

비핵화 이행을 위한 우라늄 농축시설 검증절차 및 불능화 방안 제안

윤이석*·함형필**·우승민***

2018년 개최된 평창 동계올림픽 이후 남북정상회담, 북미정상회담 등을 거쳐 북한 비핵화에 대한 논의가 이루어졌다. 다만, 북핵 관련 협상 이후 사찰과 불능화 및 폐기 단계에 해당하는 구체적인 이행절차는 실시된 전례가 없다. 따라서 추후 비핵화 협상의 순간이 찾아올 때 적합한 검증 및 폐기를 완료하기 위해 자체적인 비핵화 관련 매뉴얼이 필요하다. 본 논문은 남아공과 이란의 비핵화 사례, 일반적인 비핵화 절차를 소개했으며, IAEA의 사찰 기술 및 절차를 바탕으로 비핵화 방안에 대해 논의했다. 요약하자면, 북한 우라늄 농축시설을 대상으로 적용할 수 있는 초기·주기적 검증절차 및 불능화 방안에 대해 기술했다.

주제어 검증, 농축시설, 불능화, 비핵화

투고일: 2024. 3. 29. 수정일: 2024. 6. 10. 게재확정일: 2024. 6. 19.

* 경희대학교 원자력공학과 학사과정(skdmld98@khu.ac.kr)

** 한국국방연구원 안보전략연구센터 책임연구위원(hhp11149@gmail.com)

*** 경희대학교 원자력공학과 교수(woosm@khu.ac.kr)

I. 서론

2018년 개최되었던 평창 동계올림픽에 북한 김여정을 포함한 대표단은 대한민국을 방문했다. 이 방문을 시작으로 남북 관계 개선을 위해 남북이 상호 노력하기 시작했다. 2018년 제1차 남북정상회담이 판문점 평화의 집에서 개최되었으며, 같은 해에 2차, 3차 회담이 각각 판문점과 평양에서 진행되었다. 남북정상회담뿐만 아니라 2018년 싱가포르, 2019년 하노이에서 개최된 북미정상회담을 통해 북미 관계 개선(이계영, 김홍태, 2018)에 대한 초석이 마련되었다. 위 정상회담의 공통적인 목적 중 한 가지는 한반도의 지속적인 평화 유지이고 이를 위해 남북과 북미 전부 한반도 내의 비핵화에 초점을 맞추었다. 실제로 북미정상회담에서 영변 핵시설 폐기, 핵신고 등의 내용이 상세히 논의되었다(최원기, 2018). 하지만 당시 하노이 북미정상회담의 협상은 결렬되었고 2024년 현재 이러한 분위기는 사라지고 북한은 미사일 도발과 군사적 행위를 통해 한반도 긴장을 높이고 있다.

남북 간에 비핵화에 대한 논의는 이번이 처음이 아녘다. 남북 비핵화공동선언과 남북 상호핵사찰 추진을 통해 남북은 91.12.26~31간 3차에 걸친 핵협상을 진행했다. 그 결과 『한반도 비핵화 공동선언』에 합의했으며 이후 북한은 92.5.4 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)에 최초신고서를 제출하였다(이우탁, 2023). 또한, 미국과 북한은 1994년 ‘제네바 합의’를 통해 미북 간 북핵 동결 조치를 적용했으며 IAEA는 북한의 5개 핵시설(5MWe 원자로, 재처리시설, 핵연료제조공장, 50MWe 원자로, 200MWe 원자로)에 대한 동결(김일수, 2007)을 감시하기 위해 전문가를 파견했다. 추가로 북한은 2005년 6자회담에서 ‘9.19 공동성명’을 이행하기 위한 합의 도출에 협력했으며, 2008년에는 두 번째로 핵 프로그램 신고서를 의장국(중국)에 제출했다(문성준, 2020).¹ 하지만 사찰장비 반입과 의혹시설에 대한 사찰활동 허용 여부에 관해 이견이 발생해 6자회담 당사국들과 북한의 검증 협상이 최종 결렬되었다.² 이처럼 이전부터 한국과 미국을 포함한 국제사회는 북한과 비핵화에 대한 협상을 지속해왔으나 최종적인 비핵화는 달성되

-
- 1 제출한 신고서에는 핵관련 시설목록, 플루토늄 추출량/사용처/보유량, 우라늄 재고량 등의 내용이 포함되었음.
 - 2 북한은 신고된 핵시설 방문과 기술인력 인터뷰는 허용하지만 시료 채취·분석과 사찰장비 반입, 의혹시설에 대한 접근은 거부하였음.

지 않았다.

따라서 협상 이후 최종적인 비핵화를 달성하기 위한 구체적인 절차와 방법론이 필요하다. 더불어 미래 다시 올 수 있는 비핵화 순간을 준비하기 위해서는 비핵화 관련 준비서 및 절차서가 필요한 상황이므로 즉각적인 이행을 위해 지금부터 그 방안에 대한 연구가 필요하다.

