

## 핵융합 공정주기에서의 생산 계획 최적화

이서영\* · 하진국\*\* · 이인범\* · 이의수\*\*†

\*포항공과대학교 화학공학과  
 37673 경북 포항시 남구 청암로 77  
 \*\*동국대학교 화공생물공학과  
 04620 서울특별시 중구 필동로 1길 30  
 (2020년 5월 23일 접수, 2020년 6월 11일 채택)

## Mathematical Modeling of Scheduling Problems for the Fusion Fuel Cycle

Suh-Young Lee\*, Jin-Kuk Ha\*\*, In-Beum Lee\* and Euy Soo Lee\*\*†

\*Department of Chemical Engineering, Pohang University of Science and Technology,  
 77 Cheongam-Ro, Nam-gu, Pohang, Gyeongbuk, 37673, Korea  
 \*\*Dongguk University, 30, Pildong-ro 1-gil, Jung-gu, Seoul, 04620, Korea  
 (Received 23 May 2020; accepted 11 June 2020)

### 요 약

본 연구에서는 화학공정 최적화에 사용되는 생산계획최적기법을 도입하여 핵융합 공정에서의 삼중수소 재고량을 최소로 유지하는 수학적 모델을 구축하여 최적 운전 시나리오를 도출하였다. 핵융합 발전을 위한 공정 중 연료주기 공정(fuel cycle)은 반응연료인 중수소와 삼중수소를 저장 하고 공급하는 시스템과 핵융합 반응 배가스로부터 이를 회수 및 분리하는 세부 공정들로 구성되어 있다. 이들 공정들은 삼중수소가 방사성 물질이라는 것을 제외하면 대부분 촉매반응과 분리공정으로 이루어져 화공플랜트에 적용된 기술과 유사한 특성이 많아 화학공정에 사용되는 스케줄링 기법을 통해 최적 운전 시나리오를 도출 가능하다. 본 연구에서는 핵융합로의 다양한 장치의 특성을 반영해서, 펌프내부의 삼중수소량을 최소로 하는 최적 재생주기를 구하고, 구해진 최적 재생주기 결과를 반영하여 후단의 트리튬 플랜트에서의 최적 운전 시나리오를 확인해 보았다. 구축된 모델은 실제 토카막 시나리오에 적용되어 ITER 연료주기 내 공정의 연료흐름 및 밸런스 분석에 활용되었다.

**Abstract** – In this study, a mathematical model for optimal operation of the fusion fuel cycle is developed based on scheduling approach. The fusion fuel cycle consists of a system for storing and supplying deuterium and tritium, and receiving and separating process after the fusion reaction. Except that tritium is a radioactive material, most of these processes consist of catalytic reactions and separation process. For these reasons, it is possible to apply scheduling approach which is also widely utilized to chemical plants to derive the optimal operating scenarios. The developed model determined the optimal regeneration cycle to minimize the amount of tritium inside the vacuum pumps. Based on the characteristics of various device in the fusion reactor, the optimal tritium plant operation scenario is evaluated. The formulated model was applied to the actual tokamak scenario and utilized to analyze the fuel flow and balance of ITER fuel cycle.

**Key words:** Scheduling, ITER, Tritium Plant, State-Task Network, Optimization

### 1. 서 론

핵융합은 우라늄 연료주기를 이용하는 핵분열의 원자력 발전과 달리 지구상에 무한대로 존재하는 자원인 수소를 이용하여 에너지

를 창출한다. 융합 발전은 인류의 최종적인 에너지원으로 평가 받고 있으며, 국제핵융합실험로(ITER)라는 거대한 프로젝트를 통해 공동으로 연구가 진행되고 있다.

ITER는 크게 핵융합 반응이 일어나는 토카막과, 토카막에 공급하기 위한 핵융합 원료의 저장·분리·공급 계통을 맡은 삼중수소 플랜트로 구성되어 있다. ITER는 방사성 물질인 삼중수소를 사용하며, 수소는 항상 폭발의 위험성을 가지고 있어, 삼중수소의 방출 가능성에 대비한 여러 가지 규제 및 제한요건과 이를 만족시키는 기술개발을 필요로 한다[1]. 따라서 ITER의 핵융합 운전의 안정성 확보를 위해, 엄격한 규제 하에 삼중수소 플랜트 내부의 삼중수소 재

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: eslee@dongguk.edu

‡이 논문은 POSTECH 이인범 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고량이 관리 되어야하며, 삼중수소 재고량을 줄이기 위한 최적 가상 운전 모델링을 구축할 필요가 존재한다.

그러나 핵융합 반응에서 삼중수소의 소모를 정확히 파악하기 어렵고, 마찬가지로 진공용기 벽에 침투된 삼중수소의 양을 정량적으로 예측하기 어려운 문제가 존재한다. 따라서, ITER에 투입된 삼중수소의 총량을 관리하여 규제 이하로 관리하기 위해서는 각 장치의 수소 잔여량과 전달량 예측이, 원료 공급과 시스템의 안정성 측면에서 핵심적인 요소이다. 이에, 본 연구는 위의 두 가지 이슈를 해결하기 위해 연료 사이클의 가상 운전 모델을 개발하는데 목적을 두었으며, 시스템의 운전방식 및 변수들의 조건을 분석하여 수학적 모델을 통해 최적 운전결과를 도출하고자 한다. 제시하는 모델은, ITER 연료주기 내 전 공정의 연료흐름 및 밸런스 분석을 통해 앞서 언급한 핵융합 운전의 안정성 확인뿐만 아니라, 연료주기 내 운전 조건 및 운전방식 변경 등의 불확실성에 대한 다양한 시나리오 해석 및 분석에 대한 정보를 제공할 수 있으며, 제어시스템 개발에도 도움이 될 것이다.

## 2. 이론적 배경

### 2-1. 화학 공정최적화의 정의

화학공정설계에서 생산계획 최적화란 현재 가지고 있는 장치, 인력, 시간, 유틸리티와 같은 자원을 가장 효율적으로 운영 하여 주어진 시간동안 생산량의 증대 또는 경제적인 이익을 최대화시키는 문제를 말한다[2].

특히, 생산계획 최적화 기법은 화학공정 중에서도 회분식 공정을 대상으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 이는 회분식 공정에서 생산하고 하는 제품이 다양하고 그에 따른 운전조건이 다르기 때문에, 각 제품마다 장치에서의 조업 시간, 작업 전환시 다음 작업에 필요한 준비 시간, 제품을 각 단계로 이송하는데 걸리는 이송 시간 등이 서로 상이하여, 이들 제품을 어떤 순서로 생산하느냐, 저장조 운영은 어떤 방식으로 하느냐에 따라 주어진 시간 내에 생산 할 수 있는 제품의 양과 조업 시간이 크게 달라지기 때문이다.

