

제 21회 원전 수화학 및 부식 워크숍

# 가압경수형 원자로(PWR) 2차계통 수화학 조건 예측

2026. 06. 27(목), 세종컨벤션센터

정혜은<sup>a</sup>, 유지아<sup>b</sup>, 오영진<sup>b</sup>, 반치범<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> 부산대학교



<sup>b</sup> 한국전력기술(주)



## **I Introduction ..... 3**

## **II Methodology**

- 1. Ionization and Boiling ..... 7
- 2. Steam Generator ..... 9
- 3. Turbine ..... 12
- 4. Moisture Separator and Reheater ..... 14

## **III Results**

- 1. Steam Generator ..... 16
- 2. Turbine ..... 19
- 3. Moisture Separator and Reheater ..... 21

## **IV Summary & Future Work ..... 24**

# 1. Research Background

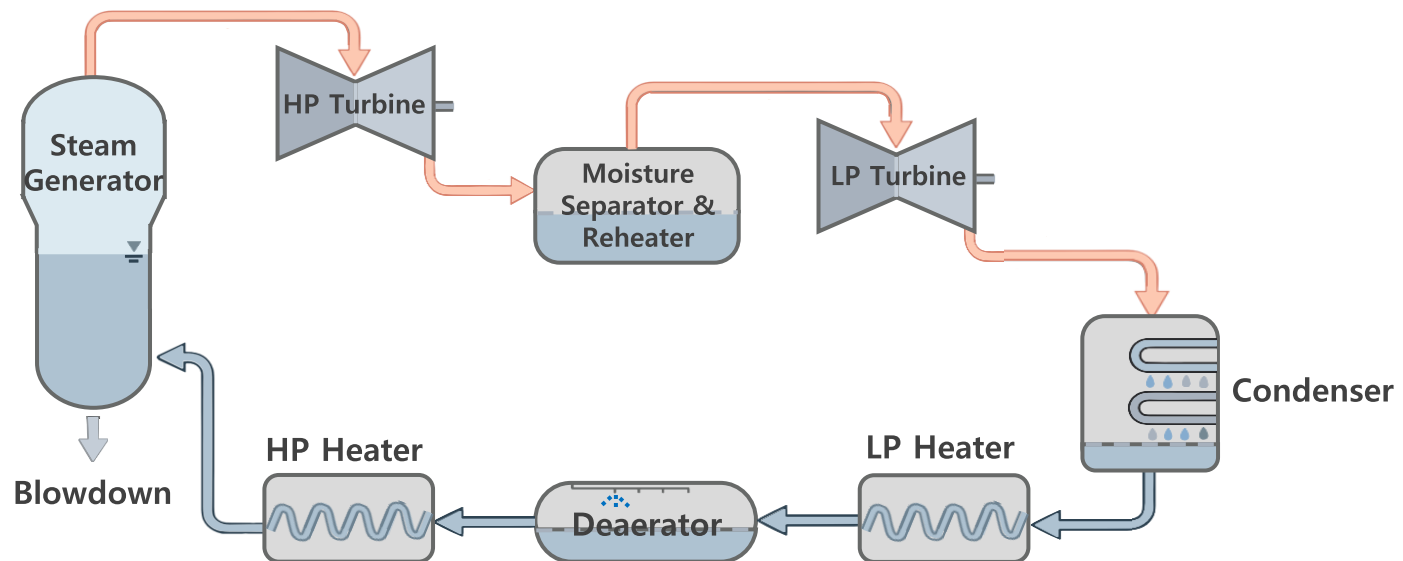
## ❖ PWR 2차계통

### • 2차계통의 정의 및 역할

- 원자로냉각재계통(1차계통)으로부터 고온의 열에너지를 전달받아 증기를 생산하는 **동력 변환 계통**
- 생산된 증기로 터빈을 구동하여 전기를 생산, 복수기에서 응축된 급수를 계통 내 재순환키는 폐쇄형 사이클

### • 주요기기

- 증기발생기 (Steam Generator) : 1차·2차 계통 간 열교환 및 **증기 생성**
- 고·저압 터빈 (High/Low Pressure Turbine) : 증기 팽창을 통한 기계적 에너지 및 **전력 생산**
- 복수기 (Condenser) : 터빈 배기 **저압증기의 응축** 및 급수 회수
- 탈기기 (Deaerator) : 급수 내 **용존산소 및 비응축성 기체 제거**



# 1. Research Background

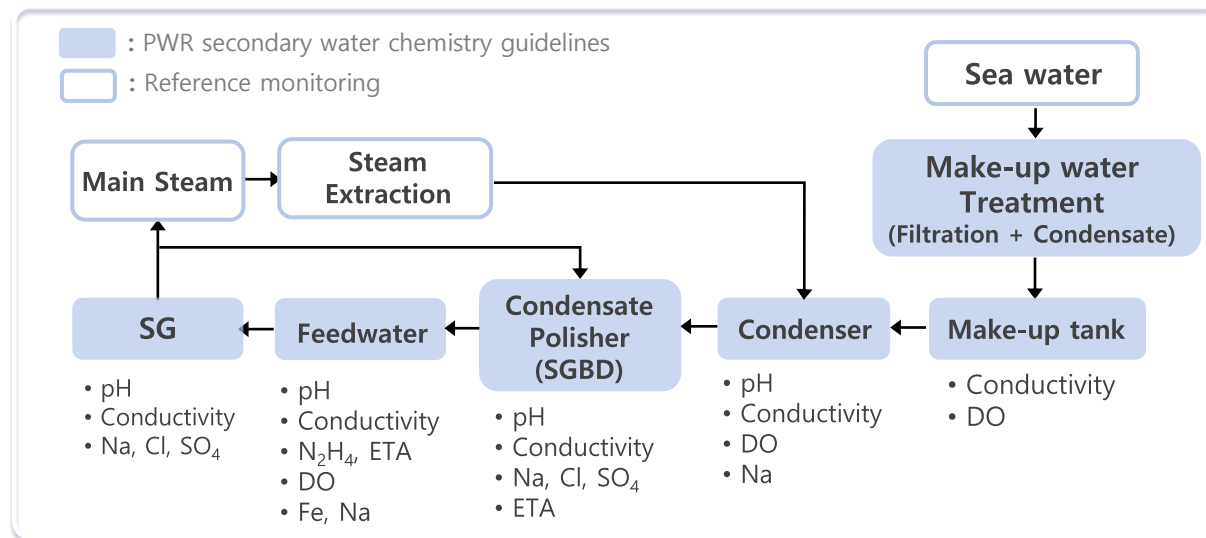
## ❖ 2차계통 수화학 제어

### • 목적

- 계통 내 주요 설비(증기발생기 전열관 등)의 **부식 억제** 및 구조 건전성 확보
- 부식생성물(sludge) 발생 및 증기발생기 내부 침적 최소화를 통한 열효율 저하 방지

### • 주요 제어 항목

- pH : 전휘발성 처리(AVT, all-volatile treatment) 기반 **아민 주입**을 통한 알칼리성 환경 유지
- 용존산소(DO) : 탈기기 및 **하이드라진 주입**을 통한 산소 제거



[Water chemistry monitoring parameters in PWR secondary system] [1]

## 1. Research Background

### ❖ 2차계통 수화학 조건 예측

- Plant Chemistry Simulator (PCS)
  - EPRI 개발, MULTEQ 계산 및 데이터베이스 기반
  - 정상상태 (steady-state)에서의 화학종 거동 예측: 화학종의 이동, 불순물의 hideout, 분해 등

### ❖ 기존 코드의 한계

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• 계산 알고리즘 비공개<ul style="list-style-type: none"><li>- 수화학 계산 내부 알고리즘 비공개 (black-box)</li><li>- 중간 계산 과정의 검증 불가능</li></ul></li><li>• 클라우드 기반 보안 문제<ul style="list-style-type: none"><li>- 발전소 운전 데이터의 외부 클라우드 서버 전송</li><li>- 핵심 운전 데이터 유출 및 보안 취약성</li></ul></li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• 접근성 제약<ul style="list-style-type: none"><li>- 회원사 배포에 따른 국내 연구진 접근성 제약</li><li>- 높은 라이선스 비용 (\$150,000)</li></ul></li><li>• 실시간 운전 상태 반영 한계<ul style="list-style-type: none"><li>- 계통 내 위치별 수화학 거동 모델링 한계</li><li>- 발전소 출력 변동에 따른 수화학 변동성 모니터링 한계</li></ul></li></ul> |
|---|---|



기술 자립과 데이터 보안을 위한 국산 수화학 코드 개발

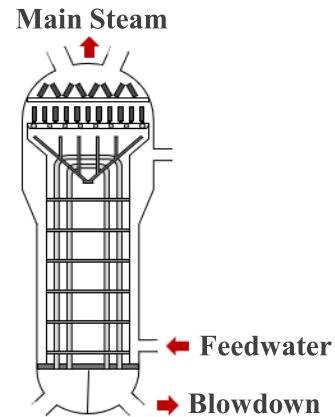
## 2. Research Approach

### ❖ 모델링 수행 범위

- 재순환형 증기발생기 (RSG\*) 2차측 : 블로우다운(Blowdown) 및 주증기(Main Steam)
- 터빈 : 터빈 내부 취출(Extraction) 및 축 방향(Axial) 라인
- 습분분리기 및 재열기 (MSR\*\*) 쉘측 : MSR 배수(Drain) 및 출구
- 정상상태 열역학적 평형(Steady-state Thermodynamic Equilibrium) 가정

