핵무기 감축 효과 측면에서 북한의 영변 핵시설 폐기안 평가

문 주 현*

❖ 요 약 ❖

본 논문은 2차 미-북 정상회담에서 북한이 미국에 제안한 영변 핵시설 폐기안을 평가하였다. 영변에 존재하거나 존재하고 있을 것으로 추정되는 시설들을 △플루토늄 핵무기 관련 시설 △우라늄 핵무기 관련 시설 △수소탄 관련 시설 △기타/공통 핵시설 그룹으로 구분하고, 각 그룹에 대해 통상적인 핵개발 과정에서 존재해야 하는 시설 중 비공개된 시설이 영변에 존재하고 있을 가능성과, 각 그룹에 속한 공개·비공개 시설 중 핵심 시설이 폐기됐을 때 미래 핵무기 수량 감축효과를 평가하였다. 정량적 평가가 어려운 시설들에 대해서는 폐기 시 북한 비핵화 측면에서 어떤 전략적 의미가 있는지를 정성적으로 평가하였다. 평가 결과, 북한의 영변 핵심 핵시설(5MWe원자로, 방사화학실험실, 우라늄 농축시설, UF_6 생산시설, IRT-2000원자로, Li-6 농축시설, 삼중수소 추출시설, UF_4 생산시설)을 폐기하면, 북한의 미래 핵물질 생산능력을 제거 측면에서 20kt급 핵무기 3~4기를 제조할 수 있는 핵물질(플루토늄과 HEU) 생산을 중단하는 효과가 있는 것으로 평가되었다. 중장기적 관점에서 보면, 핵무기 유지보수를 어렵게 하여 기존 핵무기의 핵무기로서의 전략적 가치를 떨어뜨리는 효과도 있는 것으로 평가되었다.

핵심어: 미-북 정상회담, 영변 핵시설 폐기안, 플루토늄, 고농축우라늄, 삼중수소

Ⅰ. 서론

지난 2월 27일~28일 하노이에서 개최된 2차 미-북 정상회담은 일반 예상과 달리 양국간 아무런 합의 없이 종료되었다. 이 회담을 통해 미국과 북한이 생각하는 비핵화 범위에 큰 간극이 존재한다는 것이 드러났다.

트럼프 미국 대통령은 북한과의 협상을 중단한 직후 행한 기자회견에서, “(영변 핵시설) 해체는 미국이 원하는 모든 비핵화가 아니다. 영변 핵시설뿐 아니라 (다른

* 단국대학교 원자력융합공학과, 정교수

핵시설을 포함한) 더 획기적인 비핵화 조처가 필요했다"고 말했다(김지은, 2019). 최선희 북한 외무성 부상은 그 이튿날 한국 기자들과 만나, "김 위원장은 트럼프 미국 대통령에게 영변 핵시설을 '깨끗하게 포기하겠다'는 입장을 내놨다. 영변 핵시설 폐기는 미국 핵전문가들의 참관하에 진행할 예정이었다. 우리가 제시한 영변 핵시설이라는 게 만만치 않은 것이다. (북한은) 아직까지 핵시설 전체를 폐기 대상으로 내놔본 역사가 없다"고 주장했다(유병훈, 2019).

미-북 정상회담 결렬 직후, 영변 핵시설 폐기가 북한이 요구하는 제재 해제를 수용할 만큼 비핵화 조치로서 충분한 가치가 있느냐를 두고 국내·외에서 다양한 의견이 제시되었다.

데이비드 올브라이트 과학국제안보연구소장은 "북한은 영변에서 연간 2~3개의 핵무기를 제조할 수 있는 양의 플루토늄과 무기급 우라늄을 생산하고 있고, 영변 이외의 다른 농축시설에서도 그만큼의 양을 만들 수 있다. 영변 핵시설이 전체 북핵 프로그램의 70%~80%에 해당한다는 일각의 주장은 과장된 것이며, 각국 정부의 분석을 종합했을 때 영변의 비중은 최대 50% 수준이며 가장 중요한 시설로 보기도 어렵다"고 주장하였다(박희준, 2019). 한편 3월 20일 오후 국회 본회의 외교·통일·안보 분야 대정부질문에 출석한 조명균 통일부 장관은 "영변 핵시설에 플루토늄 재처리 시설 외 핵심시설이 있다. … 영변 시설이 북한의 전체 핵 프로그램에서 차지하는 비중은 50~70% 정도로 평가한다. 그런 시설을 완전히 폐기한다고 하면 북한 비핵화 과정에서 상당히 중요하고 의미 있는 과정"이라고 주장하였다(김도균, 2019).

2차 미-북 정상회담을 통해 드러난 양국의 비핵화 대상과 범위의 간극을 어떻게 좁히느냐가 북한 비핵화 협상의 지속 여부를 결정하는 열쇠가 될 것이다. 이 과정에서 비핵화 조치에 대한 보상조치를 마련하면서, 북한이 제안한 영변 핵시설 폐기도 비핵화 초기 조치 패키지로 다뤄질 공산이 크며, 이 패키지에 대한 보상으로서 어떤 조치를 할 것인가에 대해 한-미, 미-북간 협상이 이뤄질 것이다.

영변 핵시설 폐기의 비핵화 가치에 대한 평가가 없었던 것은 아니다. 미-북 정상회담 후 사모아(Samore, 2019)가 영변 핵시설의 전략적 가치를 평가하였다. 하지만 정성적 평가에 그치고 있고, 영변에 위치한 핵시설들에 대한 상세한 정보가 있어야만 보다 명확한 평가가 가능하다고 지적하고 있을 뿐이다.

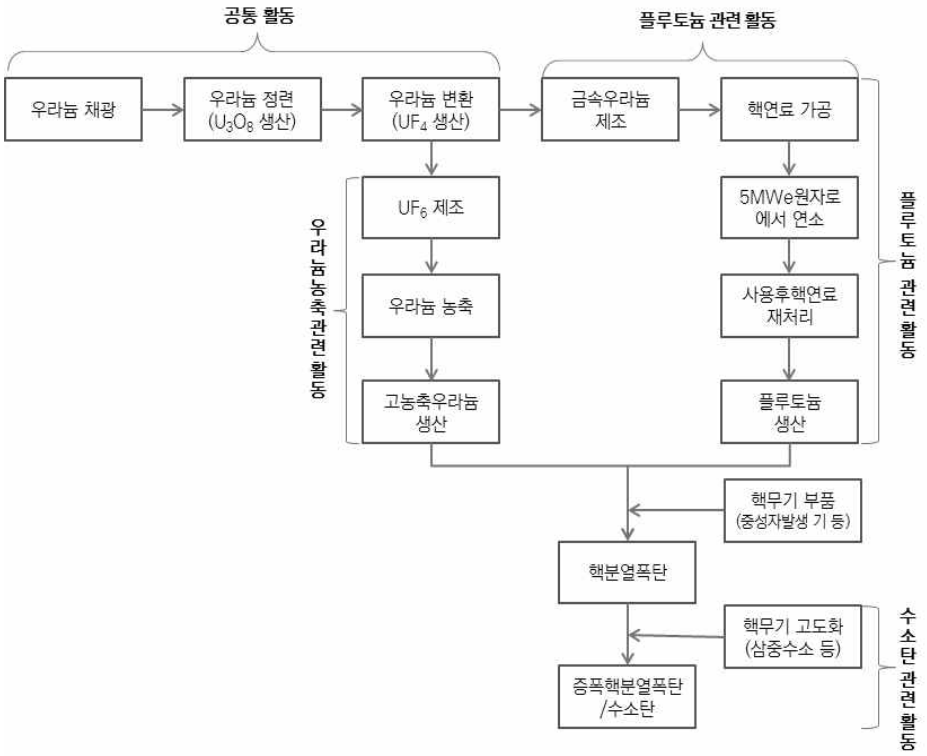
사모아의 지적처럼 영변 핵시설들에 대한 상세한 정보가 공개되지 않은 상황에서 정확한 평가는 쉽지는 않다. 그렇지만 북핵 위협의 직접적 당사자인 우리로서는 일반적인 핵개발 과정에 대한 과학적 지식과 그간 제한적이나마 공개된 정보를 토대로라도 영변 핵시설 폐기안에 대한 가치 평가, 즉, 핵무기 수량 감축 측면에서 어느 정도 효과가 있는지 평가를 해봐야 한다. 미-북 양국의 입장 차를 보다 분명하게 파악하고 그 차이를 줄여나가는 중재 노력을 해나가기 위해서는 영변 핵시설 폐기안이 핵무기 수량 감축 측면에서 어느 정도 효과가 있기에 미국이 수용하지 못했는지, 아니면 북한 주장대로 비핵화 효과가 큰 것인지를 판단해야 하기 때문이다.

