

시스템 다이내믹스 방법론을 활용한 사용후핵연료 발생량 추정 연구

정연홍*, 정승호

*한국원자력통제기술원, *jyh1404@kinac.re.kr

I. 연구개요 및 배경

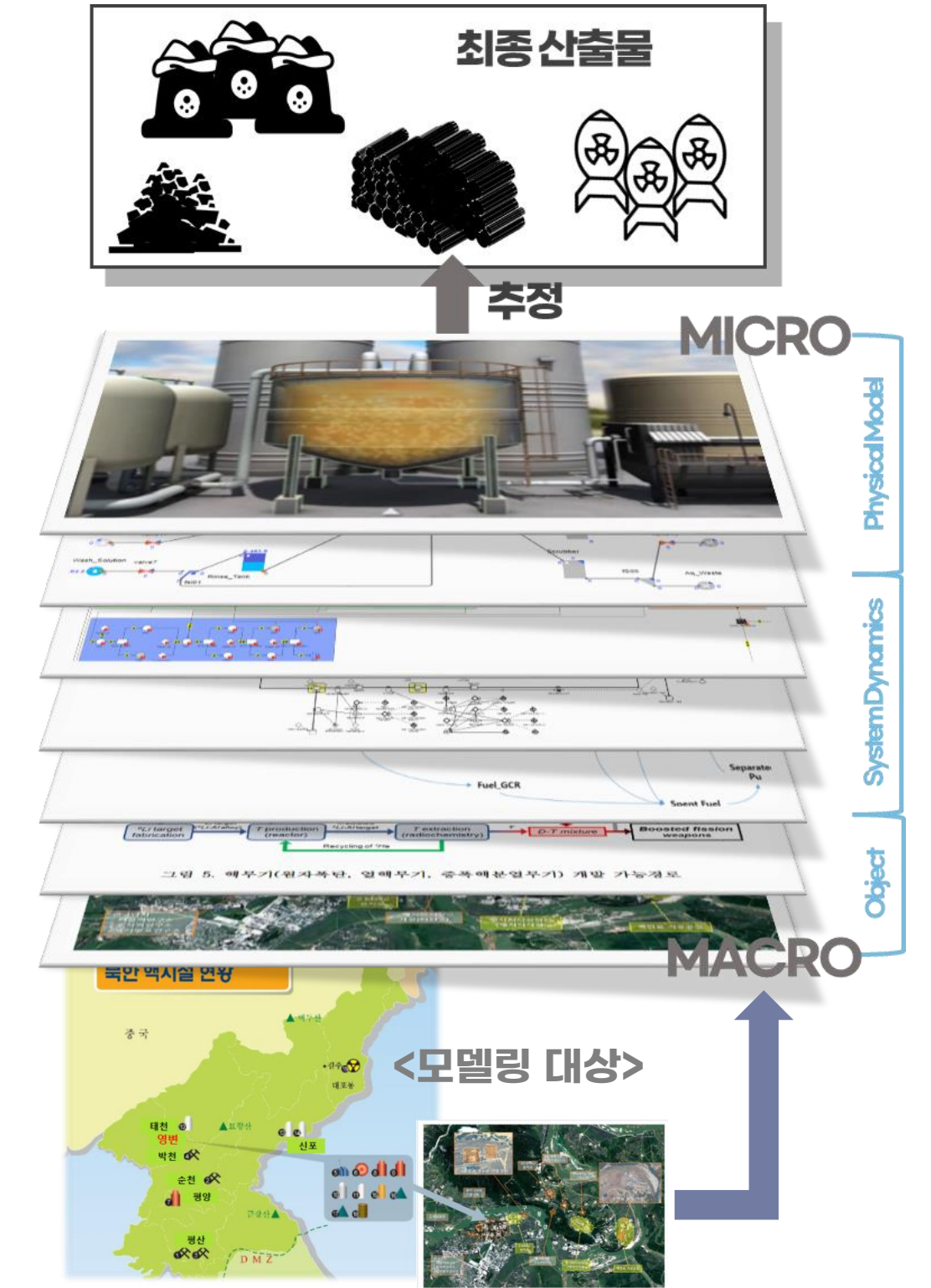
연구배경

- 한반도 평화 정착을 위해서는 북한의 비핵화가 필수적임
- 이러한 노력의 일환으로 '판문점 선언'에서 남북관계의 발전과 한반도 비핵화를 약속함
- 비핵화 추진단계(신고 및 검증)