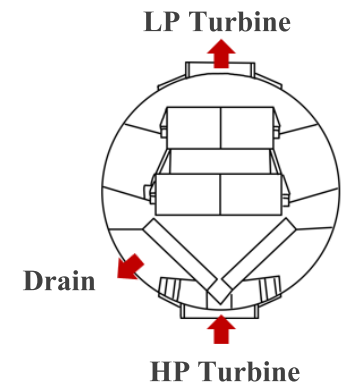
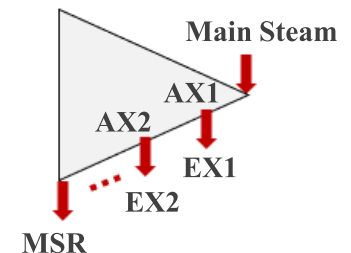
\* RSG : Recirculating Steam Generator

\*\* MSR : Moisture Separator and Reheater



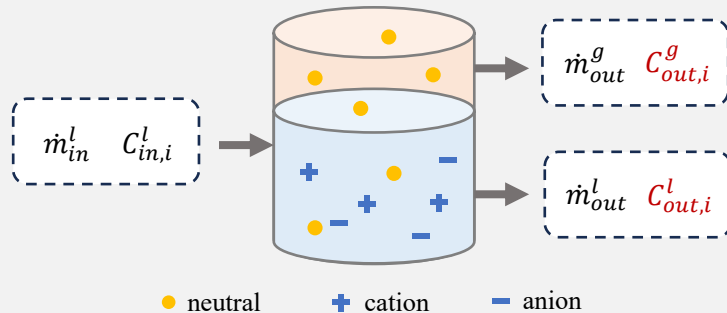
### ❖ 모델링 대상 화학종

- 주입 약품: ETA (pH 조절) 및  $N_2H_4$  (용존산소 제거)
- 열분해 생성물 :  $NH_3$ 
  - 고온 환경에서 주입 약품의 열분해로 인한 암모니아 생성 반영

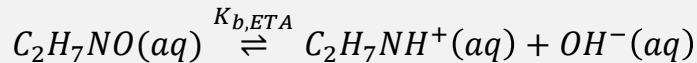
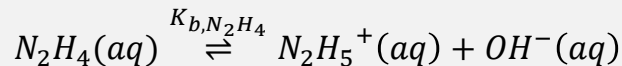
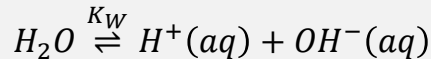


# 1. Ionization and Boiling

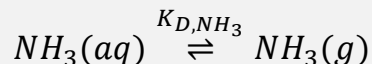
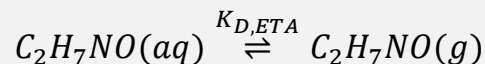
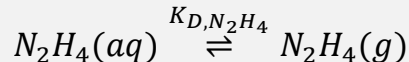
## ❖ 화학 반응



### • Ionization



### • Boiling



▶ 11개의 미지수 농도

### 평형상수

» 물의 이온곱( $K_W$ ) 및 화학종별 평형상수( $K_{b,i}$ ) 기반 4개의 방정식 도출

### 질량평형

» 화학종( $N_2H_4$ , ETA,  $NH_3$ ) 질량보존식 기반 3개의 방정식 도출

$$\dot{m}_{in}^l C_{in,i}^l = \dot{m}_{out}^v C_{out,i}^v + \dot{m}_{out}^l (C_{out,i}^l + C_{out,i}^{l+})$$

### 분배계수

» 분배계수( $N_2H_4$ , ETA,  $NH_3$ ) 기반 3개의 방정식 도출

$$C_i^v = K_D C_i^l$$

### 전기중성

» 용액 내 전기적 중성 조건 만족하는 1개의 방정식 도출

$$\sum |z_i| C_{i+} = \sum |z_j| C_{j-}$$



**11개의 미지수에 대한 연립방정식 (11×11)**

# 1. Ionization and Boiling

## ❖ 계산 과정

### 입력

- 온도 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- 주입 농도 (ppb)
- 입구 질량 유량 ( $\text{kg/s}$ )
- 출구 증기 질량 유량 ( $\text{kg/s}$ )

### Ionization & Boiling

#### 초기 추정값 설정

액상 수소이온 농도 ( $C_{H^+}^l$ ) 및 이온강도 ( $I$ )  
초기 가정을 통한  
비선형 연립방정식의 선형화

#### Gauss-Jordan 소거법 수행

선형 행렬 연산을 통한 미지수 농도 도출  
 $C_{out,i}^l$   $C_{out,iH^+}^l$   $C_{out,i}^g$   $C_{H^+}^l$   $C_{OH^-}^l$

#### 초기 입력값 업데이트

반복 계산을 위한 화학종 농도 및  
이온강도 업데이트

No

농도 수렴 판정

Yes

#### $\text{pH}_T$ 계산

수소이온 농도 및 활동도 계수 기반  
고온  $\text{pH}$  ( $\text{pH}_T$ ) 산출

### 출력

- 액상 화학종 농도
- 증기상 화학종 농도
- $\text{pH}_T$



## 2. Steam Generator

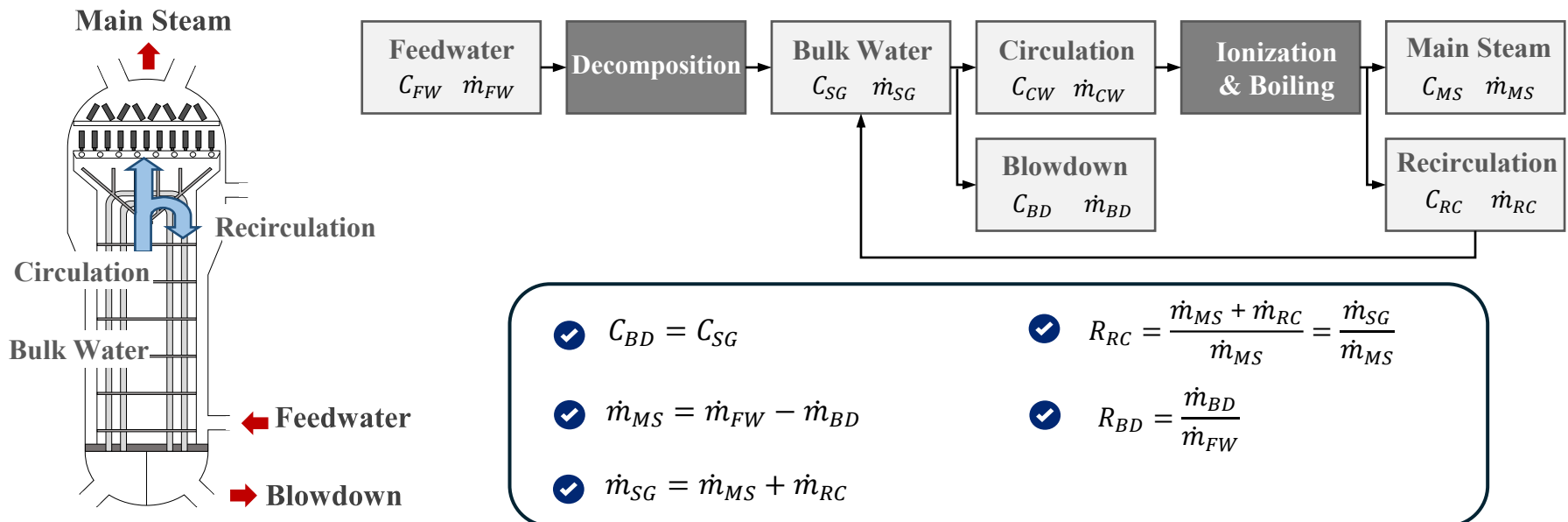
### ❖ 재순환형 증기발생기 (RSG) 모델링

#### • RSG (Recirculating Steam Generator)

- 유입된 급수는 포화 온도로 가열 및 기화 (기-액 혼합 상태)
- 2단 습분분리기를 통해 건도가 약 99.75%인 주증기 생성 및 분리된 액상은 내부로 순환 (Recirculation)
- 수화학 제어를 위해 내부 유체의 일부를 블로우다운 (Blowdown)으로 지속적으로 배출

#### • 주요 운전 변수

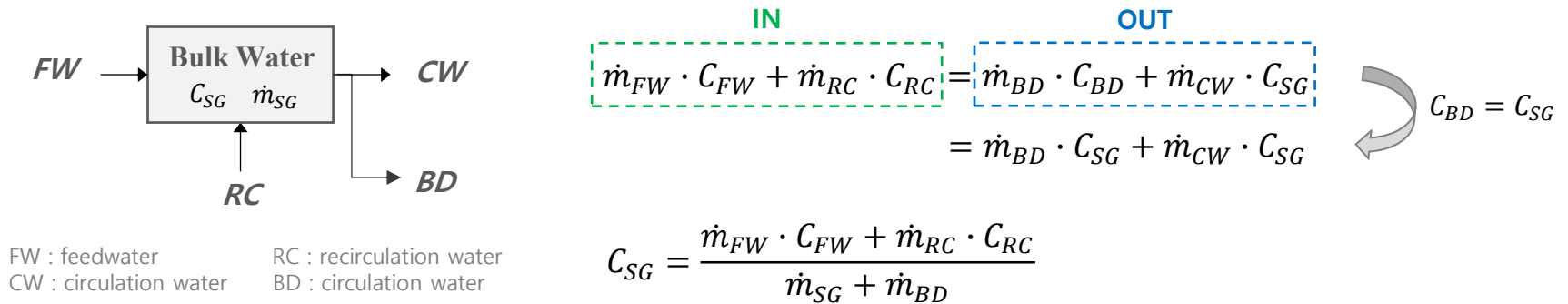
- Recirculation Ratio ( $R_{RC}$ ) : 주증기 유량 대비 증기발생기 내부 순환 유량의 비율
- Blowdown Ratio ( $R_{BD}$ ) : 유입 급수 유량 대비 블로우다운 유량의 비율
- Moisture Carryover (CO) : 습분분리기를 통과한 후 주증기 내에 남아있는 액적의 분율



