

## 북한의 흑연로형 핵연료 채택 요인 연구: 기술적 특징과 자주화 과정을 중심으로(1950~1980년대)\*

조주형(한양대학교, 정치학 박사)\*\*

홍용표(한양대학교 정치외교학과 교수)\*\*\*

### 논문요약

본 연구는 1950~1980년대 구(舊)소련의 농축우라늄연료 기반 원자력 지원에도 불구하고, 북한이 소련식의 농축핵연료-경수로 방식이 아닌 천연우라늄연료-흑연감속로를 채택한 이유를 규명하는 것에 초점을 두고 있다. 특히 북한의 초기 소련이 지원한 원자로와 새로이 자력 개발한 흑연로에 관한 기술 관련 정책 자료를 통해 기술공학적 해석과 국제정치적 분석을 결합한 학제융합적인 접근을 시도하였다. 이에 따르면 소련의 부분적인 대북 원자력협력은 표면적으로 북한에 대하여 핵확산에 관한 제약 특성을 유지토록 하였는데, 이는 동시에 북한으로 하여금 소련에 대한 의존성을 심화시켰다. 결국 북한은 소련의 간섭을 회피하고자 천연핵연료-흑연로의 도입을 통하여 자력에 의한 잠재력과 자율성을 강화하였다. 결과적으로 북한의 천연핵연료-흑연로 채택은 대(對)소련 핵 자주화를 추구한 전략적 결정이었다.

주제어: 북한, 핵전략, 자주성, 핵연료, 핵확산저항성

\* 본 연구는 대한민국 교육부와 한국연구재단의 공동연구지원사업(NRF-2023S1A5A2A03085570)의 지원을 받아 수행된 연구의 결과이다. 본 연구에 대해 유익한 심사평을 해주신 익명의 심사자 분들께 진심으로 감사의 말씀을 전합니다.

\*\* 제1저자

\*\*\* 교신저자



## I. 서론

2025년 6월 국제원자력기구(IAEA)는 북한이 핵(核)프로그램을 지속 확대하고 있다는 정황을 보고하였다<sup>1)</sup>. IAEA는 북한 영변 원자로건설·운전 상황을 언급하며 이는 유엔(UN)안보리 결의에 반(反)하는 불법 핵 프로그램이라고 지적했다. ‘현재진행형’인 북한 핵개발의 근본 문제를 이해하려면, 초기 북한의 핵개발이 어떤 핵공학·정치적 제약 하에 시작했으며, 어떻게 ‘독자적 핵능력’을 확보하기 시작했는지에 관한 기술·정치적 기원(起源)을 살펴볼 필요가 있다.

이러한 문제의식에서 본 연구는 ‘북한 영변 원자로’에 주목한다. 영변 원자로는 북한 핵개발이 어떤 기술적 제약에서 출발했는지 보여주는 오랜 상징이기 때문이다. 영변 핵시설은 소련으로부터 지원받은 원자로에서 비롯됐는데, 북한은 그 제약을 우회하고자 독자적 경로를 발전시켜 왔다. 오늘날 IAEA가 지적하는 북한 영변 핵시설 문제는 본 연구의 초점인 ‘핵연료의 자주화’라는 연속선상에서 이해될 수 있다. 이를 전제로 한 본 연구는 영변 핵시설의 출발점인 소련의 원자로와 변곡점이 된 북한의 흑연로를 분석함으로써, 오늘날 핵문제의 기원을 ‘기술-정치’의 차원에서 들여다보고자 한다.

북한은 구(舊)소련의 지원을 받아 1963년 6월 2MWe급 1연구로 ‘IRT-2000(본명:IRT-DPRK)’ 착공에 돌입했다. 소련은 IRT용 핵연료를 지원했는데, 이는 저농축우라늄(10%, Low Enriched Uranium, LEU)이었다.<sup>2)</sup> 그런데, 북한은 이렇게 받은 소련식 농축연료 방식이 아닌 신형, 즉 천연우라늄 기반 원자로를 1979년 건설하기 시작했다.

북한은 왜, 소련으로부터 지원받아 왔던 핵연료 방식이 아닌 새로운 핵연료 방식을 추진했는가? 왜 농축우라늄 핵연료를 쓰는 경수로가 아닌 새로운 경로(흑연로)를 채택했는가? 본 연구는 북한의 선택이 단순히 과학적 판단이 아닌 ‘핵연료의 정치적·과학적 자주성(sovireignty)’, 핵확산에 관한 ‘기술적 제약 극복’이라는 전략적 고려가 종합된 결과였다고 본다. 과거 소련이 핵연료를 공급하면 회수하는 방식으로 북한의 핵개발에 간여할 수 있었으나, 시간이 흐르며 북

1) “IAEA “북한, 영변에 새로운 핵 시설 건설 중.” 『KBS』 2025년 6월 10일.

2) 한국원자력연구소, 『북한의 원자력 이용개발 현황 분석 및 전망 연구』, 대전: 한국원자력연구소, 1993, pp. 39~41.

한이 자체 핵연료주기를 구축하면서 간섭효과는 약화될 수밖에 없었다. 북한이 직면한 기술적 제약과 대외 의존성은 무엇이었고, 어떻게 간섭을 회피하면서 자주화 기반을 마련했는지를 역사적으로 추적할 필요가 있다. 본 연구는 이를 1950~1980년대 소련의 핵연료 간섭구조와 북한의 흑연로 구축이라는 변곡점에서 찾고자 한다.

기존 북한 핵개발 관련 연구 중에서 핵연료의 과학기술적 특성을 기반으로 하는 분석은 많지 않다.<sup>3)</sup> 대체로 기존 연구는 체제생존·대외 억제전략 협상 등 국제정치적 측면을 중심으로 북한 핵문제를 설명하되 북한의 정권별 대외전략, 특히 미국과의 핵협상 등 실제 사례를 주로 분석하고 있다.<sup>4)</sup> 북한의 핵정책 관련 연구도 핵물질과 기술적 측면에 대한 분석보다는 핵정책 기조·경향 등을 위주로 설명하고 있다.<sup>5)</sup> 핵물질과 개발사 및 생산량·현황을 소개한 연구도 있지만, 핵물질 생성에 관한 과학적 기제를 정치적 맥락으로 연결하기 보다는 단순히 상황을 설명하는데 그치고 있다.<sup>6)</sup> 국제행위자들 간의 원자력 지원·간섭 등 제도화된 통제장치가 핵연료 공급망 등과 결합해 피지원국의 정책 자율성에 어떠한 제약을 주는지, 그것이 어떤 ‘반응(개발 방식 변경)’을 촉발하는지에 관한 연결·인과-기제(機制)분석은 대체로 간과되었다.

종래의 연구에서는 핵연료의 과학기술적 요소라고 할 수 있는 연소도·동위원소·농축문제 등이 유발하는 정치적 효과 혹은 핵물질의 국제관계적 의미 등은

- 
- 3) 북한 핵시설·핵물질 관련 해외분석은 다음과 같다. 하지만 이 또한 Pu생산량 수치의 비교·대조에만 그치고 있다. Albright, David, “North Korea’s Suspect, Former Small-Scale Enrichment Plant.” Institute For Science And International Security, *Imagery Brief*, 2016.6.21, pp. 1~5; IAEA, *Application of Safeguards in the Democratic People’s Republic of Korea*, IAEA, 2024.
- 4) 예를 들어 다음과 같은 연구들이 있다. 이창위 외, 『기묘에 선 북핵 위기』, 서울: 박영사, 2025, pp. 79~277; 전봉근, 『비핵화의 정치』, 서울: 명인문화사, 2020, pp. 267~421; 이용준, 『북핵 30년의 허상과 진실』, 파주: 한울, 2018, pp. 14~149; 장철운 외, 『북한 비핵화를 위한 전략과 추진과제』, 서울: 통일연구원, 2023, pp. 31~134.
- 5) 국방대학교 국가안전보장문제연구소, 『국가 핵전략』, 서울: 국가안전보장문제연구소, 2014, pp. 197~237; 이춘근, 『북한의 핵패권』, 서울: 인문공간, 2023, pp. 217~285; 박기덕 외, 『북핵 문제와 한반도 평화체제』, 성남: 세종연구소, 2008, pp. 187~310.
- 6) 함형필, 『김정일체제의 핵전략 딜레마』, 서울: 국방연구원, 2009, pp. 63~162; 경남대학교 국동문제연구소·북한대학원대학교, 『북한의 핵문제와 대외관계』, 파주: 한울, 2024, pp. 239~315; 강창우 외, 『핵무기와 핵전략』, 서울: 박영사, 2025, pp. 239~315.

정립·체계화되지는 않았다.)<sup>7)</sup> 그렇기에 본 연구는 핵물질의 기술 특성을 단순 언급에만<sup>8)</sup> 그치는 것이 아니라 정치적 효과를 유발하는 기제의 원인으로 보고 있다는 점에서 차별성을 갖고 있다.

