'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

월성 사용후연료 저장조에서 수중카메라를 이용한 사용후연료다발 검사

Safeguards Inspection on Spent Fuel Bundles Stored in Wolsong Spent Fuel Pond by Using the Underwater Camera

나원우, 박승기, 차홍렬, 박승식

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

국가 계량관리 검사관 및 국제원자력기구 사찰관은 월성 원자력발전소의 사용후연료 저장조에 저장돼 있는 핵연료다발에 대해 수량확인 및 비파괴검증을 이용한 진위여부 확인방법(Method K, H)을 적용하여 계량관리검사를 정기적으로 수행하고 있다. 사찰관은 밀집 저장된 Stacked tray 사이로 검사장비의 센서를 삽입하여 임의로 선정한 열 또는 행에 쌓여있는 사용후연료다발 수량을 확인한다. 그러나 밀집 저장된 Stacked tray와 초음파봉인을 위한 깔때기형 구조물에 의해 검사장비의 센서가 핵연료다발에 접근할 수 없는 문제점이 발견되었다. 사용후연료를 효과적으로 검증하기 위해서는 이런 문제점을 해결할 수 있는 장비개발의 필요성이 제기되었다. 본 논문은 이러한 장비를 개발하기 위한 설계개념을 제시하고, 이 장비가 안전조치 목적에 적용될 수 있는지 여부를 제시하고 있다.

Abstract

National and international safeguards inspectors have been doing safeguards inspections periodically on the spent fuel bundles stored in the spent fuel pond of Wolsong nuclear power plant by appling the item counting(method K) and the NDA verification(Method H). As an inspector inserted the sensor of the safeguards equipment between the stacked trays, he confirmed the number of spent fuel bundles stacked on row or column randomly selected. But, it appeared that the stacked trays and the structure materials of the ultrasonic bolt seal prevented the equipment's sensor from approaching the fuel bundle. In order to verify the spent fuel bundles effectively, it is necessary to develop the new safeguards equipment to solve these problems. This paper showed the design concept to develop this new equipment and whether this equipment will be applied for safeguards goals or not.

1. 서론

우리나라는 원자력법에 의하여 1997년부터 특정핵물질에 대한 국가 핵물질 계량관리 검사를 단계적으로 수행하고 있다. CANDU형 월성 원자력발전소는 안전조치(Safeguards) 측면에서 PWR형 원자력발전소와 비교해 복잡한 시설특성을 갖고 있다. 따라서 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency) 및 원자력통제기술센터(Technology Center for Nuclear Control)는 상당량의 계량관리 사찰량(Person Day Inspection)을 4기의 월성 원자력발전소에 투입하고 있다. IAEA에 의해 On-Load Reactor로 분류된 월성 원자력발전소들은 정상운전 중에 핵연료 교체가 주기적으로 이루어진다. IAEA는 이를 감시하기 위해 다수의 봉인 및 감시체계(Containment & Surveillance)를 물질수지구역(Material Balance Area) 내에 설치/운영함으로써, 물질수지구역 밖으로 핵물질이 방출되는지 여부 및 이와 관련된 미신고 작업의 유무확인 등을 연속적으로 감시하고 있다. IAEA는 노심에서 방출되는 핵연료다발 수량확인 및 진위여부를 무인측정할 수 있는 비파괴측정(Non-Destructive Assay) 장비를 주요측정지점에 설치하여 핵연료 방출과 관련된 모든 활동을 측정/관리하고 있다.

물자재고검사(Physical Inventory Verification) 기간동안 사찰관은 물질수지구역 내에 있는 모든 핵물질에 대한 검증을 수행해야 한다. 특히 사찰관은 사용후연료 저장조에 저장돼 있는 핵연료에 대한 검증시 모든 핵연료에 대해 임의로 선정하여 검증할 수 있어야 한다. 그러나 사용후연료다발 검증시 두가지 문제점이 대두되어 사찰관 및 시설운영자에게 부담을 가중시키고 있다. 본 논문은 이런 문제점을 분석하여 이를 해결할 수 있는 새로운 장비의 설계개념을 정립하고 안전조치 검사목적을 달성할 수 있는 방안을 제시하는데 목적이 있다. IAEA의 검사장비 기준을 만족시킬 수 있는 새로운 사용후연료다발 검사장비를 개발하여 사찰현장에 적용한다면, 사찰관과 시설운영자의 부담을 경감시키면서 안전조치 검사의 목적을 효율적으로 달성하는데 기여할 것이다.

