



< 국방대 >

북한의 핵개발 경로와 대응책

2024. 2. 21

이 춘 근

cglee@stepl.re.kr

목 차

1. 핵무기와 핵물질
2. 핵무기 개발단계와 미/소 경로 차이
3. 북한의 사회주의 개발 경로 추종
4. 북한의 핵능력 기반
5. 향후 전망 및 대응방안

1. 핵무기와 핵물질

1. 핵분열과 핵융합

■ 핵분열 : 원자탄

- 자연계 원소 : 우라늄(U235 0.7%, U234), 농축
- 인공 원소 : 플루토늄(Pu 239 함량..), 원자로 사용

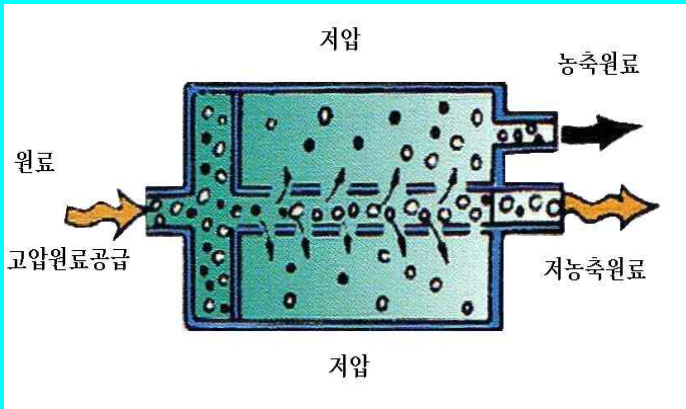
■ 핵융합 : 수소탄

- 자연계 원소 : 중수소(D), 해수 추출
- 인공 원소 : 삼중수소(T), 원자로 사용, 빠른 반감기(12.3년)
- 간접 사용 : Li^6 .. → 원자로 또는 원자탄 내에서 T 생성

● 조합 : 증폭탄, 중성자탄..

- 장치 구조와 물질 상태(기체, 액체, 고체) 및 사용량
- 소형 전술핵, 위력 조절 형..

우라늄 농축(기체확산): 미국 선도



1. 핵무기와 핵물질

2. 이란의 원심분리기 개발 단계

■ **발전** : 원심분리기 개발, 대량생산, 공장 가동

→ 개량형 : 탄소섬유 로터 개발...

