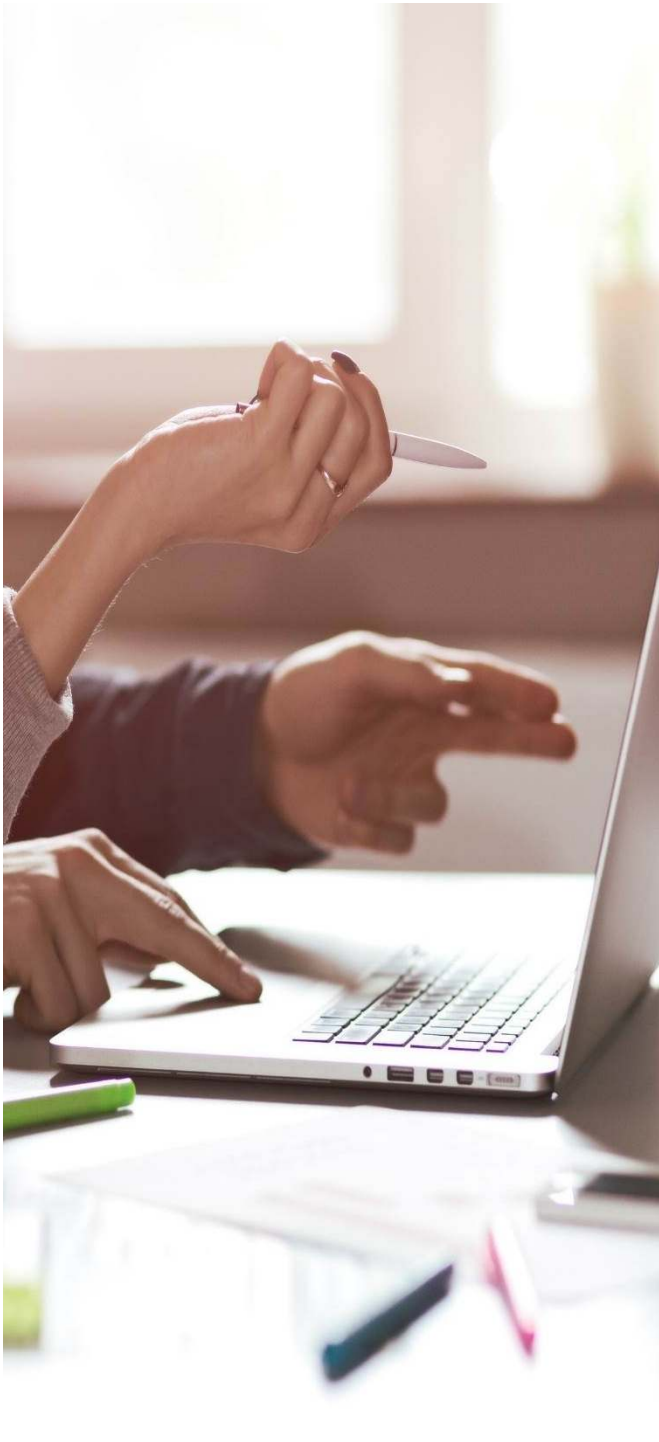


# 국내외 안전조치 검증장비 개발 현황과 전망

[NDA 장비를 중심으로]

2017 KNS 추계학술대회

- I. 안전조치 검증이란?
- II. 안전조치 검증기술
- III. 안전조치 비파괴 검증장비 종류
- IV. IAEA 검증장비 개발 현황
- V. 종합 및 전망



