

우라늄 잔류물질 장기저장을 위한 예비조사

최윤동, 최휘경, 이규일, 황두성, 문계권
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
 vdchoil@kaeri.re.kr

1. 서론

한국원자력연구원에서는 지금까지 연구를 수행하던 중에 발생된 폐기대상 우라늄 잔류물질에 대하여, 효율적 관리를 위하여 저장고에 집중 관리하고 있다. 이러한 폐기대상 우라늄 잔류물질은 상온에서 안정한 형태를 취하는 물질로서 장기저장에 적합한 화합물이어야 한다. 우라늄 금속 또는 합금, 우라늄 산화물(U_3O_8 , 또는 UO_2), 그리고 UF_4 등이 안정한 화합물이며, 저장고에 관리되는 우라늄 잔류물질은 이러한 화합물 중에 한 가지 형태로 보관되어야 한다. 한편, 폐기대상 우라늄 잔류물질은 항구적으로 저장 관리될 수 없으며 결국에는 처분되어야 한다. 미국 NTS(Nevada Test Site)에 상기 화합물형태의 감손우라늄 잔류물질을 처분한 예[1, 2, 3]가 있다. 국내에서도 폐기대상 우라늄 잔류물질이 늘어나는 추세에 있으며, 장기적으로는 외국의 처분사례 조사로부터 국내 여건에 적합한 처분 형태 및 기준에 대한 검토와 정립이 필요하다.

2. 장기저장 적합성 조사 결과

2.1 장기저장 가능한 우라늄 화합물

장기저장을 위한 안정한 형태의 대표적 우라늄 화합물은 표 1.에 나타낸 바와 같다. 대부분 우라늄 화합물의 겉보기 밀도는 그것의 이론적 밀도보다 상당히 낮으며, 생성된 과정에 따라서 매우 다양한 값을 가진다. 따라서 장기저장을 위한 우라늄 화합물이 보다 적은 부피를 가지기 위해서는 우라늄 금속을 제외하고는 더 높은 밀도를 가지도록 함이 좋다. 이는 적은 부피에 따른 포장, 운송, 그리고 처분 등의 비용이 줄어들기 때문이다. 우라늄 금속의 경우 공기 중 수분과 서서히 반응해서 우라늄 산화물과 수소를 발생하게 되는데, 반응속도는 $2 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-4} \text{mg/cm}^2$ 범위에 있다. 따라서 미국의 NTS와 같은 건조한 장소에 처분하는 경우 metal hydride나 수소 생성 등은 큰 문제가 되지 않는다. UF_4 경우, 상온에서 물에 대한 용해도는 약 40ppm 으로 매우 적다. UO_2 경

우, 미세 분말은 지하수와 접촉해서 아주 서서히 산화되어 보다 안정한 다른 우라늄 산화물을 생성한다. U_3O_8 경우, UO_2 와 비슷한 성질을 가지며 미세한 UO_2 분말이 가지는 자연 발화적인 pyrophoric한 성질은 나타내지 않는다. 따라서 U_3O_8 은 가장 안정한 우라늄 화합물이나, 일반적으로 미세한 분말 형태로 생성되기 때문에 처분을 위해서는 후 처리나 포장 등의 추가 조치가 필요하다.

Table 1. Physicochemical properties of uranium and its compounds under ambient conditions

| Compound | Bulk density, g/cm^3 | Solubility in water | Reactivity |
|----------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| U metal | 19 | insoluble | Reacts slowly with water |
| UF_4 | 2.0-4.5 | very slightly soluble | Reacts slowly with water |
| UO_2 | 2.0-5.9 | insoluble | |
| U_3O_8 | 1.5-4.0 | insoluble | |

2.2 수용성 평가 사례

처분을 위한 폐기물 접수 기준은 모든 처분시설에서 개념적으로 동일하다. 그러나 처분 부지 특성에 따라서 처분 행위는 다양하다. 폐기물 수용성 허가를 위한 실증과정은, 폐기물 화학적 형태 및 포장 형식 결정 등의 필요조건을 확립하기까지는, 많은 시간과 비용이 든다. 따라서 몇몇 처분 부지에 대한 폐기물 수용 조건을 조사함으로써부터 처분될 폐기물의 생산, 운송, 그리고 처분에 이르기 까지 드는 비용을 절감할 수 있다. 표 2.에 처분 폐기물에 대한 사례와 수용 기준을 운영 부지에 따라 나타내었다. NTS에는 많은 양의 감손 우라늄 화합물을 처분한 예가 있으며, Hanford 부지에는 DU(depleted uranium) 경우 허용 우라늄 농도가 NTS 경우보다 약 100배가량 적다. 기

타 DOE 부지에서 우라늄 농도 한계는 DU 경우보다 10배 또는 그 이상으로 적다. Envirocare 부지는 상업적으로 운영되며, 처분 수용 가능성은 우라늄 농도와 농축도에 따라서 분류된다.