이에 본 논문에서는 북한의 영변 핵시설 폐기안을 가능한 한 정량적 측면에서 평가하고자 하였다. 아직 북한의 폐기안에 어떤 핵시설까지 포함돼 있는지 밝혀지지 않았기 때문에, 본 논문에서는 영변에 존재하거나 존재하고 있을 것으로 추정되는 시설들을 △플루토늄 핵무기 관련 시설 △우라늄 핵무기 관련 시설 △수소탄 관련 시설 △기타/공통 핵시설 그룹으로 구분하고, 각 그룹에 대해 통상적인 핵개발 과정에서 존재해야 하는 시설 중 비공개된 시설이 영변에 존재하고 있을 가능성과, 각 그룹에 속한 공개·비공개 시설 중 핵심 시설이 폐기됐을 때 미래 핵무기 수량 감축 효과를 평가하였다. 정량적 평가가 어려운 시설들에 대해서는 그들 시설이 폐기됐을 때 북한 비핵화 측면에서 어떤 전략적 의미가 있는지를 정성적으로 평가하였다.

Ⅱ. 북한의 핵시설

북한은 핵무기 연구·제조·생산에 필요한 다양한 핵시설을 보유하고 있다. 북한의 핵개발 흐름도는 〈그림 1〉과 같다. 앞으로의 논의를 위해, 북한 핵시설을 크게 △플루토늄 핵무기 관련 시설 △우라늄 핵무기 관련 시설 △수소탄 관련 시설 △ 기타/공통 시설로 구분하고자 한다.

〈그림 1〉 북한의 핵개발 흐름도



플루토늄 핵무기 관련 시설은 플루토늄을 생산해, 이를 핵무기로 제조하는데 필요한 시설들이다. 이 시설 중 영변에 있는 핵심 시설은 핵연료에 중성자를 조사(照射)하여 핵연료 속 우라늄을 플루토늄으로 변환시키는 5MWe 원자로와 이 5MWe 원자로에서 배출된 사용후 핵연료로부터 플루토늄을 추출하는 방사화학실험실(재처리시설)이다.

5MWe 원자로는 북한이 자체 건설한 흑연감속 가스냉각로이다. 이 원자로는 미국, 舊소련, 영국, 프랑스 등에서 핵무기용 플루토늄을 생산하는데 이용한 원자로의 초기 단계 설계와 유사하다. 5MWe 원자로는 천연 금속우라늄을 핵연료로 사용한다. 5MWe 원자로 핵연료에 포함된 천연우라늄이 플루토늄으로 변환되는 과정은 다음과 같다.

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + \mathrm{n} \rightarrow ^{239}_{92}\mathrm{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{93}\mathrm{Np} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{94}\mathrm{Pu}$$

이렇게 생성된 플루토늄-239가 중성자를 흡수하면 핵분열을 하거나 플루토늄-240으로 변환한다.

그런데 핵무기 속의 핵물질이 초임계[1] 상태로 결합되는 과정 중에 중성자가 이미 존재하고 있으면 미숙한 핵반응이 일어나 상대적으로 적은 에너지만 방출되거나 최악의 경우 핵폭발이 일어나지 않을 수도 있다. 이러한 미숙한 핵반응을 초래하는 주요 원인 물질 중 하나가 자발적 핵분율열이 큰 플루토늄-240이다. 이 때문에 통상 핵무기에는 플루토늄-240 함량을 7% 이내로 제한한 핵무기급 플루토늄을 사용한다. 5MWe 원자로에서 연소된 사용후 핵연료에 포함돼 있는 플루토늄은 방사화학실험실에서 PUREX(Plutonium and URanium EXtraction)라 불리는 화학적 처리를 통해 추출된다. 플루토늄은 외력 없이도 밀도의 25%가 변하는 특이한 속성이 있다. 이 때문에 플루토늄 상태를 안정화하기 위해 갈륨 등과 합금으로 만들며, 이 플루토늄 합금을 핵무기 제작에 사용한다.

우라늄 핵무기 관련 시설은 우라늄-235를 90% 이상 농축한 고농축우라늄(High Enriched Uranium, HEU)을 생산하여, 이를 핵무기로 제조하는데 필요한 시설들이다. 우라늄 농축을 위해서는 먼저 고체 상태의 우라늄을 기체 상태의 육불화우라늄(UF_6)으로 변환시켜야 한다. UF_6 제조는 통상 다음 과정을 거친다.

$$\mathrm{UO_2} + 4\mathrm{HF} \rightarrow \mathrm{UF_4} + 2\mathrm{H_2O}$$

$$\mathrm{UF_4} + \mathrm{F_2} \rightarrow \mathrm{UF_6}$$

이 변환과정을 통해 제조된 UF_6는 원심분리기 농축시설로 운반돼 농축된다. 이러한 점을 고려할 때, 우라늄 핵무기 관련 시설 중 핵심 시설은 UF_4를 UF_6로 변환시켜 UF_6을 생산하는 시설과 UF_6를 농축하는 원심분리기 농축시설이다.

이들 시설 위치를 살펴보면, UF_6 생산 공정 중 첫 번째 단계인 UF_4 제조는 5MWe

1) 중성자의 실제 증가비율을 나타내는 실효 증배율(effective multiplication factor)이 1보다 큰 상태로서, 이 상태에서는 시간이 지날수록 핵분열 반응의 수가 급격하게 증가한다.

원자로 핵연료에 사용되는 금속우라늄을 만드는 과정에도 필요하기 때문에, UF_4 제조 시설은 예전부터 영변에 있었다. 그러나 두 번째 공정인 "$UF_4 + F_2 \rightarrow UF_6$" 생산시설의 정확한 위치는 알려지지 않았다. UF_6는 치명적 독성 때문에 견고한 대형 운반용기에 주입한 후, 이들 용기를 트레일러에 실어 운반한다. 이러한 대형 포장물을 빈번하게 운반하다 보면, 촘촘한 대북 감시망을 운영하는 서방세계에 농축시설 위치가 즉각 탄로 날 것이기 때문에, 영변 및 비밀 우라늄 농축시설에 UF_6를 공급하는 UF_6 생산시설은 해당 농축시설이 위치한 부지나 인근에 있을 가능성이 크다.

2010년 11월 방북한 해커(Siegfried S. Hecker) 박사는 영변 우라늄 농축시설에 2,000여개의 원심분리기가 6개의 캐스케이드로 설치돼 있는 것을 목격했다고 공개한 바 있다. 헤커 박사는 원심분리기의 직경은 약 8인치, 높이는 6피트로서, P-2형 원심분리기인 것 같다고 추정하였다. P-2형 원심분리기는 파키스탄이 우라늄 농축 시 사용한 모델이다. 이 모델은 1970년대 초 독일에서 개발되었으며, 영국, 독일, 네덜란드 등 3개국이 공동 운영하는 우라늄 농축 회사인 URENCO에서 파키스탄 핵과학자 A. Q. 칸 박사가 훔친 것과 같은 모델이다. 헤커 박사는 이 농축시설의 연간 우라늄 농축 능력은 8,000kg-SWU/yr로서, 매년 저농축우라늄 2톤을 생산할 수 있으며 캐스케이드 구조 변경 시 HEU 40kg을 생산할 수 있다고 평가하였다(문주현, 2011). 이 우라늄 농축시설에서 생산된 HEU는 우라늄 핵무기 제조뿐만 아니라 IRT-2000 원자로 핵연료 제조에 사용되는 것으로 보인다.