## I. 안전조치 검증이란

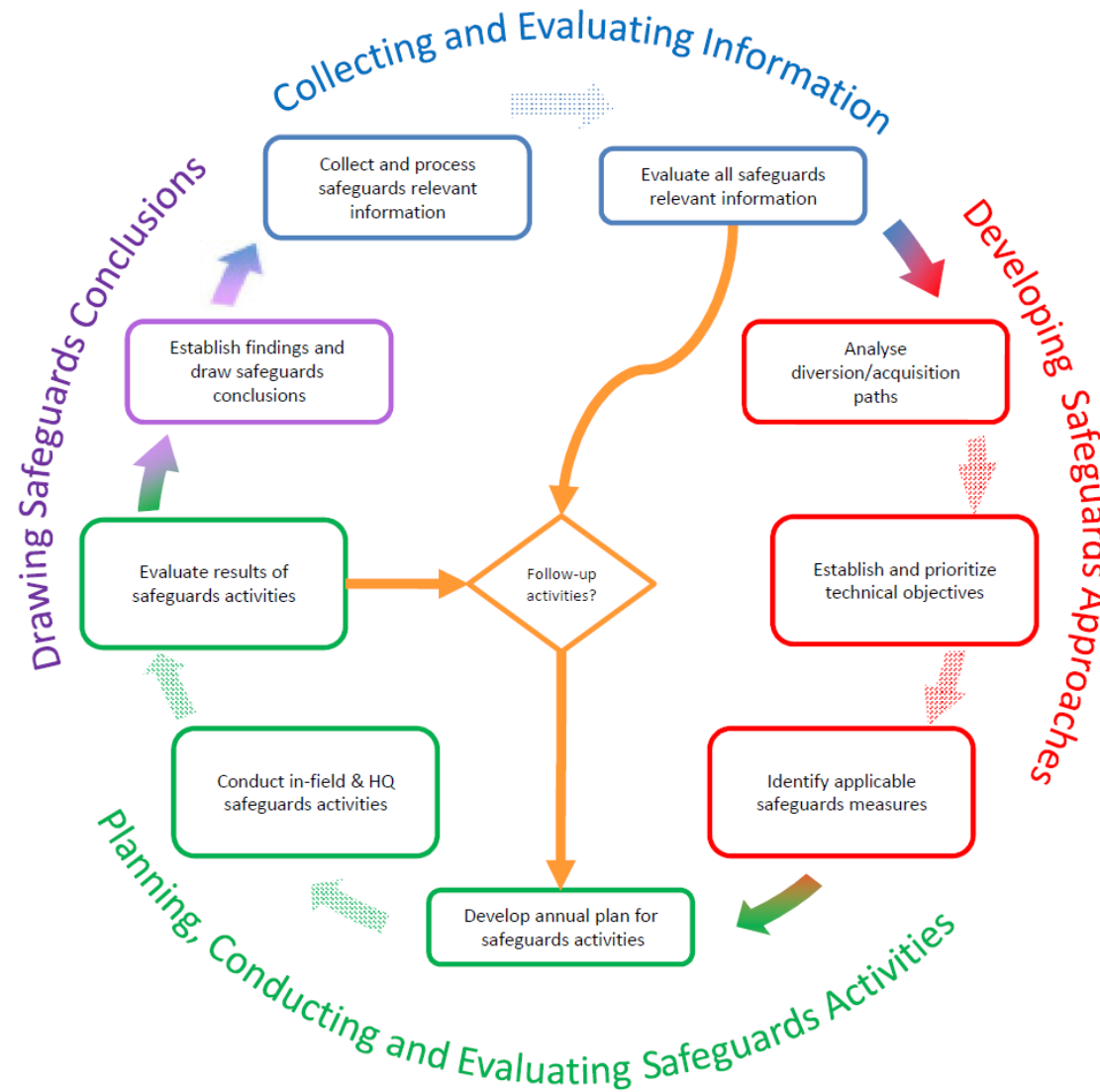


# 1. 안전조치 검증이란?



- ◆ 안전조치(Safeguards)란?
  - International Safeguards or IAEA Safeguards
  - A set of Technical Measures applied by the IAEA on Nuclear Material and Activities, for the Verification
  
- ◆ 무엇을 검증(Verification)할 것인가?
  - State's legal commitment
    - 1) Nuclear Facilities are not Misused and
    - 2) Nuclear Material not diverted from Peaceful Uses

# 1. 안전조치 검증이란?





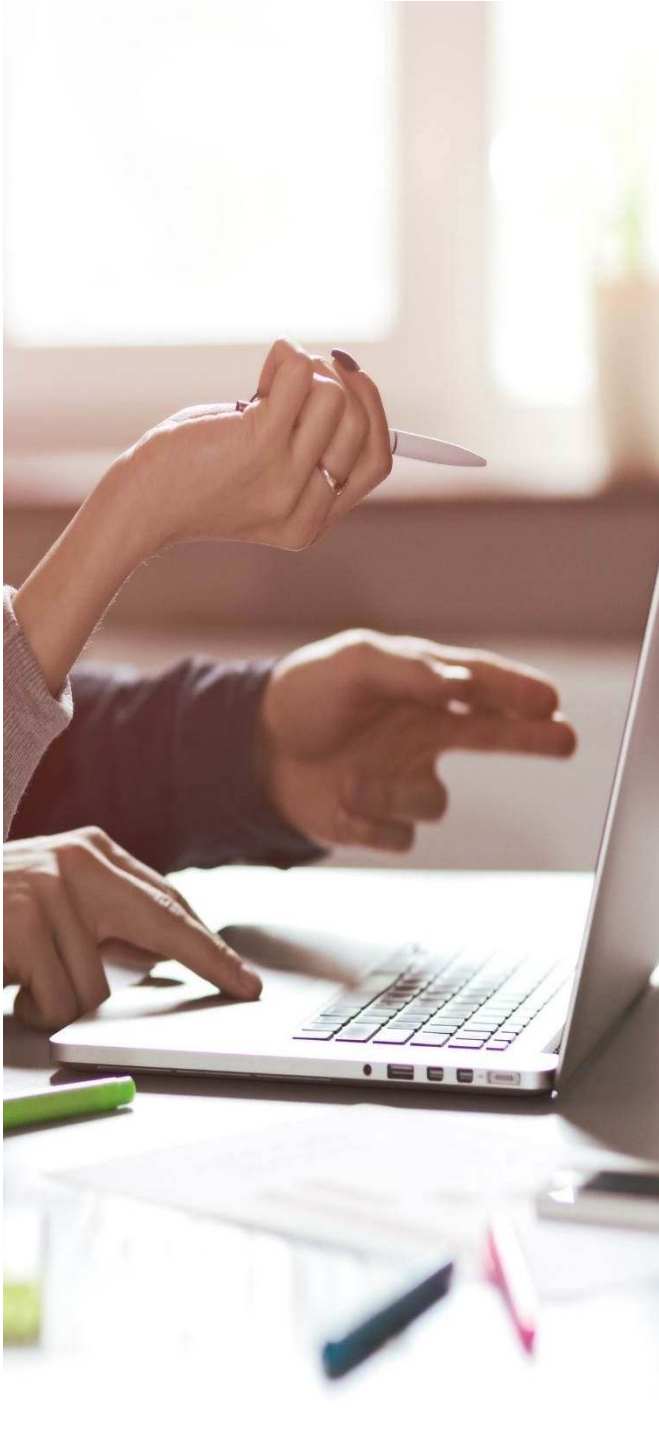
## II. 안전조치 검증기술



## II . 안전조치 검증기술의 종류



- ◆ 환경시료 샘플링
  
- ◆ 격납(봉인) 및 감시(=가장 원시적인 방법)
  - 목적 : 정보의 건전성 및 연속성 유지
  - 격납(봉인)장비 : 기계적, 광학적 및 전자적 방법
  - 감시장비 : 광학적 방법 및 방사선 측정 방법
  
