



## 우라늄 원광에서 핵연료까지 ( I )

김 건 영

한국원자력연구원 고준위폐기물처분연구센터

현재 국제 유가는 하루가 달리 오르면서 최근 배럴당 100 달러이상의 고유가 행진을 계속하고 있다. 또한 국제 유가의 상승과 더불어 원자재 값도 급상승 하고 있고 결과적으로는 전 세계적인 경제 불안 요인으로 작용하면서 우리나라와 같이 에너지원의 대부분을 수입에 의존하는 나라들은 현재 심각한 경제침체의 위기를 맞고 있다. 따라서 대체에너지의 필요성이 더욱더 중요하게 인식되고 있으며 아울러 원자력에 대한 필요성도 함께 대두되어 과거 더 이상의 원자력 발전소 건설을 금지하였던 선진국들도 하나 둘씩 원자력 발전소 건설을 허가하고 있는 실정이다. 그러나 원자력 발전은 필연적으로 방사성폐기물을 생산하게 되며 현재는 이들의 처분 혹은 처리 기술수준이 곧 그 나라의 기술수준의 척도가 되고 있다.

현재 우리나라에는 총 20기의 원자로가 가동 중에 있으며 2006년 기준으로 전체 전력 생산량의 약 40%를 차지하였고, 앞으로도 8기가 더 건설될 예정이다. 그간 언론매체 등을 통하여 알려진 바와 같이 원자력 발전에 따른 방사성폐기물은 현재 각 발전소 내에 임시 저장되고 있으나 곧 포화상태에 이를 것으로 예상되고 있다. 다행히 우여곡절 끝에 중저준위 방사성폐기물 처분장이 경주로 결정되어 건설이 진행중에

있지만, 정작 보다 중요한 사용후 핵연료를 포함한 고준위 방사성폐기물의 처분에 대해서는 한국원자력연구원에서 주도해온 과거 10년간의 연구개발실적 이외에는 아직 제도적 절차 마련 및 사회적인 공론화가 이루어지지 못하고 있다. 그러나 경주 중저준위 처분장의 결정과정 중에 매스콴을 포함한 다양한 지식전달체계의 도움으로 수 년 전만 하더라도 매우 생소했던 개념인 원자로의 종류, 원자로와 핵폭탄과의 차이, 처분과 재처리의 차이점, 중저준위나 고준위 폐기물 등의 방사성폐기물 구분, 고준위폐기물 처분에 있어서의 다중방벽개념 등이 일반인들에게 일반적인 상식수준으로 이해되면서 원자력 및 방사성폐기물에 대한 국민들의 의식 수준이 한층 높아진 것도 주지할만한 사실이다. 그럼에도 불구하고 현재 국내 전력생산량의 약 40%를 의존하는 원자력 에너지의 공급원인 핵연료 및 우라늄 자원에 대해서는 상대적으로 일반인들 뿐만 아니라 광물 자원관련 업계 종사자들에게조차 제대로 알려지지 않은 것 또한 사실이다. 따라서 본 기사에서는 우라늄 원광이 핵연료가 되기까지의 일반적인 내용과 핵연료에 대한 국내 현황을 다뤄 봄으로써 산업원료광물자원으로서의 우라늄광물에 대한 보다 현실적인 내용을 소개하고자 한다.

다음의 주요 내용들은 전문적인 지식보다는 일반인들 이해할 수 있는 수준에서, 주변에서 쉽게 접하고 구할 수 있는 관련 지식들을 모아서 보다 알기 쉽게 정리하는 방향으로 설명하였다.

## 핵연료 주기

화력발전소를 가동하기 위해서 석유나 석탄이 필요하듯이 원자력발전소를 운영하기 위해서도 연료가 필요한데 이 연료가 바로 핵연료(원자력 연료)이다. 그러나 원자력 발전에 사용되는 핵연료는 한번 사용하면 연소되어 없어지거나 다시 사용할 수 없는 석탄이나 석유 등의 화석연료와는 달리, 우리늄( $^{235}\text{U}$ )의 핵분열로 발생하는 열을 발전에 이용하는 방사성 원소의 특성상 사용이 끝난 핵연료에는 핵분열성 물질인 플루토늄(Pu)과 일부 연소되지 않은 우리늄( $^{235}\text{U}$ )이 남아 있다. 따라서 이들을 회수하여 재처리함으로써 핵연료의 원료물질로 재사용할 수 있다.