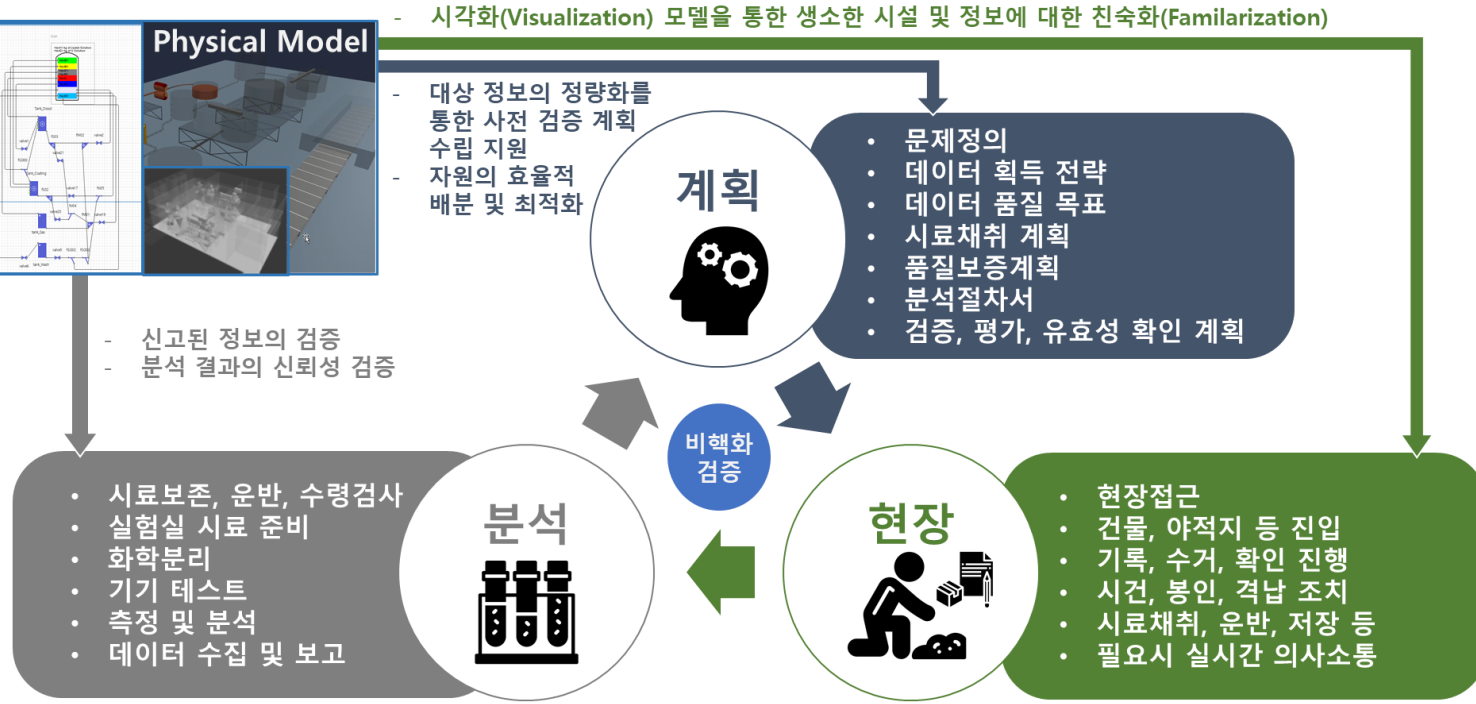
- 비핵화 검증 (신고된 정보에 대한 검증)**
- 장부검사, 신고내용과 실제 운영기록의 일치 여부 검증
- 세계정보 검증: 보유 시설 신고 사항에 대해 가능한 모든 정보를 통해 검증(서류/현장)
- 계량분석보고 검증: 핵물질 생산/사용/보유 등 중립적인 성과 물질을 확인
- 비핵화 검증: 핵물질 및 핵시설의 적외선 영상 등 신고내용 검증
- 시료분석(중성자 및 환경시료)
- 공정시료의 중립분석을 통해 신고내용의 정확성 검증
- 환경시료 분석을 통해 신고내용의 정확성 검증

KINAC Physical Model의 개념 (이하 KINAC PM)