한편 영변의 우라늄 농축시설 이외에 다른 곳에 비밀 농축시설이 있을 것이란 의혹이 꾸준히 제기돼 왔다. 실제 2차 미-북 정상회담 이후 영변 외에 서위리와 분강에 비공개 지하 우라늄 농축시설이 있다는 보도가 잇달았다(이재준, 2019; 정용수, 2019).

수소탄 관련 핵시설은 증폭핵분열탄(Boosted nuclear fission bomb)과 수소탄 제조에 사용하는 원료 물질을 생산하는 시설이다. 증폭핵분열탄은 핵분열폭탄[2]의 위력을 증가시키기 위해 핵융합 반응을 이용한 핵무기이다. 몇 그램의 중수소($^{2}_{1}H$ 또는 D라 표시)/삼중수소($^{3}_{1}H$ 또는 T라 표시)를 혼합가스 형태로 핵무기 코어[3] 중심에 장입한다. 주변 핵물질이 핵분열하여 D-T 핵융합 반응이 일어날 정도로 열이 발생하

2) 플루토늄 및 고농축우라늄같이 핵분열 물질을 사용해 만든 핵폭탄을 말한다.
3) 내폭형 핵무기 중심에 자리한 부품으로서, 핵물질(예, 플루토늄)과 중성자 발생기 등으로 구성된다.

게 되면 D-T 핵융합 반응이 일어나 대량의 중성자가 순식간에 발생하며 핵분열을 가속하여 폭발위력을 증폭시킨다. 이 때문에 더 작은 양의 핵물질로도 더 큰 위력을 낼 수 있어, 증폭핵분열탄은 미사일 탑재 가능한 핵탄두 생산을 위한 핵심 요소라 할 수 있다.

수소탄은 한쪽에 위치한 플루토늄 등 핵물질의 핵분열 반응을 일으켜 형상된 고온과 중성자를 이용해, 반대쪽에 위치한 핵융합 반응물질의 핵융합 반응을 일으켜 막대한 위력을 발생시키는 다단 구조의 핵폭탄이다. 통상 수소탄의 핵융합 반응물질로는 중수소-삼중수소, 중수소화리튬($^{6}LI^{2}H$)을 사용한다. 중수소화리튬은 핵분열 반응 시 방출되는 중성자에 조사되면서 중수소와 삼중수소를 발생시켜 핵융합반응을 일으킨다. 지금까지 기술된 내용에서 쉽게 유추할 수 있듯이, 증폭핵분열폭탄과 수소탄에 이용되는 주된 핵융합 반응은 다음과 같은 중수소-삼중수소 반응이다.

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + n(\text{중성자})$$

이처럼 증폭핵분열폭탄이나 수소탄 제조를 위해서는 중수소와 삼중수소가 필수적이다. 중수소 생산을 위해서는 중수(Heavy Water, D_2O)가 필요하다. 보통의 물속에는 5,000개의 경수 분자(H_2O) 중 1개 정도 중수 분자(D_2O)가 있다. 이 물속에 있는 중수를 암모니아/수소처리법이나 전기분해법 등을 이용하여 농축한다. 북한은 암모니아 합성공장(비료 공장)이나 대형 전기분해시설에서 중수를 확보하는 것으로 보인다. 한편 삼중수소는 자연에 극미량만 존재하기 때문에, 수소탄에 사용할 만큼의 양을 구하기 위해서는 별도 공정과 시설을 이용해 생산해야 한다. 이 때문에 중수소보다 삼중수소가 전략적 의미가 더 크다. 삼중수소는 다음 반응을 이용해 생산한다.

$$^{6}_{3}\mathrm{Li} + n \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{3}_{1}\mathrm{H}$$

위 반응에서 보는 것처럼, 삼중수소 생산을 위해서는 리튬-6과 이 리튬-6에 대량의 중성자를 조사할 수 있는 시설이 필요하다. 함경북도 수성과 강원도 노탄리 등에 리튬이 대량 매장돼 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 삼중수소 생산을 위해서는

리튬-6을 농축하여 사용한다. 원자로와 선형가속기 등을 이용하여 농축 리튬-6에 대량의 중성자를 조사할 수 있지만, 현실적으로 북한에서 대량의 중성자 조사할 수 있는 시설은 영변에 있는 IRT-2000 연구로와 5MWe 원자로밖에 없다.

IRT-2000 원자로는 舊소련에서 도입한 연구용 원자로로서 1965년에 처음 가동되었다. 최초 가동 시 이 원자로의 열출력은 2MWt였고, 핵연료는 10% 저농축우라늄이었다. 1974년 4MWt, 1986년 8MWt로 출력을 증강하면서, 80% 고농축우라늄을 핵연료로 사용하고 있다. 이 원자로 근처에는 중성자에 조사된 표적으로부터 삼중수소나 다른 동위원소를 추출해내는 동위원소 생산시설이 있다(Albright 외, 2016).

앞서 언급한 것처럼, 수소탄 관련 핵심 시설은 리튬-6 생산 및 농축시설, 중수생산시설, 중성자 조사시설 및 삼중수소 추출시설이다. 이 중 영변에 있는 것으로 알려진 시설은 중성자 조사시설에 해당하는 IRT-2000과 5MWe 원자로뿐이며, 나머지 시설의 위치는 비공개 상태이다. 다만 중성자 조사시설이 영변에 있고, 표적물질 운반의 안전성과 편의성 등을 고려할 때, 리튬-6 농축시설과 삼중수소 추출시설은 영변에 있을 가능성이 크다.

기타/공통 시설은 앞서 언급한 핵시설들 이외의 것들로서, 우라늄 광산 등과 같이 다른 유형의 핵시설들에 공통으로 원료를 공급해주는 시설이나 기타 핵시설들을 포괄적으로 구분한 것이다. 우라늄 광산과 정련시설도 북한의 전체 핵개발 프로그램을 지탱하는 핵심 시설이기는 하나, 〈표 1〉에서 보는 것처럼 우라늄 광산과 정련시설은 영변 이외의 지역에 위치하고 있어 본 논의에서는 제외하였다. 이들 시설을 제외하고 주목할 공통 시설은 UF_4 생산시설이다. UF_4는 플루토늄 생산을 위한 핵심 시설인 5MWe 원자로의 핵연료 제조와 우라늄 농축시설의 원료물질인 UF_6 제조에 꼭 필요하며, 그 생산시설이 영변에 있기 때문이다.

앞서 기술한 핵시설 중에는 미-북 제네바 합의(1994), 6자회담, 해커 박사 방북 등을 통해 위치와 규모 등이 밝혀진 시설(이하 '신고·공개 핵시설'이라 함)이 있는가 하면, 핵무기 연구개발 및 생산 과정상 존재할 것이라 예상하지만 그 위치와 규모 등이 외부로 공개되지 않은 시설(이하 '미신고·비공개 핵시설'이라 함)이 있다.

북한의 신고·공개 핵시설 목록은 〈표 1〉과 같다. 〈표 1〉에서 보는 것처럼, 영변에 소재한 북한의 플루토늄 핵무기 관련 시설은 대부분 공개돼 있다.

〈표 1〉 북한의 신고·공개 핵시설(2018.12월 기준)

프로그램*	시설명	소재	비고
플루토늄 핵무기 관련 시설	핵연료가공시설	평북 영변	북측이 IAEA에 신고('92)한 시설 5MWe원자로는 삼중수소 생산에 사용됐을 가능성 있음
	5MWe 원자로	평북 영변	
	50MWe 원자로	평북 영변	
	200MWe 원자로	평북 태천	
	방사화학실험실	평북 영변	
	폐기물 시설	평북 영변	
우라늄 핵무기 관련 시설	우라늄농축시설	평북 영변	헤커 박사 방북('10.5) 시 공개
	100MWt 실험용 경수로	평북 영변	북측이 헤커 박사 방북('10.5) 시 우라늄농축시설 건설 이유로 경수로 핵연료 공급을 언급함에 따라 우라늄 프로그램으로 구분
수소탄 관련 시설	IRT-2000 연구로	평북 영변	
기타/공통 시설	평산 우라늄 광산	황북 평산	북측이 IAEA에 신고('92)한 시설
	순천 우라늄 광산	평남 순천	
	평산 우라늄 정련시설	황북 평산	
	박천 우라늄 정련시설	황북 박천	
	UF_4 생산시설	평북 영변	
	교육용 미임계시설	평양 김일성대학	
	핵실험장	함북 길주군 풍계리	6차례 핵실험 장소
	1,000MWe 원자로	함남 신포 금호지구	제네바 합의에 따라 건설되다 중단

*출처(한국원자력통제기술원, 2018, p. 25)에 실린 핵시설을 시설 특성에 따라 저자가 분류한 것임.