이러한 준비를 위해서 다른 나라의 비핵화 사례를 검토해 볼 필요가 있다(전봉근, 2020). 첫 번째 사례로 남아공 비핵화 사례이다. 남아공은 1957년 미국이 주도하는 ‘평화를 위한 원자력(Atoms for Peace)’ 프로그램의 지원을 받아 원자로와 핵연료를 제공받았다. 이후 국립원자력연구센터를 설립해 비밀리에 농축기술을 개발하기 시작하며 핵개발에 착수했다. 하지만 1989년 드클러크(De Klerk) 대통령이 취임하면서 대외관계의 정상화 및 타국과의 경제협력을 위해 핵개발 프로그램의 종료와 핵무기 폐기를 지시했다(한인택, 2011). 1991년 핵무기 해체작업이 완료된 후 핵확산금지조약(Nuclear Nonproliferation Treaty, NPT)에 가입할 수 있었으며 사찰 의무를 수용하기 위해 IAEA와 안전조치협정을 체결했다. 이후 남아공이 제출한 초기신고서(설계정보, 계량관리보고서, 핵물질 리스트 포함)를 토대로 IAEA 사찰이 시행되었다. 물론 남아공은 IAEA의 검증이 이루어지기 이전에 핵무기 폐기를 진행했기 때문에 공식적으로 핵무기 보유를 인정하지 않은 상태였으며, 그들이 보유했던 핵 프로그램 관련 정보들이 상당 부분 폐기된 상태였다. 그러므로 핵무기 보유 이력이 있는 것으로 의심되는 남아공을 대상으로 IAEA는 북한과 이라크에 대한 핵이력 사찰 실패 경험을 교훈 삼아 핵무기 개발 프로그램의 현황, 핵무기 폐기의 완전성, 핵무기용 고농축우라늄 완전 회수 여부 등을 확인했으며 남아공이 제출한 초기신고서를 기반으로 핵물질재고량을 검증했다. 또한, 핵무기시험시설과 주변의 환경시료를 수집해 미신고 핵활동이 있었는지 검증했다. 이러한 과정을 통해 필수 관련 장비들의 불능화 작업을 수행했으며 1993년 핵무기 부품의 분해와 폐기 및 관련 기술자료들의 폐기가 완료되었다. 하지만 여기서 끝이 아니었다. 2007년 11월 남아공에서 고농축우라늄 750kg을 보관 중인 원자력연구센터에 무장 괴한 4명이 침입한 사건이 발생했다. 여기서 남아공이 고농축우라늄 상당량을 그대로 보관했다는 점을 교훈 삼아 북한의 비핵화 이행시 적절한 검증 절차를 구상할 수 있어야 한다.

두 번째 사례로 이란이 있다. 이란은 완전한 비핵화는 아니지만 기존 핵프로그램을 평화적 이용으로 전환한 첫 번째 사례로 평가된다. 이란은 남아공과 마찬가지로 미국의 ‘평화를 위한 원자력(Atoms for Peace)’ 프로그램 지원을 받아 개발을 시작했다. 이후

우라늄 농축에 관심을 가져 1980년대 후반부터 A.Q. 칸(Khan)으로부터 농축기술 및 관련 기기를 획득했다.³ 그러나 이란의 반정부 단체가 자국의 비밀 농축시설에 대해 폭로 하면서 IAEA의 사찰이 실시되었다. 본격적인 비핵화는 이란의 국제사회로부터의 제재에 대한 탈피와 미국이 주도하는 강력한 경제·금융제재로부터의 독립, 경제난 해소 등의 이유로 2013년 ‘공동행동계획(Joint Plan of Action, JPOA)’ 합의, 2015년 ‘공동포괄행동계획(Joint Comprehensive Plan of Action Regarding the Islamic Republic of Iran’s Nuclear Program, JCPOA)’ 타결과 함께 시작되었다. 최종 합의에 따라 이란은 핵물질과 핵활동을 크게 감축하고 강화된 국제 검증활동을 받았다. 핵투명성을 보장하기 위해 IAEA의 안전조치와 추가의정서를 수용했으며, 의심시설에 대한 접근도 허용했다. 이후 이란은 국제사회의 제재를 해소할 수 있었으며(도경욱 외, 2023), 국제사회는 핵무기 개발을 위한 농축·재처리 경로에 대한 감축과 봉쇄라는 해결책을 얻을 수 있었다. 하지만 이란의 경우도 JCPOA 합의 이후 미국이 트럼프 대통령 체제로 변화함에 따라 JCPOA를 일방적으로 파기하는 등 합의에 어려움을 겪었다. 따라서 이러한 정책적 시사점 또한 비핵화에 중요한 요소가 될 수 있다.

남아공과 이란 사례를 참고하여 북한의 비핵화 전략 수립을 진행할 수 있지만 두 사례가 북한의 사례와 기술적으로, 국제정치학적으로, 지정학적으로 다르기 때문에 북한의 상황에 맞는 전략 수립이 필요하다고 생각한다. 또한 북한의 경우 이란과 남아공보다 더 많은 핵물질을 생산해온 것으로 판단되며, 다수의 핵탄두를 보유한 것으로 전문가들은 판단하고 있다(Kristensen and Korda, 2023).⁴ 그리고 본 연구에서는 중점적으로 다루지는 않겠지만 북한의 경우 플루토늄 생산, 추출, 제작 시설들이 있다. 하지만 남아공과 이란의 경우 우라늄 농축시설만 운영한 경험이 있기에 차이가 존재한다. 그러므로 우리는 북한 상황에 맞는 비핵화 프로세스 또는 매뉴얼 개발이 필요하다. 따라서 본 논문은 비핵화 이행을 위한 초기 검증 절차, 주기적 검증 절차, 불능화 방안 등에 대해 정리하고 제안하고자 한다. 핵물질을 생산하는 시설에는 우라늄 농축시설, 재처리시설, 화학분석실 등이 있지만 우라늄 농축시설의 대표적인 특징인 핵물질 다량 생산성, 장기

3 농축시설의 대표적인 농축 방법으로는 원심분리기 사용이 있음. 원심분리기는 U-235와 U-238의 질량 차이를 통해 U-235를 농축하는 원리이며, 고농축우라늄 생산을 위해 수 천 개의 원심분리기가 연결되어야 함. 필수 부품으로 회전자(Rotor), 전력공급장치, 고압밀균기(Auto Claves) 등이 있음.

