

原子力施設の廃止措置に係る研究 II

－ AHP による最適な解体シナリオの検討－
(共同研究)

Research on Decommissioning of Nuclear Facilities II
- Study on Optimum Scenario Using the AHP -
(Joint Research)

芝原 雄司 石神 努 森下 喜嗣 柳原 敏
有田 裕二

Yuji SHIBAHARA, Tsutomu ISHIGAMI, Yoshitsugu MORISHITA, Satoshi YANAGIHARA
and Yuji ARITA

バックエンド推進部門

バックエンド技術開発ユニット

Nuclear Cycle Backend Technology Development Unit
Nuclear Cycle Backend Directorate

January 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

原子力施設の廃止措置に係る研究 II
－AHP による最適な解体シナリオの検討－
(共同研究)

日本原子力研究開発機構
バックエンド推進部門 バックエンド技術開発ユニット

芝原 雄司^{+1,*1}, 石神 努⁺², 森下 喜嗣⁺³, 柳原 敏^{*2}, 有田 裕二^{*2}

(2012 年 11 月 8 日受理)

原子力施設の合理的な廃止措置を進めるためには、想定される様々な解体手順（解体シナリオ）下でのプロジェクト管理データを事前に計算し、その結果を用いて最適な解体シナリオを選択することが必要である。廃止措置の研究分野では、最適な解体シナリオの選択のための意思決定に係る研究はほとんど行われておらず、今後の重要な検討課題の一つである。

原子力機構と福井大学は、解体作業の計画を策定する上で重要となる意思決定のための方法論に係る共同研究を平成 21 年度に開始した。本研究では、「ふげん」を対象に設備・機器の解体作業に関する複数の解体シナリオを想定して、人工数や廃棄物発生量などを計算し、その結果に基づいて幾つかの解体シナリオの中から合理的と考えられるものを選択するロジックを構築することを目的としている。

本年度は、給水加熱器の解体作業を対象に、平成 22 年度に行った多基準意思決定手法の一つである階層分析法（Analytic Hierarchy Process : AHP）を用いた最適な解体シナリオの選択に関する検討を行った。この結果、最適な解体シナリオの選定手法としての AHP の有用性を確認することができた。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

本研究は日本原子力研究開発機構と福井大学との共同研究に基づいて実施したものである。

⁺¹ 敦賀本部原子炉廃止措置研究開発センター（駐在）（現在、京都大学原子炉実験所）

⁺² 安全研究センターサイクル施設等安全研究ユニット

⁺³ 敦賀本部原子炉廃止措置研究開発センター

^{*1} 福井大学附属国際原子力工学研究所（現在、京都大学原子炉実験所）

^{*2} 福井大学附属国際原子力工学研究所

Research on Decommissioning of Nuclear Facilities II

- Study on Optimum Scenario Using the AHP -

(Joint Research)

Yuji SHIBAHARA^{+1,*1}, Tsutomu ISHIGAMI⁺², Yoshitsugu MORISHITA⁺³,
Satoshi YANAGIHARA^{*2} and Yuji ARITA^{*2}

Nuclear Cycle Backend Technology Development Unit,
Nuclear Cycle Backend Directorate, Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 8, 2012)

To implement a decommissioning project reasonably, it is necessary and important to calculate project management data beforehand as well as to select an optimum dismantling scenario among various scenarios postulated. Little study on the subject of selecting an optimum scenario has been carried out, and it is one of the most important issues in terms of decision making.

In FY 2009, Japan Atomic Energy Agency and University of Fukui launched the joint research of a decision making method which is important to determine a decommissioning plan. The purpose of this research is to formulate a methodology for selecting an optimum dismantling scenario among various scenarios postulated based on calculated results of project management data for FUGEN.

Project management data for several dismantling scenarios postulated at FUGEN were evaluated based on actual dismantling work for feedwater heater at FUGEN, and an optimum scenario was discussed using the AHP, one of Multi-Criteria Decision Analysis Methods.

This report describes the results of the joint research in FY 2010.

Keywords: Decommissioning, Optimum Scenario, Project Management Data,
Multi Criteria Decision Analysis Method, AHP

This work was carried out in the joint research of JAEA and University of FUKUI.

+1 Residence at Fugen Decommissioning Engineering Center, Tsuruga Head Office

(Present affiliation, Kyoto University Research Reactor Institute)

+2 Nuclear Safety Research Center

+3 Fugen Decommissioning Engineering Center, Tsuruga Head Office

*1 Research Institute of Nuclear Engineering, University of FUKUI

(Present affiliation, Kyoto University Research Reactor Institute)

*2 Research Institute of Nuclear Engineering, University of FUKUI

目 次

1.	はじめに -----	1
2.	「ふげん」の廃止措置 -----	3
2.1	「ふげん」の廃止措置の概要 -----	3
2.2	廃止措置の実施状況 -----	3
2.2.1	解体作業 -----	3
2.2.2	汚染の除去作業 -----	3
2.2.3	解体物のクリアランスへの対応 -----	4
2.2.4	原子炉本体の解体作業に係る技術開発 -----	4
3.	プロジェクト管理データの計算 -----	9
3.1	解体シナリオ -----	9
3.1.1	モデルケースの設定 -----	9
3.1.2	解体シナリオ -----	9
3.1.3	解体作業での作業性 -----	9
3.2	プロジェクト管理データの計算方法 -----	10
3.2.1	作業性の考慮方法 -----	10
3.2.2	解体シナリオのプロジェクト管理データの計算 -----	11
3.3	計算結果 -----	16
3.3.1	設置場所での作業に要する人工数および二次廃棄物発生量 -----	16
3.3.2	細断スペースでの作業に要する人工数および二次廃棄物発生量 -----	17
3.3.3	全工程での人工数および二次廃棄物発生量の計算結果の比較 -----	17
3.4	機器重量のプロジェクト管理データへの影響 -----	19
3.4.1	機器重量を変化させた場合の人工数の差の計算方法 -----	19
3.4.2	人工数の差の計算結果 -----	20
3.4.3	二次廃棄物発生量の差の計算結果 -----	21
3.5	プロジェクト管理データの計算までのまとめ -----	22
4.	最適化の検討 -----	37
4.1	AHP の概要 -----	37
4.2	評価基準と評価対象解体シナリオ -----	38
4.2.1	評価基準 -----	38
4.2.2	AHP による最適な解体シナリオの評価方法 -----	39
4.2.3	評価対象解体シナリオ -----	39
4.3	プロジェクト管理データの計算結果と解体シナリオの評価 -----	40

4.3.1	プロジェクト管理データの計算結果の評価	40
4.3.2	解体シナリオの評価結果	41
4.3.3	機器重量を変化させた場合の評価結果	44
4.4	最適化の検討のまとめ	46
5.	まとめ	59
	謝辞	60
	参考文献	60
付録 A	作業リスクの評価	61
A.1	作業リスク	61
A.2	非放射線リスクの評価	61
付録 B	シナリオ 1, 2-0 および 2-1 を対象とした最適な解体シナリオの検討結果	67
付録 C	ケース 1, 2 および 3 での各評価基準の重要度の計算	71

CONTENTS

1.	Introduction -----	1
2.	Decommissioning of FUGEN-----	3
2.1	Outline of Decommissioning of FUGEN-----	3
2.2	Implementation Status of Decommissioning-----	3
2.2.1	Dismantling activities -----	3
2.2.2	Decontamination activities -----	3
2.2.3	Activities for clearance of dismantled materials -----	4
2.2.4	Technological development for dismantling of nuclear reactor-----	4
3.	Calculation of Project Management Data -----	9
3.1	Dismantling Scenario-----	9
3.1.1	Model case -----	9
3.1.2	Scenario of dismantling for feedwater heater-----	9
3.1.3	Effect of workability for dismantling activity -----	9
3.2	Calculation Method -----	10
3.2.1	Correction method for workability -----	10
3.2.2	Calculation of project management data for dismantling scenarios -----	11
3.3	Calculation Results-----	16
3.3.1	Manpower needs and amounts of secondary waste for activities in installation site -----	16
3.3.2	Manpower needs and amounts of secondary waste for activities in site for cutting of cut pieces -----	17
3.3.3	Manpower needs and amounts of secondary waste for whole process-----	17
3.4	Effect of Weight of Equipment to Calculation Result of Project Management Data -----	19
3.4.1	Calculation method in case of various weight of equipment -----	19
3.4.2	Calculation results of difference in manpower needs-----	20
3.4.3	Calculation results of difference in amounts of secondary waste-----	21
3.5	Conclusions of Calculation of Project Management Data -----	22
4.	Study on Optimization -----	37
4.1	Outline of AHP -----	37
4.2	Evaluation Criteria and Dismantling Scenario-----	38
4.2.1	Evaluation criteria -----	38
4.2.2	Evaluation of optimum dismantling scenarios with AHP -----	39

4.2.3	Dismantling scenario -----	39
4.3	Evaluation of Project Management Data with AHP and Evaluation Results-----	40
4.3.1	Evaluation of project management data with AHP -----	40
4.3.2	Evaluation results of dismantling scenario -----	41
4.3.3	Evaluation Results in various weight of equipment -----	44
4.4	Conclusions of Study on Optimization-----	46
5.	Summary -----	59
Acknowledgement -----		60
References-----		60
Appendix A Evaluation of effect of working risk -----		61
A.1	Working risk -----	61
A.2	Evaluation of effect of nonirradiation risk-----	61
Appendix B Optimum scenario intended for scenario 1, 2-0 and 2-1 -----		67
Appendix C Calculation of degree of importance for case 1, 2 and 3-----		71

図表一覧

表の一覧

表 3.1	[細断スペース設置] に要する人工数の計算に用いた評価式
表 3.2	[細断スペース撤去] に要する人工数の計算に用いた評価式
表 3.3	設置場所での作業に要する人工数および二次廃棄物発生量 (「通常作業」の場合)
表 3.4	設置場所での作業に要する人工数および二次廃棄物発生量 (「高所作業」の場合)
表 3.5	設置場所での作業に要する人工数および二次廃棄物発生量 (「高所・狭隘部作業」の場合)
表 3.6	粗断回数に応じた細断スペースと足場面積
表 3.7	シナリオ 2 のうち [細断・収納] に要する人工数および二次廃棄物発生量
表 3.8	給水加熱器の解体作業に要する人工数, 設置場所作業期間および二次廃棄物発生量の 計算結果 (「通常作業」の場合)
表 3.9	給水加熱器の解体作業に要する人工数, 設置場所作業期間および二次廃棄物発生量の 計算結果 (「高所作業」の場合)
表 3.10	給水加熱器の解体作業に要する人工数, 設置場所作業期間および二次廃棄物発生量の 計算結果 (「高所・狭隘部作業」の場合)
表 4.1	一対比較表の概念と比較値の意味 (例)
表 4.2	プロジェクト管理データの計算結果
表 4.3	人工数に対する解体シナリオ間の一対比較表および各解体シナリオの評価点 (「通常作業」の場合)
表 4.4	各解体シナリオの評価点
表 4.5	各評価ケースで設定する各評価基準の重要度
表 4.6	解体シナリオの総合評価点 (「通常作業」, AHP)
表 4.7	各解体シナリオの評価点 (「通常作業」, SMART)
表 4.8	解体シナリオの総合評価点 (「通常作業」, SMART)
表 4.9	解体シナリオの総合評価点 (「高所作業」, AHP)
表 4.10	解体シナリオの総合評価点 (「高所・狭隘部作業」, AHP)
表 4.11	各解体シナリオの評価点 (機器重量 10ton)
表 4.12	各解体シナリオの評価点 (機器重量 50ton)
表 A.1	事故リスクのレベル
表 A.2	事故の発生頻度の一対比較表
表 A.3	事故の影響の一対比較表
表 B.1	評価基準から見た各解体シナリオの評価点
表 B.2	各解体シナリオの評価点の計算 (「通常作業」)
表 C.1	各評価基準の一対比較表

図の一覧

- 図 2.1 廃止措置の実施状況（平成 23 年 3 月現在）
- 図 2.2 タービン建屋での解体作業の状況
- 図 2.3 復水器周辺設備の解体作業の状況
- 図 2.4 重水冷却系に対するトリチウム除去の概要
- 図 2.5 重水循環ポンプに対する放射性腐食生成物の除去作業
- 図 2.6 原子炉本体の解体作業に係る技術開発（切断データ取得）
- 図 3.1 機器重量と機器長さおよび機器半径の関係
- 図 3.2 給水加熱器の解体作業を構成する作業項目（概要）
- 図 3.3 [粗断・細断・収納]，[粗断・仮置] および [細断・収納] を構成する作業項目
- 図 3.4 [給水加熱器の撤去] に要する人工数と機器重量との関係
- 図 3.5 細断スペースの概要
- 図 3.6 30ton の給水加熱器の解体作業に要する人工数の計算結果
- 図 3.7 30ton の給水加熱器の解体作業での二次廃棄物発生量の計算結果
- 図 3.8 シナリオ 2 のうち [細断・収納] で設置する細断スペースおよび足場面積
- 図 3.9 設置場所での作業に要する人工数の差
- 図 3.10 解体作業の全工程に要する人工数の差
- 図 3.11 解体作業の全工程での二次廃棄物発生量の差
- 図 4.1 階層構造の概念
- 図 4.2 本検討での最適な解体シナリオの選択に係る階層構造
- 図 4.3 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 30ton，「通常作業」，AHP）
- 図 4.4 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 30ton，「通常作業」，SMART）
- 図 4.5 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 30ton，「高所作業」，AHP）
- 図 4.6 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 30ton，「高所・狹隘部作業」，AHP）
- 図 4.7 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 10ton，「通常作業」，AHP）
- 図 4.8 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 10ton，「高所作業」，AHP）
- 図 4.9 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 10ton，「高所・狹隘部作業」，AHP）
- 図 4.10 シナリオ 2-0 に要する人工数に対する各作業項目の割合
- 図 4.11 シナリオ 2-0 の二次廃棄物発生量に対する各由来の割合
- 図 4.12 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 50ton，「通常作業」，AHP）
- 図 4.13 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 50ton，「高所作業」，AHP）

- 図 4.14 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による
最適な解体シナリオの関係（機器重量 50ton, 「高所・狹隘部作業」, AHP)
- 図 A.1 各事故のリスク（例）
- 図 A.2 事故リスクの総合評価結果
- 図 B.1 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による
最適な解体シナリオの関係

This is a blank page.

1. はじめに

我が国では、平成 23 年 3 月の時点、54 基の商業用原子力発電所が稼働しており、そのうち早期に操業を開始した 2 基は 40 年を超えて運転を続けていた。また、既に 3 基が運転を停止し廃止措置段階にあった。その後、平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災での東京電力（株）の福島第一原子力発電所事故により、上記の 3 基に加えて福島第一原子力発電所の廃止措置が必要となった。

原子力発電所の廃止措置の中で、解体作業の計画策定の際には、解体作業に必要な人工数（作業員数と作業時間の積）、作業員が受ける被ばく線量および発生する放射性廃棄物量などのプロジェクト管理データの評価、作業工程、作業リスクなどを含めた解体作業の安全性や合理性を十分に検討することが求められる。

日本原子力研究開発機構（以下、“原子力機構”）では、原子力施設の廃止措置計画を検討・策定するためのプロジェクト管理データの評価技術に係る研究開発を行っている。そこでは、プロジェクト管理データの計算に必要な評価式（機器の単位重量当たりの解体作業に要する人工数など）の整備も進めている。特に、平成 20 年度からは、将来の商業用原子力発電所や新型転換炉原型炉施設ふげん発電所（以下、“「ふげん」”）の原子炉施設の本格解体に役立てるため、「ふげん」の給水加熱器の解体作業を通して、人工数などの実績データを取得し、その分析を進めている。

一方、福井大学附属国際原子力工学研究所では、廃止措置に係る最適な解体作業の計画立案を検討することを目的とした意思決定手法などの検討を進めている。原子力機構で行われているプロジェクト管理データの評価技術および福井大学で行われている意思決定手法の検討を踏まえ、両機関が協力して、廃止措置での最適な解体シナリオを選択する方法の確立を目的として、平成 21 年度から共同研究を開始した。

平成 21 年度に行った本共同研究では、「ふげん」に設置された給水加熱器の解体作業を対象として、機器の設置場所での解体と廃棄物収納を実施する一括解体シナリオ、および機器の設置場所で機器を大まかに切断して別の場所に輸送した後に細かく切断して廃棄物収納を行う分割解体シナリオに対して、プロジェクト管理データの計算およびその結果に基づく最適な解体シナリオの選択方法などの検討を、多基準意思決定手法の一つである、スマート法（Simple Multi-Attribute Rating Technique : SMART）を用いて行った⁽¹⁾。

平成 22 年度は、多基準意思決定手法の一つである階層分析法（Analytic Hierarchy Process : AHP）を用いて、給水加熱器の解体作業を対象に最適な解体シナリオの選択に係る検討を行った。また、解体シナリオの選択に際して、給水加熱器の設置場所での作業性の影響も考慮した。

本報告書は、「ふげん」の廃止措置で行われた給水加熱器の解体作業を対象として、AHP による最適な解体シナリオの選択に係る検討結果をまとめたものである。

This is a blank page.

2. 「ふげん」の廃止措置

2.1 「ふげん」の廃止措置の概要

「ふげん」は、熱出力 557MW の重水減速沸騰軽水冷却圧力管型原子炉施設であり、昭和 53 年 3 月の初臨界以降約 25 年間の運転を行い、平成 15 年 3 月に運転を終了した。その後、廃止措置に必要な技術開発を進め、平成 20 年 2 月に廃止措置計画について国の認可を受け廃止措置段階に移行した。

現在、原子炉等規制法に従って、運転終了後も供用する設備の維持管理を行いながら、基本工程に基づいた、安全かつ合理的な施設の解体作業を進めている。

2.2 廃止措置の実施状況

使用済燃料貯蔵プールに貯蔵中の使用済燃料は、現在、原子力機構・核燃料サイクル工学研究所の再処理技術開発センターに搬出中である。また、減速材の重水は、再利用のためにカナダの民間電力会社に搬出中である。

設備の維持管理としては、使用済燃料の取扱または貯蔵に係るものについて、年 1 回の施設定期検査を受検している。廃止措置中も維持すべき施設については、適切な保全計画の下で、機能・性能を維持管理している。

これまでに既に終了したもしくは実施中である解体作業および汚染の除去作業の範囲（平成 23 年 3 月現在）を図 2.1 に、また、主な作業や技術開発の実施状況を以下に示す。

2.2.1 解体作業

解体作業は、解体物などの保管場所や廃棄物の物流ルート確保および解体物などを処理する装置設置のため、供用を終了した放射能レベルの比較的低いタービン設備の解体作業を行っている。図 2.2 に示す様に、これまでに主蒸気管、抽気管および第 3~5 給水加熱器などの解体作業を行っており、平成 22 年 9 月からは復水器周辺設備の解体作業を行った。図 2.3 に、平成 22 年度に行った復水器周辺設備の解体作業の状況を示す。

平成 21 年度に撤去した第 5 給水加熱器の設置場所には、クリアランスのためのウェットブラスト除染装置を設置した。平成 22 度は、汚染試料などを用いたウェットブラスト除染装置の性能確認試験を行っている。

なお、解体物は施設内に一時的に保管している。

2.2.2 汚染の除去作業

汚染の除去作業として、重水系統設備の解体作業時の被ばく線量の低減などを目的に、同系統設備に残留する重水の回収と、トリチウム除去作業および放射性腐食生成物の除去作業を行っている。トリチウム除去作業では、トリチウム除去装置を系統に接続して、乾燥空気の通気、局所加熱や真空引きを行い、系統内に残留するトリチウムを除去・回収する。重水冷却系に対するトリチウム除去の概要を図 2.4 に示す。また、トリチウム除去作業後、重水系統設備のうち放射性

腐食生成物による汚染の程度が大きい機器・配管などに対して、解体作業時の作業員の被ばく線量の低減を図るため、化学除染法を用いて放射性腐食生成物を除去する作業を進めている。図 2.5 に重水循環ポンプに付属する熱交換器の化学除染の例を示す。

2.2.3 解体物のクリアランスへの対応

解体物のクリアランスを目的に、平成 21 年度にクリアランスモニタをタービン建屋に設置し、運用の準備を進めている。本モニタは、解体物の表面汚染検査とクリアランス測定を行う機能を有しており、解体物の重量、核種組成比などのデータを基にクリアランス判定を行うものである。平成 22 年度は、測定評価に必要なデータを取得し、解体物中の放射能濃度の測定および評価方法の認可申請に向けた準備を進めている。タービン設備の解体物は、クリアランス制度の下に国の確認を経て、再利用または産業廃棄物として処分する計画である。

