



Korea Institute for National Unification

2013년 북한 핵프로그램 및 능력 평가

김동수·안진수·이동훈·전은주

NORTH KOREA STRATEGY

Korea Institute for National Unification

2013년 북한 핵프로그램 및 능력 평가

김동수·안진수·이동훈·전은주

2013년 북한 핵프로그램 및 능력 평가

인 쇄	2013년
발 행	2013년
발 행 처	통일연구원
발 행 인	통일연구원장
편 집 인	통일정책연구센터
등 록	제2-02361호 (97.4.23)
주 소	(142-728) 서울시 강북구 4.19로 123(수유동) 통일연구원
전 화	(대표) 900-4300 (직통) 901-2523 (팩시밀리) 901-2544
홈페이지	http://www.kinu.or.kr
기획디자인	아미고디자인 (02-517-5043)
인 쇄 처	아미고디자인 (http://www.amigodesign.co.kr)
I S B N	978-89-8479-758-1 93340
가 격	비매품

© 통일연구원, 2013

통일연구원에서 발간한 간행물은 전국 대형서점에서 구입하실 수 있습니다.
(구입문의) 정부간행물판매센터 • 매장 : 734-6818 • 사무실 : 394-0337

2013년 북한 핵프로그램 및 능력 평가

본 보고서에 수록된 내용은 집필자의 개인적인 견해이며,
당 연구원의 공식적인 의견을 반영하는 것이 아님을 밝힙니다.

목차

Contents

요 약	vii
I. 서론	1
II. 북핵 프로그램을 둘러싼 국제 정세	7
1. 국제 사회 동향	9
2. 북핵 프로그램 주요 경과	10
III. 북핵 주요 시설 현황	19
1. 영변 핵시설 불능화 조치	23
2. 5MWe 원자로	25
3. 방사화학실험실(재처리시설)	33
4. 우리늄 농축시설	34
5. 경수로 현황	44
IV. 북한 핵실험의 포괄적 평가	57
1. 북한 핵실험 주요 경과	59
2. 북한 제3차 핵실험의 기술적 평가	62
V. 북한 핵능력 평가 및 전망	77
1. 북한의 무기급 핵물질 보유량 추산	79
2. 북한의 핵탄두 수 추산 및 실전배치 가능성 전망	82
3. 북한의 추가 핵실험 가능성 전망	85

VI. 결론	89
참고문헌	97
부록 I. 기체원심분리법 우라늄 농축기술 개요	101
부록 II. 북한의 경수로 건설과 관련된 기술적 사항	116
부록 III. 핵실험 개요 및 핵무기 특성	122
최근 발간자료 안내	137

표목차 Table

〈표 II-1〉 IAEA에 신고한 북한 핵시설(1992년 5월 기준)	12
〈표 II-2〉 북핵 위기 관련 주요 일지	16
〈표 III-1〉 북한의 주요 확인 핵시설	21
〈표 III-2〉 영변 핵시설에 대한 불능화 내용 요약(2009년 4월 기준)	24
〈표 III-3〉 우라늄 농축도와 감손우라늄 농도에 따른 농축작업 필요량의 변화	44
〈표 III-4〉 경수로 건설 현장 위성사진(2009.9~2012.8)	47
〈표 III-5〉 발전용 경수로 건설에 필요한 기술 분류와 북한의 능력 추정 ...	50
〈표 III-6〉 여러 나라의 경수로 건설 사례	52
〈표 IV-1〉 북한 제2차 핵실험 규모 및 위치 추정	61
〈표 IV-2〉 북한 제1, 2차 핵실험의 핵폭발 규모 추정	61
〈표 IV-3〉 북한 제3차 핵실험 탐지 결과 요약	63
〈표 IV-4〉 다양한 지진규모-폭발력 경험 관계식	65
〈표 IV-5〉 지진 규모 및 경험식에 의한 제3차 핵실험 폭발 규모 추정	65
〈표 IV-6〉 핵실험 이후 기간별 핵종	69
〈표 IV-7〉 제논(Xe) 동위원소의 최소 탐지농도(MDC)	70
〈표 IV-8〉 국내 방사성 핵종 탐지 결과	70
〈표 IV-9〉 핵무기 위력과 암석매질에 따른 최소 비례심도와 안전심도	75
〈표 IV-10〉 화강암반지역에서의 폭발위력에 따른 안전심도	75
〈표 V-1〉 북한의 우라늄 농축 능력과 고농축 우라늄 보유량 추산표	81
〈표 V-2〉 북한의 실전 배치 가능한 핵무기의 수 추산	84

그림목차

Figure

〈그림 Ⅲ-1〉 북한의 주요 핵시설 위치	22
〈그림 Ⅲ-2〉 영변 핵시설 전경	23
〈그림 Ⅲ-3〉 흑연 감속 가스 냉각로	26
〈그림 Ⅲ-4〉 5MWe 원자로 전경	26
〈그림 Ⅲ-5〉 38North에서 공개한 위성사진(2013.8.31)	27
〈그림 Ⅲ-6〉 5MWe 원자로 재가동으로 추정되는 온배수 방출 위성영상	29
〈그림 Ⅲ-7〉 5MWe용 금속 핵연료봉(좌) 및 50MWe용 금속 핵연료봉(우)	32
〈그림 Ⅲ-8〉 재처리 시설의 장비 제거 및 보관	37
〈그림 Ⅲ-9〉 영변 농축시설의 확장 추정 위성 영상(ISIS)	38
〈그림 Ⅲ-10〉 2006년 9월 김정일의 구성 기계공작공장 방문 사진	40
〈그림 Ⅲ-11〉 2009년 12월 김정일의 강계 트랙터종합공장 방문시 공개된 사진	41
〈그림 Ⅲ-12〉 2013년 6월 강계 공장에 방문중인 김정은	42
〈그림 Ⅲ-13〉 북한 TV 방송을 통해 공개된 영상	43
〈그림 Ⅳ-1〉 기술력에 따른 폭발력과 플루토늄 및 고농축 우라늄 필요량	67
〈그림 Ⅳ-2〉 유엔 산하 CTBTO 운용 핵종 탐지 관측소	71
〈그림 Ⅳ-3〉 풍계리 핵실험장 개요	73
〈그림 Ⅳ-4〉 북한 제2차 핵실험 장소의 낚시바늘형 갱도 구조(추정)	76
〈그림 Ⅴ-1〉 북한 풍계리 핵실험장 갱도 비교사진(좌측 8월, 우측 9월)	85

요약



본 연구는 북한의 핵프로그램과 핵능력에 대한 객관적인 평가를 목적으로 하고 있다. 최근의 동향을 중심으로 살펴본 결과 북한은 핵프로그램의 고도화·정밀화·다양화를 추구하고 있는 것으로 드러났다. 그 주요내용을 들여다 보면 첫째, 북한은 2007년 2·13 합의에 따라 폐쇄 조치되었던 5MWe 원자로의 재가동을 시도하고 있는 것으로 보인다. 만약 원자로가 재가동된다면 생산된 플루토늄을 무기화하기 위해서는 최소 2년 6개월이 시간이 걸릴 것으로 추정된다. 둘째, 최근 북한은 우라늄 농축시설을 확장하고 있는 것으로 관측된다. 우라늄 농축시설의 원심분리기가 설치되어 있는 건물이 기존 크기의 2배정도 수준으로 확장된 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 원심분리기의 개수가 2,000개에서 4,000개로 늘어났다고 추정한다면 이는 북한의 우라늄 농축 능력이 기존의 2배로 확대되었다는 것으로 볼 수 있다. 셋째, 북한은 2009년 영변에 100MWh급 실험용 경수로 건설에 착수하여 2012년 가동을 목표로 사업을 추진해 왔으나 불분명한 이유로 아직까지 완성되지 못한 상태이다. 만약 경수로가 완공된다면 연간 약 15kg의 원자로급 플루토늄을 생산할 수 있을 것으로 전망된다.

본 연구에서는 북한이 실시한 세 차례의 핵실험에 대해서도 포괄적으로 평가를 진행하였는데, 그 결과 제3차 핵실험이 제2차 핵실험에 비하여 2배 이상의 규모인 것으로 판정되었다. 사용한 핵물질에 관해서는 플루토늄인지 우라늄인지 확실하지 않지만, 플루토늄탄이었을 경우 사용된 플루토늄은 3kg 이하, 우라늄탄이었을 경우 10kg 이상의 고농축 우라늄이 사용되었을 것으로 추정된다. 아울러 풍계리 핵실험장에 관해서도 최근 동향을 중심으로 분석하였는데 제3차 핵실험이 이루어졌던 것으로 추정되는 남쪽 갱도는 제1차 핵실험에 사용되었던 갱도에 비하여 안정성이 크게 향상된 것으로 판단된다.

마지막으로 본 연구에서는 북한의 핵능력에 대한 종합적 평가를하고자 하였다. 북한이 현재까지 5MWe급 영변 원자로를 이용하여 생산·추출한 플루토늄량은 $40 \pm 5\text{kg}$ 정도로 추정되고, 그동안 세 번의 핵실험에서 9~12kg의 플루토늄을 사용했다고 가정하면 북한이 현재 보유한 플루토늄량은 $30 \pm 5\text{kg}$ 정도가 될 것으로 추산된다. 이것을 충분히 활용한다면 플루토늄을 이용한 핵무기의 숫자는 6~7개 정도일 것으로 추정된다. 게다가 5MWe 영변 원자로가 정상적으로 가동된다면 매년 2~3개씩 증가하게 될 것으로 예상된다. 또한 고농축 우라늄을 이용하여 매년 추가로 최소 6개의 핵탄두를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

결론적으로 본 연구는 북한의 핵능력이 날이 갈수록 양적으로 팽창되고 질적으로 고도화되고 있다는 것을 보여주고 있다. 그럼에도 불구하고 지난 20년간 북한의 핵개발을 저지하기 위한 국제사회의 노력은 별다른 진전이 없는 상태이다. 남북관계의 안정적 발전을 꾀하고 더 나아가 통일시대를 열어 나가기 위해서는 북한 핵문제가 최우선 선결과제가 되어야 한다는 것은 두말할 나위가 없다. 지난 정부에서의 실패를 교훈 삼아 북핵 문제를 해결할 수 있는 신선한 아이디어와 정책이 그 어느 때보다도 절실히 요구된다고 할 것이다.

주제어: 북한, 북핵, 핵무기, 북한 핵능력, 남북관계

I. 서론



2012년 12월에 장거리 로켓 은하 3호를 발사함으로써 세계를 놀라게 한 북한은 유엔 안전보장이사회의 제재 결의에도 아랑곳하지 않고 2013년 2월 12일 제3차 핵실험을 단행함으로써 또 한 번 세계를 경악케 했다. 그 이후 남북관계는 한동안 악화일로를 걸었다. 북한은 연일 한국에 대한 자극적인 언사를 쏟아내고 급기야는 개성공단이 폐쇄되는 지경에 이르렀다. 우여곡절 끝에 개성공단이 재가동되고 2013년 9월에 한번 무산되었던 이산가족 상봉이 2014년 2월 말에 다시 열릴 가능성이 높아지기는 했지만 북한의 핵위협은 우리에게 상시적인 위협으로 존재한다.

북한 핵문제는 남북관계의 개선을 어렵게 만드는 가장 핵심적인 문제임에 틀림없다. 박근혜정부가 야심차게 준비하고 추진하고 있는 대북 정책인 ‘한반도 신뢰프로세스’도 북핵 문제의 진전 없이는 큰 결실을 기대하기 어렵다. 잘 알려진 것처럼 북핵 문제가 처음 불거진 1993년부터 20년이 넘는 기간 동안 문제를 해결하기 위해 다양한 방안들이 다양한 주체들에 의해서 추진되었으나 문제가 해결되기는커녕 더욱 악화되어 왔다. 북한은 이미 세 차례나 핵실험을 실시하였고 그만큼 북한의 핵기술은 고도화되고 있다고 보아야 할 것이다.

북핵문제를 근본적으로 해결하고 북한을 비핵화시키는 것이 우리의 절체절명의 과제인 것은 틀림없으며 이를 위해 전 국가적·국제적 노력을 기울여야 하는 것이 우리의 사명이지만 이와는 별도로 북한의 핵위협에 대해 철저한 대비태세를 갖추는 것 또한 소홀히 할 수 없는 일이다. 이 같은 맥락에서 본 연구는 북한의 핵프로그램과 핵능력에 대해 최근 북한의 행보를 중심으로 분석하는 것을 목표로 한다. 다시 말하면 본 연구는 북한의 핵위협에 대한 대비의 가장 기초적이면서도 근본적인 단계로서 북한의 핵프로그램을 분석하고 평가하는 데 그 목적이 있다. 이를 위해서 본 연구는 최근 북한의 핵관련 시설에 일어난 변화

를 점검하고 이에 대한 가치 혹은 함의를 종합적으로 평가함과 동시에 북한의 핵능력에 대한 객관적인 평가를 해보고자 한다. 핵 관련 시설은 영변에 있는 핵시설과 길주군 풍계리의 핵실험장을 꼽을 수 있으며 영변의 핵시설은 최근 다시 가동을 시작한 5MWe 원자로, 우라늄 농축시설, 그리고 새로 짓기 시작한 경수로 등을 꼽을 수 있다. 길주군 풍계리 핵실험장은 북한이 실시한 세 번의 핵실험이 모두 이루어졌던 곳이다.

좀 더 구체적으로 들여다보면, 먼저 II장에서는 북핵 프로그램을 둘러싼 국제정세에 대하여 논의하고자 한다. 최근 미국과 이란의 핵협상을 살펴보고, 북핵 문제에 대한 시사점을 논의할 것이다. 또한 북핵 프로그램의 역사적 경과를 검토하고 북한의 핵관련 시설을 개괄할 것이다. III장에서는 본격적으로 최근의 북핵 관련 주요 시설들을 최근 동향을 중심으로 분석한다. 먼저 5MWe 원자로의 재가동과 관련된 동향을 분석하고 의문점들을 풀어본다. 이어서 방사화학실험실(재처리시설) 및 우라늄 농축시설의 최근 동향을 분석하고 북한의 고농축 우라늄 생산능력을 예측해 볼 것이다. 또한 경수로 건설 진척 상황을 살펴보고 완공이 늦어지고 있는 이유를 분석해보고자 한다. IV장에서는 북한의 핵실험에 대한 포괄적인 평가를 시도한다. 제1차 핵실험과 제2차 핵실험을 간략하게 되돌아보고 제3차 핵실험에 대한 기술적 평가를 제고하고자 한다. 아울러 길주군 풍계리의 핵실험장에 대한 기술적 분석도 함께 제공할 것이다. V장에서는 종합적으로 북한의 핵능력을 평가해 보고 향후 북한의 추가 핵실험 가능성에 대해서도 전망해 보고자 한다. VI장의 결론에서는 본 연구에서 발견된 사실과 주요 분석들을 요약 정리하고 한국에 주는 시사점들을 논의할 것이다.

앞서 언급한 것처럼 북핵 문제는 남북관계를 풀어나가는 데 있어서 가장 어려운 문제라고 할 수 있다. 본 연구는 북한을 완전히 비핵화시키

고 북핵문제를 근본적으로 해결하기 위한 국내외적 노력과 함께 북한의 핵위협에 대하여 철저하게 대비하기 위한 기초자료로서 북한의 핵시설을 면밀히 검토하고 그들의 핵능력을 객관적으로 평가하기 위해 기획되었다. 본 연구의 결과를 기초로 북한의 핵위협에 대한 우리의 적절한 대응방안이 나올 수 있을 것이다. 북핵 상황의 객관적인 평가 없이는 6자회담 혹은 한미공조 등 우리의 정책적 대응에 한계가 있을 수밖에 없기 때문이다.

박근혜정부는 4대 국정과제 중 하나로 통일시대 기반 구축을 추진하고 있으며 튼튼한 안보는 그것을 지탱하는 중요한 축이라고 명시하고 있다. 본 연구는 이러한 현 정부의 국정과제 추진을 위한 객관적·과학적 바탕을 제공하는 데 큰 의의를 두고 있다고 할 수 있다. 또한 현 정부의 대표적인 대북정책이라고 할 수 있는 한반도 신뢰프로세스 추진을 위한 기초적인 연구로도 활용될 수 있을 것이다. 본 연구가 가져올 과학적·정책적 논의가 정부의 대북 행정책을 위한 훌륭한 길잡이로 활용될 수 있기를 고대한다.

II. 북핵 프로그램을 둘러싼 국제 정세



1. 국제 사회 동향

오바마 미국 대통령은 2009년 4월 프라하 연설¹을 통해 ‘핵무기 없는 세상’을 주창하고, 국제 핵비확산 체제 강화를 이루기 위해 핵안보 정상회의를 개최하는 등의 노력을 끊임없이 지속하며 국제 사회의 관심과 동참을 이끌어내고 있다. 그러나 국제사회의 이러한 노력에도 불구하고, 이란과 북한 핵문제는 국제 핵비확산 체제를 위협하는 가장 큰 요인으로 여겨져 왔던 것이 사실이다. 그러나 이란의 경우 핵무기를 보유하고 있지 않으며, 핵무기 제조에 필요한 핵물질²도 보유하고 있지 않기 때문에 핵무기 보유까지 일정 시간이 소요될 것이라는 판단 하에 미국을 비롯한 P5+1³은 이란 핵문제를 외교적으로 해결하기 위한 노력을 지속해왔다.

그리고 2013년 11월 24일, 2002년 이란의 반정부단체 NCRI(National Council of Resistance of Iran)에 의해 이란의 비밀 핵프로그램이 폭로되면서 이란 핵문제가 국제사회의 이슈로 대두된 지 10여 년 만에 P5+1과 이란은 협상을 통해 이란 핵문제의 포괄적 해결책 마련을 위한 초기 조치에 합의했다. 물론 최종 단계에 이르기 위한 단계적 조치가 남아있기는 하나, 외교를 통한 해결책을 마련했다는 사실만으로도

1. 오바마 대통령은 2009년 4월 프라하에서 21세기 핵위험을 강조하고, 증대되고 있는 핵테러리즘과 핵확산의 심각한 위협을 극복하기 위하여 미국은 “핵무기 없는 세상의 평화와 안보를 추구하겠다”고 연설했다. 핵무기 없는 세상을 주창하고, 이를 달성하기 위해 노력한 공로를 인정받아 오바마 대통령은 2009년 노벨평화상을 수상하였다.

2. IAEA에 따르면, 이란은 유엔 안전보장이사회의 경제제재 및 이란 자체의 기술적 결함에도 불구하고, 지속적인 우라늄 농축 활동을 통해 많은 양의 저농축 우라늄을 확보하고 있다. 하지만 현재 6,774kg의 5% 저농축 우라늄(LEU)과 186kg의 20% 고농축 우라늄(HEU)을 생산 및 보유 중인 것으로 IAEA는 파악하고 있으며, 고농축 우라늄을 사용하여 핵탄두를 제조하기 위해서는 약 240~250kg의 고농축 우라늄이 필요하나 이에겐 조금 못 미치는 양임을 알 수 있다.

3. 유엔안전보장이사회 상임이사국 5개국(미·영·프·러·중)+독일임.

국제적으로 크게 환영받을 만한 사안임은 분명해 보인다. 그러나 금번 협상 내용을 살펴보면 이란에게 농축 활동을 인정하고 있는 바, 북한에게 농축 프로그램을 포기하지 않아도 된다는 선례를 남긴 것은 아닌지 우려가 되는 것도 사실이다.

이란의 핵프로그램에 관한 합의 조치가 이루어졌다는 것은 북한이 국제사회의 평화와 안보를 위협하는 유일한 불량 국가로 남았다는 것을 의미하기도 한다. 미국은 지난 20여 년 동안 양자 및 다자(6자회담, 한·미·일·중·러·북) 채널을 통해 북한과 수많은 합의를 도출해왔으나, 북한은 우리나라 농축 프로그램 개발, 핵실험, 핵비확산조약(Nuclear Non-Proliferation Treaty, 이하 NPT), 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, 이하 IAEA) 사찰관 추방, 미사일 발사 실험 강행, UN 안전보장이사회 결의 위배 등을 통해 수많은 합의들을 위반해왔고, 이에 미국은 북한의 비가역적 비핵화 선언 이전에는 대화 재개를 추진하지 않겠다는 의지를 천명했다. 특히 미국은 북한이 핵무기 및 미사일 프로그램을 종결시킬 의지가 없으며 강한 제재 조치에도 이를 고수할 것이라는 인식이 팽배하다. 북한은 제3차 핵실험까지 진행한 사실상의 핵보유국으로 핵무기 포기 결정을 내리기는 쉽지 않아 보이는 것도 사실이나, 분명히 해결해야 하는 사안임은 분명하다.

2. 북핵 프로그램 주요 경과

북한의 핵 개발 프로그램은 1950년대부터 시작되었다. 1953년 아이젠하워 미국 대통령이 국제연합(United Nations, 이하 UN) 회의에서 ‘평화를 위한 원자력(Atoms for Peace)’을 제창한 후 원자력 선진국들은 제한된 원자력 협력을 추진하기 시작하였으며, 북한 역시 1959년

구소련과 협정을 체결하고 인력 양성 및 기술 개발에 관한 협력을 추진하였다. 구소련과의 협정을 체결한 이후 북한은 영변에 원자력연구센터를 설립하고, 구소련으로부터 도입한 0.1MWth 임계시설과 2MWth의 IRT-2000을 영변에 건설하였다. 북한은 1974년 IAEA에 가입하고 1977년 부분안전조치(INFCIRC/66) 협정에 서명하였으며, IAEA 사찰을 수용하는 등 국제 핵비확산 체제에 참여하기 시작하였다. 이후 1979년 5MWe 흑연로 건설에 착수하고, 1984년 50MWe 및 200MWe 흑연로 건설에 착수하는 등 활발하게 원자력 발전을 위한 진전을 이루어나가게 되었다. 특히 구소련의 권고에 따라 1985년 NPT에 가입한 북한은 국제 핵비확산 체제에 전적으로 참여하는 것처럼 여겨지기도 했다. 그러나 NPT 제3조 안전조치 의무에 따라 IAEA와 전면안전조치(INFCIRC/153) 협정을 체결해야하는데 이에 대한 서명과 비준을 미루면서 국제사회와의 험겨루기를 시작했다. 또한 북한은 1986년 5MWe 흑연로를 완공하고 1987년 초부터 가동에 성공하였다.

북한은 흑연로 건설과 함께 경수로 건설도 추진하였는데, IAEA 전면안전조치 서명을 미룸에 따라 구소련이 원자력 기술 및 장비의 수출을 중단하게 되어 경수로 건설 추진에 제약이 되자 1992년 ‘한반도 비핵화 공동선언’에도 합의하고 IAEA와의 안전조치협정의 서명 및 비준 작업도 추진하였다. IAEA와의 안전조치협정 비준에 따라 북한의 16개 핵시설에 대한 최초보고서도 제출하였다.

표 II-1 IAEA에 신고한 북한 핵시설(1992년 5월 기준)

번호	시 설 명	위 치	비 고
1	IRT-2000 연구로 및 임계시설	평북 영변 핵물리연구소	운영중
2	미임계시설(교육용)	평양 김일성 대학	운영중
3	핵연료봉 제조 및 저장시설	평북 영변	운영중
4	5MWe 흑연로	평북 영변 핵물리연구소	운영중
5	50MWe 흑연로	평북 영변	건설중
6	200MWe 흑연로	평북 태천	건설중
7	방사화학실험실	평북 영변 방사화학연구소	건설중 (일부가동)
8	평산우라늄광산	황해도 평산	운영중
9	순천우라늄광산	평남 순천	운영중
10	평산우라늄정련시설	황해도 평산	운영중
11	박천우라늄정련시설	평북 박천	가동중지 (’92)
12~14	635MWe 원자력발전소(3기)	함북 신포	계획중
15	동위원소가공시설	평북 영변	운영중
16	폐기물시설	평북 영변	운영중

IAEA에 최초보고서를 제출하면서 북한은 1990년에, 당시 건설중이던 영변 재처리시설에서 5MWe 흑연로의 파손 핵연료를 재처리하여 90g의 플루토늄을 1회 추출하였다고 신고⁴하였고 이에 따라 1992년 5월 하순부터 북한의 신고시설들에 대한 IAEA의 임시사찰(ad hoc inspection)

4- M. Dembinski, "North Korea, IAEA Special Inspections, and the Future of the Nonproliferation Regime," *Center for Nonproliferation Studies*, Vol. 2 (1995), <<http://cns.miis.edu/pubs/npr/dembin22.htm>>.

이 실시되었다. 그러나 사찰시에 채취한 시료들을 분석한 결과 북한의 보고와는 달리 북한이 1989년부터 1991년까지 최소 세 번의 독립적인 플루토늄 추출활동(재처리)이 있었다는 것을 확인하고, 2개의 미신고 시설에 대한 특별사찰을 요구했지만 북한은 이 시설이 군사 시설이라는 이유로 사찰을 거부했다. 결국 북한은 1993년 NPT 탈퇴를 선언하며 제1차 핵위기가 발발하게 된다. 미국은 북한의 핵문제 해결을 위해 고위급 회담을 개최하는 등 북한을 설득하는 노력을 지속하였으며, 그 결과 미북 고위급 회담 이후 북한은 NPT 탈퇴 선언을 잠정 유보하였다. 이후 1994년 10월 미국과 북한은 제네바 회담에서 북한이 폐연료봉을 밀봉하고 핵프로그램을 동결하는 대신 미국은 북한에 1,000MWe급 경수로 2기 제공 및 매년 중유 50만 톤을 공급하기로 합의하는 등 북한 핵문제의 실마리가 풀리는 듯 했다.

하지만 북한은 제네바 합의 이후에도 IAEA의 사찰활동에 비협조적이었으며, 대포동 1호 미사일을 발사하는 등 군사적 도발을 자행하며 국제사회와의 갈등이 지속되었다. 그러다 2002년 미국 부시대통령의 ‘악의 축’ 발언과 미 국방부 ‘핵태세 검토 보고서(Nuclear Posture Review, 이하 NPR)’에서 핵 선제사용 가능 7개국⁵에 북한 포함 등의 문제는 양국의 갈등으로 더욱 심화 되었으며, 특히 미국은 북한이 비밀리에 고농축 우라늄(Highly Enriched Uranium, 약칭 HEU) 프로그램을 추진하고 있다는 의심이 증폭되면서 대북 중유 공급 중단을 결정하였다. 이에 북한은 그해 12월 핵프로그램 동결 해제를 선언하고 영변원자로, 핵연료제조공장, 폐연료봉 저장시설의 감시카메라와 봉인을 제거하면서 1994년 미북 양국의 제네바 합의는 붕괴 되었으며, 이듬해인 2003년 북한은 또다시 NPT 탈퇴를 선언하게 된다.

⁵ 중국, 러시아, 이라크, 이란, 북한, 리비아, 시리아.

북한의 NPT 탈퇴 재선언 이후 북핵 문제는 6자회담을 통해 협상을 이어 갔으나 북한은 자국에 유리한 협상 결과가 예상되지 않자 2005년 2월 외무성을 통해 핵무기를 개발하여 보유하고 있다고 선언하고 6자회담의 참가를 무기한 중단하였다. 또한 3개월 뒤인 5월에 외무성은 영변 원자로에서 8,000개의 폐연료봉 인출작업이 완료되었음을 발표하였고, 6월에는 영변 원자로를 재가동 하였다. 이에 국제사회는 대북 경제제재에 착수하고 동시에 6자회담의 재개를 위한 노력을 전개하였다. 그 결과, 제4차 6자회담이 2005년 9월 베이징에서 개최되어 “북한이 모든 핵무기를 파기한다”는 내용의 ‘9·19 공동성명’을 채택하게 되었다.

하지만 ‘9·19 공동성명’에도 불구하고 북한은 2006년 7월 5일 함경북도 무수단리 발사장에서 장거리 미사일인 대포동 2호를 포함한 7기의 미사일 발사 실험을 강행하는 등 대북제재 해제를 요구하며 군사적 돌발행동을 이어갔다. 이에 UN 안전보장이사회는 대북 결의안 제1695호를 만장일치로 채택하고 대북 압박정책을 전개하였다.

북한은 이러한 대북 압박정책에 항의하며 같은 해 10월 3일 핵실험 계획을 발표하였으며, 핵실험 계획 발표 후 6일 후인 10월 9일 오전 10시 35분 풍계리 핵실험장에서 제1차 핵실험을 강행한다. 북한의 핵실험은 국제사회에 큰 파장을 불러왔다. UN 안전보장이사회는 북한에 대한 제1718호 결의안을 만장일치로 채택하고 북한에 대한 경제제재를 강화하였으며 이러한 국제사회의 대북 압박정책과 미국의 강력한 대북 경제제재는 북한을 협상장으로 이끌어 냈다.

2007년 2월에 개최된 제5차 6자회담 3단계 회의에서 북한은 60일간의 단계별 북핵 불능화 이행에 관한 ‘9·19 공동성명 이행을 위한 초기 조치(2·13 합의)’에 합의하고, 2·13 합의에 따라 영변 원자로 폐쇄를 공식 발표하였으며 IAEA도 영변 5개 핵시설(원자로 3개(5MWe, 50MWe, 200MWe), 방사화학실험실, 핵연료봉 제조공장)폐쇄를 확인하였다.

이어 제6차 6자회담 2단계 회의에서 북한의 핵물질, 기술, 노하우 이전금지 등을 담은 ‘9·19 공동성명 이행을 위한 제2단계 조치(10·3 합의)’에 합의하고 북한은 이의 일환으로 이듬해인 2008년 6월 영변 원자로 냉각탑을 폭파하며 핵불능화 이행 의지를 국제사회에 알렸다. 하지만 같은 해 12월에 개최된 제6차 6자회담 수석대표회의에서 북한이 핵시설 검증방식에 합의하지 않아 협상이 결렬되면서 다시 북핵 문제는 급격히 냉각되었다.

2009년 4월 북한은 장거리 로켓인 광명성 2호의 발사시험을 강행하고, 북한 외무성은 핵시설을 원상복구하고 핵실험과 대륙간 탄도미사일(Intercontinental Ballistic Missile, ICBM) 발사시험을 계속 할 것이라고 발표하는 등 핵개발을 재개 할 뜻을 밝혔다. 이후 한 달 뒤인 5월 25일 북한은 제2차 핵실험을 실시함으로써 국제사회를 다시금 경악케 했다.

UN은 북한의 제2차 핵실험에 대응하여 제1874호 결의안을 채택하고 대북제재를 강화하는 등 더욱 북한을 압박하였으나, 북한은 새로 추출한 플루토늄의 전량 무기화 및 우라늄 농축 착수를 발표하며 대응하였다.

이후에도 국제사회와 북한은 협상에 큰 진전을 이루지 못했으며, 이에 북한은 핵프로그램 개발에 더욱 박차를 가하며 2012년 12월에는 장거리 로켓 은하 3호를 발사하는 등 북핵 위기를 더욱 고조시켰다. 이에 2013년 1월 UN 안전보장이사회는 제2087호 결의안을 채택하며 대북 제재 수위를 강화하였고, 북한은 한반도 비핵화를 포기하고 물리적 대응 조치를 취할 것이라고 위협하였다. 그리고 약 1개월 뒤인 2월 3일 김정은 국방위원장은 노동당 회의에서 “자주권을 지키기 위한 중요한 결론을 내렸다”며 제3차 핵실험 강행을 암시하였으며, 그로부터 9일 뒤인 2013년 2월 12일 북한은 풍계리 핵실험장에서 제3차 핵실험을 강

행하였다. 북한 위기관련 일지는 <표 II-2>⁶에서 확인할 수 있다.

● 표 II-2 북한 위기 관련 주요 일지

일시	전개 내용	세부 내용
1985.12.12	북한 NPT 가입	IAEA 안전조치 협정은 1992년 4월 발효
1993.02.06	IAEA 북한 핵활동 의심 사항 발견	최소 3회('89, '90, '91)의 플루토늄 추출 및 재처리 시설 확인
1993.03.12	북한 NPT 탈퇴 선언	NPT 탈퇴 서한 유엔 안전보장이사회에 제출
1993.06.11	북한 NPT 탈퇴 유보	미북 고위급 회담에서 북 NPT 탈퇴 잠정 유보 발표
1994.10.21	제네바합의문 체결	- 북: 영변 원자로 및 관련 핵시설 동결, 경수로 완공시 핵시설 해체 - 미: 2003년까지 1,000KWe급 경수로 2기 제공, 이전까지 연간 중유 50만톤 공급
2002.11.21	미 CIA 보고서 공개	북, 핵무기 1~2기 보유 및 추가 제조에 필요한 Pu 확보 추정, 미국 중유 지원 중단
2002.12.12	북한 핵동결 해제 선언	북, 핵시설에 대한 봉인, 감시 카메라 제거
2003.01.10	북한 NPT 재탈퇴 선언	NPT 재탈퇴 발표
2003.08.27	제1차 6자회담 개최	미국의 외교 관계 인정 및 안전 보장, 사찰 전 경제 지원 등을 요구하며 핵실험 협박
2005.02.10	북한 핵무기 보유 선언	북한 6자회담 참가 무기한 중단 발표
2005.9.19	'9·19 공동성명' 채택 (제4차 6자회담)	- 북, 모든 핵무기 및 현존하는 핵계획 포기 - NPT·IAEA 안전조치 복귀, 경수로 제공문제 논의

6. 조민·김진하, 『1995-2009 북핵일지』 (서울: 통일연구원, 2009).