- ◆ 파괴분석(직접분석=가장 정확한 방법)
  - 목적 : 접근이 쉽거나, 정교하게 핵물질을 측정
  - 특징 : 시료 채취 및 분석, 화학분석 실험실
  
- ◆ 비파괴 분석
  - 목적 : 접근이 어렵거나(Difficult to Access), 신속하게 현장에서 핵물질을 측정
  - 특징 : 계측장비 / 표준선원 검교정



### III. 안전조치 비파괴 검증장비 종류





### III. 안전조치 비파괴 검증장비의 종류



- ◆ 검증대상
  - 매력도, Item / Bulk, 조사전 / 조사후
  
- ◆ 검증범위
  - 정량적 검증 : 개수/질량 (전체 : Item / 부분 : Item & Bulk)
  - 정성적 검증 : 농축도/조성
  
- ◆ 검증기술(수단/방법) -> 다양화
  - 물리적특성/방사선(r,n)/열/레이저, 수동/능동
  
- ◆ 원자력시설 유형
  - 농축시설(매력도↑, Bulk, 조사전, 정량/정성)
  - 가공시설(매력도↓, Bulk+Item, 조사전, 정량/정성)
  - 원자로시설(매력도↓, Item, 조사전, 정량/정성 + 조사후, 정량)
  - 재처리시설(매력도↑, Item+Bulk, 조사후+전, 정량/정성)
  - 저장시설, 처분시설(매력도↓, Item, 조사후, 정량/정성)

### III. 안전조치 비파괴 검증장비의 종류



#### 1. 물리적특성을 이용한 장비

장 비	활용 분야
Load Cell Weighing System (LCBS)	- UF <sub>6</sub> 실린더 무게 측정
Improved Cerenkov Viewing Device (ICVD)	- 사용후핵연료 검증
Ultrasonic Thickness Gauge (ULTG)	- 용기벽 두께 측정 (1.2 ~ 200 mm)
Densitometer (PD20)	- D <sub>2</sub> O (Heavy Water) 밀도 측정



LCBS



ULTG

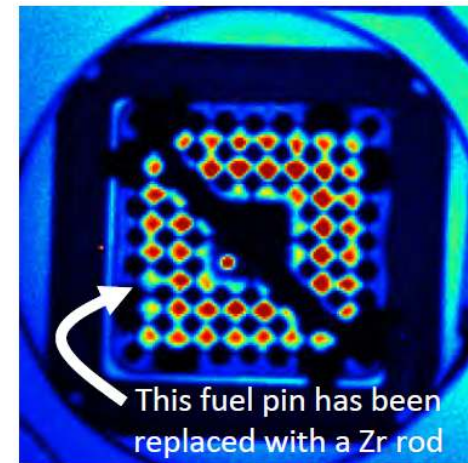
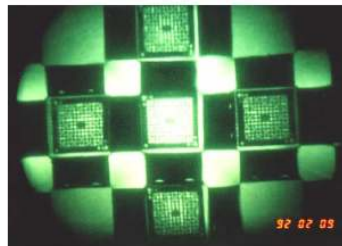
# III. 안전조치 비파괴 검증장비의 종류



## <ICVD & DCVD>



Mark IV CVD  
viewing PWR fuel



출처 : “Addressing Verification Challenges”

# III. 안전조치 비파괴 검증장비의 종류



## 2. 수동적 감마선 (Passive Gamma)을 이용한 장비

장 비	활용 분야
Hand Held Assay Probe (HM-5)	- 연료집합체 및 연료봉의 실제 길이 결정 - U-235의 존재여부 검증
Inspector2000 MCA + NaI detector (IMCN)	- U-235 농축도 검증 (bulk uranium, pellets, fuel pins)
Inspector2000 MCA + Ge detector (IMCG)	- UF <sub>6</sub> 실린더의 U-235 농축도 검증
Inspector2000 MCA + CdTe detector (IMCC)	- 사용후 LWR 핵연료 집합체 검증



