

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

항공기를 이용한 고방사성 산화물핵연료의 해외수송방안 분석
The Option Study of Air Shipment of DUPIC Fuel Elements to Canada

이호희, 박장진, 신진명, 김종호, 양명승, 구정희
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력연구소에서는 국내 원전에서 배출된 사용후핵연료를 IMEF M6 핫셀에서 건식 재가공하여 건식공정 산화물핵연료를 개발하였다. 개발된 핵연료의 성능을 검증하기 위해서는 실제 상용로와 동일한 고온고압 조건하에서 조사시험이 필요하나 국내에는 이러한 조사시설을 갖추지 못하고 있으므로 핵연료 성능의 검증이 어렵던 차에 한·카·미·IAEA간의 국제공동연구 과제진도회의에서 AECL측은 중성자비를 받지 않고 캐나다 NRU에서 건식공정 산화물핵연료를 조사시험을 할 수 있다고 제안하였다. NRU 조사시험을 하고자 하는 핵연료 봉은 사용후핵연료를 재가공한 핵연료로서 건식공정 산화물핵연료봉 10개(약 6 kgU)이며 운반물 분류등급에 따라 제7종 위험물로 핵분열성물질에 해당한다. 일반적으로 소량의 방사성물질을 운반할 경우에는 비용뿐 아니라 수송기간 측면에서 항공수송이 선박수송에 비해 유리한 것으로 알려져 있어 항공기를 이용한 건식공정 산화물핵연료의 해외 수송방안을 검토하였다. 항공 수송은 '01년 7월 이후 IATA 규정이 강화되어 항공수송의 규제요건이 강화되었고 특히, '01년 9.11 테러 이후 관계기관 승인이 좀더 엄격해졌다. 항공 수송방안을 검토한 결과 건식공정 산화물핵연료 항공수송에 적합한 상용 수송용기는 없는 것으로 조사되어 항공수송은 불가능한 것으로 분석되었다. 또한 대안으로 가용한 수송용기를 사용할 수 있는 핵분열성물질 면제범위를 이용한 항공수송방안도 검토하였으나 미국을 경유하여 일정량 이상의 Pu가 포함된 핵물질을 운반할 경우에는 미국 DOT에서 수송용기 시험을 포함한 수송용기의 인허가를 받아야할 뿐 아니라 영공통과가 예상되는 일본, 러시아 등과도 기술적인 협의와 사전허가 등이 필요한 것으로 파악되어 실현가능성이 희박한 것으로 조사되었다.

Abstract

KAERI developed a DUPIC nuclear fuel with the refabrication of spent PWR fuel discharged from domestic nuclear power plant by a dry process at M6 hot-cell in IMEF. To verify the performance of DUPIC nuclear fuel, irradiation test at operating conditions of commercially operating power plant is essential. Since the HANARO research reactor of KAERI does not have fuel test loop(FTL) for irradiating nuclear fuel under high temperature and high pressure conditions, DUPIC fuel cannot be irradiated in the FTL of HANARO until about 2008. In the 13-th PRM among Korea, Canada, USA and IAEA, AECL proposed that KAERI fabricated DUPIC fuel can be irradiated in the FTL of the NRU research reactor without charge of neutrons. The transportation quantity of DUPIC fuel to Canada is 10 elements(about 6 kg). This transportation package is classified as the 7-th class according to "recommendation on the transport of dangerous goods" made by the United Nations. Air shipment was investigated as a promising option because it is generally understood that air shipment is more appropriate than ship shipment for transportation of small quantity of nuclear materials from the perspectives of cost and transportation period. In case of air shipment, the IATA regulations have been more intensified since the July of 2001. To make matters worse, it becomes more difficult to get the ratification of corresponding authorities due

to 9.11 terror. It was found that at present there is no proper air transportation cask for DUPIC fuel. So, air transportation is considered to be impossible. An alternative of using the exemption limit of fissile material was reviewed. Its results showed that in case of going via USA territory, approvals from US DOT should be needed. The approvals include shipping and cask approvals on technical cask testing. Furthermore, since passes through territories of Japan and Russia have to be done in case of using a regular air cargo from Korea to Canada, approvals from Russia and Japan authorities are considered to be required. So, the alternative of using the exemption limit of fissile material is considered to be undesirable too.

1. 서론

핵비확산성 건식공정 산화물핵연료 기술개발과제에서는 IMEF M6 핫셀에서 경수로 사용후핵연료를 직접적인 재가공 방법에 의해 중수로 핵연료로 재사용할 수 있는 건식공정 산화물핵연료를 개발하여 다목적 연구로인 하나로에서 조사시험을 수행한 바 있다. 개발된 중수로 핵연료의 성능을 입증하기 위해서는 실제 중수로 운전조건과 동일한 고온고압분위기에서의 조사시험이 필요하나 현재 하나로는 fuel test loop이 설치되어 있지 않았으므로(2008년경 설치 계획중) 고온고압조건 하에서의 조사시험은 당분간 불가능한 실정이다. 하나로에서 조사시험 결과만으론 개발된 핵연료의 성능 입증에 한계가 있음에 따라 건식공정 산화물핵연료의 특성을 입증하는 방안을 모색하던 중 '00년 11월에 한국에서 개최된 한·카·미·IAEA간의 제13차 PRM에서 AECL측은 NRU에서 중성자비를 받지 않고 건식공정 산화물핵연료의 조사 시험을 수행하겠다는 파격적인 제안을 하였다[1, 2].