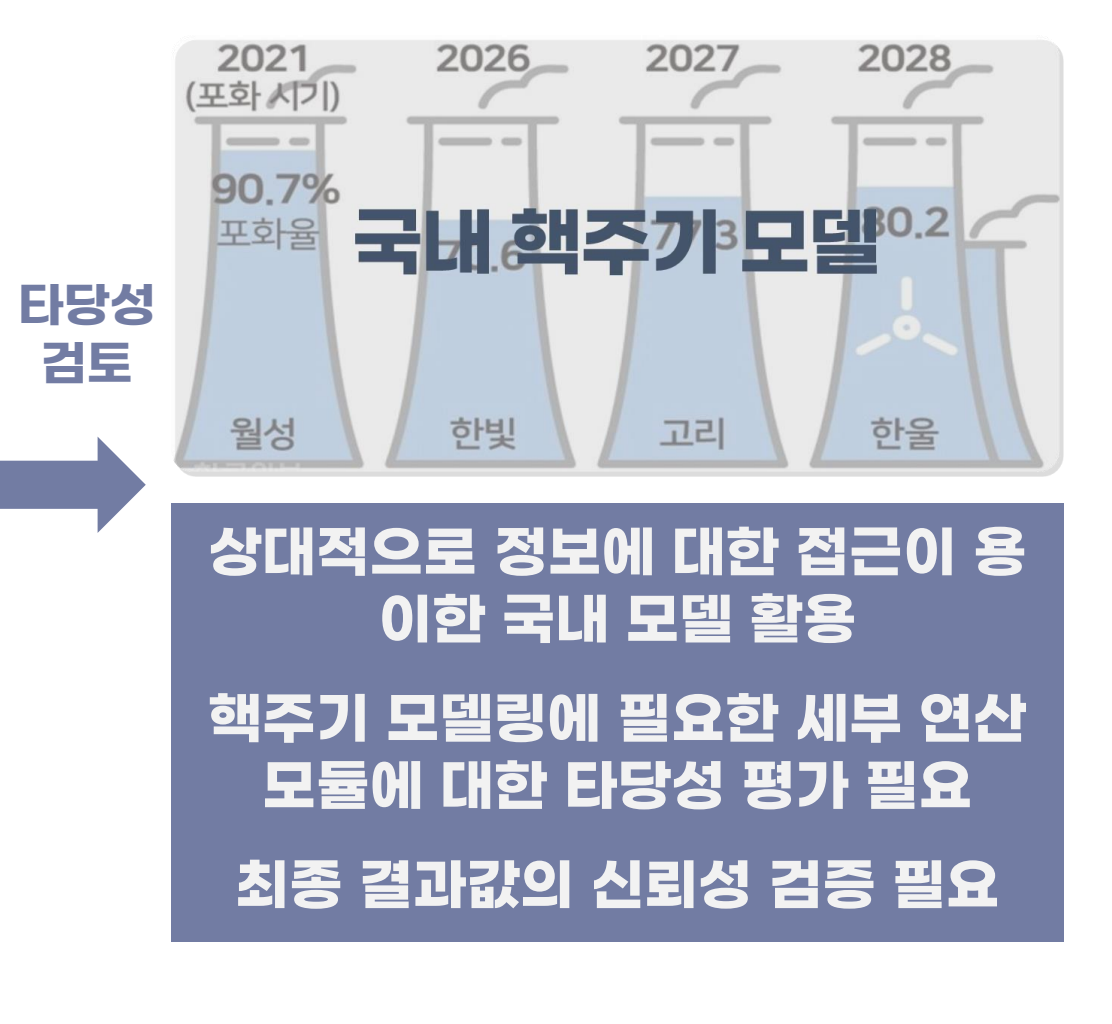
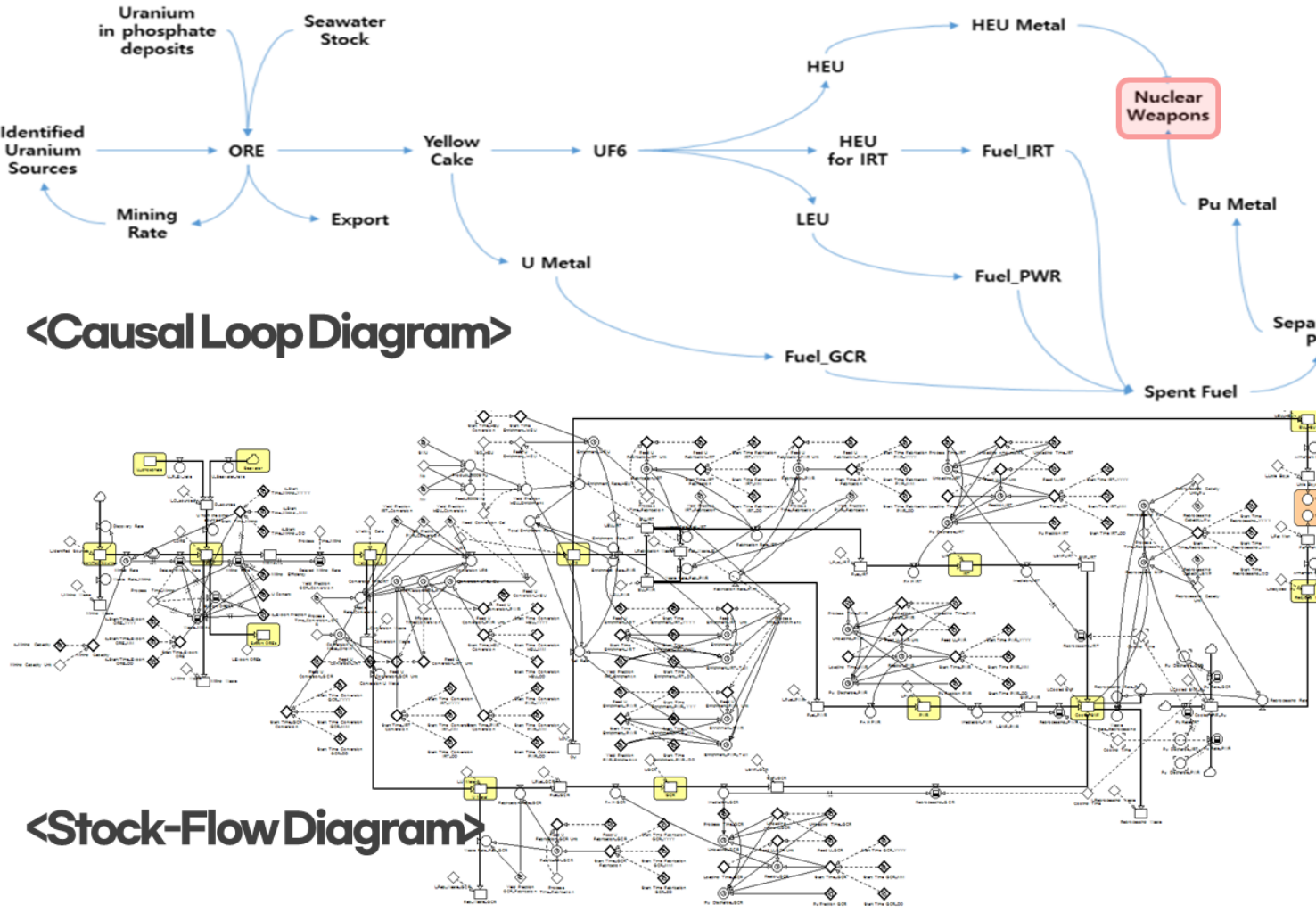
KINAC PM은 핵주기 전반에 대한 거시적 모델부터 세부 시설에 대한 미시적 모델까지 다층 구조로 구성됨

