

# 우라늄 원광에서 핵연료까지 (II)

김 건 영

한국원자력연구원 고준위폐기물처분연구부

지난호의 핵연료에 대한 개요와 우라늄 광물 및 우라늄 자원에 대한 내용에 이어서 이번호에는 핵연료 주기에 따른 핵연료의 제조단계에 대한 내용을 다루고자 한다. 주로 해설될 내용은 정련, 변환, 농축 등에 대한 내용이며 이해를 돕기 위해 지난호에 설명한 핵연료 주기에 대한 개요를 다시 한 번 간략하게 설명한 후 핵연료 주기의 각 단계에 대하여 설명하도록 하겠다.

## 핵연료 주기와 핵연료의 제조

원자력발전소에서 사용하는 핵연료는 천연 우라늄광석을 원료로 하여 여러 단계의 공정을 거쳐 제작된다. 즉, 핵연료의 원료광물을 채광하고 정련한 후, 변환, 농축 및 성형가공을 통해 핵연료(핵연료집합체)를 만들고, 이 핵연료를 원자로에서 사용한다. 사용하고 난 사용후 핵연료는

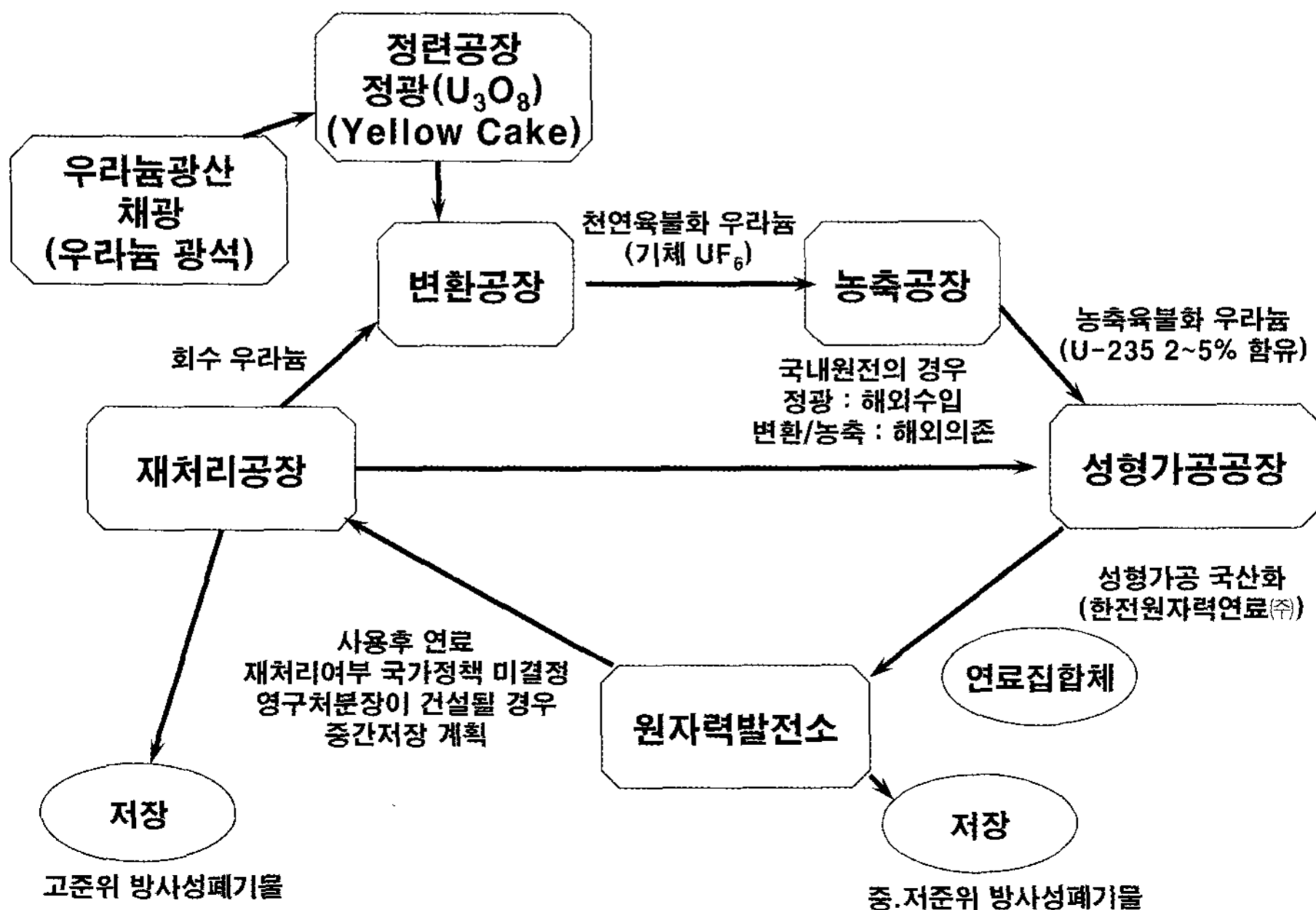


그림 1. 핵연료주기 모식도(한국수력원자력주식회사, www.khnp.co.kr).

