

'98 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

가압중수로형 사용후핵연료다발 일련번호 인식장치 개발

Development of the Spent CANDU Fuel Bundle Serial Number Identifier

나원우, 이영길, 윤완기, 곽은호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

가압중수로형 사용후핵연료다발 일련번호 인식장치(SCAI)는 수조 속의 사용후핵연료다발 일련번호를 확인할 수 있도록 설계·제작되었다. 이 장치는 카메라와 라이트가 조립되는 방향에 의해 수평 또는 수직방향의 핵연료다발 끝단을 촬영할 수 있도록 구성되었다. 검사관은 SCAI의 간단한 조작에 의해 수조 속의 핵연료다발 끝단으로 촬영부를 접근시켜서 핵연료다발 끝단에 음각된 일련번호를 촬영하여 Monitor 상에 정확히 보여줄 수 있다. 1998년도 월성 1호기 핵연료 이송기간에 현장에 적용된 SCAI는 IAEA 검사관이 임의로 선정한 핵연료 다발의 일련번호를 정확히 인식할 수 있으며, 이를 통하여 새로이 개발된 SCAI가 시설운영 방해를 최소화하면서 제한된 검증시간내에 IAEA 및 국가 안전조치 검사목적을 동시에 충족시키고 있음이 입증되었다.

Abstract

Newly developed Spent CANDU Fuel Bundle Serial Number Identifier (SCAI) was introduced to identify the serial number of spent fuel bundle loaded in the basket placed on the underwater working table. For the purpose of effectively identifying the serial number of fuel bundle, SCAI was composed of underwater camera & light part, guiding & supporting part, and control & monitor part. SCAI was properly designed so that its camera head might approach nearly at the end of fuel bundle, accurately take a picture of the serial number, and display the image of the serial number on monitor. Inspectors could easily operate SCAI after several practices in the storage pond, which was a user friendly. During the recent spent fuel transfer campaign at Wolsung-1, SCAI was effectively used to identify the serial number of the spent fuel bundles randomly selected by the IAEA inspector. It was internally evaluated that SCAI played crucial role in clear and immediate identification of fuel bundle serial number and it greatly contributed to cut inspection efforts.

1. 서 론

우리나라는 원자력법에 의하여 1997년부터 국가 핵물질 계량관리 검사를 단계적으로 수행하고 있다. CANDU형 원자력발전소는 안전조치(Safeguards) 측면에서 PWR형 원자력발전소에 비해 상당량의 핵물질 계량관리 검사가 요구되는 원자력시설이다. 따라서 국가 핵물질 계량관리 검사의 상당량이 현재 우리나라가 보유하고 있는 4기의 CANDU형 원자력 발전소에 투입되어야 한다. 우리나라의 CANDU형 원자력발전소는 충분히 냉각된 사용후핵연료를 건식 저장고의 Silo로 이송하여 저장·관리하는 건식저장법을 채택하고 있다. 연간 약 2개월이 소요되는 사용후핵연료 이송과정은 원자력발전소 운영자와 검사관 모두에게 부담이 되는 공정이다. 국제원자력기구(IAEA)와 국가 검사관은 IAEA 안전조치 기준(Safeguards Criteria)^[1]에 의하여 사용후핵연료 이송기간에 현장에 참여하여 이송되는 핵물질에 대한 안전조치 검사를 수행하고 있다. 이때, 검사관은 핵연료 이송기간에 수조 속의 바스켓에 담겨 있는 사용후핵연료다발 일련번호 확인과 방사선 측정법에 의한 사용후핵연료 진위여부 검증 등을 수행해야 한다. IAEA는 그 동안 자체 개발한 Underwater Telescope를 이용하여 수조 속의 바스켓에 담겨 있는 사용후핵연료다발의 일련번호를 확인해 왔다^[2]. 그러나 이 장치를 이용한 일련번호 확인작업은 핵연료 이송작업을 방해할 정도의 검증시간이 요구되었고, 일련번호 확인의 정확도가 낮은 것으로 평가되었다. IAEA 장치는 IAEA와 국가 검사관이 동시에 일련번호를 확인할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서는 핵연료 이송기간에 IAEA와 국가 검사관이 제한된 검증시간내에 사용후핵연료다발 일련번호를 동시에 정확히 확인할 수 있는 SCAI(Spent CANDU Fuel Bundle Serial Number Identifier)를 설계·제작하였고, 이를 핵연료 이송 현장에 적용하여 그 결과를 평가하였다.

