

## 핵활동 탐지를 위한 핵물질 입자분석의 활용

### Application of Particle Analysis for Verifying Nuclear Activities

신장수, 민경식

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

국제원자력기구가 안전조치 강화방안 중 하나로 채택하고 있는 환경시료의 채취/분석 기술은 신고된 원자력 활동의 검증 및 미신고 원자력 활동의 탐지에 매우 유용한 수단이다. 이 기술 중에서도 원자력 시설 내에서 채취한 swipe 시료 내의 핵물질 입자분석 기술은 그 시설 내에서의 원자력 활동 역사를 잘 반영하는 것으로 확인되었다. 따라서, 국제원자력기구는 '96년 초부터 회원국의 원자력 시설 현장에 적용하고 있으며, 그동안 시설 특성에 따른 기초자료 확보를 진행해 왔고, 현재는 정기사찰 시에 적용하고 있다. 이와 같은 국제원자력기구의 사찰 강화에 대응하고, 또한 자체 기술력 향상을 위하여 TCNC에서는 독일 소재 ITU와 협력 관계를 유지하고 있으며, 일정량의 국내 시료를 분석 의뢰하고 있다. 본 논문에서는 환경시료 분석기술 중에서도 특히 과거 또는 현재의 원자력 활동 추적에 매우 유용하게 활용되고 있는 입자분석 기술을 소개하고, 국내 시료의 분석을 위한 독일 ITU와의 협력 관계와 시료 분석결과를 기술하고자 한다.

#### Abstract

The environmental sample analysis for the IAEA's strengthened safeguards system was identified to be one of the powerful techniques for verification of declared nuclear activities or monitoring the clandestine nuclear activities. The effectiveness and the efficiency of the technique have been tested and proved through the field trials. Among environmental sample analysis techniques, the isotopic ratio measurement of a nuclear material particle in swipe sample has been attracting many attentions due to its powerful effectiveness for verifying nuclear activities which have been done in the facility. Baseline campaigns for various types of nuclear facilities, especially enrichment plant and reprocessing/or hot-cell facilities, were proceeded by the IAEA from early 1996.

In this paper, the technical characteristics of the environmental sample analysis are introduced, and the analytical results of the Korean swipe samples at the ITU are reported.

## 1. 서 론

걸프전 직후 실시된 이라크에 대한 UN의 사찰 결과 미신고 원자력 활동의 존재가 확인됨에 따라, 국제원자력기구는 기존의 안전조치체제(INFCIRC/153 type)가 핵확산 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 어떤 원자력 활동이라 하더라도 운전 중 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 핵물질의량은 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 표면에서 형질 또는 특수 paper로 채취하는 swipe 시료 및 시설 주변의 토양, 식물체, 물 등의 시료들이 있다. 이 시료들 중에서도 swipe 시료 내에 존재하는 핵물질(U, Pu) 입자 각각에 대하여 동위원소 분포 비를 분석하는 입자분석 결과는 시설에서의 핵활동을 추정하는데 매우 유용한 정보를 제공해 주고 있다.

국제원자력기구는 걸프전 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.

한국은 국제원자력기구가 '94년부터 시행한 현장시험 단계부터 적극 참여하여 왔고, 시설별 baseline campaign을 거쳐 '02년부터는 조사후시험시설 및 관련 분석시설과 조사재시험시설 등에서 정기사찰 시에 swipe 시료가 채취되고 있으며, 매년 개최하고 있는 한-IAEA 안전조치 검토회의에서 분석 결과를 평가하고 있다.

