질대는 지하수에서 우라늄의 거동을 제한하는 방벽 역할을 함으로써 광산 채굴 및 처리과정에서 중요한 역할을 하기도 한다(Andrade, 2002). 분출형 광상에서는 유체혼합작용에 의해 일라이트, 고령토, 드라바이트, 녹니석, 자형의 석영 및 Ni-Co-Cu-As-Mo 황화광물 등을 포함한 변질대를 형성하며, 녹니석 계열의 광물은 수도아이트를 포함한 여러 종류가 산출된다.

광상과 관련된 변질대는 부정합면 기저부에서 폭이 약 400 m, 주향 방향으로 수 km, 그리고, 광체 상부로 수 백 m에 이르도록 발달하기도 한다. 이러한 대규모 변질대는 주된 광화구조대를 모두 포함하면서 상부로 널리 퍼져있는 불꽃 모양을 이루거나 바닥쪽으로 점차 퍼져가는 중형태의 띠를 형성한다. 이때 일라이트가 우세한 변질대는 $K_2O/Al_2O_3 > 0.18$, $MgO/Al_2O_3 < 0.15$ 범위를 갖고, 고령토가 우세한 변질대는 $K_2O/Al_2O_3 < 0.04$, $MgO/Al_2O_3 < 0.04$, 그리고 녹니석이 우세한 변질대는 $K_2O/Al_2O_3 < \sim 0.04$, $MgO/Al_2O_3 < 0.125$ 의 범위를 갖는다(Sopuck *et al.*, 1983). 아타바스카 분지는 전반적으로 0.1-0.16의 K_2O/Al_2O_3 배경치를 갖는데, 시가레이크 대부분의 변질대는 0.27 이상이다(Ibrahim and Wu, 1985; Percival, 1989).

4.2. 잠입형(Ingress-type) 녹니석 수도아이트-일라이트 변질대

잠입형 변질대는 분출형과 유사한 지화학적 및 광물학적 특징을 나타내나, 변질광물분대가 반대이다. 이들은 사암이 아닌 하부의 편마암에서 유체-암석의 상호 반응작용에 의해 발달된다. 잠입형 변질대가 발달한 기반암 상부의 사암층에는 소규모의 패치상의 모암변질대가 관찰되기도 하는데, 이는 잠두광상 부존 가능성을 지시하며 지구물리학 탐사의 목표물이 된다. 이들 광상은 단일광물로서 우라니아이트가 산출되는데 기반암 구조 양쪽을 따라서 매우 좁으면서 분출형과는 역전된 변질분대를 나타낸다. 이글포인트의 경우 변질대가 안쪽에서부터 일라이트±수도아이트, 수도아이트±일

라이트, 그리고 바깥에는 Fe/Mg 녹니석±수도아이트 순으로 발달한다(Quirt, 2003). 변질대와 광체의 경계면에 놓여있는 붉은 적철석대는 부정합면을 덮고 있는 덮개면보다 불규칙하고 얇게 발달하는 경향이 있다.

이러한 광상 탐사를 위해서는 기반암에서의 단층 및 습곡 구조에 대해 제대로 이해하고 해석함으로써 광체 부존을 예측할 수 있는 지질학적 특성 파악이 중요하다. 맥아더리버광상의 경우는 분출형 및 잠입형 두 가지 모두의 변질양상이 발달하기도 하는데 이는 복잡한 열수계가 발달한 경우로 볼 수 있다.

5. 결 론

아타바스카분지는 고기 내지 중기 원생대(1.78-1.5 Ga) 시기에 퇴적된 사암으로 구성되며 원래 5-6 km의 충후를 이루었으나 침식에 의해 현재 약 1.5 km 가량이 잔존되어 있으며, 광상은 대부분 분지의 동쪽 연변부에 발달한다. 기반암은 시생대의 규장질 편마암과 고기 내지 중기 원생대의 변성역암과 규암 그리고 화강암과 페그마타이트 등의 관입암으로 구성되고, 흑연질 암석이 협재한다. 이들은 대부분 심한 습곡 및 변성작용을 받았다.

부정합면은 주로 붉은 적철석과 고령토로 구성되는 고기 표토로 덮여 있으며, 측면으로 높은 투수성과 다공성을 갖고 있어 광화유체의 중요한 이동통로이자 우라늄이 침전될 수 있는 장소 역할을 하였다. 부정합면 상부 사암은 대체적으로 95% 이상의 석영과 3% 미만의 점토질 기질로 구성되어 있고, 소량의 역암내지 이암이 발달한다. 이들은 평편하고 외관상 비변성대의 특징을 보이거나 광범위한 변질대가 발달하였다.