반면 우라늄 핵무기 관련 시설은 헤커 박사 방북 시 공개된 영변 우라늄농축시설 외에는 그 위치나 규모가 알려지지 않았다. 수소탄 관련 시설의 위치도 비공개돼 있다. 2018년 12월 현재 북한의 미신고·비공개 핵시설 목록은 〈표 2〉와 같다.

〈표 2〉 북한의 미신고·비공개 핵시설(2018.12월 기준)

프로그램*	시설명	비고
우라늄 핵무기 관련 시설	우라늄 농축연구시설	
	미공개 우라늄 농축시설	
	원심분리기 및 관련 장비 제조시설	분산돼 있을 가능성 큼
	UF_6 생산시설	분산돼 있을 가능성 큼
수소탄 관련 시설	삼중수소 추출시설	영변에 있을 가능성 큼
	리튬-6 농축시설	영변에 있을 가능성 큼
기타/공통 시설	고폭 시험시설	분산돼 있을 가능성 큼
	핵무기 연구시설	분산돼 있을 가능성 큼
	핵무기 제조시설	
	핵무기 저장시설	분산돼 있을 가능성 큼

*출처(한국원자력통제기술원, 2018, p. 34)에 실린 핵시설을 시설 특성에 따라 저자가 분류한 것임.

Ⅲ. 북한의 영변 핵시설 폐기안 평가

1. 평가를 위한 기본 개념 이해하기[4)]

평가에 앞서 핵무기와 관련한 몇 가지 기본개념을 살펴보기로 하겠다. 첫 번째는 핵폭발 위력이다. 핵폭발 위력은 핵폭탄이 터질 때 방출되는 에너지의 양을 말하며, 통상 TNT 몇 킬로톤(kt) 또는 메가톤(Mt)과 같이 TNT 등가량으로 표현한다. 종종 에너지 단위인 칼로리(Calorie) 또는 주울(Joule, J)로도 표시하는데, TNT 1kt은 10^{12} 칼로리 또는 4.2 테라주울(4.2×10^{12}J)의 에너지에 해당한다. 따라서 20kt의 핵무기라고 하면, 한 번의 폭발로 84 테라주울(8.4×10^{13}J)의 에너지를 방출한다는

4) 문주현(2010)의 논문에 게재된 내용을 발췌하여 재정리하였다.

것을 의미한다. 플루토늄 핵종 하나가 핵분열하면, 평균 207MeV의 에너지를 방출한다. 1MeV는 1.6×10^{-13}J이므로, 플루토늄 1kg이 모두 핵분열하면, 약 83.6 테라주울(8.36×10^{13}J)의 에너지를 방출한다. 따라서 플루토늄 1kg이 완전히 핵분열하면, TNT 20kt의 에너지를 방출한다고 가정해도 무방하다.

두 번째는 핵무기의 가장 중요한 설계 특성이자 핵폭발 장치의 성능지표라 볼 수 있는 폭발효율(Explosion Efficiency)이다. 폭발효율은 핵무기에 장착된 핵물질 중 핵분열 반응에 참여하는 핵물질의 비(比)로 정의한다. 상당한 수의 원자핵이 핵분열하면 이로부터 발생하는 열에너지가 너무 커서, 겨우 몇 셰이크[5]만 흘러도 핵무기 코어가 핵분열 연쇄반응이 계속되기 어려울 만큼 팽창하여 폭발효율이 크게 떨어진다. 재래식 핵분열폭탄의 경우, 폭발효율의 실질적 한계치는 25%로 알려져 있다. 핵개발 국가들은 코어가 원래의 구조를 유지하는 시간을 연장하거나 핵분열 반응시간을 단축하는 등의 진보된 설계를 채택하여 폭발효율을 높이고 있다. 폭발효율을 높이면, 원하는 핵폭발 위력을 얻는데 필요한 핵물질의 양을 줄일 수 있다.

세 번째는 임계질량(Critical Mass)이다. 임계질량은 핵분열 연쇄반응 지속을 위해 필요한 최소한의 핵물질 양을 말한다. 어떤 핵물질의 임계질량은 그 물질의 핵적 특성(Nuclear Property), 밀도, 형상, 농축도 등에 따라 달라진다. 특히, 임계질량은 핵물질 밀도의 제곱에 반비례한다. 이 사실을 토대로, 내폭형 핵무기 설계에서는 고폭약을 폭발시켜 만들어진 충격파로 플루토늄을 압축하여 매우 짧은 시간 안에 미임계[6] 상태에서 초임계 상태로 변환시켜 핵폭발을 일으킨다. 이 압축력을 높이기 위해 다양한 설계개념을 채택하고 있다. 진보된 핵무기 설계에서는 2~3kg의 플루토늄으로도 충분한 핵폭발 위력을 발휘할 수 있는 것으로 알려져 있다.

2. 핵무기 수량 감축 효과 및 전략적 의미 평가

2차 미-북 정상회담에서 북한이 제안한 영변 핵시설 폐기안에 어떤 핵시설까지

5) 10^{-8}초에 해당하는 관습적 단위로서, 핵분열 반응 사건 사이의 평균 소요시간을 표현하는 데 주로 사용한다.

6) 중성자의 실제 증가비율을 나타내는 실효 증배율(effective multiplication factor)이 1보다 작은 상태로서, 이 상태에서는 시간이 지날수록 핵분열 반응의 수가 감소하여 핵분열 연쇄반응을 유지하기 어렵게 된다.

포함돼 있는지 밝혀지지 않았기 때문에, 본 논문에서는 앞서 구분한 핵시설 중 영변에 존재하거나 존재하고 있을 것으로 추정되는 시설들을 폐기한다고 했을 때, 미래 핵무기 수량 감축 효과를 정량적으로 평가하고, 정량적 평가가 어려운 핵시설의 폐기에 대해서는 비핵화 측면에서의 전략적 의미를 평가하였다.

1) 플루토늄 핵무기 관련 시설 폐기 효과

영변에는 플루토늄 생산과 직접적 연관이 있는 핵심 시설로 5MWe 원자로와 방사화학실험실(재처리시설)이 있다. 그런데 방사화학실험실은 5MWe 원자로 사용후핵연료를 재처리하여 플루토늄을 생산하는 시설이기는 하나, 플루토늄 생산량을 좌우하는 것은 5MWe 원자로이다. 즉, 5MWe 원자로에서 배출된 사용후핵연료 양에 따라, 추출 가능한 플루토늄의 양이 결정된다. 이 때문에 플루토늄 핵무기 관련 시설 폐기로 인한 핵물질(플루토늄) 생산 중단 효과는 5MWe 원자로 폐기에 의한 효과만을 고려해도 무방하므로, 본 절에서는 5MWe 원자로 폐기의 효과만을 평가하였다.

일반적으로 원자로에 장전된 핵연료 속에 얼마만큼의 플루토늄이 생성돼 있는가는 핵연료 연소도(Burnup)[7]에 좌우된다. 연소도는 원자로 가동 일수가 늘어날수록 커진다. 이 연소도가 높을수록 핵연료 내의 플루토늄 생성량은 증가하지만, 플루토늄 순도는 떨어진다. 여기서 플루토늄 순도가 떨어진다는 것은 플루토늄 동위원소 중 미숙한 핵폭발을 초래하여 불순물로 취급받는 플루토늄-240의 함량이 높아진다는 것을 의미한다. 통상 핵무기에 사용하는 플루토늄은 플루토늄-240 함량을 7% 이내로 제한한다. 이에 따라 원자로 가동 일수는 플루토늄 생성량과 순도가 최적화되는 시간을 구해 정한다.

