

국제원자력기구의 안전조치 환경시료 분석체제와  
한국 환경시료의 분석결과에 대한 검토

IAEA's Environmental Sample Analysis System for Nuclear Safeguards  
and the Analytical Results of the Korean Environmental Samples

신장수, 안진수

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

국제원자력기구가 추진하고 있는 안전조치 강화방안 중 하나인 환경시료의 채취/분석 기술은 신고된 핵활동의 검증 및 미신고 핵활동의 감시에 매우 유용한 기술이다. 이 기술은 회원국에 대한 현장시험 단계를 거쳐 '96년 초부터는 원자력 시설별 특성에 따른 기초자료 확보가 진행되었고, 현재는 우리 나라를 포함한 일부 회원국에서 정기사찰에 적용하는 단계에 와 있다. 우리 나라는 현장시험 단계부터 적극 참여해 왔으며 지금까지 대전 원자력 시설 및 서울 TRIGA 시설 등에서 시료가 채취 분석되었고, 이를 통해 이 기술이 과거의 핵활동 규명에 매우 유용함을 보여 주었다. 본 논문에서는 국제원자력기구의 안전조치 강화 방안을 이해하기 위해 환경시료 채취/분석 체제를 소개하고, 우리 나라에서의 시료 채취/분석 결과를 검토하였다.

Abstract

The environmental sample analysis, one of the technologies for the IAEA's strengthened safeguards system, was found to be one of the powerful technologies for verification of declared nuclear activities or monitoring the clandestine nuclear activities. The effectiveness and the efficiency of the technology have been tested and verified through the field trials. Baseline campaigns for various types of nuclear facilities, especially enrichment plant and reprocessing/or hot-cell facilities, were proceeded from early 1996. Korea has positively participated in the IAEA's environmental sampling program from the beginning and many samples have been taken from the nuclear facilities at Taejon site and the TRIGA facilities at Seoul site. The analytical results showed good correspondence with the nuclear activities performed in the facility. In this report, the technical characteristics of the IAEA's environmental sample analysis system and the analytical results for the Korean nuclear facilities are reviewed for the good understanding of the IAEA's strengthened safeguards system.

## 1. 서 론

결프전 이후 이라크에 대한 UN의 사찰 과정에서 미신고 핵활동이 발견됨에 따라 국제 원자력기구는 핵물질 및 핵시설에 대한 기존 안전조치체제(INFCIRC/153 type)의 강화 필요성을 제기하게 되었고, 강화 방안 도출을 위한 "Programme 93+2"를 수행하는 과정에서 환경시료 채취/분석 기술이 강화 방안에 포함되게 되었다.

환경시료의 채취/분석은 모든 원자력 활동 중에서는 아무리 시설이나 장치를 누출 없게 운영한다 하더라도 결국은 극미량이나마 물질(핵물질 또는 공정에 투입되는 유기용제 등의 물질)이 공정 외부로 누출될 수밖에 없음에 근거하고 있다. 이와 같이 누출된 물질은 건물 내 장비나 여타 설비들의 표면에 쌓이고 또한 여러 경로를 통해 시설 외부로 유출되어 식물체나 흙 등에 쌓이거나 물에 의해 원거리까지 운반된다. 물론 이와 같이 누출된 핵물질량은 매우 적기 때문에 주민의 안전에는 문제가 되지 않는 수준이다. 그러나 분석기술의 발달에 힘입어 극미량의 누출도 검출이 가능하게 되었으며, 검출 결과는 누출 공정의 공정 특성을 반영하고 있으므로 원자력 시설에서의 과거 또는 현재 핵활동을 추정할 수 있게 한다. 안전조치 목적으로 채취 분석되는 환경시료로는 공정시설 내 장비 또는 설비 표면에서의 swipe, 시설 주변의 토양, 식물체, 물 등이 있다.

국제원자력기구는 원자력 시설별 환경시료 분석 특성을 파악하기 위하여 결프전 후 이라크에서 채취한 시료의 분석 결과와 회원국들의 원자력 시설별 특성에 따른 현장시험 수행 결과를 통하여, 분석결과가 그 시설에서의 핵활동을 잘 반영하고 있다는 결론을 얻었다. 이를 근거로 '95년에는 기존의 안전조치 협정 하에서 접근이 가능한 시설들에 대해 설계정보 검증시 또는 사찰 시 환경시료 채취를 부분적으로 적용하기 시작하였으며, '96년 초부터는 국제원자력기구 이사회의 승인에 따라 본 기술이 새로운 안전조치 기술로서 공식적으로 인정받게 되었다. 초창기의 환경시료 채취는 주로 농축시설과 hot cell 시설에서의 swipe 시료 채취에 초점이 맞추어졌다.

한국은 국제원자력기구가 추진한 "Programme 93+2"에 초창기부터 참여하였다. 특히 환경시료 채취의 경우 현장시험(field trial) 단계부터 참여하였으며, 그 후 진행된 시설별 기초자료 확보(baseline campaign) 단계를 거쳐 현재는 정기사찰(routine inspection)에서의 시료 채취 등 일련의 과정에 적극적으로 참여하고 있다. 우리 나라에 대한 국제원자력기구의 제 1차 환경시료 채취는 '94년 6월 20일에 현장시험의 일환으로 수행되었으며, 현장시험의 목적 상 매우 다양한 시설 및 지역에서 swipe 시료를 비롯한 식물체, 물 등 여러 종류의 시료가 채취되었다. 제 2차와 제 3차 시료 채취는 기초자료 확보를 위해 '96년 5월 21일과 '97년 11월 12일에 각각 이루어 졌고, 이때는 핵활동 주요시설인 농축관련 시설과 재처리관련 시설에 대한 기초자료 확보가 목적이었으므로 한국에서는 조사후시험시설 및 관련 분석시설과 조사재시험시설 등에서 swipe 시료가 채취되었다. 제 4차 시료채취는 '99년 12월 9일에 조사후시험시설과 조사재시험시설에 대하여 정기사찰의 일환으로 이루어졌다. 한국에서의 시료 채취 현황 및 국제원자력기구에 의한 분석결과는 제 3항에서 설명하고자 한다.

