



## 原子力発電所における定検工事実施計画の最適化検討

Study on Optimization of Normal Plant Outage Work Plan for Nuclear Power Plants

日本保全学会	青木 孝行	Takayuki AOKI	Member
(株) IIU	児玉 典子	Noriko KODAMA	Member
(株) IIU	高瀬 健太郎	Kentaro TAKASE	Member
(株) IIU	宮 健三	Kenzo MIYA	Member

This paper discusses maintenance optimization in maintenance implementation stage following maintenance planning stage in nuclear power plants and proposes a methodology to get an optimum maintenance work plan. As a result of consideration, the followings were obtained.

- (1) The quantitative evaluation methodology for optimizing maintenance work plan in nuclear power plants was developed.
- (2) Utilizing the above methodology, a simulation analysis of maintenance work planning for BWR's PLR and RHR systems in a normal plant outage was performed. Maintenance cost calculation in several cases was carried out on the condition of smoothing man loading over the plant outage schedule as much as possible.
- (3) As a result of the simulation, the economical work plans having a flat man loading over the plant outage schedule were obtained.

**Keywords:** Maintenance Optimization, Maintenance Implementation Stage, Maintenance Work Plan, Plant Outage, Maintenance Team Performance, Prolog, PC Aided Automatic Planning Tool

### 1. 緒言

原子力発電所の保全活動は、計画(Plan)、実施(Do)、評価(Check)、是正措置(Act)の、いわゆる保全サイクル(PDCA)を構成している<sup>[1]</sup>。この保全サイクルに従って、まず保全計画が立案される。「保全計画段階」では保全対象機器、保全タスクおよび保全実施時期を含む保全計画が立案され、その計画を実行できる陣容と能力(保全遂行能力<sup>[2]</sup>)を有する保全実行部隊が想定される。次に、この計画と想定に従って保全計画が実行に移されるが、保全計画段階における検討は、たとえば多数の保全作業が錯綜するプラント定検中のプラント状態や炉心安全性確保等のために原子炉施設保安規定で規定されている各種制約条件等の詳細を考慮して検討されたものではないので、このままでは実行できない。保全が実際に実行される「保全実施段階」における検討では、そのような安全性の確保を含む各種の保全現場における制約条件などを全て考慮した上で保全法則<sup>[3]</sup>に基づく安全性と経済性の最大化が追求され、最適保全を目指した保全実施計画が立案される。

たとえば、年間を通して原子力発電所の保全作業量の推移を見てみると、プラント運転中の保全作業は比較的少なく、プラント停止時すなわちプラント

定検時に保全作業が集中しており<sup>[4]</sup>、圧倒的に保全作業の密度が高い。また、数多くの保全作業とそれに関連する多量の諸情報が行き交い、複雑に絡み合っている。このような条件の中で保全の最適化を追求するのは容易でなく、これが保安全管理者あるいは保全技術者の長年の努力にもかかわらず、従来の保全活動を経験主義、実績主義にし、必ずしも十分に保全の最適化あるいは合理化が進まなかった原因の一つとなっていると考えられる。

そこで本研究では、最適な保全実施計画を立案するための定量評価手法について検討するとともに、原子力発電所のプラント定検を例に取って保全実施計画のシミュレーション解析を実施し、その定量評価手法を検証する。

### 2. 保全実施段階における保全定量化の考え方

#### 2.1 保全実施計画として必要な事項と内容

保全実施段階においては、保全計画段階で決定された保全計画と保全作業を実施する保全実行部隊の保全遂行能力を前提に、保全作業を実施するためのスケジュール等を立案する必要がある。保全作業を実施するためには何があらかじめ決められている必要があるだろうか。

これを明確にするため、文章を構成する基本的

な要素として知られている 5W1H<sup>1</sup> (When, Where, Who, What, Why, How)を用いて検討してみる。

5W1H に当てはめてみると、保全実施計画の主要な構成要素として下記が抽出される。これらは全て保全現場の3要素(作業要領書、保全実行部隊(作業員)、使用資機材)に関連する事項であることがわかる。

- a) When ⇒保全実施時期
- b) Where ⇒保全対象機器の設置場所
- c) Who ⇒保全実施体制/要員
- d) What ⇒保全対象機器/保全作業内容
- e) Why ⇒保全実施理由、根拠
- f) How ⇒検査・モタリング方法/工事方法(作業手順・要領、作業員動員計画、使用資機材調達計画)

すなわち、保全実施段階において決定されている必要のある事項は下記の3つの事項であることが分かる。

- ①上記 a)~f)を含む保全作業要領書が完成していること。
- ②作業要領書の規定するところから従って保全実行部隊がいつ、どこで、どのような保全タスクを実行するか、すなわち保全作業員の動員計画が明確になっていること。
- ③保全実行部隊がいつ、どこで、どのような資機材を使用するか、すなわち使用資機材の調達計画が明確になっていること。

## 2.2 保全作業の実施体制と保全遂行能力

保全作業は、作業所長以下の実施体制の下、作業班単位で実施される。作業班内の人員構成は、実施する保全タスクによって異なるが、一般には機械、電気、制御の各職種の作業員から構成される。作業班の保全遂行能力はその正確性、迅速性において各作業班毎にまちまちであり、また、構成員の数は構成員の多能工化が進んでいけば少人数とすることが可能であるので、これも作業班毎に多様であると考えられる。このような作業班が与えられた保全タスクを遂行するのに必要な作業量(作業班数あるいは作業員数×作業時間)は、それを積木に見立て、その山積みで表すことができる (Fig.1)。