핵연료의 이용과정은 우리늄 광석의 채굴-핵연료 제조-원자력 발전-사용후 연료의 관리(처분 혹은 재처리후 재사용)-재처리와 재처리 후의 고준위 방사성 폐기물 처분 등의 하나의 순환과정으로 설명될 수 있는데, 이와 같은 우리늄 채광에서부터 원전연료로 사용된 후 사용후 연료로서 재처리, 재사용 또는 방사성폐기물로 처분되기까지 우리늄의 일생을 “핵연료 주기”라고 한다. 바로 이 핵연료 주기의 맨 첫 단계를 구성하는 것이 우리늄 원광의 채굴·선광·제련 과정이다(그림 1).

## 우리늄과 원자로

우리늄은 원자번호 92, 주기율표 7B 악티늄족 원소에 속하며 지구내에는 평균 4ppm정도 함유되어 있다. 1789년 독일 화학자 M.H.크라푸로트가 처음으로 피치블랜드 중에 있음을 발견하였고, 1781년 그 당시에 태양계의 행성으

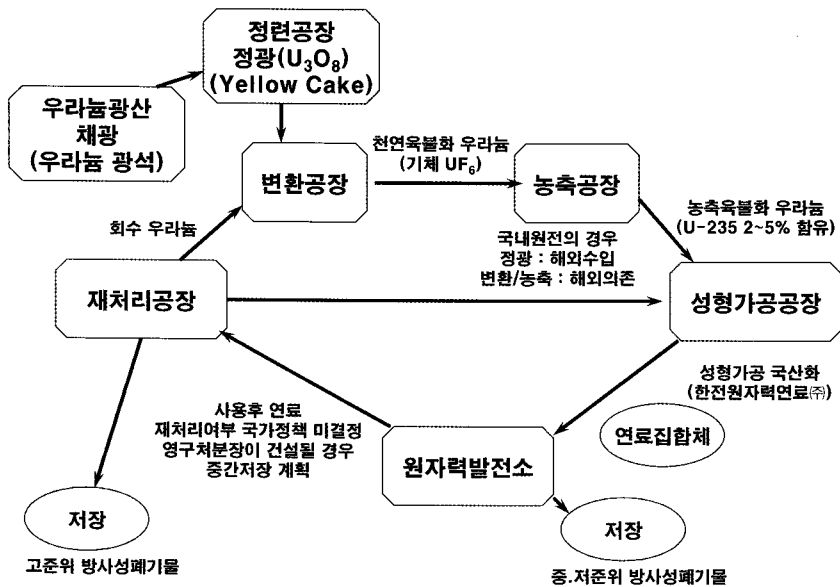


그림 1. 핵연료주기 모식도 (한국수력원자력주식회사).

로 토성의 바깥쪽에서 새로이 발견된 천왕성 (Uranus:우라누스)의 이름을 따서 우라늄 (Uranium)이라 명명하였다(대한광업진흥공사). 우라늄의 원자가는 일반적으로 환원환경에서는 +4, 산화환경에서는 +6이다. 원자가가 +6인 것은 보통 우라닐착이온( $UO_2^{2+}$ )이 되어 쉽게 물에 녹아 운반된다. 천연우라늄은 질량수 234, 235, 238 등 3종의 동위원소로 이루어지며, 이 중 우라늄 235는 악티늄족 계열 최초의 핵종이다. 핵연료의 원료로 이용되는 천연우라늄은 우라늄 -238이 99.29%, 우라늄-235가 0.71%로 구성되어 있으며, 중수로용 원자력연

료는 천연우라늄을 그대로 사용하지만 경수로용 원자력 연료는 우라늄-235의 구성을 2~5%로 높은 저농축우라늄을 사용한다. 우라늄과 같은 무거운 원자핵은 외부에서 중성자를 흡수하면 쪼개지는 성질이 있는데 이를 원자핵분열이라 한다. 핵분열이 일어날 때는 많은 에너지와 함께 2~3개의 중성자가 함께 나오게 된다. 이 중성자가 다른 원자핵에 흡수되면 또 다시 분열이 일어나고, 이렇게 연속적으로 원자핵분열이 일어나는 현상을 연쇄반응이라 한다. 원자력이란 바로 원자핵분열이 연쇄적으로 일어나면서 생기는 에너지를 말한다. 핵분열에서 에너지가 나오

표 1. 주요 우라늄 광물과 특성(대한광업진흥공사, 한국자원정보서비스)

