

핵물질 입자분석에 의한 원자력 활동 추적

Traceability of the Nuclear Material Particle Analyses for Nuclear Activities

신장수, 안진수, 소동섭

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

국제원자력기구가 추진하고 있는 안전조치 강화방안 중 하나인 환경시료의 채취/분석 기술은 신고된 원자력 활동의 검증 및 미신고 원자력 활동의 탐지에 매우 유용한 수단이다. 국제원자력기구는 '96년 초부터 회원국의 원자력 시설 현장에 적용하여 시설별 특성에 따른 기초자료 확보 업무를 진행해 왔으며, 현재는 정기사찰 시에 적용하고 있다. 본 논문에서는 국제원자력기구의 환경시료 채취/분석 체계를 소개하고, 환경시료 분석기술 중에서도 특히 과거 또는 현재의 원자력 활동 추적에 매우 유용하게 활용되고 있는 입자 분석 기술에 대하여 독일 ITU의 실험 결과를 바탕으로 기술하고자 한다.

Abstract

The environmental sample analysis, one of the technologies for the IAEA's strengthened safeguards system, was identified 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 proved 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. In this paper, the technical characteristics of the IAEA's environmental sample analysis system are introduced, and the analytical results of the Korean swipe samples at the ITU are reported.

1. 서 론

결프전 직후 실시된 이라크에 대한 UN의 사찰 결과 미신고 원자력 활동의 존재가 확인됨에 따라, 국제원자력기구는 기존의 안전조치체제(INFCIRC/ 153 type)가 핵확산을 방지에 미흡하다는 것을 인식하게 되었고, 따라서 기존 체제를 강화하여야 할 필요성이 제기되었다. 기존 체제를 강화할 수 있는 방안을 도출하기 위해 "Programme 93+2"라는 과제가 수행되었으며, 이 과정에서 환경시료의 채취/분석이 원자력 활동의 추적에 매우 유용한 수단임이 입증되었고, 이로 인해 환경시료의 채취/분석 기술이 안전조치 강화 방안에 포함되게 되었다.

환경시료의 채취/분석이 미신고 원자력 활동 추적에 유용한 것은 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 핵물질의 양은 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 현재의 원자력 활동을 추정할 수 있게 한다. 안전조치 목적으로 채취 분석되는 환경시료로는 공정시설 내 장비 또는 설비 표면에서의 swipe, 시설 주변의 토양, 식물체, 물 등이 있다.

국제원자력기구는 결프전 이후 이라크에서 채취한 환경시료의 분석 결과와 회원국들의 원자력 시설에서 시설별 특성에 따라 수행한 현장시험 결과를 통하여, 환경시료 분석 결과가 그 시설에서의 원자력 활동을 잘 반영하고 있다는 결론을 얻었다. 이를 근거로 '95년에는 기존의 안전조치 협정 하에서 접근이 가능한 시설들에 대해 설계정보 검증 시 또는 사찰 시 환경시료 채취를 부분적으로 적용하기 시작하였으며, '96년 초에는 국제원자력기구 이사회에서 본 기술을 새로운 안전조치 기술로 공식 인정하였다. 환경시료 채취 초창기에는 주로 농축시설과 hot cell 시설에서의 swipe 시료 채취에 초점이 맞추어졌다.

한국은 국제원자력기구가 '94년부터 시행한 현장시험 단계부터 적극 참여하여 왔고, '99년부터는 조사후시험시설 및 관련 분석시설과 조사재시험시설 등에서 정기사찰 시에 swipe 시료가 채취되고 있으며, 매년 개최하고 있는 한-IAEA 안전조치 검토회의에서 분석 결과를 평가하고 있다.

2. 핵물질 입자 분석기술 현황

가. 분석기술 내용

Swipe 시료는 공정설비의 연결부위나 창틀 또는 출입문 뒤 등 오랜 기간동안 쌓인 핵물질이 가장 잘 보존되어 있음직한 곳에서 paper(filter paper의 한 종류) 또는 형짚으로 일정 부위를 문질러 채취하며, 채취된 시료는 필요에 따라 시료 전

체를 대상으로 분석하기도 하고, 시료 표면에 붙어 있는 μm 직경 수준의 작은 입자들을 개별 분석하기도 한다. Swipe 시료 전체를 분석하는 것을 총량분석(bulk analysis)이라 하고, 입자 각각을 분석하는 것은 입자분석(particle analysis)이라 한다. 측정방법으로는 일반적으로 감마선 방출 핵종을 분석하는 고감도 감마선 분광분석, 우라늄 또는 플루토늄의 동위원소 구성비 및 U/Pu 비를 측정하는 질량분석 등이 있다.