과거 5MWe 원자로는 100% 출력으로 가동했을 때 연간 8kg 정도의 플루토늄을 생산할 수 있는 것으로 추정되었다. 가동된 지 30여 년이 지난 5MWe 원자로는 현재 시설이 노후화되어 제 기능을 수행하지 못하는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 현재는 연간 플루토늄 생산량이 3~4kg으로 축소된 것으로 추정하고 있다(신태복, 2017).

2차 세계대전 당시 일본 나가사키에 투하된 플루토늄 핵폭탄인 팻맨(Fat Man)에는

7) 핵연료가 원자로에 장전되어 인출될 때까지 원자로에 있으면서 중성자와 반응하여 만들어낸 에너지의 양을 말한다. 일반적으로 우라늄 단위 중량당 발생한 열출력 총량으로 나타내며, 단위로는 MWD/MTU(Mega Watt Day per Metric Ton Uranium) 또는 GWD/KgU을 사용한다.

플루토늄 6.2kg이 사용되었고, 폭발위력은 21kt TNT이었다. 플루토늄 6.2kg이 완전 핵분열된다고 가정했을 때 방출되는 폭발위력의 17% 수준이었다. 앞서 기술한 대로 팻맨 같은 순수 핵분열폭탄의 최대 폭발효율은 25%이다. 폭발효율을 17%~25%로 가정했을 경우, 20kt의 폭발위력이 발생하기 위해서는 4~6kg의 플루토늄이 필요하다. 핵폭탄의 폭발 렌즈와 뇌관 수 증가, 부양 코어(Levitated Core)와 비행판(Flying Plate) 채택 등 진보된 설계개념을 적용하면 폭발효율을 25% 내외까지 높일 수 있는 것으로 알려져 있다(문주현, 2010).

2019년 현재 북한은 수백 차례의 기폭시험과 6차례의 핵실험을 통해 획득한 데이터와 노하우를 기반으로 핵폭탄 설계를 대폭 개선했을 것이다. 따라서 북한은 팻맨보다 폭발효율이 크게 향상된 핵폭탄 설계를 이미 확보했다고 보는 게 타당하다. 북한의 핵분열폭탄 폭발효율이 25% 내외 수준까지 도달했다고 가정하면, 20kt급 핵무기 1기를 플루토늄 4kg 내외로 제작이 가능하다고 볼 수 있다. 따라서 플루토늄 핵무기 관련 핵심 시설인 5MWe 원자로와 방사화학실험실을 모두 폐기한다면, 연간 20kt급 플루토늄 핵무기 1기를 생산할 수 있는 핵물질 생산을 중단하는 효과가 있다고 평가할 수 있다.

5MWe 원자로 폐쇄는 플루토늄 생산 중단 효과 이외에 삼중수소 생산 수단 중 하나를 폐기하는 효과도 있다. 뒤에서 상술하겠지만, 삼중수소 생산을 위해서는 표적물질에 대량의 중성자를 조사해야만 하는데, 현실적으로 북한에 대량의 중성자를 공급할 수 있는 장치는 5MWe 원자로와 IRT-2000 원자로밖에 없기 때문이다.

2) 우라늄 핵무기 관련 핵시설 폐기 효과

영변에 위치하고 있는 것으로 알려진 우라늄 핵무기 관련 핵시설 중 핵심시설은 HEU을 생산해내는 원심분리기 농축시설이다.

2차 대전 때 일본 히로시마에 투하된 우라늄 핵폭탄인 리틀보이(Little Boy)에는 평균 농축도 80%인 HEU 64kg이 사용됐으며 핵폭발 위력은 13kt TNT이었다. 하지만 〈표 3〉에서 보듯이 우라늄-235 농축도를 높이고 진보된 핵폭탄 설계를 채택하면 우라늄 핵폭탄 제조에 필요한 임계질량을 줄일 수 있다. 즉, 농축도가 높을수록 핵무기 1개 제조에 필요한 HEU 양이 적어진다. 예를 들어 우라늄-235 농축도를 90%로 올리고, 핵폭탄 설계에 천연우라늄 반사체(10cm)를 적용하면 18.7kg, 베릴륨 반사체

(10cm)를 적용하면 14kg의 HEU만 있으면 핵폭발을 일으킬 수 있다(문주현 외, 2007). 우라늄 핵폭탄에 어떤 설계를 적용했느냐에 따라, 20kt급 핵무기 1기를 제조하는데 필요한 HEU(농축도 90%) 양이 달라지긴 하지만, 영변 우라늄 농축시설의 HEU 생산량 40kg은 20kt급 우라늄 핵폭탄 2~3기를 제조할 수 있는 양에 해당한다고 할 수 있다.

〈표 3〉 농축도 변화에 따른 우라늄 임계질량 변화[8)]

총질량(kg)/우라늄-235 함유량(kg) (밀도 = 18.9g/㎤)

농축도* (% 우라늄-235)	반사체		
	없음	천연 우라늄 (10 cm)	베릴륨 (10 cm)
93.5	48.0/44.5	18.4/17.2	14.1/13.5
90.0	53.8/48.4	20.8/18.7	15.5/14.0
80.0	68/54.4	26.5/21.2	19.3/15.4
70.0	86/60.2	33/23.1	24.1/16.9
60.0	120/72	45/27	32/19.2
50.0	170/85	65/33	45/23
40.0	250/100	100/40	70/28
30.0	440/132	190/57	130/39
20.0	800/160	370/74	245/49

출처: (문주현 외, 2007).

우라늄 핵무기 관련 핵심 시설 중 소재가 불분명한 UF_6 생산시설은 HEU를 직접 생산하는 것이 아니기에, 직접적인 핵무기 수량 감축 효과를 평가하기는 어렵다. 한편 영변에 UF_6 생산시설이 존재하는지는 알려지지 않았지만, UF_6 생산 원료물질인 UF_4 생산시설이 영변에 있고, 2010년 헤커 박사가 영변에서 2,000여개의 원심분리기가 설치된 농축시설을 목격한 점을 감안한다면, UF_6 생산시설도 영변에 존재한다고 보는 것이 당연한 추론이다. UF_6 생산 시설은 우라늄 농축을 위해 반드시 필요한 기체 상태의 UF_6를 만드는 곳이기 때문에, 이곳의 폐쇄는 우라늄 농축을 더 이상 하지

8) 문주현, 김신, 『또다른 핵의 세계』 p. 43.

않는다는 것을 추가 보증하는 것과 마찬가지라 할 수 있다.

한편 IRT-2000은 농축도 80%의 HEU를 핵연료로 사용하고 있다. 이 시설도 영변에 있는 점을 고려할 때, 영변 우라늄 농축시설에서 생산된 HEU를 이용해 IRT-2000 핵연료를 제조하고 있을 것이다. 따라서 영변 우라늄 농축시설을 폐쇄하면 IRT-2000에 핵연료 공급을 할 수 없게 된다. 이는 결국 IRT-2000을 이용해 생산 가능한 폴로늄-210과 삼중수소 등 핵무기 제조 및 고도화에 필요한 물질 생산도 중단된다는 것을 의미한다.

다만 관건은 우라늄 농축시설이 영변 이외의 다른 곳에도 존재하는가이다. 우라늄 농축시설이 다른 곳에 은닉돼 있다는 것은 공공연한 사실이다. 이번 2차 미-북 정상회담에서도 비밀 우라늄 농축시설이 논쟁거리가 되었었다. 앞서 언급한 대로 UF_6을 영변에서 생산해 비밀 우라늄 농축시설로 자주 운반하다 보면, 비밀 우라늄 농축시설 위치가 금방 탄로가 났을 것이다. 그렇기에 최근 언론 보도에서 언급된 서위리와 분강에 비밀 우라늄 농축시설이 있다는 것이 사실이면, 그 지역이나 인근에 또 다른 UF_4와 UF_6 생산시설이 있을 가능성이 크다. 이럴 경우, 영변에 있는 UF_6 생산시설과 우라늄 농축시설 폐기로 인한 HEU 생산 중단 효과는 반감될 수밖에 없다.