4 스톡홀름국제평화연구소(Stockholm International Peace Research Institute, SIPRI)는 북한이 30기의 핵탄두를 보유하고 있는 것으로 추정함.

간 운영, 비공개성을 고려해 그 첫 단계로 우리나라 농축시설에 초점을 맞춰 기술했다.

II. 비핵화의 개략적 절차

북한의 상황에 맞는 비핵화 전략 수립에 앞서 미국의 전략(Carlson, 2019)과 한국국방연구원의 전략(조남훈, 2018)을 참고해 비핵화의 일반적인 절차와 과정에 대해 정리해 보겠다.

신고와 검증 단계 이전에 협상국들 간의 비핵화 로드맵 합의와 핵 프로그램 동결 단계가 선행될 수 있다. 또한 불능화와 폐기 단계까지 완료되면 북한과 같은 NPT 비가입 국가들은 NPT 복귀도 가능하다. 이러한 내용과 위 참고자료를 기반으로 북한의 비핵화 이행을 위해 상정할 수 있는 일반적인 절차는 [비핵화 로드맵 합의]-[동결]-[신고]-[검증]-[폐기(해체·파괴·반출)]-[NPT 복귀] 순이다. 위와 같은 절차는 북한과 관련국 간 합의점을 조화롭게 엮어 비핵화를 이끌 수 있도록 도와주는 제도적 장치이다. 첫 번째 단계인 로드맵 합의 이후 동결 조치를 통해 폐기 대상이 되는 모든 핵시설의 가동을 중단하고 폐쇄하며 신고서를 통해 핵 프로그램에 대한 모든 현황을 문서로 확인할 수 있다. 여기서 북한 신고서의 정확성과 완전성을 확인하기 위해 신고서를 검증하며 대북 사찰을 시행한다. 하지만 이전과 달리 북핵 프로그램이 비교할 수 없을 만큼 확장되었으므로 확인해야 할 사항이 대폭 증가되었다. 때문에 소수의 IAEA 사찰팀만을 가지고서는 완전한 검증이 이루어지기 어려울 것으로 판단된다. 따라서 북핵 검증을 위해 IAEA와 공동 또는 별도의 검증단 구성이 필요하며, 이런 검증에 관한 사항은 검증 의정서(protocol) 합의가 전제되어야 한다.⁵ 이후 가장 중요한 불능화·폐기 단계는 비핵화를 실질적으로 이행하는 단계로써 시설 및 장비, 물질의 해체, 파괴, 반출, 처리(변환, 처분) 등을 포함한다. 북한의 핵물질, 핵시설, 핵무기, 관련 문서 등이 폐기되거나 반출되며 각 대상별로 적합한 조치를 취해야 한다. 핵무기와 핵분열 물질은 해체, 반출 등을 적용하며 핵시설은 해체와 제염 과정을 거친다. 핵물질은 변환이나 처분 등의 조치를 적용한다. 실물뿐만 아니라 설계정보, 소프트웨어, 문서 등의 데이터 역시 폐기 조치를 적

5 IAEA와 함께 검증단을 구성하는 것의 장점으로 1) IAEA의 경험, 2) 우리나라와 북한의 물리적 거리, 3) 북한의 언어와 문화에 대한 우리나라의 이해력 등이 있음.

용한다.

III. 북한 우라늄 농축시설에 대한 비핵화 프로세스

앞서 언급했듯, 현재 북한이 운영 중인 핵시설의 종류 및 용량, 운영 기간, 핵물질 및 핵 무기 추정 보유량은 이전 사례와 비교해 전례 없는 규모가 예상된다(홍민, 2018). 다만 북한의 우라늄 농축시설에 대한 기본적인 검증절차를 수립하는 것은 과거 남아공 사례와 현재 IAEA가 우라늄 농축시설에 적용 중인 사찰절차를 참고하는 것이 유용한 접근이 될 것으로 판단된다.

1. 우라늄 농축시설에 대한 검증절차 제안

가. 초기 검증절차

북한의 사찰과정에서 첫 번째로 중요한 것은 북한이 제출하는 신고서이다.⁶ 신고서에는 북한에 존재하는 모든 농축시설의 목록(연구시설, 실증시설, 가동시설 등에 관한 위치 및 현황)이 필수적이며, 이를 통해 검증의 완전성과 정확성을 확보할 수 있다. 또한, 남아공의 사례에서 볼 수 있듯이 북한은 설계정보, 계량관리보고서, 핵물질 리스트 등과 같은 초기신고자료를 필히 제공해야 한다. 초기신고자료에 반드시 포함되어야 하는 목록으로는 1) 모든 우라늄 농축시설 목록, 2) 우라늄 농축시설 별 설계정보, 3) 우라늄 농축시설 별 계량관리 보고서, 4) 우라늄 농축시설 별 핵물질 현황 목록, 5) 우라늄 농축시설 별 운전 기록 등이 있다.

초기 신고 이후 초기설계정보검사(Design Information Verification, DIV)와 초기 핵물질재고량의 검증이 이루어져야 하며, 검증 완료 후 감시 활동이 이루어져야 한다. 현재 IAEA는 우라늄 재고량, 초기신고서에 신고된 총량, 농도 및 농축도를 수량검증(Item Counting), 무게평가(Weighing), 비파괴분석(Non-Destructive Analysis, NDA), 파괴분석(Destructive Analysis, DA) 등을 통해 검증하고 있다. 이러한 초기신고자료 작성 시 참고

6 미신고 시설에 대한 분석은 중요하지만 한계성이 존재함. 본 연구는 신고된 자료를 기반으로 검증하고 안전조치를 적용하는 방안에 대해 우선적으로 고려함.

