

**월성발전소의 사용후연료 이송에 대한 안전조치 효율화 방안**  
**Towards More Efficient Safeguards Approach of Transfer Campaign in Wolsong**  
**CANDU Reactor**

박승기, 나원우, 박완수, 정상태, 박수진

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

**요 약**

월성원자력발전소의 특성에 따라 습식저장조에서 건식저장조로 사용후연료 이송 캠페인이 매년 약 2개월 동안 수행되고 있다. 현재 이송캠페인이 월성1호기에 수행되고 있으나, 2006년까지 월성발전소 4기에 대한 이송캠페인이 수행될 것으로 예측되고 있다. 이에 따라 소요되는 검사량도 급격히 늘어나 국내 전 검사량의 50% 이상을 차지할 것으로 보인다.

IAEA와 TCNC는 이송캠페인에 대해 여러 해의 검사경험을 축적하고, 이의 효율적인 접근 방안을 모색해 왔다. 안전조치 사찰목표를 달성하기 위한 검증 활동으로 인해 때때로 시설운영자의 이송작업에 지연을 초래하였다. 이러한 작업 지연은 격납/감시 장치, NDA와 RDT의 최적 적용으로 최소화될 수 있다. 이 논문은 이러한 장치의 효율적인 조합과 사용후연료 이송캠페인 동안 COK를 유지하기 위한 새로운 접근 개념을 제시하는데 있다.

**Abstract**

Due to the unique character of the CANDU reactor, a transfer campaign has been carried out every year for 2 months or so in Wolsong unit 1. It is expected to require performance of the transfer campaign for 4 units of Wolsong site in 2006 and more than 50% of the ROK safeguards inspection efforts. The IAEA and TCNC have gained several years of experience in safeguards approach during transfer campaign. Occasionally the deterrence and interference of operator transfer work have been occurred in order to attain safeguards inspection goal. These could be minimized using optimum C/S applications, NDA and RDT techniques. This paper shows the interrelationship and combinations of these resources and proposes new safeguards approach to maintain the continuity of knowledge from fuel loading in the spent fuel pond to the point of canister loading and closure during transfer campaign.

*The views expressed are those of authors and not of the TCNC.*

## 1. 서론

월성원자력 발전소는 가동중 핵연료를 교체하는 CANDU 원자로의 고유한 특성에 따라 안전조치 측면에서 관심의 대상이 되어왔다. 현재 가동중인 월성 원전에서는 호기당 매일 2-3채널(16-24다발)의 신연료가 노심으로 장전되고 동시에 노심으로부터 동일한 양의 사용후연료가 discharge bay로 방출되고 있다. 이러한 특성에 따라 많은 양의 사용후연료가 정상가동 중에 습식저장조인 사용후연료조에 저장되고 있다. 월성원전의 사용후연료 습식저장조는 약 10년 동안 방출되는 사용후연료를 저장할 수 있는 용량으로 설계되어 있다. 현재 사용후연료는 습식저장조에서 7년 이상 냉각된 후 건식저장고인 캐니스터로 이송되어 보관되고 있다.

안전조치 측면에서 CANDU와 다른 형태 원자력발전소의 주요 차이점 중의 하나는 CANDU는 상업운전이 시작된 이후 대략적으로 7-10년이 지나면 사용후연료 이송캠페인이 시작된다는 것이다. IAEA 안전조치 기준에 따르면, 월성원전의 사용후연료가 장기저장고인 캐니스터에 이송, 저장될 경우에는 이를 접근이 어려운 지역(difficult-to-access)으로 분류한다. 즉, 가장 엄격한 안전조치기준을 적용하여 전 이송과정에 대해 사찰관의 현장 검증과 아울러 캐니스터에 저장된 연료에 대해 이중 격납 및 감시체제 하에 두고 있다.

국내에는 현재 모두 4기의 CANDU 원자로가 가동 중에 있다. 월성1호기는 1982년 가을에 가동에 들어갔으며, 첫 번째 사용후연료 이송캠페인은 1992년 여름부터 시작되었다. 그때 이후 사용후연료 이송캠페인은 매년 약 2개월 동안 수행되어 오고 있다.