직접 처분하거나, 혹은 원자로에서 사용이 끝난 후 바깥으로 빼낸 핵연료는 100% 연소되지 않고 아직 사용할 수 있는 일부 우라늄(약 1% 정도)과 연소 중에 생성되는 플루토늄이 함유되어 있으므로 재처리 과정에서 이들을 분리, 추출하여 다시 핵연료화 하게 되며, 그 과정중에 다시 고준위 방사성폐기물을 남기기 때문에 이들을 처분하는 등의 과정을 통틀어 “핵연료 주기(Fuel Cycle)”라고 한다. 간단히 말해서 핵연료 주기란 우라늄 채광에서부터 원전연료로 사용된 후 사용후 연료로서 재처리, 재사용 또는 방사성 폐기물로 처분되기까지의 우라늄 일생이라 할 수 있다(그림 1). 한 주기는 보통 채광에서 성형 가공까지 2년, 원자로에서 3년, 재처리에 1년 등으로 최소한 약 6년으로 본다(이순영, 1995).

우라늄 광석에서 핵연료의 제조까지는 몇 단계의 공정을 거치는데 각 단계에 대한 용어 및 정의는 참고문헌마다 조금씩 차이가 있으나 여기에서 설명되는 내용은 주로 한국수력원자력주식회사와 한전원자력연료주식회사 홈페이지에 나와 있는 일반인들을 위한 자료와 용어들을 참고 하였다.

## 채 광

핵연료 주기의 제일 첫 단계는 천연 우라늄 광석을 노천(Open Pit) 및 지하(Underground)의 우라늄 광산에서 우라늄 광석을 캐내는 “채광” 공정이다. 우라늄은 천연에 존재하는 방사성원소의 하나로, 석탄처럼 땅 속에 묻혀 있기 때문에 먼저 채굴작업을 통하여 이를 캐내야 한다. 이렇게 채광한 광석중에 함유된 우라늄의 85~95%는 정련공장에서 분쇄, 여과 및 화학적 과정을 통해 추출된다. 한편 최근에는 채광비의 절감 및 환경보전을 위하여 광산내에 침출액을 주입하여 우라늄을 용해시켜 회수하는 원

지용해침출채광법(In Situ Leaching: ISL)을 이용하기도 한다.

현재는 캐나다, 호주, 카자흐스탄, 나미비아, 러시아, 니제르의 6개국이 전 세계 우라늄 생산의 80%를 차지한다. 캐나다는 현재 세계 제일의 우라늄 생산국이며 연간 25.6백만 파운드의 우라늄 정광( $U_3O_8$ )을 생산한다. 카자흐스탄은 2010년에는 4천만 파운드, 2013년에 5천만파운드를 생산할 계획을 하고 있기 때문에 계획대로라면 2010년에는 카자흐스탄이 세계제일의 우라늄 생산국이 될 전망이다(Julian Steyn, 2007).

## 정 련

광산에서 채광한 우라늄 광석에서 불순물을 제거하기 위하여 천연우라늄을 산이나 알칼리에 녹인 뒤 열을 가해 우라늄과 수소, 산소가 결합된 소위 “옐로우 케이크(Yellow Cake)”라고 불리는 노란 분말형태의 우라늄 정광( $U_3O_8$ )을 만드는 공정을 “정련”이라고 한다. 정련공장에서 생산되는 우라늄분말( $U_3O_8$ )은 질량비로 약 70%의 우라늄을 함유하고 있다.

