

A Literature Review on Application of Signature Materials in Nuclear Forensics according to Domestic Nuclear Facilities and Fuel Cycle

Yeoryeong Jeon, Da Yeong Gwon, Jiyoung Han, Woo Cheol Choi, Yongmin Kim*

Department of Radiological Science, Daegu Catholic University

Received: December 09, 2020. Revised: February 15, 2021. Accepted: February 28, 2021.

ABSTRACT

Republic of Korea has many nuclear facilities in the country, and Democratic People’s Republic of Korea(North Korea) locates in the surrounding country. Therefore, it is necessary to construct the target facility’s nuclear forensic data in a preemptive response to the changing international situation. For this reason, this study suggests "signature" materials used to understand the origins and sources of nuclear and other radioactive materials, taking into account domestic nuclear facilities and the nuclear fuel cycle. In domestic, pressurized light water reactors and pressurized heavy water reactors are in operation, and enriched and natural uranium are used as fuels. In the front-end fuel cycle, the signature materials can be nature uranium and UF₆ in the uranium enrichment process. The domestic back-end fuel cycle adopts a non-circulating cycle excluding the reprocessing process, and the primary signature material is spent nuclear fuel. According to IAEA recommendation, the importance of these materials as the signature and characteristic contents are suggested in this study. To prove the integrity of nuclear material and build a national nuclear forensics library, it is necessary to grasp the signature material and acquire the characteristic data considering the domestic nuclear facilities and the nuclear fuel cycle.

Keywords: Nuclear forensics, Surrounding countries, Nuclear facility, Nuclear fuel cycle, Signature

I. INTRODUCTION

한반도 비핵화와 관련하여 지난 2018년 세 번의 남북 정상회담과 북미 정상회담을 통해 북한의 비핵화 협상이 활발하게 이루어졌고 2019년 2차 북미 정상회담에서는 서로의 이견으로 인해 협상이 다시 고착상태에 이르렀다. 이처럼 주변국 비핵화에 대한 정세가 예측할 수 없이 변화함에 따라 여러 핵감식 분야에서 한국의 역할이 대두되고 있다. 또한, 2020년 현재 국내에서는 총 24기의 원자력발전소가 가동 중이며 4기는 건설 중이다. 이 중 건설 중인 4기의 원전을 포함하여 25기의 원전이 가압경수형(Pressurized Water Reactor, PWR), 3기의 원전은 가압 중수형(Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR)이다.^[1] 이와 같이 국내에서 다른 종류의 핵연료를 사용하는 다수의 원자력발전소를 운영 중

이다. 또한, 고리 1호기와 같이 해체 과정에 있는 원자력발전소도 존재하며, 향후 사용후 핵연료(Spent Nuclear Fuel, SNF) 및 폐기물 관리에 대한 국민의 관심이 높아지고 있다.

핵감식(Nuclear forensics)은 핵물질 불법 거래, 테러 시도와 같은 핵안보 사건을 예방하기 위한 핵물질이나 기타 방사성물질의 시그니처를 활용하여 해당 물질의 기원, 출처, 이력에 대한 정보를 제공하는 핵심 기술로써^[2] 핵안보 사건을 예방, 감지 및 대응하는 핵안보 체제의 목적을 달성하기 위해 활용되고 있다. 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)에서는 핵안보 사건을 사전에 방지 및 대응하기 위해서 핵확산 금지 조약(Nuclear Non-Proliferation Treaty, NPT) 가입국을 대상으로 핵무기 개발 가능 시설에 대하여 국제법에 따라 사찰 활동을 수행하고 있다. 이에 대응하여 각국의 핵감

* Corresponding Author: Yongmin Kim

E-mail: ymkim17@cu.ac.kr

Tel: +82-10-8922-7569

식 역량 강화를 위해 대상 시설별 핵감식 표지물질 및 분석 결과에 대한 데이터를 확보하여 국가 핵감식 라이브러리 개발이 진행되고 있다^[3-5]. 핵감식 분석에서 통용되는 용어인 ‘시그니처(signature)’란 알려지지 않은 핵 또는 기타 방사성 물질의 기원 또는 출처를 파악하는데 사용되는 물질의 특성으로, 핵감식에서 해당 물질의 기원과 이력에 대한 정보를 제공한다^[6]. 앞서 언급한 바와 같이 국내에서도 다수의 원자력시설을 운영하고 있고, 주변국으로 북한을 두고 있는 지리적 특성을 고려하여 선제적 대응을 위해 핵감식 데이터를 확보하는 것이 중요할 것이다.