## 2. 국제원자력기구의 Swipe 시료 분석 현황

### 가. 분석기술 및 내용

Swipe 시료는 공정설비의 연결부위나 창틀 또는 출입문 뒤 등 핵물질이 가장 잘 쌓여 보존되어 있음직한 곳에서 paper(filter paper의 한 종류) 또는 형짚으로 일정 부위를 문질

러 채취하며, 채취된 시료는 필요에 따라 시료 전체를 대상으로 분석하기도 하고, 시료 표면에 붙어 있는  $\mu\text{m}$  수준의 작은 입자들을 분석하기도 한다. Swipe 시료 전체를 분석하는 것을 bulk 분석이라 하고, 각각의 입자들을 분석하는 것은 particle 분석이라 하며, 측정방법으로는 일반적으로 감마선 방출 핵종 분석을 위한 고감도 감마선 분광분석, 우라늄 또는 플루토늄의 동위원소 구성비 및 U/Pu 비 측정을 위한 질량분석 등이 활용된다.

Bulk 분석의 경우 시료 전체를 대상으로 분석하는 것이므로 분석 결과는 시료에 포함되어 있는 물질들의 평균 특성만을 반영한다고 볼 수 있다. 반면에 particle 분석은 시료에 포함되어 있는 개개 particle에 대한 분석이므로 시료 채취지점에 존재하는 다양한 형태의 핵물질 특성을 반영한다. 따라서 이러한 핵물질의 성분 및 동위원소 비를 측정함으로써 그 지점에서 행해진 과거 또는 현재의 핵활동을 추정해 낼 수 있다.

재처리 시설에서는 U/Pu, Pu-240/Pu-239, Pu-240/Pu 등을 측정하여 그 시설에서 취급한 사용후 핵연료의 연소도를 추정하고, Am-241/Pu-241 비를 측정하여 재처리의 시기 및 횟수를 추정한다. 우라늄 농축시설에서는 우라늄 particle 각각에서 U-235 동위원소 함량비를 측정함으로써 생산된 핵물질의 농축도 추정이 가능하다. 농축시설에서는 농축 각 단계별 연결 부위에서 시료를 채취함으로써 각 단계별 농축도를 알 수 있고, 또한 그 시설에서 과거에 농축했던 최고치의 농축도도 알아낼 수 있으므로 설계상의 농축도를 계속 유지하며 운영을 하였는지를 확인할 수 있다.

Particle에서의 핵물질 동위원소 비 분석에는 2가지 질량분석 방법이 활용되는데, Lexan을 이용한 fission track 검출을 거쳐 Thermal Ionization Mass Spectrometer(TIMMS)을 이용하는 방법과 Electron Microscope을 이용하여 분석대상 원소를 검출한 후 Secondary Ion Mass Spectrometer(SIMS)를 활용하여 동위원소 비를 측정하는 방법이 있으며, 전자는 미국 공군산하 AFTAC(Air Force Technical Applications Center) Lab.에서 후자는 독일 Karlsruhe에 있는 유럽연합 산하 Transuranium Institute(ITU)에서 사용하고 있다. 분석을 위해서는  $10^{-15}\text{g}$  이하를 측정할 수 있는 고감도 질량분석기가 필요하며[1], SIMS를 이용하는 경우 particle의 크기가  $1\mu\text{m}$  이상으로 TIMS를 이용하는 경우보다 커야하는 단점이 있으나 전처리가 간단하여 분석비용을 절감할 수 있는 것으로 알려져 있다. 즉, SIMS를 이용한 분석에서는 particle 들을 conducting substrate에 펼친 후 이를 진공 chamber에 넣으며, 이곳에서 particle은 가속된 1차 이온(Cs 또는 산소분자 이온 등)에 의해 충돌되고, 분석 대상 particle로부터 야기된 2차 이온을 질량 분석하여 동위원소 비를 측정한다. SIMS의 경우 상대측정오차는 1-5% 정도로 알려져 있다.[2] 국제원자력기구가 swipe 시료 분석에 적용하고 있는 분석법들의 특성을 표 1에 나타내었다.

이러한 분석기술들은 미국 등 일부 선진국들만이 확보하고 있는 첨단기술이다. 국제원자력기구는 다음 5개 실험실과 Net-work Analytical Lab.(NWAL) 계약을 맺고, 국제원자력기구 사찰관들이 채취한 swipe 시료들을 의뢰하여 분석하고 있다. 이들 연구소는 미국 공군산하 AFTAC Lab, DOE 산하 연구소, 영국 공군산하 Aldermaston, 러시아의 Microparticle Analysis Lab. 및 유럽연합 산하 ITU 등이다.

#### 나. 시료채취 및 분석현황[3]

전술한 바와 같이 국제원자력기구는 "Programme 93+2"의 일환으로 환경시료 채취/분석을 추진해 왔다. 자발적으로 참여한 회원국들의 12개 특성 시설에 대한 현장시험으로부터 환경시료의 채취/분석이 시설의 신고된 핵활동을 잘 반영하고 있다는 결론을 얻을 수 있었

으며, 이를 근거로 이사회 의 승인을 거쳐 '96년 초부터는 기초자료 확보를 위해 재처리 관련 시설과 농축시설에 대한 환경시료 채취가 이루어 졌다. 국제원자력기구에서 수행하고 있는 환경시료의 채취 분석은 다음과 같은 내용으로 이루어진다.