2. 안전조치 검사

2.1 사용후연료에 대한 안전조치 검사

IAEA는 가압중수로(PHWR: Pressurized Heavy Water Reactor)형인 월성 원자력 발전소를 On-Load Reactor로 분류하여, 이에 타당한 IAEA 안전조치 기준을 적용하고 있다[1]. CANDU 600MW 형인 월성 원자력발전소는 정상운전기간에 매일 2 3채널에서 16 24개 핵연료다발이 교체되고 있다. 핵연료 교체는 한 채널에 신연료 8다발을 삽입하면서 반대 채널에서 조사된 핵연료 8다발을 동시에 방출함으로써 이루어진다. 천연 이산화우라늄(UO_2)을 연료로 하는 CANDU 핵연료가 정상운전 조건하에서 3,500 MWD/t 정도 연소되어 방출될 경우에, 방출된 핵연료 1다발에는 안전조치 측면에서 가장 민감한 핵물질인 플루토늄이 약 68g 포함된다고 IAEA는 평가하였다[2]. PHWR 원자로에서 연소된 사용후연료는 연소이력에 따라 플루토늄 생성량이 각각 달라질 수 있다. IAEA는 적정순도의 플루토늄을 생성할 수 있는 최적의 연소도로 연소된 사용후연료 120다발에는 핵폭발장치로 전용 가능한 플루토늄 최소량인 1 SQ(Significant Quantity, 8kg)가 포함된다고 평가하였다[2]. IAEA 안전조치 기준에 의해 조사된 직접핵물질(Irradiated Direct-Use Material)로 분류되는 CANDU 사용후연료는 IAEA의 철

저한 안전조치 감시하에서 저장/관리되고 있다.

IAEA는 정기검사 간의 간격이 16주를 초과하지 않는 범위내에서 연간 4회의 정기검사를 수행하고 있다. CANDU형 원자력발전소의 특성상 노심 핵연료의 검증은 가능하지 않기 때문에 IAEA는 주요측정지점에 설치된 봉인 및 감시체계의 기록과 CDM(Core Discharge Monitor), SFBC(Spent Fuel Bundle Counter) 등의 장비에서 측정된 기록을 활용하여 검사활동을 수행하고 있다. 사찰관은 이런 장비들의 기록과 시설운영자가 제출한 핵연료 장전 및 방출현황을 상호 비교하여 검사주기(약 16주) 내에 방출된 사용후연료에 대한 안전조치검사 목적을 달성하고 있다.

2.2 사용후연료 저장조에서의 안전조치 검사

사용후연료 저장조는 손상연료 저장조, 사용후연료 반입조(Reception bay), 사용후연료 저장조, 핵연료이송 작업영역 등을 포함하는 구역으로 넓게 설정돼 있다. 이 영역은 저장돼 있는 사용후연료가 물질수지구역 밖으로 이동될 수 있는 경로이므로 IAEA에서는 여러 대의 감시용 카메라와 Yes/No monitors 등을 주요측정지점에 설치하여 핵물질 이동을 연속적으로 감시하고 있다[3]. IAEA는 분기별로 1회씩 연간 4회의 정기검사를 수행하면서 봉인 및 감시체계에 대한 평가를 수행한다. 정기검사기간 동안 사찰관은 이 구역에 설치된 감시용 카메라의 테이프를 받아 검토하여 검사주기(약 16주) 동안에 물질수지구역 밖으로 미신고된 핵물질이동 등이 있었는지 유무를 확인한다. 시설운영자가 신고한 작업 이외의 이상징후가 발견되지 않는다면, IAEA 사찰관은 이것으로 사용후연료 저장조에 대한 정기검사의 목적을 달성한 것으로 간주한다.