基本的にスケジューリングの問題は、定められた期間の枠内に作業量という積木を積んでいく積木問題として捉えることができる。積木の大きさは作業日数と作業員数により様々な大きさを持つ。枠自体は制約条件によっても大きさが変わってくるため、積木を与えられた条件下でどのように積むかが重要になる。

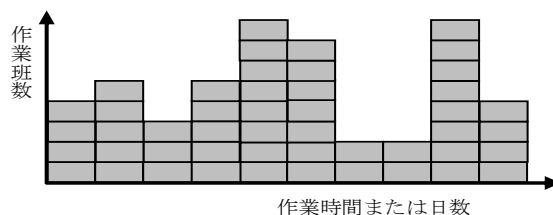


Fig.1 Method to count Work Volume

## 2.3 保全作業の制約条件と作業可能期間における必要作業量の積み上げ

保全作業は、たとえプラント停止中であっても原子炉の安全を確保する等の目的で制約を受ける。安全上の制約に加え、放射線や圧力、温度等の環境条件、電源や換気の状態、電気ノイズ、他作業との干渉等、各種の制約を受け、時間と場所を自由に選定できない場合が多々ある。プラント定検時の保全作業は、これらの条件をクリアした条件下でのみ実施できる (Table 1)。このような制約を受ける作業は多数あるので、経済性の観点から合理的な作業員の動員計画を立案することは容易でない。

Table 1 Plant Outage Schedule & Allowed Work Duration

	月 日
クリティカル工程	
〇〇工事	
□□工事	

また、作業可能期間内で出来るだけ作業班数(あるいは作業員数)の山が高くなるように作業量を平準化した計画とすると、確保する必要のある作業員数を少なくでき、それに伴う作業員の出入日当や旅費、宿泊費などを削減できる。これは数万人日という膨大な作業量を要する原子力発電所の定検では経済性の観点から重要であり、この観点からも最適化を追求する価値がある。作業量の山積みの平準化は、Fig.1において左からできるだけ連続して積木を並べ、山を低くすること、あるいは個々の保全対象機器に要する作業量を総計したプラント全体の作業量の山積みをできるだけ低くすることに相当する。

Fig.1において積木の山が出来るだけ低くなるように保全実施計画を立案することは必ずしも容易でない。それは、膨大な数の保全対象機器のそれぞれに対して実施される保全作業が、基本的に準備作業、本作業、後片付けから成り、この順序は変更で

<sup>1</sup> 5W1Hは意図するところを伝達する文章や記事を書く上で最も基本的なスタイルを表すものとして知られており、これに忠実な文章や記事は理解し易く、物事を確かかつ端的に伝えることができる、とされている。マーケティング等の世界では、明確で完結性の高い計画を立案するため、これらを意識して実施内容を検討することが重要とされている。

きないこと、また、本作業は、たとえば本格分解点検の場合、機器の分解・開放、検査・記録、手入れ、消耗品取替、復旧組立、試験・試運転の順にシーケンシャルに実施され、これも基本的に手順を変更できないことが制約条件として課されているからである (Fig.2)。

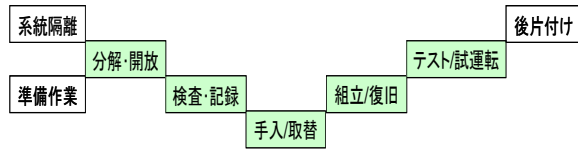


Fig.2 Work Process of Component Overhaul

### 2.4 保全費用算定の考え方

保全作業に伴う保全コストは、大別して2つに分けられる。1つは保全作業の準備、実施、評価および次回計画への反映に要する保全作業費用である。この費用は実際の活動に伴って必要となる直接費と諸経費等の間接費で構成されている。もう1つは保全作業のために必要なプラント停止に伴う生産損失である。これらの構成要素を Fig.3 に示す。

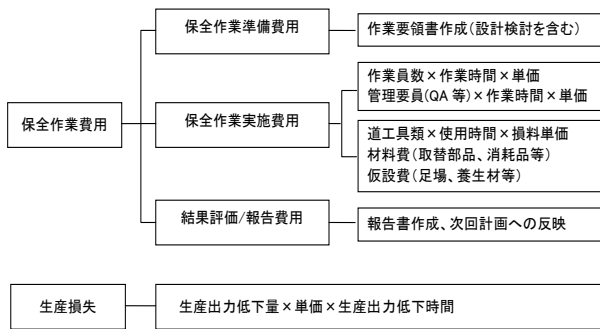


Fig.3 Main Components of Maintenance Cost

したがって、プラント定検中の保全コスト  $C_{outage}$  は下記のように表すことが可能である。

$$C_{outage} = \text{保全作業費用(直接費/間接費)} + \text{生産損失}$$

上式のうち、生産損失は、定検期間（プラント停止期間）に依存し、定検期間はその定検で実施するクリティカルパス作業項目と実施スケジュールに依存する。したがって、定検期間は元来それ自身が定検工程最適化の1パラメータである。しかしながら、原子力発電所の場合、一日当たりの発電損失が巨額であることから定検期間を可能な限り短くする方が経済的に得策である。また、定検期間を決定するクリティカルパス作業は、通常、それ程数が多くなく、また、従来の経験で既に明確になっており、クリティカルパス工程は多少のバリエーションはあるものの、ほぼ確立されている。そこで、本研究では定検期間を最適化の対象外とし、条件として与えることとする。