일시	전개 내용	세부 내용
2006.07.05	북, 미사일 발사실험 강행	대포동 2호를 포함한 7기의 미사일 발사실험
2006.07.15	UN 제1695호 대북 결의안 채택	- 미사일과 관련 물품, 재료, 기술, 북한 유입 및 재정지원 금지 - 북의 전제 조건 없는 6자회담 복귀 및 핵개발 프로그램 포기 요구
2006.10.09	북한 제1차 핵실험	풍계리 핵실험장에서 진도 3.9Mb의 지진파 포착
2006.10.14	UN 제1718호 대북 결의안 채택	핵무기·미사일 관련 물자 제품 교역 금지, 북한 자산동결 및 금융거래 중단, 무기 제조 관련자 여행 금지, 북한 화물 검색 협력
2007.02.13	'9·19 공동성명' 이행을 위한 초기 조치 합의 (2·13 합의)	60일 간의 단계별 핵불능화 이행 합의
2007.10.03	'9·19 공동성명' 이행을 위한 2단계 조치 합의 (10·3합의)	북, 핵 물질, 기술 및 노하우를 이전하지 않는다는 공약 재확인
2008.06.27	영변 원자로 냉각탑 폭파	5MWe 원자로 불능화 조치
2008.12.11	제6차 6자회담 수석대표회의 협상 결렬	북핵 검증 방식에 합의 도출 실패
2009.04.05	북한 장거리 로켓 발사	광명성 2호 발사
2009.05.25	북한 제2차 핵실험	풍계리 핵실험장에서 진도 4.5Mb의 지진파 포착

일시	전개 내용	세부 내용
2009.06.12	UN 제1874호 대북 결의안 채택	WMD·미사일관련 자원 동결을 포함한 금융거래 금지 및 대북 무역에 대한 공적 금융지 원 금지 등
2010.11.12	북한 원심분리기 공개	해커 박사 일행에게 약 1,000개의 원심분리기를 공개
2012.12.12	북한 장거리 로켓 발사실험	장거리 로켓 은하 3호 발사 성공
2013.01.22	UN 제2087호 대북 결의안 채택	북한은 한반도 비핵화 포기, 물리적 대응 조치를 취할 것이라고 위협
2013.02.12	북한 제3차 핵실험 강행	풍계리 핵실험장에서 진도 4.9Mb의 지진파 포착

이상에서 살펴보았듯이, 오랜 기간 지속적으로 많은 진전을 이루어 온 북핵 프로그램은 특히 영변을 중심으로 이루어졌다. 다음 장에서는 영변을 중심으로 이루어진 북한 핵시설에 관한 주요 변화들 및 제3차 핵실험 등의 내용을 중점적으로 다루어 2013년 한 해 동안 북한의 핵 무기 및 관련 능력 개발 활동을 자세히 살펴보고 이를 기술적으로 평가하여 향후 북핵 문제 해결을 위한 참고자료로 활용하고자 한다.

Ⅲ. 북핵 주요 시설 현황



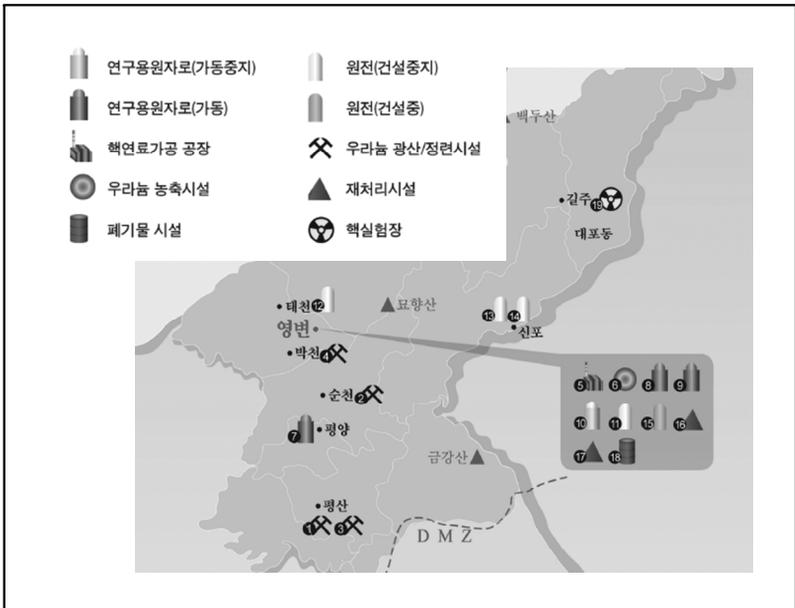
1992년 IAEA에 보고된 시설 이후에 현재까지 알려진 북한의 원자력 시설은 아래 <표 Ⅲ-1> 및 <그림 Ⅲ-1>에 잘 나타나 있으며, 영변이 북한 원자력 프로그램의 주요 시설이 존재하고 있는 원자력 거점 지역임을 알 수 있다. 물론 표에 나타난 시설들이 북한의 모든 원자력 시설은 아니다. 현재까지 알려진 시설 이외에도 핵무기 관련 연구 및 저장 시설, 우라늄 농축 연구시설 및 비밀 우라늄 농축시설 등이 존재할 것이라고 미루어 짐작하고 있으나 이에 관해 자세히 알려진 자료는 없기 때문에, 본 장에서는 알려진 시설 중에서도 특히 영변을 중심으로 하는 북한의 핵활동을 다루고자 한다.

● 표 Ⅲ-1 북한의 주요 확인 핵시설

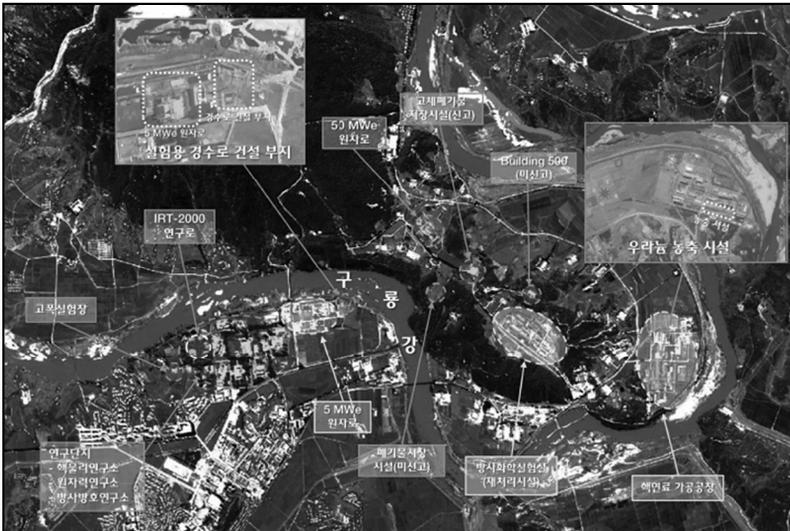
종류	시 설 명	위 치	현황 및 특징	1994년 동결 여부	2007년 불능화 대상
채광 및 정련 시설	평산 우라늄광산	황북 평산	운영중		
	순천 우라늄광산	평남 순천	운영중		
	평산 우라늄정련시설	황북 평산	운영중		
	박천 우라늄정련시설	평북 박천	가동중지/해체(1992)		
원 자 로	IRT-2000 연구로	평북 영변	운영중		
	교육용 미임계 시설	평양 김일성 대학	1978년부터 IAEA 부분안전조치 적용		
	연구용 임계시설	평북 영변	1968년 가동 1978년부터 IAEA 부분안전조치 적용 열출력: 0.1MW		
	5MWe 흑연로	평북 영변	운영중	○	○
	50MWe 흑연로	평북 영변	건설 재개 고려중	○	
	200MWe 흑연로	평북 태천	건설중지	○	
	1,000MWe 경수로 (2기)	함남 신포	1997년 착공 2003년 건설 중지		
	100MWth 경수로	평북 영변	2010년 착공 건설중		

종류	시 설 명	위 치	현황 및 특징	1994년 동결 여부	2007년 불능화 대상
핵 연료 생산	핵연료봉 제조 시설	평북 영변	시설 재건중	○	○
	농축시설	평북 영변	운영중(P2형 원심분리기 2,000개) *현재 증설중인 것으로 판단됨		
재처리	방사화학실험실	평북 영변	운영중	○	○
연구 시설	동위원소가공시설	평북 영변	운영중		
핵무기 개발	핵실험장	함북 길주군 풍계리 만탑산 일대	제1, 2, 3차 핵실험 장소		

● 그림 III-1 북한의 주요 핵시설 위치



● 그림 III-2 영변 핵시설 전경



1. 영변 핵시설 불능화 조치

앞서 언급했듯이 북한의 제1차 핵실험 이후 6자회담을 통해 도출된 2·13 합의에 따라 북한의 핵연료가공시설, 방사화학실험실, 5MWe 원자로, 50MWe 원자로 및 200MWe 원자로 등 5개 시설은 2007년 7월 14일 폐쇄 조치가 완료되었으며, 이후 이들 폐쇄시설은 IAEA의 봉인 하에 시설의 재가동 여부에 대한 모니터링이 실시되었다. 또한 2007년 11월부터 10·3 합의에 따라 영변 3개 시설(5MWe 원자로, 방사화학실험실, 핵연료가공시설)에 대한 불능화를 시작하여 2차 냉각계를 무력화 시키고, 2008년 6월 27일 5MWe 원자로의 냉각탑을 폭파하였다.

그러나 2009년 4월 5일 북한의 장거리 로켓(은하 2호 인공위성) 발사에 대한 유엔 안전보장이사회 의장 성명이 채택되자 북한은 이에 반

말하며 4월 14일 6자회담 절대불참, 불능화된 시설 복구 및 재가동 방침을 천명하고, 4월 20일 IAEA 사찰단과 미국의 불능화팀을 모두 추방하였다.

● 표 III-2 영변 핵시설에 대한 불능화 내용 요약(2009년 4월 기준)

시설명	불능화 조치	비고
5MWe 원자로	2차 냉각계통 무력화(+냉각탑 철거)	완료
	사용후핵연료 인출(8,000개 중 6,500개 인출) ⁷	완료
	제어봉 구동기구 및 사용후핵연료 인출기 제거	계획
	신연료 장전기 사용불가 조치	
방사화학실험실 (재처리 시설)	사용후핵연료 적재 운반차량 구동장치 제거/보관	완료
	사용후핵연료 운반 기중기 및 차폐문 작동기 제거/보관	
	총 4개 중 2개의 증기라인 분리	
	핵연료봉 절단기 제거/보관	
핵연료 가공시설	주요 우라늄 용해조 제거/보관	완료
	5톤 UO ₃ 저장 및 감시	
	신연료 처리(불능화 조치 and/or 국외 반출 ⁸)	완료
	우라늄 금속변환로 제거/보관, 단열벽돌과 모르타르 모래 보관	
	우라늄 금속 주조로의 제거/보관, 선반기기 제거/보관	

7. 북한은 사용후핵연료를 모두 인출하여 이를 재처리하여 플루토늄을 추출하였다고 밝힘(2009.8).

8. 우리나라가 신연료를 구입하기 위한 협상을 벌여 우리측 평가단이 영변을 방문한 적이 있으나 가격에 대한 입장차이가 커서 구입 협상이 중단되었다.

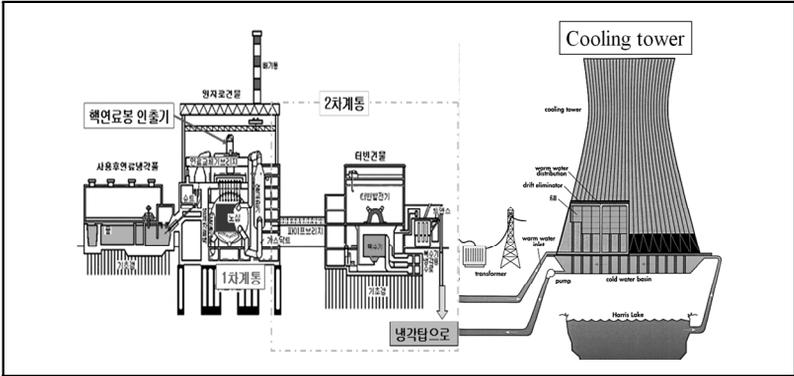
2. 5MWe 원자로

가. 5MWe 원자로 주요 특징

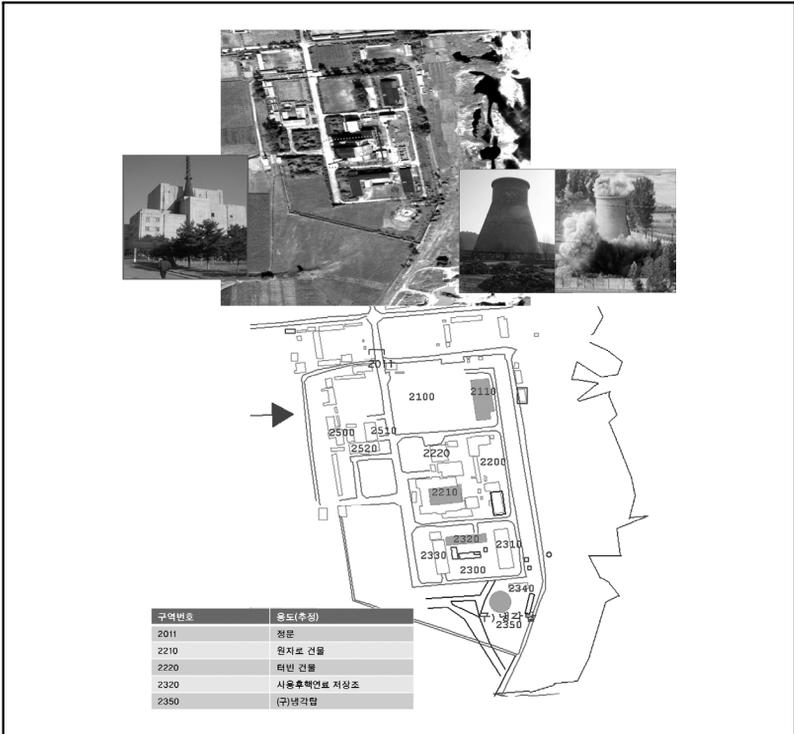
북한은 5MWe 원자로를 전력 생산, 난방열 공급, 다양한 물리적 실험을 실시하는 용도로 구축하였다고 주장하고 있으나 실제로 본 원자로로는 북한의 플루토늄 생산로로 활용된 것으로 여겨진다. 본 원자로로는 세계 최초의 상업용 원자로인 영국의 Calder Hall 원자로를 모사하여 북한이 자체적으로 건설한 흑연감속 가스냉각로(Gas Cooled Reactor, 이하 GCR)이며, 구멍이 뚫린 흑연 벽돌에 금속 우라늄(매그녹스)을 장전하고 탄산가스로 냉각하는 전형적인 플루토늄 생산로이다. 미국, 구소련, 영국, 프랑스 등에서 핵무기용 플루토늄을 생산하는데 이용한 원자로의 초기 단계 설계와 비슷해 보인다. 노심의 대부분을 흑연이 차지하기 때문에 흑연로라고도 하며, 영국에서는 발전 겸용을 거쳐서 발전용으로 개량하였으며 이를 가스냉각로라고 부르게 되었다.

일반적으로 플루토늄 생산 능력은 핵연료 연소도에 따라 달라지는데, 연소도가 높을수록 플루토늄의 생산량은 늘어나지만 순도가 낮아지기 때문에 무기급 플루토늄을 생산하기 위해서는 핵연료의 연소도가 낮아야 한다. 이는 가능한 한 연소도를 높여서 에너지 생산 효율을 높여야 하는 발전로의 요건과 상반된다. 또한 발전로에 사용하는 핵연료는 높은 연소도에서도 안전해야 하지만 플루토늄 생산로에서는 연소도가 낮기 때문에 핵연료의 품질이 상대적으로 낮아도 된다. 따라서 주목적을 은폐하고, 비효율적이지만 에너지를 이용하기 위하여 발전 기능을 유지한다고 주장할 수 있기 때문에 영변의 5MWe 원자로로는 발전용이라는 허울을 쓴 전형적인 플루토늄 생산로라 할 수 있다.

● 그림 III-3 흑연 감속 가스 냉각로



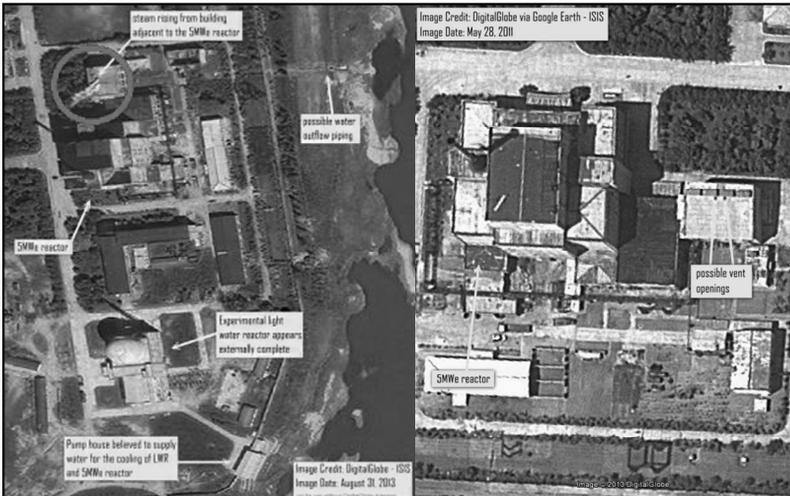
● 그림 III-4 5MWe 원자로 전경



나. 5MWe 원자로 재가동 징후 탐지

북한 핵관련 정보 인터넷 사이트인 38North는 2013년 9월 11일 북한 영변의 5MWe 원자로에 인접한 건물에서 2개의 증기가 올라오는 것을 2013년 8월 31일자 위성영상에서 확인하였다고 발표했다. 위성영상으로 볼 때 해당 건물은 증기터빈과 발전기가 설치된 보조 건물로 원자로 가동에 의해 생성된 증기가 배출된 것으로 추정된다.

● 그림 III-5 38North에서 공개한 위성사진(2013.8.31)



본 위성사진에서 관측된 증기는 터빈 가동을 위해 가동 초기 증기 응축기 내의 비응축 기체인 공기를 배출하기 위한 작업(venting)으로 추정된다. 증기 응축 과정 중에 공기가 섞인 경우 응축하려는 증기가 응축기의 차가운 고체표면(응축기 내 열전달면)에 도달하는 것을 방해하기 때문에 열전달계수의 현저한 감소를 야기시키고 열전달 효율이 떨어지기 때문에 증기응축기의 초기 운전시에는 대량의 venting이 꼭

필요하다. 일반적으로 0.5% 정도의 공기를 함유하는 수증기의 경우 열전달계수가 절반 가까이 감소하는 것으로 보고되어 있다.

또한 2013년 10월 2일 동사이트는 5MWe 원자로의 온배수가 구룡강으로 배출되는 것으로 추정되는 관측 영상(2013.09.19)을 공개하였다.

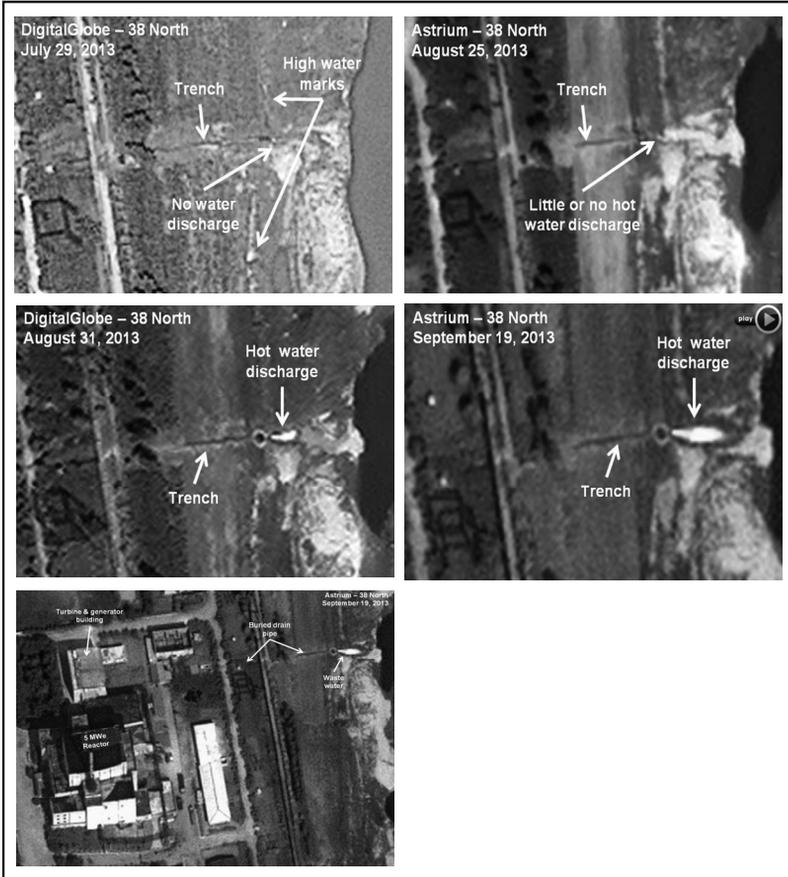
그러나 보조 건물에서 배출되는 증기와 온배수 배출을 위성 영상에서 확인했다고 해서 원자로가 실제로 가동 되었다고 단언할 수는 없다. 북한이 대남, 대미 압박을 위하여 5MWe 원자로를 실제로 가동하지는 않으면서, 가동하는 것처럼 위장할 가능성도 있기 때문이다. 실제 원자로가 가동되고 있는지 여부를 확인하기 위해서는 온배수의 수온이 주변 강물 수온보다 높다는 것이 확인되어야 한다. 그러나 이러한 온도 변화를 측정하기 위한 적외선 위성 영상은 해상도가 높지 않아 정확한 확인이 어렵다. 만일 북한이 원자로를 계속 운전한다면 온수 배출지점의 수온이 분명히 주변의 다른 지점과 어느 정도 차이를 보일 것이므로 군사위성(미국)의 적외선 영상에는 그 차이가 감지될 수 있을 것으로 여겨진다.

(1) 5MWe 재가동 관련 사항

5MWe 원자로 불능화 이후 북한은 5MWe 원자로에 대한 별다른 언급이 없었으나, 2013년 4월 2일 조선중앙통신을 통해 “핵시설들의 용도를 조절 변경해나가기로 했다”고 밝히며, “우리늄 농축공장을 비롯한 영변의 모든 핵시설들과 함께 2007년 10월 6자회담 합의에 따라 가동을 중지하고 무력화했던 5MWe 흑연감속로를 재정비, 재가동하는 조치도 포함된다”고 발표했다. 북한이 영변 핵시설에 취했던 불능화 조치들은 북한의 비핵화를 위한 상징적 의미가 강한 조치들이었으며, 사실상 영구적 불능화 조치라기보다는 원자로 재가동을 일시적으로

자연시키는 조치에 불과했기 때문에 재가동 선언이 그리 놀랄만한 사실은 아니다.

● 그림 III-6 5MWe 원자로 재가동으로 추정되는 온배수 방출 위성영상



(가) 2차 냉각계통 복구

원자로를 가동시키기 위해서는 원자로에서 발생하는 열을 냉각장치를 이용하여 제거해야 한다. 따라서 5MWe를 재가동하기 위해서는 2008년 불능화 조치로 폭파한 냉각탑을 포함한 2차 냉각계통을 복구하여야 한다. 2차 냉각계통을 복구하기 위해서는 제거된 배관과 냉각탑 건설이 필요하나, 냉각탑 건설 대신 원자로 근처의 구룡강물을 취수하여 직접 2차 냉각수로 사용하는 방법을 사용한다면 굳이 냉각탑을 복구하지 않아도 냉각수로 활용할 수 있으며, 북한은 현재 이 방법을 사용하고 있는 것으로 여겨진다. 그러나 갈수기(渴水期)에는 구룡강이 거의 바닥을 드러내어 충분한 냉각수량 확보가 어렵기 때문에 상류에서 냉수를 취수하여 하류로 온수를 배출하는 방식이 아닌, 하류에서 취수하여 냉각수로 사용한 후 상류로 방류하여 방류된 물이 흘러내려오는 동안 강물이 냉각되면 이를 다시 사용하는 방식(즉, 강의 흐름을 통해 냉각탑을 대신하는 방식)을 사용하고 있는 것으로 보인다. 특히 5MWe 흑연로는 출력밀도가 낮기 때문에 냉각계통의 기능이 정지한다 해도 즉시 원자로 가동을 정지하면 냉각정지로 인한 2차 사고가 발생하지 않으므로 2차 냉각계통 복구에는 큰 어려움이 없었을 것으로 판단된다.

(나) 핵연료 생산/장전

원자로를 가동하기 위해서는 무엇보다 핵연료가 필수적이다. 그러나 5MWe 원자로의 핵연료는 2009년 모두 인출하여 재처리하였으므로 원자로 재가동을 위해서는 새로운 핵연료를 장전해야 한다. 북한은 1994년 핵시설 동결시 약 18,500개의 핵연료를 보관하고 있었으나 2003년 및 2005년에 각각 8,000여 개의 핵연료를 사용한 것으로 알려져

있다. 북한은 2009년 4월 기준으로 5MWe용 핵연료를 약 2,500여 개⁹⁾(약 15톤) 보유하고 있었고, 피복관 상태가 매우 좋지 못했다. 하지만 5MWe 핵연료 이외에도 50MWe용 금속우라늄봉과 기타 우라늄 금속을 포함하여 전체적으로 100톤 수준의 금속 우라늄을 확보하고 있었기 때문에 화학적 처리 작업을 하지 않더라도, 50MWe용 신연료를 5MWe용에 맞게 금속 가공 및 피복 작업을 실시하여 재가공하면 2개 노심분에 해당하는 핵연료는 충분히 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

물론 핵연료 생산을 위해서는 금속 우라늄 성형 가공 시설의 복구도 필요하지만 핵연료 가공 시설에 대한 북한의 불능화 조치들은 우라늄 금속 주조로와 선반기기들을 완전히 파괴한 것이 아니라 설치 장소에서 들어내어 포장하여 보관하였기 때문에 이 시설들의 복구는 그리 어렵지 않았을 것이라 판단된다.

일반적으로 1개 노심분의 신연료 생산에 필요한 시간은 약 6개월~1년이 소요될 것으로 예상되나 이러한 작업이 2013년 4월 이전에 이미 상당부분(또는 완전히) 진행되었을 가능성¹⁰⁾도 있기 때문에 핵연료 공급의 관점에서 2013년 9월의 원자로 가동은 충분히 가능했을 것으로 판단된다.

(다) 5MWe 흑연로의 플루토늄 생산성 추정

앞서 설명했듯 이 원자로는 발전용이기보다는 플루토늄 생산을 목적으로 하는 시설로 여겨진다. 원자로에서 핵연료의 연소도가 낮을 때

⁹⁾ 노심 1개당 약 50톤의 핵연료(핵연료봉 8,000개)가 필요하다.

¹⁰⁾ 헤커(Hecker) 박사의 2006년 11월 방북 보고서에 따르면 북한이 당시 1년에 1개 노심분의 핵연료 생산을 목표로 핵연료 가공공장을 재건하고 있다고 주장했다고 한다.

는 원자로에서 발생한 총 핵분열 출력에 비례하여 플루토늄이 생성되며, 이는 원자로 열출력과 운전 시간에 비례하므로 원자로 출력은 플루토늄 생산량을 추정하는데 필요한 매우 중요한 지표이다. 특히 영변의 5MWe 흑연로는 노후화 되었지만 구조가 간단하고 출력밀도가 낮아 원자로 재가동시 특별히 불안정한 징후¹¹를 보이지는 않을 것으로 예상된다. 물론 흑연로 시설 노후화 등으로 인해 실제 가동률이 100%에 미치지 못할 것으로 여겨지기 때문에 실제 플루토늄 생산량은 설계 용량보다 작을 것으로 예상된다. 본 원자로가 100%의 열출력으로 가동될 경우 생성할 수 있는 플루토늄의 양이 연간 8kg 수준임을 고려할 때, 재가동을 통한 플루토늄 생산량은 연간 6kg을 넘기 어려울 것으로 판단된다.

● 그림 III-7 5MWe용 금속 핵연료봉(좌) 및 50MWe용 금속 핵연료봉(우)



¹¹ 2005~2007년 사이에는 원자로가 자주 가동 정지된 것이 관측되었는데, 노후된 핵연료의 피복관 손상과 계측기 이상이 주요원인으로 여겨진다. 그러나 이번 재가동시에는 피복작업을 새로이 한 신연료를 사용하고 있을 것이고, 계측기 등도 교체했을 가능성이 높기 때문에 과거보다는 한층 안정된 운전이 가능할 것으로 추측된다.

북한이 흑연로를 재가동하여 생산한 플루토늄을 무기화하기 위해서는 최소 10kg 이상의 플루토늄¹²을 생산해야 할 것이므로 플루토늄 생산에 필요한 기간(2년), 핵연료 인출을 위한 냉각기간(3개월) 및 재처리 기간(3개월) 등을 고려하면 플루토늄을 활용한 무기화까지는 최소 2년 6개월이 필요할 것으로 추정된다.

3. 방사화학실험실(재처리시설)

가. 방사화학실험실의 주요 특징

영변 원자력 단지 내에 위치하고 있는 방사화학실험실은 질산을 활용한 습식재처리(purex) 방식을 이용하고 있으며, 현재 2개의 라인이 존재하는 것으로 알려져 있다. 북한의 재처리 시설은 1986년 착공되어 1990년 소규모로 재처리를 수행했으며 1994년 동결당시 연간 80톤 정도의 사용후핵연료를 재처리할 수 있는 제1라인은 이미 완공되어 있으며, 2003년에서 2005년에 걸쳐 처리용량을 확대하여 현재는 연간 110톤 정도를 처리할 수 있다고 알려져 있다.

나. 방사화학실험실 재가동 징후

방사화학실험실의 불능화는 <그림 Ⅲ-8>에서 확인할 수 있듯이 일부 장비를 분해하고 시설에 증기를 공급하는 배관을 제거하여 따로 보관했을 뿐이므로 이를 복구하는 것은 간단하고 시간도 별로 걸리지 않았을 것으로 판단된다. 또한 5MWe 흑연로를 재가동 한다 하더라도

¹² 핵실험부분에서 임계질량에 관해서는 조금 더 자세히 다룰 예정이다.

무기 제조에 필요한 상당량의 플루토늄을 생산하기 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 최소 2년 6개월 이상의 시간이 필요할 것으로 추정되는 바, 이 시설의 복구를 서두를 필요도 없다. 물론 더 빠른 시일 내에 사용후핵연료를 인출하여 플루토늄을 추출할 수도 있으나, 그렇게 되면 플루토늄 회수량이 줄어들 것이므로, 생산효율과 경제성을 고려할 경우 가능한 시나리오는 아니라고 판단된다.

현재 북한의 재처리 시설은 별다른 특이 상황이 포착되지 않고 있으며, 그럴 필요성도 없다고 판단된다. 또한 재처리시설은 가동을 시작한다해도 위성영상에 특별한 징후가 나타나지 않기 때문에 직접 현장에서 관찰하지 않는 한 가동 여부를 판단하기 어렵다. 물론 재처리를 시작하면 상당량의 방사성 동위원소 기체의 일종인 Kr-85를 배출하나, 북한의 소규모 재처리시설에서 배출하는 정도는 원거리에서는 의미 있는 변화를 측정하기 어려운 것이 현실이다.

4. 우라늄 농축시설

가. 우라늄 농축시설 공개

2010년 11월 2일 한미경제연구소(KEI) 잭 프리처드(Jack Pritchard) 소장 일행은 방북 중 실증로 건설 현장에서 우라늄 농축 관련 징후를 인지하고 평양 귀환 후 북한 당국자들에게 관련 시설 문제를 Siegfried S. Hecker(이하 해커) 박사¹³ 등 미국 전문가들에게 보여 줄 것을 요

¹³ 해커박사는 2004년부터 2010년까지 7회에 걸쳐 방북했으며, 방북 이력 및 활동 사항은 다음과 같다.

