

WNTI

국제 원자력 운송 협회

보고서 번호

핵연료 사이클의 운송 백 엔드 물질

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



핵연료 사이클의 운송 - 백엔드 물질



서론

오늘날 전세계 전기의 대략 14%를 공급하는 원자력은 전세계 수 백만 명의 사람들에게 적절한 가격으로 청정하고 탄소배출이 없는 에너지를 제공한다. 전기 생산을 위한 원자로의 이용으로 인해, 몇 십 년 이상 방사성 물질의 광범위한 운송이 요구되고 있다. 방사성 물질 운송은 우라늄 채굴에서 연료처리 및 원자로 플랜트까지의 운반, 재생용 연료처리 및 사용후 연료 보관에 걸친 모든 단계를 지원해왔다.



방사성 물질 운송은 국제 규정에 의해 엄격한 규제를 받으며, 이 규정들을 채택함으로써 인상적인 안전 기록을 수립하였다. 즉, 반세기 동안 인류 또는 환경에 중대한 손상을 초래하는 방사성 관련 운송 사건은 단 한 건도 발생하지 않았다.



핵연료 사이클 운송은 보통 프런트엔드(사용 전) 혹은 백엔드(사용 후) 중 하나로 지정된다. 프런트엔드는 우라늄 채굴로부터 원자로에 주입하기 위한 신규 연료 어셈블리 제조에 이르는 모든 작업을 포함하는 것으로, 즉, 우라늄 원광 정광에서 육불화 우라늄 변환 시설까지, 변환시설에서 농축 시설까지, 농축시설에서 연료 제조사까지, 연료 제조사에서 여러 핵발전소까지의 모든 운송 업무를 포함한다. 백엔드는 사용된 연료의 구성 요소들의, 원자력 발전소에서부터 재사용을 위한 재처리시설로의 운송을 포함하여, 원자로에서 나온 사용후 연료와 관련된 운송 업무 일체 및 재처리된 제품의 후속적인 운송 관련 업무를 모두 포함한다. 재처리되지 않는 사용후 연료들에 대한 처리 옵션들이 일괄 선택되면, 최종 처리에 앞서 임시 저장시설로 운송된다.

백엔드 물질의 정의

원자력 발전소에서 사용되는 연료는 3-5년 간 전기를 생산한다. 이 기간을 초과하면 효율성이 저하되므로 교체될 필요가 있다. 이 사용후 연료는 여전히 원래의 우라늄의 96%, 약 3%의 폐기물 및 1%의 플루토늄을 함유하고 있다. 이 단계에서 사용후 연료는 최종 처리를 위해 저장소로 이송되거나, 우라늄과 플루토늄을 회수하기 위해 재처리된다.

잔류 우라늄은 재생 가능하다. 원자로에서 만들어진 플루토늄은 핵분열성이므로 핵연쇄반응을 지속시킬 수 있다. 이 플루토늄을 우라늄과 결합시켜 혼합산화물(Mixed Oxide, MOX) 연료를 생산한다. 폐기물은 유리화 공정을 거쳐 고품의 비용해성 유리질로 변형된 후 최종 처리에 따라 저장되는데, 예를 들면 지하 저장소에 보관된다.

백엔드 물질 운송의 필요성

일단 사용후 연료가 원자로에서 옮겨지면, 원자력 발전소에 일시적으로 저장될 수 있고, 발전소 외부의 임시저장소로 또는 재처리 시설로 운송될 수 있다. 중간 저장 시설로의 운송은 통상 국내에서 이루어지는데 반해, 재처리 시설로의 운송 작업은 국제적으로 이루어진다.