## 3. 保全実施段階における保全シミュレーション解析

### 3.1 解析方法

#### (1) 解析対象システム

実際の原子力発電所の一部システムを模擬したシステムを想定し、それを解析対象とする。具体的には原子炉安全に係わる機能、すなわちプラント定検中であっても原子炉施設保安規定で維持要求されている炉心冷却機能という極めて重要な機能を有する残留熱除去系 (RHR: 原子炉停止時冷却モード) と、原子炉圧力バウンダリー機能を有し原子炉格納容器内の高放射線量率環境という原子力発電特有の条件を持つ原子炉再循環系 (PLR) の2システムとする (Fig.4)。

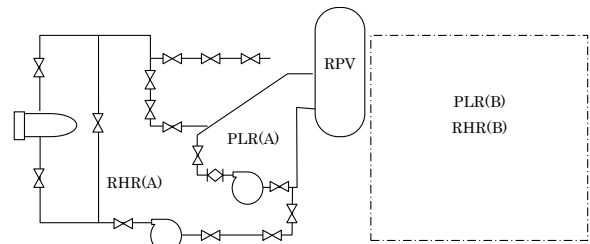


Fig.4 Plant Systems as an object of the Simulation Analysis

#### (2) 解析モデル

これまで述べてきた事項を踏まえて、本解析の全体概要を図示すると、Fig.5 のようになる。ここで図中の保全最適化条件であるが、ここでは議論を簡便なものとするため、原子炉施設保安規定等が要求する安全性に対する制約条件は検討の前提条件とし、その上で経済性の最適化を追求した保全実施計画を導出することとする。

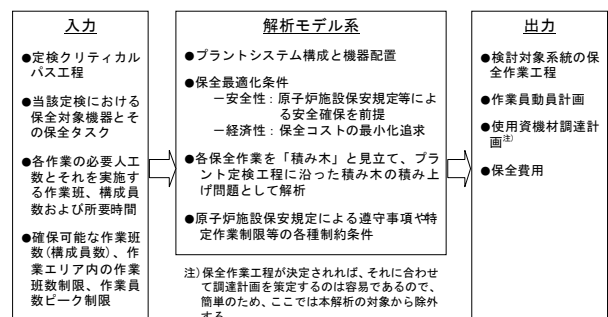


Fig.5 Analytical Model System in the Simulation Analysis

#### (3) 解析手順

定検工程最適化のための検討フローを Fig.6 に示す。なお、フロー中の最適化目標とは、「評価値 (作業班数、作業員数ピークおよび同一区域内作業班数の関数であり、それぞれに重み係数を考慮した値)」に対して設定する目標のことを意味する。すなわち、各定検工程案に対して定検期間等の制約条件を満足し、かつ算出される評価値が目標値を下回る工程

案の発見を試みる。工程案を発見できた場合にはその工程の評価値を次の新しい目標値とし、以下同様に更なる最適定検工程の発見に向けて計算を繰り返す。予め定めた試行回数内で工程案を発見できなかった場合は、最後に発見した工程を最終結果として終了する。ここで与える制約条件としては、「定検期間」「系統隔離に関する条件（保安規定遵守事項）」の他、「作業班の確保数」「作業班数の同一区域内制限」「作業員数ピーク制限」等がある。

なお、解析対象の系統が増えると、その探索空間は指数的に増大するので、探索空間をできるだけ小さくするため、下記の3つの方法を採用する。

- ① 各作業の作業量（＝作業人数×所要日数）を算出し、その大きい順に定検マスター工程上へ優先配置する。
- ② 各作業を順次、定検マスター工程上へ追加する時、追加後の作業員数ピークが最も小さくなる位置を各作業の開始時期とする。
- ③ 保全作業量の多い系統を優先して定検工程の最適化を行い、その工程を固定して、次の系統の最適化を行う。

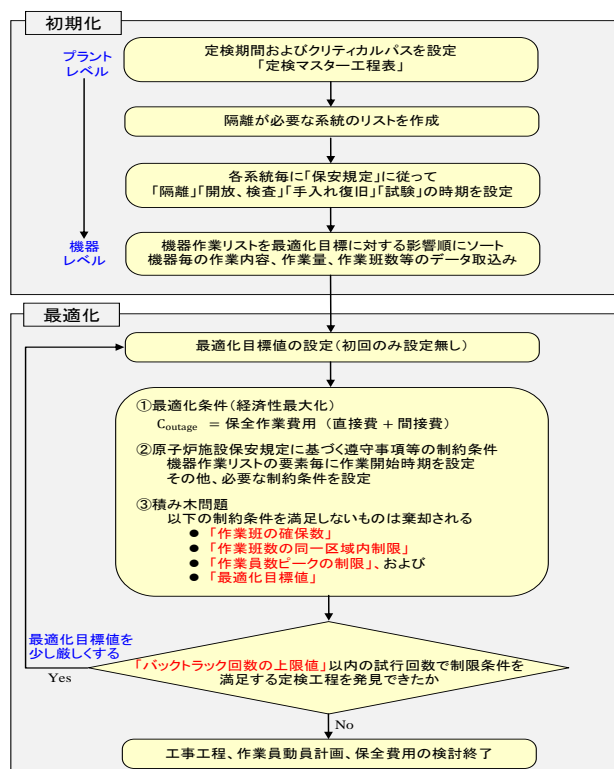


Fig.6 Flow Chart of the Simulation Analysis for Maintenance Work Planning

(4) 解析条件

下記を解析条件としてシミュレーション解析を実施する。

①プラント定検期間

プラント定検期間は、複数の定検作業のクリティカルパス工程から成っている。ここでは定検期間 80

日を基本ケースとして設定し、検討評価する対象は数多くのサブクリティカルパス工事およびそれ以下の工事として実行される膨大な量の保全作業の一部とする。

②保全対象機器毎に想定する保全タスクと必要人工数

シミュレーション解析の対象とする保全対象機器とその保全タスク、必要人工数（＝作業員数×作業日数）等を Table 2 に示すように設定する。なお、保全作業を管理する QA 員、放管員、安全対策員の数は、それぞれ保全作業員数  $N_{WTj}$  に対して下記のように設定する。