## 2. 입자분석 기술 현황

### 가. 분석 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 형겔지로 일정 부위를 문질러 채취하며, 채취된 시료는 필요에 따라 시료 전체를 대상으로 분석하기도 하고, 시료 표면에 붙어 있는  $\mu\text{m}$  직경 수준의 작은 입자들을 개별 분석하기도 한다. Swipe 시료 전체를 분석하는 것을 총량분석(bulk analysis)이라 하며, 입자 각각을 분석하는 것은 입자분석(particle analysis)이라 한다. 측정방법으로는 일반적으로 감마선 방출 핵종을 분석하는 고감도 감마선 분광 분석, 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 각 입자 별 U/Pu, Pu-240/Pu-239, Pu-240/Pu 등을 측정하여 그 시설에서 취급한 사용후 핵연료의 연소도를 추정하고, 농축시설에서는 우라늄 입자 각각에서 U-235 동위원소 비를 측정함으로써 그동안 생산된 핵물질의 농축도를 추정할 수 있다. 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)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 입자 크기가  $1\mu\text{m}$  이상 TIMS를 이용하는 경우는 입자 크기가  $0.1\mu\text{m}$  정도 되어야 한다. 그러나 SIMS를 이용하는 분석 방법의 경우 시료의 전처리가 TIMS를 이용하는 분석 방법에 비해 훨씬 간단하므로 분석비용을 절감할 수 있는 장점이 있어 입자 크기의 제약에도 불구하고 활용 선호도가 크다. 다음 <표 1>은 swipe 시료 분석에 적용하고 있는 분석법들을 보여 준다.

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, 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                                                          |
|-------------------|---------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Bulk Analysis     | Low-Background 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                            |
|                   | DNAA                | Fissile materials (U-235, Pu-239)      | Concentration DL= pg                                                 |
|                   | TIMS, ICP-MS        | U, Pu                                  | Concentration DL= pg                                                 |
|                   |                     | U isotopes                             | Abundance (ratios)                                                   |
|                   |                     | Pu isotopes                            | Abundance (ratios)                                                   |
| Particle Analysis | SIMS (with SEM)     | U, Pu                                  | Concentration in particles with diameter > 1 μm                      |
|                   |                     | U isotopes                             | Abundance (ratios) in particles                                      |
|                   |                     | Pu isotopes                            | Abundance (ratios) in particles                                      |
|                   | TIMS (with Lexan)   | 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                                      |

\*\* HRGS : High-Resolution Gamma Spectrometry  
 DNAA : Delayed Neutron Activation Analysis  
 TIMS : Thermal Ionization Mass Spectrometry  
 ICP-MS : Inductively Coupled Plasma MS  
 SIMS : Secondary Ion Mass Spectrometry  
 SEM : Scanning Electron Microscope