2. 본 론

2.1 IAEA 안전조치 방안

IAEA는 가압중수로(PHWR : Pressurized Heavy Water Reactor)형 원자력 발전소인 월성 1호기(CANDU 600 MW reactor)를 On-Load Reactor로 정의하여, 이에 타당한 IAEA 안전조치 기준을 적용하고 있다. CANDU 600 MW 원자력발전소는 정상운전기간에 매일 2~3채널에서 16~24개의 핵연료다발을 교환해야 하는데, 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 42.2g 포함된다고 IAEA는 평가하였다^[2]. PHWR 원자로에서 연소된 사용후핵연료는 연소이력(Burn-Up History)에 따라 플루토늄 생성량이 각각 달라질 수 있다. IAEA는 플루토늄을 생성할 수 있는 최적의 연소도로 연소된 사용후핵연료 120 다발에는 핵폭발장치로 전용 가능한 플루토늄의 최소량인 1 SQ(Significant Quantity, 8kg)가 포함될 수 있다고 평가하였다. 따라서 IAEA 안전조치 기준에 의해 직접핵물질(Direct-Use Material)로 분류되고 있는 CANDU 사용후핵연료는 IAEA의 철저한 안전조치 감시 하에서 저장·관리되어야만 한다.

핵연료 이송공정에 사용되는 바스켓은 사용후핵연료 60다발을 담을 수 있도록 설계·제작된

용기이다. IAEA 안전조치 기준에 의하면 0.3 SQ 이상의 직접핵물질(사용후핵연료 등)을 담을 수 있는 용기와 핵연료 장전기 등은 IAEA 검사관의 입회하에 핵물질 관리구역 내·외로 이동되어야 한다고 명시하고 있다^[1]. 사용후핵연료 60 다발(0.5 SQ)을 담을 수 있는 바스켓과 바스켓 수송용기인 Flask의 이동은 안전조치 검사의 주요 대상이다. 따라서 IAEA와 국가 검사관은 핵연료 이송기간에 현장에 상주하면서 이들 용기의 이동을 감시해야 한다. 현재, 검사관은 사용후핵연료 수조 속의 바스켓에 담기는 사용후핵연료 60 다발 가운데 2 다발을 임의로 선정하여 핵연료 일련번호를 확인하고, 방사선 측정법에 의해 사용후핵연료 진위여부를 검증하고, 그리고 핵연료가 채워진 바스켓의 이동을 현장에서 감시하고 있다^[1,3].

2.2 핵연료 이송공정

월성 1호기 원자력발전소는 사용후핵연료를 저장조에서 약 7년간 충분히 냉각시킨 후, 건식저장고의 Silo로 이송하여 저장·관리하는 방안을 채택하고 있다. 월성 1호기 원자력발전소는 45,600 다발의 사용후핵연료를 보관할 수 있는 저장조를 갖고 있다^[2]. 그러나 지속적으로 방출되는 사용후핵연료를 저장조에 저장하여 충분히 냉각시키기 위해서는 약 7년간 냉각된 사용후핵연료를 건식저장고의 Silo로 이송함으로써 저장조 공간을 매년 확보해야 한다. 그림 1은 가압중수로형 사용후핵연료 이송 전 과정을 간략하게 표현하고 있다. 운영자는 저장용기(Tray, 용량 ; 24 bundles)에 수평으로 놓여 있는 사용후핵연료다발들을 Fuel Tilt Table을 이용해 수직으로 세운 후, Fuel Loading Tool을 이용해 바스켓에 담는다. IAEA와 국가 검사관이 바스켓에 담긴 사용후핵연료에 대해 일련번호 확인과 방사선 측정법에 의한 사용후핵연료 진위여부 검증 등을 수행한다. 운영자는 검사관의 입회하에 검증이 끝난 바스켓에 뚜껑을 닫고 바스켓을 Hotcell 영역으로 이동시켜 내부를 완전 건조시킨 후, 바스켓의 상·하단을 원격용접한다. 그리고 용접된 바스켓을 이송용기(Flask, 용량 : 1 basket) 속에 담아 트레일러에 적재하여 건식저장고의 Silo(용량 : 9 baskets, 560 bundles)로 이송하여 저장·관리한다.