본 연구는 1950~80년대 북한 사례에 초점을 맞췄다. 소련의 원자력 지원이 어떻게 북한의 자율성을 제한했는지 그 과정을 추적하면서<sup>9)</sup>, 북한은 왜 소련 방식이 아닌 새로운 경로를 개발했는지를 ‘핵연료 기술특성’ 관점에서 대(對)소련 관계 등을 해석하려는 것이다. 구체적으로 본 연구는 핵개발 문제에 있어 후견국과 피후견국의 관계에 대한 아래와 같은 가설을 중심으로 북한 사례를 분석하고자 한다: ① 후견국의 통제형 원자력(핵연료) 지원체계는 피후견국의 (핵)정책적 자율성을 간섭한다. ② 피후견국은 비(非)간섭형 핵연료·원자로 경로를 선택하여 간섭을 회피하려 한다. 이는 ‘농축 핵연료의 외부 의존구조→외부 의존성 심화→간섭 회피 전환 시도→자체 핵연료주기 개발’로 축약된다.

## II. 핵연료의 특성과 핵확산 문제

원자력 발전을 위한 핵연료는 전기생산용 연료지만, 국가 생존성을 도모할 수 있는 전략적 옵션이다. 물리적 특성과 생산성·제조 난이도는 외부 의존성을 매개로 정치·외교적 활동을 제한하거나 확대한다. 특히, 핵확산저항성은 기술적 요소뿐만 아니라 정치적·외교적 의존성과 기술 의존성까지 종합 작용하는 개념이라는 점을 전제로 한다. 본 장에서는 분석단위인 ‘핵연료’를 정의하면서, 원자력 발전에서의 역할·물성 등을 설명한 이후, 각 특성이 핵확산성과 어떻게 연결되는지 밝히고자 한다.

- 
- 7) 정현숙, “1950~1960년대 북한의 ‘핵잠재력 확보전략’에 관한 연구: 원자력의 평화적 이용정책의 지속과 변화를 중심으로” 『현대북한연구』 제21권 2호, 2018, p. 48~93; 강대석·최진식, “북한의 핵무기 개발 동기요인에 관한 연구.” 『평화학연구』 제25권 2호, 2024, p. 53~77.
- 8) 김보미, “북한 핵프로그램의 시작과 성장: 1950~1960년대를 중심으로.” 『통일정책연구』 제28권 1호, 2019, p. 183~208; 문성묵, “북한 핵개발 실태와 대외정책.” 『통일정책연구』 제25권 1호, 2016, p. 59~85.
- 9) 본 연구의 ‘기술 관련 정책 자료’는 국책기관 연구보고서 및 국제기구 자료로 1차 사료이며 북한의 공식 간행물은 북한의 정책경향성을 나타내는 보조 근거자료로 사용한다.

## 1. 원자력 발전과 핵연료

원자로(原子爐)는 핵연료에 대하여, 중성자(中性子)에 의한 ‘핵분열반응’을 일으키면서 이를 인위적으로 지속·유지·통제하는 공간이다. 중성자가 핵연료의 원자에 조사(照射, Irradiation)되어 원자핵과 충돌하면, 핵분열로 에너지가 나와 발전 원동력이 된다.<sup>10)</sup> 핵반응은 원자로에서 이루어지는데 중성자가 조사되는 물질이 바로 핵연료의 핵물질이다.<sup>11)</sup> 중성자에 의해 핵연료에 대한 핵분열 연쇄반응이 발생하는데<sup>12)</sup>, 이때 중성자 속도를 감속재로 조절하면서 에너지를 얻는다.

핵연료 종류별로 핵분열 반응의 결과가 달라지기도 한다. 이를 활용하면 군사적 전용(轉用)이 가능한 이중성을 보이기도 한다. 그렇기에 핵연료는 ‘석탄 연료’ 격이지만 국가 생존성 강구를 위한 ‘전략적 옵션’으로 평가되기 때문에 핵문제의 파장력은 상당할 수밖에 없다.

다음은 핵연료 종류에 관한 것이다. 핵연료는 핵분열 연쇄반응이 있어야 에너지가 생성된다. 이는 핵분열물질(fissile material)인 우라늄(Uranium)을 가공한 연료봉으로 제작된다. 우라늄 가공 이유는 핵물질인 우라늄이 보다 쉽게 핵분열 연쇄반응을 일으킬 수 있도록 하기 위해서다. 그런데, 핵연료에 조사되는 중성자 속도에 따라 핵분열반응속도가 각기 다르므로 중성자 속도별로 적합한 핵연료 종류가 다르다. 핵연료의 물리적 형태(천연금속·농축연료 등)와 제작 난이도 역시 천차만별이다. 핵분열반응에 사용되는 핵연료는 천연금속우라늄과 농축우라늄이 존재한다. 전자는 자연 상태에서 채굴한 우라늄 광물의 불순물을 제거해 만든 천연금속이라 별도 농축 없이 흑연로(또는 중수로)에서 사용 가능하다.<sup>13)</sup> 후자는 자연의 우라늄광물을 불순물 제거 후 가공·소결(燒結)·압축한 농축(Enriched)금속이다. 농축비율(%)에 따라 저농축우라늄·고농축우라늄이 되며 주로 경수로에 사용된다. 우라늄의 농축여부가 핵연료 종류의 구분선이 되는 것이다.

10) 이우방·김한영, 『원자력공학개론』, 부산: 고려동, 2013, pp. 38~47.

11) 김천욱, 『한국의 원전』, 서울: 동명사, 2021, pp. 81~82.

12) 한국방사선진흥협회, 『원자력이론』, 서울: 한국방사선진흥협회, 2023, pp. 117~119.

13) 이기순, 『원자로 연료·재료』, 서울: 효일, 2012, pp. 113~115.

## 2. 핵확산성과 핵확산저항성

핵확산성·핵확산저항성이란, '어떤 핵연료가 확산되기 좋은 것인가, 혹은 어려운 것인가?'라는 내재 특성을 뜻한다. 이는 원자로·핵연료의 여러 요소들이 결합된 포괄적 특성의 판별 결과인데, 단일 척도로만 파악되지는 않는다. 핵확산성·저항성 판별의 핵심 척도는 바로 '농축도(Pu-239 함유비율)'와 '농축기술 습득 여부' 등이다<sup>14)</sup>. 특정 핵연료 제작을 용이도록 하는 기술병목(Technical Bottleneck) 요소 중 핵확산성·저항성을 일으키는 원천요소는 핵연료이기에, 어떤 핵연료가 핵확산에 용이·제한적인지가 관건이다. 본 연구에선 바로 이 개념을 사용한다. 다만, 포괄적으로 적용하기보다는, 특히 핵연료를 기준으로 핵연료주기(공급·회수 및 농축·비농축)에 의하여 형성되는 통제·간섭 구조를 중심으로 '핵확산성·확산저항성'을 파악하고자 한다.

핵확산성(Proliferability)은 특정한 원자력체계(원자로·연료·운전·농축 등)가 핵물질 생산·획득을 용이하게 하거나 생산된 핵물질의 군사적 전용가능성을 쉽게 하는지를 기술적 관점에서 규정한 개념이다. 핵확산성은 핵분열물질의 획득 능력을 뜻하며 기술력 확보 그 자체를 의미한다. 후술하겠지만 반대 특성인 핵확산저항성과 한 쌍을 이룬다. 핵연료의 핵확산성·핵확산저항성을 평가할 수 있는 1차 기준은 우라늄 농축시설의 존재 유무, 농축설비 제작능력, 농축설비보유 여부에 있다. 핵연료를 공급받을 수 있는 대외적 공급망의 존재 유무, 자체 핵연료 생산시설 유무에 따라 핵확산 가능성이 평가된다.

핵확산성과 핵연료 관계는 다음과 같다. 핵연료는 제작에 있어 고도의 기계·공학 역량을 요하기에 극소수 국가만이 보유하고 있다. 이마저도 IAEA(국제원자력기구)에 의해 통제된다. 핵연료 제작으로 생산되는 핵물질 중 특정 핵분열물질의 고(高)순도화 능력의 존재 유무에 따라 핵확산성이 평가된다. 문제가 되는 연료는 흑연로용 핵연료(천연금속우라늄연료), 경수로용 핵연료(농축이산화우라늄)이다.<sup>15)</sup> 특히 농축이산화우라늄을 만드는 '핵물질 농축 관련 시설'이 문제가 되며, 몇%까지 농축할 것인지에 관한 순도비율 문제로 확장된다. 특정비율 이상

14) 한국원자력연구소, 『핵연료주기시스템의 핵확산저항성 분석』, 대전: 한국원자력연구소, 2009, pp. 24~25.

15) 홍준화, 『원자력 재료』, 서울: 한스하우스, 2017, pp. 278~279.

고농축 시 핵폭탄의 원료물질을 직접 생산할 수 있음을 의미하기 때문이다. 우라늄농축비율이 높으면 핵확산 잠재성(확산성)이 높아지는 것이며 거꾸로 핵확산 저항성이 약화·저하되는 것이다.

원자로·핵연료의 군사적 전용가능성을 높이는 기술·설계특성이 핵확산성인 반면, ‘핵확산저항성(Proliferation Resistance)’은 원자력의 군사적 전용가능성을 제한하려는 기술 특성이다. ‘핵무기 제조를 위해 핵물질 전용 혹은 핵물질의 비밀 생산 및 전용 관련 민감 기술 활용 방지용 시스템 특성’이다.<sup>16)</sup> 제도적 제약요인 및 기술적 제한 특성까지 포함되며 정치·기술적 의존성 등 종합적 요소이다. 이는 원자로·핵연료 특징들이 ‘군사적 전용 유인성(proliferation weaponizing incentive)’을 제한토록 하는지의 차원에서 설명되는 핵심 지표이다.