청했고, 북한의 초청으로 11월 9일부터 13일까지 해커 박사는 북한을 방문했다.

해커 박사 방북시 북한은 경수로용 저농축 우라늄(Low Enriched Uranium, 약칭 LEU) 제조를 위해 2009년 4월 IAEA 사찰단 철수 후 영변의 핵연료 제조 시설을 개조하여 현대적인 농축시설 건설에 착수했고, 해커 박사의 방북 수일 전 본 시설을 완공하였다고 설명하며 농축시설을 확인시켜줬다고 한다. 해커 박사에 따르면 북한의 농축시설은 원심분리법을 활용한 시설이고 원심분리기의 외형은 P1 형태로 보이나 북한은 2,000여개의 원심분리기를 설치했으며 시설용량은 약 8,000kg-SWU/yr라고 주장하는 바, 이에 따르면 P2¹⁴형태일 것이라고 밝혔다.

농축시설의 크기는 120m×40m로 내부에 원심분리기가 2×3열 방식이며, 외관은 미 오하이오주 소재 피카톤 농축시설과 유사하다고 알려졌다. 해커 박사는 북한이 원심분리기 제조에 필요한 강화 알루미늄, 로터 제작용 마레이징강 등 특수 철, 원형 자석, 주파수 변환기, 진공 밸브, 베어링 등을 제작할 시설을 구비하지 못해 십수년간의 노력 끝에 외국에서 이들을 불법 조달했을 것으로 판단했으며, 원심분리기 운영 기술은 A. Q. Khan 박사를 통한 현지 교육을 통해 일부 습득한 것으로 예상했다. 또한 2009년 방북 당시에는 목격할 수 없었던 휴대 전

△ 2004년 1월: 재처리 공정을 통해 추출된 분리 플루토늄 확인, △2005년 8월: 루이스-김계관 대화에서 경수로 논의, △2006년 11월: 핵실험 관련 논의, △2007년 2월: 미북 간 1단계 협력 논의, △2007년 9월: 북한 원자로 제공 요청, △2009년 2월: 6자 회담 중단 후 상황 논의, △2010년 11월 12일: 우라늄 농축시설 확인.

14. P2형은 농축 능력이 연간 4~5kg-SWU(5kg은 독일의 G2)내외이며, 2개의 로터 사이를 벨로우즈(bellows)로 연결하고, Al-Ni-Co 또는 Sm-Co를 사용한 마그네틱 베어링을 사용한다. 외부 케이싱은 6000시리즈의 알루미늄 합금을 주로 이용한다. 외형상 P1형은 지름이 100mm, P2형은 150mm이며, P1은 로터가 알루미늄이고, P2형은 마레이징강이라는 차이가 있다.

화도 눈에 띄게 증가했고, 김일성종합대학에서도 신형 컴퓨터와 같은 최신 제어 시설들을 관찰할 수 있었으며, 이러한 첨단 기계들이 농축 시설 제어룸에서도 확인할 수 있었다고 증언했다.

농축시설은 특히 P2 원심분리기의 경우, 원심분리기 1기당 소요 전력은 70~100W 정도에 불과하여 농축시설 탐지는 매우 어렵기 때문에 북한이 비밀리에 관련 기술을 개발하고, 이를 활용한 시설을 단시간 내에 건설할 수 있었던 것으로 평가된다.

북한은 현재 탄소섬유 원심분리기에 대한 특허¹⁵를 보유하고 있다. 이는 이 장치의 실효성 여부를 떠나서 북한이 이미 원심분리기 생산 및 개발 능력을 보유했음을 의미하며, 원심분리기 cascade 연구소 및 원심분리기 조립 공장이 어디엔가 존재하고, 숨겨진 농축공장도 있을 가능성도 높다는 사실을 시사한다.¹⁶ 중국의 농축 전문가¹⁷는 농축시설의 이전¹⁸은 그다지 어려운 일이 아니기 때문에 비밀 농축 공장에서 완공된 시설을 영변으로 이전하는 것 역시 충분히 가능한 시나리오라고 평가하기도 했다. 이란 역시 농축시설을 이전한 경험이 있으며 이 경우에도 농축시설 이전에 오랜 기간이 소요되지 않았다고 한다.

15. 위, 아래 지름이 다른 원통 모형의 탄소섬유 원심분리기임.

16. 국내/외 북한 핵문제 전문가들의 거의 일치된 평가임.

17. 농축전문가 Zhu Xuhui(중국핵공업총공사, China National Nuclear Corporation) 연구원/교수의 자료를 기반으로 평가함.

18. 농축시설 이전을 위한 시설 정지는 질소가스 주입을 통해 회전 저항을 증가시키는 방법을 활용하며, 이 경우 원심분리기의 완전정지는 며칠 정도면 충분하다고 한다.

● 그림 Ⅲ-8 재처리 시설의 장비 제거 및 보관



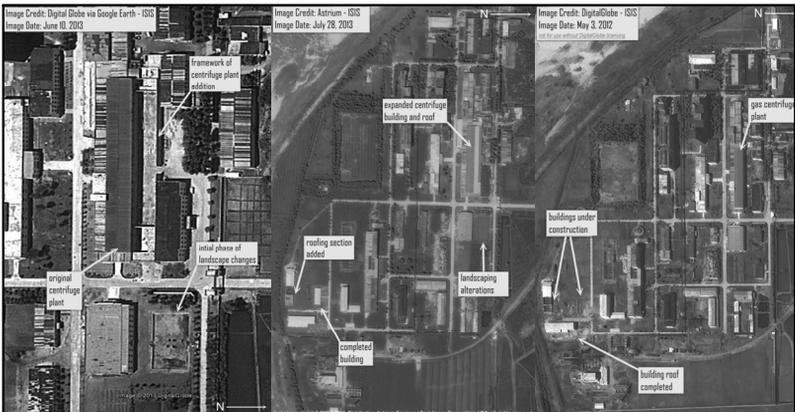
나. 영변 우라늄 농축시설 확장

미국의 과학국제안보연구소(Institute for Science and International Security, 이하 ISIS)¹⁹가 2013년 8월 7일 공개한 7월 28일자 위성영상

¹⁹ ISIS(과학국제안보연구소, Institute for Science and International Security), <<http://isis-online.org>>.

에 의하면 북한 영변 우라늄 농축시설의 원심분리기가 설치되어 있는 건물이 기존 크기의 2배 정도 수준으로 확장된 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 영변 농축시설이 약 2배 정도 확장되었다는 사실을 추정할 수 있다. Zhu Xuhui²⁰ 교수는 농축 생산량을 늘리고 농축시설을 확장하기 위해서는 원심분리기 설치 공간 확장 이외에 다른 작업은 필요 없다고 한다. 따라서 농축 공장 면적이 2배 늘어난 것은 기존의 원심분리기 갯수가 2,000개에서 4,000개로 늘어날 수 있다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

● 그림 III-9 영변 농축시설의 확장 추정 위성 영상(ISIS)



다. 북한 원심분리기 제조 능력 추정

원심분리기는 다음과 같은 6개 주요부분으로 구성되며, 원심분리기 자체 생산을 위해서는 아래 부품의 자급이 중요하다.

20. 중국의 우라늄 원심분리 농축전문가.

- 로터(회전자): 500m/sec로 회전(P2 기준)
- 움직이지 않는 케이싱 및 튜브(연료 주입 및 인출)
- 모터: 상단(로터의 하부) 부분 회전(유도전동기)
- 자석 베어링: 회전 속도가 40,000rpm 이상(P2는 63,000rpm)이 되어야 하기 때문에 일반적인 베어링은 사용이 불가능함.
- 진공펌프: 로터와 케이싱 사이의 공기를 빼내서 진공상태를 만들어 회전속도를 높임.

또한 원심분리기 가동을 위해서는 주파수변환기²¹가 필수적이며, 로터 제작을 위해서는 알루미늄 휠 열간 고속 성형기(이하 Flow Forming Machine)가 필수적이다. 특히 원심분리기용 P-2 로터는 마레이징강인 부분을 해머를 활용해 단조하고 압연장치(hot pierce mill)를 이용하여 작업을 한 후에 Flow Forming Machine를 활용하여 튜브 생산을 하게 된다. 특히 원심분리기 로터를 마레이징강을 사용할 경우 반드시 Flow Forming Machine이 필요하며, 파키스탄, 독일 등도 이 방법을 사용하였다고 알려져 있다.

우리농 농축 전문가인 Scott Kemp(MIT)는 북한은 현재 최소 3개 이상의 Flow Forming Machine을 보유하고 있는 것으로 여겨진다고 발표했다. 이 중 최신형은 서구의 제품(스페인)과 외형상으로도 매우 유사한 것으로 여겨지며, 북한이 Flow Forming Machine을 자체 제작하는 것은 불가능하기 때문에 해당 기기를 불법적인 방법으로 취득했음을 유추해 볼 수 있으며 구형의 경우 파키스탄의 도움으로 수입한 것으로 추정된다. 북한이 보유하고 있는 구형 기종은 2006년 김정일이 구성 기계공작공장을 방문 당시 공개된 사진에서 확인할 수 있다.

²¹ 원심분리기에 공급되는 전류의 주파수를 저주파에서부터 1,050hz까지 점진적으로 높여야 함.

●그림 III-10 2006년 9월 김정일의 구성 기계공학공장 방문 사진



본 장치는 CNC(컴퓨터 수치기계) 조작 패널이 없는 구형장치이다. 이후 김정일이 2009년 12월 강계 트랙터종합공장 방문시 공개된 사진을 살펴보면 2006년식에 비해 최신형 기계가 도입된 것을 확인할 수 있다. CNC 패널도 있으며 뒤편으로 제작이 완성된 것으로 보이는 제품도 살짝 보인다.

또한 2013년 6월 노동신문에 공개된²² 김정일의 강계 공장 방문 사진을 보면 2009년식에 비해 유압장치, 케이블 및 기타 장치들이 내부에 장착되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이밖에도 북한이 TV를 통해 공개한 영상을 보면 또 다른 Flow Forming Machine을 확인할 수 있는데, 이는 2009년에 공개한 것과 같은 설비일 수도 있다고 판단되기 때문에 북한은 최소 3개 이상의 Flow Forming Machine을 보유하고

22. <<http://nkleadershipwatch.wordpress.com/2013/06/23/kim-jong-un-visits-kanggyetractor-plant>>.

이를 통해 원심분리기 로터를 자체 생산할 수 있다는 사실을 확실하게 확인할 수 있다. 이밖에도 로터 제작을 위해서는 전자빔용접기,²³ 밸런스 머신²⁴ 등이 필요하다.

●그림 Ⅲ-11 2009년 12월 김정일의 강계 트랙터종합공장 방문시 공개된 사진



(1) 북한의 원심분리기 생산/보유 수량 추정

앞서 살펴본 바와 같이 북한은 원심분리기 제작에 필요한 필수 장비인 Flow Forming Machine을 최소 3개 이상 보유하고 있으며, 1개의 Flow Forming Machine이 로켓 등 다른 부품생산에도 사용된다고 가

²³ 원심분리기 로터는 회전 속도(초기 가속, 또는 정지를 위한 감속시)를 변화시킬 때 회전과 진동의 공명에 의한 파손 방지를 위하여 2~4개의 튜브(두께 1mm 정도)를 bellows(두께 0.35mm 정도)로 연결하여 용접하는데 이를 위하여 전자빔용접기가 필요함.

²⁴ 로터의 완전에 가까운 대칭성 확보를 위하여 필요한 장비임.

정한다 하여도 최소 1,000개 이상의 원심분리기를 제작할 수 있을 것이라 추산된다. 따라서 북한이 2007년부터 로터 제작을 시작했다고 가정할 경우 북한은 6,000개 이상의 P2 원심분리기를 보유하고 있다고 추정할 수 있다.

(2) 북한의 우라늄 농축능력 추산

1kg의 고농축 우라늄을 생산하는데 필요한 농축능력은 cascade의 구성과 배출되는 감손우라늄(tail)의 U-238의 농도에 따라 달라지며, 이상적인 cascade의 경우로 볼때 감손우라늄의 U-235 농도 변화에 따른 농축작업 필요량은 아래 <표 III-3>에서 확인할 수 있다.

●그림 III-12 2013년 6월 강계 공장에 방문중인 김정은



●그림 Ⅲ-13 북한 TV 방송을 통해 공개된 영상



북한 기술자가 해커 박사에게 밝힌 바에 따르면 북한은 영변 농축시설의 감손우라늄 농도가 0.27%라고 밝혔다고 함에 따라 이를 기준으로 계산해볼 경우 1kg의 90% 농축도의 고농축 우라늄 생산에 필요한 농축작업량은 약 200kg-SWU이다. 북한의 주장에 따르면, 북한이 보유한 P2 원심분리기의 농축능력은 4kg-SWU/yr 정도이므로 보유한 원심분리기 숫자에 따라 농축능력이 달라진다. 보유 숫자가 각각 2,000개(공개된 영변 시설에 설치된 갯수), 4,000개(위성사진을 근거로 영변시설을 2배로 확장한 경우의 수) 및 6,000개(원심분리기 생산 가능량을 기준으로 한 추정 숫자)인 경우 북한이 생산할 수 있는 우라늄은 각각 연간 8,000, 16,000 및 24,000kg-SWU 정도로 추산됨에 따라 북한이 연간 생산 가능한 고농축 우라늄은 약 40~120kg임을 알 수 있다.

표 III-3 우라늄 농축도와 감손우라늄 농도에 따른 농축작업 필요량의 변화

농축도 [wt% U-235]	농축 우라늄 1kg의 농축작업 필요량[kg-SWU/yr]			
	감손우라늄 농도 0.2% U-235	감손우라늄 농도 0.24% U-235	감손우라늄 농도 0.27% U-235	감손우라늄 농도 0.3% U-235
	1	0.380	0.316	0.285
2	2.194	1.935	1.794	1.672
3	4.306	3.853	3.602	3.383
4	6.544	5.895	5.535	5.220
5	8.851	8.008	7.537	7.127
10	20.863	19.047	18.027	17.137
20	45.747	41.984	39.865	33.199
40	96.616	88.960	84.642	80.874
50	122.344	112.742	107.324	90.287
60	148.235	136.687	130.169	109.674
80	200.605	185.164	176.447	149.038
90	227.341	209.953	200.137	169.270
93	235.550	217.579	207.433	175.529

5. 경수로 현황

가. 경수로 건설 공개

해커 박사는 우라늄 농축시설 이외에도 북한이 영변에 100MW급 실험용 경수로 건설을 시작했다는 사실을 공개했다. 해커 박사는 2010년 11월 12일, 영변 핵시설을 방문하여 경수로 건설부지의 콘크리트 기초 공사(한 변의 길이가 약 28m인 정사각형 모양)가 완료되고 그 위에 원

자로 격납용기(직경 22m, 두께 0.9m, 높이 40m)로 사용될 원형의 콘크리트가 약 1m 정도 올라가 있는 것을 직접 보았다고 밝혔으며 북한은 지난 2010년 7월 31일부터 경수로 공사를 착수하였고, 2012년부터 운영에 들어갈 예정이라고 밝혔다고 한다.²⁵

또한 북한은 해커 박사에게 경수로를 짓는 목적이 북한의 전력난을 해결하기 위한 것이며 경수로의 건설 및 운영을 ‘모두’ 북한이 ‘자체적’²⁶으로 추진하고 있다고 설명했다. 우선 이같이 작은 원형로를 먼저 지어 관련 기술을 숙달한 이후, 더 큰 규모의 경수로를 건설할 것이라고 주장하였고 북측 기술자는 경수로의 열출력이 100MWth이라고 밝혔으나, 전기출력에 대해서는 구체적으로 밝히는 것을 꺼리며 일반적인 발전 효율이 30% 내외임을 감안하여 예상된 전기 출력인 25~30MWe가 될 것이라 추정한다고 밝혔다고 한다. 더불어 핵연료의 피복재를 지르칼로이(zircaloy)²⁷로 할지 스테인리스강으로 할지를 확정 짓지는 못했다고 전했다. 해커 박사는 이밖에 원자로 운전과 관련된 다른 특성들(운전 압력 및 온도, 냉각재 종류 및 유량, 감속재의 종류, 연소도 등)에 대한 정보는 구체적으로 확인하지 못하였다고 밝혔다.

²⁵ Siegfried S. Hecker(CISAC), “A Return Trip to North Korea’s Yongbyon Nuclear Complex,” (2010.11.20).

²⁶ 북한은 원자로 압력용기, 펌프 등 원자로 관련 부품을 모두 자체적으로 만들 것이며, 특히 경수로용 핵연료도 직접 생산할 것이라고 주장하였다고 한다. 특히 자신들이 충분한 우라늄 원광(Ore)을 보유하고 있다는 점을 강조하였으며, 이산화우라늄(UO₂)형태의 핵연료를 제작법에 대해 현재 연구 중이고, 어려움이 있더라도 외부 지원 없이 곧 자체 생산을 시작할 것이라고 밝혔다고 한다.

²⁷ 지르칼로이는 경수로용 이산화우라늄 핵연료의 피복재로 쓰이는 지르코늄 합금으로 지르코늄에 2.5%의 주석을 가하여 300℃ 전후의 가압수 또는 비등수 속에서의 내부식성을 개선한 것으로서 주석 함유량을 줄이고 다른 원소를 추가하는 방향으로 개량하여 최근 지르칼로이-4까지 개발한 상황이다.

나. 경수로 건설 현황

북한은 2009년 100MWth 경수로 건설에 착공하여 2012년 가동하는 것을 목표로 건설을 시작하였다고 밝혔으나 현재까지 완공되지 못한 상황이다. 그러나 2012년 8월경 원자로 격납건물의 돔이 덮이는 등 터빈 홀 및 원자로 건물의 외부 구조물(벽, 지붕 등) 건설이 마무리되었으나, 일반적으로 돔이 덮이기 전에 설치되는 격납용기와 증기발생기가 설치된 징후가 포착되지 않아서 여러 가지 추측을 불러일으키고 있다. 특히 격납건물의 돔이 덮인 2012년 8월 이후 공사의 진행 상황은 외부로 드러난 보조시설의 건설 상태로 미루어 추측할 수밖에 없는 형편이어서 완공 시점에 대한 추정을 더욱 어렵게 하고 있다. 상부 돔이 완공된 상태에서 원자로와 증기발생기를 내부에 설치하기 위해서는 결합된 원자로를 기기출입구를 통해 반입시켜 설치하거나, 내부에서 원자로를 결합해야 한다. 그러나 고온·고압의 운전환경과 중성자/방사선 등의 영향을 견디기 위해 원자로의 용접 과정은 매우 중요하며, 고도의 기술력과 장비가 필요하기 때문에 격납건물 내에서 용접 과정을 진행하기는 어려울 것으로 평가된다. 우리나라 상업용 경수로의 경우 원자로와 증기발생기의 크기가 기기출입구보다 커서 돔 설치 이후에는 이러한 작업을 할 수 없고, 부득이 한 경우 벽에 구멍을 뚫고 반입한 후 다시 벽을 설치해야 하나, 북한 실험용경수로의 경우 원자로의 크기가 작기 때문에 기기출입구를 통하여 이들 용기를 반입할 수 있도록 설계한 것으로 추정되나 정확한 확인은 어렵다.

그러나 위성에서 보이는 전체적인 공사의 진행 상황으로 볼 때 이러한 장치들이 이미 설치되었을 가능성이 높다고 판단된다. 이에 관해 ISIS는 2011년 4월 11일자 보고서에서 원자로의 출력에 비해 격납용기의 규모가 너무 크다고 지적하기도 하였다. 그러나 격납용기의 규모

가 클 경우 상대적으로 기기출입구도 클 것이기 때문에 원자로의 반입이 가능할 수도 있다고 여겨진다.

표 Ⅲ-4 경수로 건설 현장 위성사진(2009.9~2012.8)





2012.8.6 영상

(1) 북한의 경수로 자력 건설 가능성

북한이 경수로를 자체적으로 건설할 기술이 있는지에 대하여 많은 의문이 제기되고 있다. 그러나 북한의 기술력과 산업생산력에 대한 정보가 부족하기 때문에 정확한 판단이 어려운 실정이다.

현재 북한은 우리나라에서 사용하는 경수로와 같은 설비를 수십년 내로 자체 생산할 수 있는 가망성은 거의 없어 보인다. 이런 규모의 경수로를 자체적으로 건설하기 위해서는 북한이 극복해야 할 기술적 문제가 많고 필요한 기자재 생산능력이 너무나 부족하기 때문이다. 현재 전 세계적으로도 상용할 수 있는 규모의 경수로를 순수하게 자국내 기술과 생산 설비만 사용하여 건설할 수 있는 나라는 거의 없다. 아마도 러시아, 프랑스, 일본 정도의 나라가 순수하게 자국내 기술과 장비로 상용 경수로를 건설하는 것이 가능할 것이다. 경수로를 자력으로 건설하기 위해서는 원자로 및 터빈계통, 발전기 계통, 보조계통, 기기 설치를 위한 건물 및 구조물과 관련 기기 일체를 자력으로 설계, 제작, 건설할 수 있어야 한다. 그러나 북한의 원자력 산업은 경수로와

는 그 궤를 달리하는 흑연로를 중심으로 발전시켜왔기 때문에, 경수로를 건설하려면 거의 모든 것을 기초에서부터 시작하여야 한다. 실제로 중국은 군사용 목적으로 사용되는 경수로(잠수함용 원자로)를 자력으로 개발하여 실전 배치하고 있으나, 상업용 경수로는 기술을 외국에서 도입하여 건설하고 이 경험을 바탕으로 경수로를 자력으로 건설하고 있다. 이는 자국에서 개발한 합선용 원자로를 기반으로 경수로를 건설하는 것은 경제성, 안전성, 개발기간 등을 고려할 때 실익이 없다고 판단했기 때문일 것이다. 중국과 북한의 원자력 기술 격차를 고려하면 북한의 경수로 자력건설이 얼마나 실현 가능성 없는 주장인가 하는 것을 알 수 있게 한다.

경수로 시스템 전체에 비교하면 부분적인 문제이지만 순수하게 자력으로 경수로를 건설·운영하려면 핵연료도 자력으로 생산해야 한다. 농축 프로그램이 성공적으로 이루어져 농축 우라늄이 공급된다 하여도 상용 경수로는 금속연료를 사용할 수 없고 산화물 연료를 사용해야 하므로 산화물 연료를 자체적으로 개발해야 하는데 경수로용 산화물 연료 제조만을 위해서라도 여러 가지 북한이 보유하지 못한 기술을 개발해야 한다. 실제로 우리나라에서 경수로용 핵연료를 국산화하는 데는 상당부분 외국의 기술을 전수 받았음에도 불구하고, 오랜 시일과 여러 가지 시행착오를 거친 후에야 가능했다.

표 III-5 발전용 경수로 건설에 필요한 기술 분류와 북한의 능력 추정

분류	내용 및 북한의 능력 추정
원자로 1차 계통	<ul style="list-style-type: none"> - 노심: 경험 부족(IRT-2000 개조 경험 정도) - 제어봉: 경험 부족(5MWe의 경우와는 다름) - 원자로 용기: 경험 없음 - 냉각재 순환펌프: 경험 없음(우리나라도 현재 완전히 국산화 하지 못함) - 열교환기: 경험 없음 - 압력 유지 계통: 경험 없음 - 배관: 경험 없음 <p>※ 모두 내진설계를 필요로 하며, 대부분 100% 또는 그 이상의 redundancy를 가져야하나 북한은 내진 설계 경험이 없을 것으로 예상됨</p>
원자로 2차 계통	<ul style="list-style-type: none"> - 터빈: 상용 경수로에서 사용하는 것보다 소형은 제작 경험이 있을 것으로 추정 - 발전기: " - 복수기: " - 순환펌프: " - 배관: " <p>※ 모두 내진설계를 필요로 하며, 터빈을 제외하고는 대부분 100% 또는 그 이상의 redundancy를 가져야 하나 북한은 내진 설계 경험이 없을 것으로 예상됨</p>
원자로 비상 냉각 계통	<ul style="list-style-type: none"> - 경험 없음 <p>※ 내진설계 필요</p>
비상 전력 공급 계통	<ul style="list-style-type: none"> - 경험 없음 <p>※ 내진설계 필요</p>

분류	내용 및 복핵의 능력 추정
보조 계통	<ul style="list-style-type: none"> - 원자로 제어계통: 경험 없음, 계측제어 관련 기술 낮음 - 방사성 폐기물 처리계통: 경험 없음 - 용수 공급계통: 경험 있음(화력발전소와 유사함)
기기 제작 기술	<p>※ 위쪽의 모든 분류 항목에 해당하는 기기 제작기술</p> <ul style="list-style-type: none"> - 복핵의 기기 제작능력은 대용량 상용경수로에 필요한 요구 성능에 맞는 주요기기 생산까지는 미치지 못할 것임 - 철저한 QA, QC가 필요로 하나 복핵은 이에 관한 개념과 제도가 정립되어 있지 않음
재료 생산기술	<ul style="list-style-type: none"> - 특수강: 기술 낙후 - 합금: 기술 낙후 - 특수강관 및 튜브: 기술 낙후
건설기술	<ul style="list-style-type: none"> - 설계기술: 기술 낙후 및 경험 부족 - 시공기술: 기술 낙후 및 경험 부족
핵연료 관련기술	<ul style="list-style-type: none"> - 우라늄 농축기술: 확보 - UO₂ 분말 제조기술: 적절한 입도(粒度)를 갖는 분말 제조에는 상당한 기술 개발기간이 필요함 - UO₂ 소결체 제조기술: 경험 없음 - 피복관 제조기술: 경수로용 피복관 제조경험 없음 - 핵연료 집합체 제조기술: 경험 없음
기타 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 작업자 피폭관리: 경험 부족 - 운영기술: 경험부족

표 III-6 여러 나라의 경수로 건설 사례

국가	건설 사례	건설 능력
우리 나라	턴키방식으로 건설 후 기술 이전을 통해 자력 건설	설계/기기제작 시공 능력을 갖추고 있음.
중국	턴키방식으로 건설 후 기술을 이전 받아 자력 건설을 하는 과정 중	경수로의 원형이 되는 원자력 잠수함용 원자로를 자력으로 제작하고 있으나, 경제성 있는 상용 경수로는 해외에서 도입함.
인도	경수로 건설을 위한 해외 협력 추진 중	자체적으로 토륨사용 고속증식로를 개발할 정도의 기술능력을 지니고 있으나, 경제성 있는 상용 경수로는 해외에서 도입하고자 함.
이란	러시아에서 경수로 도입을 위해 노력 중	농축 능력을 어느 정도 갖추고 있고 연구용 중수로를 건설중이나, 경수로 자력 개발은 시도하지 않음.
북한	KEDO 지원을 통한 경수로 건설 중단	연구용 원자로 정도는 건설할 수 있을 것으로 추정됨.

(2) 경수로 건설 지연이유

북한의 경수로 건설이 원래 주장했던 2012년보다 지연된 정확한 이유는 확인이 어렵다. 특히 2010년 해커 박사의 방북 이후 서방측 전문가가 영변을 방문한 적이 없으며 북한 역시 이에 대해 특별한 언급이 없기 때문이다. 하지만 원인을 추측해보자면 다음과 같다. 물론 건설 지연 사유가 아래 열거한 사안 중 어느 하나 때문인지 또는 네 가지 모두가 복합적으로 작용한 것인지 아니면 그 밖의 다른 이유인지 명확하게 알 수는 없다.

(가) 핵심부품 제작/도입의 어려움

북한은 경수로를 건설하거나 운영해본 경험이 없기 때문에 원자로 압력용기나 원자로 냉각재 펌프 등 핵심부품을 설계·제작하는데 어려움을 겪고 있거나, 일부 기기를 국외에서 수입할 계획이었는데 UN의 제재 강화로 인해 해외로부터의 도입이 어렵기 때문일 수 있다.

(나) 핵연료 제조의 어려움

실험용 경수로가 발전용 원자로로서 역할을 하려면 핵연료가 산화물 연료가 되어야 한다. 금속 연료로도 원자로 운영은 가능하나, 운전 온도를 높일 수 없기 때문에 제대로 된 발전용 원자로의 기능을 하기 어렵다. 그러나 북한은 지금까지 원자로 연료를 금속 연료만 사용해왔고, 산화물 연료를 제조하거나 사용해본 경험이 없다. 특히 제대로 된 산화물 연료를 만드는 것은 쉽지 않다. 앞서 언급한 바와 같이 우리나라도 1980년대에 산화물 연료의 국산화를 위한 기술과 장비를 해외에서 도입한 이후에도 완전한 국산화까지 4~5년의 시간이 소요되었을 정도이다. 북한이 처음부터 성능 좋은 산화물 연료를 목표로 하는 것이 아닐지라도 핵연료 연구 및 제조에 필요한 기기들도 수출통제 대상에 포함된 것들이 많기 때문에 단시일 내에 산화물 연료를 제조하기는 쉽지 않을 것으로 여겨진다.

(다) 핵연료용 농축 우라늄 생산 지연

경수로 운전을 위해서는 초기 노심용으로 약 4톤 정도의 저농축 우라늄이 필요하다. 영변 농축시설이 설계용량(8,000kg-SWU/년)대로 운전되었다면 2012년 초에는 초기 노심에 필요한 저농축 우라늄을 생산할 수 있었을 것이다. 그러나 이 시설이 완전하게 가동되지 못했거나 생산된 농축 우라늄의 일부 또는 전부를 무기용 고농축 우라늄 생

산에 전용했다면 경수로 연료 제조에 필요한 저농축 우라늄을 확보하지 못했을 것이다. 또한 북한의 실험용 경수로 건설은 사실상 농축시설을 건설하고 운영하기 위한 명분으로 내세운 것이기 때문에 고농축 우라늄을 이용한 핵무기 개발 의지를 내세운 마당에 경수로 건설을 서두를 필요가 없을 수도 있다.

(라) 후쿠시마 사태로 인한 안전성 재점검과 이로 인한 설계변경
후쿠시마 원전 사고 이전에는 “흑연로는 체르노빌 사태와 같은 대규모 방사성 물질 누출 사태가 일어날 수 있지만, 경수로는 유사한 경우에도 미국 TMI 원전사고를 넘는 심각한 사고는 발생할 수 없다”고 생각했다. 그러나 후쿠시마 원전 사고 이후 잘못된 인식이라는 것이 증명되었다. 북한이 우라늄 농축시설 건설의 명분으로 경수로 건설을 추진했다 할지라도 경수호가 흑연로 보다 훨씬 안전하다고 여겼기 때문에 이전에 건설해본 적 없는 경수로를 건설하겠다고 결정했을 가능성도 높다. 그러나 후쿠시마 사태로 인하여 실험용 경수로의 설계와 안전 개념에 대하여 재검토를 실시하고 일부 설계변경을 실시했을 가능성이 있으며, 실제로 이러한 작업이 이루어졌다면 건설은 당연히 상당기간 지연될 수밖에 없었을 것이다.

다. 경수로 건설 및 운영 예상

앞서 기술한 바와 같이 북한은 원래 경수로 건설을 2012년에 완공하여 시운전할 계획이었다. 그러나 완공 예정시기를 1년 이상이나 지난 시점까지도 북한은 완공시기에 대한 새로운 언급이 없다. 38North는 2014년 중반에는 건설이 완료될 것이라 예측하고 있지만, 이들도 어떤 확신이 있는 것은 아니고, 막연한 추측일 뿐이다. 현 시점에서 확실한

것은 2014년 중반 이전에는 완공이 어렵고, 2014년 말 이전에 정상적인 운전에 돌입하기 어렵다는 것이다. 이 시기는 더 늦어질 가능성이 높다. 하지만 북한이 건설하고 있는 실험용 경수로로는 상업용으로 건설하는 경수로 수준에는 한참 못 미칠 것이라 예상되며 효율을 고려하지 않고 전기 출력을 낮게 유지하도록 1차 계통의 온도와 압력을 일반적으로 훨씬 낮추어 운전²⁸한다면 원자로 운전 자체는 성공적으로 이루어질 수도 있을 것이라 여겨진다.