- 실질적인 비핵화 검증을 위해서는 다양한 기술적 준비가 필요함
- Physical Model은 비핵화 검증의 계획단계부터 현장검증, 시료분석의 모든 단계에서 기준 데이터를 제공하여 검증의 신뢰성과 완결성을 제고할 수 있음



연구목적

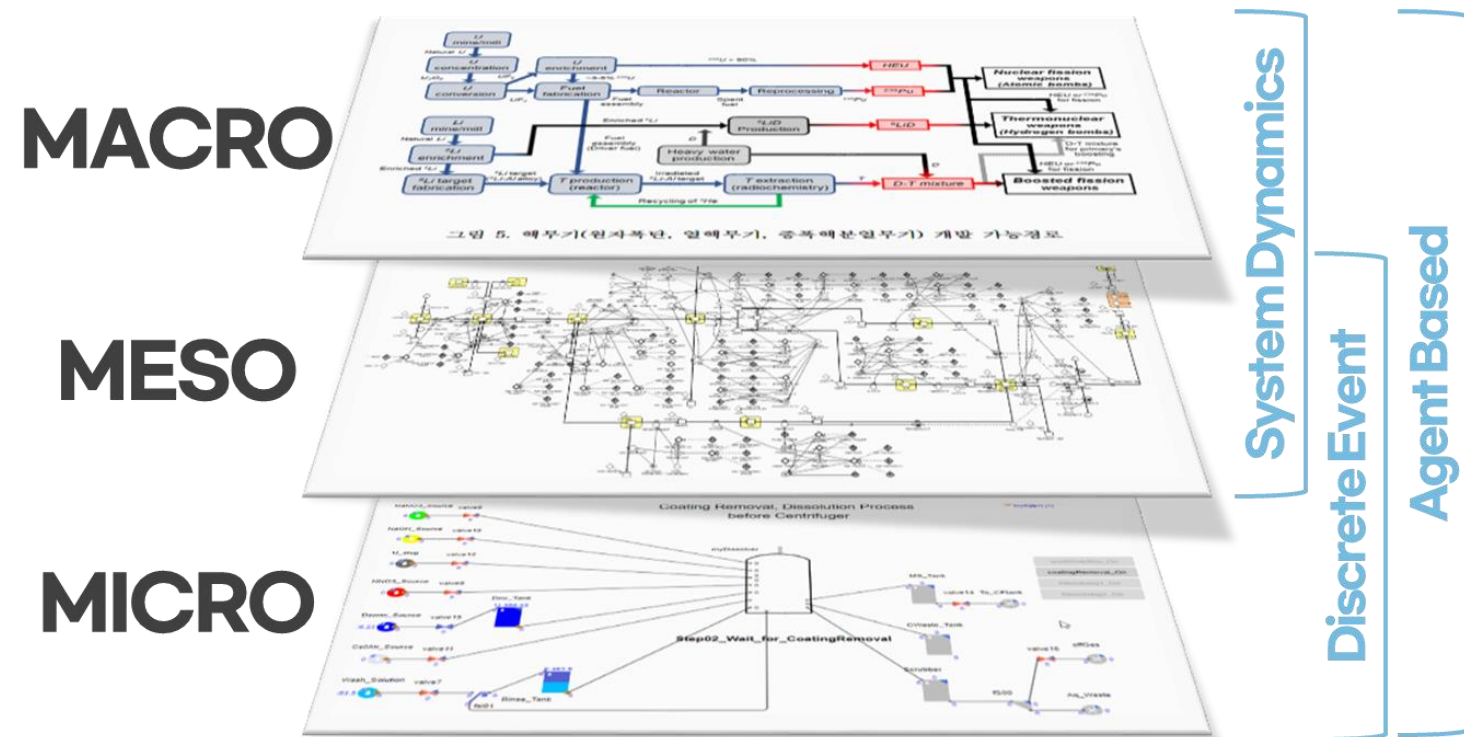
- 핵주기 전반에 대한 거시적 모델은 시계열에 따른 변화량을 모사하기에 유용한 시스템 다이내믹스 방법론을 통한 모델 개발
- 해당 방법론의 적용에 대한 타당성 평가를 위하여 상대적으로 정보를 획득하기 용이한 국내 핵주기를 간단한 시스템 다이내믹스 모델로 구성하여 핵주기 모델에 필요한 세부 연산 모듈이나 결과값의 타당성을 평가해보고자 함



2. 세부 모델링

모델링 방법론

- KINAC PM은 핵주기 관련 시설의 세부 공정을 모사하는 미시적인 모델부터 핵주기 전반의 핵물질 흐름을 추정하는 거시적인 모델까지 하나의 플랫폼에 구축하는 것이 그 목적임
- 이에 따라, 공장이나 물류 시스템 모사에 용이한 Discrete Event 모델링 방법론을 통해 세부 시설을 모델링하며, 시계열에 따른 거동을 분석하기에 용이한 System Dynamics 방법론을 적용하여 전반적인 핵주기에서의 물질 흐름을 분석하고자 함



System Dynamics

시스템 다이내믹스의 출발

"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)

시스템 다이내믹스 방법론

시스템 다이내믹스는 구조가 행태를 결정한다는 세계관에 기초함
여기에서 구조(structure)란 피드백 루프(feedback loops)를 의미
행태(behavior)란 동태적 행태유형(dynamic pattern of behavior)을 의미

