

2022 KNS 춘계학술발표회

# 원심분리 농축 공정의 이해 및 모델 개발

한국원자력통제기술원

발표자: 정연홍

2022-05-19





# Contents

- I. 연구배경
- II. 기본이론
- III. 모델개발
- IV. 결과 및 시사점

# 1. 연구배경

# 1.1. 비핵화 추진단계 - 신고 및 검증(이하 비핵화 검증)



## 비핵화 (핵물질 생산 프로그램의 동결과 핵시설 및 핵물질 폐기)

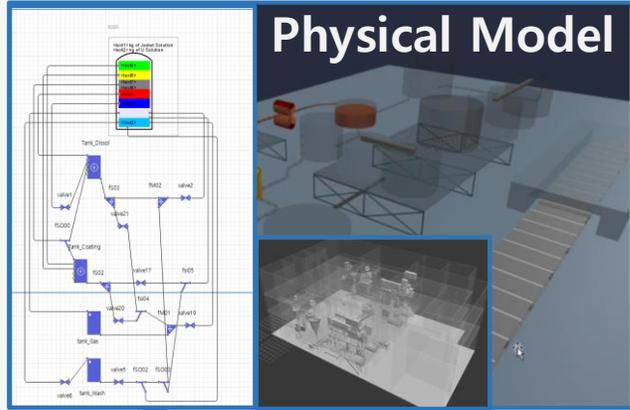


### 비핵화 검증 (신고된 정보에 대한 검증)

**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

# 1.2. 비핵화 검증에서의 Physical Model의 필요성



- 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

비핵화 검증

분석



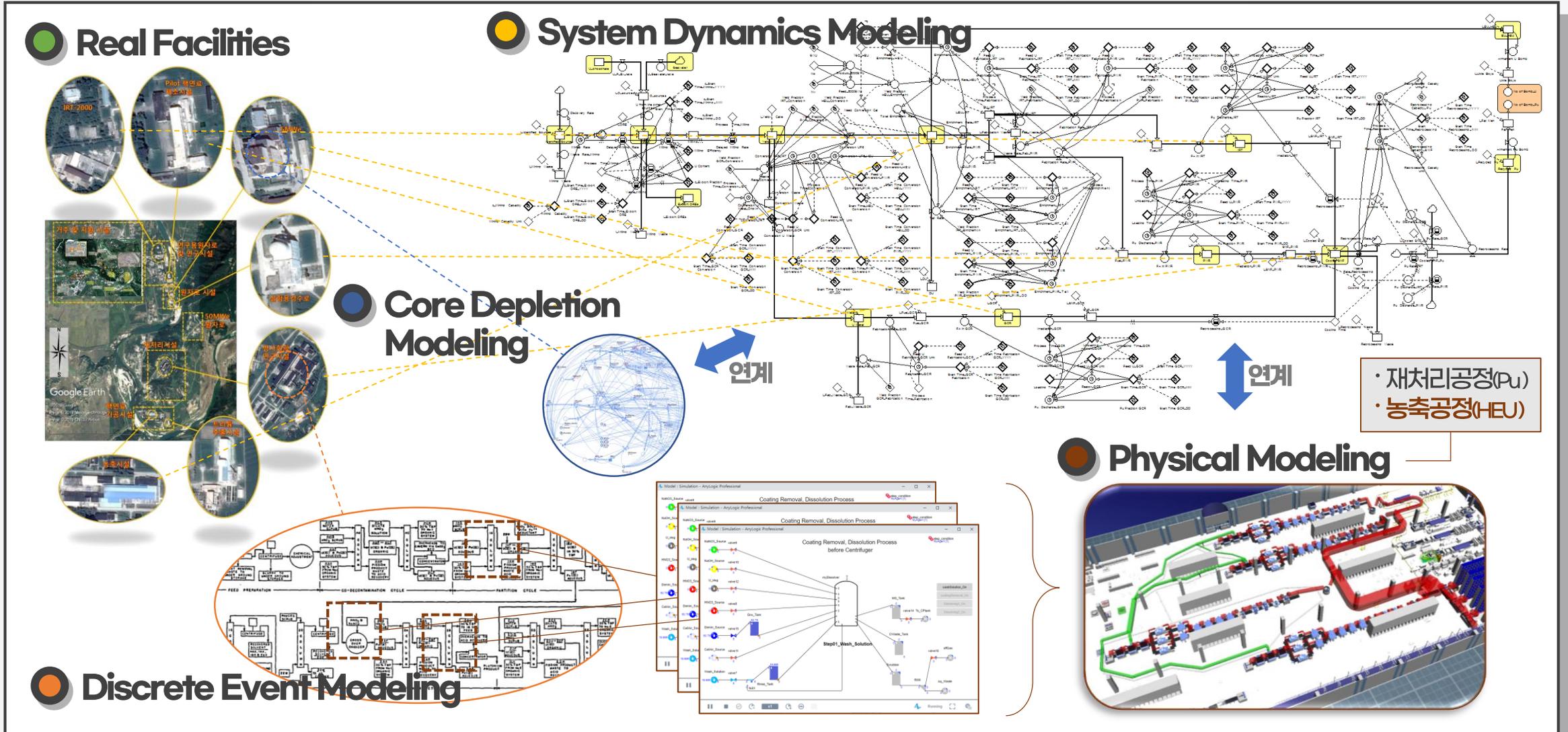
- 시료보존, 운반, 수령검사
- 실험실 시료 준비
- 화학분리
- 기기 테스트
- 측정 및 분석
- 데이터 수집 및 보고