본 연구에서는 핵확산저항성의 기술 특성에 집중한다. 핵심은 원자력의 군사적 의도에 제한을 일으키는 기술 특징으로, ① 핵물질을 쉽게 생산치 못하게 하거나 ② 핵분열물질 순도를 높이지 못하게 하거나 ③ 핵물질을 자체생산하지 못하게 하는 기술을 통칭한다. ①·③은 ‘핵물질 생산경로의 기술난이도’로 ‘핵연료 제조능력’의 곤란성이다. ②는 우라늄농축 등의 기술적 제약으로, 핵물질 중 특정 동위원소(Pu-239)의 저(低)농도화 특성이다.<sup>17)</sup> 모두 ‘핵연료’특성과 관련된 다. 이때 핵심기제는 다음과 같다. 첫째, 비핵보유국의 외부 핵연료 의존성(원인 조건)은 기술 제약을 통해 핵보유국의 간섭·통제로 연결된다(작동). 둘째, 이는 비핵보유국의 원자력 자율성을 간섭, 외교 자율성을 제약한다(결과). 이어 핵연료물질성(농축 등)은 핵확산·저항성 차이를 유발해 간섭·통제의 강도·회피를 좌우한다. 후술하겠지만, 이를 북·소 원자력 관계와 천연연료·흑연로 경로형성 과정에서 검증한다.

16) 한국원자력연구원, 『핵연료주기 시스템의 핵확산저항성 분석』, 대전: 한국원자력연구원, 2009, pp. 1~2.

17) 원자력통제기술센터, 『북한 핵 문제와 경수로 사업(I)』, 대전: 한국원자력연구소, 1999, pp. 89~90.

### 3. 핵연료 특성과 정치·외교적 함의

본 연구는 핵연료에 초점을 맞추면서, 핵연료의 외부 의존성을 핵보유국-비(非)핵보유국의 관계로 들여다본다. 이때 핵연료의 대외 의존성은 단순히 핵연료 물질의 조달이라는 상호 간 문제가 아니며, 핵보유국은 비핵보유국에 대해 원자력 정책의 자율성에 영향을 미칠 수 있는 간섭-통제형 장치로서 기능한다고 전제한다. 핵보유국은 원자력을 비핵보유국에 지원하되, 관리·제한을 위해 일종의 간섭을 시도한다. 하지만 비핵보유국은 핵보유국의 간섭을 회피하면서 자체 핵역량을 배양·확보하려는 행동을 강화하고자 한다.

본 연구의 ‘핵연료 관련성’이란 원자력 협력관계 하 비핵보유국에 대한 핵보유국의 핵연료-원자력 관련 기술력 제약으로 구성된 ‘간섭-통제형 지원체계’를 통칭한다. 비핵보유국으로선 핵연료의 제조능력·역량의 부재(不在)는 기술제약이면서, (핵보유국의)간섭을 피할 수 없는 구조적 제약조건이다. 외부 의존형 핵연료는 핵보유국의 정치적 간섭 수단이지만 비핵보유국으로선 대외 의존성을 고착시킨다. 비핵보유국의 자체 핵연료 확보 시도는 핵보유국의 간섭을 약화시켜 상대적으로 외교적 자율성을 확보할 수 있게 한다. 이 구도는 ‘핵확산성-저항성’임과 동시에 원자력의 외교적 의존성을 나타내는 척도가 된다.

## Ⅲ. 북한-소련 원자력 협력의 의미와 한계

초기 북한의 핵개발은 1955년 소련과의 ‘조·소 연합핵연구소 조직에 관한 협정’으로 촉발되었다.<sup>18)</sup> 북한은 원자로·기술 등을 소련에서 지원받아 1963년 ‘IRT-2000’이라는 연구로 건설을 시작, 1965년 완공해 67년 가동했다.<sup>19)</sup> 연구

18) 한국원자력연구소, 『북한의 원자력 이용개발 현황 분석 및 전망 연구』, 대전: 한국원자력연구소, 1993, pp. 39~41.

19) “IRT는 1965년(초) 완공, 그해 8월15일 임계도달, 67년부터 가동됐다. 농축우라늄(10%)을 사용하다가 80년 개조(4MWe)했고 소련과는 1985년까지 (IRT 운용 및 연료지원 관련)협력하였다. 이후 90년대 농축우라늄(80%)형태로 개조됐다.” 1962년 “한국원자력연구소, 『북한의 원자력 이용개발 현황 분석 및 전망 연구』, 대전: 한국원자력연구소, 1993, pp. 56~62.

로(IRT-2000)는 북한으로선 핵공학의 시작점이자 소련과의 의존관계 형성이라는 점에서 중요한 의미를 갖는다. 하지만 우라늄농축·원심분리기 등 고난도 기술력은 북한에 전수되지 않았다. 소련은 북한에 최초 원자로(IRT-2000)·핵연료(10% 농축우라늄연료)를 제공하면서도 이를 전면 회수하는 방식을 유지했다.<sup>20)</sup> 대북 농축기술이전(移轉)이 제한·간섭되는 가운데 북한은 대(對)소련 의존성으로 연료제약을 겪을 수밖에 없었고 무기화 허용 역시 소련의 간섭·통제로 제한됐다.<sup>21)</sup>

이러한 ‘부분적 기술이전(partial transfer)’으로 북한은 어떤 핵연료·원자로 방식을 채택할 것인지에 관한 ‘핵연료 딜레마’에 봉착했다. 외부세력(소련)에 계속 핵연료를 의존할 것인지, 아니면 소련 의존성을 줄이고 핵연료 자주화를 강행할 것인지가 그것이다. 결국 북한은 기술·정치적으로 소련 의존성을 줄이고자 했다. 이는 “과학부문에서 주체를 세우기 위한 투쟁을 계속 힘차게 벌여야 하겠다. 우리에게는 우리나라의 발전에 필요한 과학이 요구된다”라는 김일성에게서 영향을 받은 것으로 볼 수 있다.<sup>22)</sup> 다만 북한의 원자로 변경은 소련 방식 자체를 회피했다기보다는, 소련(후견국)의 간섭에서 벗어나려는 북한의 독자적 시도라고 할 수 있다.

북한은 소련의 핵연료 간섭·통제 구조를 회피하고자 농축이 필요없는 핵연료 방식(천연우라늄·흑연로) 등을 고민하지 않을 수 없었다. 이에 북한은 소련 의존성에서 탈피하고자 대안책을 찾기 시작했다. 핵연료 의존성(소련)을 유지하며 농축기술을 자체 확보하는 것으로 아예 핵연료 농축과정이 없는 방법이다. 이는 핵연료 형태를 바꾸는 것이었는데, 천연우라늄연료가 장입되는 흑연로가 검토되었다. 이 방법은 소련 의존성을 극복할 수 있는 ‘자주적 수단’이었다. 이는 “우리는 공업을 단순히 원상대호가 아니라 새 기술에 기초하여 복구하며 과거 식민지공업의 약점을 버리고 자립적 공업을 창설하는 방향으로 나아가고 있다”라는 김일성의 인식과도 상통한다.<sup>23)</sup>

20) 원자력통제기술센터, 『북한 핵 문제와 경수로 사업(I)』, 대전: 한국원자력연구소, 1999, pp. 34~36.

21) IRT-2000의 정치적·기술적 의미는 다음 장(4장)에서 자세히 다룰 것이다.

22) 김일성, 『사회과학의 임무에 대하여』, 평양: 조선로동당출판사, 1969, pp. 427~428.

23) 조선로동당중앙위원회직속 당력사연구소, 『김일성저작선집1』, 평양: 조선로동당출판사, 1967, pp. 176~177.

1955~1980년대 북한은 핵능력 자주화에 있어 소련의 간섭을 장애물로 인식, 이로부터 벗어나고자 자주화 방안을 계속 모색하였다. 후견국-피후견국 간 연루(連累)-방기(放棄)라는 ‘동맹 딜레마’로 통상 빚대어 볼 수 있는데<sup>24)</sup>, 핵연료를 매개로 지원국의 간섭을 회피하려는 행동으로 해석할 수 있다. 지원국은 피지원국에 핵능력을 지원·제한하고자 간섭을 가하려는 반면 피지원국은 이를 회피하며 자체역량을 확보하고자 한다. 이는 “...다른 나라들에서 이룩한 과학기술의 성과와 경험을 주체적립장에 서서 우리 실정에 맞게”라며 “...사대주의와 교조주의를 철저히 반대하며 주체적립장을 확고히 견지해야”라고 한 김일성의 발언을 통해 북한·소련 간 관계를 유추할 수 있다.<sup>25)</sup>

