

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

# In-situ 환경방사능평가 기술 현황 및 발전방향

한국원자력안전기술원 변종인



# Contents

**I** 배경 및 목적

**II** In-situ 환경방사선 평가 기술

**III** In-situ 환경방사능 평가 기술

**IV** 발전방향

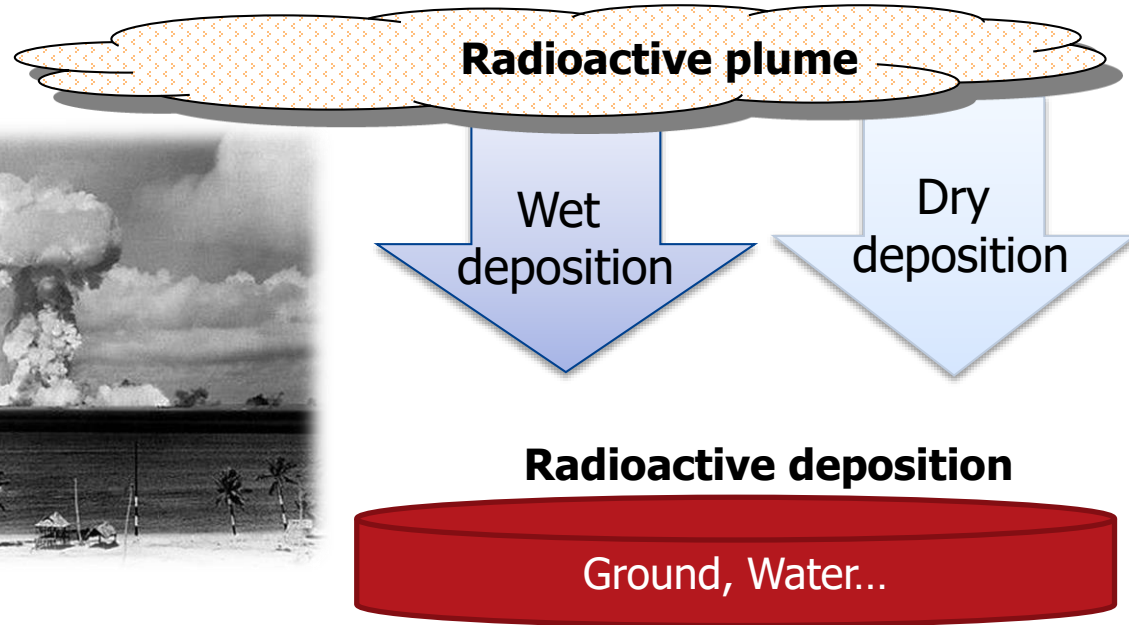
국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

# I. 배경 및 목적

## 배경 및 목적

- ▶ 핵폭발, 원자력시설의 예상치 못한 방사능 누출 사고로 인한 대기, 지표면, 수질 등에 대한 신속한 방사능 평가
- ▶ 국가 환경방사능 준위 평가
- ▶ 기타 광역의 방사선/능 평가

- Three Mile Island Incident (1979)
- Chernobyl crisis (1986)
- Fukushima accident (2011)



- ▶ 강점: 신속한 방사능 평가, 조사지역 대표성, 시료채취로 인한 시간 및 인적 자원 절약
- ▶ 약점: 시료채취 분석에 비해 불확도가 클 수 있음

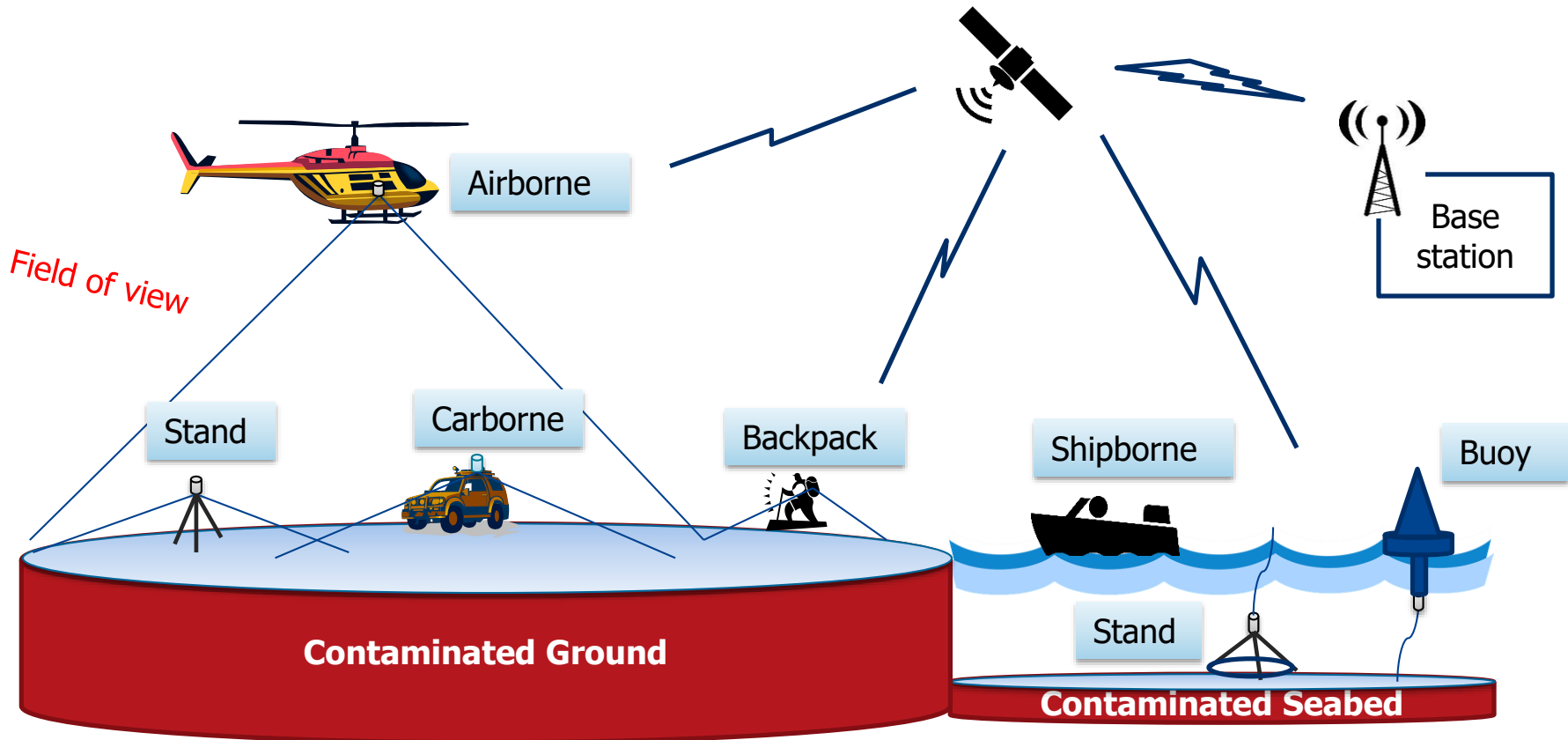
- ❖ 원자력이용시설 주변 및 전국토 환경방사선/능 준위 평가
  - 시료채취 방법과 함께 신뢰성 있는 환경방사선/능 평가
  
- ❖ 원자력 및 방사선 사고 비상 대응
  - 신속한 주민보호 조치 및 방사선으로부터의 피해를 최소화 하기 위한 의사결정자의 상황분석 및 대책 마련을 위한 근거 자료 생산
  - 신속하고 투명한 환경방사선/능 현황공개로 통한 국민의 막연한 불안감 해소 및 신뢰성을 확보함으로써 사회적 혼란 방지
  - 다양한 사고 시나리오에 대하여 신속·정확한 환경감시를 위해서는 체계적인 감시 전략의 수립이 필요