표 1. Swipe 시료 분석 방법 및 특성[2]

Method	Analyte	Measurement
Low-Background High-Resolution Gamma Spectrometry (HRGS)	Cs-134, Cs-137, Ru-106 etc.	Concentration (Bq/Sample) - DL= 1-5 mBq (10 <sup>5</sup> sec. count)
	Am-241, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241	Am-241/Pu-241 ratio for age determination
Thermal Ionization Mass Spectrometry (TIMS)	U, Pu	Concentration DL= pg
	U isotopes	Abundance (ratios)
	Pu isotopes	Abundance (ratios)
Secondary Ion (or Ion Microprobe) Mass Spectrometry (SIMS)	U, Pu	Concentration in particles with diameter > 1 μm
	U isotopes	Abundance (ratios) in particles
	Pu isotopes	Abundance (ratios) in particles
Particle Analysis (with Lexan and TIMS)	U, Pu	Presence of fissile isotopes in particles with diameter > 0.1 μm
	U isotopes	Abundance (ratios) in particles
	Pu isotopes	Abundance (ratios) in particles
Alpha Spectrometry	U-234, U-238 Pu-238, Pu-239 Pu-240	Concentration and Isotopic ratios

1) 시료채취 계획의 수립

환경시료 채취 목적이 그 시설에서의 미신고 핵활동 부재에 대한 신뢰성 증진에 있음에 비추어, 이 안전조치 목적을 만족시키기 위해서는 시설의 설계 특성과 운영 정보를 바탕으로 시료채취 계획이 수립된다. 예를 들어 농축시설의 경우에는 미신고 물질의 사용 여부 및 신고된 농축도 이상으로의 운전 여부를 확인하는 것이므로, 이를 위해 농축시설 내 cascade hall 내부, 농축 핵물질의 인입, 인출 지역 등에서 시료를 채취하여야 하고, hot cell의 경우는 Pu 또는 고농축 우라늄 생산을 위한 재처리 작업, 특정 종류나 형태의 조사 후 핵연료 취급, α-선 방출 동위원소의 추출, 운영 정지된 시설의 가동 여부 등을 확인하는 것이므로 물질의 이동점, hot cell 내부 및 작업 구역 등에서 시료를 채취하도록 한다.

2) 시료 채취

시료 채취는 시설 별로 수립된 시료 채취 절차에 따라 표준화된 시료채취 도구를 이용하여 훈련된 사찰관에 의해 수행된다. 국제원자력기구에서는 2 종류의 채취 도구를 개발하여 사용하고 있다. 하나는 cotton swipe kit로서 그림 1과 같으며 농축시설 및 hot cell 외부에서의 시료 채취에 사용되고, 다른 하나는 그림 2와 같고 hot cell 내부에서의 시료 채취에 사용된다.

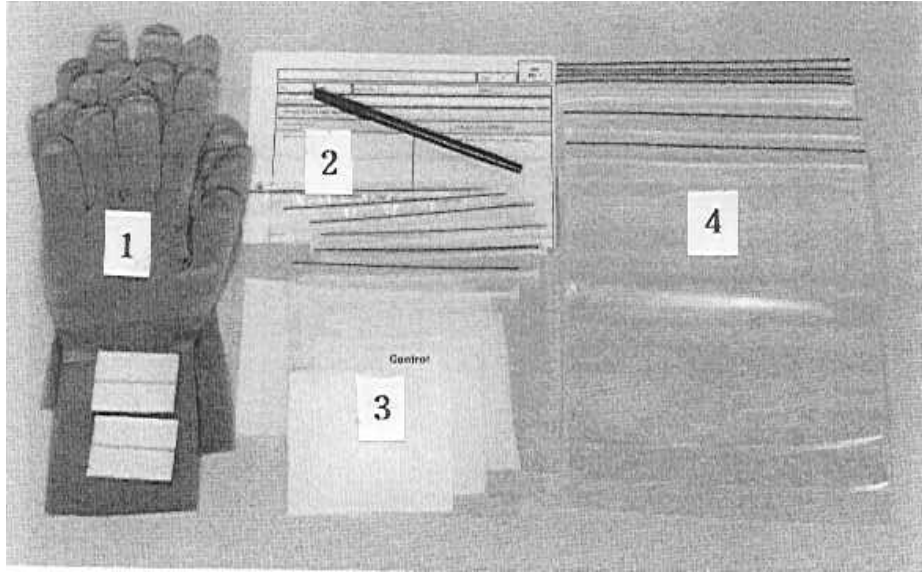


그림 1. 국제원자력기구가 사용하는 Swipe 시료채취 Kit [5]  
 (1: 고무 glove 2 set, 2: 시료채취 기록지 및 pen,  
 3: Cotton Swipe 및 작은 비닐백 (7개), 4: 큰 비닐백 )