$$N_{QAj} = a \cdot N_{WTj}, N_{HPj} = b \cdot N_{WTj}, N_{SAj} = c \cdot N_{WTj}$$

ここで a、b、c は簡単のため、それぞれ 0.10、0.30、0.15 と仮定する。

③作業可能時期と期間

プラント定検期間中は、各種の制約条件がある。本シミュレーション解析では、一例としてこれらの制約条件のうち、原子炉施設保安規定に従って RHR は常に A 系 B 系のいずれか一方の運転状態を常に確保（一系統の保全作業制限）することを条件とする。

④保全計画と保全遂行能力

ここでは保全計画と保全遂行能力の変更によって結果的に作業量（必要人工数＝作業員数×作業日数）が変化することになるので、上記②で設定する基準必要人工数を作業量のベースラインとし、作業量や保全実行部隊の作業遂行能力等を変化させてシミュレーション解析を実施する。

3.2 解析結果とその評価

(1) 基本ケースの解析結果

基本ケースとして定検期間 80 日の条件で保全実施計画立案のシミュレーション解析を実施した。このシミュレーションの結果は、コンピュータによって自動作成させた保全作業工程および作業員の動員計画（必要作業員の山積み推移）として得られるが、これらの出力を Fig.7 と Fig.8 に示す。また、このケースの保全実施計画を実現するのに要する保全費用等の解析結果を Table 3 に示す。

本ケースの工事規模は、Table 3 に示すように、作業日数が 57 日、平均稼働人数が 123 人/日、作業量の合計が 7,011 人日、保全費用が約 5 億円の工事となった。また、Fig.7 を見ると、残留熱除去系は A 系と B 系に対して原子炉施設保安規定により同時に供用除外（隔離）できないため、それぞれの供用除外期間内での作業量に応じて作業員数の増減が見られる。再循環系を含めた作業全体では工程全般に亘って投入する作業員数の増減が少ない結果となっている。

Table 2 Data on Maintenance Tasks, Required Manpower etc. utilized in the Simulation Analysis

系統	対象機器	対象部位	台数	定検対象	保全タスク	対象機器名	作業班名	作業班構成員数	作業日数	
RHR	ポンプ	本体	4	1	分解点検	RHR ポンプ	ポンプ機械チーム C	18	32	
				2	簡易点検	RHR ポンプ	ポンプ機械チーム B	13	6	
		電動機	4	1	機能・性能試験	RHR ポンプ	ポンプ電気チーム A	8	4	
				2	分解点検	シャットダウン弁	弁機械チーム B	11	15	
	弁	本体	26	1	分解点検	弁	弁機械チーム A	7	10	
				3		注入弁(A)	弁機械チーム B	11	11	
				1	簡易点検	弁	弁機械チーム A	7	4	
				2		ワ/レッション・バルブ/レイ弁	弁機械チーム A	7	4	
				1	漏洩試験	弁	弁機械チーム A	7	3	
				3		ワ/レッション・バルブ/レイ弁	弁機械チーム A	7	3	
		1	機能・性能試験	シャットダウン弁	弁機械チーム A	7	3			
		1		注入弁	弁機械チーム A	7	3			
		計装	電気(777ユーロ)	8	2	機能・性能試験	注入ラインテスト逆止弁	弁電気チーム A	7	3
					3	特性試験	圧力計測装置	計装チーム B	6	3
					2	特性試験	温度計測装置	計装チーム A	3	4
					3	特性試験	流量計測装置(A)	計装チーム B	6	3
	2				特性試験	継電器	計装チーム A	3	4	
	3				分解点検	電源(遮断器-A)	計装チーム B	6	4	
	熱交換器	配管など	2	1	ECI	熱交換器	ECT チーム	8	29	
				1	PT	溶接継手	PT チーム	8	3	
	PLR	ポンプ	機械	2	1	簡易点検	PLR ポンプ	ポンプ機械チーム A	8	19
					1	機能・性能試験	PLR ポンプ	ポンプ機械チーム A	8	3
			電気機械	10	2	機能・性能試験	PLR ポンプ	ポンプ電気チーム B	13	7
					2	分解点検	流量調整弁	弁機械チーム C	31	7
1					空気作動弁		弁機械チーム A	7	6	
2					逆止弁(B)	弁機械チーム A	7	6		
2					電磁弁	弁機械チーム A	7	5		
1					簡易点検	電動弁	弁機械チーム A	7	3	
1					特性試験	電磁弁	弁機械チーム A	7	3	
1					機能・性能試験	空気作動弁	弁機械チーム A	7	3	
計装		電気	4	1	分解点検	空気作動弁	弁電気チーム B	11	4	
				2	特性試験	圧力計測装置	計装チーム B	6	3	
				2	特性試験	温度計測装置	計装チーム A	3	4	
				2	特性試験	弁開度計測装置	計装チーム B	6	3	
				2	機能・性能試験	弁開度計測装置	計装チーム B	6	4	
				2	特性試験	継電器	計装チーム A	3	4	
MG(発電機)		配管など	410	1	特性試験	電源(PLR LFMG 遮断器)	計装チーム B	6	6	
				1	機能・性能試験	電源(Low-HIGH 切替)	計装チーム B	6	3	
				2	分解点検	LFMG 発電機	MG チーム B	7	11	
				3	PT	溶接継手	PT チーム	8	3	
				17	UT	溶接継手	UT チーム	8	4	
				8	VI	溶接継手	VI チーム	8	3	

