

## 월성 중저준위 방사성폐기물 처분장의 광물학적 특성

Mineralogical Characteristics of the Wolsong LILW Repository

김건영(Geon Young Kim)<sup>1</sup> · 고용권(Yong Kwon Koh)<sup>1</sup> · 박경우(Kyung Woo Park)<sup>1</sup>

최종원(Jong Won Choi)<sup>1</sup> · 이은용(Eun Yong Lee)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부(kimgy@kaeri.re.kr)

<sup>2</sup>한국방사성폐기물관리공단 처분기술팀

### 1. 서언

방사성폐기물 처분개념은 방사성폐기물을 안전한 환경조건을 갖는 지하환경에 처분하여 인간환경으로부터 격리시키는 것으로서, 일반적으로 공학적 방법과 천연 방법을 모두 고려한 다중방벽 개념을 채택하고 있다. 2005년 12월 경주지역이 중저준위 방사성폐기물 처분장으로 최종 결정되어 건설 인허가 단계를 거쳐 현재 경주 월성지역에 건설중인 중저준위 처분장 역시 다중방벽 개념을 채택하고 있다. 처분장으로부터 방사성 핵종의 유출은 지하수의 유동에 기인하며, 유출된 핵종의 거동은 핵종을 운반하는 지하수의 화학성분과 지하수와 접촉하는 암석, 광물 등의 지하매질의 지구화학적 특성에 좌우된다. 따라서 처분장의 안전성 평가를 위해서는 수리지화학적 특성 규명이 우선되어야 하며, 지하수와 접촉하는 모암 및 단열층전광물의 특성규명이 필수적으로 요구된다. 본 연구는 경주 월성지역의 중저준위 처분장의 부지특성조사의 일부로 수행된 내용으로서, 처분부지의 암석, 광물에 대한 지구화학적 특성 및 지구화학적 특성평가에 필요한 기초자료를 제공하고, 처분부지 내 물-암석 반응 및 지화학 모델링의 자료를 제공하기 위하여 수행된 연구 결과이다.

### 2. 시료 채취 및 실험 방법

처분부지내 지하매질에 대한 시료채취 및 분석을 수행하였으며, 특히 시추코아 시료채취 시에는 암상의 변화 및 변질대, 단열대 구간 뿐 아니라 시추공 지하수의 지구화학 조사내용도 함께 고려하여 채취 위치를 정하였다. 분석대상의 지질매질 시료는 주로 KB-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16-2 공의 시추코아에서 채취하였으며, 시료의 선택을 위해서 부지반경 1 km 내 지질도와 시추코아의 주상도를 검토한 후, 이를 기초로 암상의 변화에 따라 시료를 채취하였다. 채취된 암석, 광물 시료에 대하여 편광현미경 관찰 및 X선 회절분석(XRD)을 통한 광물감정과 X선 형광분석(XRF) 및 유도결합플라즈마 분석(ICP-AES, ICP-MS)을 통한 화학분석을 수행하였다. 이밖에 전자현미분석(EPMA)을 이용한 광물의 화학분석과 주사전자현미경관찰(SEM) 등을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 모암의 특성

처분부지의 모암은 화강암류로서 화강섬록암 및 섬록암으로 산출된다. 모암의 화학분석결과로부터 화강섬록암과 섬록암을 비교하였을 때, 화강섬록암과 섬록암 모두 비알칼리계열(subalkaline series)에 속하며 이들의 분화는 총철분함량이 비교적 결핍된 칼크-알칼리암 계열의 분화경로를 따르고 있다. 또한 화강섬록암과 섬록암의 야외 산상은 점이적으로 변하는 데에 비해 화학적으로는 비교적 명확하게 구별되어 화강섬록암이 섬록암에 비해 높은 SiO<sub>2</sub> 함량, 낮은 MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량을 보여준다. 그러나 SiO<sub>2</sub>의 증가에 따라 각 주원소들의

