

KNS 2020 온라인 추계학술발표회

**시스템 다이내믹스를 활용한 북한
핵물질 생산량 추정 방법론 연구**

발표자 : 정 연 홍

2020.12.17.(목)



INDEX

서론

활용 방법론

SD 모델링

평가 결과 및 고찰

주요 시사점 및
기대효과

Q&A

서론

활용 방법론

SD 모델링

평가 결과 및 고찰

주요 시사점 및
기대효과

Q&A



연구 배경



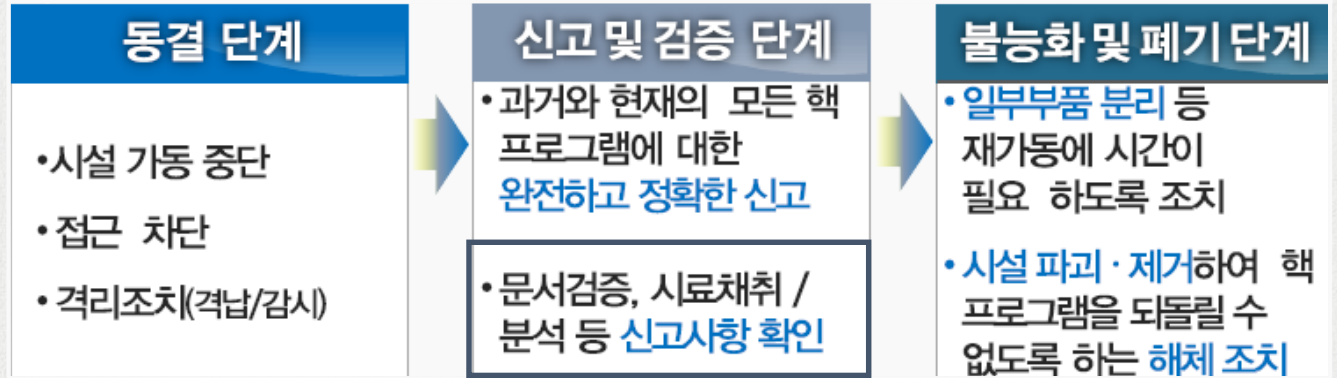
연구 필요성



선행 연구



비핵화 (핵물질 생산 프로그램의 동결과 핵시설 및 핵물질 폐기)

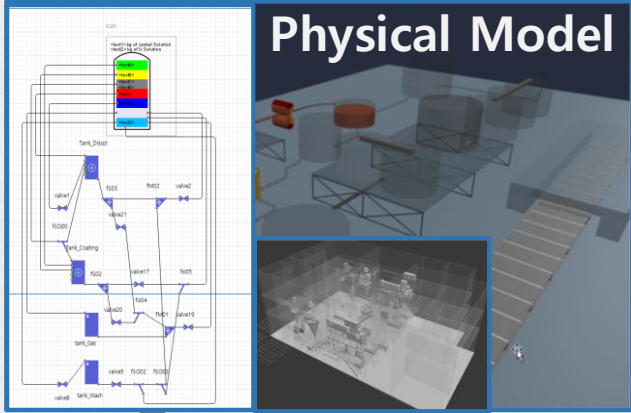


비핵화 검증 (신고된 정보에 대한 검증)

장부검사 + **현장검증** + **시료분석**

- **장부검사** : 신고내용과 실제 운영기록의 일치 여부 검증
 - 설계정보 검증 : 보유 시설 신고 사항에 대해 가용한 모든 정보를 통해 검증(서류/현장)
 - 계량관리보고 검증 : 핵물질의 생산/사용/보유 등 종합적인 양과 물질수지를 확인
- **비파괴 검증** : 핵무기 및 핵물질의 직접 측정을 통해 신고내용 검증
- **시료분석**(공정시료 및 환경시료)
 - 공정시료의 총량분석을 통해 신고내용의 정확성 검증
 - 환경시료 분석을 통해 미신고 활동의 존재 여부를 검증

- 시각화(Visualization) 모델을 통한 생소한 시설 및 정보에 대한 친숙화(Familiarization)



- 대상 정보의 정량화를 통한 사전 검증 계획 수립 지원
- 자원의 효율적 배분 및 최적화

계획



- 문제정의
- 데이터 획득 전략
- 데이터 품질 목표
- 시료채취 계획
- 품질보증계획
- 분석절차서
- 검증, 평가, 유효성 확인 계획

- 신고된 정보의 검증
- 분석 결과의 신뢰성 검증

- 시료보존, 운반, 수령검사
- 실험실 시료 준비
- 화학분리
- 기기 테스트
- 측정 및 분석
- 데이터 수집 및 보고

분석



비핵화 검증

현장



- 현장접근
- 건물, 야적지 등 진입
- 기록, 수거, 확인 진행
- 시건, 봉인, 격납 조치
- 시료채취, 운반, 저장 등
- 필요시 실시간 의사소통

JOURNAL FOR PEACE AND NUCLEAR DISARMAMENT
2019, VOL. 2, NO. 2, 553-561
https://doi.org/10.1080/2154.2019.1666022

Methods for Refining Estimates of Cumulative DPRK Uranium Production
David F. Von Hippel
Senior Associate, Nautilus Institute, Eugene, OR, USA

ABSTRACT
This paper summarizes the history of what is known about uranium mining in the DPRK, describes the major uncertainties regarding DPRK uranium production, notes some of the key techniques, as used in preparing estimates of nuclear sector activity in other nations, that might be available to assist in narrowing the range of estimates of DPRK uranium and processed fissile material production, summarizes estimates of enriched uranium and plutonium production prepared by other authors, describes existing estimates of the amount of fissile materials used in nuclear weapons tests and exported, provides a demonstration of the potential impact of remote sensing methods and testing in the DPRK in reducing uncertainties in cumulative historical uranium production, and then in fissile materials inventories, and offers conclusions, resulting from the potential impacts of uncertainty reduction approaches, as to which verification procedures should be key targets during negotiations with the DPRK.

ARTICLE HISTORY
Received 11 July 2019
Accepted 19 August 2019

KEYWORDS
North Korea; uranium production; fissile material inventories; uranium mining; fissile inventories verification

Introduction and Statement of Problem
The past 2 years have seen what appears to be a series of improvements in relationships between the Democratic People's Republic of Korea (DPRK) and the international community, or at least the initial steps toward improved relationships. In particular, summit meetings between Republic of Korea (ROK) President Moon and North Korean leader Kim Jong Un, three meetings between Kim Jong Un and United States President Donald Trump, and advancing planning for a next Trump-Kim summit have raised hopes for progress in talks to "denuclearize" the DPRK. Reaching agreement on, and then implementing, a process of dismantling the DPRK's nuclear weapons production facilities, and of removing from the Korean Peninsula (or otherwise isolating under international oversight) the DPRK's nuclear weapons and fissile material, is likely to take years, perhaps more than a decade. In the meantime, it is important that the international community be able to estimate as accurately as possible the amount of uranium – enriched and natural – that has been produced and used in the DPRK over the decades since its first foray into nuclear technologies, starting in the 1960s or before, as well as the amount of plutonium that has been produced in irradiated fuel and separated via reprocessing. Determination and

CONTACT David F. von Hippel dvon@nautilus.org Senior Associate, Nautilus Institute, Eugene, OR, USA
See, for example, MacGregor (2019) Other sources include a nuclear cooperation agreement signed by the DPRK and Russia in 1993, predicated by nuclear prospecting by both the Japanese during World War II and by the Russians in early in 1946.
© 2019 The author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

북한 우라늄 광산/정련 시설 핵물질 생산량 추정 연구

- 주요 광산으로 평산과 웅기를 선정
- 평산: 매장량(150만톤), 생산량(1만톤/연)
- 웅기: 매장량(1천만톤), 생산량(1만9천톤/연)
- 주요 정련시설로 평산을 선정
- 평산: 용량(20만톤/연), 생산량(290톤/연)
- 우라늄 품위
- 0.15~0.9%까지 범위로 지정

- 러시아, 중국 등으로 우라늄 및 토륨 원광, 모나자이트 수출
- 시기별, 시나리오별로 특정 수출량 가정
- 북한의 핵주기 관련 정보는 정확한 값 또는 단일 값으로 알려져 있지 않으므로 추정의 기본 데이터에 대하여 최대치와 최저치를 구분하여 세 가지의 시나리오(Min-Central-Max)로 추정
- 해당 연구에서 원광으로부터 추정한 정광의 누적생산량
- Min: 213.45톤
- Central: 834.38톤
- Max: 6,969.74톤

KINAC/TR-008/2011
80-9120
기술보고서

북한의 핵 프로그램과 검증



KINAC/CP-001/2019
188-8143
기술보고서

2018 북핵 총서




핵주기 시설 현황 및 가동이력 추정 연구

- 한국원자력통제기술원에서는 북핵 검증 이행을 대비한 검증 지침서를 개발(2011)
- 북한 핵 프로그램의 연혁, 북한 원자력시설 현황, 핵물질 검증 방법 및 기기, 검증대상 물질 및 시설 등에 관한 상세한 정보를 포함
- 2010년 까지의 주요 원자력시설(흑연로, 방사화학실험실, 우라늄 농축시설 등)에 대한 시설 정보 및 가동이력 정보 제공

KINAC/CP-001/2019
188-8143
기술보고서

2019 북핵 총서

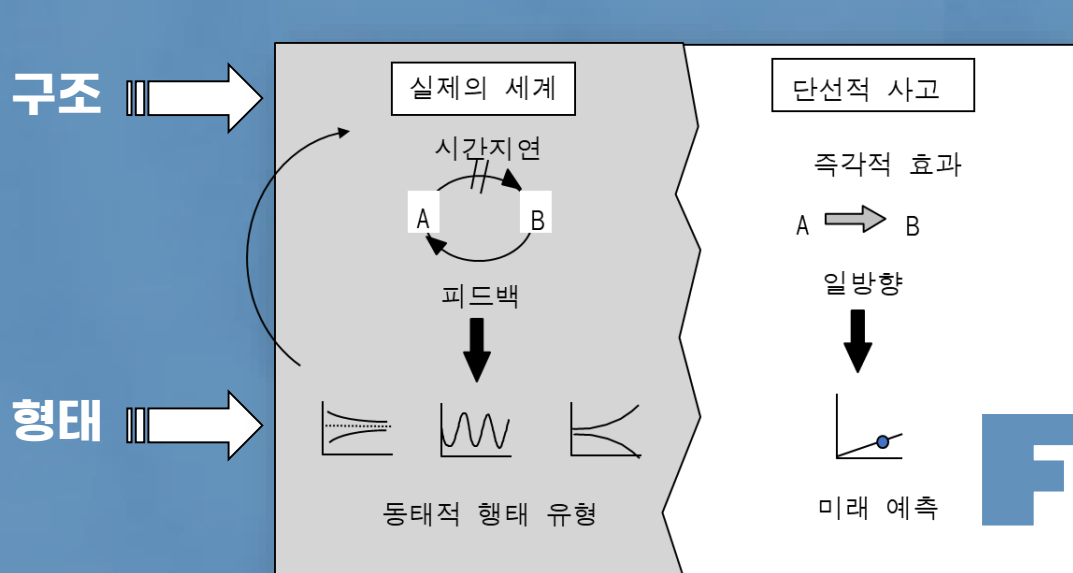


- 2010년 이후 공개정보를 통해 알려진 북한의 핵활동 정보 및 원자력시설 가동 정보를 제한적으로 제공

시스템 다이내믹스(System Dynamics)

- 시스템 다이내믹스는 구조가 행태를 결정짓는다는 세계관에 기초함
- 여기에서 구조(structure)란 피드백 루프(feedback loops)를 의미한다.
- 그리고 행태(behavior)란 동태적 행태유형(dynamic pattern of behavior)을 의미한다.