■ **P1 원심분리기 캐스케이드 구성과 개량**

- 1대 농축 실험 → 10개 cascade 실험(stage) →

19개 cascade → 164개 cascade →

2번째 164개 cascade →

164개 cascade 9개로 구성된 공장 →

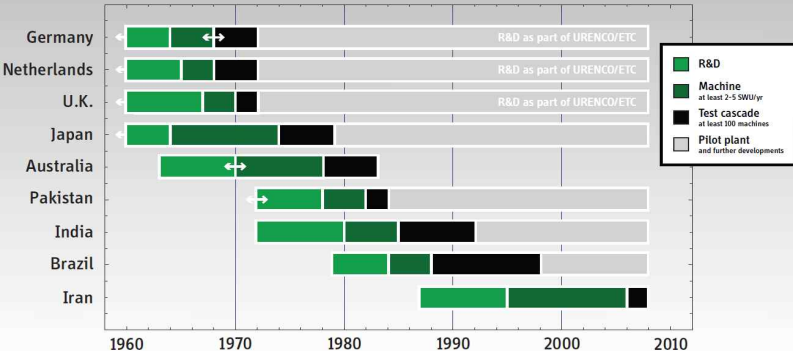
164개 cascade 5개 + 예비 cascade 164개 공장

- IR-2(이란형 P2) 개발, 탄소섬유 로터 개발

* 초기 마레이징강 bellows 문제 : 짧은 로터, sub-critical → 개량

원심분리기 개발기간 비교

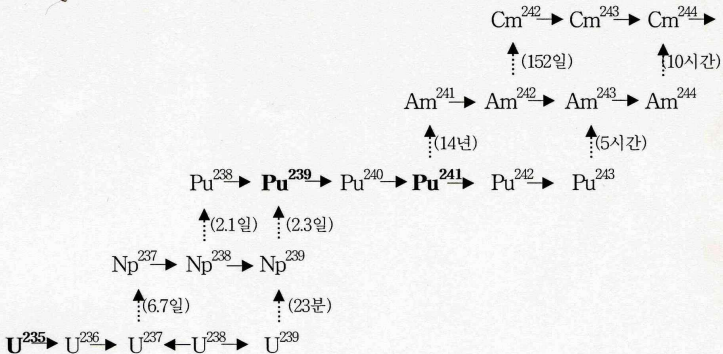
Timeline of Centrifuge Programs



DRAFT version, August 2006 - by Alexander Glaser, Princeton University

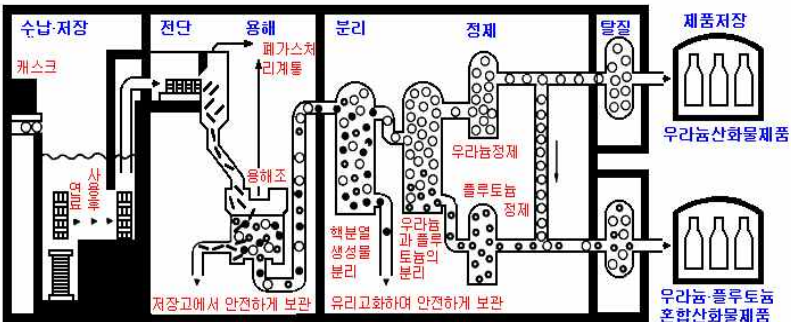
(arrows indicate uncertain dates of respective events or milestones)

원자로에서의 Pu 생성과 후속 반응



주 : \rightarrow 중성자 흡수, \leftarrow 중성자 1개 흡수 후 2개 방출, \uparrow 베타붕괴
 고딕체는 주요 핵분열물질, ()안의 숫자는 반감기

사용후 핵연료 재처리(고속증식로 원료)



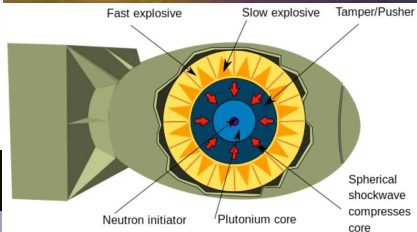
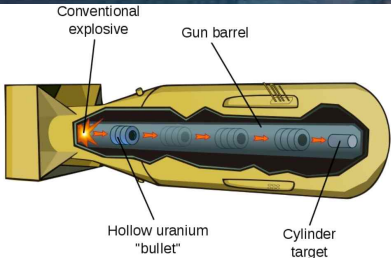
- 우라늄
- ⊙ 플루토늄
- 핵분열생성물
- / 피복관등의 금속편

2. 핵무기 개발단계와 미/소 경로 차이

1. 개발 단계 : 미/소(원자탄) → 핵융합(수소탄) → 특이

1. 원자탄 : 미국 선도, 소련 추격 및 개량

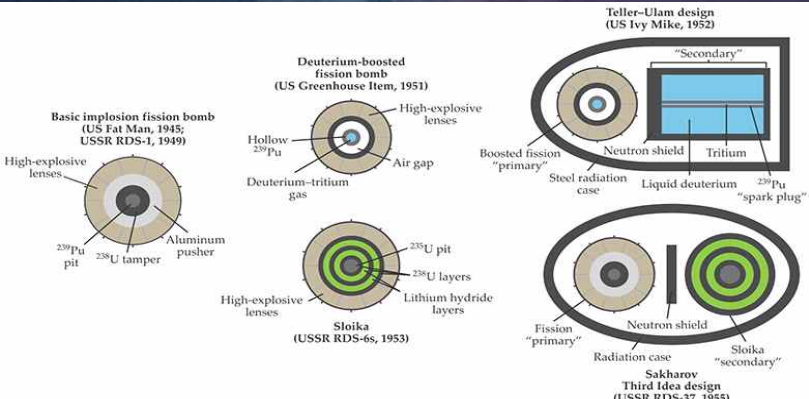
- 맨하탄계획 : HEU(포신형), Pu(내폭형), 항공, 미사일, 핵잠
- 소련 : 내폭형(Pu → HEU), 항공 → 미사일, 핵잠, 상공 열세