현장



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

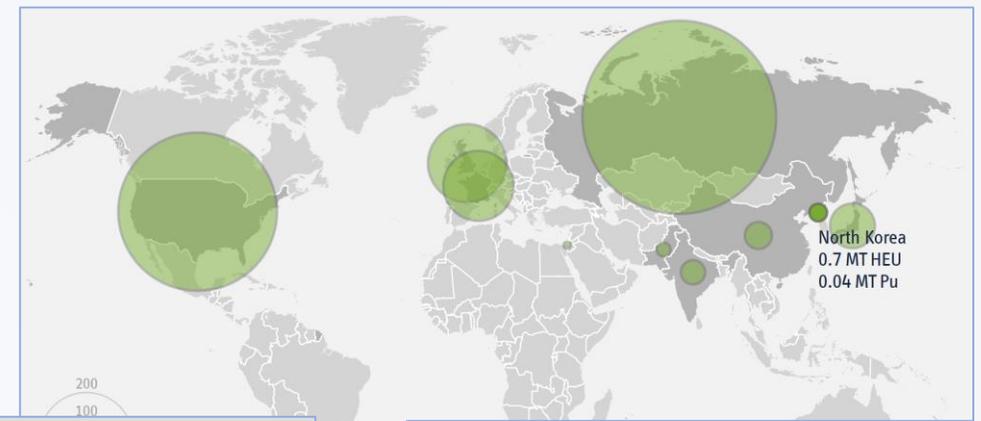
# 1.3. KINAC Physical Model의 개념 설계



## II. 기본이론

# 2.1. 고농축 우라늄(HEU) 추정 사례

항목	미국 (21.7)	스웨덴 (21.6)	일본 (21.6)	미국 (21)	미국 (20.12)	미국 (21.7)
제조 가능한 핵무기 수: 40~50개			핵무기 수: 40개	핵무기 수: 40개	Pu 보유량: 25kg~48kg	HEU 보유량: 540kg
최근 추정치		핵무기 수: 40~50개	Pu 보유량: 40 kg	Pu 보유량: 40 kg	HEU 보유량: 600kg~950kg	HEU 생산량: 244~254kg/y
조립된 핵무기 수: 10~20개			HEU 보유량: 450 kg	HEU 보유량: 400kg~1,000kg	HEU 보유량: 600kg~950kg	HEU 생산량: 244~254kg/y



BULLETIN OF THE ATOMIC SCIENTISTS  
2021, VOL. 77, NO. 4, 222-236  
<https://doi.org/10.1080/00964422.2021.1948083>

NUCLEAR NOTEBOOK

**North Korea nuclear weapons, 2021**  
Hans M. Kristensen and Matt Korda

**ABSTRACT**  
The Nuclear Notebook is researched and written by Hans M. Kristensen, director of the Nuclear Information Project with the Federation of American Scientists, and Matt Korda, a research associate with the project. The Nuclear Notebook column has been published in the Bulletin of the Atomic Scientists since 1987. This issue's column examines North Korea's nuclear arsenal. The authors cautiously estimate that North Korea may have produced enough fissile material to build between 40 and 50 nuclear weapons; however, it may not have actually assembled that many. To see all previous Nuclear Notebook columns, visit <https://thebulletin.org/nuclear-risk/nuclear-weapons/nuclear-notebook/>.

**KEYWORDS**  
Ballistic missiles; ballistic missile submarines; nuclear weapons; North Korea; Nuclear Notebook; Weapons

North Korea has made significant advances over the past two decades in developing a nuclear weapons arsenal. It has detonated six nuclear devices – one with a yield of well over 100 kilotons – and test-flown a variety of new ballistic missiles, several of which may be capable of delivering a nuclear warhead to targets in Northeast Asia and potentially in the United States and Europe. However, there is considerable uncertainty about which of North Korea's missiles have been fitted with an active operational nuclear capability.

It is widely assumed that North Korea has operational nuclear warheads for medium-range missiles. However, it is unclear whether it has managed to develop fully functioning nuclear warheads that can be delivered by long-range ballistic missiles and, following violent atmospheric reentry, detonate as planned. That said, just because North Korea has not yet publicly demonstrated a capability to deliver a functioning nuclear reentry vehicle on a long-range ballistic missile does not necessarily indicate that it is not working on developing one or could not field one in the future. It is clear from its development efforts and public statements that North Korea ultimately intends to field an operational nuclear arsenal capable of holding regional and US targets at risk.

Due to the lack of clarity surrounding North Korea's nuclear program, agencies and officials of the US intelligence community, as well as military commanders and nongovernmental experts, struggle to assess the program's characteristics and capabilities. Based on publicly available information about North Korea's fissile material production and missile posture, we cautiously estimate that North Korea might have produced sufficient fissile material to build 40 to 50 nuclear weapons and that it might possibly have assembled 10 to 20 warheads for delivery by medium-range ballistic missiles.

**North Korea's nuclear policy**

North Korea declared a no-first-use policy following its fourth nuclear test in 2016; however, it diluted its statement with the caveat that it would not "be the first to use nuclear weapons [...] as long as the hostile forces for aggression do not encroach upon its sovereignty" (Korean Central News Agency 2016). Subsequent statements have also included such caveats; during the 75th anniversary of the ruling Korean Workers' Party in October 2020, Kim Jong Un stated that North Korea's nuclear deterrent "will never be used preemptively. But if, and if [sic], any forces infringe upon the security of our state and attempt to have recourse to military force against us, I will enlist all our most powerful offensive strength in advance to punish them" (38 North 2020).

At various times, North Korea media has also threatened to launch nuclear weapons in response to more minor provocations, such as joint US-South Korean military exercises (Elyatt 2016). However, despite these occasional inflammatory statements, it is highly likely that North Korea – as with other nuclear-armed states – would only use its nuclear weapons in extreme circumstances, particularly if the continued existence of the North Korean state and its political leadership were in jeopardy.

**sipri**

# SIPRI YEARBOOK 2021

GLOBAL NUCLEAR WEAPON INVENTORIES, JANUARY 2021

Note: The boundaries used in this map do not imply any endorsement or acceptance by SIPRI.



## 38 NORTH

### Development of the Yongbyon Uranium Enrichment Plant Between 2009 and 2021

BY: OLLI HEINONEN  
JULY 16, 2021

Understanding North Korea's fissile material production capacity is an important factor in assessing the North's ability to expand its nuclear weapons program. While the plutonium production reactors are easy to identify and monitor via commercial satellite imagery, the North's uranium enrichment activities are much more difficult to discern, with both fewer unique attributes to the facilities and visible indicators of operations.