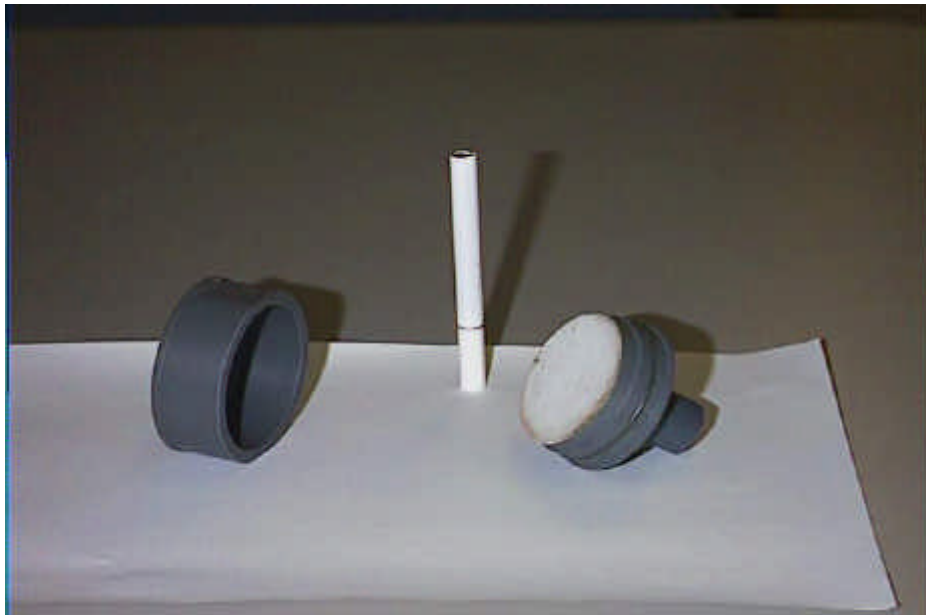


그림 2. Hot Cell 내부에서 사용하는 Swipe 시료 채취 도구

이 시료채취 도구는 오스트리아 Seibersdorf에 있는 국제원자력기구 분석실험실의 Class-100 청정실험실에서 준비되어 사찰관에게 지급되며, swipe paper 또는 cotten은 U, Pu 함량이 nanogram 이하인지 무작위 추출 실험을 통해 철저히 확인되고 있다. 그림 1의 도구는 7개의 cotten swipe로 구성되어 있으며, 각각은 작은 비닐백에 담겨 있고 이들은

다시 큰 비닐백에 넣어져 이중으로 보관된다. 7개의 cotten swipe를 사용하여 한 지점에서 수 개의 sub-sample이 채취되고 또한 background 및 교차오염을 확인할 수 있도록 채취자의 손을 닦아 control sample도 채취한다. 전체 시료가 담겨진 큰 비닐백은 Seibersdorf 실험실에서  $\gamma$ -선 측정을 통해 방사능 정도를 확인하고 안전조치 목적에 따라 분석 방안이 강구되며, 필요에 따라 NWAL에 분석 의뢰된다. 최종 분석실에 도착할 때까지 시료간 교차오염을 방지하기 위해 철저히 밀봉되어 취급된다. 그림 2는 hot cell 내부에서 시료를 채취할 수 있도록 고안된 도구이다. 이 도구는 manipulator를 이용하여 시료를 채취할 수 있도록 손잡이가 부착되어 있으며, 시료 채취 후에는 채취된 시료가 강한 방사능을 나타낼 수도 있으므로 차폐용 납으로 특수 제작된 통(Pb-lined can)에 넣어 운송하고 있다.

국제원자력기구는 '99년에 5개 회원국의 8개 농축시설과 19개 회원국의 28개 재처리 또는 hot cell 시설에서 총 511개의 swipe 시료를 채취하였다. '97년 585개, '98년 497개였던 것을 감안하면 대략 연간 500개 정도의 swipe 시료를 채취 분석하는 것으로 보여진다.[4] 이 분석이 시료 당 약 \$1,000 정도의 비용이 소요되기 때문에 예산상 시료 채취량을 급격히 확대하기는 어려울 것이다.

### 3) 분석자료 평가

Seibersdorf 청정 실험실 또는 NWAL에서 분석된 시료 분석 결과는 국제원자력기구 안전조치부(Department of Safeguards)로 보내지며, 채취된 시설의 신고된 핵활동에 따른 예상 검출신호와 실제 분석 결과를 비교하여 종합적으로 평가를 한다. 만일 실제 분석 결과가 예상치와 다르게 나타나게 되면 재 측정, 시료의 재 채취 및 시설 운영자로부터의 별도 정보 수집 등이 이루어지며, 안전조치 활동을 통해 얻은 여타 정보들을 검토하여 종합적인 재 평가를 하게 된다. 재 측정을 위해서는 처음 채취한 7개의 시료 set 중 보관해 놓은 시료를 다른 분석기관에 의뢰하여 처음과는 다른 분석 방법으로 분석할 수도 있다.

분석 결과는 장기적인 평가 자료로 활용하기 위하여 data base 화하고 있다. 모아진 자료들은 농축, 원자로 형태, 원자로 운전특성 등에 따라 나타날 수 있는 핵주기 상의 특성별로 평가되어 새로운 시설에서의 예상 신호를 예측하는 기본 자료로 활용될 수 있다.

#### 가) 농축시설 시료의 분석결과 평가[5]

우라늄 농축시설에서 채취한 swipe 시료 내 particle들은 TIMS 또는 SIMS 방법에 의해 우라늄 동위원소 비가 측정되며, 동위원소 비는 U-235 함량비, U-235/U-234 및 U-235/U-236으로 그래프를 그리고, 그래프 상에 나타난 이들의 함량비 분포를 통해 핵활동을 평가하게 된다.

시료를 bulk 분석하면 U-235 농축과정 중의 단계별 농축도들이 평균적으로 나타나게 되어 feed 물질(주로 천연우라늄, U-235; 0.726 at%)의 농축도와 유사한 농축도를 보이게 된다. 따라서 bulk 분석을 통해서서는 유효한 정보를 얻기는 어렵다. 그러나 particle 분석을 통해서서는 공정의 많은 특성을 알 수 있다. 즉, U-235 함량비를 분석함으로써 취급된 농축도 분포를 알 수 있고, 일련의 공정을 통해 만들어지는 중간단계의 농축 생성물과 tail 들의 농축도를 U-234에 대해 plotting 하면 그래프 상에 일직선으로 놓이게 되는데 이를 통해 농축 방법을 추정할 수 있다. 일반적인 상업용 농축시설의 경우 tail의 U-235 함량비는 0.3% 정도이나 Calutron을 사용한 Electromagnetic Isotope Separation(EMIS) 방법에서는 0.2% 보다도 더 낮은 것으로 알려져 있다.[6] 또한 U-234 함량비는 feed 물질의 원산지를

추정할 수 있게 한다. 즉, U-234는 U-238이 Th-234를 거쳐 생성된 붕괴 생성물이기 때문에 Th와 U와의 서로 다른 화학적 특성으로 인해 지역별로 52~54 ppm 정도의 서로 다른 함량 분포를 보이는 것으로 알려져 있다. 한편 UF<sub>6</sub>를 사용하는 시설에서는 UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> particle 이 발견되는데 만약 금속화 공정(핵무기는 우라늄 금속이므로)을 거쳤다면 UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 이외의 다른 화학종도 발견될 것이다.[6] U-236의 경우 천연에는 U-238에 대해 겨우 5.6x10<sup>-10</sup> 정도 존재하므로[7] 이의 발견은 이 공정에서 사용후 핵연료를 재처리하여 얻은 우라늄이 재순환되어 사용되었음을 추정케 한다. 다음 그림 3은 한 상업용 농축시설에서 채취한 시료에 대해 particle 분석한 결과이다. 이 시설에서는 최고 농축도 4.25%의 U-235를 생산하고 있다.