4회의 정기검사 가운데 1회는 물질수지구역내의 물자재고검사이다. 따라서 사찰관은 물자재고검사기간 동안 저장조에 저장돼 있는 핵연료다발 수량을 확인해야 한다. 검사기간 동안 원자력발전소의 주요측정지점에 설치된 봉인 및 감시체계와 CDM, SFBC 등의 장비가 정상적으로 작동하고 있을 경우, IAEA 사찰관은 Method K를 이용하여 핵연료다발 수량을 확인하고 있다. Method K는 밀집 저장된 Stacked tray 사이로 수중카메라를 삽입하여 사찰관이 임의로 선정한 열 또는 행에 쌓여있는 사용후연료다발 수량을 확인하는 방법이다[4]. 그러나 앞서 언급된 감시장비의 감시기록을 이용해 적시탐지 목적을 달성할 수 없을 경우, 즉 감시장비의 감시활동이 검사기간 동안 실패한 것으로 간주될 경우에, 사찰관은 저장조에 저장돼 있는 핵연료다발의 진위여부 검증을 위해 Method H를 적용해야 한다. Method H는 밀집 저장된 Stacked tray 사이로 감마선 검출기를 이용한 장비를 삽입하여 임의로 선정한 열 또는 행에 대해 Gamma scanning 하여 쌓여있는 사용후연료다발 수량과 사용후연료 진위여부 등을 동시에 확인하는 방법이다[4,5].

2.3 안전조치 검사의 문제점

IAEA는 앞서 기술한 두 가지 검증방법을 적용하여 그동안 월성 1호기의 사용후연료 저장조에 저장된 사용후연료다발 재고를 검증해 왔다. 그림 1, 2는 월성 1호기 및 월성 2, 3, 4호기용 핵연료선반(Tray)에 대한 크기를 보여주고 있다. 월성 1호기의 Tray(용량 : 24다발)는 옆면

높이가 약 76mm로 제작돼 있어서 핵연료다발이 쌓여 있더라도 수중카메라가 근접 촬영할 경우, 핵연료다발 끝단이 촬영될 수 있는 공간(63mm)이 상단 Tray 와 하단 Tray 사이에 형성되었다. 그러나 월성 2 ,3, 4호기용 Tray는 옆면 높이가 120mm로 제작돼 있어서 기존의 IAEA 수중카메라가 Tray에 쌓여 있는 핵연료다발의 끝단을 확인할 수 없는 문제점을 갖고 있다. 이는 지진에 대비하여 사용후연료의 안전성을 보완하기 위한 방안으로 내진 설계를 하면서 사용후연료 검증을 위한 안전조치 측면을 고려하지 못한 결과로 사료된다. 현재, IAEA는 이로 인해 물자재고검사를 위한 여러 가지 방안을 모색중이며, 그 대안으로 16 내지 19층 높이로 쌓여있는 Tray들을 각각 들어내면서 각 Tray에 놓여있는 사용후연료다발 수량을 확인하는 방안을 적용하고 있다. 이런 접근방안은 시설운영자에게 부담을 가중시킬 뿐만 아니라 사용후연료의 안전성 측면에서 문제를 낳을 수 있는 비현실적인 방안인 것으로 평가된다.

월성 1, 2, 3, 4호기의 사용후연료 저장조 바닥의 구조물에는 초음파봉인(Ultrasonic Bolt Seal)을 설치하기 위한 깔때기형 지지대가 그림 3에서 보는바와 같이 설치돼 있다. IAEA는 방출된 사용후연료들을 검증하여 Tray를 쌓은 후 초음파봉인을 함으로써 사용후연료 저장조에 있는 동안 재검증하지 않는 방안을 캐나다에서 추진했었다. 하지만, 이 방법은 IAEA 측의 비용부담이 너무 많고, 시설운영자의 사용후연료 관리 측면에서 문제점이 있을 수 있다고 판단되어 현재는 적용되고 있지 않은 안전조치 방안이다. 그렇지만 이런 용도의 깔때기형 지지대가 월성 원자력발전소에 설치돼 있어서 현재의 안전조치 검사상의 문제점으로 대두되었다. 현재 Stacked tray에 쌓여있는 핵연료다발을 확인하기 위한 Method K, H 용 센서가 Stacked tray 사이로 상하 이동할 때, 저장조 바닥에서 1, 2층의 Tray 높이까지 솟아올라온 깔때기형 지지대가 센서의 접근을 막고 있다. 월성 1호기의 사용후연료 저장조에 설치된 깔때기형 지지대로 인해 검증될 수 없는 핵연료다발 수량은 896다발이다. 이는 약 7 SQ 이상의 사용후연료가 검증되지 않은 채 저장조에서 저장/관리되고 있다는 것을 의미한다.