2.3 장치 개발

2.3.1 장치용도

SCAI는 수조 속의 사용후핵연료다발 일련번호를 제한된 시간내에 다음의 두 가지 안전조치 검사목적을 만족시킬 수 있도록 설계·제작되었다^[4]. 첫째, 사용후핵연료 저장조 속에서 약 7년간 충분히 냉각된 사용후핵연료다발들은 건식저장고로 이송되기 위해 수조 속의 바스켓에 담긴다. SCAI는 바스켓에 담겨있는 60 다발의 사용후핵연료 가운데 검사관이 임의로 선정한 사용후핵연료다발 끝단을 수직방향에서 정확히 시준하여 일련번호를 확인할 수 있어야 한다. 둘째, CANDU형 원자력발전소에서 타고 나온 사용후핵연료다발들은 Reception Bay에서 저장용기에 수평방향으로 놓여 저장된다. 운영자가 Fuel Lifting Tool을 이용하여 수평으로 놓여 있는 핵연료를 카메라에 접근시켰을 경우에, SCAI는 핵연료 끝단을 수평방향에서 정확히 시준하여 일련번호를 확인할 수 있어야 한다.

2.3.2 설계 조건

SCAI는 기존의 IAEA 장치(Underwater Telescope)를 대체할 수 있을 정도로 검사관에 의해 시설구조물에 간단히 설치되어 편리하게 사용될 수 있도록 설계되어야 한다. 또한, SCAI는 시설운영자가 Fuel Loading 작업을 하는 동안 작업영역 밖으로 안전하게 이동했다가 바스켓 상부로 이동하여 일련번호를 확인함으로써 운영자의 작업방해를 최소화 할 수 있도록 설계되어야 한다.

상기 조건에 맞게 설계된 SCAI는 고방사선장인 약 8m 깊이의 사용후핵연료 저장조 속에서 약 2개월 동안 지속적으로 사용되기 위해 다음의 조건들을 만족하는 요소들로 구성되었다. 첫째, 고방사선장인 수조 속에서 장시간 정상적으로 작동해야 하는 촬영부는 내방사성과 방수조건을 충분히 만족시키는 수중카메라와 라이트로 구성되었다. SCAI 카메라(모델; R93, 제조회사; Rees Instruments Ltd., 재원 : 직경; 40.5mm, 무게; 1.25kg)는 2×10^8 rads 의 총흡수선량(total dose rate) 과 3×10^6 rads 의 시간당흡수선량(dose rate per hour)의 내방사성을 갖고 있다. 수조 속에서 Browning 현상이 카메라 렌즈에 발생하여 피사체 촬영을 방해하므로, 20m 깊이의 수조 속의 수압을 견딜 수 있는 Non-Browning Vidicon Lens로 된 3:1 Zoom Body가 SCAI 카메라에 사용되었다. 시설 라이트를 사용할 수 없는 최악의 조건에서 충분한 밝기를 내기 위해 라이트는 외장형 라이트 전구(150W) 2개로 구성되었으며 2000시간 동안 지속적으로 사용될 수 있다. 둘째, 아주 작게 음각된 핵연료 끝단의 일련번호를 먼 거리에서 정확히 시준하기 위해서는 원격조절을 할 수 있는 기능이 요구된다. SCAI 카메라에 사용된 Zoom Lens는 초점거리가 50mm ~ infinity로서 8mm에서 24mm까지 Zooming 하면서 피사체를 촬영할 수 있다. 카메라의 라이트는 수조 속의 밝기 정도에 따라 라이트 밝기를 원격 조절할 수 있다.