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

재처리 시설에서 채취한 시료에서는 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 그동안 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.

입자에서의 핵물질 동위원소 비 분석에는 2가지 질량분석 방법이 활용되는데, fission track 검출(Lexan이용)을 거쳐 Thermal Ionization Mass Spectrometer (TIMS)을 이용하는 방법과 Scanning Electron Microscope(SEM)을 이용하여 대상 원소를 검출한 후 Secondary Ion Mass Spectrometer(SIMS)를 활용하여 U 또는 Pu의 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}g 이하를 측정할 수 있는 고감도 질량분석기가 필요하며[1], SIMS를 이용하는 경우 입자 크기가 $1\mu\text{m}$ 이상은 되어야 하므로 $0.1\mu\text{m}$ 의 입자 크기까지 측정할 수 있는 TIMS에서 보다 측정 입자의 크기가 커야하는 단점이 있으나, 시료의 전처리가 간단하여 분석비용을 절감할 수 있고, 상대측정오차도 1-5% 정도인 것으로 알려져 있다.[2] 국제원자력기구가 swipe 시료 분석에 적용하고 있는 분석법들의 특성을 표 1에 나타내었다.

이러한 분석기술들은 미국 등 일부 선진국들만이 보유하고 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, 러시아 Microparticle Analysis Lab. 및 유럽연합 산하 ITU 등이다.

<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 (10^5 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 $> 1 \mu\text{m}$
	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 $> 0.1 \mu\text{m}$
	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

나. 시료채취 및 분석[3]

"Programme 93+2"의 일환으로 국제원자력기구가 추진한 환경시료 채취/분석은 국제원자력기구 이사회의 승인을 거쳐 '96년 초부터 재처리 관련 시설과 우라늄 농축시설에 대해 적용을 시작하였다. 국제원자력기구에서 수행하고 있는 환경시료의 채취 분석은 다음과 같은 내용으로 이루어진다.

1) 시료 채취

환경시료 채취 목적이 그 시설에서의 미신고 원자력 활동 부재에 대한 신뢰성 증진에 있음에 비추어, 이 목적을 만족시키기 위해서는 시설의 설계 특성과 운영 정보를 바탕으로 시료를 채취하여야 한다. 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 생산을 위한 재처리 작업, 고농축 우라늄의 취급, 특정 종류나 형태의 조사후 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 채취하여야 한다.

시료 채취는 시설 별로 수립된 시료 채취 절차에 따라 표준화된 시료채취 도구를 이용하여 훈련된 사찰관에 의해 수행된다. 국제원자력기구는 시설 특성에 맞게 채취 도구를 개발하여 사용하고 있다.[4]

시료채취 도구는 오스트리아 Seibersdorf에 있는 국제원자력기구 분석실험실의 class-100 청정실험실에서 준비되어 사찰관에게 지급되며, 원 시료뿐만 아니라 background 및 교차오염을 확인할 수 있도록 채취자의 손을 닦은 control 시료도 준비한다. 시료는 Seibersdorf 실험실에서 γ -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 취급되고 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.[5] 이 분석이 시료 당 약 \$1,000 정도의 비용이 소요되기 때문에 예산상 시료 채취량을 급격히 확대하기는 어려울 것이다.

2) 분석자료 평가

Seibersdorf 실험실 또는 NWAL에서 보내온 시료 분석 결과는 국제원자력기구 안전조치부(Department of Safeguards)로 보내지며, 채취된 시설의 신고된 원자력 활동에 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 재평가를 하게 된다. 재 측정을 위해서는 처음 채취한 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 특성 별로 평가되어 새로운 시설에서의 예상 신호를 예측하는 기본 자료로 활용된다.

가) 농축시설 시료의 분석결과 평가[6]

우라늄 농축시설에서 채취한 swipe 시료 내 입자들은 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 원자력 활동을 평가하게 된다.