소련의 간섭을 감쇄시키려는 북한은 소련과의 원자력 관계를 유지하고 있었음에도, 김일성은 ‘자주노선’을 줄곧 강조하였다. 김일성에 의하면 “내정간섭을 한다는가 경제 및 군사원조를 중단하거나 또는 원조를 미끼로 자주성을 구속해서는 안 된다. 가장 중요한 것은 주체적 역량”이라고 했는데, 그가 원자력 지원 관계에 있던 소련을 어떻게 보고 있는지를 엿볼 수 있다.<sup>26)</sup> 당시 김일성은 “우리는 결코 남의 품에 늘 수 없으며 또 그리 하지도 않을 것”이라며 “우리는 우리의 현실로부터 출발하여 자주적으로 자기의 노선과 정책을 규정하고 그것을 관철함으로써 혁명과 건설 사업을 힘있게 (국제분야에서도)추진시켜 나아가야 한다”라고 강조했다.<sup>27)</sup> 1960년대에도 소련과의 원자력 관계를 지속한 북한은 계속 ‘자주성’을 강조했다. 김일성은 “우리는 과학기술분야에서 사대주의를 철저히 반대하며 다른 나라의 과학기술을 배워도 주체적립장(주체적 입장)에서 우리나라 현실에 맞게 발전시키는 원칙을 견지해야 하겠다”라고 밝혔는데, 소련과의 원자력 지원관계에도, 그 ‘간섭’을 견어내야 한다는 것으로 해석된다.<sup>28)</sup>

1960~1980년대 북·소 관계는 외형상 순탄해 보였으나, 흐루시초프 정권기로 바뀌며 발생한 중·소 갈등의 영향을 받기 시작했다. 1968년 미국선(푸에블로호) 나포 사건 당시, 북한은 소련의 지원을 기대했으나 북·중 밀착 기류에 북·소

24) 이상철, 『안보와 자주성의 딜레마』, 서울: 연경문화사, 2004, pp. 55.

25) 사회과학출판사, 『정치사전』, 평양: 사회과학출판사, 1973, p. 889.

26) 국군정보사령부, 『북한군 군사사상』, 국군정보사령부, 2007, p. 133.

27) 조선로동당중앙위원회직속 당력사연구소, 『김일성저작선집1』, 평양: 조선로동당출판사, 1968, p. 176.

28) 김일성, 『사회과학의 임무에 대하여』, 평양: 조선로동당출판사, 1969, p. 521.

관계는 소원해졌다.<sup>29)</sup> 북·소 원자력 관계는 유지됐으나<sup>30)</sup> 소련에 의한 핵연료제약은 풀리지 않았다. “백두산에서 감자를 캐먹으며 유격투쟁을 할지언정, 소련의 ‘대국주의적’ 압력에는 절대 굴하지 말라”며 소련을 찾은 김일성이 반발감을 표했는데<sup>31)</sup>, 북·소관계가 요동쳤음을 뜻한다. 결국 북한은 소련 의존성을 유지하면서 소련에 대한 비(非)의존관계로의 전환을 모색하였다. 대(對)소련 외교·원자력 관계 재설정을 노리던 북한은, 1970년대를 버티다 1986년 드디어 소련방식이 아닌 자체개발한 ‘흑연감속로(5MWe급)’를 독자적으로 완공했다<sup>32)</sup>. 이는 소련의 핵연료(농축우라늄)가 아닌 새로운 천연우라늄연료를 사용하는 ‘자주적 원자로’였다<sup>33)</sup>.

#### IV. 소련 지원 원자로의 제약

본 장에선 소련의 대북 간섭형 ‘농축핵연료 체계’로부터 북한의 자체 ‘천연우라늄연료 기반 흑연로 체계’ 전환기까지의 과정을 ‘핵연료 특징’을 기반으로 밝힌다. 이 과정은 북한 핵연료 체계의 ‘기술적 한계와 전환’이 중점인데, 어떤 기술적 결과를 초래하는지 탐색하는 것이다. 본 장에서의 핵연료 공학 관련 논의는 단순히 공학적인 ‘성능의 비교’가 아니며, 소련의 농축기술 차단 의도가 반영된 핵연료의 제한적인 협력으로 북한의 핵개발을 제약하려는 정치적인 통제 장치를 파악하기 위한 것이다. IRT-2000의 핵연료 공급망 구조와 농축기술 제한은, ‘핵확산저항성’의 성격을 보이면서도 동시에 소련에 대한 대외 의존성을

29) 시모토마이 노부오 지음, 정연식 옮김, 『아시아 냉전사』, 대구: 경북대학교출판부, 2017, p. 139.

30) 이춘근, 『북한의 핵패권』, 서울: 인문공간, 2023, pp. 196~199.

31) 황장엽, 『나는 역사의 진리를 보았다』, 서울: 한울아카데미, 1999, pp. 129~130.; 김일성은 1963년 9월 평양에서의 류샤오치 중국주석 회담에서 ‘소련이 조선로동당에 압력·간섭을 행사하며 전복을 시도하고 있다’라고 말했다. 박종수, 『현대 북러관계의 이해』, 서울: 명인문화사, 2021, p. 185.

32) 본 연구에서는 이 시점을 ‘소련에 의한 간섭형 단계에서 북한의 독자적인 흑연로·천연핵연료 경로로 전환되는 기술적 분기점’이라고 보고자 한다.

33) 이에 대한 정치 및 기술적 측면은 5장에서 분석될 것이다.

고착화시키는 외교장치로 기능하였다. 이러한 맥락에서 북한의 '기술적 한계'는, 제재나 사찰 그 이전 단계에서부터 이미 작동하고 있던 간섭-회피의 동학에서 나타나는 '자주화 전략'의 일환으로 이해될 수 있다. 이에 북한은 기술적 제약성을 핵연료의 자주화 논리로 전환시켜 핵연료 자력개발이라는 독특한 방식을 선택하였다. 하지만 북한의 방식이 소련으로부터의 완전한 회피를 의미하는 건 아니었다는 걸 유의할 필요가 있다.

### 1. 초기 소련 의존적 핵개발 문제

IRT-2000의 농축핵연료 방식과는 반대인 천연우라늄연료의 이해가 선행되어야 한다. 핵연료 종류는 핵폭탄의 원료물질이 되는 핵분열물질 획득 및 그 용이성에 직접 영향을 미치는데, 농축기술 적용 유무에 따라 종류가 나뉜다. 농축우라늄은 농축기술만 보장되면 바로 핵폭탄 원료물질 생산이 가능하다. 천연우라늄을 사용하는 흑연로는 농축이 불필요하여 소련 의존성을 낮춘다. 다만, 특정 가동요건(저연소도)에 따라 핵폭탄 원료물질(Pu-239)의 생산 잠재력이 결정된다.

핵심은, 북한의 소련의존성 회피 고민과 정치적 결단이 곧 소련의 핵연료 간섭에 관한 완전한 탈피를 의미하는 건 아니라는 것이다. 핵연료 공정에서 북한은 여전히 기술적 한계로 자주화는 점진적으로 이루어졌다. 북-소 간 원자력 관계는 역설적으로 '핵연료 의존성'에 관한 북한의 고민으로, '핵연료 자주화'라는 목표를 촉발했고, 이는 천연우라늄-흑연로라는 새로운 경로 채택으로 이어지는 변곡점이 됐다. 당시 북한에선 흑연로 채택을 '불가피한 경로'로 인식하여 정당화됐다. 강석주는 흑연로가 농축우라늄연료 공급 차원에서 외국에 의존할 필요가 없다는 것에 대해 북한으로선 선택의 여지가 없었다는 취지라고 주장했다.<sup>34)</sup> 다만, 'Pu 생성'과 'Pu 분리·정제-무기재료화'는 별개로 Pu를 쉽게 생성하는 게 바로 핵확산성을 보이는 것이다.

새로운 핵개발 경로 채택의 변곡점은 바로 농축기술이었다. 농축기술은 핵연료주기의 공학적 병목(Bottleneck)이지만, 국제정치적으로는 외부 세력이 '통제

34) 로버트 갈루치·조엘 위트·대니얼 폰먼 지음, 김태현 옮김, 『GOING CRITICAL: The First Korean Nuclear Crisis(북핵위기의 전말)』, 서울: 모음북스, 2005, p. 87.

력을 행사할 수 있는 장치'로 기능한다. 소련이 농축설비·원심분리기 대북 이전을 제한함과 동시에 핵연료 대여·회수 방식은, 북한의 자체 핵개발 가능성을 낮추면서도 '의존성 유지'로 묶어두려는 '관리장치'로 작동한다. 반면, 북한 입장으로선 농축기술이 제한될수록, 소련의 통제력이 작동하는 구조에서 벗어날 수 있는 방식(천연우라늄-핵연료)이 비교적 매력적인 대안으로 인식됐다. 전술한 '새로운 변곡점'이란 북한이 쉬운 기술 방식을 채택한 게 아니라 후견국(소련)의 간섭을 감쇄시키는 방안을 모색한다는 것이다. 외교·전략적 자율성 확보의지를 핵연료 채택과정에 투영한 셈이다

우라늄 농축에 관한 주요 사항은 다음과 같다. 농축우라늄은 우라늄 내 0.7%뿐인 U-235의 비중을 인위적으로 3~5% 혹은 20%~90%까지 높인 우라늄이다. 저농축우라늄(LEU)은 U-235를 약 3~5% 수준으로 농축하는 것이지만 군사적 전용 목적상 90%까지 농축한 건 고농축우라늄(HEU)이다. 문제가 되는 건 현재 사용 중인 농축설비를 기반으로 한 원심분리역량의 확보 유무였다. 이는 핵연료주기에서 '기술 장벽'이자 '핵확산성·핵확산저항성'의 판별 기준으로 인식된다. 우라늄농축에는 기체분리법·원심분리법 등이 있으나 현대 우라늄농축에는 효율 때문에 주로 원심분리법이 널리 사용되고 있다. 원심분리법은, 고장력강(鋼) 소재의 원심분리기(centrifuge) 수백여 개를 회전시킴으로써 원심력으로 U-235를 포집, 농도를 올리는 방식이다. 이는 Zippe가 고안한 고속회전용(약 5만~7만rpm) 원통분리기(P-1·P-2)에 UF<sub>6</sub>(육불화우라늄)을 주입해 원심력으로 무거운 U-238은 원통 외곽으로, 가벼운 U-235는 원통 중심부로 분리·회수하여 농도를 높이는 방법이다.<sup>35)</sup> 이 기술력이 있으면 우라늄농축에서 원자로 없이도 HEU를 생산할 수 있는데, 이게 문제가 된다. 일단 원심분리기가 확보되면 돌이킬 수 없다. 핵연료주기(원자로·핵연료제작→연료·장입→Pu-239→추출·포집→탄두화) 중 첫 단계부터 무기화가 가능하다는 게 특징이다. 소련은 원심분리기만큼은 제한했던 것이다.