분지 내 우라늄광상은 부정합면을 중심으로 상부인 사암층에 배태된 유형, 하부 기반암에 배태된 유형, 그리고 부정합면에서 하부 기반암에 걸쳐 배태된 유형 등 크게 세 가지로 구분된다. 열수변질대는 두 가지로 구분되는데, 첫째는 분출형으로 열수유체가 하부 기반암에서 상부 사암층으로 이동하며 생성된 변질대로서 중심부에서 외각으로 가면서 녹니석-수도아이트-일라이트의 누대를 보이고, 둘째는 잠입형으로 열수가 상부 사암층에서 하부 기반암으로 이동하며 생성된 변질대로서 전자와는 반대로 일라이트-수도아이트-녹니석 순의 변질대가 발달한다. 분출형과 관련된 광상은 사암을 모암으로 하고 U외에도 Ni, Co, Cu, As, Mo 등의 금속원소를 수반하는 다금속광상을 형성하고, 잠입형은 기반암을 모암으로 U만을 수반하는 단금속광상

을 형성한다. 이와 같은 지질 및 지화학적 특징은 향후 아타바스카분지내 우라늄광상 탐사를 위한 모델 구축에 효과적으로 활용되고 있다.

상기한 바와 같이 아타바스카분지내 부정합관련형 우라늄광상은 대부분 수 십내지 수 백 m 심부에 위치하고 있고 현재 탐광조사가 이루어지고 있는 대상 심도도 대부분 200 ~ 400 m 범위여서 탐사에 많은 어려움이 있다. 이에 따라 시추시료에 대한 정밀 지화학 자료 분석과 변질대 특성 파악, 고심도 지표전자탐사, 심부 시추공 전기비저항탐사, 토모그래피 탐사, 암석물성 측정 등 다양한 탐사결과를 융복합 해석함으로써 3차원 광상 지질모델 구축 등의 해석과정이 필요할 것으로 여겨진다. 향후 국내 기업의 실제적인 우라늄 투자 성공과 자주개발 능력 향상을 위해서는 우라늄광의 탐광기술 확보가 요구되며, 이를 위해서는 부정합관련형 우라늄광상과 관련된 지질학적, 광물학적, 지화학적, 지구물리학적 및 광상성인적 특성이 종합된 탐사모델의 정립이 필요하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지자원기술개발사업의 지원을 받아 수행된 결과임(No. 2010201030003A). 이 논문에 대해 유익한 조언을 주신 익명의 심사위원께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- Andrade, N. (2002) Geology of the Cigar Lake uranium deposit, in Andrade, N., Breton, G., Jefferson, C.W., Thomas, D.J., Tourigny, G., Wilson, S., and Yeo, G.M., eds., Field Trip A1, The Eastern Athabasca Basin and its Uranium Deposits: Geological Association of Canada, Mineralogical Association of Canada, Annual Meeting, Field Trip Guidebook A1, p.53-72.
- Annesley, I.R., Madore, C., Shi, R. and Krogh, T.E. (1997) U-Pb geochronology and thermotectonic events in the Wollaston Lake area, Wollaston Domain: A summary 1994-1996, in Summary of Investigations 1997, Saskatchewan Geological Survey, Saskatchewan Energy and Mines, Miscellaneous Report 97-4, p.162-173.
- Campbell, J.E., Klassen, R.A. and Shives, R.B.K. (2007) Integrated field investigations of airborne radiometric data and drift composition, Nuclear Energy Agency—International Atomic Energy Agency Athabasca test area, Saskatchewan, in Jefferson, C.W. and Delaney, G., eds., EXTECH IV: Geology and Uranium EXploration TECHnology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta: Bulletin 588: Geological Survey of Canada, p.533-554.
- Creaser, R.A. and Stasiuk, L.D. (2007) Depositional age of the Douglas Formation, northern Saskatchewan, determined by Re-Os geochronology, in Jefferson, C.W. and Delaney, G., eds., EXTECH IV: Geology and Uranium EXploration TECHnology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta: Bulletin 588: Geological Survey of Canada, p.341-346.
- Davis, D.W. and Sutcliffe, R.H. (1985) U-Pb ages from the Nipigon Plate and Northern Lake Superior" Geological Society of America Bulletin, v.96, p.1572-1579.
- Fayek, M., Harrison, T.M., Ewing, R.C., Grove, M. and Coath, C.D. (2002a) O and Pb isotope analyses of uranium minerals by ion microprobe and U-Pb ages from the Cigar Lake deposit, Chemical Geology, v.185, p.205-225.
- Fayek, M., Kyser, T.K. and Riciputi, L.R. (2002b) U and Pb isotope analysis of uranium minerals by ion microprobe and the geochronology of the McArthur River and Sue Zone uranium deposits, Saskatchewan, Canada: The Canadian Mineralogist, v.40, p.1553-1569.
- Franklin, J.M. (1978) The Sibley Group, Ontario, in Wanless, R.K. and Loveridge, W.D., eds., Rubidium-strontium isotopic age studies, report 2: Geological Survey of Canada Paper 77-14, p.31-34.
- Gall, Q. (1994) The Proterozoic Thelon paleosol, N.W.T., Canada, Precambrian Research, v.68, p.115-137.
- Gandhi, S.S. (2007) Significant unconformity-associated uranium deposits of the Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta, and selected related deposits of Canada and the world: Geological Survey of Canada, Open file 5005 (CD-ROM).
- Hamilton, M.A. and Buchan, K.L. (2007) U-Pb baddeleyite age for Otish Gabbro: Implications for correlation of Proterozoic sedimentary sequences and magmatic events in the eastern Superior Province (abstract), in GAC-MAC Program with Abstracts, v. 32: Geological Association of Canada, Annual Meeting, Yellowknife, May 23-25, 2007, p.35.
- Ibrahim, H.J. and Wu, H.F. (1985) Geochemical and mineralogical alteration at the Midwest uranium-nickel deposits, in Sibbald, T.I. and Petruk, W., eds., Geology of Uranium Deposits: Canadian Institute of Mining and Metallurgy Special Volume 32, p.73-84.
- Jefferson, C.W., Thomas, D.J., Gandhi, S.S., Ramaekers, P., Delaney, G., Brisbin, D., Cutts, C., Portella, P. and Olson, R.A. (2007) Unconformity-associated uranium deposits of the Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta, in Jefferson, C.W. and Delaney, G., eds., EXTECH IV: Geology and Uranium EXploration TECHnology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta: Bulletin 588: Geological Survey of Canada, p.23-68.
- Madore, C., Annesley, I. and Wheatley, K. (2000) Petrogenesis, age, and uranium fertility of peraluminous leucogranites and pegmatites of the McClean Lake / Sue and Key Lake / P-Patch deposit areas, Saskatchewan. May 29-June 2, 2000, Calgary, GAC-MAC Program with Abstracts, v.25, 1041.PDF, 4p.
- McGill, B., Marlatt, J., Matthews, R., Sopuck, V., Home-niuk, L. and Hubregtse, J. (1993) The P2 North uranium deposit Saskatchewan, Canada: Exploration

