2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

사용후CANDU핵연료 수중검증장치 개발 및 활용현황

Development and Application of Underwater Spent CANDU Fuel Verifier(SCAV) for Spent CANDU Fuel Verification

차홍렬, 박승기, 나원우, 안진수

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

임승강, 최기영

한국전력공사 월성원자력발전소
경상북도 경주시 양남면 나아리 260

요약

가압중수로형 원자력발전소에서 타고 나온 사용후핵연료는 플루토늄을 상당량 포함하면서 핵연료의 크기 또한 작아 전용가능성이 매우 높다. 수조속에 밀집,저장된 사용후CANDU핵연료의 수량확인 및 대량결손탐지를 위한 사용후CANDU핵연료 수중검증장치(Spent CANDU Fuel Verifier ; SCAV)를 개발하였다. 개발된 SCAV는 기계적인 성능시험과 현장시험을 토대로 1998년부터 월성발전소의 국가계량관리검사에 활용되기 시작하였다. TCNC와 IAEA가 공동으로 수행한 SCAV 인증시험 후, TCNC와 IAEA는 SCAV 공동활용을 통하여 안전조치활동의 효율을 증가시켰으며, 시설측의 부담을 경감시키는 효과를 얻었다. 그러나 IAEA의 초음파봉인을 위한 깔대기형 구조물, stack 사이의 간격, 핵연료의 냉각기간, 검출기의 민감도 등은 SCAV의 활용범위를 제한하고 있다. 본 논문에서는 이들 요인을 고려한 장비의 개발, 활용 및 문제점 등을 기술하고 있다.

Abstract

CANDU reactor, its inherent character of fuel on-loading and potential diversion path have made safeguards organization pay more attention for verification. Spent CANDU Fuel Verifier (SCAV) has been developed for item counting and NDA verification of spent fuel stored in stack of the storage pond by means of underwater gamma scanning. Since 1998 SCAV has been used for the national safeguards inspection at the Wolsong Plants. And also this equipment has been jointly used, since authentication test was successfully performed by TCNC and IAEA. Joint use of SCAV has increased the efficiency of safeguards activities and reduced operator burden. However, the scope of verification using SCAV has been limited by the detector sensibility, structure material for the ultrasonic bolt seal, distance between tray and tray, and cooling time of spent fuel. In consideration of these factors this paper shows its development and application.

1. 서론

가압중수로형(PHWR) 발전소중의 하나인 월성원자력발전소에서 연소된 CANDU형 사용후핵연료는 저장용기(tray)에 담긴 상태로 임시 저장고인 수조속에 장시간 냉각된 후, 건식저장고로 이송되어 저장되고 있다. 이와 같이 저장,관리되고 있는 사용후핵연료는 핵무기로의 전용이 가능한 플루토늄을 상당량 포함하고 있으면서 핵연료의 크기 또한 작아 전용가능성이 매우 높다. 따라서 주기적으로 IAEA의 사찰[1)]을 받는 매우 민감한 안전조치 대상물질일 뿐만 아니라 원자력통제기술센터(TCNC)에서 수행하고 있는 국가검사의 주요 대상 핵물질중의 하나이다. TCNC에서는 국가검사측면에서 이를 적절히 검증할 수 있는 장비의 개발이 요구되었다.

사용후핵연료의 핵분열생성물에서 방출되는 감마선을 이용한 비파괴검증기술[2),3)]은 안전조치분야에서 널리 활용되고 있다. 사용후핵연료를 비파괴적인 방법으로 검증하는 원리는 사용후핵연료에서 방출되는 감마선중 대표적인 Cs-137 662 keV 감마선세기 또는 gross intensity를 스케닝하여 피크를 구분하는 것이다. 이때 Cs-137 감마선을 이용하여 사용후핵연료의 진위를 파악하는 방법은 ‘Method H’, gross intensity를 측정하여 사용후핵연료의 수량을 파악하는 방법은 ‘Method I’로 구분된다. 따라서 간편하면서도 탐침형 CdZnTe 검출기[4)]를 사용하여 사용후핵연료저장 stack 사이로 상하방향으로 스케닝하여 감마선 스펙트럼을 수집할 수 있는 사용후CANDU핵연료 검증장치(Spent CANDU Fuel Verifier ; SCAV)를 개발하였다. 개발된 SCAV는 기계적인 성능시험과 현장시험을 토대로 1998년부터 월성발전소의 국가계량관리검사에 활용되기 시작하였다. IAEA와 공동으로 수행한 인증시험 후 IAEA와 TCNC간 SCAV 공동활용을 통하여 안전조치활동의 효율을 증가시켰으며, 시설측의 부담을 경감시키는 효과를 얻었다. 그러나 IAEA의 초음파 봉인을 위한 깔대기형 구조물과 밀집,저장된 stack 사이의 간격은 장비접근의 제한성을, 핵연료의 냉각기간, 검출기의 민감도등은 사용후핵연료 검출한계에 영향을 주고 있다.