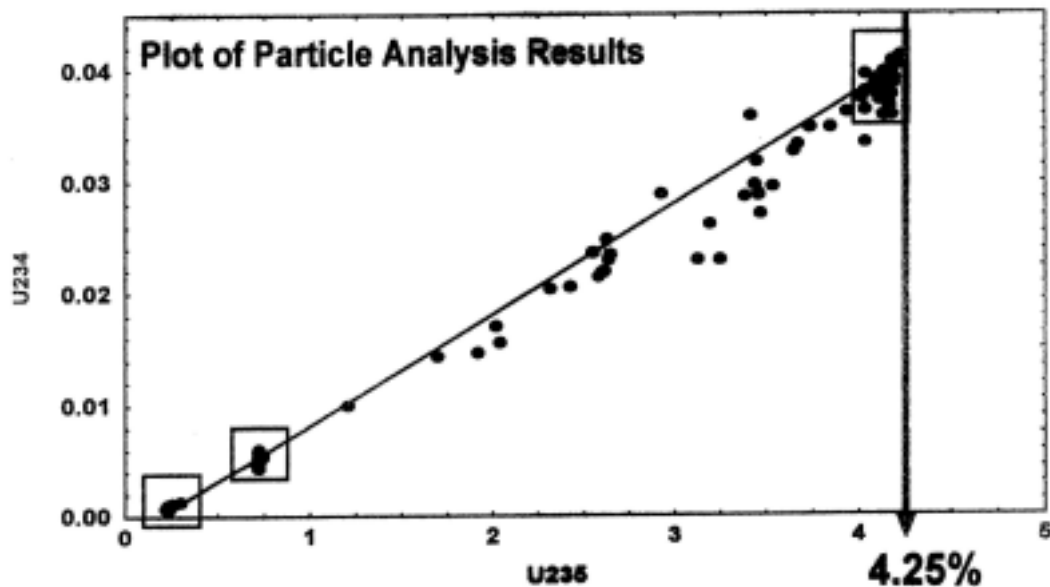
#### 나. 분석 결과 평가

##### 1) 농축시설 시료의 분석결과 평가[3]

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 나타

나게 되어 원료물질(주로 천연우라늄, U-235; 0.726 atom%)의 농축도와 유사한 농축도를 보이게 된다. 따라서 총량분석을 통해서도 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.[4] 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 UF<sub>6</sub>를 사용하는 시설에서는 UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 입자가 발견되는데 만약 금속화 공정(핵무기는 우라늄 금속이므로)을 거쳤다면 UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 이외의 다른 화학종도 발견될 것이다.[4] U-236의 경우 천연에는 U-238에 대해 겨우  $5.6 \times 10^{-10}$  정도 존재하므로 [5] 이의 발견은 이 공정에서 사용후 핵연료를 재처리하여 얻은 우라늄이 재순환되어 사용되었음을 추정케 한다. <그림 1>은 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[6]

#### 나) Hot Cell 시료의 분석결과 평가[3]

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 입자분석하기도 한다.

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 성분비를 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[6]

| Pu 동위원소 성분비 (wt %)*                      |                     |                |                 |                  |
|------------------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|------------------|
| 동위원소                                     | Very low<br>Burn-up | Low<br>Burn-up | High<br>Burn-up | MOX<br>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 ITU에서의 U 입자 분석

#### 가. 시료의 준비

'96년 5월 국제원자력기구 사찰관과 함께 연구소 조사후시험시설 및 조사재시험 시설에서 채취한 swipe 시료를 독일 ITU에 의뢰하여 입자분석 하였다. TCNC에서는 ITU와의 분석 용역계약을 체결하고 매년 4개의 시료를 분석 의뢰하기로 하였으며, '01년에 2셀(TCNC-08: PIEF lead cell 외부, TCNC-19: PIEF radioactive

waste analysis room 바닥), '02년에 4셀(TCNC-17: PIEF chemical room & equipment surface, TCNC-21: PIEF chemical waste tank & storage room surface, TCNC-10: PIEF top hatch on lead cell, TCNC-32: IMEF top access on cell M4)이 분석의뢰 되었다. '03년에는 TCNC 국가 사찰관이 8월에 조사후시험시설 및 조사재시험시설의 작업장 내에서 채취한 시료 4셀(PIEF0301, PIEF0302, IMEF0301, IMEF0302)이 분석되었다.

#### 나. Swipe 시료의 전처리

채취/운반된 swipe 시료는 알파 및 감마 측정기를 사용하여 시료에 대한 방사능 정도를 측정한 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 형질 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 형질 조각에 붙어있는 입자들이 n-Heptan에 효율적으로 떨어져 나가도록 약 5분 동안 진동시킨다. 유리 vial에 들어 있는 n-Heptan 용액은 잠시 방치해 둔 후 20 $\mu$ l micro-pipett을 사용하여 용액 상부에 부유되어 있는 입자를 조심스럽게 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.