특히, 일정계획(Scheduling) 문제의 경우 생산 계획 단계에서 정해진 생산 목표를 달성하기 위해 비교적 짧은 시간동안 각 제품의 생산 순서를 결정하고 사용하게 될 장치를 할당하는 문제를 다루게 된다[3]. 이때, 대상 공정의 생산량 증대, 생산에 걸리는 시간 단축, 비용 절감 등의 목표를 가지고, 공정의 장치 구성과 운전 조건 등을 바탕으로 수학적 모델을 구축하게 된다. 구해진 해 즉, 생산일정계획은 Gantt-Chart 형태로 표현된다.

### 2-2. 공정최적화 도입 필요성

ITER의 핵융합 운전은 20시간 동안 반응이 일어나는 토카막에서 batch 형태의 핵융합 반응 실험을 하는 ‘Burn-and-well’ 운전과 나머지 4시간 동안은 다음 날을 위해 각 시스템 점검을 하는 ‘System Checking’ 운정으로 구성된다. 또한 토카막의 운전방식에 따라 Inductive (400sec burn), Hybrid (1000sec burn), 및 Non-inductive (3000secburn)로 구분되어, 하루에 20회 이상 1회에 30분-200분 이내의 주기로 회분식 운전이 행해진다. 이에 따라 연료주기는 토카막으로 1회 연료공급, 일정 시간 휴지 후 다시 연료공급이 반복되는 방식(Burn-and-dwell)로 진행된다[4].

핵융합 발전을 위한 연료주기(fuel cycle)공정은 반응물질인 중수

소와 삼중수소를 저장 및 공급하는 시스템과 핵융합 반응 후 배가스로부터 이를 회수하여 정제 및 분리 하는 세부공정등으로 구성되어 있다. 이들 회수, 분리 및 정제 공정들은 삼중수소가 방사성 물질이라는 점을 제외하면 대부분 촉매 반응과 분리 공정으로 이루어져 있어 화공 플랜트에 적용된 기술과 유사한 특성이 많다. 또한 burn-and-dwell을 통한 반복적(cyclic)하게 운전되는 특성을 비롯 생산최적 기법을 통하여 안전기준을 만족하며 최적 장치 구성 및 운전 조건등을 도출 할 수 있게 된다.

### 2-3. 공정최적화 도입 대상

본연구에서는 연료주기의 안정적인 수소연료의 공급 및 저장을 위한 운전계획 및 각 토카막 운전 모드에서 한 사이클 내의 각 장치의 내부 재고량 변화량을 알아보기 위하여, 수학적 모델을 구축하였다. ITER의 Vacuum System (VS)는 연료주기의 한 부분을 구성하며 Torus Cryopump (TCP)와 roughing pump를 포함한 시스템으로 핵융합이 일어나는 토카막 후단에 위치하며 토카막을 진공에 가까운 압력을 유지하고, 배가스를 삼중수소 플랜트로 배출하는 기능을 담당한다 (Fig. 1). TCP는 극저온 면에 가스들이 응축 또는 흡착되는 원리를 이용한 고진공 펌프로써, 높은 배기 속도와 고진공 환경을 제공하는 것이 특징이다. 크라이오펌프는 일정 기간이 지나면 내부에 쌓인 물질을 배출하는 재생과정이 필요하며, ITER의 TCP의 경우 4단계의 재생과정(He 배출, Warm-up, Evacuation, Cool-down)을 거쳐 후단 공정인 TEP으로 배출되게 된다.

Tokamak Exhaust Process (TEP)는 VS를 거친 Tokamak의 배가스를 받아들여 수소동위원소들을 molecular sieve 등을 사용하여 분리하는 역할을 한다. Isotope Separation System (ISS)는 cryogenic distillation column으로 구성되어 있으며, 수소 동위원소들의 분리를 담당한다. 분류탑 특성상, 연료주기 중 가장 많은 기체-액체상태의 삼중수소를 보유하고 있으며(max 700g), 그 보유량을 최소화 하는 것이 연료주기 모델링의 핵심이다[5]. 각 분리된 연료는 Storage Delivery System(SDS) 내의 Buffer Vessel (BV)로 이송·저장되며 tokamak 연료 필요조건에 따라 Fuelling System (FS)로 이송된다. 이때 각각의 조성에 따라 삼중수소 주로 하는 연료라인과, 중수소를 주로 하여 토카막으로 공급하 연료라인이 존재한다. 이렇게 조성에 따라 삼중수소 동위 원소들을 분리·저장하는 이유로는 토카막에서 반응하는 수소 동위원소의 양이 매우 미량이기 때문에, 배출된 가스를 다시 분리하여 재활용을 통해 연료를 효과적으로 사용하기 위함이다[6]. 토카막에서 미반응된 삼중수소와 중수소 및 반응 생성가스 등은 Vacuum System 에서 회수 되어, 후단의 삼중수소플랜트의 TEP, ISS, SDS를 순차적으로 거쳐 다시 토카막으로 공급된다[7]. 각 토카막 운전 방식에 따른 RU, FT, RD phase의 Fuelling

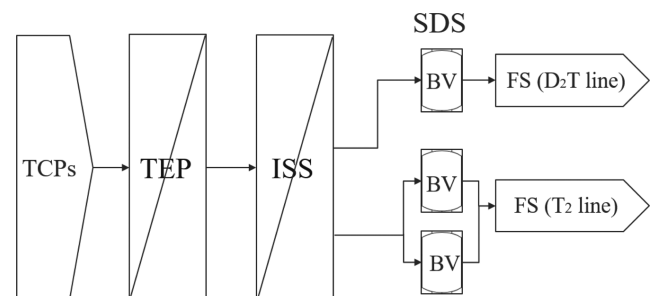


Fig. 1. System Scope: Fusion Fuel Cycle.

공급조건 및 그때의 SDS BV에서 요구하는 조성비는 해당 논문 값을 참고했다[8].

### 3. 생산 최적 계획

삼중수소 플랜트의 최적 운전을 위해 본 연구에서는 회분식 공정 및 연속 공정에서도 사용 가능한 Network-based 기법인 State-task-network (STN)을 구성해 수학적 모델을 구축하였다. STN 기법은 생산 계획 도출을 위해 공정을 네트워크 형식으로 재 표현하는 기법이다[2]. 이 방법은 모든 공정 요소를 두 가지 종류의 노드(state,

task)로 구분한다. State 노드는 공정에 필요한 원료, 중간물질, 생산된 최종 흐름까지 각 물질의 상태를 나타내는 노드이며, Task 노드는 공정 장치를 통해 수행되는 운전 작업을 나타낸 노드이다. STN 기법을 이용한 Scheduling 모델 개발을 위해서는 Table 1과 같은 정보들이 필요로 한다.

Fig. 2은 TCP의 재생공정 최적모델을 위한 state-task-network이다. state에 해당하는 것은 ‘Feed’, ‘Int TCP#’, ‘Int2 TCP#’, ‘Int3 TCP#’, 를 포함하여 총 21가지 물질이 있으며 task에 해당하는 것은 TCP의 재생 프로세스에 따라 반응 후 배가스를 펌핑하는 ‘pump’, 펌핑된 배가스 중에서 헬륨을 분리하는(He-evacuation) ‘He-evac’, 펌프를 히팅하는 ‘Warm-up’, 펌프에 남아있는 나머지 수소 동위원소를 포함한 배가스를 배출하는 ‘Evacuation’, 마지막으로 다시 펌핑 할 준비를 위해 ‘Cool-down’ task로 구분된다.