시료를 총량분석하면 U-235 농축공정 중의 단계별 농축도들이 평균적으로 나타나게 되어 원료물질(주로 천연우라늄, U-235; 0.726 at%)의 농축도와 유사한 농축도를 보이게 된다. 따라서 총량분석을 통해서만 유효한 정보를 얻기가 어렵다. 그러나 입자들을 분석하여 U-235 함량비를 측정하면 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.[7] 또한 U-234 함량비는 원료물질의 원산지를 추정할 수 있게 한다. 즉, U-234는 U-238이 Th-234를 거쳐 생성된 붕괴 생성물이기 때문에 Th와 U과의 서로 다른 화학적 특성으로 인해 지역별로 52~54 ppm 정도의 서로 다른 함량 분포를 보이는 것으로 알려져 있다. 한편 UF₆를 사용하는 시설에서는 UO₂F₂ 입자가 발견되는데 만약 금속화 공정(핵무기는 우라늄 금속이므로)을 거쳤다면 UO₂F₂ 이외의 다른 화학종도 발견될 것이다.[7] U-236의 경우 천연에는 U-238에 대해 겨우 5.6x10⁻¹⁰ 정도 존재하므로 [8] 이의 발견은 이 공정에서 사용후 핵연료를 재처리하여 얻은 우라늄이 재순환되어 사용되었음을 추정케 한다. 그림 1은 한 상업용 농축시설에서 채취한 시료에 대해 입자분석한 결과이다. 이 시설에서는 최고 농축도 4.25%의 U-235를 생산하고 있다.

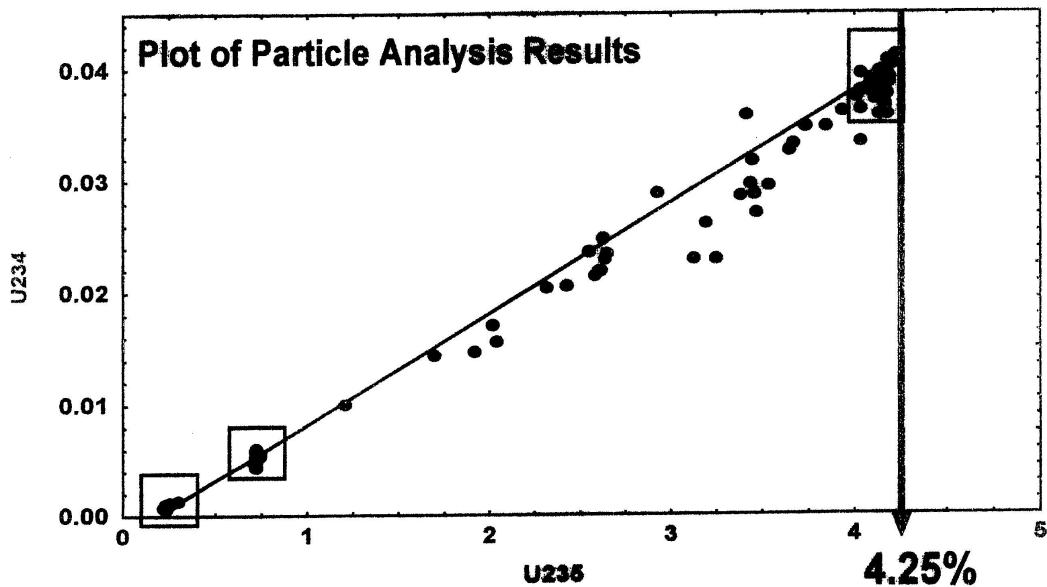


그림 1. 상업용 농축시설의 Swipe 시료 내 우라늄 입자분석 결과[9]

나) Hot Cell 시료의 분석결과 평가[6]

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 입자분석이 가능하지만 hot cell 내부에서 채취한 시료는 방사능이 매우 높을 수 있으므로 총량분석만 수행하는 것을 원칙으로 하고 있다. 그러나 최근에는 hot cell 내부 시료의 경우에도 시료를 분할하는 방법으로 방사능을 낮춘 후 입자분석할 수 있는 방안을 모색하고 있다.