At the Eighth Congress of the Workers' Party of Korea (WPK) held in January, Kim Jong Un disclosed goals for the North's nuclear weapons program, including miniaturization of warheads, development of tactical weapons and a "super-large hydrogen bomb (<https://kcnawatch.org/wp-content/uploads/sites/5/2021/01/DPR-Korea-2021-01-Special-issue.pdf?r=1619883116740>).” At the Supreme People's Assembly meeting just weeks later, he highlighted the need to develop (<https://www.38north.org/2021/01/special-session-lowest-official-growth-rate-in-decades/>) a nuclear power industry as well.

While none of these ambitions are new, there have been few corresponding advancements to North Korea's capacity to produce plutonium and uranium in recent years – fissile materials needed for manufacturing nuclear weapons. In terms of plutonium production, the 5 MWe Reactor at the Yongbyon Nuclear Scientific Research Center, which is capable of producing up to six kilograms (kg) of plutonium per year, has not been operating since 2018 and the Experimental Light Water Reactor (ELWR), which uses low-enriched uranium fuel and may be able to produce additional plutonium in the future, has been under construction since 2011 and is still not

## 2.2. 고농축 우라늄(HEU) 추정 근거 - 1

### 38 NORTH

#### Development of the Yongbyon Uranium Enrichment Plant Between 2009 and 2021

BY: OLLI HEINONEN  
JULY 16, 2021

Understanding North Korea's fissile material production capacity is an important factor in assessing the North's ability to expand its nuclear weapons program. While the plutonium production reactors are easy to identify and monitor via commercial satellite imagery, the North's uranium enrichment activities are much more difficult to discern, with both fewer unique attributes to the facilities and visible indicators of operations.

At the Eighth Congress of the Workers' Party of Korea (WPK) held in January, Kim Jong Un disclosed goals for the North's nuclear weapons program, including miniaturization of warheads, development of tactical weapons and a "super-large hydrogen bomb (<https://kcnawatch.org/wp-content/uploads/sites/5/2021/01/DPR-Korea-2021-01-Special-issue.pdf?t=1619883116740>). At the Supreme People's Assembly meeting just weeks later, he highlighted the need to develop (<https://www.38north.org/2021/01/session-lowest-official-growth-rate-in-decades/>) a nuclear power industry as well.

While none of these ambitions are new, there have been few corresponding advancements to North Korea's capacity to produce plutonium and uranium in recent years—fissile materials needed for manufacturing nuclear weapons. In terms of plutonium production, the 5 MWe Reactor at the Yongbyon Nuclear Scientific Research Center, which is capable of producing up to six kilograms (kg) of plutonium per year, has not been operating since 2018 and the Experimental Light Water Reactor (ELWR), which uses low-enriched uranium fuel and may be able to produce additional plutonium in the future, has been under construction since 2011 and is still not

#### ◦ 영변 농축시설의 누적 생산량 추정 (2020년말 기준)

##### - (가정1) 생산 시나리오 : 저농축우라늄(LEU)과 고농축우라늄(HEU) 생산 병행

실험용경수로의 핵연료용 3.5% LEU는 노심 2기분만 생산하고, 나머지 농축능력은 핵무기용 90% HEU 생산에 주력\*

\* 2016년 8월, <교도통신>의 서면질의에 대해 북한 원자력연구소가 “핵 무력 건설과 원자력 발전에 필요한 농축우라늄도 계획대로 생산하고 있다”고 밝힌 것에 근거

##### - (가정2) 가동이력과 생산능력

\* 캐스케이드 1 : 2012년부터<근거 미제시> 총 9년간 8,000kg-SWU/yr으로 생산

\* 캐스케이드 2 : 2015년부터<근거 미제시> 총 6년간 8,000kg-SWU/yr으로 생산

☞ (2020년말 기준 총 누적 농축 생산능력) 흘1: 72,000kg-SWU/yr, 흘2: 48,000kg-SWU/yr

##### - (누적 생산량 추정치) 2020년 말 기준

· 노심 2기분(UO<sub>2</sub> 기준 8톤, U 기준 약 7.9톤)의 3.5% LEU 생산시

· 540kg의 90% HEU(고농축우라늄탄 약 20개분)와 생산 가능

\* (1) 생산효율이 100%인 이상적인 경우를 상정했다는 점, 장기간에 걸친 위성영상 분석시 (2) 가동 이상 징후(냉각기 수의 감소, 눈이 녹지 않은 강설 영상 등)가 간헐적으로 포착된 바 있으며, (3) 공정 투입물과 생산물의 운송 징후가 한번도 포착된 적이 없다는 점에서 상기 추정치는 최대치임

#### ◦ 북한의 90% HEU 연간 생산량(추정)

##### - 244~254kg의 HEU(고농축우라늄탄 약 9개분) 생산 가능

= 영변 농축시설의 연간 생산량(추정) + 비밀 농축시설의 연간 생산량(추정)

= 94kg(고농축우라늄탄 약 4개분) + 150~160kg(고농축우라늄탄 약 6개분)

영변 농축시설의 농축 시나리오	각 캐스케이드 흘 당 연간 생산량(U-기준)		누적 생산량 (U-기준)		가능성
	LEU	HEU	LEU	HEU	
LEU/HEU 병행 생산	평균 0.52톤	평균 36kg	7.9톤	540kg	높음
2. 3.5% LEU만 생산	2.2톤	0	33톤	0	중간
3. 90% HEU만 생산	0	47kg	0	705kg	낮음

시나리오 1 생산 예시		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	총합	
HEU (kg-U)	흘1	36	36	36	36	36	36	36	36	36	325	541
	흘2	미 가 동			36	36	36	36	36	36	216	
LEU (ton-U)	흘1	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	4.68	7.9
	흘2	미 가 동			0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	3.12	

## 2.2. 고농축 우라늄(HEU) 추정 근거 - 2

### ○ 분리작업단위(Separative Work Unit, SWU):

분리작업단위는 U-235와 U-238을 분리하는 우라늄 농축 과정에 필요한 노력을 정의하는 단위로서 농축 전후의 엔트로피 변화에 대한 가치함수를 바탕으로 Dirac에 의해 농축작업량을 측정하는 다음의 식이 제안됨