Fig. 3는 ISS의 내부 수소 인벤토리 최소화화를 위한 삼중수소 플랜트의 state-task-network이다. state에 해당하는 것은 ‘VRS’, ‘Int TEP’, ‘DS’, 를 포함하여 총 13가지 물질이 있으며 task에 해당하는 것은 TEP에서 이루어지는 ‘TEP’와 TEP를 거친 연료를 ISS로 받아들이는 역할을 하는 ‘Sep TEP’ 그리고 받아들이는 연료를 SDS의 각 BV에 전달하는 ‘D2 Fuel’, ‘T2 Fuel’ 이 존재한다. 그리고 SDS의 D2-line BV에서 FS으로 연료를 전달하는 task인 ‘D2 Ramp-up’, ‘D2 Flat-top’, ‘D2 Ramp-down’, 마찬가지로 SDS T2-line BV에서 FS으로 연료를 전달하는 task인 ‘T2 Ramp-up’, ‘T2 Flat-top’, ‘T2 Ramp-down’이 존재한다.

Table 1. Fuel Cycle Scheduling Requirements

Fuel Cycle Process Analysis	Information
	Process Flow Diagram - Equipment connectivity
	Equipment spec. - available units / capacity / flowrate limits
	Operation mode - Batch/continuous / semi-continuous - Non-overlapping / overlapping operation - Zero-wait transfer / Intermediate storage
	Task information - Duration / wait-time / time-gap
	Supply & Demand - Timing / required quantity
	Time horizon

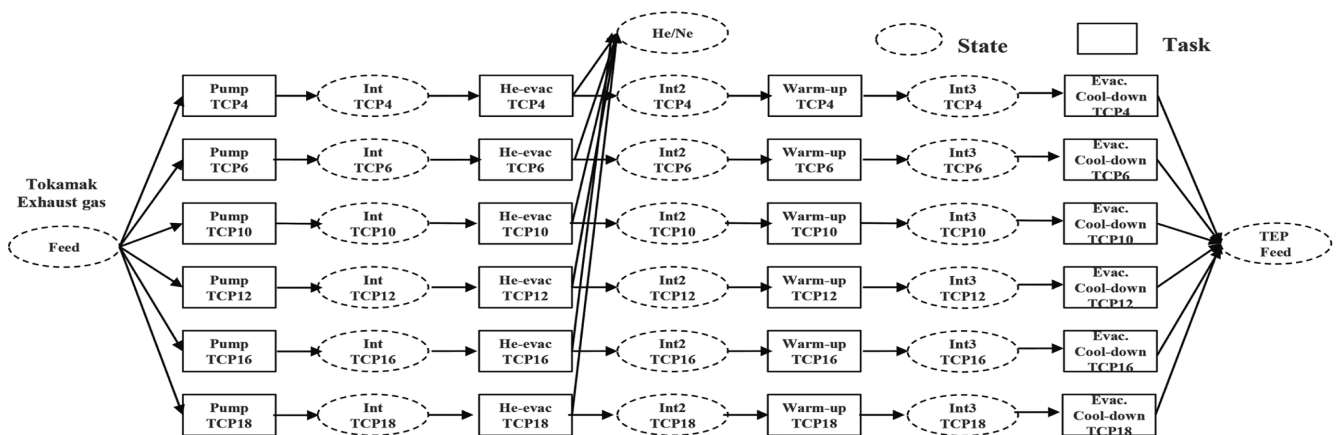


Fig. 2. TCP state-task-network.

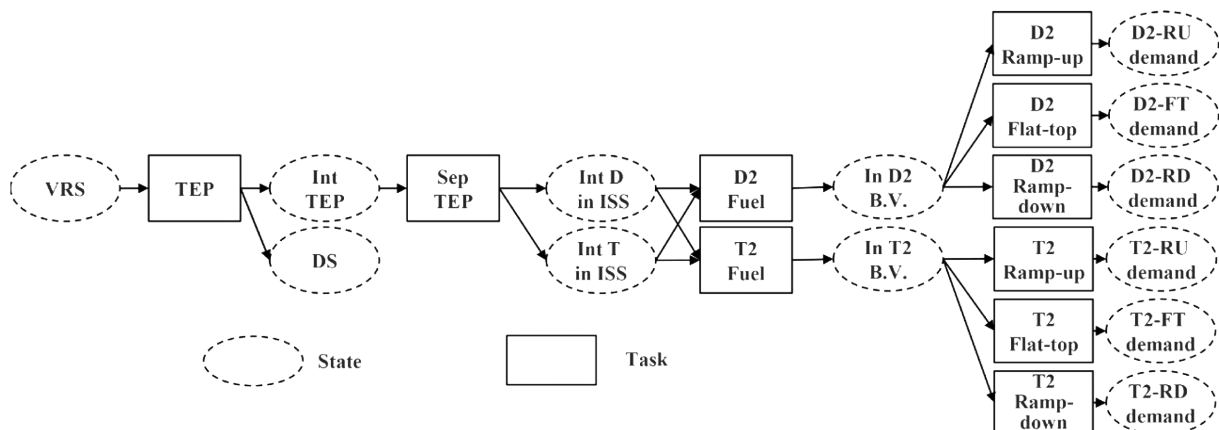


Fig. 3. Tritium Plant System (TEP, ISS, SDS, FS) State-task-network.

#### 4. 수학적 모델

VRS 최적 운전 결과를 반영하여 ISS 내부의 삼중수소 재고량을 최소로 유지하는 연료주기 모델을 구하기 위해 이와 같은 State-task-network를 바탕으로 구축된 연료주기 스케줄링 모델링의 목적 함수와 위 제약조건들을 간단하게 살펴보면 아래와 같다.

##### Phase I

min  $Tmax$  = Maximum Tritium inventory in six TCPs

$$\text{s.t. } \begin{cases} h(y, Y, Z) = 0 \\ g(y, Y, Z) \geq 0 \end{cases} \begin{cases} \text{Mass balance} \\ \text{Allocation constraints} \\ \text{Hydrogen deflagration constraints} \\ \text{Pumping speed constraints} \\ \text{Uniform/Non-uniform distribution constraints} \\ \text{Regeneration constraints} \end{cases}$$

$$y \in \mathbb{R}, Y \in \{0, 1\}, Z \in \mathbb{N}$$

##### Phase II

min  $WorkingT$  = Maximum Tritium working inventory in ISS

$$\text{s.t. } \begin{cases} h(y, Y, Z) = 0 \\ g(y, Y, Z) \geq 0 \end{cases} \begin{cases} \text{Mass balance} \\ \text{Allocation constraints} \\ \text{Batch size constraints} \\ \text{Time constraints} \\ \text{Equipment capacity constraints} \end{cases}$$

$$y \in \mathbb{R}, Y \in \{0, 1\}, Z \in \mathbb{N}$$

#### 4.1. Phase I: Vacuum Roughing System (VRS) 삼중수소 재고량 최소화 운전 계획 도출

ITER의 진공시스템은 토카막의 진공 부피를 각 진공 펌프 시스템으로 배출하고 모든 펌핑 가스를 삼중수소 플랜트로 배출하는 기능을 담당하며, 또한 진공시스템의 삼중수소 저장 한도는 언제든지 모든 펌프에 저장되는 삼중수소 최대 총량은 180 g를 초과해서는 안 된다[9]. 그중 토러스 극저온 펌프(TCP)는 토카막에서 배출되는