입자분석에서는 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. 총량분석에서는 U/Pu 비 및 핵분열 생성물들의 성분비

를 측정하여 핵연료의 연소도 및 종류를 추정하고, Am-241 또는 핵분열 생성물들을 분석하여 hot cell 내부에서 사용후 핵연료가 취급된 시기를 추정한다. 순수 Pu 입자나 예상보다 U/Pu 비가 낮은 입자들이 발견되면 이는 Pu 추출 실험이 수행되었음을 나타낸다. 표 2는 사용후 핵연료 별로 나타날 수 있는 Pu 동위원소 함량비를 보여주고 있다. 이와 같은 함량비를 실제의 분석 결과와 비교하여 취급된 사용후 핵연료의 특성을 파악할 수 있다.

<표 2> Pu 동위원소 성분비와 핵연료 특성[9]

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. SIMS을 이용한 U 입자 분석

가. Swipe 시료의 전처리

채취/운반된 swipe 시료는 알파 및 감마 측정기를 사용하여 시료에 대한 방사능 정도를 측정 후 이를 청정실험실로 옮겨 시료간 교차오염이 발생하지 않도록 세심한 주의를 기울여 전처리를 행한다. 청정실험실의 청정도는 실험실 전체를 class 100 정도로 유지하면서 작업이 이루어지는 chemical hood나 clean chamber는 class 10으로 유지한다.

실험 table 위에 비치한 비닐 glove bag에 시료를 넣고 입자가 많이 붙어 있을 만한 형겅 부위에서 약 1cm x 1cm 크기로 3~4개의 조각을 자른 후 이를 직경 약 1.5cm 높이 약 10cm 크기의 n-Heptan이 담겨진 유리 vial에 넣고, 초음파 세척기를 이용하여 형겅 조각에 붙어있는 입자들이 n-Heptan에 효율적으로 떨어져 나가도록 약 5분 동안 진동시킨다. 유리 vial에 들어 있는 n-Heptan 용액은 잠시 방치해 둔 후 20 μ l micro-pipett을 사용하여 용액 상부에 부유되어 있는 입자를 조

심스럽게 취하여 chemical hood 내 hot plate 위에서 표면온도가 60~70도가 되도록 미리 가열해 둔 직경 1", 두께 약 3mm의 graphite plate 위에 소량씩 떨어뜨려 n-Heptan이 잘 마르기를 기다린다. 이 과정을 10여 회 반복하여 n-Heptan 용액 중에 들어있는 입자들이 graphite plate 위에 골고루 분포하여 부착되도록 한다. 이후 graphite plate 위에 남아 있는 n-Heptan 유기물들을 제거하기 위해 200도 이상으로 가열한다.

Graphite plate는 일반 실험실에 있는 SEM에 넣어 밤새 U 입자를 scanning 하여 U 입자의 위치와 수를 파악한다.

나. 입자내 U 동위원소 비 분석

입자가 부착된 graphie plate SIMS에 옮겨 250 μ m x 250 μ m 크기로 U-238에 대해 defocusing 한 primary ion(O₂⁺) beam을 조사하여 ion image 방식으로 mass scanning을 하여 유효한 우라늄 입자를 찾아낸다. 이어 primary ion beam을 입자에 focusing하여 발생하는 secondary 이온을 질량분석함으로써 동위원소 비를 측정한다.

매 측정 전후에 표준 U 입자시료를 이용하여 검정을 하며, 표준 U 입자시료는 미국 NIST의 1%, 3%, 10% U-235 농축 질산용액을 표준물질로 하여 ITU에서 자체 제조한 것을 사용하고 있다. 표준 입자시료는 표준 질산용액을 주사기로 분사한 후 3단계에 걸친 고온 furnace를 거쳐 graphite plate에 부착시키는 방법을 사용하고 있다. 만들어진 입자의 모양과 크기 등은 용액을 주사시킨 량 및 속도, 용액 입자가 통과하는 3개의 중간 furnace 온도 등에 민감하게 의존한다.

4. 분석 결과 및 검토

'96년 5월 국제원자력기구 사찰관과 함께 연구소 조사후시험시설에서 채취한 swipe 시료 2 셀(시료번호 : TCNC-08, TCNC-19)을 독일 ITU 연구소에 의뢰하여 입자분석하였다. TCNC-08은 lead cell 외부에서, TCNC-19는 waste analysis room 바닥에서 채취된 것이다.