- Mining Geology, v.2, p.321-331.
- OECD/NEA & IAEA (2008) Uranium 2007: Resources, Production and Demand (appendix 4).
- Percival, J.B. (1989) Clay mineralogy, geochemistry and partitioning of uranium within the alteration halo of the Cigar Lake uranium deposit, Saskatchewan, Canada, unpublished Ph.D. Thesis: Carleton University, Ottawa, 343p.
- Powell, B., Wood, G. and Bzdel, L. (2007) Advances in geophysical exploration for uranium deposits in the Athabasca Basin, in Exploration 07 Proceedings Fifth Decennial Conference on Geophysics and Geochemistry of Minerals, ed. B. Milkereit.
- Quirt, D.Q. (2003) Athabasca unconformity-type uranium deposits: one deposit type with many variations, in Cuney, M., ed., Uranium Geochemistry 2003, International Conference, April 13-16 2003, Proceedings: Unité Mixte de Recherche CNRS 7566 G2R, Université Henri Poincaré, Nancy, France, p.309-312.
- Rainbird, R.H., Stern, R.A., Rayner, N. and Jefferson, C.W. (2007) Age, provenance, and regional correlation of the Athabasca Group, Saskatchewan and Alberta, constrained by igneous and detrital zircon geochronology, in Jefferson, C.W. and Delaney, G., eds., EXTECH IV: Geology and Uranium EXploration TECHNOlogy of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta: Bulletin 588: Geological Survey of Canada, p.193-210.
- Ramaekers, P. (1990) Geology of the Athabasca Group (Helikian) in northern Saskatchewan. Saskatchewan Energy and Mines, Saskatchewan Geological Survey Report 195, 49p.
- Ramaekers, P., Jefferson, C.W., Yeo, G.M., Collier, B., Long, D.G.F., Drever, G., McHardy, S., Jiricka, D., Cutts, C., Wheatley, K., Catuneanu, O., Bernier, S., Kupsch, B. and Post, R. (2007) Revised geological map and stratigraphy of the Athabasca Group, Saskatchewan and Alberta, in Jefferson, C.W. and Delaney, G., eds., EXTECH IV: Geology and Uranium EXploration TECHNOlogy of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta: Bulletin 588: Geological Survey of Canada, p.155-192.
- Sopuck, V.J., de Carle, E.M. and Cooper, B. (1983) The application of lithogeochemistry in the search for unconformity-type uranium deposits, northern Saskatchewan, Canada, in Parslow, G.R., ed., Geochemical Exploration 1982, Special Issue: Journal of Geochemical Exploration, v.19, p.77-99.
- Thomas, D.J., Matthews, R.B. and Sopuck, V. (2000) Athabasca Basin (Canada) unconformity-type uranium deposits: exploration model, current mine developments and exploration directions; in Geology and Ore Deposits 2000: The Great Basin and Beyond, Geological Society of Nevada Symposium Proceedings, Reno, Nevada, (ed.) J.K. Cluer, J.G. Price, E.M. Struhsacker, R.F. Hardyman, and C.L. Morris, May 15-18, 2000, v.1, p.103-206.
- Wasyliuk, K. (2002) Petrogenesis of the kaolinite-group minerals in the eastern Athabasca Basin of northern Saskatchewan: Applications to uranium mineralization, M. Sc. Thesis: University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, 140p.
- UEX (2005) UEX Reports Multiple High-grade Intersections of Sandstone and Basement-hosted Uranium Mineralization in 63B Area at Shea Creek: Wed Sep 14, 2005 News release on UEX website : <http://www.uexcorporation.com/>

2011년 9월 7일 원고접수, 2011년 12월 11일 게재승인