

2011年度 2月  
工學碩士學位論文

# PWR 사용후핵연료 해상수송시 가상 시나리오 위험도 평가

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

李 相 憲

# PWR 사용후핵연료 해상수송시 가상 시나리오 위험도 평가

A Risk Evaluation of Virtual Scenario for PWR Spent Fuel  
on Sea Transportation

2011年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

李 相 憲

# PWR 사용후핵연료 해상수송시 가상 시나리오 위험도 평가

指導教授 宋 鍾 淳

이 論文을 工學碩士學位 申請 論文으로 提出함.

2010年 10月

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

李 相 憲

# 李相憲의 碩士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 金 辰 源 印

委員 朝鮮大學校 教授 羅 滿 均 印

委員 朝鮮大學校 教授 宋 鍾 淳 印

2010年 11月 日

朝鮮大學校 大學院

## 목 차

그림 목차 .....	iii
표 목차 .....	iv
ABSTRACT .....	v
제1장 서론 .....	1
제2장 사용후핵연료 수송 및 시스템 현황 .....	2
제1절 국내외 수송현황 분석 .....	2
1. 사용후핵연료 현황 및 발생량 .....	2
2. 사용후핵연료 국내 관리현황 .....	3
3. 국내 수송현황 .....	3
4. 국외 수송현황 .....	5
제2절 국내외 수송시스템 현황 및 규정 .....	9
1. 운반방법에 따른 이동수단 .....	9
2. 수송용기 .....	16
3. 부대설비 .....	19
3. 수송관련 법규 및 규정 .....	21
제3장 방사선영향 평가코드 기초자료 .....	30

제1절 방사선 영향평가 코드분석 .....	30
<b>제4장 수송관련 가상 시나리오 예비구성 .....</b>	<b>44</b>
제1절 수송관련 기본구성 요소 및 영향인자 .....	44
1. 수송관련 기본자료 .....	44
2. 수송관련 구성요소별 인자 .....	50
제2절 가상 수송시나리오 구성 .....	62
1. 가상 수송시나리오 기본사항 .....	62
2. 가상 수송시나리오 도출 .....	64
 <b>제5장 가상 시나리오 해상수송 위험도 평가 .....</b>	<b>67</b>
제1절 RADTRAN 주요 입력값 설정 .....	67
제2절 RADTRAN을 이용한 위험도 평가 분석 .....	70
 <b>제6장 결론 .....</b>	<b>72</b>
 <b>참고문헌 .....</b>	<b>74</b>

## 그림 목차

그림1. 사용후핵연료 부지별 호기별 저장량 .....	2
그림2. 미국 사용후핵연료 운반경로 .....	5
그림3. 일본 NFT의 사용후핵연료 수송현황(Tokai) .....	6
그림4. 일본 NFT의 사용후핵연료 수송현황(Rokkasho) .....	7
그림5. 스웨덴 SKB의 사용후핵연료 수송·저장 .....	8
그림6. 프랑스 사용후핵연료 철도 및 전용선박 선적 모습 .....	9
그림7. PNTL의 INF-3 선박 .....	12
그림8. 일본 NFT의 선박 .....	12
그림9. 스웨덴 M/S Sigyn 수송선박 .....	13
그림10. KN-12 수송용기 수송용 특수 트레일러 .....	15
그림11. 프랑스 사용후핵연료 수송용기 차량 .....	16
그림12. TN24XLH 수송용기 개념도 .....	19
그림13. INF 3급 선박의 안전 특징들 .....	26
그림14. MACCS II 전산코드 계산 흐름도 .....	40
그림15. 정박시간에 따른 집단피폭선량 .....	70
그림16. 방출률과 거리에 따른 개인 피폭선량 .....	71

## 표 목 차

표1. 울진 원자력본부의 호기간 이동현황 .....	3
표2. 고리 원자력본부의 호기간 이동현황 .....	4
표3. INF 선박 등급 .....	10
표4. PNTL의 INF-3 선박제원 .....	11
표5. 일본의 INF-3 선박제원 .....	11
표6. 국내 사용후핵연료 수송시스템 개발현황 .....	17
표7. KN-12 운반용기의 설계특성 .....	18
표8. INF 선박 등급 .....	25
표9. 방사성물질 운송에 대한 국제 안전규정 .....	27
표10. 대상원전 현황 및 설계수명 .....	47
표11. 수송관련 기본자료 및 가정 .....	49
표12. 대상원전별 사용후핵연료 저장량 .....	53
표13. 사용후핵연료 저장용량 확장 이력 .....	54
표14. 사용후핵연료 저장용량 확장계획 .....	54
표15. 확장 후 원전본부별 사용후핵연료 저장용량 .....	55
표16. 중간저장시설 부지위치별 해상수송 시간 .....	56
표17. 사용후핵연료 수송에 영향을 미치는 구성요소별 인자 .....	58
표18. 사용후핵연료 소요인력구성(안) .....	61
표19. 발전소별 연간 수송량 .....	64
표20. 3가지 변수에 따른 가상시나리오 도출 .....	65
표21. 변수를 고려한 가상시나리오 항목(시나리오 5) .....	66



# **ABSTRACT**

## **A Risk Evaluation of Virtual Scenario for PWR Spent Fuel on Sea Transportation**

Lee, Sang Heon

Advisor : Prof. Song, Jong-Soon Ph.D

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

External transportation of Spent Fuel not only needs to ensure public reliability for safety but it is essential to establish the optimal method of transportation considering technology, safety, economical efficiency for the efficient management of radiowaste.

At present, the contents on management and transportation of spent fuel are not determined as a national policy but fundamental analysis and measures on transportation plan and planning for disposal of Spent Fuel afterwards should be established.

To derive a transportation scenario, investigation on transportation status of Spent Fuel, rules and regulations is needed and analysis on domestic and international transport plan analysis procedures and methodology is needed.

To set a transport scenario of Spent Fuel, the best scenario on different assumptions and conditions should be able to be driven through quantity estimation, risk assessment, cost evaluation and transportation route analysis etc.

Transportation of Spent Fuel must be able to prevent accidents that may occur during transportation and ensure safety for targets that live on the carrying path or can be affected by radiowaste during transportation.

Reliability must be able to improved by analyzing basic materials and assessment tools for marine and land transport safety assessment and investigating and performing input data of the program etc. for safety assessment and verifying the safety of transport scenarios.

## 제1장 서론

현재 국내 원전에서 발생하는 사용후핵연료는 원전부지 내 임시저장시설에 저장 관리 되고 있다. 현재 수송 가능한 경수로 사용후핵연료는 2009년 6월말 기준으로 총 11,567다발(4,715 MTU)이며, 중간저장을 위해서 각 원전별 사용후핵연료 저장 용량을 확장 중에 있다. 제 253차 원자력위원회 의결에 따라 원전 내 임시저장고 포화가 예상되는 2016년까지 중간저장시설 운영을 목표로 하고 있다. 따라서 수송경로를 고려한 수송 시나리오를 도출하여 분석하는 작업이 필요하다. 수송시스템과 수송 시나리오는 상호 연계성이 있으므로 수송시스템을 구축하고 수송시나리오를 전산 모사하여 경제성 및 기술성 등을 종합적으로 분석한 후 적용 가능 시나리오별 수송시스템을 구축해야 한다. 안전성에 대한 신뢰도를 확보하여야 할 뿐 아니라 기술성, 경제성 등을 고려한 수송방안 수립이 필수적이다. 기술성을 평가하는 위험도 평가 프로그램을 사용하기 위해서는 각각의 입력 변수 값을 설정해야한다. 경제성을 평가할 수 있는 비용평가 측면에서의 개념적 접근법의 경우 다양한 추정방법이 존재하며 적절한 추정방법의 선택이 중요하다. 이를 바탕으로 본 연구는 중간저장을 위한 경수로에서 발생하는 사용후핵연료 수송시나리오를 설정하기 위한 구성요소를 조사하고 영향인자(변수)를 도출하여 시나리오를 생성했다. 국외의 사용후핵연료 수송 사례 검토를 통한 수송 수단별 영향 평가 체계의 특성 자료를 조사하고 지역 환경 특성에 반영이 가능한지 검토하여 원전별 해상운송 거리, 선박의속도등을 가정하여, 시나리오 변수를 설정하였다.

또한, 국외의 사용후핵연료 수송 사례 검토를 통한 방사선 영향 평가 체계의 특성 자료를 조사하였으며 이러한 자료를 바탕으로 수송시나리오 설정을 위한 영향 인자 및 변수를 설정 하였으며 가상시나리오를 도출 하였다. 이를 고려하여 국내 해양 사고 통계 자료를 검토하였으며 이를 통하여 기초적인 국내 수송 가능 해상 경로의 환경 현황 자료를 수집하여 위험도평가를 수행하였다.

## 제2장 사용후핵연료 수송 및 시스템 현황

### 제 1 절 국내외 수송현황 분석

#### 1. 사용후핵연료 현황 및 발생량

2008년 12월 말 기준으로 부지별로 총 10,087.07 MTU가 저장되어 있다. 사용후 핵연료 다발수로 계산할 경우에는 2008년 12월 말 기준 고리 4,184 다발, 영광 3,888 다발, 울진 3,055다발, 월성 289,640 다발이 저장되어 있다.

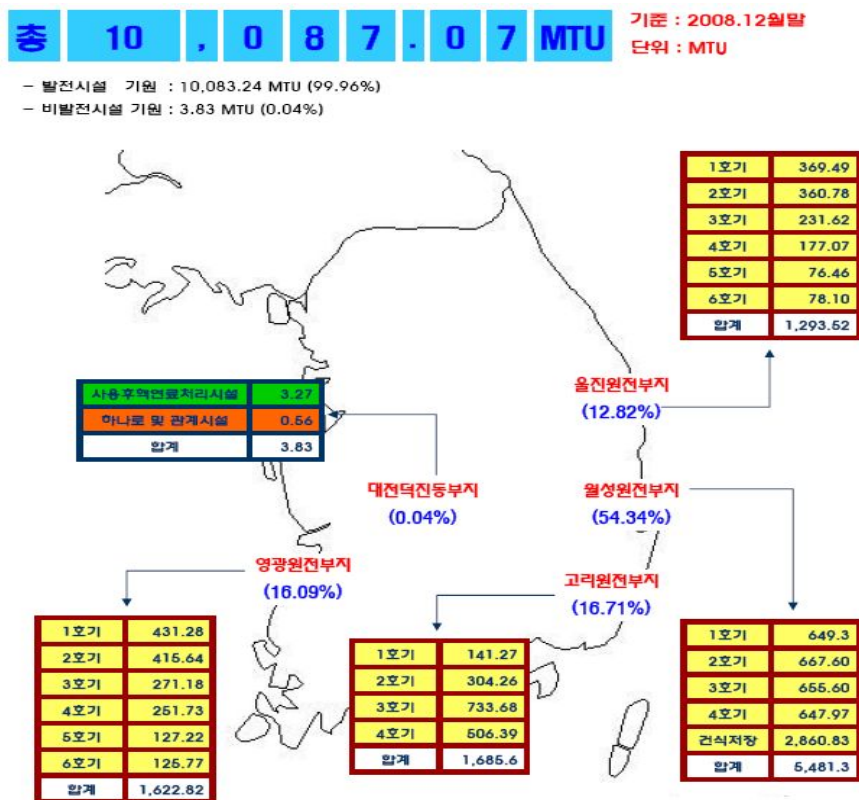


그림 1. 사용후핵연료 부지별 호기별 저장량(2008년 12월 말 기준)

## 2. 사용후핵연료 국내 관리현황

원자력발전소에서 생성된 사용후핵연료는 원자력발전소 부지 내에서 저장·관리되고 있으며, 제249차 및 제253차 원자력위원회 의결에 따라 국가가 건설하고자 하는 중간저장시설 건설 일정과 연계해서 원자력발전소 부지 내 사용후핵연료 저장시설의 저장용량을 확장하고 있다. 경수로형 원자력발전소의 경우, 저장용량의 확장을 위해 조밀 저장대 설치를 추진하여 고리 원자력발전소 3호기, 울진 원자력발전소 1,2호기는 조밀저장대로의 교체를 완료하였으며, 2006년에는 고리 원자력발전소 4호기, 영광 원자력발전소 3,4호기의 조밀 저장대 교체를 완료하였으며, 2008년 12월말에는 울진 원자력발전소 3,4 호기 조밀저장대 교체사업이 완료되었다. 고리 원자력 발전소 1,2호기의 경우에는 저장능력이 부족하여 사용후핵연료를 고리 원자력 발전소 3,4호기 사용후핵연료 저장조로 이송하여 공동 저장관리하고 있다.

## 3. 국내 수송현황

사용후핵연료의 호기간 이동은 1990년부터 수행되어 왔으며, 울진 및 고리발전소 호기간 이동현황을 살펴보면 다음과 같다.

표 1. 울진 원자력본부의 호기간 이동현황

년도	원 전 명	이동장소	운반량(다발)
2008	울진 2호기	울진 3호기	48
2008	울진 1호기	울진 3호기	12
합계			60

표 2. 고리 원자력본부의 호기간 이동현황

년도	원 전 명	이동장소	운반량(다발)
1990	고리 1호기	고리 3호기	20
1991	고리 1호기	고리 3호기	136
1994	고리 1호기	고리 4호기	76
1994	고리 1호기	고리 3호기	44
1995	고리 1호기	고리 3호기	36
2000	고리 2호기	고리 4호기	12
2000	고리 1호기	고리 4호기	28
2001	고리 2호기	고리 3호기	4
2001	고리 1호기	고리 3호기	20
2002	고리 2호기	고리 3호기	48
2002	고리 1호기	고리 3호기	60
2003	고리 2호기	고리 3호기	108
2003	고리 1호기	고리 3호기	72
2004	고리 1호기	고리 3호기	36
2004	고리 2호기	고리 3호기	84
2004	고리 3호기	고리 4호기	60
2006	고리 1호기	고리 4호기	84
2007	고리 2호기	고리 4호기	60
합계			988

## 4. 국외 수송현황

### 가. 미국

NUREG-0752에서는 NRC에서 사용후핵연료 수송허가를 시작한 1979년부터 2005년도까지 발생한 수송이력 통계를 제시하고 있다. 그림 2는 NRC에서 승인한 사용후핵연료 수송 루트를 나타내고 있다.

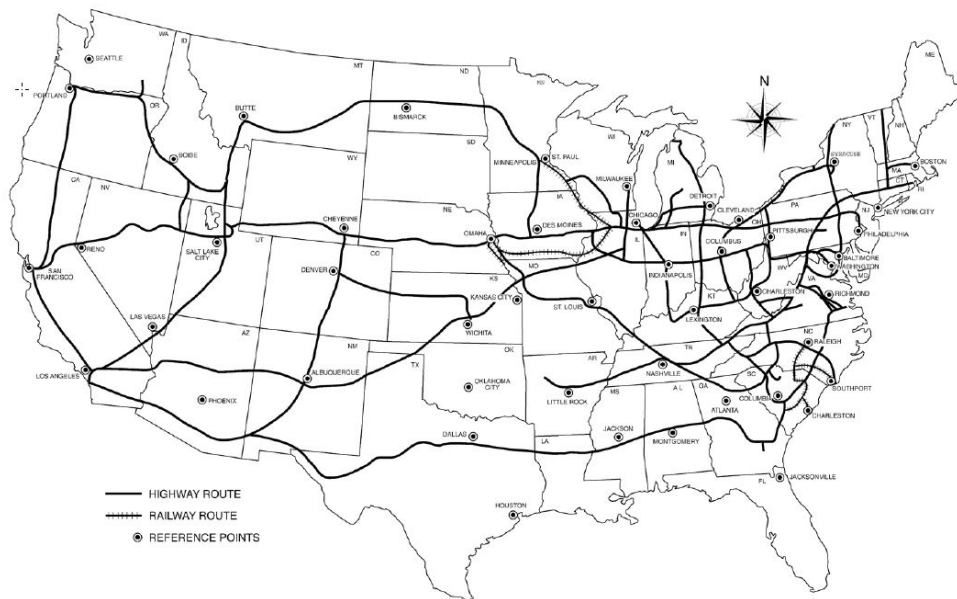


그림 2. 미국 사용후핵연료 운반 경로(1979~2005)

NRC에 의해 승인 된 사용후핵연료 수송은 1,524건으로 보고되고 있다. 이중 고속도로를 이용한 것이 약 83.4%를 차지하며, 철도를 이용한 경우는 약 16.6%를 차지하고 있다.<sup>1)</sup>

그림 2는 1979-2005년 기간 동안 고속도로 및 철도를 이용한 사용후핵연료 수송 패턴을 보여준다.

1) NUREG-0725 Rev.14 "Public Information Circular for shipments of Irradiated Reactor Fuel"

미국 내 고속도로를 이용한 수송은 1984년 209건에 최고에 이르다, 1990년까지는 감소세를 보인다. 국외수입의 경우 1980년대 이후로 감소세를 보이고 있으며, 연평균 수출은 전체를 통틀어 약 0~4건으로 보고되고 있다. 1990년~1993년도에는 총 5건의 국제 수송 환적형태로 미국 항구를 통해 수송되었다. 대부분의 수송활동은 1980년~1987년 사이에 주로 발생했으며, 1987년 이후에는 상대적으로 낮은 수송활동을 보여주고 있다.