우라늄 광석을 정련하기 위해서는 우선 광석을 불밀 등으로 분쇄한 다음 비중선광법, 부유선광법 또는 자기선광법 등의 적당한 선광법을 이용하여 우라늄 품위를 높인다. 이렇게 품위를 높인 우라늄 원광석에서 우라늄을 분리하기 위해서 산이나 알칼리에 용해시켜 우라늄을 침출하는데 용해시에는 4가 우라늄 이온( $U^{4+}$ )을 가용성의 6가 우라늄 이온( $UO_2^{2+}$ )으로 산화시키는 것이 필요하므로 보통  $MnO_2$ ,  $NaClO_3$  등과 같은 산화제도 함께 첨가한다. 우라늄 침출에서 탄산칼슘성분이 적은 광석은 염산 또는 질산 등에 용해시켜 침출하는 것이 효율적이지만, 가격이 저렴한 황산을 이용하는 황산 침출법을 주로 사용한다. 그러나 탄산칼슘 함량이 5~6% 이상

함유된 경우에는 산 대신에 탄산나트륨으로 용해시켜 우라늄을 침출하는 탄산염 침출법(또는 알칼리 침출법)이 사용된다(이기순, 2001).

이렇게 산이나 알칼리로 침출시킨 우라늄 용액은 침전법, 이온교환수지법 또는 용매 추출법을 이용하여 우라늄을 회수한다. 회수된 우라늄을 물로 세척한 뒤 건조시키면 노란 분말형태의 중(重)우라늄산염이 되는데, 이 중우라늄산염이 황색이기 때문에 옐로 케이크라고 한다. 옐로 케이크는 다시 변환 및 농축과정을 거쳐서 원자로 연료용의 금속 우라늄 또는 화합물의 원료로 사용한다.

## 변환 및 농축

채광 및 정련을 거친 천연우라늄에는 U-235와 U-238이 0.7 : 99.3 비율로 함유되어 있다. 원자력발전소에서 연료로 사용하기 위해서는 U-235의 비율을 2~5% 정도로 높여야 한다. 이렇게 U-235의 비율을 높이는 것을 “농축”이라고 한다. 농축을 하기 위해서는 고체상태의 우라늄 정광(U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)을 기체상태의 육불화우라늄(UF<sub>6</sub>)으로 만들어야 하며 이 공정을 “변환”이라고 한다. 육불화우라늄(UF<sub>6</sub>)은 우라늄(U)에 불소(F)원자가 6개 붙어있는 화합물로서, 앞서 설명한 고체상태인 우라늄 정광(U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)인 옐로우케이크에 불소를 결합시키면 육불화우라늄이 된다.

원자력발전소의 원자로 중, 중수로용 연료의 경우에는 정광(U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)을 바로 성형가공할 수 있는 이산화우라늄(UO<sub>2</sub>) 분말로 만들어야 하며 이 공정 역시 “변환”이라 한다. 반면에 기체상태의 저농축 육불화우라늄(UF<sub>6</sub>)을 원자력 연료로 성형가공하기 위하여 다시 고체상태의 “이산화우라늄(UO<sub>2</sub>)”으로 만드는 공정은 “재변환”으로 이와 구별하여 부른다.

원자력발전소에서 연료로 사용하기 위해서 변

환공정을 통하여 만들어진 육불화우라늄(UF<sub>6</sub>)을 여러가지 농축방법으로 U-235의 비율을 높게 만든다. 자연속에 존재하는 천연우라늄은 원자핵분열을 할 수 있는 우라늄235가 약0.71%이며, 나머지는 핵분열하지 않는 우라늄238로 구성되어 있다. 그러므로 천연우라늄을 농축을 위한 육불화우라늄(UF<sub>6</sub>)으로 변환시키고 이를 다시 원자력발전소의 원자로 중, 경수로 연료로 사용하기 위해서 U-235의 비율을 2~5%로 높이는 것이다. 그러나 핵폭탄을 위해서는 90% 이상 고농축을 시켜야 하기 때문에 원자력발전을 위한 핵연료의 제조와 핵폭탄의 제조는 엄격히 구분될 수 있다.

우라늄 동위원소를 분리할 때 분리 유니트에서 농축되는 비율은 공급되는 원료의 조성에는 관계없이 거의 일정하므로 원칙적으로 보면 동일한 분리 공정을 계속해서 수행하면 원하는 농축도를 얼마든지 높일 수 있다. 그러나 동위원소간에는 물리적 및 화학적 성질이 동일하고 특히 우라늄과 같은 무거운 원소인 경우에는 동위원소간에 질량차가 매우 작으므로 통상적인 방법으로는 분리하기 어렵다(이기순, 2001).

이러한 농축에는 기체확산법(GDP: Gaseous Diffusion Process)과 기체 원심분리(gas centrifuge) 방법 등이 사용되며 이밖에 노즐 분리법과 LASER법, 플라즈마 분리법, 화학 교환법 등이 사용된다(www.kores.net; 이기순, 2001).