조사연료의 해외 수송방안을 분석하기 위해서는 우선 수송대상 핵연료의 특성과 양을 결정하고, 국내외 관련법규 및 규정 등의 기본 요건을 검토하여야 하며, 이와 아울러 적합한 수송용기를 선정하고, 수송방법과 절차 등이 포함된 수송방안 등을 분석하여야 한다. 특히, 건식공정 산화물핵연료와 같이 소량의 조사된 사용후핵연료의 해외 운반한 선례는 국내뿐 아니라 해외에서도 경험 이 거의 없는 실정이다. 이에 따라 일반적으로 소량의 방사성물질을 운반할 경우에는 비용뿐 아니라 수송기간 측면에서 항공수송이 선박수송에 비해 유리한 것으로 알려져 있어 항공기를 이용한 건식공정 산화물핵연료의 해외수송 가능성을 검토하였다[3, 8].

2. 운반대상 핵연료의 특성

건식공정 산화물핵연료의 해외수송을 위해서는 운반대상 핵연료의 특성과 양을 결정하는 것이 중요하다. 운반대상 핵연료의 양은 '01년 5월 및 11월 한국에서 개최된 제 14차 및 15차 한·카·미·IAEA간의 PRM에서 협의하여 산화물핵연료봉 10개(약 6 kgU)로 결정한 후 이를 JD에 반영하였다. 또한 미국원산 핵연료의 국제이전에 따른 미국측의 사전동의를 '01년 4월 신청하여 '02년 4월 미국으로부터 동의를 획득하였다. 건식공정 산화물핵연료 제조에 사용된 경수로 사용후핵연료는 '86년 10월 고리 1호기에서 배출되어 PIEF 수조에 저장중인 G23 핵연료로서 농축도 3.21 w/o, 연소도 35,500 MWD/MTU이다. 운반대상 산화물핵연료봉 10개의 특성은 다음과 같다.

- 운반 수량 : 건식공정 산화물핵연료 봉 10개(연료봉: 직경 13.8 mm x 길이 495 mm)
- 방사능량 : 약 40.34 TBq/10 rods
- 조 성
 - U-235 : 55 g
 - U(total) : 5,085 g
 - Pu-239 and Pu-241: 28.9 g
 - Pu(total) : 40 g
- Fissile Material : 83.9 g
- 붕괴열 : 3.6 watt
- A2 값 : 약 1,130 A2

3. 항공 해외수송 관련 법규 및 규정

조사연료의 해외수송을 위해서는 관련법규 및 규정을 검토하여 제반 요건을 만족시킬 수 있도록 적합한 절차에 따라 수송용기와 수송방법을 선정하고, 규제기관으로부터 인허가를 획득하여야 한다. 특히 본 수송과 같이 소량의 조사후연료를 수송한 경험은 국내뿐 아니라 세계적으로도 매우 드문 경우에 해당하므로 관련법규 및 규정의 검토와 해당 전문가들과의 협의는 무척 중요하다. 특히 소량의 조사연료의 국제수송은 정책적인 목적에 따라 수행한 바는 있으나 상용목적으로 운반한 경험은 전무한 것으로 조사되었다. 더욱이 해외수송의 근간이 되는 IAEA TS-R-1, IATA DGR 등이 최근에 강화되어 개정됨에 따라 이들 규정의 검토는 중요하다. 또한 국제수송은 위에서 언급한 공통적인 규정 외에 해당국의 관련법규 및 규정도 만족시켜야 한다. 이에 따라 우선 공통규정인 IAEA TS-R-1, IATA DGR 등과 국내 관련법규 등을 검토하였다[3, 8].

조사연료의 수송과 관련된 국내 원자력관련 법규 및 규정은 원자력법, 원자력법시행령, 원자력법시행규칙, 방사선안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙(과기부령 제 30호), 방사성 물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정(과기부고시 제2001-23호), 방사성물질 운반용기의 제작검사 및 사용검사에 관한 규정(과기부고시 제2001-19호) 등이 있다[4~7].

4. 수송용기 선정

고방사성 조사연료를 운반하기 위해서는 국제적으로 통용되는 규정에 따라 해당국의 원자력 규제기관으로부터 인허가를 받은 수송용기를 사용하여야 한다. 이러한 용기를 선정하기 위해서는 운반대상 조사연료의 제원, 방사능량, 붕괴열, 핵분열성물질 여부 등의 특성을 분석하여 이에 맞는 수송용기를 선정하여야 한다. 방사성물질 운반용기는 운반물의 크기, 형태 및 운반 목적에 따라 다양한 운반용기를 개발하여 활용 중에 있다. 방사성물질 등의 종류와 그 한도량에 따라 L형 운반물, IP형 운반물(IP-1형, IP-2형, IP-3형), A형 운반물, B형 운반물(B(U)형, B(M)형), C형 운반물 및 핵분열성물질 운반물로 구분한다. 운반물은 차폐·격납 및 열전달 특성이 승인된 설계기준에 적합하여야 하고, 핵분열성물질인 경우에는 임계를 방지하기 위하여 중성자 방출물질의 존재와 분포를 확인하여야 한다[3, 8].