그런데 이 기술력을 확보하지 못하면 원자로가 반드시 필요하다. 플루토늄(Pu)의 생성·추출 고농도화 과정들도 요구된다. 우라늄농축 공정의 확보 유무는 일종의 '기술 장벽'으로서 기능하기에 원심분리기 확보는 곧 잠재적 핵개발로 인

35) 박진호, 『핵화학공학』, 서울: 한스하우스, 2012, pp. 378~380.

정된다. 우라늄농축 경로의 차단, 대외적 의존성 유지는 흑연로 대비 핵확산저항성의 가장 마지막 단계인 것이다. 결과적으로 북·소 원자력관계는 사실상 소련의 간섭 매개였고, 이는 북한의 독자 핵개발의 제한적 억제장치로 기능하였다.

## 2. 연구로의 한계 봉착

2MWe급(열출력 8MWe급) 연구로인 IRT-2000은 연구·교육·동위원소 생산·실험을 목적으로 설계됐다. 이에 연구로는 상업용 원자로와는 달리 저출력·소규모이기에 대규모 연속발전이 불가능했다. 열출력에 따라 Pu생성량이 규정되는데, 열출력이 작다는 건 Pu 등 핵분열물질 생성량 자체가 극소량이라는 뜻이다. 핵확산성 지표 중 ‘연간 생성 핵물질(Pu)’의 절대량 자체가 워낙 적기에, 원자로·핵연료주기 성능평가 시 사용되는 지표로선 유의미하지 않다. ‘무기사용 목적에 적합한 핵분열물질량 기준’으로 통상 Pu 8kg이 핵무기 1기 설계에 소요되는 최소량으로 취급되나<sup>36)</sup>, IRT-2000은 이를 충족하기엔 턱없이 부족했다. IRT-2000의 핵확산성은 기대할 수 없었다는 것이다.

게다가 핵연료 역시 연구로의 빈번한 증지로 통제됐다. 이러한 특징은 IRT-2000이 ‘대량 핵물질 생산수단’으로는 부적합하며 태생적 이유로 Pu생산의 한계로 작용하였다. 전술한 것처럼 ‘IRT-2000’은 저출력 원자로라는 점, 단기간 대규모 핵물질 생산수단으로써 활용되기에는 구조적 한계가 있다. 다만, 이는 연구용 경수로이므로 Pu생성 자체는 가능하나, 무기급 Pu의 즉시확보를 의미하지는 않는다. 이어 사용후핵연료가 소련에 반환되는 간섭형 구조 하에서는, 북한이 이를 재처리·무기화에 활용할 수 있는 Pu의 실질적 확보는 제한적이다.

IRT-2000의 핵연료 역시 소련에 전량 의존하고 있었기에 핵확산저항성은 소련의 간섭에 의해 유지됐다. 결국 핵확산성을 기대할 수는 없었다. 이는 “...우리 공업의 락후성(낙후성)을 없애고 국내에서 필요한 여러 제품들을 자체로 얼마든지 만들어낼 수 있는 자립적공업을 건설하여야 한다”라는 김일성의 주문을 통해 엿볼 수 있다.<sup>37)</sup> 이때 ‘자립’은 의존성을 극복하려는 것으로 해석된다. 북한

36) ‘1SQ’라는 단위 값으로 표현된다. IAEA, *INFCIRC/153*, IAEA, 1972, p. 9.; KINAC 정책연구센터, 『북한의 플루토늄 및 농축우라늄 생산능력』, 대전: 한국원자력통제기술원, 2015, pp. 33~35.

은 ‘큰 나라를 섬기고 굴종하는 사상으로서 지배와 복종 및 착취 관계’를 ‘사대주의’로 표현했는데, 이에 대한 극복 방안으로 기술혁명이 필요하다고 주장했다. 이러한 문제의식은 “우리는 선조들에게서 물려받은 사대주의 사상을 완전히 뿌리빼기 위하여서도 기술혁명을 하여야 한다”라고 발언한 김일성의 요구에서 나타난다. 소련 의존적 핵연료 간섭구조를 ‘극복되어야 할 종속’으로 인식하였는데, 이는 핵연료의 자력화(현지조달·자체화)를 정당화하는 촉발점으로 기능하였다.<sup>38)</sup>

IRT-2000에 사용되던 소련의 농축핵연료의 태생적 한계는 ‘Pu 생성량과 Pu-239의 비중’보다도 ‘Pu 생성 설비 확보 혹은 자체 확보 여부’라는 접근이 보다 유효하다. 주안점은 ‘핵연료의 종류가 핵능력의 한계를 규정한다’는 점이다. 핵물질 생성용 설비 자체의 확보 여부가 핵심으로 북한의 차기 목표가 됐다. 당시 김일성은, 원자력에 대해 “원자력 연구 분야에서 우리는 아직 많은 문제를 풀지 못하고 있다”라면서 “핵원료림은 얼마든지 있지만 그걸 공업적 방법으로 처리하지 못하고 있다”라고 지적한 바 있다. 이는 북한이 원자로에 대해 단순히 ‘보유 그 자체’보다도 핵원료의 공업처리(정련·전환 등)와 설비 기반 일체를 자력으로 갖추는 문제를 핵개발의 필수과제로 인식했음을 보여준다.<sup>39)</sup> 결국 북한은 핵연료 자주성 확보시도를 감행했는데, 김일성의 논리는 ‘큰 나라만 쳐다보는 사대주의의 해독성은, 자주성을 저버리게 된다’는 것이었다. 즉, “사람이 사대주의를 하면 머저리가 되고 민족이 사대주의를 하면 나라가 망하고 당이 사대주의를 하면 혁명과 건설을 망쳐먹는다”고 말한 것이다.<sup>40)</sup> 이로써 소련 의존형 방식이 아닌 자체 핵연료 개발이라는 결과에 이르게 되었다.

한편, 태생적 설계한계(저출력)로 IRT는 ‘대량 핵물질 생산로’가 되기엔 부족하다는 특징을 내포했다. 게다가 IRT-2000는 소련에 핵연료를 의존하고 있어 이 방식이 지속되는 한 북한의 독자적 자주화는 기대하기 어려웠다. 북한의 옵션은 ① 소련의 통제력에 편승하거나 ② 소련의 간섭이 열린 방식으로 자율성을 확보하는 것이었다. 즉, 본 장에서 밝힌 초기 ‘핵확산저항성’은 단순한 핵능력

37) 김일성, 『사회주의 경제관리 문제에 대하여』, 평양: 조선로동당출판사, 1970, p. 2.

38) 조선로동당중앙위원회지속 당력사연구소, 『김일성저작선집4』, 평양: 조선로동당출판사, 1968, p. 176.

39) 김일성, 『김일성저작집 15』, 평양: 조선로동당출판사, 1981, pp. 213~214.

40) 조선로동당중앙위원회지속 당력사연구소, 『김일성저작선집5』, 평양: 조선로동당출판사, 1972, p. 506.

특성이 아니라, 북한이 외교적 간섭을 회피할 수 있는 구조적 특성인 셈이다.

다만, 원자로의 전환이 실제 가능해지려면 일정한 조건이 요구된다. 본 연구에서는 핵연료기술·대외환경의 결합으로 형성된 조건으로써 이해될 수 있다. 먼저, 흑연로 방식을 추진하려면 우라늄 관련(정련·핵연료 가공에 필요한) 금속·기계·화학공학적 역량이 종합 축적되어야 한다. 원자로 운용을 위해서는 단순히 인적교류 수준에만 그쳐서는 안 되며 전문적인 인력·연구·공정 간 융합체계가 안정화되어야 할 뿐만 아니라 또한 대외(소련의) 핵연료 공급망을 대체하려는(북한 내) 우라늄원광 확보가 전제되어야 한다. 그리고 후견국(소련)에의 연료 의존성(통제)을 극복하려는 정치적 유인·결단이 요구된다. 이하 5장에서는 위 조건들을 전제로 ‘소련이 아닌 자체 핵연료 내재화’와 ‘흑연로 운전조건(저연소·단주기)’으로 구체화 되는 과정을 주로 다룬다.