#### 다. 입자내 U 동위원소 비 분석

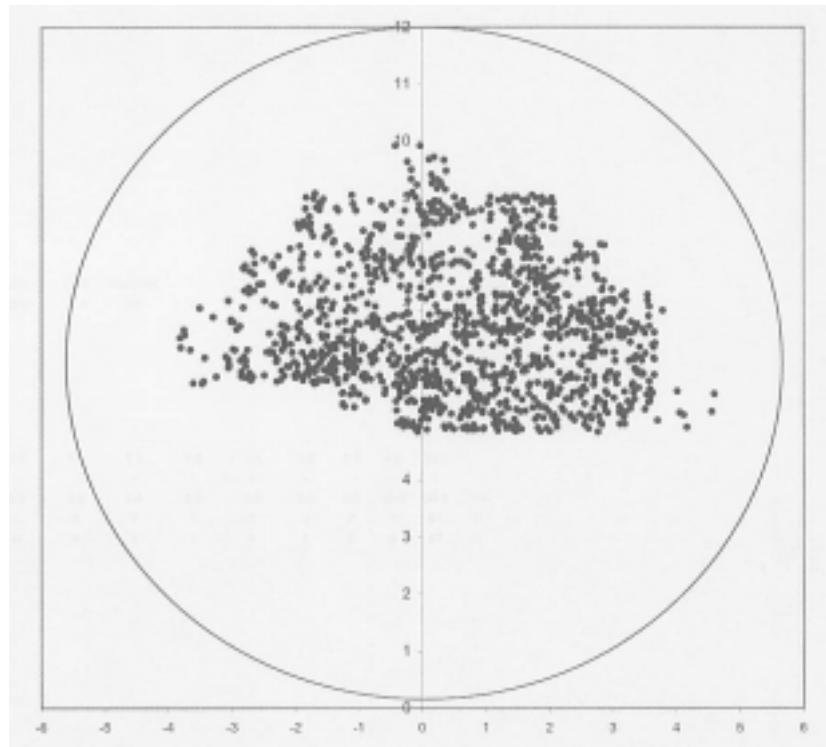
입자가 부착된 graphite plate SIMS에 옮겨 250 $\mu$ m x 250 $\mu$ m 크기로 U-238에 대해 defocusing 한 primary ion( $O_2^+$ ) beam을 조사하여 ion image 방식으로 mass scanning을 하여 유효한 우라늄 입자를 찾아낸다. 이어 primary ion beam을 입자에 focusing하여 발생하는 secondary 이온을 질량 분석함으로써 동위원소 비를 측정한다.

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, 용

액 입자가 통과하는 3개의 중간 furnace 온도 등에 민감하게 의존한다.

#### 4. 분석 결과 및 검토

TCNC-08 시료를 처리하여 얻은 graphite plate에서 SEM을 이용하여 측정한 U 입자 분포를 <그림 2>에 나타내었다. 시료 형질의 일부분을 1cm x 1cm 로 잘라 낸 조각 3~4개를 처리하여 얻은 것인데도 1,000개 이상의 U 입자들이 존재함을 알 수 있다.



<그림 2> U-Particle Distribution in TCNC-08

이와 같이 처리된 graphite plate는 SIMS로 옮겨져 U의 동위원소 비가 측정된다. 각 시료 내 U 입자들에 대한 U-235 농축도를 <표 3>에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 전반적으로 조사후시험시설에서 채취한 시료들에서는 우리나라 경수로에서 사용하고 있는 핵연료의 농축도를 벗어나지 않는 농축도 검출 결과를 보이고 있다. Chemical waste 및 방사능 폐기물을 취급/또는 보관하는 위치에서 채취한 시료들에서는 5% 수준의 비교적 높은 농축도 입자들이 발견되었는데, 이는 아마도 농축도 검정을 위한 다양한 농축도의 표준시료 사용과 이들의 혼합에 의해 만들어진 입자들에 기인하는 것으로 보인다. TCNC-32 시료는 '96년도에 조사재시험시설의 M4 cell top access 부분에서 채취된 시료로서 당시까지는 아직 핵물질이 취급되지 않았던 시기이며, 분석 결과에서도 핵물질이 발견되지 않았다. 한편 '03년도 조사재시험시설 hot cell 주변에서 채취한 시료(IMEF0301)에서는 약 20% 농축도의 입자가 검출되었으며, 이는 하나로 핵연료의 취급을 반영하고 있다.