라. 실험용 경수로 운영이 핵무기급 물질 생산에 미치는 영향

실험용 경수로의 열출력이 100MW이므로 이 원자로가 정상적으로 100% 출력으로 운영된다면 연간 약 15kg의 원자로급 플루토늄²⁹을 생산할 수 있을 것이다. 예상 플루토늄 생산량과 농축 우라늄 소요량은 운전형태에 따라 달라진다. 경수로가 정상적인 형태로 운전될 경우 생산되는 원자로급 플루토늄은 무기용으로 적합하지 않으나, 경제성을 무시하고 핵연료를 연소도가 낮은(700MWd/MTU 정도 또는 그 이하) 상태에서 인출하여 운전한다면, 상당량의 무기급 플루토늄을 생산할 수도 있다. 그러나 이 경우 운전의 연속성이 중단되어 플루토늄 생산총량이 감소할 뿐 아니라 핵연료용 농축 우라늄 소요량이 증가하게 될 것이다. 그러나 순수하게 핵무기 제작을 위한 핵물질 확보의 측면에서 보면 우라늄을 농축하여 경수로를 운영, 플루토늄을 생산하는 것보다는 농축시설에서 고농축 우라늄을 생성하여 핵무기를 제조하는

²⁸ 북한 경수로 평가를 위한 기초자료(부록 II) 참조.

²⁹ 플루토늄의 품질이 낮아(Pu-239의 함량이 60%정도) 핵무기에 사용하기는 곤란하고, 원자로 연료로 사용하는 플루토늄을 의미한다. 그러나 핵무기에 사용이 전혀 불가능한 것은 아니기 때문에 fizzle의 가능성이 높아진다. 무기급 플루토늄은 Pu-239 함량이 93% 이상인 것을 지칭한다.

것이 더 간단하고 효율적이기 때문에 이러한 가능성은 낮다고 볼 수 있다. 다만 운영되는 경수로가 고밀도의 중성자 빔을 형성할 수 있다면 3중수소를 생산하여 장기적으로는 증폭핵무기³⁰나 중성자탄 등을 생산할 수 있는 능력을 갖추어 좀 더 고도화된 핵무기를 보유할 수 있을 것이다.

³⁰- 핵무기 중심부에 소량(수~수십 g)의 3중수소를 넣어 핵무기의 폭발위력을 증가시킨 핵무기이다.

IV. 북한 핵실험의 포괄적 평가



1. 북한 핵실험 주요 경과

가. 제1차 핵실험

북한은 대포동 2호 등의 미사일 발사 시험 강행 이후 UN이 제1695호 대북 결의안을 채택하며 대북 압력 정책을 강화해 오자 2006년 10월 3일 “미국 제재 압력에 자위적 차원으로 조선민주주의인민공화국 과학 연구 부문에서는 앞으로 안전성이 철저히 담보된 핵실험을 할 것이다”라고 외무성 공식 성명을 발표하며 북한 최초의 핵실험을 실시할 것임을 밝혔다. 그로부터 6일 후인 10월 9일 오전 10시 35분, 한국지질자원연구원은 북한 화대군 부근에서 진도 3.9Mb의 인공 지진파를 감지하면서 북한의 제1차 핵실험을 확인하였으며, 곧바로 북한 조선중앙통신은 보도를 통해 북한 최초의 핵실험이 성공적으로 진행됐다고 공식적으로 발표하였다.

북한이 핵실험 실시를 발표하고 1주일이 지난 10월 16일 미국 국가정보국은 북한의 핵실험 추정장소 인근에서 채취한 대기 샘플에서 방사성 핵종을 탐지하였고 북한의 핵실험 위력은 1kT³¹미만이었다고 발표하였으며, 뉴욕 타임지는 정보 고위관계자의 말을 인용하여 북한이 플루토늄을 이용한 핵실험을 실시한 것으로 보인다고 보도하였다. 실제 실험 후 3~16일 사이에 미 공군, 한국/스웨덴, 유엔 산하 CTBTO(포괄적핵실험금지 조약기구) 등에서 각각 평소보다 높은 농도의 제논 동위원소가 검출되었고 채집한 방사성 핵종을 분석한 결과 북한은 제1차

31. 핵무기의 폭발 에너지는 TNT의 폭발력(kT)으로 환산 표시하는데, 1kT(kiloton)은 약 1,012cal(4.184×10¹² joule)로 계산된다. 하지만 TNT에 의한 화학적 폭발은 방출된 에너지의 대부분이 운동에너지나 폭발에너지로 방출되지만 핵폭발의 경우는 일부만이 이런 형태의 에너지로 방출되기 때문에 실제로 1kT의 핵폭발력은 TNT 1kT이 발생시키는 화학적 폭발력의 1/2 수준이라고 알려져 있다.

핵실험에서 플루토늄을 사용한 것이 공식 확인되었으며, 발생한 인공 지진의 진도 규모로 보았을 때 폭발 규모는 0.2~0.9kT로 추정되었다.

이렇듯 핵물질과 폭발 규모로 볼 때 북한의 제1차 핵실험은 물리적 관점에서 전체적으로 실패로 보는 시선이 많다. 즉 북한의 기폭 기술 부족으로 인해 핵물질이 충분히 분열하지 못하고 부분 폭발하는 fizzle 현상이 일어났다고 추정하며 북한이 개발한 핵무기가 아직 유용성이 없다고 결론 내렸다. 또한 ISIS는 평양 당국이 제1차 핵실험 전 중국에 4kT 위력의 핵실험을 실시한다고 통보하였지만 실제 관측은 이에 많이 못 미친 1kT이하였다는 점을 근거로 핵실험이 실패했다고 평가하였다.

하지만 북한의 최초 핵실험을 실패라고 선불리 보기 어렵다. 북한은 중국에 핵실험을 통보할 당시 신고서에 제1차 핵실험에 사용한 플루토늄의 양이 2kg정도라고 밝힌 바, 2kg의 플루토늄으로 4kT의 폭발력을 예상했다면 북한이 상당히 높은 수준의 핵무기 설계도를 입수하여 사용하고 있다는 추측을 가능하게 한다. 만일 북한이 제1차 핵실험부터 높은 수준의 설계도를 바탕으로 고난이도의 핵실험을 수행했다고 가정한다면 북한의 핵무기 설계 기술 수준은 우리가 예상하는 것보다 훨씬 진보된 것일 수도 있다. 북한의 제1차 핵실험 결과를 핵폭발 규모만으로 평가하여 실패라고 단정지어서는 안 되는 이유가 바로 이것이다.

나. 제2차 핵실험

북한은 2009년 5월 25일 북한은 제2차 핵실험을 강행하며, 핵프로그램의 재개를 국제사회에 알렸다. 북한 조선중앙통신은 “공화국의 자위적 핵 억제력을 강화하기 위한 조치의 일환으로 제2차 핵실험을 성공적으로 진행했다”라고 발표하며 제2차 핵실험을 공식화하였다. 미국 국

가정보국(Office of the Director of National Intelligence, 이하 ODNI)도 북한의 제2차 핵실험 실시를 공식 인정하였다. 국내외 기관이 발표한 북한의 제2차 핵실험에 의해 발생한 인공지진의 규모와 위치는 <표 IV-1>과 같다. 제2차 핵실험의 추정 위치는 제1차 핵실험과 마찬가지로 함북 길주군 풍계리로 제1차 핵실험 장소와 불과 수 km 떨어진 곳이다.

● 표 IV-1 북한 제2차 핵실험 규모 및 위치 추정

기관	지진 규모	추정위치
기상청, 한국지질자원연구원	4.5mb	제1차 실험 추정지로부터 약 3km 북서쪽 (북위 41.28 동경 129.06)
미국 지질연구소	4.7mb	제1차 실험 추정지로부터 약 5km 서쪽 (북위 41.30 동경 129.03)
유엔 산하 CTBTO	4.5mb	제1차 실험 추정지로부터 약 2km 동쪽 (북위 41.29 동경 129.05)

한국지질자원연구원 및 기상청에서 측정한 인공 지진파는 4.5Mb로 CTBTO가 측정한 값과 동일하였으며, 미국 지질연구소의 측정치인 4.7Mb 보다는 작았다. 제2차 핵실험의 지진 규모 측정치로 볼 때 추정 폭발력은 제1차 핵실험에 비해 수배 강한 수 kT으로 추정(<표 IV-2>)하고 있다.

● 표 IV-2 북한 제1, 2차 핵실험의 핵폭발 규모 추정

핵실험	지진 규모	핵폭발 규모	정상적 핵실험 추정 시
제1차	3.9Mb, 3.6MI	0.2~0.9kT	일부 성공(부분폭발)
제2차	4.5Mb, 4.4MI	1.2~5.2kT	대략적으로 성공 추정

제2차 핵실험은 제1차 핵실험 때와 달리 방사성 핵종 탐지에 관한 공개된 보고가 없다. 제1차 핵실험의 경우 핵실험 후 3~16일 사이에 핵실험과 관련된 핵종(Xe 등)이 탐지되었으나, 제2차 핵실험은 제1차 핵실험에 비해 폭발력이 높음에도 불구하고 방사성 핵종이 탐지되지 않았다. 이것은 북한이 방사성 핵종 누출을 방지하기 위해 핵실험 장소의 봉쇄 상태를 더욱 개선하는 등 제1차 핵실험에 비해 치밀하게 준비했기 때문으로 추정할 수 있다. 만약 방사성 핵종인 제논(Xe)이 탐지 되었다면 탐지된 핵종의 동위원소 비율($Xe-135/Xe-133$)을 분석하여 사용 핵물질의 추정이 가능했을 수 있을 것이다(핵종의 동위원소 비율에 따른 핵실험 사용 핵물질 구분과 관련된 내용은 다음 장에서 좀 더 자세하게 다룰 것이다). 하지만 그동안 북한이 폐연료봉의 재처리를 통해 상당량의 플루토늄을 확보했을 것으로 추정하는 바, 플루토늄을 사용했을 것으로 추측하는 것이 유력하다.

2. 북한 제3차 핵실험의 기술적 평가

북한은 제2차 핵실험 이후 국제사회의 압박에도 불구하고 우라늄 농축시설을 공개하고 미사일 발사 실험을 실시하는 등 국제사회를 지속적으로 위협하였다. 2012년 장거리 로켓 은하 3호 발사 실험에 따라 국제사회의 대북 제재가 더욱 강화되자 북한은 제3차 핵실험의 당위성과 강행의지를 수차례 천명하며 제3차 핵실험 실시 가능성을 높여 갔다. 북한의 핵실험 위협은 2013년 2월 12일 제3차 핵실험을 실시하면서 현실이 되었다. 북한의 제3차 핵실험은 북한 핵프로그램의 진척과 핵능력의 수준을 판단할 수 있는 중요한 사건이었다. 이 절에서는 북한의 제3차 핵실험에 따른 국내외 탐지 결과를 분석하고, 이에 따른

기술적 쟁점을 평가하고자 한다.

가. 북한 제3차 핵실험 개요

북한은 2013년 2월 12일 11시 57분경 풍계리 핵실험장에서 제3차 핵실험을 실시하였다. 북한 핵실험에 의한 인공 지진파가 수분 후 국내 기관에서 관측되었으며, 북한은 12일 14시 43분 조선중앙통신을 통하여 제3차 지하 핵실험이 성공적으로 진행되었다고 공식보도하였다. 북한의 제3차 핵실험에 의해 발생한 인공지진 강도는 제2차 핵실험의 4.5Mb 보다 강한 4.9Mb로 관측되어 핵실험의 폭발 규모가 더 증대되었음을 보여주었다. 또한 제2차 핵실험 때와 마찬가지로 핵실험 관련 방사성 핵종이 탐지되지 않아 어떤 핵물질을 사용하였는지는 판단하기 어려웠다.

● 표 IV-3 북한 제3차 핵실험 탐지 결과 요약

	제3차 핵실험	제2차 핵실험	제1차 핵실험	관련기관
일시(한국시간)	'13.2.12. 11:57	'09.5.25. 09:55	'06.10.9. 10:35	
장소	함북 길주 풍계리			
지진탐지	4.9Mb	4.5Mb	3.9Mb	기상청/한국지질자원연구원
	5.1Mb	4.7Mb	4.3Mb	미국 USGS
	4.9Mb	4.5Mb	4.1Mb	유엔 산하 CTBTO
	5.2Mb	4.8Mb	4.2Mb	독일 BGR
음파탐지	탐지	탐지	탐지 안됨	한국지질자원연구원
핵종탐지	불검출	불검출	탐지(미공군)	
환경방사능	특이사항 없음	특이사항 없음	특이사항 없음	한국원자력안전기술원

나. 핵폭발 규모 추정 및 기술적 분석

(1) 핵폭발 규모 추정

지하 핵실험의 폭발 규모는 핵실험시 발생하는 인공 지진파의 크기를 통해 추정할 수 있다. 과거 핵보유국들은 다양한 핵실험 조건에서 핵실험을 실시하고 이로부터 도출된 지진규모-폭발력 관련 여러 가지 경험 관계식을 핵폭발 규모 추정에 사용하고 있다. 그러나 지진 규모-폭발력 경험관계식은 핵실험 자료 및 연구자에 따라 <표 IV-4>에서 보는 바와 같이 다양한 관계식이 제시되어 있으며 지질조건, 실험조건에 따라 적용 가능한 관계식이 상이하다는 한계가 있다. 즉 동일한 규모의 폭발력 일지라도 핵실험장의 지질 특성, 핵실험장 구조(실험 깊이, 밀폐구조 등), 지진파 전파 매질의 감쇄 특성에 따라 측정되는 지진파가 다를 수 있기 때문에 각 측정 기관별로 측정된 지진파를 어떤 경험식에 대입하느냐에 따라 추정되는 폭발력이 다를 수 있다. <표 IV-5>를 살펴보면, 북한의 제3차 핵실험시 각 국가별로 측정된 인공지진 값과 각 경험 관계식을 이용하여 도출한 핵폭발 규모 추정값이 작게는 4kT에서 높게는 40kT에 이르는 다양한 값을 보여주고 있는 것 역시 이 같은 이유에서 기인한다. 특히 한반도 지역에서는 과거 핵실험이 이루어진 바가 없으므로 지진규모와 폭발력 사이의 관계식이 확립되어 있지 않아 타 지역에서 수행된 경험식들을 적용할 경우 북한 제3차 핵실험의 고유 특성을 반영할 수 없기 때문에 이 같은 추정 방식은 불확실성이 존재할 수밖에 없다. 독일 연방지질자원연구소(BER)는 북한의 제3차 핵실험 위력이 40kT에 달한다고 발표한 것도 이러한 오차적 요소를 고려하지 않고 미국 네바다 핵실험장의 경험식인 Murphy(1981) 방식을 그대로 사용할 때 매우 보수적인 결과로 이를 객관적으로 평가하기에는 무리가 있다. 일반적으로 지질환경이 밝혀지지 않은 불특정 미확인 실험지역에 대한 폭

발 규모 추정은 CTBTO에서 사용하는 MIS 방식이 사용되며, 이 식을 통해 약 8~12kT정도의 폭발력을 보인 것으로 추정할 수 있다. 이와 같이 북한의 제3차 핵실험에 대한 폭발력 규모 추정값은 각 나라별로 차이가 있으나, 대부분의 전문가들이 제3차 핵실험이 제2차 핵실험 보다 약 2배 이상의 규모라는 것에는 동의하고 있다.

● 표 IV-4 다양한 지진규모-폭발력 경험 관계식

No	관계식	출처	도출 실험지(암석매질)
1	$M_b = 4.0 + \log(y)$	CTBTO IMS	미확인(불특정) 실험지역
2	$M_b = 3.92 + 0.81 \cdot \log(y)$	Murphy(1981)	미국 네바다 핵실험장 (응회암/유문암)
3	$M_b = 4.45 + 0.75 \cdot \log(y)$	Ringdal(1992)	카자흐스탄(구소련) shagan 핵실험장 (혈암)
4	$M_b = 3.79 + 0.91 \cdot \log(y)$	Murphy et al. (2001)	프랑스 Sahara (화강암)
5	$M_b = 4.38 + 0.83 \cdot \log(y)$	Murphy et al. (2001)	카자흐스탄(구소련) Azgir (염암)

※ Mb(Body wave magnitude): 실체파 규모

● 표 IV-5 지진 규모 및 경험식에 의한 제3차 핵실험 폭발 규모 추정

관측 기관	지진 규모	핵폭발규모				
		IMS	Murphy (1981)	Ringdal	Murphy (2001)	Murphy* (2001)
한국지질자원연구원/ 유엔 산하 CTBTO	4.9(Mb)	7.94	16.21	3.98	16.58	4.2
미국 지질조사국 (USGS)	5.1(Mb)	12.59	28.63	7.36	27.51	7.37
독일 연방지질 자원연구소(BER)	5.2(Mb)	15.85	38.04	10.00	35.43	9.72

※ $M_b = 4.38 + 0.83 \cdot \log(y)$, 카자흐스탄

(2) 핵폭발 규모와 핵물질 사용량

북한이 제3차 핵실험에 사용한 핵물질의 양은 다양한 경험식에 의해 핵폭발 규모와 북한의 핵무기 기술 수준에 따라 추정해 볼 수 있다. 1995년에 미국 Natural Resources Defense Council에서 발간한 보고서³²는 핵실험시 요구되는 핵물질량을 핵폭발력과 연계하여 설명하고 있는 바, 이를 바탕으로 제3차 핵실험에서 사용한 핵물질의 양을 추정하고자 한다.

(가) 플루토늄탄일 경우

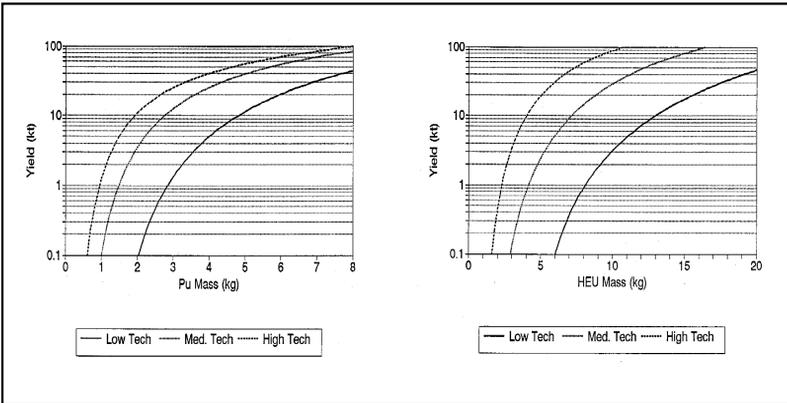
만약 북한이 플루토늄탄 제조 기술이 낮다고 가정할 경우 제3차 핵실험에서와 같이 5~10kT 이상의 폭발력을 내기 위해서는 순도 90% 이상의 Pu-239(무기급 플루토늄)이 5kg 이상 사용되었을 것으로 추정된다(<그림 IV-1> 참조). 이는 미국이 나가사키에 투하했던 플루토늄탄의 효율(~21kT, 폭발효율 20%)과 유사한 것으로, 만약 북한이 이러한 낮은 기술수준이라고 한다면 제조시 핵물질 손실을 고려하여 실제로는 5kg 이상의 플루토늄이 사용되었을 것으로 보인다.

하지만 북한은 제1차 핵실험 때부터 상당히 높은 수준의 핵무기 설계를 입수하여 이를 바탕으로 핵실험을 수행했다고 추정되고 있으며, 제3차 핵실험의 경우 폭발력이 제2차 핵실험보다 2배 이상으로 평가됨에 따라 제2차 핵실험 이후 북한의 핵무기 설계 기술은 이전보다 진일보했다고 평가할 수 있다. 따라서 북한은 중급 이상의 핵무기 설계 기술을 보유하고 있다고 보는 것이 더 유효할 것이며, 북한이 중급

³²- Thomas B. Cochran and Christopher E. Paine, "The Amount of Plutonium and Highly-Enriched Uranium Needed for Pure Fission Nuclear Weapons," Natural Resources Defense Council (1995.4.13).

이상의 핵무기 기술을 보유했다고 가정하면 3kg 이하의 플루토늄으로 제3차 핵실험과 같은 5kT 이상의 폭발력을 낼 수 있었을 것으로 추측할 수 있다.

● 그림 IV-1 기술력에 따른 폭발력과 플루토늄 및 고농축 우라늄 필요량



(나) 우라늄탄일 경우

북한이 제3차 핵실험시 고농축 우라늄을 사용하고, 기술수준이 낮다고 가정하면 5~10kT 수준의 폭발력을 내기 위해서는 11~14kg 이상의 고농축 우라늄을 사용했을 것으로 예상된다.³³ 하지만 중급이상의 우라늄탄 제조 기술을 가지고 있다면 6kg 미만의 고농축 우라늄으로도 5kT 이상의 폭발력을 낼 수 있다고 추정할 수 있다. 북한의 우라늄탄 제조 기술 수준에 대한 정보 부족으로 보유 기술의 수준을 정확히 구분하기는 어렵지만, 고농축 우라늄 확보 및 핵무기 제작에 필요

33. 일반적으로 고농축 우라늄을 이용하여 핵무기를 만들 경우에는 약 15kg 내외의 우라늄을 사용한다고 알려져 있으나 본 보고서에서는 다른 요인들(기폭장치)을 고려하여 조금 더 보수적인 결과값을 제시하고 있음.

한 시간이 충분치 않았음을 고려한다면, 우라늄탄 제작 기술 수준이 높지는 않을 것으로 여겨진다.

즉 제3차 핵실험에서 북한이 계획한 대로 폭발력이 발생하였고, 북한의 보유기술을 플루토늄탄은 중급 이상, 우라늄탄은 중급 미만으로 가정하면, 플루토늄탄일 경우 사용된 플루토늄은 3kg 이하, 우라늄탄일 경우 10kg 이상의 고농축 우라늄이 사용되었을 것으로 추정할 수 있다.

다. 사용 핵물질 추정 분석

(1) 핵실험 사용 핵물질 분석 방법

핵실험에 사용된 핵물질은 핵폭발시 방출되는 제논 동위원소 3개 핵종(Xe-133, Xe-133m, Xe-135)과 크립톤 동위원소(Kr-85)의 비율을 분석함으로써 구별한다. 핵실험의 경우 핵분열로부터 불활성 기체의 방사성 동위원소들이 발생되며, 지하 핵실험이라도 깊은 심도 및 완벽한 차폐를 제외하고는 대개 이들 핵종이 대기 중으로 방출되기 때문에 탐지할 수 있다. 특히 우라늄탄과 플루토늄탄은 핵폭발시 방출되는 제논(Xe)과 크립톤(Kr)의 비율이 각기 다르므로 두 방사성 핵종의 비(Xe-133, Xe-133m, Xe-135/Kr-85)를 측정하여 핵실험에 사용된 핵물질의 종류를 추정할 수 있다. 아래 <표 IV-6>에서 살펴보면, Xe 및 Kr의 반감기, 생성량 등을 고려하여 핵실험 이후 단기(2~3일 이내), 중기(3~6일), 장기(1~2주)로 구분하여 핵종 비를 구분하여 활용 가능하며, 우라늄탄의 경우 핵분열시 Xe-133/Kr-85의 구성비가 4.7이고 플루토늄탄의 경우 Xe-133/Kr-85의 구성비는 11.7이므로, 이를 기준으로 핵폭발에 사용한 핵물질을 구별해 낼 수 있다.

● 표 IV-6 핵실험 이후 기간별 핵종

구분	사용 핵종 비	특징
단기	Xe-135m/Kr-85m (반감기 15.29분/4.48시간)	초기 생성량이 많아 검출이 용이하나 2~3일 후 그 양이 급격히 줄어들며, Kr-85m과 유사한 감소 현상을 보임.
중기	Xe-135/Kr-85 (반감기 9.14시간/10.72년)	핵폭발 후 3~4일 정도에 생성량이 많은 반면 그 이후 양이 급격히 감소함.
장기	Xe-133/Kr-85 (반감기 5.243일/10.72년)	가장 장기간 동안 생성됨.

그러나, 원자력발전소 및 재처리 공장에서도 핵분열과 연관된 불활성 기체가 발생하므로 탐지된 핵종이 핵실험에 의한 불활성 방사성 기체인지를 확인해야 한다. 기존 원자력 시설에서 발생한 불활성 기체와 핵실험에 의한 불활성 기체 역시 동위원소 핵종(Xe-131m, Xe-133, Xe-133m, Xe-135)의 비율을 분석하면 확인 가능하지만, 제논(Xe) 동위원소가 동시에 검출될 확률은 높지 않고, 크립톤(Kr)의 경우 백그라운드 준위가 높아 핵실험 탐지 및 분석에 유리한 결과를 도출하기가 어렵다. 또한 시간이 지날수록 방사능 농도비율의 차이가 감소하여 제논(Xe) 동위원소 최소 탐지농도(<표 IV-7>) 이상의 핵종 탐지가 어려워져 사용 핵물질의 구별 가능성이 더욱 낮아진다. 더불어 이러한 이론적인 계산은 핵종 방출 시나리오, 핵무기 설계·계산에 사용된 피션 라이브러리(fission library)에 따라 동위원소비율이 다르게 계산될 수 있어서 정확하게 핵물질을 확인하는 데에는 한계가 있다.

● 표 IV-7 제논(Xe) 동위원소의 최소 탐지농도(MDC)

Radioactive Xenon	Half-life	MDC (mBq/m ³ air)
Xe-131m	11.934 days	10
Xe-133	5.243 days	0.5
Xe-133m	2.19 days	4
Xe-135	9.1 hours	2

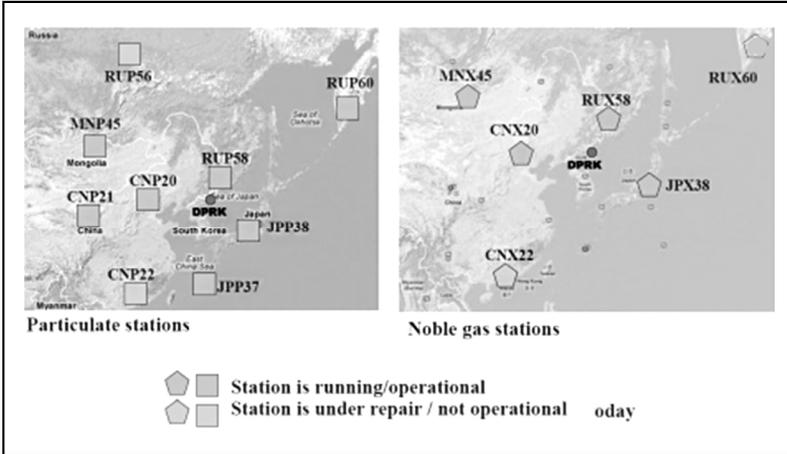
(2) 제3차 핵실험 방사성 핵종 탐지 결과

우리나라는 북한의 제3차 핵실험 이후 KINS(한국원자력안전기술원), KAERI(한국원자력연구원) 등이 운용중인 6대의 방사성 핵종 탐지 장비를 이용하여 육상, 공중, 해상에서의 불활성 방사성 기체 포집 활동을 수행하였으나, 제2차 핵실험시와 같이 핵실험과 관련된 불활성 방사성 기체 포집에는 실패했다. 유엔 산하 CTBTO 역시 북한 주변에 총 5개의 제논(Xe)탐지 관측소와 총 6개의 입자성 방사성 핵종 관측소를 운용(<그림 IV-2>)하였으나 방사성 제논(Xe)기체를 탐지하지 못했다고 발표했다.

● 표 IV-8 국내 방사성 핵종 탐지 결과

	분석장비 및 분석횟수		분석핵종	분석결과
	분석장비	분석횟수		
육상	고정식 I	5회	제논(Xe)	비검출
	고정식 II	4회		
공중	이동식(항공기 탑재)	2회	입자성 방사성 핵종	비검출
해상	이동식(선박 탑재)	2회	제논(Xe)	비검출
계		13회		비검출

● 그림 IV-2 유엔 산하 CTBTO 운용 핵종 탐지 관측소



※ MN45(Ulaanbaatar), CN20(Beijing), CN21(Lanzhou),
RU58(Ussuriysk), RU60(Kamchatskiy),
JP37(Okinawa), JP38(Takasaki)

이는 핵실험 장소의 봉쇄상태(지질특성, 핵실험 깊이, 지하강도의 봉쇄품질 등에 따라 다름)가 좋아 대기 누출량이 적기 때문인 것으로 추정된다. 핵실험 장소를 봉쇄하는 것은 대규모 핵실험의 경우가 소규모 핵실험보다 용이하며, 이는 핵실험 규모가 커질수록 방사성 핵종이 누출될 수 있는 틈(crack)을 막아주는 소위 ‘stress containment cage’가 크게 형성되기 때문에 봉쇄효과가 커지는 것으로 알려져 있다.³⁴ 또한 우리나라와 북한의 경우, 지하수층이 발달해 있기 때문에 핵실험으로 인해 발생한 핵분열 생성물들이 지하수층을 뚫고 대기중으로 누출되기 어려울 수도 있으며, 제3차 핵실험에서 사용된 수평터널 구조

³⁴- National Research Council, *The Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Technical Issues for the United States* (Washington D.C.: The National Academics, 2012).

핵실험장의 봉쇄상태가 수직터널 구조에 비해서 봉쇄를 잘했기 때문 이라고 평가되기도 한다. 실제로 수직터널 구조의 핵실험장에서 실시 한 제1차 핵실험 때는 제논(Xe)이 탐지된 바 있다. 북한은 제3차 핵실험 후 조선중앙통신을 통하여 “핵실험이 높은 수준에서 안전, 완벽하게 진행되어 주위생태환경에 그 어떤 부정적 영향도 주지 않았다는 것이 확인되었다”며 핵실험으로 인한 방사성 핵종이 누출되지 않았음을 시사한 바 있으며, 이에 국제사회는 북한이 제3차 핵실험에 사용한 핵물질을 단정하지 못하고 추정에만 의지하고 있다.

(3) 제3차 핵실험 사용 핵물질 추정

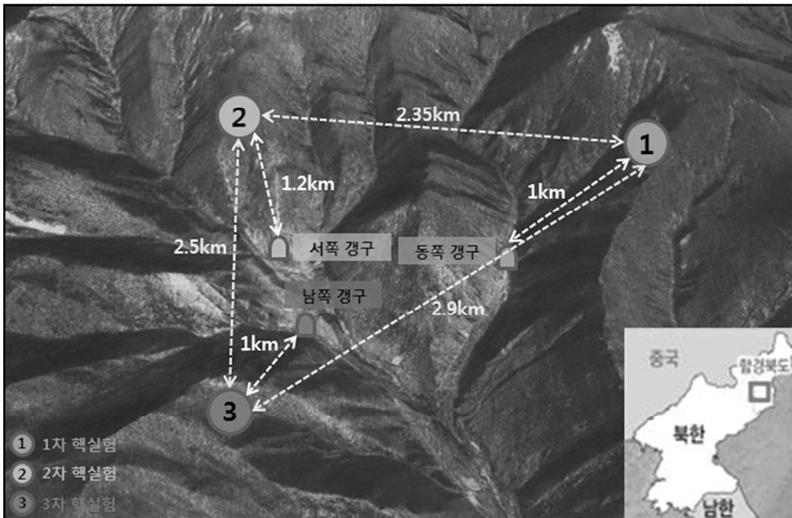
북한은 제3차 핵실험 이후 “다종화된 우리 핵억제력이 우수한 성과 물리적으로 과시됐다”고 공식 발표하며 제3차 핵실험에 사용된 핵물질이 플루토늄이 아닌 고농축 우라늄임을 암시하였다. 또한 북한은 ‘폭발력이 크면서도 소형화·경량화 된 원자탄’이라 밝힘에 따라 고농축 우라늄을 사용한 핵실험이었음을 우회적으로 표현하고 있다. 최근의 북한 정황이나 환경을 고려하였을 때 북한이 고농축 우라늄을 확보하고 이를 사용했을 가능성도 크다. 이렇듯 제3차 핵실험은 플루토늄 보다는 고농축 우라늄을 사용했을 가능성에 좀 더 무게를 두고 있으나, 북한은 영변 원자로 및 재처리 시설을 활용하여 플루토늄을 지속적으로 추출하여 확보한 것으로 알려져 있는 바, 북한이 제1, 2차 핵실험에서 사용한 것과 마찬가지로 플루토늄 기반의 핵실험을 실시했을 가능성도 여전히 존재한다.

라. 풍계리 핵실험장에 대한 기술적 분석

(1) 풍계리 핵실험장 개요

함경북도 길주군 풍계리에 속해있는 북한 핵실험장은 만탑산(2,205m) 중턱에 위치하고 있으며, 북한의 제1, 2, 3차 핵실험이 이 장소에서 실시되었다. 풍계리 핵실험장은 산악지형을 활용하여 산 하부에서 굴착하여 만든 터널로, 제1차 핵실험이 실시된 터널과 제2차 핵실험이 실시된 터널은 불과 2.35km 밖에 떨어져 있지 않다고 추정하고 있다. 제1차 핵실험이 실시된 동쪽 갱도 왼편의 산을 중심으로 서쪽 갱도, 남쪽 갱도가 현재 굴착되어 핵실험 장소로 사용되었으며, 남쪽 갱도 입구로부터 북쪽으로 150m 지점에 지휘통제 병커로 추정되는 건물이 있는 것으로 알려져 있다.

