

WNTI

국제 원자력 운송 협회

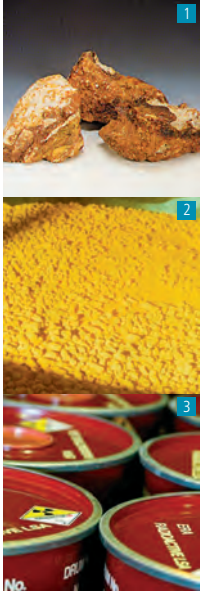
보고서 번호

핵연료 사이클 운송
프런트 엔드 물질

방사성 물질의 안전하고, 효율적이며 신뢰할 수 있는 운송을 위한 WNTI의 헌신적 노력



핵연료 사이클의 운송 - 프런트 엔드 물질



서론

원자력은 현재 전세계인들에게 이용 가능한 깨끗하고, 탄소배출이 없으며, 적절한 가격의 에너지를 만드는 전기에 대한 전세계 수요의 대략 14%를 공급하고 있다. 대다수 원자로들은 가압경수로 (Pressurized Water Reactor) 또는 비등수형 원자로(Boiling Water Reactor)이며, 양자 모두 주요 연료는 농축 우라늄이다. 이들 경수형 원자로(Light Water Reactor)의 연료 코어는 통상적으로 각각 우라늄 펠릿으로 충전 봉인된 연료봉들로 구성된 많은 연료 어셈블리들을 담고 있다.

이 중요한 에너지를 유지하기 위해서는 핵연료 사이클 물질들이 지속적으로 안전하고 효과적으로 국가 간에 운송되는 일이 필수적이다. 핵물질의 운송은 엄격하게 규제되고 있고, 몇 십 년에 걸쳐 놀랄만한 안전 기록을 보유하고 있다.

핵연료 사이클 운송은 보통 프런트엔드(사용 전) 혹은 백엔드(사용 후)중 하나로 지정된다. 프런트엔드는 우라늄 채굴부터 원자로에 주입하기 위한 신규 연료 어셈블리 제조까지 이르는 모든 작업을 포함하는 것으로, 즉, 우라늄 원광 정광에서 육불화 우라늄 변환 시설까지, 변환시설에서부터 농축 시설까지, 농축시설에서 연료 제조사까지, 연료 제조사에서 여러 핵발전소까지의 모든 업무를 포함한다. 백엔드는 원자력 발전소에서 재사용을 위한 재처리시설까지 사용후 연료의 운송을 포함하는 원자로에서 나온 사용후 연료와, 그리고 재처리된 연료의 후속 운송과 관련된 모든 업무를 포함한다. 재처리되지 않는 사용후 연료들에 대한 처리 옵션들이 일괄 선택되면, 최종 처리에 앞서 중간 저장시설에 운반된다.

우라늄 정광 생산을 위한 채굴

핵연료를 만드는 원자재는 우라늄 원광이며, 주요 산출지는 북아메리카, 오스트레일리아, 남아프리카 및 중앙아시아이다. 원광은 일반적으로 대략 1.5%의 우라늄을 함유하지만, 몇몇 광산에서는 그 함유량이 훨씬 높다. 원광은 우선 분쇄되고 화학적, 물리적 공정들을 거쳐 정련되어 우라늄 정광, 즉 UOC로 알려진 천연 산화우라늄의 건조 분말로 만들어진다. UOC에 대한 역사상의 이름은 “옐로우케이크(Yellow cake)”이었는데, 초기 정광이 전형적으로 노란색이기 때문이었다.

UOC는 저활동성 물질이며, 방사능 위험은 현저하게 낮다. 보통 표준 해상(ISO) 화물 컨테이너에 봉인된 210리터 드럼(산업용 포장재의 일종)에 담겨 운송된다. 도로, 철도 혹은 해상으로 운반될 수 있으며, 많은 경우에 복합운송방식이 사용된다. UOC는 육불화 우라늄(Hex)으로의 변환을 위하여 변환시설로 운송된다.