미국은 1979년부터 2005년까지 약 2,326 톤의 사용후핵연료를 수송하였으며, 트럭에 비해서 상대적으로 많은 적재능력을 보여주는 철도수송이 약 84%인 1954톤의 사용후핵연료 수송한 것으로 나타났다. 운반방법에 따라 고속도로 모드에서 축적된 이동거리는 약 987,000 마일로 전체 운반 중 92.85%를 차지하고 있다.

## 나. 일본

일본 NFT의 사용후핵연료 수송현황은 Tokai 재처리 시설의 경우, 1977년부터 2008년까지 1,003 MTU를 수송했으며, Rokkasho 재처리 시설의 경우, 1998년부터 2008년까지 2,926 MTU를 수송한 것으로 나타났다.

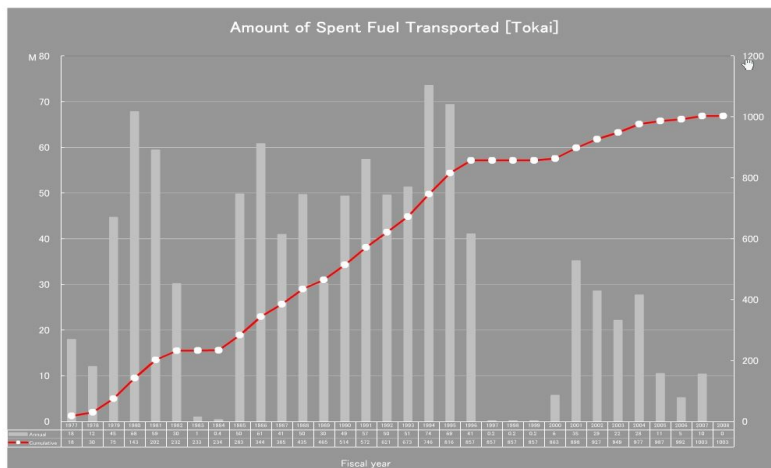


그림 3. 일본 NFT의 사용후핵연료 수송현황(Tokai)



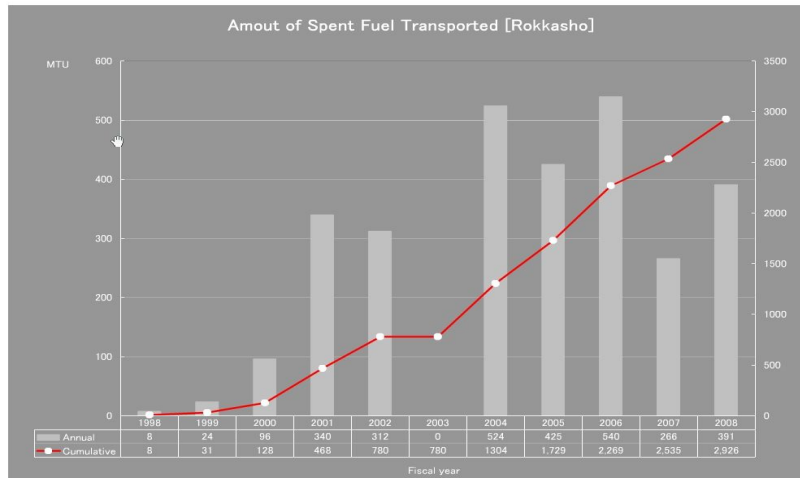


그림 4. 일본 NFT의 사용후핵연료 수송현황(Rokkasho)

#### 다. 스웨덴

스웨덴의 모든 사용후핵연료 및 방사성폐기물은 SKB에 의해 수송된다. 또한 모든 수송은 해상운송에 의해 이뤄지며, INF-3급 선박인 Sigyn호에 의해 수송된다. 선박, 트럭 및 수송 컨테이너는 SKB가 소유하며, 원전소유의 물량장을 이용한다. 원전 수명 시나리오에 따른 사용후핵연료 발생량은 표 5와 같다. 전용선박인 M/S Sigyn호는 연간 약 30~40번의 운행으로 연평균 80~100개의 플라스크를 수송한다. 이것은 연당 250Ut(uranium tons)에 해당한다. 표 6에 사용후핵연료 수송량을 나타냈다. 사용후핵연료 수송용 플라스크는 약 75톤으로 길이 6m, 내경 2m이며, 약 2~3 톤의 사용후핵연료를 수송할 수 있다.

2007년 말 기준으로, CLAB의 저장현황은 BWR 사용후핵연료 3,562 MTU를 비롯하여 총 4,676 MTU의 사용후핵연료를 저장하고 있다. 40년 운영주기의 스웨덴 원자로에서 발생될 사용후핵연료는 약 9,000 tHM이 예상되며, 연간 사용후핵연료 발생량은 대략 300 tHM으로 예상된다. 각 원전에서는 3~5년에 걸쳐 열을 식힌 사용후핵연료는 캐스크(cask) 용기에 담겨 Sigyn 선박을 이용하여 수송하고 있다.

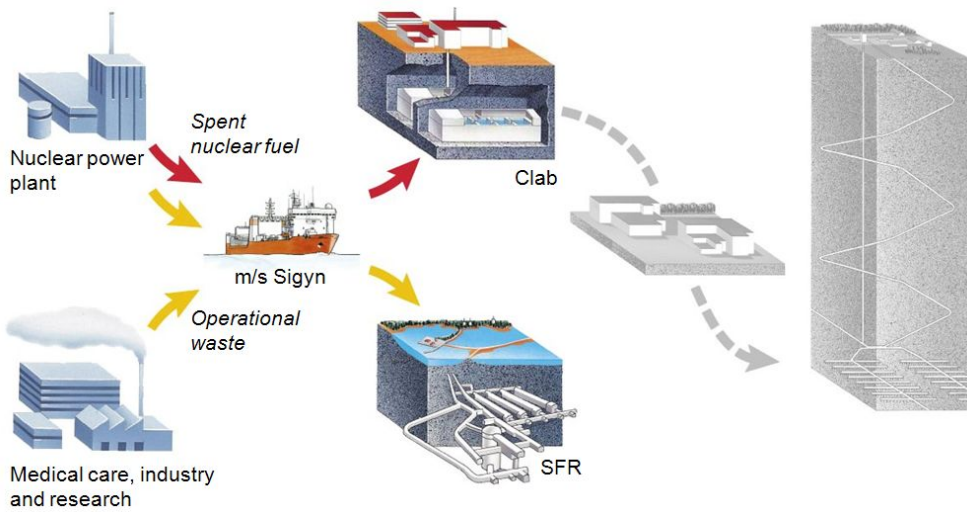


그림 5. 스웨덴 SKB의 사용후핵연료 수송·저장

## 라. 프랑스

프랑스는 운전 중인 원자로 59기에서 연간 약 1,150톤의 사용후핵연료가 발생하고, 그 중의 약 850만 톤을 재처리하고 있으며, 유리고화체형태의 고준위방폐물 1,639m³, 사용후핵연료 10,350m³를 보유중이다. 사용후핵연료 재처리는 COGEMA에서 운영하는 Marcoule의 UP1(1997년 운전을 중지하고 현재 해체작업이 진행 중임)과 La Hague의 UP2, UP3 재처리시설을 이용하고 있다. 독일, 스위스, 벨기에, 네덜란드 등의 유럽 각국과 일본에서 위탁받은 사용후핵연료를 포함하여 대부분 La Hague의 재처리시설에서 이루어지고 있는데, 지금까지 약 36,000 톤 이상의 사용후핵연료를 재처리하였다. 사용후핵연료는 다양한 루트를 통해 La Hague로 수송된다. 프랑스를 포함한 유럽 국가들은 주로 기차로 보내고, 일부는 배로 보낸다. 그러나 일본에서 보낸 것도 마지막에는 기차에 실려 이곳으로 온다. 그러나, 일부는 30~40개 바퀴를 달고 있는 대형 트레일러에 끌려오기도 한다. 한번에 6톤씩 1700여톤을 수송하려면, 1년에 300회 정도 기차나 트레일러가 이곳에 들어와야 한다.



그림 6. 프랑스 사용후핵연료 철도 및 전용선박 선적 모습

## 제2절 국내외 수송시스템 현황 및 규정

### 1. 운반방법에 따른 이동 수단

#### 가. 해상수송

선박을 이용한 사용후핵연료 해상수송은 인구밀집지역을 회피할 수 있어 안전성 확보에 보다 유리하다. 우리나라 원전이 해안에 위치하기 때문에 해상수송이 유리할 것이다. 따라서 해상수송의 주요 수단으로 운송선박의 건조가 필요하다. 사용후핵연료의 안전한 해상운송을 위해 국내 항만을 운항하는 선박은 국제해사기구(IMO)에서 제정한 ‘선박에 의한 방사성물질의 안전운송에 관한 국제규칙(INF

Code)’을 적용하여야 한다. INF Code는 사용후핵연료, 재처리된 플루토늄이나 우라늄과 같은 고준위방사성 물질을 해상으로 운송하는 선박에 적용되는 국제기준으로서 충돌사고 등으로 선체가 손상될 경우에도 쉽게 전복되지 않는 이중선체 등의 구조를 갖추도록 하고 있다. 또 방화설비, 화물구역 온도관리, 화물고박방법, 전기공급장치 등의 안전기준을 정하고 있다.

해상 수송을 위한 선박으로는 INF-2 또는 INF-3 선박이 가능하다. 표 4에 나타낸 INF 선박등급에서 보듯이 INF-2 선박의 경우 총 방사능이  $2 \times 10^6 \text{TBq}$  이하의 플루토늄을 수송할 수 있으며, 따라서, 1회 수송 가능한 수송용기 개수는 사용후핵연료의 총 방사능량에 의해 결정된다. INF-3 선박의 경우 방사능 제한이 없어 많은 용기를 1회에 수송할 수 있으나, 선박의 가격이 높은 단점이 있다.

표 3. INF 선박등급

선박등급			기준
Class	INF	1	4,000TBq 이하의 전체 방사능을 갖는 물질 운송에 인증된 선박
Class	INF	2	$2 \times 10^6 \text{TBq}$ 이하의 전체 방사능을 갖는 방사성핵연료 또는 고준위 방사성폐기물 운송에 인증된 선박 및 $2 \times 10^5 \text{TBq}$ 이하의 전체 방사능을 갖는 플루토늄 운송에 인증된 선박
Class	INF	3	물질의 전체 방사능에 제한 없이 방사성 핵연료 또는 고준위 방사성폐기물 운송에 인증된 선박 및 플루토늄 운송에 인증된 선박

대표적인 INF-3 급 선박으로 PNTL사의 Pacific Heron 및 Pacific Sandpiper 와 일본의 INF-3급 선박의 제원을 표 5 및 표 6에 각각 정리하였다. 2)

2) <http://www.pntl.co.uk/pntl-fleet/pntl-ships.asp>

표 4. PNTL의 INF-3 선박 제원

	<b>Pacific Heron (2008)</b>	<b>Pacific Sandpiper (1985)</b>
LENGTH	104 m	104 m
BEAM (width)	17 m	16 m
DEADWEIGHT	4,916 ton	3,775 ton
DISPLACEMENT	9,667 ton	7,725 ton
ENGINE	2 Diesel Engines, each with 3600 hp	2 Diesel Engines, each with 1900 hp
Max Cargo Capacity	20 cask	24 cask

표 5. 일본의 INF-3 선박제원

	<b>KAIEI MARU</b>	<b>ROKUEI MARU</b>
LENGTH	100 m	100 m
BEAM (width)	16.5 m	16.5 m
DEADWEIGHT	3,000 ton	3,000 ton
DISPLACEMENT	5,000 ton	5,000 ton
Max Cargo Capacity	12 spent fuel packages	20 spent fuel packages



그림 7. PNTL의 INF-3 선박(좌 : Pacific Heron, 우 : Pacific Sandpiper)



그림 8. 일본 NFT의 선박(좌 : KAIEI MARU, 우 : ROKUEI MARU)

스웨덴의 M/S Sigyn은 Salen Technologyies AB(Saltech)가 설계하고 프랑스 조선소 ACH가 건조하였다. 1981년 1월에 발주하여 1982년에 인도되었다.

## m/s Sigyn

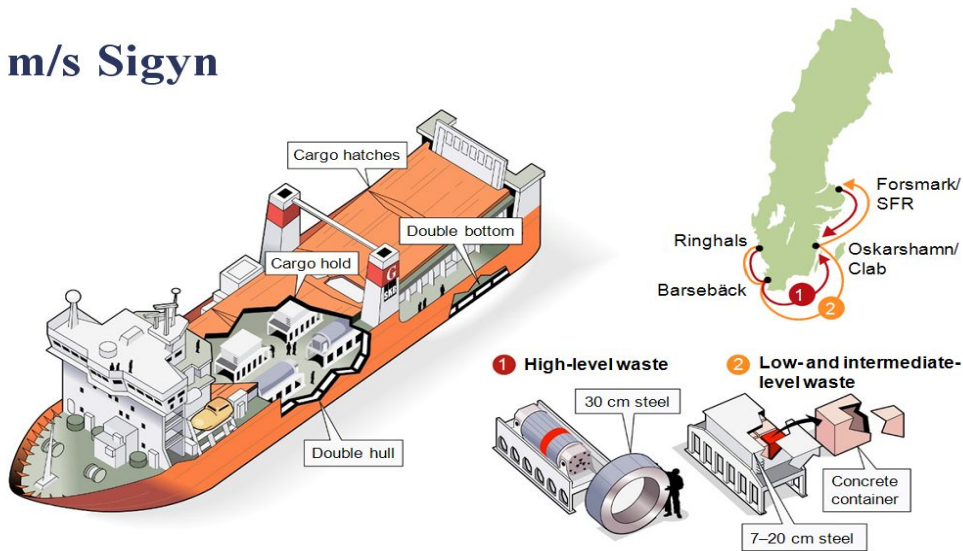


그림 9. 스웨덴 M/S Sigyn 수송선박

사용후핵연료와 방사성폐기물의 수송용으로서 IMO 규칙 type I 선박을 만족하도록 특수하게 설계되어 이중저와 이중선측으로 되어 있으며, 기관과 전기장비도 이중으로 되어 있다. Ro/Ro 와 Lo/Lo 의 겸용선으로 통상적으로는 Ro/Ro 시스템이 사용되고 있다.

사용후핵연료 용기와 중저준위 폐기물 컨테이너는 화물창의 갑판에 간단하고 강건한 고정도구에 의해 고박된다.

1개인 화물창은 길이가 57m이며, 폭이 10m, 높이가 5.7m 이며, 10개의 사용후핵연료 cask나 10개의 중저준위 container 또는 이들을 화물창 후방에 싣고 동시에 수송할 수가 있다. <sup>3)</sup>

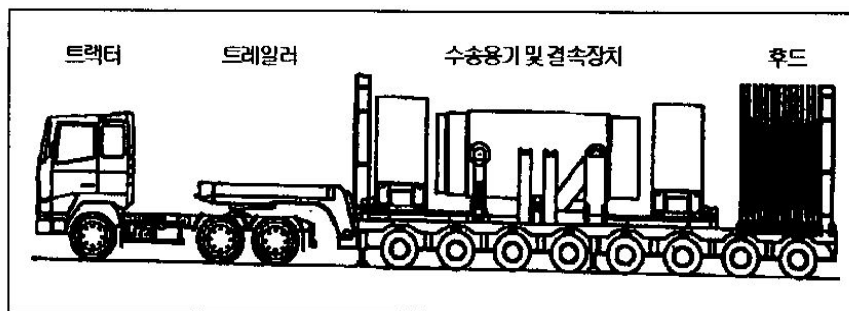
M/S Sigyn 은 B.V(Bureau Vertias)와 LR(Lloyd's Register of Shipping)의 양 선급을 만족하도록 하고 프랑스와 스웨덴 양국의 감독과 관청의 요구에 만족되도록 건조되었다.

### 나. 육상수송

KN-12 수송용기를 이용한 고리 사용후핵연료 소내 수송 및 저장시 연료가 장

3) Transportation of radioactive waste, SKB brochure, [www.skb.se](http://www.skb.se)

전된 수송용기의 총 중량은 약 85톤의 중량물이기 때문에, 특수 설계 및 제작된 8축 전용 트레일러를 이용하여 수송하였다.<sup>4)</sup> 트랙터, 트레일러 및 수송용기를 포함한 전체 수송중량은 약 110톤으로 이를 분산하기 위해 8축을 사용하였고, 축 당 바퀴수가 4개로서 총 32개의 바퀴를 구비하고 있다. 회전반경을 최대한 줄이기 위하여 각 축은 각각 구동이 가능하다. 트레일러의 전장은 15m, 폭은 2.5m 자체 중량은 약 25톤이다. 아울러, 수송용기로의 접근을 방지하고, 기상악화등으로부터 보호하기 위하여 후드(Hood) 구조물을 설치하였고, 후드의 상하부에는 수송용기에 대한 원활한 열전달을 위하여 공기 유입구와 유출구를 설치하였다. 프랑스 원자력 발전소로부터 재처리 공장으로 사용후핵연료 수송을 위해 사용하는 전형적인 차량의 크기는 길이 24 m, 높이 4.7 m, 폭 3.1 m 이며, 최대 적재 중량은 175 톤이다.