## V. 북한의 핵연료 자주화 모색

### 1. 천연금속핵연료의 확산 용이성

본 절에서의 ‘천연금속핵연료의 확산 용이성’이란, 핵무기의 ‘제조’ 그 자체보다도, 북한에서의 핵연료 자력조달·가공에 관한 기초 여건이 얼마나 쉽게 마련되었느냐에 관한 것이다. 우라늄원료 확보의 용이성 및 핵연료관련 공정의 진입 장벽이 얼마나 낮은지의 여부가 핵심이다. 소련의 간섭 수단이 ‘차단장벽’으로 연결되는 공정과정을 설명하고자 한다. 이를 위해 북한의 우라늄 정련기반공정을 밝히면서, 대외의존성의 분산과 핵연료 자주화로 이어지는 연결 논리를 보이려는 것이다. 다음은 이에 관한 구체적인 공정 과정에 대한 설명이다.

먼저, 북한의 현지 우라늄원광은 천연핵연료의 기술적 용이성을 결정짓는 첫 번째 요인이다. 우라늄원광의 탐사·채굴 능력은 전통적 광산역량으로 달성 가능한데, 원광의 북한 현지화는 핵연료 원료물질의 외부 의존성을 약화시키고 자체 조달력을 높이도록 한다. 북한의 우라늄양은 핵연료 자주화의 기초를 용이하도록 만든다(북한의 우라늄 매장량은 약 2,600만톤, 가채 매장량은 400만톤으로 알려

졌는데,<sup>41)</sup> 이는 북한의 핵연료 자주화 여건이 비교적 수월하다는 것을 뜻한다).

우리늄의 정련·변환 과정은 우리늄 원석을 연료 전구체(산화우리늄)로 바꾸는 것인데, 농축보단 기술적 진입장벽이 비교적 낮은 편이다. 우리늄 제련은 황산법·탄산나트륨법이 대표적이는데, 이로써 옐로우케이크를 얻는다. 옐로우케이크는 곧장 연료로 사용할 수 없기에 정련·전환공정을 거친다.<sup>42)</sup> 자체 우리늄 광산을 보유한 북한은 위 공정에 요구되는 금속·기계·화학공학역량 등을 1986년까지 모두 갖춘 것으로 알려져 있다<sup>43)</sup>. 요컨대, 우리늄은 질산우리늄용액에서 액상형태로 추출되어 가열·분해 시  $UO_3$ 을 얻고, 이를 불화수소와 반응시켜  $UF_4$ (사불화우리늄)으로 바꾼다. 이로써 금속우리늄을 만들 수 있으며 불소와 결합시키면 농축공정에 투입되는  $UF_6$ 이 생성된다.<sup>44)</sup>

이처럼 핵연료의 기술 현지화 용이성은, 북한으로선 핵연료용 우리늄을 자체 조달할 수 있는 특징이 된다. 이때 핵연료를 노내에서 연소시킬 때의 기술적 여건(노내 핵연료 온도)이 문제가 된다. 상온(常溫)이 아닌 고압·고온성을 통제하는데에 기술 난이도가 상승하는 건 자명하다. 노내 용기 중심부인 노심(爐心)은 핵반응에 의한 에너지로 고압·고온 특성을 갖는다. 핵연료·경수로로는 각기 초고온(수천도)·수백도의 온도차를 보이는데 연료종별로 ‘핵연료의 온도 내성(耐性)’이 문제가 된다. 핵연료가 더 빨리, 더 쉽게 녹을 수 있어서다.

핵연료의 천연우리늄연료는 IRT-2000·경수로 등의 농축우리늄연료에 비해 낮은 용점(融點)을 갖고 있어 농축연료 대비 저온특성(저연소·연료 단기성)이 요구된다. 두 연료는 각기 핵연료·경수로에 장입되지만 천연연료는 농축연료 대비 노내 ‘온도’에 의한 독특한 부작용을 일으킨다.<sup>45)</sup> 농축우리늄연료의 용점이

41) 이춘근, 『과학기술로 읽는 북한 핵』, 서울: 생각의나무, 2005, pp. 110~111. 다만, 이는 현지접근성 제한에 따른 조사자료한계로 편차가 있을 수 있어 ‘근접추정치’로 ‘천연우리늄 자립의 잠재자원’이라는 지표로 한정한다.

42) 김시환, 『알기 쉬운 핵연료관리』, 서울: 형설출판사, 2010, p. 72.

43) “북한의 첫 번째 원자로는 1980년부터 건설되어 1986년 운전이 시작됐고 초기 수년간 운전에 문제를 겪다 1990~91년 (20-80MWe)출력을 얻었다…원자로엔 천연우리늄이 연료봉형태로 50톤 들어있다(1톤에는 0.27-0.30kg의 무기급Pu가 포함).” 과학기술처 원자력통제과, 『북한의 플루토늄 소유량』, 서울: 과학기술처, 1994, p. 16~19. 운용에 결함이 있었더라도, 원자로를 만들어 실제 가동했다는 것 그 자체로 원자로관련 금속·기계·화학분야 역량이 수렴되었음을 뜻한다고 할 수 있다.

44) 박진호, 『핵화학공학』, 서울: 한스하우스, 2012, pp. 342~355.

2,850도인데, 천연금속우라늄의 용점은 1,132도로 이는 노내 핵연료 안전성과 직결되는 중대 사항이다.<sup>46)</sup> 핵연료가 빨리 녹으면 원자로 용기 용해(멜트다운)가 발생할 수 있는데 천연핵연료는 노내 온도가 1,132도에 이르지 않도록 유의해야 한다. 연료안전상 이보다 절반가량 더 낮은 상태여야 한다.

게다가 천연핵연료는 상온에서 사방정 구조상( $\alpha$ 상)을 가지나, 660도에선 육방정 구조상( $\beta$ 상)으로 변태하고 770도에선 체심입방구조( $\gamma$ 상)로 재변태하여 총 3가지 결정 구조의 변화( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )를 겪는다는 특징이 문제가 된다. 온도 상승변화로 제각기 결정 구조로 변화하며 3가지 상이 나타난다는 것인데, 이는 부피 변화를 수반한다. 우라늄금속 결정구조가 팽창하는 '조사 성장(Irradiation growth)'인데, 핵연료의 체적이 무려 1.2%가량 늘어난다. 온도변화점마다 결정 구조가 바뀌며 체적이 커지는 것으로, 이는 천연핵연료 붕괴 및 노내 파괴의 주 원인이다. 이는 노내 온도를 무려 2,850도까지 버틸 수 있는 농축핵연료와는 달리 저(低)연소(Burn-up)<sup>47)</sup>운전을 필연적으로 야기하며, 이는 Pu의 질적 지표인 Pu-239함량을 높인다. 기술력이 부족한 북한으로선 3천도의 핵연료 운용보다 660도 이하 운용이 비교적 수월하다. 결과적으로 낮은 핵연료 온도내성에 의해 Pu 생산 난이도 역시 경수로에 비해 낮아지므로 오히려 핵확산성을 높일 수 있다.

이처럼 북한이 우라늄 원료를 자력 조달하면서 정련 관련 공정을 갖추수록, 북한에 대한 소련의 핵연료를 통한 간섭·통제는 점차 약화된다. 이는 핵연료주기의 일부를 이제 북한이 자력 감당할 수 있게 됨에 따라 대(對)소련 의존성을 낮추어 외교적 간섭에 대해서도 버틸 수 있는 정치·외교·기술적 내구성을 형성토록 한다. 다만, 천연금속우라늄연료는 물성 상 여러 운전 조건(연소도·온도내성)과 결합될 때 새로운 함의를 갖는다. 후속 절에서 이러한 특성이 흑연로에서의 운전 조건과 맞물릴 때 어떤 전략적 결과를 형성하는지 검토한다.

45) 이기순, 『원자로 연료·재료』, 서울: 효일, 2012, pp. 113~120.

46) 홍준화, 『원자력 재료』, 서울: 한스하우스, 2017, pp. 269~271.

47) 연소도(Burn-up: MWD/tU) = { 열출력(MWt) × 가동기간 × 원자로 가동률 } ÷ 핵연료투입량(tU). 핵연료1t이 1,000kw(1MW)를 1일간 유지하는 에너지(1,000kw×24h)를 생산함을 뜻한다. 일본원자력문화진흥재단 지음, 심기보 옮김, 『원전연료와 원자로 재료』, 서울: 한국원자력문화재단, 2000, p. 97.

## 2. 흑연로-천연핵연료 특성과 합의

본 절은 '천연우라늄연료-흑연로'가 어떻게 북한의 자주성(소련 간섭의 회피)과 핵확산성(핵물질 확보 용이성)을 동시에 강화하였는지를 기술적 과정을 통해 설명한다. 이 논리는 '소련-북한의 역학관계'에 있어 핵연료를 얼마나 자주 갈아 끼웠는지(연료주기), 이에 어떤 품질의 Pu가 만들어졌는지(동위원소 조성) 등에 숨어 있다. 즉 소련이 농축핵연료를 공급·회수하는 형태로 대북 영향력을 행사했던 구조에서, 북한이 천연핵연료 기반 흑연로로 바꾸면서 그 재량권을 확대할 수 있었다. 이하에서는 Pu의 품질이 어떻게 바뀌게 되는지, 그리고 핵물질 축적과 자율성의 강화가 어떻게 연결되는지를 살펴본다.