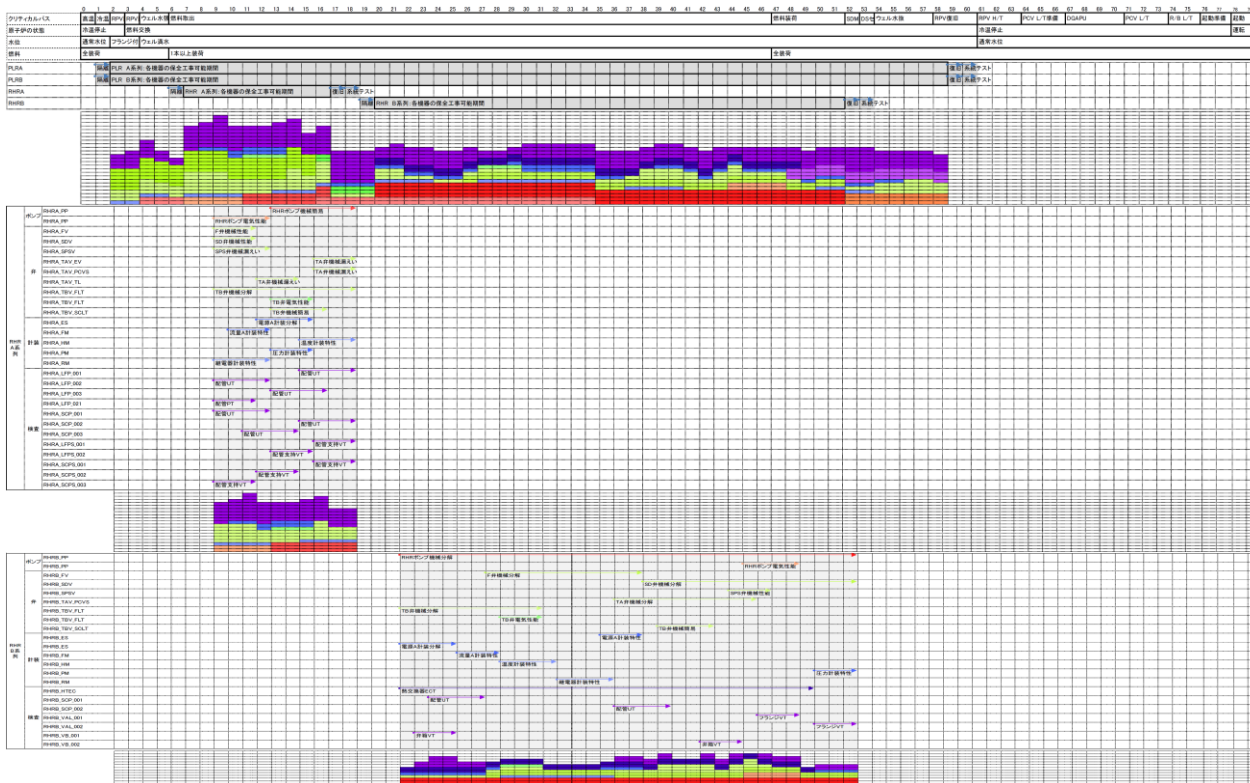


Fig.7 Computer Output of Work Schedule, Man Loading Plan in the Base Case

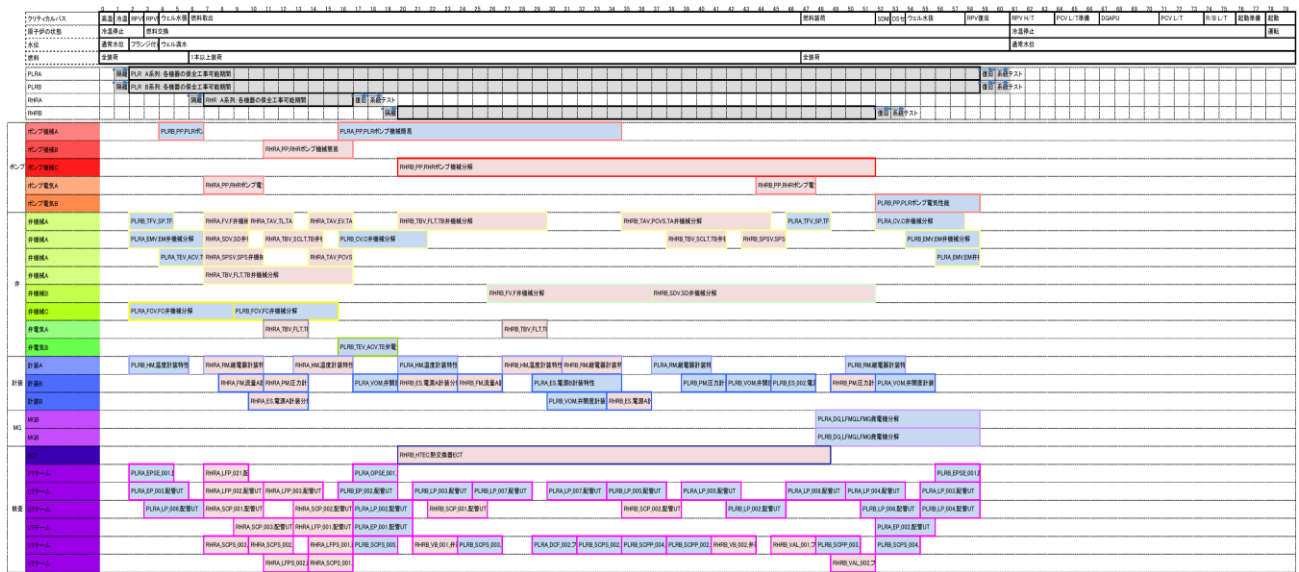


Fig.8 Computer Output of the Base Case (Work Team Schedule)

Table 3 Result of the Simulation Analysis in the Base Case

項目	解析結果 (千円)
0 定検期間	80
0 作業日数	57
1 保全作業員費用	302,606
	直接費 226,935
	間接費 75,671
(平均稼働人数: 人/日)	(79)
2 管理要員(QA/放管/安全)費用	204,650
	直接費 175,560
	間接費 29,090
(平均稼働人数: 人/日)	(44)
3 上記費用合計 (1+2)	507,256
	直接費 402,495
	間接費 104,761
(平均稼働人数: 人/日)	(123)

Table 4 Analytical Result of Economic Efficiency in the Base case

項目	解析ケース	定検期間		
		80日 (基本ケース)	85日	90日
0	作業日数	57	62	67
1	保全作業員費用	千円 302,606	300,033	299,663
	直接費	226,935	226,935	226,935
	間接費	75,671	73,098	72,728
(平均稼働人数)	人/日	(79)	(72)	(67)
2	管理要員(QA/放管/安全)費用	千円 204,650	200,280	198,545
	直接費	175,560	173,600	173,530
	間接費	29,090	26,680	25,015
(平均稼働人数)	人/日	(44)	(40)	(37)
3	上記保全費用合計 (1+2)	千円 507,256	500,313	498,208
	直接費	402,495	400,535	400,465
	間接費	104,761	99,778	97,743
(平均稼働人数)	人/日	(123)	(112)	(104)
4	基本ケースとの差	千円	-6,943	-9,048
	直接費	-	-1,960	-2,030
	間接費	-	-4,983	-7,018
	(平均稼働人数)	人/日	-	(-11)

(2) 定検期間 (作業可能期間) の長さが保全作業の経済性へ与える影響