● 그림 IV-3 풍계리 핵실험장 개요



(2) 안전심도 분석

풍계리 핵실험장의 산악 지형은 방사성 물질 봉쇄 등 지하 핵실험을 안전하게 수행하기 위한 깊이(안전심도) 확보에 중요한 역할을 하고 있는 것으로 분석된다. 안전심도는 지하 핵실험의 중요한 고려요소로서 핵무기 설계위력의 상한과 하한을 고려하여 방사성 물질을 완전히 봉쇄할 수 있는 안전상한치로 설정되며 일반적인 지하 핵실험의 안전심도는 다음 식으로 계산 가능하다.

$$\text{깊이(m)} = \text{비례심도계수(m/kT}^{1/3}) \times Y^{1/3} (Y \text{ in kton, 폭발력})$$

안전심도는 폭발위력, 암석매질, 지질구조 등에 따라 달라지는데, 미국은 실험을 통해 이와 같은 조건을 반영한 비례심도계수를 도출하였으며 이를 통해 안전심도를 설정할 수 있다. 안전심도는 혈암, 규산염암 등 연암매질보다 화강암 암반의 경암매질에서 더 커야 하며, 위력이 크면 안전심도는 깊어진다. 풍계리 핵실험장은 우리나라의 일반적인 화강암 매질로 방사성 물질의 누출 위험이 연암매질(층적토 등)에 비해 커서 기폭실이 연암매질보다 더 깊은 곳에 위치해야 할 것으로 판단된다. 북한이 제3차 핵실험과 같이 10~15kT 정도의 폭발력이 발생한다면 방사성 물질의 누출 방지를 위해 400m 이상의 깊이를 가지고 있는 갱도가 필요할 것으로 보이며, 풍계리 핵실험장의 산악구조는 이러한 조건을 만족하는 것으로 판단된다.

북한 풍계리 핵실험장은 만탑산에 위치하고 있는데, 현재 제3차 핵실험 위치로 추정되고 있는 남쪽 갱도는 만탑산 정상까지 대략 380m의 깊이로 알려지고 있으며, 따라서 북한이 굴착 작업 등 여러 조건에서 어려운 수직형 갱도보다는 안전심도를 충분히 확보할 수 있는 수평형 갱도를 이용하여 핵실험을 실시했던 것으로 분석된다.

● 표 IV-9 핵무기 위력과 암석매질에 따른 최소 비례심도와 안전심도

위력(kT)	최소 비례심도(m/kT ^{1/3})			최소 안전심도(m) ³⁵		
	혈암	화강암	규산염암	혈암	화강암	규산염암
2	107	201	128	134.8	253.2	161.3
20	100	170	82	271.4	461.4	222.6
200	90	128	55	526.3	748.5	321.6
2000	70	82	30	881.9	1033.1	377.9

● 표 IV-10 화강암반지역에서의 폭발위력에 따른 안전심도

위력(kT)	3.5	15	35	100	300	1,000
안전심도(m)	295	410	490	620	720	880

(3) 핵실험장 구조

성공적인 핵실험을 수행하기 위해서는 핵실험시 발생하는 방사성 기체 및 물질의 누출 방지/안정적 봉쇄, 실험 자료 확보 등이 필수적이며, 이를 위해 핵실험장의 세밀한 설계가 요구된다.

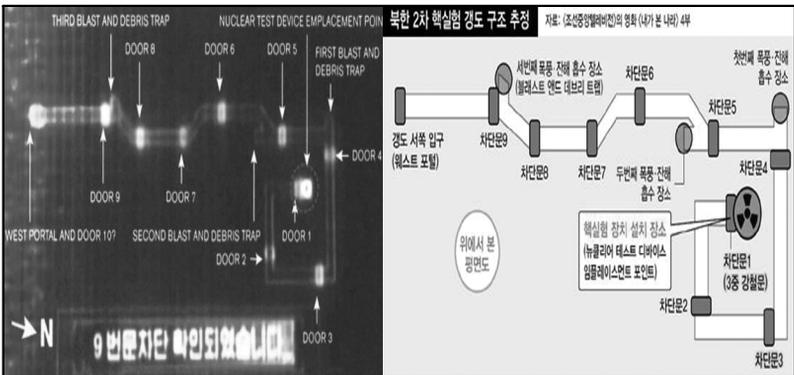
북한은 2013년 2월 5일 제2차 핵실험 상황을 담은 영상을 공개했는데, 공개된 영상에서 제2차 핵실험 당시 사용했던 갱도가 낚시바늘 형의 수평 갱도 구조를 가지고 있는 것으로 나타났다. 북한이 공개한 낚시바늘형 구조의 갱도는 9개의 차단문(또는 차단벽)과 3개의 폭풍잔해 흡수공간이 있으며, 핵실험 장비 설치장소에서 4번 차단문까지는

³⁵ 이춘근, 『지하 핵실험에 대한 과학기술적 이해』 (서울: 과학기술정책연구원, 2007) 참조.

충격완화를 위해 모두 직각으로 꺾여 있는 구조를 보이고 있다. 이러한 낚시바늘형 갱도는 폭발지점 부근의 갱도를 굴곡형으로 굴착하여 핵실험 충격을 견딜 수 있는 능력을 향상시킨 것으로 방사성 물질 등의 봉쇄력을 개선한 구조이다. 북한은 제1차 핵실험 당시 방사성 물질이 누출된 것을 보완하기 위해 차단시설을 보완한 것으로 보이며, 실제 제2차 핵실험에서는 방사성 핵종을 탐지하지 못함으로써 북한이 계획한 대로 방사성 물질 봉쇄 능력이 향상된 것으로 평가된다.

북한이 제2차 핵실험 당시 방사성 물질 누출 봉쇄에 성공함에 따라 제3차 핵실험에서도 제2차 핵실험에서와 마찬가지로 낚시바늘형 구조의 갱도를 그대로 활용했을 가능성이 크다.

● 그림 IV-4 북한 제2차 핵실험 장소의 낚시바늘형 갱도 구조(추정)



V. 북한 핵능력 평가 및 전망



1. 북한의 무기급 핵물질 보유량 추산

앞장에서 서술한 북한 핵무기 관련 주요 시설과 최근 현황 및 제1, 2, 3차 핵실험에 대한 평가를 바탕으로 현재 북한이 보유한 무기급 핵물질을 추산해 볼 수 있다. 이 절에서는 사용후핵연료의 재처리를 통해 확보하고 있는 무기급 플루토늄과 2,000개 이상으로 추정되는 원심분리기를 이용하여 생산 가능 및 보유하고 있는 무기급 고농축 우라늄의 양을 과거 북한의 핵능력과 현재 시설 및 기술에 대한 추정을 통해 추산해 보았다.

가. 무기급 플루토늄 보유량 추산

북한이 5MWe급 영변원자로를 이용하여 지금까지 생산/추출한 플루토늄량은 최대 50kg 정도로 추정되나, 여기에는 추정근거가 되는 가동률이 상당한 오차 가능성을 지니고 있으므로, 이를 감안하면 북한이 분리한 플루토늄량은 40 ± 5 kg 정도로 추정할 수 있다.³⁶ 또한 북한은 제1차 핵실험 당시 사용한 플루토늄의 양이 2kg을 약간 넘는 양이라고 주장했으나, 외부 전문가들은 3~4kg일 것이라고 판단하고 있다. 또한 제2차 핵실험과 제3차 핵실험의 경우 제1차 핵실험의 경우보다 폭발력이 증가되어 이것이 동일한 설계를 기폭용 고폭약(high-explosive)의 양만 변화시켰다는 주장, 또는 플루토늄의 양만 늘렸다는 주장 등 전문가들 사이에서 의견이 분분하긴 하지만 앞서 북한의 핵무기 기술과 폭발력으로 추정된 제2, 3차 핵실험의 플루토늄 총 사용량은 6~8kg 정도가 될 것으로 보고 있다. 따라서 북한은 3차례³⁷에 걸쳐 실시한 핵

³⁶ KINAC/TR-008/2011, “북한핵 프로그램과 검증,” p. 19.

³⁷ 제3차 핵실험에서 플루토늄을 사용했는지, 고농축 우라늄을 사용했는지 알 수 없으나, 플루토늄을 사용한 것으로 가정한다.

실험에서 9~12kg의 플루토늄을 사용했다고 가정하면 북한이 현재 보유한 분리된 플루토늄량은 약 30 ± 5 kg 정도가 될 것으로 추산된다. 이와 관련하여 도쿄 신문은 북한의 무기급 플루토늄 보유량이 26kg, 재처리되지 않은 플루토늄이 약 7kg(이후 재처리함)이라고 보도한 바, 이것을 사실로 가정한다면 약 33kg이 되며, 그 후 제3차 핵실험을 감행한 것을 감안하면 남은 양은 최소 30kg 이상이라고 평가되므로, 앞선 추산값의 신뢰성을 뒷받침 해주고 있다.

나. 무기급 고농축 우라늄 보유량 추산

북한의 고농축 우라늄 보유량 추산은 농축시설에 대한 정보의 부족으로 플루토늄의 경우보다 어렵다. 플루토늄의 경우 영변 원자로, 재처리 시설 등 생산 시설이 분명하고, 이들 시설의 능력이 어느 정도 파악되어 있으나 농축시설의 경우, 이러한 자료가 부족하여 대부분 가정과 추정에 의존할 수밖에 없기 때문에 추정량에 오차가 크다.

앞서 III장에서 북한 농축시설에 대한 현황 분석을 통해 북한이 2007년부터 원심분리기 대량생산(연간 1,000개)을 시작하여 농축시설을 성공적으로 운영하고 있다면 2013년 말 기준으로 현재까지 보유 가능한 농축 우라늄 생산용 원심분리기 수는 최대 6,000개에 달할 것이라고 평가한 바 있다. 이를 바탕으로 고농축 우라늄의 최대 보유량을 추산해 보고자 한다.

북한이 2010년 우라늄 농축시설을 공개하기 이전에 원심분리기 1,000개 정도를 보유하는 시설을 2008년부터 운영했다고 가정하고, 농축시설을 공개한 이후 추가로 비밀 시설을 2011년부터 운영했다고 가정했다. 또한 북한이 현재 크기의 2배로 증설중인 우라늄 농축 공장의 농축 능력도 현재 보유시설과 동일하다고 가정하여 연간 농축 능력을 추산하면, 약 24,000kg-SWU에 달한다.

표 V-1 북한의 우라늄 농축 능력과 고농축 우라늄 보유량 추산표

시설	가동 기간	누적 가동 기간	원심분리기 [개]	농축 능력 [kg-SWU/년]	누적 농축일량 [kg-SWU]	HEU(90%) 생산 가능량 [kg]
영변 농축 시설	2010.11.~현재	3년	2,000	8,000	24,000	120
	2013~(증설중)	-	2,000	8,000		
제3의 시설	2008.6.~현재	5.5년	1,000	4,000	22,000	110
	2011.6.	3.5년	1,000	4,000	14,000	70
계			6,000	24,000	46,000	300

물론 실제에 있어서는, 원심분리기의 가동률이 100%가 되지 못할 가능성이 높고 100MWth 실험용 경수로를 위한 저농축 우라늄 생산에 사용된 부분이 있을 것이며, 고농축 우라늄 생산을 위한 중간단계 농축 과정에 있는 양이 상당할 것이므로 실제로 보유한 고농축 우라늄의 양은 <표 V-1>의 값(300kg)보다는 적을 것이다. 하지만 제3의 비밀 시설을 제외하고 영변 시설의 운영만으로도 최소 100kg 이상은 보유가 가능할 것으로 예상된다. 또한 ISIS가 추정하 대로 북한이 영변 우라늄 농축시설을 약 2배 정도 확장하여 동 시설이 완전히 가동된다면 영변 시설만으로 연간 약 80kg의 고농축 우라늄을 생산할 수 있을 것이다. 일반적으로 미사일에 탑재되는 우라늄탄 제작에 소요되는 고농축 우라늄 양이 15kg 내외인 것을 고려하면, 북한이 전략 핵무기를 만들기 위해서는 무기당 최소 20kg 정도의 고농축 우라늄이 소요될 것으로 예상되는 바, 향후 북한이 영변 시설의 증축을 통해 지속적으로 고농축 우라늄을 생산할 경우 연간 4개 정도의 전략 핵무기를 제조할 수 있는 양임을 알 수 있다.

이처럼 2013년 말 북한이 보유한 고농축 우라늄의 최소량은 100kg 이상이 될 것으로 추산되며, 기존 농축시설이 100% 가동되고 영변 농축시설의 확장을 통한 성공적인 운영 등을 가정한다면 향후 연간 40~120kg씩 고농축 우라늄 보유량이 증가할 것으로 판단된다. 만일 북한이 기존의 농축기술을 바탕으로 원심분리기를 계속적으로 늘려간다면 북한의 고농축 우라늄 보유량은 더 빠르게 증가할 수도 있을 것이다.

2. 북한의 핵탄두 수 추산 및 실전배치 가능성 전망

가. 플루토늄탄

보유하고 있는 무기급 플루토늄으로 핵무기 1개를 제조하는데 필요한 양은 핵무기 설계, 제조기술, 목표로 하는 탄두의 중량과 폭발력에 따라 달라진다. 이로 인해 북한이 보유한 플루토늄으로 몇 개의 핵무기 제조가 가능한가를 추산하는 것은 어려운 문제이다.

특히 내폭형으로 제작되는 플루토늄탄은 동일한 기술수준이더라도 목표한 폭발위력을 동일하게 하였을 때 핵물질의 양을 증가시키면 내폭용 고폭약의 양이 줄어들어 결과적으로 탄두 크기와 중량이 줄어들게 된다. 북한이 운반 수단인 한계(미사일 탄두 무게 500kg, 직경 50cm) 때문에 어느 정도 안전성을 고려하여 탄두 숫자를 희생하더라도 미사일 탑재용으로 대량(6~8kg/탄두)의 플루토늄을 사용하여 전체 장치의 크기 및 중량을 줄이고 폭발의 신뢰성을 높이는 방법을 선택한다면 보유한 30kg으로 실전배치용 탄두를 4~5개 제조할 수 있을 것이다. 이 경우 핵실험시 낮은 기술로 만든 기폭장치를 사용하여도 확실하게 20kT급 이상의 성공을 보장할 수 있을 것이다. 또 다른 선택

으로 플루토늄 6~8kg을 사용한 탄두를 2~3개 제조하고, 남은 플루토늄(10~15kg)으로 플루토늄이 적게(3~4kg/탄두) 사용되는 설계로 핵탄두를 제작한다면 추가로 3~4개의 핵탄두를 제조할 수 있을 것이다. 물론 전체 플루토늄을 사용하여 핵탄두 숫자를 늘리려 한다면 8~10개의 탄두(플루토늄 3~4kg/탄두)를 제작할 수도 있고 제1차 핵실험에 사용했다고 주장하는 2kg/탄두의 설계를 사용한다면 15개의 탄두를 제조할 수 있을 것이다. 그러나 전략·전술적인 운용 측면에서 이런 극단적인 선택보다는 2~3가지 형태의 핵탄두 모두를 채택하는 혼합형을 채택할 가능성이 높다. 북한이 이러한 여러 가지 방법 중 어떤 것을 선택하느냐 하는 것은 북한의 기술력과 정치적인 선택에 따라 결정될 것이나 현재 북한이 실전 배치할 수 있는 플루토늄을 이용한 핵무기의 숫자는 6~7개 정도일 것으로 보는 것이 일반적이다. 하지만 5MWe 영변 원자로를 정상적으로 계속 가동한다면, 그 숫자는 앞으로 2년 후에는 매 2년마다 2~3개씩 증가하게 될 것으로 예상된다.

나. 우라늄탄

농축 우라늄을 이용한 폭탄 역시 핵탄두 설계, 제조 기술과 목표로 하는 폭발력에 따라 1개당 필요로 하는 우라늄의 양이 달라진다. 합체형(gun type) 핵폭탄을 극단적으로 설계한다면 탄두 1개당 필요한 농축 우라늄의 양이 약 40kg 이상으로 많은 양의 우라늄이 요구되지만, 내폭형 설계 등 개선된 설계를 적용한다면 20kg 이하면 충분히 하나의 핵무기를 만들 수 있다. 그러므로 만일 북한이 앞에서 추산한 대로 이미 100kg 이상의 고농축 우라늄을 확보했다면, 5개 정도의 핵탄두를 제조할 수 있을 것이다. 또한, 앞서 추산한 것처럼 6,000개의 P2형 원심분리기가 가동률 100%로 정상적으로 가동된다면 앞으로 매년 추가로

6개 또는 그 이상의 핵탄두를 제조할 수 있을 것으로 예상된다. 만일 북한이 원심분리기를 계속적으로 늘려간다면 이 양은 더 빠르게 증가할 수도 있다.

다. 실전배치 가능성

핵무기는 핵무기 1개당 핵물질 사용량을 늘린다면 그 제조 기술이 비교적 낮더라도 쉽게 소형화·경량화 할 수 있다. 지금까지 확인된 북한의 플루토늄 보유량이 최소 30kg 이상이 될 것으로 보고 있는 바, 북한이 마음만 먹는다면 비록 핵무기 설계기술이 낮더라도(실제로는 상당히 높은 수준일 가능성도 있다) 4~5개의 핵무기를 실전배치하는 것은 전혀 어려운 일이 아니다. 즉, 북한은 이미 핵무기를 실전배치할 능력을 보유하고 있다고 보아야 한다.³⁸

● 표 V-2 북한의 실전 배치 가능한 핵무기의 수 추산

종 류		2013년 말	2015년 말	2017년 말
플루토늄 핵무기	소형/경량 탄두	2~3개	~10개	~13개
	일반 탄두	3~4개		
	소 계	6~7개	~10개	~13개
고농축 우라늄 핵무기 ³⁹		5개	17개	40개 이상
합 계		12개	27개	50개 이상

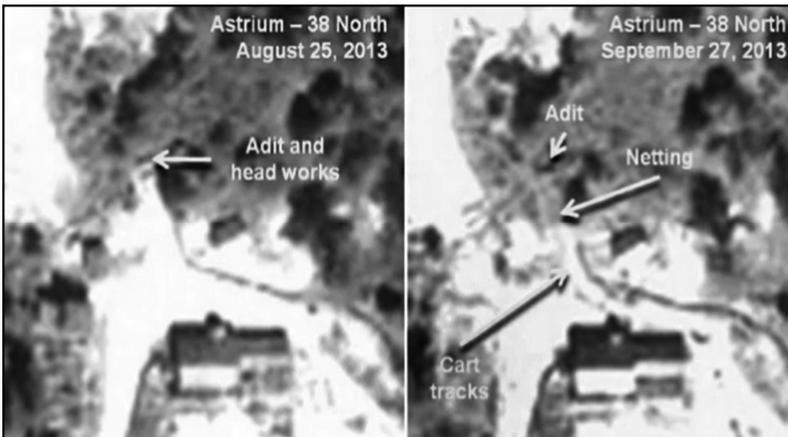
38. 미국의 평가는 이와 다르지만 미국의 평가는 미국에 위협될 수준의 배치가 가능한가 하는 것을 기준으로 하고 있을 수도 있다. 이러한 관점에서는 우리와 미국의 견해는 일치하지 않을 수 있다.

39. 고농축 우라늄 핵무기 1개당 20kg 사용을 기준으로 했으며, 핵무기 파괴력을 높이기 위하여 고농축 우라늄 사용량을 증가시키면 탄두수는 줄어들 수 있음. 그러나 원심분리기 숫자를 늘려간다면 탄두수는 더욱 빠르게 증가할 수도 있음.

3. 북한의 추가 핵실험 가능성 전망

‘38North’는 2013년 10월 23일 풍계리 위성사진을 분석한 결과 핵실험장 서쪽 및 남쪽에서 새로운 갱도 입구와 이곳에서 파낸 흙을 쌓아 놓은 더미가 관찰됐다고 밝히며, 이러한 새 갱도 작업은 새로운 핵실험을 위한 기초 작업일 수도 있고, 제3차 핵실험에 사용한 기존 갱도 내부의 통행과 통풍을 원활하게 하기 위한 추가적인 출입구 건설 작업일 수도 있다고 분석하였다.

● 그림 V-1 북한 풍계리 핵실험장 갱도 비교사진(좌측 8월, 우측 9월)



북한의 이러한 활동이 새로운 핵실험을 위한 새 갱도 건설과 관련되어 있다면, 북한의 제4차 핵실험 가능성을 조심스럽게 예측해 볼 수 있다. 미국 스탠퍼드대학 국제안보협력센터 닉 한센(Nick Hansen) 연구원은 새로운 터널 입구가 2개가 건설된 것과 관련하여 북한이 만약 제4차 핵실험을 실시한다면 이 실험장 남쪽 갱도를 이용할 가능성이 크며, 앞으로 추가 핵실험을 위한 사전 준비작업을 꾸준히 벌이고 있

다고 평가하였다. 이와 관련하여 우리 국방부도 풍계리 핵실험장의 남쪽 갱도는 언제든지 핵실험을 할 수 있는 여건이 돼 있음을 인정하고 추가 핵실험 가능성을 면밀히 관찰 중이라고 보고⁴⁰한 바 있다.

중국의 핵 전문가 리빈(李濱, Li bin) 칭화대 교수는 2013년 9월 25일 '제1회 아산 북한회의'에서 북한 핵무기 기술은 아직 소형화를 달성하지 못하였으며, 핵탄두의 소형화를 위해 한 차례 이상의 추가적인 핵실험을 강행할 가능성이 있다고 밝혔다. 북한은 핵무기 보유를 통해 국제사회와의 협상력을 강화하려는 정치적 목적과 핵무기 위협을 강화하는 군사전략적 목적 달성을 추구하고 있는 바, 이를 위해서는 핵탄두를 탄도미사일의 탑재, 사거리 범위까지 날려 보내기 위한 소형화·경량화는 필수적이다. 즉 북한은 추가적인 핵실험을 통해 핵무기의 기폭장치의 크기를 줄이고 적은 양의 핵물질을 사용하는 소형 핵무기 기술을 개발하여, 이를 국제사회에 과시할 가능성이 크다는 것이다.

또한 북한의 최근 영변 원자로 재가동, 우라늄 농축시설 확장 등 일련의 활동은 추가적인 핵실험 가능성을 더욱 높이고 있다. 앞서 분석한 바와 같이 북한이 보유하고 있을 것으로 추정되는 무기급 핵물질의 양과, 핵시설의 추가 가동 및 증축 등을 통한 보유량 증가분을 고려한다면 추가 핵실험을 단행한다고 하더라도 충분히 전략적으로 비축할 수 있는 핵물질은 보유하고 있을 수 있다. 즉 이것은 북한이 핵물질에 대한 부담없이 핵실험을 실시할 수 있다는 것으로, 북한의 추가 핵실험 가능성을 더욱 높게 한다.

더불어 북한 내부의 정치적 상황으로 인한 추가 핵실험 강행도 예측해 볼 수 있다. 장성택 전 국방위원회 부위원장 숙청 사태는 북한 내부

40. 새누리당 북한안보전략특위 회의에서의 백승주 국방부 차관의 발언을 인용 (2013.11.15).

의 정치적 환경이 매우 불안함을 보여주는 것으로, 김정은 체제를 공고히 하기 위한 돌발적인 군사 행동의 가능성이 커졌다는 것이다. 이와 관련하여 제임스 켈리(James Kelly) 전 국무부 동아시아태평양 담당 차관보는 장성택 숙청으로 인해 절대적 권력을 쥐게 된 김정은이 추가적인 핵실험과 같은 군사 행동을 통해 내부 결집력을 강화 할 것이라고 예측하며 경제를 우선시하던 장성택이 사라짐으로써 북한 내부의 정책적 무게 중심이 경제에서 군사력 강화 쪽으로 옮겨 갈 것이라고 분석했다.

물론 북한의 제3차 핵실험에 대해 중국이 이례적으로 강한 유감을 표시하는 등 중국의 강경한 입장으로 인해 북한이 제4차 핵실험과 같은 과잉 도발은 당분간 어렵다고 보는 의견도 있으며, 장성택 숙청 이후 북한 내부의 민심을 달래기 위해 엄청난 경제적 부담을 안고 있는 추가 핵실험을 감행하지 않을 것이라고 보는 의견도 있다.

이렇듯 북한 내부의 복잡한 정치 환경이나 대외적 환경을 고려하였을 때 쉽게 북한의 추가 핵실험 단행 가능성을 확실히 짐치기는 어렵다. 그러나 북한은 3차례에 걸친 핵실험을 통해 획득한 핵무기 설계 기술이 있으며, 핵무기 제작에 필요한 핵물질도 보유하고 있을 뿐만 아니라 핵실험을 위한 지하 갱도도 마련되어 있기 때문에 기술적으로는 핵실험을 위한 모든 준비가 완료되어 있다고 여겨지며 추가 핵실험은 북한 지도부의 정치적 판단에 의해 그 시기가 결정될 것이라고 판단된다.

VI. 결론



지금까지 북한의 핵관련 시설과 프로그램에 관하여 최근의 동향을 중심으로 논의하였다. 북한의 핵위협이 가중되는 있는 작금의 상황에서 본 연구는 북한의 핵프로그램을 점검하고 그들의 핵능력을 객관적으로 분석·평가하는 것을 목표로 진행하였다. 결론에서는 지금까지의 연구결과를 요약·정리하고 우리의 대북 핵정책에 주는 시사점을 논의하고자 한다.

북핵 문제는 북한과 한국과의 양자관계의 문제라기보다는 국제관계의 여러 주체들과 다층적으로 얽혀 있는 문제라고 보아야 할 것이다. 현재까지 북한은 NPT를 탈퇴하고 IAEA의 사찰관을 추방하며, 수차례 장거리 미사일 시험발사를 강행하였을 뿐만 아니라 3차례의 핵실험을 강행하는 등 대량살상무기 관련 국제규범을 수도 없이 어겨왔다. 북한의 반국제규범적 행위에 대하여 UN을 비롯한 국제사회는 다양한 방법으로 북한의 핵과 장거리미사일 개발을 지지하고자 노력하였다. 1994년 제네바 핵합의와 6자회담 틀은 대화와 타협의 상징이었으며 수차례의 대북 UN제재 결의는 강압외교를 상징한다. 결과적으로 대화외교나 강압외교 모두 북한의 핵무기 개발을 막는 데 실패하였고 본 연구에서 살펴본 바와 같이 북한이 핵능력을 고도화·정밀화시켜 가는 것을 지켜볼 수밖에 없었다.

최근 동향을 중심으로 살펴본 결과 북한은 핵프로그램의 고도화·정밀화·다양화를 추구하고 있는 것으로 드러났다. 첫째, 북한은 2007년 2·13합의에 따라 폐쇄조치되었던 5MWe 원자로의 재가동을 시도하고 있는 것으로 보인다. 그에 관한 결정적인 증거는 좀 더 확인이 필요하지만 그 징후는 여러 군데서 탐지되고 있으며 기술적으로도 어렵지 않은 것으로 판단된다. 만약 북한이 5MWe 원자로를 재가동하는 것이 사실이라면 생산한 플루토늄을 무기화하기 위해서는 최소 2년 6개월의 시간이 걸릴 것으로 추정된다. 둘째, 북한은 우라늄 농축시설을 확

장하고 있는 것으로 관측된다. 우라늄 농축시설의 원심분리기가 설치되어 있는 건물이 기존 크기의 2배 정도 수준으로 확장된 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 원심분리기 개수가 2,000개에서 4,000개로 늘어났다는 추정이 가능하며 이는 북한의 우라늄 농축 능력이 기존의 2배로 확대되었다는 것을 의미한다. 원심분리기 숫자에 따라서 농축능력이 달라진다는 것을 감안하면, 보유숫자가 각각 2,000개(공개된 영변 시설에 설치된 개수), 4,000개(위성사진을 근거로 영변시설을 2배로 확장한 경우의 수), 6,000개(원심분리기 생산 가능량을 기준으로 한 추정 숫자)인 경우, 북한이 생산할 수 있는 우라늄은 각각 연간 8,000, 16,000 및 24,000kg-SWU 정도로 추산됨에 따라 북한이 연간 생산 가능한 고농축 우라늄은 약 40~120kg임을 알 수 있다. 셋째, 북한은 2009년 영변에 100MW급 실험용 경수로 건설에 착수하여 2012년 가동을 목표로 사업을 추진해 왔으나 현재까지 완공되지 못한 상황이다. 경수로 건설이 지연되고 있는 이유로는 첫째, 핵심부품 제작 혹은 도입의 어려움, 둘째, 핵연료 제조의 어려움, 셋째, 핵연료용 농축 우라늄 생산 지연, 넷째, 후쿠시마 사태로 인한 안전성 재점검과 이로 인한 설계변경 등의 이유를 생각해 볼 수 있다. 경수호가 완공된다면 연간 약 15kg의 원자로급 플루토늄을 생산할 수 있을 것으로 전망된다.

본 연구에서는 북한이 행한 3차례의 핵실험에 대해서도 포괄적으로 평가를 진행하였는데, 그 결과 제3차 핵실험이 제2차 핵실험에 비하여 2배 이상의 규모였던 것으로 판정되었다. 사용한 핵물질에 관해서는 플루토늄인지 우라늄인지는 확실하지 않지만, 플루토늄탄이었을 경우 사용된 플루토늄은 3kg 이하, 우라늄탄이었을 경우 10kg 이상의 고농축 우라늄이 사용되었을 것으로 추정된다. 아울러 풍계리 핵실험장에 관해서도 최근 동향을 중심으로 분석하였는데 제3차 핵실험이 이루어졌던 것으로 추정되는 남쪽 갭도는 제1차 핵실험에 사용되었던 갭도

에 비하여 안전성이 크게 향상된 것으로 판단된다.

마지막으로 본 연구에서는 북한의 핵능력을 종합적으로 평가하고자 하였다. 북한이 현재까지 5MWe급 영변원자로를 이용하여 생산·추출한 플루토늄량은 $40 \pm 5\text{kg}$ 정도로 추정되고 그간 세 번의 핵실험에서 9~12kg의 플루토늄을 사용했다고 가정하면 북한이 현재 보유한 플루토늄량은 $30 \pm 5\text{kg}$ 정도가 될 것으로 추산된다. 이것을 충분히 활용한다면 플루토늄을 이용해 현재 북한이 보유한 실전 배치할 수 있는 핵무기의 숫자는 6~7개 정도일 것으로 추정된다. 5MWe 영변 원자로를 정상적으로 계속 가동한다면, 앞으로 2년 후에는 매 2년마다 2~3개씩 증가하게 될 것으로 예상된다. 또한 북한은 2013년 말 현재 100kg 이상의 고농축 우라늄을 보유하고 있는 것으로 추산되며, 기존 농축시설이 100% 가동되고 확장된 시설이 성공적으로 운영된다면 향후 연간 40~120kg씩 고농축 우라늄 보유량이 증가할 것으로 판단된다. 이것은 현재까지 북한이 5개 정도의 핵탄두를 제조했을 수 있으며 매년 추가로 6개 또는 그 이상의 핵탄두를 제조할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 본 연구는 북한이 핵탄두의 소형화를 위한 한 차례 이상의 추가적인 핵실험을 강행할 가능성이 있음과 그것을 위한 기술적인 준비는 모두 완료된 상태임을 주장하였다. 다시 말하면 북한의 제4차 핵실험은 기술적으로 모든 준비가 완료되어 있으며 북한 지도부의 정치적 판단에 의해서 그 시기가 결정될 것이라고 본다.

본 연구에서 보여주듯이 북한의 핵능력은 날이 갈수록 양적으로 팽창되고 질적으로 고도화되고 있다. 그럼에도 불구하고 지난 20년 간 북한의 핵개발을 저지하기 위한 국제사회의 노력은 별다른 진전이 없는 상태이다. 북한의 핵개발 전략의 가장 중요한 당사자라고 할 수 있는 미국은 몇 년째 ‘전략적 인내’라는 이름의 소극적 대북정책으로 일관하고 있으며 또 다른 당사자인 한국 또한 적극적으로 나서지 못하고

있는 실정이다. 북핵 문제를 해결하기 위해 결성된 6자회담은 2008년 이후로 열리지 못하고 있으며 UN의 대북제재결의 또한 별다른 실효를 거두지 못하고 있다. 국제사회가 별 뾰족한 대책을 세우지 못하고 있는 사이에 북한은 그들의 핵능력을 빠른 속도로 확대해 나가고 있다는 것을 본 연구는 보여주고 있는 것이다. 따라서 한국을 비롯한 국제사회가 북핵 문제를 해결하기 위하여 가장 먼저 고민해야 할 것은 어떻게 하면 북한의 핵을 현재 상태로 동결할 것인가의 문제이다.