3. 장비 개발 및 설계

3.1 개념설계

월성 원자력발전소에 대한 안전조치 검사는 앞에서 언급된 몇 가지 문제점을 해결하는 방안으로 개선되어야 한다. 본 논문은 현재의 안전조치 검사방안에서 대두된 문제점을 해결할 수 있고 IAEA 안전조치 기준을 만족시킬 수 있는 개선방안을 제시하여, 이에 합당한 장비의 개념을 새로이 제시하고 있다. 기존의 IAEA 검사장비는 상하 운동하면서 90도 각도의 정면에 놓여 있는 핵연료다발을 확인하도록 설계돼 있어서 월성 2, 3, 4호기에는 적용될 수 없었다. 그러므로 새로운 장비의 개념은 상하 Tray간의 좁은 공간(19mm) 속을 적절한 각도로 카메라 렌즈가 시준 할 수 있도록 Mirror를 적용하여 수평으로 놓여 있는 핵연료 다발의 상단을 촬영할 수 있도록 하는 것이다.

또한, 초음파봉인을 위한 깔때기형 지지대는 저장조 바닥에서 2번째 Tray의 중간 부분까지 올라와 있으며, 각각이 핵연료 4다발을 가로막고 있어서 기존의 센서가 접근할 수 없었다. 새로운 장비의 수중카메라 끝에 좌우 360도 회전 가능한 Mirror를 부착하여 깔때기형 지지대 좌우에서 카메라 렌즈가 Tray와 깔때기형 지지대 사이로 핵연료다발을 시준하여 촬영한다면, 이

로 인한 안전조치 검사의 문제점을 해결할 수 있다. 새로운 장비가 촬영할 수 있는 최적의 핵연료다발 영상에 대해 IAEA 및 국가 검사관이 안전조치검사 기준에 적합한 것으로 판단하여 물자재고검사 자료로 활용한다면, 이 장비는 그 동안 대두된 대부분의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 안전조치 검사장비로서 IAEA의 인증(Authentication) 받을 수 있을 것이다.

3.2 장비 구성

그림 4는 사용후연료 저장조의 Stacked tray(16 내지 19층)에 쌓여 있는 사용후연료다발의 수량을 확인하는 안전조치 검사방법(Method K)을 도식적으로 나타낸 것이다. 본 장비는 그림에 나타난바와 같이 사용후연료 저장조의 Gantry bar에 설치되어 사찰관이 임의로 선정한 Stacked tray로 이동될 수 있도록 구성될 것이다. 선정된 Stacked tray에 정렬된 장비는 Stacked tray의 상하로 이동하면서 쌓여있는 핵연료다발의 수량을 파악하게 된다. 장비의 Guide tube 끝단에 부착될 수중카메라가 장비의 Supporting frame에 장착될 Stepping motor에 의해 상하 운동하면서 사찰관이 원하는 방향에 놓인 핵연료다발을 촬영하여 그 영상을 모니터 상에 나타낸다.

안전조치 검사의 목적을 효과적으로 달성하기 위해서는 장비 구성요소인 카메라와 Mirror 간의 정렬관계가 중요한 요소가 될 것이다. 즉, 이런 정렬 조건에 따라 장비가 촬영할 수 있는 피사체의 Pixel 량이 결정된다. 사찰관이 검증활동을 수행하는데 있어서 가능한 핵연료다발의 많은 Pixel 들을 촬영할 수 있어야 안전조치 검사의 목적을 효과적으로 달성할 수 있다. 따라서 카메라와 Mirror 간의 정렬관계는 모의실험을 통해서 정확한 정렬 각도가 계산되어 장비개발에 적용되어야 한다.