4) 고리 사용후핵연료 소내 수송 및 저장공사 최종보고서, 한수원, 2003.12





그림 10. KN-12 수송용기 수송용 특수 트레일러



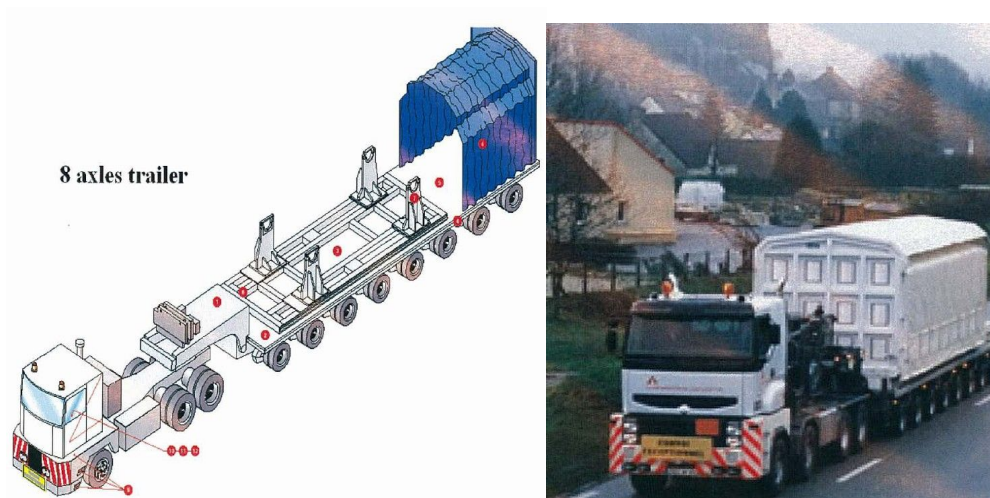


그림 11. 프랑스 사용후핵연료 수송용기 차량

## 2. 수송용기

국내의 사용후핵연료 수송 분야를 살펴보면 이미 경수로 사용후핵연료 집합체 4개를 장전해 수송할 수 있는 KSC-4 수송용기와 집합체 12개를 장전해 수송할 수 있는 KN-12 운반용기를 설계·제작해 고리원전부지에서 호기간 이송작업에 활용한 바 있으며, 현재는 한국형 원전 등에서 발생하는 사용후핵연료를 수송할 수 있는 중형 운반용기를 개발 중에 있다.

표 6. 국내 사용후핵연료 수송시스템 개발현황

모델명	기관명	수송용량 Fuel Assembly	최대연소도 (MWD/MIU)	최대 농축도 (wt%)	냉각 기간 (년)	최대 붕괴열 (kW)	총중량 (M/T)	용기방식	비 고
KSC-1	한원연 (KAERI)	1 FA	45,000	3.5	1	7.2	28.0	수송 전용	원전연구원 수송
KSC-4	한원연 (KAERI)	4 FA	38,000	3.2	3	7.0	37.0	수송 전용	고리 소내수송

KN-12	한수원 (KHNP)	12 FA	50,000	5.0	7	12.6	84.3	수송 전용	WH연료 소내수송
KN-18	한수원 (KHNP)	18 FA	55,000/7년 60,000/9년	5.0	7/9	19.1	126.8	수송 전용	CE연료 소내수송

#### 가. KN-12 운반용기

KN-12 사용후핵연료 수송용기는 가압형 경수로에서 발생한 사용후핵연료 집합체를 12다발까지 건식(내부 건조 및 헬륨가스 충전) 및 습식(내부에 물 충전)조건으로 수송할 수 있도록 설계된 운반용기로서, B(U)형 핵분열성물질 수송물[type B(U)F]에 대한 규정의 기술기준을 만족시키는 것으로 평가되었다.

운반용기는 원자력법에 따라 설계승인이 획득하였으며, 관련 규정에 따른 B형 운반용기의 수송사고조건에 대한 사용후핵연료의 격납, 방사선차폐, 구조적 건전성, 임계제어 및 무동력 열제거 등의 성능검사를 통해 건전성이 입증되어 안전한 운반용기임이 확인되었다. 최대 정상 운전압력(MNOP)은 0.7MPa 이하이며, 습식수송 시 화재사고조건에 대한 최대내부압력을 만족시키며, 핵임계안전지수(CSI)는 0(영)이다.

표 7. KN-12 운반용기의 설계특성

항 목	설계특성
수송용량	PWR 12다발
중량(M/T)	- 총 중량 : 84.3톤,      - 빈 용기 : 62톤
치수	- 본체 외경 : 1.942m - 총 길이(완충체 포함) : 5.744m
재질	- 구조재 및 감마선차폐체 : 탄소강 - 중성자 차폐체 : PE - 충격완충체 : Beech wood, Spruce wood
냉각방식	- 건식(헬륨) 및 습식(물) 겸용
설계기준 연료	- 형태 : PWR 14x14, 16x16, 17x17, - 연소도 : 50,000 MWd/MTU - 냉각기간 : 7년 - 농축도 : 5.0%
최대 붕괴열	12.6 kW
설계압력(정상운전)	0.7 MPa

#### 나. TN 24 용기

TN24<sup>TM</sup> 수송/저장 겸용 용기 계열은 유럽, 미국, 일본 등 에서 다목적 시스템으로 널리 인식되고 있다. TN24<sup>TM</sup> 계열 용기는 용도에 따라 18개 종류가 있으며, 130개 이상의 용기가 제작되었다. PWR 핵연료집합체 24개를 저장하기 위한 목적으로 개발된 금속저장용기이다.

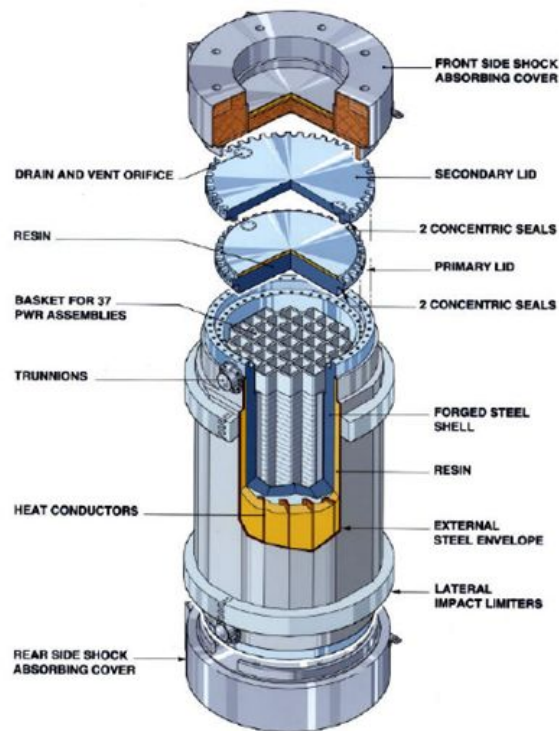


그림 12. TN24XLH 수송용기 개념도

TN24 용기의 주요 구성요소로는 실린더형 용기 몸체, 핵연료 바스켓, 1차 뚜껑과 2차 뚜껑, 수송을 위한 2개의 충격흡수체 등으로 구성되어 있다. 이 용기는 IAEA B Type 요구조건을 충족하고 있다.

### 3. 부대설비

#### 가. 사용후핵연료 수송관련 제반사항

사용후핵연료 중간저장시설이 소외에 위치할 경우 사용후핵연료의 수송 수단으로 도로, 철도 및 해상운송을 고려할 수 있다. 그러나 국내 원자력발전소가 모두 해안에 위치하고, 사용후핵연료를 포함한 용기의 무게가 대부분 100톤을 상회하고 있어, 교량 등이 많은 국내 도로 여건상 육로 수송은 매우 짧은 거리를 제외하고는

고려하기 어렵기 때문에 선박수송방법이 필수적으로 선택되고 있다. 수송선박과 더불어 부수적으로 선박수송에 필요한 선박접안 물량장, 전용부두, 수송용기를 선박에 선적하기 위한 선적 설비가 설치되어야 한다. 그리고 수송용기가 도착되는 저장시설에도 하역부두, 크레인 설비 등이 역시 필요하다.

해상수송의 경우 각 발전소에서 꺼낸 사용후핵연료는 차량으로 부지내의 부두로 옮긴 후 선박을 이용하여 저장시설 부지까지 수송한 후 다시 차량을 이용하여 저장시설 내로 옮긴다. 저장시설이 소내에 있을 경우(AR) 사용후핵연료의 수송은 차량만을 이용한다.

소내 중간 저장의 경우 사용후핵연료의 용기내 장입, 소내 이송, 저장시설내 설치, 저장의 단계만이 필요하나 최종 처분이 아닌 소외 중간 저장의 경우 선적을 위한 시설이 필요하며 선적 및 하역 작업이 추가되며 시설 내에서의 인수인계를 위한 검사 역시 필요하다. 소내 중간 저장의 경우 최종 처분을 위하여 이러한 작업절차가 필요하나 소외 중간 저장의 경우 이러한 절차를 반복해야만 한다. 사용후핵연료 취급 절차의 증가는 작업자 피폭 및 위험도 증가로 이어진다.

#### 나. 사용후핵연료 중간저장기술

사용후핵연료 중간저장 기술은 습식 저장기술과 건식 저장기술로 구분되며, '80년대 중반까지는 실증경험이 풍부한 습식 저장이 주로 채택되었으나, '90년대에 들어서면서 용량 확장과 장기 관리 측면에서 유리한 건식 저장방식을 채택하기 시작하여 독일, 헝가리, 체코, 미국, 영국 등 현재 많은 나라에서 건식 저장시설을 설치하여 운영하고 있다. 고려해야할 측면은 수송, 안전성, 감시 및 방호, 사용후핵연료 조작 등이다.

기술적으로 습식과 건식 방법을 비교하면 대규모 저장용량을 필요로 하지 않은 경우 건식은 습식에 비해 초기 투자비가 적으며 운영에 필요한 기기계통이 단순하고 복잡하지 않아 이에 따른 위험도 역시 작은 장점이 있다. 또한 운영 중 경제성 역시 우수한 장점이 있다. 이러한 이유로 세계 각국의 경우 중간저장 방식으로 건식을 널리 채택하였다.

## 다. 사용후핵연료 수송 물양장 요건

물양장은 사용후핵연료 전용선박이 안전하게 입항 및 선·하역 작업이 가능하도록 항로조건이 양호하게 구비되어야 한다. 선회장 및 접안시설이 적절히 갖춰져 있어야 하며, 항만시설 전면 수심이 양호하고 배후부지 확보 및 도로시설 확보가 용이해야 한다. 앞서 언급한 것처럼 한수원에서는 중·저준위 폐기물 해상수송을 위해 물양장 증축공사를 추진하고 있다. 사용후핵연료 해상수송을 위한 물양장 및 항만시설 요건 구체화는 향후 사용후핵연료 수송계획이 구체화되면 수송선박과 수송용기, 수송 물동량 등과 연계와 함께 각 원전부지 항만시설에 대한 심층 조사 분석이 병행을 통해 진행되어야 한다.

## 라. 크레인 설비

사용후핵연료 선·하적 방식은 크게 LO/LO 방식과 RO/RO 방식이 있다. LO/LO 방식은 부두에 설치된 크레인 및 해상 크레인을 통해 선·하적하며, 수송용기의 중량이 약 130톤이므로 이 정도의 중량을 취급하기 위해서는 해상 크레인 또는 별도의 대형 크레인 설치가 요구된다. 일본의 경우, 그림 15와 같이 Mutsu-Ogawara 항에 150톤 규모의 Wharf crane 이 설치되어 있지만, 국내의 경우 원전 물양장에 100톤 이상의 수송용기를 선·하역할 수 있는 대형 크레인을 설치한 곳은 현재 없는 실정이고, 원전별 사용후핵연료 수송물량이 대형 크레인을 설치할 만큼 충분하지 않는 실정이다. 취급용량 150톤 기준 하버 크레인의 경우, 구매가격은 약 100억원(설치비 제외)에 이르며, 연간운영비도 약 54백만원/년(인건비 제외)에 이르는 것으로 조사되었다. 일본의 wharf crane에 다음과 같은 기술과 시스템이 갖춰져 있다.

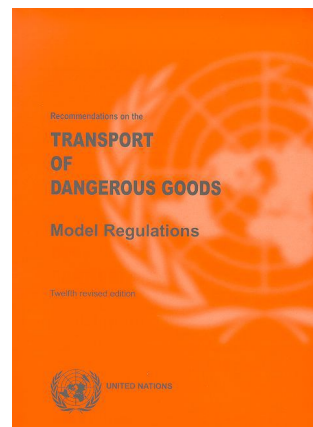
## 4. 국내의 수송관련 법규 및 규정

### 가. 국제 위험물 운반 안전관리 체계

각 국가들의 규제당국이 여러 가지 형태의 위험물 운반 안전성을 확보하기 위하여, UN은 경제사회 전문가 위원회((United Nations Economic and Social Council Committee of Experts; ECOSOC)를 주축으로 위험물 운반에 대한 권고사항을 발간하였다. 전문가 위원회 권고 사항(Recommendations of the committee of Experts)은 ECOSOC 가 1957년 발간한 초판으로부터 보완 발전되어, 오렌지북(Orange Book)으로 잘 알려져 있는 위험물 운반 지침(Recommendations on the Transport of Dangerous Goods)으로 발행되고 있다. UN의 권고사항은 각 회원국의 자국 내 운반뿐만 아니라 국제운반에 대해서 육로, 항공, 철도, 해운 등 모든 형태의 위험물 운반에 대한 안전규정으로 수용되었다. 오렌지북에 포함되는 위험물은 크게 9가지로 구분되고 있으며, 방사성물질은 'Class 7'로 구분되었다.

#### [UN의 위험물 운반지침에 따른 위험물 구분]

- Class 1: 폭발물(Explosives)
- Class 2: 가스류(Gases)
- Class 3: 인화성액체(Flammable Liquids)
- Class 4: 가연성고체, 자연 발화성 물질, 물과 반응시 위험한 물질
- Class 5: 산화성 물질, 유기과산화물  
(Oxidizing Substances & Organic Peroxides)
- Class 6: 유독성물질(Toxic & Infectious Substances)
- Class 7: 방사성 물질(Radioactive Materials)**
  - 제7급은 운송품내의 방사능 농도와 총 방사능량이 기본 방사성 핵종에 대한 값을 초과하는 방사성 핵종이 함유되어 있는 물질을 말한다. 기본 방사성 핵종에 대한 값은 IMDG Code 제2.7.7.2.1항~제2.7.7.2.6항에 명시되어 있음.
- Class 8: 부식성 물질(Corrosive Substances)
- Class 9: 기타 위험물질(Miscellaneous Dangerous Substances & Articles)



#### 나. IAEA 운반규정



IAEA 운반 규정은 각 회원국의 관계당국이 수립하고 운영하여야 하는 법과 제도, 승인 등의 행정행위 등에 관한 사항으로부터 방사선 안전을 위한 상세한 규정, 각종 운반물 및 운반용기의 설계 및 제작에 필요한 성능기준, 시험요건 등 기술적인 세부사항들을 포괄적으로 다루고 있다. IAEA 운반규정은 크게 8개의 Section으로 구성되어 있으며, 각 Section별 기술내용은 다음과 같다.

- **Section I (Introduction)**

- 규정의 배경, 목적, 적용범위 및 구성 기술

- **Section II (Definitions)**

- 총 48개의 기술적 용어에 대한 정의 기술

- **Section III (General Provisions)**

- 방사성방어, 비상대응, 품질보증, 정준수보증, 규정 미준수, 특별조치, 교육에 관한 규정 기술

- **Section IV (Activity Limits and Material Restrictitons)**

- 운반할 방사성물질의 방사능 제한치 및 물질 제한값 기술. 기본 방사선핵종값 등

IAEA Safety Standards  
for protecting people and the environment

Regulations for the  
Safe Transport of  
Radioactive Material  
2009 Edition

Safety Requirements  
No. TS-R-1



- **Section V (Requirements and Controls for Transport)**

- 방사성물질 운반물을 준비하고 운반하는데 필요한 각종 기술기준 규정

- . 최초 및 매 운반시 운반전 요건, 오염 및 누설 운반물에 대한 규정, 각 운반물 종류별 적용되는 기술기준, 방사선준위, 운반관련 서류의 준비, 표시 및 표지, 운반절차, 운반수단별 추가요건

- **Section VI (Requirements for Radioactive Materials and for Packagings and Package)**

- 방사성물질에 대한 요건, 운반물 및 운반용기에 대한 일반요건, 항공운반에 대한 추가 요건, 여러 형태의 운반물 및 운반용기의 설계기준에 관한 사항 기술

- **Section VII (Test Procedure)**

- 운반물의 종류별 설계기준 만족 여부에 확인을 위한 시험요건 기술

- **Section VIII (Approval and Administrative Requirements)**

- 각 국가의 관계당국이 승인하여야 하는 사항 기술

## 다. 해상 운반규정

1965년 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 국제 해상 위험물 규약(International Maritime Dangerous Goods, IMDG Code)을 발표했다. 본 규약은 해상으로 모든 종류의 위험물을 운송하는 것에 관한 것이다. 혼입금지 물질의 격리와 특정한 관련이 있는 포장과 용기 적재와 같은 사항들을 다룬다. 방사성물질에 관한 조항들은 IAEA 규정에 근거한다. IMDG Code는 해상운송 도중 방사성물질의 취급과 운송 종사자들에게 지침을 규정한다.