2001년 중 국내 32개 시설에서 국가 계량관리 검사와 IAEA 사찰량은 각각 약 400 PDIs(person-day inspection)를 기록하였다. 이러한 사찰량 중에서 약 절반에 가까운 사찰량이 4기의 CANDU 원자로에 투입되었으며, 이 중에서 약 절반은 1호기의 사용후연료 이송캠페인에 투입되었다. 가동중인 경수로 12기와 원전연료(주)등 다른시설에 각각 25%의 사찰량이 투입되었다. 한편, 월성원전 2호기의 사용후연료 이송캠페인이 2004년, 월성원전 3호기 2005년 그리고 2006년에는 월성원전 4호기에 대한 이송캠페인이 시작될 예정이다. 가까운 장래에 월성원전 사용후연료 이송캠페인에만 국내 전시설의 사찰량 절반 이상이 투입될 뿐 아니라 사찰량의 급격한 증가가 예상되고 있다. 따라서 월성원전의 사용후연료 이송캠페인에 대한 효율적인 안전조치 접근 방안을 모색하는 것이 시급한 실정이다.

## 2. 월성원전에 대한 안전조치 접근

월성원전에서 안전조치 관점에서 검증하여야 할 3개의 주요 strata는 신연료, 노심연료 및 사용후연료로 이루어져 있다. 월성원전에 대한 기본적인 안전조치 접근은 장부검사와 이를 검증하는 비파괴검사, 격납 및 감시 수단으로 이루어져 있다. 일반적으로 격납 및 감시 장치는 이전에 검증된 핵물질이나 시설에 대한 COK(Continuity of Knowledge)를 유지하며, 사찰을 효율적으로 수행하도록 하는 수단이다. 신연료, 노심연료 및 사용후연료조에 저장되어 있는 사용후연료에 대한 검증은 현 안전조치체제 하에서 정기적으로 검증되어 질 수 있다. 그러나 접근이 어려운 지역으로 간주되는 건식저장고에 대한 안전조치 접근은 보다 엄격하고, 사용후연료 이송캠페인동안 전 핵물질 흐름에 대해 사찰관의 현장 검증을 필요로 하고

있다. 따라서 사용후연료를 건식저장고인 캐니스터로 이송할 때에는 많은 양의 사찰량이 필요하다. 월성원전 2, 3, 4호기에 대한 사용후연료 이송캠페인을 시작하기 전에 보다 효율적인 사찰 접근 방안을 찾는 것이 필요하며, 이를 위해 고려해야할 주요 요소는 다음과 같다.

- 이송되는 핵물질에 관한 COK를 유지하기 위한 최적의 격납 및 감시체제의 조합
- 모든 핵물질 흐름을 검증하기 위해 국가 검사기관과 IAEA의 긴밀한 협력체제
- 가용 자원과 시설특성을 고려한 안전조치 접근
- 새로운 안전조치 개념과 새로운 기술의 도입을 고려한 주기적인 안전조치체제 검토