Causal Loop Diagram

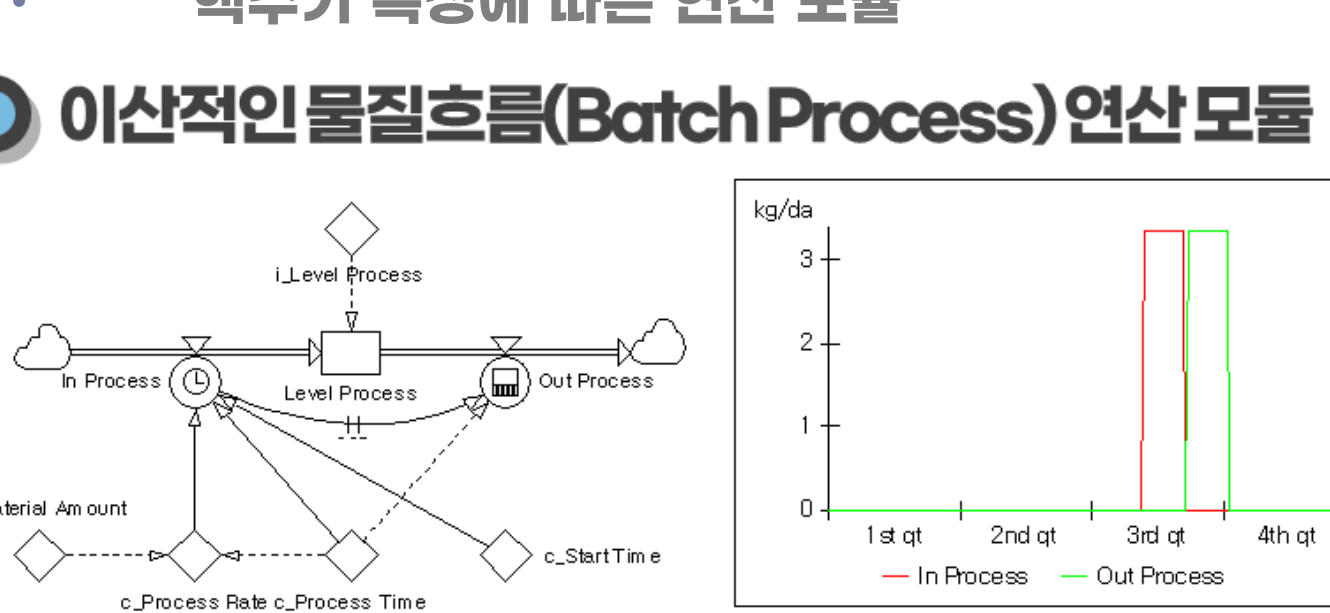


가정 및 참고사항

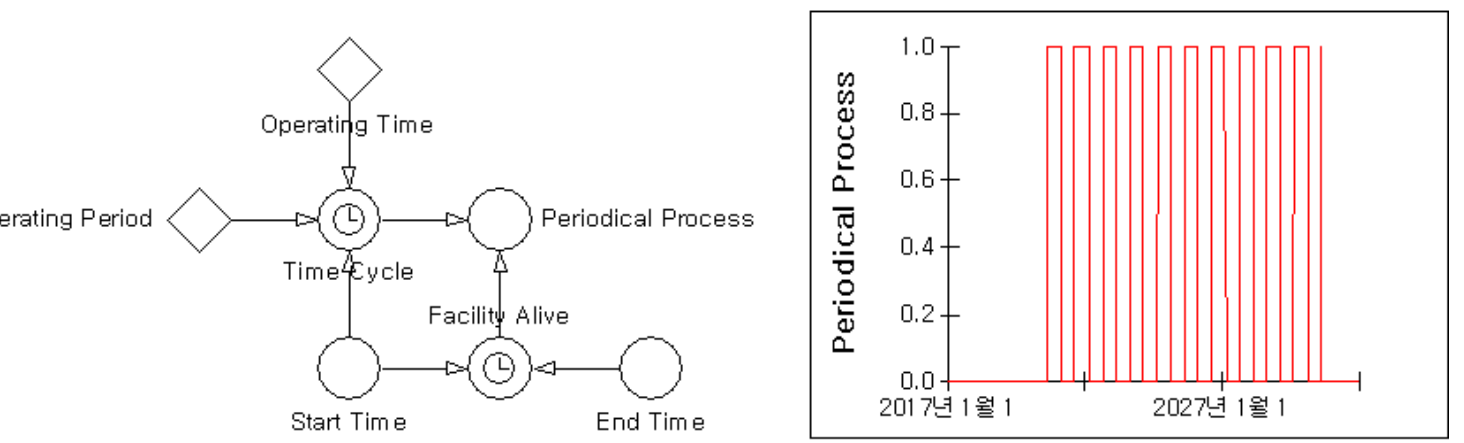
- 채광, 정광, 변환, 농축까지의 공정은 존재하지 않음
- 상기의 핵주기는 해외수입(Oversea)으로 대체
- 성형기공에 소요되는 시간은 5달로 가정
- PWR은 22기, CANDU는 4기, 총 26기의 원전을 가정 (Array로 농축량 정보 입력)
- 원자로는 일정한 주기(18개월)를 바탕으로 정상 운영현황을 가정
- PWR의 사용후핵연료는 사용후핵연료 저장조에 저장 후 30년 뒤 최종처분 가정
- CANDU의 사용후핵연료는 6년간 사용후핵연료 저장조에 저장 후 건조저장시설로 이송
- 건조저장시설에서는 30년 뒤 최종처분 가정
- 사용후핵연료의 양은 정전후 핵연료의 양과 동일하다고 가정