2.2.4 原子炉本体の解体作業に係る技術開発

原子炉本体の解体作業は高線量下であること、また、「ふげん」の原子炉本体は、軽水炉と異なり圧力管型で狭隘な構造であり、多様な金属材料を使用していることから、これらの特徴を考慮した水中切断技術や遠隔解体工法などが必要となる。このため、各種切断技術の性能データ取得試験（図 2.6）や、解体時の粉じん挙動を明らかにする試験を実施し、解体作業計画などに資するデータを取得している。

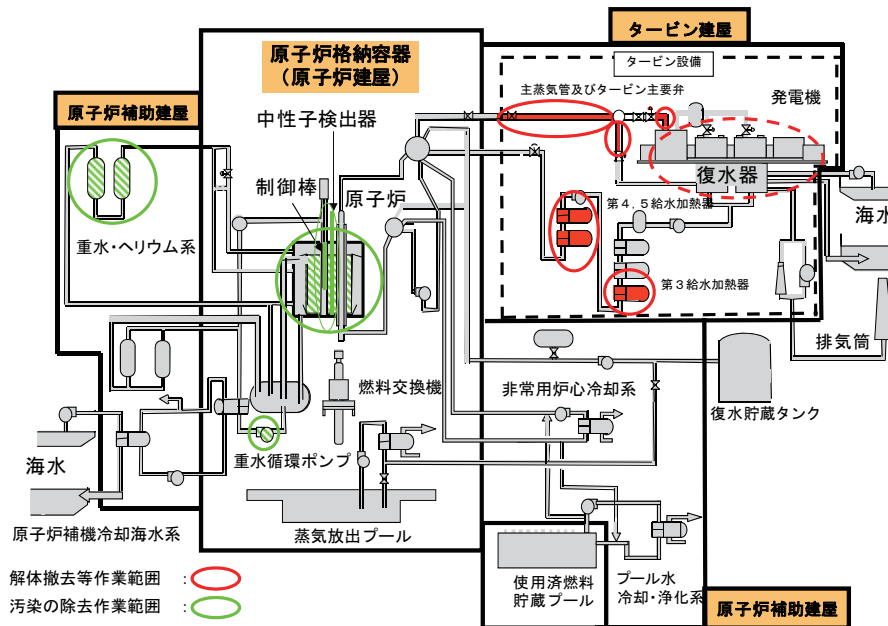


図 2.1 廃止措置の実施状況（平成 23 年 3 月の時点）

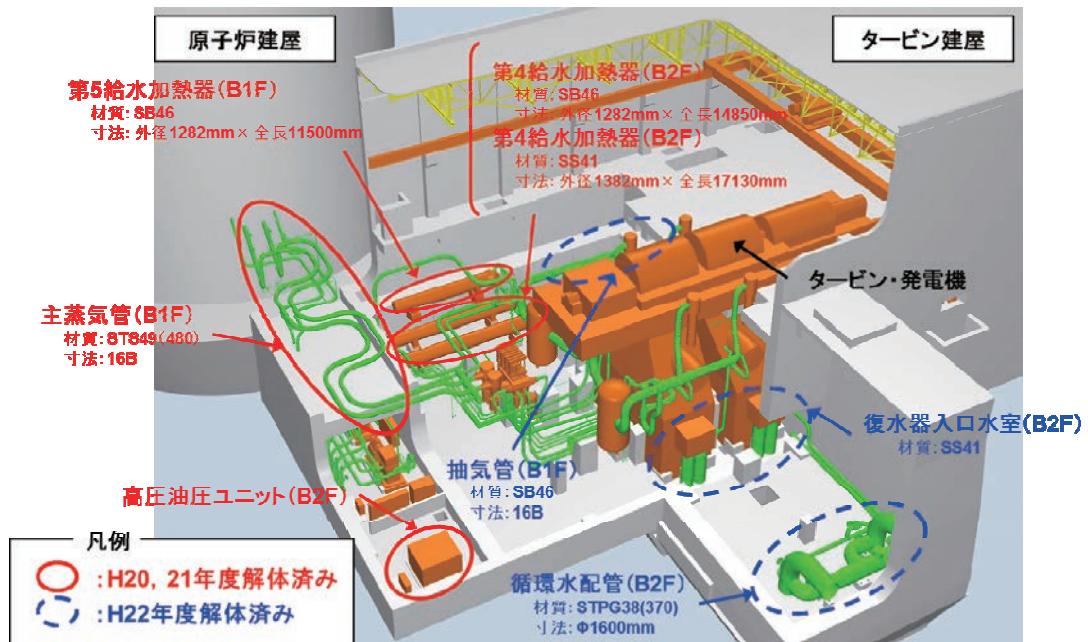


図 2.2 タービン建屋での解体作業の状況



復水器冷却水入口水室



復水器冷却水(海水)配管



復水器冷却水(海水)配管の解体作業の様子



図 2.3 復水器周辺設備の解体作業の状況

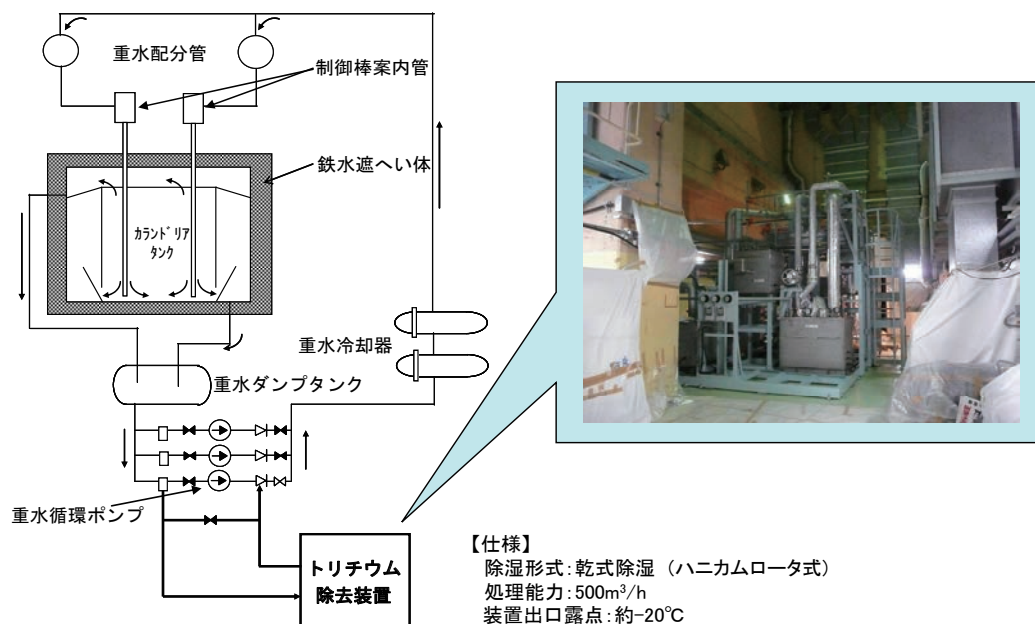
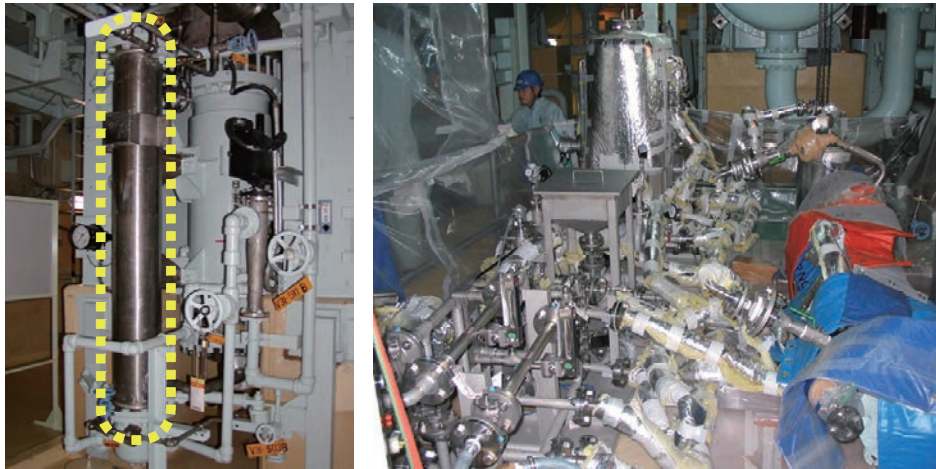


図 2.4 重水冷却系に対するトリチウム除去の概要



重水循環ポンプ用熱交換器

放射性腐食生成物の化学除染

図 2.5 重水循環ポンプに対する放射性腐食生成物の除去作業



図 2.6 原子炉本体の解体作業に係る技術開発（切断データ取得）

This is a blank page.

3. プロジェクト管理データの計算

平成 21 年度には、大型機器の解体作業に関して、1)設置場所およびその周辺（以下，“設置場所”）で、大まかな切断（以下，“粗断”）、細かな切断（収納容器に収納できる大きさへの切断：以下，“細断”）および収納容器への収納を行う一括解体シナリオと、2)設置場所での粗断と別の場所への移送・保管（以下，“仮置”）を行い、別途、細断および収納を行う分割解体シナリオに要するプロジェクト管理データの計算を行った⁽¹⁾。

平成 22 年度は、同様の解体シナリオに対して、大型機器を設置場所で解体する際の作業員の作業性を考慮したプロジェクト管理データの計算を行った。以下に、解体シナリオ、プロジェクト管理データの計算方法および計算結果を述べる。

3.1 解体シナリオ

3.1.1 モデルケースの設定

大型機器の解体作業に関するモデルケースとして、給水加熱器を想定した。この給水加熱器の形状データ（長さおよび半径）を設定するために、JPDR の第 1・2 給水加熱器並びに「ふげん」の第 1~5 給水加熱器およびタービン補機冷却器の機器重量と形状データの分析を行った。機器重量と機器長さおよび機器直径との関係は、図 3.1 に示す様に、JPDR と「ふげん」の給水加熱器は良く似た形状特性を有している。これより、給水加熱器の長さおよび直径は、機器重量 30ton を想定した場合、それぞれ 14.7m および 1.4m（体積：22.5m³）となる。本報告では、第 4 章で述べるプロジェクト管理データの計算結果を基にした最適解体シナリオの検討に資するために、「ふげん」に設置された比較的大型の機器として、機器重量 30ton を想定した給水加熱器の形状データを用いて解体シナリオに応じたプロジェクト管理データを求めた。

3.1.2 解体シナリオ

給水加熱器の解体シナリオとして、図 3.2 および図 3.3 に示すシナリオ 1 とシナリオ 2 を設定した。シナリオ 1 は、給水加熱器の設置場所で粗断と細断を行い、解体物を収納容器に収納する（〔粗断・細断・収納〕；以下、作業項目を〔xxx〕で示す）一括解体シナリオであり、シナリオ 2 は、設置場所で粗断した粗断片を別の場所に仮置き（以下，“〔粗断・仮置〕”）、その後、別の場所（以下，“細断スペース”）で細断および収納（以下，“〔細断・収納〕”）する分割解体シナリオである。

3.1.3 解体作業での作業性

本年度は、設置場所で解体する作業員の作業性として、シナリオ 1 およびシナリオ 2 のうち〔粗断・仮置〕に関して、「通常作業」、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」を考慮した。「通常作業」とは、大型機器が床面に設置され、解体作業が何の影響も受けない場合を指す。「高所作業」とは、大型機器が高所に設置され、解体作業が足場上で行われる場合を指している。また、「狭隘部作業」とは、大型機器が壁や天井、あるいは他の機器と隣接しており、大型機器周辺で

解体する作業員の作業スペースに制限が掛かる場合を指す。「高所・狭隘部作業」とは、「高所作業」と「狭隘部作業」での解体作業に対する制限が同時に掛かる場合を指す。

「高所作業」では、作業員の転落や物の落下などの要因により、作業員の傷害・死亡などの作業リスクの増加およびそれに伴う廃止措置計画の遅延が考えられる。この作業リスクは、シナリオ2では、設置場所で行われる「高所作業」および「高所・狭隘部作業」の作業期間を短くすることで低減できる。ここでは、作業リスクの低減を目的とした、下記の解体シナリオを想定した。

- シナリオ1： 設置場所で〔粗断・細断・収納〕を行う
- シナリオ2-0： 設置場所では切断せずに〔仮置〕を行い、後に細断スペースまで移動してそこで〔細断・収納〕を行う
- シナリオ2-1： 設置場所では粗断回数1回の〔粗断・仮置〕を行い、後に細断スペースまで移動してそこで〔細断・収納〕を行う
- シナリオ2-2, 2-3, 2-4, 2-5： 設置場所でそれぞれ粗断回数2, 3, 4, 5回の〔粗断・仮置〕を行い、後に細断スペースまで移動してそこで〔細断・収納〕を行う

上記解体シナリオでは、給水加熱器に加えて、その周辺領域に設置されている他の機器の解体作業を想定しており、〔作業領域養生〕、〔グリーンハウス設置〕および〔作業領域調査〕などの準備・後処理作業は周辺領域を含めた全体で行われると想定した。これより、解体シナリオ間での準備・後処理作業の差は無くなるため、これらの作業項目に関してはプロジェクト管理データの計算の対象外とした。なお、計算対象としたプロジェクト管理データは、給水加熱器の設置場所で行われる作業項目である、一括解体シナリオの〔粗断・細断・収納〕、解体物の収納に使用する収納容器を収納場所まで移動する〔廃棄物容器搬入〕および解体物を収納した収納容器を保管場所まで移動する〔廃棄物容器搬出〕、並びに分割解体シナリオの〔粗断・仮置〕および〔細断・収納〕である。

3.2 プロジェクト管理データの計算方法

3.2.1 作業性の考慮方法

プロジェクト管理データの計算には、旧日本原子力研究所で開発された COSMARD コード⁽²⁾⁻⁽⁴⁾を基に、現在、原子力機構が開発を進めている計算コード：PRODIA コードを用いた。PRODIA コードで使用している各種パラメータは、JPDR の解体作業で得られた実績データを基に作成しており⁽⁵⁾、現在、「ふげん」への適用性について検証を進めている⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。本研究では、その検証結果を基に、プロジェクト管理データの計算を行った。

3.1 節で述べた作業性を考慮する場合、PRODIA コードでは、以下に示す様に単位作業係数に補正を行う⁽²⁾⁻⁽⁵⁾：

$$UF_w = [1 + \sum(C(k) \times W_{cr}(k))] \times UF_n \quad \text{--- (3.1)}$$

UF_n ： 補正前の単位作業係数

UF_w ： 補正後の単位作業係数

$C(k)$: 補正の有無 (0 : 無, 1 : 有)

$W_{cr}(k)$: 補正係数

k : 作業性を示す指標

ここで, JPDR の解体作業で得た実績データの分析により, 「高所作業」および「狭隘部作業」の作業性に対する補正係数として共に 0.5 が得られている⁽⁵⁾.

補正後の単位作業係数は, 作業性を示す指標が「高所作業」の場合,

$$UF_w = [1 + 1 \times 0.5] \times UF_n = 1.5 \times UF_n \quad \text{--- (3.2)}$$

となり, 作業性を示す指標が「高所作業」と「狭隘部作業」の 2 つが合わさった「高所・狭隘部作業」の場合,

$$UF_w = [1 + (1 \times 0.5 + 1 \times 0.5)] \times UF_n = 2.0 \times UF_n \quad \text{--- (3.3)}$$

となる.

設置場所で行われる作業項目（「給水加熱器の撤去」など）に要する人工数は, 作業性が「高所作業」あるいは「高所・狭隘部作業」によって, 式(3.2)あるいは式(3.3)に示す補正後の単位作業係数を用いて計算した.

3.2.2 解体シナリオのプロジェクト管理データの計算

「通常作業」に要する人工数と二次廃棄物発生量の計算は次の通りに行った.

(1) 人工数の計算

① シナリオ 1 の人工数の計算

図 3.4 に示している JPDR の解体作業の実績データ⁽⁵⁾ (給水加熱器の解体作業に要する人工数と機器重量の関係) より, 「給水加熱器の撤去」に要する作業員の人工数 (JPDR モデル) : Y_{S1-1} (人・時) は以下の式で計算が出来る :

$$Y_{S1-1} = 21.9 \times m_e \quad \text{--- (3.4)}$$

ここで, m_e は機器重量 (ton) である.

シナリオ 1 では, 「給水加熱器の撤去」に加えて, 「コンクリート基礎ハツリ」(p.12 参照), 「廃棄物容器搬入」および「廃棄物容器搬出」が含まれている. 第 3・4 給水加熱器の解体作業に要した人工数の分析結果⁽⁶⁾および JPDR の解体作業の実績データより⁽²⁾⁻⁽⁴⁾, これらの作業項目に要する人工数 (「コンクリート基礎ハツリ」: Y_{S1-2} (人・時), 「廃棄物容器搬入」: Y_{S1-3} (人・時), 「廃棄物容器搬出」: Y_{S1-4} (人・時)) は, それぞれ以下の式で求めた :

$$Y_{S1-2} = 0.5 \times m_e$$

$$Y_{S1-3} = 1.6 \times m_e \quad \text{--- (3.5)}$$

$$Y_{S1-4} = 4.8 \times m_e \quad \text{--- (3.6)}$$

式(3.4)~式(3.6)より, シナリオ 1 に要する人工数 : Y_{S1} (人・時) を以下の式で求めた :

$$Y_{S1} = Y_{S1-1} + Y_{S1-2} + Y_{S1-3} + Y_{S1-4} \quad \text{--- (3.7)}$$

$$= 28.8 \times m_e$$

② シナリオ 2 の人工数の計算

シナリオ 2 に要する人工数： Y_{S2} （人・時）は，〔粗断・仮置〕および〔細断・収納〕に要する人工数： $Y_{①}$ （人・時）および $Y_{②}$ （人・時）を，それぞれ個別に計算した。

以下に，各作業項目に要する人工数の計算方法について述べる。

a. 〔粗断・仮置〕の人工数の計算

〔粗断・仮置〕に要する人工数は，図 3.2 および図 3.3 に示す 1) 〔切断準備〕，2) 〔切断・閉止〕および 3) 〔仮置〕の 3 つの作業項目に要する人工数の合計になる⁽⁶⁾。

〔切断準備〕は，給水加熱器が粗断中にコンクリート基礎から落下するのを防止するサポートを設置する〔仮支持設置〕および給水加熱器が設置されているコンクリート基礎側面を剥離する〔コンクリート基礎ハツリ〕で構成される。〔切断・閉止〕は，給水加熱器の外殻と伝熱管を切断する〔給水加熱器粗断〕および開口部への閉止板を溶接する〔開口部閉止〕で構成される。〔仮置〕は，重量物を移動するために床面へ鉄板を敷設する〔床養生〕および給水加熱器の粗断片を仮置き場所へ移動する〔移動〕で構成される。

〔粗断・仮置〕の人工数の計算には，上記作業項目を考慮した，第 3・4 給水加熱器の解体作業に要した人工数の分析結果で得られた式⁽⁶⁾を改良した以下の式⁽⁹⁾を用いた。

$$Y_{①} = (3.9 \times n + 1.8) \times m_e \quad \text{--- (3.8)}$$

ここで， n は粗断回数を表している。

粗断回数は，粗断を行わずにそのまま仮置するシナリオ 2-0 では $n=0$ ，他のシナリオ 2-1~2-5 では $n=1 \sim 5$ となる。なお， $n=5$ のときは，式(3.4)に示す JPDR の解体作業で得られた実績データから求めた式： $21.9 \times m_e$ とほぼ同じ： $21.3 \times m_e$ になる。本検討では，設置場所での作業期間の短縮を解体シナリオ検討の目的の一つとしているため， $n>5$ の検討は除外した。

$n=1 \sim 5$ の給水加熱器の〔粗断・仮置〕に要する人工数の計算結果を図 3.4 に示す。

b. 〔細断・収納〕の人工数の計算

〔細断・収納〕に要する人工数は，図 3.2 および図 3.3 に示す 1) 〔細断スペース設置〕，2) 〔粗断片細断・収納〕および 3) 〔細断スペース撤去〕の 3 つの作業項目に要する人工数の合計になる。