### (1) 저연소도 운전 : 소련의 간섭 회피 성공

1986년 북한이 5MWe급 흑연로를 자체 완공하면서 흑연로용 천연우라늄연료를 활용하기 시작했다. 북한의 저연소도 흑연로 운전은 기술적으로 (천연금속)우라늄 연료의 노내 체류시간을 짧게 하며, 이때 생성되는 핵폭탄의 원료물질인 Pu 동위원소 구성에 있어 Pu-239의 비중을 상대적으로 높이는 효과를 일으킨다. 연소도란 중성자가 핵연료에 얼마나 조사되는지에 관한 것으로, 노내 중성자 조사로 연소되는 핵연료의 중성자 노출도를 의미한다. 이때 흑연로가 '저연소도'라는 특성과 결합되면 핵확산성을 띠는 독특한 특징을 보인다.

천연핵연료는 농축핵연료와 달리 비교적 고열에 약하기에 노내 연소도를 비교적 높이기 어려우며 흑연로-천연핵연료 조합은 저연소도로 가동된다. 고연소도(수천~수만MWD/tU)를 요구하는 경수로(농축핵연료)에 비해 북한의 5MWe 흑연로는 저연소(수백MWD/tU)에서 운전된다. 이에 Pu-239 비율이 95%를 보이기도 한다. 즉, 흑연로에선 연소도가 낮고 체류시간이 짧을수록 핵폭탄의 원료물질 생성에 용이하다는 것으로, 핵확산잠재성이 비교적 높다는 뜻이다.

노내 1차 중성자 조사직후 Pu가 생성되는데, Pu-239가 무려 95%수준에 달하는 게 핵심이다. 흑연로특성상 온도내성한계로, 흑연로에서 연소된 천연연료를 빨리 빼내야 한다. 조사시간이 짧아 Pu-239와 함께 생성된 Pu-240·241 비율은 오르지 않는다. 이때 Pu에는 중성자 개수가 다른 Pu-239·Pu-240·Pu-241 등이

있는데, Pu-239에 중성자가 계속(2차) 조사되면, Pu-240→241→242 등 고차등 위원소로 변환된다. 이게 늘어나면 Pu-239함량비가 줄어 핵폭탄 품질이 하락한다.

〈표1〉 흑연로(5MWe급)연소도(Burn-up)의 동위원소비율<sup>48)</sup>

MWD/tU	Pu-238(%)	Pu-239(%)	Pu-240(%)	Pu-241(%)	Pu-242(%)
200	0.7	*95.0	3.0	1.0	0.3
500	1.5	*90.0	6.0	2.0	0.5
1,000	1.5	82.0	12.0	3.0	1.5

핵연료가 중성자 조사에 의해 포획·변환되는 확률이 줄어들기에 Pu-239의 고순도율은 유지된다. U-238은 통상 중성자 흡수(+n)에 Pu-239로 변환되나, 중성자 계속조사 시 Pu-239가 Pu-240으로 바뀌어 Pu-239의 비중이 낮아진다.<sup>49)</sup> 그래서 저연소 가동 시 Pu-239 생성비율은 무려 95%수준을 달성하기도 하는데, 이는 무기급 Pu 동위원소 비율 기준치(93.8%)를 상회하는 수준이다. 이를 바로 추출하면 고도의 핵확산성을 띤다. 핵폭탄의 원료물질을 북한이 쉽게 생산할 수 있는 것이다. 결과적으로 북한은 흑연로-천연우라늄연료를 통해 농축 공정 없이도 Pu를 자체 생산할 수 있다. 이는 소련의 간섭을 우회함으로써 북한이 독자적 핵주기 구축 시도를 성공했다는 의미이다.

〈표2〉 원자로의 등급별 Pu 동위원소 비율(%)<sup>50)</sup>

	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
Super	-	*98.0	2.0	-	-
Weapon	0.12	*93.8	5.8	0.35	0.022
Reactor	1.3	60.3	*24.3	*9.1	5.0

48) Park, Geon Hee and Ser Gi Hong, "An Estimation of Plutonium Inventories of 5MWe Yongbyon Reactor with MCNP6." Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, 한국원자력학회 창립 50주년 기념 학술대회(2019년 5월 23~24일), pp. 1~4.

49) 김시환, 『알기 쉬운 핵연료관리』, 서울: 형설출판사, 2010, pp. 219~223.

50) 원자력통제기술센터, 『북한 핵 문제와 경수로 사업(I)』, 대전: 한국원자력연구소, 1999, p. 89.

## (2) 연료주기 단기화(短期化) : 자체 핵능력 확보

핵연료주기의 단기화란, 원자로 내 핵연료의 체류시간을 의도적으로 짧도록 설정해 핵연료를 자주 회수·교체토록 하는 방식이다. 천연핵연료·흑연로에서 Pu의 '생산속도'를 높일 수 있는데 이는 Pu-239 함량비율을 높인다. 바로 이것이 북한이 자체 핵확산성을 증강시키는 방법으로 특히 문제가 된다. 구체적으로 노내 증성자 조사 결과로 생성된 여러 Pu동위원소들 중 Pu-239는 '핵연료의 원자로 잔류시간'에 의해 결정된다. 흑연로에선 연소도가 낮아야 Pu-239가 무기급(90%이상)으로 생성되는데, 교체주기가 짧아야 Pu-239를 쉽게 추출·획득할 수 있다. 무기급 Pu는 Pu-240생성을 억제하고자 저연소(400 MWe-day 수준)를 지향하는 반면, 농축우라늄이 사용되는 경수로로는 고연소도(통상 30,000~40,000 MWe-day 수준)로 훨씬 높은 편이다.

천연금속우라늄연료·흑연로는 한계온도라는 제약으로 노내핵연료 체류시간을 늘릴 수 없다. 핵연료의 노내 체류시간이 짧을수록, 동일조건(출력·가동시간)하 핵연료 파손(조사성장)을 방지하고자 연료교체가 필히 요구된다. 흑연로에 장입된 천연금속우라늄연료를 빼내야 하는데, 이는 연료교체라 해도 Pu추출을 뜻한다. 빈번한 연료교체는 Pu의 빈번한 추출·회수인 것이다. 흑연로·천연핵연료는 비교적 긴 교체주기를 가진 경수로·농축핵연료에 비해 Pu를 자주 회수하게 된다. 이는 연료특성에 따른 연료주기 단기화현상은 핵확산 증강을 뜻한다.

즉, 이에 관한 정책적 함의로는 흑연로의 '존재' 그 자체보다 원자로 운전방식(저연소화 등)이 핵물질의 품질도(Pu 중 Pu-239의 구성비율)를 좌우한다는 것이다. 이로써 초점은 흑연로 혹은 경수로 등의 원자로 유형 그 자체라기보다는, 핵연료의 교체주기·가동률 및 사용후핵연료 등에 관한 것에서 정책적 의미를 찾을 수 있다할 것이다.

종합하면, 천연우라늄·흑연로 체계는 '기술우위'라기보다는 소련의 간섭·통제 회피의도에 있다. 원자로의 저연소 운전은 Pu-239비율을 높여 군사 전용성을 증대시키고, 핵연료 단주기화는 핵연료의 회수·교체를 빈번하게 하여 핵물질 축적속도를 높인다. 결과적으로 북한이 외부(소련)의 핵연료 간섭구도에서 벗어나도록 하여 핵연료의 자주성을 확대하도록 작동한다. 이는 '핵연료 자주성'이 정치적 구호가 아닌, 소련과의 새로운 국제정치적 관계로 재형성되었음을 의미한다.

## VI. 결론

본 연구의 핵심은, 원자로에 필요한 핵연료의 공급방식에 의한 대외의존(간섭·통제) 구조가 북한의 핵개발 자주화 전략을 어떻게 자극했느냐는 것이다. 소련이 지원한 원자로(IRT-2000)는 표면상 북한의 원자력개발을 지원하려는 것으로 보이나, 사실상 핵개발에 필요한 '핵연료 종속성'을 고착시켰고 이는 북한의 자력 핵개발을 간섭했다. 북한은 소련 의존형 핵연료 방식을 회피할 수 있는 우회로를 모색했고, 그 결과 소련 방식이 아닌 자체 핵연료 기반 흑연로를 고안했다.

전술한 분석으로 3가지를 확인했다. 첫 번째, 소련의 핵연료 간섭구조는 북한의 핵연료 통제권을 실질적으로 제약했다. 두 번째, 북한의 천연우라늄·흑연로 채택은, 소련의 간섭을 우회하여 핵물질(Pu)의 통제력을 '자주화'하였다. 이러한 기술경로 채택은 '간섭 회피-자주화'라는 북한의 자주화 기초 하 외교·안보 전략과 결합되어 작동했다.

이는 오늘날 북핵의 이해를 위한 함의를 갖는다. 먼저 자원(우라늄)의 자체 정련·전환은 '우라늄농축 병목'과는 무관하게 핵연료의 대외적 공급의존성을 약화시키는 토대로 기능한다. 이는 소련의 대북통제용 핵연료 간섭 특성을 감쇄시키고, 북한의 기술·외교 옵션을 확장시킨다. 이에 북한의 흑연로 방식은 본 연구의 '저연소도 및 핵물질운용' 차원에서 어떻게 구체화 됐는지 이해할 수 있는 정책 검증 사례이다.