3.3 향후계획 및 기대효과

원자력통제기술센터는 이런 개념의 장비개발을 위해 월성 원자력발전소의 사용후연료 저장조에서 문제가 되고 있는 Tray 간 간격(19mm)과 깔때기형 구조물이 있는 동일한 조건하에서 Cold test를 수행하여 장비개발에 필요한 설계자료를 얻을 계획이다. 그리고 모의연료를 이용한 Cold test에서 문제가 되는 조건에서의 핵연료다발을 촬영하여 촬영된 영상에 대해 국가계량관리 검사관 및 IAEA 사찰관은 IAEA 안전조치 기준에 준한 평가를 할 것이다. 이런 Cold test 결과가 IAEA 안전조치 기준에 부합된다는 평가가 있으면, 새로운 장비를 설계/제작하여 안전조치 검사장비로서 IAEA의 인증을 받고 국가 및 IAEA 검사를 위한 목적에 적용할 계획이다.

향후, 위에 언급된 설계개념에 맞도록 장비를 개발하여 월성 원자력발전소에 적용한다면, 국가 계량관리 검사관 및 IAEA 사찰관은 IAEA 안전조치 기준에 부합된 검사결과를 효율적으로 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 본 장비는 안전조치 검사를 위해 시설운영자가 Stacked tray를 한 개씩 들어내면서 저장돼 있는 사용후연료다발 수량을 파악하는 현재의 검사방법을 대신할 수 있어서 시설운영자의 부담을 경감시켜 줄 수 있는 방안이다.

4. 결론

국가 계량관리 검사관 및 IAEA 사찰관은 앞서 기술한 두 가지 검증방법(Method K, H)을 적용하여 월성 1호기의 사용후연료 저장조에서 물자재고검사를 그동안 수행해 왔다. 하지만, 월성 1, 2, 3, 4호기의 사용후연료 저장조에는 그동안 물자재고검사를 하는데 있어서 구조적인 문제점이 있는 것으로 평가되었다. 국가 검사관 및 IAEA 사찰관은 앞서 기술한 두가지 문제점을 해결하여 안전조치 검사목적을 효과적으로 달성해야 하는 당면과제에 직면하고 있다. 본 논문은 이를 해결할 수 있는 검증방법상의 대안을 제시하여, 새로운 검사장비 개발을 위한 설계개념을 정립하는데 목적이 있다. 앞서 기술한바와 같이 새로운 검사장비가 성공적으로 개발되어 검사현장에 적용된다면, 안전조치 검사목적을 효과적으로 달성할 수 있는 새로운 검사장비로서 IAEA의 인증을 받을 수 있는 것으로 사료된다. 이러한 국가검사의 활동이 국내에서 이루어지고 있는 평화적인 원자력 이용에 대한 투명성을 제고시키는데 기여할 것이며 또한, 국제원자력 사회에서 원자력통제기술센터가 수행하고 있는 핵물질 통제기술의 위상을 한 단계 높이는데 기여할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. IAEA, "Safeguards Criteria 1991-1995" (1994)
2. IAEA, "Verification of Spent Fuel Bundle Transfer from Spent Fuel Bay to Dry Storage at Wolsung-1" (1996)
3. 이재성외, “CANDU형 원자력발번소에 대한 사찰기술 선진화”, KAERI/RR-1918/98
4. IAEA, "The CANDU Course(Session 10 ; Verification of Irradiated CANDU Fuel Bundles (Method K)" (1993)
5. Won Woo Na, "Development of Safeguards Equipment for Wolsong Reactors", INMM Annual Meeting, (1999).