## 2. Steam Generator

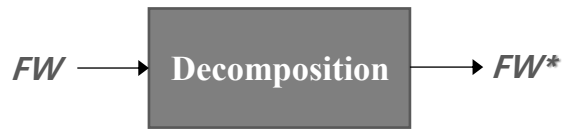
### ❖ 재순환형 증기발생기 (RSG) 모델링

#### • 증기발생기 내부 *Bulk Water* 질량 평형



#### • 화학종의 열분해 반영

- Decomposition Loss Fraction ( $L_i$ ): 열분해로 인한 기존 화학종  $i$ 의 분해 비율 (%)
- Decomposition Mass Yield ( $k_i$ ): 분해된 화학종  $i$ 의 단위 질량당 생성되는  $\text{NH}_3$ 의 질량 (g/g)



$$C_{FW,N_2H_4}^* = C_{FW,N_2H_4} - C_{FW,N_2H_4} L_{N_2H_4}$$

$$C_{FW,ETA}^* = C_{FW,ETA} - C_{FW,ETA} L_i$$

$$C_{FW,NH_3}^* = C_{FW,NH_3} + C_{FW,N_2H_4} L_{N_2H_4} k_{N_2H_4} + C_{FW,ETA} L_{ETA} k_{ETA}$$

## 2. Steam Generator

### 입력

- 증기발생기 온도
- 주급수 농도
- 주급수 질량 유량
- Blowdown Ratio
- Recirculation Ratio
- Decomposition loss fraction
- Decomposition mass yield
- Moisture Carryover

### Calculation

#### 초기 추정값 설정

증기발생기 내부 Bulk Water의  
화학종별 초기 농도 가정

$$C_{i,SG} = C_{i,BD}$$

#### Ionization & Boiling 모듈 계산

이온화 및 비등 계산 모듈을 통해  
주증기 및 순환수 농도 도출

$$C_{MS} = (1 - CO) \times C_i^g + CO \times (C_i^l + C_{iH^+}^l)$$

$$C_{i,RC} = C_i^l + C_{iH^+}^l$$

#### 초기 입력값 업데이트

증기발생기 내부 Bulk Water 농도 업데이트

$$C_{i,SG} = \frac{\dot{m}_{FW} \cdot C_{i,FW} + \dot{m}_{RC} \cdot C_{i,RC}}{\dot{m}_{SG} + \dot{m}_{BD}}$$

No

농도 수렴 판정

Yes

#### pH<sub>T</sub> 계산

수소이온 농도 및 활동도 계수 기반  
고온 pH (pH<sub>T</sub>) 산출

### 출력

- 블로우다운 화학종 농도
- 주증기 화학종 농도
- pH<sub>T</sub> at FW, BD, MS

## 3. Turbine

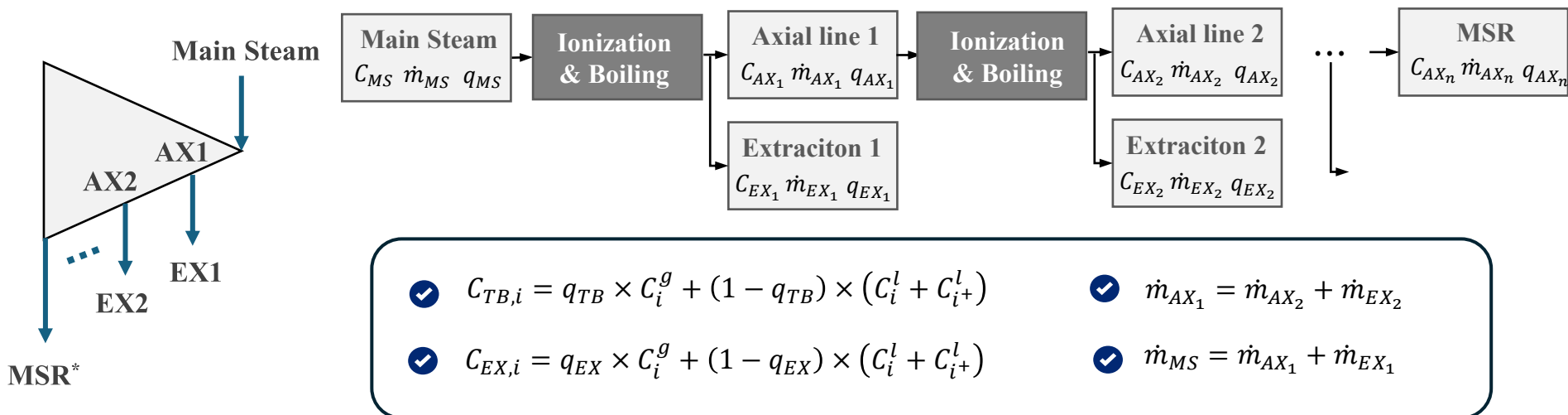
### ❖ 터빈 모델링

#### • 터빈

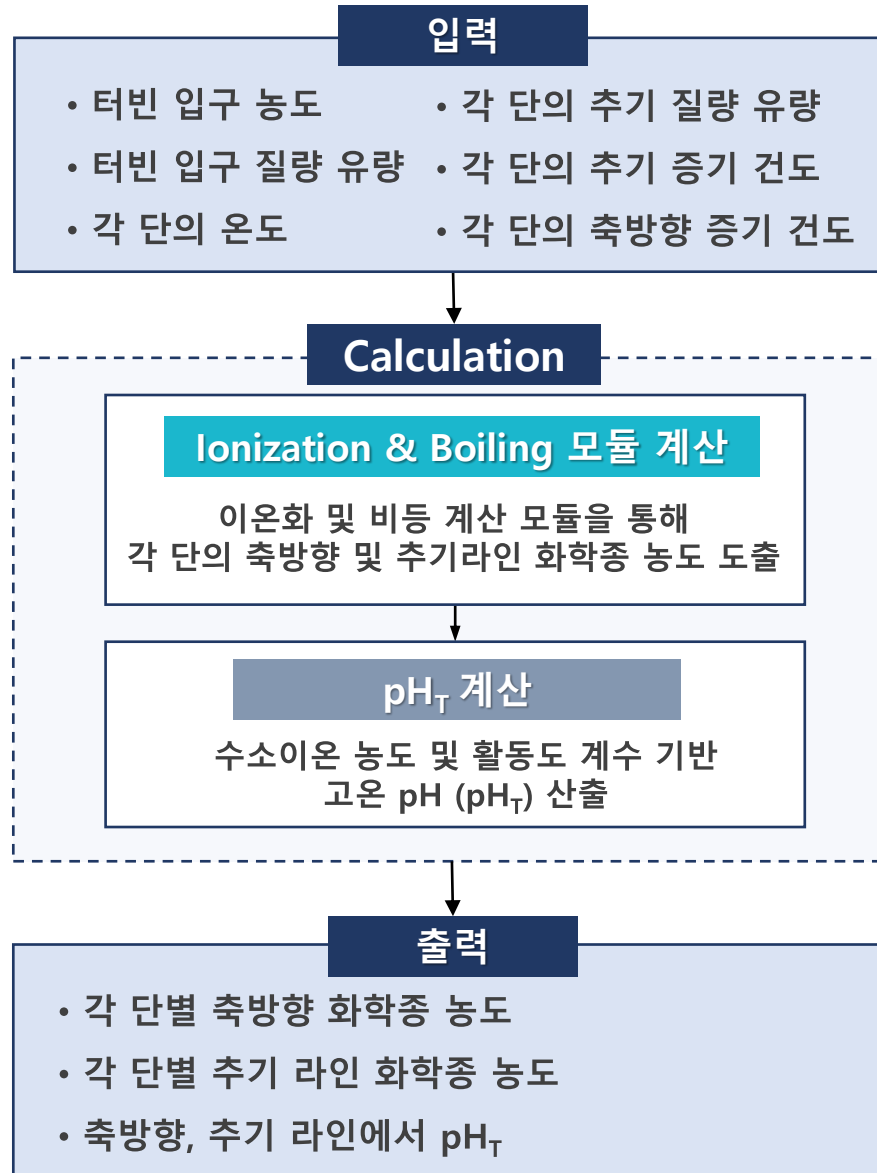
- 터빈은 다단(multiple stages)로 구성. 증기는 **축방향 (axial line)**을 따라 팽창하며 구동
- 열효율 향상을 위해 각 단의 중간 과정에서 증기의 일부를 **추출 라인 (extraction line)**으로 추기 배출

#### • 주요 운전 변수

- 추출 라인 수 (n) : 터빈 내 총 추기 라인의 수
- 온도 ( $T_n$ ) : 터빈 n단에서의 증기 온도
- 축 방향 증기 건도 ( $q_{AXn}$ ) : n단 축방향 라인에서의 증기 건도
- 추기 증기 건도 ( $q_{EXn}$ ) : n단 추기 라인에서의 증기 건도