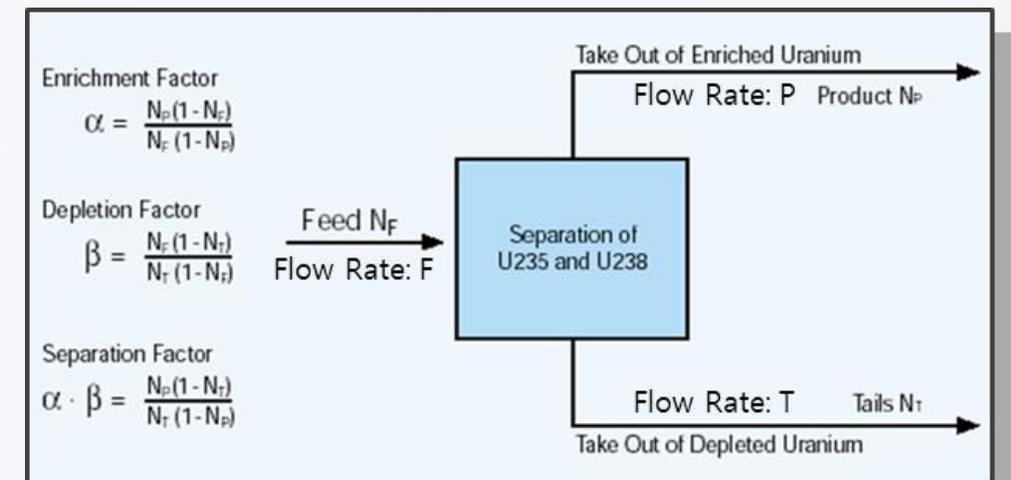
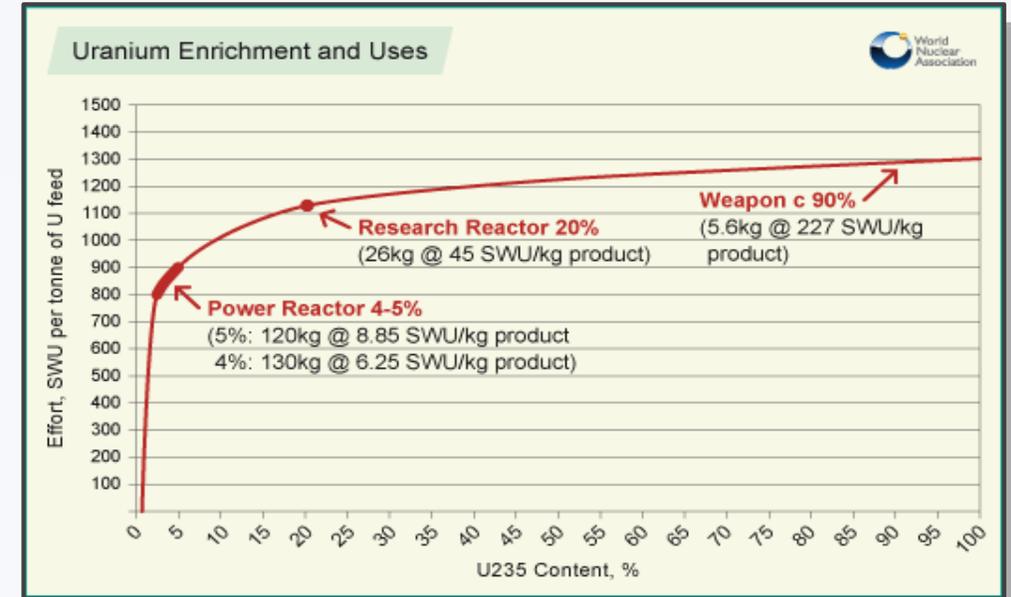
$$\Delta U = P \times V(N_P) + T \times V(N_T) - F \times V(N_F)$$

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

- $\Delta U$  : 농축작업량 [kg-SWU 또는 t-SWU]
- P, T, F : Product, Tail, Feed의 양
- $N_P, N_T, N_F$  : Product, Tail, Feed의 농축도
- $V(x)$  : value function

### ○ 추정의 한계

원심분리기의 세부 요건, 공정에서의 입출력 물질의 유량, 중간 생성물 발생 여부 등 농축우라늄 생산량에 영향을 줄 수 있는 다양한 요인들을 고려하지 않고 단순히 분리작업단위 하나만으로 특정 시설이나 국가의 농축우라늄 생산량을 추정하는 것은 실질적인 생산 능력을 과대, 과소 평가하는 오류가 발생



### ○ 기체 분리 관련 지배 방정식

- 우라늄 농축을 위한 가스 원심분리기의 주요 특성을 결정하는 것은 여러 가지 이유로 어려운 작업임
- 특히, 다음의 두가지 독립적인 문제를 해결해야함
  - 원심분리기 내에서의 기체의 유동 : 유체역학 방정식
  - 우라늄의 분리 효과 : 기체확산 방정식
- 원심분리기가 일정시간 가동하게 되면 더 이상 확산이 이루어지지 않는 평형상태에 도달하게 됨
- 이러한 등온평형 상태를 가정하여 다음의 식(1)을 유도할 수 있음

$$0 = Dp \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\Delta M}{2RT} \left( \frac{v_a}{a} \right)^2 r^2 N(1-N) + r \frac{\partial N}{\partial r} \right] - pw \frac{\partial N}{\partial z} + Dp \frac{\partial^2 N}{\partial z^2}$$

$$\Delta M = 0.003 \text{ kg/mol}$$

$R$  : gas constant

$T$  : average temperature

- 축 방향에 대한 확산효과가 무시할 만큼 작다고 가정하면 원심분리기 양쪽 끝에서의 동위원소 농도차에 대한 다음의 분석식(2)을 도출할 수 있음
- 해당 식을 바탕으로  $F$ (Feed rate),  $L$ (Counter current rate),  $\theta$ (cut),  $Z_p$ (Rectifier length)의 네 가지 제어 가능한 변수에 따라 원심분리기 내에서의 동위원소 농도차이를 결정할 수 있음

$$N_P - N_W = \frac{\Delta M}{2RT} \left( \frac{v_a}{a} \right)^2 (r_2^2 - r_1^2) N_F (1 - N_F) \times \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{1+L/F}{\theta} \right) [1 - \exp(1A_P Z_P)] \\ & + \left( \frac{L/F}{1-\theta} \right) [1 - \exp(-A_W(Z - Z_P))] \end{aligned} \right\}$$

$$\theta = \frac{P}{F}$$

$$A_P = \frac{2\pi D \rho}{\ln(r_2/r_1)} \frac{1}{F} \frac{\theta}{(1+L/F)(1-\theta+L/F)}$$

$$A_W = \frac{2\pi D \rho}{\ln(r_2/r_1)} \frac{1}{F} \frac{1-\theta}{(L/F)(1-\theta+L/F)}$$