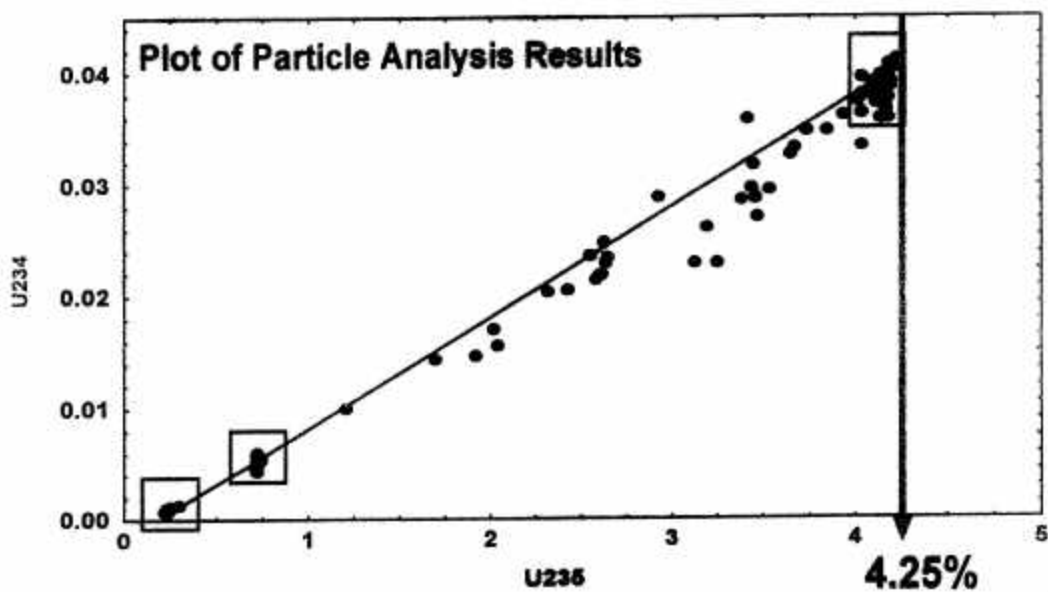


그림 3. 상업용 농축시설의 Swipe 시료 Particle 분석 결과[8]

#### 나) Hot Cell 시료의 분석결과 평가[5]

Hot cell 시설의 경우는 방사능이 매우 높은 hot cell 내부에서 채취된 시료와 hot cell 외부에서 채취된 낮은 방사능의 시료가 있다. Hot cell 외부에서 채취한 시료는 particle 분석이 가능하지만 hot cell 내부에서 채취한 시료는 방사능이 매우 높을 수 있으므로 bulk 분석만 수행하는 것을 원칙으로 하고 있다. 그러나 최근에는 hot cell 내부 시료의 경우에도 시료를 분할하는 방법으로 방사능을 낮춘 후 particle 분석이 행해질 수 있는 방안을 모색하고 있다.

Particle 분석에서는 U, Pu의 동위원소 비를 측정하며, 분석 결과는 U-235/U-234, U-235/U-236, U-236/Pu-240의 그래프로 나타내어 취급된 사용후 핵연료의 연소도 및 종류 등을 추정한다. Bulk 분석에서는 U/Pu 비 및 핵분열 생성물들의 성분비를 측정하여 핵연료의 연소도 및 종류를 추정할 수 있으며, Am-241 또는 핵분열 생성물들을 분석하여 hot cell 내부에서 사용후 핵연료가 취급된 시기를 추정할 수 있다. 순수 Pu particle이나 예상보다 U/Pu 비가 낮은 particle 들이 발견되면 이는 Pu 추출 실패가 수행되었음을 나타낸다. 다음 표 2는 사용후 핵연료 별로 나타낼 수 있는 Pu 동위원소의 함량비를 보여주

고 있다. 이와 같은 함량비를 실제의 분석 결과와 비교하여 취급된 사용후 핵연료의 특성을 파악할 수 있다.

표 2. Pu 동위원소 성분비와 핵연료 특성[8]

Pu 동위원소 성분비 (wt %)*				
동위원소	Very low Burn-up	Low Burn-up	High Burn-up	MOX High BU**
	0.4 GWD/TU	3 GWD/TU	40 GWD/TU	40 GWD/TU
Pu-238	<<	0.05	2.1	2.4
Pu-239	99.2	94.1	53.6	33.3
Pu-240	0.8	5.2	23.5	33.9
Pu-241	0.004	0.7	13.9	17.3
Pu-242	<0.001	0.02	6.9	13.1
U/Pu	4800	680	95	21

\* Irradiation of 3.5% U-235 fuel in PWR  
 \*\* MOX fuel with natural U and U/Pu = 16

### 3. 한국 시료의 분석 결과

#### 가. 제 1차 시료 채취/분석

국제원자력기구에 의한 제 1차 환경시료 채취는 '94년 6월 20-24일에 현장시험의 일환으로 수행되었다. 이 당시에는 아직 환경시료 채취/분석이 국제원자력기구의 정식 안전조치 방안 중 하나로 선택되기 이전으로서 표 3과 같은 다양한 시료들이 채취되었다.