## 사고 유형에 따른 환경으로의 유출 방사성 핵종 (IAEA-TECDOC-1092)

Nuclear accident scenario	Radionuclides of importance		
	In the first day (Radionuclides with half-lives of 6 hours and greater)	In the first week (Radionuclides with half-lives of about 1 day and greater)	Long term
Reactor meltdown with or without failed containment	Y-90, Sr-91, Y-93, Nb-96, Zr-90, Mo-99, Rh-105, Pd-109, Ag-111, Pd-112, Cd-115, Sn-121, Sn-125, Sb-126, I-131, I-132, Te-131m, Te-132, I-133, I-135, La-140, Pr-142, Ce-143, Pr-143, Ba-146, Nd-147, Pm-149, Pm-151, Eu-152m, Sm-153, Sm-156, Eu-157, Np-239	Rh-86, Sr-89, Y-90, Y-91, Nb-95, Zr-95, Nb-96, Mo-99, Tb-160, Ru-103, Rh-105, Ag-111, Pd-112, Cd-115, Cd-115m, Sn-121, Sb-124, Sn-125, Sb-127, I-131, Te-131m, Te-132, I-133, Cs-136, Ba-140, La-140, Ce-141, Ce-143, Pr-143, Nd-147, Pm-149, Pm-151, Sm-153, Np-239	H-3, Sr-89, Sr-90, Y-91, Nb-93m, Nb-95, Ru-103, Ru-106, Ag-110m, Cd-113m, Cd-115m, Sn-121m, Sn-123, Sb-124, Sb-125, I-129, Cs-134, Cs-137, Ce-141, Ce-144, Pm-147, Tb-160, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Am-241, Pu-241, Cm-242, Pu-242, Am-243, Cm-244
Reactor meltdown with particle containment	H-3, Rb-88, Sr-89, Sr-90, Y-90, Sr-91, Y-91, Ru-103, Ru-105, Ru-106, I-121, I-123, I-132, I-134, I-135, Cs-136, Cs-138, Cs-139, Ba-139, Ba-140, La-140	H-3, Sr-89, Sr-90, Ru-103, Ru-105, Ru-106, I-131, I-133, Ba-140, La-140	H-3, Sr-89, Sr-90, Tc-99, Ru-103, Ru-106, I-129, I-131, Cs-137
Nuclear fuel reprocessing plant release	Sr-90, Nb-95, Zr-95, Tc-99, Ru-103, Ru-106, I-129, I-131, Cs-134, Cs-137, Ce-141, Ce-144, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Am-241, Pu-241, Cm-242, Pu-242, Am-243, Cm-244		
Plutonium fuel reprocessing plant release	Pu-238, Pu-239, Pu-240, Am-241, Pu-241, Pu-242		

## In-situ 환경방사선/능 계측 방법

- 항공기, 차량, 선박, 도보(Backpack) 및 스탠드 형(육상, 해양) 장비 이용



국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

## II. In-situ 환경방사선 평가 기술



## 항공기 이용 환경방사선 탐사



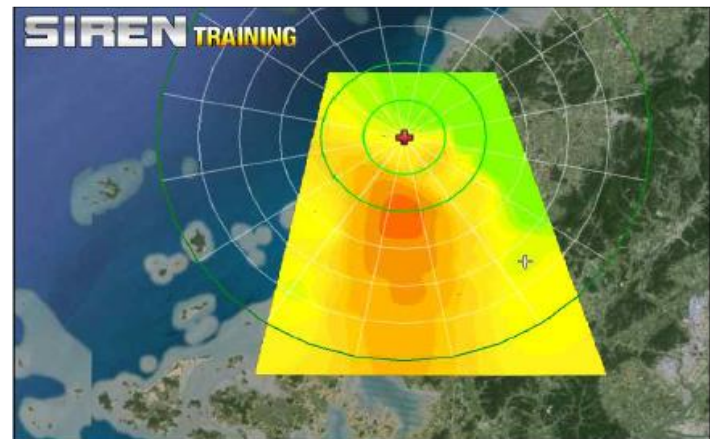
회전의 항공기 탐사



무인 회전의 이용 탐사



고정의 항공기 탐사



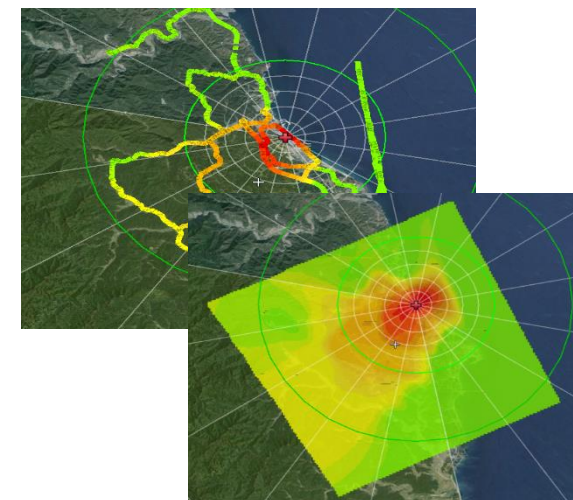
# In-situ 환경방사선 평가 기술

## 차량 이용 환경방사선 탐사

### 지각탐사



### 비상대응 탐사



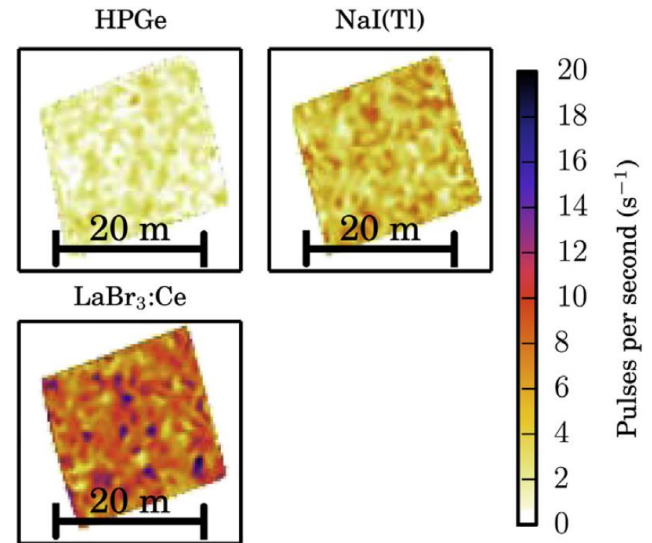


## 백팩(Backpack) 이용 환경방사선 탐사



HPGe: ~ 25 kg  
(질소 충전)

LaBr<sub>3</sub>(Ce), NaI(Tl):  
~ 9 kg



Cs-137 에너지 영역에서의 현장  
백그라운드 측정결과

<Journal of Environmental Radioactivity 135 (2014) 54-62>

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

## II. In-situ 환경방사능 평가 기술

## In-situ 감마핵종 분석 관련 참고자료 (최근 1년 연구 결과)

해양  
In-situ

- A two-point in situ method for simultaneous analysis of radioactivity in seawater and sediment/ Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2019, *in press*.

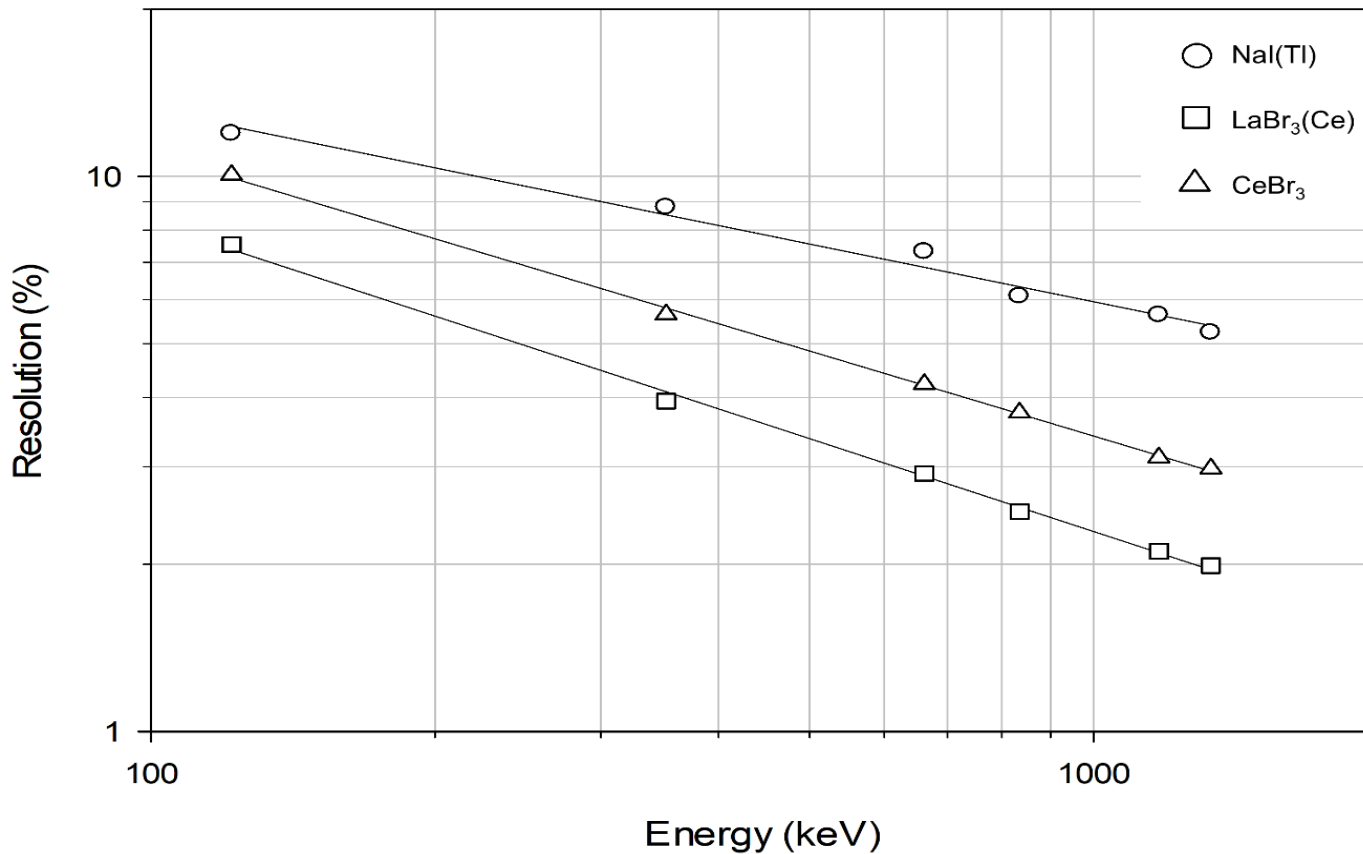
육상  
In-situ

- In-situ  $\text{CeBr}_3$  gamma-ray spectrometry for radioactivity analysis of soil/ Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2019.
- In-situ gamma-ray spectrometry for radioactivity analysis of soil using  $\text{NaI}(\text{Tl})$  and  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  detectors/ Radiation Protection Dosimetry, 2019.
- 지표면 침적 방사성핵종에 대한  $\text{NaI}(\text{Tl})$ ,  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  및  $\text{CeBr}_3$  검출기의 MDA 비교 평가/ 한국방사성폐기물학회, 2019, *in press*.