2.3.3 장치 구성

그림 2(A)는 사용후핵연료다발을 건식저장고로 이송하기 전에 수조 속의 사용후핵연료다발 일련번호를 확인하기 위해 SCAI를 현장에 설치한 모습을 도식적으로 나타낸 것이다. 바스켓에 담겨 있는 임의의 사용후핵연료다발 일련번호를 확인하기 위해 검사관이 SCAI의 Supporting Frame 상단에 부착된 Arm과 수조 속의 Turn Table을 조절하여 촬영부를 피사체에 접근시킬 수 있도록 SCAI를 설계하였다. 그리고 SCAI는 검사관이 선정한 핵연료 일련번호 영상을 약 30초 내에 Monitor 상에 나타내어 IAEA와 국가 검사관, 그리고 시설운영자가 동시에 검사결과를 공유할 수 있도록 구성되었다.

그림 2(B)는 가압중수로형 원자력발전소에서 타고 나온 사용후핵연료다발 일련번호를 Reception Bay에서 확인할 수 있도록 설치한 SCAI 모습을 간략하게 나타낸 것이다. 운영자는 On-Load Reactor인 CANDU형 원자로에서 거의 매일 방출되는 핵연료를 Fuel Lifting Tool을 이용해 Cart에서 저장용기(Tray)로 옮겨 놓는다. 검사관은 카메라와 라이트가 수평방향으로 조립된 촬영부를 Cart와 Tray 사이의 저장조 바닥에 내리고 장치를 설치한다. 이때, 운영자가 Cart에서 Tray로 핵연료를 옮기면서 핵연료다발 끝단을 Camera Head 정면에 잠시 멈출 경우에, SCAI는 핵연료다발 끝단에 음각된 일련번호 영상을 Monitor 상에 나타낼 수 있

도록 구성되었다.

SCAI는 두 지점에서의 안전조치 검사목적에 효과적으로 달성할 수 있도록 하기 위해 그림 3의 요소로 구성되었다. 첫째는 수조 속의 사용후핵연료다발 일련번호를 정확히 촬영하는 그림 3의 촬영부로서 두 지점에서의 검사목적에 따라 카메라와 라이트의 조립방향과 각도를 달리 할 수 있도록 설계되었다. 둘째는 카메라와 라이트로 구성된 촬영부를 수조 속의 사용후핵연료다발 끝단에 접근시킬 수 있도록 가이드하고, 임의로 선정된 바스켓 내의 사용후핵연료다발 끝단의 적절한 거리까지 접근시켜서 정확히 시준할 수 있도록 조절하고, 장치를 시설물에 고정시켜서 검사기간 동안 장치를 안전하게 지지해주는 지지부이다. 그림 3의 지지부는 검사 현장에서 쉽게 조립·분해가 되도록 설계되었고, 카메라와 피사체간의 거리를 항상 일정하게 유지할 수 있도록 제작되었다. 검사관은 지지부에 부착된 촬영부를 검사관이 임의로 선정한 바스켓 내의 사용후핵연료다발 끝단 위로 이동시켜서 촬영한다. 셋째는 지지부에 의해 수조 속의 사용후핵연료다발 끝단을 시준하고 있는 촬영부가 촬영한 일련번호 영상을 나타내는 Monitor, 카메라와 라이트 기능을 원격 조절하는 Controller로 구성된 제어부이다. 검사관은 촬영된 핵연료다발 끝단의 영상을 Monitor로 보면서 최상의 해상도를 갖는 일련번호 영상을 얻을 수 있도록 카메라의 줌(ZOOM)과 매크로(MACRO) 기능을 조절하고, 수조 속의 밝기가 최적의 조건이 되도록 라이트 밝기를 조절한다. 이때, 검사관은 Monitor 상에 나타난 일련번호를 확인하여 시설운영자가 제공한 저장용기(Tray)별 핵연료다발 일련번호와 대조하여 검사목적에 달성한다.