2. 시스템 개발

2.1 장치 설계 및 제작

CANDU 원자력 발전소 사용후핵연료 저장수조에 16 trays 또는 19 trays로 stack되어 있는 사용후핵연료를 비파괴적으로 검증할 수 있도록 개발된 SCAV는 수조속의 사용후핵연료에서 방출되는 감마선을 검출하여 핵연료의 재고검증이 가능하면서 다음과 같은 특성을 갖도록 설계하였다.

- 현장검증에 사용하기 위하여 분해/조립이 가능하여야 하며 부피를 최소화 할 수 있어야 한다.
- 장치는 경량화되여야 하며 아울러 견고하여야 한다.
- 방사성물질 제염이 용이하여야 하며 장시간 사용 또는 보관하더라도 부식되거나 변형되지 않아야 한다
- 각종 제어장치 및 기계적 구조는 단순화하여 유지.보수가 용이하도록 하여야 한다
- 검증대상 시료 한 개에 대한 계측시간을 최소화하여 정해진 검사기간 동안에 가능한 많은 시료를 시험할 수 있도록 검출기의 차폐효과를 최대로 하여야 한다.
- 사용되는 검출기는 수중에서 상온에 장시간 사용될 수 있어야 하며 검출기의 교체가 용이해야 한다.

2.2 시스템 구성

그림 1은 월성원자력발전소 사용후핵연료 저장수조에 stack 단위로 보관되어 있는 사용후CANDU 핵연료 및 제작된 SCAV의 배치상태를 도식적으로 보여주며 그림 2는 개발된 SCAV 사진이며, 그림 3은 SCAV의 전자장치의 체계도이다. 그림 2에서 보듯 본 장치는 크게 3개 부분으로 구성되어 있다. 탐침형 CdZnTe 검출기를 보호 및 차폐하고 있는 검출부(detection part)가 Up-Down tube에 연결되어 수조속에 들어간다. 스테핑모터(stepping motor), 지지대(supporting frame), Up-Down 튜브 그리고 튜브 안내판(tube guide frame)으로 구성된 구동부(driving part)는 시설 bridge의 safety bar에 설치된다. 그리고 장치를 제어하기 위한 모터콘터롤러(motor controller)와 감마선 신호를 검출할 수 있는 탐침형 CdZnTe 검출기, 검출된 신호를 처리, 수집하는 전자장비(MCA, Amplifier) 그리고 신호의 분석을 위한 소프트웨어로 구성된 제어 및 신호 처리부(control & signal processing part)는 bridge위에 설치된다.

2.3 MCNP code에 의한 검출부(detection part) 감마스케닝 모사

사용후CANDU핵연료가 tray에 저장되어 16층 또는 19층으로 보관된 Stack을 수직 방향으로 감마스캐닝[3),5)] 하기 위해서는 탐침형 CdZnTe 검출기 둘레를 적절히 차폐 및 콜리메이션하여 주변의 사용후핵연료에서 입사하는 강한 세기의 감마선 영향을 차단할 수 있어야 한다. 그러나 stack간 간격이 10cm 이내로 매우 조밀하므로 충분한 차폐 효과를 얻기 위해 차폐체 두께를 증가시키는 것은 제한을 받고 있다. 이와 같은 검증 조건하에서 검출기를 적절히 차폐시키고 콜리메터를 통해 사용후핵연료에서 방출되는 감마선을 측정할 수 있도록 하기 위해, 차폐율이 좋은 텅스텐을 이용해 검출부를 설계,제작하였다.

차폐체 두께에 따른 수직 방향 감마 스케닝 결과를 모사하기 위하여 검출부의 각 위치별 상대적 계측확율분포를 MCNP code를 이용하여 계산하였다. 그림 4는 콜리메터 직경 7 mm, 텅스텐 두께 17.5, 30, 50mm에 대해 각각 계산된 Cs-137 662keV 감마선세기의 검출부 위치별 상대적 계측확율분포를 보여준다. 스케닝대상 사용후핵연료 및 주변의 핵연료들이 서로 동일한 연소도와 냉각기간을 갖는다고 가정하였으며, 콜리메터를 통하여 입사하는 Cs-137 662 keV 감마선과 차폐체에서 상호작용없이 입사하는 Cs-137의 662 keV 감마선만을 고려하였다. 그림 4와 같은 경향의 검출기 위치별 계측 확률분포는 사용후핵연료 다발 수량 파악을 위한 검증 방법(Method H & I)의 목적을 만족하고 있음을 간접적으로 보여주고 있다.