건식공정 산화물핵연료 봉 10개의 A2값의 합은 약 1,130이고, 핵분열성물질이 15 g를 초과하므로 핵분열성물질에 해당한다. A2값이 1이상인 방사성물질을 운반할 수 있는 운반용기는 B(M), B(U), C형이 있으며, 이 중에서 핵분열성물질을 운반하기 위해서는 B(M)F, B(U)F, CF형의 운반용기를 사용하여야 한다. 특히 본 건식공정 산화물핵연료는 이미 원자로에서 한번 조사된 사용후핵연료를 재가공하여 제조되었으므로 방사능이 높고, 핵분열성물질일 뿐 아니라 연료봉의 길이가 약 50 cm로서 이에 적합한 용기를 선정하기는 쉽지 않다. 이에 따라 건식공정 산화물핵연료의 해외수송을 위해 국내에 사용중인 수송용기를 인허가 받아 사용하는 방안과 외국의 수송용기를 임대하는 방안을 동시에 검토하였다.

가. 국내 수송용기 사용방안 검토

국내에서 사용중인 수송용기로서 건식공정 산화물핵연료 봉 10개를 수송할 수 있는 용기는 KSC-1, KSC-4, 하나로 캐스크 등 3종이 있다. 그러나 이러한 용기는 모두 국내에서만 사용할 수 있도록 규제기관으로부터 인허가를 받았거나 또는 소내 운반에만 사용하도록 인허가를 받았다. KSC-1과 KSC-4는 길이가 약 4m인 되는 경수로 사용후핵연료 집합체 1개 또는 4개를 적재하여 원자력발전소 내의 저장수조간 사용후핵연료를 수송할 수 있도록 설계되었다. KSC-1과 KSC-4 수송용기는 수송하고자 하는 건식공정 산화물핵연료 봉(약 50 cm)에 비해 너무 크고, 또 건식공정 산화물핵연료를 적재하여야 하는 IMEF 수조에 반입이 불가능한 문제도 있는 것으로 조사되었다.

이에 따라 KSC-1과 KSC-4 수송용기는 검토대상에서 제외하고 하나로 수송용기의 적용 가능성을 집중적으로 검토하였다. 하나로 캐스크는 다목적연구로인 하나로에서 조사후 배출되는 하나로 사용후핵연료 1 다발 또는 중수로형 사용후핵연료 2 다발을 운반할 수 있도록 설계되었으나, 인허가 과정에서 연구소 소내운반에만 사용할 수 있도록 규제기관의 인허가를 받아 현재는 연구

소 내에서만 사용되고 있다. 이 수송용기의 특성은 표 1에 나타난 바와 같다[10]. 현재 이 수송용기는 하나로에서 조사된 하나로핵연료의 하나로 수조와 IMEF 수조간의 운반 또는 조사시험을 위해 IMEF M6 셀에서 제조된 건식공정 산화물핵연료 소결체, 핵연료봉 혹은 다발의 하나로 수조와 IMEF 수조간의 운반에 사용되고 있다.

표 1. 하나로 수송용기(KMRR Cask)의 주요 특성

구 분	주요 특성
• Type	B(U)F
• Length	2.03m (1.70m)
• Diameter	1.14m (0.77m)
• Weight	6.6 ton
• Cavity	dia. 124mm, ℓ 1.07m
• Capacity	1 KMRR F/A, 2 CANDU F/A
• Radioactivity	320,000 Ci

이 캐스크는 습식 캐스크로서 핵물질의 적재 및 하역은 IMEF 혹은 하나로 수조의 물 속에서 수행하고, 운반할 때에는 수송용기 내의 물을 완전히 제거한 상태에서 운반한다. 하나로 수송용기는 운반하고자 하는 건식공정 산화물핵연료에 비해 조금 큰 것이 흠이나, 이 수송용기는 이미 하나로와 IMEF 수조간에 하나로 조사연료 또는 건식공정 산화물핵연료 시료를 여러번 운반한 경험이 있고, 방사능, 열용량 및 외부치수, 중량 등의 다른 특성은 대부분 수송조건을 만족하고 있는 것으로 분석되었다. 이 수송용기는 제작 당시 인허가 비용 등의 문제 때문에 연구소 내에서만 운반할 수 있도록 인허가를 받아 건식공정 산화물핵연료의 해외수송을 위해서는 규제기관으로부터 다시 인허가를 받아야 하는 문제점이 있다. 이에 따라 인허가 갱신방안을 개략적으로 검토하였다.