MMCA



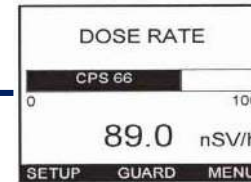
IMCA

# III. 안전조치 비파괴 검증장비의 종류



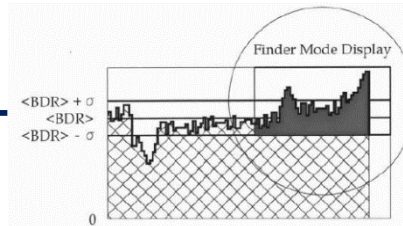
<HM-5 (NaI) : 다용도>

1. 선량률 모드



2. 핵종확인 모드

3. 선원검색 모드

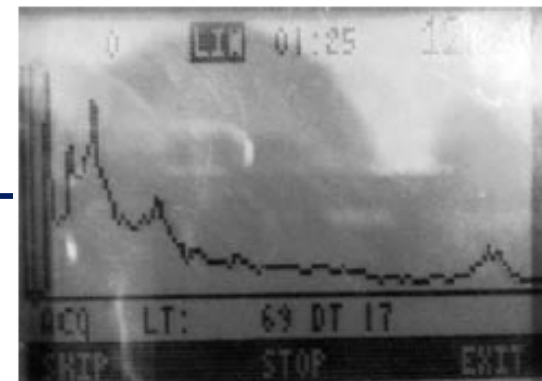


4. 고급모드

- Pu/U 검증 : ROI내 채널들의 총계수와 불확도를 계산
- U-235농축도 측정
- Active Length 측정
- Spectrum

Ac-228	Ag-108m	Ag-110m	Am-241	Annih. Rad.
Ba-133	Be-7	Bi-207	Bi-212	Bi-214
Cd-109	Ce-139	Co-57	Co-58	Co-60
Cr-51	Cs-134	Cs-137	DU-238	Eu-152
Eu-155	Fe-59	Ga-67	Hf-181	I-123
I-125	I-131	I-133	I-134	I-135
In-111	Ir-192	K-40	Mn-54	Mn-56
Na-22	NP-237	Pb-214	Pd-103	Pu-239
PU-240	Ra-226	Ru-106	Sb-124	Sb-127
Se-75	Tc-99m	Th-232	Tl-201	Tl-208
U-233	U-235	U-238	Xe-133	Y-88
Zn-65				

ISOTOPE	ROI	중심 에너지값(Centroid)
U-235	159-220	186
Pu	188-235	208
Th-232	218-268	238
DU	280-450	420
Am-241	40-80	60