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

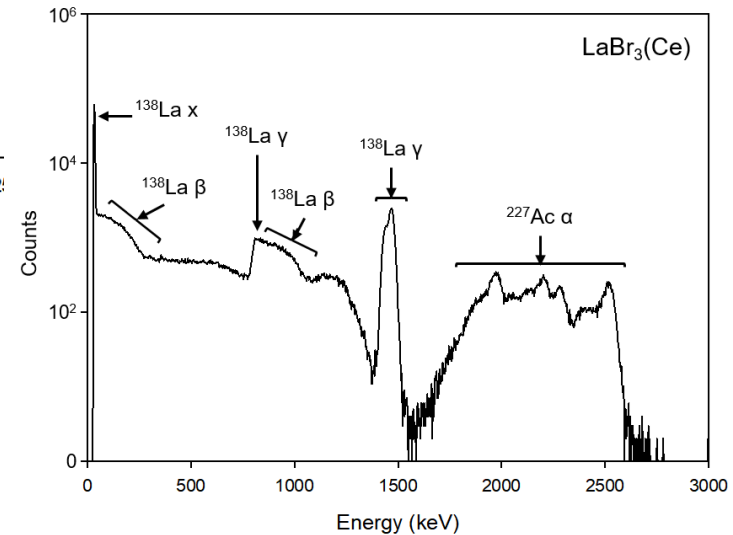
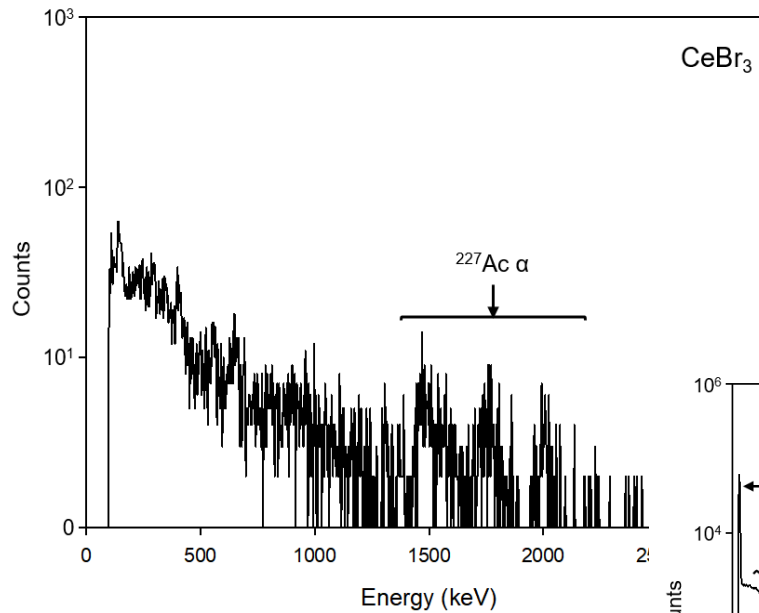
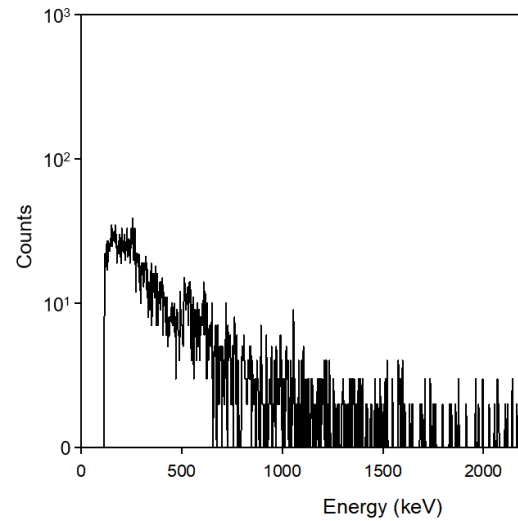
# 육상 in-situ 감마핵종 분석 기술

## 섬광검출기(2"Ø × 2")의 분해능 비교



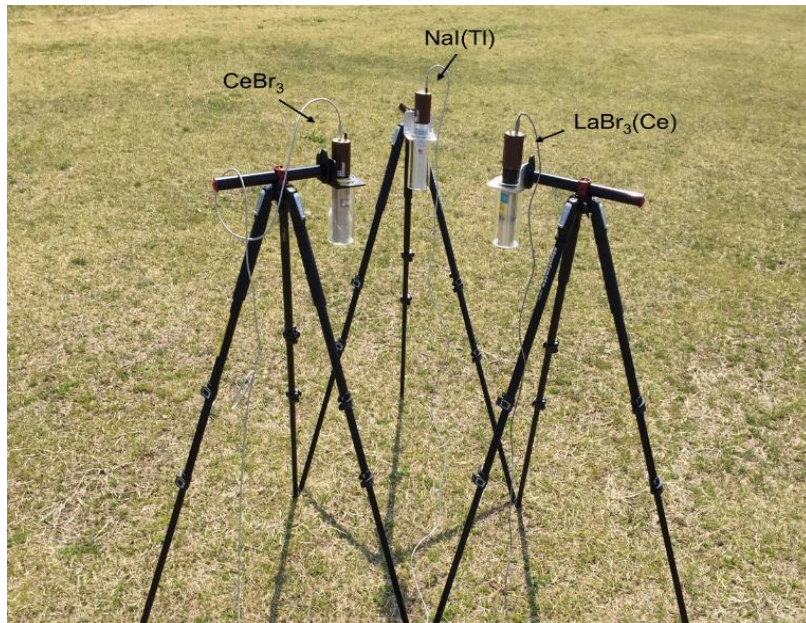
# 섬광검출기 이용 in-situ 방사능평가

## 자체 백그라운드 비교

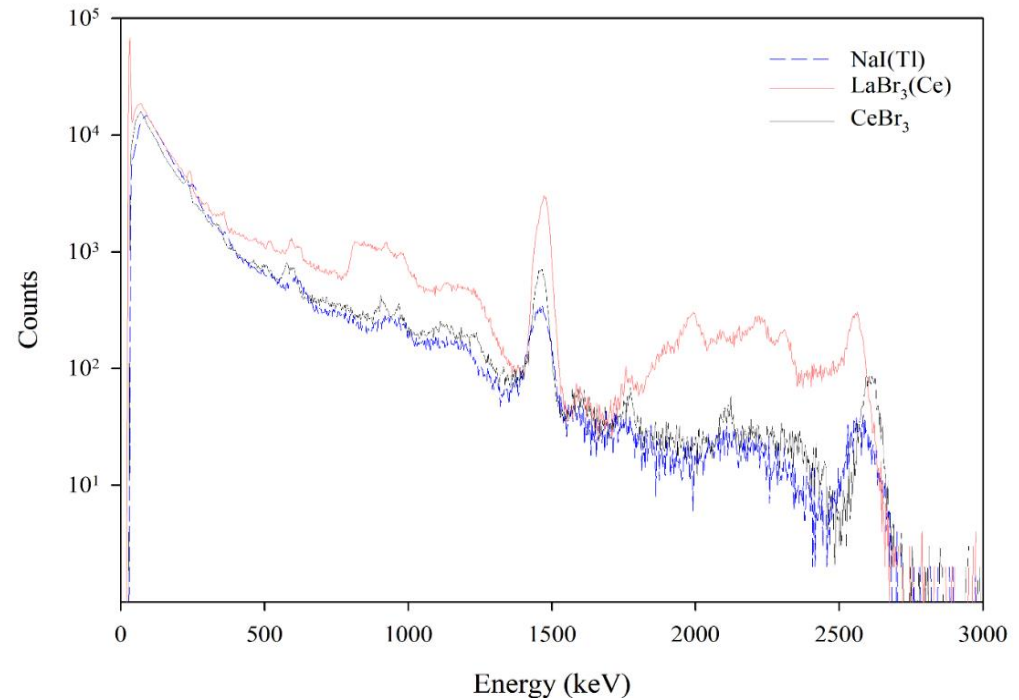




## In-situ 감마선 측정



검출기 Crystal 크기: 2"Ø × 2"