가 될 수 있는 기존 IAEA 문서(U.S. NRC, 2020)로 우라늄 농축시설에 대한 설계정보설문(Design Information Questionnaire, DIQ)이 있다. DIQ 목록에 명시된 사항들을 북한의 농축시설에 그대로 적용하는 것이 바람직하지만 북한이 정보를 온전히 제공하지 않을 가능성을 고려하면 모든 DIQ 목록의 정보는 제한될 것이다. 그러므로 우라늄 농축에 가장 중요한 ‘고농축우라늄 농축도’와 ‘총생산량’과 관련된 최소한의 정보를 요구하고 이를 토대로 효과적인 검증을 진행하는 것이 현실적이다. 위와 관련된 필수 DIQ 목록은 [표 1]과 같다.

또한, 북한은 DIQ 이외에도 계량관리보고서를 함께 제출해야 한다. 현재 IAEA 안전조치 이행을 위해 요구하는 계량관리보고서는 물질수지구역간 핵물질 이동내역, 재고 변동 사항을 작성하는 재고변동보고서, 물질수지구역에 존재하는 핵물질 목록을 작

[표 1] 북한 우라늄 농축시설 사찰에 필요한 최소한의 DIQ

Overall process parameters			
13. Facility description (indicating all process stages, storage areas and feed, product, tail, and waste points)	General flow diagram(s)		
14. Process description (identifying sampling and key measurement points; MBAs; Inventory locations)	Flow sheet(s)		
15. Design capacity as a function of year (throughput and energy consumption)	MTUSW/annum MW		
Nuclear material description and flow			
17. Main material description	Feed	Product	Tails
i) chemical and physical form			
ii) throughput and enrichment ranges as a function of year			
iii) Batch size/flow rate and campaign period			
iv) storage inventory			
18. Waste material			
i) Source and form (indicating major contributors; liquid or solid; range of constituents; enrichment range; include contaminated equipment)			
ii) Storage inventory range, Method and frequency of recovery/disposal			
19. Container and storage area description			

출처: U.S. NRC(2020)

성하는 물자재고목록, 물질수지구역의 물질수지기간동안 핵물질의 재고변동과 현황에 대해 작성하는 물질수지보고서, 추가적인 설명이 필요한 사항을 작성하는 추가설명서로 구성되어있다(IAEA, 1976).

북한이 DIQ를 통해 제공한 시설별 네 가지 사항을 제출하는 것이 가장 이상적이다. 하지만 북한이 모든 사항을 제공하는데 동의하지 않는 경우, 최소한 시설별 연간 물자 재고목록과 연간 물질수지보고서를 제출하도록 요구하는 것이 필요하다고 판단된다.

핵물질 현황 목록은 앞에서 제공한 우라늄 농축시설에서 생산 또는 관리 중인 고농축우라늄 외의 보유·사용 중인 다른 핵물질에 대한 정보를 포함해야 한다. 마지막으로 농축시설 운전 기록은 우라늄의 물자재고검사(Physical Inventory Verification, PIV)와 같은 검증의 용이성을 위해 신고된 농축시설의 운전 이력과 현황을 포함해야 한다.

위 정보를 북한이 온전히 제공했을 경우, 이를 효과적으로 검증하기 위해 적절한 규모의 사찰팀이 필요하다. 우라늄 농축시설에 대한 사찰팀의 구성은 시설별 규모에 의존하지만, IAEA 안전조치 이행과 관련된 사찰인원 구성을 참고할 수 있다. IAEA는 물자재고검사 및 설계정보검사를 위해 3~4명의 사찰관을 편성하고 있다. 여기에 더해 1명의 산업공학 전문가가 필요할 것으로 판단된다. 산업공학 전문가는 시설의 운영, 재무관리, 물질관리, 인력관리, 회계관리 등의 전반적인 시스템 운영에 대한 높은 이해도를 기반으로 시설의 운영과 관련된 검증에 도움을 줄 수 있다. 그러므로 북한의 우라늄 농축시설에도 최소 4~5명 정도의 사찰관이 편성되어야 할 것이다. 만약 우라늄 농축시설이 복수의 도시에 분산되어 있으면 각 시설별로 일주일 정도의 사찰 기간을 두고 위의 팀원들이 이동하면서 사찰을 수행하는 것을 제안한다.

위와 같이 사찰팀이 구성되었다면 효과적인 검증 활동을 위해 적절한 장비를 구비해야 한다. [표 2]는 90년대 북핵 사찰 준비 시 식별했던 장비를 참고해 현재 상황에 맞게 재구성한 표이다. 이전 장비들과 달라진 점은 장비들의 핵물질 계측 불확실성의 감소, 장비의 이동성 등이 있다. 따라서 우라늄 정량평가 목적과 관련된 장비들이 추가되었으며, 고성능의 계측 장비들이 추가되었다. 또한 90년대 검증을 준비할 당시 우라늄 농축시설의 존재에 대해 확인하지 못했을 뿐 아니라 재처리시설의 존재를 추정하고 계획을 세웠으므로 현재 상황에 맞게 재구성해 플루토늄 정량평가와 관련된 장비는 제외되었다.