우라늄 정광의 육불화 우라늄으로의 변환

UOC는 채굴지역에서 전세계적으로 북아메리카, 유럽 및 러시아에 소재한 변환 시설들로 운송된다. 먼저, 화학적으로 정련된 후, 일련의 화학 공정을 거쳐 육불화 우라늄 형태의 천연 우라늄으로 변환되는데, 이는 다음의 농축 단계에 필요한 형태를 갖추기 위해서이다. UOC 변환공정에서 산출된 천연 육불화우라늄은 신규 원자로 연료 제조에 있어 매우 중요한 중간반응물이다. 국제운송을 포함하여 이를 위한 아주 상당한 규모의 상업적 교역이 행해진다.

생산공정에서 직경 약 1.25미터(48”)인 큰 원통형 강철 운반 실린더는 12.5톤의 자재를 담을 수 있으며, 제조과정에 따라 액체 또는 기체 상태의 육불화우라늄으로 즉시 채워진다. 그 다음 실린더 내부에서 상온으로 냉각되면서 고형화된다. 저장 및 운송 도중에 실린더 내부의 육불화우라늄은 고체 형태이다. 천연 육불화우라늄 또한 농축시설로 운송되기 이전에 이 실린더 안에 저장된다. 육불화우라늄은 일상적으로 도로, 철도, 해상 또는 더 일반적으로는 복합운송방식으로 운송된다.

육불화우라늄이 저활동성 물질이고, 가능성이 매우 희박하기는 하나 방출 시 화학적 위험이 있을 수 있는데, 이는 수분을 함유한 공기와의 반응으로 독성이 있는 부제품이 형성되기 때문이다.

육불화 우라늄의 농축

원자로에서 쪼개지는(핵분열하는) 우라늄의 주요 동위원소는 U-235이며, 천연적으로 발생하는 우라늄의 0.7%정도이다. 이것을 가스 확산 과정이나 가스원심분리를 통해 경수로에 필요한 3~5%까지 증대시킨다.

상업적 농축시설이 미국, 서유럽 및 러시아에서 가동중이며, 이 지역에서 변환 및 농축시설 간의 국제적인 육불화 우라늄 운송 작업이 이루어진다.

농축된 육불화 우라늄은 더 작은 보통 실린더에 담겨 운송된다. 이 실린더는 직경이 약 76cm(30")이며, 겹포장되어 적재되므로 충돌, 화재, 침수에 저항성이 있으며, 연쇄반응을 방지한다. 적재된 겹포장은 일반적으로 연료제조 시설까지 운송을 위하여 ISO 평판 컨테이너(ISO flat rack container)를 이용하여 운송된다.



농축공정의 잔류 생성물인 열화 육불화 우라늄은 천연 육불화 우라늄과 동일한 물리적 및 화학적 특성을 가지므로, 동일한 형태의 실린더를 이용하여 운송된다.

연료 제조

5% 농축 미만의 육불화 우라늄에서 형성되는 이산화우라늄 분말 또한 저활동성 물질이다. 농축된 육불화우라늄은 우선 이산화우라늄 분말로 변환된 후, 압착 및 소결 공정을 거쳐 펠릿 형태로 만들어 진다. 펠릿은 지르코늄 합금튜브에 쌓여지고, 원자로로의 운송을 위해 연료 어셈블리로 만들어 진다. 연료 제조시설들은 전세계 많은 국가들에 소재한다.

연료 어셈블리는 통상적으로 길이가 약 4미터(12')이다. 특수하게 설계된 튼튼한 강철재 포장재에 담겨 운송된다. 포장재의 설계 및 구성은 운송 도중 핵 연쇄반응이 일어나지 못하도록 사전에 결정된다.

핵연료 사이클 운송 규정

방사성 물질의 안전한 운송을 위한 국제원자력기구(IAEA) 규정은 핵연료 사이클 운송을 위한 토대를 마련했다. 기본 개념은 방사능이 미치는 영향으로부터 인명, 재산 및 환경을 보호하는 차폐물을 제공하고, 연쇄반응



7

방지 및 내용물 분산을 억제할 수 있는 포장재를 이용함으로써 1차적으로 안전을 보장한다는 것이다. 또한, 운영 차원에서 최선의 관행을 도입하여 합리적으로 달성될 수 있는 범위에서 작업자와 공공대중에게 가해지는 방사능 용량을 저감하는 일은 긴요한 사안이다.