각 시료 셀은 시료 채취 전에 채취자의 손을 문질러 보관한 control swipe 시료 1개와 실제 시료 3개로 구성되어 있다. 각 시료는 앞에 기술한 3.가항의 절차에 따른 전처리 과정을 거쳐 입자가 부착된 graphite plate가 준비되었고, 이는 다시 SEM에 의해 U 입자 분포가 결정되었으며, SIMS에 의해 입자 별 U 동위원소 비가 측정되었다. 그림 2는 TCNC-08 시료를 처리하여 얻은 graphite plate에서 SEM을 이용하여 측정한 U 입자 분포이다. 시료 형질의 일부분을 1cm x 1cm 로 잘라낸 조각 3~4개를 처리하여 얻은 것인데도 1,000개 이상의 U 입자들이 존재함을 알 수 있다.

TCNC-08에서 임의로 선정한 30개 particle과 TCNC-19에서 선정한 48개 particle의 U 동위원소 비는 각각 표 3과 표 4와 같이 측정되었다.

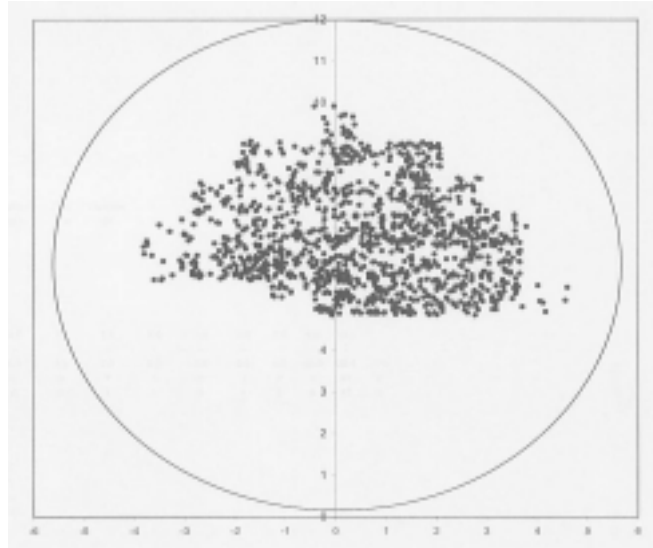


그림 2. U-Particle Distribution in TCNC-08

<표 3> TCNC-08 분석 결과

Particle No.	U-234 atom %	U-234 1 σ	U-235 atom %	U-235 1 σ	U-236 atom %	U-236 1 σ
1			0.8840	0.1274		
2			0.7419	0.0464		
3	0.2104	0.0320	3.0881	0.3591	0.1999	0.0711
4			0.7342	0.0433		
5			3.0633	0.3044		
6			2.7599	0.1125		
7	0.1539	0.0355	2.8750	0.2990	0.1683	0.0507
8			0.7575	0.0756		
9			3.2686	0.2523		
10			1.0261	0.0976		
11			2.8354	0.1937		
12			0.7862	0.0495		
13			2.8161	0.0780		
14			2.7595	0.0909		
15			0.2364	0.0175		
16			0.2344	0.0256		
17			3.5523	0.0918		
18			0.7421	0.0280		
19			2.7036	0.0718		
20			0.3788	0.0979		
21			0.7834	0.0260		
22			0.8995	0.0767		
23			0.8502	0.0389		
24			0.2314	0.0205		
25			0.7324	0.0119		
26	0.0120	0.0023	0.7265	0.0381		
27			3.5929	0.2414		
28			0.8197	0.1060		
29			0.8141	0.0966		
30			0.7762	0.0605		

