JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(4) : 481-487 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.481

한반도 원자력 활동 현장 검증을 위한 인력 및 장비 운반에 관한 연구

한지영[1], 박수희[1], 박제완[1], 김용민[1,*]

[1]대구가톨릭대학교 방사선학과

Research on Transportation of Personnel and Equipment for Verification of Nuclear Activities on the Korean Peninsula

Ji-Young Han[1], Su-Hui Park[1], Je-Wan Park[1] and Yong-Min Kim[1,*]

Department of Radiological Science, Daegu Catholic University, 13-13 Hayang-ro, Gyeonsan-si 38430, Republic of Korea

Abstract After conducting a hydrogen bomb test and launching an intercontinental ballistic missile (ICBM) in 2017, The Democratic People's Republic of Korea (North Korea, D.P.R.K.) declared the completion of its national nuclear capabilities. Currently, North Korea is refusing all nuclear inspections, but the possibility of nuclear inspections and the denuclearization process on the Korean Peninsula still exists. The Republic of Korea (South Korea, Rep. of Korea) has numerous reasons as a neighboring country to participate in North Korea's nuclear inspections and denuclearization, including technological capabilities, geographical proximity, and linguistic benefits. This study assumes nuclear inspections and verification within North Korea and aims to propose scenarios for the transportation and operation of personnel and equipment. The data and results compiled through this research are anticipated to serve as foundational information for future inspections and verifications on the Korean Peninsula. Furthermore, it is assessed that they could contribute to the development of strategies in preparation for participation in denuclearization efforts.

Key words: Nuclear activity, Denuclearization verification equipments, Transportation scenario

1. 서 론

북한은 2017년 수소폭탄 실험과 ICBM 시험 발사에 성공한 후 '국가 핵무력 완성'을 선언했다. 현재 북한은 모든 핵사찰을 거부하고 있지만 한반도 내 핵사찰 및 비핵화 검증 과정의 가능성은 존재한다.

국내에서는 원자력활동 현장 검증의 기술적 지원을 위해 필수 기술분야, 원자력 안전규제 독립검증을 위한 핵심 기술 확보, 핵활동 비핵화 검증을 위한 검증 역량 개발 등의 사업이 추진되고 있다[1]. 국내 핵활동 분석 역량은 IAEA (International Atomic Energy Agency) NWAL (NetWork of Analytical Laboratories) 분야 3개에 가입되어 있을 만큼 발전하였으나 대부분의 보유 기술이 농축도, 함량 등 신고 정보 검증에 초점이 맞춰져 있다. 주요 원자력 시설에 대한 사찰 및 안전조치 이행 등에 사용될 수 있는 장비 및 국내 연구개발 중인 핵활동 분석 관련 현장 장비에 대하여 북한 환경을 고려한 사용 및 운반 조달에 대한 기준이 설정되지 않았다. 북한이라는 환경을 고려한 운반 및 현장 적합성에 대한 연구는 미비하며 실제 북한 원자력활동 현장 검증 과정에 활용 가능한 연구 수행이 필요

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Yong-Min Kim
Tel. +82-53-850-2522 E-mail. ymkim17@cu.ac.kr

Received 11 December 2023 **Revised** 21 December 2023 **Accepted** 21 December 2023

Fig. 1. YongByon nuclear complex.

하다. 본 연구에서는 북한 내 원자력시설 사찰 및 검증을 위한 인력, 장비의 운반 및 운영에 대한 사전 분석 및 계획과 관련된 자료 구축, 접근성 평가 및 운반·운영시나리오를 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

북한의 원자력 시설에는 영변핵단지, 풍계리 핵실험장, 평산 우라늄 광산/정련 시설 등이 있다[2]. 본 연구는 원자력 시설 중 영변핵단지를 주요 사찰 및 검증 대상 시설로 선정하고 접근성 평가 및 절차 분석을 통해 운반, 운영 시나리오를 제시하고자 하였다. 영변핵단지 내 주요 시설로는 5 MWe 원자로, 방사화학 실험실, 화학처리 의혹시설, 우라늄 농축시설, 원자로 냉각시설, 실험용 경수로 등이 존재한다. Fig. 1은 영변핵단지 전경을 나타낸다[3].