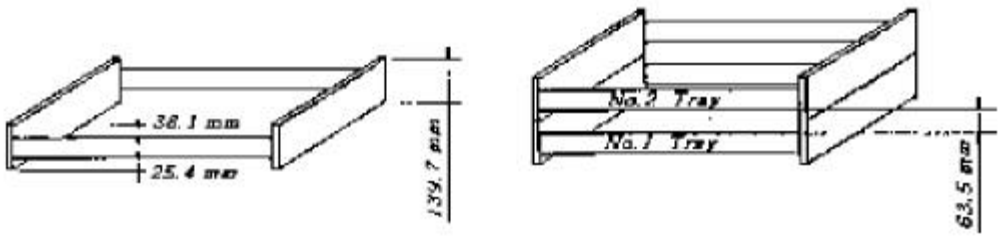

그림 1. 월성 1호기 사용후연료 저장용 Tray

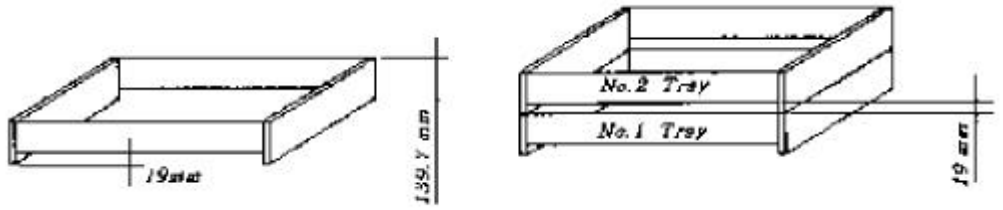

그림2. 월성 2, 3, 4 호기 사용후연료 저장용 Tray