핵연료주기에 따라 핵물질은 물질상태(고체, 기체), 농축도 등과 같이 고유의 시그니처를 가지고 있으며 이러한 시그니처를 활용하면 물질의 사용 용도와 기원 추정에 대한 기초정보를 파악할 수 있다. 본 연구에서는 국제 핵사찰 기구인 IAEA의 지침 및 공동연구프로젝트(Coordinated Research Project, CRP)의 연구결과를 바탕으로, 국내 원자력 시설과 핵연료주기를 고려하여 주요 표지물질을 도출하고 향후 핵감식에서 주목할 수 있는 표지물질의 시그니처 내용을 제시하였다.

II. SIGNATURE MATERIALS ACCORDING TO NUCLEAR FUEL CYCLE

핵연료주기는 우라늄채광부터 연료 성형가공, 원자로내 연소, SNF 처리 과정까지 포함하며 2011년 국내에서는 우라늄 변환 시설을 해체하고^[7] 상업용 농축우라늄을 100% 수입하고 있다. 또한 후행핵연료주기와 관련해서는 SNF 처분에 관한 정책이 확정되지 않아 핵연료를 한번 사용하고 저장 또는 처분하는 비순환 주기를 채택하고 있으며, SNF를 원전 내에 임시 저장하고 있다.

1. Signature materials of front-end fuel cycle

선행핵연료주기(front-end fuel cycle)는 우라늄광을 채굴하고 성형, 가공하는 과정으로 진행된다. 우라늄 정련 과정은 선행핵연료주기에서 우라늄을 공급하는 주요 과정이다. 우라늄 광석이 물리적으로 균일한 크기의 가루로 분쇄되고, 화학적 여과 과정인 정련 과정을 통하여 중우라늄산염으로 알려

져 있는 U_3O_8 (yellow cake)로 가공된다. 천연우라늄을 연료로 사용하는 중수로와 달리 경수로는 농축우라늄을 연료로 사용한다. 천연우라늄은 ^{235}U 을 0.7% 가량 함유하고 있고 이는 경수로에서 핵분열 연쇄반응을 일으키기에 충분하지 않다. 따라서 ^{235}U 의 비율을 2~5%로 높이기 위해 농축작업을 하게 된다. 우라늄 농축을 위해 yellow cake를 기화하기 쉬운 화합물로 만드는 과정에서 육불화우라늄(UF_6)으로 변환된다. 현재 국내에서는 해당 단계까지 진행된 농축된 우라늄을 수입해 연료를 생산하고 있다.

국내에서는 월성 2, 3, 4호기에 공급되는 중수로 용 연료와 이외 나머지 21기 경수로에 공급되는 연료를 모두 생산하고 있다^[8]. 따라서 표지물질로 선행핵연료주기에서 천연우라늄을 포함해야 하며 농축되어 수입되는 UF_6 를 고려해야 할 것이다. 국내의 선행핵연료주기를 고려한 표지물질과 IAEA에서 핵감식 라이브러리 구축을 위해 권고하는 중요 표지물질의 시그니처 및 내용을 Table 1에 제시하였다^[3].