[표 2] 우라늄 농축시설 사찰에 필요한 장비

장비명	목적	비고
HM-5	우라늄 특성 파악	비파괴분석
ECGS	우라늄 농축도 파악	비파괴분석
IMCN		비파괴분석
IMCG		비파괴분석
COMPUCEA		파괴분석
ULTG		우라늄 용기 두께 파악
LCBS	질량평가	비파괴분석
환경시료채취키트	과거 시설에서 생산한 우라늄 농축도 추정	
CCTV(XCAM)	비핵화 후 시설의 감시목적	
CHEM(or OLEM)	비핵화 후 시설의 product 감시 목적	비파괴분석
노트북	계측정보기록	
통신장비	사찰관들 간의 통신 목적	
디지털카메라	설계정보검사를 위한 목적	
Seal 장비	비핵화 후 시설 내 핵물질의 격납 목적	
개인피폭선량계	사찰관 피폭선량 평가 목적	
나침반(GPS)	시설 탐색 활용	
다목적 칼	시설 탐색 활용	
지도	시설 탐색 활용	
각종기록양식지 및 장비 사용절차서	사찰활동 기록	
통신요령서	사찰관들 간의 원활한 통신 목적	
비상구급의료	비상구급의료장비	
손전등	시설 탐색 활용	
줄자(Laser meter)	시설 탐색 활용	
방사선방호용구	사찰관 보호	
사찰규정 및 합의서	사찰활동 목적	
노트와 필기구	사찰활동 기록	

- HM-5: 휴대용 다목적 감마 분광기(비파괴분석)
- IMCN: NaI 검출기와 결합된 Inspector 2000 다중채널 분석기(비파괴분석)
- IMCG: HPGe 검출기와 결합된 Inspector 2000 다중채널 분석기(비파괴분석)
- ECGS: 전기 냉각 게르마늄 시스템(Electrically Cooled Germanium System)(비파괴분석)
- ULTG: 초음파 두께 측정기(The Ultrasonic Thickness Gauge)(비파괴분석)
- LCBS: Load cell 기반 계량 시스템(비파괴분석)
- COMPUCEA: 우라늄 농도 및 농축 분석법(COMBined Procedure for Uranium Concentration and Enrichment Assay)(파괴분석)

나. 주기적 검증절차

일반적으로 농축시설에 대한 초기신고서 검증은 사찰기구의 판단 기준을 충족할 때까지 진행된다. 전반적인 검증기간과 범위는 북한 최초신고서의 정확성, 완전성 및 복잡성 여부에 따라 달라진다. 최초신고서에 대한 사찰과 검증이 종료되면 일반적으로 피사찰국의 의무이행 확인 여부 및 감시검증을 위해 정기사찰에 돌입하게 된다. 이때 상세한 내용은 북한과의 협의 결과에 따라 달라지겠지만 IAEA 주기적 검증절차를 고려하면 매월 1회(IAEA, 2019)의 설계정보검사, 중간검사(제고 및 재고변동 확인), 무통보사찰 등이 수행될 것으로 판단된다. 보통 무통보사찰과 설계정보검사의 이행 주기는 시설이 생산하는 핵물질의 농축도와 연관이 있으며 통상 5% 이하의 농축 핵물질의 경우에는 월 1회의 무통보사찰과 설계정보검사가 수행된다. 추가로 농축과 관련된 농축 핵심구역만 확인하는 일일접근도 월 3회의 빈도로 수행되는데, 이 또한 북한과의 협의가 별도로 선행되어야 한다.

북한 농축시설의 주기적 검증을 구상하기 위해 현재 IAEA가 적용하고 있는 신고된 우라늄 농축시설의 사찰과정과 방법을 활용할 수 있다. 농축시설을 보유하고 있는 국가의 상황과 해당 시설의 처리량에 따라 IAEA 사찰방식은 달라진다. 예를 들어, IAEA가 해당 국가를 투명하다고 판단하면 아무리 큰 상업용 농축시설일지라도 연 1회 정도의 설계정보검사가 시행되며, 매달 정기(중간)검사(Interim Inspection) 및 무통보불시사찰((Limited Frequency Unannounced Access, LFUA)을 시행한다. 또한, 정기검사 사이의 감시 공백을 보완하기 위해 IAEA는 감시카메라를 특정 구역에 설치해 UF₆ 실린더의 농축 핵심구역 내부·외부로의 이동을 감시한다. IAEA가 평화적으로 사용 중인 우라늄 농축시설에 적용하는 주기적 사찰과정(검증절차)은 아래와 같다.

- (1) 설계정보검사는 연 1회 정도 실시하며 현재의 설계정보가 유효한지, 지난 1년간 시설의 변경사항은 없는지 육안검사를 통해 확인한다. 이를 위해 설계정보에 수록된 모든 시설 내의 장소에 대해 접근이 보장되어야 한다. 또한, 캐스케이드 홀, Feed/Withdrawal Station, 화학분석실 등의 장소에서 환경시료 채취를 통해 미신고 핵 활동, 즉 신고된 농축도 이상의 핵물질 생산 여부에 대한 확인이 가능하다. 의심 국가의 경우, 5% 이하 핵물질을 생산하는 시설은 월 1회, 5~60% 핵물질을 생산하는 시설의 경우는 생산량에 따라 월 1~2회 정도의 검사를 실시한다. 설계정보검사는 사찰관이 시설에서 설계정보서의 정확성과 완

전성을 확인하기 위한 검사활동으로서 피사찰국가에서 제공한 설계정보대로 시설이 운전되는지, 설계정보의 변경이 신고되면 변경사항이 IAEA가 적용하고 있는 안전조치 접근법에 얼마나 영향을 미치는지 검증한다.