## 3. Turbine



\* MS: Main Steam

\*\* EX: Extraction

\*\*\* AX: Axial

## 4. Moisture Separator and Reheater

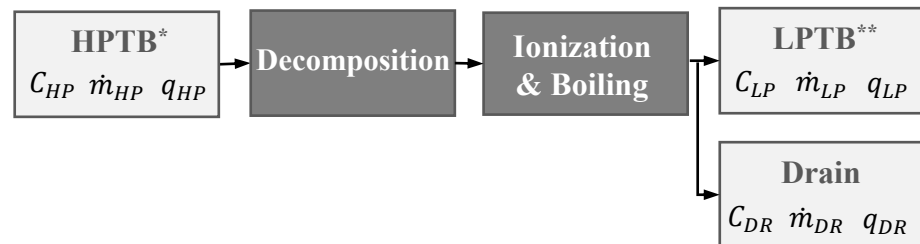
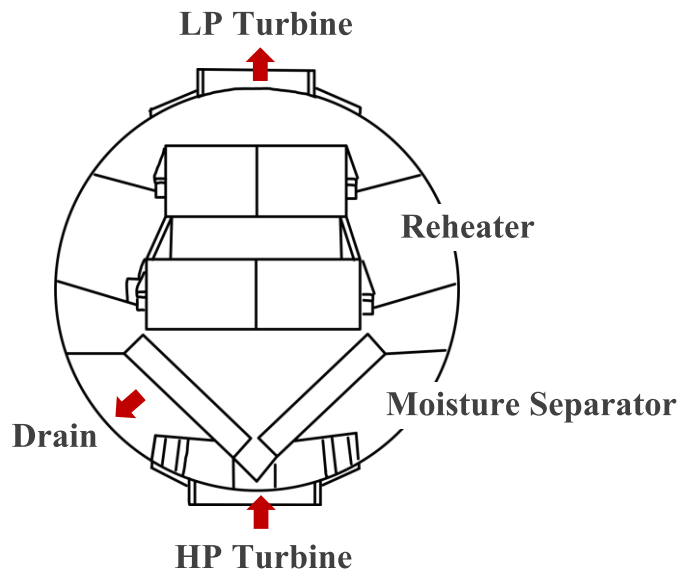
### ❖ 습분분리기 및 재열기 (MSR) 모델링

#### • MSR (Moisture Separator and Reheater)

- 고압 터빈 출구 증기에 포함된 잔류 습분을 **습분분리기**를 통해 제거. 분리된 액상은 **드레인 (Drain)**으로 이동
- 습분이 제거된 증기는 **재열기**를 통해 과열증기 형태로 저압터빈으로 유입

#### • 주요 운전 변수

- Drain 질량 유량 ( $\dot{m}_{DR}$ ) : 습분분리기에서 분리되어 배출되는 액상(드레인)의 질량 유량
- Moisture Carryover (CO) : 습분분리기에서 제거되지 않고 저압터빈으로 이동하는 액상 분율
- Moisture Carryunder (CU) : 드레인 라인으로 배출되는 액상에 함께 배출되는 기상(증기) 분율

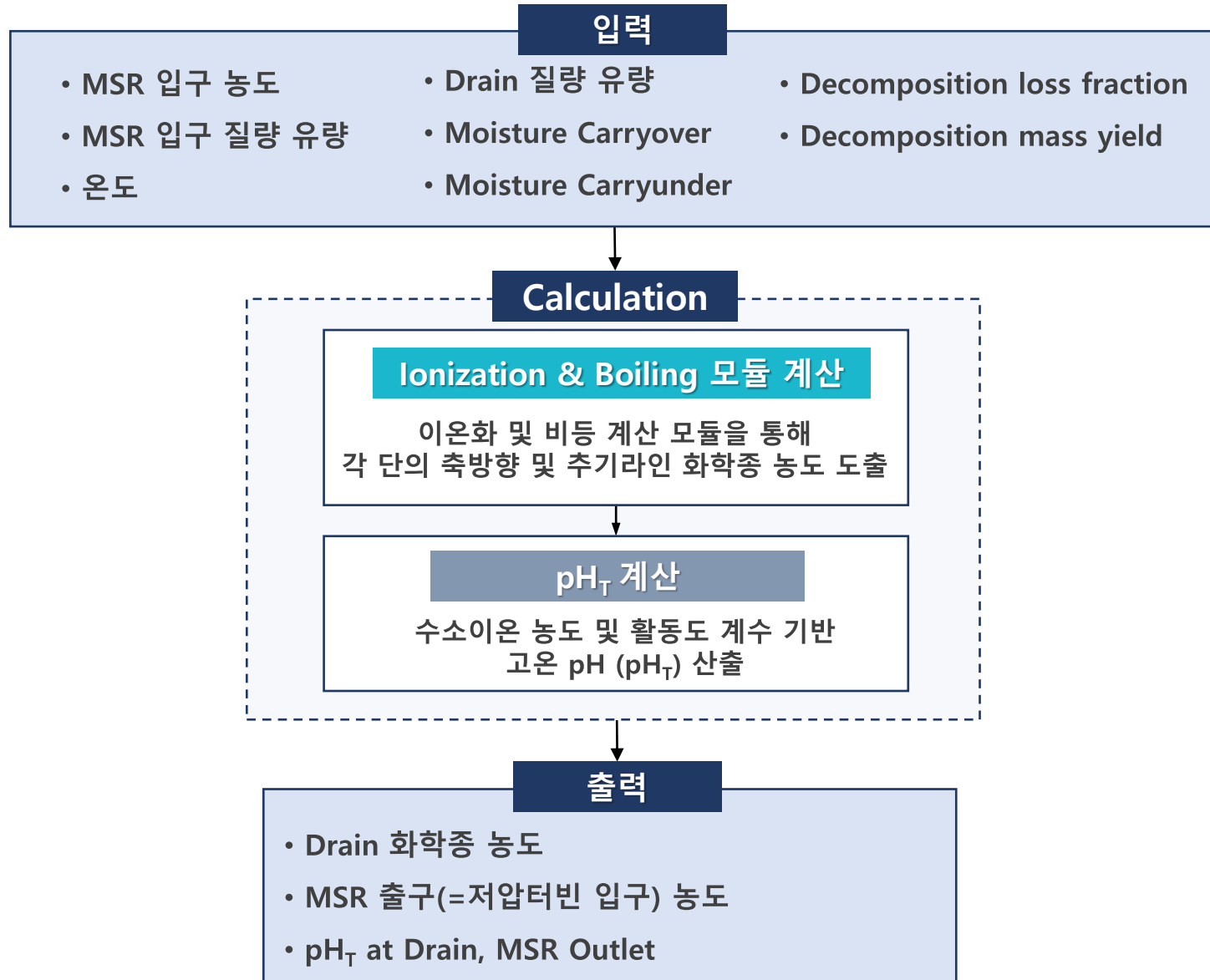


- ✓  $\dot{m}_{HP} = \dot{m}_{LP} + \dot{m}_{DR}$
- ✓  $C_{LP} = (1 - CO) \times C_i^g + CO \times (C_i^l + C_{iH^+}^l)$
- ✓  $C_{DR} = CU \times C_i^g + (1 - CU) \times (C_i^l + C_{iH^+}^l)$

\* HPTB: High Pressure Turbine

\*\* LPTB: Low Pressure Turbine

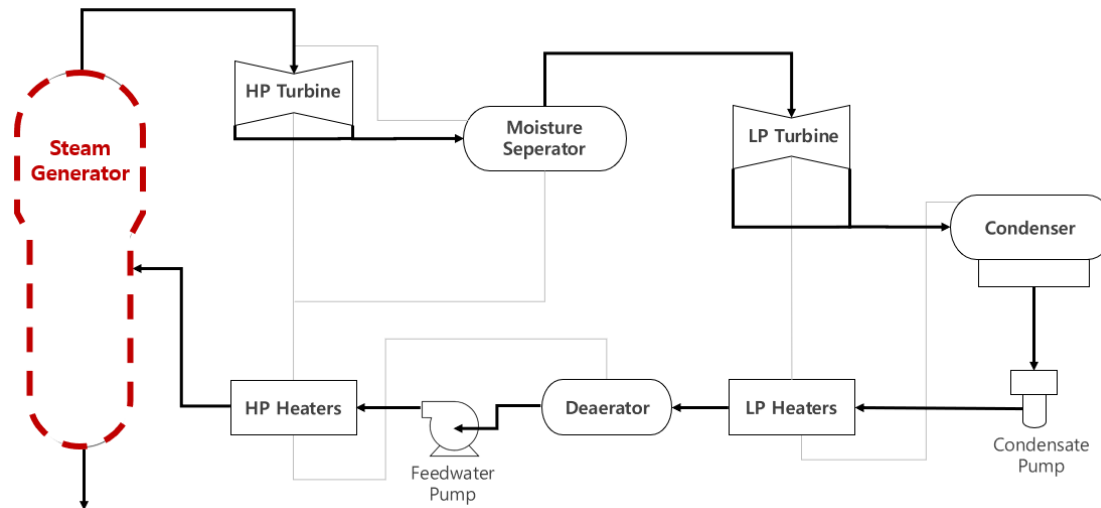
## 4. Moisture Separator and Reheater



## 1. Steam Generator

### ❖ RSG 입력 조건

- 증기발생기 온도 : 290 °C
- 주급수 질량 유량 : 801.36 kg/s
- 주급수 농도<sup>[2]</sup> : NH<sub>3</sub> 800 ppb, N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 92.4 ppb, ETA 1600 ppb
- Blowdown ratio<sup>[2]</sup> : 1%
- Recirculation ratio<sup>[3]</sup> : 3.7
- Moisture Carryover<sup>[4]</sup> : 0.25% (주증기 건도 99.75%)
- Decomposition loss fraction : L<sub>N<sub>2</sub>H<sub>4</sub></sub> 68%<sup>[2]</sup>, L<sub>ETA</sub> 2%<sup>[5]</sup>
- Decomposition mass yield : k<sub>N<sub>2</sub>H<sub>4</sub></sub> 0.56 g/g, k<sub>ETA</sub> 0.62 g/g <sup>[5]</sup>



[2] Soonchunhyang Univ., Final Report on Development of Advanced Amine Chemistry Application Technology for Nuclear Power Plant Secondary System, Ministry of Knowledge Economy (MKE), Republic of Korea, 2011.