그림 4에서 보다 정확한 감마스케닝 결과를 얻기 위해서는 차폐체 두께를 증가시키는 것이 바람직하다. 그러나 차폐체 두께를 증가시키는 것은 제한되므로 현장상황을 고려하여 최적의 차폐체 두께를 결정해야 한다. 실제로 현장에 따라 stack 간격이 8 ~ 10 cm의 범위를 갖고 있고, 탐침형 CdZnTe 검출기의 크기(직경 8mm)를 고려했을 때 그림 4에서 차폐체 두께가 30 mm인 경우도 사용후핵연료간의 구별이 가능하기 때문에 본 검출부의 차폐체 - 텅스텐만의 두께를 30.5mm, 그리고 외부 스테인레스 라이닝을 포함한 차폐체 직경(두께)이 80mm가 되도록 하였다. 형태는 사각형과 실린더형 2종류가 이다. 그림 2(a)는 실리더형으로 제작된 검출부의 사진이다.

2.4 구동부(driving part)

시설 bridge 난간에 설치되는 구동부는 재질이 알루미늄이다. 지지대에 롤러를 부착하여 좌우 이동이 용이하게 하였으며, Up-Down 튜브에 부착된 rack gear와 스테핑모터에 의해 Up-Down 튜브와 검출부의 상하 이동이 되게 하였다. 아울러 상,하 리미트는 안전을 위하여 2차 제어기능을 한다.

현재 SCAV는 월성발전소의 각 호기별 전용으로 사용할 계획이므로 제한된 검사일정에서 장비의 설치 및 분해로 인한 시간을 줄이기 위하여 Up-Down 튜브, 스테핑모터, 튜브 안내판과 검출부는 조립된 상태로 사용후핵연료저장조에 보관하고 있다. 현장에서 사용시 조립보관되어 있는 SCAV 일부분을 시설 크레인으로 시설 bridge에 설치된 지지대에 간단히 올려 놓으면 된다.

2.5 제어 및 신호 처리부(control & signal processing part)

모터콘터롤러는 스테핑모터의 속도 및 scanning 방향을 제어하는 기능을 가지고 있다. 속도는 최저 2.2mm/sec에서 45mm/sec의 벙위를 갖고 있다. MCA는 독일에서 IAEA의 MSSP(Membership State Support Program)에 의해 개발된 MCA-166(GBS Elecktronik GmbH, Germany)를 사용한다. 사용후핵연료에서 방출되는 감마선세기가 세기 때문에 MCA-166에 내장된 amplifier는 검출된 신호처리 능력이 떨어진다. 따라서 이를 보완하기 위하여 신호처리속도가 우수하면서 pulse pile-up reject(PUR) 기능을 가진 외장형 TC-244 Amplifier(TELENEC, UAS)를 사용하고 있다. 탐침형 CdZnTe 검출기는 직경이 8mm, active volume이 각각 5mm^3, 1mm^{3}인 SDP310/Z/05s, SDP310/Z/01(Ritec Ltd., Latvia)가 사용된다. 검출기는 수중에서 사용되기 때문에 방수가 되어야 하므로 이를 위해 스테인레스 튜브로 방수처리를 하였다. 그리고 윈도우용 프로그램인 WinSCAN(GBS Elecktronik GmbH, Germany)은 독일이 MSSP의 일환으로 개발하여 IAEA에 제공한 것이다..

3. SCAV 활용 및 문제점

3.1 IAEA 인증 시험

IAEA에서는 TCNC가 개발한 SCAV를 공동으로 활용하기 위하여 1999년 월성원자력발전소 2호기 사용후핵연료 저장조에서 TCNC와 함께 시설현장의 지원을 받아 SCAV 인증 시험을 수행하였다[6]. 시험결과 SCAV는 기계적으로 수조속의 사용후CANDU핵연료검증에 충분히 활용할 수 있으며, 사용후핵연료에서 방출되는 감마선세기가 강하기 때문에 시험에 사용된 검출기 SDP310/Z/20s (active volume 10mm^3)보다 민감도가 각각 2배와 14배 정도 약한 SDP310/Z/05s나 SDP310/Z/01를 사용하면 보다 나은 결과를 얻을 수 있을 것이라는 결론을 얻었다.

3.2 검증방법 적용한계

사용후핵연료가 원자로에서 방출된 이후의 냉각기간에 따른 SCAV에 의한 검출한계를 조사하였다. 냉각기간 2년에서 3개월 사이의 사용후핵연료에 대해 SDP310/Z/20s 검출기로 냉각기간과 주변적재환경이 다른 stack중 7개 stack을 선정하여 측정된 감마선 전 스펙트럼(full spectrum)에서 Cs-137(662 keV) 피크의 검출한계를 확인하였다. 표 1은 냉각기간과 주변환경에 따른 Cs-137 662 keV 감마선 피크의 검출한계를 보여준다. 표 1에서 보듯, 검출기의 반대편에 핵연료가 없으면서 냉각기간이 1년 정도된 사용후핵연료에 대해서는 Cs-137 피크 검출이 가능했으나(Method H), 냉각기간이 더 짧은 사용후핵연료에 대해서는 Cs-137 피크 검출이 곤란하였다. 그리고 비록 냉각기간이 20개월 정도로 길어도 검출기 반대쪽에 냉각기간이 짧은 사용후핵연료가 있으면 Cs-137 피크 검출이 곤란하였다. 그러나 냉각기간이 짧은 연료에 대해서 Cs-137 662 keV 감마선 피크를 포함하는 넓은 에너지 영역의 region of interest(ROI)를 설정하면 ROI의 gross intensity 피크 검출은 가능하였다(Method I).