## 2.1 사용후연료 이송을 위한 현재의 안전조치 접근

사용후연료조의 저장용량이 포화상태에 이르면, 시설운영자의 계획된 일정에 따라 일반적으로 냉각이 오래된 사용후연료부터 사용후연료조에서 건식저장고로 이송이 시작된다. 핵물질에 대한 접근이 어려운 구역 즉, 장기저장고인 건식저장고로 이송됨에 따라 안전조치 접근을 매우 엄격히 적용하고 있다. 이송 전에 사용후연료조에서 수량확인, 일련번호 확인 및 고탐지확률을 이용하여 비파괴검증을 수행한다. 이러한 검증 활동은 바스켓 적재, 건조 및 용접 공정에 따라 수행된다. 사용후연료조에서 건식저장고로 이송 시에는 사찰관이 이송 차량에 동승하여 현장검증을 실시하며, 건식저장고에서는 여러개의 봉인을 이용하여 COK를 유지한다. 이송작업의 마무리 단계에서는 건식저장고의 각 캐니스터 재검증 튜브에 검출기를 투입하여 지문(fingerprint)과 용접부문에 대한 사진을 기록한다. 사찰관이 사용후연료조에서 건식저장고로 이송되는 핵물질에 대한 현장검증을 위해, 사용후연료조에 사찰관 부재 시에는 Vacoss Seal과 감시카메라를 이용하여 COK를 유지하고 있다. 사용후연료 이송캠페인은 2개월 여 동안 진행됨에 따라 기후조건, 이송장비의 고장, 검증활동과 사찰관의 부재 등에 따라 예측하지 못한 지연이 초래되곤 한다. 사용후연료조에서 사찰관 부재시 모든 핵물질 흐름을 동결하기 위해 설치된 봉인은 이송작업 지연의 주요 원인 중 하나이다. 그림 1.은 현재의 안전조치 적용을 개략적으로 나타내고 있다.

## 2.2 새로운 안전조치 접근 방안

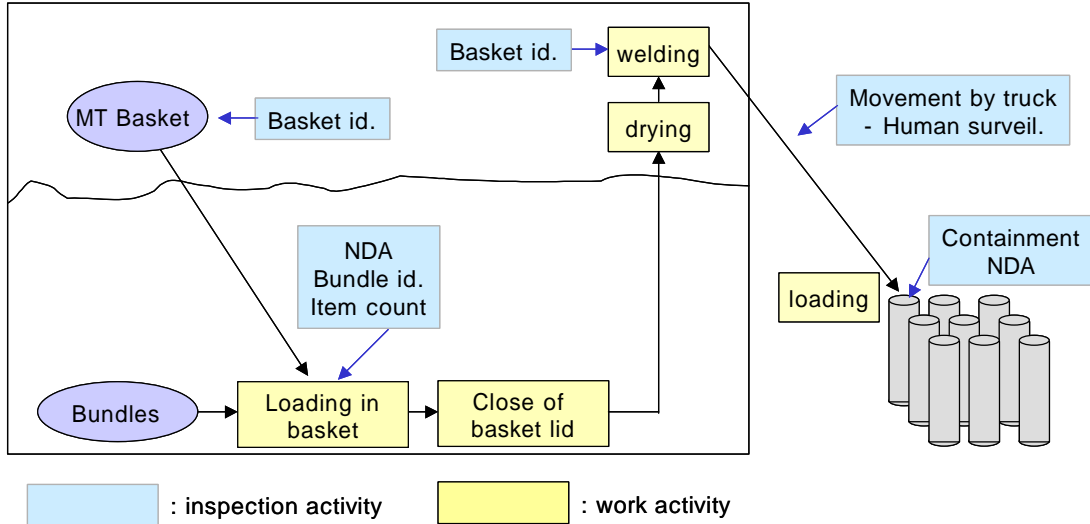
IAEA 안전조치 기준에 따르면 접근이 어려운 구역에 저장되는 핵물질에 대해 그 구역에 저장되기 전에 수량확인, 일련번호 확인(만약 가능하다면), 고탐지확률로 비파괴검증과 이중 격납 및 감시시스템을 적용하도록 되어 있다. 여기에서 안전조치 관점에서 주요한 두 가지 요인이 있음을 알 수 있다. 하나는 접근이 어려운 저장구역으로 이송되기 전에 사용후연료에 대한 검증이 수행되어야 한다는 것이며, 다른 하나는 이미 검증된 사용후연료가 바

스켓에 적재되고 캐니스터에 저장되어 이송작업이 완료될 때 까지 COK를 유지하는 것이다.