[3] Hyoung Tae Kim, et al. "Performance Evaluation of Annular Fuel in OPR-1000 Plant During a Main Steam Line Break Accident", KNS Spring Meeting, 2010.

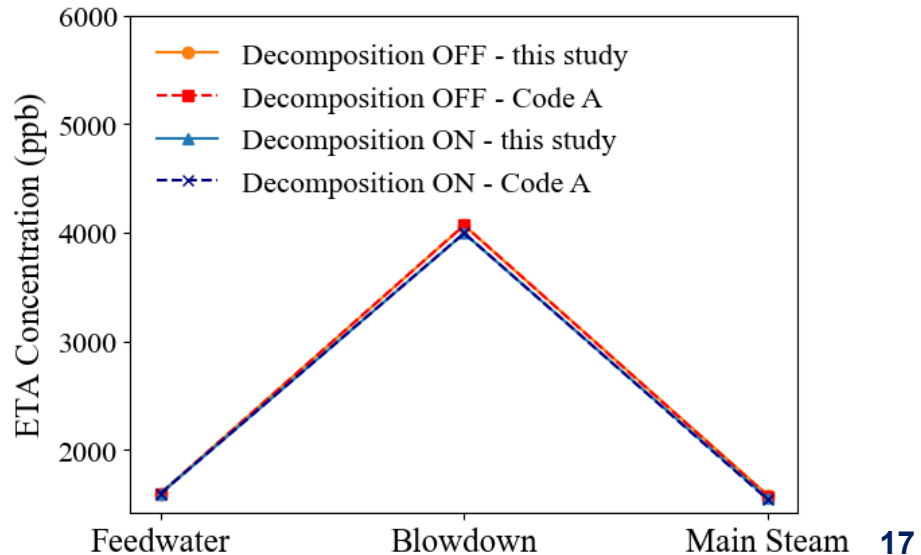
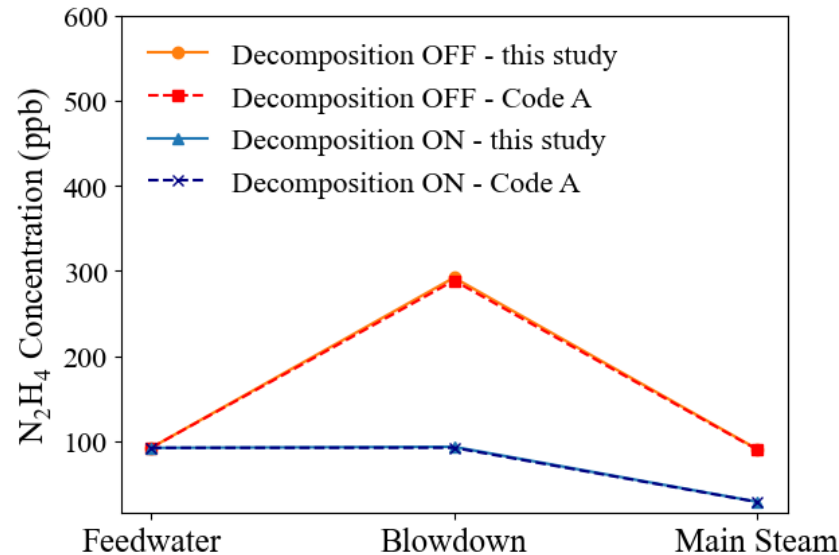
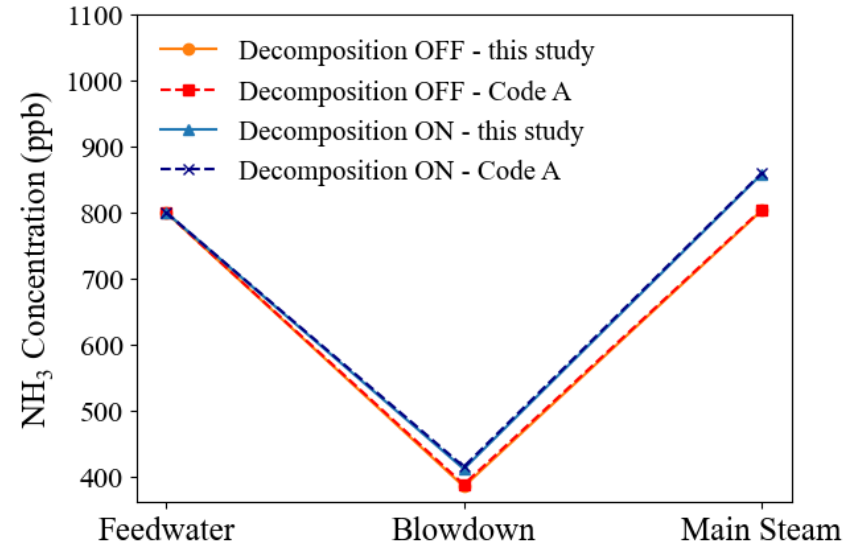
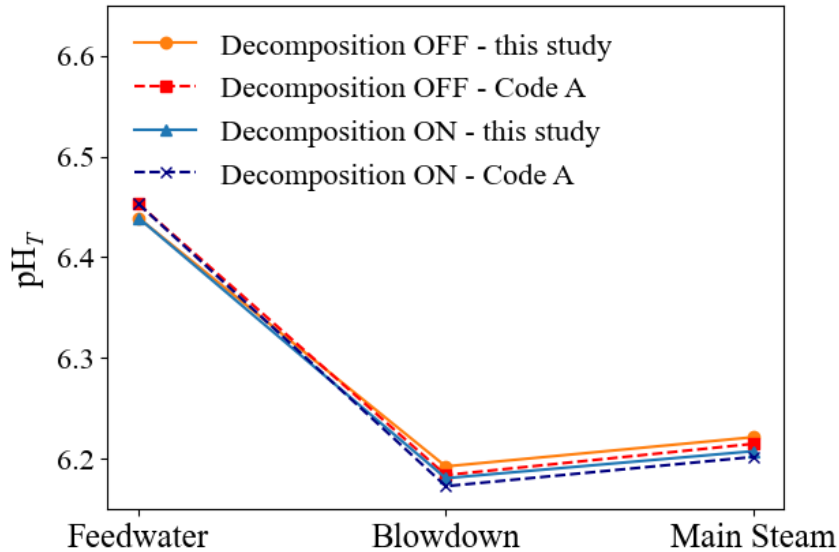
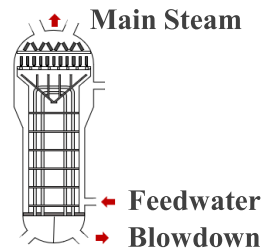
[4] Kihwan Kim, et al., "An Air/water Experimental Study on the Moisture Carry Over for the Moisture Separator of a Steam Generator"

[5] 정현준, 이인형, 김영인, "다양한 수화 조건에서 ETA의 열분해 특성 평가", 한국산학기술학회 학술대회논문집, 2014.