광 물 명		화 학 식	U 함유량(%)	특 성
1차 우라늄 광물	Uraninite	$UO_2$	46~88	갈색, 회색, 녹색 우라늄산화물 (보통 $U_3O_8$ )과 공생
	Pitchblende	$UO_2 + U_3O_8$		갈색, 회색, 녹색 Uraninite의 괴상 Colloform 변종, 불순 우라늄산화물
	Coffinite	$U(SiO_2)_{1-x}(OH)_4$	41~60	흑색의 우라늄 규산염광물. 뉴멕시코, 유타, 와이오밍주의 사암층 또는 열수광상에 부존
	Brannerite	$UTi_2O_6$		흑색, 우라늄산화물
	Davielite		0~4	Fevielite 철산화물
	Carnotite	$K_2(UO_2)_2(VO_4)_3 \cdot 3H_2O$	53~55	선황색, 녹색 (불순물함유시 Potassium Uranyl Vanadate)
	Tyuyamunite	$Ca(UO_2)(VO_4)_2 \cdot 5-8H_2O$	49~54	선황색, 녹색 (불순물함유시) Calcium Uranyl Vanadate, Metatyuyamunite와 유사
2차 우라늄 광물	Torbernite	$Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12H_2O$	47	담녹색, Cupric Phosphate Metatorbernite [ $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ ]
	Autunite	$Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10-12H_2O$	48~50	오렌지색, 연녹색. Calcium Uranyl Phosphate. Meta-Autunite( $2-6H_2O$ )와 유사
	Uranophane (Uranotite)	$Ca(VO_2)_2(SiO_3)_2$	56	우라늄 규산염 광물. Beta-uranophane과 유사
	Gummite			우라늄산화물과 다른 광물의 혼합물. 야외에서 노란색, 황색, 적색 및 여러 색의 혼합광 총칭
	Zircon	$ZrSiO_4$		
기타	Allanite	$(Ce, Ca, Y)_2(Al, Fe, Mg)_3Si_3O_{12}(OH)$		
	Thucolite			Uraninite와 탄화수소의 혼합물

는 원리는 우리가 잘 알고 있는 아인슈타인의 유명한  $E=mc^2$ 로 표현되는 법칙으로, 핵분열 전 후에 발생한 질량결손만큼 에너지가 발생한다는 원리이다. 우라늄의 열중성자에 의한 핵분열에서는 약 200MeV의 에너지를 방출하며 평균 2.5개의 중성자도 방출하여, 이렇게 방출된 중성자가 다른 우라늄 235 원자를 분열시키도록 조건을 주면 연쇄반응을 일으켜 거대한 에너지를 방출하게 된다. 이때 연쇄반응이 서서히 일어나도록 하여 원하는 에너지를 안전하게 이용하는 것이 원자로나이다. 따라서 원자로는 우라늄이 분열해 열에너지를 낼 수 있도록 만들어진 보일러라고 할 수 있다(한전원자력연료주식회사).

우라늄이 분열해 열에너지를 낼 수 있도록 만들어진 보일러인 원자로에는 여러 종류가 있지만 현재 우리나라의 원자력 발전소의 원자로로는 가압경수로형과 가압중수로형으로 이루어져 있다. 이 중 가압경수로는 세계 원전의 60% 정도를 차지하는 원자로로서, 명칭에서도 알 수 있듯이 냉각재와 감속재로 일반 물(H<sub>2</sub>O)을 사용하며, 연료는 핵분열이 가능한 U-235가 2~5% 들어있는 저농축우라늄을 사용한다. 국내 원전 중 월성 1·2·3·4호기 외에는 모두가 가압경수로이다. 가압중수로는 캐나다에서 개발해 캔두(CANDU)라고도 불리는 원자로로 냉각재와 감속재로 중수(D<sub>2</sub>O)를 그리고 연료로 천연우라늄을 사용하는 것이 가장 큰 특징이다(한전원자력연료주식회사).

## 우라늄 광물

원자로에 사용되는 핵연료의 원료물질인 우라늄은 자연에서 주로 우라늄 광물로부터 얻어지는데 우라늄을 함유하는 광물은 여러 종류가 있다. 우라늄을 주성분으로 하는 것만도 약 100여종이