하나로 수송용기는 현재 3개를 연구소가 확보하고 있으므로 이 수송용기의 일부를 사용하여 규제기관의 인허가를 받는 방안을 검토하였다. 우선 규제기관의 담당자와 인허가 방안과 성능을 보장하기 위한 시험방안에 대해 협의하였다. 하나로 운반용기의 인허가를 갱신하기 위해서는 운반용기의 인허가를 위한 제반 안전성분석을 재 시행하여야 하고, 안전성 시험도 재 수행되어야 한다. 건전성 입증시험을 위해서는 용기 3개중 1~2개를 안전성 시험용으로 사용해야 할 것으로 예상되거나 경우에 따라서는 추가 모델제작이 필요할 것으로 예상된다. 인허가를 추진하기 위해 최소한 3~5명이 6개월 이상 투입되어 안전성 시험 및 안전성보고서 작성 등의 준비가 필요하다. 또한 규제기관에 안전성분석보고서 등의 인허가 서류를 제출하여 서류심사에만 약 3개월 정도 소요될 것으로 예상되며, 안전성 시험을 수행할 경우에는 최소 6개월 정도가 소요될 것으로 조사되었다.

하나로 수송용기는 국내 규제기관에서 인허가를 받더라도 이를 근거로 경유국 또는 도착국으로 예상되는 미국 및 캐나다의 규제기관으로부터 인허가 또는 인증을 받아야 한다. 특히 이러한 절차는 모든 인허가 서류를 영문으로 작성하여야 할 뿐 아니라 국내에서 외국의 규제기관에 인허가를 신청한 경험이 없어 업무수행에도 어려움이 예상된다. 이러한 모든 것을 고려할 때 인허가 비용만도 수천만원이 소요되고 위험부담도 너무 큰 것으로 조사되었다. 또한 하나로 수송용기의 모든 인허가가 완료되더라도 핵분열성물질의 항공수송을 위한 요건은 만족시키지 못하므로 이 수송용기에 건식공정 산화물핵연료를 적재하여 항공수송은 불가능하므로 선박수송을 하거나 핵분열성물질 면제범위를 이용하여 핵연료의 일부만을 운반해야 하는 문제도 있는 것으로 파악되었다. 이러한 제반 여건과 문제점을 고려할 때 단 1~2회의 건식공정 산화물핵연료의 해외수송을 위해 국내에서 사용중인 수송용기를 재 인허가 받는 방안은 경제적 및 기술적 측면에서 위험부담은 너무 크나 얻는 이점이 적은 것으로 분석되었다.

나. 외국의 수송용기 조사

국내에서 사용중인 수송용기의 인허가를 갱신하여 건식공정 산화물핵연료의 해외수송에 적용하는 방안을 검토했으나 기술적 및 경제적 측면에서 위험부담이 큰데 비해 얻는 실효가 적으므로 국내 수송용기를 사용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 조사되었다. 이에 따라 해외 수송용기를 임대하여 건식공정 산화물핵연료를 수송하는 방안을 집중적으로 검토하게 되었다. IAEA PACTRAM List에 의하면 2000년도 수송용기 인허가 보유현황은 전 세계 총량이 1,657개이고, 이 중에서 B(U)F형은 247개, 항공수송 가능한 B(U)F형은 93개인 것으로 조사되었다. 건식공정 산화물핵연료 봉 10개의 특성을 고려할 때 건식공정 산화물핵연료를 수송할 수 있는 수송용기의 중량은 2~8톤 정도가 적당한 것으로 예상된다. 이를 근거로 IAEA PACTRAM list를 보며 수송용기를 조사하였다. 2000년도 IAEA PACTRAM List에 따르면 중량 2톤~8톤의 수송용기는 표 2에 나타난 바와 같이 약 20개 정도가 있는 것으로 파악되었으나 건식공정 산화물핵연료 봉 수송가능 여부는 PACTRAM List에 나타난 자료가 미비하므로 판단이 어려웠다. 이에 따라 수송용기를 제작하거나 확보하고 있는 외국의 전문기관들에 문의하여 수송용기를 조사하였다.

표 2. 해외 수송용기 현황 (항공운반, 중량 : 2~8톤)