全ての定検作業は各種の制約条件が課されており、それらを満たす期間 (作業可能期間) は定検期間内の特定の時期に限定されたものとなる。また、その作業可能時間は定検期間の長さによって影響を受ける。

まず、着目している保全作業を実施できる作業可能期間の長さが経済性へ与える影響を確認するため、定検期間以外の主要なパラメータを固定し、定検期間を 80 日から 85 日および 90 日へ延ばしたケースについて解析を実施した。その結果を Table 4 に示す。

一般に定検期間を延長すれば、それは制約条件の緩和となるので経済性は向上すると考えられる。そこで、解析結果を見ると、定検期間が基本ケースの 80 日から延びるに従って作業員数は作業期間全体に亘って変動が少ないものとなり、その結果として Table 4 に示すように、保全費用および作業員平均稼働人数は減少する結果となった。これは定検期間という制約が期間の延長とともに緩和されたためであると考えられる。

以上より、一般的には定検クリティカルパス工事

以外の工事は作業可能期間をできるだけ長く取る方が経済性を向上させることができると考えられる。また、定検期間は定検クリティカルパス工事の所要時間によって決まり、固定されるが、この制約の中で定検期間内の各種の制約をできるだけ緩和あるいは排除すれば、保全作業の経済性を向上させることができると考えられる。

(3) 保全実行部隊の保全遂行能力が保全作業の経済性へ与える影響

保全実行部隊の保全遂行能力には、作業の正確性と迅速性の 2 面があり、保全実施計画における経済性の検討には作業の迅速性を考慮する必要がある。作業の迅速性が高ければ、同じ作業を実施する場合でも作業量 (作業員数×作業日数) を少なくすることができるので、経済性を向上させる一つの方策である。そこで、保全作業能力を 2 割向上させた場合と 2 割低下させた場合の 2 ケースについて解析を実施した。その結果を Table 5 に示す。

解析結果を見ると、保全遂行能力の向上は、当然のことながら保全費用の低減につながり、保全遂行

能力の低下は保全費用の増加につながっている。保全遂行能力を2割向上させたケース(所要日数D×0.8)は、総保全費用約5億円規模の保全作業に対し、作業速度を2割向上させることにより、保全費用を約1.3億円低減できる結果となった。ここで、解析条件として設定した保全遂行能力の増減割合が、解析結果である保全費用の増減割合と異なる結果となっている。これは本問題が作業量(作業員数×所要日数)のブロックを積み上げる積木問題であり、離散化しているためであると考えられる。