以下では，これらの作業項目に要する人工数の計算方法について述べる。

〔細断スペース設置〕に要する人工数

〔細断スペース設置〕は，前回の報告書⁽¹⁾と同様に，〔作業領域養生〕，〔グリーンハウス設置〕，〔資材機器搬入〕，〔解体用機器設置〕および〔足場設置〕で構成した。これらの作業項目のうち，〔作業領域養生〕，〔グリーンハウス設置〕および〔資材機器搬入〕に要する人工数は細断スペースの面積に依存し，〔足場設置〕に要する人工数は足場の面積に依存する。〔解体用機器の設置〕は，設置する解体用機器の種類に依存する。ここでは，〔粗断片細断・収納〕に

使用する工事用電源の設置と仮定し，JPDR の解体作業の実績データ⁽⁵⁾より得られた評価式（表 3.1 参照）を使用した。

第 3・4 給水加熱器室での機器の解体作業の分析で導出した各作業項目の人工数の評価式⁽⁷⁾（表 3.1 参照）を用いて，「細断スペース設置」の人工数： $Y_{\textcircled{2}-1}$ （人・時）を，以下の式で求めた：

$$Y_{\textcircled{2}-1} = 2.36 \times S + 0.42 \times S_f + 11.21 \quad \text{--- (3.9)}$$

ここで， S および S_f は，設置する細断スペースの面積（ m^2 ）および足場面積（ m^2 ）である。

細断スペースは，図 3.5 に示す様に，粗断片の周囲に幅 3m のマージンを設けた粗断片の細断作業を行う主スペースと，JPDR の解体作業で採られた作業手順と同様に，細断した外殻および伝熱管の収納作業を行う副スペース（ 17.4m^2 ）で構成した。この場合，細断スペースの面積： S （ m^2 ）は，以下の式で表すことができる。

$$S = (l + 6) \times (\Phi + 6) + 17.4 \quad \text{--- (3.10)}$$

ここで， Φ および l は，粗断片すなわち給水加熱器の直径（m），および粗断片の長さ（m）を表す。粗断片の直径は，図 3.1 に示す給水加熱器の重量と直径の関係式を用い，粗断片の長さ： l （m）は給水加熱器の長さ： L （m）と粗断回数： n より， $l = L/(n + 1)$ で求めた。足場は，粗断片の両脇に幅 1m のものを計 2 本設置すると仮定し，足場面積： S_f （ m^2 ）を以下の式より求めた。

$$S_f = (1 \times l) \times 2 = 2 \times l \quad \text{--- (3.11)}$$

「粗断片細断・収納」に要する人工数

「粗断片細断・収納」は，「粗断片搬入」，「解体範囲設定」，「粗断片の解体・収納」から構成されるとした。さらに，「粗断片の解体・収納」は「廃棄物容器搬入」，「粗断片の撤去」，「廃棄物容器搬出」から構成した。

「粗断片搬入」は粗断片の細断スペースへの移動作業であるため，「粗断・仮置」にある粗断片の「移動」を用いた。粗断片の「移動」に要する人工数： $Y_{\textcircled{2}-2}$ （人・時）は，以下の式で求めた：

$$\begin{aligned} Y_{\textcircled{2}-2} &= \sum 0.69 \times m_{cp} \\ &= 0.69 \times m_e \end{aligned} \quad \text{--- (3.12)}$$

ここで， m_{cp} は粗断片 1 つの重量（ton）である。

「解体範囲設定」は粗断片の細断のためのマーキングに要する作業であり，その作業に要する人工数は，粗断片の全投影面積をその指標とした。「解体範囲設定」に要する人工数： $Y_{\textcircled{2}-3}$ （人・時）は，以下の式で求めた：

$$Y_{\textcircled{2}-3} = 0.33 \times S_e \quad \text{--- (3.13)}$$

ここで， S_e は粗断片の全投影面積（ m^2 ）であり， $S_e = \sum (\Phi \times l) = \Phi \times L$ となる。

1 つの粗断片（重量： m_{cp} （ton））に対する「粗断片の解体・収納」に要する人工数： Y_{cp} （人・時）は，式(3.7)を用いると次式となる。

$$Y_{cp} = 28.3 \times m_{cp} \quad \text{--- (3.14)}$$

給水加熱器の粗断により発生した粗断片の重量は数 ton 以上であり，「開口部の閉止」でその開口部に蓋を溶接することを想定している．これより，外観上，1 つの粗断片は 1 基の「給水加熱器」と同等であるため，「粗断片の解体・収納」に要する人工数の計算には式(3.7)を使用した．給水加熱器の重量と粗断片の重量には， $m_e = \sum(m_{cp})$ の関係があるため，全ての粗断片を解体して容器に収納する「粗断片の解体・収納」に要する人工数： $Y_{②-2-1}$ （人・時）は，以下の様になる：

$$\begin{aligned} Y_{②-2-1} &= \sum(28.3 \times m_{cp}) \\ &= 28.3 \times m_e \end{aligned} \quad \text{--- (3.15)}$$

式(3.15)には，「廃棄物容器搬入」，「粗断片の撤去」，「廃棄物容器搬出」が含まれる．

式(3.12)～式(3.15)より，「粗断片細断・収納」に要する人工数： $Y_{②-2}$ （人・時）は，以下の様になる：

$$\begin{aligned} Y_{②-2} &= Y_{②-2-1} + Y_{②-2-2} + Y_{②-2-3} \\ &= 28.99 \times m_e + 0.33 \times S_e \end{aligned} \quad \text{--- (3.16)}$$

「細断スペース撤去」に要する人工数

「細断スペース撤去」は，「資材機器搬出」，「足場撤去」，「片付け整理」，「グリーンハウス撤去」および「解体用機器搬出」で構成されると仮定した．

「細断スペース撤去」に要する人工数： $Y_{②-3}$ （人・時）は，式(3.9)の導出で使用したパラメータ，細断スペース面積： S （m²）および足場面積： S_f （m²），並びに表 3.2 の評価式より，以下の式になる：

$$Y_{②-3} = 1.82 \times S + 0.28 \times S_f + 14.29 \quad \text{--- (3.17)}$$

「細断・収納」全体に要する人工数

式(3.9)，式(3.16)および式(3.17)より，「細断・収納」に要する人工数： $Y_{②}$ （人・時）は，以下の式となる：

$$\begin{aligned} Y_{②} &= Y_{②-1} + Y_{②-2} + Y_{②-3} \\ &= 28.99 \times m_e + 0.33 \times S_e + 4.18 \times S + 0.70 \times S_f + 25.50 \end{aligned} \quad \text{--- (3.18)}$$

(2) 設置場所での作業期間

設置場所での作業期間： T （日）は，式(3.7)および式(3.8)で示す，シナリオ 1 あるいはシナリオ 2 のうち「粗断・仮置」に要する人工数：それぞれ Y_{S1} （人・時）および $Y_{①}$ （人・時），並びに 1 日当りの作業員の投入人数： p （人/日）および 1 日当りの作業時間： t （時間/日）を用いた以下の式で求めた：

$$T = Y / (p \times t) \quad \text{--- (3.19)}$$

式(3.19)は、JPDR の解体作業の条件に合わせて 1 日当たりの作業員の投入人数を 5 人、1 日当たりの作業時間を 4 時間とした場合には、以下の様になる：

$$T = Y/20 \quad \text{--- (3.20)}$$

(3) 二次廃棄物発生量の計算

二次廃棄物としては、作業員の装備品と細断スペースであるグリーンハウスの構造材であるビニールシートを考慮した。作業員の装備品に由来する二次廃棄物発生量を D_1 (kg)，細断スペースに由来する二次廃棄物を D_2 (kg) としたとき、二次廃棄物発生量の合計： D (kg) は以下の様になる：

$$D = D_1 + D_2 \quad \text{--- (3.21)}$$

以下に、 D_1 および D_2 それぞれの計算方法を示す。

① 作業員の装備品に由来する二次廃棄物発生量の計算

作業員の装備品に由来する二次廃棄物発生量： D_1 (kg) は、各作業項目に要する人工数： Y_i (人・時) に依存するため、人形峠環境技術センターの製錬転換施設での実績データより導出した単位係数 (9.84×10^{-2} kg/人・時) を用いて、以下の式で計算した：

$$D_1 = 9.84 \times 10^{-2} \times \sum Y_i \quad \text{--- (3.22)}$$

② 細断スペースに由来する二次廃棄物発生量の計算

細断スペースに由来する二次廃棄物には、グリーンハウスの構造材として使用したビニールシートを考慮した。この発生量： D_2 (kg) は、細断スペースの表面積： S_A (m²) に依存するため、装備品と同様に製錬転換施設での実績データより導出した単位係数 (10.12×10^{-2} kg/m²) を用い、以下の式で計算した：

$$D_2 = 10.12 \times 10^{-2} \times S_A \quad \text{--- (3.23)}$$

ここで、 S_A (m²) は、設置した細断スペースの主スペースと副スペースの表面積の合計である。

[細断・収納] の人工数の計算で述べた様に、細断スペースは、粗断片を搬入、細断するための主スペースと細断片を収納するための副スペースとに分かれている。主スペースの表面積： S_{A-m} (m²) は、設置したグリーンハウスの高さを 3m とすると、以下の様になる：

$$S_{A-m} = S \times 2 + 3 \times l \times 2 + 3 \times \Phi \times 2 \quad \text{--- (3.24)}$$

また、副スペースの表面積： S_{A-s} (m²) は、同様に高さを 3m とすると、以下の様になる：

$$S_{A-s} = 3 \times 3 \times 2 + 5.8 \times 3 \times 2 + 3 \times 5.8 \times 2 = 87.6 \quad \text{--- (3.25)}$$

式(3.24)および式(3.25)より、全ての細断スペースの表面積： S_A (m²) は、以下の様になる：

$$S_A = S_{A-m} + S_{A-s} = S \times 2 + 3 \times l \times 2 + 3 \times \Phi \times 2 + 87.6 \quad \text{--- (3.26)}$$

式(3.23)および式(3.26)より，細断スペースに由来する二次廃棄物発生量： D_2 (kg) は，以下の様になる：

$$D_2 = 10.12 \times 10^{-2} \times (S \times 2 + 3 \times l \times 2 + 3 \times \Phi \times 2 + 87.6) \quad \text{--- (3.27)}$$

3.3 計算結果

3.3.1 設置場所での作業に要する人工数および二次廃棄物発生量

シナリオ1およびシナリオ2のうち〔粗断・仮置〕に要する人工数は，それぞれ式(3.7)および式(3.8)を用いて計算した．また，設置場所での作業性について，式(3.2)～式(3.3)に示す補正後の単位作業係数を用いた．

以下に，設置場所での作業性が「通常作業」，「高所作業」および「高所・狭隘部作業」での結果を示す．

(1) 「通常作業」

「通常作業」のシナリオ1およびシナリオ2のうち〔粗断・仮置〕に要する人工数および二次廃棄物発生量を表3.3に示す．

シナリオ1の場合864人・時の人工数を要し，シナリオ2のうち〔粗断・仮置〕では粗断回数に伴い，人工数は54人・時から639人・時に増加する．設置場所での作業期間は，シナリオ1の場合43日となり，シナリオ2のうち〔粗断・仮置〕では粗断回数に伴い3日から32日に増加する．

二次廃棄物発生量は，シナリオ1の場合85kgとなり，シナリオ2のうち〔粗断・仮置〕では粗断回数に伴い5kgから63kgに増加する．

(2) 「高所作業」

「高所作業」のシナリオ1およびシナリオ2のうち〔粗断・仮置〕に要する人工数および二次廃棄物発生量を表3.4に示す．

シナリオ1の場合1,296人・時の人工数を要し，シナリオ2のうち〔粗断・仮置〕は粗断回数に伴い，人工数は81人・時から959人・時に増加する．設置場所での作業期間は，シナリオ1の場合65日となり，シナリオ2のうち〔粗断・仮置〕は粗断回数に伴い4日から48日に増加する．

二次廃棄物発生量は，シナリオ1の場合128kgとなり，シナリオ2のうち〔粗断・仮置〕は粗断回数に伴い8kgから94kgに増加する．

(3) 「高所・狭隘部作業」

「高所・狭隘部作業」のシナリオ1およびシナリオ2のうち〔粗断・仮置〕に要する人工数および二次廃棄物発生量を表3.5に示す．

シナリオ1の場合1,728人・時の人工数を要し，シナリオ2のうち〔粗断・仮置〕は粗断回数に伴い，人工数は108人・時から1,278人・時に増加する．設置場所での作業期間は，シナリオ

1 の場合 86 日となり、シナリオ 2 のうち〔粗断・仮置〕は粗断回数に伴い 5 日から 64 日に増加する。

二次廃棄物発生量は、シナリオ 1 の場合 170kg となり、シナリオ 2 のうち〔粗断・仮置〕は粗断回数に伴い 11kg から 126kg に増加する。

3.3.2 細断スペースでの作業に要する人工数および二次廃棄物発生量

図 3.2 および図 3.3 に示す様に、〔粗断・仮置〕で粗断片を別の場所に移設した後に行われる〔細断・収納〕は、〔細断スペース設置〕、〔粗断片細断・収納〕、〔細断スペース撤去〕に分けることが出来る。

設置場所での作業性が悪いので、別に細断スペースを設置して作業することを想定しているため、細断スペースでの作業性は全て「通常作業」として、細断スペースでの作業に要する人工数を計算した。

以下では、これらを個別に計算する。

30ton の給水加熱器の場合の各解体シナリオでの粗断回数に応じた細断スペースと足場面積を表 3.6 に示す。また、各解体シナリオでの細断スペースの設置および撤去に要する人工数を表 3.7 に示す。

〔細断スペース設置〕に要する人工数は、粗断回数に応じて、429 人・時から 202 人・時に減少する。同様に、〔細断スペース撤去〕に要する人工数は、粗断回数の増加に伴い 335 人・時から 161 人・時に減少した。これは、表 3.6 に示す様に、粗断片長さおよびそれに影響される細断スペース面積が粗断回数の増加に応じて減少するためである。

一方、〔粗断片細断・収納〕に要する人工数は 877 人・時になった。表 3.3 に示す「通常作業」での〔粗断・細断・収納〕に要する人工数：849 人・時より多くなっているのは、式(3.14)および式(3.15)で示す細断スペースへの粗断片の搬入およびマーキングに要する人工数が加算されているためである。

3.3.3 全工程での人工数および二次廃棄物発生量の計算結果の比較

給水加熱器を設置場所で〔粗断・細断・収納〕を行うシナリオ 1 と、設置場所で〔粗断・仮置〕を行い、細断スペースで〔細断・収納〕を行うシナリオ 2 に要する人工数および二次廃棄物発生量の比較を行う。

(1) 「通常作業」

「通常作業」の場合の全工程に要する人工数を表 3.8 および図 3.6 に示す。

シナリオ 1 の場合、解体物を収納する廃棄物容器の搬入などに要する人工数を考慮に入れると、全工程で 864 人・時を要する。一方、設置場所で〔粗断・仮置〕を行い、細断スペースで〔細断・収納〕するシナリオ 2-0 を選択した場合の全工程に要する人工数は 1,695 人・時となり、シナリオ 1 と比較して 2.0 倍程度人工数を多く要する。

シナリオ 2-0~2-5 で比較すると、粗断回数 $n=1$ であるシナリオ 2-1 で最も少ない人工数を示し、シナリオ 2-1~2-3 ($n=1\sim3$) はシナリオ 2-0 ($n=0$) よりも少ない人工数になる。これは、シナリオ 2 の全工程に要する人工数に対する設置場所での〔粗断・仮置〕に要する人工数の割合が最大でも 34%程度（シナリオ 2-5 の場合）と少なく、細断スペースでの〔細断・収納〕に要する人工数

が大きく影響すること、[細断・収納]に要する人工数はシナリオ 2-0 ($n=0$) が最も多く、粗断回数に伴い減少することが原因である。

全工程で発生する二次廃棄物発生量を表 3.8 および図 3.7 に示す。シナリオ 1 の場合、全工程で発生する二次廃棄物発生量は 85kg となる。一方、シナリオ 2-0 を選択した場合、シナリオ 1 と比較して 2.6 倍程度多い 220kg の二次廃棄物が発生する。

シナリオ 2-0~2-5 で比較すると、粗断回数 $n=2$ であるシナリオ 2-2 で最も少ない二次廃棄物発生量を示し、シナリオ 2-1~2-5 ($n=1\sim5$) はシナリオ 2-0 ($n=0$) よりも少ない二次廃棄物発生量となる。これは、[細断スペース設置] および [細断スペース撤去] に必要な作業員の装備および設置したグリーンハウスに由来する二次廃棄物が大きく影響しているためである。

グリーンハウス由来の二次廃棄物発生量は細断スペースの面積に影響する粗断片の大きさに強く依存している。表 3.6 に示す様に、シナリオ 2-1~2-5 の粗断片の長さは平均 4.3m となり、シナリオ 2-0 (14.9m) の 29%となっている。また、シナリオ 2-1~2-5 の細断スペースの面積は平均 94m² とシナリオ 2-0 (172m²) と比較して 55%程度になっている。細断スペース由来の二次廃棄物発生量は、式 (3.26) に示す様に、粗断片長さ、粗断片直径、細断スペースの面積に依存するために、シナリオ 2-0 はシナリオ 2-1~2-5 よりも多くなる。

一方、[細断スペース設置] および [細断スペース撤去] に必要な作業員の装備に由来する二次廃棄物は、式(3.21)に示す様に、作業員の人工数に依存すること、およびこの人工数は、表 3.1 および表 3.2 に示す様に、細断スペースの面積に依存することが原因となり、細断スペース由来の二次廃棄物発生量と同様にシナリオ 2-0 はシナリオ 2-1~2-5 よりも多くなる。

(2) 「高所作業」

「高所作業」の場合の全工程に要する人工数を表 3.9 および図 3.6 に示す。

シナリオ 1 の場合、全工程に要する人工数は 1,296 人・時になる。一方、シナリオ 2-0 を選択した場合、シナリオ 1 と比較して 1.4 倍程度人工数を多く要し、全工程で 1,722 人・時となる。

シナリオ 2-0~2-5 で比較すると、粗断回数 $n=1$ であるシナリオ 2-1 が最も少ない人工数を示すことには変わらないが、設置場所での [粗断・仮置] に要する人工数が「通常作業」の約 1.5 倍と作業性が影響する。このため、 $n=0$ であるシナリオ 2-0 よりも人工数が少なくなるのは、最小の人工数を示すシナリオ 2-1 ($n=1$) だけとなる。

全工程で発生する二次廃棄物発生量を表 3.9 および図 3.7 に示す。シナリオ 1 の場合、全工程で発生する二次廃棄物発生量は 128kg となる。一方、シナリオ 2-0 を選択した場合、シナリオ 1 と比較して 1.8 倍程度多い 223kg の二次廃棄物発生量が見込まれる。

シナリオ 2-0~2-5 で比較すると、粗断回数 $n=1$ であるシナリオ 2-1 で最も少ない二次廃棄物発生量を示し、シナリオ 2-1~2-5 ($n=1\sim5$) はシナリオ 2-0 ($n=0$) よりも少ない二次廃棄物発生量となる。最少の二次廃棄物発生量が粗断回数 $n=1$ であるシナリオ 2-1 となったのは、設置場所での [粗断・仮置] に要する人工数が作業性の影響を受けて「通常作業」の 1.5 倍になったことが原因である。

(3) 「高所・狭隘部作業」

「高所・狭隘部作業」の場合の全工程に要する人工数を表 3.10 および図 3.6 に示す。

シナリオ 1 の場合、全工程に要する人工数は 1,727 人・時となる。一方、シナリオ 2-0 ($n=0$) を選択した場合、シナリオ 1 との差はほぼ無く、全工程で 1,749 人・時の人工数を要する。また、シナリオ 2-0~2-5 で比較すると、シナリオ 2-1 ($n=1$) が最も少ない人工数を示すことには変わらないが、設置場所での「粗断・仮置」に要する人工数が通常作業の 2 倍と作業性の影響を受け、シナリオ 2-0 ($n=0$) とシナリオ 2-1 ($n=1$) は全工程の人工数が同程度となる。

全工程で発生する二次廃棄物発生量を表 3.10 および図 3.7 に示す。シナリオ 1 の場合、全工程で発生する二次廃棄物発生量は 170kg となる。一方、シナリオ 2-0 を選択した場合、シナリオ 1 と比較して 1.4 倍程度多い 226kg の二次廃棄物発生量が見込まれる。

シナリオ 2-0~2-5 で比較すると、「高所作業」と同様に、粗断回数 $n=1$ であるシナリオ 2-1 で最も少ない二次廃棄物発生量を示し、シナリオ 2-1~2-5 ($n=1\sim5$) はシナリオ 2-0 ($n=0$) よりも少ない二次廃棄物発生量となる。