➡ 시계열의 흐름에 따른 거시적인 물질의 흐름을 분석하는 데에 유용함



“산업동태론은 산업시스템들의 행태를 연구하는 방식으로서, 정책과 의사결정과 구조 그리고 시간지연 등이 어떻게 상호연결되어 시스템의 성장과 안정성에 영향을 주는지를 밝히고자 한다... 산업동태론은 시스템에 동태적인 특성을 부여하는 정보 네트워크의 중요성을 강조한다” (Forrester 1961, 서문)



JAY FORRESTER

서론

활용 방법론

SD 모델링

평가 결과 및 고찰

주요 시사점 및
기대효과

Q&A



CLD 작성

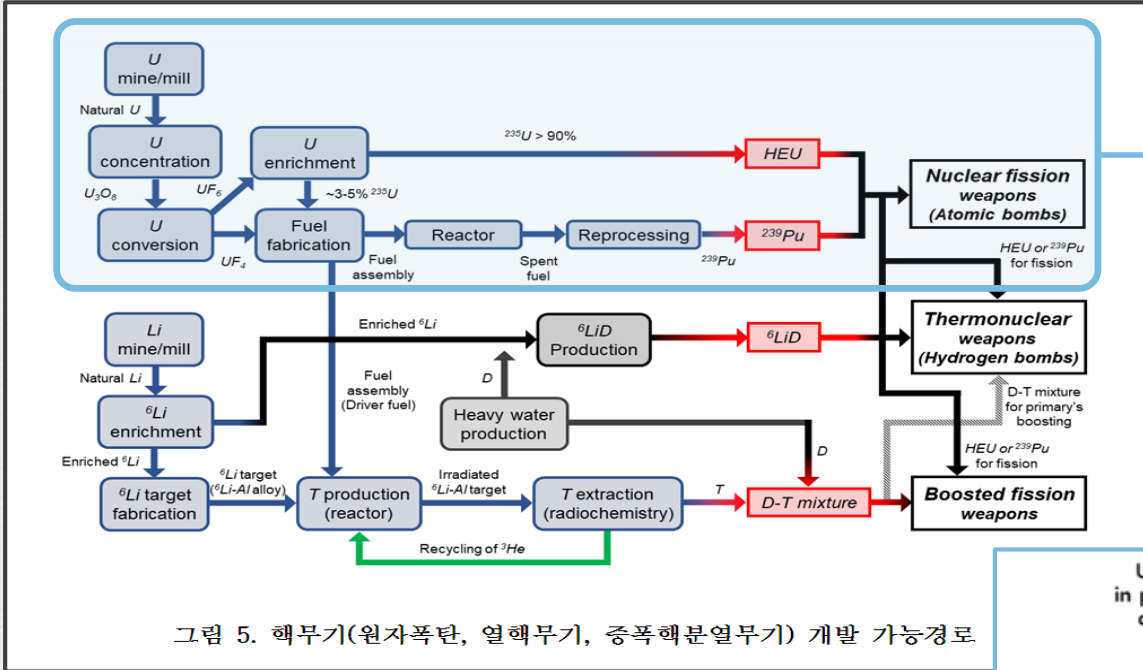


SFD 작성



세부 모델링

Causal Loop Diagram(CLD) 작성



핵물질(HEU, Pu) 관련 주기 시설만 발체

<Causal Loop Diagram>

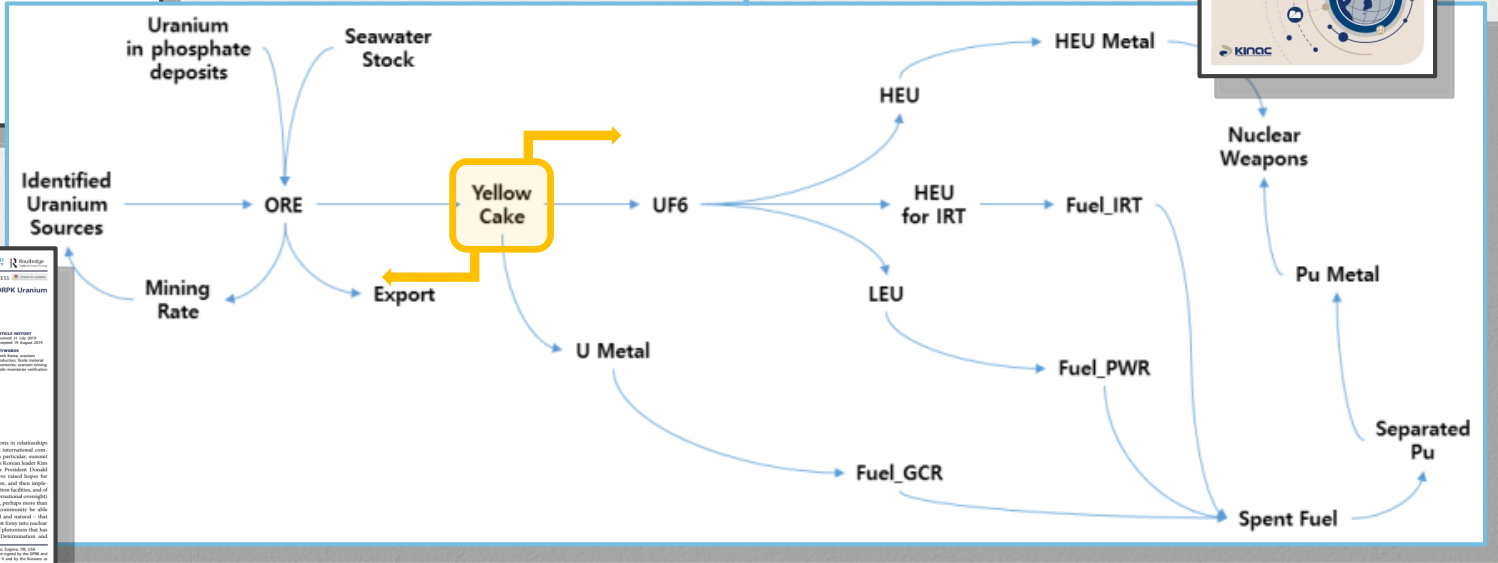


그림 5. 핵무기(원자폭탄, 열핵무기, 중폭핵분열무기) 개발 가능경로

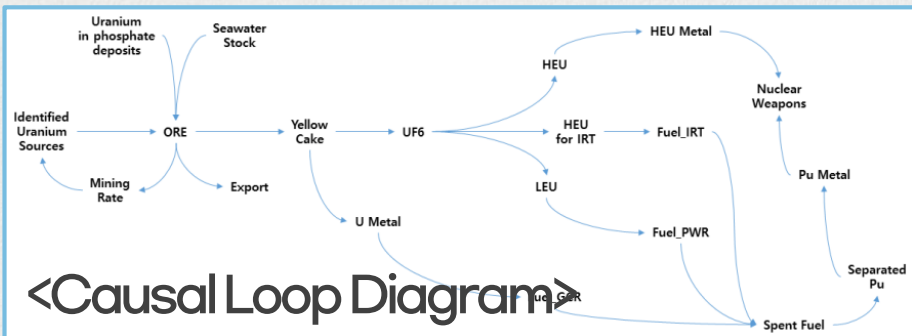
<북한의 핵무기 개발 관련 주기>

Methods for Refining Estimates of Cumulative DPRK Uranium Production
 David P. Cook Report
 North Atlantic Treaty Organization, Europe, US, UK

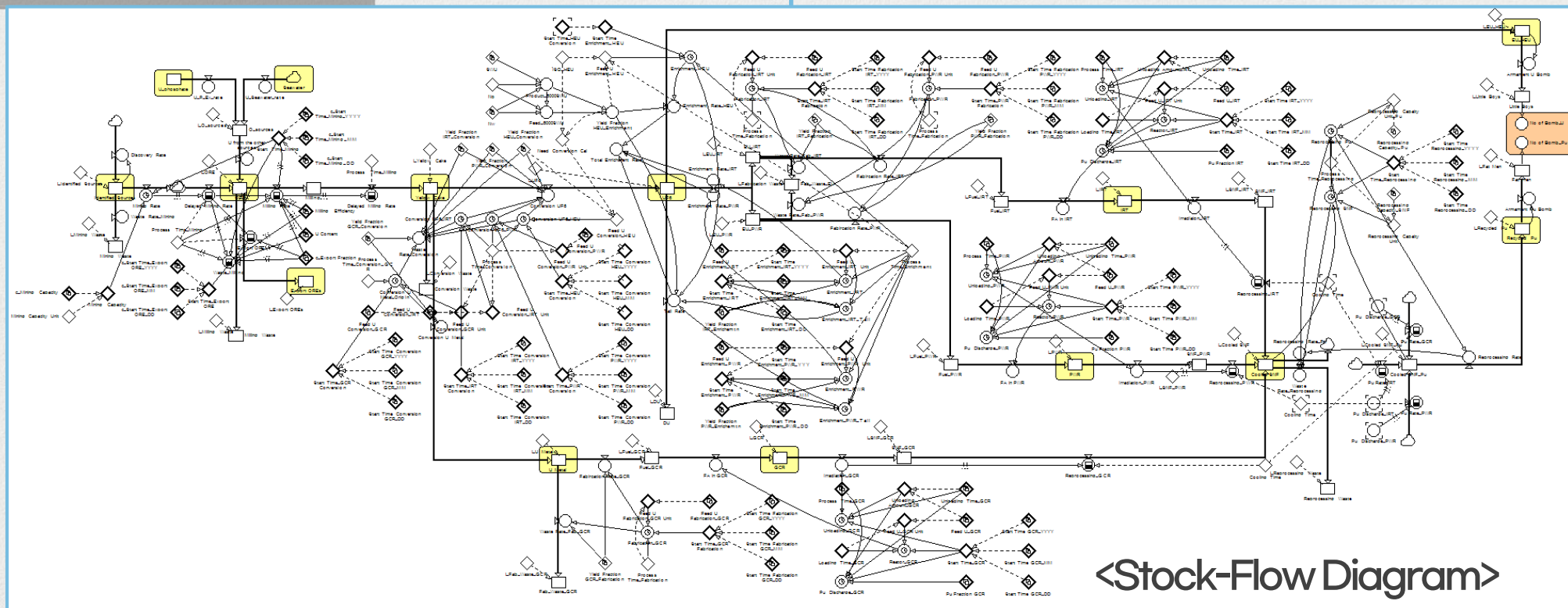
ABSTRACT
 This report examines the history of what is known about cumulative uranium production in North Korea since 1992, and the increased uncertainty of that total since 2009. It also examines the relationship between the Democratic People's Republic of Korea (DPRK) and North Korea's nuclear program, and the impact of the 2009 nuclear test on the program. The report also examines the impact of the 2009 nuclear test on the program, and the impact of the 2009 nuclear test on the program.