- (2) 중간검사는 지난 한 달간의 유량 변화를 검증하기 위해 월 1회 정도 실시한다. 지난 중간검사 이후 외부에서 유입된 Feed 실린더와 새롭게 생산되어 외부로 반출될 Product와 Tail 실린더들에 대한 수량검증과 태그식별, 샘플링 검사 방식에 따라 무작위로 파괴분석과 비파괴분석, 무게평가를 실시한다. Heels 실린더에 대해서는 수량검증, 태그식별, 공진 검사를 수행한다. 의심 국가의 경우 위 검사 외의 무게평가를 추가로 실시한다.
- (3) 의심 국가의 농축시설 내에 있는 Process 핵물질을 제외한 모든 핵물질에 대해 100% 수량검증, 태그식별 후, 무작위로 소수의 실린더를 선택해 봉인을 교체하여 검증하는 봉인검증을 실시한다. 모든 핵물질은 움직이지 못하도록 고정되어 봉인한다. 또한, 농축시설의 모든 핵물질 반출 통로에 감시카메라를 설치해 24시간 녹화하며 이를 주기적으로 검토함으로써 사전 통보 없이 무작위로 반출되는 핵물질의 여부를 확인한다. 그리고 Product Cold box로 들어오는 파이프에 무인 비파괴분석 장비를 부착해서 농축도를 감시하며, Load Cell을 설치하여 농축우라늄의 생산량을 감시한다.
- (4) 무통보불시사찰은 미신고 Feed를 사용하여 신고된 농축시설의 오용을 막고 캐스케이드 홀을 방문해 미신고 변경사항을 확인함과 동시에 환경시료 채취를 통해 미신고 고농축 우라늄의 생산 활동을 조기에 탐지하기 위한 사찰과정으로 통상 월 1회 정도 실시한다. 의심 국가의 경우 월 1회의 불시사찰(UI: Unannounced Inspection)을 통해 캐스케이드 홀과 Feed/Withdrawal Station들이 신고된 대로 운전되는지 육안검사를 통해 확인하며, Product와 Tail을 파괴분석 샘플로 채취하여 확인한다. 5~20% 이상의 농축도를 가진 Product의 경우에 불시사찰은 월 2회, 20% 이상의 경우는 월 4회의 감시를 실시한다.
- (5) 물자재고검사는 연 1회 실시하며, 시설 내의 모든 핵물질에 대한 재고 검증이 이루어진다. 대규모의 상업농축시설인 경우, 검사를 위해 생산을 중단하는 것은 무리가 있으므로 운전 중 어느 한 시점을 정해 해당 시설 내의 모든 핵물질의 재고량을 검사한다. 공정 중의 핵물질도 물자재고검사의 대상이며, 파이프 내부의 핵물질량을 정확하게 평가하기는 어렵지만 설계값으로 IAEA에 제공

되어야 한다. 이러한 물자재고검사를 통해 해당 시설에서 Feed로 사용된 핵물질량과 Product, Tail 및 Waste 양을 검증하여 물질수지평가를 통해 해당 시설의 미계량핵물질(Material Unaccounted For, MUF)을 계산한다. MUF량은 일정하지 않고 0을 기준으로 클 수도 적을 수도 있지만 증가 또는 감소의 일정한 경향을 가지면 안된다.

북한의 비핵화 과정은 두 가지 시나리오로 예측할 수 있다. 첫 번째는 농축시설을 폐기 대상으로서 불능화를 실시하는 경우이다. 이러한 경우 주기적 사찰은 설계정보검사만으로 충분할 것이다. 두 번째 시나리오는 이란의 JCPOA 사례와 같이 우라늄 농축시설을 평화적 이용 대상으로서 지속적으로 가동하는 경우이다. 지속 가동을 위해 위에서 살펴본 바와 같이 IAEA의 정기적 사찰절차를 준용할 수 있다. 따라서 북한의 우라늄 농축시설에 대한 주기적 사찰 예상 시나리오는 다음과 같이 정리할 수 있다.

[표 3] 우라늄 농축시설의 평화적 이용 시 주기적 검증 방안

	기간	대상	활동 사항	명수	장비
설계정보 검사 & 물자재고 검사	2~3주/년	<ul style="list-style-type: none"> • Storage • 캐스케이드 홀 • Feed/Withdrawal Station • 화학분석실 • Heels cylinder • 폐기물저장고 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계사항 육안검사 • 수량검증 • 태그식별 • 무게평가 • 환경 시료 채취 • 파괴분석 • 비파괴분석 	3~4명	<ul style="list-style-type: none"> • HM-5 • ECGS • LCBS • ULTG • 환경 시료 채취 장비 • COMPUCEA
중간검사	3일/월	<ul style="list-style-type: none"> • 캐스케이드 홀 • Feed/Withdrawal Station • Heels Cylinder • 화학분석실 	<ul style="list-style-type: none"> • 100% 수량검증 • 태그식별 • 공진 검사 • 비파괴분석 • 무게평가 • 파괴분석 	2명	<ul style="list-style-type: none"> • HM-5 • ECGS • LCBS • ULTG • 환경 시료 채취 장비
무통보사찰	1일/월	<ul style="list-style-type: none"> • 캐스케이드 홀 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계사항 육안검사 • 환경 시료 채취 	2명	<ul style="list-style-type: none"> • 환경 시료 채취 장비
UI	1회/월	<ul style="list-style-type: none"> • 캐스케이드 홀 • Feed/Withdrawal Station • Product & Tail 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계사항 육안검사 • 파괴분석 	2명	<ul style="list-style-type: none"> • 환경 시료 채취 장비

- (1) 비핵화 이후 우리나라 농축시설의 불능화: 설계정보검사 위주의 주기적 사찰 적용
- (2) 비핵화 이후 우리나라 농축시설의 평화적 이용: [표 3]에 나타난 주기적 사찰 절차 적용

2. 우리나라 농축시설에 대한 불능화 방안 제안

불능화는 감시 및 감찰하에 시설의 일부분을 파손시켜 재가동에 시간을 두는 조치와 복구를 위한 노력이 새로운 시설을 건설하는 것과 다름없는 폐기 수준의 조치까지 세부적으로 나눌 수 있다(한국원자력통제기술원, 2011). 또한, 직접적인 파손뿐만 아니라 시설에 활용될 수 있는 컴퓨터와 문서 등의 소프트웨어적 요소의 제거 또한 불능화에 포함된다. 이처럼 다양한 불능화 단계를 구체적으로 이행하기 위해 6자회담 이후 북한 핵시설을 대상으로 시행되었던 불능화 절차에 대해 살펴볼 필요가 있다. 6자회담에서 논의된 불능화는 복구에 상당한 시간과 노력이 필요하도록 일부의 중요부품과 장치를 제거하는 조치였다(한국원자력통제기술원, 2011). [표 4]는 한국원자력통제기술원에서 제공한 북한 핵시설 불능화 현황에 관한 내용이다.

