

高速炉の最適点検工程スケジューリングに関する基礎的検討

Fundamental Study on Optimal Scheduling of Inspection Process for Fast Reactor

東京理科大学	鈴木 正昭	Masaaki SUZUKI	Member
東京理科大学	伊藤 真理	Mari ITO	Non-member
日本原子力研究開発機構	橋立 竜太	Ryuta HASHIDATE	Member
日本原子力研究開発機構	高橋 慧多	Keita TAKAHASHI	Non-member
日本原子力研究開発機構	矢田 浩基	Hiroki YADA	Member
日本原子力研究開発機構	高屋 茂	Shigeru TAKAYA	Member

To achieve the reasonable and effective maintenance of nuclear power plants, it is essential to optimize the aging management from the viewpoints of both safety and efficiency. We propose an inspection-process-scheduling model that minimizes the number of inspection activities in a fast reactor. In this study, we formulate the inspection-process-scheduling problem as mixed integer programming and 0-1 integer programming problem.

Keywords: Plant life management, Inspection-process scheduling, Fast reactor, Operations research, Optimization, Mathematical programming

1. はじめに

予防保全スケジューリングは産業分野で広く行われている。事業者や機器サプライヤは通常、スケジュールが満たすべき制約と周期的な保全間隔を事前に定義するが、多くの場合それらはエンジニアの経験に基づくものである。Prajapat らは、保全スケジュールの最適化分野の、特に発電所への応用に関してレビューしている[1]。

本研究では高速炉における保全最適化に向けた検討の一環として、従来手作業で行われているプラント点検工程の組み立てを、オペレーションズ・リサーチの数理的手法を用いて自動化および最適化するシステムについて検討する。高速炉もんじゅを例にとると、点検項目の数は膨大（約 11 万タスク）であり、点検工程の組み立ては複雑なものとなっている。ここではシステム構築に必要な情報の整理、およびシステムの概念検討を行った。

2. 想定する点検工程スケジューリング問題

本研究ではまず、高速炉 1 次冷却系（3 ループ）を考える。想定する点検対象とその点検項目・周期・台数・制約条件を表 1 に示す。工程策定期間は 10 年間分、最適化の指標は運転時間の最大化とする。

ここで考える点検およびプラント運用に係る主な制約条件の一部を抜粋する：

一般事項

- セル室での点検作業は同時に 4 作業までとする。

燃料交換に関する事項

- 連続運転期間 9 ヶ月以内に燃料交換を実施する。
- 燃料交換時のナトリウム液位は定格運転時液位（NsL: 3 ループ冷却材充填）とする。

冷却材液位に関する事項

- 点検期間中のナトリウム充填ループは最低 2 ループを保持する。

ナトリウムの充填／ドレン、セル室の空気置換／窒素置換に関する事項

- セル室の空気置換は、ナトリウムドレン完了後、10 日間経過しなければ実施できない。
- セル室の窒素置換は、ナトリウム充填 8 日前までに実施する。

その他の事項

- 制御棒駆動機構の動作確認時のナトリウム液位は NsL とする。
- 1 次主循環ポンプの本格点検の実施は、簡易点検の実績を兼ねることとする。

表1 想定する点検対象とその点検項目・周期・台数・制

点検対象		点検項目	点検周期 (月)	点検台数 (台)	制約条件	
					ナトリウムドレン	セル室解放
A/B/C ループ	1次主ポンプ	簡易点検	36	1	A/B/Cループ ドレン	-
		本格点検	72	1		-
	弁	分解点検	120	40		A/B/Cループセル室 空気置換
	ナトリウム漏えい検出器	フィラメント交換+計器校正	12	10		-
	配管支持装置	外観検査	120	400		A/B/Cループセル室 空気置換
	電源設備	分解点検	12	1		-
	微調整棒駆動機構	分解点検	36	3		-
	後備炉停止棒駆動機構	分解点検	36	6		-
	粗調整棒駆動機構	分解点検	36	10		-
	燃料交換	-	9	1		-

3. 定式化

点検工程スケジューリング問題を数理計画モデルである混合整数計画と0-1 整数計画モデルとして定式化し、点検回数を最小化（点検間隔を最大化）する点検工程スケジューリングモデルを提案する。特に計算コスト削減の観点から、1段階目の最適化としてまずスケジュール作成対象期間中のどの月にどの点検を行うかを決定して、次に2段階目の最適化として各月のどの日にどの点検を行うかを決定する、2段階のスケジューリングモデルを構築する。

基礎的検討として、ここでは、提案スケジューリングモデルで所望の制約条件を表現可能であること、それら制約を満たす最適スケジュールを求解可能であることを検証する。そのために、前述の制約条件を簡易的に模擬した試算条件において最適化計算を行う。

3.1 1段階目の最適化モデル

まずスケジュール作成対象期間中のどの月にどの点検を行うかを決定する。この時、スケジューリングの時間単位は1ヶ月刻みとなる。目的関数として点検間隔の最大化を、制約条件として点検周期の超過禁止に関する制約、可能な限り燃料交換とそれ以外の点検を同時期に実施する制約等をそれぞれ考える。具体的には以下のとおり定式化する：