Stock-Flow Diagram(SFD) 작성

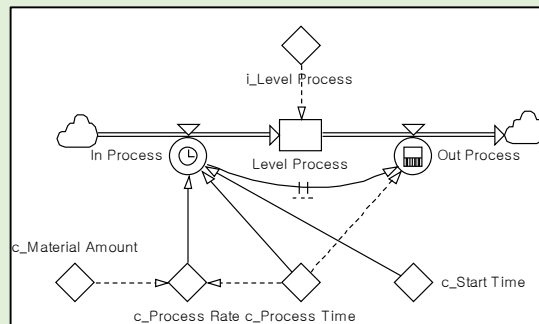


주요 핵주기 시설에 대한
SFD 작성

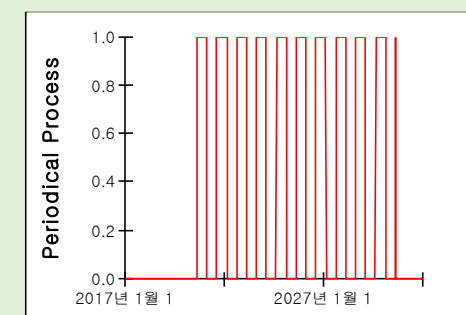
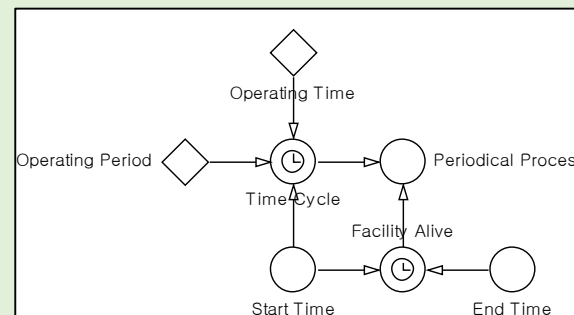


핵주기 특성에 따른 연산 모듈

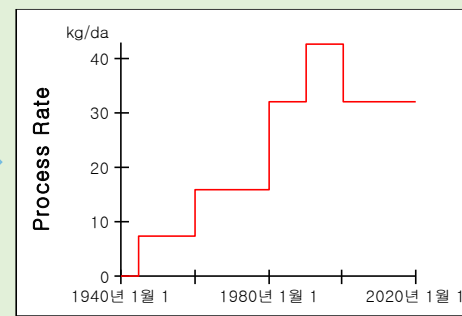
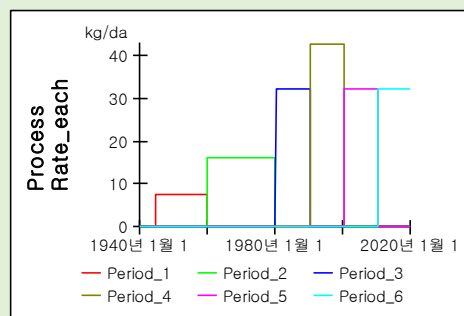
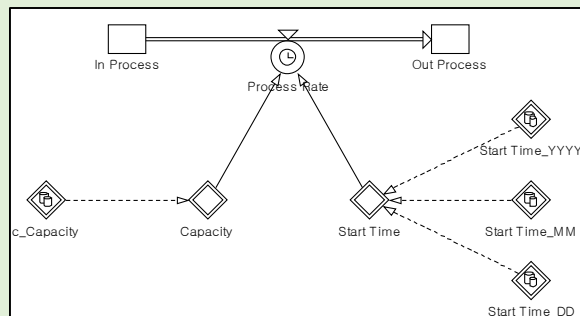
이산적인 물질흐름(Batch Process) 연산 모듈



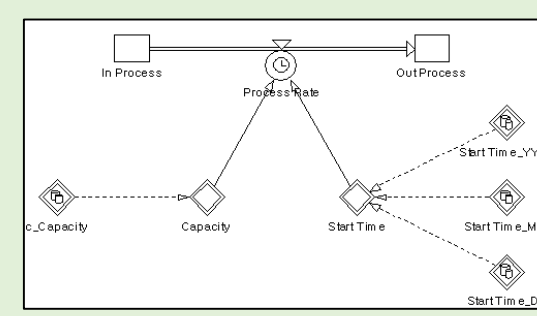
주기적인 가동 모듈



가동이력 별 생성 데이터 통합 모듈

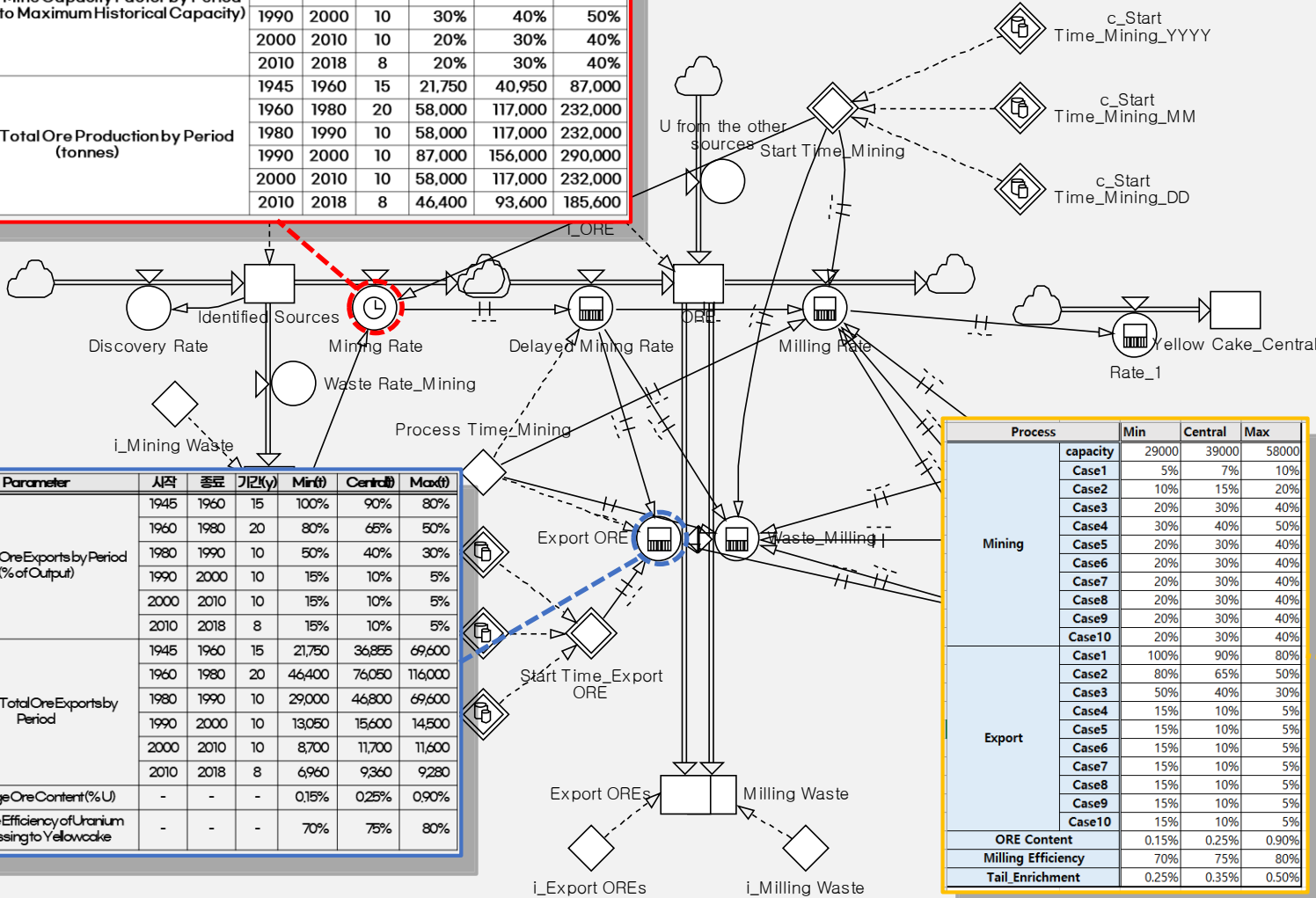


엑셀 연동 모듈



Natural Uranium

Parameter	시작	종료	기간(y)	Min(t)	Central(t)	Max(t)
Total DPRK Mine Capacity (tonnes ore per annum, maximum historical capacity)	-	-	-	29,000	39,000	58,000
	1945	1960	15	5%	7%	10%
	1960	1980	20	10%	15%	20%
Average Mine Capacity Factor by Period (Relative to Maximum Historical Capacity)	1980	1990	10	20%	30%	40%
	1990	2000	10	30%	40%	50%
	2000	2010	10	20%	30%	40%
	2010	2018	8	20%	30%	40%
	1945	1960	15	21,750	40,950	87,000
Implied Total Ore Production by Period (tonnes)	1960	1980	20	58,000	117,000	232,000
	1980	1990	10	58,000	117,000	232,000
	1990	2000	10	87,000	156,000	290,000
	2000	2010	10	58,000	117,000	232,000
	2010	2018	8	46,400	93,600	185,600



Parameter	시작	종료	기간(y)	Min(t)	Central(t)	Max(t)
Average Ore Exports by Period (% of Output)	1945	1960	15	100%	90%	80%
	1960	1980	20	80%	65%	50%
	1980	1990	10	50%	40%	30%
	1990	2000	10	15%	10%	5%
	2000	2010	10	15%	10%	5%
	2010	2018	8	15%	10%	5%
Implied Total Ore Exports by Period	1945	1960	15	21,750	36,855	69,600
	1960	1980	20	46,400	76,050	116,000
	1980	1990	10	29,000	46,800	69,600
	1990	2000	10	13,050	15,600	14,500
	2000	2010	10	8,700	11,700	11,600
	2010	2018	8	6,960	9,360	9,280
Average Ore Content(% U)	-	-	-	0.15%	0.25%	0.90%
Average Efficiency of Uranium Processing to Yellowcake	-	-	-	70%	75%	80%