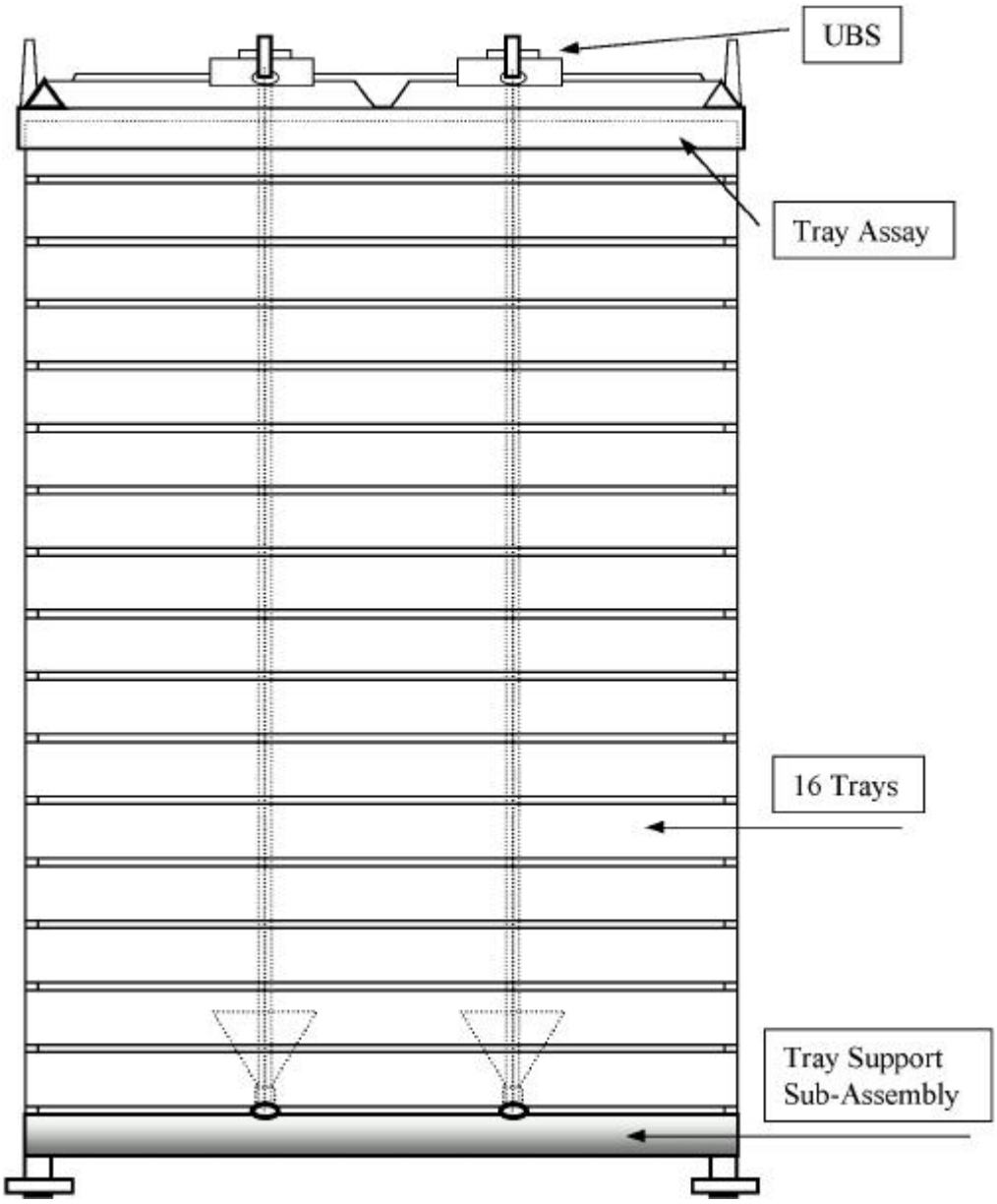

그림 3. 사용후연료 저장조에 저장된 핵연료 선반(stacked tray)의 계략도

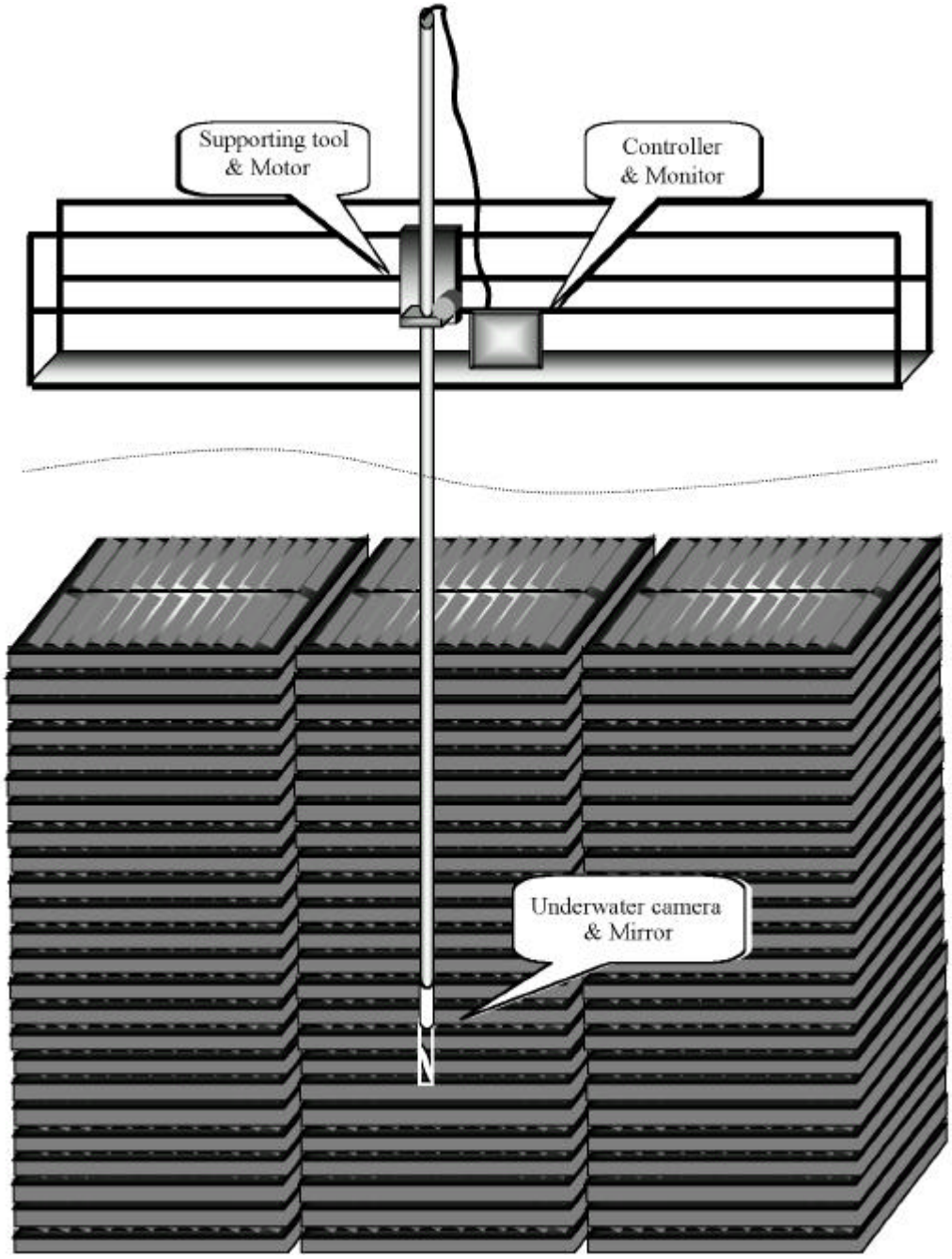

그림 4. CANDU 사용후연료 저장조에서 수중카메라를 이용한 사용후연료다발 검사의 개념도