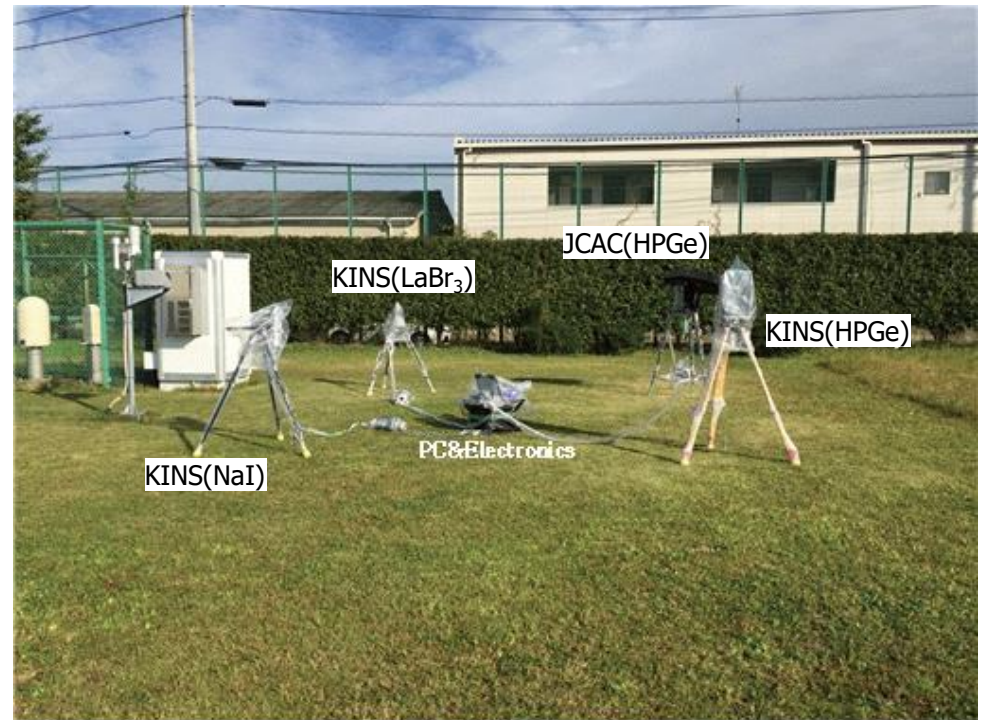
- ❖ 지표면 침적 핵종에 대한 MDA: (전반적으로) NaI(Tl) > LaBr<sub>3</sub>(Ce) > CeBr<sub>3</sub>
- ❖ 균질분포 자연방사성핵종 (<sup>40</sup>K, <sup>208</sup>Tl, <sup>214</sup>Bi) 평가: in-situ/ sampling <5%

(Lee et al., 2019)

## 후쿠시마 원전사고 기인 오염된 토양 측정(일본, 2016)

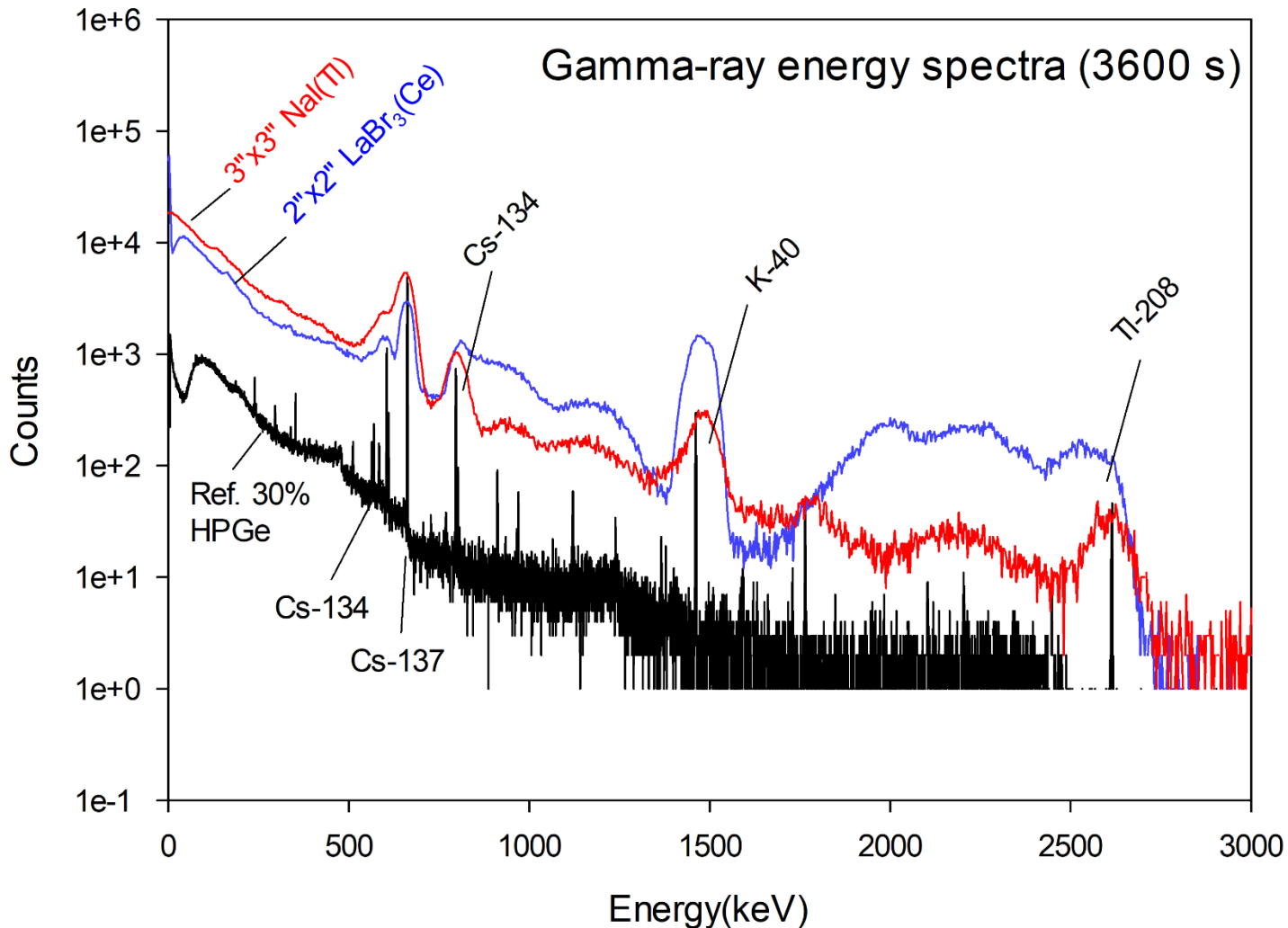


측정 장비 설치



In-situ 감마선 측정

## 후쿠시마 원전사고 기인 오염된 토양 측정(일본, 2016)



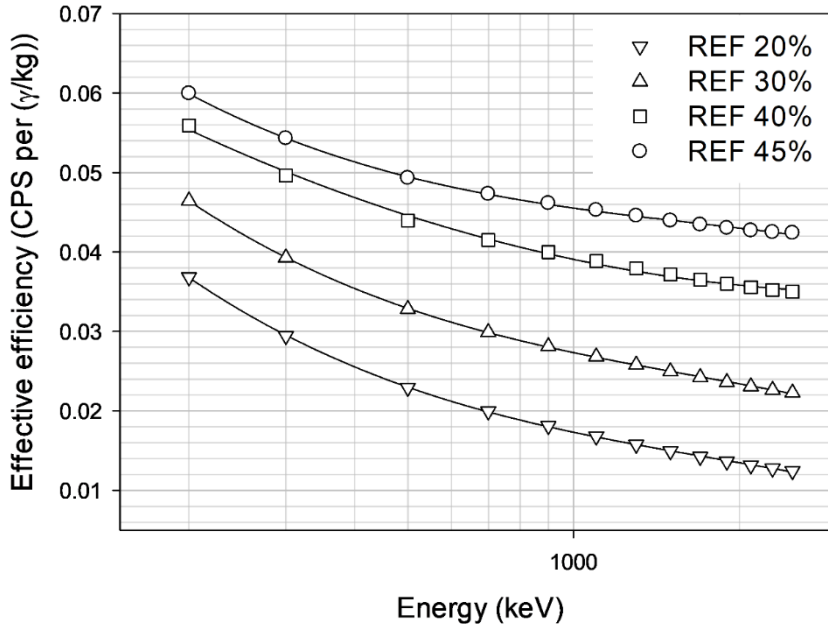


## 후쿠시마 원전사고 기인 오염된 토양 측정(일본, 2016)

Nuclides	Unit	Activity		
		HPGe	NaI(Tl)	LaBr <sub>3</sub> (Ce)
<sup>134</sup> Cs	Bq/m <sup>2</sup>	2050 ± 30	2200 ± 40	2150 ± 70
<sup>137</sup> Cs	Bq/m <sup>2</sup>	11400 ± 80	13500 ± 1800	11000 ± 300
<sup>40</sup> K	Bq/kg	156 ± 4	176 ± 6	<850
<sup>208</sup> Tl	Bq/kg	4.13 ± 0.01	4.27 ± 0.19	<35.8
<sup>214</sup> Bi	Bq/kg	15.4 ± 0.5	13.1 ± 1.6	<160
<sup>214</sup> Pb	Bq/kg	15.1 ± 0.1	<26.2	<363
<sup>228</sup> Ac	Bq/kg	11.6 ± 0.1	<26.9	<421