일본, 독일, 스위스, 벨기에, 네덜란드, 프랑스, 러시아, 인도 및 영국을 포함하여 많은 나라들이 일정량의 사용후 연료를 재처리한다. 주요 상업적 재처리/재생 시설들은 프랑스와 영국에 기반을 두고 있다. 재처리를 위해 사용후 연료를 프랑스나 영국으로 보내는 나라는 폐기물을 포함하여 모든 생성물에 대한 소유권을 보유하고, 이 폐기물들은 해당 국가로 반송되어야 한다. 원산지 국가로 선적되고 나면, 폐기물은 최종 처리를 위해 저장된다. MOX 연료로 재생된 플루토늄은 전기 생산을 위해 원자로에 주입된다.

산업적 규모의 백엔드 물질 선적은 1960년 대 초에 시작되었으며, 이 시점의 원자력은 전세계적으로 몇몇 국가들에서 전기의 중요한 원천이 되기 시작했다. 사용후 연료는 백엔드 물질 중 첫 번째로 운송되는 물질이었다. 이후 플루토늄이, 초반에는 플루토늄 분말 형태로, 후반에는 MOX 연료 형태로 원산지 국가로 반환됐다. 유리화된 고준위 폐기물이 최초로 선적된 해는 1995년이며, 이러한 형태의 많은 화물들이 해상 및 철도로 운송되고 있다.



백엔드 물질의 운송 방법

보편적으로 인정받고 있는 엄격하고 포괄적인 규정 체제

모든 다른 방사성 물질 운송처럼, 백엔드 물질 운송은 인명, 재산 및 환경을 보호하기 위해 신중하게 통제되고 있다. 방사성 물질의 안전한 운송에 관한 국제원자력기구 규정(IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material)은 1961년 최초로 발행되었으며, 과학 및 기술적 발전과 보조를 맞추기 위해 정기적으로 개정되어 왔다. 현재, 60개 이상의 회원국들이 자국 내 규정을 위한 토대로 IAEA 규정을 적용 또는 이용하고 있다. 더불어, 육로, 해상, 항공 및 내륙수로 운송에 책임이 있는 주요 기구들은 IAEA 규정을 기구들의 자체 규정에 통합하고 있다. 그리고, 위험물 운송에 대한 UN 모범 규정(the United Nations Model Regulations for the Transport of Dangerous Goods)은 항상 IAEA 규정을 참조해 왔다. 그 결과 IAEA 규정은 전세계 거의 모든 곳에서 일어나는 방사성 물질의 운송에 적용된다.

반드시 고품 제품의 형태를 갖는 백엔드 물질

고형 생성물질-사용후 연료, MOX 연료 및 유리화된 고준위 폐기물-은 중요한 안전 요소이다. 이 물질들의 특성은 장기적인 안정성과 낮은 수중 용해도이며, 여타 사고 이후에도 고체 형태로 남아있게 된다. 사용후 연료 및 MOX 연료는 둘 다 지르코늄 합금 금속제 튜브(연료 봉)에 담긴 단단한 세라믹 펠릿으로 만들어 진다. 차이점은 그 내용물에 있다. 사용후 연료는 우라늄(95%), 플루토늄(1%) 및 핵분열 생성물(3%)을 함유하고 있고, 방사성이 높는데 반해, MOX 연료는 우라늄 및 이산화 플루토늄으로 만들어지며 저준위 방사성을 갖는다. 유리화된 고준위 폐기물의 경우, 유리화 공정에서 핵분열 생성물이 녹은 유리질에 합쳐져 스테인레스 강철 캐니스터에 주입되면서 고품화된다. 결과적으로, 핵분열 생성물은 고정되며, 방사성이 높은 유리화된 생성물은 스테인레스 강철 캐니스터에 의해 보호된다.