2.4 현장적용 및 실증

검사관은 SCAI 장치의 주요 구성요소인 카메라와 라이트를 검사대상 사용후핵연료다발들이 놓인 조건에 맞게 촬영부 아답터에 고정한다. 핵연료 끝단에 작게 음각된 일련번호가 최상의 해상도로서 Monitor 상에 나타날 수 있도록 카메라와 피사체간의 거리를 공기중에 조절하여 카메라를 아답터에 고정시킨다. 그리고 Camera Head에서 최적의 거리(약 15cm)에 위치한 피사체 중심에 라이트 빛이 최적의 조건으로 비추질 수 있도록 라이트 각도를 조절한다. 만일, 카메라와 라이트 조립 각도가 조건에 어긋나게 되면 빛의 반사에 의해 좋은 해상도를 갖는 영상을 얻을 수 없다. 조립된 촬영부를 가이드 튜브로 연결하면서 사용후핵연료 저장조 속의 사용후핵연료다발에 접근시키고, 장치를 지지부에 안전하게 고정시킨다. SCAI는 이런 조립절차에 의해 사용후핵연료 저장조의 안전조치 검사지점에 안전하게 설치되어 바스켓에 담긴 각각의 사용후핵연료다발 끝단으로 쉽게 이동된다.

SCAI는 1998년에 있었던 2개월 동안의 월성 1호기 사용후핵연료 이송현장에 조립되어 시설내 구조물 위에 안전하게 설치되었다. IAEA와 국가 검사관은 수조 속의 바스켓에 담긴 사용후핵연료다발을 임의로 선정하여 일련번호를 확인하는 검사활동에 SCAI를 적용하였다. 현장에 적용된 SCAI의 구성, 적용절차, 적용결과 등에 대해 다음의 결과를 얻었다.

- 국가 검사관은 SCAI를 간단히 조립하여 시설 구조물에 안전하게 설치할 수 있었다. SCAI는 안전조치 검사장비로서 운영상의 편리성을 갖는 것으로 평가되었다.
- 국가 검사관은 Supporting Frame의 Arm과 수조 속의 Turn Table을 조절함으로써 바스켓

에 담겨 있는 60 다발 가운데 임의로 선정된 핵연료다발 끝단을 정확히 시준할 수 있고, 한번 설정된 피사체와 카메라간의 초점에 의해 사용후핵연료다발 끝단을 짧은 시간내에 촬영하여 고해상도의 영상을 Monitor로 확인할 수 있었다. SCAI는 일련번호 확인작업에 대해 안전조치 검사장비로서의 재현성을 갖고 있는 것으로 평가되었다.

- 시설 운영자가 Fuel Loading 작업을 하는 동안 SCAI는 작업구역 밖으로 이동되었다가 검사관이 임의로 선정한 핵연료 다발 위로 이동하여 짧은 시간내에 핵연료다발 일련번호를 확인할 수 있었다. SCAI는 시설 운영자의 작업 방해를 최소화하면서 안전조치 검사목적을 효과적으로 달성한 것으로 평가되었다.
- IAEA와 국가 검사관, 그리고 시설운영자가 Monitor 상에 나타난 사용후핵연료다발 일련번호 영상을 동시에 확인할 수 있으며, 그림 4는 Monitor 상에 나타난 일련번호 영상의 예를 나타낸 것이다. SCAI는 일련번호 확인작업에 대한 투명성을 확보했으며, 사용후핵연료 이송기간에 IAEA와 국가 안전조치 검사목적 달성에 효과적으로 기여한 것으로 평가되었다.

3. 결 론

SCAI는 현장적용 시험을 통해서 IAEA 안전조치 기준에 의한 검사목적을 효과적으로 달성할 수 있도록 설계·제작된 안전조치 검사장비인 것으로 평가되었다. IAEA 안전조치 검사를 지원하고 동시에 국가 안전조치 검사목적을 달성하기 위해 설계·제작된 SCAI는 기존의 IAEA 장치(Underwater Telescope)에 비해 안전조치 검사장비로서의 편리성과 재현성, 그리고 일련번호 확인의 정확성 등 모든 면에서 우수한 것으로 평가되었다. 1998년에 있었던 월성 1호기 사용후핵연료 이송기간에 SCAI는 IAEA와 국가 검사관에 의해 성공적으로 사용되었으며, 적용결과는 IAEA 안전조치 기준을 충분히 만족시키고 있는 것으로 평가되었다. 향후, SCAI는 안전조치 검사장비로서의 IAEA 인증(Authentication)을 받음으로써 IAEA와 국가 안전조치 검사목적에 지속적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 새로이 개발된 SCAI는 IAEA 안전조치 검사 목적을 효과적으로 충족시킬 수 있었으므로, 본 연구는 원자력산업에 대한 우리나라의 핵투명성을 제고시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