1993년에 IMO도 IAEA 규정을 보완하기 위해 선내적재 플라스크에 담긴 방사선이 조사된 핵연료, 플루토늄과 고준위 방사성폐기물의 안전한 운송에 관한 규약(The Code for the Safe Carriage of Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High-Level Radioactive Wastes In Flasks on Board Ships, INF Code)을 제정했다. 비록 포장설계가 일차적인 안전조치로 남았지만, 본 규약은 방사성물질을 운송하는 선박의 설계에 관한 권고사항을 도입했다. 이들 보완 조항들은 손상 이후의 안전성, 화재 방지 및 구조적 저항력과 같은 사안들을 다룬다. 2001년 1월에 INF Code는 강제사항이 되었으며, 선내 적재 포장된 조사 핵연료, 플루토늄과 고준위 방사성폐기물의 안전한 운송에 관한 국제규약(International Code for the Safe Carriage of Packaged Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High-Level Radioactive Wastes on Board Ships, INF Code)으로 IMO가 요청한대로 재검토 및 개정 되었다.

## 라. INF 선박 규정

선박구조, 장비, 인력배치 및 운용의 모든 측면은 자국 및 국제 규정에 따라야 한다. 자국 내 법률은 해상 인명안전에 관한 국제협약(the International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS), 선박의 오염방지에 관한 국제협약(the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL) 및 국제 해상 위험물 규약(the International Maritime Dangerous Goods Code, IMDG Code)을 포함하여 IMO내에서 합의된 많은 협약들과 규정들로부터 제정된다. 이들 규정들은 모든 종류의 선박들에 적용되며, 선박설계 및 운용의 각 측면을 총괄적으로 다룬다. 그리고 INF Code는 방사성 화물을 운반하는 선박에 대해 더 엄격한 규정을 부과한다.

결과적으로, INF 선박은 INF, IMDG, MARPOL 및 SOLAS의 요구조건들을 만족해야 한다.

표 8. INF 선박 등급

선박등급	기준
Class INF 1 Ship	4,000TBq 이하의 전체 방사능을 갖는 물질 운송에 인증된 선박
Class INF 2 Ship	$2 \times 10^6$ TBq 이하의 전체 방사능을 갖는 방사성핵연료 또는 고준위 방사성폐기물 운송에 인증된 선박 및 $2 \times 10^5$ TBq 이하의 전체 방사능을 갖는 플루토늄 운송에 인증된 선박
Class INF 3 Ship	물질의 전체 방사능에 제한 없이 방사성 핵연료 또는 고준위 방사성폐기물 운송에 인증된 선박 및 플루토늄 운송에 인증된 선박

#### 마. SOLAS 협약

SOLAS(개정된 SOLAS 74)는 선박의 안전한 운용에 대한 표준을 정하며, 세부 분류, 안전성, 기계류, 전기설치, 화재 안전 요구조건, 구명, 무선 통신, 항해 안전 및 위험물 운송을 다룬다. 손상 안정성, 방화, 화물 공간의 온도 조절, 구조적 고려사항들, 화물 안전 조치, 전기 공급, 방사능 보호 장비 및 관리, 교육 및 선상 비상계

획에 관련된 부가적인 요구조건들이 있다. IMDG Code 조항은 또한 포장재에 적절한 표식과 라벨부착 지정 및 선박 구조에 포장재 고정을 위한 필요조건에 적용된다.

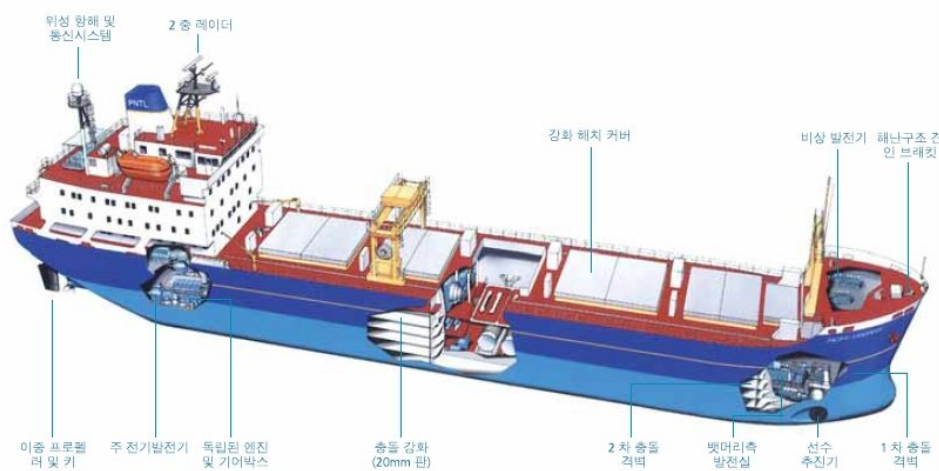


그림 13. INF 3급 선박의 안전 특징들

MARPOL은 선박에 의한 오염으로부터 해양환경을 보호하고, 위험물 혹은 오염물의 손실 혹은 손실을 포함하는 발생가능한 모든 사고를 가장 가까운 해안 국가에 보고할 것을 요구한다. 선박 안전에 대한 모든 심각한 위협 또한 이 규정 하에서 보고되도록 하는 것이다. 국제 규정은 방사성 물질 운반에 사용되는 포장에만 단독으로 적용된다. 이들 규약들과 규정들은 지속적으로 재검토 된다.

#### 마. 항공 운반규정

국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)는 모든 측면의 국제적 민간항공에 책임이 있다. 국제 민간 항공에 관한 1944협약(1944 Convention on International Civil Aviation)에 부가 조건을 개발하여 표준과 권고 관례를 발전시킨 것이다. 1981년 ICAO는 위험물질의 항공운송을 다루는 부속서 18(Annex 18)을 채용했고, 추가로 이러한 운송에 관한 요구조건을 상술한 기술적

지침 체계(A Set of Technical Instructions, TI)를 발표했다. TI는 IAEA 규정에 완전히 일치하는 포장, 표식, 라벨부착 및 문서화에 대한 요구조건은 물론 위험제품 목록을 포함한다.

표 9. 방사성물질 운송에 대한 국제 안전규정

운송방식	국제기구	규정명/합의서명/규약명	현행버전	범위
전체	IAEA	• 방사성물질의 안전 운송을 위한 규정, TS-R-1	TS-R-1; 2009년판	전세계
전체	UN	• 위험제품 운송에 관한 권고안	2007년판 (15번째 개정판)	전세계
해상	IMO	• 국제해상 위험제품 규약 (IMDG Code) • 선내 포장된 조사된 핵연료, 플루토늄과 고준위 방사성 폐기물의 안전운송에 관한 국제규약(INF Code)	2000년 판	전세계
항공	ICAO IATA	• 위험제품의 안전한 항공운송에 관한 기술적 지침(TI) • 위험제품규정(DGR)	2007-2008 년 판 2008년판	전세계

## 사. 국내 수송관련 법규 및 규정

### 1) 원자력법<sup>5)</sup>

우리나라는 2001년 1월 원자력법 개정을 통하여 IAEA 운반규정 1996년도 판을 적용한 바가 있다. 원자력법에서는 방사성물질의 운반안전관리를 위하여 운반신고,

5) 방사성물질 운반안전관리에 대한 고찰, 이복형, 2008.8.14, 과학기술법연구 제14집 제1호

포장 및 운반에 관한 기술기준, 피폭관리등, 사고의 조치등, 포장 및 운반 검사, 운반용기의 설계승인, 운반용기의 검사 등의 규정을 두고 있다.

하위 규정으로서 원자력법시행령과 원자력법시행규칙을 통하여 원자력법에서 규정한 사항들에 대한 세부 요건 및 행정절차 등을 규정하고 있으며, IAEA 운반 규정에서 정하고 있는 기술적인 사항들은 방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙과 교육과학기술부고시 제 2008-89호(방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 고시)에 규정되어 있다.

방사성물질 운반에 관한 원자력법의 조문에 대한 요약은 다음과 같다.

- 제86조(운반신고)
  - ① 방사성물질의 국내 사업소의 운반에 대한 신고
  - ② 방사성물질을 적재한 외국 선박·항공기의 입항 또는 경우에 대한 신고
- 제87조(포장 및 운반에 관한 기술기준)
- 제88조(피폭관리등)
  - 운반관계 작업자에 대한 교육 및 피폭여부 확인
- 제89조 (사고의 조치 등)
  - ① 방사성물질등의 포장 및 운반 관련 비상대응계획 수립
  - ② 방사성물질등의 포장 또는 운반중 사고 발생시 보고에 관한 사항
- 제90조 (포장 및 운반검사)
- 제90조의2 (운반용기의 설계승인)
- 제90조의3 (검사)

## 2) 원자력법시행령

방사성물질의 운반에 관하여 원자력법시행령은 운반신고(제235조), 외국선반등의 운반신고(제236조), 포장 및 운반검사(제237조), 운반용기의 설계승인(제239조의2), 운반용기의 검사(제239조의3), 운반용기의 검사면제(제239조의4)등 6개 조문으로써 원자력법에서 정하고 있는 사항의 절차와 요건을 규정하고 있다.

1982년 9월 제정당시 원자력법시행령에는 방사성물질 운반과 관련한 행정절차 요

건과 함께 세부 기술기준이 수록되어 있었다. 1999년 8월 개정을 통하여 기술기준에 관한 사항은 2000년 4월 과학기술부령 제17호로 제정된 방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙에 이관되면서 지금의 모습을 갖추게 되었다.

당시 원자력법시행령과 원자력법시행규칙에 수록되었던 대부분의 상세한 기술기준들이 새롭게 제정된 방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙과 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙(과학기술령 제16호)으로 이관되었다.

### 3) 원자력법시행규칙

원자력법시행규칙은 주로 각종 행정절차, 제출서류, 서식 등에 관한 사항을 기술하고 있다.

방사성물질의 운반에 관하여 기술된 사항으로는 운반신고의 범위 및 방법, 비상대응계획 작성방법, 포장 및 운반검사의 수행 대상 및 방법, 운반용기 설계승인의 대상, 설계승인 신청서류 작성 방법, 운반용기 검사 관련 서류 작성 등에 관한 사항을 수록하고 있다.

### 4) 교육과학기술부 고시

방사성물질의 포장 및 운반에 관하여 2건의 고시가 시행중에 있다. 교육과학기술부고시 제2009-37호(방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 고시)에서는 원자력법, 원자력법시행령, 원자력법시행규칙, 방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙에서 반영하지 못한 IAEA 운반 규정의 세부내용이 반영되어 있다.

아울러, 교육과학기술부고시 제 2009-37호(방사성물질 운반용기의 제작 검사 및 사용검사에 관한 규정고시)에서는 원자력법 제90조3의 규정에 따라 방사성물질 운반용기의 검사에 관한 세부사항을 규정하고 있다.

방사성물질 수송선박과 관련된 법규는 교육과학기술부고시 제2009-37호(중·저준위 방사성폐기물 운송선박의 방사선안전관리 등에 관한 기술기준 고시), 국토해양부고시 제2009-574호(방사성물질 운송선박의 안전기준) 등이 있다.

## 제3장 방사선 영향 평가코드 기초자료

### 제1절 방사선 영향평가 코드분석

#### 1. RADTRAN 코드

##### 가. RADTRAN 코드 개요

- 방사성 물질의 이송 중 리스크를 계산하는 프로그램

##### 나. RADTRAN 코드 역사

###### 1) RADTRAN 1

- RADTRAN 1은 NUREG-0170에 따라 개발
- 항공기와 다른 것들에 의한 방사성물질의 이동에 대한 EIS (USNRC, 1977)
- Sandia National Laboratories에 의해 개발

###### 2) RADTRAN 3

- RADTRAN 3은 DOE가 투자하고, 사용자가 SNL(1986) 이상으로 사용 가능하도록 완성
- TRANSNET gateway를 경유하는 SNL 서버에서 실행
- 다이얼 호출로 telnet을 통해 원격 접속 가능

###### 3) RADTRAN 4

- RADTRAN 4(1992)의 메뉴 체계는 많이 증가된 사용자 정의 입력 및 특정 경



로 개발을 허용

- RADTRAN는 현재 대부분의 DOE와 NRC의 환경 평가 및 충격 해석에 사용

#### 4) RADTRAN 5 (1998)

- 새로운 정지 모델 도입
- 85%의 사용자 정의 입력과 15%의 사용자 선택을 허용
- 2001년 : 안전 고려는 접근을 곤란하게 만드는 secure shell의 경유를 요구
- 2003년 : Sandia National Labs 이 저작권 소유
- 2004년 : RADTRAN 5는 그래픽 사용자 인터페이스(GUI) 입력 파일을 생성하는 RADCAT과 함께 다운로드 가능.

#### 5) RADTRAN 5.5 (to be launched FY05)

- 매우 기능적인 대기 분산 모델 (from RISKIND)
- 확장된 방사성 핵종 라이브러리 (150 nuclides)

#### 6) RADTRAN 6

- RADTRAN 5.5의 모든 것 포함
- 모형 보호 기능 제거
- 경제 모델 추가
- 중대 그룹 위험과 RMEI에 대해 강조
- 교차 섭취 선량 계산 방법

## 다. 파트별 기본인자

Package	Radionuclide	Vehicle	Link	Stop	Handling	Accident
Long Dim (m) 수송용기 길이	Select Radionuclide 핵종선택	Number of Shipments 수송수단 개수	Length 이동거리	Min Distance 정차시 화물에서 피폭대상자 최소거리	Number of Handlers 선 하적 작업인원	Probability 사고시나리오별 발생 비율
Dose Rate 표면으로부터 1m 선량	Phy/Chem Gr. 물리적/화학적 그룹화	Vehicle Size 용기최대크기	Speed 이동 중 속도	Max Distance 정차시 화물에서 피폭대상자 최대거리	Distance 화물에서 작업자거리	Deposition Velocity 사고 발생 시 핵종 방출속도
Gamma Fraction	Curies 방사능	Vehicle Dose Rate 1m 간격 피폭선량	Population Density 인구밀도	People or People/km2 정체구역 피폭대상자 수	Time 선 하적 소요시간	Release 시나리오 핵종특성별 핵종 방출 비율
Neutron Fraction		Gamma Fraction	Vehicle Density 차량밀도	Shielding Factor 차폐 계수 (1= no shielding)		Aerosol 시나리오 에어로솔 형태로 발생비율
		Neutron Fraction	Persons per Vehicle 차량탑승인원수	Time 정차시간		Respirable 에어로솔 형태로 방출된 핵종이 흡입 될 비율
		Crew Size 승무원 수	Accident Rate 사고 발생률			Isopleth P
		Crew Distance 표면에서 가장 가까운 승무원의 거리	Fatalities per Accident 사고 발생당 사망자 수			Weather 특수한 조건 외 기본 값 사용
		Crew Shielding Factor 차폐계수 (1= no shielding)	Zone 지역특성 (도심, 시골 등)			
		Crew View 화물 최대직경	Type 도로종류 (주도로, 부도로)			
		Exclusive Use 사용용도 폐기물전용수단일 경우 yes	Farm Fraction 농지 비율			

## 2. MACCS2 코드

### 가. MACCS2 코드의 개요

1982년 미국의 샌디아국립연구소(Sandia National Laboratory ; SNL)에서는 기존의 CRAC 전산코드의 기상자료 샘플링방법 및 비상대응모델을 개정 보완한 CRAC 2 전산코드를 개발하였다. 그러나 샌디아 부지연구 등의 다양한 응용분야에 CRAC 2를 활용함에 있어서 전산코드 모델 내 변수선택이나 민감도 분석 시 충분한 변수의 유연성을 제공하지 못하는 문제가 발생되었으며, 응용분야에 따른 CRAC 2의 FORTRAN 원시코드의 수정과 이에 따른 다양한 버전의 소프트웨어의 유지 및 관리의 필요성 때문에 품질보증 측면에서 추가비용 및 어려움이 발생하였다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 MACCS(MELCOR Accident Consequence Code System) 전산코드를 개발하게 되었다.

MACCS 전산코드는 데이터베이스 작성을 유연하게 할 수 있고 모듈화된 입력 자료를 사용하여 부지특성계산, 민감도 및 불확실성의 평가와 새로운 현상모델을 용이하게 결합할 수 있도록 만들어졌다. MACCS 전산코드에서 고려하는 현상모델은 대기이동, 장단기 사고 완화 조치, 피폭경로, 결정론적 및 확률론적 건강영향 및 경제적비용 등이다. MACCS(Ver. 1.4)는 NUREG-1150의 리스크 평가시 활용되었고, 이후 SNL에서는 이를 개정하여 PC에서 사용할 수 있는 MACCS 1.5.11.1 판을 개발하였다.

MACCS 전산코드는 사고 시 원전으로부터 유출되는 방사성핵종에 의한 영향을 평가하기 위하여 개발되었으므로 고려하는 방사성핵종의 수가 제한적이었다. 이를 보완하고 원전뿐만 아니라 비원전 시설물에 대한 잠재적인 리스크평가에 적용하기 위하여 미국 NRC 및 DOE(Department of Energy)의 재정적인 지원과 BNL(Brook Heaven National Lab), INEL(IDAHO National Engineering Laboratory), LANL(Los Alamos National Laboratory), ORNL(Oak Ridge National Lab), RFP(Rocky Flat Plant) 등의 기술적인 지원 하에 대폭적인 개정이 이루어져 MACCS II 전산코드가 개발되었고, 뉴멕시코대학의 베타-테스트 팀의 수계산을 통해 독립적인 검증작업이 완료된 전산코드이다.