전용 포장재 내에 운송되는 백엔드 물질

IAEA 규정에 따라, 사용후 연료, MOX 연료 및 유리화된 고준위 폐기물은 플라스크 또는 캐스크라 불리는(규정 내 사용된 용어인 Type B 포장재에 해당됨) 특별하게 설계된 운송 포장재에 담겨 운송된다. 이 포장 용기는 용기 내에 운송되는 특정 방사성 물질을 위해 특별히 설계되고, 방사능으로부터 인명, 재산 및 환경을 보호해주며, 심각한 사고를 견딜 수 있도록 설계된다. Type B 포장재는 드럼 정도의 크기부터 트럭 정도의 크기까지 있으며, 항상 저항성이 매우 우수하고 차폐 수준이 매우 높다.

엄격한 시험을 반드시 충족해야 하는 포장재

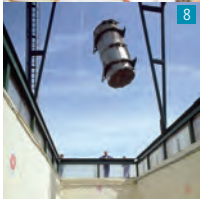
IAEA 규정의 방침은 이용되는 운송 형태에 관계없이 포장재를 통해 안전을 보장해야 한다는 것이다. 이 규정 하에서 포장 설계는 일련의 혹독한 충격, 화염 및 침수 시험을 만족시켜야 하며, 특히, 다음의 시험에 통과해야 한다.

- 두 차례의 낙하시험- 단단한 지면 위 9미터 높이 낙하 및 강철 펀치바 상단 1미터 높이 낙하; 최악 상황의 각도들로 낙하 시험을 반복적으로 실시할 수 있다.

- 후속적으로 수행되는 시험으로, 포장물을 30분간 800°C의 화염에 완전히 노출시키는 화염 시험이 있다
- 그 다음에 실시되는 시험으로, 캐스크가 8시간 동안 15미터 깊이로 침수되는 것과 같은 조건들에 처해지는 침수 시험이 있다. 더 높은 준위의 방사성 물질용으로 설계된 캐스크에 대해서는 1시간 동안 200미터 깊이에서 실시되는 한 단계 높은 침수 시험이 있다.

이 시험들은 포장재가 실제로 가해질 수 있는 충돌, 화재 혹은 침수를 포함한 운송 사고들을 견딜 수 있음을 보장하며, 핵분열성 물질인 경우, 연쇄반응이 일어날 수 없음을 보장한다. Type B 포장재는 해당 국가 기관의 인증이 필요하다. 일단 포장 설계가 승인되면, 트럭, 기차 혹은 선박에 의한 지표면 운송에 사용될 수 있다.

규정은 Type C로 지정된 포장재에 담긴 백엔드 방사성 물질의 항공 수송에 대해 설명하고 있다. Type C 포장재 요건에는 항공사고 조건들 하에서 포장재가 무결성을 유지할 수 있음을 보장하기 위한 추가 시험들이 포함되어 있다. Type C의 포장재는 아직 미개발 상태이다.