[표 4] 6자회담 이후 북한 핵시설의 불능화 현황

시설명	불능화 조치	완료 여부
5MWe 원자로	2차 냉각계통 냉각탑 철거	완료
	사용후핵연료 인출(6500/8000)	미완료
	제어봉 구동기구 및 사용후핵연료 인출기 제거	
	신연료 장전기 사용불가 조치	
방사화학실험실	사용후핵연료 적재 운반차량 구동장치 제거·보관	완료
	사용후핵연료 운반 기중기 및 차폐문 작동기 제거·보관	
	총 4개중 2개의 증기라인 분리	
	핵연료봉 절단기 제거·보관	
핵연료제조공장	주요 우라늄 용해조 제거·보관	완료
	5톤 UO ₃ 저장 및 감시, 신연료 처리	미완료
	우라늄 금속변환로 제거·보관, 단열벽돌과 모르타르 모래 보관	완료
	우라늄 금속 주조로의 제거·보관, 선반기기 제거·보관	

출처: 한국원자력통제기술원(2011)

타 시설의 불능화 조치를 기반으로 우리나라 농축시설에 적용할 수 있는 불능화 절차를 구상할 수 있다. 북한의 대표적인 우리나라 농축시설은 원심분리기 기반 시설이다. 불능화를 위해 원심분리기의 연결관 및 원심분리기 주요 구조물 자체를 절단하는 작업이 필요하다. 북한이 사용 중인 농축시설의 원심분리기는 2,000개 이상으로 알려져 있으며, 이들의 캐스케이드 배관 접합부를 절단하면 원심분리기의 일시적인 불능화를 달성할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 북한은 다량의 알루미늄 파이프를 러시아로부터 수입했는데, 이는 기체 원심분리기의 외부 구조물로 사용된다(Albright and Hinderstein, 2006). 알루미늄 파이프의 절단 역시 일시적인 불능화에 적용될 수 있다. 전력공급장치, Autoclaves, Desublimers 등과 같은 필수 부품의 제거도 원심분리기 불능화에 사용될 수 있다. 또한, 원심분리기 부품 제작과 관련된 수출통제항목을 추가하는 방법이 있다. 대표적인 북한의 수출통제 품목으로 유동성형기기(Flow Forming Machine)가 있는데, 이는 원심분리기의 핵심 부품인 회전자를 생산한다(문성준, 2020). 품질관리 장비와 필수부품 제작기기의 사용 불가 조치 또한 하나의 방법이 될 수 있다.

효율적인 불능화를 위해 북한의 원심분리기에 대한 부품, 원자재, 공정 과정에 대한 목록화가 필요하며, 이를 통해 불능화의 정도에 따른 절차를 수립할 수 있다.

IV. 결론

국제사회가 북핵 문제에 관심을 갖게 된 이후 30여 년 동안 비핵화에 대한 논의가 지속되었으나 그 사이 북한의 핵능력은 고도화를 이루어냈다. 한반도의 평화를 위해 비핵화는 필수적인 과정이며 이러한 과정에 조금 더 도움이 되고자 본 논문을 작성했다. 본 논문은 과거 진행되었던 북한 비핵화 관련 협상 사례와 일반적인 비핵화 절차를 소개했으며, 협상 단계 이후 농축시설의 구체적인 초기·주기적 검증절차 및 불능화 방안에 대해 기술했다.

검증절차에 첫 번째로 중요한 것은 북한이 제출하는 신고서이다. 신고서에는 농축시설 목록·설계정보·계량관리보고서·핵물질 현황·운전 기록 등이 포함되어야 한다. 상세한 농축시설 검증을 위해 위 정보들의 온전한 확보가 선행되어야 한다. 또한 효과적인 검증을 위해 4~5명의 사찰팀이 필요하다. 이후 진행되는 검증절차 및 불능화 방안은 IAEA의 사찰 기술과 경험, 주요 원자력 선진국의 최신 기술과 비핵화 사례를 활용할 수

있다.

다만 위와 같은 비핵화 프로세스를 적용하기에 앞서 필요한 부분들이 존재한다. 첫 번째로 핵관련 정보를 입수하기 위한 방안이 필요하다. 시설의 특성을 고려하면, 북한의 우라늄 농축시설을 포함한 핵시설들을 은밀하게 설치해 운영할 가능성이 존재한다. 비밀리에 운영된 시설 내에 은닉해둔 핵물질 또한 적발하기 위해 기술적으로 많은 어려움이 존재한다. 결국, 이러한 핵관련 정보들의 입수 여부가 북핵 비핵화에 큰 비중을 차지한다. 두 번째로 비핵화와 관련된 전문가 인력양성이 필요하다. 관련 전공자와 전문가의 부족은 미래의 비핵화 이행 시 경험 부족으로 인한 결점을 발생시킬 가능성을 높인다. 따라서 전공 지식을 함유한 전문가를 육성해 비핵화에 대한 방안을 모색하는 과정이 필요하다. 세 번째로 핵시설에 관한 연구가 필요하다. 현재 한미원자력협정으로 인해 농축시설, 재처리시설 등에 관한 깊이 있는 연구가 불가능한 상황이다(이병철, 2017). 이러한 시설들은 북한의 핵심 핵시설로 우리나라 또한 자체적인 비핵화 매뉴얼을 만들기 위해 관련 연구를 진행할 필요가 있다.