<표 4> TCNC-19 분석 결과

Particle No.	U-234 atom %	U-234 1 σ	U-235 atom %	U-235 1 σ	U-236 atom %	U-236 1 σ
1			0.2582	0.0300		
2			0.2274	0.0255		
3			0.3097	0.0241		
4			0.2620	0.0397		
5			0.2214	0.0190		
6	0.0198	0.0043	0.2165	0.0103		
7	0.0077	0.0025	0.2115	0.0138		
8	0.0177	0.0038	0.2204	0.0258		
9	0.0442	0.0092	3.7980	0.2248	0.0066	0.0027
10			0.3813	0.0211		
11			0.2224	0.0227		
12			0.2423	0.0318		
13	0.0086	0.0024	0.7069	0.0211		
14			0.3095	0.0281		
15	0.00436	0.00182	0.20855	0.01812		
16			0.23732	0.01612		
17			0.24427	0.00973		
18	0.04825	0.00385	3.64019	0.10672	0.01015	0.00511
19			0.22638	0.01194		
20			0.2810	0.0397		
21			0.2284	0.0164		
22	0.0111	0.0026	0.2304	0.0176	0.00487	0.00192
23	0.0157	0.0063	0.2244	0.0153	0.00636	0.00193
24	0.0062	0.0010	0.2135	0.0125	0.00471	0.00190
25	0.0363	0.0051	3.5944	0.0649	0.00602	0.00214
26	0.0099	0.0030	0.2065	0.0172	0.00578	0.00201
27			3.4724	0.1173		
28			3.5750	0.1476		
29	0.0178	0.0048	0.6969	0.0323	0.00780	0.00431
30			0.2334	0.0291		
31	0.0498	0.0190	3.5655	0.1059	0.02090	0.00449
32	0.0125	0.0074	0.2165	0.0108	0.00430	0.00182
33	0.0173	0.0026	0.2205	0.0184	0.01099	0.00416
34			0.2333	0.0243		
35			0.2323	0.0231		
36	0.0131	0.0053	0.2195	0.0237	0.01010	0.00496
37	0.0066	0.0020	0.2115	0.0128	0.00353	0.00121
38			0.2473	0.0329		
39			0.3982	0.0476		
40			0.2828	0.0378		
41			3.38717	0.05837		
42			0.27095	0.02116		
43			0.30562	0.05012		
44	0.01396	0.00191	0.24829	0.02536		
45			3.56501	0.06253		
46	0.03492	0.00526	3.76129	0.08064	0.00708	0.00185
47			0.22837	0.02418		
48			0.83683	0.05009		