상으로 알려져 있으나 실제 경제성 있는 우라늄 광석을 구성하는 우라늄 광물은 몇 종류에 지나지 않는다. 우라늄을 주요 광석광물로 U를 함유하는 종류에는 우라니나이트(Uraninite, UO<sub>2</sub>), 코피나이트(Coffinite, U(SiO)<sub>2</sub>(OH)<sub>4</sub>), 카노타이트(Carnotite, K<sub>2</sub>(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>(VO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O), 오테나이트(Autunite, Ca(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·10~12H<sub>2</sub>O), 토버나이트(Torbernite, Cu(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·8~12H<sub>2</sub>O), 우라노페인(Uranophane, Ca(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>·6H<sub>2</sub>O), 투야무나이트(Tyuyamunite Ca(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>(VO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·5~8H<sub>2</sub>O) 등이 있다(표 1). 이 중 우라니나이트는 교질상의 우라니나이트 변종인 핏치블렌드(Pitchblende)로서도 잘 알려져 있으며 항상 부분적으로 산화되어있기 때문에 실제 화학식은 UO<sub>2</sub>와 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>의 사이에 분포한다(김수진, 1983; Klein, 1993). 또한 오테나이트 등의 광물은 자외선에 의해 형광을 내기 때문에 이를 우라늄 탐사에 이용하기도 한다. 우라늄광상의 탐사에는 흔히 방사능측정기를 사용하는데 실제 우라늄 광석에서 감지되는 방사능은 우라늄의 방사성붕괴로 결과된 딸핵종들의 방사능에 의한 것이기 때문에 탐사의 자료로 사용될 수는 있지만 방사능의 세기가 우라늄의 함량과 반드시 비례하지는 않는다.

우라늄 자원으로서의 우라늄 광물외에 바닷물이 있을 수 있다. 바닷물의 우라늄 평균농도는 약 3ppb로 아주 작지만 바닷물의 양을 고려한다면 우라늄의 양은 약 40억톤으로 육지에서 경제적으로 채굴이 가능한 우라늄의 수백배 이상으로 추정되고 있다(이기순, 2001).

## 우라늄 광상

현재까지 알려진 우라늄 광상은 크게 선캄브리아대(특히 17억 년보다 더 오래된 지질시대)의

대륙 지각 속에 있는 것과 고생대 중기(약 4억 년 전)~현재 사이에 퇴적암·산성화성암 지층 내 형성된 것으로 2가지로 크게 구별할 수 있다. 국제원자력기구(IAEA)는 우라늄자원의 유형에 대해 세계적인 주요 우라늄자원 부존지역의 지질(geological setting)에 근거하여 다음과 같이 8개형의 우라늄광상 지질형태(geologic type of uranium deposits)별 분류를 한 바 있다(IAEA, 1990).

① 석영-역암 광상(Quartz-pebble conglomerate deposit) : 함석영력 역암에 배태된 광상으로써 시생대의 화강암 및 변성암 상부에 퇴적된 하부 원생대 층에서 발견된다. 지구대기가 무산소였던 시대(약 22억 년 전)에 형성되어 우라늄이 산화·용탈되지 않고 현재까지 그대로 남아 있는 당시의 사광상이다. 주산지는 캐나다의 엘리트 레이크, 남아프리카공화국의 윗워터즈란드(금을 수반한다) 등이다. 우라늄광물은 주로 우라니나이트이나 토륨 등 우라늄 광물을 포함한 중금속광물과 공생한다.

② 원생대 부정합 관련 광상(Proterozoic unconformity-related deposit) : 16~18억 년 전 지구상에 일어났던 조산운동기에 발달한 원생대의 부정합과 관련이 있는 것으로 시생대의 기저암이 분포하는 선캄브리아기의 순상지에서 주로 발견된다. 일단 산화된 우라늄이 부정합면(기반암과 피복층의 경계면)을 따라 이동·재침전된 것이다. 일부는 기반암의 갈라진 틈에 침투하여 광맥상태로 나타난다. 오스트레일리아 북부의 파인크릭 지향사대, 캐나다의 비버로지지구 등이 있다. 우라늄 광물은 피치블렌드(Pitchblende)이며 산포상 또는 괴상의 형태로 발달된다.

③ 각력복합체광상(Breccia complex deposit)

④ 화성암과 변성암내 광염형 마그마, 페그마타

이트, 접촉광상(Disseminated magmatic, pegmatitic and contact deposits in igneous and metamorphic rocks) : 화강암, 마그마타이트, 섬장암, 페그마타이트 및 탄산염 내에 형성되며 변성암 속에서는 Ni, Co를, 페그마타이트 속에서는 Zr, Th, 희토류원소 등을 수반한다. 산포상 접촉광상은 화강암에 의해 관입된 흑연질 편마암의 열극 내에 발달되는 것으로 우라늄광물은 주로 피치블렌드다. 나미비아의 레싱은 대규모 광염형 광상의 예이다.