북한의 미래 핵을 동결한다는 것이 결코 북한의 비핵화를 포기한다는 의미가 되어서는 안 될 것이다. 다만 현실적이고, 전략적으로 사고했을 때 미래 핵의 동결을 주제로 북한과의 협상을 시작해야 한다는 것을 의미한다. 그리고 그 협상의 중심에 한국 정부가 있어야 한다. ‘전략적 인내’라는 이름의 정책에서 보듯이 미국은 현재 북핵 문제를 시급히 해결되어야 할 과제로 인식하고 있지 않는 것으로 보인다. 북한이 핵무기 몇 개를 더 만든다고 해서 그것이 핵무기 수 천개를 보유한 미국의 안보에 심대하게 위협이 된다고 생각하지 않기 때문일 것이다. 그렇지만 한국은 미국과는 상황이 다르다. 북한의 증대하는 핵능력은 직접적으로 한국의 안보를 위협하며 핵무기 하나가 추가될 때마다 한국이 북한으로부터 받는 위협은 그에 상응하여 증가한다고 보아야 할 것이기 때문이다. 따라서 한국이 적극적으로 나서서 미국을 설득하고 북한과 우선 미래 핵을 동결하는 방안을 놓고 협상을 시작하는 것이 현실적으로 가장 우선적인 방안이 되어야 할 것이다.

2014년 들어 연초부터 북한은 일종의 평화공세를 펴오고 있다. 연일 남북관계 개선 의지를 언급하고 핵문제를 다루기 위한 6자회담 재개의 필요성도 제기하고 있으며, 때마침 이산가족 상봉도 곧 이루어질 듯하다. 우리 정부는 남북관계를 획기적으로 개선하고 북한으로부터의 핵위협에 적극적으로 대처하기 위하여 이 분위기를 적극적으로 활

용할 필요가 있다. 북한의 완전한 비핵화가 결코 풀기 쉬운 문제가 아님을 지난 20년의 경험을 통하여 충분히 인지하고 있기 때문에 비핵화를 정책의 최종목표로 삼음과 동시에 북한의 핵을 현 수준에서 동결하기 위한 협상을 하루라도 빨리 시작하는 것이 우리의 최우선 과제가 되어야 할 것이다. 미국이 미온적인 태도로 나온다고 하더라도 우리 정부가 적극적으로 나서서 6자회담이든 4자회담이든 틀에 구애받지 말고 협상을 시작하는 것이 당면한 북한 핵으로부터의 위협을 최소화하는 길일 것이다.

현 정부가 대북정책의 대원칙으로 삼고 있는 한반도 신뢰프로세스는 튼튼한 안보의 토대 위에서 남북관계의 정상화를 추구하고 있다. 그러나 깊이 들여다보면 대북 인도적 지원을 비롯한 기본적인 남북관계는 이어나갈 것이지만 북핵 문제의 진전 없이는 획기적인 관계개선은 힘들 것이라는 것이 우리 정부의 입장이다. 다시 말하면, 남북관계의 정상화를 위해서는 어떤 식으로든 북핵 문제 해결의 가닥을 잡아야 한다는 것이다. 여러 현실적인 요소들을 고려했을 때 북핵 문제를 한번에 해결하기는 어렵기 때문에 단계적 접근법이 필요하다는 것이고 또 그 노력의 중심에는 미국보다는 한국 정부가 있어야 한다는 점 또한 아무리 강조해도 지나침이 없다. 그리고 그것이 한반도 신뢰프로세스가 성공을 거둘 수 있는 길이다.

참고문헌

1. 단행본

조민·김진하. 『1995-2009 북핵일지』. 서울: 통일연구원, 2010.

이춘근. 『지하 핵실험에 대한 과학기술적 이해』. 서울: 과학기술정책연구원, 2007.

National Research Council. *The Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Technical Issues for the United States*. Washington D.C.: The National Academics, 2012.

2. 논문

Dembinski, M. “North Korea, IAEA Special Inspections, and the Future of the Nonproliferation Regime.” *Center for Nonproliferation Studies*. Vol. 2, 1995, <<http://cns.miis.edu/pubs/npr/dembin22.htm>>.

Hecker, Siegfried S. (CISAC). “A Return Trip to North Korea’s Yongbyon Nuclear Complex.” 2010.11.20.

Cochran, Thomas. B. and Christopher E. Paine. “The Amount of Plutonium and Highly-Enriched Uranium Needed for Pure Fission Nuclear Weapons.” *Natural Resources Defense Council*. April 13, 1995.

3. 기타자료

ISIS. <<http://isis-online.org>>.

NK Leadership Watch. <<http://nkleadershipwatch.wordpress.com/2013/06/23/kim-jong-un-visits-kanggyetractor-plant>>.

KINAC/TR-008/2011. “북한핵 프로그램과 검증.”

WIKIPEDIA. <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermonuclear_weapon>.

부록

부록 I. 기체원심분리법 우라늄 농축기술 개요

부록 II. 북한의 경수로 건설과 관련된 기술적 사항

부록 III. 핵실험 개요 및 핵무기 특성



부록 I. 기체원심분리법 우라늄 농축기술 개요

1. 기체원심분리법 우라늄 농축기술 개요

가. 우라늄 농축 개요

자연계에 존재하는 우라늄은 그 동위원소 구성이 산지에 따라 미세한 차이는 있으나 대체로 U-238 약 99.3%와 U-235 약 0.7%로 구성되어 있다. U-235는 중성자와 반응하여 핵분열 반응을 잘 일으키지만 U-238은 핵분열을 잘 일으키지 않기 때문에 대부분의 원자로는 U-235의 함량을 높인 농축 우라늄을 사용하며, 우라늄을 이용하여 핵무기를 만들기 위해서는 일반적으로 U-235의 함량을 90% 이상으로 농축한 농축 우라늄을 사용하고 있다.

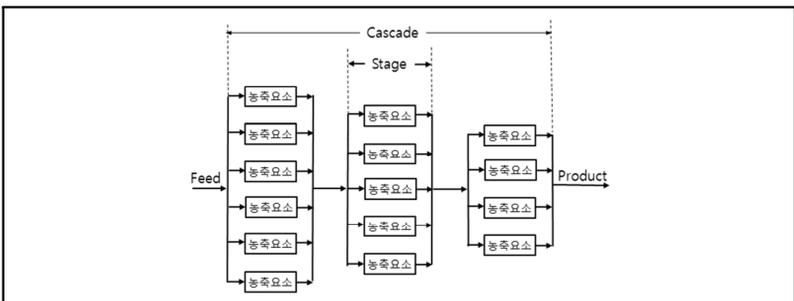
그러나 동위원소는 물리적 성질이나 화학적 성질이 거의 동일하므로 보통의 방법으로는 동위원소를 분리할 수 없다. 동위원소 분리를 위해서는 원자핵의 질량수의 차이에 따른 물리적 또는 화학적으로 근소한 특성차이를 이용하는 분리방법이 사용된다. 최초의 핵무기를 개발한 맨하탄 프로젝트에서는 당시 가능성이 있다고 생각되는 수많은 농축 방법이 연구되었지만, 공업적 규모로 우라늄을 농축하는데 성공한 것은 전자분리법과 기체확산법이었다. 열확산법이 부분적으로 사용되었고 이온교환법, 광화학반응법, 전기화학반응법, 원심분리법 등도 연구되었지만 원리적으로 분리계수가 낮거나, 재료나 기기의 성능이 부족하기 때문에 연구가 중지되고 말았다. 최초의 대규모 우라늄 농축시설은 미국에서 기체확산법 방식으로 건설되었으나, 현재는 전력 소비와 시설 규모가 작고 경제성이 높은 원심분리법을 이용하고 있다.

나. Cascade 개념

우라늄 농축에 사용되는 장치들은 원자레이저농축법(AVLIS)을 제외하면 일반적으로 1회의 작업으로 달성할 수 있는 농축도가 낮다. 이로 인해 여러 번의 농축 작업이 반복 수행되어야 한다. 그런데 문제는 농축이 진행될수록 공급되는 유량과 농축도가 달라지기 때문에 농축 시설을 효율적으로 운전하기 위해서는 장치들의 운전조건을 최적상태로 유지할 수 있는 조합이 필요하다. 이러한 조합을 찾아내기 위한 계산을 위해서는 cascade라는 개념을 도입할 필요가 있다.

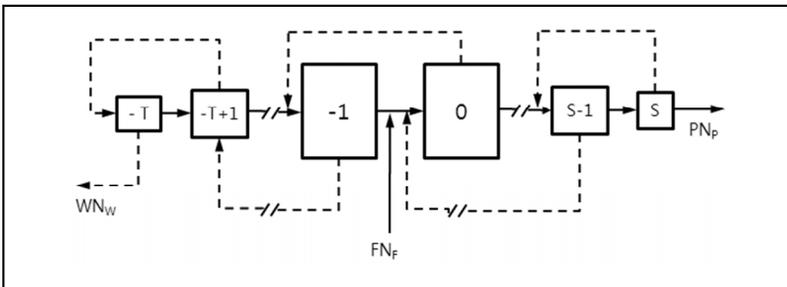
Cascade의 기초개념은 <부록 그림 I-1>에 나타나 있는 것처럼 정렬된 농축요소(예를 들면, 원심분리기)들이 ‘단계(stage)’ 단위로 조직화된 것이다. stage 내의 농축요소는 ‘병렬(parallel)’로 연결된다. Stage의 폭(한 stage 내 농축요소의 수)은 이 stage를 통과하는 물질 흐름의 총량에 비례한다. Stage들은 서로 연결되어 계열을 이루며, 각 stage들은 앞선 stage에서 input을 받고 output은 다음 stage로 빠져나간다. 각 stage의 폭이 일정하지 않고 따라서 각 stage에서 처리하는 물질의 양도 변화한다. 이는 생산물의 유량이 항상 원료의 유량보다 적기 때문이다.

● 부록 그림 I-1 Cascade의 개념



<부록 그림 I-2>는 cascade가 연속적으로 재순환 물질로부터 U-235를 추출하는 방법을 나타내고 있다. 그림에서 각각의 box는 한 stage를 나타내며, 각 stage의 output는 농축된 흐름과 감소된 흐름인 2개의 흐름으로 구성되어 있으며 2개의 흐름은 모두 input 흐름과 U-235의 함량이 다르다. 농축된 흐름은 다음 단계의 input 흐름이 된다. 한편 감소된 흐름은 낮은 stage의 input 흐름으로 되돌려지게 된다. 대부분의 공정에서 농축과 감소 흐름은 각각 한 stage 앞과 후의 stage로 보내진다. 이러한 cascade를 ‘대칭(symmetric)’이라 한다. 그러나 어떤 공정에서는 농축과 감소 흐름이 비대칭인 방법을 사용한다. 이 경우 이러한 흐름은 앞과 뒤의 stage 수가 다르게 되며, cascade 설계는 상당히 복잡하게 된다.

● 부록 그림 I-2 대칭형(symmetric) cascade



다. 기체 원심분리(gas centrifuge)법

기체 원심분리법은 기체화시킨 분자를 고속으로 회전시키면 원심력에 의하여 외부에 무거운 분자와 내부에 가벼운 분자가 모이는 것을 이용한 분리방법이다. 그러나 이 방법은 분리 능력이 회전속도의 2승 이상(이론적으로는 4승이나 실제로는 2승 정도라 알려져 있다)에 비례

하므로 고속원심분리기가 필요하며, 이에 따라 특수한 강도를 가진 내식성 재질과 정밀 제작기술을 필요로 한다.

● **부록 표 1-1 원심분리기 회전자 벽의 속도에 따른 1단계 농축도**

회전자 벽의 속도	농축 계수
400m/sec	1.097
500m/sec	1.156
600m/sec	1.233
700m/sec	1.329

그러나 천연 우라늄을 5%로 농축하기 위해서는 기체 확산법의 경우 900단계(stage)가 필요하나 원심분리법은 27단계 정도 내외로 가능하며, 소비 전력도 기체 확산법의 1/7 내지 1/10 정도 수준이기 때문에 훨씬 더 경제적이라고 알려져 있다. 원심분리법은 새로운 재료의 개발과 기계공학의 발전으로 기체확산법 보다 훨씬 큰 분리계수를 얻을 수 있다.

라. 우라늄 농축용 원심분리기 특성

원심분리법의 이점들은 제2차 세계대전기간 동안 우라늄 농축에 종사한 사람들도 인식하고 있었다. 그래서 그 당시 미국과 독일에서 원심분리기 연구가 활발하게 추구되었다. 그러나 당시로서는 극복하기 어려운 많은 문제점들이 발견되었다. 이러한 문제점들을 해결하고 기체 확산법과 경쟁할 수 있는 원심분리기를 개발하는 데는 상당기간 동안 많은 연구와 기술적인 진보가 필요했다. 이러한 문제점들 중 가장 중요한 네 가지 문제와 해결책들은 다음과 같다.

(1) 제품 추출 문제

이론적으로 계산되는 이상적인 동위원소 분리계수는 원심분리기 회전자의 벽과 중심부에 실제로 존재하는 동위원소 비율이다. 이 차이만큼의 충실한 분리 이득을 얻기 위해서는, 제품이 원심분리기의 중심에서 추출되어야만 할 것이다. 그러나 원심분리기의 빠른 회전은 사실상 모든 기체가 벽 근처에 모이게 한다. 예를 들면, 전회에서 예시한 반지름이 10cm, 초당 회전수가 800($\omega = 800 \times 2\pi = 5,000 \text{ rad/s}$)인 원심분리기 중심의 압력은 벽면 압력의 4000만 분의 1로 계산된다. 그래서 비록 농축될지라도 중심 가까이로부터 제품 추출을 시도하는 것은 거의 불가능하게 된다. 사실상 모든 분리작업은 원심분리기의 벽 근처 좁은 폭의 고리모양 영역에서 일어난다. 그러므로 ‘향류(counter current)’ 형태의 내부 흐름이 만들어지지 않는 한 분리효과는 크게 줄어든다. 향류 형태의 내부순환 흐름에 의하여 가벼운 성분은 회전자의 축 부근에 농축되어 상승류를 따라 상부로 올라가고, 무거운 성분은 회전자의 벽 부근과 바닥에 농축된다. 외부로부터의 기체 공급은 중심축 부근에서 이루어진다.

(2) 진동제어 문제

물체가 고속으로 회전할 때 흔들리거나 진동하는 것을 막기 위해서는 주의 깊게 균형이 잡혀야 한다. 우라늄 농축에 유용한 분리계수를 얻기 위해서 필요한 높은 회전속도에서 이 문제는 매우 심각하게 된다. 또한, 이에 더하여 진동이 공명에 의하여 증폭되어 원심분리기를 파괴할 수 있을 정도의 ‘임계회전속도’ 영역이 존재한다는 문제가 있다. 그렇기 때문에, 이 임계회전속도보다 높은 속도에서 원심분리기를 조작하는 것이 바람직하며, 원심분리기가 가속될 때 진동을 감쇄시키

거나, 이 스트레스를 견딜 수 있는 설계 방안이 필요하다.

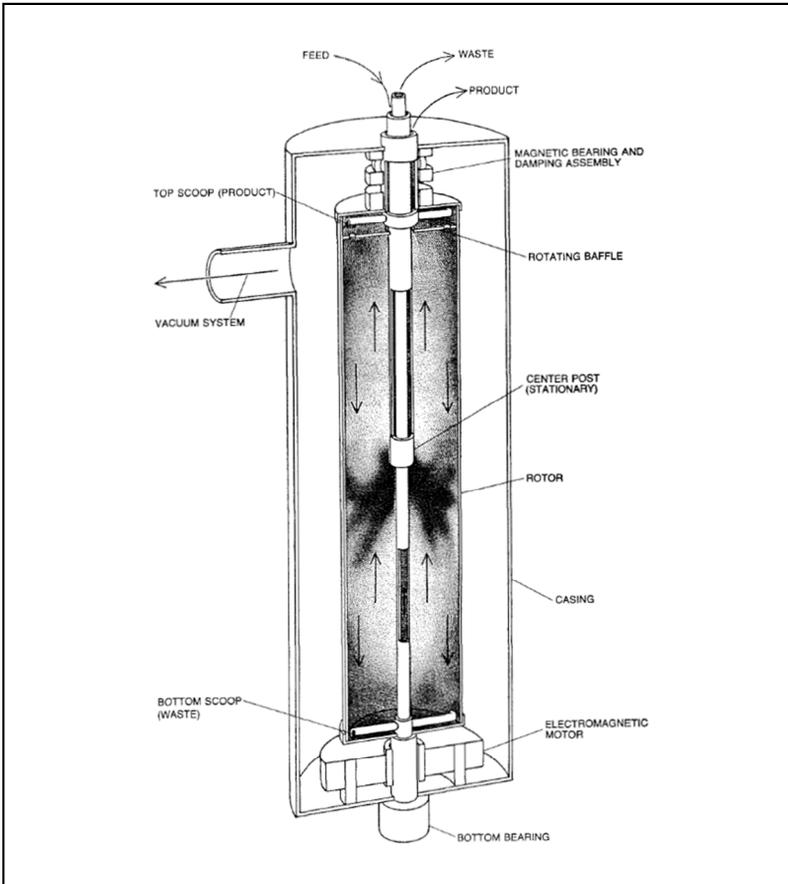
이 문제는 1950년대에 Gernot Zippe¹ 팀에 의하여 구소련에서 개발된 방식인 바닥에 기름이 칠해진 피벗 베어링과 컵형 지지구를 사용하고 상부에 자석베어링을 사용하여 해결되었다. 자석베어링은 로터 축과 덮개 사이에 어떤 물리적 접점이나 마찰이 없다. 자석베어링은 진동이 감소되도록 축이 내부에서 부유하도록 설계되었으며, 하부는 pivot이 컵에 의하여 지지된다. 내부는 매우 높은 진공(아마도 대기압의 100만 분의 1~1000만분의 1 정도)이 유지되기 때문에 마찰이 더욱 감소된다. 원심분리기 외부용기는 누설을 방지할 뿐만 아니라 원심분리기가 파괴될 경우 파편을 저지할 정도로 충분히 강력해야 한다.

(3) 회전자의 재질 문제

원심분리기의 매우 높은 회전 속도는 외벽에 매우 강한 기계적 응력으로 가한다. 예를 들면, 10cm의 반지름과 800 회전/sec의 회전체 벽에 가해지는 인장 변형력은 알루미늄 인장강도의 1.3배인 7,000kg/cm²이 될 것이다. 바꾸어 말하면 알루미늄으로 만들 경우 이 회전자는 회전속도를 감당하지 못하고 파괴된다는 것이다.

¹ 오스트리아 출신 독일 과학자로 제2차 세계대전 후 구소련에 끌려갔으나, 원심분리법에 의한 우라늄 농축법 개발 성공을 석방 조건으로 하여 개발에 성공한 후 서독으로 돌아왔다. 그 후 그의 팀이 개발한 원심분리기 기술을 미국과 독일에 전수하였다. Urenco의 원심분리기도 그가 전수한 기술에 바탕을 두고 있다.

부록 그림 1-3 원심분리기의 구조



이러한 문제를 해결하기 위하여 고속 원심분리기는 강도가 높고 질량이 가벼운 탄소섬유, 유리섬유 등과 합성수지를 결합한 복합재료가 사용되고 있다. <부록 표 I-2>에 이러한 새로운 재료와 오래전부터 사용되던 재료들의 특성을 비교하여 수록하였다. 충분한 안전 여유와 운전시간 동안 축적되는 재료의 과도한 비틀림(creep)을 방지하기 위해서는 표에 나타난 최대회전 속도보다 낮은 속도로 운전되어야 한다.

● 부록 표 1-2 여러 물질들을 실린더로 만들 경우 허용되는 최대 회전속도

물질	인장강도 T [kg/cm ²]	밀도 ρ [g/cm ³]	T/ρ [x 103]	대략적인 최대 회전 속도[m/sec]
알루미늄 합금	5,200	2.8	1.9	425
티타늄	9,200	4.6	2.0	440
고강도 강철	17,000	8.0	2.1	455
마레이징강	22,500	8.0	2.8	525
유리섬유/resin	7,000	1.9	3.7	600
탄소섬유/resin	8,500	1.7	5.0	700

(4) 회전자 내부 흐름의 이론적 해석 문제

원심분리기의 분리 능력은 회전자 내부에 형성되는 향류 흐름의 특성에 따라 매우 민감하게 변한다. 이 흐름의 특성을 지배하는 유체역학 방정식이 이해되기까지는, 원심분리기 성능을 향상시키는 것은 오직 경험적인 시행착오법만 사용가능하였다. 그러나 1983년에 독일의 Ernst Rätz에 의하여 실제 적용이 가능한 이론이 발표되었다. Rätz는 축류 흐름 동적수력학을 나타내기 위하여 two-shell 접근법을 사용하는 독립적인 분석을 하였다. 최근에는 매우 복잡한 방정식들을 푸는 컴퓨터 코드들의 발전으로 인하여 조금 더 조직적이고 예측 가능한 방법으로 원심분리기를 설계하는 것이 가능하게 되었다. 이를 통해 원심분리기 크기와 회전속도를 증가시켜 분리 능력이 높은 원심분리기 제작이 가능해졌다.

그러나, 이론적 분석의 한계는 여전히 존재한다. 우라늄 농축을 위한 원심분리기 설계에 필요한 설계변수 도출을 위해서는 원심분리기 내부의 기체 흐름을 유체역학 방정식으로 해석하고, 확산에 의한 분리

현상을 분석하여 이를 유체역학 문제에 적용할 수 있어야 한다. 실제적인 장치를 설계할 때는 회전자 내부에 설치되는 원료주입과 제품 추출을 위한 scoop, baffle 또는 주입되는 공급 흐름의 가속 등으로 인한 섭동의 영향을 무시할 수 없기 때문에 단순한 계산만으로는 제대로 된 장치를 설계할 수 없다. 그런데 원심분리기들의 연구개발에 관한 사항들은 1960년 이후 비밀로 분류되고 있기 때문에 원심분리기들에 관한 기술적 사항들을 이론적으로 해석한 결과들을 실제 적용할 때 어느 정도 차이를 나타내는지 확인할 수 있는 자료는 거의 공개되어 있지 않다. 그러므로 위에서 소개한 내용도 실제 장치에서 어느 정도의 차이를 나타내는지 알 수 없다.

마. 주요 원심분리기들의 특성

<부록 표 I-3>에서는 역사적으로 중요한 원심분리기와 현재 상업적으로 사용되거나 새로운 원심분리기 시설을 건설하기 위하여 브라질, 이란, 프랑스, 그리고 미국에서 개발되고 있는 원심분리기들의 세대별 주요특성과 정보의 추정치를 수록하였다. 편의상 이들의 명칭을 일반적으로 불리어지는 명칭(P-1, P-2 등)으로 표시하였다. <부록 표 I-3>은 공개정보를 기반으로 하고 있기 때문에 불확실성이 상당히 높다. 그러나 공개된 원심분리기들의 특징은 평가할 수 있으며, 더 오래전에 만들어진 기계들의 특성이 적절하게 향상되었을 것으로 가정하고 있다.

부록 표 1-3 주요 원심분리기들의 설계 특성

Type	Original Machine	Deployment Period	Rotor Characteristics				Separative Power kgSWU/yr
			Matrial	Speed [m/sec]	Diamerter [cm]	Length [m]	
-	Zippe	1940s-50s	Aluminum	350	7.4	0.3	0.44
P-1	SNOR/ CNOR	1960s-70s	Aluminum	350	10	2.0	2-3
P-2	G-2	1960s-70s	Maraging Steel	485	15	1.0	5-6
P-3	4-M	Early 1980s	Maraging Steel	(485)	n/a	2.0	12
P-4	SLM (TC-10)	Late 1980s	Maraging Steel	(500)	15	3.2	21
-	TC-11	Late 1980s	Carbon Fiber	(600)	n/a	(3)	n/a
-	TC-12	1990s	Carbon Fiber	(620)	(20)	(3)	40
-	TC-21	2000s	Carbon Fiber	(770)	(20)	(5)	100
-	AC-100	2000s	Carbon Fiber	(900)	(60)	(12)	330

(1) P-1 type

P-1은 SNOR과 CNOR(scientific and cultivated nuclear orbital rotor)이라 명명된 초기의 네덜란드 설계에 기반을 두고 있다. 이 네덜란드 설계는 Urenco의 초기 계획으로 개발된 것으로서, 독일의 시험 공장 SP-1에 사용되었다. 원 독일 기계의 회전자는 6개의 segment로 구성되어 있으나 P-1은 4개의 segment로 구성되며 길이도 줄어서

2m보다 조금 짧다. CNOR과 P-1 설계에서 각 segment는 0.5SWU/yr의 총 분리능력을 가진다고 말해진다. 알루미늄으로 설계된 모든 회전자의 한계 회전 속도는 대략 35m/sec이며, 회전자의 직경은 10~11cm이다. 2006년 4월 이란 관리와의 인터뷰에서 확인한 P-1(IR-1)의 상세한 설계 내용들은 회전자 길이는 180cm, 직경은 10.5cm, 회전속도는 350m/sec였다. 이 회전자 길이는 이란의 시험용 농축 공장에 설치된 cascade의 사진과 일치한다.

(2) P-2 type

공개적으로 이용할 수 있는 정보에 기초하여 G-2 원심분리기를 약간 변형한 것이다. G-2 자체는 2개의 segment로 구성된 마레이징강 회전자를 사용하는 독일의 Urenco의 예비설계다. 널리 알려진 G-2의 길이는 1m이고, P-2의 사진도 이와 일치한다. G-2의 회전자 직경은 14.5~15cm로 보고되어 있다. G-2는 독일의 시험공장 SP2와 네덜란드의 실증시설 B21에 사용되었다. 원심분리기 회전자에 고강도 마레이징강의 사용은 500m/s 이상의 회전속도를 허용한다. 회전속도 485m/s는 대부분의 마레이징강을 사용한 <부록 표 I-3>에 수록된 기계들에 기준값으로 사용된다. P-2의 분리 능력은 5kg-SWU/yr로 추정된다.

(3) P-3 type

파키스탄의 더 발전된 원심분리기인 P-3와 P-4의 설계와 운용에 관한자료는 대부분 Matthew Hibbs의 보고서에 근거를 두고 있다. 중요한 가정은 이들 두 가지 기계가 1970년대 말에서 1980년대 초의 Urenco의 연구에 기본을 두고 있다는 것이다. 네덜란드 정부 보고서

에 의하면, 파키스탄 과학자 Khan은 1970년대 초에 네덜란드에서 개발중이었던 진보된 원심분리기(4-M를 지칭함)의 설계에 접근할 수 있었을 가능성도 있다. 이용할 수 있는 정보를 통해 추정해볼 때 4-M은 4개의 segment로 이루어져 있고 대략 2m 높이를 가지고 있으며 마레이징강 회전자를 가지고 있다는 것이다. P-3의 분리 능력은 12SWU/yr 이하라고 알려져 있다.

(4) P-4 type

서방의 정보자료는 파키스탄이 1980년대 중반에 진보된 원심분리기를 개발시켰던 것을 시사한다. 이 기계는 Urenco 설계(SLM이라 불리는 나중에 TC-10으로 나중에 알려져 있는)에 바탕을 두고 있다. 소문에 의하면, 회전자는 14.5cm의 직경, 3.2m로서 운전속도는 508m/s이며, P-4의 분리능력은 21SWU/yr라고 한다.

<부록 표 I-3>에 수록된 추가적인 기계들은 진보된 원심분리기 기술의 능력을 설명하기 위한 것이다. Urenco의 기계 설계와 운영 파라미터들에 대한 평가는 Urenco의 여러 가지 보도 자료에 근거하고 있다. 이들 자료는 Urenco 원심분리기의 세대별 분리능력, 원주 속도, 회전자 길이들을 설명하는 자료와 특징을 그래프로 나타내고 있다. 자료들은 신뢰할 수 있는 절대값을 추정하는데 유용하다. 구체적인 TC-12(4세대의 기계)의 성능은 40SWU/yr이고, 길이는 대략 3m라고 한다. 회전자가 금속인(maraging, 강철) 기계들의 최대 속도는 대략 500m/s 정도이다. 합성물질들을 사용한 3세대 원심분리기들은 회전속도를 1.2배 증가시켰으며 가장 최신 설계들에서는 1.5배 증가를 가능케 하여 회전속도가 각각 600m/s와 750m/s에 이르는 것으로 알려져 있다.

(5) 미국이 개발한 원심분리기

미국은 기존 기체확산법의 공장에 대한 투자가 커서 원심분리기를 이용한 대규모 농축공장을 건설하지는 않았으나, 단일 분리용량은 가장 큰 대형 원심분리기(AC100)를 개발한 것으로 알려져 있다. 새로운 USEC 농축시설을 위해 개발된 원심분리기 후보인 이 기계는 1970년대와 1980년대 초에 개발된 설계에 바탕을 두고 있으며, 분리 능력은 330~350SWU/yr으로 알려져 있으나 이 기계들은 수명이 짧아서(1~5년) 경제성은 높지 않은 것으로 알려져 있다.

바. 164개 원심분리기로 구성되는 cascade의 운전 특성

본 설계는 이란 농축 프로그램의 기본적인 구조로서 그 근원은 파키스탄과 독일에서 유래된 것이다. 이 cascade는 15stage로 구성되고, 공급은 24개의 농축기로 구성된 5번째 stage에서 이루어진다. 양적으로 공급과 생산은 각각 시간당 70g과 7g이며 생산물의 농축도는 3.5%이다. 인용된 제품 생산비율은 오직 1개의 기계가 최상 stage에 있는 것을 시사한다. 이 정보와 이상적 cascade를 위한 표준공식을 사용하면, 아래 <부록 그림 I-4>와 매우 유사한 모양의 cascade가 얻어진다. Cascade의 특성과 성능 모사는 원심분리기의 공급물 농축도와 공급 속도 변화에 따른 과도 응답(transient response)과 단순 수치모델에 대한 Rätz의 해석에 기초를 두고 있다.

P-1형 원심분리기 164개를 사용한 cascade의 연간 생산량은 농축도에 따라 34~113kg이 될 수 있으며, 영변의 cascade는 이 cascade를 2배 또는 약간 변형한 172×2형태인 것으로 추정된다.

부록 표 I-4 P-1형(164개로 구성된 cascade)의 운전 조건에 따른 모사 평가결과

운전 형태*	164 P1-040	164 P1-044	164 P1-100	164 P1-135
L/F	3.94	3.73	2.31	1.92
F* [mg(UF6)/S]	4.00	4.40	10.00	13.50
Feed [mg(UF6)/S]	15.36	16.90	38.40	51.84
Product [mg(UF6)/S]	1.57	1.73	3.93	5.31
Tails [mg(UF6)/S]	13.79	15.17	34.47	46.53
Feed [kg(U)/yr]	328	360	819	1,105
Product [kg(U)/yr]	34	37	84	113
Tails [kg(U)/yr]	294	323	735	992

Standard Operation

Feed	0.720%	0.720%	0.720%	0.720%
Product	5.672%	5.517%	4.022%	3.498%
Tails	0.155%	0.173%	0.343%	0.403%
SP-C [SWU/yr]	389	393	408	405
SP-AM [SWU/yr]	2.37	2.40	2.49	2.47

Batch Mode(first cycle: using 3.5% enriched feed)

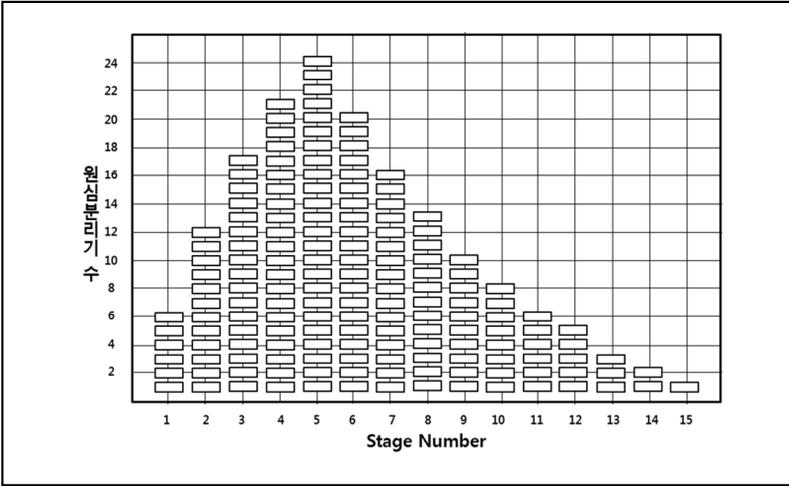
Feed	not considered	3.498%
Product		16.309%
Tails		2.037%

Batch Mode(second cycle: using 16.3% enriched feed)

Feed	not considered	16.309%	not considered
Product		91.089%	
Tails		7.568%	

※ '164 P1-040'은 P-1형 164개를 사용한 cascade에 공급류 흐름이 4.0mg/s를 나타냄.