### ○ 분리작업단위(SWU)와의 연계

- 앞서 언급했던 분리작업량에 대해서는 다음(3)과 같이 정리할 수 있음

$$\delta U = PV(N_P) + WV(N_W) - FV(N_F)$$

$$\delta U = F[\theta V(N_P) + (1-\theta)V(N_W) - V(N_F)]$$

- 이를 Taylor 전개를 통해 정리하면 다음(4)과 같음

$$\delta U \approx \frac{1}{2} F\theta(1-\theta)(N_P - N_W)^2 V''(N_F)$$

$$V''(N_F) = \left[ \frac{1}{N_F(1-N_F)} \right]^2$$

- 이 식을 앞의 식(2)에 대입하면,

$$\delta U_{Rietz}(L, F, \theta, Z_P) = \frac{1}{2} F\theta(1-\theta) \left( \frac{\Delta M}{2RT} v_a^2 \right)^2 \left( \frac{r_2}{a} \right)^4 \left[ 1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]^2 \times \left[ \left( \frac{1+L/F}{\theta} \right) (1 - \exp[1A_P(L, F, \theta)Z_P]) + \left( \frac{L/F}{1-\theta} \right) (1 - \exp[-A_W(L, F, \theta)(Z - Z_P)]) \right]^2$$

으로 정리(5)가 가능하며, 특정 설계 조건을 바탕으로 식을 더욱 단순화하면 다음(6)과 같이 정리할 수 있음

$$\delta U_{Rietz}(K) = \frac{1}{2} K \left( \frac{\Delta M}{2RT} v_a^2 \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]^2 \left( 1 - \exp \left[ \frac{2\pi D\rho}{\ln(r_2/r_1)} \frac{Z}{K} \right] \right)^2$$

$$K = F \frac{(1-\theta + L/F)^2}{\theta(1-\theta)}$$

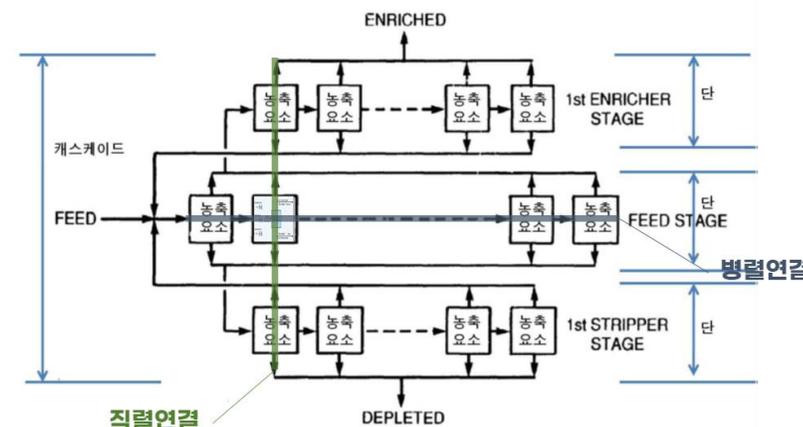
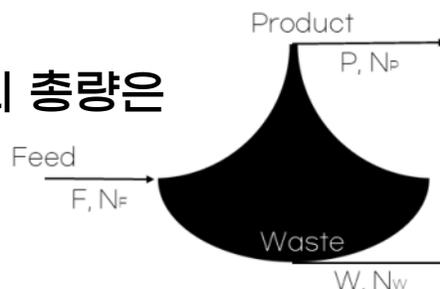
## 2.4. 캐스케이드 단위에서의 해석

### ○ 캐스케이드 구성

- 원심분리기의 다단 연결 : 충분한 농축효과(물질량, 농축도)를 달성하기 위한 농축요소의 연결
  - 원하는 물질 유량 달성 : 원심분리기 병렬 연결(Stage를 구성)
  - 원하는 농도 변화 달성 : 원심분리기 직렬 연결(Cascade를 구성)
- 우측의 그림은 캐스케이드의 계통을 간략하게 도식화한 것
- 공정 내에서의 우라늄 총량이나 U-235의 총량은 항상 일정해야함