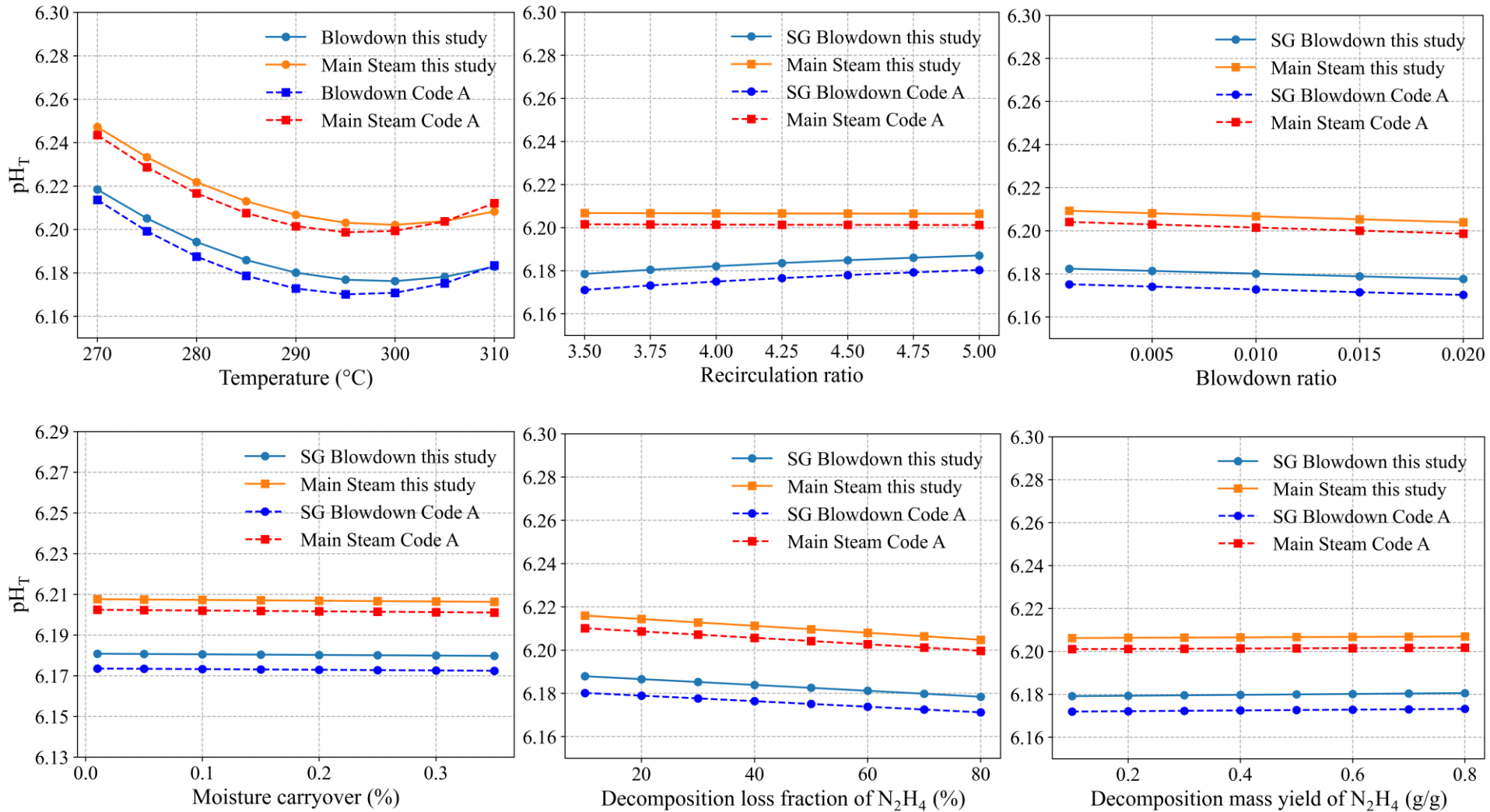
## 1. Steam Generator

### ❖ RSG 결과



## 1. Steam Generator

### ❖ 주요 운전 변수 변화에 따른 $pH_T$

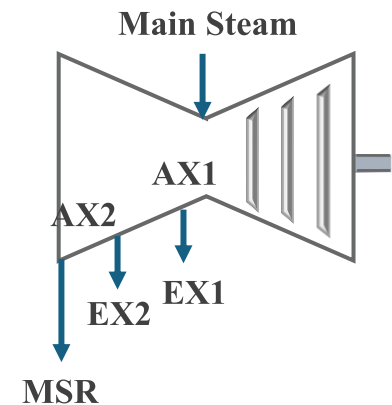


## 2. Turbine

### ❖ 터빈 입력 조건

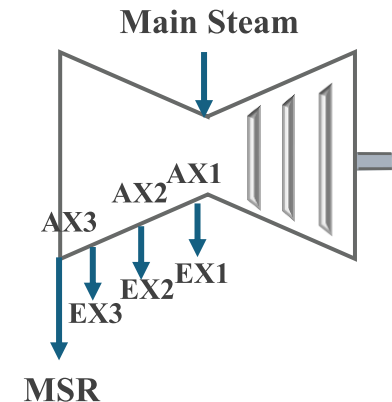
- 터빈 입구 질량 유량 : 757.65 kg/s
- 터빈 입구 농도 :  $\text{NH}_3$  804.16 ppb,  $\text{N}_2\text{H}_4$  90.42 ppb, ETA 1575.06 ppb
- 추기라인 개수 : 2개

	1 of 2	2 of 2
추기라인 질량 유량	90.92 kg/s	90.92 kg/s
온도	260 °C	232.2 °C
축방향 증기 건도	98%	95%
추기 증기 건도	97%	92%

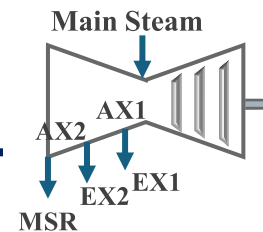


- 추기라인 개수 : 3개

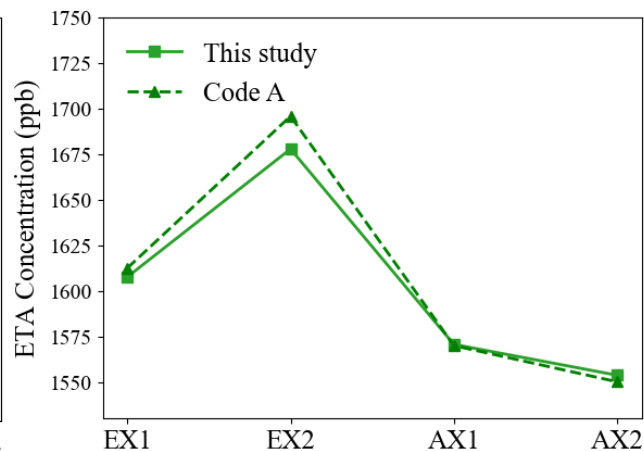
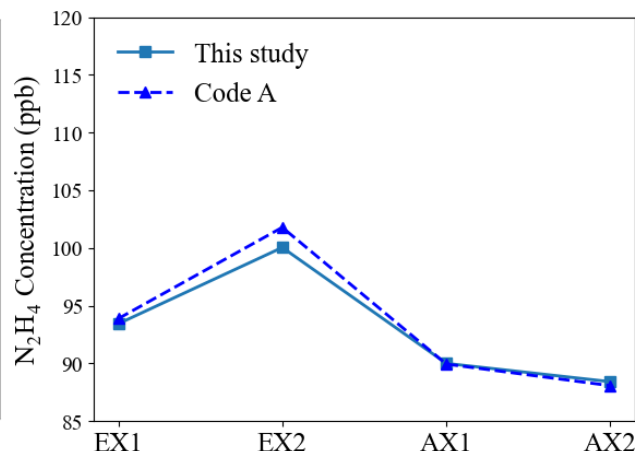
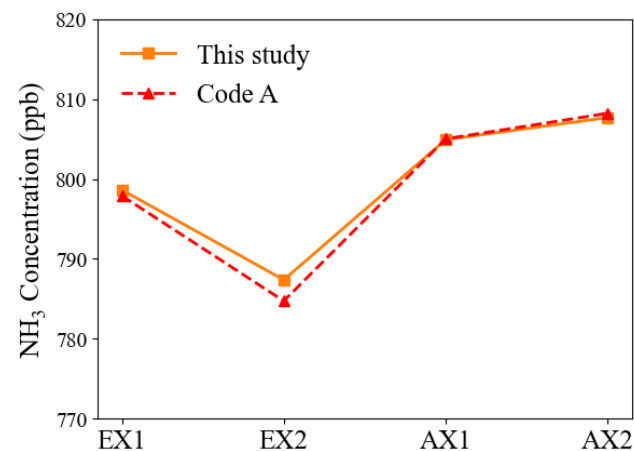
	1 of 3	2 of 3	3 of 3
추기라인 질량 유량	60.61 kg/s	60.61 kg/s	60.61 kg/s
온도	260 °C	245 °C	232.2 °C
축방향 증기 건도	98%	96%	95%
추기 증기 건도	97%	95%	92%



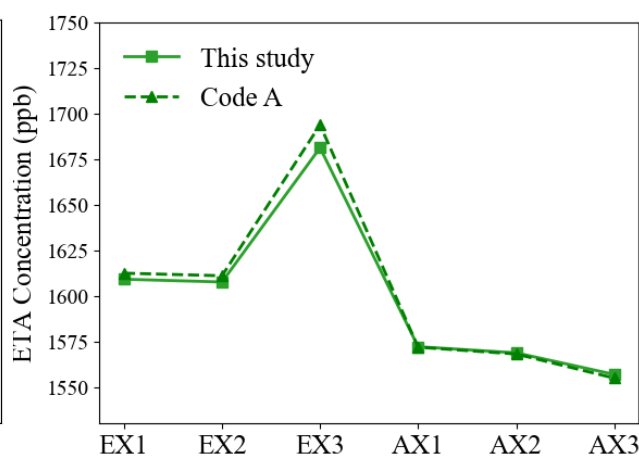
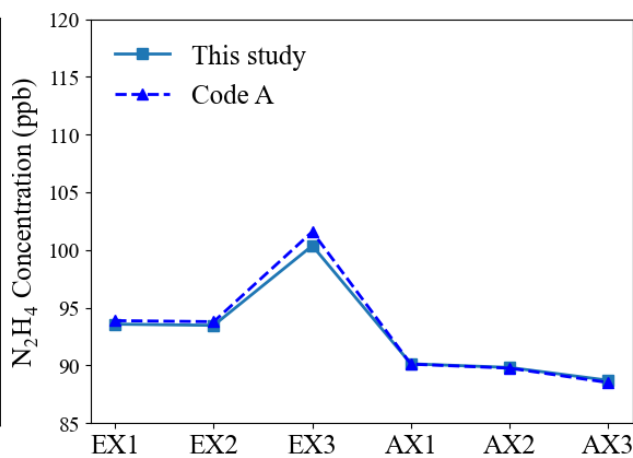
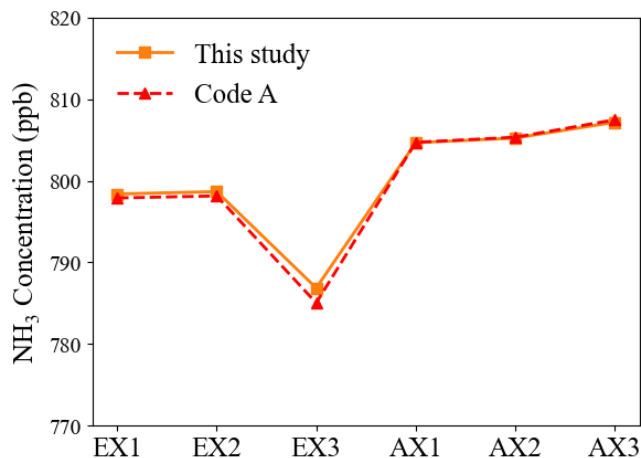
## 2. Turbine