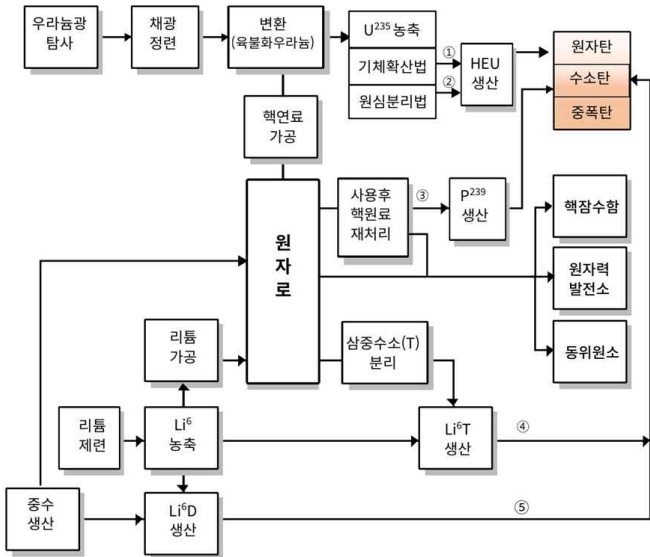


1. 핵무기 개발단계와 미/소 경로 차이

2. 냉전과 미/소 수소탄 개발경쟁

- **미국** : 대위력, 고가 액체(기체) D-T 활용, 원자로 T 생산 우세
- **소련** : 고체(Li⁶D), 염가/저위력 고가/대위력 병행, 야전 편이성



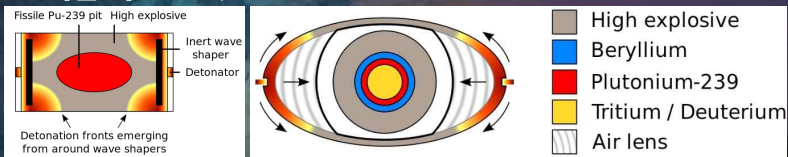


1. 핵무기 개발단계와 미/소 경로 차이

3. 핵탄두 소형화와 전술핵 > 미/소 경로의 차이 > 격차 원리

■ 기폭장치와 고성능 폭약, 복합 피트

- Linear Implosion, Two Point implosion
- 고성능 폭약 : Comp B → DATB, TATB → 둔감 화약
- 복합 피트 : Pu, HEU → Pu/HEU



■ 핵융합 물질 첨가 : 1단(전술핵, 증폭형), 2단(수소탄) 결합

- D, T, Li⁶D : 위력 조절, 지하 핵실험의 장점(핵 현대화) 활용
- T 대량생산, 저장, 유연 활용 : 미/러, 중 격차 확대(중성자탄..)

3. 북한의 사회주의 개발경로 추종

1. 1980 ~ : 연구에서 생산으로, 원전에서 핵무기로

- 1981년 전국과학자대회 : 원자력발전소 건설 천명
- 영변단지 급속 확장 : 응용학과 영변 이동(물리대학 확장)
- 응용연구 강화 : 1차, 2차 과학기술발전3개년계획(1988-1993)
 - 원자력주기 연구 : 농축, 사용후 핵연료 재처리, 폐기물 처리
 - 차기 기술 기초연구 : 레이저와 화학교환법, 고속증식로,
- 관리체제 개편 : 영변단지 노동당 군수공업부로 이전
- 1983~ 고성능장약 실험, 1993~ 고폭장치 실험
- 1998~ 과학기술발전5개년계획 : 원심분리기, Li^6 분리, 중수
- 2006.10.9 제1차 핵실험
- 2010년 11월 우라늄 농축시설과 실험용 경수로 공개

3. 북한의 사회주의 개발경로 추종

2. 북한의 선택 : 초기 소련/중국식 추종

- **목표** : 열가, 대량 생산, 빠른 실전배치, 전술 운용 편의성
 - 고효율 표준탄두 양산 + 소량의 증폭탄/수소탄, 중성자탄(X)
 - Pu에서 HEU 로의 전환('00 중반~'10 초반)과 대량생산
 - **기반 구축** : 장기적인 핵연료 주기 완성과 설비 개선
 - '80 말 : 원자력주기 구축, HEU 농축 연구(기계공학연구소)
 - '00 초 : Li^6 농축과 중수소(D) 생산, 단, T는 없음
 - **단계별 개발** : 선택과 집중을 통한 사회주의 개발경로 추종
 - HEU 양산, Li^6 와 중수소(D) 개발, 단 Pu와 T 대량생산 난관
 - 핵실험/차기 기술개발 병행 : 단계적 실험(원자→수소→소형)
- **북한의 수소탄(소련식)** : 고체 Li^6 와 D 의존, T는 제한