국제정치적 관점에서, 천연우라늄·흑연로는 북한에 2가지 전략적 이익을 제공했다. 첫째, 짧은 체류시간·저연소도 운전 등은 Pu-239 비중을 높이는데 이로써 제한된 시설만으로도 핵물질 회수·축적 역량을 강화하는 자율성이 그것이다. 둘째, 이는 대(對)소련관계 외 국제적 외교수단으로써 '핵확산·저항성'을 활용할 수 있게 됐다. 북한은 1990년경 영변에 대형흑연로(50MWe급·200MWe급)를 건설하던 중 미국과의 비핵화 협상으로 중단했다. 이는 5MWe급 흑연로가 북한의 Pu생산수단이면서 대형흑연로 구상으로 연결됐음을 의미한다.

북한의 우라늄 농축역량이 커진 오늘날, IRT처럼 핵연료의 대외의존형 방식에 의한 '간섭효과'는 기대하기 쉽지 않다. 북한이 자체 역량을 축적하면서 간섭 효과가 감소했기 때문이다. 이는 비확산정책 상 '핵연료 통제'보다는, 민감 역량

(농축)을 어떻게 관리할 것인지로 초점이 맞춰진다. 이에 북한 핵문제는 기술조치(사찰·검증)와 정치적 대응(제재·협상)을 융합·설계해야 하는 상황이다. 따라서 오늘날 대북 핵협상은 원자로·핵연료 유형과 ① 핵연료·핵물질 추적 강화 ② 핵연료의 상시 검증이 결합된 방식을 고안해 낼 필요가 있다.

핵연료를 기반으로 분석한 1950~80년대 북한의 핵개발 문제는 ‘기원(基源)’ 그 자체에만 국한되지 않는다. 소련의 원자력 간섭구조를 무력화하고자 북한이 자력 추진한 원자로는, 1993년 제1차 북핵 협상에서 쟁점이 됐고, 오늘날의 북한 핵문제로 연결되었다. 이는 원자력 특성이 국제구조를 움직인다는 ‘기술·정치’의 융합으로써, 북한 핵전략을 관통한다는 데 본 연구의 의의가 있을 것이다.

## 참고문헌

### 1. 한글 문헌

- 강대석·최진식, “북한의 핵무기 개발 동기요인에 관한 연구.” 『평화학연구』 제25권 2호, 2024.
- 강창우 외, 『핵무기와 핵전략』, 서울: 박영사, 2025.
- 경남대학교 국동문제연구소·북한대학원대학교, 『북한의 핵문제와 대외관계』, 파주: 한울, 2024.
- 김시환, 『알기 쉬운 핵연료관리』, 서울: 형설출판사, 2010.
- 김일성, 『김일성저작집 15』, 평양: 조선로동당출판사, 1981.
- 김일성, 『사회과학의 임무에 대하여』, 평양: 조선로동당출판사, 1969.
- 김일성, 『사회주의 경제관리 문제에 대하여』, 평양: 조선로동당출판사, 1970.
- 김천옥, 『한국의 원전』, 서울: 동명사, 2021.
- 과학기술처 원자력통제과, 『북한의 플루토늄 소유량』, 서울: 과학기술처, 1994.
- 국군정보사령부, 『북한군 군사사상』, 국군정보사령부, 2007.
- 국방대학교 국가안전보장문제연구소, 『국가 핵전략』, 서울: 국가안전보장문제연구소, 2014.
- 김보미, “북한 핵프로그램의 시작과 성장:1950-1960년대를 중심으로.” 『통일정책연구』 제28권 1호, 2019, p. 183~208.
- 로버트 갈루치·조엘 위트·대니엘 폰먼 지음, 김태현 옮김, 『GOING CRITICAL:The First Korean Nuclear Crisis(북핵위기의 진말)』, 서울: 모음북스, 2005.
- 문성목, “북한 핵개발 실태와 대외정책.” 『통일정책연구』 제25권 1호, 2016.
- 박기덕 외, 『북핵문제와 한반도 평화체제』, 성남: 세종연구소, 2008.
- 박진호, 『핵화학공학』, 서울: 한스하우스, 2012.
- 박종수, 『현대 북러관계의 이해』, 서울: 명인문화사, 2021.
- 사회과학출판사, 『정치사전』, 평양: 사회과학출판사, 1973.
- 시모토마이 노부오 지음, 정연식 옮김, 『아시아 냉전사』, 대구: 경북대학교출판부, 2017.
- 이기순, 『원자로 연료·재료』, 서울: 효일, 2012.
- 이상철, 『안보와 자주성의 딜레마』, 서울: 연경문화사, 2004.
- 이용준, 『북핵 30년의 허상과 진실』, 파주: 한울, 2018.
- 이우방·김한영, 『원자력공학개론』, 부산: 고려동, 2013.
- 이창위 외, 『기रो에 선 북핵 위기』, 서울: 박영사, 2025.
- 이춘근, 『과학기술로 읽는 북한 핵』, 서울: 생각의나무, 2005.
- 이춘근, 『북한의 핵패권』, 서울: 인문공간, 2023.

- 일본원자력문화진흥재단 지음, 심기보 옮김, 『원전연료와 원자로 재료』, 서울: 한국원자력 문화재단, 2000.
- 원자력통제기술센터, 『북한 핵 문제와 경수로 사업(I)』, 대전: 한국원자력연구소, 1999.
- 장철운 외, 『북한 비핵화를 위한 전략과 추진과제』, 서울: 통일연구원, 2023.
- 전봉근, 『비핵화의 정치』, 서울: 명인문화사, 2020.
- 정현숙, “1950~1960년대 북한의 ‘핵잠재력 확보전략’에 관한 연구: 원자력의 평화적 이용정책의 지속과 변화를 중심으로.” 『현대북한연구』 제21권 2호, 2018.
- 조선로동당중앙위원회직속 당력사연구소, 『김일성저작선집1』, 평양: 조선로동당출판사, 1967.
- 조선로동당중앙위원회직속 당력사연구소, 『김일성저작선집4』, 평양: 조선로동당출판사, 1968.
- 조선로동당중앙위원회직속 당력사연구소, 『김일성저작선집5』, 평양: 조선로동당출판사, 1972.
- 한국방사선진흥협회, 『원자력이론』, 서울: 한국방사선진흥협회, 2023.
- 한국원자력연구소, 『북한의 원자력 이용개발 현황 분석 및 전망 연구』, 대전: 한국원자력 연구소, 1993.
- 한국원자력연구소, 『핵연료주기시스템의 핵확산저항성 분석』, 대전: 한국원자력연구소, 2009.
- 함형필, 『김정일체제의 핵전략 딜레마』, 서울: 국방연구원, 2009.
- 황장엽, 『나는 역사의 진리를 보았다』, 서울: 한올아카데미, 1999.
- KINAC 정책연구센터, 『북한의 플루토늄 및 농축우라늄 생산능력』, 대전: 한국원자력통제기술원, 2015.
- “IAEA “북한, 영변에 새로운 핵 시설 건설 중.” 『KBS』 2025년 6월 10일.

## 2. 영문 문헌

- Albright, David, “North Korea’s Suspect, Former Small-Scale Enrichment Plant.” Institute For Science And International Security, Imagery Brief, 2016.6.21.
- IAEA, INFCIRC/153, IAEA, 1972.
- IAEA, Application of Safeguards in the Democratic People’s Republic of Korea, IAEA, 2024.
- Park, Geon Hee and Ser Gi Hong, “An Estimation of Plutonium Inventories of 5MWe Yongbyon Reactor with MCNP6.” Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, 한국원자력학회 창립 50주년 기념 학술대회 (2019년 5월 23~24일).

Abstract

A Study on the Factors Behind North Korea's Adoption of  
Graphite Reactor-Type Nuclear Fuel  
- Focusing on Technological Features and the Autonomy Process  
(1950s-1980s) -

Cho, Joo Hyung (Ph.D, Hanyang University)  
Hong, Yong Pyo (Professor, Hanyang University)

This study focuses on why North Korea(NK) adopted a Natural Uranium-fueled(NU) Graphite-Moderated Reactor(GMR) instead of the Soviet-style Enriched nuclear fuel-based Light-Water Reactor(LWR) system, despite the Soviet Union's support for nuclear energy from the 1950s to the 1980s. Specifically, this study utilizes policy-data on NK's early Soviet-supported reactors and its newly developed GMR, employing an interdisciplinary approach that combines technological analysis and international political analysis. According to this study, the Soviet Union's partial nuclear cooperation with NK ostensibly maintained the constraints on nuclear proliferation, but it also deepened North Korea's dependence on the Soviet Union. Ultimately, NK sought to circumvent Soviet interference by adopting NU and GMR, thereby strengthening its own potential and autonomy. Ultimately, NK's adoption of NU-GMR was a strategic decision aimed at achieving nuclear independence against the Soviet Union.

Keywords: North Korea, Nuclear strategy, Independence, Nuclear fuel,  
Proliferation resistance

투고일: 2025년 12월 31일, 심사일: 2026년 1월 31일, 게재확정일: 2026년 2월 24일