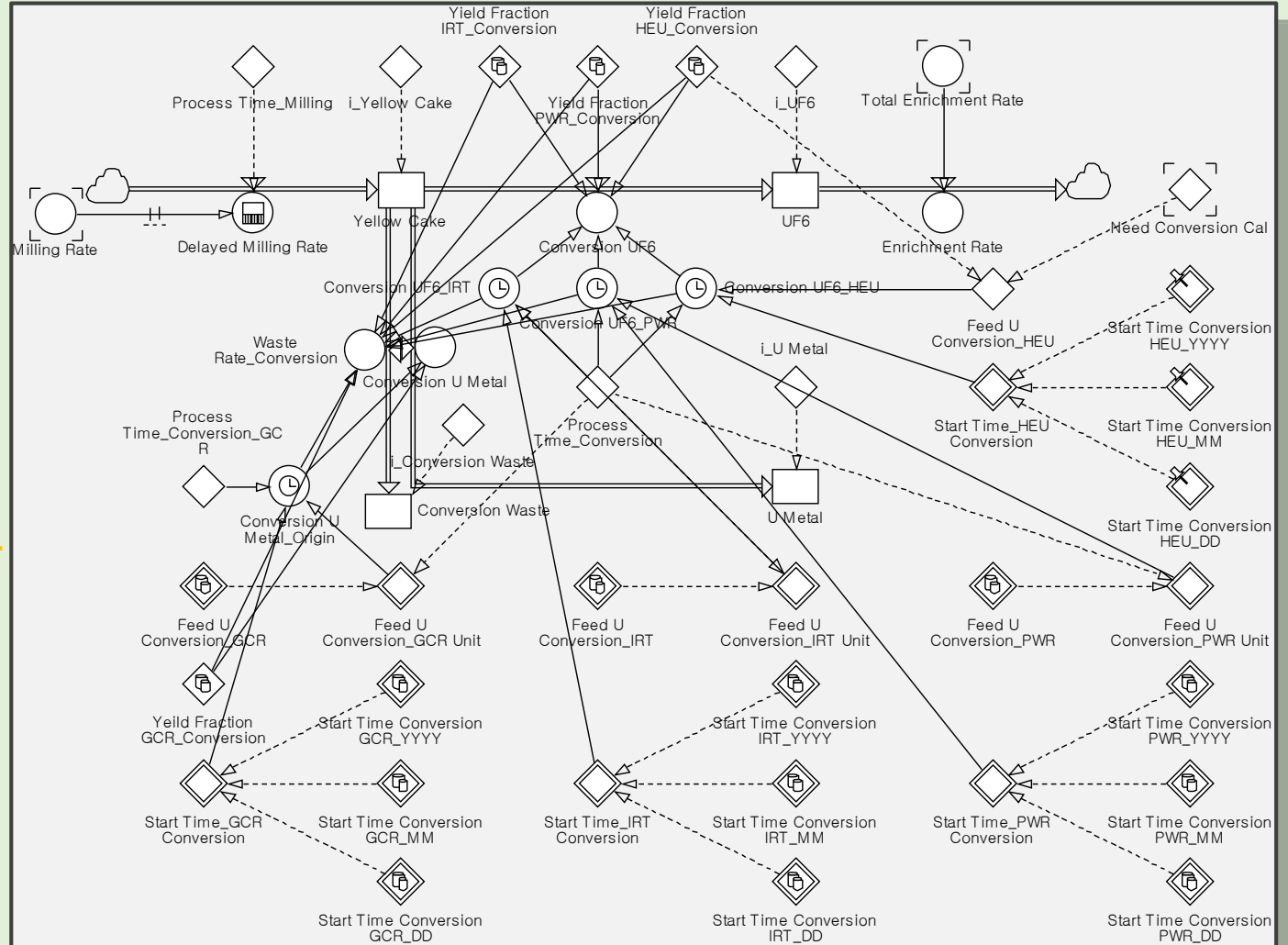
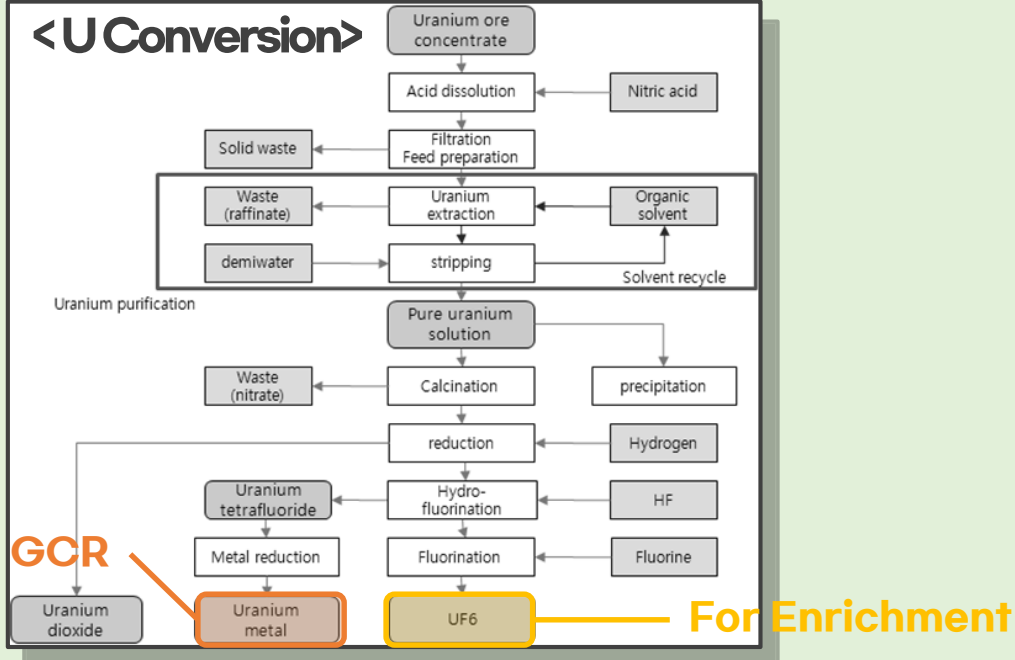
Process	Min	Central	Max	
Mining	capacity	29000	39000	58000
	Case1	5%	7%	10%
	Case2	10%	15%	20%
	Case3	20%	30%	40%
	Case4	30%	40%	50%
	Case5	20%	30%	40%
	Case6	20%	30%	40%
	Case7	20%	30%	40%
	Case8	20%	30%	40%
	Case9	20%	30%	40%
	Case10	20%	30%	40%
Export	Case1	100%	90%	80%
	Case2	80%	65%	50%
	Case3	50%	40%	30%
	Case4	15%	10%	5%
	Case5	15%	10%	5%
	Case6	15%	10%	5%
	Case7	15%	10%	5%
	Case8	15%	10%	5%
	Case9	15%	10%	5%
	Case10	15%	10%	5%
ORE Content	0.15%	0.25%	0.90%	
Milling Efficiency	70%	75%	80%	
Tail Enrichment	0.25%	0.35%	0.50%	

가정 및 참고사항

- 평산, 웅기두 지역의 우리늄 광산만을 가정
- 가채 매장량은 각각 다음과 같음
 - 평산 : 1,500,000t
 - 웅기 : 10,000,000t
- 연간 채광 능력은 다음과 같음
 - 평산 : 10,000t/y
 - 웅기 : 19,000t/y
- 실질적으로 두 개의 광산 외에 추가적인 광산이 존재하므로 평산, 웅기두 광산의 가채 매장량이 특정 수준 이하로 내려가는 경우, 추가적인 광산을 개발하는 것으로 모델링을 수행함
- 입력 데이터의 참조 논문으로 활용한 Von Hippel의 연구에 따르면, 우리늄의 매장량이나 시설의 처리용량 등을 단일한 값이 아닌 최저값-중간값-최고값의 범위로 제시하고 있어 본 모델에서도 이와 동일하게 세 가지 시나리오로 입력 데이터를 구성함
- 또한, 북한은 구소련과 중국을 포함한 여러 국가들에 우리늄 원광, 토륨 원광, 모나자이트 등을 상당량 수출한 것으로 알려져 있어, 이러한 수출에 대한 인자도 고려
- 입력 데이터 (Excel Spread Sheet)

Scenario	Central		Mining		Export ORE		Yellow Cake	
	Start	End	Capacity(MTU/yr)	Start	End	Export f	Content	Efficiency
Case1	1945-01-01	1959-12-31	2730	1945-01-31	1960-01-30	90%	0.25%	75%
Case2	1960-01-01	1979-12-31	5850	1960-01-31	1980-01-30	65%	0.25%	75%
Case3	1980-01-01	1989-12-31	11700	1980-01-31	1990-01-30	40%	0.25%	75%
Case4	1990-01-01	1999-12-31	15600	1990-01-31	2000-01-30	10%	0.25%	75%
Case5	2000-01-01	2009-12-31	11700	2000-01-31	2010-01-30	10%	0.25%	75%
Case6	2010-01-01	9998-12-31	11700	2010-01-31	9999-01-30	10%	0.25%	75%
Case7	9999-01-01	9999-12-31	11700	9999-01-31	9999-12-31	10%	0.25%	75%
Case8	9999-01-01	9999-12-31	11700	9999-01-31	9999-12-31	10%	0.25%	75%
Case9	9999-01-01	9999-12-31	11700	9999-01-31	9999-12-31	10%	0.25%	75%
Case10	9999-01-01	9999-12-31	11700	9999-01-31	9999-12-31	10%	0.25%	75%