Uranium Balance :  $F = P + W$

U-235 Balance :  $F \times N_F = P \times N_P + W \times N_W$



### ○ 캐스케이드 단위에서의 분리계수를 통한 분리작업단위 도출

- 분리계수는 농축요소 1개를 통해 얻을 수 있는 분리효과를 표현
- 계산의 단순화를 위해 혼합효과가 없는 이상적인 캐스케이드를 가정

$$\alpha = \frac{N_P / (1 - N_P)}{N_F / (1 - N_F)}$$

$$\beta = \frac{N_P / (1 - N_F)}{N_W / (1 - N_W)}$$

$$\gamma = \alpha \beta = \frac{N_P / (1 - N_P)}{N_W / (1 - N_W)}$$

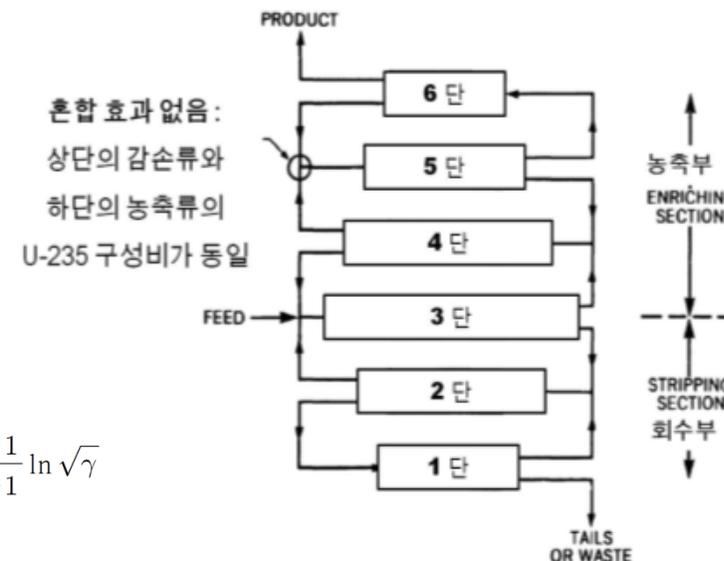
$$N_{F,n} = N_{W,n+1} = N_{P,n-1}$$

$$\alpha_n = \beta_n = \sqrt{\gamma_n} = \alpha = \beta = \sqrt{\gamma}$$

$$N_F = \theta N_P + (1 - \theta) N_W$$

$$\theta = \frac{(\beta - 1)[1 + (\alpha - 1)N_F]}{\alpha \beta - 1}$$

$$\delta U = F \frac{\sqrt{\gamma} - 1}{\sqrt{\gamma} + 1} \ln \sqrt{\gamma}$$



# III. 모델개발

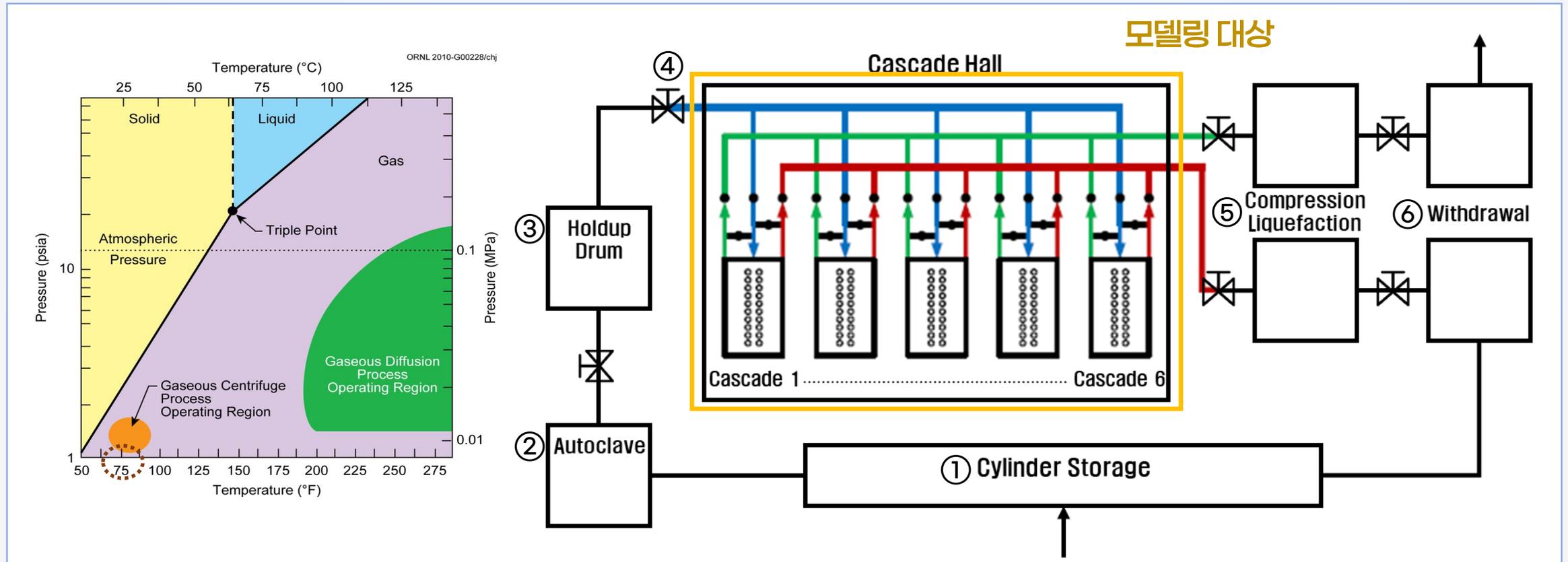
### ○ 가정사항

- 모델링은 현실세계의 문제를 효율적으로 해결하기 위한 방법으로서 복잡한 대상 중 중요하다고 판단되는 세부 정보 위주로 단순화는 방식으로 이루어짐
- 이러한 단순화를 위해서 필연적으로 수많은 가정을 통해 현실세계를 가능한 단순하게 인식하고 적은 수의 통제 가능한 변수를 통해서 시스템을 통제할 수 있도록 만들
- 우라늄 농축시설을 모사함에 있어서도 많은 가정사항을 포함하고 있으며, 정리하면 다음과 같음
  - 분리요소(원심분리기) 단위가 아닌 스테이지 단위로 모사
  - 원심분리기 유형은 P-2형으로서 공개된 정보를 기반으로 개량여부는 고려하지 않음  
(velocity: 485m/s, diameter: 15cm, length: 1m, radii ratio: 0.746)
  - 이상적인 캐스케이드를 고려하여 상단과 하단의 혼합효과를 고려하지 않음
  - 농축도 90%의 고농축우라늄을 생산하기 위해 동일한 캐스케이드 구성(15개 stage로 구성)을 직렬로 연결함을 가정
  - 모델링의 범위는 시설 전체가 아닌 실질적인 생산량에 영향을 주는 캐스케이드 홀에 한정함