3) 수소탄 관련 핵시설 폐기

수소탄 관련 핵시설에는 핵물질을 직접 생산하는 시설은 포함돼 있지 않다. 영변에 있는지도 불확실하다. 따라서 해당 시설이 영변에 위치할 가능성과 함께 그 시설을 폐기했을 때 효과를 평가하는 것으로 대신하고자 한다.

수소탄 관련 핵심 시설 중 영변에 있을 가능성이 있는 시설은 삼중수소 생산시설, 즉 리튬-6 농축시설, 중성자 조사시설, 삼중수소 추출시설이다. 중성자 조사시설인 IRT-2000과 5MWe 원자로가 영변에 있으므로, 중성자 조사 과정의 선·후행 공정인 표적 생산과 삼중수소 추출을 위한 시설도 운반의 안전성과 편의성을 고려할 때 영변에 있을 가능성이 크다.

2017년 6월 27일 한국학술연구원 주최로 서울 웨스틴조선호텔에서 열린 '제14차 코리아포럼-북핵 문제 국제학술회의'에서 "북한은 동위원소 리튬-6과 원자로 중 하나를 이용해 삼중수소를 생산하고 있다. 영변 핵연구단지에 새롭게 지어지고 있는 시설

중 두 곳이 삼중수소 추출 시설로 의심되는데, 한 곳은 IRT-2000 원자로 근처 동위원소 생산 시설 인근에, 다른 한 곳은 핵연료가공 시설이 있는 남동부 지점에 건설 중인 것으로 보인다."라는 헤커 교수의 발언(유지혜, 2017)도 이를 뒷받침하고 있다.

삼중수소-중수소는 증폭핵분열폭탄과 수소탄을 제조하는데 핵심적 역할을 한다. 이뿐만 아니라, 핵분열폭탄의 중성자 공급 물질로도 사용될 수 있다. 핵분열 연쇄반응을 일으키기 위해서는 미임계 상태의 핵물질이 초임계 덩어리로 결합되는 시점과 거의 동시에 대량의 중성자를 공급해줘야 한다. 최소 1백만 개의 중성자를 거의 동시에 공급할 수 있어야 한다. 초임계 상태에 머무는 기간이 매우 짧은 내폭형 핵무기에서는 핵물질 상태 변환시점과 중성자 공급시점의 시차가 1백만의 1초 이내가 되도록 해야 한다.

초창기 핵무기 설계에서는 중성자 공급을 위해 폴로늄-210/베릴륨 동위원소를 사용한 중성자 발생기를 사용했다. 폴로늄-210은 비스무트-209에 중성자를 조사하여 제조한다. 이를 위해서는 원자로 같이 대량의 중성자 공급이 가능한 시설이 필요하다. 북한의 경우, IRT-2000과 동위원소 생산시설에서 폴로늄-210을 생산했을 가능성이 크다.

폴로늄-210의 반감기(Half-time)[9]는 138.4일이다. 이는 핵무기 관점에서 상반된 두 가지 의미가 있다. 하나는 장점으로서, 폴로늄-210은 반감기가 짧아서 강력한 α입자를 방출하는 핵반응이 빨리 일어나므로 핵무기에 소량(핵무기에 방사능 기준으로 약 50 mCi의 폴로늄-210이 사용되는데, 이 양은 겨우 11mg에 불과하다)만 사용해도 된다는 것이다. 다른 하나는 단점으로서, 폴로늄-210은 가만히 나둬도 방사성 붕괴가 되면서 빨리 없어지므로, 중성자 발생기의 중성자 공급능력을 유지하기 위해서는 폴로늄-210을 자주 보충해줘야 한다는 것이다. 이 재래식 중성자 발생기의 결정적 단점은 핵분열 연쇄반응 개시 시점을 정밀하게 제어하기가 힘들다는 것이다.

이 때문에 대량의 중성자를 제때 공급하기 위한 진보된 설계가 개발되어 왔다. 그 중 하나가 외부 중성자 발생기(External Neutron Initiators, ENI)이다. 외부 중성자 발생기는 중수소와 삼중수소의 핵융합 반응을 통해 고에너지 중성자를 발생시

9) 어떤 방사성 핵종의 수(數)가 방사성 붕괴에 의해, 원래 수의 반으로 줄어드는 데 걸리는 시간으로, 모든 방사성 핵종은 고유의 반감기를 가지고 있다. 방사성 핵종의 수는 음의 지수함수($e^{-\frac{\ln 2}{T}t}$, 여기서, t = 시간, T = 반감기)에 따라 감소한다.

키는 소형의 선형 입자가속기를 포함하고 있다. 이 입자가속기를 '펄스 중성자 튜브'라고 한다. 이 튜브는 길이가 수 cm인 진공 튜브인데, 한쪽 끝에는 이온원(ion source)이, 반대편에는 이온 표적이 위치하고 있다. 표적에는 수소 동위원소 중 하나가 들어있다. 이온원에 전류가 공급되면 전기방전이 일어나 수소 동위원소 이온이 생성된다. 이 이온들은 고전압에 의해 표적 쪽으로 100~170keV까지 가속된다. 이온이 표적과 충돌하면 D-T 반응에 의해 14.1 MeV의 중성자가 방출된다. 또 다른 하나는 삼중수소/중수소 내부 중성자 발생기인데, 이는 증폭핵분열폭탄에 사용되는 방법과 같다. 내폭 중심 근처의 고온과 고밀도를 이용하여 D-T 핵융합반응을 일으키는 것이다. 코어 중심에 소량의 수소 동위원소를 장입하면 되는 것이기 때문에, 이 설계는 ENI보다 물리적으로 더 단순하고 소형이다.

이처럼 삼중수소는 증폭핵분열탄, 수소탄 제조뿐만 아니라 핵분열 폭탄 고도화하는데 핵심적 역할을 하는 물질이다. 그런데 삼중수소도 반감기가 12.3년인 방사성동위원소이다. 이 때문에, 자연 상태 그대로 놔둬도 시간이 지나면서 방사성 붕괴에 의해 그 수가 감소한다. 삼중수소를 제조한 후 10년이 지나면 원래 양의 57%, 12.3년이면 50%, 15년이면 43%, 20년이면 32%만 남아있게 된다.

삼중수소 생산시설 폐쇄는 핵물질(플루토늄, HEU) 생산을 중단하는 직접적인 효과는 없지만, 비핵화 측면에서 상당한 의미를 지닌다고 볼 수 있다. 왜냐하면, 삼중수소를 중성자 발생기 원료물질로 사용하는 핵분열폭탄, 증폭핵분열폭탄, 수소탄에 영향을 미치기 때문이다. 삼중수소를 이용하는 중성자 발생기를 장착한 핵분열폭탄의 경우, 시간이 지나면서 삼중수소의 양이 줄어들면, 외부 중성자 발생기의 중성자 발생 능력과 핵폭발 촉발 성능이 저하되면서 핵무기로서의 전략적 가치가 떨어진다. 증폭핵분열폭탄이나 수소탄은 중수소-삼중수소 핵융합 반응을 이용하기 때문에, 삼중수소를 주기적으로 보충해주지 못하면, 삼중수소-중수소 핵융합 반응이 충분히 일어나지 않아 핵무기 위력도 떨어지고, 나아가 핵미사일 고도화를 더 이상 진행할 수 없게 된다.

한편 IRT-2000 원자로 폐쇄는 삼중수소 생산 수단을 제거한다는 측면에서 의미도 있지만, 재래식 폴로늄-210/베릴륨 중성자 발생기에 사용되는 폴로늄-210의 생산 수단을 제거하는 의미도 함께 갖고 있다. 폴로늄-210은 반감기가 삼중수소보다 짧아서 삼중수소보다 훨씬 더 자주 보충을 해줘야 중성자 발생기로서의 성능을

유지할 수 있다. 이 때문에 IRT-2000을 폐쇄하면, 재래식 폴로늄-210/베릴륨 중성자 발생기를 장착하고 있는 핵분열폭탄도 핵무기로서의 전략적 가치가 떨어지게 된다.