3. 북한의 사회주의 개발경로 추종

3. Pu 뒤에서 중장기 HEU 프로그램 가동

- 자체개발과 국제협력, 국제사회의 대응
 - '80 말부터의 본격 개발 : 과학원 기계공학연구소...
 - '94 파키스탄과의 협력 : P1 20대, P2, 설계도, 공장 연수
 - '90~'00 관련 소재, 부품 입수 노력 강화..
 - '00 전반 : 소재, 수학적 모사(나비에 스톱스 방정식..)
 - '02 캐리 특사 방북 : 우라늄 농축 활동 여부 논쟁
- 원심분리기 양산 공개
 - '09 우라늄 농축 발표, 김정일 현지지도 사진(P2 로터)
 - '10 현대식 영변 농축공장 공개(해커) : P2(?), bellows 1개
- P2 양산 시기와 수량, 개량형 양산 여부, HEU 누적생산량...
 - 몇번째 핵실험 사용(?), 탄두당 사용량, Pu/HEU 복합 피트...

3. 북한의 사회주의 개발경로 추종

4. 과학원('90 후반~'00 초반) : 원심분리기, 핵융합 연구

순	명칭	주요 동향
1	수학연구소	* 기계진동진단기 개발 * 유체, 폭발역학, 나비에 스토크스 방정식
2	물리학연구소	* 이론물리, 플라즈마, 전동기 * 광학, 초전도체, 자성체
3	기계공학연구소	* 초고속회전 동역학 및 장치, 초경질 재료 * 고속회전기계, 초고속 원심분리기 개발 * 마찰, 마모, 유압공학
4	전자공학연구소	* 집적회로, 컴퓨터, 전자부품
5	컴퓨터과학연구소	* 대형 병렬컴퓨터, 인공지능
6	자동화연구소	* 공정관리용 컴퓨터 집중감시조정시스템
7	용접연구소	* 마찰용접, 플라즈마 용접 등 특수용접
8	과학실험설비공장	* 초고진공 펌프
9	전자재료연구소	* 자성재료
10	지질학연구소	* 리튬 자원 탐사와 개발

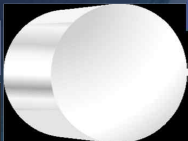
P2 원심분리기 생산 과정



Steel
ingot

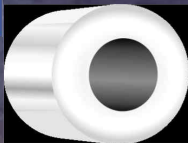


hammer



단조(forge)

구멍 뚫기
(hot pierce)

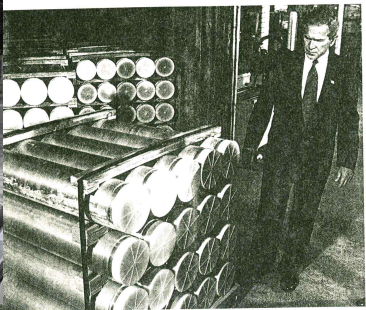


rough

유동성형
(Flow forming)



Rotor : 직경 150mm, 두께 1mm,
길이 500mm, belows coupling)