# 원자력 사고 비상 대응 in-situ 방사능 평가

## 신속 효율교정 코드 개발



토양 중 균질분포 선원에 대한 전에너지피이크 효율

### Calibration Factor for Field Measurement

Detector ID: \_\_\_\_\_

#### Input parameters

Relative detection efficiency(%)
30

#### Detector crystal geomtry

Diameter(mm)	Length(mm)	Length/Diameter
62.5	39.5	0.632

#### Efficiency correction factor

Energy(keV)	Calibration factor			
	Fresh deposition* (cps per (γ/m <sup>2</sup> ))	u(%)	Uniform distribution** (cps per (γ/kg))	u(%)
200	0.0017503	15	0.0465	15
300	0.0013450	15	0.0393	15
500	0.0009785	15	0.0328	15
700	0.0007980	15	0.0299	15
900	0.0006854	15	0.0281	15
1100	0.0006069	15	0.0268	15
1300	0.0005487	15	0.0258	15
1500	0.0005040	15	0.0249	15
1700	0.0004686	15	0.0242	15
1900	0.0004398	15	0.0236	15
2100	0.0004154	15	0.0231	15
2300	0.0003937	15	0.0226	15
2500	0.0003731	15	0.0223	15

\*α/p(cm<sup>2</sup>/g)=6.25

\*\*α/p(cm<sup>2</sup>/g)=0

by Byun, 2016



# 원자력 사고 비상 대응 in-situ 방사능 평가

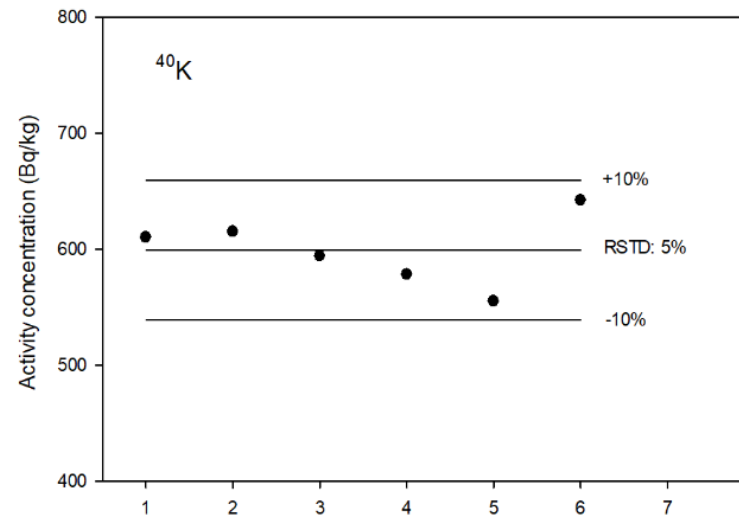
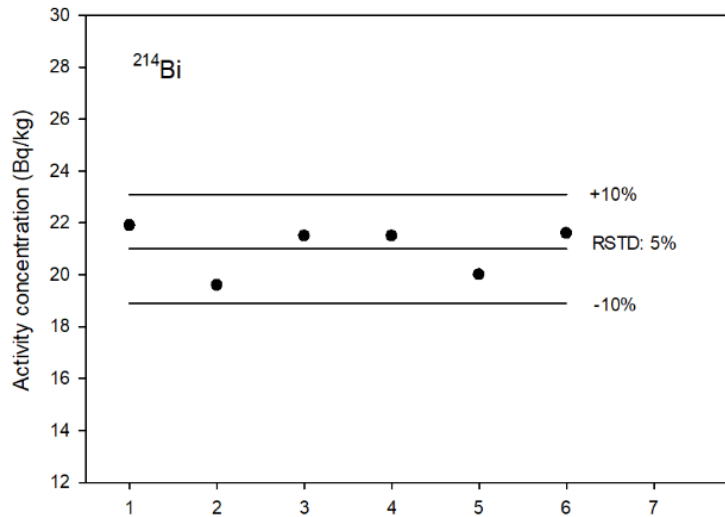
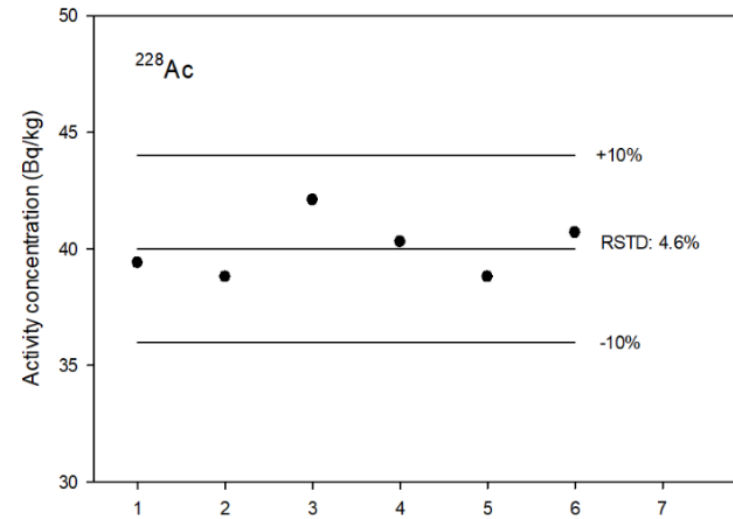
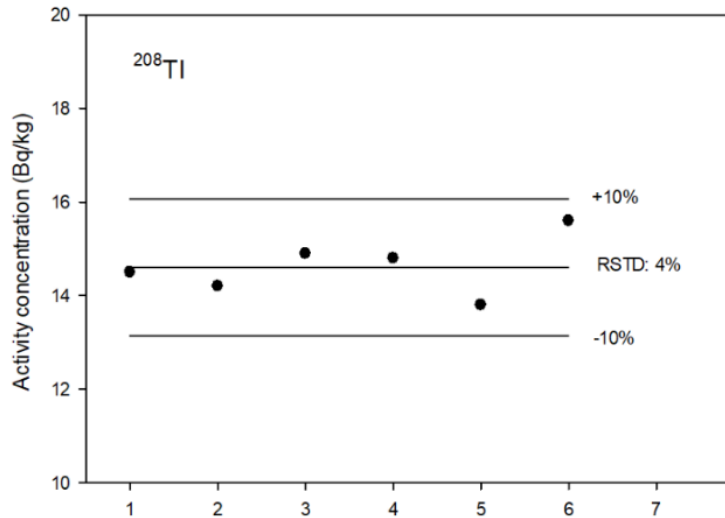
## 환경탐사팀 in-situ 교차분석을 통한 QA/QC

- 참가기관: KINS, 고리, 새울, 월성, 한빛, 한울 방재대책팀



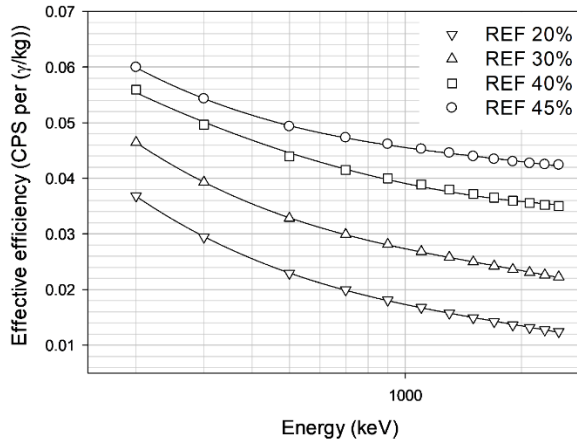
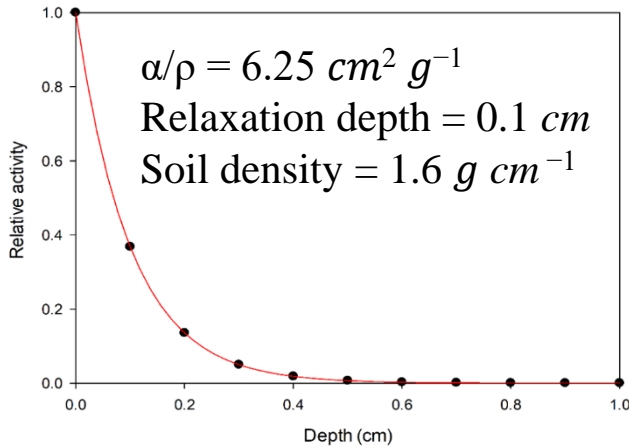
# 원자력 사고 비상 대응 in-situ 방사능 평가