MACCS II 전산코드로 고려할 수 있는 현상은 다음과 같다.

- 대기이동
- 선량예측에 의한 완화수단
- 음식과 물의 섭취경로에 따른 선량축적
- 급성 및 지발성 건강영향
- 경제적 비용

#### 나. MACCS II 전산코드의 입출력 자료

MACCS II 전산코드의 수행을 위해서는 다음과 같은 입력 자료를 필요로 한다.

- 핵종들의 사고시의 초기량
- 사고에 의해 생성되는 방사선원항 관련 자료로서, 방사능운 수, 방출 방사능운의 열 함량, 시간, 간격 및 고도, 비상대응 시까지의 시간, 각 방사능운 단편 내에 존재하는 각 핵종그룹의 분율
- 시간별 풍속, 대기 안정도, 부근 기상대 측정 강수량과 같은 부지기상 특성자료.
- 주변의 인구밀도에 관한 자료로 분포자료는 약 80km (50mile) 까지의 반경에 대해 16개의 각 방향 구역에 대한 인구조사를 기본으로 작성됨.
- 비상대응에 대한 가정들에 대한 자료, 토지이용에 관한 자료, 작물, 토지, 건물의 가격 등과 같은 경제력에 관한 자료

이러한 입력 자료를 바탕으로 MACCS II 전산코드에서 계산되는 항목들은 다음과 같다.

- 풍하 이동거리, 사고에 의해 대기에 방출된 핵종들의 확산 및 침적
- 직접(방사성운 피폭, 방사능운 흡입, 지표피폭, 재부유 흡입) 또는 간접경로(섭취)에 따른 단기 및 장기피폭
- 방어행동에 의한 피폭저감

## 다. 선량평가

MACCS II 전산코드의 선량평가 모델은 3가지 과정으로 구성된다.

- 사용자에게 의해 주어진 시간동안의 피폭경로 모델에 대한 방사성물질에 의한 개인피폭
- 방어수단에 의한 피폭의 감소
- 방어수단에 의해 발생한 실제 피폭선량 계산

MACCS II 전산코드는 각 경로에 대해 경로피폭을 저감시키는 수단에 의해 각 피폭의 값이 저감되도록 모델링 한다.

### 1) 선량저감

MACCS II 전산코드는 사고 후의 시간대를 비상, 중간, 장기의 3개의 단계로 구분한다. 약 7일 동안의 시간간격을 가지는 비상단계 동안 선량은 소개, 대피, 일시이주 등의 방법에 의해 저감된다. 중간단계 동안 피폭은 일시이주에 의해 감소되며, 토양제염이 수행된다. 장기단계 동안 비상주 자산의 제염, 상주자산에 대한 금지, 몰수, 작물폐기, 오염토지에 대한 경작금지 등에 대해 선량완화가 일어난다.

MACCS II 전산코드에서는 인구의 이주는 일정준위의 선량기준을 초과하는 선량을 피폭할 때 발생한다. 일시이주와는 달리 소개 및 대피는 피폭된 선량에 무관하게 특정지역에서 발생한다. 경고 이후의 연기기간 이후, 부지조건을 반영하여 선정된 풍하방향으로 소개가 이루어진다. 소개지역 외부의 풍하방향에서의 소개자들도 미래의 피폭을 피하기 위해 소개를 시작한다. MACCS II 전산코드의 대피모델 역시 경고와 대피지연시간이 존재한다고 가정한다. 일단 대피가 시작되면 사람들은 대피소에서 일정 대피기간 동안 더 이상의 피폭을 피하기 위해 잔류하게 된다.

MACCS II 전산코드는 사고 후 장기단계의 시작시점에서 복구수단이 행하여지지 않았을 경우 대중에게 피폭되는 선량을 사용자에게 의해 지정된 PAG와 비교한다. EPA (Environmental Protection Agency)의 거주조건으로 지정된 기준은 사고 후 최초 1년간 0.02 Sv 이하, 이후 연간 0.05 Sv 이하이며, 이는 MACCS II 전산코드에서 5년간 0.4 Sv 이상일 때 이주를 시행하는 것과 동일하다. 만약, 장기선량기

준을 만족하지 못할 때 MACCS II 전산코드는 기준충족을 위해 다음과 같은 계산을 수행한다.

- 제염을 통한 기준충족
- 제염을 통해 기준을 만족시키지 못할 때, 제염 후 풍화와 방사능붕괴에 의한 핵종감소를 위한 일정기간의 금지

## 2) 피폭경로

MACCS II 전산코드에서는 모두 7개의 피폭경로가 고려된다.

- 이동하는 방사능운에 의한 피폭(Cloudshine)
- 지표에 침적된 물질에 의한 피폭(Groundshine)
- 피부에 침적된 물질에 의한 피폭(Skin deposition)
- 이동하는 방사능운의 흡입에 의한 피폭(Cloud inhalation)
- 자연, 기계적 과정에 의해 지표에 침적된 물질의 재 부유 물질의 호흡에 의한 피폭(resuspension inhalation)
- 오염된 작물의 섭취(food ingestion)
- 오염된 식수의 섭취(water ingestion)

섭취에 의한 피폭은 비상단계의 모델에서는 고려하지 않는다. ②와 ⑤의 과정에 의한 피폭만이 중간단계에서 고려된다. ②, ⑤, ⑥ 및 ⑦의 과정들이 장기단계에서의 피폭에서 고려된다. ⑥과 ⑦에 의한 피폭은 계산되는 공간격자 이외의 이주에 대해서도 피폭을 유발시킨다. 방사능운 피폭은 무한크기의 방사능운에 의한 피폭과 유한크기의 방사능운에 의한 피폭을 대응하는 수정인자(correction factor)를 이용하여 계산된다. 피부피폭은 건식침적과 입자에 의한 피폭으로 모델링 된다. 섭취선량은 오염된 물과 음식의 섭취에 의해 발생한다. 식수경로는 오염된 물의 일정부분이 사람에게 의해 섭취된다고 가정한다. 물의 순환은 고려되지 않으며, 즉 바다는 방사능의 영구 소멸원으로 설정된다. 섭취선량은 오염된 우유, 육류, 작물의 섭취에 의해서도 발생한다. 작물은 여러 가지로 분류된다. MACCS II 전산코드의 기본 입력파일에는 작물을 7가지로 분류한다(목초, 저장목초, 곡물, 엽채류, 종자, 구

근, 기타). 표층간 작물의 표면에서 식생부분, 수확중의 유실, 우유나 육류에의 혼합, 처리, 저장, 가공중인 육류, 우유, 섭취부분 등에서의 잔류 등 방사능 물질의 이동인자(transfer factor)를 이용하여 고려된다.

### 3) 차폐인자

MACCS II 전산코드는 사람들을 3개의 그룹으로 분류한다.

- 소개자
- 능동적으로 대피하는 사람
- 옥내외, 차량 등에서 일상적인 활동을 하는 사람

소개자의 선량은 운반 차폐인자를 이용하여 계산된다. 능동적으로 대피하는 사람에 대한 차폐인자는 대피자가 출입구를 닫으며 공기순환을 차단하고 실내나 지하로 대피하기 때문에 일상 활동자에 비해 낮은 값을 가진다. 즉, 보다 더 차폐된 값을 가진다. 이러한 차폐인자는 외부 코드들을 이용하여 계산되어지거나 사용자에게 의해 제공되어야 한다.

### 4) 건강영향

건강영향은 특정 장기에 대한 선량으로부터 계산된다. 특정 장기에 대한 선량은 선량환산인자(Dose Conversion Factor)에 의해 계산된다. 조기사상(사고 후 1년 이내에 발생하는)은 비선형 선량-반응 모델을 이용하여 계산한다[24]. 방사선에 의한 건강영향에 대하여 특정장기 I의 손상에 대한 조기 사상율은 위험도 함수(Hazard function)가 이용된다.

라. MACCS II 전산코드의 계산구조 및 해석법

#### 1) 계산구조

MACCS II 전산코드의 계산은 다음의 세 단계로 나눌 수 있다.

- 입력 자료의 처리

- 유효성 검증
- 현상 모델링, 출력자료의 처리.

한편, MACCS II 전산코드에서의 평가는 ATMOS, EARLY, CHRONC의 3가지 모듈로 나누어서 수행된다.

## 2) ATMOS 모듈

ATMOS 모듈에서는 대기중에 방출된 물질의 확산과 침적을 바람 방향에서의 거리에 관한 함수로 계산하게 된다. ATMOS에서 다루는 현상은 건물의 wake 영향, 방사능운의 상승, 이동 중 방사능운의 확산, 건침적과 습침적, 방사성 붕괴이며, 다음과 같은 현상과 계산을 수행하게 된다.

- 기상 조건의 결정
- 방사능운 차원의 초기화
- 방출전의 방사성붕괴 계산
- 방사능운 상승 여부의 결정
- 방사능운 도달시간의 계산
- 습식침적 후 잔류물질의 양 계산
- 방사능운의 확산 계산
- 이동 중 방사성붕괴의 계산
- 방사능운 상승량 결정
- 침적을 무시한 예상 대기확산인자( $x/Q$ )의 계산
- 건식침적 후 잔류물질의 양 계산
- 건식 및 습식침적으로 동시에 유실되는 물질의 양 계산
- 대기 및 지표면에서의 평균농도 계산
- 침적으로 인한 방사능운의 양의 제외
- 제거를 위한 입자크기의 최신화

## 3) EARLY 모듈

EARLY 모듈에서는 비상대응 기간 중의 방사선 피폭으로 인한 건강영향 및 피



폭선량을 계산하며, 다음과 같은 내용을 포함한다.

- 정규분포를 근사하는 막대그래프의 생산
- Cloudshine 교정인자의 계산
- 정지된 상태에서 대피자(sheltering people)와 소개자(evacuee)가 받는 선량평가
- 이주지역에서의 선량평가
- 이동중인 대피자가 받는 선량평가
- 건강영향 위해도의 계산
- 사용자가 요청한 EARLY 결과의 출력

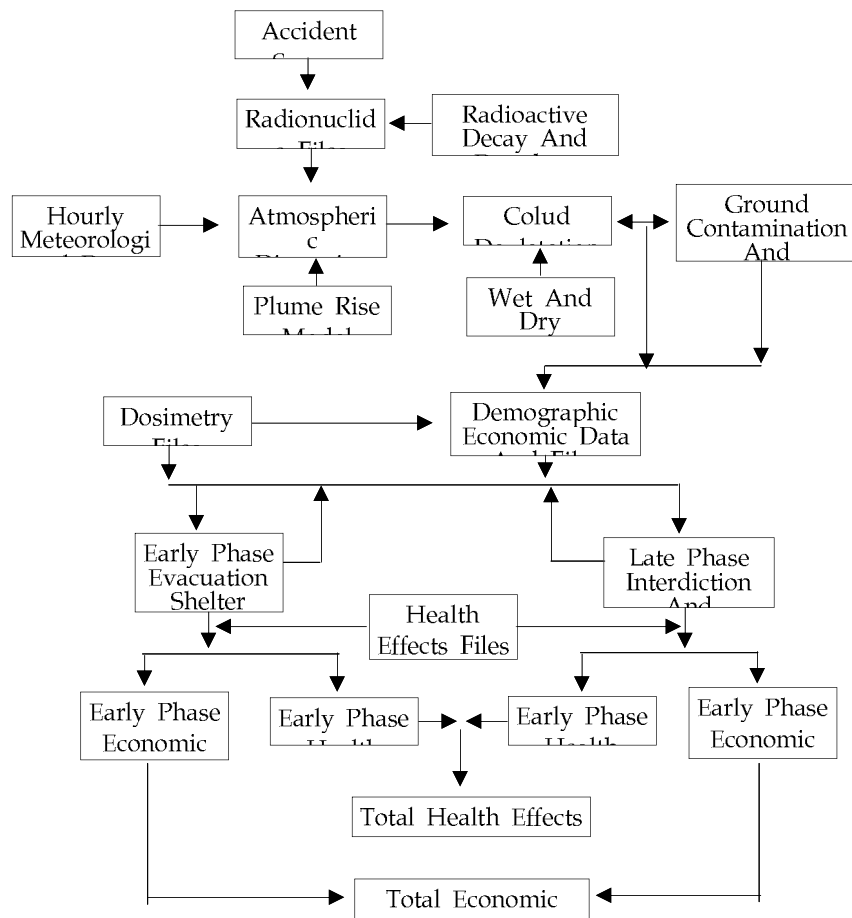


그림 14. MACCS II 전산코드 계산 흐름도

#### 4) CHRONC 모듈

CHRONC 모듈에서는 비상대응 기간 이후에 대하여 영향 평가를 계산하며, 다음과 같은 내용을 포함한다.

- 공간격자에서의 지표농도 계산
- 첫 해의 경작식품 경로의 효율성 결정

- 재이주나 대피로 사람들이 이동한 거리 계산
- 중간단계에서 필요한 조치의 결정
- 중간단계에서 발생한 선량의 결정
- 제염의 효율성과 비용결정
- 선택한 조치의 비용-효율성 결정
- 모든 경로와 조치로 인한 선량과 비용의 합산
- 사용자가 요청한 CHRONC 결과의 출력

#### 마. 계산결과의 해석

중대사고에 따라 선원량의 양이 큰 차이가 있을 수 있으며, 방출이 발생한 때의 기상 조건이 방사선 결말 해석의 중요성 정도에 큰 영향을 끼친다. 예를 들면, 방출시 plume이 바다 쪽으로 빠져나갈 때의 폭우는 건강영향을 감소시킬 수 있으나, 근처의 풍하도시로 방사능운이 이동할 때는 건강영향을 크게 증대시킨다. 방사선 결말 해석이 선원량의 양, 일기, 인구밀도 등에 의해 크게 좌우되기 때문에, 대상 발전소에 대하여 방사선 결말 해석의 확률 및 범위를 묘사하기 위한 중대성 측정(선량, 건강영향, 비용)의 통계적 분포를 만들기 위해서, 방사선 결말 해석의 중대성 평가는 일단의 선원량, 기상연속 및 피폭집단 등에서 가능한 모든 조합을 고려해야 한다.

일반적으로 일기와 인구분포에 따른 중대성의 변화를 나타내는 분포는 각각의 대표적 선원량에 대해 우선적으로 계산된다. 그 후 중대성의 전체적인 평가는, 위의 선원량에 따른 분포의 가중치를 적용시킨 합을 구함으로서 얻어지는데, 여기에서 각각의 분포는 잠재선원의 발생 절대 확률로서 가중치가 구해진다.

주어진 선원량에 대해 MACCS II 전산코드의 결말 분석으로써 발전소 입지에서 기상 조건에 의한 대기 이동을 반영해 주기 위하여 대표 기상자료인 기상연속, j(기상자료들로부터 대상 지역에서의 방사능 확산 특성을 잘 나타낼 수 있고 비교적 긴 시간 동안 지속될 수 있는 대표적인 기상 연속 표본, 보통 150 연속)와 대표적인 풍하 인구분포, k(발전소 사고 지점으로 부터 풍향에 따른 거리별 공간, 보통 16)의 가능한 모든 조합이 만들어지며, 이에 따라 수행되는 각각의 중대성 측정에 대해 대략 2,400개의 결말이 생긴다. 각각의 기상연속 발생확률( $P_{wj}$ )과 각 인구집단에 대한 피폭확률( $P_{pk}$ )이 주어졌으므로 2,400개 결말의 일기와 인구에 따른 평

가인자 값의 확률을 구할 수 있으며, 이를 CCDF (Complementary Cumulative Distribution functions)라 한다.

### 3. 그 외 관련 코드 분석

#### 가. INTERTRAN2

: INTERTRAN2의 입력 인자는 이송 중 방사성폐기물의 위험도를 평가하는 공통된 특성을 가지는 코드인 RADTRAN과 유사한 입력 인자로 구성된다. 다만 대부분의 입력 인자 값이 약어로 설정되어 있다. INTERTRAN2와 RADTRAN이 서로 다른 가장 큰 차이는 운송 수단의 결정이다. RADTRAN의 경우 Highway, Rail, Barge 등 총 3개로 구성되나. INTERTRAN2의 경우 Combination Truck, Rail, Barge, Ocean-going Ship(>3000 gross tons), Cargo-Air, Passenger Air, Passenger Van or Small Truck, Cargo Van/Delivery Truck, Cargo Van/Truck-with Rail, Cargo Van/Delivery-with cargo 등 총 10가지의 운송 수단으로 구분된다. 또한 INTERTRAN2에서는 Ship Size와 Fatalities per Accident는 사용하지 않는다.

- TRANSAT (An Atmospheric Dispersion Model)  
: 대기 확산 모델
- TICLD (Individual Dose Calculation Program)  
: 개인 선량 평가 프로그램
- LHS(Latin Hypercube Sampling Program)

#### 나. RISKIND

RISKIND는 사용후핵연료 또는 트럭이나 기차로 운반시 관계되는 노출에 의한 잠재적인 방사선험적인 결과와 개인과 집단에 대한 health risk를 추정할 때 사용된다.