국내에서 북한으로의 이동에는 크게 항공, 항만, 차량 운반 3가지를 고려할 수 있다. 이에 항공, 항만, 차량 운반 유형별 접근성 평가를 수행하고 각 절차 분석을 수행하고자 하였다. 운반 경로, 운반 절차 등의 분석이 수행되었으며 각 운반별 고려 사항을 서술하였다. 각 절차별 소요시간을 종합하여 총 소요시간을 제시하고자 한다. 또한, 안전조치 이행 방법 및 항목 분석을 수행하였으며 최종적으로 운반 및 운영 시나리오를 제시하고자 한다. 여기에는 운반, 운영 절차, 검증 인력, 전력 공급 방안, 운반 차량 등이 포함된다.

운영 시나리오 내 사찰 및 검증 시간 제시를 위해 국내 사찰 관련 보고서를 검토한 결과 사찰 소요시간은 사찰 시설, 사찰 종류에 따라 상이하였으나 대부분 1~2일이 소요되었고 많게는 9일이 소요된 것을 확인하였다[4]. 본 연구의 절차 내 현장 검증 시간은 최소 72시간으로 제시하고자 한다.

2.1. 항공 운반 접근성 평가 및 절차 분석

국내에서 북한까지 이동하는 방법으로 항공 운반 경로는 직항, 중국 환승 두 가지 방법이 존재한다. 직항 경로는 서해직항로를 사용하였을 때 1시간이 소요될 것으로 예상된다. 서행직항로는 김포공항에서 이륙하여 서해로 빠져나간 뒤 북한에 착륙하는 항로이다. 중국 북경을 환승하는 항로는 김포공항에서 이륙하여 2시간 30분 이동 후 북경공항에 착륙하며 환승에 약 1시간이 소요될 것으로 예상되며, 이후 북경공항에서 평양순안국제공항까지 2시간 비행하여 총 5시간 30분이 소요될 것으로 예상된다. 평양순안국제공항에서 영변핵단지까지 거리는 83 km로 북한의 열악한 도로 실정을 고려하여 30 km hr^{-1}로 운행한다고 가정하였을 때 약 2시간 48분이 소요될 것으로 예상된다. 이외에 적재물 승차, 하차는 각 1시간, 대기 및 검증 기기 보관 1일, 검증의 경우 정확한 소요시간 예측이 어려우므로 대략적인 시간(72시간)으로 예상하였다.

항공 운반의 고려 사항은 세관 및 보안 검사 과정에서의 시간 지연, 화물칸 적재 중 가해질 충격 가능성, 타 수송에 비해 높은 수송 비용 등이 존재한다. 항공 운반 절차 및 예상 소요시간은 Table 1과 같다.

2.2. 항만 운반 접근성 평가 및 절차 분석

북한 영변핵단지와 가장 인접한 항만은 다사도항이며, 중국 항만 중에서는 단둥시가 가장 가깝다. 국내 28개 무

Table 1. Air transportation procedure and required time

Procedure	Estimated time of completion	Risk factors
Loading cargo and personnel boarding on the aircraft	1 hr	Impact, customs
Gimpo → Pyongyang	1 hr (Utilizing the West Sea direct route) 5 hr 30 min (Transit in Beijing)	Impact
Loading cargo and personnel onto the vehicle	1 hr	Impact
Pyongyang airport → Yongbyon nuclear complex	2 hr 48 min	Impact, vibration
Unloading cargo and disembarkation of personnel from the vehicle	1 hr	Impact
Waiting and equipment storage	Maximum 24 hr	Temperature changes, humidity
Verification activities conducted	Minimum 72 hr	Fall
Loading cargo and personnel onto the vehicle	1 hr	Impact
Yongbyon nuclear complex → Pyongyang airport	2 hr 48 min	Impact, vibration
Loading cargo and personnel boarding on the aircraft	1 hr	Impact
Pyongyang → Gimpo	1 hr (Utilizing the West Sea direct route) 5 hr 30 min (Transit in Beijing)	Impact
Unloading cargo and disembarkation of personnel from the aircraft	1 hr	Impact
Total time required	109 hr 36 min (4 days 13 hr 36 min)	–