## 환경탐사팀 in-situ 교차분석을 통한 QA/QC

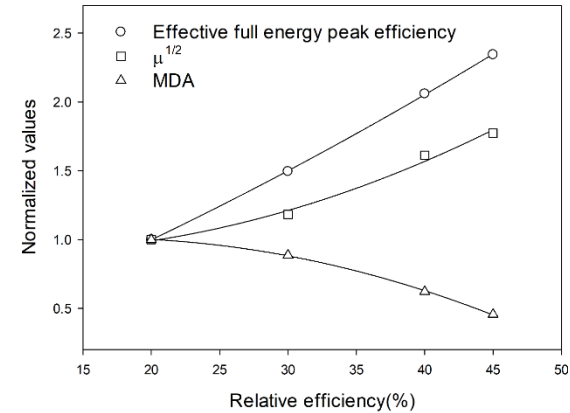


# 원자력 사고 비상 대응 in-situ 방사능 평가

## 지표면 침적 핵종에 대한 검출가능 수준 평가기술 개발



지표면 침적 선원에 대한 전에너지피이크 효율



ε<sub>R</sub> vs. normalized ε<sub>e</sub>, √μ<sub>B</sub> 및 <sup>137</sup>Cs에 대한 MDA

$$T_M = 0.5 \left( \frac{2 a M_t}{\epsilon_e I_\gamma} + \frac{b^2 \dot{\mu}_B}{\epsilon_e^2 I_\gamma^2} + \sqrt{\frac{4ab^2 M_t \dot{\mu}_B}{\epsilon_e^3 I_\gamma^3} + \frac{b^4 \dot{\mu}_B^2}{\epsilon_e^4 I_\gamma^4}} \right) / M_t^2$$

$$T_M \cong \frac{2.71^2 \dot{\mu}_B}{(\epsilon_E I_\gamma M_T)^2}$$

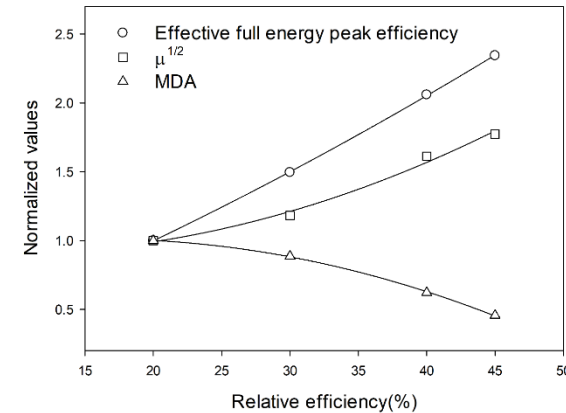
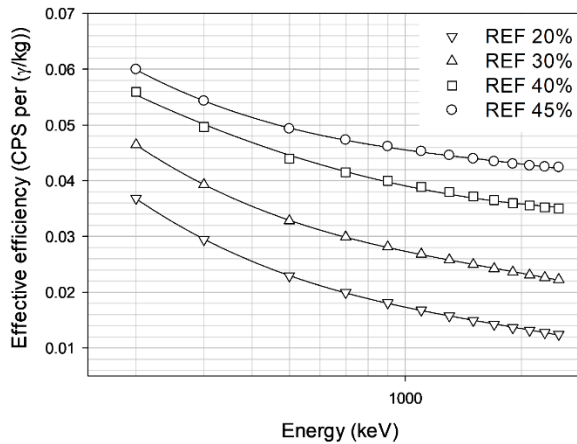
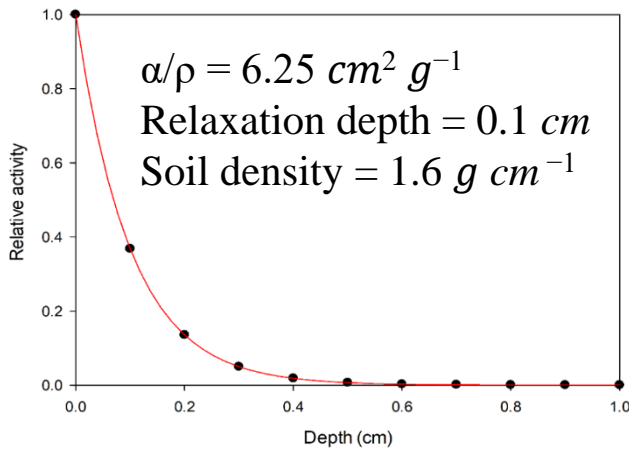
$$T_t(s) = T_M C_{MDA}(\epsilon_R)$$

with 95% confidence level



# 원자력 사고 비상 대응 in-situ 방사능 평가

## 지표면 침적 핵종에 대한 검출가능 수준 평가기술 개발



지표면 침적 선원에 대한  
전에너지 피이크 효율

$\epsilon_R$  vs. normalized  $\epsilon_e$ ,  $\sqrt{\mu_B}$  및  
<sup>137</sup>Cs에 대한 MDA

- ❖ 도출된 MDA 보정 인자:  $C_{MDA}(\epsilon_R) = 0.957 - 0.0119 \epsilon_R + 6.78 \times 10^{-4} \epsilon_R^2$
- ❖ 30% 상대효율( $\epsilon_R$ )의 HPGe 검출기에 대한 MDA(고리원전 주변),  $T_M=3600$  s.

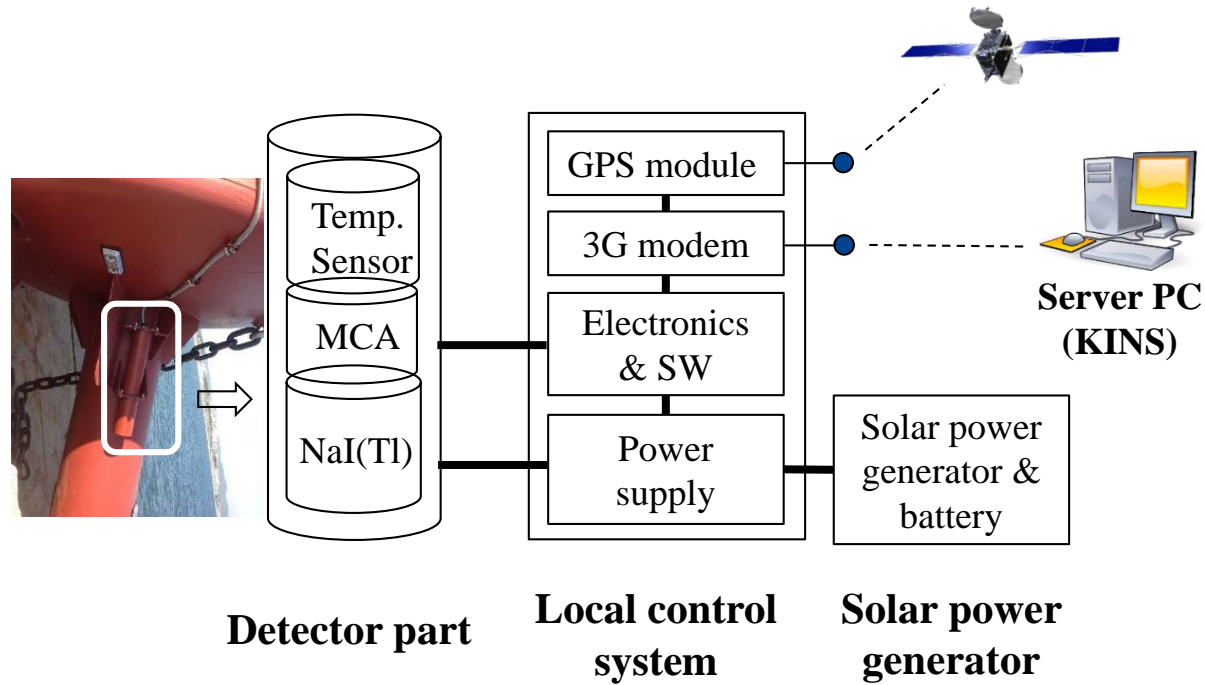
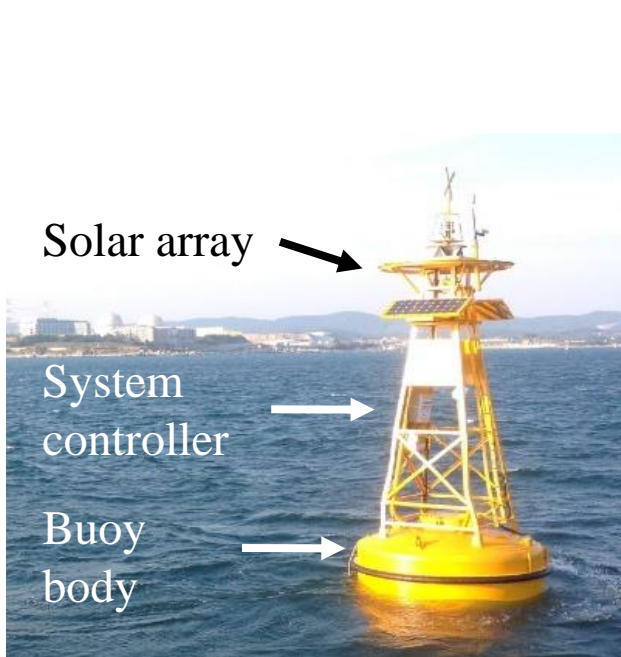
지표면 형태 (조사 지점수)	MDA (Bq/m <sup>2</sup> )		
	<sup>131</sup> I (364.5 keV)	<sup>134</sup> Cs (604.7 keV)	<sup>137</sup> Cs (661.7 keV)
토양 (7)	50~87	44~85	49~80
초지 (4)	62~78	54~73	63~70
아스팔트 또는 콘크리트 (4)	58~71	52~59	57~60