**Table 5 Effect of Maintenance Work Team Performance on Economic Efficiency**

項目		解析ケース	保全遂行能力(作業迅速性)			
			所要日数 D (基本ケース)	所要日数 D×0.8 (作業速度高)	所要日数 D×1.2 (作業速度低)	
0	定検期間	日	80	80	88	
	保全作業の所要日数		57	57	65	
1	保全作業員費用	千円	302,606	229,791	326,478	
	直接費		226,935	166,950	247,500	
	間接費		75,671	62,841	78,978	
	(平均稼働人数)	人	(79)	(58)	(75)	
	管理要員(QA/放管/安全)費用	千円	204,650	148,855	219,385	
2	直接費		175,560	127,680	191,100	
	間接費		29,090	21,175	28,285	
	(平均稼働人数)	人	(44)	(32)	(42)	
	上記合計(1+2)	千円	507,256	378,646	545,863	
3	直接費		402,495	294,630	438,600	
	間接費		104,761	84,016	107,263	
	(平均稼働人数)	人	(123)	(90)	(117)	
4	基本ケースとの差	合計	千円	—	-128,610	+38,607
		直接費		—	-107,865	+36,105
		間接費		—	-20,745	+2,502
		(平均稼働人数)	人	—	(-33)	(-6)

作業速度は日頃の作業員の教育訓練やベンチマーキング活動あるいはインセンティブの付与等で改善される可能性があるため、今後の課題である。一方、保全遂行能力を2割低下させたケース(所要日数D×1.2)は、作業日数が65日となり、前提としていた定検期間80日の中では実施できず、定検期間を88日に延長する必要があるとの結果となった。この場合、定検期間80日以内で作業を完了するには保全実施体制の強化(陣容の増強やシフト体制の導入等)が必要である。

(4) 作業班数が保全作業の経済性へ与える影響

保全作業を実行する作業班の数(あるいは作業員数)に制限があると、所定の作業可能期間内に作業が完了しない等の問題が生じ、保全実施計画に大きな影響を与える可能性がある。そこで保全作業に従事する作業班の数を制限した場合、経済性にどのような影響があるか、作業班を最大2班および3班に制限したケースについて解析を実施した。その結果をTable 6およびTable 7に示す。

解析結果を見ると、作業班数の制限を厳しくすると、作業日数が増え、所定の定検期間(80日)内では実施できないことがわかる。原子力発電所の場合、出力が大きいので定検の延長による発電損失は莫大な金額となる。十分な作業員の確保は重要な課題である。次に、作業班数の各ケースにおける作業員

の延人数を見ると、作業班数を制限した方が人数は少なくなることがわかる。作業員の延人数は間接費に直接影響するため、作業班数を制限するほど人件費を下げることに繋がる。このことから、何らかの理由で定検期間が延長され、作業可能日数に余裕ができた場合は、作業班数を制限した方が経済性の向上につながる事がわかる。

**Table 6 Effect of the Number of Maintenance Work Teams on Economic Efficiency**

項目		解析ケース	作業班数			
			最大4班 (基本ケース)	最大3班に制限	最大2班に制限	
0	定検期間	日	80	82	89	
	作業日数		57	59	66	
1	保全作業員費用	千円	302,606	300,661	299,075	
	直接費		226,935	226,935	226,935	
	間接費		75,671	73,726	72,140	
	(平均稼働人数)	人/日	(79)	(76)	(68)	
2	管理要員(QA/放管/安全)費用	千円	204,650	201,385	195,902	
	直接費		175,560	173,460	170,940	
	間接費		29,090	27,925	24,962	
3	(平均稼働人数)	人/日	(44)	(42)	(37)	
	上記保全費用合計(1+2)	千円	507,256	502,046	494,978	
	直接費		402,495	400,395	397,875	
	間接費		104,761	101,651	97,103	
	(平均稼働人数)	人	(123)	(118)	(105)	
4	基本ケースとの差	合計保全費用	千円	—	-5,210	-12,278
		直接費		—	-2,100	-4,620
		間接費		—	-3,110	-7,658
		(平均稼働人数)	人/日	—	(-5)	(-18)

**Table 7 Analytical Result on the Number of Maintenance Work Teams**

	作業班名	基本ケースの作業班数(解析条件)	作業班を最大3班と制限したケースの作業班数(解析結果)	作業班を最大2班と制限したケースの作業班数(解析結果)
1	ECT	1	1	1
2	MGB	2	1	1
3	PTチーム	1	1	2
4	UTチーム	3	3	2
5	VTチーム	2	2	2
6	計装A	1	2	1
7	計装B	2	2	1
8	弁機械A	4	3	2
9	弁機械B	1	1	1
10	弁機械C	1	1	1
11	弁電気A	1	1	1
12	弁電気B	1	1	1
13	ポンプ機械A	1	1	2
14	ポンプ機械B	1	1	1
15	ポンプ電気A	1	1	1
16	ポンプ電気B	1	1	1
17	ポンプ機械C	1	1	1
一	作業員延人数	113	102	94

(5) 作業員の多能工化が保全作業の経済性へ与える影響

原子力発電所の設備は、機械、電気、制御に関連する機器、部品から構成されており、これらが一体となっているものが多い。このような設備に対し、その保全作業に従事する作業員はそれぞれの職種別に人材が育成されており、異なる職種の保全作業を異なる職種の作業員が作業に当たることは通常ない。このため、一連の保全作業を実施する場合、作業が非効率的になりがちである。そこで保全作業に従事する作業員が異なる職種の作業にも対応できるように教育訓練した場合(これをここでは作業員の多能工化という)、その効果がどの程度なのか確認するため、解析を行った。解析の結果をTable 8に示す。