위와 같은 결점이 해결된다면 효율적인 비핵화 수행을 위해 우리나라 다양한 기관들의 역할 분담을 고려할 수 있다. 각 기관의 수행 능력을 고려하면, 원자력안전위원회가 총괄하는 것이 적절할 것이다. 또한 한국원자력통제기술원과 한국원자력연구원이 참여해 핵시설과 핵물질, 검증절차에 관련된 데이터와 연구 목록을 제공한다면 효율적이고 현실적인 비핵화 진행을 기대할 수 있을 것이다. 추가로 IAEA와의 협력을 위해 한국원자력통제기술원과 외교부의 역할도 중요할 것으로 판단된다. 제안된 내용을 토대로 연구를 지속적으로 수행하며 결점을 보완한다면 향후 한반도의 평화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.⁷

7 본 논문은 한국원자력통제기술원 위탁보고서 “핵주기시설의 검증 절차 수립을 위한 기반 연구”를 기반으로 재구성한 것임을 밝히는 바입니다.

참고문헌

- 김일수, “2.13 합의 이후의 북미관계 전망,” 『정치·정보연구』 제10권 제1호, 2007, pp. 149-165.
- 도경옥, 심상민, 안준형, 이동은, “비핵화 합의와 이행의 법·제도적 문제: 주요 비핵화 사례를 중심으로,” 통일연구원, 2023.
- 문성준, “북한 비핵화 과정의 기술적 검증 적용방안에 관한 연구,” 조선대학교 정책대학원 박사학위논문, 2020.
- 이계영, 김홍태, “2018 평창동계올림픽의 평화올림픽 성과와 과제,” 『한국엔터테인먼트산업학회논문지』 제12권 제4호, 2018, pp. 151-166.
- 이병철, “평화적 이용’에 관한 한미원자력협정과 미국의 이중성,” 『평화학연구』 제18권 제4호, 2017, pp. 27-48.
- 이우탁, “북한과 IAEA의 길긴 악연…2009년 이후 연결고리 끊겨,” 『연합뉴스』, 2023.9.26.
- 전봉근, “비핵화의 정치,” 명인문화사, 2020.
- 조남훈, “북한 비핵화 과정 및 전망,” 한국국방연구원, 2018.
- 최원기, “핵신고 문턱에 걸린 2차 미-북 정상회담,” 『Voice of America』, 2018.10.19.
- 한국원자력통제기술원, “북한의 핵프로그램과 검증,” 한국원자력통제기술원, 2011.
- 한인택, “핵폐기 사례연구: 남아프리카공화국 사례의 함의와 한계,” 『한국과국제정치(KWP)』, 제27권 제1호, 2011, pp. 83-108.
- 홍민, “북한의 자발적 비핵화와 정치-기술적 과정,” 통일연구원, 2018.
- Albright, David, and Corey Hinderstein “Dismantling the DPRK’s Nuclear Weapons Program: a Practicable, Verifiable Plan of Action,” *United States Institute of Peace*, 2006.
- Carlson, John, “Denuclearizing North Korea: The Case for a Pragmatic Approach to Nuclear Safeguards and Verification,” *38 North Special Report*, Stimson Center, 2019.
- IAEA, “The Text of the Agreement of 31 October 1975 Between the Republic of Korea and the Agency for the Application of Safeguards in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons,” INFCIRC/236, 1976 (<https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infircs/1976/infirc236.pdf>) (검색일: 2024.3.4).
- IAEA, “International Safeguards in the Design of Enrichment Plants,” *IAEA Nuclear Energy Series*, ISSN 1995 7807; no. NF-T-4.10, 2019.
- Kristensen, Hans M., Matt Korda, “7. World Nuclear Forces,” SIPRI Yearbook 2023, 2023.
- U.S. NRC, “IAEA Form N-75 – IAEA Design Information Questionnaire Isotopic Enrichment Plants,” 2020 (<https://www.nrc.gov/docs/ML1430/ML14300A180.pdf>) (검색일: 2024.2.29).

Abstract

Proposed Procedures for Verifying and Disabling Uranium Enrichment Facilities for Denuclearization

Yiseock Yoon,* Hyeongpil Ham,** and Seungmin Woo***

Following the 2018 PyeongChang Winter Olympics, discussions on North Korea's denuclearization took place through inter-Korean summits and North Korea-US summits. However, there have been no instances for concrete implementation steps such as inspection, disablement, and dismantlement following negotiations on North Korea's nuclear program. Therefore, there is a need for a self-developed manual on denuclearization to ensure appropriate verification and disposal when the moment for further denuclearization negotiations arrives. This paper introduces cases of denuclearization in South Africa and Iran, the general denuclearization procedures, and discusses denuclearization measures based on the International Atomic Energy Agency's (IAEA) inspection technology and procedures. In summary, it describes the initial · periodic verification procedures and disablement measurements applicable to North Korea's uranium enrichment facilities.

Keywords Verification, Enrichment Facilities, Disablement, Denuclearization

* B.S., Department of Nuclear Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Republic of Korea (skdmlid98@khu.ac.kr)

** Senior Research Fellow, Center for Security and Strategy, Korea Institute for Defense Analyses, Seoul, Republic of Korea (hhp11149@gmail.com)

*** Assistant Professor, Department of Nuclear Engineering, College of Engineering Kyung Hee University, Yongin, Republic of Korea (woosm@khu.ac.kr)