배가스를 펌핑하는 역할로, 토카막 배출가스는 진공 펌프를 이용하여 대기압에서 교차압력 10 Pa로 배출되며, 또한 토카막에서 진단용 헬륨을 제거하여 전체 프로젝트 일정에서 허용된 시간 단위에서 누수 테스트를 실행하기 위해서 24시간 안에 배출되어야 한다. 토로스 극저온펌프는 삼중수소의 인벤토리를 최소화하기 위해 펌프는 일정한 패턴으로 작동되며, 주어진 펌프의 경우 최소 지속 시간 150 초, 4회의 재생단계가 있으며, 연속 펌프의 재생은 최소 150초만큼 엇갈리게 작동한다[10]. 이러한 운전패턴에서 4 개의 펌프가 주어진 시간에 펌핑되고, 펌핑운전을 하지 않는 나머지 펌프가 재생단계를 운전한다. 따라서 펌프는 펌핑을 멈추고 150초마다 재생을 시작하며, 동시에 재생된 펌프가 다시 펌핑을 시작한다. 본 수학적 모델에서는, VS내의 TCP 삼중수소 재고량을 최소화 하는 스케줄링 모델을 제시하는 것으로 한다.

TCP 운전에서 있어서 가장 중요한 제약조건은 다음과 같다.

- Pumping Speed,
- Pumping Capacity
- Tritium Inventory
- Deflagration risk

Pumping Speed에 있어서는 burn-phase에 있어서 최소 molecular flow pumping speed가  $\sim 65 \text{ m}^3/\text{s}$  이상 되어야 하며, 따라서 4개 이상의 펌프가 burn-phase에서 운전되어야 한다[11]. 삼중수소 저장 한도는 언제든지 모든 펌프에 저장되는 삼중수소 최대 총량은 180 g를 초과해서는 안 된다. 또한 TCP내의 수소 재고량은  $1.5 \text{ mol H}_2/\text{m}^3$ 를 넘기지 않는 것으로 한다 [11]. ITER의 TCP 진공펌프는 총 6로 가정하였으며, 펌프 포트 위치는 #4, #6, #10, #12, #16, #18로 가정하였다. 본 가상 운전 모델은 [2]모델을 기반으로 개발하였으며, 기존의 모델에서 필수적으로 만족시켜줘야 할 아래 조건들을 반영하였다[12].

- Tokamak  $\rightarrow$  VRS 수소 연료 공급 시기, 공급량, 조성
- TCP 안전 기준에 따른 장치별 삼중수소 최대 저장량
- TCP 안전 기준에 따른 장치별 수소 최대 저장량

수학적 모델을 구축하기 위해, 상용 프로그램인 GAMS를 사용하여 Mixed Integer Linear Program (MILP)로 본 모델을 구축하였으며, solver로는 CPLEX을 사용하였다.

$$Tmax \geq F_{j,n} \quad \forall j, n \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} wv_{i,n} \leq 1 \quad \forall i, n \quad (2)$$

Eq. (1)과 Eq. (2)는 각각 VRS의 삼중수소의 최고 인벤토리를 나타내는 식이며, 각 TCP는 한 time point에서 최대 한가지 task만 수행 가능하다는 제한조건이다.

$$\begin{aligned} ST_{s,n} + \sum_{j \in J_s} F_{j,n} &= ST_{s,n-1} + \sum_{j \in J_s} F_{j,n-1} \\ &+ \sum_i \rho_{i,s}^p B_{i,n-dur_i} - \sum_i \rho_{i,s}^c B_{i,n-dur_i} \quad \forall s, n \end{aligned} \quad (3)$$

$$F_{j,n} = F_{j,n-1} + \sum_{i \in I_j} \rho_{i,s}^p B_{i,n-dur_i} - \sum_{i \in I_j} \rho_{i,s}^c B_{i,n-dur_i} \quad \forall j \in J_s, n \quad (4)$$

Eq. (3)와 Eq. (4)는 물질수지 식을 나타낸 것이다. 각 시점(time point)  $n$ 에서 물질 재고량  $ST_{s,n}$ 은 다음과 같이 나타낸다.  $\rho_c, \rho_p (\geq 0)$

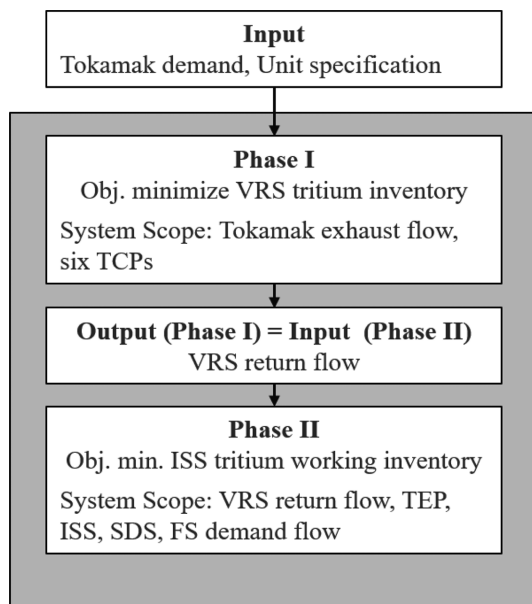


Fig. 4. Fuel Cycle Scheduling.

각각 state  $s$  에서 task  $i$  또는 task  $i$  에서 state  $s$  로의 방향성에 대한 정보 상수이다. Time point  $n$  의 끝 시점의 state  $s$  의 재고량은 production flow,  $\rho_p B_{i,n}$  와 consumption flow,  $\rho_c B_{i,n}$  의 합으로 계산된다. 단, 첫번째 time point  $n1$  에서는 지난시점에서 생산된 양이 없으므로, 초기량  $ST0$  (parameter)에서 생산을 위해 소비된 양을 빼주는 것으로 한다.  $I_s$  는 state  $s$  를 생산하거나 사용하는 모든 task  $i$  를 의미하는 것으로 한다.

$$V_i^{\min} wv_{i,n} \leq B_{i,n} \leq V_i^{\max} wv_{i,n} \quad \forall i \in I_j, \quad n \quad (5)$$

$$F_j^{\min} \leq F_{j,n} \leq F_j^{\max} \quad \forall s, \quad j \in J_s, \quad n \quad (6)$$