### 2.2.1 SSAC와 협력강화를 통한 안전조치 접근

“한-IAEA 경수로협력강화에 대한 양해각서”가 지난 2001년 10월 17일 서명되었다. 이 양해각서에 따라 경수로에 대한 새로운 안전조치 개념이 2002년 1월부터 적용되고 있다. 이러한 기본 개념은 SSAC 검사원이 모든 계획된 일반사찰(interim inspection)을 수행하며,

1.



반면 IAEA는 임의로 선택한 일반사찰에 참여하는 것이다. IAEA는 적시에 독자적인 안전조치 결론을 얻기 위해 RDT(remote data transmission) 체제를 적용하고 있다.

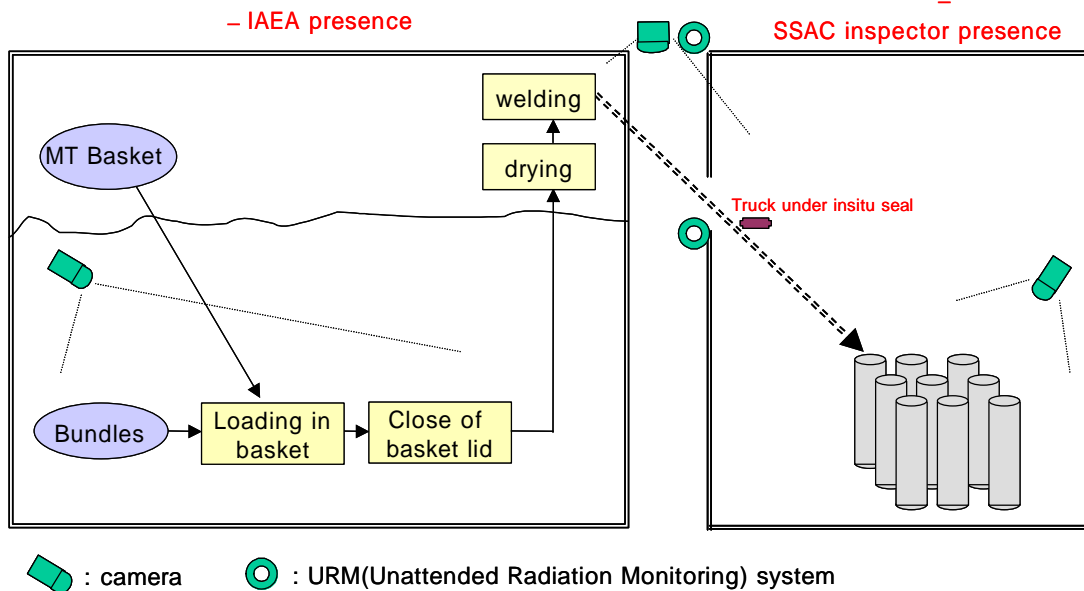
이러한 개념은 월성원전의 사용후연료 이송궤폐인에도 적용될 수 있다. 현재 모든 이송작업은 같은 부지내의 2개의 저장지역에서 수행되고 있다. 사용후연료조에 사찰관의 부재시 즉, 사용후연료조에서 건식저장고로 핵물질이 이송될 때와 건식저장고에서 사찰관이 검증작업을 수행할 때에는 사용후연료조의 핵물질 흐름은 봉인으로 동결되고 있다. 아울러 SSAC와 IAEA 검증활동이 각각 독립적으로 수행됨에 따라 모든 검증활동도 중복되고 있다. 검증활동의 중복과 사찰관 부재시 핵물질 흐름의 동결을 위한 봉인은 시설운영자의 사용후연료 이송작업 지연의 주요 원인이 되고 있다.