Table 2. Uranium disposal experience and disposal criteria according to the uranium concentration

| Site | Description |
|-----------------------------|---|
| NTS ^a | U ₃ O ₈ (578t, 418t) ^b , UF ₄ (1870t, 800t), UO ₂ (880kg, 723kg), U metal(1120t, 666t) |
| Hanford | Similar criteria NTS's but uranium metal exceeds the concentration allowable |
| Other DOE Site ^c | Not allow for disposal untreated conversion products, and small capacity |
| Envirocare ^d | DU less than 370,000pCi/g, NU 4,000pCi/g, Enrichment degree less than 10% and ²³⁵ U 1,900pCi/g |

^a Nevada Test Site, ^b Waste Quantity and uranium Quantity, ^c Los Alamos Site, Idaho Site, Savana River Site, and Oak Ridge Site operated by DOE, ^d Envirocare commercial sector.

2.3 국내 우라늄 잔류물질 재고 현황

국내 폐기대상 우라늄 잔류물질 재고를 표 3.에 요약하였다. 현재까지 발생된 폐기대상 우라늄 잔류물질 양은 많지 않으며 장기 저장에는 큰 문제가 없다. 단지 UF₆는 매우 반응성이 큰 물질로 누출 시 주변 환경오염이 심각하다. 따라서 가까운 시일 내에 변환 시켜서 장기 저장에 안전한 물질로 만들어서 저장되어야 한다.

Table 3. Inventory uranium residues

| | Chemical form | Amount, kg/kgU |
|------------------|-------------------------------|-----------------|
| Depleted uranium | Uranium metal | 13,156/12,356 |
| | UF ₄ | 12,766/9,610 |
| | UO ₂ | 9,337/8,344 |
| | U ₃ O ₈ | 1,943/1,816 |
| | UF ₆ | 184,909/125,020 |
| Natural uranium | Uranium metal | 196/195 |
| | UF ₄ | 60/45 |
| | UO ₂ | 3,733/3,256 |
| | U ₃ O ₈ | 1,373/979 |

2.4 우라늄 잔류물질에 대한 이용 및 처분에 대한 고찰

폐기대상 우라늄 잔류물질 대부분은 감손 우라

늄으로서 지금까지 감손 우라늄이 실제로 다량으로 사용된 경우는 없지만 그 이용 가능성은 많이 연구된 바 있다. 특히 사용 후 연료를 저장하는데 차폐체로 고밀도 감손 UO₂ 분말 이용이 가장 유용한 방안으로 고려된다. 우라늄 금속은 증장비에 쓰이는 평형추로의 이용이 바람직하나 방사성물질이라는 점에서 적용에 장애가 되고 있다. UF₄나 U₃O₈의 형태가 처분에 적합한 화합물이나, UF₄ 경우 물에 대한 용해도로 인해 U₃O₈의 형태가 우라늄 잔류물질을 처분하기 위한 최적형태의 화합물인 것으로 판단된다. 한편 우라늄 잔류물질을 처분하기 위한 지역으로는 NTS 처분장과 같은 건조한 특수지역이나, 우라늄 광산 지역이 적당하다.

3. 결론

폐기대상 우라늄 잔류물질에 대한 처분은 국내의 경우 적합한 처분장 선정에, 높은 인구밀도와 비교적 낮은 깊이에 위치해 있는 지하수 등, 지정학적 제약이 많다. 따라서 사용 후 연료 저장에 충전 물질로 사용하거나 우라늄광이 있었던 부지에 처분함이 바람직하다. UF₆는 처분까지 고려된 안전한 형태의 물질로 변환시켜서 저장 되어야 한다.

4. 참고문헌

- [1] ORNL/TM-2000/161, Assessment of Preferred Depleted Uranium Disposal Forms, 2000.
- [2] ORNL/TM-2000/355, Evaluation of the Acceptability of Potential Depleted Uranium Hexafluoride Conversion Products at the Envirocare Disposal Site, 2000.
- [3] Federal Register, Vol. 72, No. 63, 15869, April 3, 2007. Notice of Availability of a Draft Supplement Analysis for Disposal of Depleted Uranium Oxide Conversion Product Generated from Doe's Inventory of Depleted Uranium Hexafluoride.