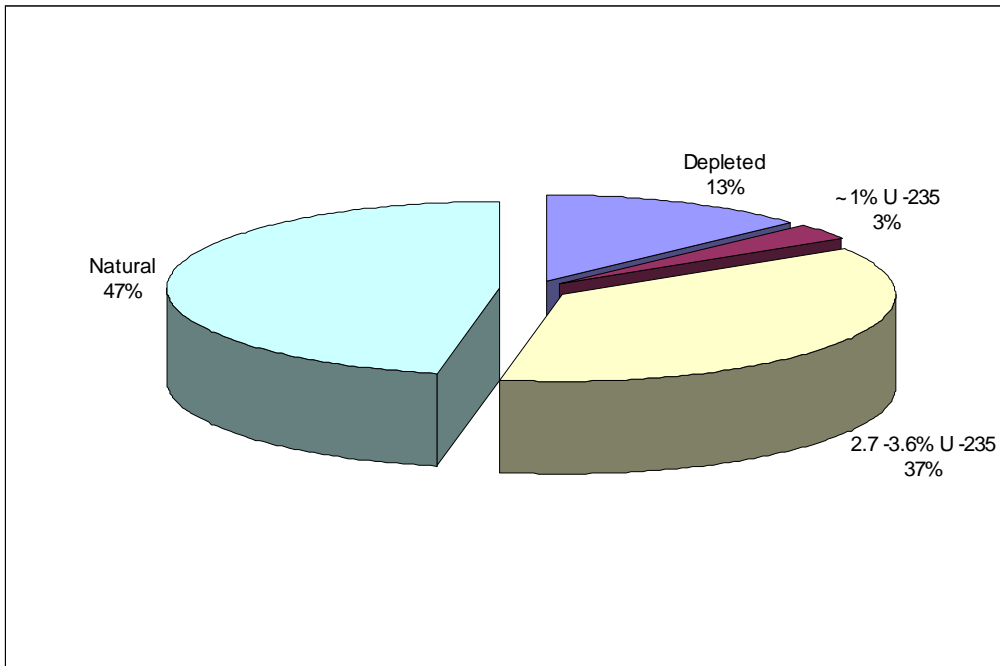


그림 3. Enrichment Distribution of U particles in the Sample TCNC-08

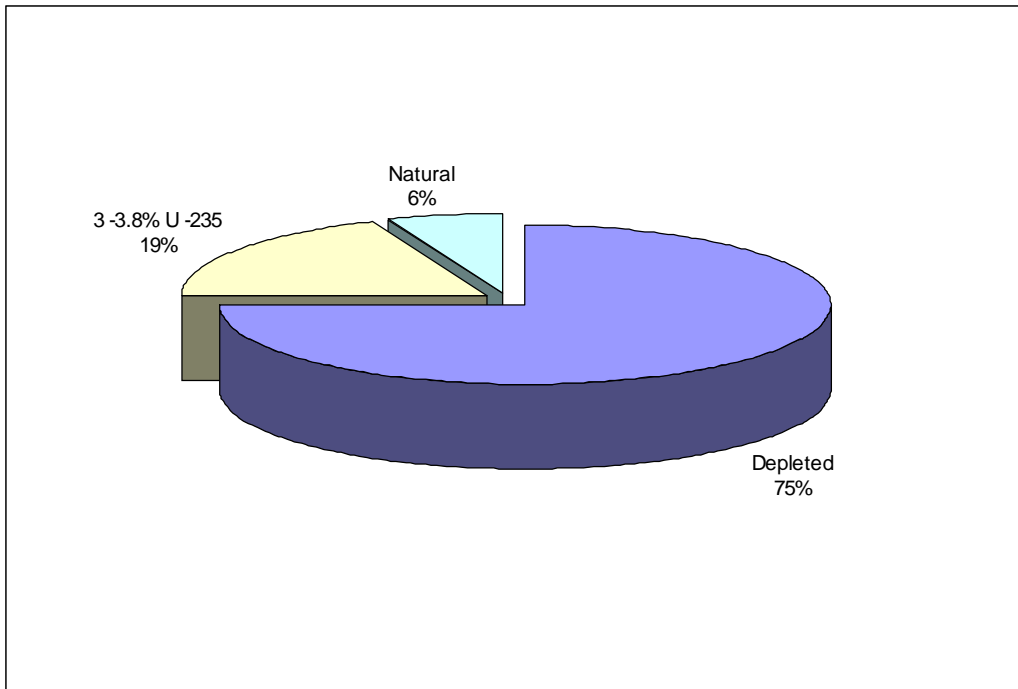


그림 4. Enrichment Distribution of U Particles in the Sample TCNC-19

그림 3에서 보는 바와 같이 시료 TCNC-08에서는 U-235의 농축도가 2.7~3.6%의 저농축 우라늄이 37%, 천연우라늄이 47% 및 감손우라늄이 13% 존재하는 것으로 측정되었다. 또한 그림 4와 같이 시료 TCNC-19에서는 농축도 3~3.8%의 저농축 우라늄이 19%, 천연우라늄이 6% 및 감손우라늄이 75% 검출되었다.

두 시료 모두에서 그동안 그 시설에서 취급해온 핵물질의 특성을 벗어나지 않는 결과를 얻었다.

이와 같이 환경시료의 채취/분석은 원자력 활동의 검증 또는 미신고 원자력 활동의 추적에 매우 유용한 수단으로 입증되고 있다. 따라서 국제원자력기구는 미신고 원자력 활동의 탐지를 위해 환경시료의 채취/분석을 적극적으로 활용해 나갈 것으로 예상된다. 이와 같은 국제기구의 활동에 효율적으로 대응하기 위하여 각 개별 국가에서도 관련 정보의 추적 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 수 없을 것이다.

우리 나라의 경우도 국제원자력기구에 의한 환경시료 채취/분석에 대한 적극적인 참여와 국제적으로 공인된 외국의 연구기관과의 협력을 통해 환경시료 분석 결과에 대한 평가 능력을 제고해 나가는 것이 매우 중요하다. 이는 또한 향후 있을 수 있는 남북 상호사찰에서 기초자료로도 활용될 수 있으므로 자료의 체계적인 추적과 자료 분석 능력 개발을 지속적으로 추진해 나가야 할 것이다.

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] 신장수, 안진수, "국제원자력기구의 안전조치 환경시료 분석체제와 한국 환경시료의 분석결과에 대한 검토", 2001년 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2001년 5월 24-25일, 제주대학교.
- [5] IAEA Annual Report, 89-97, 1999.
- [6] D.L. Donohue, "Strengthening IAEA Safeguards through Environmental Sampling and Analysis", J. of Alloys and Compounds 271-273, 11-18, 1998.
- [7] "Environmental Monitoring for Nuclear Safeguards", US Congress Report, Office of Technology Assessment, 1996(?).

- [8] 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.
- [9] "Environmental Sampling for IAEA Safeguards-Status as of 1999", IAEA presentation document, Department of Safeguards, IAEA, Dec. 1999.