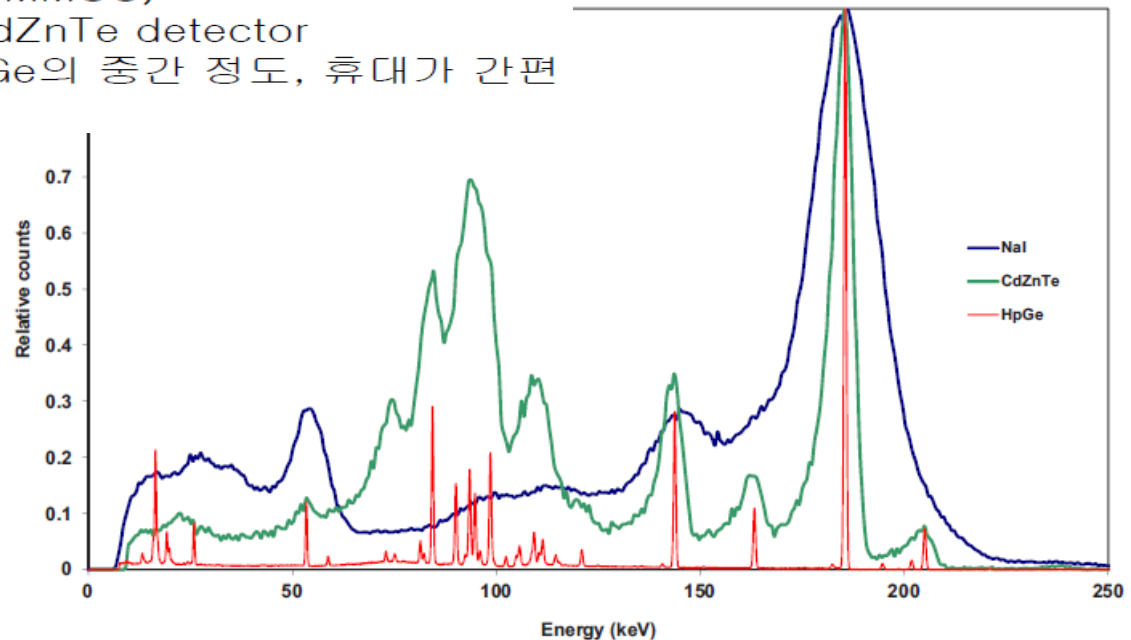


# III. 안전조치 비파괴 검증장비의 종류



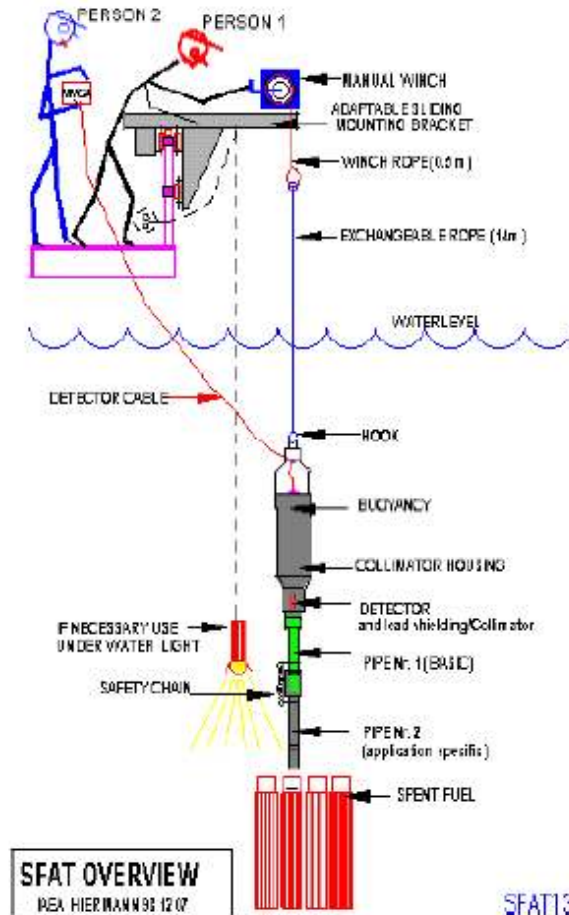
## <IMCN, IMCG, IMCC>

- 저분해능 감마선 분광분석법 (IMCN, MMCN)  
: Multichannel Analyzer, NaI detector
  - 검출 효율이 높고 휴대가 간편
  - 신연료 측정에 주로 사용
- 고분해능 감마선 분광분석법 (IMCG, MMCG)  
: Multichannel Analyzer, HPGe detector
  - 우수한 에너지 분해능으로 핵종 분석이 용이
  - 검출기를 액체질소로 냉각해야하는 단점
  - 사용후핵연료 및 신연료 농축도 측정에 주로 사용
- 감마선 분광분석법 (IMCC, MMCC)  
: Multichannel Analyzer, CdZnTe detector
  - 에너지 분해능이 NaI와 Ge의 중간 정도, 휴대가 간편
  - 신연료 측정에 주로 사용