CERT	CERTCTRY	PKID	CONTENTS
GB/3705B/B(U)F-85	UK		IRRADIATED EXPERIMENTAL SAMPLES
GB/3705E/B(U)F-85	UK		IRRADIATED EXPERIMENTAL SAMPLES
GB/3705A/B(U)F-85	UK		IRRADIATED EXPERIMENTAL SAMPLES
RU/116/B(U)F-85T/A1	RUSSIAN FED.	TK-S5	2 FUEL ASS'Y OF WWER-1000 REACTOR
CH/5029/B(U)F	SWITZERLAND	FS 41	Aiguilles base d'UO2-Pu02. 250g d'U235,
GB/3705D/B(U)F-85	UK		IRRADIATED EXPERIMENTAL SAMPLES
GB/3705F/B(U)F-85	UK		IRRADIATED EXPERIMENTAL SAMPLES
F/351/B(U)F-85	FRANCE	RD15/IIB	max 100g U235 enr.?93%
GB/2773C/B(U)F-85	UK		IRRADIATED FUEL ELEMENTS
B/61/B(U)F-85	BELGIUM	PAD. RD15/IIB	FILTERS CONTAINING URANIUM OXYDES
USA/9234/B(U)F	UNITED STATES O	NCI-21PF-1	MAX: 5020 POUNDS URANIUM HEXAFLUORIDE
USA/9284/B(U)F-85	UNITED STATES O	ESP-30X	MAX. 5020 LBS UF6 PACKAGED
GB/3390A/B(U)F-85	UK	NUPACK 200	ILW
B/51/B(U)F-85	BELGIUM	FS69	not irr. MOX fuel
RU/159/B(U)F-85T	RUSSIAN FED.	TK-S7M	24 FUEL ASSEMBLIES OF EGP-6 REACTOR
NL/0079/B(U)F	NETHERLANDS	TN 6/3	ELEMENTS STANDARD, CRAYONS
USA/0533/B(U)F	UNITED STATES O	TN 6/3	IRRADIATED FUEL PINS OR RODS
A/9801/B(U)F	AUSTRIA	TN 6/3	SPENT FUEL
B/60/B(U)F-85	BELGIUM	Marianne	IRRADIATED U-TARGETS

GNB, BNFL, COGEMA 등 수송 관련회사에 문의한 결과 건식공정 산화물핵연료의 해외수송에 적당한 소형 수송용기는 없다는 회신을 받았다. 현재까지 입수한 수송용기 정보에 따르면 건식공

정 산화물핵연료 봉의 수송에는 AECL사의 IMT Cask, NAC사의 LWT Cask, GE사의 GE-2000 Cask 등이 일단은 사용 가능한 것으로 판단되었다. 이에 따라 각각 수송용기에 대해 좀더 구체적으로 조사하였다.

NAC사의 LWT Cask는 미국 NAC사에서 개발하여 사용중인 수송용기로 미국주도로 국내 연구용 원자로인 TRIGA 원자로에서 배출된 TRIGA 사용후핵연료를 국내에서 적재하여 미국으로 수송할 때 사용했던 수송용기이다. 이 수송용기는 하나로 수조에서 사용한 경험이 있고 미국 규제기관의 제작 및 사용허가가 낮으므로 본 수송에는 기술적으로 큰 문제는 없는 것으로 조사되었다. 이 수송용기에 대한 특성 및 주요사항 검토결과는 표 3과 같다. 이 수송용기는 기술적인 측면에선 큰 문제가 없으나 수송용기의 총 중량이 23톤이나 되고 임대비용이 만만찮게 소요되는 단점이 있다. 또한 이 수송용기는 항공수송 요건에 따른 인허가를 받지 않았기 때문에 항공수송에는 부적합하다[11].

표 3. NAC-LWT 수송용기 주요특성 및 소요비용

구 분	NAC-LWT Cask (미국)	비 고
용기 특성	<ul style="list-style-type: none"> • Type B(U)F-85 • Length 5.9m (5.08m) • Diameter 1.65m (1.12m) • Weight 23.6 ton • Cavity dia. 340mm, ℓ 4.5m • Capacity 1 PWR F/A, 2 BWR F/A, 120 TRIGA F/A 	미국주도로 국내 연구용 원자로인 TRIGA 원자로에서 배출된 TRIGA 사용후핵연료 운반 경험 있음

GE-2000 Cask는 미국의 GE사가 소유하고 있는 수송용기로 주요 특성은 표 4와 같다. GE-2000 Cask는 NAC-LWT cask에 비해 무게가 다소 적고, 크기가 작은 것이 NAC-LWT Cask에 비해 약간 도움이 되나 여전히 중량이 무겁고, 항공수송을 위한 인허가는 취득하지 못했으므로 항공수송은 불가능하고 수송용기의 임대비용이 비싼 것이 흠이다. 또 이 수송용기를 항공 수송할 수 있도록 승인을 받으려면 추가비용과 더불어 4~6개월 정도 소요된다고 한다[12].

표 4. GE-2000 수송용기 주요특성 및 소요비용

구 분	GE 2000 Cask (미국)	비 고
용기 특성	<ul style="list-style-type: none"> • Type B(U)F-85 • Length 3.34m (1.80m) • Diameter 1.83m (0.98m) • Weight 15.2 ton • Cavity dia. 340mm, ℓ 4.5m • Capacity HFIR F/A, TSR F/A, TRIGA F/A • Radioactivity 	

AECL사는 조사된 CANDU 사용후핵연료 1다발을 수송할 수 있는 IMT 수송용기 3 개를 확보하고 있다. 이 수송용기는 기존에는 천연우라늄을 조사한 사용후핵연료를 운반할 수 있도록 B(U)형으로 인허가를 받았으나, '02년 3월 인허가를 갱신하여 농축도가 있는 사용후핵연료도 수송할 수 있도록 B(U)F형으로 인허가를 재 취득하였다. 그러나 이 수송용기는 certificate 내용 중에 핵분열성물질의 항공수송은 불가하다는 문구를 넣어 인허가를 받았으므로 핵분열성물질의 항공수송