Eq. (5)과 Eq. (6)은 각 장치의 최소/최대 batch크기에 대한 제약 조건이다. 즉, 임의의 time point  $n$ 에서 task  $i$ 가 조업할 경우  $wv_{i,n}$ 는 1의 값을 갖게 되어, 이때의 조업하는 양  $B_{i,n}$ 은  $B_{\max_i}$ 와  $B_{\min_i}$ 사이 값에 해당한다. 만약 Eq. (5)에서 이진변수가 0의 값을 갖을 경우 해당 시점에서 해당 task의 물질전달은 일어나지 않는다.

$$TF_{j,n} = TF_{j,n-1} + \sum_{i \in I_j} \rho_{i,s}^T \rho_{i,s}^p B_{i,n-dur_i} - \sum_{i \in I_j} Evac_{i,n-dur_i} \quad \forall j, \quad n \quad (7)$$

Eq. (7)은 TCP에서 수소동위원소가 pumping에 의해 내부 재고량이 증가하고 evacuation에 의해 감소하는 것을 나타낸다.  $TF_{j,n}$ 은 time point  $n$ 에서 장치  $j$ 에 있는 삼중수소 재고량을 의미한다.  $Evac_{j,n}$ 은 한 개의 TCP에서 evacuation 시 배출되는 삼중수소 량이다.

$$Evac_{i,n} \leq \beta_{i,n} wv_{i,n} \quad \forall i \in I^{Evac} \quad (8)$$

Eq. (8)은  $Evac_{j,n}$  작업시 최대 배출되는 삼중수소량은 장치 최대 유량  $\beta_{i,n}$ 와 한 time point간의 간격 (100s)를 넘기지 않는 것으로 한다. Eq. (8)에서 이진변수가 0의 값을 갖을 경우 해당 시점에서 해당 evacuation에 의한 물질전달은 일어나지 않는다.

$$\sum_{i \in I^{pump}} wv_{i,n} \geq NP \quad \forall n, n \in \text{fueling} \quad (9)$$

Eq. (9)는 할당 제한조건식으로 이진변수  $wv_{i,n}$ 을 사용하여 VS의 각 6개의 TCP 중 pumping speed를 만족하기 위하여, 최소 NP개 만큼의 펌프가 운전되어야 한다는 조건을 나타낸다.

$$\sum_{i', i' \in IJ} \sum_{n' \geq n}^{n' \leq n + dur_i - 1} wv_{i',n'} - 1 \leq M(1 - wv_{i,n}) \quad \forall i, i \in IJ, \quad j, \quad n \quad (10)$$

Eq. (10)은 같은 장치  $j$ 에서 운전되는 task는 이전 task가 종료되기 전에 후단 task가 시작될 수 없다는 제한조건을 의미한다. 여기서  $dur_i$ 는 task  $i$ 의 batch time을 의미한다.

#### 4.2. Phase II: ISS의 내부 수소 인벤토리 최소화를 위한 삼중수소 플랜트 Scheduling 모델

본 가상 운전 모델은 모델은 [13] 모델을 기반으로 개발하였으며, 기존의 모델에서 필수적으로 만족시켜줘야 할 아래 조건들을 반영하였다[8].

- SDS BV  $\rightarrow$  Torus 수소 공급 타이밍, 공급량, 조성
  - VRS  $\rightarrow$  TEP 수소 공급 타이밍, 공급량, 조성
  - 각 장치 별 최소/최대 저장량
- 수학적 모델을 구축하기 위해, 상용 프로그램인 GAMS를 사용

하여 Mixed Integer Nonlinear Program (MINLP)로 본 모델을 구축하였으며, solver로는 Baron을 사용하였다.

장치내 재고량은 크게 working inventory와 base inventory로 나눌 수 있으며, base inventory는 장치가 그 역할을 수행하기 위해 최소로 있어야 하는 재고량을 의미한다. 예를 들어, VRS의 경우 base inventory가 0에 수렴하지만, ISS의 경우 증류탑으로 연료주기내 가장 많은 삼중수소 재고량을 보유하게 된다. ISS 내부의 기체·액체상태의 삼중수소는 매우 반응성이 크므로, 다음 스케줄링 모델은 한 사이클 내의 ISS 내부의 삼중수소 재고량을 최소화 하는 목적함수로 갖는다. 결정변수로는 연료 전달 프로파일을 갖고 이 연료흐름 패턴, 유속, 타이밍을 포함한다.

$$\text{Min } WorkingInv = Tmax - Tmin$$

목적함수에서  $Tmax$ 와  $Tmin$ 은 각각 한펄스 내에서 삼중수소의 최대/최소 인벤토리량을 의미한다. 즉 최대값과 최소값 사이값에 해당하는 working inventory가 정의되며, 목적함수로 한펄스내에 working inventory의 값을 최소화 하는 것을 목표로 한다.  $Tmax$ 와  $Tmin$  값을 구하기 위해 아래와 같은 Eq. (11)과 Eq. (12)가 사용된다.

$$Tmax \geq F_{j,n} \quad \forall j, \quad n \quad (11)$$

$$Tmin \leq F_{j,n} \quad \forall j, \quad n \quad (12)$$

Eq. (13)은 할당 제한조건식으로 이진변수  $wv_{i,n}$ 을 사용하여 SDS의 각 BV이 최대 한가지 상태의 연료공급(Ramp-up, Flat-top, Ramp-down)이 가능하다는 조건을 나타낸다. 이진변수  $wv_{i,n}$ 은 임의의 time point  $n$ 에서 task  $i$ 가 운전될 경우 1의 값을 가지며, 그렇지 않은 경우 0의 값을 갖게 된다.

$$\sum_{i \in I^{BVtoFS}} wv_{i,n} \leq 1 \quad \forall i, \quad n \quad (13)$$

Eq. (14)와 Eq. (15)는 물질수지 식을 나타낸 것이다. 각 시점 (time point)  $n$ 에서 물질 재고량  $ST_{s,n}$ 은 다음과 같이 나타낸다.  $\rho_s \rho_p$  ( $\geq 0$ ) 각각 state  $s$  에서 task  $i$  또는 task  $i$  에서 state  $s$  로의 방향성에 대한 정보 상수이다. Time point  $n$ 의 끝 시점의 state  $s$ 의 재고량은 production flow,  $\rho_p B_{i,n}$ 와 consumption flow,  $\rho_c B_{i,n}$ 의 합으로 계산된다. 단, 첫번째 time point  $n1$ 에서는 지난시점에서 생산된 양이 없으므로, 초기량  $ST0$  (parameter)에서 생산을 위해 소비된 양을 빼주는 것으로 한다.  $I_s$ 는 state  $s$ 를 생산하거나 사용하는 모든 task  $i$ 를 의미하는 것으로 한다.

$$ST_{s,n} + \sum_{j \in J_s} F_{j,n} = ST_{s,n-1} + \sum_{j \in J_s} F_{j,n-1} + \sum_{i \in I_s} \rho_{i,s}^p B_{i,n-1} - \sum_{i \in I_s} \rho_{i,s}^c B_{i,n-1} \quad \forall s, \quad n \quad (14)$$

$$F_{j,n} = F_{j,n-1} + \sum_{i \in I_j} \rho_{i,s}^p B_{i,n-1} - \sum_{i \in I_j} \rho_{i,s}^c B_{i,n-1} \quad \forall j \in J_s, \quad n \quad (15)$$