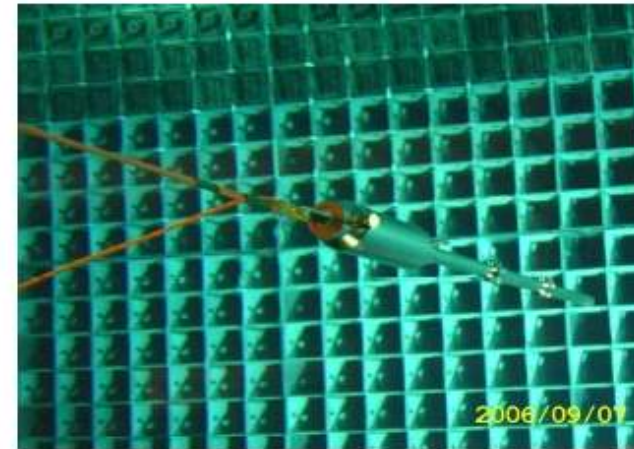
# III. 안전조치 비파괴 검증장비의 종류

## <SFAT (NaI or CZT) : 감마선 에너지 스펙트럼 분석>

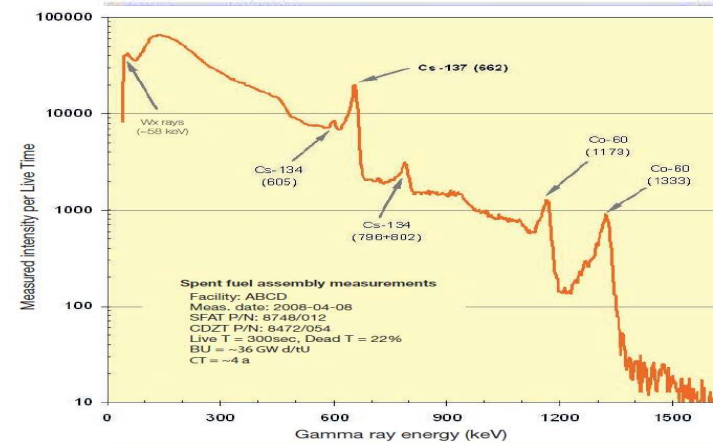


SFAT 측정 방법

SFAT13



SFP에서의 SFAT 측정

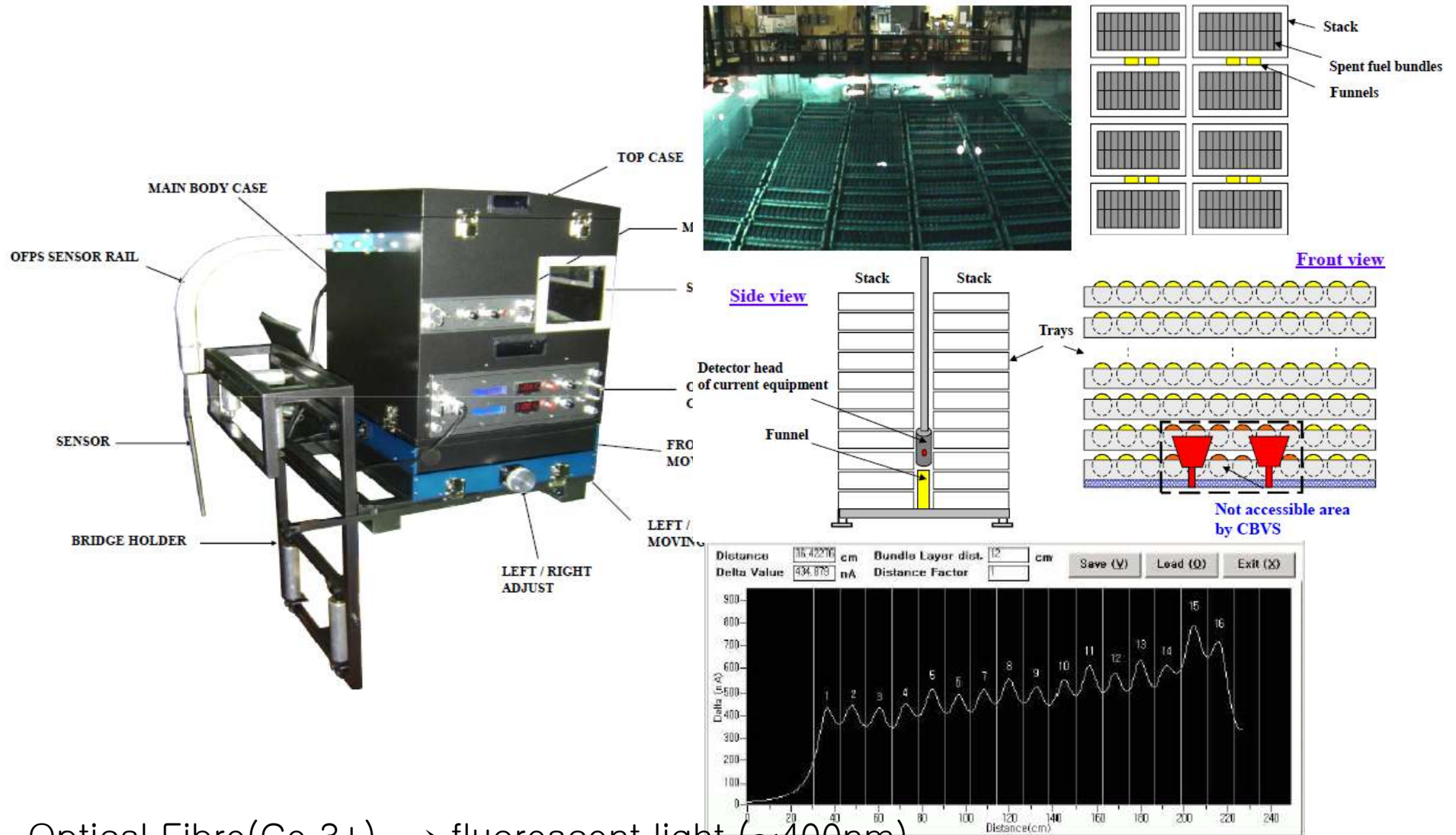


SFAT 측정 결과 분석

# III. 안전조치 비파괴 검증장비의 종류



## <OFPS (Optical Fibre Scintillator) : 감마선 강도(Intensity) 측정>



Optical Fibre(Ce 3+) → fluorescent light (~400nm)



# III. 안전조치 비파괴 검증장비의 종류

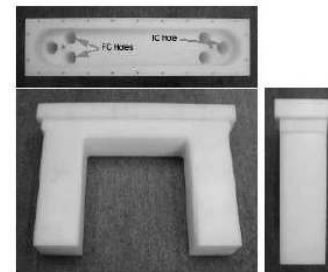


## 3. 수동적 중성자 (Passive Neutron)을 이용한 장비

장 비	활용 분야
High Level Neutron Coincidence Counter (HLNC)	- PuO <sub>2</sub> 재고 검증
Inventory Sample Counter (INVS)	- 작은 Pu 시료 양 측정
Plutonium Neutron Coincidence Counter (PNCL) Fork Detector (FDET)	- 핵연료 집합체의 Pu 양 측정



**Fission chamber (4)**

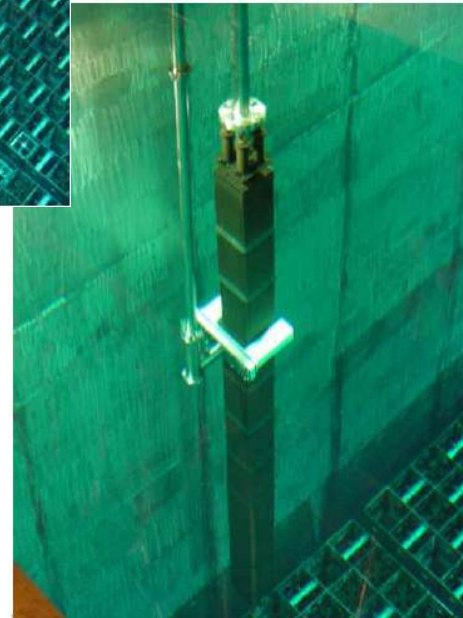


**Ion chamber (2)**

# III. 안전조치 비파괴 검증장비의 종류



## 3. 수동적 중성자 (Passive Neutron)을 이용한 장비






## IV. IAEA 검증장비 개발 현황



# IV. IAEA 안전조치 검증장비 개발 현황



## <주요 참고문헌>

 **60 Years**  
IAEA *Atoms for Peace and Development*  
Board of Governors

GOV/2017/23  
Date: 12 May 2017

Restricted Distribution  
Original: English

---

**For official use only**  
Item 8(b) of the provisional agenda  
(GOV/2017/22)

### The Safeguards Implementation Report for 2016

*Report by the Director General*

---

**Main Developments in 2016**

- The amount of nuclear material under safeguards increased to 204 073 significant quantities.
- Two additional protocols entered into force and one additional protocol has been applied provisionally pending its entry into force. Two operational small quantities protocols were amended.
- The broader conclusion was drawn for the first time for two States, and implementation of integrated safeguards started in three States.
- The Agency completed updating State-level safeguards approaches for the remaining States in the original group of 53 States that were already under integrated safeguards at the start of 2015, and developed State-level approaches for 11 other States.
- Through the Modernization of Safeguards Information Technology (MOSAIC) project, the Agency developed six new applications and continued to improve the performance and security of the safeguards information system.