Table 2. Port transportation procedure and required time

Procedure	Estimated time of completion	Risk factors
Loading cargo and personnel onto the ship	1 hr	Impact, customs
Inchon Port → Dasado Port	16 hr	Impact
Unloading cargo and disembarkation of personnel from the ship	1 hr	Impact
Dasado Port → Yongbyon nuclear complex	5 hr 10 min	Impact, vibration
Unloading cargo and disembarkation of personnel from the vehicle	1 hr	Impact
Waiting and equipment storage	Maximum 24 hr	Temperature changes, humidity
Verification activities conducted	Minimum 72 hr	Fall
Loading cargo and personnel onto the vehicle	1 hr	Impact
Yongbyon nuclear complex → Dasado Port	5 hr 10 min	Impact, vibration
Loading cargo and personnel onto the ship	1 hr	Impact
Dasado Port → Inchon Port	16 hr	Impact
Unloading cargo and disembarkation of personnel from the ship	1 hr	Impact
Total time required	144 hr 20 min (6 days 20 min)	–

역항 중 북한 다사도항, 중국 단둥시와 가장 인접한 항만은 인천항으로 인천항에서 출발하는 경로를 분석하였다. 인천항에서 단둥시로의 이동을 위한 항로는 454 km로 소요시간 16시간이 예상된다. 다사도항으로의 이동에도 유사한 시간이 소요될 것으로 판단된다. 나머지 절차에 대한 소요시간은 항공 운반과 마찬가지로 적재물 승차, 하차는 각 1시간, 대기 및 검증 기기 보관 1일, 검증은 대략적인 시간(72시간)으로 예상하였다.

항만 운반의 고려 사항으로는 세관 및 보안 검사 과정에서의 시간 지연, 화물칸 적재 중 가해질 충격 가능성 등이 존재한다. 항만 운반 절차 및 예상 소요시간은 Table 2와 같다.

2.3. 차량 운반 접근성 평가 및 절차 분석

국내에서 북한까지 차량을 이용해 이동하는 방법으로 판문점에서 영변핵단지까지 이동하는 것으로 총 거리는 283 km이다. 30 km hr^{-1}로 운행한다고 가정했을 때 9시간

Table 3. Vehicle transportation procedure and required time

Procedure	Estimated time of completion	Risk factors
Loading cargo and personnel onto the vehicle	1 hr	Impact
Panmunjom→Yongbyon nuclear complex	9 hr 24 min	Impact, vibration
Unloading cargo and disembarkation of personnel from the vehicle	1 hr	Impact
Waiting and equipment storage	Maximum 24 hr	Temperature changes, humidity
Verification activities conducted	Minimum 72 hr	Fall
Loading cargo and personnel onto the vehicle	1 hr	Impact
Yongbyon nuclear complex→Panmunjom	9 hr 24 min	Impact, vibration
Unloading cargo and disembarkation of personnel from the vehicle	1 hr	Impact
Total time required	118 hr 48 min (4 days 22 hr 48 min)	–

24분이 소요될 것으로 예상된다. 나머지 절차에 대한 소요시간은 타 운반과 마찬가지로 적재물 승차, 하차는 각 1시간, 대기 및 검증 기기 보관 1일, 검증은 대략적인 시간(72시간)으로 예상하였다.

차량 운반 시 고려 사항으로는 도로 상태로 기인한 진동, 교통 체증 등이 있다. 차량 운반 절차 및 예상 소요시간은 Table 3과 같다.

운반 경로 접근성 평가 및 운반 절차 분석 결과 가장 짧은 시간이 소요되는 것은 항공 운반이었으며 항만 운반이 가장 긴 시간이 소요될 것으로 예상된다. 항만 운반은 타 경로와 비교 시 명확한 장점은 없었다. 차량 운반은 이동수단의 변경 없이 운반이 가능하다는 장점이 있으며 적재물을 옮기는 과정에서 수반되는 번거로움, 낙하 및 충격의 위험성 등을 감소시킬 수 있다. 이동 및 검증 소요시간은 항공, 차량, 항만 순으로 짧을 것으로 예상된다. 하지만 항공 운반 중 서해 직항로 사용이 불가하여 북경 환승할 경우 차량 운반과 비슷한 시간이 소요된다. 이에 본 연구에서는 이동 수단의 변경이 없다는 가장 큰 장점과 항공 운반과의 비슷한 소요시간 등을 근거로 차량 운반 시나리오를 최적의 시나리오로 선정하였다. 다만, 위험성 요인 중 차량 진동이 존재하여 운반 시 무진동 차량을 활용하고자 한다.

2.4. 차량 운반 경로 상세 분석

차량 운반 시나리오의 상세 경로 분석 결과 판문점(북한 판문역)에서 출발하여 19 km 이동 후 평양-개성 고속도로에 진입한다. 이후 충성의 다리까지 이동하여 평양-희천 고속도로로 진입한 뒤 총 259 km를 이동 후 고속도로에서 진출하고 5 km 이동하여 영변핵단지에 도착한다.