8

규정은 5가지 유형의 상이한 주요 포장 방식을 제공한다. 즉, 제외, 산업용, Type A, Type B 및 Type C로 지정됐으며, 각 포장재가 담은 방사성 물질의 특성에 기반한 설계 기준이 명시되었다. 규정은 핵분열성 물질, 즉, 핵연쇄반응을 지속시킬 수 있는 물질을 담은 포장재들에 대해서 추가 기준을 규정한다. 규정은 또한 적절한 시험 절차를 명시한다. 잠재적인 위험에 따라 요구되는 포장재의 무결성이 결정되는, 포장 방식에 대한 이러한 등급별 접근법-물질이 갖는 위험이 증대될수록 포장재의 견고성 또한 증대된다-은 핵연료 사이클의 안전하고 효율적인 상업적 운송작업에 중요하다. 도로, 철도 및 해상 모두 핵연료 사이클 물질 운송에 일반적으로 사용된다.



9

프런트엔드 포장재에 대한 IAEA 시험

UOC는 비교적 안전한 물질이며 잠재 위험은 낮다. UOC 포장재는 정상적인 운송 조건들에서 반드시 무결성을 유지해야 하며, 이러한 조건들을 모의실험하는 일련의 시험들을 통과할 수 있도록 설계된다. 그 예로, 포장재가 정상적인 운송 도중 격계 될 수 있는 취급의 종류들을 모방한 물분무법, 자유낙하, 겹쳐 쌓기 시험 및 구멍내기 시험 등을 들 수 있다.

육불화 우라늄은 독성증기를 발산할 수 있는 고체라는 점에서 특별하다. 천연 및 열화 Hex 포장재로 사용되는 강철 원통은 국제적으로 표준화되어 있고 누출 없이 모든 응력을 견뎌낼 수 있는지 확인하는 압력 시험을 통과해야 한다. 그리고, 열 시험 요건에 따른 평가가 수행된다.

농축된 프런트엔드 물질들, 즉, 농축된 육불화 우라늄, 이산화 우라늄 분말 및 신규 연료 어셈블리는 핵분열성이다. 이 물질들과 연관된 잠재 위험은 원하지 않는 연쇄반응이다. 따라서, 충돌, 화재 및 침수를 포함하여 운송 중에 실제로 일어날 수 있는 모든 사고 조건들 하에서도 임계 상태가 발생하지 않도록 보장하기 위하여 포장재에 대한 시험을 실시한다.

핵물질 운송 경험

방사성 물질의 안전한 운송에 관한 IAEA 규정은 방사성 물질의 안전하고 효과적인 운송을 위하여 장비의 설계 및 절차를 위한 견실한 토대를 제공해주고 있다. 운송 산업의 다른 어떤 분야도 이보다 더 심하게 규제받지 않으며, 운송산업의 어떤 분야에도 방사성 물질 운송보다 더 안전한 기록은 찾아볼 수 없다. 50년 간, 인명이나 환경에 중대한 방사능 손상을 초래한 단 한 건의 사건도 없었다. 이러한 성과는 엄격한 규제 체제가 있었기에 가능했으며, 동시에 포장 및 운송 활동을 수행한 관련 업체들의 전문가 정신에 기인한다.

사진

- 1 우라늄 원광
- 2 처리과정을 거쳐 제분된 우라늄 원광 - "옐로우 케이크(Yellow cake)"
- 3 우라늄 정광 드럼
- 4 48" 육불화 우라늄 실린더
- 5 겹포장된 30" 육불화 우라늄 실린더
- 6 우라늄 연료 어셈블리
- 7 우라늄 정광 드럼 운송 준비 과정
- 8 신규 제작된 연료의 운송을 위한 고정 작업
- 9 프론티엔드 물질의 도로 운송

WNTI

국제 원자력 운송 협회

Remo House

310-312 Regent Street

London W1B 3AX

United Kingdom

전화: +44 (0)20 7580 1144

팩스: +44 (0)20 7580 5365

웹페이지: www.wnti.co.uk

이메일: wnti@wnti.co.uk

