

방사성폐기물처분연구를 위한 화강암지역내 심부시추코아의 암석화학 및 단열충전광물 특성

김건영, 고용권, 박경우, 배대석

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

고준위방사성폐기물의 심지층 처분개념은 다중방벽 개념으로써, 처분장으로부터 핵종 유출을 최대한 차단하도록 설계되는 공학적 방벽과 더불어 수십만년에서 수백만년의 장기간의 안전성을 고려해야하는 지질학적 방벽으로 이루어진다. 지질학적 방벽으로서 불투수성인 결정질 암반을 고려할 경우, 처분장으로부터 유출된 방사성 핵종의 이동은 주로 단열대를 따르는 지하수의 유동특성에 좌우되게 되며, 유출된 핵종의 지화학적 거동은 이를 운반하는 지하수의 화학성분 및 지하수와 접촉하는 암석과 광물특성에 좌우된다. 따라서 처분장의 안전성 평가를 위해서는 모암에 따른 수리지화학적 특성규명이 우선되어야 하며, 지하수와 접촉하는 모암 및 단열충전광물의 특성규명이 필수적으로 요구된다. 이를 위하여 한국원자력연구소에서는 우리나라의 대표적 결정질 암반인 유라기 화강암 중 영동형 (강원도 고성)과 영서형 (대전 유성) 화강암을 선정하여 이에 대한 심부 시추조사 및 장기적 모니터링을 수행하고 있으며, 이번 연구는 이들 심부 시추코아로부터 얻어진 화강암 및 단열충전광물들의 광물학적 특성과 지화학적 특성분석 결과이다.

영동형 화강암의 연구지역은 강원 고성지역에 해당하며 주변에 다양한 편마암류가 분포하고, 화산암류가 소규모로 분포하고 있다. 시추위치의 지질은 전형적인 조립질 흑운모 화강암이며, 시추구간 전반에 걸쳐 매우 신선한 양상으로 단열대의 발달을 관찰하기 어렵다. 500m 시추공에서 심도별로 채취된 시료의 전암분석결과를 살펴보면 미세한 석영-장석맥이 지나가는 277m 구간에서 SiO_2 , Na_2O 의 함량 증가가 관찰되며, 이 부분을 제외하고는 전 구간에 걸쳐 매우 일정한 화학 특성을 보이고 있다. 주구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모, 각섬석 등이고, 이밖에 스피넬, 저어콘, 금홍석, 적철석 등이 소량 산출된다. 또한 지표환경에서 일라이트, 녹니석, 카올린 광물이 풍화산물로 산출된다. 장석은 알바이트에서 올리고클레이스까지의 조성을 보이고 흑운모는 엔나이트와 흑운모사이의 좁은 범위의 조성을 보인다. 각섬석은 칼슘계열로서 ferro-edenite 및 ferro-edenitic hornblende 조성을 보인다. 전체적인 연구지역 화강암의 SiO_2 의 함량은 65.1~77.8%로 산성암에 해당되며, 과알루미나-준알루미나 성질을 나타내고, 0.92~1.19범위의 알루미나 포화지수를 갖는다. 전체적으로 SiO_2 성분이 증가함에 따라, TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , FeO^T , CaO , P_2O_5 , MnO 는 감소하는 경향을 보이면서 K_2O 는 증가하는 일반적인 화강암의 분화경향을 나타낸다.

영서형 화강암지역은 대전 유성북부지역으로서 경기변성암 복합체 내에 위치하며 주로 선캠브리아기의 편마암류와 중생대의 심성암과 맥암류로 구성되어 있다. 시추위치의 지질은 중립질 내지 조립질의 복운모화강암으로 이루어져 있으며 국지적으로는 미약하나마 편상조직을 보이기도 한다. 심부 시추공자료에 의하면 지표에서부터 심부에 이르기까지 크고 작은 단열대가 다수 발달해 있으며 이러한 단열대를 중심으로 다양한 변질양상을 보이고 있다. 변질대 및 단열대에서는 방해석, 불석 및 녹염석 세맥이 발달해 있으며 이러한 변질구간에서는 흑운모가 관찰되지 않고 녹니석화되어있다. 또한 일부구간의 신선한 화강암 부분을 제외하고는 대부분의 장석이 견운모화되어 있는 양상을 보인다. 일부 석영맥이 산출되는 구간에서는 황철석 등의 광석광물이 산출되는 것으로 보아 국지적인 열수변질작용이 있었던 것으로 판단된다. 주구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모, 백운모 등이며 석류석, 저어콘 등이 소량 관찰된다. 녹니석, 녹염석, 일라이트가 2차광물로 관찰되고, 퍼어다이트가 드물게 관찰되기도 한다. 영서형 화강암내 500m 시추공에서 심도별로 채취된 시료의 전암분석결과를 살펴보면 염기성 암맥이 지나가는 -105m 구간을 포함하여 -90m~-130m 구간과 -230m~-250m 구간에서 급격한 SiO_2 함량 감소와 Al_2O_3 , CaO 의 증가가 관찰된다. 특히 이 두 구간에서 L.O.I 값이 증가한 것은 이 구간에 점토광물과 같은 2차 광물이 많이 존재함을 지시