---

**Recommended Action**

The Board is invited to take note of the Agency's *Safeguards Implementation Report for 2016* attached hereto.

The Board is invited to authorize the release of the *Safeguards Statement* and the Background to the *Safeguards Statement* and Summary.

STR-382

## Development and Implementation Support Programme for Nuclear Verification 2016–2017

Vienna, February 2016

 **IAEA**  
International Atomic Energy Agency

STR – 375

## IAEA Department of Safeguards Long-Term R&D Plan, 2012-2023

Vienna, January 2013

 **IAEA**  
International Atomic Energy Agency

## IV. IAEA 안전조치 검증장비 개발 현황



1. 우라늄 성분 및 농축도 통합 분석 시스템 (COMPUCEA, Combined Procedure for U Concentration and Enrichment Assay)
2. 휴대형 라만레이저 분광계 (A hand-held Raman Spectrometer)
3. 개량형 캐스케이드 헤더 농축 모니터 (CHEM, Cascade Header Enrichment Monitor)
4. 포크형 사용후연료 계측기 (FDET, Fork Detector Irradiated Fuel Measuring System)
5. 수동형 감마방출토모그래피 (PGET, Passive Gamma Emission Tomography)
6. 개량형 CANDU 연료 검증장비 (CBVB, CANDU Bundle Verifier for Baskets)
7. 속중성자컬러시스템 (FNCL, Fast Neutron Collar System)

# IV. IAEA 안전조치 검증장비 개발 현황



## 1. 우라늄 성분 및 농축도 통합 분석 시스템 (COMPUCEA, Combined Procedure for U Concentration and Enrichment Assay)

- A. Uranium Elemental Content : L-edge densitometry (U, 17.17 keV)
  - 30kV/100uA X-ray generator
  - a Peltier-cooled, high-resolution 10mm<sup>2</sup> x 0.5 mm Si drift detector
- B. U-235 abundance : Gamma Spectrometry (U-235, 185 keV)  
(Lanthanum-bromide detector, LaBr<sub>3</sub>(Ce))



IAEA 2<sup>nd</sup> COMPUCEA system



Hybrid K-edge Densitometer at OSL

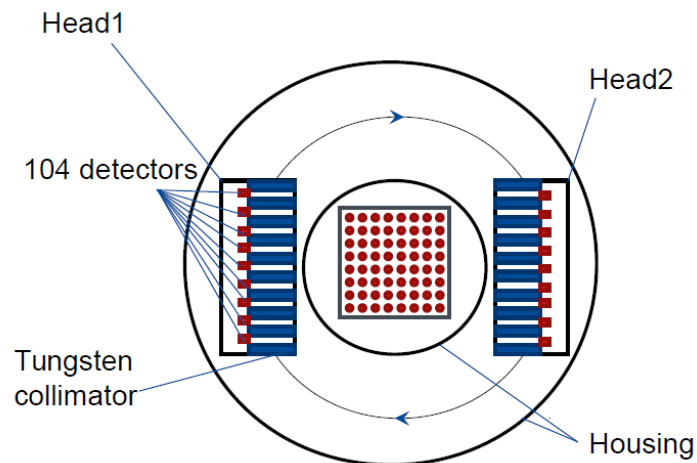
## 5. 수동형 감마방출토크그라피 (PGET, Passive Gamma Emission Tomography)

### A. Gamma Spectrometry (Eu-154, 1274KeV)

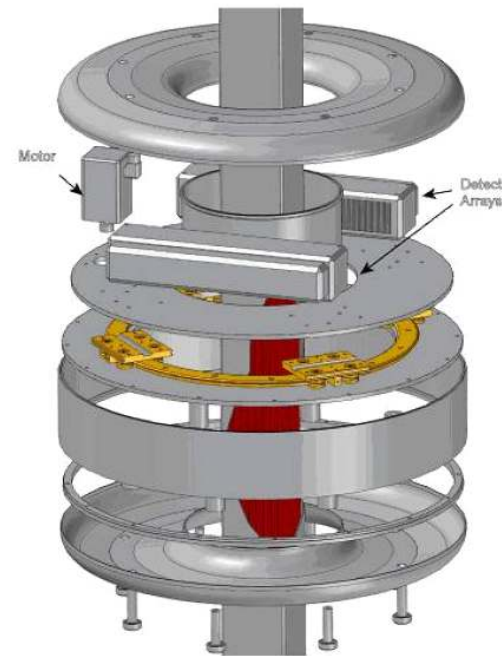
– A directionally Collimated Detector Array System

(Lanthanum-bromide detector, LaBr<sub>3</sub>(Ce))