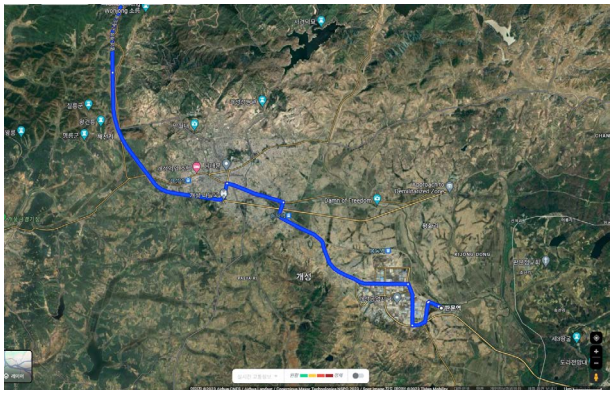
이 과정에서 고속도로를 제외한 경로에서 총 5개의 교량을 지나게 된다. 상세 분석 과정에서 차선 개수도 분석하고자 하였으나 정확한 차선 개수에 대한 분석에는 어려움이 존재했다. 또한, 교량의 개수, 도로의 차선 개수 등과 같은 도로 상황을 파악하고자 하는 상세 분석에서 고속도로의 경우 유의미한 결과 도출이 없을 것으로 판단되어 고속도로를 제외한 경로에 대한 분석만 수행되었다. Fig 2는 운반 시나리오 내 일부 경로를 나타내었다[5].

2.5. IAEA 사찰

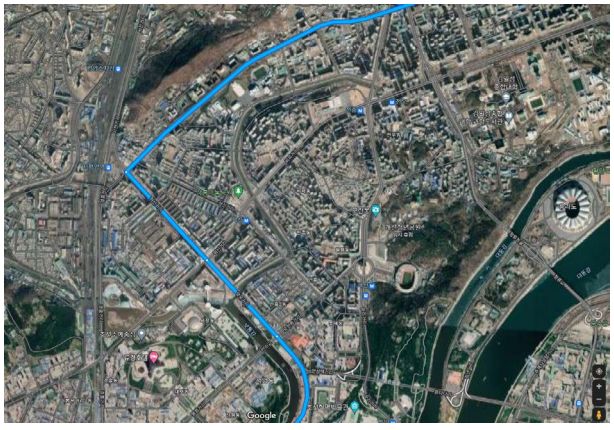
IAEA 사찰은 대상국의 시설, 시설 외 지역에 저장하고 있는 핵물질 관리, 핵물질 국제 이전에 관한 관리, 미계량 물질 원인 분석 등을 안전조치체제를 통해 수행된다. 사찰은 핵물질 양, 구성 파악, 검증을 통한 감시 등의 활동을 의미하며 일반, 임시, 특별 사찰로 구성된다. 우리나라에서는 2시간 사전 통보 방식의 단기통보무작위중간사찰(Short Notice Random Interim Inspection, SNRI), 24시간 사전 통보 무작위중간사찰(Random Interim Inspection, RII), 물자재고검증(Physical Inventory Verification, PIV), 무통보사찰(Unannounced Inspection, UI) 등의 IAEA 사찰이 수행되고 있다[6]. 무통보사찰에서는 장부검증, 봉인 설치, 신연료, 사용후핵연료 검증, 환경 시료 채취, 사용후핵연료 운반용기 검증 등이 수행된다. 실제 IAEA 사찰에서 수행된 검증 항목, 항목별 장비 및 도구는 Table 4와 같다.

3. 결 과

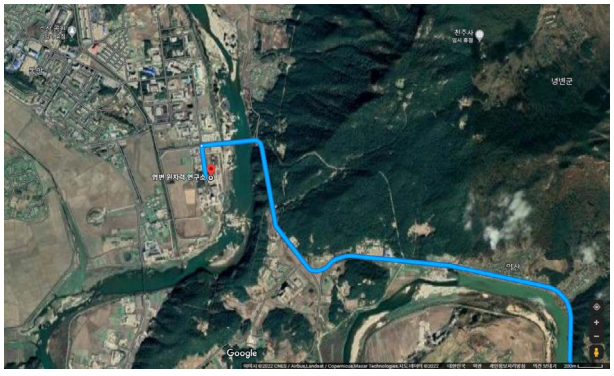
영변핵단지로 향하는 운반 방법 중 차량 운반 시나리오



Route from Panmunjom to the Pyongyang-Kaesong Expressway



Route from Chungsong Bridge to
the Pyongyang-Heicheon Expressway



The route from Pyongyang-Heicheon Expressway to
the Yongbyon nuclear complex

Fig. 2. Detailed transport route.