에는 사용할 수 없다. 이 수송용기는 무게가 5.6톤에 불과하고 CANDU 다발을 수송할 수 있도록 설계되어 중량 및 특성 등 기술적인 면에서는 NAC-LWT 및 GE-2000 Cask에 비해 유리한 것으로 분석되었다. 또한 임대가격도 앞에서 언급한 수송용기에 비해 훨씬 싸고, 운반하고자하는 해당국의 규제기관에서 인허가를 받는 용기이고, AECL사의 NRU에서도 사용한 경험이 있는 등의 이점을 갖고 있다. IMT Cask의 주요특성은 표 5에 나타낸 바와 같다[13].

표 5. IMT 수송용기 주요특성 및 소요비용

구 분		IMT Cask (캐나다)	비 고
용기 특성	<ul style="list-style-type: none"> • Type • Length • Diameter • Weight • Cavity • Capacity • Radioactivity 	B(U)F-85 1.93m (1.37m) 1.22m (0.76m) 5.6 ton dia.170mm, ℓ 800mm CANDU 1 bundle 54,000 Ci	

다. 수송용기 선정

국내에서 사용중인 하나로 수송용기의 인허가를 갱신하여 해외수송에 사용하는 방법과 외국의 수송용기중 AECL사의 IMT Cask, NAC사의 LWT Cask, GE사의 GE-2000 Cask를 사용하는 방안에 대해 검토하였다. 하나로 수송용기는 제작 당시 인허가 비용 등의 문제 때문에 연구소 내에서만 운반할 수 있도록 인허가를 받아 건식공정 산화물핵연료의 해외수송을 위해서는 규제기관으로부터 다시 인허가를 받아야 하는 문제점이 있다. 하나로 수송용기의 인허가를 갱신하기 위해서는 운반용기의 인허가를 위한 제반 안전성분석을 재 시행하여야 하고, 안전성 시험도 재 수행되어야 한다. 또한 경유국 및 도착국의 인허가도 고려하여야 한다. 이러한 제반 여건과 문제점을 고려할 때 단 1~2 회의 건식공정 산화물핵연료의 해외수송을 위해 국내에서 사용중인 수송용기를 재 인허가 받는 방안은 경제적 및 기술적 측면에서 위험부담은 너무 크나 얻는 이점이 적은 것으로 분석되었다.

외국의 수송용기를 임대하는 방안을 검토한 결과 GE-2000 Cask과 NAC-LWT Cask는 중량이 너무 무겁고 임대비용이 너무 비싼 것으로 조사되었다. 기술적인 측면 및 경제적인 측면에서 AECL사의 IMT 수송용기가 가장 바람직한 수송용기로 분석되었다. 그러나 이 수송용기도 검토 대상이었던 다른 수송용기와 마찬가지로 핵분열성물질의 항공수송은 불가하므로 선박을 이용한 수송이나 핵분열성물질 면제범위를 이용한 항공수송에만 사용할 수 있는 단점이 있는 것으로 조사되었다.

5. 수송방안 분석

운반대상 사용후핵연료의 특성, 핵연료 봉과 수송용기 적재하역 방법 등의 기술적 측면 및 수송용기 임대비용, 인허가비용, 수송비용 등의 경제적 측면과 더불어 항공수송에 따른 법규 및 규정 등의 특성을 고려하여 건식공정 산화물핵연료 봉의 수송에 적합한 수송방안을 도출하기 위해 여러 수송방안을 분석하였다. 일반적으로 소량의 방사성물질을 운반할 경우에는 비용뿐 아니라 수송기간 측면에서 항공수송이 선박수송에 비해 유리한 것으로 알려져 있다. 특히 항공수송은 수송기간이 짧아 수송용기의 임대기간을 단축할 수 있으므로 수송용기를 소유하고 있지 못한 우리 실정에 적합한 수송방식이다. 이에 따라 건식공정 산화물핵연료를 항공운반 가능여부를 검토하였다.

가. 항공혼용 수송방안 분석

수송비용을 줄이려면 여객기 또는 화물기를 이용해서 다른 화물과 함께 혼용 적재하여 수송하

는 것이 바람직하다. 대한항공은 인천공항에서 캐나다 서부에 위치한 밴쿠버 공항까지 여객기를 하루에 1회씩 운항하고 있고, 화물기인 경우에는 인천공항에서 캐나다 동부에 위치한 토론토까지 주당 2~3회 운항하고 있다. 따라서 이 수송방안은 법규와 규정을 만족시킬 수 있다면 가용한 수송방안이므로 우선 이 방안에 대한 법규 및 규정의 제한 사항을 검토하였다.