### ❖ 화학종 농도 (추기라인 2개)



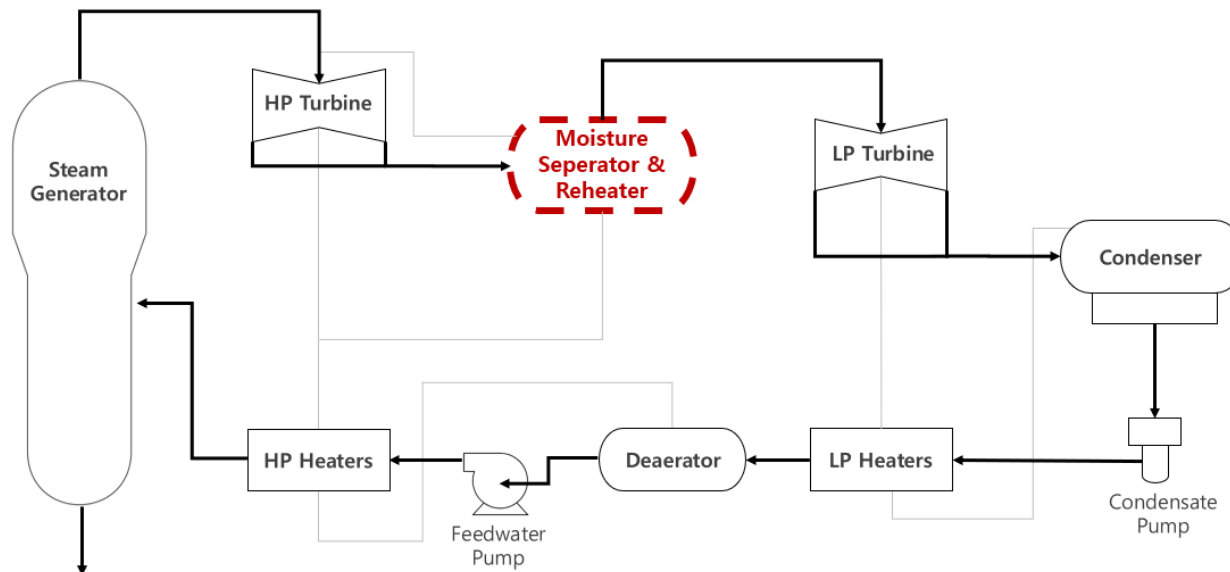
### ❖ 화학종 농도 (추기라인 3개)



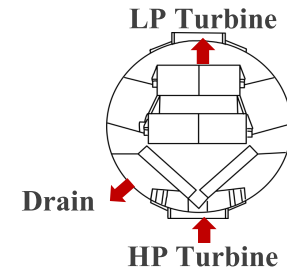
## 3. Moisture Separator and Reheater

### ❖ MSR 입력 조건

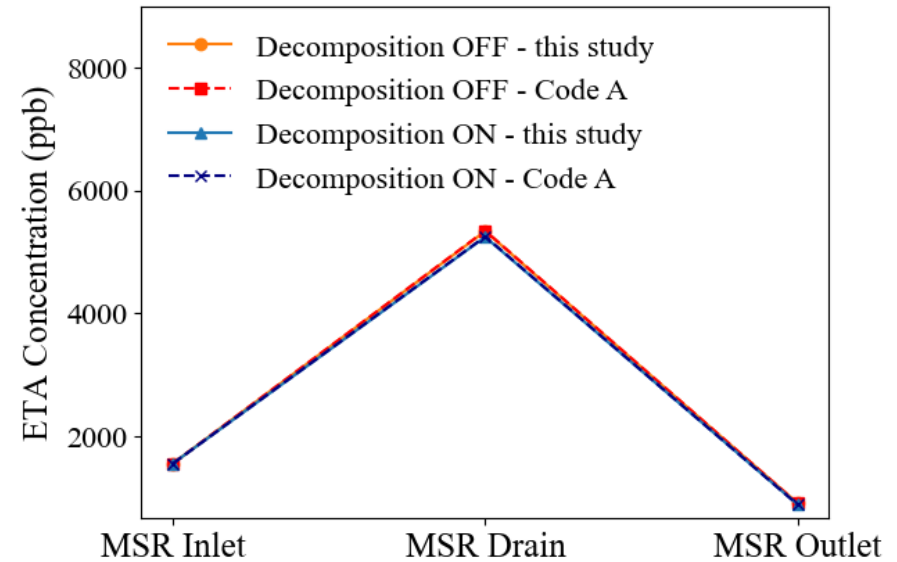
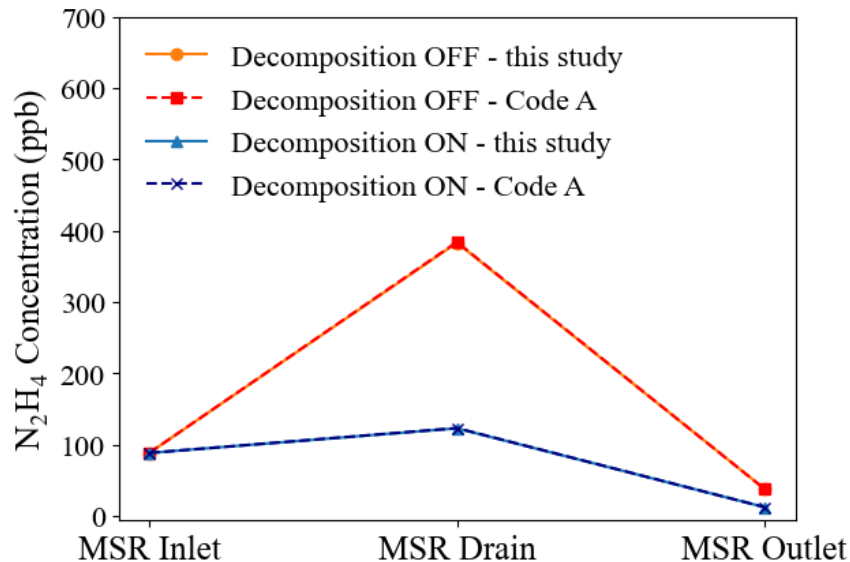
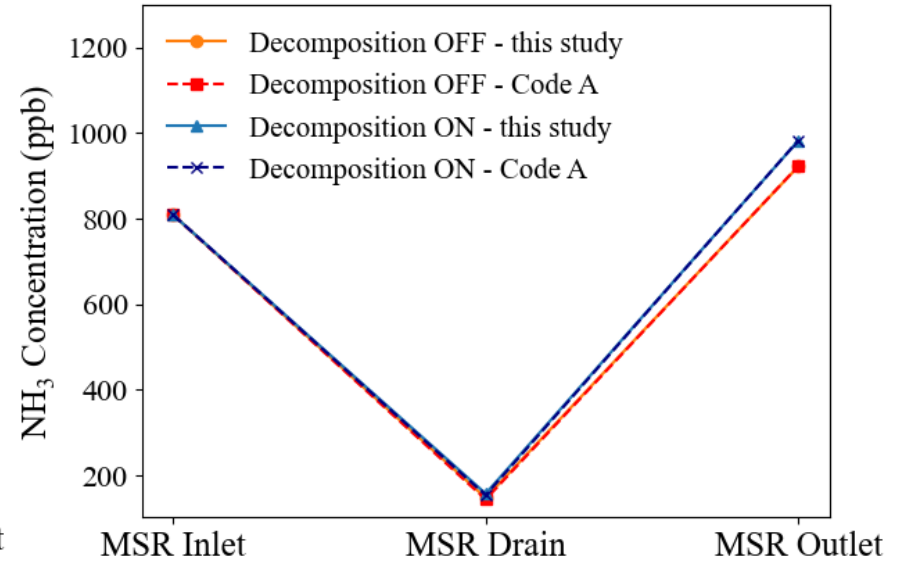
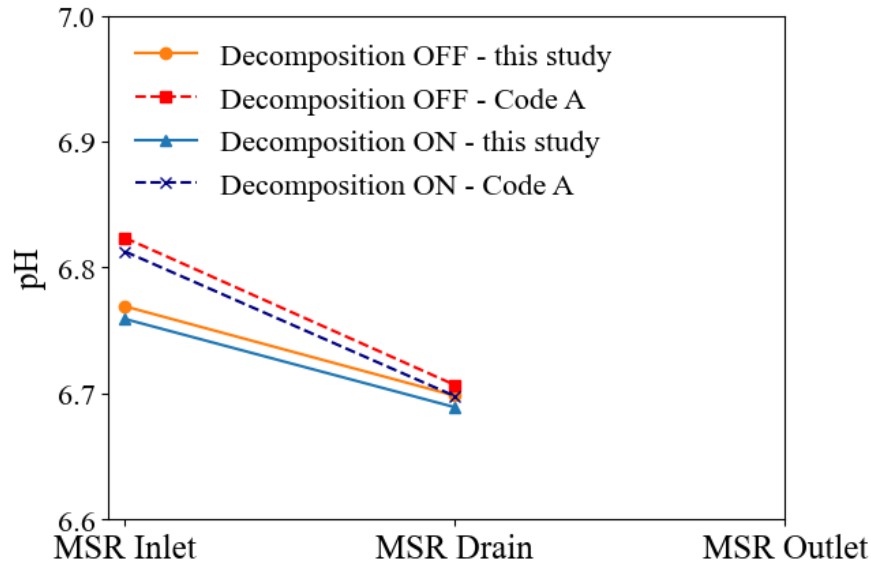
- MSR 온도 : 190.6 °C
- 입구 질량 유량 : 575.81 kg/s
- Drain 질량 유량 : 84.07 kg/s
- MSR 입구 농도 : NH<sub>3</sub> 808.2 ppb, N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 88.1 ppb, ETA 1550.12 ppb
- Carryover : 0.25%
- Carryunder : 0.25%
- Decomposition loss fraction : L<sub>N<sub>2</sub>H<sub>4</sub></sub> 68%, L<sub>ETA</sub> 2%
- Decomposition mass yield : k<sub>N<sub>2</sub>H<sub>4</sub></sub> 0.56 g/g, k<sub>ETA</sub> 0.62 g/g