Table 1. Characterization contents of signature materials in front-end fuel cycle

Signature materials	Characterization	Contents
Nature uranium	Geology	<ul style="list-style-type: none"> • Mine location • Geological formation • Deposit types • Mining technique • Colour
	Stable isotopes	<ul style="list-style-type: none"> • Isotope name • Use standard units for particular isotope system • Uncertainty
UF_6	Trace element	<ul style="list-style-type: none"> • Trace element concentration • Trace element concentration uncertainty
	Physical characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • Density • Status material(solid, liquid, gas) • Mechanical properties (tensile strength, hardness, ductility, etc.) • Description of fuel (pellet) and dimensions(rods, plates) • Cladding information • Serial number (as applicable)
	Uranium isotopes	<ul style="list-style-type: none"> • Isotope ratio (^{238}U in the denominator) • Isotope ratio uncertainty
	Chemical form	<ul style="list-style-type: none"> • Compound name
	Container	<ul style="list-style-type: none"> • Container type • Volume • Dimensions

IAEA 문헌에 권고된 바에 따르면 Table 1에서 천연 우라늄의 안정동위원소(stable isotope) 시그니처 항목에서 조사 물질 중 탄소, 산소, 질소, 황의 경우 동위원소 비율을 추가해야 하며, 스트론튬은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 의 비율, 납의 경우 $^{204}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$ 를 조사해야 한다. 농축되지 않은 우라늄 정광을 대상으로 분석한 유럽연합의 연구에 따르면 납과 스트론튬의 경우 시료를 더 많이 처리할수록 동위원소 비율이 자연 비율에 가까워짐을 확인한 바 있다⁹⁾. 미량원소(trace element)는 $\mu\text{g/g}$ 단위로 분석을 해야 한다.

UF₆의 물리적 특성(physical characteristics)에는 핵연료봉, 핵연료관, 펠릿의 설계계획, 기술도면 및 사진이 포함되어야 한다. 원자로 유형에 따라 치수(dimension)가 정해진 연료 펠릿을 사용하며, 일반적으로 원통형으로 제작된다. 치수에 대한 불확도 범위가 엄격하게 적용되기 때문에 제조 당시의 물리적 특성을 비교하면 핵연료의 관리 상태를 파악할 수 있다. 우라늄 동위원소(uranium isotopes)에 대해서는 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 및 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 비율을 구해야 한다. 우라늄 동위원소 비율 구함으로써 연료 주기에서 핵물질의 상태변화에 따라 시그니처로 활용할 수 있는 정보와 선행핵연료주기(농축, 연료가공단계)에서의 농축 이력, 연료 제조 품질에 대한 정보를 확인할 수 있다¹⁰⁾. 또한, ^{235}U 이외에 연료에 존재하는 ^{236}U 및 ^{232}U 는 우라늄이 이전에 원자로에 존재했었다가 추후 재처리되었음을 알려주는 시그니처로 활용할 수 있다¹¹⁾. 모든 연료 제조 시설이 재처리된 우라늄을 활용하여 연료를 생산하지는 않으므로 우라늄 동위원소 구성은 재처리가 가능한 제조업체 수를 제한하여 핵감식 조사의 범위를 좁히는데 활용될 수 있다.

2. Signature materials of back-end fuel cycle

후행핵연료주기(back-end fuel cycle)는 제작된 핵연료가 장전되고 연소된 후 생산효율이 떨어진 핵연료를 재처리를 통해 재활용하거나, 폐기물로 처리, 저장 및 처분하는 과정을 의미한다. PWR에서는 약 4-5년, PHWR에서는 약 10개월 정도 사용 후 신연료로 교체하여 SNF가 발생하게 된다. 국내에서는 발전용 원자로, 연구용 원자로, 교육용 원자로에서

SNF가 발생하고 있으며 발생하는 고준위 폐기물의 대부분을 차지한다. 발전용 원자로 운영 후 발생하는 SNF는 발전소 내 수조에 저장하고 있으며 월성 원자력발전소의 경우 건식 저장시설을 갖추고 있다¹²⁾.

발전하는데 사용된 연료는 재처리 과정으로 넘어가 핵연료로 재활용할 수 있지만 국내의 경우 재처리시설을 보유하지 않아 핵연료를 재활용하는 경우는 없다. SNF 처리방식에 관하여 국외와 같이 국내에서도 핵무기로 쓰지 못하는 우라늄과 초우라늄(Transuranium, TRU)을 추출하는 파이로프로세싱 방식을 개발한 바 있으나 핵안보 및 핵비확산 측면에서 실증에 대한 논쟁이 계속되고 있다^{13,14)}.