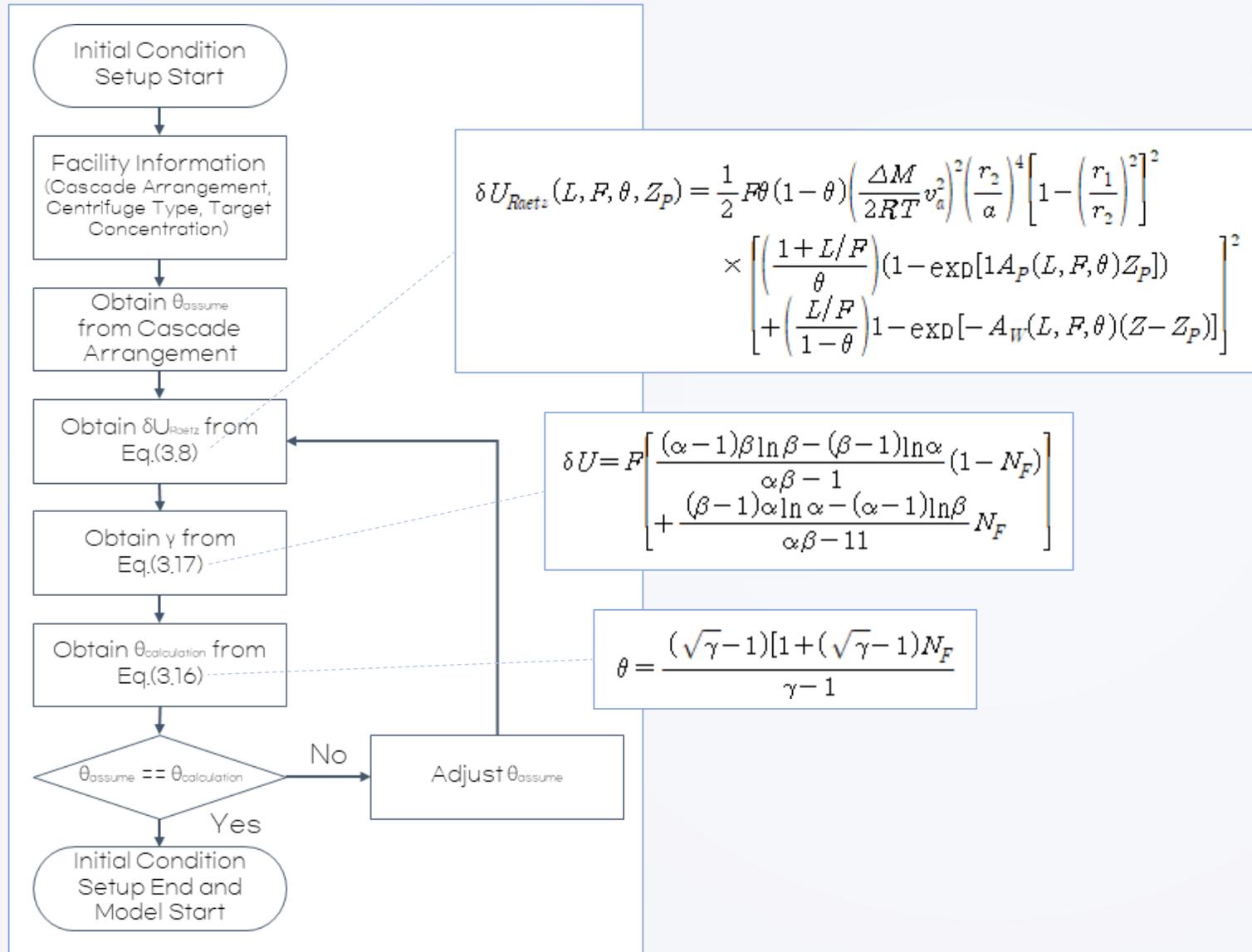
## 3.2. 가스 원심분리 공정의 구성

### ○ 주요 공정 및 물질흐름:

고체(NUF60) 실린더 공급 → ① 저장소에 저장 → ② 실린더를 가열하여 기체로 변환 → 샘플링 및 불순물 제거  
 → ③ 일정한 유량으로 Feed 공급 조정 → ④ 캐스케이드 공급 → 농축 → ⑤ 기체(UF6)를 제품화하기 위한 압축  
 → ⑥ 승화/액화를 통해 실린더에 저장