Eq. (16)과 Eq. (17)은 각 장치의 최소/최대 batch크기에 대한 제약 조건이다. 즉, 임의의 time point  $n$ 에서 task  $i$ 가 조업할 경우  $wv_{i,n}$ 은 1의 값을 갖게 되어, 이때의 조업하는 양  $B_{i,n}$ 은  $B_{\max_i}$ 와  $B_{\min_i}$ 사이 값에 해당한다. 만약 Eq. (16)에서 이진변수가 0의 값을 갖을 경우 해당 시점에서 해당 task의 물질전달은 일어나지 않는다.

$$V_i^{\min} wv_{i,n} \leq B_{i,n} \leq V_i^{\max} wv_{i,n} \quad \forall i \in I_j, n \quad (16)$$

$$F_j^{\min} \leq F_{j,n} \leq F_j^{\max} \quad \forall s, j \in J_s, n \quad (17)$$

Eq. (18)은 SDS BV에서 FS으로 연료를 공급할 때, 연료 흐름을 일정 유속이상으로 유지시키기 위한 최소 BV 인벤토리에 관한 제약조건이다.

$$F_{j,n} \geq stob_i - M(1 - wv_{i,n-1}) \quad \forall j \in J^{BV}, i \in I_j, n \quad (18)$$

Eq. (19)와 Eq. (20)은 TEP에서 수소동위원소가 기타 기체와 분리되는 task는 반드시 VRS의 regeneration 스케줄안에 일어나야 한다는 것을 의미한다. 또한 SDS BV에 저장되어 있는 연료가 FS로 전달되는 타이밍 또한 토카막의 Ramp-up, Flat-top, Ramp-down 시간내에 이루어 져야 하는 것을 의미한다.

$$T_{i,n}^s \geq starttime_i - H(1 - wv_{i,n}) \quad \forall i \in I^{fix} \quad (19)$$

$$T_{i,n}^f \leq finishtime_i + H(1 - wv_{i,n}) \quad \forall i \in I^{fix} \quad (20)$$

Eq. (21) 부터 Eq. (25)는 task의 시작시간과 종료시간에 대한 제한조건이다.

$$T_{n+1} \geq T_n \quad \forall n \quad (21)$$

$$T_n \geq T_{i,n}^s - H(1 - wv_{i,n}) \quad \forall i, n \quad (22)$$

$$T_n \leq T_{i,n}^s + H(1 - wv_{i,n}) \quad \forall i, n \quad (23)$$

$$T_{n+1} \geq T_{i,n}^f - H(1 - wv_{i,n}) \quad \forall i, n \quad (24)$$

$$T_{n+1} \leq T_{i,n}^f + H(1 - wv_{i,n}) \quad \forall i, n \quad (25)$$

Eq. (26)와 Eq. (27)은 task의 시작시간과 종료시간에 대한 제한 조건이다. Eq. (26)는 같은 종류의 task인 경우 time point n+1에서 일어나는 task의 시작시간은 그전 time point n에서 일어나는 종료 시간 이후에 일어나야 됨을 나타낸다. Eq. (27)은 같은 종류의 task i가 끝나는 시간은 task가 시작하는 시간과 소요되는 시간을 합한 것보다 크다는 것을 의미한다[14].

$$T_{i,n}^f \leq T_{i,n}^s + dur_{i,n} + H(1 - wv_{i,n}) \quad \forall i, n \quad (26)$$

$$T_{i,n}^f \geq T_{i,n}^s + dur_{i,n} - H(1 - wv_{i,n}) \quad \forall i, n \quad (27)$$

Eq. (28)와 Eq. (29)는 펄스패턴에 대한 제한조건식이다.

$$T_{i,n}^s \geq Istart_i - H(1 - wv_{i,n}) \quad \forall i, i \in I^{SSIoBV}, n \quad (28)$$

$$T_{i,n}^f \leq Istart_i + H(1 - wv_{i,n}) + dur_i \quad \forall i, i \in I^{SSIoBV}, n \quad (29)$$

이때 pulse의 지속시간  $dur$ 은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다. 지속시간  $dur$ 와 처리량  $rate$ 를 곱해준 값은 전체 task의 batch크기에 해당한다.

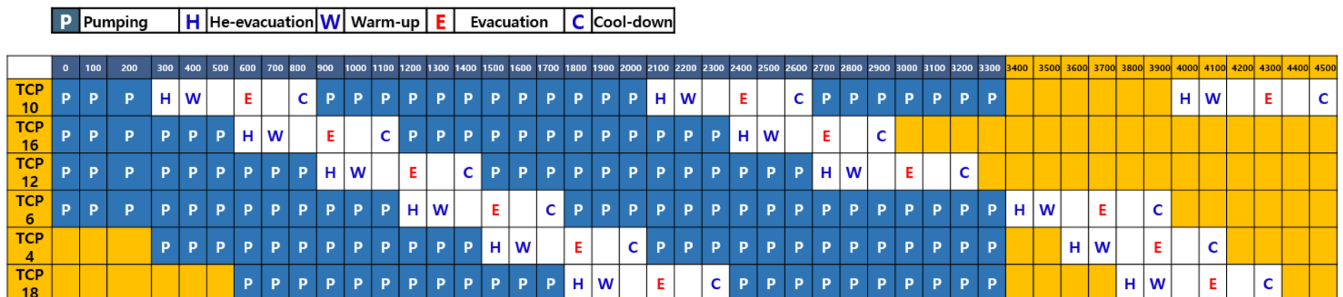


Fig. 5. TCP Regeneration Gantt Chart (Phase I).

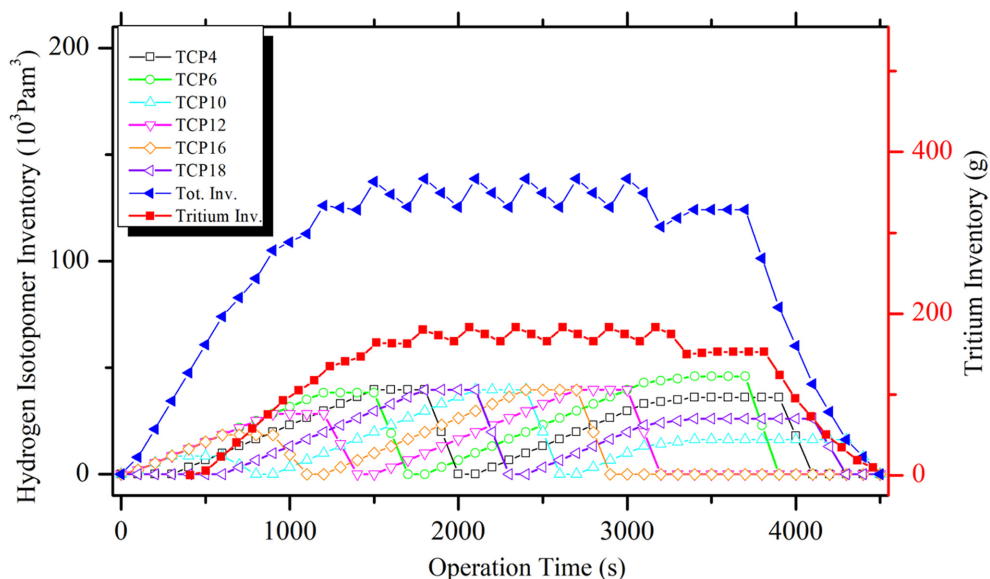


Fig. 6. TCP Inventory: Non-inductive Operation.