3. 북한의 사회주의 개발경로 추종

5. 핵심시험 목적과 절차 : 중국 사례

기초과학
연구

국방수요

신사고
신개념
신원리

실행
가능성

원리, 기술

핵장치
설계,
실험
내용/
방법

안전성
신뢰성

진단방법

실험
시행
방안

핵장치
제조
실험준비

핵
실험

계측
평가

< 핵심시험위원회 구성 >

1. 제품설계위원회
2. 장외시험위원회
3. 중성자점화위원회
4. 냉시험위원회

핵실험 유형과 특성

구	특성	장점	단점
대기	<ul style="list-style-type: none"> • >30km 예정고도 • 항공기, 로켓, 기구 • 철탑(소형 핵무기) 	<ul style="list-style-type: none"> • 폭발효과 직접관찰 • 측정공간 충분활용 • 각종유형 정량평가 • 실험경비 절감 	<ul style="list-style-type: none"> • 대기오염 확산 • 설계비밀 노출 • 기상조건 영향 • 주변국 항의
지면	<ul style="list-style-type: none"> • 충격파 파괴효과 • 방사능 낙진 형성 	<ul style="list-style-type: none"> • 건물/엄폐효과 측정 • 각종 지하기지 파괴 (토양유출 및 변형) 	<ul style="list-style-type: none"> • 심각한 오염지대 • 주변국 항의
지하	<ul style="list-style-type: none"> • 화구/생성물 봉쇄 • 깊이(m) > 120(kt)^{1/3} (10kt : 300m 이상) • 수직/수평갱 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 환경오염 최소화 • 근거리 관측/정찰 • 안전/기밀유지 유리 	<ul style="list-style-type: none"> • 기술장애 증가 • 비용/작업/시간 증가 • 측정설비 방수문제 • 살상효과 판단곤란 • 대형무기 실험 곤란
수하	<ul style="list-style-type: none"> • 천수/심수 실험 	<ul style="list-style-type: none"> • 함선/함만/잠수함 	<ul style="list-style-type: none"> • 해양오염 확산

3. 북한의 사회주의 개발경로 추종

6. 풍계리 실험장 : 표면 붕괴를 수반한 대 위력 시험

■ 안전 심도 : 봉쇄각질 형성 + 미파열 암석층

- 100kt 이상 : 반사파 고려(봉쇄 이론 초과), 산악지형 가중

* 38north 발표식 : $Depth=122(\text{yield in kT})^{1/3}$, 최대 ~280kt

➔ 풍계리에는 부적합 : 6차 실험이 거의 최고 위력

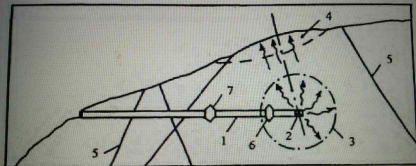


Figure 18. Schematic illustration of gas migration through the damaged rock massif: 1- underground works; 2- zero room; 3- damage zone radius; 4- spill zone; 5- tectonic faults; 6 and 7- first and second stemming.

3. 북한의 사회주의 개발경로 추종

7. 핵실험과 유형

순(일시) 북한 발표	지진파 규모 (Mb)	위력(kt) 한국 국방부	위력(kt) 암석 특성 고려
1차 (2006.10.9) : 폭발	3.9	1이하	0.4~1.5
2차 (2009.5.25) : 위력	4.5	3~4	3~6
3차 (2013.2.12) : 소형화	4.9	6~7	6~18
4차 (2016.1.6) : 수소탄	4.8	6	6~15
5차 (2016.9.9) : 표준화	5.0	10 ± 2	10~20
6차 (2017.9.3) : 대형 수소탄	5.7	50~70	50~150

3. 북한의 사회주의 개발경로 추종

8. 북한의 경로 : 원자력(Pu) → HEU, 수소탄, 미사일

- **기본형** : 1차(2006.10), 2차(2009.5)
 - 내폭형 기폭장치 개발, Pu 활용
 - 핵실험 기술 발전
- **표준화** : 3차(2013.2) → 5차(2016.9)
 - 기존 미사일 탑재, 표준화 : 노동, 스커드.
 - HEU, HEU+Pu, 핵물질 이용율 개선
- **수소탄** : 4차(2016.1) → 6차(2017.9)
 - 대위력 증폭탄, 수소탄 : Li⁶D 추정
 - 핵융합 실험 및 측정기술 발전
- **화산 31** : 과도기 소형전술핵, 투발수단 확장



3. 북한의 사회주의 개발경로 추종

9. 기술 경로 : 병진 발전, 원자력, 수소, 핵무기, 핵발전

제1차
(2006)
Pu

제2차
(2009)
Pu

제3차
(2013)
HEU

제5차
(2016)
HEU

제7차
(2024?)
HEU(T?)

강성대국전략
(1998~2022)

김정은
집권

경제-핵
병진

개발
인력
일부
이전

소형화-수소탄
병행

- * 제7차 : 소형 전술핵(T 사용?)
- * 제7차 성공시 제8차 : 소형 수소탄(Pu, T?)

제4차
(2016)
(원리)

제6차
(2017)
Li6D

제8차
(2025?)
Li6D(T?)