를 최적의 시나리오로 제시한다. 무진동 차량을 이용하여 대한민국에서 북한으로 이동하는 시나리오로 판문점에서 영변핵단지까지의 최단 거리는 283 km이다. 상세 경로를 분석한 결과 평양-희천 고속도로, 평양-개성 고속도로

Table 4. Equipment and tools for each verification

Verification items	Equipment and tools
UF_6 cylinder	– HPGeDetector - ECGS – Thickness gage, Standard weight
Fuel assembly	– HE-UNCL, HM-5
Fuel rod	– IMCL & HM-5 – IAEA standard fuel rod
Powder	– IMCG & HM-5 – Standard weight
Pellet	– IMCG & HM-5 – Standard weight
Heavy water reactor bundle	– HM-5 – Standard weight
DA sampling	– Empty bottle – Standard weight

를 경유하여 약 9시간 24분이 소요된다. 운반 경로는 Fig. 3과 같다[5]. 운반, 운영에 요구되는 인력, 전력 공급에 대한 내용을 아래에 서술하였다.

3.1. 검증 인력

수행되는 검증의 종류, 검증 시설 등에 따라 투입되는 인력은 상이하다. IAEA 국내 사찰 시 적게는 1~2명, 많게는 4~5명의 인력이 사찰 수행을 위해 투입되었으며, 여기에 비슷한 규모의 국내 검사원이 함께 투입되었다[6]. 대부분의 사찰에 1~2명의 인력이 투입되었으나, 2시간 사전 통보 방식의 단기통보무작위중간검사와 매년 수행되는 정기 물자재고검사와 설계정보검증이 함께 수행될 경우 비교적 많은 인원이 투입되었다. 북한 시설 사찰 및 검증 시 IAEA 검증 인력 외에 장비 활용 및 소통 등과 관련하여 국내 인력의 투입 가능성이 존재한다. 본 연구에서는 검증 장비 사용, 운반을 고려하여 최소 2명으로 구성된 검증단과 국내 인력 2인의 투입을 가정한다.

3.2. 전력 공급

사찰 및 검증 과정에서 장비의 정상작동 담보를 위해서 장비의 배터리 및 전력 공급 확보가 요구된다. 북한의 전력난으로 현장에서 원활한 전력공급이 어려울 것으로 판단되어 전력 공급을 위한 사전 대비가 필요하다. 이를 위

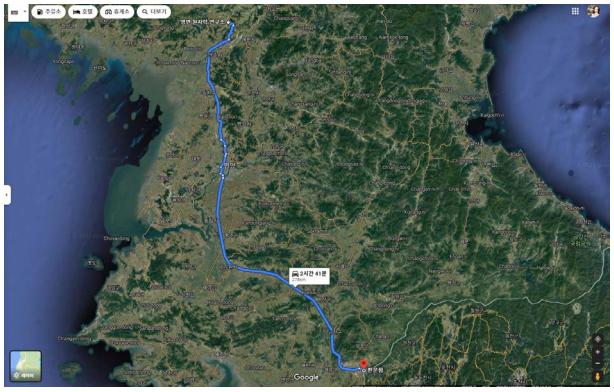


Fig. 3. Vehicle transportation scenario.

Table 5. Transportation and operational scenarios

Transportation and operational scenarios	
1	Loading cargo and personnel onto the vehicle
2	Panmunjom → Yongbyon nuclear complex
3	Unloading cargo and disembarkation of personnel from the vehicle
4	Waiting and equipment storage
5	Verification activities conducted
6	Loading cargo and personnel onto the vehicle
7	Yongbyon nuclear complex → Panmunjom
8	Unloading cargo and disembarkation of personnel from the vehicle
Personnel and other matters	

* Verification team: 2 domestic personnel in addition to IAEA inspection personnel
* Vehicle: Vibration-resistant vehicle
* Emergency power: Uninterruptible Power Supply

해, 장비의 충전, 차량 충전 가능 여부, 배터리 교체 가능 여부, 배터리 교체 시기 등의 확인과 함께 검증단 자체 전력 확보가 요구된다.