10



11



12

안전 증명

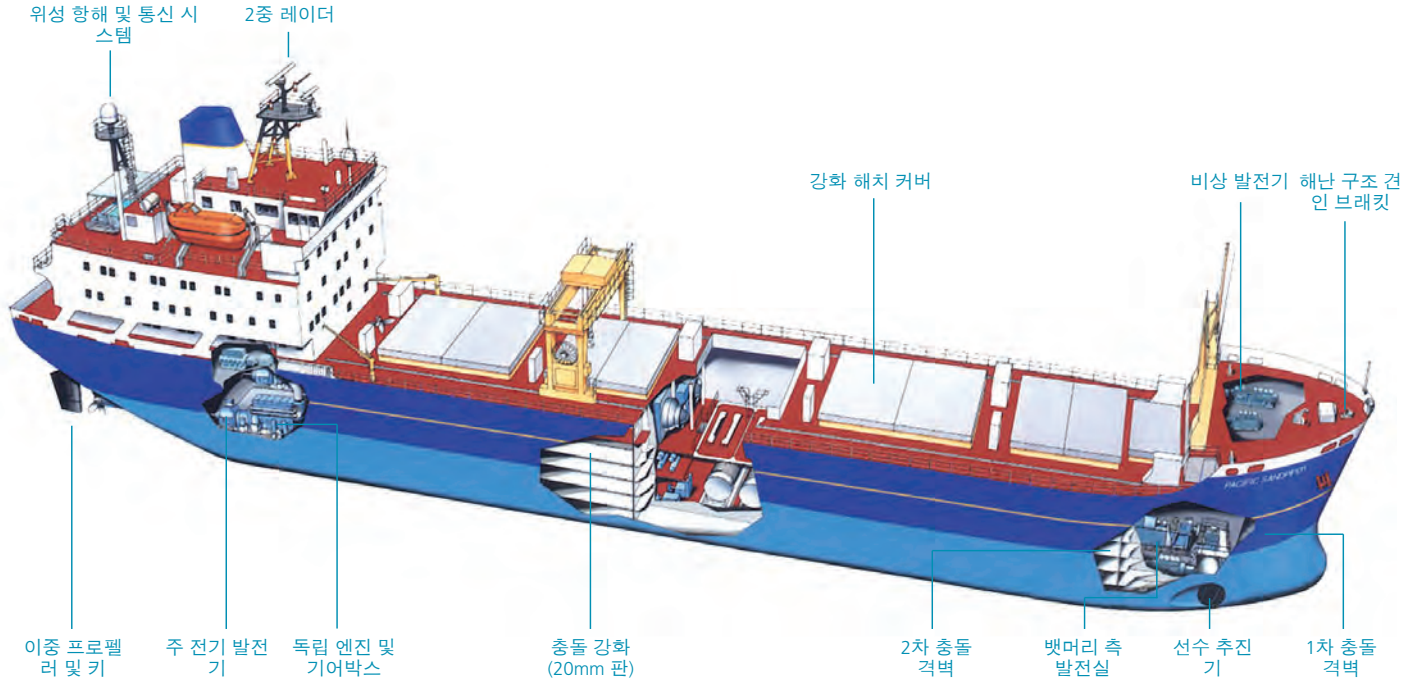
Type B 포장재의 몇몇 증명 실험들이 상당한 안전도 및 견고성을 보여주기 위해 시행된다. 예로, Sandra National Laboratories^{주1}의 엔지니어들과 과학자들은 Type B 포장재를 대상으로 1970년대 및 1980년대에 광범위한 시험들을 수행했다. 이 시험에는 포장재를 실은 트럭 트레일러가 3미터 두께의 콘크리트 벽에 98 및 138km/h의 속도로 충돌하는 트럭 충돌 및 철도 건널목에서 131km/h의 속도로 Type B 포장재와 디젤기관차가 충돌하는 모의시험이 포함되었다^{주2}. 이와 유사하게, 영국 중앙 전기 발전 위원회(UK Central Electricity Generating Board)는 1984년에 164km/h로 달리는 140톤짜리 기차가 Type B 포장재에 돌진하는 증명시험을 공개적으로 실시하였다^{주3}. 충돌 후 평가에 따르면 포장재는 단지 표면상의 손상만을 입었고, 내용물이 누출되지 않았음이 밝혀졌다. 시각적 효과가 상당했음은 분명하나, 이 충돌 증명 시험은 상기 요약된 IAEA의 일련의 시험들에 비하면 덜 엄격한 것들이다. 이는 IAEA 일련의 시험들이 현실 세계에서 벌어지는 사고들을 충실히 반영하기 때문이다.

해상 운송: 특수 제작 선박

백엔드 물질의 해상 운송의 경우, 선박 설계는 운송 포장의 안전성을 증대시킨다. 1993년 IMO는 IAEA 규정을 보완하는 선내 적재 플라스크 내의 방사성 핵연료, 플루토늄 및 고준위 방사성 폐기물의 안전한 운송에 관한 자발적 규약인 INF Code(The voluntary Code for the Safe Carriage of Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High-Level Radioactive Wastes in Flasks on Board Ships, INF Code)를 발표했다. 이 보완 규정은 주로 선박 설계, 건조 및 장비를 다룬다. INF Code는 1999년 도입됐고, 2001년 1월에 의무사항이 되었다. 이것은 사용후 연료, MOX 연료 혹은 유리화된 고준위 폐기물을 운반하는 선박들이 구비해야 하는 추가적인 안전 사항들을 설명하고 있다.