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. IAEA, "The CANDU Course(Session 10 ; Verification of Irradiated CANDU Fuel Bundles (Method K)" (1993)
4. 박은호 외, "원자력통제기술센터 운영사업, 사찰기술분야", KAERI/MR-306/97 (1997)

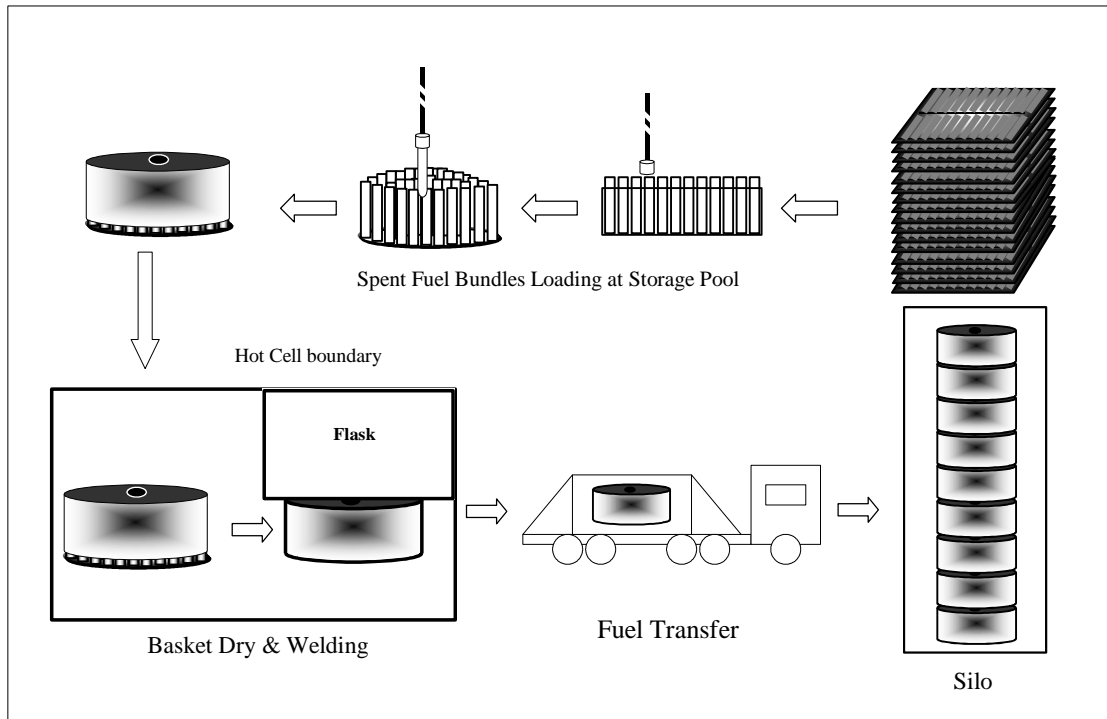