채취한 swipe 시료에 대해서는 HRGS 방법을 사용하여 방사성 핵종에 대한 분석이 수행되었고, U, Pu 농도 및 동위원소 측정을 위한 bulk 분석과 14개 시료에 대한 particle 분석이 수행되었다. 원자력 시설 외부에서 채취한 자연 환경시료에 대해서는 bulk 분석이 수행되었으며 U, Pu 농도 및 동위원소 비가 측정되었다.

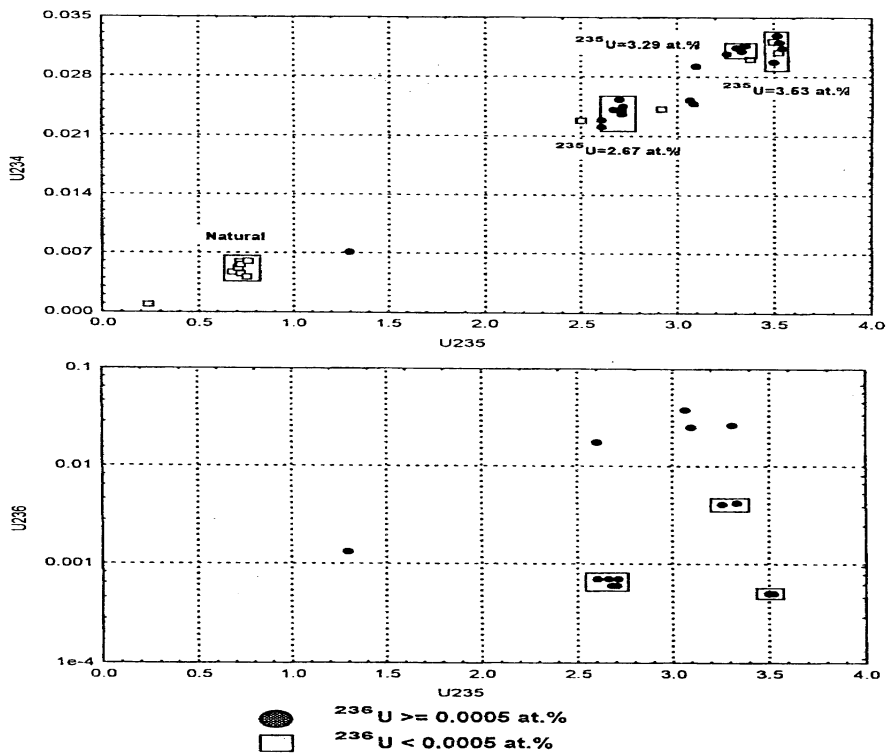
분석 결과 사용후 핵연료를 취급한 시설에서는 자연 방사성 핵종인 K-40, Ra-226을 포함하여 Cs-134, Cs-137, Co-60 등의 인공핵종들이 검출되었으며, particle 분석에서는 다양한 U-235 농축도가 검출되었고, 이 농축도들은 그동안 시설에서 취급했던 농축도들을 잘 반영하는 것으로 확인되었다. 이때 얻은 particle 분석 결과를 그림 4에 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 U-235의 농축도 분포는 DU, NU 및 경수로 핵연료 제조에 사용한 약 3.5% 농축도까지 골고루 검출되었으며, 실제로 이들은 시설에서 그동안 사용한 각종 농축도들을 모두 잘 반영하는 것으로 나타났다. U-236의 함량 비는 취급한 사용후 핵연료들의 burn-up 수준을 반영한다.



표 3. 현장시험을 위한 국제원자력기구의 환경시료 채취

구 분	채취지점 및 시료 수
시설 내부 (98 sub-samples)	Swipe 시료 채취 (14개 지점, 7 sub-samples/sample point) - Inspection Training Center : 1 - 조사후시험시설(PIEF) : 5 - 조사재시험시설(IMEF) : 1 - 중수로핵연료가공시설(CFFP) : 3 - U-변환시설 : 1 - 방사성폐기물취급시설 : 3
	Vegetation Samples (11개 지점, 4 sub-samples/sample point) - Grass : 18 - Pine Needle : 15 - Soil and Lichen : 11
시설 외부 (323 sub-samples)	Soil (4 sub-samples/sample point) : 7
	Water Samples (3 sub-samples/sample point) - Grab Water : 13 - Sediment : 11 - Biota : 11
	- Water Filter (water flow) : 14(samples)