기체확산법은 분자량이 다른 기체가 여러 미세한 구멍을 통과할 때 그 확산속도에 차이가 있음을 이용하여 동위원소를 분리하는 방법으로(www.kores.net), 미국과 프랑스는 초기에 기체확산법을 사용하였으나 비용이 비싸고 많은 전력소모로 인하여 가스 원심분리기로 전환 중이다. 원심분리법은 질량수가 각각 다른 혼합기체를 원심력을 이용하여 분리시키는 방법으로, 회전 용기에 혼합기체를 넣고 용기를 회전시키면 용기내의 기체도 용기와 같은 각속도로 회전하게

되는데, 이때 기체분자에 원심력이 작용하여 가벼운 기체분자는 회전 중심부 쪽으로 그리고 무거운 분자는 주변으로 모이게 되어 이를 각각 따로 회수하여 질량수가 다른 혼합기체를 분리하는 방법이다(이기순, 2001). 러시아 역시 초기에는 기체확산법을 사용하였으나 오래 전부터 원심분리방법으로 전환하였다. 일본 역시 원심분리법을 사용하고 있다. 그러나 현재 진행중인 레이저를 이용한 방법이 개발되면 더욱 효율적이고 경제적인 우라늄 농축이 가능하게 될 것으로 전망된다(이순영, 1995). 레이저 분리법은 동위원소가 각각 특정 에너지 준위에 해당하는 고유파장을 갖는 성질을 이용한 방법으로써 각각의 파장에 맞는 레이저를 쏘여주어 선택적으로 질량수가 서로 다른 동위원소를 들뜨게 하거나 이온화시켜서 분리시키는 방법이다(이기순, 2001).

현재 국제적으로 Tenex(러시아), Usec(미국), Areva(프랑스), Urenco(영국, 독일, 네덜란드)의 4개의 주요 공급자가 있으며 일본과 중국이 자체적으로 농축기술 및 시설을 보유/운영하고 있다. 이밖에 캐나다, 호주, 남아프리카 등의 우라늄 자원 보유국들도 새로운 농축계획을 발표하고 있으며, 아르헨티나, 브라질은 원자력 원료의 공급을 보장받기 위하여 자체적으로 농축기술을 확보하려고 하고 있다.

## 성형가공

고체상태의  $UO_2$  분말로써 펠렛과 연료봉을 만들어 원자력발전소에서 연료로 사용하는 핵연료 집합체를 만드는 일련의 공정을 “성형가공”이라고 한다.

우리나라의 경우 현재 경수로와 중수로의 원자료를 운영중이며 이들 경수로용 원자력 연료와 중수로용 원자력 연료는 서로 다른 성형가공 공정을 거친다. 경수로용 원자력연료를 만들기 위

해서는 먼저 수입된 육불화 우라늄을 재변환공정을 통해 이산화우라늄( $UO_2$ )으로 바꾸어 균질 혼합과 분말준비공정을 거쳐 압분체로 만든다. 이 압분체는 소결과 연삭을 거쳐  $UO_2$  소결체로 완성되며, 소결체는 연료봉에 장입되어 봉단마개 용접과 골격체 조립, 락커도포, 집합체 조립, 헬륨누출시험 그리고 최종검사를 거쳐 원자력연료 집합체로 완성된다. 원자력연료는 여러가지 부품으로 구성되는데, 우리나라의 한전원자력연료(주)에서는 대부분의 부품을 국산화하여 사용하고 있다. 중수로용 원자력연료도 경수로형과 비슷한 공정을 거치게 되는데, 중수로용은 경수로와 달리 천연우라늄을 사용하기 때문에 재변환공정이 없다. 또한 소결체의 크기도 경수로에 비해서 약간 크며, 부품공정에서 베릴륨 도포와 흑연도포, 가접 및 경납땜, 베이킹 등의 공정을 거친다. 또한 경수로용 원자력연료 집합체의 길이가 약 4m에 이르는 반면 중수로용은 50cm가 약간 못된다([www.knfc.co.kr/kor](http://www.knfc.co.kr/kor)). 우리나라는 천연우라늄을 그대로 사용하는 중수로형인 월성 원자력발전소를 제외한 나머지 8기의 원자력발전소가 모두 3.2% 정도의 농축우라늄을 핵연료로 사용하고 있는 경수로형 원자력발전소다.