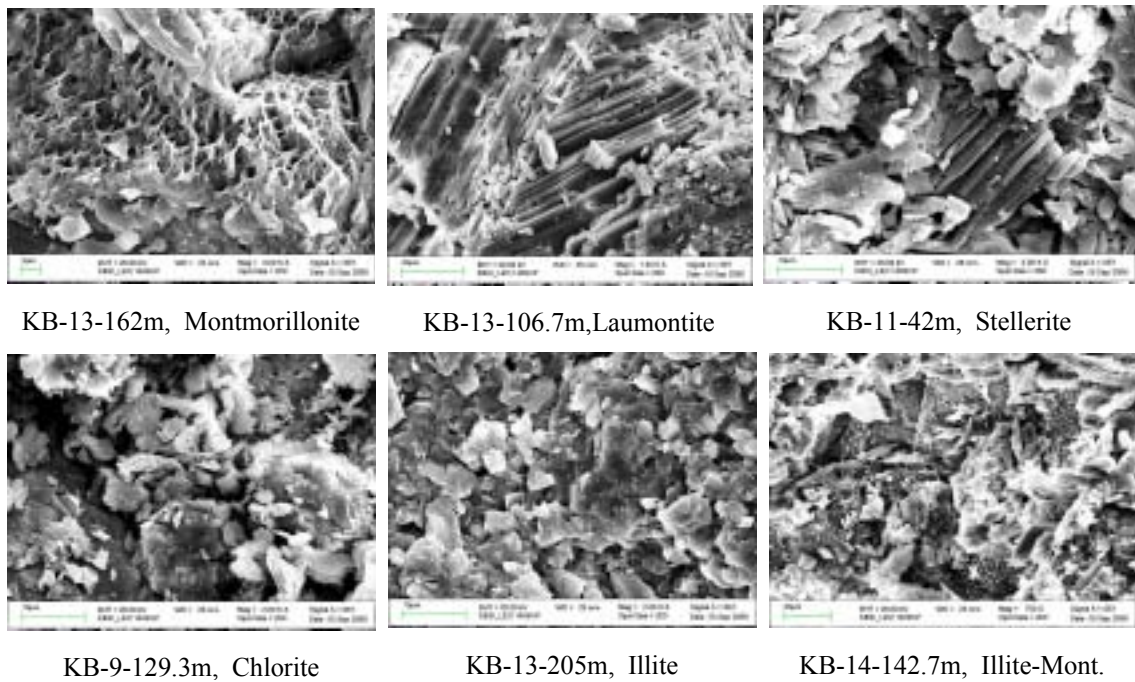
변화경향이 동일선상에 놓여있어서 이들이 동일한 마그마 기원임을 지시한다. 이들 화강암류를 구성하는 사장석의 경우는 화강섬록암은  $Ab_{61} \sim Ab_{87}$ 로서 올리고클레이스(Oligoclase)~안데신(Andesine)에 해당하며, 섬록암은  $Ab_{63} \sim Ab_{72}$ 로서 주로 올리고클레이스에 해당하고, 정장석은 조성차이가 거의 없다. 흑운모는 팔면체 내의  $Fe/(Fe+Mg)$  비가 0.45~0.47로 매우 일정한 값을 보이며, 전형적인 흑운모의 화학조성을 보여준다. 녹니석 역시 팔면체 내의  $Fe/(Fe+Mg)$  비가 0.36~0.50으로 상대적으로 Mg가 부화된 양상을 보이며, 비교적 일정한 화학조성을 보여준다. 처분부지내의 주원소들의 공간적 분포를 살펴보면, 섬록암 지역이 화강섬록암 지역에 비해 낮은  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  및 높은  $CaO$ ,  $Fe_2O_3$  분포를 보여줌에 화강섬록암과 섬록암 지역의 차이가 명확하다. 이 중  $CaO$ 와  $Na_2O$ 의 분포 양상은 섬록암과 화강섬록암 지역 간의 차이가 더욱 분명하고 그 증감 경향이 거의 정확하게 상반되어 있어 지구성광물인 사장석의 조성변화가 처분부지 암석의 화학 조성을 변화시키는 가장 큰 원인을 알 수 있다.