결과적으로 SCAV를 사용한사용후핵연료검증에 적용되는 방법은 Method H와 Method I 두 방법이 가능하다. 특히 냉각기간에 따른 적용가능한 검증방법은 검출기의 민감도와 밀접하기 때문에 비교적 민감도가 좋은 SDP310/Z/20s 검출기 대신 SDP310/Z/05s나 SDP310/Z/01 검출기를 사용하면 냉각기간이 더 짧은 사용후핵연료에 까지 적용한계를 확대할 수 있을 것으로 생각되며, 이에 대한 시험은 곧 수행할 예정이다. SDP310/Z/05s 검출기로 수집된 전 스펙트럼에서 Cs-137 662 keV 감마선의 피크를 구별할 수 있으면 662 keV 피크만을 따로 구분한 ROI를 설정하여 ROI에 해당되는 감마선만 분석하는 Method H, 그러하지 않으면 Cs-137 662 keV 영역을 포함하는 넓은 ROI를 설정하여 분석하는 Method I로 검출방법을 결정한다. 이때 Method I를 적용할 때는 SDP310/Z/05s 보다 민감도가 약한 SDP310/Z/01을 사용하면 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

3.3 SCAV 활용

TCNC는 1998년부터 국가계량관리검사에 SCAV를 활용하여 사용후CANDU핵연료의 재고검증을 수행하기 시작하였다. 이 후, 2000년부터 TCNC와 IAEA는 국가계량관리검사 및 IAEA 사찰의 물자재고검사때 SCAV를 공동으로 활용하고 있다. 이때 수집된 data는 서로 공유하면서 독자적으로 분석, 평가를 한다. TCNC와 IAEA는 그림 1과 같이 SCAV를 설치한 후, 사용후CANDU핵연료 검증을 위해 사용후CANDU 핵연료 24개씩 tray에 저장되어 16층 또는 19층으로 적재된 stack에서 sample size에 따라 임의로 선정된 column의 수직방향으로 스케닝하여 검출된 피크수를 확인하고 있다. 그림 5는 사용후핵연료저장조의 일반적인 layout을 보여준다. 그림 5에서 보듯 IAEA의 US 봉인을 위해 설치된 깔대기는 SCAV 검출부의 접근을 곤란하게 한다. 즉, 바닥에서 1, 2번째 trays의 한쪽 면 column 4 – 9에 해당되는 12 핵연료는 SCAV로 검증이 곤란하다. 한 개 사용후핵연료에 포함된 플루토늄의 양은 평균 67.8g으로 약 0.008 SQ(Significant Quantity)에 해당되며, 1개 stack에 총 813g Pu (0.096 SQ)의 양의 검증이 불가능하다. IAEA는 이 부분만 중탐지확율(RM 50%)로 sample size를 결정하여 추가로 stack을 옮겨 육안검증을 하고 있다.

4. 결과 및 고찰

그림 6은 사용후핵연료 저장수조의 바닥구조물과 깔대기에 의한 스케닝 시작위치 차이를 보여준다. 그림 7과 8은 2000년 월성발전소 1호기 물자재고검사때 1994년도 방출된 사용후핵연료에 대해 stack의 column 단위로 바닥에서 위쪽으로 스케닝하여 Method H에 의해 수집된 Cs-137 감마선세기 결과의 예로서 분석에 사용된 프로그램 'WnSCAN'으로 출력한 것이다. 그림 7, 8에서 가로축에 나타난 숫자는 프로그램에 의해 자동 search된 피크 수, 즉, 바닥에서부터 측정된 사용후핵연료를 의미한다. 그림 7은 Method H로 봉인 깔대기가 없는 부분에서의 스케닝한 19개 피크와 그림 8은 동일한 조건에서 봉인 깔대기가 있는 부분에서의 scanning한 17.5개 피크를 보여준다. 가장 왼쪽에 위치하고 있는 0.5 피크는 깔대기의 윗부분 즉, 바닥에서 2번째 tray 높이의 중간부분에서 스케닝한 결과이다. 그림 9는 1999년도 방출된 사용후핵연료에 대한 method I에 의해 검출된 gross 감마선세기를 스케닝한 결과를 보여준다. 그림 9를 그림 7, 8과 비교했을 때, 사용후핵연료 부분과 사용후핵연료 사이에 대한 검출된 감마선세기의 차이가 Cs-137 감마선세기를 수집한 경우에 비해 상대적으로 작음을 볼 수 있다. 이는 냉각기간이 짧은 사용후핵연료의 경우 gross 감마선세기를 측정했을 때 낮은 에너지 영역의 감마선세기가 매우 강하여 검출부의 차폐효과가 상대적으로 줄어들기 때문이며, 또한 넓은 ROI에서 Cs-137 감마선세기가 기여하는 정도가 상대적으

로 작기 때문이다.