PWR의 SNF에는 TRU(Transuranium, 초우라늄원소), MA(Minor-Actinide)와 같은 장수명 핵종이 존재한다. 또한, 스트론튬, 세슘, 아이오딘과 같은 핵분열생성물도 존재한다. 하지만 앞서 제시된 핵종의 나머지 약 96%에는 연소 되고 남은 우라늄과 플루토늄 등 연료로 재사용할 수 있는 물질들이 포함되어 있다. 따라서 SNF의 표지물질 시그니처로 앞서 언급된 물질에 관한 정보를 포함할 수 있도록 해야 한다. 또한, 유럽연합의 선행연구에 의하면 후행핵연료주기에서 UOC는 해당 주기에서 발생하는 물질들 보다 불순물이 많이 포함되어 있기 때문에, 핵감식의 주요 표지물질이 될 수 있다¹⁵⁾. Table 2에 국내의 후행핵연료주기를 고려한 표지물질과 IAEA에서 핵감식 라이브러리 구축을 위해 권고하는 중요 표지물질의 시그니처 및 내용을 나타내었다³⁾. 선행핵연료주기의 표지물질과 동일하게 SNF의 물리적 특성(physical characteristics), 화학적 형태(chemical form) 및 우라늄 동위원소(uranium isotopes) 비율을 구해야 한다. 추가적으로 SNF는 우라늄의 핵분열 결과 플루토늄이 생성되므로 플루토늄 동위원소(plutonium isotopes)의 시그니처로 $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, $^{242}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 비율을 구해야 한다. 연료 주기에서 핵물질의 상태변화에 따라 시그니처로 활용할 수 있는 정보를 얻기 위한 분석기술에 대한 인도의 선행연구에서 플루토늄 동위원소 비는 반응 유형, 조사 조건, 우라늄 농축도 같은 조사 이력을 평가하는데 사용할 수 있다고 하였다^{10,16)}. 특히, ^{240}Pu 동위원소 비는 플루토늄 사용 목적을 파악하는데 활용할 수 있

다. 예를 들어, 무기제작 목적으로 사용한다면 동위원소 존재비가 7% 미만이며, 연료로 사용한다면 18%를 초과한다.

Table 2. Characterization contents of signature materials in back-end fuel cycle

Signature materials	Characterization	Contents
Spent Nuclear Fuel	Physical characteristics	<ul style="list-style-type: none"> Description of fuel assembly and dimensions(for rods, plates, etc.) Cladding information(type) Assembly structure Surface oxide thickness
	Uranium isotopes	<ul style="list-style-type: none"> Isotope ratio (^{238}U in the denominator) Isotope ratio uncertainty
	Plutonium isotopes	<ul style="list-style-type: none"> Isotope ratio (^{239}Pu in the denominator) Isotope ratio uncertainty
	Elemental concentration	<ul style="list-style-type: none"> Elemental concentration Elemental concentration uncertainty
	Serial number	<ul style="list-style-type: none"> Serial number
	Chemical form	<ul style="list-style-type: none"> Compound name
	Irradiation history	<ul style="list-style-type: none"> Reactor type Burn-up(to include, actinides and fission products) Assembly power history Operating records Load and discharge dates Radiation level

일련번호(Serial number)의 경우 핵연료 설계와 관련된 개별 일련번호 또는 범위로 파악해야 한다. 원소 농도(elemental concentration)는 가돌리늄, 붕소와 같은 가연성 독물질에 대한 정보를 포함해야 한다. 상업용 원자력발전소의 연료는 가연성 독물질을 사용하여 연료의 반응성을 제어한다. 일반적으로 연료 제조 과정에서 공정배관, 사용한 시약 등의 이유로 연료에 불순물이 첨가되지만 연료에 포함된 가연성 독물질의 양은 불순물로 발견되는 양보다 많은 수준이므로 연료를 생산하는데 사용되는 공정 유형을 파악할 수 있다¹¹⁾.