핵주기 특성에 따른 연산 모듈

이산적인 물질흐름(Batch Process) 연산 모듈



주기적인 기동 모듈



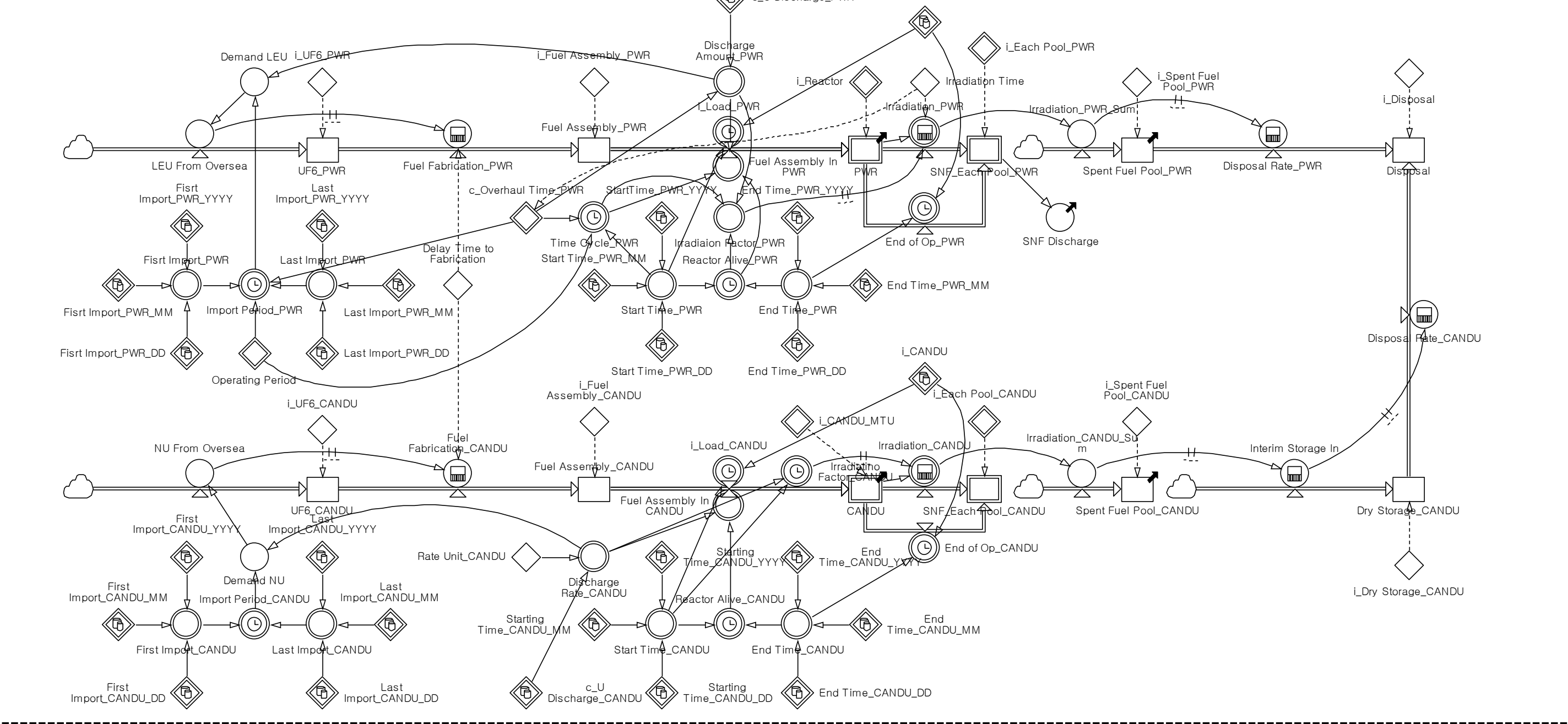
Stock-Flow Diagram

입력 데이터(엑셀을 통한 원자로 관련 정보 입력)

데이터 입력을 위한 엑셀 시트

호기	시업연월	연구종지	설계수명(연)	연료명칭	U 무게(ton/호기)	장전주기(mon)	호기	시업연월	연구종지	설계수명(연)	연료명칭	U 무게(ton/호기)	U 무게(kg/day)	장전주기
Kori_1	1978-04-29	2017-06-19	40	16ACE7	43.3	18	Wolsung_1	1983-04-22	2019-12-24	40	CANDU6	95	260.3	20개/day
Kori_2	1983-07-25	2023-07-15	40	16ACE7	49.8	18	Wolsung_2	1997-07-01	2037-06-21	40	CANDU6	98	268.5	20개/day
Kori_3	1983-09-30	2023-09-20	40	17ACE7	72.5	18	Wolsung_3	1999-07-01	2039-06-21	40	CANDU6	98	268.5	20개/day
Kori_4	1986-04-29	2026-04-19	40	17ACE7	72.5	18	Wolsung_4	1999-10-01	2039-09-21	40	CANDU6	98	268.5	20개/day
New_Kori_1	2011-02-28	2051-02-18	40	PLUST7	76	18								
New_Kori_2	2012-07-20	2052-07-10	40	PLUST7	76	18								
New_Kori_3	2016-12-20	2076-12-05	60	PLUST7	103	18								
New_Kori_4	2019-08-29	2079-08-14	60	PLUST7	103	18								
Hambit_1	1986-08-25	2026-08-15	40	17ACE7	72.5	18								
Hambit_2	1987-06-10	2027-05-31	40	17ACE7	72.5	18								
Hambit_3	1995-03-31	2035-03-21	40	PLUST7	76	18								
Hambit_4	1996-01-01	2035-12-22	40	PLUST7	76	18								
Hambit_5	2002-05-21	2042-05-11	40	PLUST7	76	18								
Hambit_6	2002-12-24	2042-12-14	40	PLUST7	76	18								
Hanul_1	1988-09-10	2028-08-31	40	17ACE7	72.5	18								
Hanul_2	1989-09-30	2029-09-20	40	17ACE7	72.5	18								
Hanul_3	1998-08-11	2038-08-01	40	PLUST7	76	18								
Hanul_4	1999-12-31	2039-12-21	40	PLUST7	76	18								
Hanul_5	2004-07-29	2044-07-19	40	PLUST7	76	18								
Hanul_6	2005-04-22	2045-04-12	40	PLUST7	76	18								
New_Wolsung_1	2012-07-31	2052-07-21	40	PLUST7	76	18								
New_Wolsung_2	2015-07-24	2055-07-14	40	PLUST7	76	18								