記号の定義

集合

I : 機器の集合

C : 点検回数の集合

T : 期 (月) の集合

定数

$M_i (\forall i \in I)$: 機器 i の点検周期

$k_i (\forall i \in I)$: 機器 i の点検に要する期間

\hat{c} : 最大点検回数

決定変数

$z_{ict} (\forall i \in I, \forall c \in C, \forall t \in T)$: 機器 i の c 回目の点検を t 期に開始するとき 1, それ以外 0

$s_{ic} (\forall i \in I, \forall c \in C)$: 機器 i の $c - 1$ 回目の点検から c 回目の点検までの間隔

定式化

$$\text{Maximize } \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} s_{ic} \quad (1)$$

$$\text{Subject to } s_{ic} \leq M_i - k_i, \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \quad (2)$$

$$s_{i,c+1} = \sum_{t \in T} t z_{i,c+1,t} - \sum_{t \in T} t z_{i,c,t}, \quad \forall i \in I, 1 \leq c \leq \hat{c} - 1, \quad (3)$$

$$s_{i1} = \sum_{t \in T} t z_{i1t}, \quad \forall i \in I, \quad (4)$$

$$\sum_{t \in T} z_{ict} \leq 1, \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \quad (5)$$

$$\sum_{c \in C} z_{ict} \leq 1, \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \quad (6)$$

$$s_{ic} \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \quad (7)$$

$$z_{ict} \in \{0, 1\}, \forall t \in T, \forall i \in I, \forall c \in C. \quad (8)$$

目的関数(1)は点検間隔を最大化する。制約式(2)は機器 i の点検周期または燃料交換前に必ず点検を行うよう制約する。制約式(3)、(4)は変数 s_{ic} を定義する。制約式(5)は機器 i の c 回目の点検は必ず1回以下とする。制約式(6)は機器 i の t 期の点検は必ず1回以下とする。制約式(7)は非負制約である。制約式(8)はバイナリ制約である。

3.2 2段階目の最適化モデル

次に、2段階目の最適化として、1段階目の結果を受けてどの日にどの点検を行うかを決定する。このとき、スケジューリングの時間単位は1日刻みとなる。目的関数として月初めから点検開始日までの間隔の最小化を、制約条件として各点検工程間の関係に関する制約等をそれぞれ考える。具体的には以下のとおり記号を追加して定式化する：

記号の定義 (追加)

集合

J : 機器の集合

D : 期 (日) の集合

定数

F : 同時点検上限数

L : 月末日

$k_j (\forall j \in J)$: 機器 j の点検に要する期間

決定変数

$y_{jd} (\forall j \in J, \forall d \in D)$: 機器 j の点検を d 期に行っているとき 1, それ以外 0

$z_{jd} (\forall j \in J, \forall d \in D)$: 機器 j の点検を d 期に開始するとき 1, それ以外 0

定式化

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} dz_{jd} \quad (9)$$

$$\text{Subject to } \sum_{j \in J} y_{jd} \leq F, \quad \forall d \in D, \quad (10)$$

$$\sum_{d \in D} z_{jd} \geq 1, \quad \forall j \in J, \quad (11)$$

$$y_{jd} = \sum_{t'=t-k_j+1}^t z_{jd}, \quad \forall j \in J, \forall d \in D, \quad (12)$$

$$dz_{jd} \leq L - k_j, \quad \forall j \in J, \forall d \in D, \quad (13)$$

$$y_{jd}, z_{jd} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \forall d \in D. \quad (14)$$

目的関数(9)は月初日から点検開始日までの間隔を最小化する。制約式(10)は d 期の同時点検上限数を制約する。制約式(11)は当該月内に必ず点検するよう制約する。制約式(12)は変数 y_{jd} を定義する。制約式(13)は機器 j の点検を月末日 L までに必ず終わるよう制約する。制約式(14)はバイナリ制約である。

4. 数値実験

4.1 実験条件

前節で示したスケジューリングモデルおよび試計算条件において最適化実験を行った。本実験における各点検の必要点検期間の設定値を表2に示す。ここで、1段階目の最適化計算中では点検期間を1ヶ月単位に切り上げて用いている。また、同時点検上限数 $F=4$ とした。求解に用いたソルバーは IBM ILOG CPLEX 12.6.3, 計算環境は Intel Core i5-6200U@2.30GHz, 8GB RAM である。

表2 各点検の点検期間の設定値

点検対象		1台あたり必要点検期間	
		1段階目での設定値	2段階目での設定値
A/B/C ループ	1次主ポンプ (本格点検)	3ヶ月	87日
	弁	1ヶ月	9日
	ナトリウム漏えい検出器	1ヶ月	0.2日
	配管支持装置	1ヶ月	1日
	電源設備	1ヶ月	15日
	微調整棒駆動機構	3ヶ月	78日
	後備炉停止棒駆動機構	3ヶ月	78日
	粗調整棒駆動機構	3ヶ月	78日
	燃料交換	2ヶ月	50日