3.4 機器重量のプロジェクト管理データへの影響

3.3 節は、30ton の給水加熱器を対象とした解体シナリオのプロジェクト管理データの計算結果を示している。本節では、給水加熱器の重量： m_e を 10~50ton に変化させた場合のプロジェクト管理データへの影響について検討を行った。

以下に、設置場所での作業および全工程の作業に要する、シナリオ 1 とシナリオ 2 の人工数の差の計算結果、および二次廃棄物発生量の差の計算結果を示す。

3.4.1 機器重量を変化させた場合の人工数の差の計算方法

(1) 設置場所での作業に要する人工数の差の計算式

3.2 節で示した式より、設置場所での作業に要する、シナリオ 1 の人工数（式(3.7)参照）： Y_{S1} （人・時）と、シナリオ 2 のうち「粗断・仮置」の人工数（式(3.8)参照）： $Y_{①}$ （人・時）の差： ΔY_1 （人・時）を以下の式で求めた：

$$\Delta Y_1 = Y_{①} - Y_{S1} \quad \text{--- (3.28)}$$

給水加熱器の設置場所での作業性を考慮した場合、式(3.1)の補正後の単位作業係数を用いると、式(3.28)は以下の様になる：

$$\begin{aligned} \Delta Y_1 &= [1 + \sum(C(k) \times W_{cr}(k))] \times (Y_{①} - Y_{S1}) \\ &= [1 + \sum(C(k) \times W_{cr}(k))] \times [(3.9 \times n + 1.8) \times m_e - 28.3 \times m_e] \\ &= [1 + \sum(C(k) \times W_{cr}(k))] \times (3.9 \times n \times m_e - 26.5 \times m_e) \end{aligned} \quad \text{--- (3.29)}$$

(2) 全工程での作業に要する人工数の差の計算式

シナリオ 1 の人工数： Y_{S1} （人・時）とシナリオ 2 の全工程の人工数： $Y_{S2}(= Y_{①} + Y_{②})$ （人・時）の差： $\Delta Y_2 (= Y_{S2} - Y_{S1})$ （人・時）を以下の式で表す：

$$\begin{aligned} \Delta Y_2 &= \{[1 + \sum(C(k) \times W_{cr}(k))] \times Y_{①} + Y_{②}\} - [1 + \sum(C(k) \times W_{cr}(k))] \times Y_{S1} \\ &= [1 + \sum(C(k) \times W_{cr}(k))] \times (Y_{①} - Y_{S1}) + Y_{②} \end{aligned} \quad \text{--- (3.30)}$$

$$\begin{aligned}
&= \Delta Y_1 + Y_{\text{②}} \\
&= [1 + \sum(C(k) \times W_{cr}(k))] \times (3.9 \times n \times m_e - 26.5 \times m_e) \\
&\quad + [28.99 \times m_e + 0.33 \times S_e + 4.18 \times S + 0.70 \times S_f + 25.50]
\end{aligned}$$

式(3.30)の $Y_{\text{②}}$ は、式(3.18)に示す様に、機器重量： m_e (ton)，細断スペース： S (m²) および足場面積： S_f (m²) の関数である。この S および S_f は共に機器重量および粗断回数に依存するため、式(3.30)も機器重量と粗断回数のみに依存する。 $m_e=10\sim 50\text{ton}$, $n=0\sim 5$ での S および S_f の計算結果は図 3.8 に示す様になり、機器重量が大きく、粗断回数が少なくなるに伴い、面積は逆に増加する。 $m_e=50$, $n=0$ の場合、 $S=256\text{m}^2$, $S_f=50\text{m}^2$ になる。

3.4.2 人工数の差の計算結果

(1) 設置場所での作業に要する人工数の差の計算結果

式(3.29)を用いた、機器重量 $m_e=10\sim 50\text{ton}$ での設置場所での作業に要する人工数の差、つまりシナリオ 1 とシナリオ 2 のうち「粗断・仮置」に要する人工数の差 ΔY_1 (人・時) の計算結果は図 3.9 の様になった。

以下に、各作業性での設置場所での作業に要する人工数の差の計算結果を示す。

①「通常作業」

「通常作業」の場合、シナリオ 2 の選択による設置場所での作業に要する人工数の差は、粗断回数 $n=0$ のシナリオ 2-0 では機器重量 $m_e=50\text{ton}$ の時に最大で 1,500 人・時程度の削減 ($\Delta Y_1=-1,500$ 人・時) が見込まれる。一方で、シナリオ 2 では $m_e=10\text{ton}$ の場合、人工数の削減は $n=2\sim 5$ の場合で 200 人・時以下であり、 $m_e=20\text{ton}$ の場合では、 $n=5$ の時に人工数の削減は 200 人・時以下となる。1 日当りの作業員の投入人数および 1 日当りの作業時間を JPDR の解体作業と同様に 5 名および 4 時間とし、かつ 1 週間の作業日数を 5 日とした場合、200 人・時の短縮は 2 週間の短縮になる。

②「高所作業」

「高所作業」の場合、シナリオ 2 の選択による設置場所での作業に要する人工数は、粗断回数 $n=0$ のシナリオ 2-0 では機器重量 $m_e=50\text{ton}$ の時に最大で 2,000 人・時程度の削減が見込まれる。一方で、シナリオ 2 では、 $m_e=10\text{ton}$ の場合、 $n=4\sim 5$ の場合だけで人工数の削減が 200 人・時以下となる。「高所作業」では「通常作業」と比べて、シナリオ 2 の選択による人工数の削減効果が大きくなる。

③「高所・狭隘部作業」

「高所・狭隘部作業」の場合、粗断回数 $n=0$ のシナリオ 2 の選択による設置場所での作業に要する人工数は、シナリオ 2-0 では機器重量 $m_e=50\text{ton}$ の時に 2,500 人・時程度の削減が見込まれる。一方で、シナリオ 2 では、 $m_e=10\text{ton}$ の場合、 $n=5$ の場合だけで人工数の削減が 200 人・時以下となる。「高所・狭隘部作業」では「高所作業」と比べて、シナリオ 2 の選択による人工数の削減効果が大きくなる。

(2) 全工程での作業に要する人工数の差の計算結果

式(3.29)を用いた、 $m_e=10\sim 50\text{ton}$ でのシナリオ1とシナリオ2の全工程に要する人工数の差 ΔY_2 (人・時)の計算結果は図3.10の様になった。

以下に、各作業性での全工程に要する人工数の差の計算結果を示す。

①「通常作業」

「通常作業」の場合、シナリオ2の選択による全工程での作業に要する人工数は、粗断回数 $n=5$ のシナリオ2-5では機器重量 $m_e=50\text{ton}$ の時に1,500人・時程度の増加が見込まれる。一方で、シナリオ2では、機器重量に因らず $n=1\sim 2$ は $n=0$ よりも少ない人工数となり、 $n=3$ の場合には $n=0$ と同等の人工数になる。これは、3.3.3項で述べている様に、シナリオ2の全工程に要する人工数に対する「粗断・仮置」に要する人工数の割合が少なく、「細断・収納」に要する人工数が大きく影響すること、および「細断・収納」に要する人工数は粗断回数に伴い減少し、 $n=0$ が最も多く要することが影響している。 ΔY_2 の計算結果より、シナリオ2を選択する際には $n=1$ または2で行う方が少ない人工数で済むため、効率が良い。

②「高所作業」

「高所作業」の場合、シナリオ2の選択による全工程での作業に要する人工数は、粗断回数 $n=5$ のシナリオ2-5では機器重量 $m_e=50\text{ton}$ の時に1,400人・時程度の増加が見込まれ、「通常作業」の場合よりも人工数の増加は低減される。一方で、シナリオ2では、 $n=0$ よりも少ない人工数が $n=1$ の場合に限定され、 $n=2\sim 5$ では $n=0$ よりも多くなる。これは、シナリオ2の全工程に要する人工数に対する設置場所での「粗断・仮置」に要する人工数の割合が「通常作業」よりも多くなることが原因である。

③「高所・狭隘部作業」

「高所・狭隘部作業」の場合、シナリオ2の選択による全工程での作業に要する人工数は、粗断回数 $n=5$ のシナリオ2-5では機器重量 $m_e=50\text{ton}$ の時に1,200人・時程度の増加が見込まれ、「通常作業」および「高所作業」よりも人工数の増加は低減される。一方、シナリオ2では、 $n=0\sim 2$ では機器重量に伴いシナリオ1との人工数との差は低減される。特に、 $m_e=40\sim 50\text{ton}$ の場合には、 $n=0\sim 1$ の時にシナリオ1よりも少ない人工数で行える。

3.4.3 二次廃棄物発生量の差の計算結果

シナリオ1とシナリオ2での二次廃棄物発生量の差 $\Delta D(=D_{S1} - D_{S2})$ (kg)の計算結果を図3.11に示す。人工数とは異なり、二次廃棄物発生量は全ての条件でシナリオ1よりシナリオ2の方が多くなる。これは、細断スペースに設置したグリーンハウスに使用したビニールシートの量に由来している。

粗断回数が同じ場合には、全ての作業性で二次廃棄物発生量は機器重量と共に増加する。シナリオ2の選択による二次廃棄物発生量は、粗断回数 $n=5$ のシナリオ2-5では機器重量 $m_e=50\text{ton}$ の時に、「通常作業」で190kg程度、「高所作業」で170kg程度、「高所・狭隘部作業」で150kg程度となり、作業性の低下に伴い減少する。一方、シナリオ2では、「通常作業」では $n=1\sim 5$ で

$n=0$ よりも二次廃棄物発生量の低減が見込まれるが、この条件は「高所作業」では $n=1\sim3$ に限定され、「高所・狭隘部作業」になると $n=1\sim2$ になる。

また、「通常作業」では、 $n=1$ よりも $n=2$ の方が二次廃棄物発生量は少ない。これは、粗断回数の増加に伴う二次廃棄物発生量の増加よりも、粗断回数の増加に伴う細断スペースの面積の減少が原因となるグリーンハウスに使用したビニールシートの量の減少が大きく影響しているためである。

3.5 プロジェクト管理データの計算までのまとめ

大型機器の解体作業に対して、設置場所で廃棄物容器への収納まで行う一括解体シナリオと設置場所から移動させて、細断スペースで廃棄物容器への収納まで行う分割解体シナリオの2種類の解体シナリオを設定し、各解体シナリオのプロジェクト管理データの比較を行った。

分割解体シナリオの人工数は、「通常作業」で一括解体シナリオの2倍程度要することになり、設置場所での作業性が「高所作業」、「高所・狭隘部作業」となるに伴いその差は減少する。また、二次廃棄物発生量も同様の傾向を示す。一方、分割解体シナリオの設置場所作業期間は、一括解体シナリオの1/10倍程度で行うことができ、この差は設置場所での作業性が変わっても維持される。「通常作業」の場合、設置場所を早急に開放することが優先的に求められる場合には分割解体シナリオを選択するほうが良いと言える。また、作業性が「高所作業」および「高所・狭隘部作業」となっても分割解体シナリオの有している設置場所作業期間の利点を保持していること、並びに人工数および二次廃棄物発生量の差は減少するために分割解体シナリオを選択する利点は更に大きくなる。

分割解体シナリオ間で比較すると、人工数および二次廃棄物発生量は共に粗断回数が0回よりも1回行った方が少なく行うことができる。これは、粗断回数の増加に伴う細断スペースの面積の減少に因る、〔細断スペース設置〕および〔細断スペース撤去〕に要する人工数および二次廃棄物発生量の減少が影響している。

表 3.1 「細断スペース設置」に要する人工数の計算に用いた評価式

作業項目	評価式	備考
[作業領域養生]	$Y = 0.60 \times S$	細断スペース面積に依存 ^{*1}
[グリーンハウス設置]	$Y = 1.41 \times S$	細断スペース面積に依存 ^{*1}
[資材機器搬入]	$Y = 0.35 \times S$	細断スペース面積に依存 ^{*1}
[足場設置]	$Y = 0.42 \times S_f$	足場面積に依存 ^{*1}
[解体用機器設置]	$Y = 11.21$	工事用電源の設置を想定 ^{*2}

*1：参考文献(7)参照

*2：参考文献(5)参照

表 3.2 「細断スペース撤去」に要する人工数の計算に用いた評価式

作業項目	評価式	備考
[片付け整理]	$Y = 0.77 \times S$	細断スペース面積に依存 ^{*1}
[グリーンハウス撤去]	$Y = 0.66 \times S$	細断スペース面積に依存 ^{*1}
[資材機器搬出]	$Y = 0.39 \times S$	細断スペース面積に依存 ^{*1}
[足場撤去]	$Y = 0.28 \times S_f$	足場面積に依存 ^{*1}
[解体用機器搬出]	$Y = 14.29$	工事用電源の撤去を想定 ^{*2}

*1：参考文献(7)参照

*2：参考文献(5)参照

表 3.3 設置場所での作業に要する人工数および二次廃棄物発生量
(「通常作業」の場合)

解体シナリオ	粗断回数 (回)	人工数 (人・時)	設置場所 作業期間 (日)	二次廃棄物 発生量 (kg)
シナリオ 1		863.7	43	85.0
シナリオ 2-0 のうち[粗断・仮置]	0	54.0	3	5.3
シナリオ 2-1 のうち[粗断・仮置]	1	171.0	9	16.8
シナリオ 2-2 のうち[粗断・仮置]	2	288.0	14	28.3
シナリオ 2-3 のうち[粗断・仮置]	3	405.0	20	39.9
シナリオ 2-4 のうち[粗断・仮置]	4	522.0	26	51.4
シナリオ 2-5 のうち[粗断・仮置]	5	639.0	32	62.9

表 3.4 設置場所での作業に要する人工数および二次廃棄物発生量
(「高所作業」の場合)

解体シナリオ	粗断回数 (回)	人工数 (人・時)	設置場所 作業期間 (日)	二次廃棄物 発生量 (kg)
シナリオ 1		1,295.6	65	127.5
シナリオ 2-0 のうち[粗断・仮置]	0	81.0	4	8.0
シナリオ 2-1 のうち[粗断・仮置]	1	256.5	13	25.2
シナリオ 2-2 のうち[粗断・仮置]	2	432.0	22	42.5
シナリオ 2-3 のうち[粗断・仮置]	3	607.5	30	59.8
シナリオ 2-4 のうち[粗断・仮置]	4	783.0	39	77.0
シナリオ 2-5 のうち[粗断・仮置]	5	958.5	48	94.3

表 3.5 設置場所での作業に要する人工数および二次廃棄物発生量
(「高所・狹隘部作業」の場合)

解体シナリオ	粗断回数 (回)	人工数 (人・時)	設置場所 作業期間 (日)	二次廃棄物 発生量 (kg)
シナリオ 1		1,727.4	86	170.0
シナリオ 2-0 のうち[粗断・仮置]	0	108.0	5	10.6
シナリオ 2-1 のうち[粗断・仮置]	1	342.0	17	33.7
シナリオ 2-2 のうち[粗断・仮置]	2	576.0	29	56.7
シナリオ 2-3 のうち[粗断・仮置]	3	810.0	41	79.7
シナリオ 2-4 のうち[粗断・仮置]	4	1,044.0	52	102.7
シナリオ 2-5 のうち[粗断・仮置]	5	1,278.0	64	125.8

表 3.6 粗断回数に応じた細断スペースと足場面積

解体シナリオ	粗断回数 (回)	粗断片重量 (ton)	粗断片長さ (m)	細断スペース 面積 (m ²)	足場面積 (m ²)
シナリオ 2-0	0	30.0	14.9	171.7	29.8
シナリオ 2-1	1	15.0	7.5	116.7	14.9
シナリオ 2-2	2	10.0	5.0	98.3	9.9
シナリオ 2-3	3	7.5	3.7	89.2	7.5
シナリオ 2-4	4	6.0	3.0	83.7	6.0
シナリオ 2-5	5	5.0	2.5	80.0	5.0

表 3.7 シナリオ 2 のうち [細断・収納] に要する人工数および二次廃棄物発生量

解体シナリオ	粗断回数 (回)	人工数 (人・時)				二次廃棄物 発生量 (kg)
		設置	細断・収納	撤去	合計	
シナリオ 2-0	0	428.8	876.8	335.0	1,640.6	214.9
シナリオ 2-1	1	292.8	876.8	230.8	1,400.4	175.6
シナリオ 2-2	2	247.5	876.8	196.1	1,320.3	162.5
シナリオ 2-3	3	224.8	876.8	178.7	1,280.3	156.0
シナリオ 2-4	4	211.2	876.8	168.3	1,256.2	152.1
シナリオ 2-5	5	202.1	876.8	161.3	1,240.2	149.4

設置： [細断スペース設置]

細断・収納： [粗断片細断・収納]

撤去： [細断スペース撤去]

表 3.8 給水加熱器の解体作業に要する人工数，設置場所作業期間および
二次廃棄物発生量の計算結果（「通常作業」の場合）

解体シナリオ	粗断回数 (回)	人工数（人・時）			設置場所 作業期間 (日)	二次廃棄物 発生量 (kg)
		設置場所	細断 スペース	全工程		
シナリオ 1	--	863.7	--	863.7	43	85.0
シナリオ 2-0	0	54.0	1,640.6	1,694.6	3	220.2
シナリオ 2-1	1	171.0	1,400.4	1,571.4	9	192.5
シナリオ 2-2	2	288.0	1,320.3	1,608.3	14	190.9
シナリオ 2-3	3	405.0	1,280.3	1,685.3	20	195.8
シナリオ 2-4	4	522.0	1,256.2	1,778.2	26	203.4
シナリオ 2-5	5	639.0	1,240.2	1,879.2	32	212.3

設置場所： [粗断・細断・収納]（シナリオ 1），[粗断・仮置]（シナリオ 2-0~2-5）

細断スペース： [細断・収納]

表 3.9 給水加熱器の解体作業に要する人工数，設置場所作業期間および
二次廃棄物発生量の計算結果（「高所作業」の場合）

解体シナリオ	粗断回数 (回)	人工数（人・時）			設置場所 作業期間 (日)	二次廃棄物 発生量 (kg)
		設置場所	細断 スペース	全工程		
シナリオ 1	--	1,295.6	--	1,295.6	65	127.5
シナリオ 2-0	0	81.0	1,640.6	1,721.6	4	222.9
シナリオ 2-1	1	256.5	1,400.4	1,656.9	13	200.9
シナリオ 2-2	2	432.0	1,320.3	1,752.3	22	205.0
シナリオ 2-3	3	607.5	1,280.3	1,887.8	30	215.8
シナリオ 2-4	4	783.0	1,256.2	2,039.2	39	229.1
シナリオ 2-5	5	958.5	1,240.2	2,198.7	48	243.8

設置場所： [粗断・細断・収納]（シナリオ 1），[粗断・仮置]（シナリオ 2-0~2-5）

細断スペース： [細断・収納]

表 3.10 給水加熱器の解体作業に要する人工数，設置場所作業期間および
二次廃棄物発生量の計算結果（「高所・狹隘部作業」の場合）

解体シナリオ	粗断回数 (回)	人工数（人・時）			設置場所 作業期間 (日)	二次廃棄物 発生量 (kg)
		設置場所	細断 スペース	全工程		
シナリオ 1	--	1,727.4	--	1,727.4	86	170.0
シナリオ 2-0	0	108.0	1,640.6	1,748.6	5	225.6
シナリオ 2-1	1	342.0	1,400.4	1,742.4	17	209.3
シナリオ 2-2	2	576.0	1,320.3	1,896.3	29	219.2
シナリオ 2-3	3	810.0	1,280.3	2,090.3	41	235.7
シナリオ 2-4	4	1,044.0	1,256.2	2,300.2	52	254.8
シナリオ 2-5	5	1,278.0	1,240.2	2,518.2	64	275.2

設置場所： [粗断・細断・収納]（シナリオ 1）， [粗断・仮置]（シナリオ 2-0~2-5）

細断スペース： [細断・収納]