<표 3> 시료별 U-235 농축도(atom %) 분포

|                | TCNC-08 | TCNC-19 | TCNC-17 | TCNC-21 | TCNC-10 | TCNC-32 | PIEF0301 | PIEF0302 | IMEF0301 | IMEF0302 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
| DU<br>or<br>NU | 0.231   | 0.228   | 0.698   | 0.243   | 0.700   | none    | 0.203    |          | 0.199    | none     |
|                | 0.234   | 0.230   | 0.705   | 0.276   | 0.714   |         | 0.207    |          | 0.216    |          |
|                | 0.236   | 0.232   | 0.708   | 0.759   | 0.733   |         | 0.208    |          | 0.772    |          |
|                | 0.378   | 0.233   | 0.718   | 0.786   | 0.739   |         | 0.208    |          | 0.773    |          |
|                | 0.726   | 0.233   | 0.720   |         | 0.741   |         | 0.210    |          |          |          |
|                | 0.732   | 0.237   | 0.720   |         | 0.748   |         | 0.326    |          |          |          |
|                | 0.734   | 0.242   | 0.721   |         | 0.751   |         | 0.693    |          |          |          |
|                | 0.741   | 0.244   | 0.727   |         | 0.754   |         | 0.698    |          |          |          |
|                | 0.742   | 0.247   | 0.732   |         | 0.757   |         | 0.706    |          |          |          |
|                | 0.757   | 0.248   | 0.735   |         | 0.758   |         | 0.716    |          |          |          |
|                | 0.776   | 0.258   | 0.737   |         | 0.761   |         | 0.724    |          |          |          |
|                | 0.783   | 0.262   | 0.738   |         | 0.768   |         | 0.732    |          |          |          |
|                | 0.786   | 0.270   | 0.739   |         | 0.769   |         | 0.738    |          |          |          |
|                |         | 0.281   | 0.740   |         | 0.778   |         | 0.748    |          |          |          |
|                |         | 0.282   | 0.747   |         | 0.781   |         | 0.749    |          |          |          |
|                |         | 0.305   | 0.749   |         | 0.787   |         | 0.760    |          |          |          |
|                |         | 0.309   | 0.760   |         | 0.790   |         |          |          |          |          |
|                |         | 0.309   | 0.761   |         | 0.794   |         |          |          |          |          |
|                |         | 0.381   | 0.769   |         | 0.795   |         |          |          |          |          |
|                |         | 0.398   | 0.787   |         |         |         |          |          |          |          |
|                |         | 0.696   | 0.794   |         |         |         |          |          |          |          |
|                |         | 0.706   |         |         |         |         |          |          |          |          |
| EU             | 0.814   | 0.836   | 2.937   | 3.889   | 0.812   | none    | 2.610    | 0.969    | 0.820    | none     |
|                | 0.819   | 3.387   |         | 4.132   | 0.817   |         | 2.790    | 0.950    | 0.840    |          |
|                | 0.850   | 3.472   |         | 4.404   | 0.846   |         | 3.665    |          | 0.853    |          |
|                | 0.884   | 3.565   |         | 4.520   | 0.855   |         |          |          | 3.097    |          |
|                | 0.899   | 3.565   |         | 4.587   | 1.552   |         |          |          | 19.337   |          |
|                | 1.026   | 3.575   |         | 4.725   | 2.733   |         |          |          | 20.842   |          |
|                | 2.703   | 3.594   |         | 4.732   | 3.492   |         |          |          |          |          |
|                | 2.759   | 3.640   |         | 4.869   | 3.570   |         |          |          |          |          |
|                | 2.759   | 3.761   |         | 5.057   | 3.622   |         |          |          |          |          |
|                | 2.816   | 3.798   |         | 5.086   | 3.678   |         |          |          |          |          |
|                | 2.835   |         |         | 5.092   | 3.715   |         |          |          |          |          |
|                | 2.875   |         |         | 5.126   | 3.724   |         |          |          |          |          |
|                | 3.063   |         |         |         | 3.732   |         |          |          |          |          |
|                | 3.088   |         |         |         | 3.743   |         |          |          |          |          |
|                | 3.268   |         |         |         | 3.798   |         |          |          |          |          |
|                | 3.552   |         |         |         | 3.917   |         |          |          |          |          |
|                | 3.592   |         |         |         | 4.249   |         |          |          |          |          |
|                |         |         |         |         | 4.492   |         |          |          |          |          |

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.

우리나라의 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 계발을 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] D.L. Donohue, "Strengthening IAEA Safeguards through Environmental Sampling and Analysis", J. of Alloys and Compounds 271-273, 11-18, 1998.
- [4] "Environmental Monitoring for Nuclear Safeguards", US Congress Report, Office of Technology Assessment, 1996(?).
- [5] 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.
- [6] "Environmental Sampling for IAEA Safeguards-Status as of 1999", IAEA presentation document, Department of Safeguards, IAEA, Dec. 1999.