경수로 협력강화에서 적용된 것 같이 각 기관은 2개의 저장구역에서 독자적인 검증활동을 수행하고, 검증자료를 공유하는 개념의 협력체제를 적용할 수 있다. 각 기관은 적시에 독자적인 결론을 얻기 위해 RDT체제, 적절한 격납 및 감시체제와 다른 지역에서 수행되고 있는 검증활동에 대해 임의로 선택하여 참여하는 경수로 협력강화 개념을 적용할 수 있다. 이러한 개념의 적용은 개략적인 분석으로도 이송작업의 효율을 30% 이상 높일 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.2.2 시설 특성을 고려한 무인검증시스템을 이용한 안전조치 접근

월성원전 1호기의 노심 및 사용후연료 검증을 위한 현재의 안전조치 시스템은 주로 CDM(core discharge monitor), BC(bundle counter), Y/N 검출기와 주요 전용경로에 설치되어 있는 감시카메라로 구성되어 있다. 원자로 vault에 설치되어 있는 CDM은 노심으로 방출되는 사용후연료의 수량을 측정할 수 있다. 즉, BC와 함께 사용후연료조로 방출되거나 이송되는 모든 노심연료가 확인될 수 있다. 따라서 이 시스템은 노심연료의 전용, 선언하지 않은 핵물질 생성 및 노심과 사용후연료조 사이에 핵물질의 흐름을 계속하여 감시할 수 있다. 또

## 2. SSAC



한 사용후연료조는 격납 및 감시체제하에 놓여있다.

기존의 안전조치 기준을 만족시키기 위해서는 건식저장고로 핵물질 이송 전 사용후연료조에서 바스켓에 적재하기 전에 수량확인 및 비파괴검증이 필요하다. 사용후연료에 대한 비파괴검증 기준을 만족시키기 위한 하나의 방안은 사용후연료조에서 이송작업이 시작되기 전에 사용후연료조의 모든 핵물질에 대한 검증을 완료하고, 적절한 격납 및 감시장치를 설치하여 검증된 핵물질에 대한 COK를 유지하는 것이다. 또한, 이송작업이 완료된 후에 사용후연료조의 핵물질에 대한 재검증을 실시하여 추가적으로 이송에 따른 불일치 여부를 판단할 수 있다. 감시장치를 통하여 핵연료다발이 바스켓에 적재되기 전에 일련번호와 수량에 대한 검증이 가능하며, 핵물질 흐름에 따라 바스켓 뚜껑 개폐, 건조 및 용접 작업을 확인할 수 있다. 바스켓의 일련번호는 용접작업대에서 확인 및 기록이 가능하다. 월성원전 1호기의 건식저장고는 발전소와 같은 부지에 위치하고 있으며, 거리상으로도 매우 가깝다. 이러한 가까운 거리는 트럭을 이용한 연료이송 작업 검증에 있어서도 안전조치상 이점이 있다. 즉, 모든 이송로의 흐름에 대한 검증이 2-3개의 감시장치로 충분하며, 이송로의 주요 지점에 URM(unattended radiation monitoring)을 설치, 핵물질 흐름 검증의 보완시스템을 확보할 수 있다. 건식저장고에서의 바스켓을 캐니스터로 적재하는 작업자의 활동은 감시장치로 검증할 수 있다. 또한 캐니스터의 검증 튜브에 설치한 URM은 핵물질 적재 및 이송방향에 대한 보완시스템으로 활용될 수 있다. 이와 같이 핵물질 흐름에 대한 COK를 유지하기 위한 모든 무인검증시스템을 이중 및 보완시스템을 유지함으로써 안전조치 기준을 만족시킬 수 있다.

현재 국내 모든 경수로에 대해 한-IAEA 안전조치협력강화체제가 유지되고 있으며, 이러한 개념은 월성원전 사용후연료 이송캠페인에도 적용될 수 있다. 1988년 이후 개정 원자력

법에 의해 월성원전의 사용후연료 이송캠페인에 대해 국가 검사원이 독자적으로 검증을 수행해 오고 있다. 월성원전의 이송캠페인에 대해 협력강화체제를 도입하여 국가 검사원의 검사활동 결과물이 IAEA 안전조치 결과를 도출하기 위한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한, IAEA는 이러한 국가 검사체제를 활용하여 탐지활동을 수행하는 새로운 개념을 안전조치 기준에 도입하여야 할 것이다. 즉, 국가 검사원의 검증 활동에 대해 임의로 선택한 비통보 검사 참가체제를 도입함으로써 탐지확률을 향상시킬 수 있을 것이다.