$$dur_i rate_i = \sum_n B_{i,n} \quad \forall i, i \in I^{ISStoBV}, n \quad (30)$$

### 5. 가상 운전 결과

개발된 수학적 모델(Phase I)을 통해 구한 TCP의 최적 재생주기 결과는 Fig. 4와 같다. 6개의 TCP가 순차적으로 재생되며, 이때 운전조건에 따라 Tokamak burn-phase에 4대의 TCP가 펌핑하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5, Fig. 6). 각 TCP는 동일한 양의 Tokamak 배가스를 펌핑하며, 펌핑 후 He-evacuation 및 Warm-up 단계를 거쳐서 Evacuation 재생 단계에서 300초간에 거쳐 후단 공정인 TEP으로 배출된다. Non-inductive Tokamak 운전 공정의 경우 6개의 TCP가

주기적으로 재생되는 것을 확인할 수 있다.

Phase I에서 얻은 VRS 최적 운전 결과를 바탕으로 Phase II에서 ISS 내부 삼중수소 재고량을 최소화 할 수 있는 운전 스케줄을 Phase II에서 도출하였다(Fig. 7, Fig. 8). ISS의 경우 후단의 SDS의 BV의 용량에 의해 해가 정해지는 것을 확인하였다. Fig. 8을 보면 SDS의 D<sub>2</sub>T-line의 BV는 여유가 있는 반면, T<sub>2</sub>-line의 BV는 용량을 만족시키기 위한 최소 BV 유지량을 제외하고 모든 버퍼 용량을 사용하는 것을 확인할 수 있다. SDS의 T<sub>2</sub>-line의 BV가 상대적으로 D<sub>2</sub>T-line의 BV에 비해 작기 때문에, ISS에서 SDS로 연료를 전달하는 타이밍은 SDS T<sub>2</sub>-line의 BV의 용량이 허용되는 시점으로 정해진다.

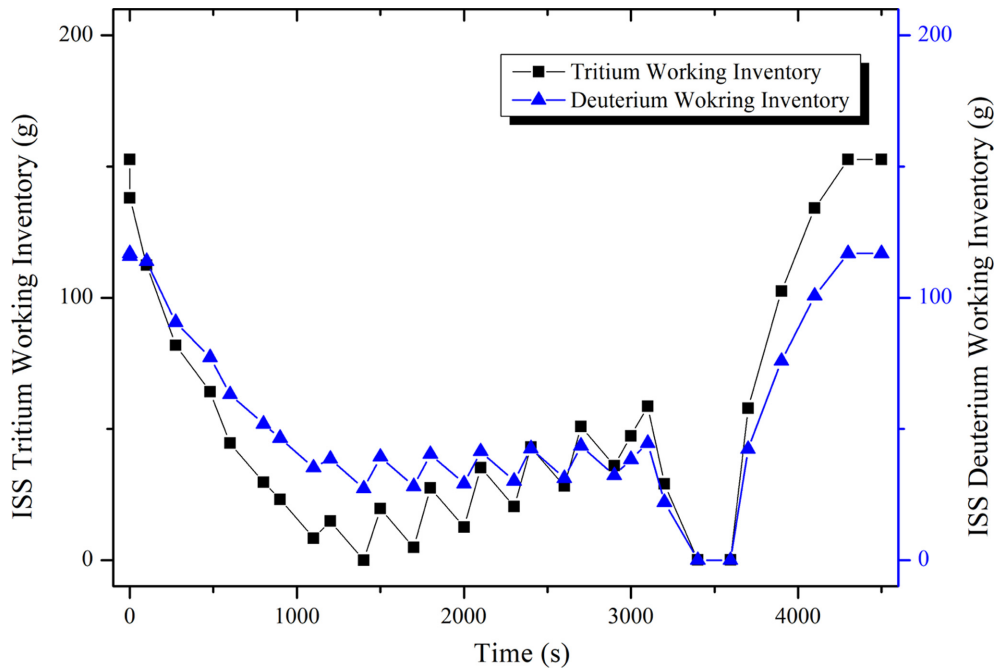


Fig. 7. ISS Working Inventory: non inductive operation mode under high tritium demand.

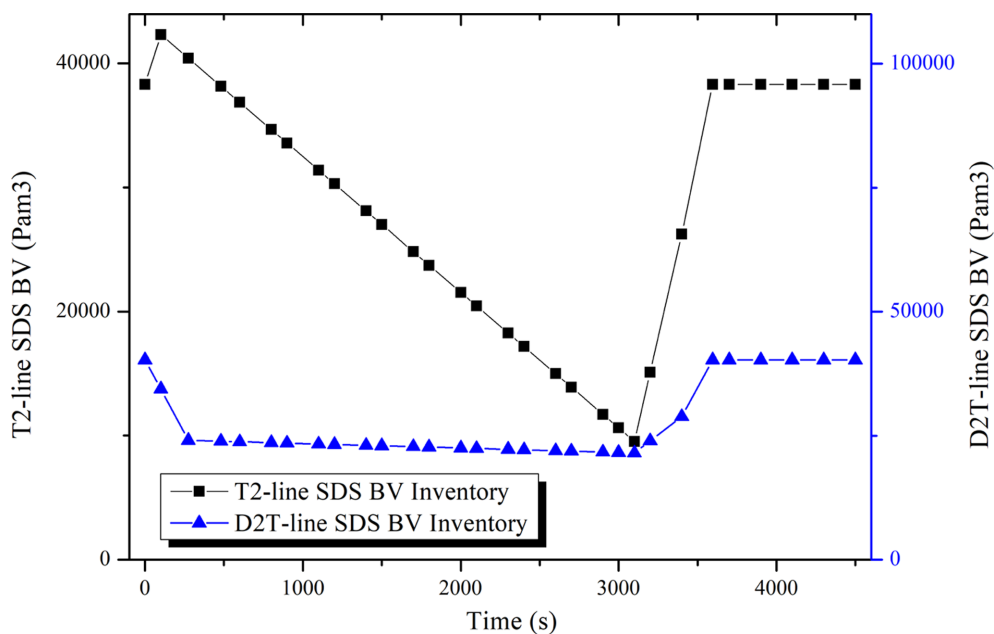


Fig. 8. SDS BV Inventory: non-inductive operation mode under high tritium demand.