그림 10은 검증된 stack의 column에서 바닥에서 8, 10, 13번째 tray의 사용후핵연료 연소도가 주변보다 낮은 경우를 보여준다. 즉, 특정 핵연료의 연소도가 지나치게 낮은 경우, 감마스케닝을 했을 때 사용후핵연료에서 방출되는 감마선세기가 주변의 연료보다 상대적으로 낮기 때문에 피크가 잘 검출되지 않는다. SCAV를 사용하여 검증한 1998년 이후로 이러한 현상은 간혹 있었으며, 이러할 경우 해당 column의 핵연료에 대한 연소도를 비교함으로 사용후핵연료가 존재하고 있음을 간접적으로 확인하고 있다.

5. 결론

1998년부터 SCAV를 안전조치 대상물질인 사용후핵연료를 비파괴적으로 검증하는데 활용해온 결과 국가계량관리검사에 충분히 활용할 수 있음을 확인하였다. 특히 TCNC와 IAEA가 SCAV 공동활용을 통하여 안전조치활동의 효율을 증가시켰으며, 시설측의 부담을 경감시키는 효과를 얻었다. 그러나 검증대상 중 시설 구조상 장비가 접근할 수 없는 부분과 현재 개발된 검출기의 민감도 한계로 인한 냉각기간이 짧은 핵연료등 극히 일부 물질을 검증하지 못하는 문제점은 있다. 이러한 문제는 현재 IAEA나 TCNC가 보유하고 있는 감마선검출장비로는 해결하기 어려운 문제이며, 해결책으로 새로운 개념의 검증시스템 개발이 필요하다.

6. 참고문헌

1. IAEA “Safeguards Criteria (1991-1995)”. 1992

2. D. Reilly, et al, “ Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials”, NUREG/CR-5550, 1991

3. R. Zarucki et al, “The Passive Gamma Ray Uno-Destructive assay Method for Verification of Non-Accesible Nuclear Material in Spent Fuel Ponds”, IAEA-SM-333/1594, 1994

4. R. Arlt, et al, “Overview of the Use of CdTe Detectors for the Verification of Nuclear Material in Nuclear Safeguards”, Nucl. Instr. and Meth. A322, 575, 1992

5. 나원우 외, “CANDU 사용후핵연료 검증을 위한 감마선 측정장치 설계”, ’96 추계학술발표 논문집, 대한방사선방어학회, 1996

6.곽은호 외, “원자력통제기술센터 운영사업, 사차기술분야”, KAERI/MR-332/99, 1999

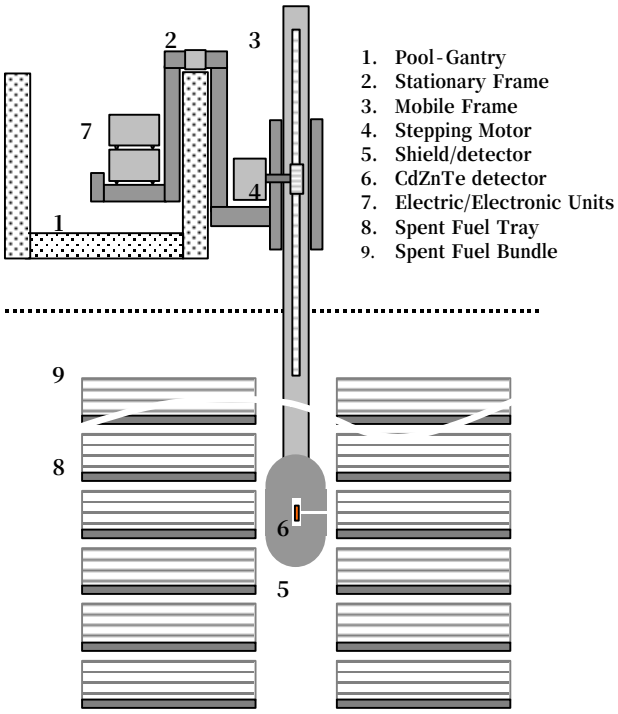
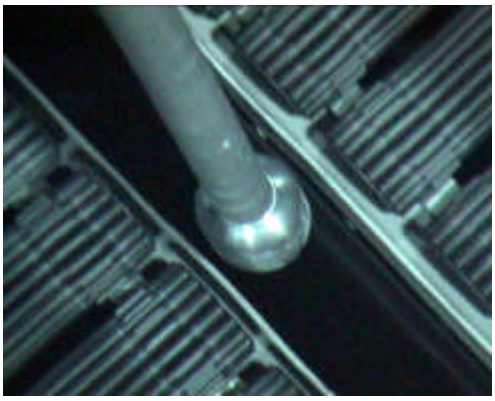
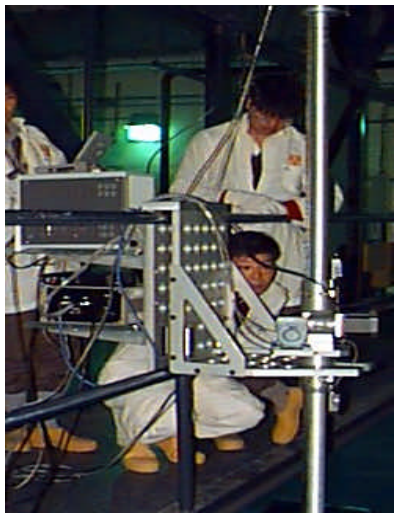