결론적으로 북한이 영변에 있을 것으로 추정되는 삼중수소 생산시설(IRT-2000 원자로, Li-6 농축시설, 삼중수소 추출시설)을 폐쇄하겠다고 한다면, 이는 중장기적으로 ① 중성자 발생기 성능 저하로 북한이 기존에 보유하고 있는 핵분열폭탄의 핵무기로서의 전략적 가치 저하, ② 미래의 증폭핵분열탄과 핵융합폭탄 등 수소탄 제조 중단, ③ 미사일에 탑재하기 위한 핵탄두 소형화, 고도화 과정 중단 등의 의미를 내포하고 있다고 볼 수 있다.

4) 기타/공통 핵시설 폐기

기타/공통 핵시설 중 영변에 위치하고 있는 것으로 알려진 핵심시설은 플루토늄과 HEU 생산을 위한 공통 원료물질인 UF_4를 생산하는 시설이다. UF_4 생산시설을 폐기하면, 더 이상 5MWe 원자로 핵연료를 제조할 수 없어 5MWe 원자로를 가동할 수 없게 되면서 결국 플루토늄도 생산할 수 없다. 또한 우라늄 농축을 위한 원료물질(UF_6)도 제조할 수 없게 돼 HEU 생산도 어렵다. 따라서 UF_4 생산시설 폐기는 북한의 미래의 핵물질 생산능력을 완전히 제거하는 것이라 볼 수 있어, 비핵화 측면에서 상당한 의미를 지닌다고 할 수 있다.

하지만 관건은 UF_4 생산시설이 영변 이외 다른 곳에도 존재하는가이다. 영변의 UF_4 생산시설에서 생산된 UF_4나 UF_6를 비밀 우라늄 농축시설로 운반하는 것은 우라늄 농축시설의 위치를 드러낼 위험성이 있었기 때문에, 비밀 우라늄 농축시설이 위치한 지역으로 거론된 서위리와 분강 지역에 UF_4 생산시설이 있을 가능성이 있다. 이 경우 영변 UF_4 생산시설 폐기 효과와 의미는 축소될 수밖에 없다. 향후 비핵화 과정에서 북한의 미래 핵물질 생산능력 완전히 제거하기 위해서는 북한에 있는 모든 UF_4 생산시설을 찾아 폐쇄할 필요가 있다.

Ⅳ. 논의

미국과 북한이 생각하는 비핵화 범위에 큰 이견 때문에 2차 미-북 정상회담이 양국간 아무 합의 없이 결렬되었다. 2차 미-북 정상회담을 통해 드러난 양국간 인식의 간극을 어떻게 좁히느냐가 향후 북한 비핵화 협상의 지속 여부를 결정하는 열쇠가 될 것이다. 비핵화 로드맵을 수립하는 과정 중 북한 스스로 제안한 영변 핵시설 폐기안도 비핵화 초기 조치 패키지로 다루어질 가능성이 있다.

북한이 제안한 영변 핵시설 폐기안에 담긴 구체적 내용이 밝혀지지 않았기 때문에, 이에 대한 상세 평가는 쉽지 않다. 그렇지만 북핵 위협의 직접적 당사자인 우리로서는 통상적인 핵개발 과정에 대한 과학적 지식과 그간 제한적이나마 공개된 정보를 토대로라도 영변 핵시설 폐기안에 대한 가치 평가, 즉, 핵무기 수량 감축 측면에서 어느 정도 효과가 있는지 평가를 해봐야 한다. 미-북 양국간 입장차를 보다 분명하게 파악하고 그 차이를 줄여나가는 중재 노력을 해나가기 위해서는 영변 핵시설 폐기안이 핵무기 수량 감축 측면에서 어느 정도 효과가 있기에 미국이 수용하지 못했는지, 아니면 북한 주장대로 비핵화 효과가 큰 것인지를 나름 판단해야 하기 때문이다.

이에 본 논문에서는 북한의 영변 핵시설 폐기안을 가능한 한 정량적 측면에서 평가하고자 하였다. 아직 북한의 폐기안에 어떤 핵시설까지 포함돼 있는지 밝혀지지 않았기 때문에, 본 논문에서는 영변에 존재하거나 존재하고 있을 것으로 추정되는 시설들을 △플루토늄 핵무기 관련 시설 △우라늄 핵무기 관련 시설 △수소탄 관련 시설 △기타/공통 핵시설그룹으로 구분하고, 각 그룹에 대해 통상적인 핵개발 과정에서 존재해야 하는 시설 중 비공개된 시설이 영변에 존재하고 있을 가능성과, 각 그룹에 속한 공개·비공개 시설 중 핵심 시설이 폐기됐을 때 미래 핵무기 수량 감축 효과를 평가하였다. 정량적 평가가 어려운 시설들에 대해서는 폐기 시 북한 비핵화 측면에서 어떤 전략적 의미가 있는지 정성적으로 평가하였다.

영변에는 플루토늄 생산과 직접적 연관이 있는 핵심 시설로 5MWe 원자로와 방사화학실험실(재처리시설)이 있다. 이들 시설을 폐기하면, 연간 20kt급 핵무기 1기 제조가 가능한 플루토늄 생산을 중단하는 효과가 있는 것으로 평가되었다. 5MWe 원자로는 삼중수소 생산을 위한 대량의 중성자 공급시설로 사용할 수 있어서 5MWe 원자로 폐기는 삼중수소 생산 수단 중 하나를 제거하는 전략적 의미가 있다고 볼 수 있다.

영변에는 우라늄 핵무기 관련 시설로 연간 8,000kg-SWU/yr 우라늄 농축시설이 있다. 이 농축시설에 원료물질을 공급하는 UF_6 생산시설의 위치는 알려지지 않았지만, UF_6 생산에 필요한 UF_4 생산시설과 우라늄 농축시설이 영변에 있고 원료물질 운반의 안전성과 편의성을 고려할 때, 영변에 있을 가능성이 크다. 영변 우라늄 농축시설 폐쇄는 매년 20kt 급 HEU 핵무기 2~3기 제조가 가능한 핵물질 생산 중단 효과를 가지는 것으로 평가되었다. 또한 영변에 같이 위치한 IRT-2000에 HEU 핵연료를 공급할 수 없게 돼, IRT-2000을 이용해 생산 가능한 폴로늄-210과 삼중수소 생산을 중단하는 효과도 있다. 이렇게 되면, 핵폭발을 촉발시키는데 필요한 중성자 발생기의 제작 및 유지보수가 어렵게 돼, 기존 핵무기의 전략적 가치가 시간이 지나면서 자연스레 감소하게 된다. UF_6 생산시설을 우라늄 농축시설과 함께 폐쇄하는 것은 "우라늄 농축 원료물질 생산 중단 → HEU 생산 중단 → HEU를 이용한 다양한 핵무기 개발 중단 및 IRT-2000 원자로 중단"을 의미하므로, 우라늄 핵무기 프로그램을 더 이상 하지 않겠다는 것을 추가 보증하는 것이라 할 수 있다. 다만, 우라늄 농축시설이 영변 이외 다른 곳에 존재할 가능성이 큰데, 이럴 경우, 영변에 있는 UF_6 생산시설과 우라늄 농축시설 폐기로 인한 HEU 생산 중단 효과는 반감될 수밖에 없다.

수소탄 관련 핵심 시설 중 영변에 있을 가능성이 있는 시설은 삼중수소 생산을 위한 리튬-6 농축시설과 삼중수소 추출시설이며, 중성자 조사시설인 IRT-2000나 5MWe 원자로는 영변에 있다. 이들 시설이 폐쇄된다면 폴로늄-210과 삼중수소 등 핵무기 제조와 고도화에 필요한 핵심 전략물질 생산 중단을 의미하기 때문에, 북한 비핵화 측면에서 상당한 의미를 갖는 것으로 보인다. 폴로늄-210은 재래식 핵무기의 폴로늄-210/베릴륨 중성자 발생기에 사용되며, 짧은 반감기 때문에 자주 보충을 해줘야 한다. 폴로늄-210 생산이 중단되면, 폴로늄-210 보충이 어려워 중성자 발생기 성능이 떨어져 핵폭발을 촉발시키기 어렵게 된다. 이 때문에 폴로늄-210 보충이 되지 않는다면, 재래식 폴로늄-210/베릴륨 중성자 발생기를 장착하고 있는 핵분열폭탄은 핵무기로서의 전략적 가치가 떨어진다. 삼중수소는 핵분열폭탄, 증폭핵분열폭탄 및 수소탄에 공통으로 사용될 수 있는 물질이며, 폴로늄-210보다 빈도가 떨어지긴 하지만 핵무기 성능 유지를 위해 주기적으로 보충을 해줘야 한다. 이 때문에 삼중수소 생산 중단은 중장기적으로 ① 중성자 발생기 성능 저하로 북한이 기존에 보유하고 있는 핵분열폭탄의 핵무기로서의 전략적 가치 저하, ② 향후 증폭핵분열폭탄과 핵융

합폭탄 등 수소탄 제작 중단, ③ 미사일에 탑재하기 위한 핵탄두 소형화, 고도화 과정 중단을 의미한다고 볼 수 있다.