⑤ 맥상광상(vein deposit) : 모암내의 열극 및 각력대 등의 공동을 우라늄광물들이 충전한 것으로 유럽, 북미 등지에 분포. 주로 화강암과 관련이 있는 것으로 우라늄 광물은 주로 피치블렌드 및 코피나이트 등이 황철석 및 철산화물과 함께 소량으로 맥상으로 발달된다. 프랑스의 마시프상트랄, 동유럽의 엘체산지 등이 있다.

⑥ 사암내에 배태된 광상(sandstone deposit) : 하성 또는 천해성 환경에서 퇴적된 암석 내에 주로 발달한다. 우라늄을 함유한 지하수가 사암층 속을 통과할 때 환원되어 우라늄이 재침전하여 형성된 광상이다. 1차 우라늄 광물인 피치블렌드 혹은 코피나이트와 풍화작용에 의해 2차 우라늄 광물인 카노타이트, 투야무나이트, 우라토페인 등이 아코스질 석영사암 내에 배태된다. ① ② 유형과 함께 자원으로서 중요하다. 미국의 콜로라도고원 등이 있다.

⑦ 표성 광상(surficial deposit) : 지하수유동 등에 의하여 지표에 운반 침전된 광상이다. 우라늄을 함유한 물이 건조기후에서 증발하고 다른 염류와 함께 우라늄광물이 침전된 것이다. 오스트레일리아의 일릴리 등이 있다.

⑧ 기타광상(other types of deposit) : 이밖에

석회암 및 석회암 공동이 발달하는 카르스트 지역에 발달하는 광상, 해양성 인산암염에 산포상으로 배태되는 광상, 역청질 세일 내에 부분적으로 농집된 광상, 페름기-석탄기의 석탄 및 올리고신 갈철광에 부존하는 광상, 화산 활동 지역의 화산성 쇄설 물질에 배태된 광상 등이 있다(대한광업진흥공사).

### 우리나라의 우라늄 자원

우리나라의 우라늄광상에 대한 조사는 1955년부터 시작된 이래 1976년까지 간헐적으로 진행되어 대부분 경제성이 희박한 우라늄의 광화작용이 확인되었다. 그 이후 저품위 이지만 지금까지의 탐사 결과로는 가장 대규모의 광상에 해당하는 것으로, 1976년부터 한국자원개발연구소(현 한국지질자원연구원)에서 본격적인 탐사가

시작되어 1985년도에 종결된 옥천층군에 배태하는 흑색세일형의 우라늄 광상이 대표적이다.

한편 같은 기간 다른 형태의 우라늄에 대한 탐사도 병행되어 가평-양평지역의 선캠브리아기 변성퇴적암에 배태하는 층준 규제형의 우라늄광상이 발견되어, 한때는 IAEA의 우라늄광상의 지질형태별 유형분류에 따른 소위 부정합형의 우라늄광상으로 불리어 왔으나, 캐나다나 호주 등에 산출되는 전형적인 부정합형의 우라늄광상과는 그 유형이 상이하다. 그 외 고기화산암에 관련된 광화작용, 중생대의 사암이나 세일에 배태하는 사암형의 광상, 알카리 교대작용에 관련된 우라늄광상, 열수광상 등의 소규모이나 다양한 형태의 우라늄광상이 확인되었고, 지구구조별로는 경기육괴, 영남육괴, 옥천층군, 소규모 함몰대에 퇴적된 경상층군 등에서 우라늄광상이 발견된다(표 2, 한국원자력연구소, 2000).

표 2. 전국 주요 우라늄광상 분포지역 (한국원자력연구소, 2000)

지역/위치	지형/지질	광체특성	주변환경
충주서남부	이질암, 함U흑색점판암	WSW로 plunge 역전향사구조 규암층하부 8개 lens상 광체 N45°~60° E, 40° NW, N30° W, 40° NW/40° S 폭: 1.2~10.3m U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.04~0.06%, V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 0.48~1.47% FC (Fixed carbon): 8.54~18.16%	음성천(동남류: 광체 통과)-달천천(북동류)-충주호
괴산 덕평 충북 괴산군 정천면 덕평리	흑색점판암, 함U흑색점판암, 천매암	N40°~45° E, 50°~80° NW(평균 60°) 7~4매(남7매→북4매) 연장: 1.650m (평균:200~300m) 폭: 3.9m(0.1~20.9m) U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.041%, V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 0.930%, FC: 13.4%	속리산-달천천(덕평광체)-충주호
괴산 용유리-미원 충북 청원군 미원면 충북 보은군 내부면 산외면	규암/석회암/흑색점판암호층상: 흑색점판암/흑색변성사암 중:회녹색/회질천매암/흑색점판암 하:회녹색및사질천매암/흑색점판암/회녹색사질함역천매암	N50° E, 45°~75° NW 총연장: 0.5~2.5Km 폭: 3.8m(0.3~14.4m) U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.034%	속리산-박대천(어은리,귀만리)-달천천-충주호