3. 북한의 사회주의 개발경로 추종

10. 핵실험 소요 : 외교적 협상과 기술기반의 병행

- **제1차(2006.10.9)** : 최초 핵실험 → 낮은 폭발위력
 - Pu 기반 내폭형 기폭장치 폭발시험
 - HEU로의 전환과 수소탄 개발을 위한 기반 구축
- **제2차(2009.5.25)** : 기폭장치 개선 → 4kt 폭발위력 달성
- **제3차(2013.2.12)** : HEU로의 전환, 기본형 원자탄 완성
 - CHIC-4(?), 탄두 소형화와 대량생산, 수소탄 개발 박차
 - 경제건설 - 핵무력 병진노선 채택
- **제4차(2016.1.6)** : 수소탄 원리실험
- **제5차(2016.9.9)** : 미사일 탄두 실험, 대량생산
- **제6차(2017.9.3)** : 수소탄 실험(위력 조절)

4. 북한의 핵능력 기반

1. 핵물질, 핵탄두 수량: T 사용(?), 다양한 변수, 정보 부족

- **PU 생산량(원자로 노화)** : ~50kg
- **HEU 총량** : 강선(?) 포함 2,800kg(영변 760), 울브라이트 1,770
- HEU 생산 >'10, P2 누적 증가, 현 12,000대 추정, 개량형(?)
- **핵탄두** : HEU : 초기 60kg, 현 20~25, 고기술 <10kg, 20kg추정
- Pu : 초기 6.4kg, 현 5~7, 고기술 <2kg, 4kg 추정
- Pu/HEU : 초기 4.2/6.8kg, 2/10 추정, 증폭탄 4/50+Li6D 추정

종류	플루토늄 (단독 또는 포함)	고농축 우라늄 단독	합계
단순 핵분열탄 (플루토늄, 고농축 우라늄)	10	112	122
단순 핵분열탄(고농축 우라늄) + 복합피트	20	102	122
단순 핵분열탄(고농축 우라늄) + 증폭탄	10	87	97
단순 핵분열탄(고농축 우라늄) + 복합피트 + 증폭탄	복합 5 + 증폭 8 = 13	90	103

4. 북한의 핵능력 기반

2. 탄두 소형화 : 화산 31

■ **기폭장치/폭약** : Linear/고성능(?)

■ **핵물질** : HEU, Pu/HEU, Pu

- 핵융합물질 사용(?) : D/T, Li⁶D

■ **화산 31 적용 투발수단** : 과도기 중간단계의 소형 전술핵

- 단거리 탄도미사일, 초대구경 방사포, 순항미사일, 어뢰

- 탄체/탄두 일체형 : 저속, 유도/조정장치 분산, 투발수단 성능

→ 신뢰성 입증, 기폭장치 재구분(투발수단별 다양화) 필요

→ 탄두 분리형, 중장거리 미사일용, 차기 소형탄두 필요

■ **핵실험** : 화산 31의 신뢰성 확인, 차기 도약 기반, T 유연 활용



4. 북한의 핵능력 기반

3. 전술적 성능 : 탄두에서 투발수단 으로의 중심이동

- **위력** : 원자탄, 증폭/수소탄, Pu/HEU, T 사용을 통한 위력 조절
 - 차기 전술핵 개발 및 실험 : 제7차, 8차... 핵실험(?)
- **사거리 및 정확도** : 액체 단, 중거리, ICBM, 순항미사일
 - 고체 : 단/중거리 다양화, 대구경 방사포, SLBM, ICBM
- **발사준비시간, 생존성, 기동성, 방어 돌파력** : 기동, 극초음속
 - 액체(앰플화), 고체(TEL, 잠수함, 열차, 호수..), 섞어 쓰기
- **투발수단 다양화와 운용 능력** : 전략군 → 육해공...
 - 예산 폭증, 첨단기술, 지원산업, 전술 운용, 유지보수...

4. 북한의 핵능력 기반

4. 연료 체제 현대화 : 고체 추진제 개발과 개량

■ HTPB / AP / Al 복합고체추진제

- 대량생산, 성능 안정화와 최적화
- 이론 비추력 260~265초, 중국 248.

- NEPE 269~272(중국 ICBM 252), CL-20 > 270

* RD-250(UDMH/N₂O₄) 수면비추력 270, 우주발사체 300~400

■ 2023년 신형 고체모터 연소시험과 비행시험

- 140tf 대추력, 단 짧은 연소시간 : ICBM(대형화/단 증가 필요)
- 화성 18호 고각 발사 : ICBM급 (노즐목, 재진입 소재 진전)
- HTPB 개량형(RDX 혼용) 또는 NEPE? (적색 화염)



4. 북한의 핵능력 기반

7. 핵무기의 기술적 성능 : 지원 산업...