INF Code(INF 3으로 알려짐)의 최고 안전 등급 선박에 대한 기본 설계는 선체 사이에 충격저항 구조를 갖춘 화물 구역으로 둘러싸인 이중 선체구조로, 각각의 선체에는 높은 안전성 및 사고시 생존에 필요한 모든 필수 시스템이 별도로 갖춰져 있다. 과거 30 여년 간, 유럽과 일본 간 백엔드 물질들을 운반하는데 INF3 형식의 선박이 이용되어왔다.

특수 제작 선박의 안전 관련 특징



전문 운송회사들

1960년대 이래 경험있고 전문화된 운송회사들이 산업적 규모로 백엔드 물질들을 안전하고 정기적으로 운송해 왔다. 이 회사들은 운송시스템을 잘 개발해 왔고, 요구되는 안전 절차를 준수하여 전세계적인 백엔드 물질 운송을 관리하고 있다. 한 예로, 모든 운송 형태에 이용되는 비상 대비책을 통합하여 포괄적이고 효과적인 비상사태 대비 계획들을 수립한 바 있다. 드문 경우의 사고에서도 공중 보건과 환경이 적절히 보호받도록 보장하기 위하여 이 대응 계획들에 대한 정기적인 테스트를 실시한다.

명백한 진실

핵연료 사이클 물질들의 국제운송은 전세계인들에게 원자력의 이점을 가져다 주는데 중요한 역할을 수행해 왔다. 이 운송은 우라늄 채굴, 연료 제조, 연료 재처리, 사용후 연료 관리 및 폐기물 저장을 포함하는 핵연료 사이클의 모든 단계들을 지원해 왔다. 정상 조건하에서뿐만 아니라, 현실적으로 가정할 수 있는 운송 상의 모든 사고 조건들 하에서도 핵연료 사이클 운송이 안전하게 수행될 수 있도록 보장하기 위하여 연료 사이클 물질의 운송은 엄정하게 규제를 받는다. 반세기가 넘는 동안, 방사성 물질의 방출이 발생한 중대한 운송 사건은 단 한 건도 없었다.

참조

- 1 Sandia National Laboratories는 Sandia Corporation, Lockheed Martin Company가 미국 에너지부를 위해 운영하는 국립 보안 연구소이다(매우 다양한 에너지 연구 및 개발 사업의 수행을 담당하고 있음).
- 2 “우리는 총돌시키고, 태우고 또 총돌시킨다.” ; Sandia National Laboratories의 포장재의 역사, 1978-1997, C. J. Mora 및 P. McConnell, 방사성 물질의 포장재 및 운송에 관한 제 12차 국제 회담 (PATRAM 98), p1616
- 3 “사용후 핵연료 운송: 개요”. 미국 에너지부, 민간 방사성 폐기물 관리 사무소, 1986년 3월, p14

사진

- 1 영국의 사용후 연료의 철도 운송
- 2 일본의 사용후 연료의 도로 운송
- 3 일본 무츠-오가와라(Mutsu-Ogawara) 항의 특수 제작 선박
- 4 MOX 연료 펠릿
- 5 MOX 연료 어셈블리
- 6 MOX 연료 캐스크 하역작업
- 7 첨단 컴퓨터 기법을 이용하여 설계되는 운송 캐스크
- 8 IAEA 낙하 시험
- 9 IAEA 화염 시험
- 10 하역 작업
- 11 특수 제작 선박
- 12 유리화된 고준위 폐기물을 담은 캐스크의 선박 적재 작업



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