그림 1. 사용후핵연료저장조에 설치될 SCAV 개념도



(a) 실린더형 감지부



(b) 구동부

(c) 제어 및 신호 처리부

그림 2. SCAV의 구성 사진

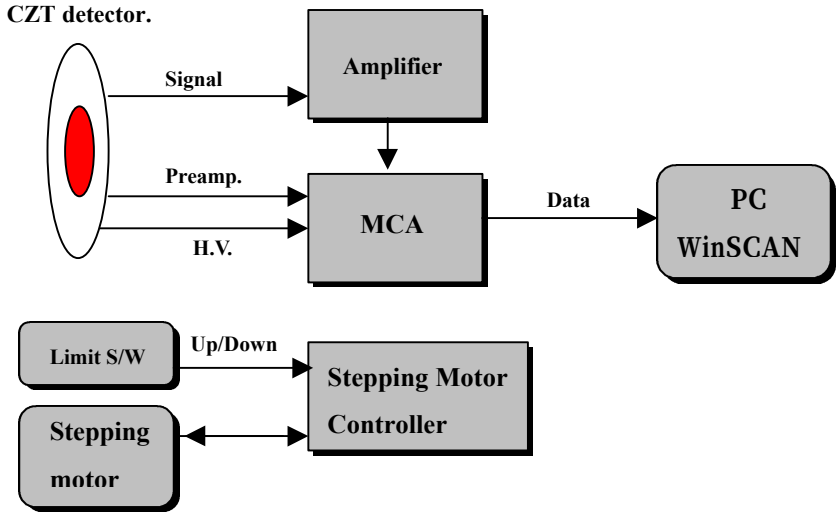


그림 3. SCAV 전자장치 체계도

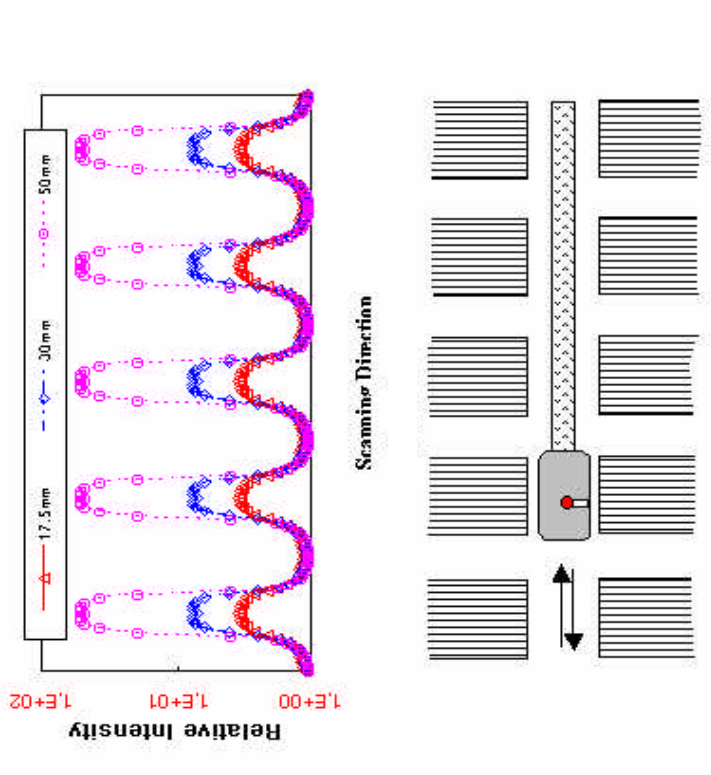


그림 4. 검출부 차폐체두께 결정을 위한 감마스캐닝 상대검출세기의 MCNP 모사

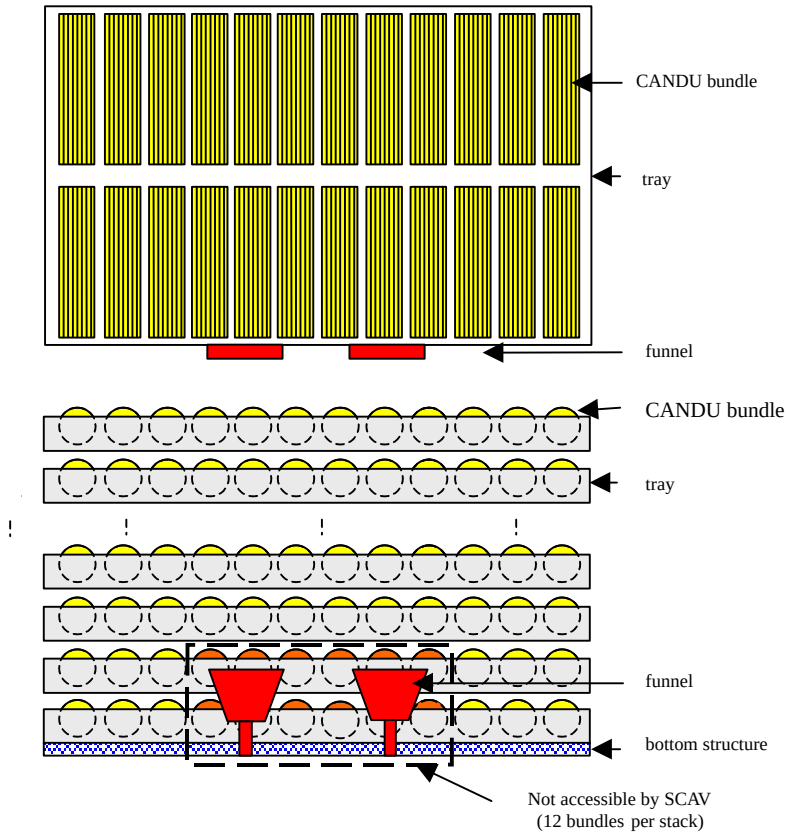