여객기에 위험물을 혼용 적재하여 수송할 경우에는 IATA DGR 규정을 만족시켜야 한다. 그러나 IATA DGR Limitation중 Operator Variation(대한항공)에 핵분열성물질의 여객기를 이용한 수송은 금지되어 있다. 특히 작년부터 대한항공에서는 항공기 안전 운항을 위하여 모든 여객기에 위험품 탑재를 금지(단, 화물기 미운항 지역에 한하여 화장품, Duty Free Item, 자동차는 대한항공의 사전 결정 하에 운송 가능하다고 함)하고 있다. 또한 이밖에도 여러 규정에 위배되기 때문에 건식공정 산화물핵연료는 여객기를 이용하여 항공수송 하는 것은 불가능한 것으로 판단된다. 핵분열성물질을 화물기로 혼용 운반할 경우에는 '01. 7월 이후 IATA 규정이 강화되어 운반용기에 보다 엄격한 제한을 두고 있다. A2 값이 3000 이하이면 규정상 B(U) 수송용기로도 항공수송이 가능하나 이 경우에는 안전한 항공운송을 보장할 수 있도록 수송용기가 설계/제작되어야 할뿐 아니라 입증시험도 거쳐야 한다.

건식공정 산화물핵연료의 수송에 가장 적합한 수송용기로 잠정 결정된 AECL사의 IMT Cask는 2002년 3월 B(U)F 수송용기로 인허가를 갱신하였으나 Certificate의 내용 중에 핵분열성물질의 항공수송은 불가하다고 명시되어있다. 또한 지금까지 조사한 바에 따르면 핵분열성물질 면제범위를 초과하는 건식공정 산화물핵연료를 항공 운반할 수 있는 적합한 수송용기는 없는 것으로 조사되었다. 따라서 건식공정 산화물핵연료의 항공혼용 수송은 여객기인 경우에는 대한항공에 적재할 수 없으므로 불가능하고, 화물기인 경우에도 현 단계에서는 건식공정 산화물핵연료를 적재할 수 있는 적합한 항공수송용 수송용기가 없어 불가한 것으로 판단된다[3, 8].

나. 항공전용 수송방안 분석

건식공정 산화물핵연료 봉 10개는 핵분열성물질 면제범위를 초과하는 양으로 이를 수송하기 위해서는 핵분열성물질의 항공수송에 적합한 수송용기에 적재하여 수송하여야 한다. 이 경우에는 핵분열성물질을 항공 수송할 수 있도록 설계/제작되고 시험된 수송용기를 사용하여야 하나 현재 건식공정 산화물핵연료 봉 10개를 수송할 수 있는 적합한 수송용기는 없는 것으로 조사되었다. 또한 전용수송의 경우에는 수송용기가 있더라도 순수 항공운반비용만 수십만불 정도가 소요될 것으로 추정되므로 경제적인 측면에서도 이 수송방안은 바람직하지 못하다. 따라서 항공전용 수송방안은 기술적 및 경제적 측면에서 건식공정 산화물핵연료 봉의 수송에는 적합하지 않은 것으로 판단된다[3, 8].

다. 면제범위를 이용한 화물기 혼용 수송방안 분석

건식공정 산화물핵연료 봉 10개는 핵분열성물질 면제범위를 초과하는 양으로 이를 항공수송할 수 있는 적합한 수송용기가 없어 기술적 측면에서 항공혼용 수송방안이 불가능한 것으로 조사됨에 따라 대안으로 핵분열성물질 면제범위(건식공정 산화물핵연료 봉 약 1.7개 해당)를 이용한 항공혼용 수송방안을 검토하였다. 이 수송방안은 핵분열성물질 면제범위에 해당하는 적은 양의 건식공정 산화물핵연료를 화물기에 혼용적재하여 수송하는 방안으로 B(U) 수송용기에 적재가 가능하다. 이 경우에는 기존 수송용기로 잠정적으로 결정된 IMT Cask의 사용이 가능하고 또 1회의 수송비용이 비교적 저렴하므로 이 방안을 집중적으로 검토하였다.

그러나 이 경우에는 IATA Limitation중 State Variation에 따라 영공 통과국, 경유국의 승인문제가 복잡한 것으로 조사되었다. 특히 미국 DOT는 일정량이상(건식공정 산화물핵연료 펠렛 1개 정도) 이상의 Pu를 포함한 핵물질을 항공수송 할 경우에는 엄격히 규제하고 있다. 이에 따라 미국 DOT에 관련사항을 문의해본 결과 비록 핵분열성물질 면제범위라 할지라도 일정량 이상의 Pu를 포함한 핵물질을 항공수송 할 경우에는 수송용기의 시험까지도 요구하고 있는 것으로 조사되었다. 또한 이러한 선례도 없었던 것으로 조사되어 규정을 보수적으로 해석함에 따라 승인 받기가 무척

어려울 것으로 예상된다. 또한 핵분열성물질을 항공으로 수송할 경우에는 영공 통과국(일본, 러시아)에도 핵물질의 양에 관계없이 포장물의 설계 승인 및 운반신고를 해야 한다는 것도 파악되어 위험부담이 너무 큼을 알게 되었다[3, 8].