4.2 結果

1段階目の最適化結果

648 変数、414 制約に対して求解には約 13 秒を要した。また、1 段階目の最適解として得られた点検スケジュールを図1に示す。同図からは、いずれの点検対象の点検間隔も点検周期を超過していないこと、電源設備（点検周期：12ヶ月）や微調整棒駆動機構（点検周期：36ヶ月）を見ると単純に点検周期ごとに点検を行うのではなく点検周期に最も近い燃料交換時期と同時期のタイミングで点検を行っていること、などが分かる。

2段階目の最適化結果

ここでは、2段階目の最適化計算の例として、図1における9ヶ月目を対象としてスケジューリングを行なった結果を示す。スケジュール作成対象期間は30日間、点検対象は6機器である。360変数、396制約に対して求解には約1秒を要した。また、2段階目の最適解として得られた点検スケジュールを図2に示す。同図からは、目的関数（月初日から点検開始日までの期間）を最小化し、また、同時点検上限数の制約を満たす解が得られていることなどが分かる。

5. おわりに

点検回数を最小化（点検間隔を最大化）する点検工程スケジューリングモデルを提案した。本研究では、点検工程スケジューリング問題を混合整数計画問題および0-1整数計画問題として定式化し、1段階目の最適化としてまずどの月にどの点検を行うかを決定し、次に2段階目の最適化として1段階目の結果を受けてどの日にどの点検を行うかを決定する、2段階の最適スケジューリングモデルを構築した。実機における制約条件を簡易的に模擬した試計算条件で最適化実験を行い、所望の制約条件を表現可能であること、それら制約を満たす最適スケジュールを提案モデルで求解可能であることを検証できた。

参考文献

- [1] N. Prajapat et al., "Preventive maintenance scheduling optimization: A review of applications for power plants", In: L. Redding, R. Roy, and A. Shaw (eds) *Advances in Through-life Engineering Services*, Decision Engineering, Springer, 397—415, 2017.

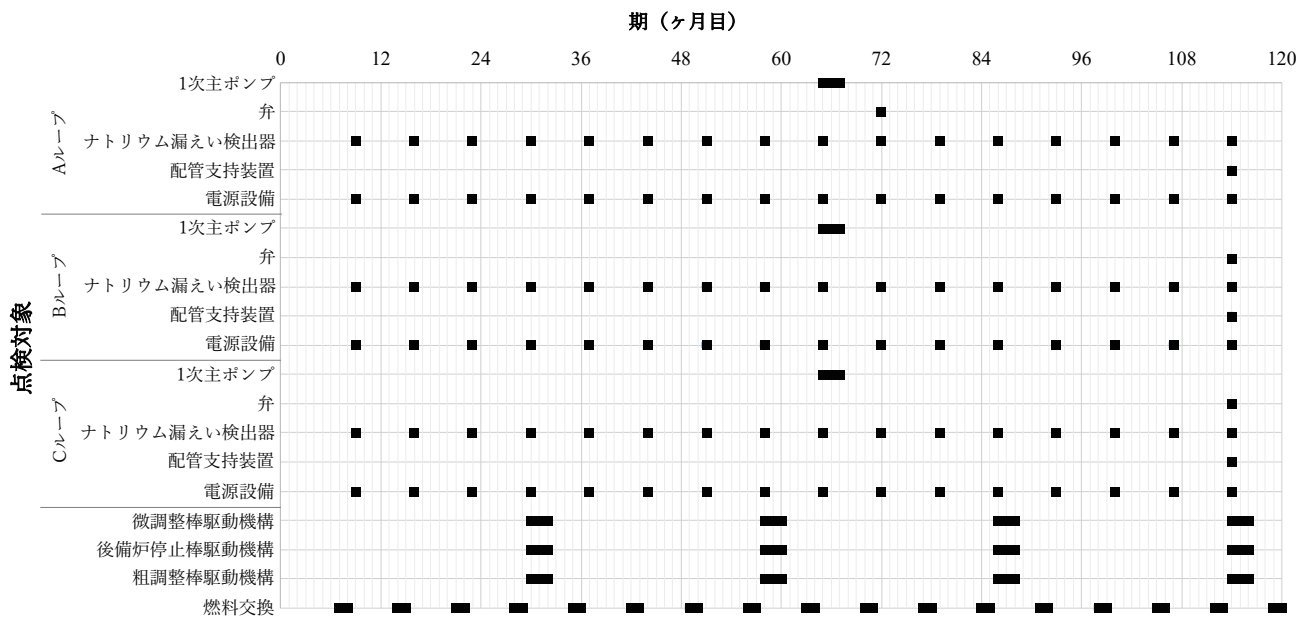


図1 1段階目の最適化計算で得られた点検スケジュール



図2 2段階目の最適化計算で得られた点検スケジュール