본 연구에서는 무정전 전원장치와 비상 디젤 발전기의 활용을 고려하였다. 무정전 전원장치는 일시적 전원장치로 전력 공급이 중단되거나 장애 발생 시 안정적 전기 공급에 사용된다[7]. 내장된 배터리를 충전하여 전원차단 시 사용 가능하며 전원 장애에 대한 대책으로 활용된다. 비상디젤 발전기는 사용전원의 공급이 중단될 경우 대체 전력으로 공급되는 비상전원을 발전하는 장치이다. 본 연구에서는 비상디젤 발전기의 상대적으로 큰 부피로 인해 무정전 전원장치의 사용을 고려한다.

3.3. 운반, 운영 시나리오

연구를 통해 도출된 운반, 운영 시나리오는 Table 5와 같다. 차량 운반 시나리오의 절차와 검증단, 차량, 비상 전력에 대한 내용이 포함되었다.

4. 고 찰

운반 및 운영 시나리오 분석 과정에서 장비의 정상 작동 및 시나리오에 영향을 미칠 수 있는 위험요인을 도출하였다. 연구를 통해 도출된 위험 요인으로는 공통적으로 충격, 진동, 환경 변화, 습도, 항공 및 항만 운반 시 세관 등이 있다. 세관의 경우 예상치 못한 요인으로 연구진이 극한 환경 실험 수행을 위해 장비를 운반하던 중 일본 세관에서 장비에 대한 관세를 부과하였다. 또한, 장비 확인이 진행되어 이 과정에서 시간 지연이 발생하였다. 이를 통해 보다 상세한 위험 요인 평가가 요구됨을 확인할 수 있었으며 후속 연구를 통해 추가적 상세 위험 요인 분석이 진행될 필요가 있다고 판단하였다.

5. 결 론

한반도 내 원자력 시설 검증 및 사찰에 요구되는 현장 검증 장비에 대한 사전 확보 및 현장 접근성, 조달 및 운영 방안에 대한 사전 분석이 요구된다. 본 연구에서는 영변핵단지로의 검증 및 사찰을 가정하고 장비, 인력의 운반, 운영 시나리오를 제시하고자 하였다. 이를 위해 38 NORTH에서 제공하는 ATLAS, 구글어스 등 위성지도를 활용하여 북한의 주요 비핵화 대상 시설인 영변핵단지로의 운반 경로 접근성 평가를 수행하였다. 또한, IAEA 사찰에 대한 분석을 수행하였고 연구 결과를 종합한 운반, 운영 시나리오를 제시하였다. 연구를 통해 도출된 최종 운반시나리오는 차량 운반 시나리오이며, 접근성 평가, 절차 분석을 통해 가장 효율적인 시나리오인 것을 확인하였다. 차량 운반 전체 경로에 대한 상세 분석을 추가로 수행하였으며, 해당 경로에서 교량 개수, 경유 도로 등의 정보가 도출되었다. 운영 시나리오는 절차, 소요시간, 투입 인력, 차량, 비상 전력에 대한 내용을 제시하였다.

연구를 통해 구축 및 제시된 자료 및 시나리오는 향후

북한 검증 및 사찰 시 참고 자료로 활용될 수 있다. 또한, 향후 한반도 비핵화 참여에 대비한 정책 및 전략 수립에 기여할 것으로 판단된다.

사 사

This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation Of Nuclear Safety (KoFONS) using the financial resource granted by the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) of the Republic of Korea (No. 2103090).

참고문헌

1. Nuclear Safety and Security Commission. 2022. Nuclear Safety Research and Development Project Plan for the year 2022, pp. 1-17.
2. Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control. 2020. 2019 North Korea Nuclear Series, pp. 5-12.
3. 38North, 2023, https://www.38north.org/.
4. Korea Atomic Energy Research Institute. 2007. Evaluation for the status of the IAEA inspoction at PIEF &UF4 conversion plant (2001~2006), pp. 14-51.
5. Google Maps, 2023. “https://www.google.co.kr/maps/?hl＝ko&entry＝ttu”.
6. Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control. 2023. 2022 Kinac Annual Report, pp. 19-21.
7. IM SB. 2014. Domestic uninterruptible power supply technology trends. *The Korean Institute of Power Electronics* **19**(5): 36-41.