## 6. 결 론

지금까지 ITER 핵융합 연료주기 공정에서 Scheduling 기법을 도입하여 최적 운전 시나리오를 도출하기 위한 수학적 모델에 대해 소개하였다. 앞서 언급한 바와 같이 가상 운전 모델 개발을 통해 ITER 연료주기의 안정적인 운전 및 연료주기 내의 각 장치의 운전 상황, 연료 저장 상태 및 물질 흐름 상태를 확인 할 수 있다. 특히 Phase I에서 VRS 내부의 삼중수소를 최소화 하는 TCP 최적 재생 패턴을 도출하였으며, 이 결과를 바탕으로 Phase II에서 ISS 내부의 삼중수소를 최소화 할 수 있는 운전 패턴을 도출하였다. 이와 같이, ITER 연료주기 내 전 공정의 연료흐름(Tritium Flow) 및 Balancing 분석을 위한 Tritium balance 모델 개발은 앞서 언급한 핵융합 운전의 안정성 확인뿐만 아니라, 연료주기 내 운전조건 및 운전방식 변경 등의 불확실성에 대한 다양한 시나리오 해석 및 분석에 대한 정보를 제공할 수 있으며, 제어시스템 개발에도 도움이 될 것이다.

## Nomenclature

### Index

$i$	: tasks
$s$	: states
$j$	: units
$n$	: event points

### Set

$I^{BV}$	: tasks for B.V
$I_j$	: tasks that can be performed in unit [ $j$ ]
$J_s$	: units that belong to state [ $s$ ]

### Parameters

$V_i^{\min}, V_i^{\max}$	: maximum and minimum processing capacity for task [ $i$ ]
$F_j^{\min}, F_j^{\max}$	: maximum and minimum storage capacity for unit [ $j$ ]
$\alpha_i$	: constant term of processing time of task [ $i$ ]
$\beta_i$	: variable term of processing time of task [ $i$ ]
$\rho_{i,s}$	: proportion of state $s$ produced, consumed by task [ $i$ ]
$\sigma_{ip}$	: composition of material $p$ of task [ $i$ ]
$Sstarttime_s$	: start time of supply state [ $s$ ]
$Sfinishtime_s$	: finish time of supply state [ $s$ ]
$STO_s$	: initial available amount of state [ $s$ ]
$F0_j$	: initial available amount of unit [ $j$ ]
$ST_s^{\max}$	: maximum amount of state [ $s$ ]
$H$	: Time horizon
$Tstartlimit_j$	: the end time of unit $j$ in previous cycle

### Binary variables

$wv_{i,n}$	: task $i$ is activated at event point [ $n$ ]
------------	--

### Continuous variables

$B_{i,n}$	: amount of batch undertaking task $i$ at event point [ $n$ ]
$F_{j,n}$	: amount of stored material in unit $j$ at event point [ $n$ ]
$ST_{s,n}$	: amount of state $s$ at event point [ $n$ ]

$T_{i,n}^s$	: time at which task $i$ starts in unit $j$ at event point [ $n$ ]
$T_{i,n}^f$	: time at which task $i$ finish in unit $j$ at event point [ $n$ ]

## Reference

1. Cho, S., Chang, M. H., Yun, S.-H., Kang, H., Jung, K.-J., Chung, H., Koo, D., Kim, Y., Lee, J. and Song, K.-M., "ITER Storage and Delivery System R&D in Korea," *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, **38**, 425-433(2010).
2. Kondili, E., Pantelides, C. and Sargent, R., "A General Algorithm for Short-term Scheduling of Batch Operations—I. MILP Formulation," *Comput. Chem. Eng.*, **17**, 211-227(1993).
3. Birewar, D. B. and Grossmann, I. E., "Simultaneous Production Planning and Scheduling in Multiproduct Batch Plants," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**, 570-580(1990).
4. Chang, M. H., Yun, S.-H., Kang, H.-G., Cho, S., Song, K.-M., Kim, D., Chung, H., Camp, P., Shu, W. and Willms, S., "Alternative Analysis for Fuel Storage and Delivery in the ITER Tritium Plant," *Fusion Eng. Des.*, **89**, 1557-1561(2014).
5. Roth, J., Tsitrone, E., Loarte, A., Loarer, T., Counsell, G., Neu, R., Philipps, V., Brezinsek, S., Lehnen, M. and Coad, P., "Recent Analysis of Key Plasma Wall Interactions Issues for ITER," *J. Nucl. Mater.*, **390**, 1-9(2009).
6. Yun, S.-H., Chang, M.-H., Kang, H.-G., Kim, C.-S., Cho, S.-Y., Jung, K.-J., Chung, H.-S. and Song, K.-M., "Tritium Fuel Cycle Technology of ITER Project," *Trans. Korean Hydrogen New Energy Soc.*, **23**, 56-64(2012).
7. Lee, J.-U., Chang, M. H., Yun, S.-H., Lee, E. S., Lee, I.-B. and Lee, K.-H., "Hypothetical Operation Model for the Multi-bed System of the Tritium Plant Based on the Scheduling Approach," *Fusion Eng. Des.*, **109**, 602-607(2016).
8. Lee, S.-Y., Chang, M. H., Yun, S.-H., Ha, J.-K., Lee, I.-B. and Lee, E. S., "Optimal Scheduling Model to Minimize Tritium Inventory Level in Fuel Cycle of Tritium Plant," *Fusion Eng. Des.*, **136**, 747-751(2018).
9. Pearce, R. J., Antipenkov, A., Boussier, B., Bryan, S., Dremel, M., Levesy, B., Mayaux, C. and Wykes, M., "The ITER Divertor Pumping System, Design Evolution, Simplification and Performance," *Fusion Eng. Des.*, **88**, 809-813(2013).
10. Day, C., Antipenkov, A., Dremel, M., Haas, H., Hauer, V., Mack, A., Boissin, J., Class, G., Murdoch, D. and Wykes, M. *Validated design of the ITER main vacuum pumping system*, Proc. 20th Int. Conf. Vilamoura, 2004.
11. Wykes, M., "Minimisation of the Hydrogenic Inventory of the ITER Neutral Beamline and Torus Cryo-sorption Pumps," *Fusion Sci. Technol.*, **48**, 39-42(2005).
12. Lee, S.-Y., Chang, M. H., Lee, J.-U., Yun, S.-H., Ha, J.-K., Lee, I.-B. and Lee, E. S., "Optimal Pump Regeneration Model for Fuel Cycle of ITER," *Fusion Eng. Des.*, **146**, 2251-2254(2019).
13. Maravelias, C. T. and Grossmann, I. E., "New General Continuous-time State-Task Network Formulation for Short-term Scheduling of Multipurpose Batch Plants," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **42**, 3056-3074(2003).
14. Lee, S.-Y., Chang, M. H., Yun, S.-H., Ha, J.-K., Lee, I.-B. and Lee, E. S., "Hypothetical Daily Operation Model of Fuel Cycle in Tritium Plant," *Fusion Eng. Des.*, **130**, 21-25(2018).