- 한 번에 한 개의 시나리오 실행
- 사용자 입력 (e.g. 방사핵종 난해)
- LOS 모듈 부재

#### 다. HOTSPOT

HOTSPOT Health Physics 코드는 Health Physics 관계자들에게 방사성 물질을 수반하는 사고를 평가하기 위한 빠르고 field-portable한 계산 도구를 제공하기 위해 만들어졌다. HOTSPOT 코드는 방사성 물질의 대기 중 방출과 관계된 방사선 효과의 1차적 근사다. HOTSPOT 프로그램은 적시의 첫 평가에 대해서 상당히 정확하다.

4개의 일반적인 프로그램 PLUME, EXPLOSION, FIRE, and RESUSPENSION 은 계속되거나 한 번의 방출, 폭발적인 방출, 연료 화재 또는 지역의 오염 사고 등으로 인한 방사성 물질의 방출에 따르는 바람이 불어가는 방향으로의 계산을 한다.

- 폭발에 대한 디자인
- 더 많은 메모리 사용
- 정상상태 모듈 부재
- LOS 모듈 부재

## 제4장 수송관련 가상 시나리오 예비구성

### 제1절 수송관련 기본구성 요소 및 영향인자

#### 1. 수송관련 기본자료

수송방안분석을 위해서는 다양한 구성요소와 영향인자들이 변수로 작용하여 시나리오가 생성되고 비교·평가되어야 한다. 수송관련 대표적인 구성요소로서는 인프라, 프로세스, 시스템 및 물량 등이며, 이에 대한 분석을 통해 영향인자가 도출될 수 있다. 이에 앞서 수송관련 기본 자료가 생산되어야 하며, 이에 대한 가정 및 설정은 다음과 같으며, 수송관련 기본 자료 및 가정에 대해 요약 정리하였다. 향후 수송방안 분석 프로그램에서는 변수 또는 참조 형식으로 적용될 것이다.

#### 가. 대상 원전

우리나라는 현재 고리(4기), 영광(6기), 울진(6기), 월성(4기) 등 4개 사이트에 16기의 경수로와 4기의 중수를 포함한 20기(1,772만KW)의 원전이 가동 중에 있으며, 발전전력량의 36%를 공급하고 있다. 그리고 신고리 4기 및 신 월성 2기가 건설 중에 있고, 신울진 2기가 계획 중에 있다.<sup>6)</sup>

수송방안분석을 위한 대상원전은 과제 내 한수원(주) 발전기술원의 사용후핵연료 DB구축 연구를 수행하고 있는 경수로 16기로 선정하고, 2008년 12월 말 기준의 사용후핵연료 부지별 저장량을 기본 자료로 활용한다.

#### 나. 기준 사용후핵연료 특성

수송대상 사용후핵연료 특성을 나타내는 주요 속성으로는 핵연료 종류, 농축도, 최대 연소도, 냉각기간 등이 있다. 중간저장시설의 단계적 건설방법을 고려하여, 2008년도 12월 말 기준 16기 원전에 저장중인 11,118 다발의 89.5%를 포함하는 농축도

6) IAEA-PRIS(Power Reactor Information System)

4.5w/o 이하, 연소도 45,000 MWD/MTU 이하의 사용후핵연료를 1단계 저장시설의 대상 기준으로 선정하였다.

수송대상 사용후핵연료는 교육과학기술부 고시 제2009-37호 “사용후핵연료 인도 규정”의 7조(냉각)에 의거 특별한 사유가 없는 한 원전에서 최소한 5년 이상의 냉각기간을 거쳐야 한다. 사용후핵연료의 냉각기간이 길수록 수송용기의 중량은 상대적으로 가벼워짐에 따라 취급크레인의 용량, 수송용기당 사용후핵연료의 적재능력 증대를 가져올 수 있으므로, 향후 수송방안분석 프로그램 상에서는 5년 이상의 변수로 설정한다.

#### 다. 중간저장시설 운영 방식

중간저장시설 운영 방식은 중앙집중식과 분산식(원전부지 내, 3개 부지)의 중간저장만 고려하는 것으로 가정하였다. 발전소 인근 부지의 분산저장은 제외하였는데, 중앙집중식 시나리오와 유사한 결과를 보일 것으로 예상되고, 부지선정의 다양성, 수송경로의 복잡성 및 주민수용성 측면에서 제외되었다. 시나리오 수립시 고려사항으로 중앙집중식 중간저장시설의 위치는 임의의 부지로 가정하고, 각 원전 부지에서의 수송비용은 동일하다고 가정하였다. 분산저장의 경우, 부지 확보 가능 여부는 고려하지 않고 각 부지에서의 소내 수송비용은 동일하다고 가정하였다.

#### 라. 중간저장시설 용량 설정

저장방식별 저장용량 설정을 위해 중간저장시설의 수명을 MACSTOR/KN-400의 설계수명에 해당하는 50년으로 가정하였다. 2017년부터 2067년까지 사용후핵연료 발생량 평가를 고려하여 전체 중간저장용량을 약 30,000톤으로 설정하였다. 1단계 중간저장시설용량은 앞서 기술한 사용후핵연료 선정기준에 의거 7,813다발, 약 3,516톤으로 설정하였다. 분산저장방식은 1단계 건설규모를 3개 부지로 균등 배분한다. 따라서 중앙집중시설의 경우, 전체 중간저장 규모는 약 30,000톤, 1단계 건설규모는 여유도를 고려하여 5,000톤으로 설정하고, 분산저장시설의 경우, 전체 규모는 site 당 10,000톤, 1단계 분산저장 규모는 마찬가지로 여유도를 고려하여 site 당

1,500톤으로 설정하였다.

#### 마. 원전 수명 기간

원전 수명기간은 사용후핵연료 물량분석시 발생량에 영향을 미친다. 고리 1호기의 경우, 1978년 4월 사업운전을 시작한 우리나라 최초의 원자력발전소로 2008년 6월 18일 설계수명(30년)이 끝났으나, 10년간 계속운전을 고려하여 40년으로 적용하고, 그 외의 운전은 당초 설계수명인 40년을 적용하였다. 참고로 대상원전은 아니지만, 신고리 3, 4 호기 및 신울진 1, 2 호기 설계수명은 60년이다. 대상원전 현황 및 수명기간을 고려한 종료년도를 표 10에 나타냈다.

표 10. 대상원전 현황 및 설계수명

발전소명	호기	용량(만KW)	사업운전일	설계수명 종료년도
고리	1호기	58.7	1978.04.29	2018
	2호기	65	1983.07.25	2023
	3호기	95	1985.09.30	2025
	4호기	95	1986.04.29	2026
영광	1호기	95	1986.08.25	2026
	2호기	95	1987.06.10	2027
	3호기	100	1995.03.31	2035
	4호기	100	1996.01.01	2035
	5호기	100	2002.05.21	2042
	6호기	100	2002.12.24	2042
울진	1호기	95	1988.09.10	2028
	2호기	95	1989.09.30	2029
	3호기	100	1998.08.11	2038
	4호기	100	1999.12.31	2039
	5호기	100	2004.07.29	2044
	6호기	100	2005.04.22	2045



## 바. 수송개시 및 종료시점

제253차 원자력위원회(2004.12.17)에서 2016년까지는 원전 부지 내 저장용량을 확충하여 각 원전별로 관리하고, 중간 저장 시설 건설들을 포함한 2016년 이후의 사용후핵연료 관리방침에 대해서는 충분한 논의를 거쳐 국민적 공감대하에서 추진하기로 결정한 바 있다. 이러한 의결사항에 근거하여 사용후핵연료 수송은 2017년 이후부터 개시된다고 볼 수 있다.

수송종료시점은 사용자가 가정한 수송대상 사용후핵연료의 최소 냉각기간에 원전 수명 종료년도를 더한 시점을 설정하거나 사용자가 직접 설정할 수 있도록 할 예정이나, 본 단계에서는 1단계 수송 종료시점을 2026년으로 가정하였다.

## 사. 수송방법

사용후핵연료를 원전으로부터 중간저장시설까지 수송하는 방법으로 해상수송은 전용선박을 사용하고, 발전소에서 물양장까지의 육상 수송은 특수차량을 사용하는 것으로 가정하였다.

## 아. 작업특성 구분

사용후핵연료 수송을 위해서는 다양한 작업들이 요구되는데, 작업특성에 따라 주간 작업 및 연속작업으로 다음과 같이 구분한다.

### ○ 주간 작업

- 수송용기 중량물 취급, 장전, 인수인계, 장전 및 반출 관련 검사업무, 육로수송, 수송선박 선·하역 작업 등

### ○ 24시간 작업

- 수송선박 항해, 장전조 충수 및 배수, 장전 수송용기 배수 및 건조 등

이는 수송용기 장전, 해체, 선·하역 시간 산정 및 인건비 계상을 위한 기본 가정으로 활용될 것이다.

#### 자. 기타

연간 수송량은 연간 400톤 규모이며, 수송개시년도 및 기간은 2017년부터 10년간이다. 수송 용기 적재용량은 호기 구분 없이 일정용량으로 24개로 가정하였다. 해체비용은 설계수명(50년) 후 해체되는 것으로 가정하였다.

표 11. 수송관련 기본자료 및 가정

구분	항목		주요 가정	비고
기본자료	대상원전		경수로 16기 원전(고리 1~4호기, 영광 1~6호기, 울진 1~6호기)	
	1단계 사용후핵 연료 기준	최대연소도	45,000MWd/MTU이하	
		최대농축도	4.5 w/o	
		최소 냉각기간	8 년	
	중간저장 시설 운영 방식 및 용량	중간저장방식	중앙집중식	
			분산저장식	
		1단계 물량	7,813 다발(약 3,516톤)	
		연간 수송량	400톤	
		수송기간	10년(2017~2026)	
	중앙집중 식 중간저장 시설	수송 용기 용량	24다발	
		위치	임의의 부지	
		규모	30,000톤	
		1단계 건설규모	5,000톤(여유분 고려)	
		시설 수명	50년	
	원전 수명 기간		40년	
	수송개시년도		2017년	
	수송종료시점		2026년	
	수송방법		해상 수송 : 전용선박 근거리 육상 수송 : 특수차량	
	주간작업		수송용기 중량물 취급, 장전, 인수인계, 장전 및 반출 관련 점사업무, 육로수송, 수송선박 선하역 작업	
	24시간 작업		항해, 장전조 충수 및 배수, 장전 수송용기 배수 및 건조 등 연속작업	

## 2. 수송관련 구성요소별 인자

제조/유통기업의 운송 관련 업무의 비효율성을 극복하고 물류혁신을 이루기 위해서는 가장 먼저 해당 기업의 정확한 수준과 현실을 파악하는 것이 중요하다고 한다. 이를 위해서 크게 4가지 구성요소-인프라, 프로세스, 시스템, 물동량-에서 분석이 이루어져야 한다고 한다<sup>7)</sup>. 사용후핵연료의 특수성(위험도, 중량 등)을 고려한다면 물류혁신을 위한 진단체계를 사용후핵연료 수송방안분석에 충분히 활용할 수 있다고 판단한다. 이에 4가지 측면에서의 구성요소별 인자들을 분석하고 영향인자를 도출하였다.

### 가. 인프라

#### 1) 수송선박

사용후핵연료 수송선박은 전용선박으로 INF-2급 또는 INF-3급 선박이 될 수 있다. 선박등급은 선박 가격, 선박 최대 수송용기 저장량 등에 영향을 끼친다. 수송선박의 적재용량은 연도별 수송물동량, 중간저장시설의 위치, 수송용기의 적재용량, 원전에서의 사용후핵연료 장전 및 반출 시간, 선·하역시간 및 물양장 등을 종합적으로 검토한 후 결정될 수 있다. INF-3급 선박일 경우, 24다발용 수송용기를 최대 20개까지 실을 수 있다. 따라서 본 단계에서는 수송용기 적재량을 10개, 15개, 20개로 가정하였다.

수송선박의 속성으로는 선박척수, 전장, 선폭, 총톤수, 최대 수송용기 저장량, 승무원 수, 최대 속도, 항해속력, 연속운행거리, 항속거리 등이 있다. 또한 적재 및 하역 방식에 따라 Ro/Ro 방식과 Lo/Lo 방식이 있다. 이 방식의 설정에 따라 크레인과 같은 부대설비 여부가 좌우된다. 이러한 속성들은 DB 개념설계에서의 ERD(Entity Relationship Diagram)상에서 명확해 질 수 있다. 비용평가항목으로서 수송선박의 건조 및 운영비, 유지보수, 선박안전법상의 선박검사비용 등이 있다.

---

7) LG CNS Entru Consulting Partners의 물류혁신 동향(trends)과 사례-제조/유통기업의 수배송 혁신

## 2) 수송차량

수송용기의 수송차량의 속성으로는 각 원전별 차량 소요수량, 수송차량단가 등이 있고, 관련인자로는 수송용기의 중량, 수송선박의 선적/하역 방식 등이 있다. 기본적으로 각 발전소에 2대(예비용 1대 포함)씩, 중간저장시설에 2대로 총 8대가 필요한 것으로 가정하였다.

## 3) 선·하역장비

선·하역 장비로는 대형크레인과 대형지게차가 있다. 수송선박의 선·하역 방식에 따라 좌우되는데, 항만 물량장에 대형 크레인이 설치하여 수송용기를 선적 및 하역하는 Lo/Lo 방식에 필요하다. 속성으로는 각 원전별 크레인 및 대형지게차 소요 수량, 단가 등이 있다. 국내의 경우, 원전의 물량장에 100톤 이상의 수송용기를 선·하역 할 수 있는 대형 크레인은 어느 곳에도 없는 실정이다. 비용평가를 위한 항목으로는 초기 투자비, 운영비(유지보수 및 인건비 등) 등이 있다.

## 4) 수송용기

수송용기의 주요 속성은 위험도분석에서 상세히 다루게 되는데, 수송방안분석에서의 주요 속성으로는 수송용기당 사용후핵연료의 적재용량이다. 현 단계에서는 사용후핵연료 다발을 24개 적재하는 것으로 가정하였다.

## 5) 중간저장시설의 부지 위치

중간저장시설의 부지위치는 교육과학기술부 고시 제2009-37호(2009. 9. 23) “사용후핵연료 중간저장시설의 위치에 관한 기술기준”에 근거한 기준으로 크게 내륙부지와 임해부지로 나눌 수 있다. 개념평가분야에서는 중간저장시설의 위치를 “임의의 부지”로 가정하였다. 향후 수송방안분석에서는 GIS 시스템과 연동되어 임의의 부지를 선택하여 그에 따른 경로, 소요시간, 주변 인구 밀도 등이 자동 계산될 예정이다. 또한 남해안의 경우, 섬들과 주변 양식장, 동해안이나 서해안에 비해 인구밀집지역

과의 인접성으로 인해 배제하였다.

따라서, 본 과제에서는 다음과 같이 2가지 중간저장시설의 부지위치를 잠정 결정하여 예비시나리오를 구성하였다.

○ 1안 : 고리 인근지역

○ 2안 : 영광 이북지역

#### 나. 수송 물량

사용후핵연료 수송물량은 각 원전의 저장량, 누적 발생량, 연간 발생량, 저장용량, 저장용량 확장 계획, 원전 호기별 수명 종료 년도, 총 사용후핵연료 추정 발생량, 연간 수송량, 수송기간, 수송용기개수 등에 영향을 받는다. 연간 400톤 규모로 10년간 1단계 수송하는 것으로 가정하였다.

2009년 6월말 기준으로 국내 원전에서 발생한 경수로 사용후핵연료는 11,399다발(4,718 MTU)이다. 경수로 사용후핵연료는 전량 저장수조에 저장되어 있으며 2008년 12월말의 사용후핵연료를 기준으로 한다.

사용후핵연료 임시저장시설의 저장용량은 원자력 발전이 지속되면서 포화되기 시작하였는데, 운영자인 한국수력원자력(주)은 저장능력을 확충하기 위하여 조밀 저장대 교체·설치, 원전 호기간 이송 저장 및 건식저장시설 추가 건설 등의 방법을 사용하고 있다. 경수로 사용후핵연료의 경우 저장수조의 저장용량을 늘리는 방법과 원전 호기별 저장수조 공유 등의 방법으로 발생하는 사용후핵연료를 모두 소내 수조에 습식저장하고 있다. 국내에서 중간저장을 위해서 2008년 12월말 기준으로 대상원전별 사용후핵연료 저장용량 확장 현황을 나타냈고, 2016년까지 저장용량 확장계획을 반영하였다.