그림 1. CANDU 사용후핵연료 이송공정

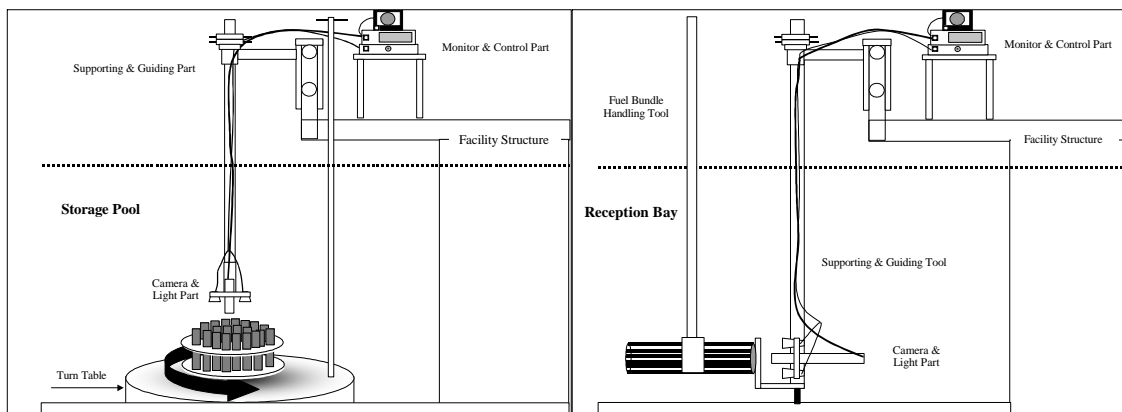


그림 2(A). SFP에 설치된 SCAI 배치도

그림 2(B). RB에 설치된 SCAI 배치도

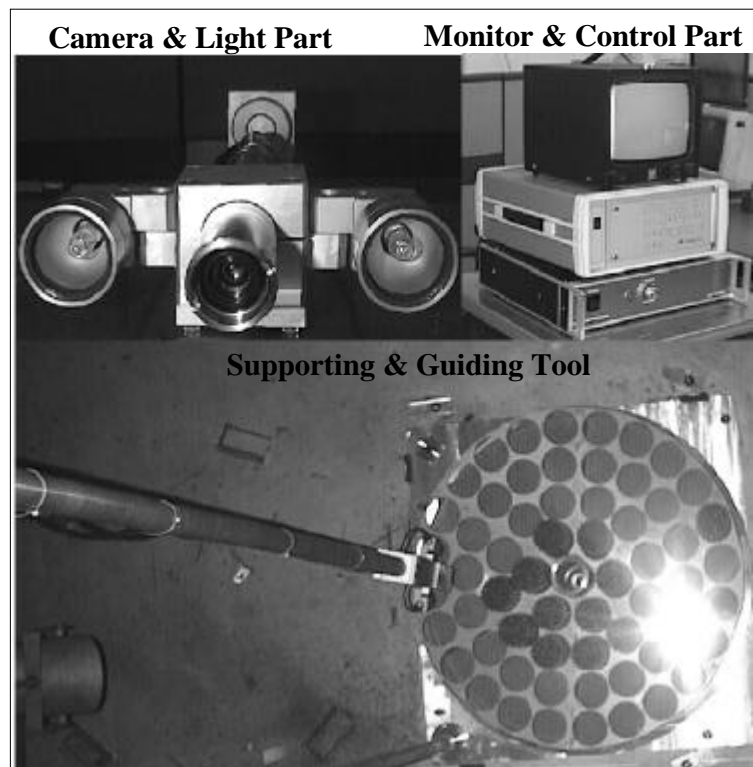


그림 3. SCAI 장치의 구성요소

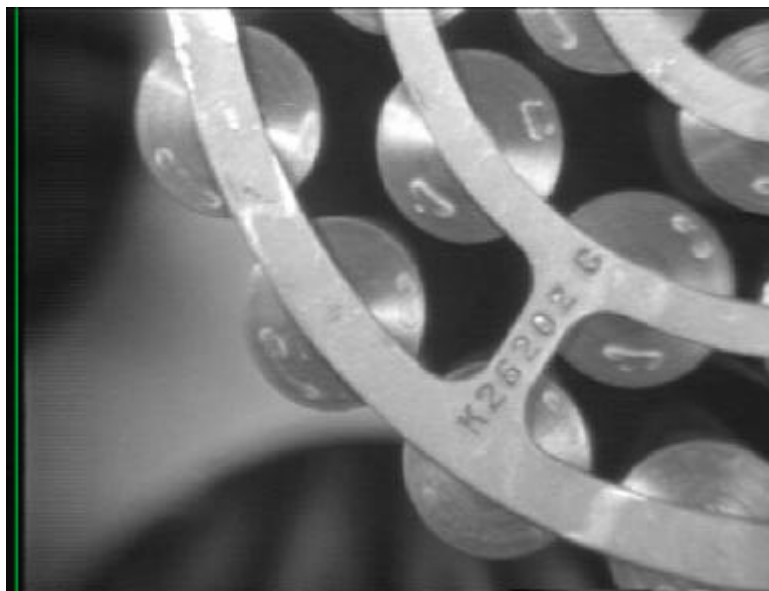


그림 4. SCAI가 인식한 CANDU 핵연료다발 일련번호 영상