그림 5. 사용후CANDU핵연저장 stack 구조 (위) 상부 모습, (아래) 측면 구조

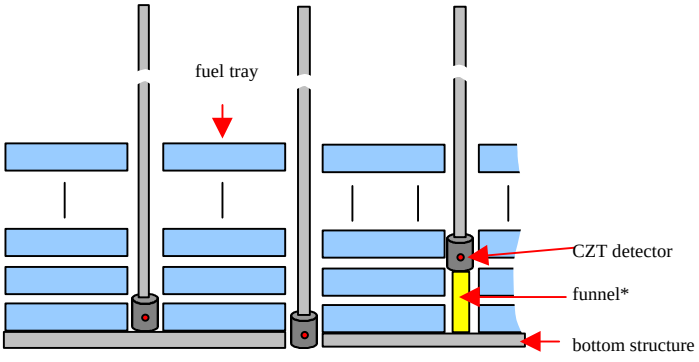


그림 6. 사용후핵연료저장조의 구조물에 따른 스케닝위치
(구조물 있을 때:왼쪽, 구조물 없을 때:가운데, 깔대기 위:오른쪽)

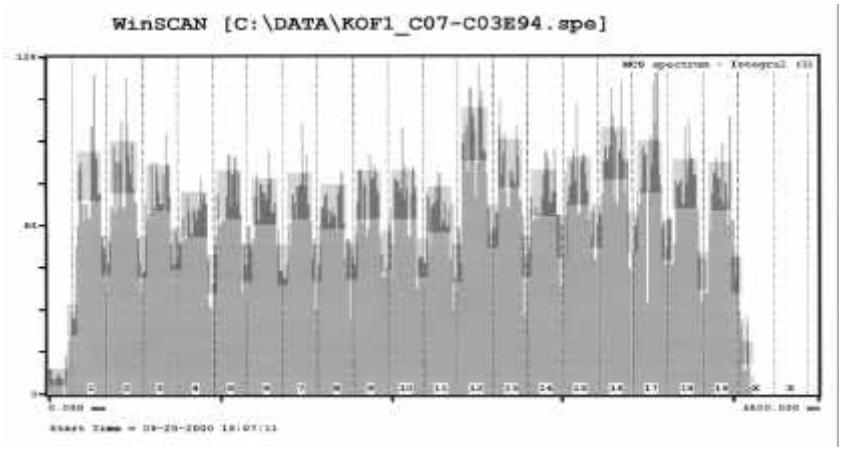


그림 7. Method H로 깔대기가 없는 부분에 사용후핵연료 스케닝결과(예)
(가로축: 바닥에서부터 tray 위치, 세로축: 측정된 Cs-137 감마선 세기)