표 12. 대상원전별 사용후핵연료 저장량 (2008년 12월 말 기준)

발전소	저장량(다발)	저장용량(다발)	비고
고리 1	360	562	WH 14X14
고리 2	716	920	WH 16X16
고리 3	1,792	2,260	WH 14, 16, 17
고리 4	1,364	2,262	WH, 14,16, 17
<b>소계</b>	<b>4,232</b>	<b>6,004</b>	<b>70.5% 포화</b>
영광 1	1,093	2,262	WH 17X17
영광 2	917	1,152	WH 17X17
영광 3	664	1,302	CE 16X16
영광 4	616	1,302	CE 16X16
영광 5	315	700	CE 16X16
영광 6	312	700	CE 16X16
<b>소계</b>	<b>3,917</b>	<b>7,418</b>	<b>52.8% 포화</b>
울진 1	800	1,119	WH 17X17
울진 2	788	1,067	WH 17X17
울진 3	564	1,498	CE 16X16, 17X17
울진 4	540	1,498	CE 16X16, 17X17
울진 5	184	700	CE 16X16
울진 6	188	700	CE 16X16
<b>소계</b>	<b>3,064</b>	<b>6,582</b>	<b>46.6 % 포화</b>

표 13. 사용후핵연료 저장용량 확장 이력 (2008년 12월 말 기준)

확장시기	대상호기	확장내용	확장용량		비고
			다발	MTU	
1990	울진 2호기	조밀저장대 교체	421	178	
1995	울진 1호기	조밀저장대 교체	642	271	
1993	고리 3호기	조밀저장대 추가	447	188	빈 공간 추가설치
1995	울진 2호기	1영역 교체	18	8	
1996	고리 4호기	조밀저장대 추가	406	171	빈 공간 추가설치
1997	영광 1호기	조밀저장대 추가	406	171	빈 공간 추가설치
1997	영광 2호기	조밀저장대 추가	406	171	빈 공간 추가설치
2002	고리 3호기	조밀저장대 교체	1,067	451	
2005	울진 2호기	조밀저장대 교체	187	79	
2006	고리 4호기	조밀저장대 교체	1,110	468	
2006	영광 3호기	조밀저장대 교체	624	261	
2006	영광 4호기	조밀저장대 교체	624	261	
2007	영광 1호기	조밀저장대 교체	1,109	468	
2008	울진 3호기	조밀저장대 교체	820	337.84	
2008	울진 4호기	조밀저장대 교체	820	337.84	

표 14. 사용후핵연료 저장용량 확장계획

구분	저장용량		확장내용	확장 시기	확장 후 저장용량	
	다발	MTU			다발	MTU
영광5	700	288.4	조밀저장대 추가	2012년	1,174	483.7
영광6	700	288.4	조밀저장대 추가		1,174	483.7
영광2	1,152	494.2	조밀저장대 추가	2012년	2,262	970.4



표 15. 확장 후 원전본부별 사용후핵연료 저장용량(단위:다발)

구분	사용후핵연료 저장용량 현황		
	저장용량	저장량	저장가능년도
고리	6,004	4,248	2016
영광	8,537	3,956	2016
울진	7,530	3,187	2017

#### 다. 프로세스

##### 1) 수송용기 장전/반출 시간 및 작업조 편성

본 과제상의 공통 전제에 의거 중간저장방식의 수납방식은 건식수납으로 가정하였다. 또한 건식저장방식 평가를 위해 수평저장 모듈 방식, 콘크리트 저장방식, 금속 저장용기를 평가대상으로 선정하였다.

사용후핵연료의 장전과 반출을 위해 원전에서 수행하는 작업은 수송용기 인수, 연료장전준비, 연료장전, 수송준비, 수송용기의 선적/수송, 수송용기 인수인계작업 등이 되풀이 된다. 작업 소요시간은 작업자의 숙련도, 일일 작업시간, 검사, 작업설비, 수송 물동량 등에 영향을 받는다.

작업조 편성은 KN-12를 이용한 고리 소내 수송의 경우, 현장/수송 작업 관리를 위해 현장총괄 및 관리 책임자를 1명씩, 방사선 안전 관리조 1명, 품질 관리조 1명, 작업조 6명(작업조장1, 크레인운전원1, 연료장전원1, 적재하역원 1, 수송용기제염원 2)으로 구성하였다. 이 인원을 통해 1회 수송의 실제 소요작업일수는 KN-12용기의 경우 5일이 소요되었다. 24다발의 수송용기의 경우에는 약 15~30시간이 더 추가될 것으로 예상된다. 또한 일련의 작업들은 주간에만 수행되므로 물양장까지의 소내 수송을 포함하여 약 7일이 소요된다고 가정하였다.

##### 2) 해상수송 경로 및 소요시간

중간저장시설의 부지위치에 따라 각 원전부지와 개략적인 해상수송 거리 및 운항 소요시간을 표 16에 나타냈다. 운항 소요시간은 수송선박의 평균 운항 속도 12Knot (22.2km/h)로 가정하여 산출하였다. 해상 거리는 국립해양조사원에서 제공하는 해상거리 프로그램을 사용하였다.

표 16. 중간저장시설 부지위치별 해상수송 시간

중간저장시설 부지	원전	운항거리(소요시간)	가정	비고
1안	울진	약 75km (약 4시간)	1일	
	고리	약 265km(약 12시간)	1일	
	영광	약 1,140km(약 52시간)	3일	
2안	울진	약 1,220 km(약 55시간)	3일	
	고리	약 905km(약 41시간)	2일	
	영광	약 75km(약 4시간)	1일	

### 3) 수송용기 선적/하역 시간

사용후핵연료를 해상수송하기 위해서는 원전 또는 중간저장시설의 물양장에서 수송 선박에 적재 수송용기를 선적 또는 하역을 해야만 한다. 본 과제에서는 각 물양장에서 수송용기의 선적 및 하역작업은 인수인계 및 검사작업을 포함하여 약 2일이 소요된다고 가정하였다.

### 4) 항해일수

수송 선박의 연간 최대 항해일수는 기후, 유지보수 등을 고려하여 최대 이용률을 50%로 가정하여 180일로 가정하였다.

### 5) 연간작업일수

연간작업일수 계산은 휴일, 기후상황, 선박점검 등을 고려하여 180일로 가정하다.

## 라. 시스템

### 1) 수송 비용평가 프로그램

사용후핵연료 수송 비용평가는 주로 초기투자비와 장비운영비와 인건비를 포함한 연간운영비를 산정하여 시나리오별로 비교 평가해오고 있다. 초기투자비로는 인프라 분야에서 분류한 수송용기, 운반차량, 수송 부대 장비 등의 소요 수량 및 단가, 물양장 및 항만시설항목에서의 크레인 초기투자비와 연간운영비, 수송선박의 선가, 감리비, 금융비용 등, 수송용기 유지보수 시설 등이 있다.

연간운영비로는 인프라에서 언급한 장비들의 운영비와 수송선박 및 수송용기의 연간유지보수 비용이 있다. 현 단계에서는 이러한 항목들은 좀 더 세분화하고, 그 가격 및 비용은 사용자가 입력하도록 한다.

### 3. 수송관련 영향인자 도출

사용후핵연료 수송에 영향을 미치는 구성요소별 인자들을 도출하고, 주요 결정(가정)사항을 표 17에 나타내었다.

표 17. 사용후핵연료 수송에 영향을 미치는 구성요소별 인자

구성요소	항목		주요 가정/결정사항	비고		
인프라	중간저장시설	중간저장방식		중앙집중식		
				분산저장식		
		위치	고리 인근지역			
					영광 이북지역	
		저장방식		건식저장		
		저장용량	중앙집중식	30,000톤		
			분산저장식	10,000톤/site		
	중앙집중식 시설수명		50년			
	수송선박	전용선박		INF-2급		
				INF-3급		
		제원	전장			
			선폭			
			총톤수			
			최대 수송용기 적재량			
			승무원 수			
			최대 속력			
			항해 속력			
			연속운항			
			항속거리			
		적재 및 하역방식		Ro/Ro 방식		
				Lo/Lo 방식		
	수송차량	방식		전용차량		
		소요수량		부지별 2대 중간저장시설 2대		
	선하역 장비	종류		크레인		
		취급크레인용량		113톤		
	수송용기	적재용량		24다발		

구성 요소	항목		주요 가정/결정사항	비고
물량	수송대상사용후핵연료기준		최대 연소도	
			농축도	
			최소 냉각기간	
	1단계 물량		전체물량	
			연간수송량	
			수송기간	
	수송개시년도		2017년	
	수송 종료년도		원전수명기간 + 사용후핵연료냉각기간 이내	
	대상원전		경수로 16기 원전(고리 1~4호기, 영광 1~6호기, 울진 1~6호기)	
	원전 수명 기간		40년	
프로세스	수송방법		해상 수송 : 전용선박 근거리 : 특수차량	
	수송작업구 분	주간작업	수송용기 중량물 취급, 장전, 인수인계, 장전 및 반출 관련 검사업무, 육로수송, 수송선박 선하역 작업	
		연속작업	항해	
	작업시간	연간작업일수	180일	
		수송용기장전/반출	7일	
		수송용기 수납/지장	7일	
		선하역 시간	2일	
		수송선박 최대 항해일수	180일	
	선박항해시 간	울진이북	울진	약 75km (약 4시간)
			고리	약 265km(약 12시간)
			영광	약 1,140km(약 52시간)
		영광이북	울진	약 1,220 km(약 55시간)
			고리	약 905km(약 41시간)
			영광	약 75km(약 4시간)

구성 요소	항목		주요 가정/결정사항	비고
시스템	비용평가항목	초기투자비	수송용기 소요 수량 및 단가	
			운반 차량 소요 수량 및 단가	
			수송부대장비	
			물양장 및 항만시설	
			수송선박	
			수송용기 유지보수 시설	
		연간운영비	장비운영비	
			인건비	
	수송선박    연간 운영비 상세	인건비	선원	
			안전관리자	
			육상관리직원	
		선박경비	수리비	
			부속품	
			일반선용품	
			보험료	
			제세공과금	
			치적 유지비	
			기타 선박 경비	
		운항비	선박 입출항비	
			운항연료비	
			경상연료비	
			운항유회유비	
			경상유회유비	
			하역비	
	인건비 항목		장전작업 등급별 소요인원	
			인수인계작업 등급별 소요인원	
			등급별 일노임 단가	
			연봉	
			소요비용	
			도로수송 등급별 소요인원	

표 18. 사용후핵연료 소요인력구성(안)

내용		소요인력
장전작업/포장작업	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수송용기 장작작업 6명/조 × 2개조 = 12명</li> <li>- 운반용기 포장작업 3명(지게차 운전수 포함)</li> </ul>	15명/부지
인수/인계(발전소)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 용기 인수/인계</li> <li>- Health Physics</li> <li>- 물량장 운영/관리</li> </ul>	2명/부지
차량	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수송용기 수송차량 운전 2명/조 × 4개 지역 = 8명</li> </ul>	8명
수송부대장비	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 처분장 항만 대형지게차 1명</li> <li>- 육로수송 경호 및 안내 2명/조 × 4개 지역 = 8명</li> </ul>	9명
항만운영(중간저장시설)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 처분장 항만 운영관리</li> <li>- Health Physics</li> </ul>	2명
수송선박	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 선장</li> <li>- 항해사</li> <li>- 기관장</li> <li>- 통신사</li> <li>- Health Physics</li> <li>- 선원 14명(7명/조×2개조)</li> </ul>	20명
용기 유지/보수 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수송용기 유지보수 시설 10명</li> </ul>	10명

## 제 2 절 가상 수송시나리오 구성

### 1. 가상 수송시나리오 기본사항

#### 가. 수송 경로 생성 및 수송 스케줄 수립 고려사항

상기 6개 시나리오 대한 수송경로 및 스케줄 구성은 다음과 같은 전제사항 및 고려사항을 반영한다.

- 수송루트는 해상수송과 육상수송으로 나뉜다. 해상수송시스템은 운반용기, 운반차량, 취급장비, 전용운송선박 및 항만시설 등으로 구성된다. 원전 저장고에서 원전 물량장까지는 전용차량을 이용하여 육상으로 운반하며, 원전물량장에서 중간저장시설 물량장까지는 전용운송선박을 이용하여 해상으로 운반한다. 중간저장시설까지는 전용운반차량을 이용하여 육상으로 운반한다.
- 시간의 단위는 일(day)로 하고, 연간 수송물량을 만족하는 수송선박 최대 항해일수 및 연간 작업일수를 고려 1년 365일 동안의 수송경로 생성 및 수송 스케줄을 수립한다.
- 일자별 수송선박의 출발지, 목적지에 대한 두 가지 변수를 구분한다.
- 일자별 수송선박에 적재된 수송용기의 개수 파악한다.
- 각 원전부지에서 사용후핵연료 장전이 완료되는 시점 및 중간저장시설에서 장전된 수송용기의 수납/저장 작업이 완료되는 시점을 다음 수송 스케줄 수립에 활용한다.
- 각 원전 및 중간저장시설의 작업현황이 표시되어야 한다.



- 중간저장시설과 각 원전부지 사이의 항해경로 생성시 왕복운항을 기본적으로 고려한다.
- 각 원전에서 장전작업이 완료되는 시점에 맞춰 수송선박이 출항한다.
- 한 원전부지에서 장전된 수송용기 일부를 선적하고, 다른 원전부지에 들러 나머지 장전된 수송용기를 선적하는 것은 배제한다.
- 빈 수송용기를 중간저장시설로부터 어떤 부지로 옮긴 다음 바로 중간저장 시설로 회귀하지 않고, 다른 부지에 들러 미리 적재된 수송용기를 선적하여 수송하는 것은 허용한다.
- 빈 수송용기를 중간저장시설로부터 한 원전부지에 일부 하역한 후 다른 원전부지에 일부 하역하는 것은 허용한다.

#### 나. 연간 수송물량 산정 고려 사항

연간수송물량 산정은 다음과 요구사항을 전제사항을 고려하여 반영한다.

- 사용후핵연료 발생저장량은 2008년 12월 말 기준으로 한다.
- 중앙집중시설의 경우, 전체 중간저장 규모는 약 30,000톤으로 1단계 수송물량은 5,000톤으로 한다.
- 1단계 수송 개시 및 종료시점을 2017년 ~ 2026년으로 가정한다.
- 연간수송물량은 2008년 12월 말 기준 각 원전별 저장량(표 1 참조)에 1단계 수송기간인 10년을 나눈 값 연간 수송량으로 한다. 표 11에 발전소별 연간 수송량을 나타냈다. 연간 수송 물량을 24다발 수송용기로 환산하면 고리=18, 영광=17, 울진=13이 된다. 이 자료는 수송 선박의 최대 적재량 대비 각 원전별 방문 횟수를 결정할 수 있다.

표 19. 발전소별 연간 수송량

구분	고리 발전소	영광 발전소	울진 발전소	비고
다발	423	391	306	1,120
수송용기 (24다발)	18	17	13	

## 2. 가상 수송시나리오 도출

앞의 표 8에 나타낸 바와 같이 수송시나리오 영향을 미치는 주요 인자들을 검토한 결과, 구성요소 중 인프라분야의 중간저장시설 위치, 수송선박의 최대 적재용량 및 운용 수송용기의 수량으로 나타났다.

본 논문에서는 중간저장시설위치는 영광 이북지역, 고리 인근지역으로 고려하였고, 수송선박의 적재량은 15, 20, 25개로 고려하였다, 현재 국내 원전에서 취급되는 크레인의 용량을 해결한다고 가정하고 21다발과 24다발의 수송용기 개발을 고려하였다. 위 변수인자를 바탕으로 실제 시나리오는 각각의 항목에 따라 다양한 시나리오가 생성될 수 있다. <표 20>과 같이 영향인자에 대한 총 12개의 시나리오를 하나씩 생성하였다. 영광 이북지역으로 부지를 선정했을 경우 상대적으로 수송 시간이 늘어남에 따른 해상 수송운항 관련 안전성에 영향을 미친다. 그러나 타 지역에 비해 인구 밀도에 따른 주민집단선량등 안전성 측면과 크레인의 용량을 고려한 <표 20>의 6번 안을 기본 시나리오로 설정하였다.

표 20. 3가지 변수에 따른 가상시나리오 도출(12가지)

no.	중간저장시설	선박 적재용량	수송용기 적재용량	비 고
1	영광이북지역	15개	21다발	
2	영광이북지역	20개	21다발	
3	영광이북지역	25개	21다발	
4	영광이북지역	15개	24다발	
5	영광이북지역	20개	24다발	
6	영광이북지역	25개	24다발	
7	고리인근지역	15개	21다발	
8	고리인근지역	20개	21다발	
9	고리인근지역	25개	21다발	
10	고리인근지역	15개	24다발	
11	고리인근지역	20개	24다발	
12	고리인근지역	25개	24다발	

표 20은 3가지 변수를 고려한 시나리오3의 주요 항목을 나타내었다. 위 가상시나리오 항목 외 원전의 적재 및 반출계통, 수송 용기 및 선박, 부두의 선적 및 하역계통, 중간저장시설의 수납 및 저장계통, 부대설비로 구성되고, 수송시나리오는 수송물량, 수송경로, 수송 용기 및 선박의 적재용량, 작업소요시간 등이 있다.

표 21. 변수를 고려한 가상시나리오 항목(시나리오 6)

주항목	보조항목	가상 결정항목
저장시설	중간저장방식	소외중앙집중식
	중간저장위치	영광이북지역
	저장방법	건식
	저장용량	30,000MTU
수송선박	전용선박	INF-3급
	적재및하역방식	Lo/Lo방식
	적재용량	수송용기 25개
	수송방식	건식 수송
수송용기	적재용량	수송·저장(24다발)
물량	1단계물량 (2009.06 기준)	11.391다발 (고리,영광,울진)
항해시간 (22km/hr)	영광 이북지역 (서해 임해부지)	울진: 약 1,220km
		고리: 약 905km
		영광: 약 75km

## 제5장 가상 시나리오 해상수송 위험도 평가

### 제1절 RADTRAN 주요 입력값

#### 1) Select a vehicle mode

: 해상수송을 평가하기 위하여 Barge를 선택하였다.