사용후연료조에서 건식저장고로 사용후연료 이송캠페인 동안 무인검증시스템의 COK를 유지하여 안전조치 사찰목표를 달성하기 위해 제안한 시설특성을 고려한 안전조치 접근 방안은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 습식 및 건식저장고에서 설계정보 검증 수행
- 사용후연료 이송캠페인이 시작되기 전 사용후연료조의 핵물질 재고 검증
- 감시장치를 이용하여 사용후연료조로 반입되는 바스켓의 번호 확인
- 감시장치를 이용하여 바스켓으로 적재되는 핵연료다발 수량 확인
- 감시장치를 이용하여 습식저장고의 핵물질 흐름, 즉 바스켓 뚜껑 개폐, 건조 및 용접 공정 흐름 확인
- 습식저장고의 최종 공정인 용접공정에서 바스켓 번호 확인 및 기록
- 감시 및 URM을 이용하여 습식저장고에서 건식저장고로 핵물질 이동 확인
- 감시장치 및 URM을 이용하여 건식저장고의 캐니스터로 바스켓 적재 검증 및 COK 유지
- 이송캠페인 완료 후 습식저장고의 핵물질 재고 검증
- 원격자료전송 시스템을 이용하여 실시간으로 상기 무인감시장치의 자료를 IAEA HQ로 송부
- 국가 SSAC와 경수로협력강화체제와 유사한 개념의 협력강화체제 유지
- 핵연료이송 기간 동안 탐지확률을 고려한 선택적인 비통보 사찰 수행

한편 핵연료 이송캠페인 기간 중 무인 감시 및 격납 장치 등이 정상적으로 작동하지 않아 발생한 핵물질 재고와 흐름의 완전한 회복은 매우 어려우며, 사실상 현재의 안전조치 기준에서는 거의 불가능하다. 이러한 실패의 경우에 대비한 분석과 추가활동 방안에 대한 협의가 선행되어야 할 것이나 발생 경우에 따른 접근방안이 바람직할 것이다.

### 3. 결론

월성원전의 가동 중 노심연료 교체라는 독특한 특성으로 인해 발생한 대량의 사용후연료는 월성원전 1호기의 경우 매년 약 2개월 기간동안 사용후핵연료 이송캠페인이 수행되어 왔다. 2006년에는 월성원전 1-4호기 모두 사용후연료 이송이 필요한 것으로 나타나, 이송에 대한 안전조치 검증을 위해 사찰량의 급격한 증가와 아울러 이를 위해 국내 안전조치 사찰량의 절반 이상 투입될 것으로 예측되고 있다. 따라서 사용후핵연료 이송작업에 대한 안전조치 검증의 효율화가 시급한 과제로 대두되고 있다.

월성원전은 습식 및 건식저장고가 동일한 부지내에 비교적 가까운 곳에 위치하고 있어서 COK를 유지하기 편리한 특성을 지니고 있다. 접근이 어려운 구역으로 분류되는 시설에 대한 안전조치 접근은 시설의 설계특성을 고려한 case by case 접근이 고려되어야 할 것이다.

아울러 “경수로협력강화체제”와 같은 한-IAEA 협력강화는 월성원전 사용후연료 이송에 대한 안전조치 검증을 보다 효과적이고 효율적으로 수행할 수 있는 방안을 제공할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. *IAEA*, "THE SAFEGUARDS IMPLEMENTATION REPORT FOR 2000 - GOV/2001/21/Corr.2" IAEA, June 2002
2. *B.K Kim*, "Study on the National Policy Establishment for Integrate Safeguards System - KAERI/RR-1959/99" KAERI, December 1999
3. *IAEA*, "Safeguards Criteria 1991-1995" IAEA, February 1998
4. *Y.M Choi*, "Technology Center for Nuclear Control 2001 Annual Report - KAERI/MR-376/2001" KAERI, December 2001