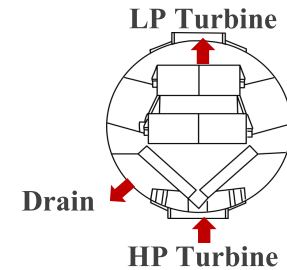
## 3 . Moisture Separator and Reheater



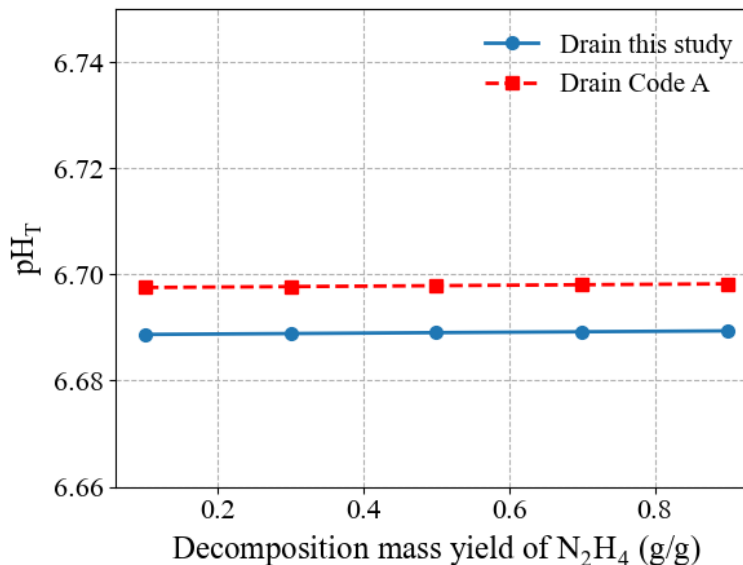
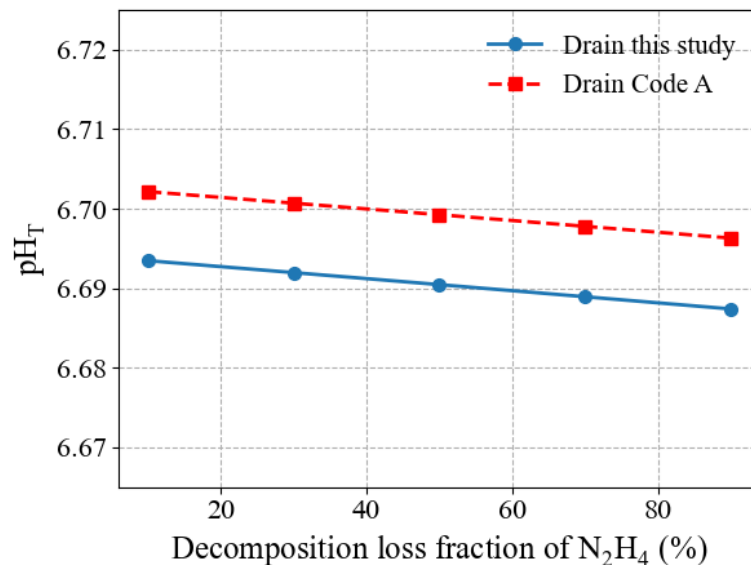
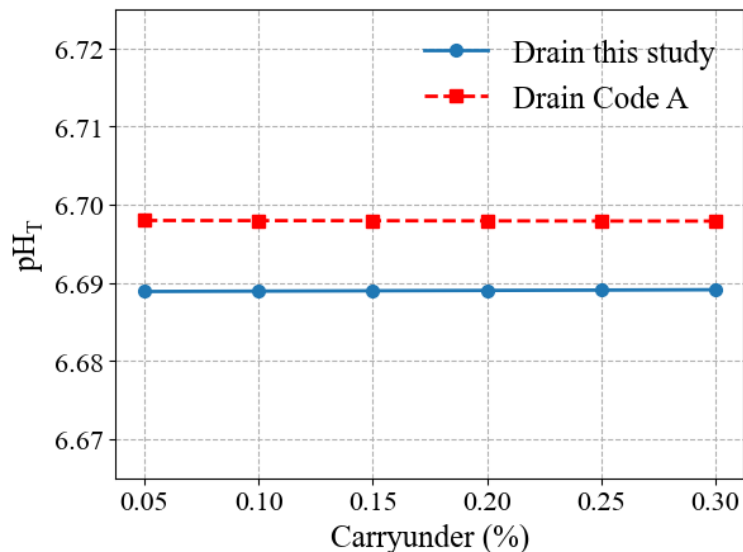
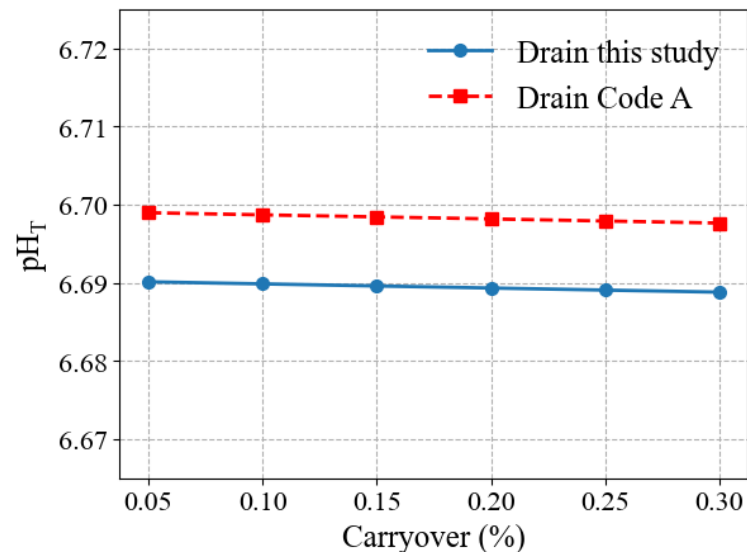
### ❖ MSR 결과



## 3. Moisture Separator and Reheater



❖ 주요 운전 변수 변화에 따른  $pH_T$



# 1. Summary & Future Work

## ❖ Summary

- 이온화 및 비등(상분배) 기반의 평형 모델을 구성하고, 이를 PWR 2차 계통 주요 기기 (RSG, 터빈, MSR)의 정상상태 수화학 조건 예측에 적용함.
- RSG와 MSR의 경우, 열분해 유무에 따른 위치별 농도 계산 결과가 상용코드와 일치하였으며, 주요 운전변수에 대한 민감도 분석에서도 상용코드와 동일한 변화 경향성을 확인하였음.
- 휘발도가 높은  $\text{NH}_3$ 는 주증기 및 저압터빈 측으로 우선적으로 분배되었으며, 상대적으로 휘발도가 낮은  $\text{N}_2\text{H}_4$  및 ETA는 블로우다운 및 배수 측에서 높은 농도를 보여 상분배 특성이 일관되게 반영되었음.
- 터빈의 경우, 추기라인 수에 따른 농도 변화 경향은 상용 코드와 일치하였으나, 최종 추기 라인에서 오차가 다소 증가함. 다만 모든 위치에서 최대 상대오차는 1.2% 이내이며, 후단부의 오차 상승은 편차 누적 영향으로 판단됨.

## ❖ Future Work

- 기타 핵심 기기 (복수기·탈기기·급수가열기 등) 모델링 수행
- 해석 대상 화학종 추가 및 화학 반응 모델 확장 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  등)
- 기기별 모델을 통합한 2차 계통 통합 모델 구축



감 사 합 니 다