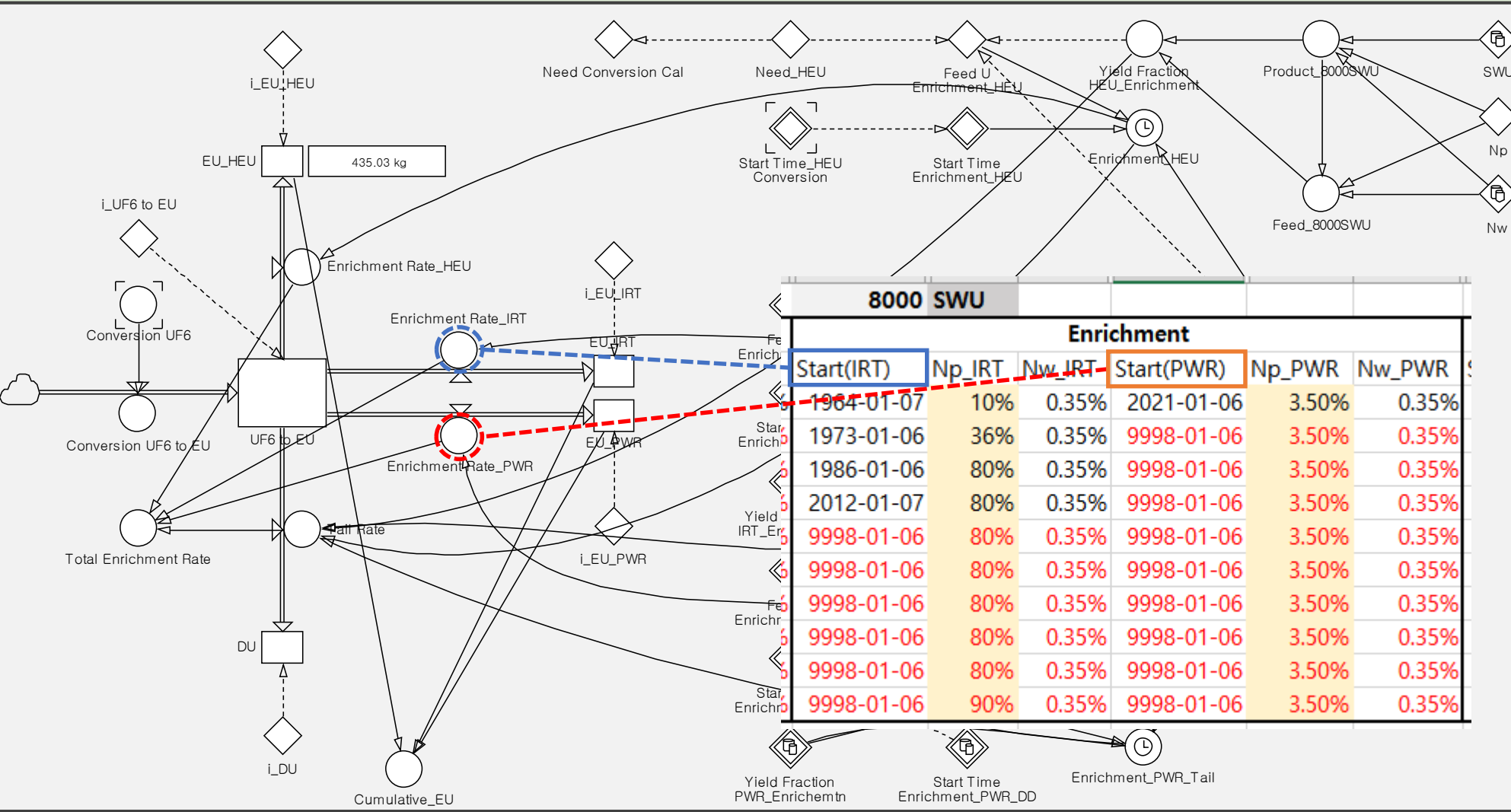
Yellow Cake



가정 및 참고사항

- 다양한 원자로(흑연로, 연구로, 경수로 등)를 가정하여 변환 공정 생성물을 흑연로 연료용 금속 우라늄(U Metal)과 농축을 위한 육불화우라늄(UF6)로 구분하여 가정
- 변환 공정의 가동은 원자로 가동 일정에 따라 최적의 스케줄에 따라 작업하도록 가정
- 이렇게 최적의 스케줄에 대한 정보는 한전원자력연료에서 정광, 변환, 농축 공정을 수행하는 해외 공급사와의 계약 시기를 참고하여 필요한 공정 소요시간을 산정
- 이는 각각, 변환 2개월, 농축 2개월, 성형가공 5개월에 해당함

Enriched Uranium



<지배방정식(Dirac)>

$$\Delta U = P \times V(N_P) + W \times V(N_{W'}) - F \times V(N_F)$$

$$V(N_P) = (2N_P - 1) \times \ln\left(\frac{N_P}{1 - N_P}\right)$$

$$V(N_{W'}) = (2N_{W'} - 1) \times \ln\left(\frac{N_{W'}}{1 - N_{W'}}\right)$$

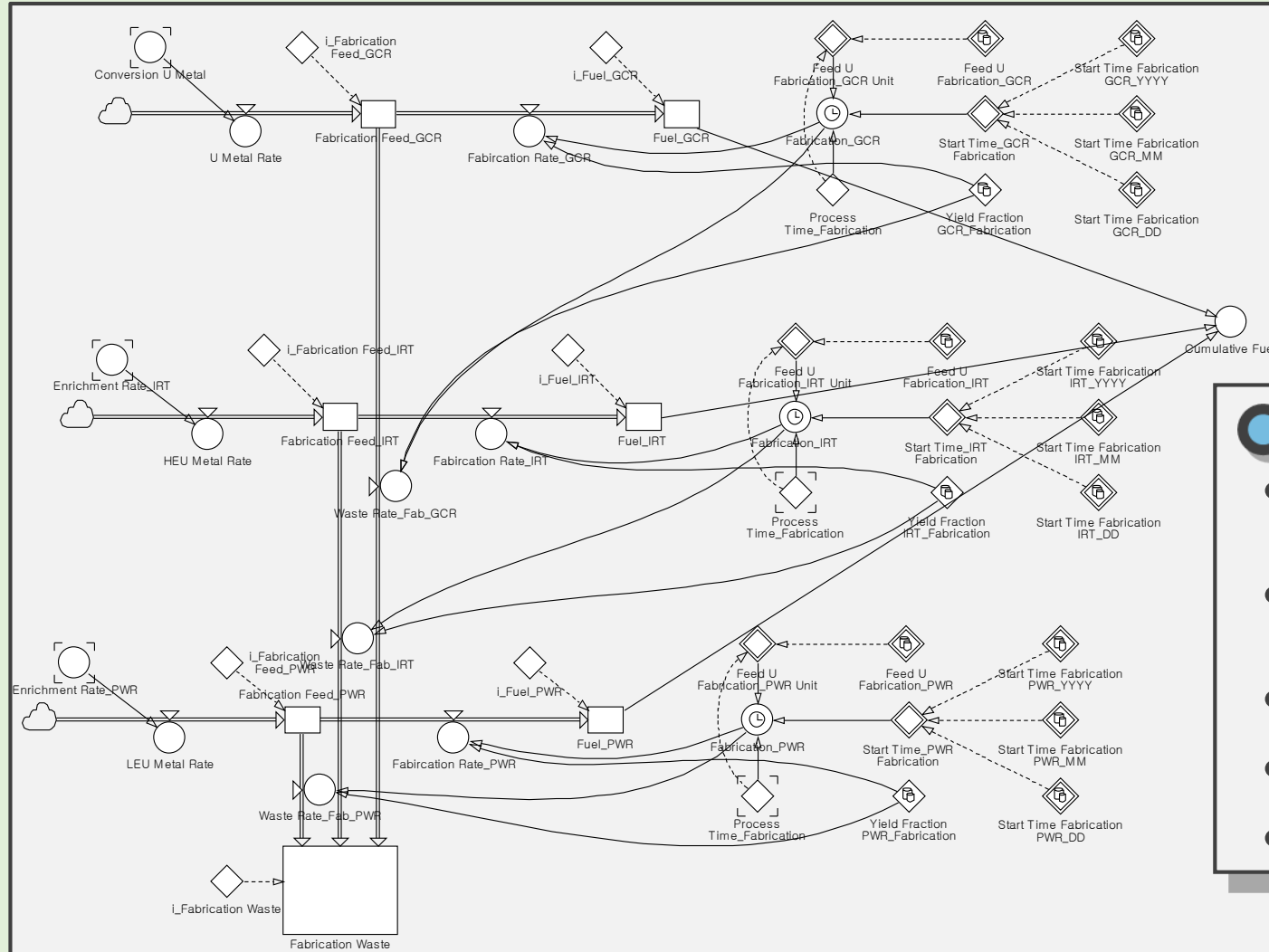
$$V(N_F) = (2N_F - 1) \times \ln\left(\frac{N_F}{1 - N_F}\right)$$

$$SWU_{1kg-U} = (2N_P - 1) \times \ln\left(\frac{N_P}{1 - N_P}\right) + \frac{N_P - N_F}{N_F - N_{W'}} \times (2N_{W'} - 1) \times \ln\left(\frac{N_{W'}}{1 - N_{W'}}\right) - \frac{N_P - N_{W'}}{N_F - N_{W'}} \times (2N_F - 1) \times \ln\left(\frac{N_F}{1 - N_F}\right)$$

8000 SWU						
Enrichment						
Start(IRT)	Np_IRT	Nw_IRT	Start(PWR)	Np_PWR	Nw_PWR	
1964-01-07	10%	0.35%	2021-01-06	3.50%	0.35%	
1973-01-06	36%	0.35%	9998-01-06	3.50%	0.35%	
1986-01-06	80%	0.35%	9998-01-06	3.50%	0.35%	
2012-01-07	80%	0.35%	9998-01-06	3.50%	0.35%	
9998-01-06	80%	0.35%	9998-01-06	3.50%	0.35%	
9998-01-06	80%	0.35%	9998-01-06	3.50%	0.35%	
9998-01-06	80%	0.35%	9998-01-06	3.50%	0.35%	
9998-01-06	80%	0.35%	9998-01-06	3.50%	0.35%	
9998-01-06	90%	0.35%	9998-01-06	3.50%	0.35%	

- ## 가정 및 참고사항
- 농축공정의 산출물을 아래와 같이 세 가지로 구분
 - 무기개발용 고농축 우라늄(90%)
 - 연구용 원자로 연료(20-80%)
 - 경수로 연료(4-5%)
 - 감손우라늄의 농축도도 추가적인 입력변수로 가정(초기값: 0.35%)
 - 농축공장이 건설되었던 2010년 11월 부터 무기생산용 고농축 우라늄을 꾸준히 생산하는 것을 가정
 - 다만, 원자로 연료를 우선생산 후 남는 용량만큼을 고농축 우라늄 생산에 투입함을 가정