공동연구의 당사자인 미국 DOS의 전문가도 '02년 11월 개최된 한·카·미·IAEA 간의 제 16차 PRM에서 미국을 경유하는 항공수송경로는 바람직하지 않다고 Comment한 바 있으므로 면제범위를 이용한 항공혼용 수송방안에 대해서는 더 이상의 검토는 바람직하지 않은 것으로 판단된다. 또한 어려운 과정을 거쳐 면제범위를 이용해서 건식공정 산화물핵연료를 1회 수송하더라도 수송량이 적어 연구목적을 충족시키지 못하는 문제점도 있어 면제범위를 이용한 항공혼용 수송방안도 위험에 비해 실익이 적은 것으로 조사되었다.

7. 결론

핵비확산성 건식공정 산화물핵연료 기술개발과제에서는 건식공정 산화물핵연료봉을 개발하였으나 상용로 운전조건과 동일한 고온·고압하에서 조사시험을 할 수 없어 핵연료 성능의 검증이 어렵던 차에 캐나다 AECL측은 중성자비를 받지 않고 NRU에서 건식공정 산화물핵연료를 조사시험을 할 수 있다고 제안한 바 있다. 이에 따라 건식공정 산화물핵연료의 해외 항공수송방안을 검토하였다. NRU 조사시험을 하고자 하는 핵연료봉은 국내 원전에서 배출된 사용후핵연료를 IMEF M6 핫셀에서 재가공한 핵연료로서 핵연료봉 10개(약 6 kg)로 핵분열성물질이 약 84 g 포함되어 있으므로 UN 위험물 분류등급에 따라 제7종에 해당하며 핵분열성물질이 일정량을 초과하므로 핵분열성물질에 해당한다. 건식공정 산화물핵연료 봉 10개를 수송할 수 있는 수송용기는 IMT 수송용기(AECL 소유, 5.5 톤)가 임대가격 및 크기 면에서 가장 적합한 것으로 분석되었다. IMT 수송용기는 '02년 3월 B(U)F형으로 승인되었으나, 강화된 IATA DGR에 따라 핵분열성물질의 항공수송은 불가하다. 항공 수송은 '01년 7월 이후 IATA 규정이 강화되어 항공수송의 규제요건이 강화되었고 특히, '01년 9.11 테러 이후 관계기관 승인이 더욱 엄격해졌다.

건식공정 산화물핵연료의 항공수송방안을 검토한 결과 건식공정 산화물핵연료 봉 10개는 핵분열성물질에 해당하므로 이를 항공수송할 수 있는 적합한 항공수송용 수송용기는 없는 것으로 조사되었다. 따라서 현시점에서는 건식공정 산화물핵연료 봉 10개의 항공수송은 불가능한 것으로 분석되었다. 또한 가용한 수송용기를 이용할 수 있는 대안으로 핵분열성물질 면제범위를 이용한 항공수송방안도 검토하였다. 이 경우에도 IATA Limitation에 따라 미국을 경유하여 일정량 이상의 Pu가 포함된 핵물질을 운반할 경우에는 미국 DOT에서 수송용기 시험을 포함한 수송용기의 인허가를 요구할 뿐 아니라 영공통과가 예상되는 일본, 러시아 등과도 기술적인 협의와 사전허가가 필요한 것으로 조사되었다. 이에 따라 핵분열성물질 면제범위를 이용할 경우에도 득보다는 위험부담이 너무 크므로 이 방안도 실현성이 없는 것으로 분석되었다.

(참고 문헌)

- [1] 이정원, 양명승 외, "DUPIC 핵연료제조 및 공정기술개발", KAERI/RR- 2234/2001(2002)
- [2] 박장진, 이호희 외, "DUPIC 핵연료시설 기술개발", KAERI/RR-2221/2001 (2002)
- [3] IAEA, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material" IAEA Safety Standards Series TS-R-1(1996)
- [4] "원자력법"(2001. 1.16), "원자력법시행령"(2001. 7. 17)", "원자력법시행규칙"(2001. 7. 25)
- [5] "방사선안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙", 과기부령 제 30호(2001. 7. 30)
- [6] "방사성 물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정", 과기부고시 제2001-23호(2001. 9. 18)
- [7] "방사성물질 운반용기의 제작검사 및 사용검사에 관한 규정", 과기부고시 제2001-19호(2001. 9. 18)
- [8] "IATA Dangerous Goods Regulations"(2001. 1)
- [9] Air Business Home Page
- [10] 구정희, 이주찬 외 "KMRR 핵연료 수송용기 안전성분석보고서" KAERI- NEMAC/TR

-19/94(1994)

- [11] U.S. NRC "Certificate of Compliance for Radioactive Material Packages(NAC-LWT)"
USA/9225/B(U)F-85 Rev. 27, 2000. 1
- [12] U.S. NRC "Certificate of Compliance for Radioactive Material Packages(GE-2000)"
USA/9228/B(U)F-85 Rev. 18, 1999. 11
- [13] CNSC "Certificate of Compliance for Radioactive Material Packages(IMT Cask)"
CDN/2061/B(U)F-85 Rev. 5, 2002. 2

(감사의 글) 본 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.