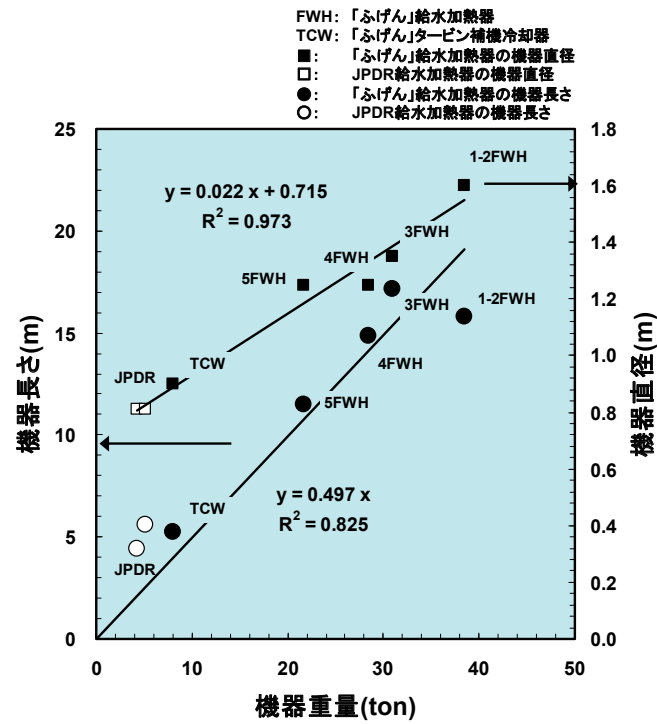


図 3.1 機器重量と機器長さおよび機器半径の関係

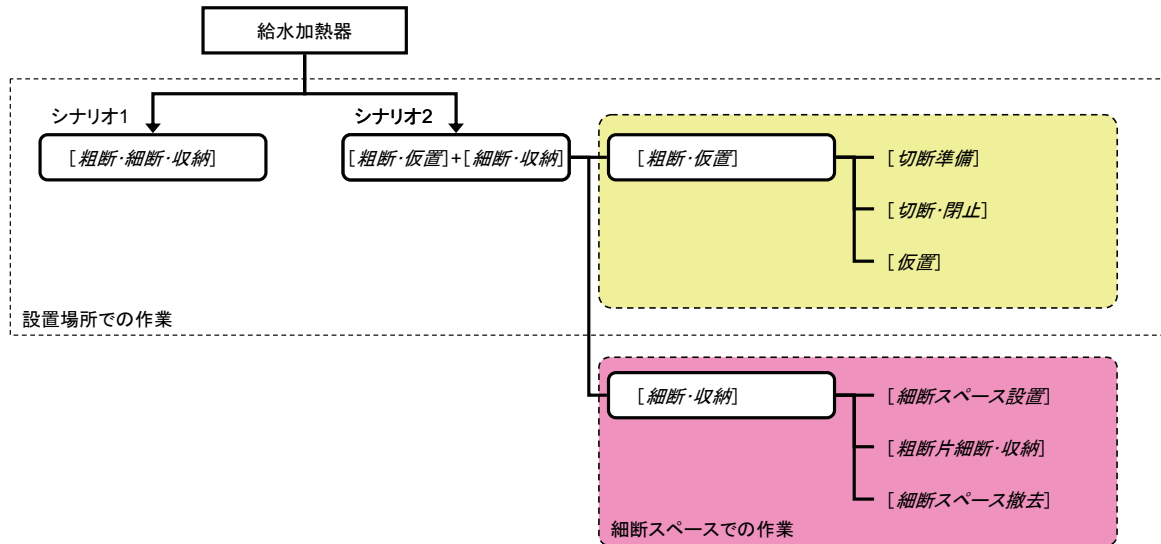


図 3.2 給水加熱器の解体作業を構成する作業項目（概要）

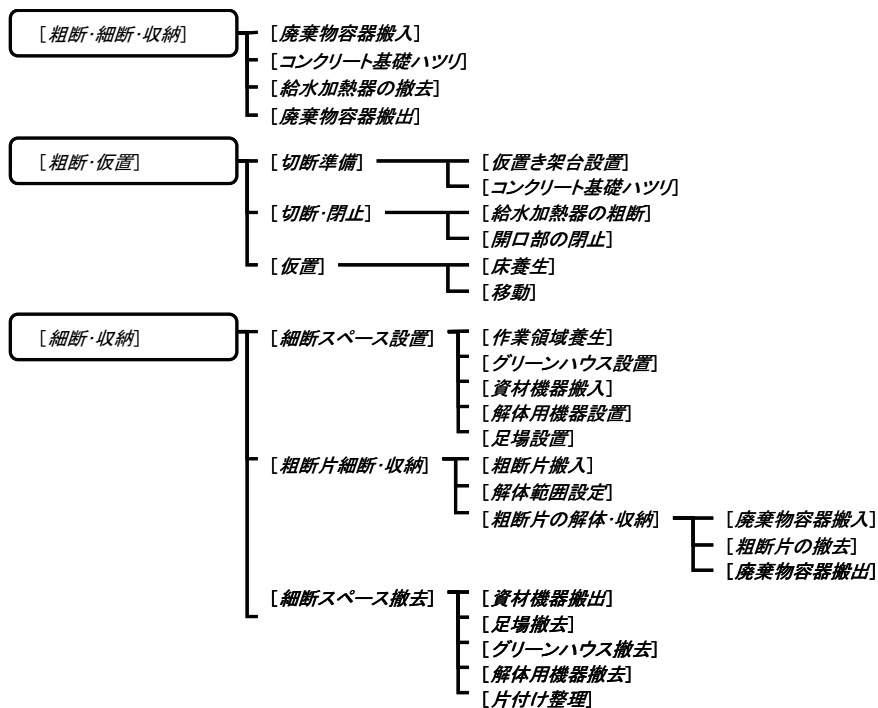


図 3.3 [粗断・細断・収納]，[粗断・仮置] および [細断・収納] を構成する作業項目

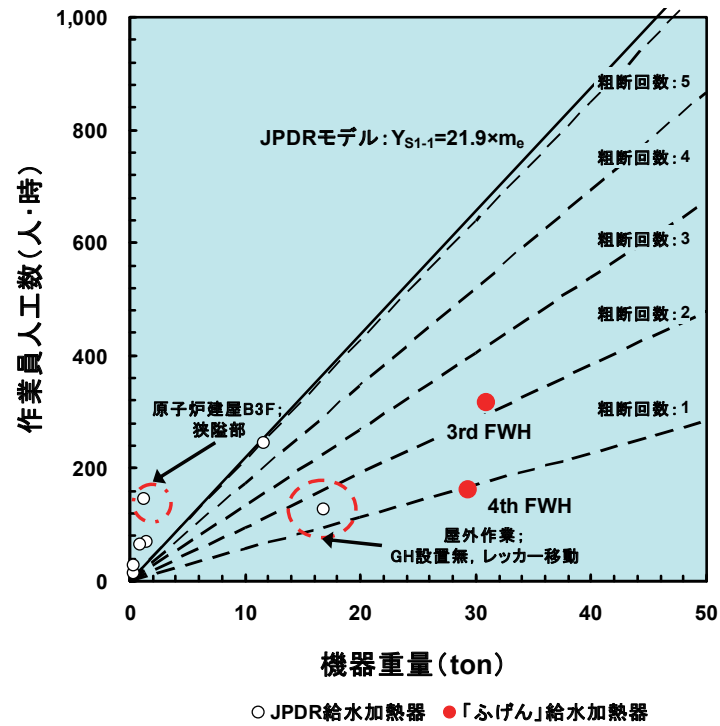


図 3.4 「給水加熱器の撤去」に要する人工数と機器重量との関係

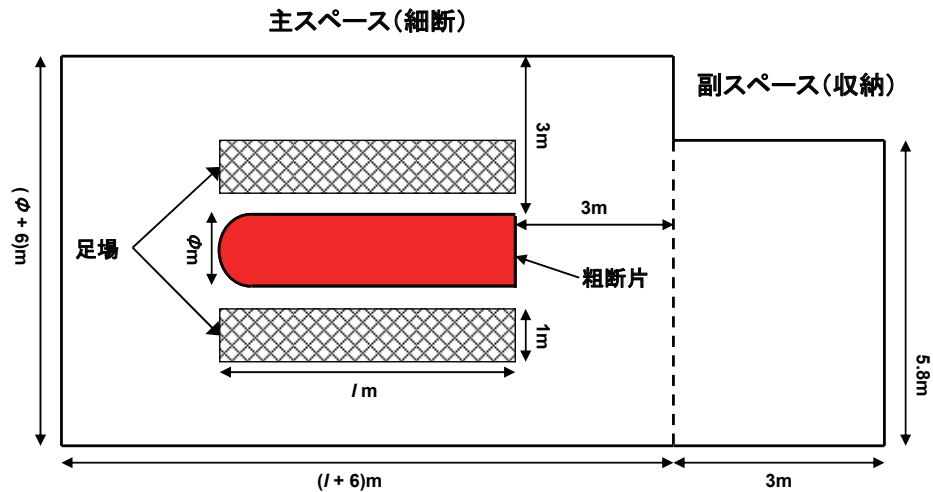


図 3.5 細断スペースの概要

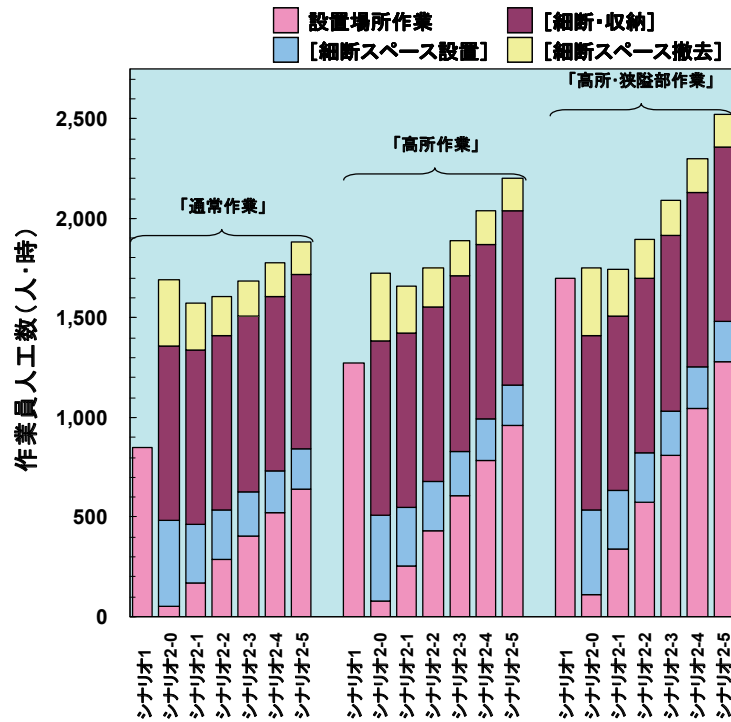


図 3.6 30ton の給水加熱器の解体作業に要する人工数の計算結果

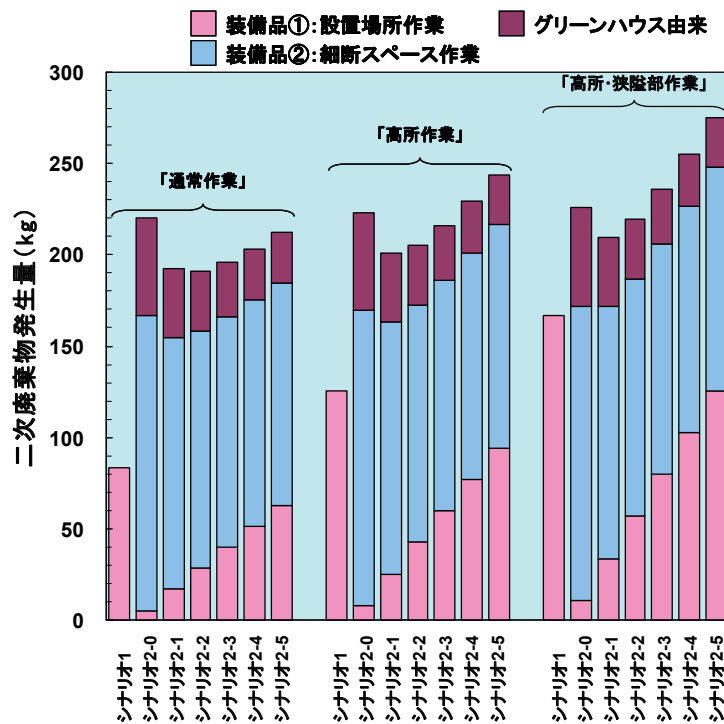
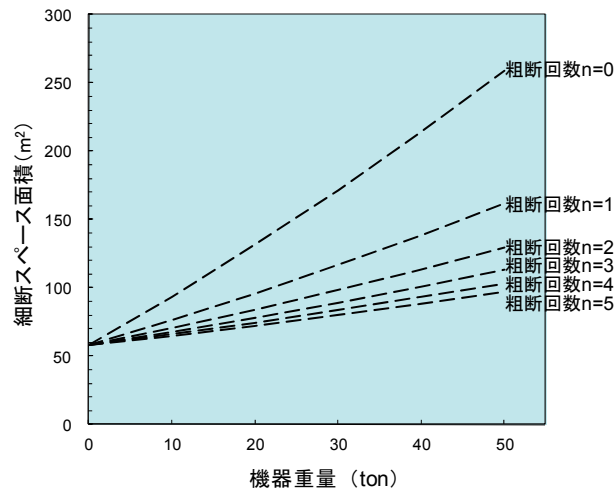
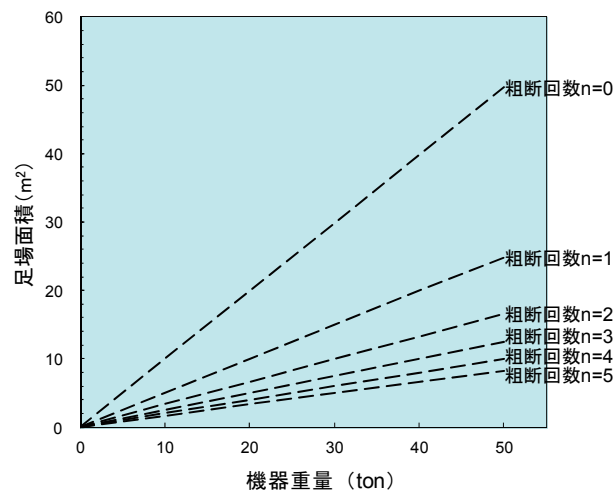


図 3.7 30ton の給水加熱器の解体作業での二次廃棄物発生量の計算結果

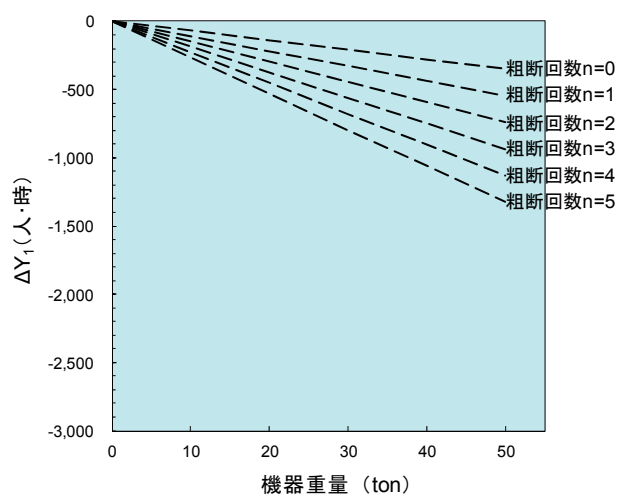


(1)機器重量と細断スペース面積の関係

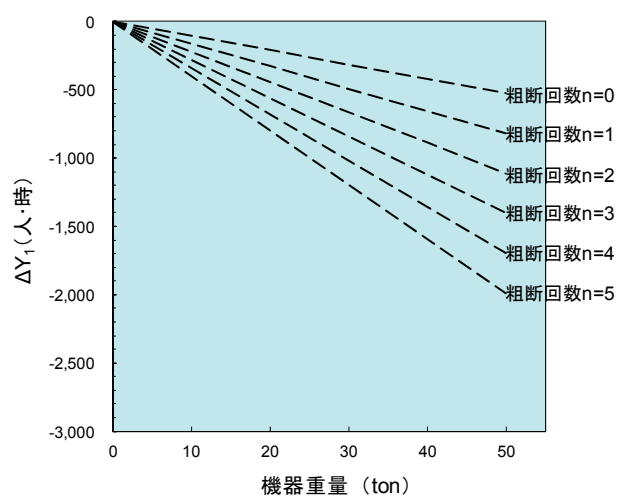


(2)機器重量と足場面積の関係

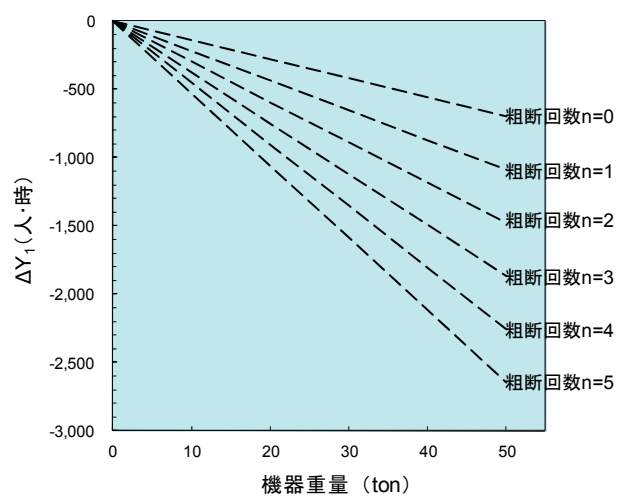
図 3.8 シナリオ 2 のうち [細断・収納] で設置する細断スペースおよび足場面積