표 2. (계속)

지역/위치	지형/지질	광체특성	주변환경
보은서부지역 충북 보은군 회남면	석회질 점판암 상: 흑색점판암/사질천매암 중: 흑색점판암/사질천매암 하: 흑색점판암/함U흑색점판 암(중부사질 천매암 경계 에서 50~100m 하부), 담회색천매암(운모편암), 함역천매암	N30° E, 36° NW 총연장: 1.7Km 폭: 3.8m(0.3~14.4m), 2.4m(0.3~5.2m) U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.031%, V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 0.47%, FC(7.34%), Cu(0.028%), Mo(0.025%), Ni(0.030%)	지류(분저리에서 남류)-대청호
대전 이현 대전 대덕구 이현동	규암, 흑운모편암 함U흑연편암 흑운모편암, 규암 N30° ~40° E, 50~70° SE	지표: 950m, 심부: 230m, pinch, swelling이 심함 5~32m간격 2조 발달 폭: 1.1m(0.3~4.8m) U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.035%	
대전 소룡 대전 동구 소룡리	석회암, 녹회색사질천매암, 흑색점판암, 함U점판암협재, 녹회색사질천매암	N30° ~35° E, 39° ~60° NW 연장: 1.5Km 폭: 6.0m(0.6~21.7m) U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.036%, V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 0.63%, FC: 23.58%, S: 3.17%, Cu: 0.029%, Mo: 0.042%	지류-대전천-금강
대전 요광-성당 충남 금산군 추부면 요광-성당리	석회암(마전리석회암), 암회색점판암, 흑색점판암(함U층 협재), 녹회색천매암 및 편암	N40° ~50° E, 45° ~70° NW, 역전 연장: 4.7Km, 폭: 6.8m(0.2~49.1m) U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.028%	소옥천(서남서류)- 유등천-갑천-금강
대전 삼괴 대전 동구 삼괴리	녹회색천매암, 암회색사질천매암, 흑색점판암(함U층 협재), 암회색천매암	N20° E, 28° ~50° NW 연장: 2.2Km 폭: 3.3m(0.3~15.65m) U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.029%, V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 0.21%	지류(북동류)-대 전천-갑천
대전 콜남이 대전 동구 상소동	석회암/석회규산염암 흑색점판암(함U층협재), 흑운모편마암 암회색점판암	N50° E, 35° NW 연장: 0.8Km 단속적 폭: 11.1m(0.7~37.8m) U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.041%, V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 0.11%	
대전 추부 금산군 추부면 마전리	석회암, 암회색점판암 석회암, 흑색점판암(함U층협재), 녹회색천매암 및 운모편암	N55° E, 34° ~55° NW 역전 연장: 4Km 폭: 5.8m(0.1~46.4m) U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.033%, V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 0.19%, FC: 13.5%	
금산 도장골 금산군 복수면	석회암, 흑색점판암(함U층 협재) 녹회색사질천매암	N25° ~70° E, 34° ~57° NW로 역전 연장: 3Km, 폭: 9.0m(0.8~33.9m) U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.040%, V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 0.36%, FC: 19.49%, Cu: 0.026%, Mo: 0.060%, Ni: 0.031%	

표 2. (계속)