한다. 대부분 단열대에는 2차광물들이 충전하고 있으며, 국지적으로 저온의 열수변질작용에 의한 광물들이 증첩되어 있기도 하다. 단열충전광물들은 대부분 단일광물보다는 여러 광물종의 혼합체로 존재한다. 특히 YS-01 시추공(500m 심도)으로부터 회수된 단열충전 광물에 대한 X-선 회절분석(XRD) 결과 불석 광물(로몬타이트, 홀란다이트), 방해석, 일라이트 (2M1과 1Md), 녹니석, 녹염석 등이 확인되었다. 이 중, 로몬타이트와 홀란다이트 같은 불석 광물들과 방해석이 가장 흔하게 관찰되는 단열충전광물이며 이들은 흔히 서로 intergrowth된 상태로 결정화 되어있다. 산출상태 또한 매우 다양하여 약 1~2mm 두께의 맥상으로 결정형이 잘 발달한 상태로 산출되기도 하고 단열 표면 코팅이나 미세 균열을 충전하는 형태로 산출되기도 한다. 일라이트와 녹니석 또한 흔하게 관찰되는 단열충전광물로서 녹니석으로 주로 코팅되어 있는 단열면은 어두운 녹색이나 검은색을 띠고 있다. 녹염석은 매우 미세한 균열을 충전하는 형태로 산출되며 흔히 녹니석이나 일라이트와 함께 존재한다. 녹염석으로 주로 구성된 단열은 주로 밝은 녹색을 띠고 있으며 대부분 hairline crack 형태로 존재하나 녹염석의 결정이 잘 발달되어 밀집되어 있는 부분도 관찰된다. 이밖에 소량의 카올린 광물이나 clinozoisite가 존재하기도 하며 특징적으로 몰리브데나이트나 황철석과 같은 광석광물들이 산출되기도 한다. YS-01 시추공지하수의 화학조성자료로부터 PHREEQC를 이용하여 시추공지하수로부터 단열광물의 대한 포화지수를 계산한 결과는 이들 이외에 2차 광물로 철산화물 및 스�멕타이트가 2차광물로 침전될 수 있을 가능성을 보여주고 있다. 이들의 상대적인 산출량은 방해석 \geq 불석광물 \gg 일라이트 $>$ 녹염석 \gg 녹니석 $>$ 카올리나이트의 순이며, 심도의 증가에 의한 온도 및 압력 증가에 따른 광물상의 뚜렷한 변화는 관찰되지 않는다. 단열대를 따르는 지하수 유동에 의한 물-암석 반응 및 열수변질의 증첩에 의한 원소거동을 알아보기 위하여 단열대의 화학분석결과로부터 Al_2O_3 를 immobile element로 하여 isocon을 도시한 결과, 대부분 SiO_2 도 immobile 한 것으로 나타났으며, 특히 로몬타이트와 방해석이 충전된 단열대는 CaO의 함량이 명확히 증가되었다. 일라이트가 산출되는 단열대는 K_2O 의 증가와 Na_2O 와 CaO의 감소가 함께 나타나기 때문에 대부분의 일라이트는 사장석의 변질로 생성되었음을 알 수 있다. 그러나 소량의 일라이트, 녹니석, 카올리나이트 등의 단열충전광물이 생성된 단열대는 대부분의 원소들이 일련의 isocon상에 도시되어 원암이 외부로부터의 원소의 추가나 제거 없이 변질되었음을 지시한다. 전체적으로 YS-01공은 변질정도에 따라 -13~+13%의 질량변화가 있었고 YS-04공은 -29~+28%의 질량변화가 있었다.