● 부록 그림 I-4 164개의 원심분리기(15-stage) 배열



부록 II. 북한의 경수로 건설과 관련된 기술적 사항

1. 북한의 경수로 건설과 관련된 기술적 사항

북한의 경수로 건설이 공식적으로 확인되었으나 북한이 정말 경수로를 자체적으로 건설할 능력이 있는지에 대한 의문이 제기되고 있다. 이를 정확히 평가하기 위해서는 북한이 가진 기술력과 산업생산력에 대한 세부적인 정보가 필요하나 이에 대해서 알려진 것이 거의 없어 정확한 판단은 사실상 어려운 실정이다. 그러므로 여기에서는 북한이 자체적으로 경수로용 핵연료를 제작하는데 필수적인 ‘농축 능력’을 보유하고 있는지를 알아보고, 북한이 건설하고자 하는 ‘경수로의 실체를 예상’하여 건설 가능성을 판단하는데 도움이 되는 분석을 시도해 보고자 한다.

가. 원자로 기동(최초 운전)에 필요한 농축 능력

해커 박사가 공개한 자료에 따르면 북한의 농축시설에는 2,000개의 원심분리기가 설치되어 있고 총 농축능력은 8,000kg-SWU/yr 이다. 또한 천연우라늄(약 0.71%)을 공급하여 평균 3.5%(2.2~4%)의 농축 우라늄을 생산하고, tail의 농도는 0.27%라 한다. 이를 바탕으로 북한의 농축시설에서 생산 가능한 농축 우라늄의 양을 생산품의 농축도에 따라 계산해 본 결과는 다음 표와 같다.

● 부록 표 II-1 북한의 농축시설의 연간 농축 우라늄 생산량

농축도[%]	2.2	3.0	3.5	4.0	90	93
생산량[kg-U/년]	3,737	2,221	1,755	1,445	40.0	38.6

북한의 주장을 바탕으로 계산하면 본 농축시설을 가동률 100%로 가동하면 약 2.3년²(노심 1기분 우라늄량/연간 생산량=4/1.755) 이후인 2012년 초에는 북한이 짓고 있는 경수로 1기분의 핵연료를 제작하는데 사용할 저농축 우라늄(LEU)을 생산할 수 있다. 또한 이렇게 생산한 저농축 우라늄을 직접 핵연료로 사용할 수는 없고, 이를 피복된 이산화우라늄 연료로 가공하는 단계를 거쳐야만 경수로용 핵연료로 사용할 수 있기 때문에 이 보다 좀 더 많은 시간이 소요될 것이다.

나. 지속적인 원자로 가동에 필요한 농축 능력

원자로를 지속적으로 가동하기 위해서 주기적으로 핵연료를 교체해 주어야 한다. 예를 들어 열출력이 2,700MW인 경수로를 75% 가동률로 가동할 경우, 이를 유지하기 위한 핵연료를 제작하는데 필요한 연간 우라늄 농축 소요량은 약 150ton-SWU/yr 정도(생산품의 농축도가 3.5%, tail의 농축도가 0.2%이고 경우)이다. 100MWth 경수로의 경우, 대체로 1/27 정도인 약 5,600kg-SWU 정도의 농축 능력을 필요로 할 것이며, 또한 북한처럼 tail의 농축도가 0.27%인 경우에는 농축 소요량이 약 4,770kg-SWU/yr으로 줄어든다. 농축작업 필요량은 우라늄 농축도가 같더라도 tail의 농축도(U-235의 비율)가 달라지면 동일한 양의 농축 우라늄을 생산하는데 필요한 농축 작업량이 달라진다. 그러나 tail의 농축도가 높아지면 그에 비례하여 필요한 천연 우라늄양이 증가한다.

² 실제로 초기 노심에는 3.5%보다 낮은 농축도의 연료도 장전될 것이기 때문에 농축 시설이 100%로 가동 된다면 초기 노심 농축에 필요한 기간은 보다 짧을 것으로 예상된다.

이상의 내용을 종합하면, 북한이 공개한 영변 농축시설이 제대로 가동된다면 핵연료 공급은 충분하다고 볼 수 있다. 그리고 영변의 농축시설이 북한이 목표로 한 성능(8,000kg-SWU/년)보다 훨씬 낮은 성능으로 운전된다 하더라도 북한이 1년 반(2009년 4월부터 2010년 10월까지) 동안에 2,000개의 원심분리기를 설치할 능력이 있다면 이미 이전에 다른 장소(들)에도 원심분리기를 설치하였을 가능성이 있다고 볼 수 있다. 또는 앞으로도 비교적 단기간에 비슷한 규모 또는 그 이상의 원심분리기를 추가로 건설하는 것도 가능할 것이기 때문에 농축능력 측면에서는 100MWth 원자로를 운영하는 데는 문제가 없을 것으로 판단된다.

다. 열효율과 원자로 1차 계통에 주어지는 온도와 압력

경수로는 가압경수로는 물론이고 비등수형의 경우에도 원자로 용기를 비롯한 1차 계통이 높은 온도와 압력에 견딜 수 있어야 한다. 따라서 1차 계통에 필요한 여러 부품들을 제조하기 위해서는 고난도의 기술과 오랜 경험을 필요로 한다. 그러나 발전소의 열효율을 낮게 한다면 1차 계통에 주어지는 온도와 압력의 부담이 크게 낮아질 수 있으며, 기기제작에 필요한 기술의 어려움이 크게 완화될 수 있을 것이다.

북한의 100MWth 원자로의 상세한 운전조건이 알려지지 않아, 현재 실제로 운영되고 있는 1,000MWe급 가압경수로의 운전조건을 기준으로 열효율의 변화에 따른 1차 계통에 필요한 최소한의 온도와 압력의 변화를 개략적으로 계산했으며 1,000MWe 경수로 열출력을 2,815MWth, 원자로 온도를 323°C, 응축기 온도를 50°C로 가정하였다.³ 이러한 계

3. 계산의 편의를 위해 원자로의 효율을 계산할 때, 실제 열효율을 이상적인 열기관의 열효율의 1,000MWe 경수로에서 나타난 수치인 77.5%로 가정함.

산은 실제 조건과는 상당한 차이가 있을 수 있으나 열효율을 희생하면 경수로 주요기기가 감당해야할 온도와 압력의 부담이 얼마나 완화될 수 있는가를 잘 보여 준다.

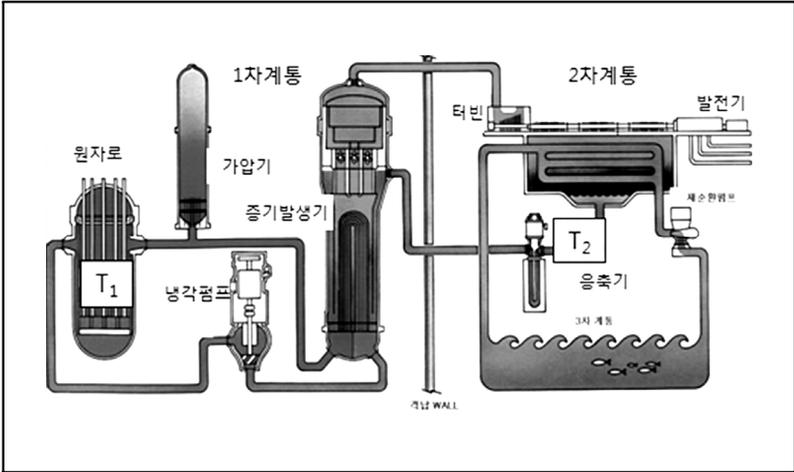
● 부록 표 II-2 열효율에 따른 1차 계통의 온도와 평형 수증기압

	원자로 가동조건			안전을 고려한 원자로 설계기준 (가동온도 + 27℃)		
	가동 온도 [℃]	평형 수증기압 [kgf/cm ²]	1,000MWe 경수로 대비 평형수증기압비	온도 [℃]	평형 수증기압 [kgf/cm ²]	1,000MWe 경수로 대비 평형수증기압비
1,000MWe 경수로 (열효율 35.5%)	323.0	119.7	1	350	168.5	1
열효율 30%	254.0	43.3	0.36	281	66.3	0.39
열효율 25%	203.8	17.1	0.143	230.8	28.9	0.17
열효율 20%	162.4	6.7	0.06	189.4	12.6	0.075

<부록 표 II-2>에서 보는 바와 같이 예를 들어, 열효율을 35.5%에서 25%로 낮출 경우, 원자로 1차 계통에 요구되는 온도가 약 119℃나 낮아지고 압력은 무려 1/6 정도로 감소한다. 이는 열효율을 대폭 희생하면 훨씬 낮은 기술수준으로도 원자로 용기와 관련 기기 제작이 가능하다는 것을 의미한다. 또한 북한은 해커 박사에게 구체적인 전기출력(electric power)을 밝히기 꺼려했다고 하는데 그 이유가 발전소 건설 후에 기기성능 등에 문제가 발생할 경우 설계에서 예정된 온도와 압력보다 낮추어(더불어 전기 출력도 낮아짐) 운전할 가능성을 고려한 것일 수도 있다. 즉, 북한은 경수로를 건설·운전하면서 기기의 성능에 결함이 발견되어 예정된 발전 효율보다 낮은 효율로 운전하게 되더라도

경수로가 성공적으로 운영되고 있다고 선전할 여지를 둔 것이라고 추정할 수 있다.

부록 그림 II-1 원자력 발전소 에너지 전달 계통



1,000MWe급 경수로의 열출력은 약 2,815MWth이므로 열효율은 약 35.5%이다. 정상운전시 이 원자로의 온도는 약 323°C⁴(평균 수증기 압력 119.7kgf/cm²)정도이다. 이때 2차 계통 응축기의 온도를 50°C⁵라 가정하면 이론적 최대 열효율은 열역학 법칙에 의하여, 이론적 최대 열효율 = $(T_1 - T_2) / T_1$ 로 표시되므로, 1,000MWe 원자로의 이론적인 최대 효율은 45.8%이다.⁶

4. 모든 1,000MWe급 경수로의 운전온도가 정확히 이 온도는 아닐 것이지만 예를 들어 유사한 값을 선택한 것임.
5. 실제 운영되는 정확한 온도를 알 수 없어서 임의의 온도를 설정한 것이며, 이 온도가 변하면 전체 열효율이 변할 수 있으나, 전체적인 경향은 크게 변하지 않을 것임.
6. 여기서는 T1 = 기관의 고온부 온도(절대온도), T2 = 기관의 저온부 온도(증기터빈의 경우 응축수 온도)임.

즉, 이론적인 최대 효율은 45.8%이나 실제 효율은 열손실, 기계적 문제 등으로 인하여 이 보다 훨씬 낮은 35.5% 정도이고 이론 효율 대비 실제 효율은 약 77.5% 정도로 추산 된다. 실제 효율을 이론 효율의 77.5%라는 값을 적용하여 열효율 25%인 경우에 필요한 노심 온도(x)를 역으로 추산하면, 203.8°C가 되어 323°C보다 약 119°C가 낮다. 203.8°C와 평형을 이루는 수증기 압력은 17.12kgf/cm²이며, 이는 119.7kgf/cm²에 비하면 매우 낮은 값이다(323°C인 경우의 약 14%).

또한 실제로는 안전문제 때문에 원자로 용기는 운전 온도보다 약 27°C가 높은 350°C(평형 수증기압 168.5kgf/cm²)까지 견딜 수 있도록 설계한다고 한다. 열효율 25%인 경우에도 안전문제를 고려하여 운전온도인 203.8°C 보다 27°C 높은 230.8°C의 평형 수증기압을 보면 28.9kgf/cm²로 350°C인 경우의 약 17%에 불과하다.

부록 Ⅲ. 핵실험 개요 및 핵무기 특성

1. 핵실험 개요

가. 목적

핵무기는 핵물질을 초임계상태로 만들어 충분한 연쇄 핵반응을 일으키고 이로 인해 발생하는 많은 양의 에너지를 폭발력으로 이용한다. 즉, 핵무기의 성능은 핵물질을 얼마나 빠르게 임계질량 이상으로 합체하고 충분히 연쇄 핵반응을 일으킬 수 있는 환경을 만들어 주느냐에 달려있다. 따라서 적은 양의 핵물질로 강력한 폭발력을 내는 우수한 성능의 핵무기 제작에는 매우 정밀한 공학적 기술이 필요하다. 예를 들어 내폭형 원자폭탄의 경우 원형으로 대칭적인 충격파를 만들어 짧은 시간에 핵물질을 압축하여 초임계상태를 만드는 기폭장치가 필수적이나, 이 장치는 핵물질의 부분폭발 현상을 방지하기 위해 100만분의 1초 단위의 정밀도를 요구하고 있다.

이러한 기폭장치 이외에도 초기 핵분열을 유도하는 중성자 발생장치, 핵물질 외부로 누출되는 중성자를 반사시켜 내부의 중성자 밀도를 높게 하여 핵물질의 임계질량을 줄이고 폭발 효율을 증가시키는 역할을 하는 반사재, 핵물질을 둘러싸 자체의 관성효과를 통해 핵분열중인 물질의 팽창을 늦추어 폭발의 효율성을 높여주는 텀퍼(tamper) 등 다양한 부품이 핵무기의 설계 목적에 따라 설치되고 이러한 부품들의 완벽한 작동을 통해 핵무기의 성능이 극대화 될 수 있다. 따라서 제작한 핵무기가 설계한 대로 제대로 작동하는지 성능을 확인하고 성능을 개선하거나 새로운 핵무기를 설계하기 위한 기초자료를 확보하기 위해서는 반드시 핵실험이 필요하다. 추가적으로 자국의 과학기술 및 군사

력 과시, 타 핵무기 보유국에 대한 위협 및 견제 등 정치적 수단으로 핵실험이 이용되기도 한다.

나. 역사

인류 최초의 핵실험은 미국이 나가사키 원폭 투하를 앞두고 1945년 7월 16일 뉴멕시코 사막에서 실시한 트리니티 핵실험으로, 플루토늄탄을 사용하여 약 20kT의 폭발력을 보인 것으로 알려져 있다. 이후 미국은 세계유일의 핵무기 보유국이라는 독점적 지위를 유지해 오다 구소련이 1949년 8월 29일 20kT 규모의 핵폭탄 실험에 성공하면서 미소간 핵무기 양강구도로 개편되었으며, 이때부터 양국의 본격적인 핵무기 개발 경쟁이 시작되었다. 또한 다른 강대국들도 핵무기 보유의 필요성을 절감하고 앞다투어 핵무기 개발을 추진한 결과 영국, 프랑스, 중국 순으로 핵실험을 성공하여 핵무기 보유국 반열에 올라섰다. 미소 양국은 중국까지 핵실험을 성공하고 핵무기 보유를 선언하자 추가적인 핵무기 보유국가의 출현을 염려하여 핵비확산에 대한 논의에 본격적으로 착수하였다. 미소 양국은 핵무기의 확산 방지를 위해 핵보유국은 핵비보유국에게 핵무기를 이전하지 않으며 핵비보유국은 핵무기의 제조·취득을 하지 않고, 이의 이행여부를 확인하기 위한 보증 수단으로 안전조치를 실시한다는 내용을 포함하고 있는 핵비확산 조약(NPT) 초안을 제시하였다. 하지만 핵비보유국들은 이러한 핵비확산 조약 제안이 국가 고유의 권리를 침해하는 불평등 조약이라고 크게 반발하였으나 미소 양국의 정치·경제적 압박에 의해 1969년 6월 12일 국제연합 총회에서 이 조약의 지지결의를 채택하였다. 이후 1970년 3월 NPT가 발효되어 핵비보유국의 핵무기 개발은 금지되었으며, NPT 발효 이전에 핵무기를 개발한 미국, 구소련, 영국, 프랑스, 중국 등 5개국

이 핵무기 보유국가로 인정되었다. 하지만 이러한 국제사회의 핵비확산 노력에도 불구하고 NPT 비당사국이던 인도는 평화적인 목적이라는 명분으로 1974년 5월 최초 핵실험을 강행하였으며, 이 핵실험이 일부 성공으로 평가되었다. 이후 인도는 20여년 간 추가적인 핵실험을 하지 않다가 1998년 5월 한달 간 5차례의 추가 핵실험을 실시함으로써 핵보유능력을 국제사회에 알렸다. 반면 인도의 최초 핵실험은 인도와 오랜 분쟁국이던 파키스탄이 핵개발에 뛰어들게 한 중요한 시발점이 되었다. 파키스탄은 1974년 인도의 최초 핵실험 이후 자체적인 핵무기 개발에 착수하였으며, 1998년 인도가 추가 핵실험 실시 이후 약 2주가 지난 5월 28일과 5월 30일 6차례의 핵실험을 연속적으로 실시하여 핵보유국임을 스스로 증명하였다. 하지만 인도와 파키스탄은 NPT 비당사국으로서 NPT 발효 이후 핵실험을 강행하고 핵무기를 보유한 경우로 국제사회에서 핵보유국 지위를 인정받지 못하고 있다.

● 부록 표 III-1 각국의 최초 핵실험 관련 사항

국가	사용 핵물질	폭발규모	실험 연도
미국	플루토늄	20~22kT	1945년
구소련	플루토늄	22kT	1949년
영국	플루토늄	25kT	1952년
프랑스	플루토늄	60kT	1960년
중국	농축 우라늄	20~22kT	1964년
인도	플루토늄	주장 : 12~15kT 추정 : 4~6kT-	1974년
파키스탄	농축 우라늄	주장 : 12kT 추정 : 4~6kT	1998년
북한	플루토늄	추정 : 0.4~0.8 kT (부분폭발 추정)	2006년

핵보유국들과 인도, 파키스탄, 북한 등은 1945년부터 2013년까지 총 2,060여회 이상의 핵실험을 실시한 것으로 파악되며 대부분 지상, 해저 및 지하에서 실시되었다. 미국은 1945년부터 현재까지 1,032회의 핵실험을 실시하였으며, 러시아는 715회의 핵실험을 실시하였다. 다른 핵보유국의 핵실험 실시 횟수는 모두 합쳐 315회로 미러 양국의 핵실험 횟수에 비해 상대적으로 적다. 핵무기 개발이 왕성했던 1950~1960년대 초기에는 지상 또는 해저 핵실험을 주로 하였는데 이로 인한 부작용과 국제사회의 비판이 거세지자 미국, 영국, 구소련은 1963년 지하를 제외한 환경(지상, 해저, 우주 등)에서의 핵실험을 금지하고 지하 핵실험 일지라도 다른 국가로 방사성 물질이 확산되지 못하도록 규정하는 부분적 핵실험 금지조약(Partial Test Ban Treaty, 이하 PTBT)을 체결하였으며, 이후 대부분의 핵실험은 지하에서 실시되었다(하지만 프랑스, 중국 등은 동 조약을 체결하지 않고 1980년까지 지상 핵실험을 지속적으로 수행하였다). 하지만 부분적 핵실험 금지조약은 지하에서의 핵실험을 허용하고 있었기 때문에 핵실험 및 핵무기 확산에 대한 제한 효과를 가져오지는 못하였다. 이에 미국과 구소련은 1974년 지하 핵실험의 규모를 150kT 이하로 제한하는 조약(Threshold Test Ban Treaty, 이하 TTBT)을 체결하는 등 핵개발의 억제에 많은 노력을 기울였다. 하지만 이러한 미국과 구소련의 노력에도 불구하고 핵무기 개발을 추진하는 국가들이 지속적으로 핵실험을 강행하자 국제사회는 일체의 핵실험을 금지하는 포괄적 핵실험 금지조약(Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty, 이하 CTBT)을 제안하였으며, 이 조약은 1996년 국제연합 총회에서 절대 다수의 찬성으로 채택되었다. 하지만 CTBT가 발효되기 위해서는 미국, 영국, 러시아를 포함한 원자력 능력을 가진 44개국의 비준이 필요하나 미국, 중국 등은 아직 미비준 상태이며 인도, 파키스탄, 북한 등은 서명조차 하고 있지 않아 조약의 발효가 불투명하다.

부록 표 III-2 각국의 공식적인 핵실험 실시 횟수(1945~2013)

	미국	러시아 (구소련)	영국 ⁷	프랑스	중국	인도	파키 스탄	북한	합계
지상+ 해저 핵실험	217	219	21	50	23	-	-	-	530
지하 핵실험	815	496	24	160	22	6	6	3	1,532
합계	1,032	715	45	210	45	6	6	3	2,062

다. 핵실험의 종류

핵실험은 크게 실험이 수행되는 장소에 따라 지상 핵실험, 수중 핵실험, 지하 핵실험, 대기권 핵실험으로 구분한다. 핵무기 개발 초기인 1950년대에는 주로 지상 또는 수중에서 많은 핵실험이 실시되었으나, 핵실험 이후 방사성 물질에 의한 피해 및 부작용 등의 문제로 1960년대부터는 대부분 지하에서 핵실험을 실시하였다.

(1) 지상 및 수중 핵실험

핵무기 개발 초기에는 개발비용에 대한 부담, 실험의 편의성 등을 고려하여 주로 지상에서 수행되었다. 지상 핵실험은 핵실험의 준비 기간이 짧고, 비용이 저렴하며, 핵실험 결과를 관측하는데 용이하다는 장점이 있어 많은 국가들이 핵무기 개발 초기에 지상에서 많은 핵실험

7. 영국의 지하 핵실험은 모두 미국의 네바다 주 핵실험장에서 실시되었으나 표에 명시된 핵실험 횟수는 영국내에서 실시한 핵실험 횟수로 집계하였으므로 실제 수행한 핵실험 횟수는 더 많음.

을 수행하였다. 하지만 지상 핵실험은 핵무기 폭발 이후 부산물인 방사성 물질로 인한 환경오염 등의 단점으로 인해 국제사회의 거센 비판을 받았다. 이에 따라 당시 핵보유국이던 미국, 구소련, 영국은 부분적 핵실험 금지조약을 체결하고 지상 환경에서의 핵실험을 전면 금지하였다. 1963년 부분적 핵실험 금지조약 체결 이전까지 미국은 총 97회, 러시아는 139회, 영국은 21회 등 대부분의 핵실험을 지상에서 실시하였으며, 1963년 이후에는 모두 지하에서 핵실험을 실시하였다. 하지만 프랑스와 중국은 부분적 핵실험 금지조약을 체결하지 않았기 때문에 1980년까지 다수의 지상 핵실험을 실시하였다.

수중 핵실험은 지상 핵실험과 마찬가지로 핵무기 개발 초기에 많이 실시되었다. 미국은 주로 태평양에서 120여 차례의 수중 핵실험을 실시하였으며, 비키니 섬의 수중 핵실험이 유명하다. 하지만 이러한 수중 핵실험도 방사성 물질의 확산, 환경오염 문제 등으로 1993년 부분적 핵실험 금지조약에 의해 금지되었다.

(2) 지하 핵실험

지상 핵실험의 부작용으로 인해 지상 환경에서의 핵실험이 부분적 핵실험 금지 조약에 의거 전면 금지됨에 따라 핵무기 보유국들은 지하에서 핵실험을 실시하였다. 1963년 이후 대부분의 핵실험은 지하에서 실시되었다. 지하 핵실험은 지하에 거대한 구멍을 파거나 터널을 굴착하여 땅 속 깊은 곳에 핵무기를 위치시키고 폭발시키는 방식이기 때문에 실험에 소요되는 비용과 시간이 지상 핵실험에 비해 매우 크다. 또한 핵실험의 결과 관측과 실험 제어가 다소 어려운 단점이 있다. 하지만 핵폭발 후 다량의 방사성 물질들이 땅속에 갇혀있기 때문에 방사성 물질의 누출로 인한 피해를 줄일 수 있어 환경적으로 다소 안전하다고

할 수 있다. 이런 지하 핵실험은 비밀리에 핵무기를 개발하는 국가들이 핵무기에 대한 특성 및 성능을 숨기기 위한 수단으로 이용되기도 한다. 북한도 이러한 지하 핵실험의 특성 때문에 지하 핵실험을 실시하였으며, 이로 인해 핵실험 정보를 최대한 숨길 수 있었다. 지하 핵실험은 보통 핵무기의 폭발로 인해 발생하는 특정 지진파를 분석하여 실험이 실시된 장소를 추적할 수 있으며, 또한 발생 지진파를 폭발력으로 환산하여 핵무기의 폭발력을 추정할 수 있다.

(3) 대기권의 핵실험

대기권의 핵실험은 탄도미사일, 인공위성 등의 요격용으로 개발된 핵무기를 실험하기 위해 실시되는 방식이다. 보통 대기권의 핵실험은 핵무기가 고도 40km에서 540km 지점에서 폭발하는 것을 목표로 실시되며, 1958년부터 1962년 동안 미국과 구소련이 유일하게 20여 차례의 대기권의 핵실험을 실시하였다. 대기권의 핵실험은 대기권외에서 폭발하여 방사성 물질에 의한 피해는 없지만, 핵탄두의 폭발당시 생성된 미립자와 방사선에 의해 통신장애가 발생할 수 있는 단점이 있다.

2. 핵무기 특성

가. 핵무기(원자폭탄)의 원리

핵무기는 핵분열 또는 핵융합 시 방출되는 많은 양의 에너지를 폭발력으로 이용하여 대량 살상 및 파괴용으로 이용되는 무기를 총칭한다. 핵분열 반응을 이용하는 핵무기는 연쇄 핵분열 반응이 가능한 고농축 우라늄 또는 플루토늄 등의 핵분열성 물질을 원료로 사용한다. 이러한

핵분열성 물질이 연쇄 핵분열 과정에서 자발적으로 분열하여 폭발할 수 있는 질량을 임계질량이라고 부른다. 핵무기는 미임계상태의 핵물질을 순간적으로 초임계상태로 만들고 중성자를 공급하여 연쇄 핵분열 반응이 빠른 시간 내에 일어나게 하여 핵분열에너지를 순식간에 방출하게 함으로써 대량의 폭발력을 얻을 수 있다. 핵물질의 임계질량은 핵물질의 모양, 크기, 순도 및 주변 물질에 따라 다르며 일반적으로 핵물질의 농도가 100%이고 완벽한 구 형태를 가지고 있다고 가정하면 U-235의 임계질량은 56kg(직경 17cm)이며, Pu-239의 경우 10kg(직경 9.9cm)로 알려져 있다. 핵무기 설계 및 제조 시 핵무기의 크기를 줄이고 폭발효율을 높이기 위해 중성자 반사재를 사용하게 되는데 이러한 반사재 사용을 통해 핵물질의 임계질량을 줄일 수 있다. 만약 앞서 말한 구형태의 핵물질이 반사재로 둘러 싸여져 있다면 U-235의 임계질량은 15kg 정도로 낮아지며, Pu-239의 경우 4.5kg 정도로 낮아질 수 있다. 또한 동일한 형상을 가진 핵물질일지라도 임계질량은 밀도의 제공에 반비례(즉 밀도가 2배, 3배로 증가하면 임계량은 각각 1/4, 1/9로 감소)하므로 고도의 기폭 및 압축 기술을 통해 임계질량을 줄일 수 있기 때문에 이 수치가 핵무기를 제작하기 위한 필요량을 나타내는 것은 아니며, 적은 양의 핵물질로 핵무기를 만드는 것이 최신 핵무기 제작 핵심기술로 평가되고 있다.

나. 핵무기(원자폭탄)의 종류

핵무기는 일반적으로 핵분열 연쇄반응을 빠른 시간 안에 일어나게 하여 폭발력을 가져오는 핵분열 기반의 폭탄을 ‘원자폭탄,’ 중수소나 삼중수소, 리튬 등을 순간적으로 가열 압축하여 핵융합 반응을 일으켜 폭발력을 발생시키는 핵융합 기반의 폭탄을 ‘수소폭탄’이라고 부른다.

원자폭탄은 핵분열에 사용된 핵물질의 종류에 따라 ‘우라늄탄’과 ‘플루토늄탄’으로 구분되며, 또한 핵물질을 임계질량 이상으로 만드는 폭파 방식에 따라 ‘합체형(gun type) 원자폭탄’과 ‘내폭형(implosion type) 원자폭탄’으로 구분된다.

(1) 원자폭탄 vs 수소폭탄

원자폭탄은 U-235, Pu-239 등의 핵물질을 순간적으로 임계질량 이상으로 만들어 연쇄 핵분열 반응에서 나오는 에너지를 이용하는 반면 수소폭탄은 원자폭탄을 기폭장치로 이용하며 원자폭탄이 폭발할 때 발생하는 열과 중성자로 핵융합 환경을 만든 다음 중수소 또는 삼중수소의 핵융합 반응을 유도하여 발생하는 다량의 에너지를 이용한다. <부록 그림 III-1>⁸에서 보는 바와 같이 핵융합 반응은 수천만도의 고온과 수백만 기압의 고압이 필요하므로 열핵무기(thermonuclear weapons)라 부르기도 하며, 이러한 이유로 기폭장치로 원자폭탄을 사용한다. 기폭장치인 원자폭탄이 폭발하면 수소폭탄 내부가 반경방향으로 압축되고 방사선에 의해 발생된 고열이 내부의 폴리스티렌(Polystyrene)을 플라즈마 상태로 만들어 핵융합 환경을 만들어 주며, 연료 물질인 중수소화리튬(LiD) 내 Li-6가 원자폭탄의 폭발로부터 발생한 중성자를 흡수하여 삼중수소(3H, 트리튬)와 헬륨(He)을 생성한다. 이때 생성된 삼중수소와 중수소가 핵융합 반응을 일으켜 핵융합 에너지를 방출하게 된다. 또한 일반적인 수소폭탄은 연료물질 겉을 감손우라늄으로 둘러싸고 추가적인 핵분열 반응을 유도하여 폭발력에 위력을 가하도록 제작된다. 또한 핵융합에 필요한 충분한 온도와 압력

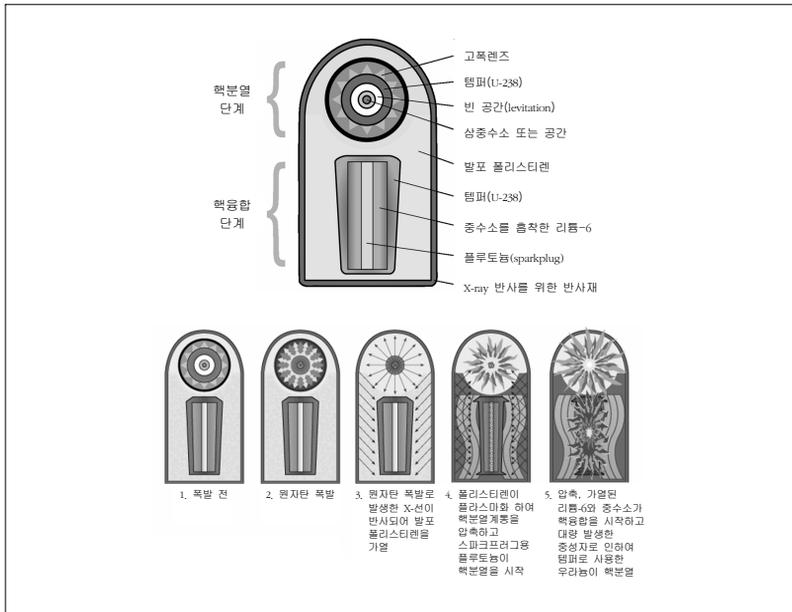
⁸. WIKIPEDIA, <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermonuclear_weapon>.

을 얻기 위해 핵융합 물질 중심에 원통형의 플루토늄을 추가로 사용하는 경우도 많다. 수소폭탄은 원자폭탄에 비해 장치가 훨씬 복잡하기 때문에 전체 크기나 중량이 크게 증가하게 된다.

● 부록 표 Ⅲ-3 원자폭탄과 수소폭탄 비교

핵무기	기본원리	사용 물질	기폭장치	비고
원자폭탄	핵분열	U-235 Pu-239	고성능폭약 (화약폭탄)	핵폭풍, 초기방사선, 낙진에 의한 방사능 오염과 전자장 파동을 수반
수소폭탄	핵융합	LiD (중수산화리튬)	원자폭탄 사용	수소폭탄 겉에 U-238을 입혀 위력을 증가시킨 3F탄(Fission-Fusion-Fission)이 일반적인 형태임.