### 3-2. 광물학적 특성

처분부지 조사지역 전체에 걸쳐서 파쇄대가 발달하여 있고 이 파쇄대를 따라 변질정도가 매우 다양하게 나타나며, 시추코아에서도 거의 전 심도에 걸쳐서 파쇄대가 발달하여 있고 그 파쇄대를 중심으로 단열충전광물들이 생성되어 있다. 또는 파쇄대가 발달하여 있지 않더라도 미세한 세맥 형태로 단열충전광물들이 생성되어 있다. 화강섬록암과 섬록암은 모두 중립 내지 세립질 조직을 보이며, 주 구성광물은 사장석, 각섬석, 흑운모, 알칼리장석, 석영, 불투명 광물 등이다. 전자현미경분석결과, 사장석의 경우는 화강섬록암은  $Ab_{61} \sim Ab_{87}$ 로서 올리고클레이스(Oligoclase)~안데신(Andesine)에 해당하며, 섬록암은  $Ab_{63} \sim Ab_{72}$ 로서 주로 올리고클레이스에 해당하고 정장석은 조성차이가 거의 없었다. 흑운모는 팔면체 내의  $Fe/(Fe+Mg)$  비가 0.45~0.47로 매우 일정한 값을 보이며, 전형적인 흑운모의 화학조성을 보여준다. 녹니석 역시 팔면체 내의  $Fe/(Fe+Mg)$  비가 0.36~0.50으로 상대적으로 Mg가 부화된 양상을 보이며, 비교적 일정한 화학조성을 보여준다.

시추코아상에서는 다양한 규모의 단열대가 관찰되며, 이들은 경우에 따라 점토질 물질로 채워진 단층비지형태를 보여주기도 한다. 시추코아에서 확인된 단열광물은 몬모릴로나이트, 제올라이트광물(로먼타이트, 스텔레라이트, 홀란드타이트), 녹니석, 일라이트, 방해석 등이며 단일 광물로 산출되는 경우가 매우 드물고 여러 점토광물의 집합체로 주로 산출된다. 이 중 제올라이트 광물인 로먼타이트나 스텔레라이트는 산출량은 적으나 산출빈도가 매우 높고, 세맥 형태나 코팅형태로서 처분부지 내 단열구간에 광범위하게 산재한다. 녹니석은 시추코아 전반에서 관찰되는 단열구간에서 단열면에 얇은 코팅형태로 주로 산출된다. 일반적으로 열수변질광물로 알려져 있는 황철석과 로먼타이트가 매우 광범위하게 분포하는 것으로 보아 조사지역 전반에 걸쳐 광범위한 광화작용 혹은 열수변질작용이 있었음을 지시한다. SEM 관찰결과, 몬모릴로나이트는 대부분 전형적인 별집모양의 외형을 보여주며, 경우에 따라서는 일라이트나 장석입자의 외곽부에 불규칙한 결정형으로 산출되어 이들이 운모류나 장석의 변질산물임을 지시한다. 제올라이트 중 로먼타이트는 특징적인 주상의 집합체 결정형을 보여준다. 로먼타이트에 비해 매우 드물게 산출되기는 하지만 스텔레라이트 역시 불규칙한 주상으로 산출된다. 녹니석은 불규칙한 육각판상의 집합체로 주로 산출되며 일라이트 역시 판상의 집합체로 산출되나 결정도는 매우 낮고 결정형도 전형적인 육각판상형을 보여주지 않는다. 단열충전광물 중 몬모릴로나이트와 제올라이트 광물은 높은 양이온교환능을 갖고 있고 조사지역 전반에 걸쳐 광범위하게 산출되기 때문에 처분부지의 장기 안전성 측면에서 매우

중요하게 다루어져야 할 광물이다. 또한 황철석 역시 지하수의 산화-환원 반응에 직접적으로 관계될 뿐 아니라 pH 조건도 변화시키기 때문에 중요하며, 이들이 지하수와 반응하여 산화되면 지하수의 pH는 낮아지고 지하수에 용존된 Fe는 주변 환경의 변화에 따라 다시 산화철의 형태로 침전될 수 있다. 이와 관련하여 단열대 내의 황철석에 대한 황동위원소 분석결과는 이들이 열수변질작용에 의해 형성되었음을 지지하며 단열충전광물들의 산소 및 수소 안정동위원소 분석결과 역시 이들이 마그마 기원임을 지지한다. 따라서 처분부지 내 단열충전 광물들은 단열대를 따르는 지하수와는 단순한 물-암석 반응 이외에 광범위한 마그마 기원의 열수작용에 의한 영향을 받은 것으로 판단된다.



**Fig. 1.** SEM images of the representative fracture-filling minerals