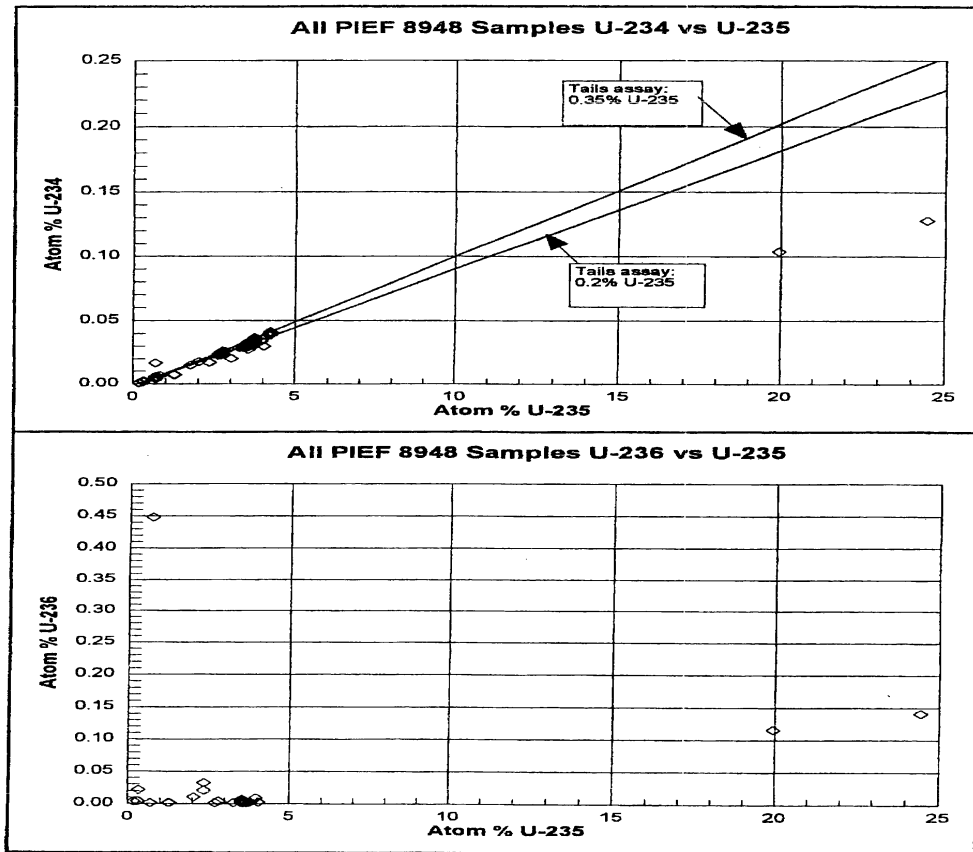
Particle Analysis Results at Field Trial in Jun '94

그림 4. 시설 내 Swipe 시료의 U 동위원소 Particle 분석 결과[9]

나. 제 2차 시료 채취/분석

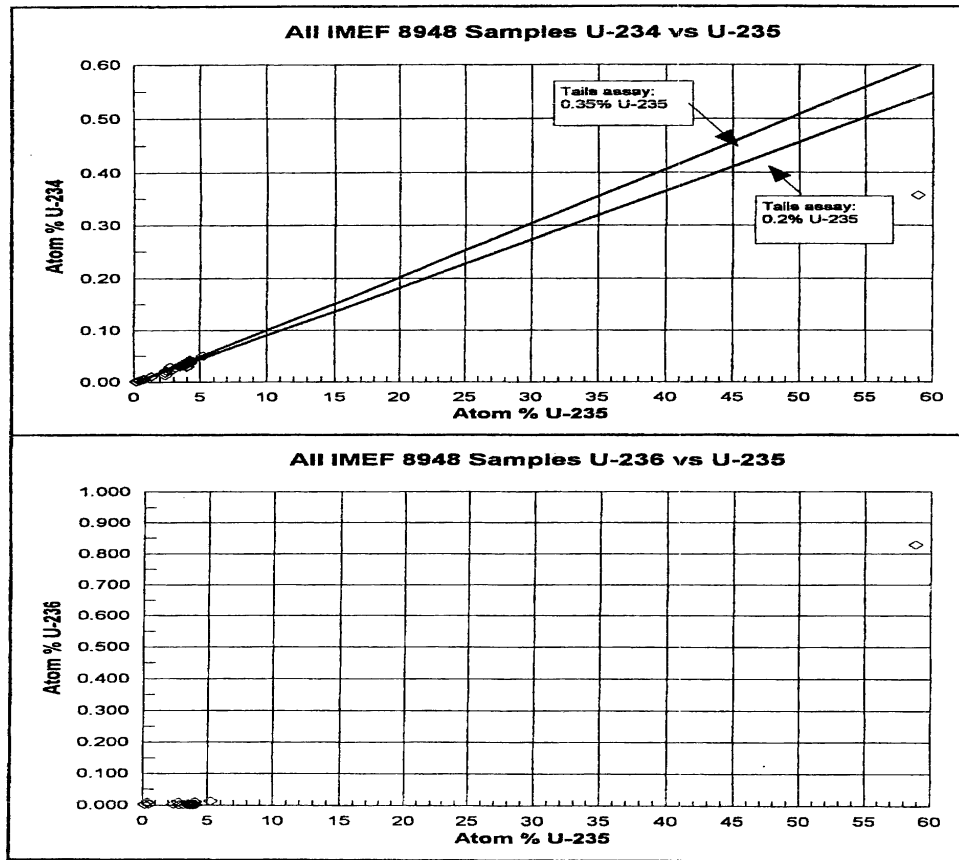
기존의 INFCIRC/153 type 협정에 의해 접근이 가능한 원자력 시설 부지 내 환경시료의 채취/분석을 안전조치의 새로운 방법으로 채택하면서 국제원자력기구는 시설별 기초자료 확보를 위한 시료 채취가 진행되었으며, 우리 나라에서는 '96년 5월 21-23일에 걸쳐 조사후시험시설에서 21개, 조사재시험시설에서 15개의 swipe 시료가 채취되었다. 국제원자력기구는 이때 채취한 시료 중 조사후시험시설 시료 15개, 조사재시험시설 시료 7개에 대하여 particle 분석 및 bulk 분석을 수행하였으며, 각 시설별 particle 분석 결과를 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

조사후시험시설 시료의 분석 결과는 역시 그 시설에서 취급한 핵물질들의 U 동위원소 비를 잘 반영하고 있으며, 조사재시험시설의 경우 그때까지 핵물질을 전혀 취급하지 않은 하나의 hot cell top access에서 58.8%의 U-235 농축도를 가진 particle이 검출되었다. 이에 대한 경위 설명과정에서 서울의 TRIGA III 손상 핵연료(초기 농축도 70%)를 '77년에 서울 TRIGA hot cell에서 취급된 사실과 연관이 있는 것으로 해석되었다. 실제로 원자로감시시편을 담은 cask들이 수차례 조사재시험시설 hot cell로 이동된 것으로 밝혀졌으며 이 운반 과정에서 58.8%의 농축도를 가진 particle이 cask에 묻어 이동된 것으로 추정되었다.