(1) 「通常作業」

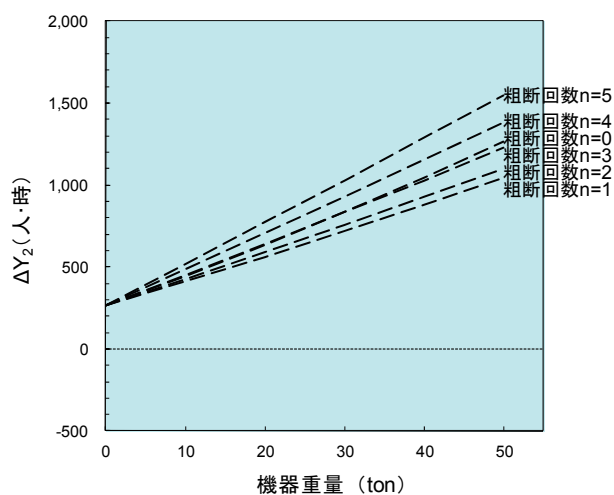


(2) 「高所作業」

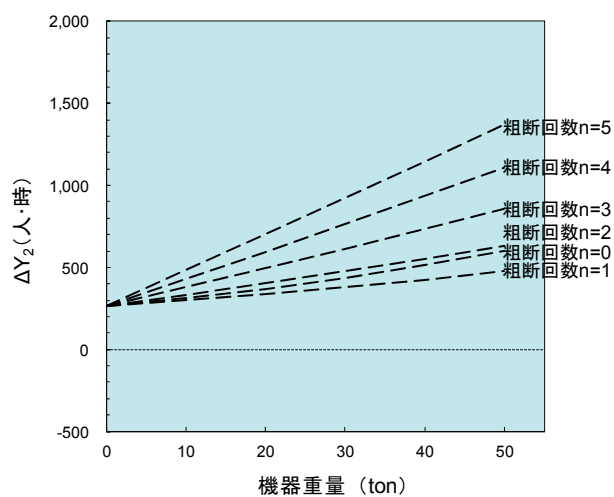


(3) 「高所・狭隘部作業」

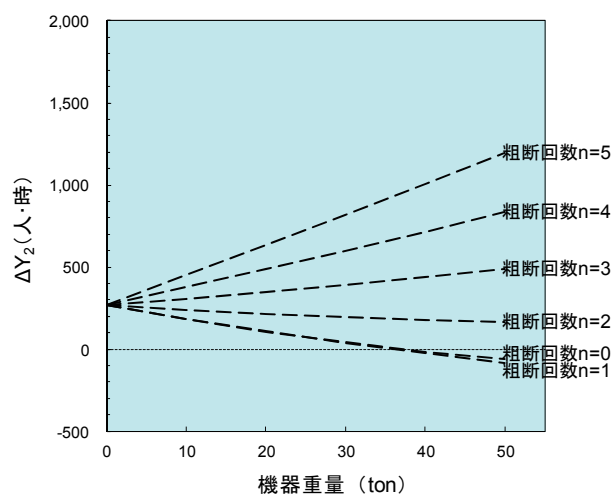
図 3.9 設置場所での作業に要する人工数の差



(1) 「通常作業」

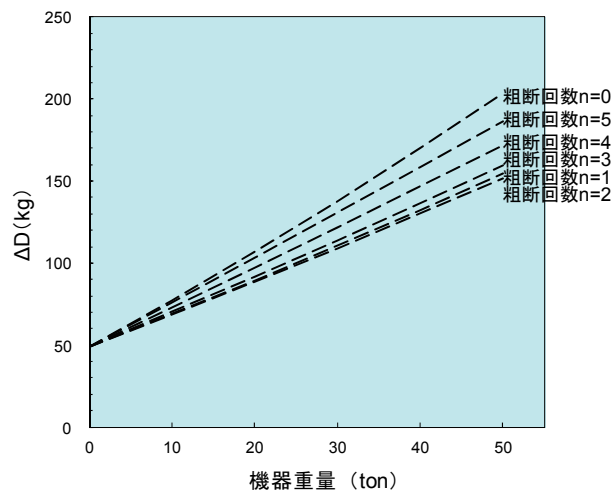


(2) 「高所作業」

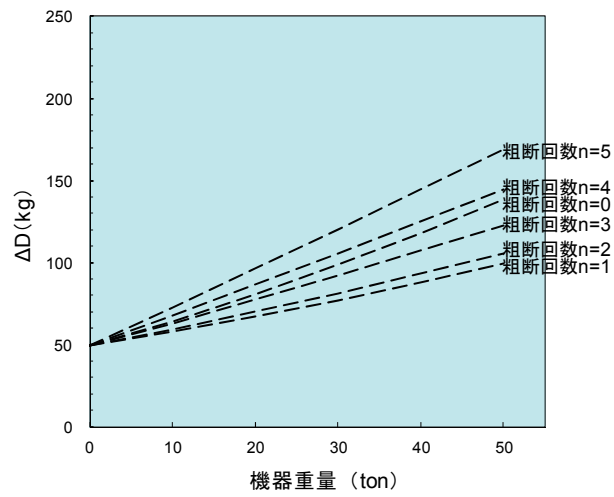


(3) 「高所・狭隘部作業」

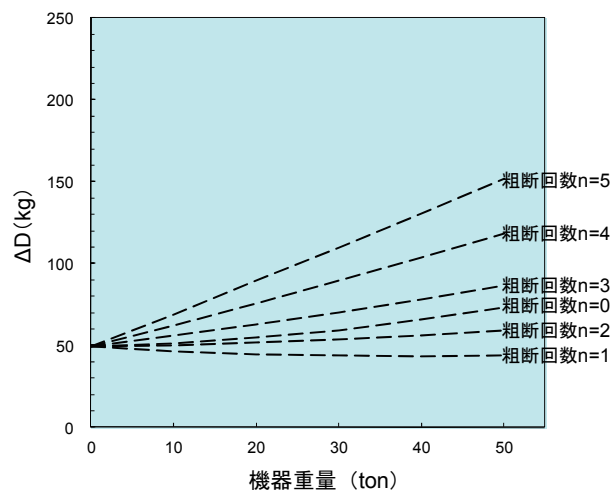
図 3.10 解体作業の全工程に要する人工数の差



(1) 「通常作業」



(2) 「高所作業」



(3) 「高所・狭隘部作業」

図 3.11 解体作業の全工程での二次廃棄物発生量の差

This is a blank page.

4. 最適化の検討

階層分析法 (Analytic Hierarchy Process : AHP) により最適な解体シナリオを選択するためには、解体シナリオに設定した各評価基準のウェイトと各評価基準から見た各解体シナリオのウェイトを設定し、各解体シナリオを総合的に評価することが必要である。

以下に、AHP の概要、設定した評価基準および評価結果を述べる。

4.1 AHP の概要

AHP は、最適化を検討する評価基準の単位が異なる場合、または、その定量化が困難な場合、人間の感覚を反映した意思決定に有用な分析方法である⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。AHP では問題を、

$$\text{最終目標} \text{---} \text{評価基準} \text{---} \text{代替案} \quad \text{--- (4.1)}$$

の関係で考え、意思決定に係る要素（最終目標、評価基準、代替案）を階層構造に分解して表現する。階層構造の概念を図 4.1 に示す。

次に、階層構造に基づき、上位レベル k の要素 i から見た下位レベル $k+1$ の要素 j のウェイトを求める。いま、上位レベル k の要素 $i : k_i$ のウェイトを w_{ki} 、下位レベル $k+1$ の要素 $j : (k+1)_j$ のウェイトを $w_{(k+1)j}$ とする。 $i = 1, \dots, m$ および $j = 1, \dots, n$ とした場合、各レベルの要素とウェイトは以下の様に表すことが出来る。

上位レベル k	要素	1	2	...	i	m
	ウェイト	w_{k1}	w_{k2}	...	w_{ki}	w_{km}
下位レベル $k+1$	要素	1	2	...	j	n
	ウェイト	$w_{(k+1)1}$	$w_{(k+1)2}$	...	$w_{(k+1)j}$	$w_{(k+1)n}$

上位レベル k の要素 i から見た下位レベル $k+1$ の要素 j のウェイトを $v_{ij}(k+1)$ とすると、下位レベル $k+1$ での要素 j の合成されたウェイトは次式で与えられる。

$$w_{(k+1)j} = \sum_{i=1}^m w_{ki} v_{ij}(k+1) \quad \text{--- (4.2)}$$

ここで、

$$\vec{w}_k = (w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}) : \quad \text{行ベクトル} \quad \text{--- (4.3)}$$

$$V(k+1) = [v_{ij}(k+1)] : \quad \text{マトリックス} \quad \text{--- (4.4)}$$

とおくと、式(4.2)は以下の様になる。

$$\vec{w}_{(k+1)} = \vec{w}_k V(k+1) \quad \text{--- (4.5)}$$

各レベルの要素のウェイトは、同レベル内での要素間の相対的なウェイトを表わす比較値が記載された一対比較表を用いて求める。一対比較表の概念と比較値の意味（例）を表 4.1 に示す。

上位レベル k の要素から見た下位レベル $k+1$ の各要素のウェイトは、一対比較表で表わされた行列（一対比較行列）の最大値（最大固有値）に対する正規化した（ベクトルの要素の和が 1）固有ベクトルで与えられる。式(4.6)に示す様に、各レベルでの要素のウェイトを積み上げることで、最上位レベル 1 から見た最下位レベル L のウェイトが求められる。

$$\begin{aligned}\bar{w}_L &= \bar{w}_{L-1}V(L) \\ &= \bar{w}_{L-2}V(L-1)V(L) \\ &\dots \\ &= \bar{w}_2V(3)V(4)\dots V(L)\end{aligned}\quad \text{--- (4.6)}$$

最上位レベル 1 から見た最下位レベル L のウェイトが最終目標に対する各代替案の総合評価点であり、総合評価点が最も大きな代替案が最適なものとなる。

表 4.1(2)に示す様に一対比較表は人間の感覚に基づく場合に利用できるため、AHP は「定量化が困難な問題に対する意思決定の過程をシステム化して評価できる」という特徴がある。

4.2 評価基準と評価対象解体シナリオ

4.2.1 評価基準

評価基準は、最適な解体シナリオの選択を検討するための指標となる。昨年度は、床面に設置された給水加熱器の解体シナリオ（全ての作業項目の作業性が「通常作業」の場合）に対して、解体作業のコスト、廃棄物発生量、および作業効率を評価基準として着目した⁽¹⁾。

解体作業のコストでは、コストを直接比較することが困難なため、解体作業に要する人件費に直接関係する人工数を評価基準とした。

廃棄物発生量では、解体作業後に管理する廃棄物容器数と二次廃棄物発生量が重要となるが、収納する切断片の大きさが同一の場合には解体物を収納する廃棄物容器数は同一となる。一方、解体作業に要する装備品および「細断・収納」のために設置する細断スペースに由来する二次廃棄物発生量は解体シナリオに大きく影響を受ける。このため、二次廃棄物発生量を評価基準とした。

機器の設置場所を解体後に別の目的で利用することを想定している場合、設置場所での解体作業に要する期間が長くなると、その設置場所の利用開始が遅れる。このため、作業効率は設置場所での作業期間（以下、「設置場所作業期間」）に依存する。よって、作業効率では、設置場所作業期間を評価基準とした。これらの評価基準は、全て 3 章で計算したプロジェクト管理データを用いて評価することが出来る。

最適な解体シナリオを選択するための階層構造を図 4.2 に示す。

本年度は、昨年度検討した解体シナリオに対して、給水加熱器設置場所での作業性が「通常作業」、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」の場合を検討する。「高所作業」および「高所・狭隘部作業」では作業員の傷害・死亡による人的被害の発生リスク（以下、「作業リスク」）の増加が考えられる。人的被害の発生は解体作業の中断を招き、廃止措置計画の遅延の原因の 1 つとなる。このため、分割解体シナリオは、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」の作業期間

を減らすことによる作業リスクの低減を目的とした解体シナリオと言える。これらを考慮して、本年度は、対象とする評価基準を解体作業のコスト、廃棄物発生量および解体作業の遅延とした。

評価基準のうち、解体作業のコストおよび廃棄物発生量に関しては昨年度と同様である。廃止措置計画の遅延は、解体作業が計画通りに進めることができないために、関連している他の解体作業に与える影響とした。解体作業の遅延の原因として、昨年度も評価対象とした解体作業の作業効率に加えて、上述の人的被害の影響を考えた。しかし、人的被害の発生リスク、つまり作業リスクは定性的な評価は行えるが（付録 A 参照）、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」が想定される設置場所作業期間に対する作業リスクの定量的な重み付けの方法に関しては、今後十分に検討を行う必要がある。また、詳細な分析評価に必要な事故事例などのデータ取得も不十分である。よって、本研究では、作業リスクは設置場所での作業期間の長さに応じて増大するものと考え、作業効率と同じく設置場所作業期間を作業リスクの評価基準とした。このことより、作業効率・作業リスク共に設置場所作業期間を評価基準としているため、廃止措置計画の遅延低減の評価基準も設置場所作業期間となり、最適な解体シナリオを選択するための階層構造は図 4.2 を用いることができる。

4.2.2 AHP による最適な解体シナリオの評価方法

式(4.1)の関係を最適な解体シナリオの評価に適用する場合、1)最適な解体シナリオの選択のためにどのような評価基準（解体作業のコストなど）を設定し、各評価基準に対してどのようなウェイトを置くのか、および 2)各評価基準から見て、どの解体シナリオにどのようにウェイトを置くのかを検討し、最適な解体シナリオの選択のための各解体シナリオの総合評価点を算出する。なお、各評価基準は、プロジェクト管理データ（人工数、二次廃棄物発生量、設置場所作業期間）をその要素とすることを 4.2.1 項で述べている。

式(4.1)の関係を最適な解体シナリオの検討に適用した場合、以下の様になる。

$$\text{最適な解体シナリオ} \sim \text{評価基準} \sim \text{解体シナリオ} \quad \text{--- (4.7)}$$

最適な解体シナリオから見た各評価基準のウェイトを“重要度”とし、設定した各評価基準である人工数、設置場所作業期間および二次廃棄物発生量に対する重要度をそれぞれ A 、 B および C で表す。また、各評価基準から見た各解体シナリオのウェイトを“評価点”とし、設定した人工数、設置場所作業期間および二次廃棄物発生量から見た各解体シナリオの評価点をそれぞれ a 、 b および c で表す。この場合、各解体シナリオの総合評価点： W ($W_1, W_2, \dots, W_n$) は、以下の式で求めることができる。

$$\begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & c_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} \quad \text{--- (4.8)}$$

4.2.3 評価対象解体シナリオ

評価対象解体シナリオについては、3 章で設定した解体シナリオ、すなわち、30ton の給水加熱器を設置場所で「粗断・細断・収納」を行うシナリオ 1 並びに設置場所での「粗断・仮置」およ

び細断スペースで〔細断・収納〕を行うシナリオ 2-0~2-5 の中から 2 つの解体シナリオを最適化の対象に選定した。選定した解体シナリオとその選定理由は、次の通りである。

プロジェクト管理データの計算結果（表 3.8~表 3.10）から、次のことが分かる。

- ① シナリオ 1 は人工数と二次廃棄物発生量が最も少なく、シナリオ 2-0 は設置場所作業期間が最も短い。従って、これら 2 つの解体シナリオは、最適な解体シナリオとなる可能性がある。
- ② シナリオ 2-2~2-5 をシナリオ 2-1 と比較すると、ほぼ全ての解体シナリオは、人工数および二次廃棄物発生量がシナリオ 2-1 に比べて多く、設置場所作業期間も長い。

すなわち、シナリオ 2-2~2-5 は、3 つの評価基準についてシナリオ 2-1 に比べて劣っており、最適な解体シナリオとなる可能性は無い。これから、最適な解体シナリオとなる可能性を有するものは、シナリオ 1、シナリオ 2-0 およびシナリオ 2-1 の 3 つに絞られる。

平成 21 年度も同様の考え方で、これら 3 つの解体シナリオについて最適化を検討した⁽¹⁾。その結果、最適な解体シナリオはシナリオ 1 とシナリオ 2-0（平成 21 年度報告書ではシナリオ 2 と表記）となった。そこで、これら 3 つの解体シナリオを対象に、「通常作業」、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」について、上記 3 種のプロジェクト管理データを評価基準とした AHP による最適化を検討した。その結果、シナリオ 2-1 は最適な解体シナリオになり得ないことを確認した（付録 B 参照）。従って、最適化の検討対象を 2 つの解体シナリオ、シナリオ 1 とシナリオ 2-0 とする。また、設置場所での作業について、作業性として、「通常作業」、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」を想定する。

4.3 プロジェクト管理データの計算結果と解体シナリオの評価

プロジェクト管理データの計算結果に解体シナリオの評価では、AHP で用いる評価点に対してはプロジェクト管理データの計算結果と一対比較表を用いて算出し、重要度に対してはケーススタディおよび感度解析を行った。第 3 章で検討した設置場所での作業性と最適な解体シナリオとの関係を検討するために、重要度の設定は全ての作業性で同一とし、作業性の相違によるプロジェクト管理データの計算結果への影響について調べた。以下に、プロジェクト管理データの計算結果に基づく各解体シナリオの評価結果について述べる。

4.3.1 プロジェクト管理データの計算結果の評価

プロジェクト管理データについては、原子力機構が開発している PRODIA コードにより計算を行った（3 章）。しかし、プロジェクト管理データは単位が異なるため、これらを用いて解体シナリオの最適化を検討するためには、換算係数を用いて同一の単位にするか、あるいは、無次元量に変換する方法が考えられる。ここでは、プロジェクト管理データを無次元量に変換する方法として、単位の異なる各評価基準を総合的に評価できる多基準意思決定手法の 1 つである AHP を用いる。

AHP では、各解体シナリオのプロジェクト管理データの計算結果を基に比較値を計算し、その比較値を用いて一対比較表を作成して、各解体シナリオの評価点を求める。なお、一対比較表の作成には次の 3 通りが考えられる：

- ① プロジェクト管理データの計算結果と SMART で用いた評価方法⁽¹⁾を基に比較値を設定する。SMART では、プロジェクト管理データの計算結果の相違を指数関数的に変化するグレードを使用した。
- ② 表 4.1 に示す様に、ユーザーがエンジニアリングの主観的判断に基づいて一対比較表の比較値を設定する。
- ③ 各評価基準間のプロジェクト管理データの計算結果の比を比較値とする。これは、評価基準の値であるプロジェクト管理データの計算結果の相違をリニアに変化すると仮定したものである。

平成 21 年度は、①の SMART で指数関数的に変化するグレードを用いた評価を行っている⁽¹⁾。本研究の AHP では、③による一対比較表の作成を行い、一部の結果について SMART との比較も行う。PRODIA コードを用いて得た、プロジェクト管理データの計算結果を表 4.2 にまとめる。

表 4.2 から次のことが分かる。シナリオ 1 は、人工数が 864 人・時（「通常作業」）から 1,727 人・時（「高所・狹隘部作業」）となり、作業性に大きく影響を受ける。このため、シナリオ 1 では、設置場所作業期間は 43 日（「通常作業」）から 86 日（「高所・狹隘部作業」）になる。

一方、シナリオ 2-0 は、設置場所作業期間は 3 日（「通常作業」）から 5 日（「高所・狹隘部作業」）に増加するが、全人工数のうち設置場所での作業に要する人工数が占める割合は 3%程度であり、「通常作業」から「高所・狹隘部作業」に変わっても「通常作業」での全人工数の 1.5%しか増加せず、あまり影響は無い。よって、人工数の観点から、「高所・狹隘部作業」では「通常作業」に比べてシナリオ 1 の優位性は減少する。

「通常作業」の計算結果に基づき作成した人工数から見た解体シナリオ間の一対比較表および各解体シナリオの評価点を表 4.3 に示す。ここで、人工数が少ない方に高い評価点を与えるために、各解体シナリオの人工数の逆数の比を比較値とした。評価点は、幾何平均法で計算して求めた（付録 B 参照）。他の作業性（「高所作業」、「高所・狹隘部作業」）と他の評価基準（二次廃棄物発生量、設置場所作業期間）についても同様の一対比較表を作成した。こうして得られた各解体シナリオの評価点（ a , b , c ）を表 4.4 に示す。

各解体シナリオの評価点は、プロジェクト管理データの計算結果の比である比較値に基づいて評価している（表 4.3 参照）。この結果、作業性の相違によりプロジェクト管理データの計算結果が解体シナリオ間でどの程度変動するかによって、評価点は変化する。例えば、作業性が「通常作業」から「高所・狹隘部作業」に変わることにより、設置場所作業期間は両シナリオともに約 2 倍（43 日→86 日（シナリオ 1）、3 日→5 日（シナリオ 2-0））になるため、両シナリオの評価点も変化しない。一方、作業性が「通常作業」から「高所・狹隘部作業」に変わることにより、人工数はシナリオ 1 では約 2 倍（864 人・時→1,727 人・時）となるが、シナリオ 2-0 では約 3%増（1,695 人・時→1,749 人・時）となりそれほど変化しないため、シナリオ 1 とシナリオ 2-0 の人工数の評価点の比が約 2 : 1（0.662 : 0.338）から約 1 : 1（0.503 : 0.497）となる。

4.3.2 解体シナリオの評価結果

(1) 評価ケース

最適な解体シナリオの選択に影響を及ぼす要因として、設定する評価基準に対する重要度、および解体シナリオに対する評価点の評価手法が挙げられる。このため、評価ケースには、これら

の要因を変化させる種々の場合が考えられる。これら要因のすべての組み合わせを考えると膨大な数となるため、ここでは、以下の考え方に基づき評価ケースを設定した。

- ① 設定する評価基準には、プロジェクト管理データを設定する。
- ② 評価点は、PRODIA コードや一対比較表を用いて算出する。
- ③ 各評価基準の重要度は、当該解体作業の位置づけおよび目的などに依存し、意思決定者の判断に負うところが大きい。このため、ここでは重要度を変化させる。
- ④ 評価点の評価手法については、各評価基準のプロジェクト管理データの比を使用する。その際、昨年度使用した SMART との比較を一部のケース（「通常作業」での評価）について行う。

評価基準としてプロジェクト管理データである人工数、二次廃棄物発生量、設置場所作業期間を考慮し、各評価基準の重要度を変化させた以下の4つのケースを設定した。

- ケース1：人工数の重要度 $\div$ 二次廃棄物発生量の重要度 $\ll$ 設置場所作業期間の重要度
 ケース2：人工数の重要度 $\div$ 二次廃棄物発生量の重要度 $\gg$ 設置場所作業期間の重要度
 ケース3：人工数の重要度 $\div$ 二次廃棄物発生量の重要度 $\div$ 設置場所作業期間の重要度
 ケースP：各評価基準の重要度の値を変化させた感度解析

ケース1は、人工数の重要度が二次廃棄物発生量の重要度と同程度であり、設置場所作業期間の重要度が人工数と二次廃棄物発生量の重要度に比べて絶対的に重要な場合である。例えば、解体作業の後、その場所を収納容器の一時保管場所、または廃止措置を進めるに当たって必要な他の機器の設置などのために、人工数を犠牲にしても早く設置場所を利用したい場合に相当する。

ケース2は、人工数の重要度が二次廃棄物発生量の重要度と同程度であり、人工数と二次廃棄物発生量の重要度が設置場所作業期間の重要度に比べて絶対的に重要な場合である。設置場所の早期の利用が無く、人工数や二次廃棄物発生量をなるべく少なくしたい場合に相当する。