Table 8 に示す解析結果は、Table 2 に示す作業班名のうち、たとえば、弁機械チーム A と弁電気チーム A の保全作業を同一の作業班（あるいは作業員）が実施すると仮定して解析した結果である。この表から分かるように、シミュレーションの対象が限定された保全作業ではあるが、総保全費用約 5 億円の工事規模に対し、保全費用の低減額は約 26 百万円であり経済上の効果は比較的大きい。多能工化によるヒューマンエラーの増加が懸念されるが、諸外国の状況や他産業の状況を確認し、今後の方向性を検討することは重要な課題であると考えられる。

**Table 8 Effect of the Adoption of Multi-Skill Workers on Economic Efficiency**

項目		解析ケース	作業員の多能工化		
			職種別作業 (基本ケース)	電気機械作業 の同一班実施	
0	定検期間	日	80	80	
	作業日数		57	57	
1	保全作業員費用	千円	302,606	295,321	
	直接費		226,935	226,935	
	間接費		75,671	68,386	
	(平均稼働人数)	人	(79)	(73)	
2	管理要員(QA/放管/安全)費用	千円	204,650	186,017	
	直接費		175,560	159,600	
	間接費		29,090	26,417	
	(平均稼働人数)	人	(44)	(40)	
3	上記保全費用合計 (1+2)	千円	507,256	481,339	
	直接費		402,495	386,535	
	間接費		104,761	94,804	
	(平均稼働人数)	人	(123)	(113)	
4	基本ケースとの差	合計保全費用	千円	—	−25,917
		直接費		—	−15,960
		間接費		—	−9,957
		(平均稼働人数)	人	—	(−10)

(6) 地元作業員の活用が保全作業の経済性へ与える影響

我が国の原子力発電所の保全活動に地元の作業員を活用することは、従来から重要な課題となっているが、ここでは地元作業員を保全活動に活用することを想定してその経済効果がどの程度のものか確認するため、解析を行った。解析の結果を Table 9 に示す。なお、ここでいう経済効果とは、地元作業員を活用した場合、他地域から作業員を集めるのと異なり、旅費や宿泊費、出入り日当等の間接費が不要となると仮定して経済性への影響を確認することである。

原子力発電所の保全を実施するには一定の知識と技量が求められ、また多数の作業員が必要であるので、作業員全員を地元作業員とすることは現実的ではないが、このようなケースを想定すると、表中にあるように、総保全費用約 5 億円の工事規模に対し、保全費用の低減額は約 97 百万円であり経済上の効果は比較的大きいと言える。

**4. 結言**

プラント定検時は、数多くの保全作業が集中するため、多数の作業員や各種の情報が現場で錯綜するだけでなく、原子炉施設保安規定に基づく安全遵守

事項やその他数多くの制約条件が課される。このため、安全性の観点からだけでなく、経済性の観点からも定検期間全体に亘って平準化した作業量が計画されていることが望まれる。

このような保全実施段階における保全を最適化するため、保全実施計画の保全定量化手法を明らかにし、これを取り込んで保全実施計画立案のシミュレーション解析を実施した。これをプラント定検時に実施する一部の保全作業に適用した結果、定期検査期間全体に亘って作業量が平準化された経済性の高い保全実施計画を導出することができた。

本シミュレーション解析に用いた保全実施計画シミュレータを実際の原子力発電所における保全作業の実施計画立案作業に適用すれば、安全性に関する制約条件を満足し、経済性の観点から最適な作業員の動員計画を導出することができる。その計画に基づき現状の動員計画を修正すれば、得られる経済効果は小さくないと考える。

**Table 9 Effect of the Adoption of Maintenance Workers from Local Community on Economic Efficiency**

項目		解析ケース	作業員の所属箇所		
			他地域の作業員 (基本ケース)	地元作業員 (通勤費以外 間接費なし)	
0	定検期間	日	80	80	
	作業日数		57	57	
1	保全作業員費用	千円	302,606	233,728	
	直接費		226,935	226,935	
	間接費		75,671	6,793	
	(平均稼働人数)	人	(79)	(79)	
2	管理要員(QA/放管/安全)費用	千円	204,650	176,298	
	直接費		175,560	175,560	
	間接費		29,090	738	
	(平均稼働人数)	人	(44)	(44)	
3	上記保全費用合計 (1+2)	千円	507,256	410,026	
	直接費		402,495	402,495	
	間接費		104,761	7,531	
	(平均稼働人数)	人	(123)	(123)	
4	基本ケースとの差	合計保全費用	千円	—	−97,230
		直接費		—	±0
		間接費		—	−97,230
		(平均稼働人数)	人	—	(±0)

**参考文献**

[1] (社)日本電気協会, “原子力発電所の保守管理規程(JEAC4209-2007)”, 2007

[2] 青木, “大規模複雑プラントシステムの保全水準と安全水準の定量化手法に関する研究”, 日本保全学会誌「保全学」, Vol.9, No.3, pp.31-36 (2010)

[3] “原子力発電所の保全プログラムに基づく保全活動の検査手法に係わる調査・検討報告書”, 日本保全学会, pp.199-201 (平成 20 年 2 月)

[4] “RC158 軽水型原子力発電所保全研究分科会 研究報告書”, (社)日本機械学会, pp.C-2-15~C-2-20 (2000 年 3 月 31 日発行)

(平成 23 年 3 月 15 日)