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

# 해양 in-situ 감마핵종 분석 기술

# 해양 in-situ 감마핵종 분석

## 부이 (Buoy) 기반 in-situ 해수 중 방사능 평가

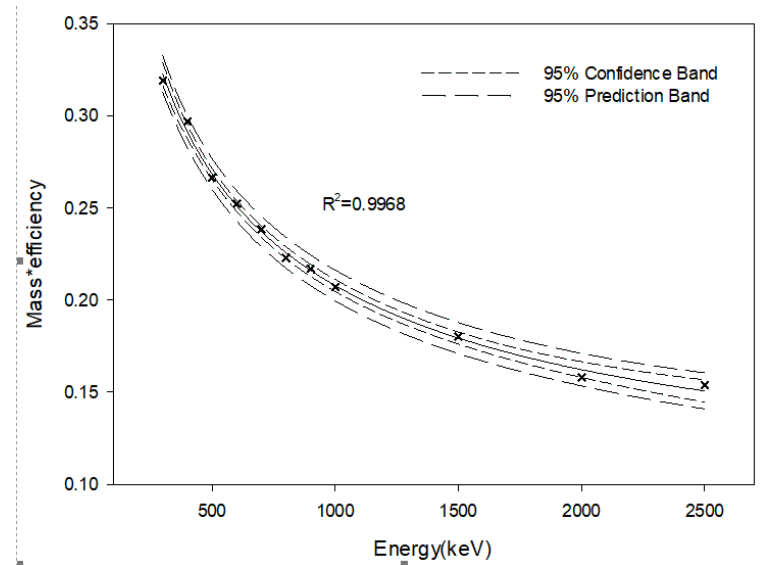
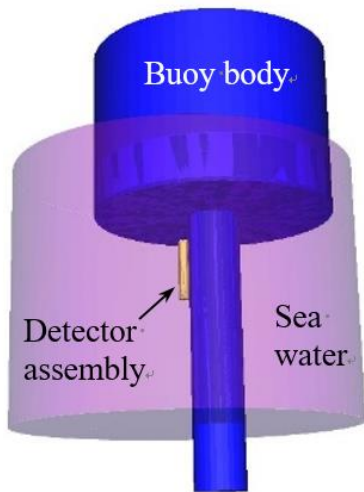


부이(buoy) 기반의 실시간 해수 중 방사능 감시기

실시간 해수 감시기의 시스템 구성도

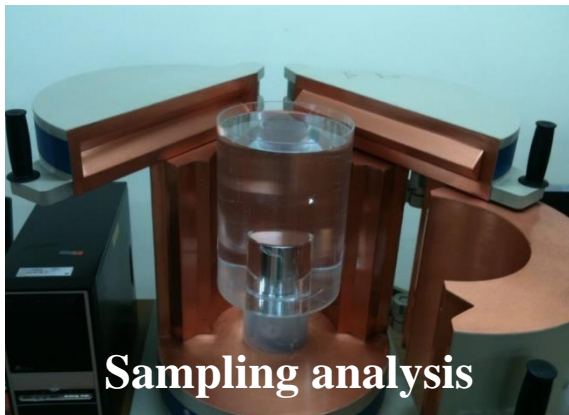
## 부이 (Buoy) 기반 in-situ 해수 중 방사능 평가

### 시스템 효율교정



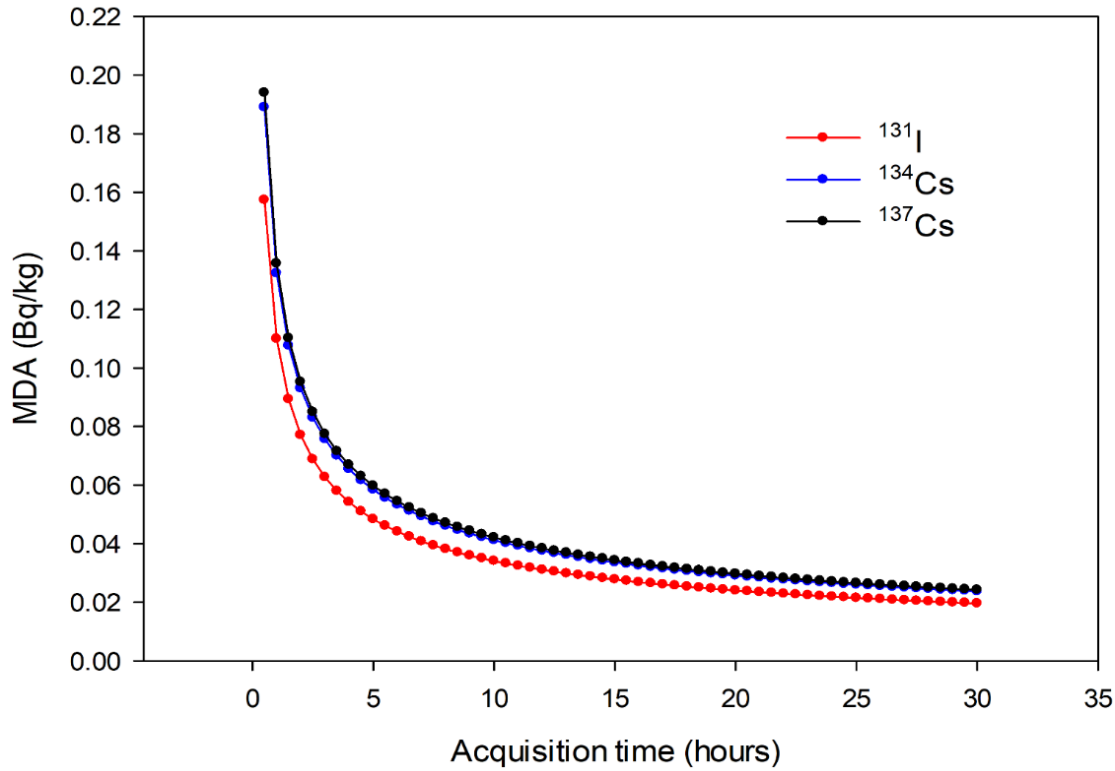
### 해수 시료 중 <sup>40</sup>K 방사능 분석 결과 비교

Site No.	<sup>40</sup> K의 방사능농도 (Bq/kg), k = 1		In-situ/ 시료채취
	In-situ 방법	시료채취 분석	
1	11.3 ± 1.1	10.4 ± 0.4	1.09
2	10.8 ± 1.1	10.6 ± 0.4	1.02
3	10.5 ± 1.0	11.2 ± 0.4	0.94