- **중량 및 크기(소형화), 신뢰성, 안전성, 수명, 정비 용이성 등**
- **산업** : 국가지원, 무기 일변도의 원자력주기, 원자로 부족
- **핵무기 신뢰성** : 복잡, 정교한 시스템으로 구성
 - 각종 전술환경(기후, 역학, 전자장 등)에서 성능을 발휘해야..
 - * 충돌, 진동, 가속도, 온도, 염분, 기압, 복사 등의 극한 시험 통과
- **보안, 상태 안정(노화 방지)** : 다양한 폭약, 물질, 재료들로 구성
 - 핵물질의 분열 : 중성자원, Pu(돌발 핵폭발), T(고가, 저장, 짧은 반감기)
 - 폭약 : 취화, 돌발 폭발(둔감화약 사용)
 - 구조 재료 부식 : 재료간의 상용성 변화, 용접 부위 부식
 - 핵무기 수명 연장 조치 : 초기 사용 핵물질과 폭약, 재료, 장치의 치환
 - * 신뢰성 평가를 위한 주기적 기폭장치, 핵무기 시험 필요

4. 북한의 핵능력 기반

8. 경제적 희생 : 경제-핵무력 병진건설...

■ 국가계획체제 혼선

- 과기발전5년계획(2013~2017) → 경제발전 5년전략(2016~2020)
→ 경제발전 5년계획
- 유사 내용으로 목표연도 연장, 대부분의 영역에서 실패

■ 강성대국 전략 목표 상실 : 2022년 과학기술기여율 50% 목표

- 2017년 1인당 GNI \$1,214, 세계 150위권, 명목상 농업국가로 전략
- 강성대국 → 강성국가 → 사회주의 강국 → 사회주의 발전

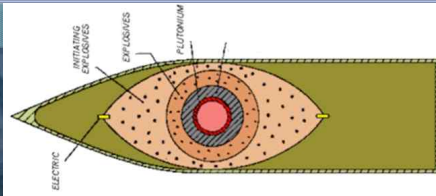
■ 자력갱생 : 공원 원료 자급율 70% → 80%

- 주제철, 탄소하나화학 : 경제성, 생산성 악화
- 대 중/러 관계 호전 : 단 공법전환 난항, 대형 투자 지연(딜레마)

5. 향후 전망 및 대응방안

1. 향후 전망

- 핵물질 다양화, 총량 확대
 - HEU 대폭 확대, Pu 지속
 - T 확보와 유연한 활용
- 차기 소형 전술핵 : 기폭장치 추가 소형화
 - 투발수단 다양화, 전술 고도화, 수소탄, 다탄두...
- 투발수단 확장 : 육해공 확장
- 핵전술 고도화 : 우주기반, 수중, 지하, 인력/차량
- 인공위성 발사 : 정찰위성 3개 이상(실시간 감시), 통신위성
- 추가 핵실험 : 화산 31 신뢰성, 차기 소형 탄두/수소탄(T ?)



5. 향후 전망 및 대응방안

2. 북한의 5대 핵 위협

- **위력 증가** : 모든 탄두의 방어에 총력을 기울여야...
- **핵탄 수량 증가** : 지속 방어체제를 구축해야...
- **미사일 고도화** : 전방위/다층 방어체제를 구축해야...
- **핵전술 고도화** : 다양한 변수, 치열한 두뇌싸움...
- **대응능력 부족** : 약점 보완

→ 차기 방어체계 구축 : 고고도 체류 기반..

5. 향후 전망 및 대응방안

3. 대응 방안 : 경로 파악과 차단

분 야	내 용
경로 파악	<ol style="list-style-type: none">1. 상세 경로와 수준 파악2. 미래 예측3. 비교 연구와 국제 협력
경로 차단	<ol style="list-style-type: none">1. 맞춤형 제재2. 비확산3. 남북대화과 국제협력
방어와 방호	<ol style="list-style-type: none">1. 조기경보2. 다층/다방면 복합방어망 구축3. 민방위체제 강화

감사합니다!