지역/위치	지형/지질	광체특성	주변환경
금산 수락/목산광체 금산군북수면 수영리 목산리 진산군수락리	변성사질암(석영운모편암, 사질천매암, 규암) 변성석회암(석회암, 흑색변 성이질암, 변성사질암쳐트, 석회질세일) 변성이질암(흑색점판암, 천 매암, 사질천매암)(함U흑색 점판암, 석회암협제)	- 목산 N60° E 4.5Km간 13개 lens 광체 - 수락 N20° E 3km간 9개 lens 광체	수영리/목산리(북 류)-유등천-갑천- 금강  수락리(북류)-대 곡천-갑천-금강
공주지역	역암, 함력사암 응회질~석회질세일 호상편마암, J화강암	연장: 약80m 폭: 수cm U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.002~0.0338%	지류(남동류)-금 강유입
평해지역 (금장산, 독곡) 울진온정 외선미리	쥬라기화강암, 역암/사암/세일 기성층변성화산암 원남통변성퇴적암	금장산: volcanogenic deposit, 연장 4m, 폭 1m내외 독곡: 사암형광상, 연장불량, 폭1m내외 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.012~0.155% U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.096~3.012%	금장산-소태천-남 대천-동해
중원산지역 양평 용문 중 원리	장락산규암 흑운모편암	규암과 편암의 엮리면내 lens상 광체 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.37~0.67%	중원산(남류)- 흑천(서남서류)- 남한강
유명산지역 가평 설악가 일리 양평 옥천 용 천리 경계부	선캄브리아기 규암 및 편암 흑운모-녹니석편암 흑운모편마암	편암/규암 경계하부 2~3m층준에 배태 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : -노두: 0.94~2.04% -시추: 0.001~1.1% -갱내: 2.5~9.8% V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : -노두: 0.02~3.31% -갱내: 0.21~0.61%	유명산(남서류)- 남한강
보납산지역 가평가평읍 보납산	선캄브리아기 편마암, 편암류 및 변성퇴적암	규암과 편마암의 경계부 편리를 따라 배태 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.089~0.1%	지류(보납산)- 가평천-북한강
진천지역 진천백곡 양백2리	쥬라기 화강암 석류석편암, 흑운모편마암 roof pendent 강구조로	500m에 걸쳐 불규칙 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> : 0.046%	백곡천상류(남동 류)-백곡저수지

### 우리늄 자원의 전망

이와 같이 우리나라도 우리늄 광석의 매장이 약 34,000톤(U) 확보되었으나, 평균품위가 0.038%인 저품위 우리늄광석으로 1970년대

중반 조사 종료 시 당시 경제성이 없는 것으로 평가되어 현재는 정광 소요량 전망을 해외에서 수입하고 있는 실정이다. 세계 우리늄 확인매장량은 약 475만톤(U)으로 세계 연간 소요량이 6.5만톤(U) 임을 고려할 때 이는 향후 약 70년



간 사용 가능한 양으로 평가되고 있으나 정확한 매장량을 산정하기는 어렵다. 또한 확인매장량과는 별개로 전 세계 원전 사용량의 약 150년분에 해당되는 979만톤(U)의 추정매장량이 있는 것으로 평가되고 있으며 과거 석유나 석탄의 가채 평가량이 탐사 및 채광 기술 등의 발전과 더불어 계속적으로 증가한 것처럼, 우라늄의 경우도 신규 탐사기술 및 최근 적용된 ISL(In-situ Leaching) 채광 기술의 도입으로 가채 평가량이 증가할 것으로 전망된다. 이 밖에도 약 2,200만톤의 우라늄이 지각 속에 인산염과 함께 혼재되어 있고 바닷물 속에도 전 세계 원전이 6만년간 사용할 수 있는 약 40억톤의 우라늄이 존재하고 있는 것을 고려한다면 우라늄 자원은 21세기에도 인류의 에너지문제를 해결하는데 기여할 수 있을 것으로 예상된다(한국원자력산업회의, 2007).

상기 매장량 중 대부분은 우라늄 시장가가 고가였던 1970~1980년대에 확인된 것이며, 구 소련 붕괴 후 구 소련산 우라늄 및 러시아 핵무기 해체 우라늄의 시장 유입과 더불어 세계 각국 및 전력사 보유 재고 우라늄의 시장 유입으로 우라늄 시장가가 안정된 1990년대 이후는 우라늄광 탐사 및 개발이 거의 중단된 상태이다. 특히 러시아 핵무기 해체 우라늄이 본격적으로 시장에 유입된 1990년대 중반 이후부터는 현재까지도 전 세계 우라늄 소요량의 50~60%만을 직접 채광한 우라늄으로 충당하고 있으며, 나머지는 재고 우라늄 등 다양한 형태의 이차 공급원(Secondary supplies)으로 충당하고 있다. 2000년대 초반까지는 러시아 핵무기 해체 우라늄 및 플루토늄의 상용 원전 사용 계획 등으로 전 세계 우라늄 시장이 안정세를 유지할 것으로 전망되어, 당분간은 신규 우라늄광 탐사 및 개발이 활발하지 않을 것으로 전망되었으나, 최근 향후 전 세계 우라늄 수급 불균형 우려에

따른 우라늄 시장가격의 지속적인 상승으로 캐나다, 호주, 카자흐스탄, 나미비아 등에서 신규 우라늄 광상의 개발이 본격적으로 이루어지고 있다(한국수력원자력주식회사, 2004).