### B. Mechanical & Electronics



Detectors arranged in 2 Head



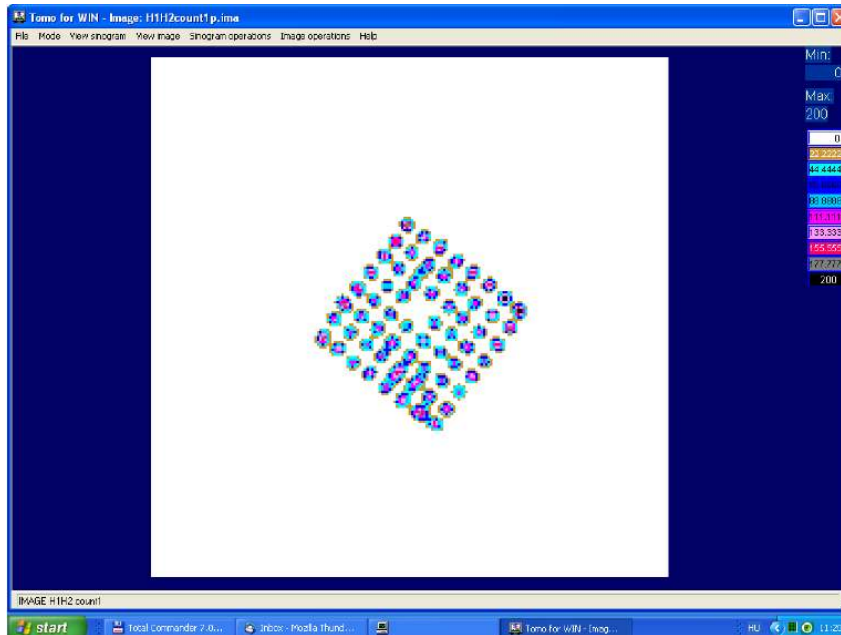
Mechanical design of prototype

출처 : “A Prototype for passive gamma emission tomography, STUK”

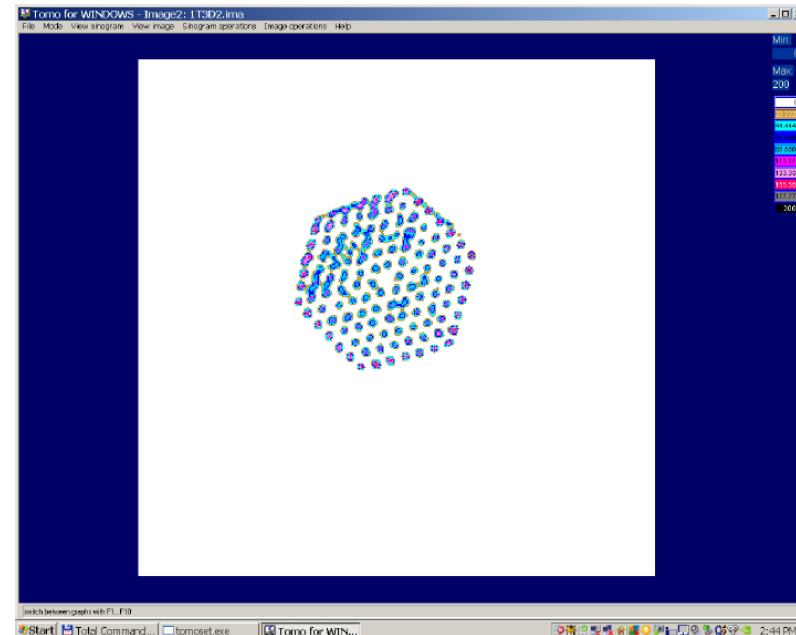
# IV. IAEA 안전조치 검증장비 개발 현황



## 5. 수동형 감마방출토모그래피 (PGET, Passive Gamma Emission Tomography)



Olkiluoto BWR 8X8, 2013



Loviisa VVER Hexagonal, 2014

출처 : “A Prototype for passive gamma emission tomography, STUK”





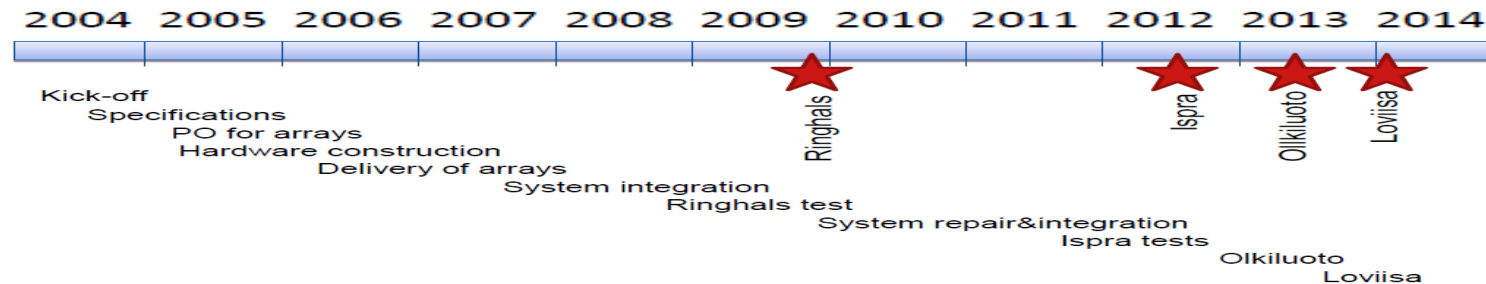
## V. 종합 및 전망



## IV. 종합 및 전망



1. IAEA는 회원국과의 공동연구(MSSP)를 통해 검증장비의 개발을 지속적으로 수행하고 있음



2. 미조사연료(펠릿, 파우더)는 현장에서 실험실에서의 불확도와 대등한 수준의 준실시간적 정량적(농축도) 분석을 요구하는 추세
3. 조사된연료는 CZT기반 계측기 혹은 토모그라피 기술이 각광받고 있음

감사합니다

[kimwj@kinac.re.kr](mailto:kimwj@kinac.re.kr)