기타/공통 핵시설 중 영변에 있는 것으로 알려진 핵심시설은 플루토늄과 HEU 생산을 위한 공통 원료물질이라 할 수 있는 UF_4 생산시설이다. UF_4 생산시설을 폐기하면, 플루토늄과 HEU 생산을 동시에 중단시키는 효과가 있다. 하지만 영변 이외에 다른 곳에 UF_4 생산시설이 있다면, 그 효과는 반감될 수밖에 없다.

요약하면, 영변의 핵심 핵시설을 폐기한다면, 북한의 미래 핵물질 생산능력을 제거 측면에서 20kt급 핵무기 3~4기를 제조할 수 있는 핵물질(플루토늄과 HEU) 생산을 중단하는 효과가 있는 것으로 평가되었다. 기존에 보유하고 있는 핵무기의 경우, 즉각적으로 감축 또는 제거하는 효과는 없지만, 중장기적으로 볼 때, 폴로늄-210과 삼중수소 등 핵무기에 필수적으로 들어가는 물질 생산이 중단되어 핵무기의 핵심 부품 교체가 어려워져 핵무기 성능을 제대로 유지할 수 없게 되면서 핵무기로서의 전략적 가치가 떨어지는 것으로 평가되었다. 다만, 북한이 보유한 기존 핵무기 설계, 제조 시점, 수량 등이 정확히 알려지지 않아서 이들 핵무기 성능의 자연 저하에 따른 실질적으로 폐기되는 핵무기의 수량과 그 시점은 추정하기가 어렵다.

본 논문에서 평가한 결과, 북한 비핵화 측면에서 상당한 의미를 지니는 영변의 핵심 핵시설은 5MWe원자로, 방사화학실험실, 우라늄 농축시설, UF_6 생산시설, IRT-2000원자로, Li-6 농축시설, 삼중수소 추출시설, UF_4 생산시설인 것으로 확인되었다. 따라서 2차 미-북 정상회담에서 북한이 제안한 영변 핵시설 폐기안에 이들 핵심 시설 중 어디까지가 포함됐는지를 확인한다면, 북한의 비핵화 의지와 진정성을 개략적으로나마 가늠해 볼 수 있을 것이다.

본 논문의 평가 결과가 우리 나름의 북한 비핵화 방안을 만들어나가는데 기여할 수 있을 것으로 판단한다. 향후 북한 비핵화 협상은 북한의 비핵화 의지와 진정성에 대한 미국의 의구심이 해소되지 않는 한 지금의 교착상태를 벗어나기 쉽지 않다. 또 완전한 신고와 先핵폐기를 할 경우, 일시에 무장해제당할 수도 있다는 북한의 우려도 마냥 무시한 채 강행할 수도 없다. 그렇기에 우리나라는 양국 입장을 고려해, 북한의 기존 핵능력(핵무기와 핵물질) 수준은 당분간 유지하여 북한의 우려를 완화하고, 북한의 미래 핵능력과 기존의 핵능력을 일거에 사실상 무력화시켜 미국의 우려를 해소하는 방안을 고려해 볼 필요가 있다. 이를 위한 구체적 방안으로서, 비핵화 초기

단계에서 영변의 모든 핵심 핵시설 – 앞 단락에서 제시한 핵심 핵시설 -을 일시에 영구 불능화시킨 후 양국이 합의한 기한 내에 기존의 핵무기와 다른 핵시설들을 순차적으로 폐기하면서, 비핵화 조치 이행시마다 적절한 상응 조치를 취하는 방안을 검토해 볼 수 있을 것이다.

투 고 일: 2019.05.04.
심사완료일: 2019.05.20.
게 재 일: 2019.05.30.

참고문헌

김도균. 2019. “정경두 국방장관 “북한 핵·미사일 관련 모든 활동, 한미당국 이미 파악.”『오마이뉴스』. 3월 20일.

김지은 외. 2019. “트럼프가 밝힌 북미 정상회담 결렬 이유, 북한 모든 제재 해제 원해.”『한겨레』. 2월 28일.

문주현 외. 2007.『또다른 핵의 세계』. 제주: 열림문화.

문주현. 2010. “핵실험을 통해 본 북한의 핵능력.”『통일문제연구』. 제53호: 41-58.

문주현, 2011. “북한 우라늄농축프로그램의 기술적 타당성 및 잠재적 위험 평가.”『북한학연구』. 제7권, 제1호: 137-160.

박희준. 2019. “핵 전문가들 “영변 없이도 핵무기 연간 2~3개 제조 가능…영변 비중은 50% 수준.”『글로벌이코노믹』. 3월 5일.

신태복. 2017. “북한 핵능력 고도화에 대응하기 위한 바람직한 국방개혁 방안 연구.” The Institute for Unification Education.

유지혜. 2017. “헤커 “北, 수소폭탄에 필요한 삼중수소 생산능력 확보”.”『중앙일보』. 6월 27일.

이재준. 2019. ““하노이 북미회담, 북한 '비밀 핵시설' 존재 인정 안해 결렬” 아사히.”『뉴시스』. 3월 18일.

정용수. 2019. “미국서 찾아내 북한이 놀란 곳은 분강.”『중앙일보』. 3월 5일.

한국원자력통제기술원. 2019.『2018 북핵 총서』KINAC/GP-001/2019.

Albright D. and Vergantini Serena Kelleher. 2016. “North Korea’s IRT Reactor: Has it Restarted? Is it Safe?.” Institute for Science and International Security Imagery Brief Report. https://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/ IRT_Reactor_ March_9_2016_ FINAL.pdf (검색일: 2019년 4월 23일).

Samore, Gary. 2019. “How Significant is the Dismantlement of Yongbyon?.” https://www.38north.org/2019/03/gsamore031119 (검색일: 2019년 4월 23일).

Evaluation of North Korea's Proposal for Dismantling of the Yongbyon Nuclear Facilities in Terms of Reduction in its Nuclear Weapon Inventory

Joo Hyun Moon

This paper evaluates the proposal by North Korea to dismantle nuclear facilities at Yongbyun Scientific Research Center, suggested at the 2019 United States-North Korea Hanoi Summit. For evaluation, this paper classifies the nuclear facilities, which have existed or have been presumed to exist at there, into the four groups: plutonium weapon-related facilities; uranium weapon-related facilities; hydrogen weapon-related facilities; and other/common facilities since North Korea has not yet specified exactly which facilities in Yongbyon would be dismantled. This paper evaluates the dismantling of the core nuclear facilities in each facility group in terms of the expected reduction in the future North Korea's nuclear weapon inventory and strategic meaning. Facilities with difficulty in quantitative assessment are qualitatively evaluated for their strategic significance in North Korea's denuclearization. The evaluation results show that dismantling of the core nuclear facilities, which include 5MWe research reactor, radiochemistry laboratory, uranium enrichment facility, UF_6 production facility, IRT-2000 research reactor, Li-6 enrichment facility, tritium extraction facility, and UF_4 production facility could cease North Korea's future production of 3~4 nuclear weapons with yield of 20kt TNT. In addition, from the mid- and long-term viewpoints, it could depreciate the strategic values of the North Korea's existing nuclear weapons due to disabling their refurbishment.

Keywords: U.S.-North Korea Summit, Proposal to Dismantle Yongbyun Nuclear Facilities, Plutonium, High Enriched Uranium, Tritium