III. DISCUSSION

IAEA는 공동연구프로젝트를 통하여 핵감식 시료 분석뿐만 아니라 국가 핵감식 라이브러리 구축에 이르기까지 각국의 상황에 맞게 진행한 관련 연구 자료를 공유하고 있다⁹⁾. IAEA 지침에서 실제 핵감식에서는 하나의 시그니처 뿐만 아니라 다양한 시그니처 비교를 권장하고 있다. 국가 핵감식

라이브러리 구축은 핵감식 사건 발생 시, 기존에 비슷한 사례가 있었다면 비교할 수 있는 자료를 쉽게 확보할 수 있게 하고¹⁷⁾ 핵물질 및 기타 방사성 물질에 관한 기본 특성뿐만 아니라 핵감식 주요 시설, 핵심시설에 대한 표지물질들에 대한 데이터를 축적함으로써 국가 핵감식 역량 강화에도 기여할 수 있다. 그러나 국가 핵감식 라이브러리는 다수 사례에 대한 분석정보를 기반으로 구축할 수 있기 때문에 앞서 언급된 표지물질에 대해 국내 핵감식 분석 역량에 따라 최적 분석 기술 정보를 많이 확보하고 시료 수집과 전처리 등 하위 단계의 절차에 대해서도 제도적으로 마련해 둘 필요가 있다.

후행핵연료주기에서 일본을 포함한 여러 국가에서는 재처리로 우라늄과 플루토늄을 추출하여 MOX (Mixed Oxide Fuel) 연료로 재활용하는 방법을 사용하고 있다. 국내에서는 SNF 처리방식으로 초우라늄을 추출하는 파이로프로세싱 방식을 개발한 바 있으나 실제로 활용되지 않고 있다. 또한, 재처리 시설이 없어 재처리 과정에서 표지물질을 고려할 필요가 없고 국내에 반입된 핵연료 물질은 여러 조약에 따른 국제법 및 국내법에 따라 엄격하게 관리되고 있다. 그러나, 농축우라늄을 전량 수입하는 국내와 달리 북한은 핵연료 제조 관련된 전주기 시설을 운영하고 있다. 자국의 풍부한 천연 우라늄 공급 능력을 바탕으로 평산 우라늄 광산과 정련 시설을 통해 직접 U_3O_8 을 공급하고 영변 핵단지 주요 시설 중 재처리시설이 포함되어 있다. 북한은 영변 핵단지에 대부분의 원자력 기반 시설을 구축하고, 흑연 감속로를 주력 원자로로 개발하여 5 MWe 급 흑연로를 건설, 운영하여 고농축우라늄 등 무기급 핵물질도 보유하고 있는 것으로 확인된 바 있다^{18, 19)}. 완전한 비핵화를 위해서 무기급 핵물질의 생산량 및 변동량에 대한 정보가 확보되어야 하지만 신고 및 공개정보의 신뢰성은 낮은 것으로 파악되어 왔으며 이에 따라 국내에서도 핵물질 탐지에 대한 연구들이 수행된 바 있다^{20, 21)}. 국내 원자력시설의 핵물질에 대한 라이브러리를 구축이 되어있다면, 북한 비핵화 시 인접국으로써 사찰 주체에게 국내의 원자력 시설과 유사한 북한의 원자력 시설에 대해 핵감식 대상의 범위를 좁히고, 체계적인 분석 방법을 제공하여 북한 비핵화 과정에서 주도적 역

할을 기대할 수 있다. 또한, 핵감식 라이브러리를 구축하고 있는 주요국들과 비교를 통해 물질의 기원에 대한 추정에 더욱 신뢰성을 높일 수도 있을 것이다. 북한 비핵화 과정에서 주요한 역할이 기대되고 있는 만큼 선제적으로 우라늄 채광, 정련, 변환, 농축, 재처리 과정을 포함하는 핵연료 전주기에 대한 표지물질과 물질의 시그니처를 고려할 필요가 있을 것으로 생각된다.