이렇게 완제품의 핵연료집합체를 원자력발전소의 원자로에서 에너지를 발생하는 과정을 “연소”라고 하며, 연소를 완료한 연료를 “사용후 연료”라고 한다. 사용 후 핵연료에는 U-235이 중성자를 흡수하여 만들어진 핵분열성 물질인 플루토늄(Pu)과 장전된 U-235 중에 연소되지 않은 일부 U-235가 남아있으며, 따라서 사용 후 핵연료 중에서 우라늄 및 플루토늄을 회수하여 핵연료의 원료물질로 재사용할 수 있다. 이처럼 사용후 연료에서 재활용 가능한 우라늄 및 플루토늄을 회수하는 공정을 “재처리”라고 하며, 회수된 우라늄은 농축과정을 거쳐 재사용된다. 플루토늄은 경수로 또는 고속증식로의 핵연료로 사용될 뿐 아니라 원자폭탄의 원료가 된다([www.kores.net](http://www.kores.net)).

## 국내 원자력 발전과 원자력연료 (www.knfc.co.kr/kor)

우리늄은 원자력발전소의 원료로서 안정적 연료공급 에너지이며, 세계 전역에 고르게 매장되어 있고, 수입원이 정치적·경제적으로 안정된 선진국이어서 석유와 비교하여 세계 에너지 정세에 상대적으로 크게 영향을 받지 않는다. 특히 우리늄은 소량의 연료로 막대한 에너지를 낼 수 있으며, 수송과 저장이 쉽다. 예를 들어 100만kW 급 발전소를 1년간 운전하려면 석유로는 150만 톤이 필요하나 우리늄은 30톤이면 된다. 그리고 원전은 우리늄을 원자로에 장전하면 12~18개월 가량은 연료를 교체하지 않아도 되므로 그만큼의 연료의 비축효과가 있는 셈이다.

원자력연료는 경수로용을 기준으로 할 때, 크게 소결체, 연료봉, 집합체로 분류할 수 있다. 소결체는 우리늄 재변환과 압분 과정을 거쳐 제조되는 길이 1cm 정도의 원주형 압분체로, 무게가 약 5.2g, 직경이 약 8mm 정도다. 이 소결체는 길이 4미터 정도의 연료봉 하나당 356개가 장입되며, 원자력연료 집합체 1다발에는 약 96,000개가 장입된다. 이 원자력연료 소결체 1개가 생산할 수 있는 전력량은 약 1.600kWh로 우리나라 1가구가 약 8개월간 쓸 수 있는 전력량에 해당한다. 또한 원자력연료 집합체 1다발이 생산할 수 있는 전력량은 약 1억5천만kWh로 약 6만가구가 1년간 쓸 수 있는 양에 해당된다. 에너지원별 효과를 볼 때도 우리늄 235 1그램은 석유 9드림과 석탄 3톤에 해당하는 열에너지를 생산할 수 있으므로 소량의 원자력연료를 원자로에 장전하여 약 3~4년 동안 많은 열을 발생시킬 수 있다.

우리나라는 2008년 현재 고리, 울진, 영광 등

에서 16기의 경수로형 원자력발전소가 상업운전을 하고 있으며, 중수로형 원자력발전소는 월성에서 4기가 가동 중에 있고 추가로 8기의 원자로가 건설 중에 있다. 우리나라는 1970년대부터 원자력발전을 시작하였는데, 초기에는 외국에서 원자력발전에 필요한 원자력연료를 수입하여 사용하였다. 그러나 1989년부터 한전원자력연료(주)에서 원자력연료를 생산하기 시작하였고, 현재는 원자력연료 설계와 제조기술을 완전히 국산화하여 외국의 도움없이 우리 기술로 원자력연료를 생산하여 국내에서 가동 중인 모든 원자력발전소에 공급하고 있다.

한국수력원자력주식회사(www.khnp.co.kr)와 한전원자력연료주식회사 (www.knfc.co.kr/kor)는 각각 국내 원자력발전과 원자력연료에 대한 보다 전문적이고 다양한 내용들을 일반인들도 쉽게 이해할 수 있도록 설명하고 있으므로 관심있는 독자들은 이들 홈페이지를 방문할 것을 추천한다.

## 참고문헌

- 대한광업진흥공사, 한국자원정보서비스 홈페이지 (www.kores.net).
- 이기순 (2001) 핵연료개론.
- 이순영 (1995) 원자력과 핵은 다른 건가요?, 한세출판사.
- 한국수력원자력주식회사 홈페이지 (www.khnp.co.kr).
- 한전원자력연료주식회사 홈페이지 (www.knfc.co.kr/kor).
- Julian Steyn (2007) Never a dull moment, Nuclear Engineering, International, 52, 14~18.