ケース3は人工数、二次廃棄物発生量、設置場所作業期間の重要度が同等の場合である。これは、評価基準に対する重要度を決められず、ケース1と2のどちらとも言えない場合に相当する。

ケースPは、各評価基準の重要度を変化させる感度解析であり、重要度に対する全ての組み合わせを考慮している。このケースの結果から、重要度と最適な解体シナリオの関係が把握できる。

各評価ケースで設定した各評価基準の重要度を表4.5に示す。なお、ケース1~3の重要度は、上記の設定および表4.1に示す比較値の設定方法を用いて計算した（付録C参照）。各解体シナリオの総合評価点は、式(4.8)並びに表4.4の各解体シナリオの評価点および表4.5に示す各評価基準の重要度を用いて計算した。なお、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」の場合についても、評価基準としてプロジェクト管理データである人工数、二次廃棄物発生量、設置場所作業期間を考慮し、「通常作業」の場合と同様の評価ケースを設定した。このため、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」の各評価基準の重要度も表4.5の値を使用した。

(2) 評価結果

① ケース1~3

「通常作業」の場合

ケース1~3について、AHPを用いて評価した各解体シナリオの総合評価点を表4.6に示す。

ケース 1 およびケース 3 はシナリオ 2-0 の方が総合評価点が高く最適な解体シナリオとなったが、ケース 1 に比べてケース 3 は、両シナリオ間での総合評価点の差は減少している；つまり、シナリオ 2-0 の優位性は減少している。これは、表 4.5 に示す様に、設置場所作業期間に対する重要度を小さく設定している（ケース 1：0.714，ケース 3：0.333）ためである。一方、ケース 2 ではシナリオ 1 の方が総合評価点が高く最適な解体シナリオとなった。

次に、SMART を用いて評価した各解体シナリオの評価点（平成 21 年度報告書⁽¹⁾では、グレードと表記）および総合評価点をそれぞれ表 4.7，4.8 に示す。SMART を用いた場合でも、ケース 1 ではシナリオ 2-0 の方が総合評価点が高く最適な解体シナリオとなり、ケース 2 およびケース 3 では、シナリオ 1 の方が総合評価点が高く最適な解体シナリオとなった。

「高所作業」および「高所・狭隘部作業」の場合

「高所作業」および「高所・狭隘部作業」でのケース 1~3 について、AHP を用いて評価した解体シナリオの総合評価点を表 4.9 および表 4.10 に示す。「高所作業」では、ケース 1 およびケース 3 はシナリオ 2-0 の方が総合評価点が高く、最適な解体シナリオであるが、ケース 2 ではシナリオ 1 の方が総合評価点が高く最適な解体シナリオとなった。「高所・狭隘部作業」では、全てのケースでシナリオ 2-0 の方が総合評価点が高く最適な解体シナリオとなった。

②ケース P

人工数、二次廃棄物発生量および設置場所作業期間の重要度を、それぞれ A ， B ， C で表した場合、

$$A + B + C = 1 \quad (0 \leq A, B, C \leq 1) \quad \text{--- (4.9)}$$

となる。式(4.9)は、各評価基準の重要度が平面状に存在する三角形の内部に存在することを示している。

ケース P から得られる各評価基準の重要度を用いて、重要度を変化させ得る全ての範囲の「通常作業」時の総合評価点について、AHP を用いて評価したところ図 4.3 に示す結果となった。三角形の各頂点是对應する評価基準の重要度が“1”の場合を意味している。

PRODIA コードの「ふげん」への適用性の検証により得た評価式を用いた人工数の計算結果と実績データとの間に±10%程度の誤差：1σがあり、総合評価点にも同様に影響する。このため、3σ以上の総合評価点の差を、最適な解体シナリオの判定の基準とした。以上の条件の下に、シナリオ 1 の総合評価点 W_1 とシナリオ 2-0 の総合評価点 W_2 の比が 1.30 倍以上 ($W_1/W_2 \geq 1.30$) になる、シナリオ 1 の総合評価点が 0.565 以上の領域を「シナリオ 1 が最適な解体シナリオ」と判定した。この領域内に上述のケース 2 が存在している。一方、シナリオ 2-0 の総合評価点とシナリオ 1 の総合評価点の比が 1.30 倍以上 ($W_2/W_1 \geq 1.30$ ，つまり $W_1/W_2 \leq 0.77$) になる、シナリオ 1 の総合評価点が 0.435 以下の領域を「シナリオ 2-0 が最適な解体シナリオ」と判定した。この領域内にケース 1 は存在する。また、その間の $0.77 \leq W_1/W_2 \leq 1.30$ を「遷移領域」とした。遷移領域のほぼ中央にケース 3 は存在している。

図 4.3 より、設置場所作業期間に対する重要度を約 0.4 以上にすれば、シナリオ 2-0 が最適な解体シナリオとなる。これは、設置場所作業期間はシナリオ 2-0 の方がシナリオ 1 に比べてかなり短く、設置場所作業期間の評価点はシナリオ 2-0 の方がシナリオ 1 に比べて 16 倍程度大きいため

である。逆に、人工数と二次廃棄物発生量については、シナリオ 1 の評価点の方がシナリオ 2-0 の評価点に比べて大きい（2~2.5 倍）ため、設置場所作業期間に対する重要度を約 0.2 以下にすれば、シナリオ 1 が最適な解体シナリオとなる。

表 4.5 に示している各評価基準の重要度を用いて、同様の評価を、SMART を用いて行った場合の結果を図 4.4 に示す。

図 4.3 と図 4.4 から分かる様に、SMART と AHP の結果は類似しているが、シナリオ 1 が最適な解体シナリオとなる範囲および遷移領域は、共に SMART の方が幾分（シナリオ 1 が最適な解体シナリオとなる領域：AHP の 1.3 倍、遷移領域：AHP の 1.1 倍）広くなる。このため、AHP ではケース 3 は遷移領域のほぼ中央で $0.435 < W_1 < 0.500$ のシナリオ 2-0 が優位を示す側に存在していたが、SMART では同じ遷移領域に存在しても $0.500 < W_1 < 0.565$ のシナリオ 1 が優位を示す領域の端に存在する。これは、プロジェクト管理データを用いた各解体シナリオの評価点の計算を AHP ではリニアスケールで行い、SMART では指数関数的なスケールで行っているため、それぞれの評価点に違いが生じたことが原因である。

また、「高所作業」および「高所・狹隘部作業」に対して AHP を用いてケース P を評価したところ、図 4.5 および図 4.6 に示す結果となった。シナリオ 1 が最適な解体シナリオとなる領域は、「高所作業」の場合は「通常作業」の場合の 63.3%に減少し、「高所・狹隘部作業」の場合は「通常作業」の場合の 0.4%に減少する。その理由は、次の通りである。

シナリオ 2-0 では、設置場所での人工数が全作業項目に要する人工数に占める割合が少ない（3% 程度）ため、「高所作業」および「高所・狹隘部作業」となっても、全作業項目に要する人工数に及ぼす影響は小さい。一方、シナリオ 1 では、全作業項目に要する人工数が設置場所での作業によるため、「高所作業」および「高所・狹隘部作業」の作業性の影響が極めて大きくなる。また、ケース 2 は「高所作業」では遷移領域に入っている。「高所・狹隘部作業」では、ケース 2 ではシナリオ 1 とシナリオ 2-0 の総合得点はほぼ同じになっており、人工数、二次廃棄物発生量および設置場所作業期間を評価基準として用いた場合には、シナリオ 1 が最適な解体シナリオとなる領域はほとんど無い。

4.3.3 機器重量を変化させた場合の評価結果

4.3.2 項で検討した結果は、30ton の給水加熱器での最適な解体シナリオについて検討したものである。本項では、給水加熱器の重量が 10ton および 50ton の場合について評価し、機器重量の違いによる総合評価点への影響について検討を行った。以下に各条件での評価結果を示す。

図 3.7、図 3.9 および図 3.10 のプロジェクト管理データを基に機器重量を変化した場合の最適な解体シナリオの評価を 4.3.2 項と同様の方法で行った。また、各評価基準の重要度の条件も、4.3.2 項と同様に、表 4.5 の値を使用した。

①機器重量 10ton の場合

機器重量 10ton の場合の「通常作業」、「高所作業」および「高所・狹隘部作業」での各解体シナリオの評価点を表 4.11 に示し、総合評価点の計算より得た各評価基準の重要度と最適な解体シナリオの関係を図 4.7~図 4.9 に示す。

表 4.11 より、各作業性での人工数および二次廃棄物発生量の評価点の解体シナリオ間の差は、30ton での結果と比較して大きくなることが分かった。シナリオ 2-0 に要する人工数のうち、〔細

「断スペース設置」と「細断スペース撤去」に要する人工数の割合を式(3.8)および式(3.18)を用いて計算した結果を図 4.10 に示す。「断スペース設置」と「細断スペース撤去」に要する人工数の割合は機器重量 10ton では 55%（「通常作業」の場合、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」では、それぞれ 53%および 51%）となり、機器重量 30ton の場合の 43%（「通常作業」の場合、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」では、それぞれ 41%および 39%）よりも高くなり、機器重量 10ton の方が「断スペース設置」と「細断スペース撤去」の人工数の影響は大きい。図 4.11 に示す様に、二次廃棄物発生量の場合も同様である。このことより、「断スペース設置」と「細断スペース撤去」に要する人工数および二次廃棄物発生量の影響は機器重量が 10ton の方が 30ton よりも大きいことが、人工数および二次廃棄物発生量の評価点の変化の原因である。一方、設置場所作業期間は機器重量 30ton の結果と同じである。

人工数および二次廃棄物発生量の評価点が、機器重量 30ton の場合よりも解体シナリオ間の差が大きくなったことを受けて、相対的に設置場所作業期間の評価点の差の総合評価点へ影響は、30ton の場合より小さくなる。つまり、設置場所作業期間の重要度の影響は、機器重量が 10ton の方が 30ton の場合より小さくなる。この結果、シナリオ 2-0 が最適な解体シナリオとなる領域は機器重量 30ton の場合の 16%の減少（図 4.7、「通常作業」の場合）となった。「高所作業」（図 4.8）では、シナリオ 2-0 が最適な解体シナリオとなる領域は「通常作業」と比較して 25%増加するが、機器重量 30ton の結果と比較するとシナリオ 2-0 の領域は 22%減少する。「高所・狭隘部作業」（図 4.9）になると、ケース 2 が遷移領域に含まれ、機器重量 30ton の結果と比較するとシナリオ 2-0 の領域は 24%減少する。これは、表 4.11 に示す様に、人工数および二次廃棄物発生量の評価点のシナリオ間の差が機器重量 30ton の場合よりも大きいために、設置場所作業期間の重要度の影響が小さくなることが原因である。

②機器重量 50ton の場合

機器重量 50ton の場合の「通常作業」、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」での各解体シナリオの評価点を表 4.12 に示し、総合評価点の計算より得た各評価基準の重要度と最適な解体シナリオの関係を図 4.12~図 4.14 に示す。

表 4.12 に示す各作業性での人工数および二次廃棄物発生量の評価点は表 4.4 に示す機器重量が 30ton の結果と同程度の値を示しており、かつ、解体シナリオ間での評価点の差は機器重量が 30ton の結果と比較して小さくなる。これは、機器重量 10ton の場合とは異なり、30ton から 50ton への機器重量の増加分が 1.7 倍程度と機器重量が 10ton から 30ton への場合と比べて小さいこと（10ton の場合、3 倍）による、「断スペース設置」および「細断スペース撤去」に要する人工数および二次廃棄物発生量の影響が小さくなることが原因である（図 4.10、図 4.11 参照）。

各評価基準の重要度の各解体シナリオの総合評価点への影響は、設置場所作業期間の重要度の影響が機器重量 30ton の結果より僅かながら大きくなる。「通常作業」では、図 4.12 に示す様に、ケース 1 はシナリオ 2-0 が最適な解体シナリオとなっているが、シナリオ 2-0 が最適な解体シナリオとなる領域は、機器重量 30ton での結果と比較して 4%しか増加しない。「高所作業」（図 4.13）でのシナリオ 2-0 が最適な解体シナリオとなる領域は 5%しか増加せず、ほぼ機器重量 30ton の結果と変わらない。「高所・狭隘部作業」（図 4.14）でもシナリオ 2-0 が最適な解体シナリオとなる領域は 6%しか増加しないが、機器重量 30ton の結果とは異なり、重要度をどの様に設定しても、シナリオ 1 が最適な解体シナリオになる領域は無い。

4.4 最適化の検討のまとめ

AHP を用いて最適な解体シナリオの評価を行い、以下の知見を得た。

- (1) AHP と SMART での評価結果の比較により、AHP の方が SMART よりも一括解体シナリオが最適な解体シナリオとなる領域が広いことを確認した。これは、プロジェクト管理データの計算結果に基づく評価点の算出方法が異なるためである。
- (2) 重要度の感度解析を行った結果、一括解体シナリオが最適な解体シナリオとなる領域は設置場所での作業性が「通常作業」，「高所作業」，「高所・狭隘部作業」になるに伴い狭くなり，「高所・狭隘部作業」では一括解体シナリオが最適な解体シナリオとなる領域はほぼ無くなった。これには、解体シナリオ間の設置場所作業期間の評価点の差が大きく影響していることと、人工数および二次廃棄物発生量の差が作業性の変化に伴い減少していることが影響している。

以上より、本研究のモデルケースで検討した解体シナリオが最適な解体シナリオとなる条件の把握を行うことができ、最適な解体シナリオの評価方法として AHP の有用性を確認した。

今後はモデルケースでの検討結果を実際の解体作業に適用するための検討が必要となる。このためには、本研究で評価方法を確立できなかった作業リスクの影響および被ばく線量の影響の最適な解体シナリオの評価方法への組み込み方、並びに上述の評価点の算出方法などについてさらなる検討が必要と思われる。

表 4.1 一対比較表の概念と比較値の意味（例）

(1) 要素間の一対比較表		
	要素 1	要素 2
要素 1	1	4
要素 2	1/4	1

(2) 比較値の意味	
比較値	意味
1	両要素が同程度に重要
2	要素 1 が要素 2 より若干重要
3	要素 1 が要素 2 より重要
4	要素 1 が要素 2 よりかなり重要
5	要素 1 が要素 2 より絶対的に重要
逆数	要素 2 から見たとき

表 4.2 プロジェクト管理データの計算結果

(1) 「通常作業」の場合				
解体シナリオ	全人工数	二次廃棄物	設置場所	
	(人・時)	発生量 (kg)	作業期間 (日)	人工数(人・時)
シナリオ 1	863.7	85.0	43.2	863.7
シナリオ 2-0	1,694.6	220.2	2.7	54.0

(2) 「高所作業」の場合				
解体シナリオ	全人工数	二次廃棄物	設置場所	
	(人・時)	発生量 (kg)	作業期間 (日)	人工数(人・時)
シナリオ 1	1,295.6	127.5	64.8	1,295.6
シナリオ 2-0	1,721.6	222.9	4.1	81.0

(3) 「高所・狹隘部作業」の場合				
解体シナリオ	全人工数	二次廃棄物	設置場所	
	(人・時)	発生量 (kg)	作業期間 (日)	人工数(人・時)
シナリオ 1	1,727.4	170.0	86.4	1,727.4
シナリオ 2-0	1,748.6	225.6	5.4	108.0

表 4.3 人工数に対する解体シナリオ間の一対比較表および各解体シナリオの評価点
(「通常作業」の場合)

人工数	シナリオ 1	シナリオ 2-0	幾何平均	評価点
シナリオ 1	1	1,694.6/863.7	1.401	0.662 (= 1.401/2.115)
シナリオ 2-0	863.7/1,694.6	1	0.714	0.338 (= 0.714/2.115)
合計			2.115	

表 4.4 各解体シナリオの評価点
(1)「通常作業」

解体シナリオ	人工数の評価点 : a	設置場所作業期間の 評価点 : b	二次廃棄物発生量の 評価点 : c
シナリオ 1	0.662	0.059	0.722
シナリオ 2-0	0.338	0.941	0.278

(2)「高所作業」

解体シナリオ	人工数の評価点 : a	設置場所作業期間の 評価点 : b	二次廃棄物発生量の 評価点 : c
シナリオ 1	0.571	0.059	0.636
シナリオ 2-0	0.429	0.941	0.364

(3)「高所・狭隘部作業」

解体シナリオ	人工数の評価点 : a	設置場所作業期間の 評価点 : b	二次廃棄物発生量の 評価点 : c
シナリオ 1	0.503	0.059	0.570
シナリオ 2-0	0.497	0.941	0.430

表 4.5 各評価ケースで設定する各評価基準の重要度

評価ケース	人工数の重要度 : A	設置場所作業期間の 重要度 : B	二次廃棄物発生量の 重要度 : C
ケース 1	0.143	0.714	0.143
ケース 2	0.455	0.090	0.455
ケース 3	0.333	0.333	0.333
ケース P	0~1*	0~1*	0~1*

* : $A + B + C = 1$, $0 \leq A, B, C \leq 1$

表 4.6 解体シナリオの総合評価点（「通常作業」，AHP）

解体シナリオ	ケース 1	ケース 2	ケース 3
シナリオ 1	0.240	0.635	0.481
シナリオ 2-0	0.760	0.365	0.519

表 4.7 各解体シナリオの評価点（「通常作業」，SMART）⁽¹⁾

解体シナリオ	人工数の評価点： a	設置場所作業期間の 評価点： b	二次廃棄物発生量の 評価点： c
シナリオ 1	10	8	4
シナリオ 2-0	4	4	10

表 4.8 解体シナリオの総合評価点（「通常作業」，SMART）

解体シナリオ	ケース 1	ケース 2	ケース 3
シナリオ 1	5.6	9.0	7.7
シナリオ 2-0	8.3	4.6	6.0

表 4.9 解体シナリオの総合評価点（「高所作業」，AHP）

解体シナリオ	ケース 1	ケース 2	ケース 3
シナリオ 1	0.215	0.554	0.422
シナリオ 2-0	0.785	0.446	0.578

表 4.10 解体シナリオの総合評価点（「高所・狭隘部作業」，AHP）

解体シナリオ	ケース 1	ケース 2	ケース 3
シナリオ 1	0.196	0.494	0.377
シナリオ 2-0	0.804	0.506	0.622

表 4.11 各解体シナリオの評価点（機器重量 10ton）

(1)「通常作業」

解体シナリオ	人工数の評価点： a	設置場所作業期間の 評価点： b	二次廃棄物発生量の 評価点： c
シナリオ 1	0.719	0.059	0.789
シナリオ 2-0	0.281	0.941	0.211

(2)「高所作業」

解体シナリオ	人工数の評価点： a	設置場所作業期間の 評価点： b	二次廃棄物発生量の 評価点： c
シナリオ 1	0.633	0.059	0.716
シナリオ 2-0	0.367	0.941	0.284

(3)「高所・狹隘部作業」

解体シナリオ	人工数の評価点： a	設置場所作業期間の 評価点： b	二次廃棄物発生量の 評価点： c
シナリオ 1	0.567	0.059	0.656
シナリオ 2-0	0.433	0.941	0.344

表 4.12 各解体シナリオの評価点（機器重量 50ton）

(1)「通常作業」

解体シナリオ	人工数の評価点： a	設置場所作業期間の 評価点： b	二次廃棄物発生量の 評価点： c
シナリオ 1	0.653	0.059	0.710
シナリオ 2-0	0.347	0.941	0.290

(2)「高所作業」

解体シナリオ	人工数の評価点： a	設置場所作業期間の 評価点： b	二次廃棄物発生量の 評価点： c
シナリオ 1	0.560	0.059	0.623
シナリオ 2-0	0.440	0.941	0.377

(3)「高所・狹隘部作業」

解体シナリオ	人工数の評価点： a	設置場所作業期間の 評価点： b	二次廃棄物発生量の 評価点： c
シナリオ 1	0.493	0.059	0.556
シナリオ 2-0	0.507	0.941	0.444