IV. CONCLUSION

본 연구는 문헌 연구로써 국제원자력기구의 지침과 공동연구프로젝트, 관련 문헌들을 분석하여 국내 원자력 시설과 핵연료 주기를 고려하여 주요 표지물질을 도출하고 활용방안을 제시하였다. 우라늄과 플루토늄은 핵감식이 수행되어야 하는 필수 대상 물질이며 핵연료주기 및 공정방법에 따라 표지물질로 고려할 수 있다. 국내 선행핵연료주기는 연료 성형가공 과정이 포함되며 주요 표지물질은 국내 원자력발전소의 연료 물질인 천연우라늄과 UF_6 를, 후행핵연료주기에서는 사용후핵연료로 생각할 수 있다. 국제사회에서 핵안보 선도국으로 도약하기 위해 국내 핵안보 및 핵비확산 전담기관에서 핵감식 라이브러리 구축의 필요성뿐만 아니라, 실제 활용 여부에 대해서도 구체적으로 논의될 필요성이 있을 것으로 생각된다. 이를 위해 국내 핵감식 분석역량을 정확하게 파악하고 유관기관들의 정확한 자료제공이 필요할 것이다. 향후 지리적으로 비핵화 대상국인 북한이 인접해 있다는 점과 국내 원자력 시설 및 운용 분석 장비를 고려하여 국내 상황에 적합한 표지물질을 도출하고 이에 대한 핵감식 분석 역량을 강화할 수 있도록 해야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다. (No. 2004025)

Reference

- [1] International Atomic Energy Agency, Nuclear Power Reactors in the World, 2020.
- [2] V. Fedchenko, "The Role of Nuclear Forensics in Nuclear Security", Strategic Analysis, Vol. 38, No. 2, pp. 230-247, 2014.
<https://doi.org/10.1080/09700161.2014.884442>
- [3] International Atomic Energy Agency, Development of a National Nuclear Forensics Library: A System for the Identification of Nuclear or Other Radioactive Material out of Regulatory Control, 2018.
- [4] J. Borgardt, J. Canaday, D. Chamberlain, "Results from the second Galaxy Serpent web-based table top exercise utilizing the concept of nuclear forensics libraries", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 311, pp 1517-1524, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s10967-016-5069-x>
- [5] F. Taylor, M. Higginson, O. Marsden, J Schwantes, State of practice and emerging application of analytical techniques of nuclear forensic analysis: highlights from the 5th Collaborative Materials Exercise of the Nuclear Forensics International Technical Working Group (ITWG), Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 323, pp 415-430, 2016.
<https://doi.org/10.1007/s10967-019-06950-7>
- [6] International Atomic Energy Agency, Nuclear Forensics in Support of Investigations, Nuclear Security Series No.2-G, Rev.1, 2015.
- [7] S. B. Hong, "A Study on the Optimization Method for Decommissioning Site Remediation", Graduate School for Kyung Hee University, Doctoral thesis, 2016.
- [8] Y. B. Gwon, "Independence of nuclear fuel manufacturing technology and development of fuel service technology", Nuclear industry, Korea Atomic Industry Forum, Vol. 26, No. 5, pp 21-23, 2006.
- [9] International Atomic Energy Agency, Identification of High Confidence Nuclear Forensics Signatures, IAEA-TECDOC-1820, 2017.
- [10] S. K. Aggarwal, "Thermal ionisation mass spectrometry (TIMS) in nuclear science and technology-a review", Analytical Methods, Vol. 8, pp 942-957, 2016.