● 부록 그림 Ⅲ-1 수소폭탄의 구조(上)와 폭발원리(下)



(2) 우라늄탄 vs 플루토늄탄

우라늄탄은 연쇄핵분열 물질로 U-235를 사용한다. 천연 우라늄 중 U-235는 0.71% 밖에 존재하지 않아 충분한 연쇄 핵반응을 일으키기 위해서는 동위원소 분리 방식을 통해 U-235를 분리하고 농축해야 한다. 즉, 우라늄탄을 만들기 위해서는 20% 이상의 고농축 우라늄을 생산할 수 있는 우라늄 농축기술의 확보가 우선되어야 하며, 무기급으로 사용되기 위해서는 농축도가 최소 90% 이상인 U-235가 필요하다고 알려져 있으나 핵무기 제작 기술에 따라 요구되는 농축도는 더 낮아질 수 있다. U-235는 자발 핵분열율이 0.16(핵분열횟수)/kg-s으로 매우 작아 분리된 핵분열 물질을 합쳐 초임계 상태로 만드는 결합과정이 용이하여 제작이 상대적으로 쉬운 편이다. U-235 원자 1개의 핵분열 에너지는 215.2MeV로 U-235 1kg이 완전히 핵분열 한다고 가정할 경우 약 20kT의 핵폭발 위력을 가진다고 이론적으로 밝혀져 있다. 일본 히로시마에 투하된 원자폭탄은 농축 우라늄 64kg이 핵분열 물질로 사용되어 18kT의 폭발력을 가졌던 것으로 분석되어 있고, 실제 핵분열한 핵물질은 겨우 전체의 1.4% 밖에 되지 않았다고 보고되고 있다.

플루토늄탄은 연쇄 핵분열 물질로 Pu-239를 사용하며, Pu-239는 U-238의 증식과정을 통해 얻을 수 있다. U-238은 중성자 하나를 흡수하여 U-239가 만들어 지며 불안정한 상태의 U-239가 두 번의 베타붕괴 과정을 거쳐 Pu-239로 변환된다. 원자로 내 핵연료는 90% 이상이 U-238로 채워져 있기 때문에 핵연료의 연소과정에서 자연스럽게 Pu-239가 만들어지며, 연소된 사용후핵연료 내의 Pu-239를 재처리를 통해 분리 획득할 수 있다. 즉, 플루토늄탄을 만들기 위해서는 사용후 핵연료의 재처리 기술이 수반되어야 하며 무기급으로 사용되기 위해서는 농축도 93% 이상의 Pu-239가 필요하다고 알려져 있으나 이 또한

핵무기 제작기술에 따라 요구되는 농축도가 더 낮아질 수 있다. 93% 이상의 핵무기급 순도의 Pu-239는 중성자 밀도가 높은 흑연감속로(영변 원자로형)에서 생산이 가능하며, 경수로에서는 약 60~70% 정도의 순도를 가진 Pu-239가 생산된다고 알려져 있다. 이러한 재처리를 통한 Pu-239 획득 및 플루토늄탄 제작은 우라늄농축을 통한 고농축 우라늄 획득 및 우라늄탄 제작보다 시간과 비용이 절감되며, Pu-239의 임계질량은 U-235에 비해 작아 핵무기의 경량화에 유리하다. 하지만 원자로 내 핵연료에는 Pu-239 뿐만 아니라 Pu-240도 함께 존재하는데 Pu-240은 매우 높은 자발핵분열율(415,500(핵분열횟수)/kg-s)을 가지고 있고 생성 도중 중성자를 흡수하는 성질 때문에 핵무기 사용에 부적절한 불순물로 작용한다. 플루토늄탄은 이러한 Pu-240의 불순물적 성질로 인해 무기급 플루토늄 내에서 Pu-240의 함량이 7% 이하로 유지되어야 하며, 내폭형 구조만을 가져야하는 구조적 제약을 가지고 있는 등 제작이 상대적으로 어려운 단점이 있다. Pu-239의 1kg이 완전히 핵분열한다고 가정할 경우 약 20kT의 핵폭발 위력을 가진다고 이론적으로 밝혀져 있으며, 일본 나가사키에 투하된 원자폭탄은 플루토늄 6.2kg을 사용하여 21kT의 폭발력을 가졌던 것으로 분석되어 실제 핵분열 효율이 16% 정도 되었다고 보고 있다.

부록 표 III-4 우라늄탄과 플루토늄탄의 특성 비교

	우라늄탄	플루토늄탄
취급성	- 상태가 안정적이며 독성이 거의 없어 취급하기 용이함.	- 자체독성이 강하여 취급이 어려움. - 취급을 위하여 별도의 글로브 박스 등이 필요함.
보관성	- 습기에 약하고 산화되기 쉬우나, 표면에 산화막을 형성하여 건조 상태에서는 안정화됨.	- 습기와 산소에 약하고, 산화되기 쉬워 표면에 금을 도금하여 보관함. - 장기간 보관할 경우 Am-241의 농도가 높아져 감마선이 많이 발생되므로 다시 용해하여 정제 후 가공해야 함.
기폭장치	- 합체형 기폭장치를 사용하여 폭탄 제조가 가능하나 고농축 우라늄 50kg 이상이 필요함. - 내폭형인 경우 고농축 우라늄 15kg 정도로 폭탄 제조 가능함.	- 효과적인 핵무기 제조를 위해서는 내폭형 기폭장치를 사용하며, 이는 합체형보다 복잡하고 높은 정밀성과 신뢰성이 요구됨.

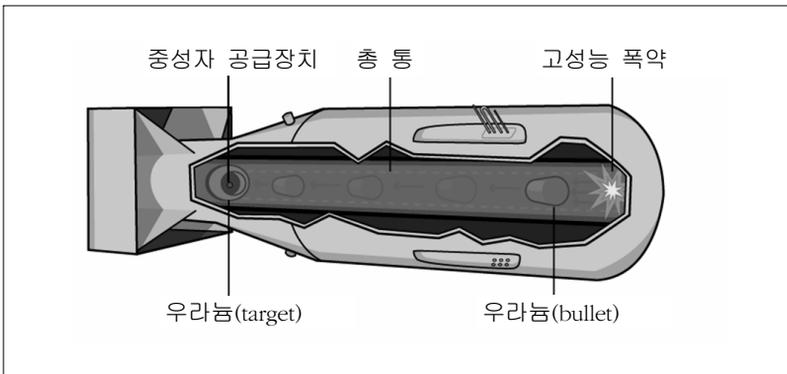
(3) 합체형 vs 내폭형

핵무기는 핵물질의 연쇄핵분열 반응을 일으키기 위해 핵물질을 임계질량 이상으로 만들어 주는 결합 방식에 따라 합체형(또는 포신형, gun type)과 내폭형(implosion type)으로 구분된다. 임계질량 이하의 여러 핵물질을 순간적으로 결합하여 임계질량 이상으로 만들어 주는 방식을 합체형, 임계질량 이하의 물질을 압축하여 임계질량 이상으로 만들어 주는 방식을 내폭형이라 한다.

합체형 원자탄은 핵분열성 물질을 두 부분으로 나누어 구분되게 설치하고, 한쪽의 핵분열성 물질을 다른 물질 쪽으로 이동시켜 순간적으로 합체시켜 임계질량 이상으로 만들어 줌으로써 핵분열 연쇄반응을 일으키는 방식이다. 이 방식은 두 핵물질이 합쳐지는데 걸리는 시간이

상대적으로 길기 때문에 플루토늄탄의 경우 Pu-240의 높은 자발핵분열율로 인해 부분폭발(fizzle)현상이 일어날 확률이 증가하므로 적용이 어려우며, 우라늄탄에만 적용할 수 있다. 이 방식은 장치제작이 단순하지만 상대적인 시간적 지연으로 인해 두 핵물질이 완벽하게 합체되기 이전에 핵분열이 시작될 수 있어 핵분열 효율이 낮다는 단점이 있다. 이 방식은 핵분열을 측면에서 비효율적이어서 핵무기 제작기술이 발전된 국가에서는 더 이상 사용하고 있지 않으나, 충분한 농축 우라늄을 보유하고 있는 국가라면 비교적 쉽게 핵무기를 제작할 수 있으며, 핵실험 없이도 실전에 사용이 가능하다. 일본 히로시마에 투하된 원자폭탄이 이와 같은 합체형 핵무기였으며, 당시에서 핵실험없이 투하되었다고 알려져 있다.

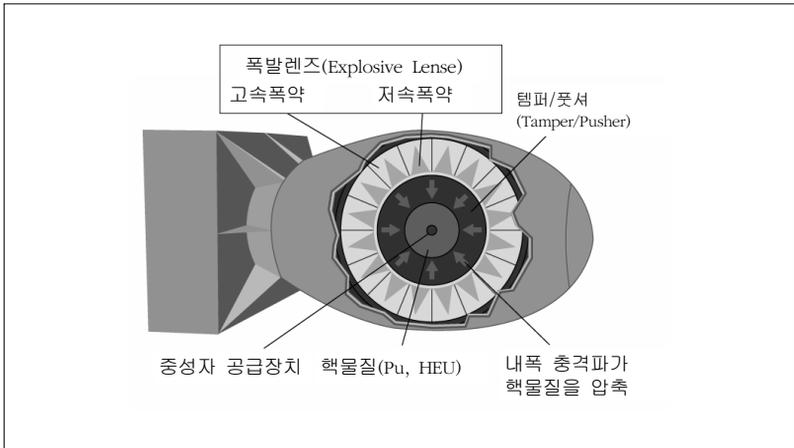
● 부록 그림 Ⅲ-2 합체형 원자폭탄 구조



내폭형 원자탄의 경우 임계질량 이하의 물질을 폭발물질로 둘러싼 다음 안쪽으로 폭발하게 함으로써 순간적으로 핵분열성 물질을 압축시켜 임계질량 이상이 되도록 하여 핵분열 연쇄반응을 유도한다. 내폭형 방식은 핵물질을 임계질량 이상으로 만들어 주는 시간이 매우 빠르

기 때문에 플루토늄탄에 적용할 수 있으며, 단순히 핵물질의 질량을 합하여 임계질량 이상을 만들어 주는 것이 아니라 압축을 통해 일정 질량의 밀도를 높이는 방식이기 때문에 핵분열 효율이 합체형에 비해 높다. 하지만 Pu-240의 자발 핵분열로 인한 부분 폭발을 방지하기 위해서는 100만분의 1초 정도의 극히 짧은 시간의 오차 한계내에 작동해야 하는 등 장치 제작에 정밀한 기술이 필요하며, 실전에 사용하기 위해서는 핵실험을 통해 장치의 성능을 검증할 필요가 있다. 일본 나가사키에 투하된 원자폭탄이 이와 같은 내폭형 핵무기였으며, 합체형 방식이었던 히로시마 원폭에 비해 적은 양의 플루토늄을 쓰고도 폭발효율은 10배 이상이었다고 보고되었다.

● 부록 그림 III-3 내폭형 원자폭탄 구조



최근 발간자료 안내

연구총서

2011-01	제2차 핵안보정상회의와 북한 핵문제	전성훈	14,500원
2011-02	북한군의 기강 해이에 관한 연구	이교덕 외	11,000원
2011-03	통일 진입과정에서의 북한 재건 방향	최진욱, 김진하	5,500원
2011-04	북한의 부문별 조직실태 및 조직문화 변화 종합연구	정영태	16,000원
2011-05	북한형사재판제도 연구: 특징과 실태	이규창, 정광진	8,000원
2011-06	북한주민의 삶의 질: 실태와 인식	김수암 외	12,000원
2011-07	한반도 평화와 북한 비핵화: 협력적 위협감축(CTR)의 적용방안	박종철 외	10,000원
2011-08	대북한 핵협상 전략구상방향	홍우택 외	6,000원
2011-09	중국의 부상에 대한 북한의 인식과 대응	허문영, 마민호	10,000원
2011-10	북한 핵의 국제정치와 한국의 대북 핵전략	배정호 외	11,000원
2011-11	평화통일을 위한 통일외교 전략	황영호 외	13,500원
2011-12(I)	중국의 G2 부상과 한반도 평화통일 추진전략 제1부	황병덕 외	15,500원
2011-12(II)	중국의 G2 부상과 한반도 평화통일 추진전략 제2부	황병덕 외	13,500원
2011-12(III)	중국의 G2 부상과 한반도 평화통일 추진전략 제3부	황병덕 외	18,000원
2012-01	미국의 對韓 핵우산정책에 관한 연구	전성훈	14,000원
2012-02	북한부패와 인권의 상관성	김수암 외	11,000원
2012-03	보호책임(R2P) 이행에 관한 연구	이규창 외	11,000원
2012-04	EC/EU사례분석을 통한 남북 및 동북아공동체 추진방안: 유럽공동체 형성기를 중심으로	손기웅 외	14,000원
2012-05	김정은체제의 권력엘리트 연구	이교덕 외	13,000원
2012-06	독재정권의 성격과 정치변동: 북한 관련 시사점	박형중 외	11,000원
2012-07	북방삼각관계 변화와 지속: 북한의 균형화 전략을 중심으로	허문영, 유동원, 심승우	10,000원
2012-08	북한 핵문제의 전망과 대응책: 정책결정모델(Decision Making Model)을 이용한 전략 분석	홍우택	8,000원
2012-09	중국의 한반도 관련 정책연구기관 및 전문가 현황분석	전병근, 양광용	6,000원
2012-10	2000년대 대북정책 평가와 정책대안: '동시병행 선순환 모델'의 원칙과 과제	박종철 외	12,500원
2012-11	리더십교체기의 동북아 4국의 국내정치 및 대외정책 변화와 한국의 통일외교 전략	배정호 외	11,500원
2012-12	김정은 정권의 정책전망: 정권 초기의 권력구조와 리더십에 대한 분석을 중심으로	최진욱, 한기범, 장용석	7,500원
2012-13	신정부 '국가전략 DMZ 평화적 이용'	손기웅 외	8,000원
2013-01	남북러 가스관과 동북아 에너지 협력의 지정학	이기현 외	6,000원
2013-02	한국의 FTA전략과 한반도	김규륜 외	8,500원
2013-03	김정은 체제의 변화 전망과 우리의 대책	박종철 외	10,000원

2013-04	EC/EU사례분석을 통한 남북 및 동북아공동체 추진방안 - EC기 분석을 중심으로 -	손기응 외	12,000원
2013-05	오바마·시진핑 시대의 동북아 국가들의 국내정치 및 대외정책과 한국의 대북 및 통일외교	배정호 외	11,000원
2013-06	북한사회 위기구조와 사회변동전망: 비교사회론적 관점	조한범, 황선영	6,000원
2013-07	인도적 지원을 통한 북한 취약계층 인권 증진 방안 연구	이규창 외	12,500원
2013-08	새로운 세대의 탄생: 북한 청소년의 세대경험과 특성	조정아 외	15,000원
2013-09	북한의 핵-미사일 대응책 연구	홍우택	6,000원
2013-10	북한에서 국가재정의 분열과 조세 및 재정체계	박형중, 최사현	7,000원

학술회의총서

2011-01	한반도 통일비전과 국제협력		4,000원
2011-02	북한인권 실상과 효율적 개입방안		8,500원
2012-01	The Outlook for the North Korean Situation & Prospects for U.S.-ROK Cooperation After the Death of Kim Jong-il		6,000원
2012-02	김정은 체제의 북한 인권문제와 국제협력		19,000원
2012-03	해외 이주·난민 지원제도의 시사점		12,000원
2013-01	유엔 인권메커니즘과 북한인권 증진방안		20,000원
2013-02	한반도신리프로세스 추진전략		19,000원

협동연구총서

2011-14-01	북한정보관리체계 개선방안(총괄보고서)	황병덕 외	14,500원
2011-14-02	북한정보관리체계 개선방안(상)	황병덕 외	13,000원
2011-14-03	북한정보관리체계 개선방안(중)	황병덕 외	12,000원
2011-14-04	북한정보관리체계 개선방안(하)	황병덕 외	13,500원
2011-15-01	북한 경제발전을 위한 국제협력 프로그램 연구: 국제사회의 경험 분석(총괄보고서)	임강택 외	11,000원
2011-15-02	부패의 개념과 실태 및 반부패 개혁	박형중 외	10,000원
2011-15-03	체제전환국의 시장-민주제도 건설 지원	박영호 외	13,000원
2011-15-04	국제사회의 개발지원전략과 협력체계 연구	장형수 외	9,500원
2011-15-05	수원국의 역량발전을 위한 개발협력전략과 사례연구	이종무 외	9,500원
2011-15-06	인프라 개발을 위한 국제협력 사례와 시사점	이상준 외	9,000원
2012-11-01	북한 경제발전을 위한 국제협력 프로그램 실행방안(총괄보고서)	임강택 외	11,000원
2012-11-02	북한 부패실태와 반부패 전략 국제협력의 모색	박형중 외	10,000원
2012-11-03	북한 경제발전을 위한 국제협력체계 구축 및 개발지원전략 수립 방안	장형수 외	8,000원
2012-11-04	북한의 역량발전을 위한 국제협력 방안	이종무 외	8,000원
2012-11-05	북한의 인프라 개발을 위한 국제사회 협력 프로그램 추진방안	이상준 외	8,000원

2012-12-01	한반도 통일 공공외교 추진전략(I) - 공공외교의 이론적 조명과 한반도 주변4국의 對한국 통일 공공외교(총괄보고서)	황병덕 외	13,500원
2012-12-02	공공외교의 이론적 조명과 주변4국의 한반도통일 공공외교 분석틀	김규륜 외	8,500원
2012-12-03	미국의 對한국 통일 공공외교 실태	박영호 외	9,500원
2012-12-04	중국의 對한국 통일 공공외교 실태	이교덕 외	7,500원
2012-12-05	일본의 對한국 통일 공공외교 실태	이진원 외	8,000원
2012-12-06	러시아의 對한국 통일 공공외교 실태	여인곤 외	7,500원
2013-26-01	한반도 통일 공공외교 추진전략(II) - 한국의 주변4국 통일공공외교의 실태 연구(총괄보고서)	황병덕 외	14,000원
2013-26-02	한국의 對미국 통일 공공외교 실태	박영호 외	8,000원
2013-26-03	한국의 對중국 통일 공공외교 실태	전병곤 외	7,500원
2013-26-04	한국의 對일본 통일 공공외교 실태	이기태 외	8,000원
2013-26-05	한국의 對러시아 통일 공공외교 실태	조한범 외	6,000원

논총

통일정책연구, 제21권 1호 (2012)	10,000원
<i>International Journal of Korean Unification Studies</i> , Vol. 21, No. 1 (2012)	10,000원
통일정책연구, 제21권 2호 (2012)	10,000원
<i>International Journal of Korean Unification Studies</i> , Vol. 21, No. 2 (2012)	10,000원
통일정책연구, 제22권 1호 (2013)	10,000원
<i>International Journal of Korean Unification Studies</i> , Vol. 22, No. 1 (2013)	10,000원
통일정책연구, 제22권 2호 (2013)	10,000원
<i>International Journal of Korean Unification Studies</i> , Vol. 22, No. 2 (2013)	10,000원

북한인권백서

북한인권백서 2010	박영호 외 10,000원
<i>White Paper on Human Rights in North Korea 2010</i>	박영호 외 20,000원
북한인권백서 2011	김국신 외 17,500원
<i>White Paper on Human Rights in North Korea 2011</i>	김국신 외 17,500원
북한인권백서 2012	김수암 외 19,500원
<i>White Paper on Human Rights in North Korea 2012</i>	손기웅 외 23,500원
북한인권백서 2013	조정현 외 24,000원
<i>White Paper on Human Rights in North Korea 2013</i>	조정현 외 23,000원

기타

2011	통일대비를 위한 북한변화 전략(통일대계연구 2011-01-1)	박형중 외	17,000원
2011	북한변화를 위한 한-중 협력방안(통일대계연구 2011-01-2)	임강택 외	6,500원
2011	남북 친화력 확대 방안(통일대계연구 2011-02)	조민 외	6,000원
2011	통일대비를 위한 국내과제(통일대계연구 2011-03)	박종철 외	13,000원
2011	통일외교 과제와 전략(통일대계연구 2011-04)	최진욱 외	13,000원
2011	US-China Relations and Korean Unification(Grand Plan for Korean Unification 2011-05)	최진욱 편저	12,000원
2011	통일 비용·편익 연구의 새로운 접근: 포괄적 연구요소의 도입과 대안의 모색 (통일 비용·편익 종합연구 11-01)	김규륜 외	19,000원
2011	체제전환 비용·편익 사례연구(통일 비용·편익 종합연구 11-02)	조한범 외	10,500원
2011	통일 비용·편익 추계를 위한 북한 공식경제부문의 실태연구 (통일 비용·편익 종합연구 11-03)	임강택 외	9,500원
2011	2011년 통일에측시계구축	박영호, 김흥기	8,000원
2011	한반도 통일과 동북아 4국의 입장과 역할	배정호 외	6,500원
2011	Korean Unification and the Positions and Roles of the Four Neighboring Powers	배정호 편	8,000원
2011	중국의 부상에 따른 동북아 전략환경의 변화와 한반도	배정호 편	12,000원
2011	2011 Unification Clock: When will We See a Unified Korea? Park Young-Ho, Kim Hyeong Ki		4,000원
2011	알기쉬운 통일교육 12주제	허문영 외	35,000원
2012	탈북자 관련 국제조약 및 법령	이규창 외	19,500원
2012	북한인권 이해의 새로운 지평	북한인권연구센터 편	20,500원
2012	알기쉬운 통일교육: 해외한인용	허문영 외	30,000원
2012	통일대비를 위한 대북통일정책 모색(통일대계연구 12-01)	박형중 외	15,000원
2012	통일한국에 대한 국제적 우려해소와 편약: 지역 및 주변국 차원 (통일대계연구 12-02)	박종철 외	14,000원
2012	Korean Unification and a New East Asian Order (Grand Plan for Korean Unification 12-03)	최진욱 편저	6,000원
2012	Korean Peninsula Division/Unification: From the International Perspective Kim Kyuryoon, Park Jae-Jeok		13,000원
2012	중국의 국내정치 및 대외정책과 주요 국가들의 대중국 전략	배정호, 구재희 편	22,000원
2012	China's Domestic Politics and Foreign Policies and Major Countries' Strategies toward China Bae Jung-Ho, Ku Jae H.		22,500원
2012	통일 비용·편익의 분석모형 구축(통일 비용·편익 종합연구 2012-1)	김규륜 외	11,500원
2012	'선도형 통일'의 경로와 과제(통일 비용·편익 종합연구 2012-2)	김규륜 외	9,000원
2013	유엔 인권메커니즘과 북한인권	북한인권사회연구센터 편	18,000원
2013	중국 시진핑 지도부의 구성 및 특징 연구 (중국 지도부의 리더십 분석과 한중정책협력방안 2013)	전병근 외	9,000원

2013 통일 이후 통합을 위한 갈등해소 방안: 사례연구 및 분야별 갈등해소의 기본방향	박종철 외	13,000원
2013 한반도 통일에 대한 동북아 4국의 인식(통일외교 콘텐츠 생산(1))	배정호 외	16,500원
2013 알기 쉬운 통일교육III: 북한이탈주민용	조정아 외	11,000원
2013 알기 쉬운 통일교육III: 북한이탈주민용 수업지침서	조정아 외	6,000원
2013 민주화 및 양질의 거버넌스 수립: 북한 변화와 통일을 위한 시사점 (통일대계연구 13-01)	박형중 외	13,500원
2013 시장화 및 빈곤감소형 경제질서 수립: 북한 변화와 통일을 위한 시사점 (통일대계연구 13-02)	임강택 외	12,500원
2013 통일대계연구: 4년 연구 종합논의 (통일대계연구 13-04)	박형중 외	8,000원
2013 정치·사회·경제 분야 통일 비용·편익 연구 (통일 비용·편익 종합연구 2013-1)	조한범외	17,500원
2013 The Attraction of Korean Unification: Inter-Korean and International Costs and Benefits (통일 비용·편익 종합연구 2013-2)	김규륜 외	15,500원
2013 한반도 통일의 미래와 주변 4국의 기대 (통일 비용·편익 종합연구 2013-3)	김규륜 외	10,500원
2013 전환기 중국의 정치경제 (통일대비 중국에 대한 종합적 전략 연구: 통일시대 한중관계 전망 2013-1)	배정호 외	15,500원
2013 China's Internal and External Relations and Lessons for Korea and Asia (통일대비 중국에 대한 종합적 전략 연구: 통일시대 한중관계 전망 2013-2)	Bae Jung-Ho, Ku Jae H.	17,500원
2013 중국의 대내외 관계와 한국의 전략적 교훈 (통일대비 중국에 대한 종합적 전략 연구: 통일시대 한중관계 전망 2013-3)	배정호, 구재희 편	16,500원

연례정세보고서

2011 통일환경 및 남북한 관계 전망: 2011~2012	6,000원
2012 통일환경 및 남북한 관계 전망: 2012~2013	7,000원
2013 통일환경 및 남북한 관계 전망: 2013~2014	7,000원

통일정세분석

비매품

2011-01 2011년 북한 신년 공동사설 분석	최진욱 외
2011-02 미·중 정상회담의 의미와 한국의 전략적 고려사항	배정호 외
2011-03 2011년 미·중 정상회담 평가: 동북아 및 한반도에의 함의	황병덕 외
2011-04 2009년 헌법 개정 이후 북한 노동법제 동향	이규창

2011-05	최근 북한 주민의 의식변화와 정책적 시사점	임순희
2011-06	최고인민회의 제12기 제4차 회의 결과 분석	임강택, 최진욱
2011-07	중동 민주화 혁명과 한반도 전략적 함의	배정호, 박영호, 박재적, 이기현
2011-08	북한의 여성권·아동권 관련 법 제정 동향	임순희, 김수암, 이규창
2011-09	상반기 북한정세 분석 보고서	최진욱 외
2012-01	2012년 북한 신년 공동사설 분석	최진욱 외
2012-02	북한의 아동교육권 실태와 관련 법령 제정 동향	임순희, 조정아, 이규창
2012-03	북한 미사일 발사에 대한 국제사회의 대응	배정호 외
2012-04	제4차 당대표자회와 제12기 제5차 최고인민회의의 분석	박형중 외
2012-05	최근 국제사회의 북한인권 논의동향	이금순, 한동호
2013-01	2013년 북한 신년사 집중분석	전성훈 외
2013-02	3차 핵실험 이후 김정은 정권의 대내외 정책	전성훈 외
2013-03	시진핑 체제의 출범과 대내외정책 방향 12기 전국인민대표대회 제1차 회의 결과분석	전병근, 이기현
2013-04	북한 3차 핵실험 이후 미국의 대북정책 논의 동향	박형중, 박영호, 김동수
2013-05	대북경제제재에 대한 북한의 반응과 대북정책에의 함의	임강택
2013-06	한미정상회담 결과 분석	김규륜 외
2013-07	한중정상회담 결과 분석	이기현
2013-08	김정은 정권의 대내외 정책평가와 우리의 대응방향	박영자
2014-01	2014년 북한 신년사 집중분석	박형중 외

KINU 정책연구시리즈

비매출

2011-01	재스민혁명의 분석과 북한에 대한 시사점	박종철 외
2011-02	창지투(長吉圖) 선도구와 북한-나선특별시, 러시아 극동지역 간 경제협력 과제	림금숙
2011-03	6자회담과 남북관계: 전망과 대책	박종철 외
2011-04	보호책임(R2P)의 이론 및 실행, 그리고 한반도에서의 함의: 리비아 및 코트디부아르 사태를 중심으로	조정현
2011-05	남북러 가스관 사업의 효과, 쟁점, 과제	이운식
2011-06	DMZ 총람: 개요, 정치·군사적 현황	손기웅 외
2011-07	DMZ 평화적 이용의 국가적 의미	손기웅 외
2012-01	통일재원 마련 및 통일외적 결집 관련 국민의 인식	김규륜, 김형기
2012-02	2012년 상반기, 북한 정책동향 분석: 북한 매체의 논조를 중심으로	박형중 외
2012-03	러시아의 극동개발과 북한 노동자	이영형
2012-04	오바마 2기 행정부의 대 한반도 정책 전망	김장호 외
2012-04(E)	The Second Term Obama Administration's Policy towards the Korean Peninsula	Jangho kim
2012-05	중국 18차 당대회 분석과 대내외정책 전망	이기현 외
2013-01	북한 지하자원을 활용한 DMZ/접경지역 남북 산업단지 조성방안	손기웅 외
2013-02	박근혜정부의 대북정책 추진 방향	최진욱 외
2013-03	박근혜정부의 통일외교안보 비전과 추진 과제	최진욱 외
2013-04	유엔조사위원회(COI) 운영 사례 연구	김수암 외

2013-05	Trustpolitik: 박근혜정부의 국가안보전략 - 이론과 실제 탐색연구 -	박형중 외
2013-06	서독의 대동독 인권정책	안지호 외
2013-07	2013년 북한 정책 논조 분석과 평가	박형중 외
2013-08	한반도 신뢰프로세스 업그레이드를 위한 2014년 대북정책 추진전략	최진욱 외
2013-09	김정은 정권의 대남 긴장조성: 2013년과 향후 전망	박영자 외
2013-10	국내불안과 대외도발: 북한에 대한 적용 가능성 탐색	정성철
2013-11	2013년 북한 핵프로그램 및 능력 평가	김동수 외

북한인권: 국제사회 동향과 북한의 대응

비매품

2011	북한인권: 국제사회 동향과 북한의 대응, 제6권 1호	김수암, 전현준, 이규창
2011	북한인권: 국제사회 동향과 북한의 대응, 제6권 2호	김수암, 김국신, 이규창
2012	북한인권: 국제사회 동향과 북한의 대응, 제7권 1호	손기웅 외
2012	북한인권: 국제사회 동향과 북한의 대응, 제7권 2호	손기웅 외
2013	북한인권: 국제사회 동향과 북한의 대응, 제8권 1호	이금순 외
2013	북한인권: 국제사회 동향과 북한의 대응, 제8권 2호	이금순 외

Study Series

비매품

2011-01	A New Approach to the National Community Unification Formula Park Jong Chul, Hong Woo Taek, Lee Kyu Chang, Kim Philo, Chun Chae Sung, Cho Seong Pyoul, Hong Ihk Pyo, Hwang Sun Hye	
2012-01	Study of Disciplinary Problems in the North Korean Army Lee Kyo Duk, Chung Kyu Sup	
2012-02	The Quality of Life of North Korean: Current Status and Understanding Kim Soo Am et al.	
2012-03	Basic Reading on Korean Unification Huh Moon Young et al.	
2013-01	Study on the Power Elite of the Kim Jong Un Regim Lee Kyo Duk et al.	
2013-02	Relations between Corruption and Human Rights in North Korea Kim Soo Am et al.	
2013-03	Easing International Concerns over a Unified Korea and Regional Benefits of Korean Unification Park Jong Chul et al.	
2013-04	'Peaceful Utilization of the DMZ' as a National Strategy Son Gi Woong et al.	

■■ 통일연구원 定期會員 가입 안내

통일연구원은 민족공동체 실현을 위한 국민 역량을 축적하고 통일환경 변화에 적극적 주도적으로 대응할 수 있도록 통일문제에 관한 제반 사항을 전문적, 체계적으로 연구하고 있습니다. 본원의 연구성과에 관심이 있는 분들에게 보다 많은 정보와 자료를 제공하고자 연간 회원제를 운영하고 있습니다.

연간 회원에게는 간행물을 우편으로 우송해 드리며 각종 학술회의에 참석할 수 있는 혜택을 드립니다.

1. 회원 구분

- 가) 학생회원: 대학 및 대학원생
- 나) 일반회원: 학계나 사회기관소속 연구 종사자
- 다) 기관회원: 학술 및 연구단체 또는 도서관

2. 가입방법

- 가) 「회원 가입신청서」 작성
- 나) 신한은행 140-002-389681(예금주: 통일연구원)으로 계좌입금
- 다) 연회비: 학생회원 7만원, 일반회원 10만원, 기관회원 20만원

3. 회원 특전

- 가) 연구원이 주최하는 국제 및 국내학술회의 등 각종 연구행사에 초청
- 나) 연구원이 발행하는 정기간행물인 『통일정책연구』, *International Journal of Korean Unification Studies*, 단행본 시리즈인 연구총서, 학술회의총서, 협동연구총서, 통일정세분석 등 우송
- 다) 도서관에 소장된 도서 및 자료의 열람, 복사이용
- 라) 구간자료 20% 할인된 가격에 구입

4. 회원가입 문의

- 가) 주소: (142-728) 서울시 강북구 4.19로 123(수유동) 통일연구원 통일학술정보센터 출판자료팀 도서회원 담당자(books@kinu.or.kr)
- 나) 전화: (02)901-2559, FAX: (02)901-2547
- 다) 홈페이지: <http://www.kinu.or.kr>

※ 가입기간 중 주소변경시에는 즉시 연락해 주시기 바랍니다.

KINU 정책연구시리즈 13-11

2013년 북한 핵프로그램 및 능력 평가

 통일연구원

www.kinu.or.kr



ISBN 978-89-8479-758-1