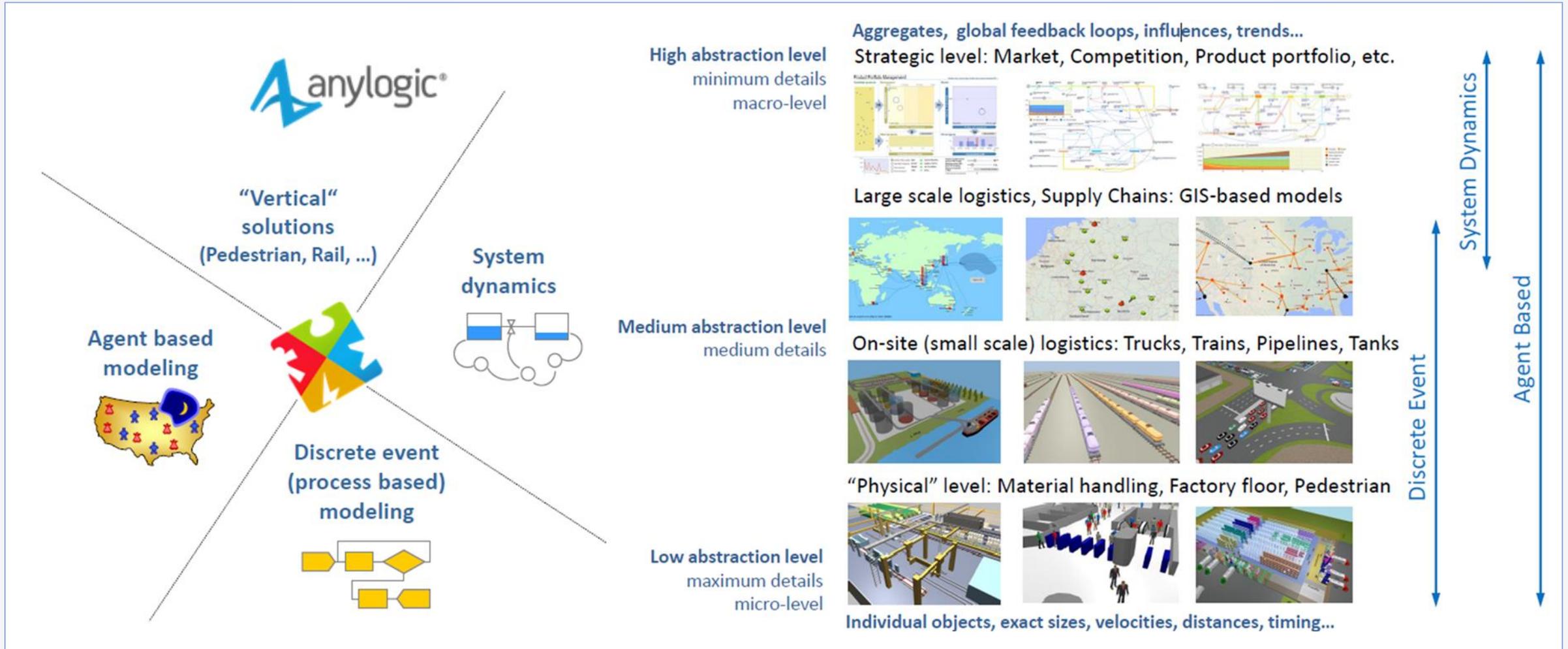
### 3.3. 초기 조건 연산 알고리즘



### ● 농축류와 감손류의 물질흐름을 설정하기 위한 초기조건 연산

- 원심분리기 내부의 압력 구배에 따라 농축류와 감손류의 물질흐름이 발생
- 농축류와 감손류의 유량을 결정하기 위한 인자( $\theta$ , cut,  $P/F$ )를 초기조건으로 도출
- 해당 값을 바탕으로 농축류와 감손류의 유량을 결정하고 다음 단계에서 동일한 방식으로 초기조건을 도출
- 해당 연산을 반복적으로 수행하여 최종 생산량을 결정

## Multi-Method Simulation Modeling with AnyLogic™



## IV. 결과 및 시사점

# 4.1. 개발된 모델 시연 화면

FlowCal : Simulation - AnyLogic Professional

Velocity	485.0	m/s	Optimum_Separative_Power 0.076	update
Length	1.0	m	Optimum_Cut 0.884	update
Radii ratio	0.746	-	Optimum_Feed_Rate 31.075	update
Temperature	320.0	K	Enriched_Concentration_C1 0.025	update
Separation Factor	1.34	-	Enriched_Concentration_C2 0.2	update
Feed Rate	300.0	mg/s	Enriched_Concentration_C3 0.004	update
			Enriched_Concentration_C4 0.003	update
			Stripped_Concentration 0.003	update

**<원심분리기 운전 변수를 조절하는 메인 화면>**

FlowCal : Simulation - AnyLogic Professional

### <단일 캐스케이드 가시화 모델>

Arrangement of Stages in Cascade #1

Enriching Section

Stripping Section

Feed Stage (S5) 0.72 %

Waste Stage (S1) 0.345 %

Product Stage (S15) 3.5 %

Assuming an ideal cascade, the mixed effect of upflow and downflow is not considered. The stripped flow in the enriching section is iteratively cycled back to the previous stage. Similarly, the enriched flow in the stripping section is iteratively cycled back to the previous stage.

- Diameter : Flow Rate
- Color Transparency : U-235 Concentration

FlowCal : Simulation - AnyLogic Professional

### <단일 캐스케이드를 이용한 전체 농축 공정 모델>

FlowCal : Simulation - AnyLogic Professional

### <전체 농축 공정 가시화 도식도>

Arrangement of Cascades

Feed : 300 mg/s 0.72%

Waste : 299.854 mg/s 0.3%

Product : 0.146 mg/s 90%

Product: 0.146 mg/s

Waste: 299.854 mg/s

## 4.2. 두 가지 시나리오에 대한 평가

### ● 농축도 90% HEU 1kg 생산에 대한 연산결과

Case 1. 중간생성물이 최소로 발생하도록 구성

- 필요한 천연우라늄의 양 : 555.55kg
- 발생하는 감손우라늄의 양 : 552.75kg
- 발생하는 중간생성물 : 80% HEU 1.80kg
- 요구되는 분리작업량 : 495 SWU/yr

Case 2. 중간생성물의 순환을 고려하지 않음

- 필요한 천연우라늄의 양 : 4,800kg
- 발생하는 감손우라늄의 양 : 4,176kg
- 발생하는 중간생성물 : 1.5%, 10%, 40% 등 다양한 중간생성물 발생
- 요구되는 분리작업량 : 3,155 SWU/yr

농축 용량을 16,000 SWU로 가정할 경우, 연생산량

- Case 1 : 32kg/yr
- Case 2 : 5kg/yr

영변 농축시설의 농축 시나리오	각 캐스케이드 할당 연간 생산량(U-기준)	
	LEU	HEU
LEU/HEU 병행 생산	평균 0.52톤	평균 36kg
2. 3.5% LEU만 생산	2.2톤	0
3. 90% HEU만 생산	0	47kg

영변 농축시설의 농축 시나리오	누적 생산량 (U-기준)	
	LEU	HEU
LEU/HEU 병행 생산	7.9톤	540kg
2. 3.5% LEU만 생산	33톤	0
3. 90% HEU만 생산	0	705kg

<SWU를 통한 추정량>

### ○ 농축우라늄 생산량 추정 모델의 의의 및 한계점

- 전통적 방식의 우라늄 생산량 추정 방법론을 탈피하기 위해 기체의 물리적 거동을 모사
- 원심분리기의 상세 사양이나 공정 내에서의 물질량 등의 변화를 실시간으로 반영 가능
- 감손류의 농축도를 가정이 아닌 연산의 결과로서 추정 가능
- 전통적 추정 방법론에 비해 보다 정확한 무기급 우라늄 생산량 추정이 가능할 것이며, 이를 토대로 실제 비핵화 단계에서의 정책결정에 보다 유용한 정보를 지원할 수 있을 것으로 기대
  
- 다만, 보다 간결한 수학적 모델을 제시하기 위해 많은 가정을 두고 있음
- 이러한 가정에 따라서 전통적 추정 방법론을 온전히 대체할 수 없음
- 또한, 연산의 과정에서 발생하는 중간 생성물에 대한 추가적인 고려가 요구됨  
(모델을 통한 연산에서는 중간 생성물을 최소화하기 위해 혼합효과를 무시하거나 중간생성물 자체를 폐기물로 간주하여 연산에 큰 오차가 발생함)

### ○ 향후 추진

- 보다 정확한 물질수지 연산을 위한 모델 개선
- 중간생성물에 대한 처리 방안 마련(혼합효과 고려, 평행에 도달하는 시간 무시함을 가정)
- 모델의 정확성을 검증하기 위한 실제 사례 분석 및 평가  
(이란의 JCPOA 사례 분석 진행 중)



Q & A