Fuel Assembly



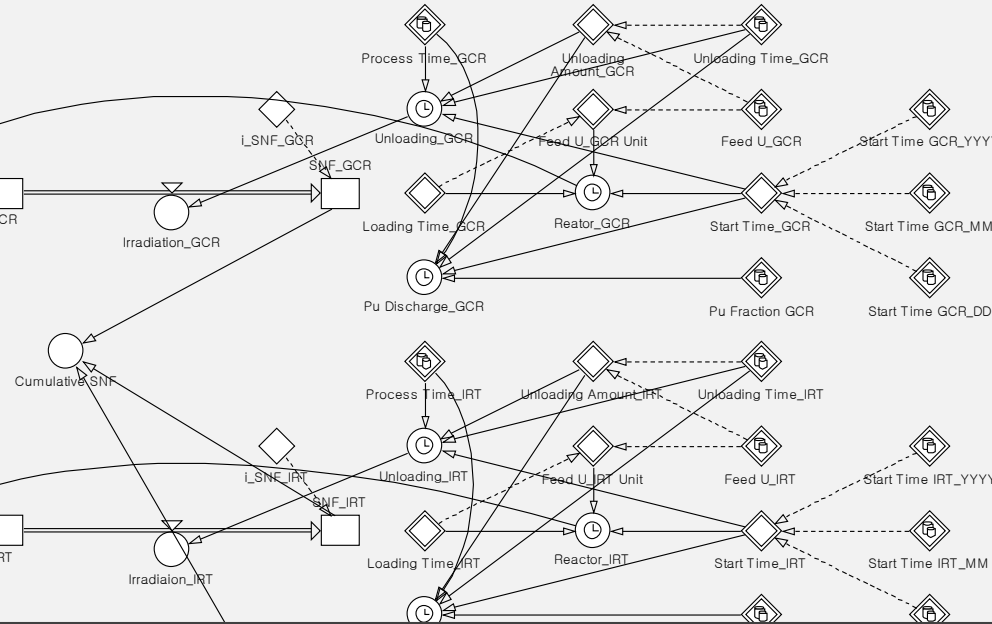
- ### 가정 및 참고사항
- 흑연로용 핵연료 제조는 변환공정 생성물인 금속우리늄으로부터 연결됨
 - 연구용 원자로, 경수로의 경우 농축 공정 생성물인 농축우리늄으로부터 연결됨
 - 핵연료 제조 공정 역시 원자로 가동 이력에 따라 공정이 수행됨을 가정
 - 공정에서 발생하는 폐기물은 한 곳에 축적시키는 것으로 가정
 - 공정 소요 시간은 2개월을 가정

Spent Nuclear Fuel

가동기간 (year)	재처리시기 (year)	평균연소도 (MWD/tHM)	전문기관추정치(kg)			
			ISIS	CISAC	IPFM	KINAC
1986-1989	1990	NA	1-8	1-76	NA	27-28
1989-1994	2003	600-700	27-29	25	263-302	
2003-2005	2005	220-320	135-17	12	101-145	14-19
2005-2007	2009	210-300	6-7	8	97-136	8-16
총계			48-61	46-58	46-58	50±5

가동기간 (year)	열출력 (MWh)	우리농축도 (%)	초기우리농축도 장전량(kg)	사용후핵연료 발생량(tU/y)	플루토늄 생산량(kg/y)
1965 ~ 1973	2	10	10	0.005	0.024
1974 ~ 1986	4	36			
1987 ~ 2008	8	80			

열출력 (MWh/t)	전기출력 (MWe)	핵연료 유형	농축도 (%)	핵연료 장전량 (tU)	플루토늄 생산량 (kg)
100	25 ~ 30	UO2	2.2 ~ 4 (평균 3.5)	4	15



가정 및 참고사항

- 2011년에 KINAC에서 발간한 "북한의 핵 프로그램과 검증"이라는 연구보고서에 포함된 정보를 활용 (2010년 까지의 북핵 현황)
- 2007년 6자회담 합의를 통한 "단계적 비핵화 조치"를 바탕으로 냉각탑을 파괴하는 등 핵프로그램의 불능화 실시
- 이후 2013년에 '경제건설과 핵무력 건설 병진 노선'을 채택하면서 영변 핵시설의 복구 및 재가동 징후 포착
- 위성영상 분석을 통해 2013년, 2016년에 각각 원자로가 가동되었음을 확인
- 연소도와 가동기간을 고려하여 생산되는 Pu의 양을 일정한 비율로 단순화하여 연산
- 연구용 원자로는 필요시에만 가동하는 원전이지만 해당 기간 동안 지속적으로 가동함을 가정
- 경수로로는 가동된 이력은 없지만 향후 가동의 가능성을 고려하여 모델링에 포함시킴

6.242 kg/rod

GCR

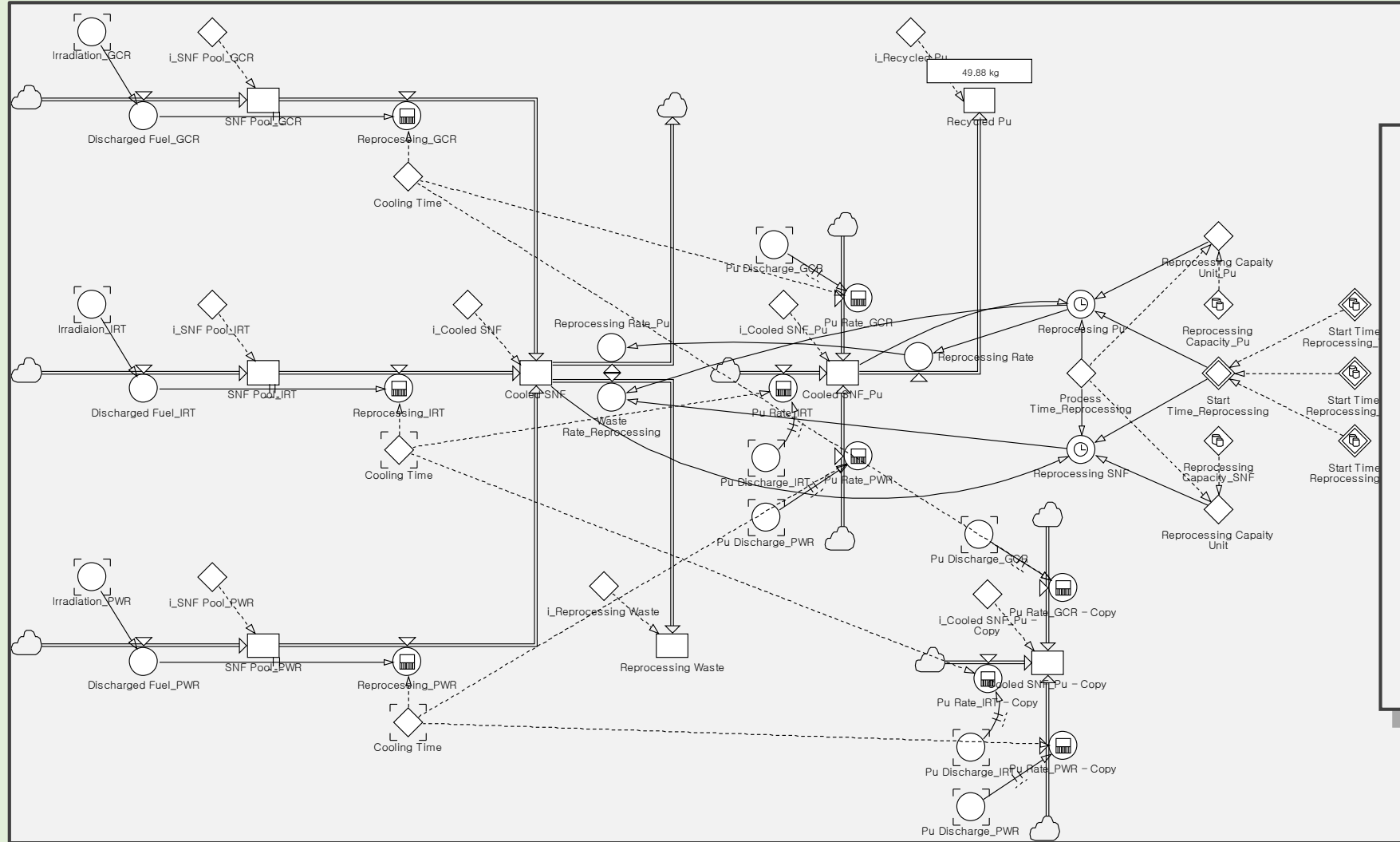
IRT-2000

PWR

Start	End	rod	Capacity(kg/#)	Pu(g/rod)	Pu(kg)	Pu f	Unloading(da)	Start	End	U Need%	Capacity(kg/#)	Pu(kg/y)	Start	End	Capacity(MTU/#)	Pu(kg/#)
1986-01-05	1989-03-28	8120	50685.04	1.09	8.87	0.00017	45	1965-01-01	1973-01-01	10%	10	0.024	2022-01-01	2023-06-10	4	15
1989-05-12	1994-04-10	8120	50685.04	2.05	16.61	0.00033	45	1974-01-01	1986-01-01	36%	10	0.024	9999-01-01	9999-12-31	4	15
2003-02-23	2005-03-31	8120	50685.04	1.39	11.32	0.00022	45	1987-01-01	2008-01-01	80%	10	0.024	9999-01-01	9999-12-31	4	15
2005-06-16	2007-07-14	8120	50685.04	0.95	7.73	0.00015	45	2013-01-01	2021-01-01	80%	10	0.024	9999-01-01	9999-12-31	4	15
2013-08-31	2015-10-20	8120	50685.04	1.17	9.52	0.00019	45	9999-01-01	9999-12-31	80%	10	0.024	9999-01-01	9999-12-31	4	15
2016-09-30	2018-11-20	8120	50685.04	1.17	9.52	0.00019	45	9999-01-01	9999-12-31	80%	10	0.024	9999-01-01	9999-12-31	4	15
9999-01-01	9999-12-31	8120	50685.04	1.17	9.52	0.00019	45	9999-01-01	9999-12-31	80%	10	0.024	9999-01-01	9999-12-31	4	15
9999-01-01	9999-12-31	8120	50685.04	1.17	9.52	0.00019	45	9999-01-01	9999-12-31	80%	10	0.024	9999-01-01	9999-12-31	4	15
9999-01-01	9999-12-31	8120	50685.04	1.17	9.52	0.00019	45	9999-01-01	9999-12-31	80%	10	0.024	9999-01-01	9999-12-31	4	15
9999-01-01	9999-12-31	8120	50685.04	1.17	9.52	0.00019	45	9999-01-01	9999-12-31	80%	10	0.024	9999-01-01	9999-12-31	4	15