- <https://doi.org/10.1039/C5AY02816G>
- [11] M. Wallenius, ITWG guideline on characteristic parameters of uranium dioxide (UO₂) fuel pellets, 2016.
- [12] Y. H. Choi, J. H. Ko, D. G. Lee, I. S. Jung, "A Study on Radiation Safety Evaluation for Spent Fuel Transportation Cask", *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, Vol.17, No.4, pp 375-387, 2019. <https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2019.17.4.375>
- [13] S. M. WOO., S. S. Chirayath., M. Fuhrmann., "Nuclear fuel reprocessing: Can pyro-processing reduce nuclear proliferation risk?", *Energy Policy*, Vol. 144, 111601, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111601>
- [14] S. Squassoni, "The Dark Side of Nuclear Energy: Risks of Proliferation from Domestic Fuel Cycle Technologies", *21st Century Prometheus*, pp 49-66, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28285-1_3
- [15] M. G. Kristo, A. M. Gaffiney, N. Marks, K. Knight, W. S. Cassata, I. D. Hutcheon, "Nuclear Forensic Science: Analysis of Nuclear Material Out of Regulatory Control" *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 44, pp 555-579, 2016. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060115-012309>
- [16] M. Kattathu, K. Theresa, V. Zsolt, G. Amy, D. Joanna et. al., "Intercomparison of the Radio-Chronometric Ages of Plutonium-Certified Reference Materials with Distinct Isotope Compositions", *Analytical Chemistry*, vol. 91, pp 11643-11652, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b02156>
- [17] M. F. Lannunziata, *Handbook of Radioactivity analysis: Volume 2: Radioanalytical application 4th edition*, Academic Press, 2020.
- [18] Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control, 2019 North Korea Nuclear Edition, KINAC/GP-007/ 2019, 2019.
- [19] H. S. Jung, D. H. Lee, J. H. Lee, Challenges of nuclear law integration in preparation for the unification of the Korean Peninsula, Korea Atomic Energy Research Institute, Nuclear Policy Brief report, 2016-7(Vol. 36), 2016.
- [20] S. W. Kwak, H. B. Kang, J. K. Shin, J. H. Lee, "Estimation of Uranium Particle Concentration in the Korean Peninsula Caused by North Korea's Uranium Enrichment Facility", *Journal of radiation protection and research*, Vol.39, No. 3, pp 127-133, 2014. <https://doi.org/10.14407/jrp.2014.39.3.127>
- [21] S. W. Kwak, S. S. Jang, J. H. Lee, H. S. Yoo, "A Study on Current Status of Detection Technology and Establishment of National Detection Regime against Nuclear/Radiological Terrorism", *Journal of radiation protection and research*, Vol.34, No. 3, pp 115-120, 2009. <https://doi.org/10.14407/jrp.2014.39.3.127>

국내 원자력시설 및 핵연료 주기에 따른 핵감식 표지물질 활용에 대한 고찰

전여령, 권다영, 한지영, 최우철, 김용민*

대구가톨릭대학교 방사선학과

요 약

국내에는 다수의 원자력시설이 존재하며, 지리적으로 비핵화 대상국인 북한을 주변국으로 두고 있다. 변화하는 국제 정세에 따른 선제적 대응으로 대상시설에 대한 핵감식 데이터를 구축할 필요가 있다. 이를 위해 국내 원자력시설 및 핵연료 주기를 고려하여 핵물질 및 기타 방사성물질의 기원 또는 출처를 파악하는데 사용되는 표지물질을 제시하였다. 국내에서는 경수로 및 중수로를 운영하고 있으며 각각 핵연료로 농축 우라늄과 천연우라늄을 사용한다. 국내 선행핵연료주기에서 표지물질은 중수로형 원자력발전소의 연료인 천연우라늄과 우라늄 농축과정의 UF_6 으로 생각할 수 있다. 국내 후행핵연료주기는 재처리 과정을 제외된 비순환 주기를 채택하고 있어 주요 표지물질은 사용후핵연료가 된다. 해당 물질들에 대해 IAEA 문헌에서 권고하는 표지물질의 시그니처 중요도를 판단하고 조사 항목을 제시하였다. 향후 핵감식에서 핵물질 관리에 대한 무결성 입증과 국가 핵감식 역량을 높이기 위한 핵감식 라이브러리 구축을 위해 국내 원자력시설과 핵연료주기를 고려한 표지물질을 파악하고 해당물질 별 시그니처 데이터를 확보해야 할 것으로 생각된다.

중심단어: 핵감식, 주변국, 원자력시설, 핵연료 주기, 시그니처

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	전여령	대구가톨릭대학교 방사선학과	박사후연구원
(공동저자)	권다영	대구가톨릭대학교 방사선학과	박사후연구원
	한지영	대구가톨릭대학교 방사선학과	석사후연구원
	최우철	대구가톨릭대학교 방사선학과	대학원생
(교신저자)	김용민	대구가톨릭대학교 방사선학과	부교수