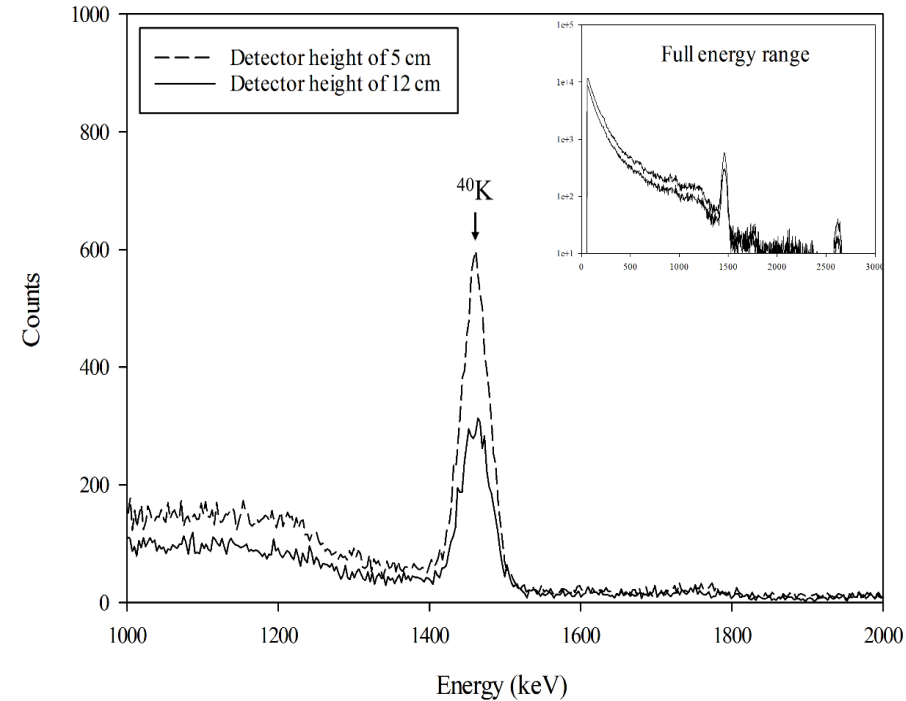
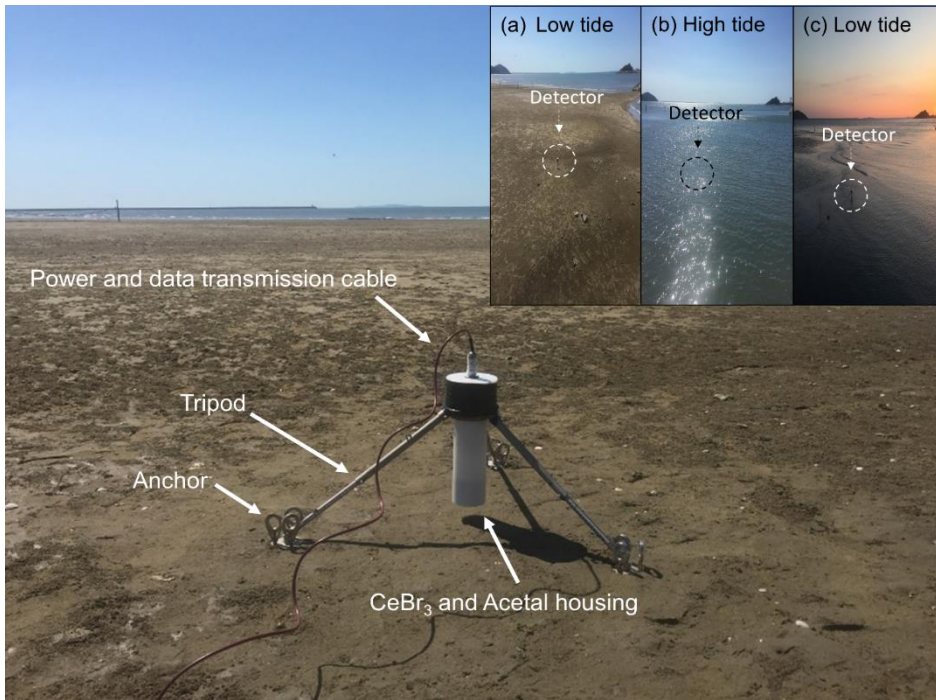
## 부이 (Buoy) 기반 in-situ 해수 중 방사능 평가

### MDA 평가



핵종	MDA (Bq/kg)	
	15 분 측정	24 시간 측정
$^{131}\text{I}$	2.0	0.022
$^{134}\text{Cs}$	2.5	0.027
$^{137}\text{Cs}$	2.6	0.027

## 해저퇴적물 및 해수 중 감마핵종 동시 분석



CeBr<sub>3</sub> 검출기 이용 해수 및 해저퇴적물 중 방사능 계측 시스템

(Lee et al., 2019)

5 cm 및 12 cm 높에서 측정된 CeBr<sub>3</sub>의 <sup>40</sup>K 감마선에너지스펙트럼

## 해저퇴적물 및 해수 중 감마핵종 동시 분석

$$\frac{N_{S_x,h1}}{N_{W_x,h1}} = \frac{(1 - R_T/R_w)}{(R_T/R_S - 1)}$$

높이 1에서 해저퇴적물과 해수 중 감마핵종에 대하여 측정된 전에너지피이크 계수 비

$$R_T = \frac{N_{T,h1}}{N_{T,h2}} = \frac{N_{S,h1} + N_{W,h1}}{N_{S,h2} + N_{W,h2}}$$

높이 1과 2에서 측정된 전에너지피이크 계수(효율) 비  
(측정)

$$R_S = \frac{N_{S,h1}}{N_{S,h2}} = \frac{\varepsilon_{S,h1}}{\varepsilon_{S,h2}}$$

높이 1과 2에서 해저퇴적물 중 감마핵종에 대하여 측정된 전에너지피이크 계수(효율) 비  
(시뮬레이션)

$$R_W = \frac{N_{W,h1}}{N_{W,h2}} = \frac{\varepsilon_{W,h1}}{\varepsilon_{W,h2}}$$

높이 1과 2에서 해수 중 감마핵종에 대하여 측정된 전에너지피이크 계수(효율) 비  
(시뮬레이션)

# 해양 in-situ 감마핵종 분석

## 해저퇴적물 및 해수 중 감마핵종 동시 분석

해수 및 해저퇴적물 중  $^{40}\text{K}$ 에 대한 in-situ 및 시료채취 분석 결과 비교

분석 대상	$^{40}\text{K}$ 의 방사능농도, $k=1$		In-situ 방법/ 시료채취 분석
	In-situ 방법	시료채취 분석	
해수 ( $\text{Bq L}^{-1}$ )	$11.4 \pm 2.5$	$11.1 \pm 0.3$	$1.03 \pm 0.23$
해저퇴적물 ( $\text{Bq kg}^{-1}\text{-wet}$ )	$575 \pm 29$	$636 \pm 5$	$0.90 \pm 0.05$

핵종	에너지 (keV)	MDA ( $t=3600$ s)	
		해수 ( $\text{mBq L}^{-1}$ )	해저퇴적물 ( $\text{Bq m}^{-2}$ )
$^{131}\text{I}$	364.0	684	521
$^{137}\text{Cs}$	661.6	634	423

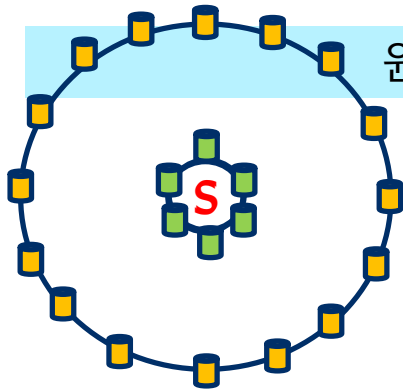


국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

## IV. 발전 방향

# In-situ 환경방사능 평가 기술 발전 방향

- ❖ 조기탐지를 통한 선제적 비상 대응: 실시간 저준위 **in-situ** 방사능 평가
- ❖ RDFR (Rapid **Data Fusion** & Reproduction)
  - 대기확산 모델과 측정결과의 신속한 연계 및 데이터 재생산  
→ 동적 방사선원 평가 강화: 대기 중 방사능 평가



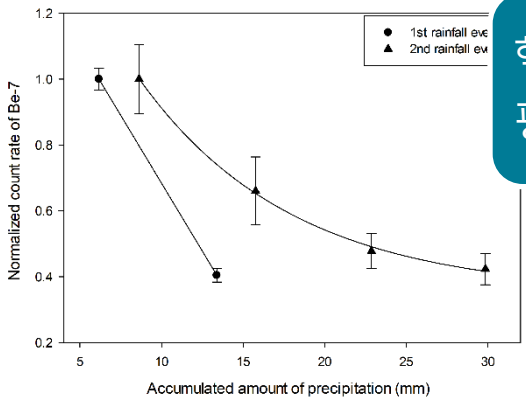
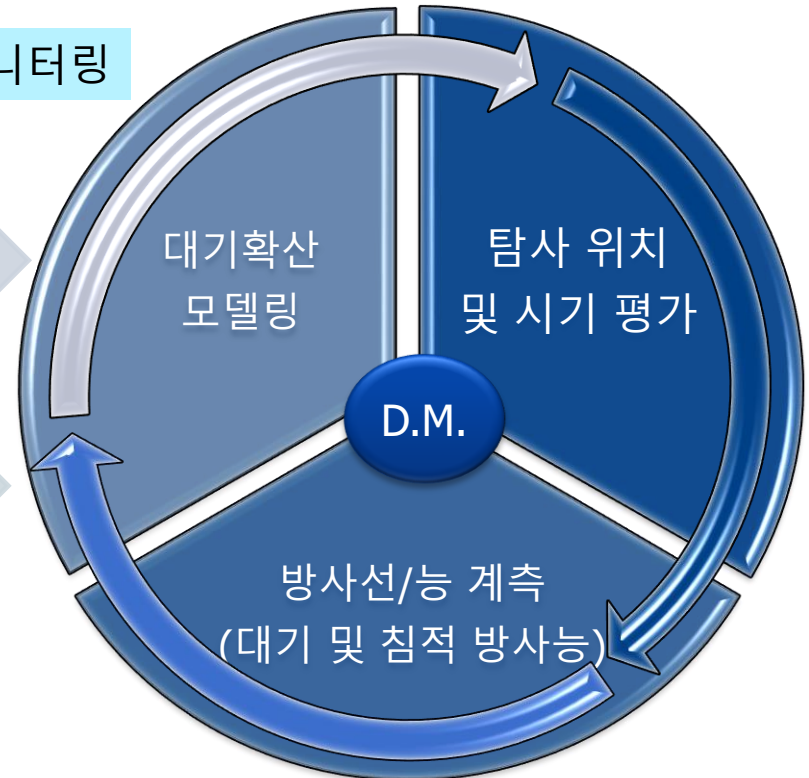
원전주변 실시간 대기 방사능 모니터링

선원항  
평가

시뮬레이션,  
계측

핵종 거동  
평가 연구

기초 자료  
생산 및 추적



# 감사합니다