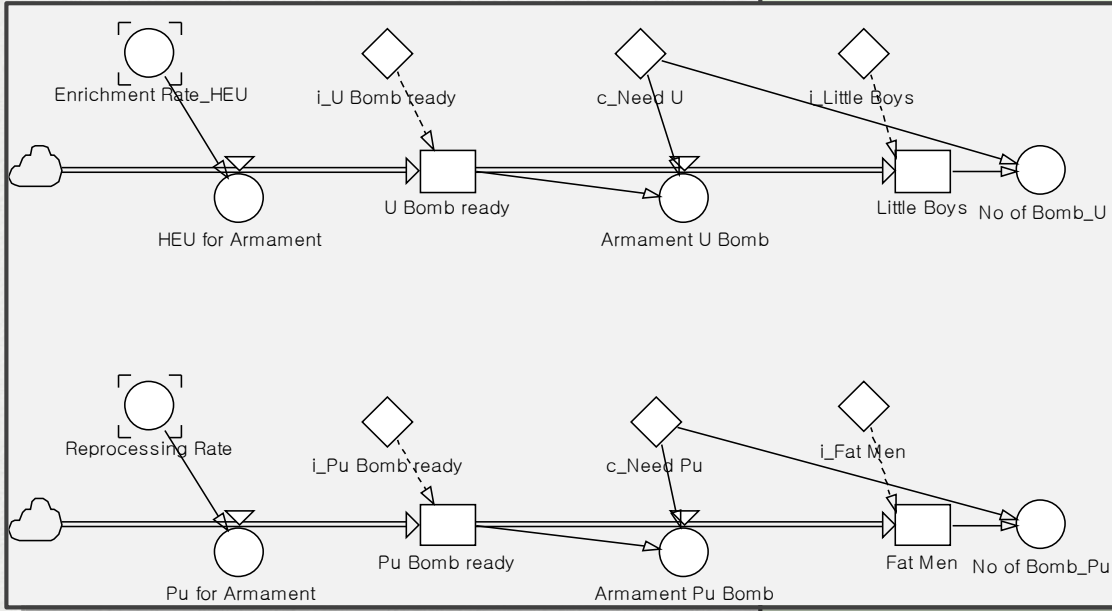
- 출처 : 이정현, 박일진, 안진수. (2011). 북한의 핵 프로그램과 검증. 한국원자력통제기술원: KINAC/TR-008/2011(B0-9120),
 - 출처 : 이영욱 외. (2019). 2018 북핵총서. 한국원자력통제기술원: KINAC/GP-001/2019(B8-8130).

Recycled Nuclear Fuel



- ### 가정 및 참고사항
- 2019 북핵총서에 따르면 1990년 초, 2003년, 2005년, 2009년, 2016년에 각각 재처리가 이루어졌음을 추정하고 있음
 - 재처리 공정은 1회 공정 수행에 4개월이 소요됨을 가정
 - 원자로의 유형 및 연소도 등에 따라 발생하는 플루토늄의 양이 제각각이지만 일반화된 공정 모델링을 위하여 플루토늄 생성 비율을 특정값으로 지정하여 모델링 수행
 - 다만 해당 생성 비율을 입력변수로 지정하여 향후 변경 가능하도록 설계하였으며, 기본값으로서 기존 연구에서 제시하고 있는 플루토늄 생산량과 유사한 생산비율을 입력함

Armament of Nuclear Bomb

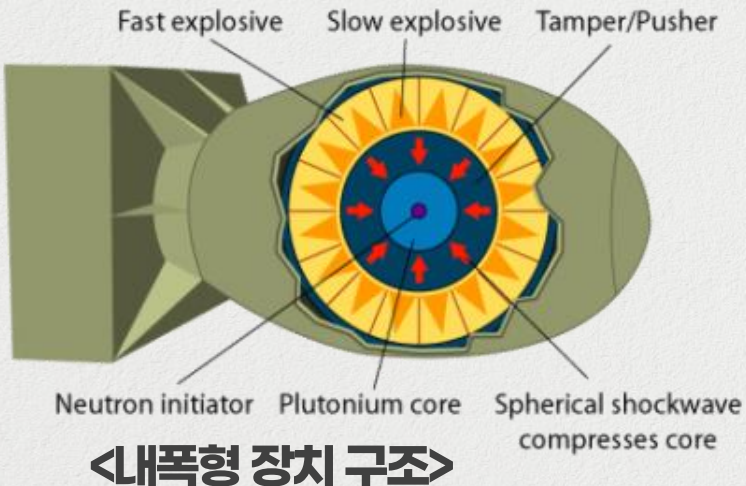


다양한 농축도와 반사체 효과에 따른 U-235의 임계질량

Enriched Uranium (%U-235)	Critical Mass(kg)		
	None	Natural Uranium(10cm)	Beryllium(10cm)
93.5	48.0	18.4	14.1
90.0	53.8	20.8	15.5
80.0	68.0	26.5	19.3
70.0	86.0	33.0	24.1
60.0	120.0	45.0	32.0
50.0	170.0	65.0	45.0
40.0	250.0	100.0	70.0
30.0	440.0	190.0	130.0
20.0	800.0	370.0	245.0

다양한 농축도와 반사체 효과에 따른 Pu-239의 임계질량

Isotopic Composition of Pu(atomic %)		Critical Mass(kg)	
Pu-239	Pu-240	None	Natural Uranium(10cm)
100	0	10.5	4.4
90	10	11.5	4.8
80	20	12.6	5.4
70	30	13.9	6.1
60	40	15.4	7.0
50	50	17.2	8.0
40	60	20.0	9.2
20	80	28.4	13.0
0	100	40.0	20.0



● 생산된 U-235
20.8kg 달성 시
핵무기 1기 생산

● 생산된 Pu-239
4.8kg 달성 시
핵무기 1기 생산

서론

활용 방법론

SD 모델링

평가 결과 및 고찰

주요 시사점 및
기대효과

Q&A



**우라늄 채광 관련
모델 검증**

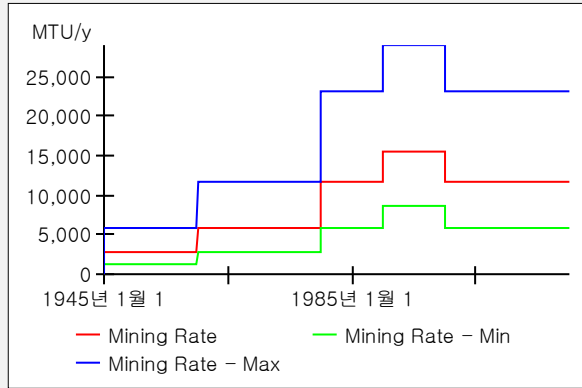


**원자로 가동 관련
모델 검증**

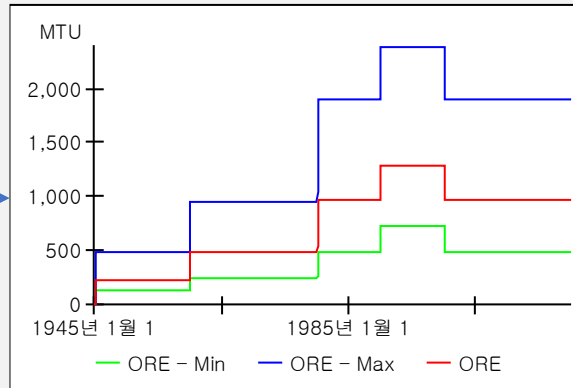


**핵무기 제조
능력 검증**

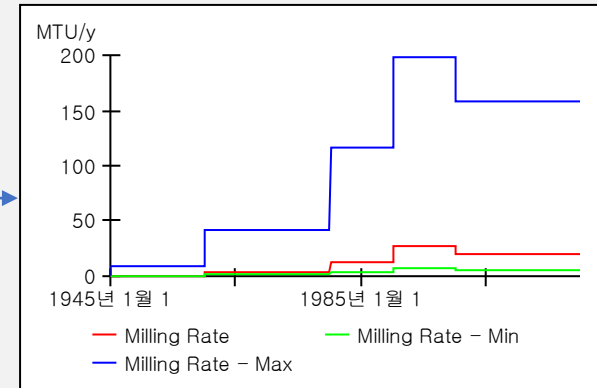
시뮬레이션 결과 - 1



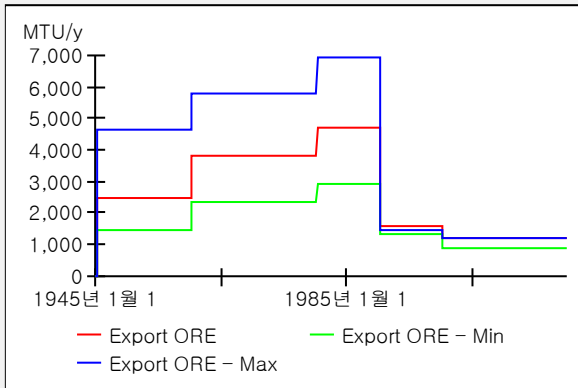
● Mining Rate(Min-Central-Max)



● ORE Inventories(Min-Central-Max)



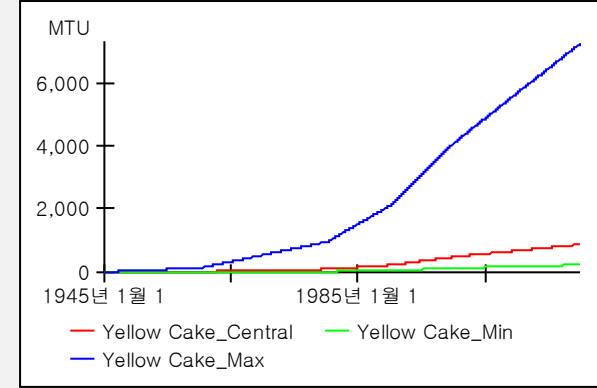
● Milling Rate(Min-Central-Max)



● Export Rate(Min-Central-Max)

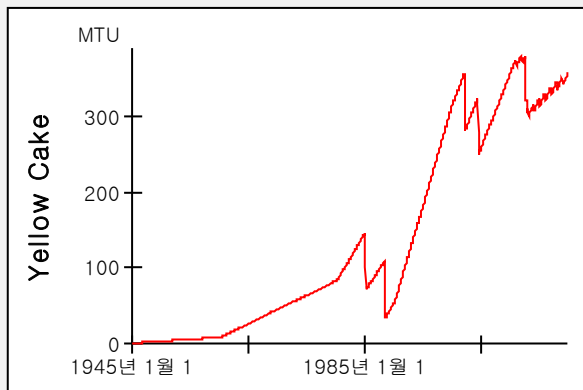
원광으로부터 추정된 정광의 양(연산 결과 비교)

Scenario		Min	Central	Max	
Von Hippel 연산결과		정광 누적생산량(t)	213.45	834.72	6,969.74
System Dynamics Model 연산결과	공정 시간 미반영	정광 누적생산량(t)	212.31	830.38	6,969.812
		오차(%)	0.53	0.52	0.50
System Dynamics Model 연산결과	공정 시간 반영	정광 누적생산량(t)	213.45	834.71	6,969.82
		오차(%)	0	0	0