PIEF Samples in May '96

그림 5. 조사후시험시설 Swipe 시료의 U 동위원소 Particle 분석 결과[10]



### IMEF Samples in May '96

그림 6. 조사재시험시설 Swipe 시료의 U 동위원소 Particle 분석 결과[10]

다. 제 3차 시료 채취/분석[11]

'97년 11월 12-19일까지 hot cell 내부에 대한 기초자료 확보를 위해 시료 채취가 진행되었으며, TRIGA II, TRIGA III, 조사후시험시설, 조사재시험시설의 hot cell 내부 총 14개 지점에서 swipe 시료를 채취하였다.

시료에 대한 particle 분석 결과 U-235 농축도는 0.2-4.3%를 나타내었고, 여러 가지 표준 핵물질을 취급하는 화학실험용 hot cell에서는 U/Pu 비가 100 미만인 particle도 검출됨으로써 순수 Pu 용액 또는 Pu 함량이 높은 U 용액이 실제로 사용되었음을 보여 주었다. 국제원자력기구에서는 낮은 U/Pu 비(<100)의 particle이 사용후 핵연료를 취급하는 hot cell에서 발견되면 본 hot cell에서 Pu 추출 실험을 의심하는 단서로 삼고 있다. 본 hot cell의 경우 특성상 순수 Pu 표준 용액도 취급되는 곳이므로 낮은 U/Pu 비의 particle 존재가 설명이 가능하다.

라. 제 4차 시료 채취/분석[12]

정기사찰의 일환으로 '99년 12월 9일에 조사후시험시설, 조사재시험시설 및 동위원소 생산시설 등 7개 지점에서 swipe 시료가 채취되었다.

사용후 핵연료를 취급한 시설에서는 다양한 형태의 동위원소 농축도 및 방사성 핵종이 검출되었으며, 역시 그동안 취급한 핵물질들을 잘 반영하고 있다. 조사후시험시설 화학분석용 hot cell에서는 19.9% 또는 20.1% 농축도의 U가 발견되었는데, 이는 이 hot cell에서 '97년 1월 이후 취급해 온 U-Mo 또는  $U_3SiAl$  핵연료를 반영하는 것이며, 조사재시험시설에서는 '98년부터 취급한 하나로 핵연료(농축도 19.97 w%)의 취급 흔적도 나타나고 있다.

#### 4. 결 론

환경시료의 채취/분석은 아직 원자력 시설 부지 외부에 적용하는 광역 환경시료 채취/분석이 기술 외적인 여러 문제로 인해 적용이 유보되어 있는 상태이나 시설 부지 내 시료만으로도 핵활동의 검증 또는 미신고 핵활동의 추적에 매우 유용한 수단으로 인정되고 있다. 이와 같은 국제원자력기구의 활동에 효율적으로 대응하기 위하여 각 개별 국가에서도 관련 정보의 축적 및 발생할 지도 모르는 국제기구와의 마찰에 대응하기 위한 기술 개발이 필요한 상황이다.

그러나, 환경시료의 분석은 청정실험실, 고감도 질량분석기 등을 사용하는 매우 비용이 많이 들고 분석 시간도 오래 걸리는 분석 방법이다. 그러므로 개별 회원국이 이에 필요한 시설과 기술을 갖추는 것은 효율적인 대응이 될 수는 없을 것이다.

우리 나라의 경우 국제원자력기구의 안전조치 추가의정서인 INFCIRC/540에 대해 '99년 6월 서명한 상태이며 '01년 3월 현재 국회의 비준을 대기하고 있다. 또한 경수로 발전소에 대한 원격감시 체제와 환경시료 채취/분석과 같은 안전조치 강화방안에 포함되어 있는 기술들을 이미 부분적으로나마 적용하고 있는 상황이다. 따라서 국제원자력기구에 의한 환경시료 채취/분석에 대한 적극적인 참여가 대외적으로는 경수로 등과 같이 핵확산성이 적은 시설에 대한 사찰량 감소에 기여할 수 있도록 정책적 노력을 기울여야 할 것이며, 대내적으로는 향후 있을 수 있는 남북 상호사찰에서 기초자료로 활용될 수 있도록 자료의 체계적인 축적과 자료 분석 능력의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J.N. Cooley, E. Kuhn, and D.L. Donohue, "The IAEA Environmental Sampling Programme", Symposium on International Safeguards, IAEA-SM-351/182, 6, 1997.
- [2] D.L. Donohue, "Analytical Method", IAEA Inspector Training Course Material on Environmental Sampling, 1997.
- [3] J.N. Cooley, E. Kuhn, and M. Ryjinski, "Environmental Sampling for IAEA Safeguards-Status Report", Proc. of INMM 39th Annual Meeting, Florida, July 1998.
- [4] IAEA Annual Report, 89-97, 1999.
- [5] D.L. Donohue, "Strengthening IAEA Safeguards through Environmental Sampling and Analysis", J. of Alloys and Compounds 271-273, 11-18, 1998.
- [6] "Environmental Monitoring for Nuclear Safeguards", US Congress Report, Office of Technology Assessment, 1996(?).
- [7] X.L. Zhao, M.J. Nadeau, L.R. Kilius, and A.E. Litherland, "Detection of Naturally Occurring U-236 in Uranium Ore", Earth and Planetary Science Letters 124, 241-244, 1994.

- [8] "Environmental Sampling for IAEA Safeguards-Status as of 1999", IAEA presentation document, Department of Safeguards, IAEA, Dec. 1999.
- [9] D.L. Donohue, "Preliminary Report on Results of ROK Field Trial", 1994.
- [10] "Baseline Swipe Sample Results-Draft Summary of Observations", IAEA, Mar. 3, 1997.
- [11] "Baseline Swipe Sample Results-Additional Analysis Results", IAEA, Sep. 6, 1999.
- [12] "Additional Baseline Swipe Sample Results", IAEA, Sep. 11, 2000.