## 우라늄 광상의 또 다른 가치

고준위방사성폐기물의 심부지층처분에 대한 장기적인 안전성확보를 위해서 선진 각국들은 다양하고 수많은 연구를 수행하여 왔다. 이러한 연구의 수행과정에서 현안문제로 대두되는 과제 중의 하나는 안전성 정도를 실제로 어떻게 보여 주며 또한 입증할 수 있는가 이다. 즉, 폐기물처분의 특징은 방사선적 안전성확보에 요구되는 기간이 수십 만년 이상의 지질시대에 준하는 기간 동안 발생하는 현상에 관한 것이다. 또한 자국의 지질환경 특성에 알맞은 처분방식을 결정해야 한다는 점과 처분안전성에 관한 모든 기술적평가 과정 및 결과는 원위치(in-situ)에서 실증되어야 한다는 점이다. 특히, 고준위폐기물 처분의 경우 가시적인 실증 사례들을 필요로 하기 때문에, 관련 시험방법 및 해석기술을 개발하고 처분사업이 착수되기 이전에 이러한 기술에 의한 실증 결과들이 제시되어야 한다. 처분장의 성능평가 과정에 적용되는 모든 입력인자들은 실내 및 현장시험 조사 등을 통해서 취득되는데, 이 과정은 대부분 제한된 시간과 공간 내에서 당시의 기술수준에 의존해서 구해진다. 따라서 실제 현상과는 상당한 규모의 불확실성을 초래할 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 실내 및 현장 시험 연구보다 처분장의 현실성에 가까운 시·공간적인 규모의 틀을 보여줄 수 있는 수단이 필요하게 된다. 이러한 관점에서, 처분안전성 평가 과정에서 관심의 대상이 되는 일련의 변화 또는 진화 과정과 유사한 현상을 상당한 시간 및 규모

로 진행되는 것을 자연환경에서 발견할 수 있으며, 이러한 현상을 방사성폐기물 처분분야에서는 '자연유사(natural analogue)' 라 한다.

자연유사연구는 실험실 규모의 시·공간적인 범위를 훨씬 초월하는 규모로 자연상태에서 일어나고 있는 현상 중 처분안전성과 유사한 현상을 연구함으로써 처분장의 안전성 평가에 필요한 정보를 얻거나 평가 모델을 입증하는 모델확인 방법을 말한다. 처분부지의 선정은 원위치 물성이 폐기물처분에 적합한 가를 시험하는 것이 포함된다. 방사성폐기물을 안전하게 처분하는 가장 중요한 문제는 처분하기 전에, 폐기물을 지하에 매설하였을 때 핵종이동이 장기간 동안에 주변 자연환경에 의해 어떤 영향을 미치는지 예측하는 것이다. 자연유사 연구의 효과적인 이용은 지질학적인 긴 시간이 경과하는 동안에 방사성핵종 이동의 누적된 영향을 실제 방사성폐기물 처분장에서도 유사하게 적용할 수 있다는 점이다.

이러한 관점에서 기존 우라늄 광상은 자연상태에서 방사능을 띤 광물질이 일정량 이상 부존하는 곳으로 이는 원자력에너지의 원료 공급원으로서 중요성뿐만 아니라 환경적인 측면에서 자연상태에 방사성물질이 적치 또는 매설되어 있는 것과 유사한 경우가 된다는 점에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 특히, 우리나라의 경우 옥천층군 내에 부존하는 우라늄 광상은 한반도 중심을 횡단하는 광범한 지역(120km)에 걸쳐 발달하며, 환경적인 면 뿐만 아니라 자연상태에서 방사성핵

종들의 지화학적 거동특성을 연구할 수 있는 대상이 될 수 있다(한국원자력연구소, 2000).

\* 다음 호의 우라늄 원광에서 핵연료까지 (II)에서는 핵연료 주기에 따른 핵연료의 제조단계에 대한 해설로서 정련, 변환, 농축 등에 대한 내용이 이어질 예정임.

## 참고문헌

- 김수진 (1983) 광물학 원론.  
대한광업진흥공사, 한국자원정보서비스 홈페이지 (www.kores.net).
- 이기순 (2001) 핵연료개론.  
한국수력원자력(주), 산업자원부 (2004) 원자력 발전백서.  
한국수력원자력주식회사 홈페이지 (www.khnp.co.kr).
- 한국원자력산업회의 (2007) 원자력연감.  
한국원자력연구소 (2000) 자연유사연구 대상지역 현황분석 및 예비평가, KAERI/TR-1527/2000.  
한전원자력연료주식회사 홈페이지 (www.knfc.co.kr/kor)
- IAEA (1990) Uranium red book, IAEA.  
Klein, C. (1993) Manual of mineralogy.