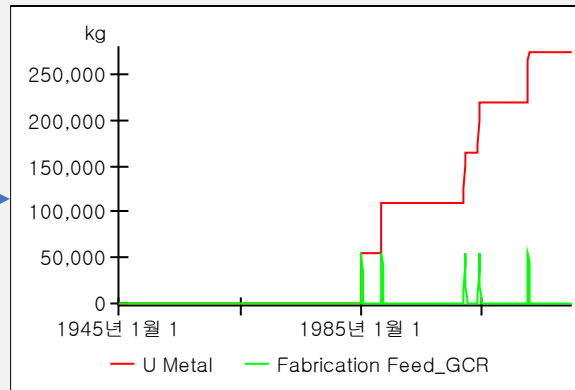


● Yellow Cake Inventories(Min-Central-Max)

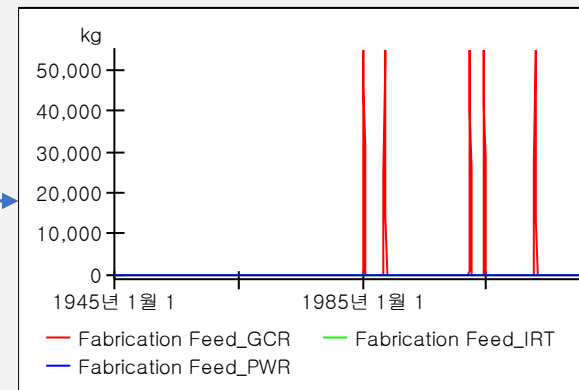
시뮬레이션 결과 - 2



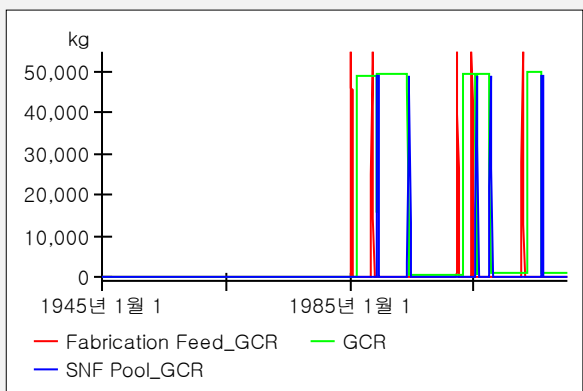
● Yellow Cake (Central)



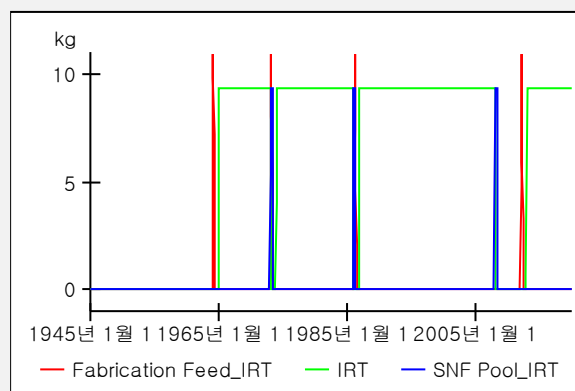
● Conversion for GCR (Central)



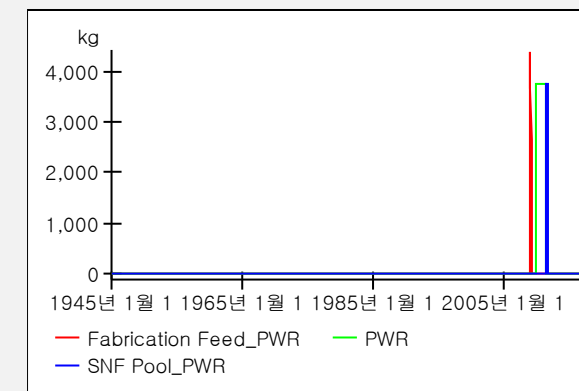
● Fuel Assemblies (Central)



● 흑연로 관련 핵물질 흐름



● 연구로 관련 핵물질 흐름



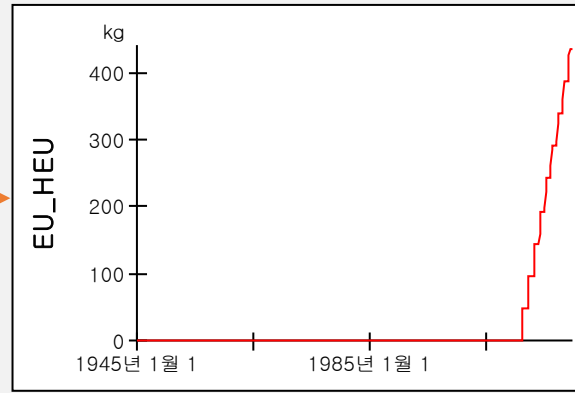
● 경수로 관련 핵물질 흐름 (가상)

시뮬레이션 결과 - 3

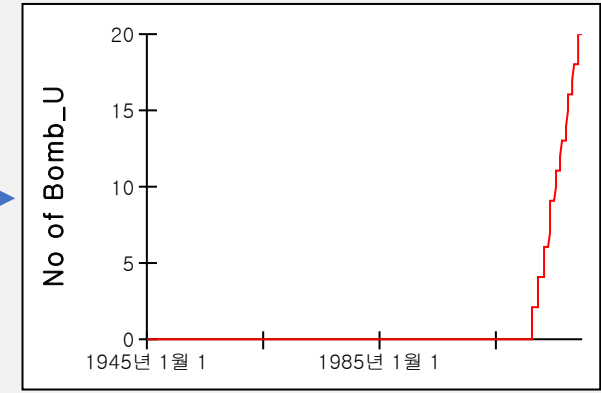
핵물질 생산량 추정

Enrichment Process

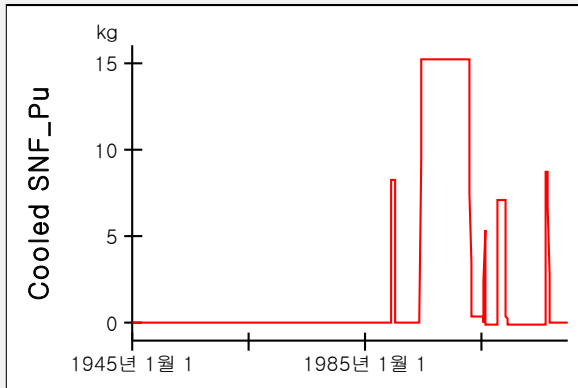
구분	고농축우라늄(kg)	플루토늄(kg)
추정량(Vitaly)	180~850	52
추정량(Yonhong)	435.03	49.88
	+44 kg/y	+8~10 kg/y (최적 조건)



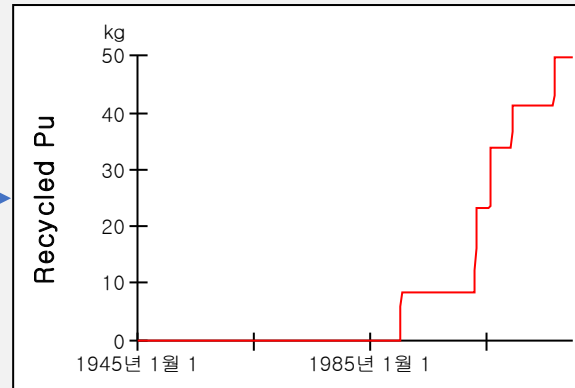
● Production of HEU (Central)



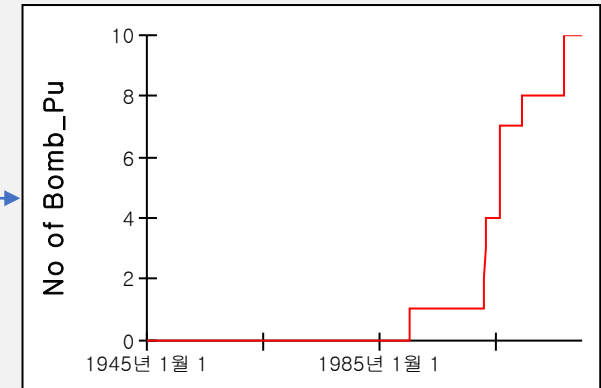
● NW Capabilities (HEU)



● Cooled SNF_Pu (Central)



● Production of Pu (Central)



● NW Capabilities (Pu)

주요 시사점 및 기대효과 - 1

○ 핵물질 생산량 추정을 위한 시스템 다이내믹스 모델 개발

- 핵주기 공정별(채광-정련-변환-농축-연소-재처리) 일방향적인 물질흐름 도출
- 다양한 원자로 유형을 가정하여 다차원적인 접근을 시도
- Excel Spread Sheet를 통해 외부입력변수를 연동할 수 있는 확장성 고려

○ 시뮬레이션 결과 및 분석

- 핵물질의 흐름이 시간의 흐름과 일치하여 변화함을 확인
- 공정별 소요 시간 및 원자로 가동 전후로 최적의 일정에 따라 핵물질 생산량이 변화함을 확인
- 정광 생산 전후로 다른 참조문헌을 활용함에 따라 정광이 누적되는 형태로 결과값 도출
- 원광으로부터 생산된 정광의 양에 대한 연산 결과, 참조문헌의 값과 매우 유사한 결과값을 도출
- 비록 많은 가정이 포함되어 있지만 알려져 있는 정보를 바탕으로 추정된 핵물질량이 타 연구에서의 결과값과 유사한 범위에 포함됨을 확인

주요 시사점 및 기대효과 - 2

○ 개선요구사항

- 개별 시설에서의 공정 정보를 가동이력, 시설용량 정도의 제한적 정보를 통해 모델링하여 개별 시설에 대한 구체적인 모델링 개발이 필요함
- 특히, 원자로의 연소에 따른 핵물질 인벤토리 변화를 추정할 수 있는 노심해석 모델이 별도로 필요
- 실제로 획득 가능한 정보의 수준을 미리 파악하여 입력변수에 해당 정보를 모두 입력 가능하도록 입력 변수의 세분화 필요
- 확인된 정보가 아닌 많은 가정을 통해 도출한 결과로서 입력변수 자체에 대한 신뢰성 검증이 필요
- 주요 입력변수를 도출하기 위한 민감도 및 불확도에 대한 부가적인 평가가 필요
- 플루토늄의 경우, 원자로 및 재처리 시설의 가동 여부를 확인하여 보다 구체적으로 추정이 가능하지만 고농축우라늄의 경우, 농축 시설의 가동만이 생산량에 영향을 줄 수 있으며, 실제 시설의 가동 여부를 확인하기 어렵고 추가적인 은닉 시설의 존재여부도 확인하기 어렵기 때문에 보다 현실적인 제한이 필요 (정치, 외교적 상황 고려)

○ 시사점 및 기대효과

- 비핵화 검증에 필요한 핵물질 생산능력 예측을 위한 물질수지 조감도의 뼈대를 구축
- 확장성을 고려한 모델링을 통해 검증 데이터 연동 및 세부 공정 모델과의 연계에 유용성을 제공
- 직관적인 입·출력 변수 활용을 통해 신진연구자의 진입장벽을 낮춤



Q&A

감사합니다