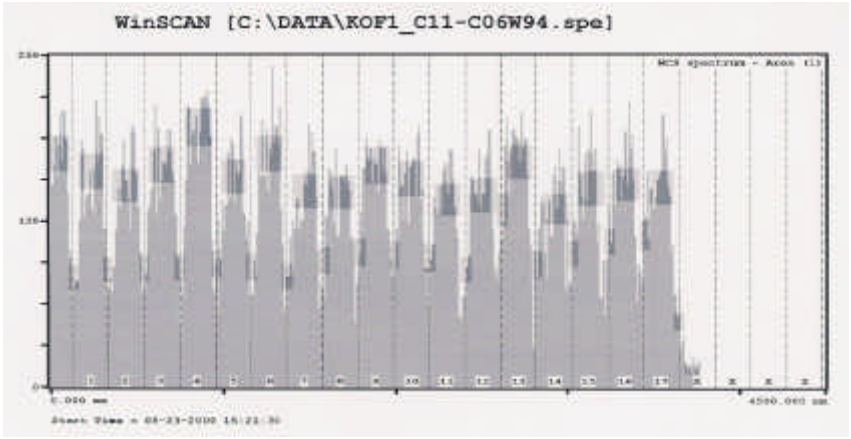


그림 8. Method H로 깔대기가 있는 부분에 사용후핵연료 스케닝결과(예)
(가로축: 바닥에서부터 tray 위치, 세로축: 측정된 Cs-137 감마선 세기)

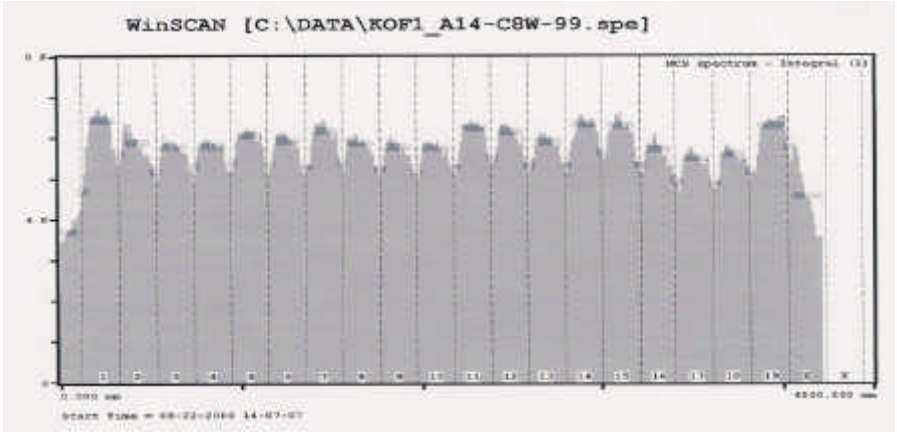


그림 9. Method I로 깔대기가 없는 부분에 사용후핵연료 스케닝결과(예)
(가로축: 바닥에서부터 tray 위치, 세로축: 측정된 gross 감마선 세기)

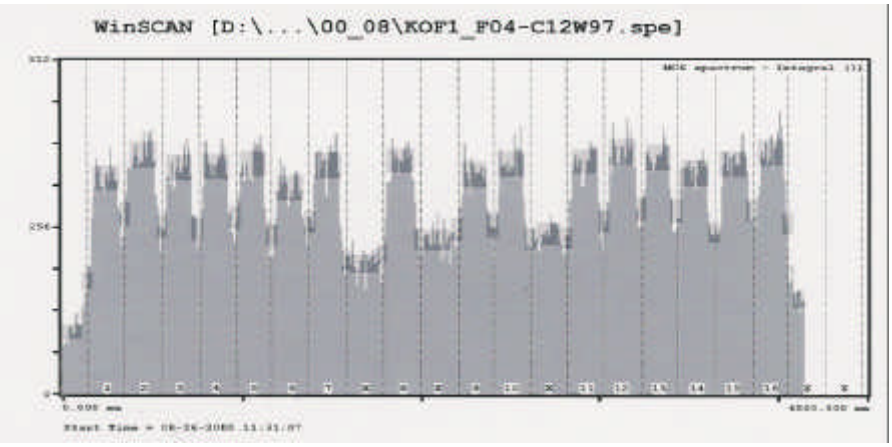


그림 10. Method I**로 이상부위가 발견된 사용후핵연료 스케닝결과(예)**
(가로축: 바닥에서부터 tray **위치, 세로축: 측정된** gross **감마선 세기)**

표 1. 냉각기간에 따른 Cs-137 662 keV **감마선피크의 검출한계**

구분	측정대상연료 냉각기간	콜리메터 반대편 연료 냉각기간	Cs-137 peak 검출여부
1	16 - 20개월	3개월	불가능
2	12개월	12개월	가능
3	12개월	-	가능
4	20개월	8 - 9개월	불가능
5	19개월	6개월	불가능
6	6개월	-	불가능
7	24개월	-	가능