#### 2) Package

- Name : KN-24 (24다발 국내 수송용기 개발을 가정)
- Long Dim : 4.81m (수송용기 최대 길이)  
국내 사용후핵연료 수송용기인 KN-12 제원을 보수적으로 적용
- Dose Rate : 국내 방사성 물질 운반 규제의 최대 기준치인  
1미터 거리에서의 10 mrem/hr를 적용
- Gamma and Neutron Fraction : 중저준위 폐기물 수송의 자료를  
근거하여 사고시 중성자는 방출 되지 않는다고 가정

#### 3) Radionuclide

: 실제 원자력발전소에서 저장되어 있는 사용후핵연료 핵종 DB를  
근거하여 주요 핵종을 적용

#### 4) Vehicle

- Name : 국내 최초 방사성물질(사용후핵연료 포함) 수송선박인  
“한진 청정 누리호” 제원을 입력
- Number of Shipments : 수송선박은 1대로 가정
- Vehicle Size : 36m  
운송 선박 내 화물 또는 용기의 적재량 최대 크기
- Vehicle Dose Rate : 국내 방사성 물질 운반 규제의 최대 기준치  
1미터 거리에서의 10 mrem/hr를 적용

- Gamma and Neutron Fraction  
: 중저준위 폐기물 수송의 자료를 근거하여 사고시 중성자는 방출 되지 않는다고 가정
- Crew Size : 20명  
"한진 청정누리호" 수송선박 탑승수(안전관리자 포함)
- Crew Distance : 5.8m  
: 수송용기의 표면에서 가장 가까운 승무원까지의 거리
- Crew Shielding Factor : 0.5  
: 실제 차폐 계수를 측정하기 어려움으로 보수적으로 50% 가정
- Crew View : 4.81m (수송용기 최대 길이)  
국내 사용후핵연료 수송용기인 KN-12 제원을 보수적으로 적용
- Exclusive Use  
: 폐기물 전용 운송 수단일 경우 YES

#### 6) LINK

- Length : 905km  
고리원자력발전소에서 서해임해부지의 해상수송을 가정
- Speed : 22km/hr  
"한진 청정누리호"의 속도를 적용
- Population Density : 1명  
선박의 평균 간격(1km)을 가정하여 보수적으로 1을 적용
- Vehicle Density : 해당 경로의 운송수단 밀도  
사용후핵연료의 안전한 수송을 위해 보수적으로 1을 적용
- Persons per Vehicle : 20명  
해당 경로의 수송선박 탑승 인원수
- Accident :  $8.30 \times 10^{-6}$  accident/veh-km  
2005년부터 2008년까지 해양사고횟수를 고려하여 계산하여 적용
- Fatalities per Accident :  $3.05 \times 10^{-2}$ 명  
Sandia National Lab에서 제시한 보고서 자료 적용
- Zone : Suburban(도심 외부)

- Type : other

해상운반시 other 적용

- Farm Fraction : 50%

도심외부 설정으로 인한 보수적인 값 적용

## 7) STOPS

: 중저준위 폐기물 운반 자료를 바탕으로 보수적인 값 적용

- Name : 정차 구역의 이름

- Vehicle : 해당 정차 구역에 정차하는 차량의 종류

- Min Distance : 정차시 화물에서 피폭대상자까지의 최소 거리

- Max Distance : 정차시 화물에서 피폭대상자까지의 최대 거리

- People or People/km2 : 정차 구역에서 피폭 대상자의 수

(최소 거리와 최대 거리가 같을 시는 단순한 대상자 수로 계산,  
최소 거리와 최대 거리가 다를 시는 해당 구역의 피폭 대상자  
밀도)

- Shielding Factor : 차폐 계수 (1=no shielding, 0=100% shielding)

- Time : 정차 시간

## 8) HANDLING

: 중저준위 폐기물 운반 자료를 바탕으로 보수적인 값 적용

- Name : 선하적 구역 이름

- Vehicle : 선하적하는 운송 수단 종류

- Number of Handlers : 선하적 작업 인원

- Distance : 방사성 화물에서 작업자까지의 평균 거리

- Time : 선하적 소요 시간

## 9) ACCIDENTS(측정의 어려움으로 보수적 가정값 및 조사값 인용)

: 사고 시나리오별 발생 빈도 및 시나리오별 핵종 방출 특성값 설정

- Probability Fraction and Index : 시나리오 설정(선박파손, 화재)

사고 시나리오별 발생 비율

- Deposition Velocity : 사고 발생시 핵종의 방출 속도  
실제 핵종의 방출 속도를 측정하기 어려움으로 보수적으로 가정
- Release Fraction : 시나리오별 핵종이 방출 될 비율
- Aerosol Fraction : 시나리오별 핵종이 에어로졸 형태로 방출될 비율
- Respirable Fraction : 에어로졸로 방출된 핵종을 흡입하게 될 비율

## 10) PARAMETERS

: 상기의 각 파트 입력 자료 외 입력값. RADTRAN에서 Parameter 값은 일반적인 조건에서 기존에 구축된 자료를 통해 default 값을 설정해 놓았다.

## 제2절 RADTRAN을 이용한 위험도 평가 분석

### 1. 충격에 의한 선박 파손의 경우 평가 결과

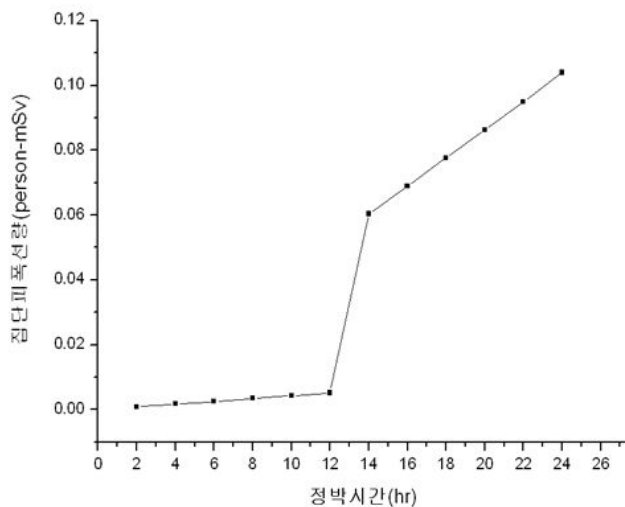


그림 15. 정박시간에 따른 집단피폭선량

- 가상의 수송시나리오를 설정한 후 RADTRAN을 이용하여 사고시 충격에 의한



선박파손의 경우를 평가한 결과 정박시간에 따른 집단피폭선량이 증가함을 볼 수 있다.

- 집단피폭선량 값이 12시간 부근에서 갑자기 증가하게 된 원인은 프로그램의 오류는 아닌 것으로 판단되어 문턱 선량값에서 피폭되는 값이 큰 폭으로 증가한 것으로 평가하였다.

- 향후, 정박시간의 세분화된 집단피폭선량값을 계산하여, 정확하고, 세분화된 피폭선량 값을 도출해 낼 수 있을 것으로 평가 하였다.

## 2. 충돌에 의해 화재가 발생하는 경우 평가 결과

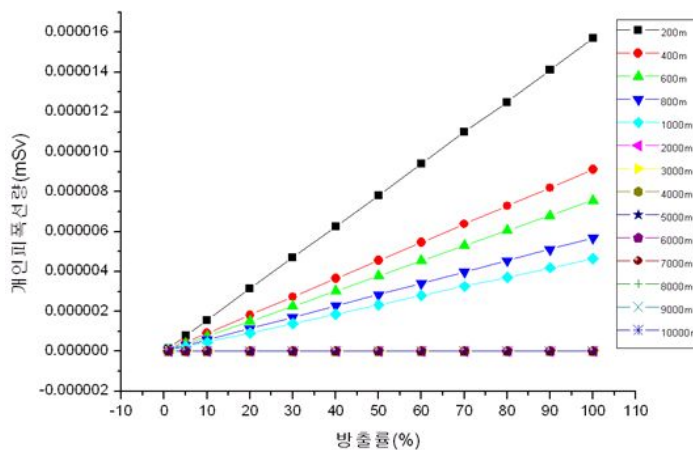


그림 16. 방출률과 거리에 따른 개인 피폭선량

- 충돌에 의해 화재가 발생하는 경우 핵종의 100% 누출을 보수적으로 가정하였으며 방출률에 따른 개인 피폭선량값을 나타내었다.

- 평가결과, 방출률에 따라 거리에 따른 개인 피폭선량 값이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

- 그래프와 같이 가까운 거리에서는 개인피폭선량이 많음을 알 수 있으며, 이는 방사선 특성 중 피폭량은 거리제곱에 반비례한다는 역자승 법칙을 확인할 수 있다.

## 제6장 결론

사용후핵연료의 소외수송은 안전성에 대한 대국민 신뢰도를 확보하여야 할 뿐만 아니라, 기술성, 안전성, 경제성을 고려한 최적의 수송방안 수립이 필수적이다. 이를 위하여, 원전에서 발생하는 사용후핵연료를 중간저장시설까지 효율적으로 수송하기 위한 시스템 분석을 위해 국내외 사용후핵연료 소외수송현황을 파악하였다. 또한 사용후핵연료의 안전한 소외수송을 위해서는 정부, 지자체 및 관련 기관들 간의 사전 협의를 통해 운반 방법, 운반 경로를 결정하고 정상 및 비상사태를 대비한 대응절차 및 체계를 준비해야만 하며, 국내외 법규 및 규정을 준수해야만 한다. 이를 위해 국제 핵물질 운반에 대한 규정 및 국내외 법규 분석을 수행하였다.

수송시나리오는 수송물량, 수송경로, 수송 용기 및 선박의 적재용량, 작업소요시간 등에 큰 영향을 받는다. 따라서 수송시스템과 수송시나리오는 상호 연계성이 있으므로 수송시스템을 구축하고 수송시나리오를 전산 모사하여 경제성 및 기술성 등을 종합적으로 분석한 후 적용 가능 시나리오별 수송시스템을 구축해야만 한다.

수송관련 영향인자는 구성요소 중 인프라분야의 수송선박 최대 수송용기 적재량, 중간저장시설 위치, 수송용기 운용수량으로 나타났으며, 중간저장시설이 고리 인근 지역과 영광 이북지역에 위치한다고 가정하고, 각 부지에 대한 수송선박의 최대 적재용량을 15개, 20개, 25개로 가정하였으며 수송용기 21다발, 24다발의 개발을 가정하여 12개의 시나리오를 도출하였다.

도출된 시나리오 중 하나의 시나리오를 선택하여 미국에서 DOE 주관 하에 개발한 RADTRAN 5.5 코드를 사용하여 작업자 및 승무원, 인근 거주자에 대한 피폭선량을 평가하였다. 평가를 수행하기 위한 기본적인 코드 입력 자료는 고리-영광이북 지역 간 해상 운반경로에 맞추어 결정하였으며, 특정 값은 미국의 NUREG-0170, RADCAT 메뉴얼에서 제시하는 값을 사용하였다. 모든 입력 인자를 결정하는데 있어서 가장 중요한 것은 현실에 가장 근접한 값을 설정하는 것이나 본 논문에서는 자료 수집상의 오차를 최소화하기 위하여 모든 입력 자료를 상당히 보수적으로 설

정하여 평가하였다.

입력자료를 바탕으로 계산한 결과, 정박중 선박 승무원의 개인피폭선량, 정박중 거주자 피폭선량, 사고시 개인피폭선량의 값이 일반인에 대한 연간 피폭선량제한치( $1\text{mSv/yr}$ ) 및 연간 자연선량률( $2.4\text{mSv/yr}$ )보다 극히 낮은 것으로 평가되었다.

향후 오차의 최소화를 위한 방법으로 국내 실정에 가장 근접한 값을 설정하고 RADTRAN의 주요 입력인자를 변수로 지정하여 민감도 분석을 수행할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] 제3차 사용후핵연료 관리 및 방사성폐기물 관리 안전 공동협약에 대한 국가보고서, 2008.10 교육과학기술부
- [2] IAEA, "Status and Trends in Spent Fuel Reprocessing", IAEA-TECDOC-1467, 2005
- [3] DOE National Transportation Program, Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste Transportation
- [4] NUREC-0725 Rev.14 "Public Information Circular for shipments of Irradiated Reactor Fuel"
- [5] 미국 NRC 홈페이지, <http://www.nrc.gov>.
- [6] 원전 물량장 증축 공사 입찰 공고
- [7] 박기철, "국내 사용후핵연료 관리 현황 및 전망", 원자력산업, 2008.8 p.27
- [8] 방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙, 교육과학기술부령 제24호, 2008.12.3112월
- [9] SKB, Plan 2003. Costs for management of the radioactive waste products from nuclear power production, TR-03-11 (2003)
- [10] IAEA Safety Standards Series, Regulations for the Safe, Transport of Radioactive Material, TS-R-2, 2005.
- [11] RADTRAN 5 Technical Manual, SAND2000-1256, 2000
- [12] 원자력 이용시설 주변 방사선 환경 조사 및 평가 보고서, KINS/AR-40, 2008
- [13] Jeremy L. Sprung, Data and Methods for the Assessment of the Risks Associated with the Maritime Transport of Radioactive Materials Results of the SeaRAM Program Studies Volume 1, Sandia National Laboratory Report, SAND98-1171/1(1998)
- [14] Radcat 2.3 User Guide, SAND2006-6315, 2007.
- [15] 방사성폐기물 수송사업, 한국원자력연구소 부설 원자력환경관리센터, KAERI - NEMAC / Pr - 33/94

## 감사의 글

학부생 시절, 실험실에서 공부를 하고 싶다며 무작정 연구실 문을 두드렸던 때가 생각이 납니다. 추운 겨울 실험실을 들어와 지난 4년간의 연구실 생활을 돌이켜 한편의 논문으로 대신하기엔 아쉬움이 많이 남지만, 배움의 터였던 핵주기공학 실험실에서 대학원 생활을 잘 마무리 할 수 있게 되어서 무엇보다 뜻 깊게 생각하고, 이 논문이 완성되기까지 저를 도와주시고 지도해 주신 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 부족한 제가 대학원에 진학하기로 결심 했을 때 연구와 강의로 바쁘신 가운데도 실험실 생활을 할 수 있도록 자상하게 인도해 주시고 연구방향에 대하여 넓은 안목으로 키워주시며 지도해주신 송종순 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드리며, 논문심사를 하면서 많은 조언을 해주신 나만균 교수님, 김진원교수님께도 정말 진심으로 감사드립니다.

또한, 학부때부터 대학원생활까지 열정적으로 가르침을 주신 김승평교수님, 정운관 교수님, 이경진 교수님, 이심교교수님, 신원기교수님, 이기복교수님께 깊은 감사를 드립니다.

입학에서부터 논문이 완성되기 까지 2년이란 배움의 여정이 힘들지 않고 즐거울 수 있게 함께해온 대학원 동기 정현이형, 용진이형, 성한이형, 강일이형에게 고마움을 전합니다. 각자의 분야에서 건승하시길 진심으로 기원 합니다.

각자 실험실에서 대학원 생활을 같이 해오며 도와주신 유선이형, 정민이형, 현영이형, 인호형, 동혁이형, 희망이형에게 깊은 감사를 드립니다. 또한 학부때부터 지내온 웅이형, 영만이형, 평규, 재환, 영규, 민수, 동수, 민서, 윤화, 수민, 민영, 사용,

경준, 주현, 영국, 현민이에게 감사의 마음을 전합니다. 이외에 미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너무나 많습니다.

학교 외 많은 도움을 주셨던 (주)에네시스 한병섭박사님, 이재민박사님, 전종선 차장님, 신상원팀장님, 이수홍팀장님, 김진환과장님, 박상규 과장님, 연화누나, 진호, 정희, 민경 외 많은 여러분께 감사의 마음을 전합니다. 특히, 진심으로 대해주시고, 업무 외적으로 많은 도움을 주신 팀장님들께 다시 한번 감사의 마음을 전합니다.

끝으로, 지금까지 변함없는 믿음과 사랑으로 저를 응원 해주신 사랑하는 부모님과 우리형, 친지 가족 분들께 감사의 마음을 전합니다. 또한 곁에서 항상 믿어주며 옆에 있어준 여자친구와 항상 챙겨주신 여자친구 가족들에게 감사를 드립니다.

학교생활 외 도움을 주었고 바쁘다는 여러 가지 이유로 소홀히 했던 친구들 희재, 석철, 윤권, 현덕, 명구, 규현, 으뜸, 현식, 찬용, 지노, 보경 등에게 고맙고 지금처럼 늘 변함없이 지내도록 하자.

모든 분들의 이름을 되새기지 못함을 죄송하게 생각하며, 사회 어느 곳에서 무엇을 하던, 인생의 선배배로서 그리고 친구로서 많은 관심과 애정을 가지고 저를 지켜 봐주셨던 모든 분들께 부끄럽지 않은 모습으로 훗날 다시 뵈 수 있도록 어디서든 최선을 다하겠습니다.

## 저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20097288	과 정	석사
성 명	한글 : 이상헌    한문 : 李相憲    영문 : LEE SANG HEON				
주 소	광주광역시 북구 용봉동 696-20				
연락처	e-mail : leesanghoen@naver.com				
논문제목	한글 PWR 사용후핵연료 해상수송시 가상 시나리오 위험도 평가				
	영문 A Risk Evaluation of Virtual Scenario for PWR Spent Fuel on Sea Transportation				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다                      음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함(다만, 저작물의 내용변경은 금지함)
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함

동의여부 : 동의(0)    반대( )

2010년    12월

저작자 :    이상헌    (인)

**조선대학교 총장 귀하**