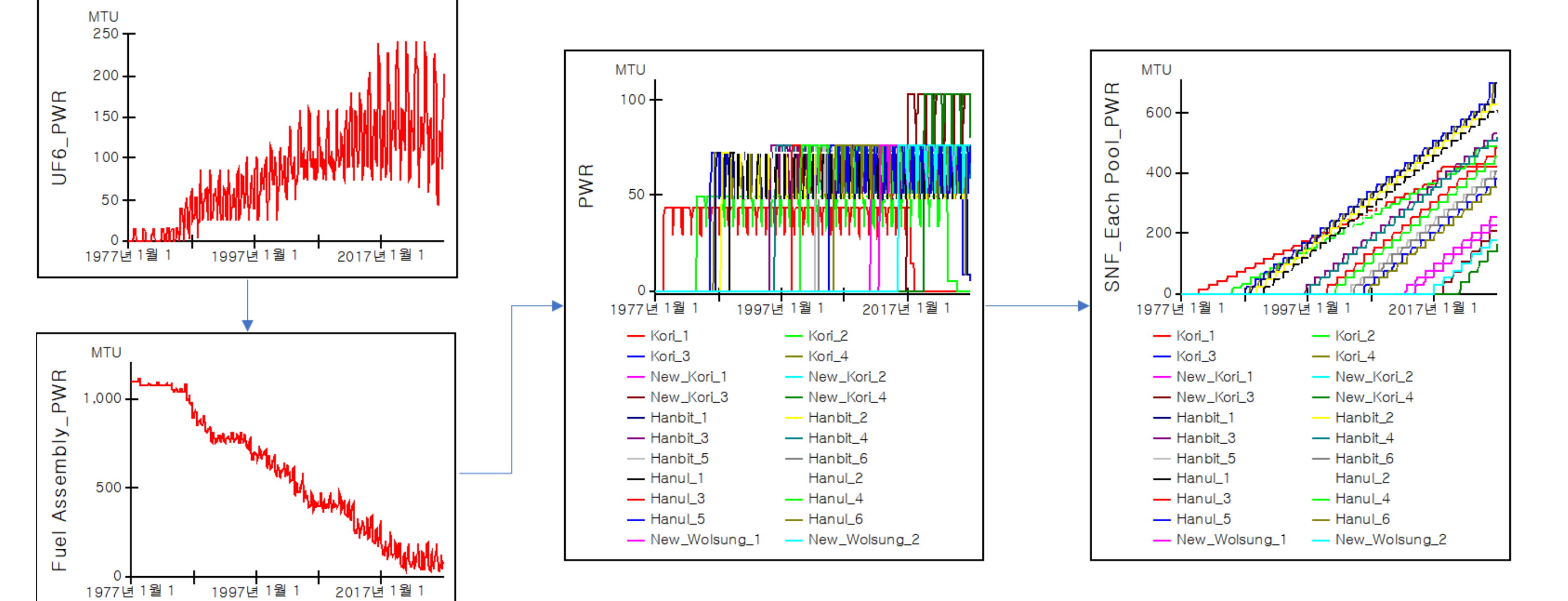
국내 핵연료 주기에 대한 Stock-Flow Diagram 작성



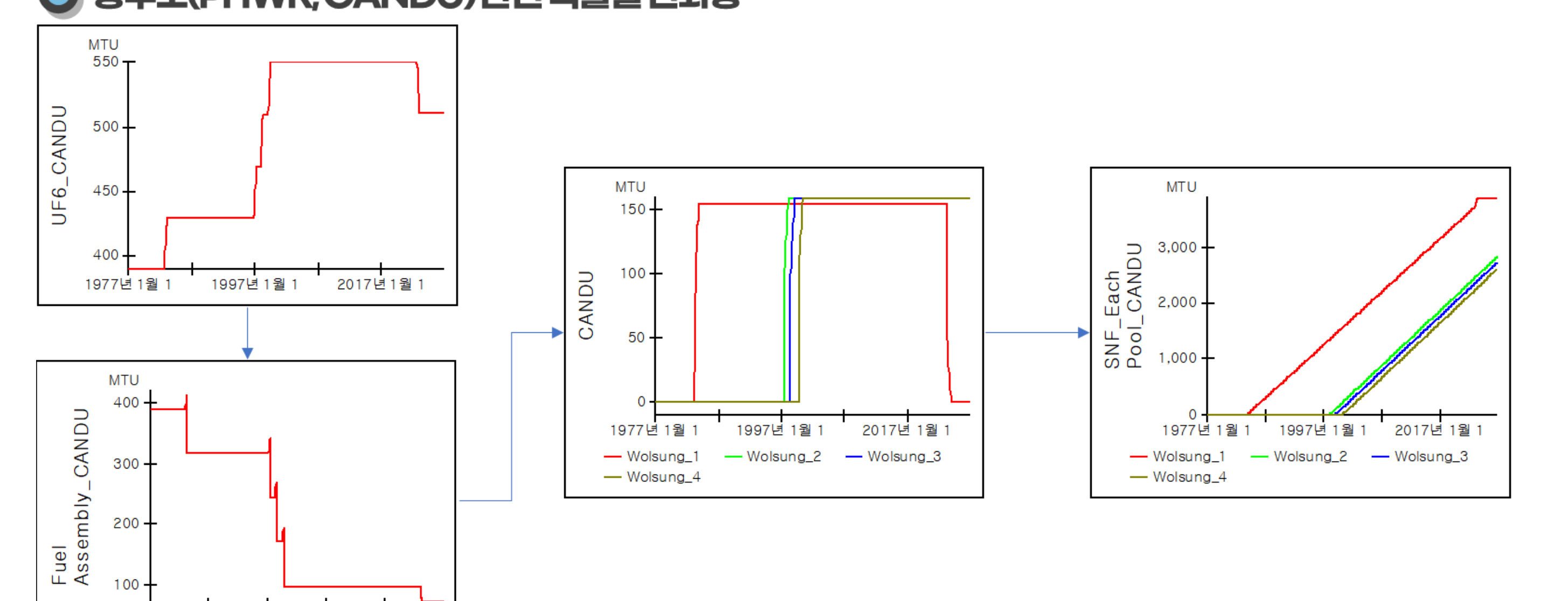
3. 결과 및 평가

연산결과

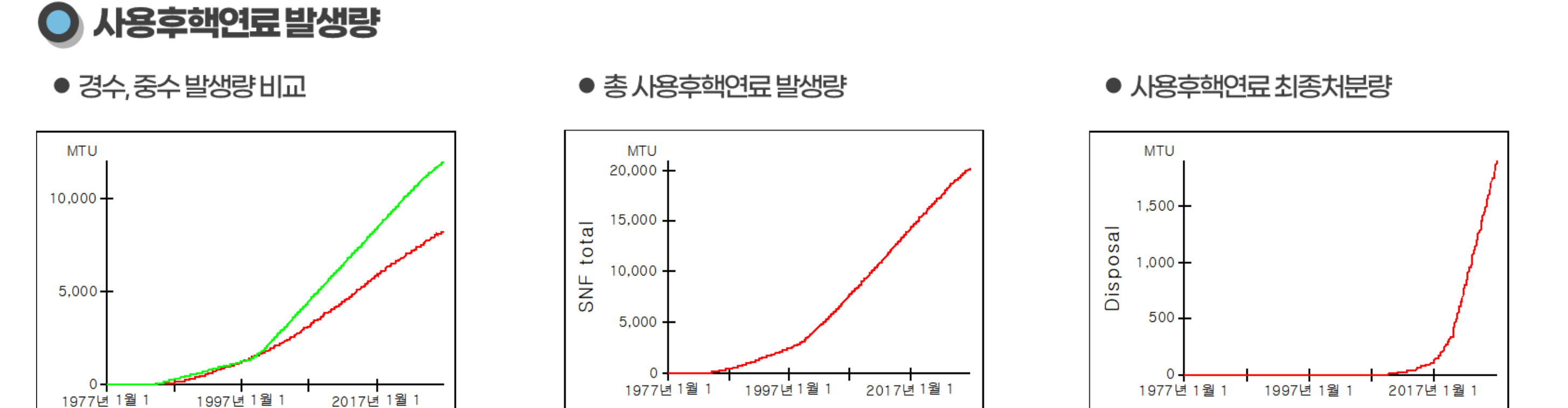
경수로(PWR) 관련 핵물질 변화량



중수로(PHWR, CANDU) 관련 핵물질 변화량



사용후핵연료 발생량



결과 평가

- 사용후핵연료 처리기술 연구개발사업 재검토위원회에서의 검증연구 결과에 따르면 2017년말을 기준으로 약 5,000톤 가량의 사용후핵연료가 발생됨
- 본 모델을 통한 연산결과 2017년말을 기준으로 15,030톤이라는 유사한 결과값을 도출함
- 하지만 모델링 과정에서 많은 가정과 추정을 활용함에 따라 보다 많은 오차를 예상함
- 실질적인 사용후핵연료 발생량을 확인하기 위하여 계량관리보고서(물자재고목록)의 데이터를 연계할 수 있도록 모델링 수정 필요
- 오차발생 요인의 개선 및 수정을 통해 실질적인 국내 사용후핵연료 발생량을 추정할 수 있는 모델 개발 가능하며 이를 바탕으로 사용후핵연료 중간저장시설 및 최종처분시설 등의 도입 시기 등 정책 결정을 위한 배경연구가 가능할 것

References

- [1] F.H.A. Rahim, N.N. Hawari and N.Z. Abidin, "Supply and demand of rice in Malaysia: A system dynamics approach", International Journal of Supply Chain and Management, Vol.6, No.4, pp. 234-240, 2017.
- [2] 한국수력원자력, 열린원전운영정보, 운영현황 및 실적(https://npp.khnp.co.kr/index.khnp?menuCd=DOM_000000102002001001)
- [3] 사용후핵연료 처리기술 연구개발사업 재검토위원회, "사용후핵연료 처리기술 연구개발사업 재검토위원회보고서", 2018