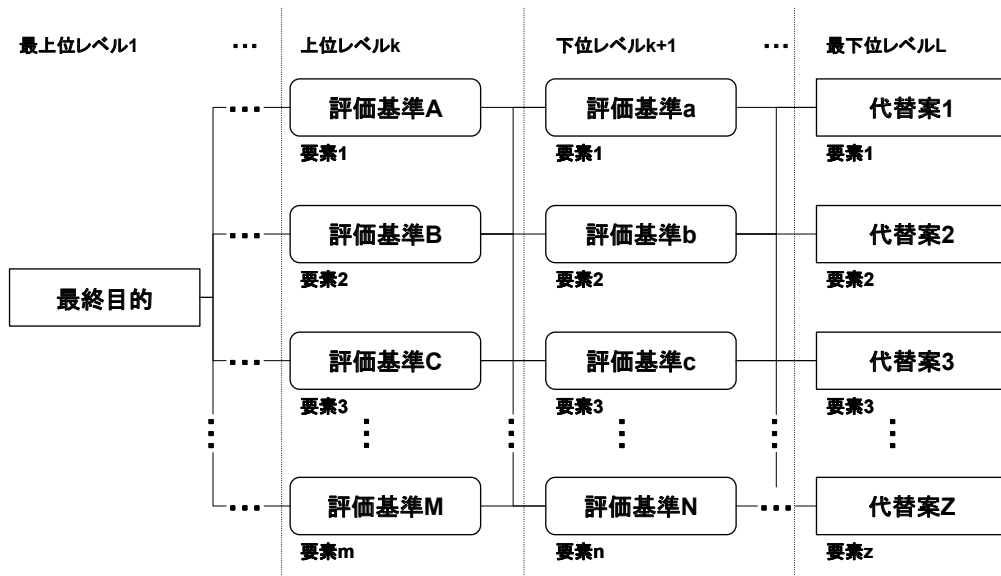


図 4.1 階層構造の概念

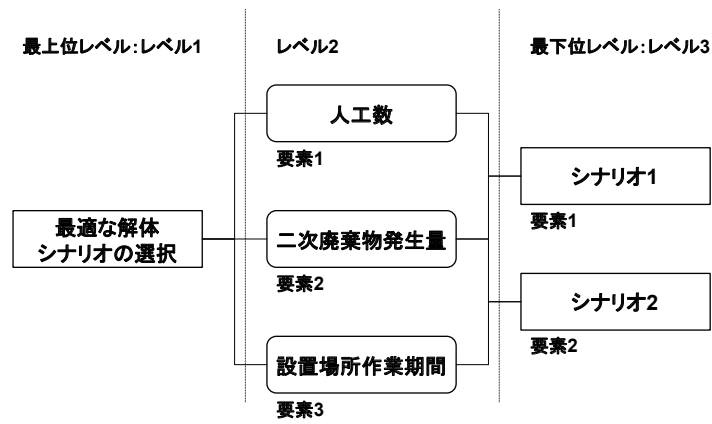


図 4.2 本検討での最適な解体シナリオの選択に係る階層構造

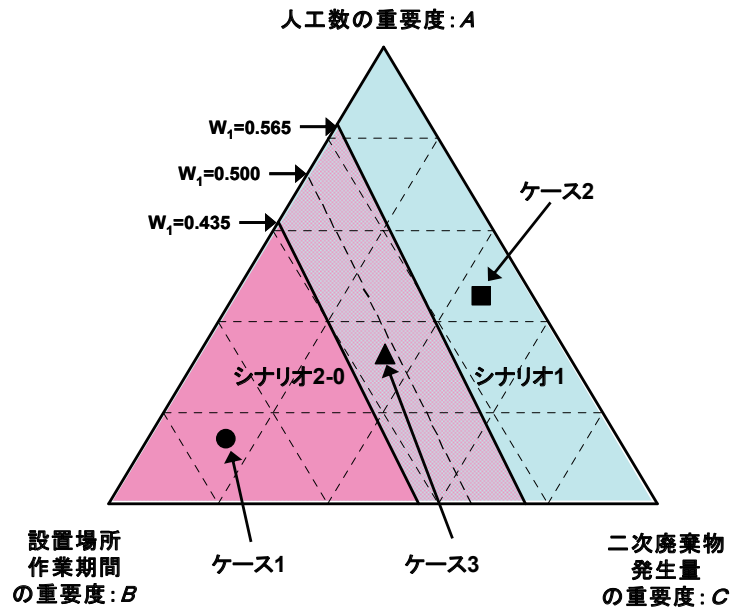


図 4.3 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の
評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 30ton, 「通常作業」, AHP）

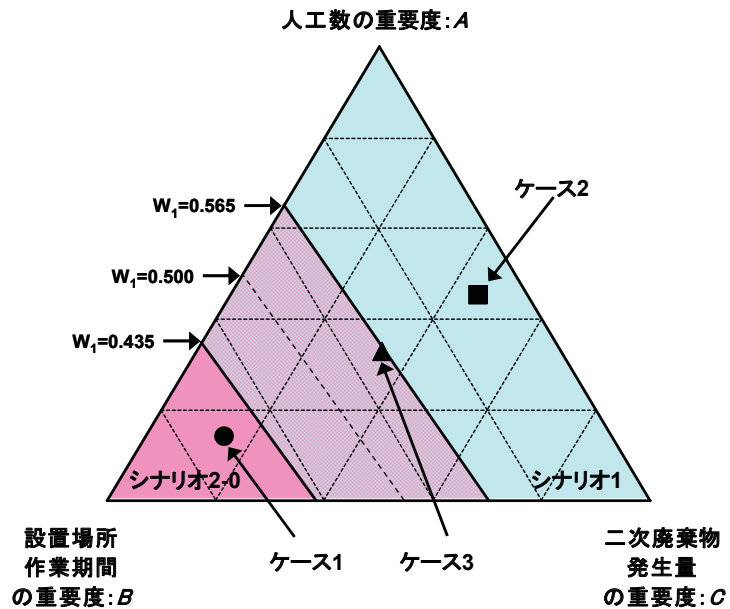


図 4.4 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の
評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 30ton, 「通常作業」, SMART）

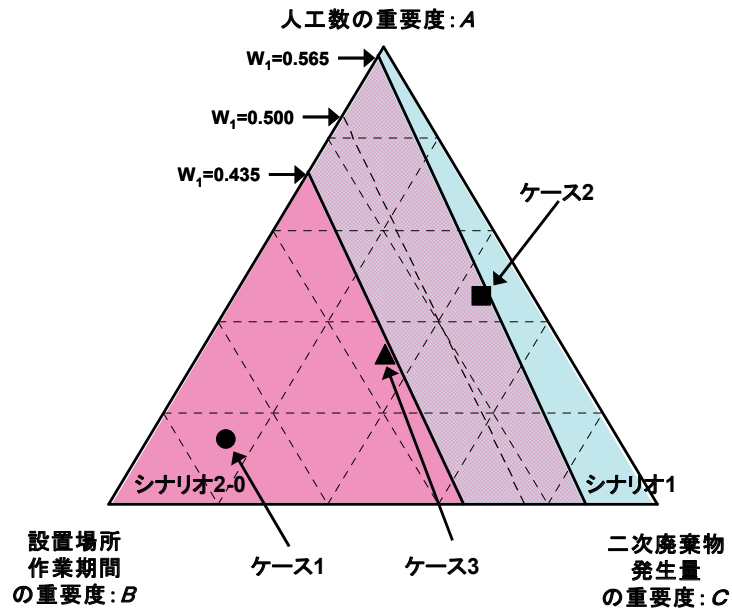


図 4.5 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の
評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 30ton, 「高所作業」, AHP)

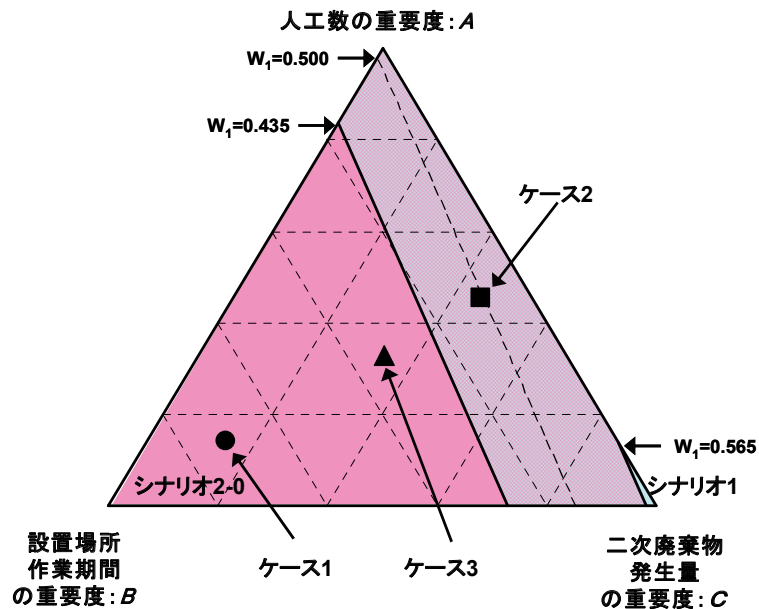


図 4.6 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の
評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 30ton, 「高所・狭隘部作業」, AHP)

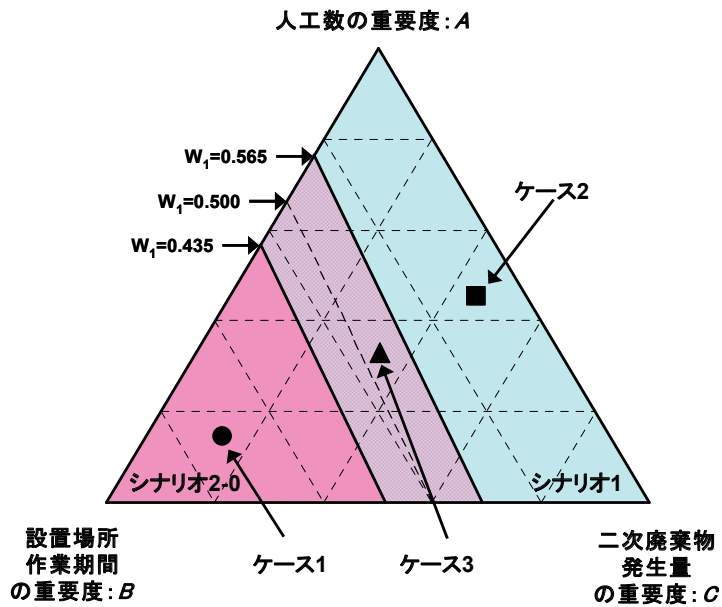


図 4.7 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の
評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 10ton, 「通常作業」, AHP）

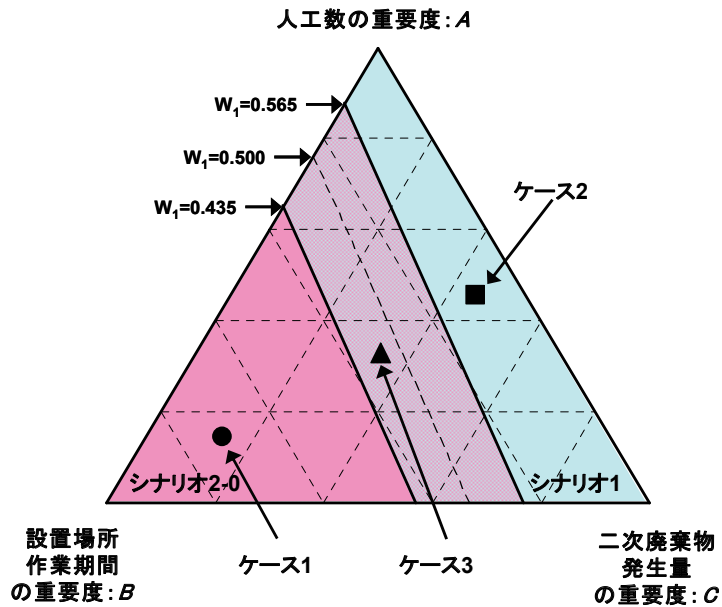


図 4.8 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の
評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 10ton, 「高所作業」, AHP）

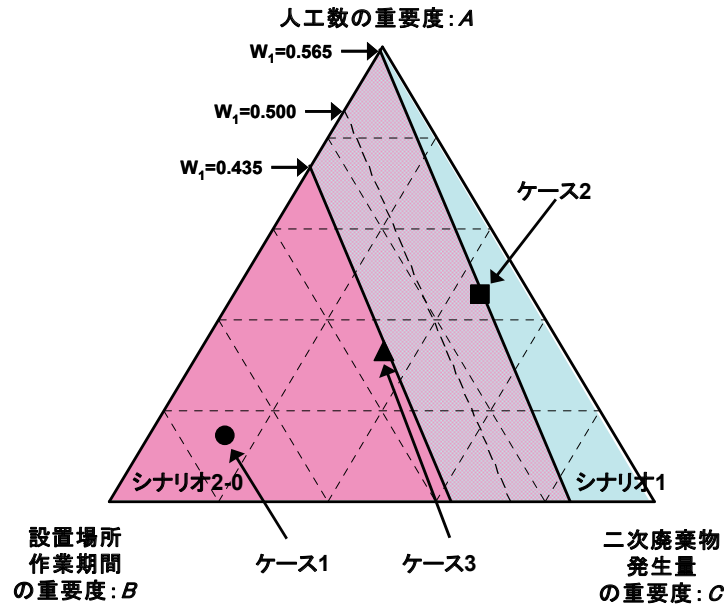


図 4.9 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 10ton, 「高所・狭隘部作業」, AHP）

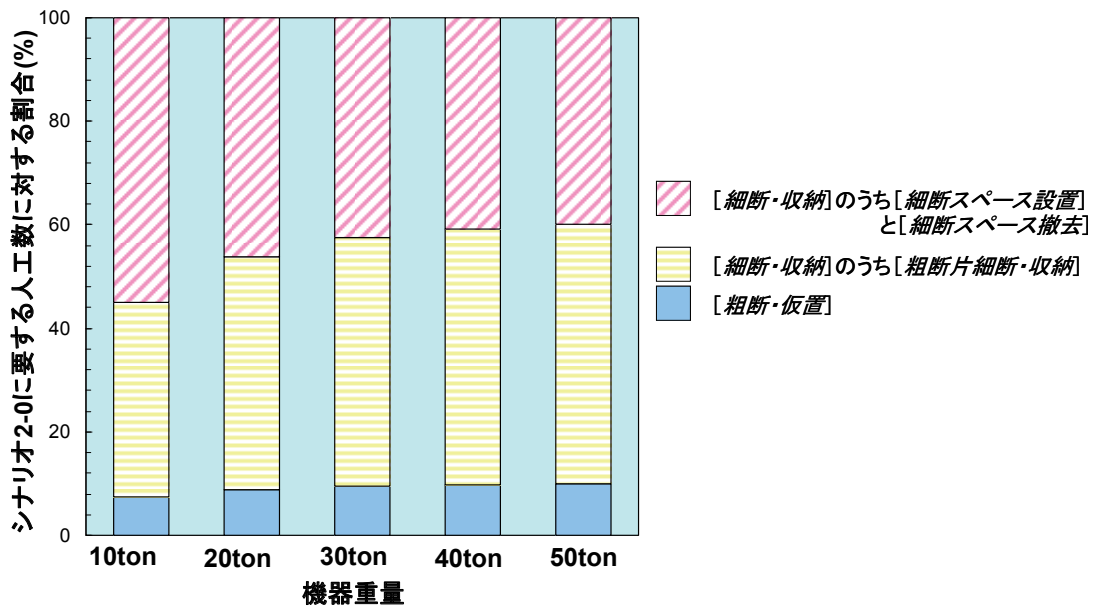


図 4.10 シナリオ 2-0 に要する人工数に対する各作業項目の割合

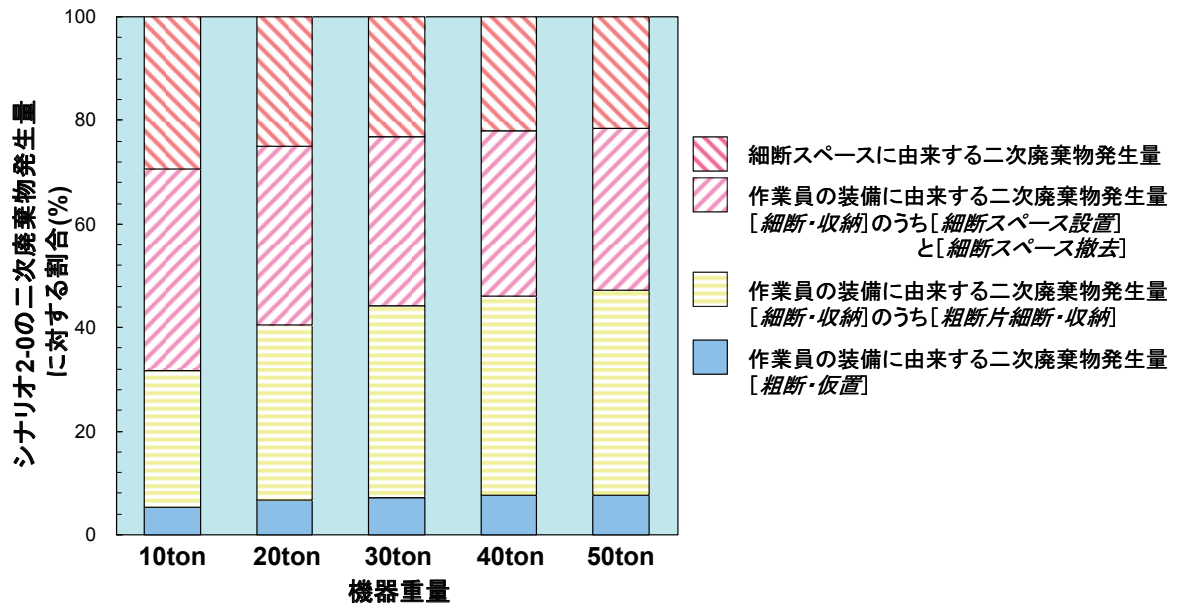


図 4.11 シナリオ 2-0 の二次廃棄物発生量に対する各由来の割合

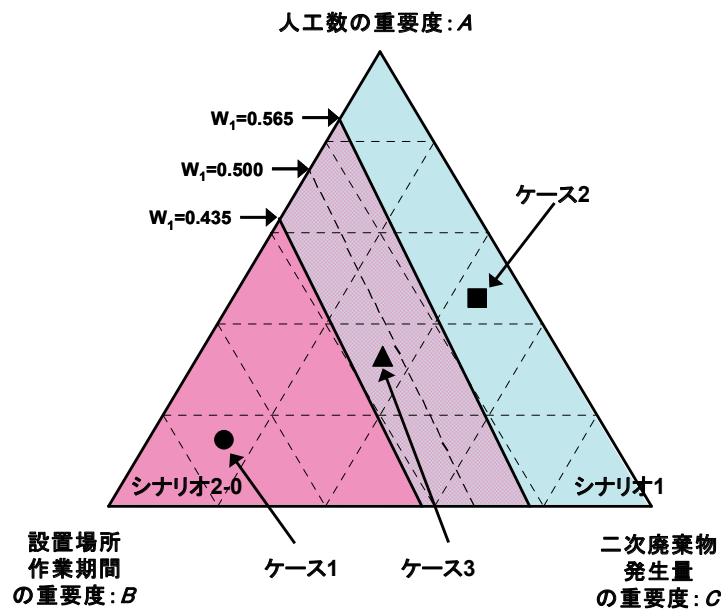


図 4.12 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の
評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 50ton, 「通常作業」, AHP）

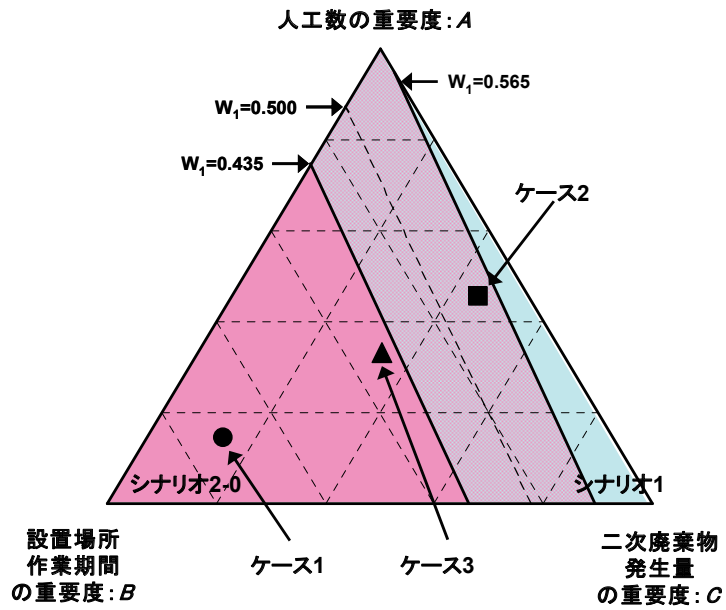


図 4.13 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の
評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 50ton, 「高所作業」, AHP)

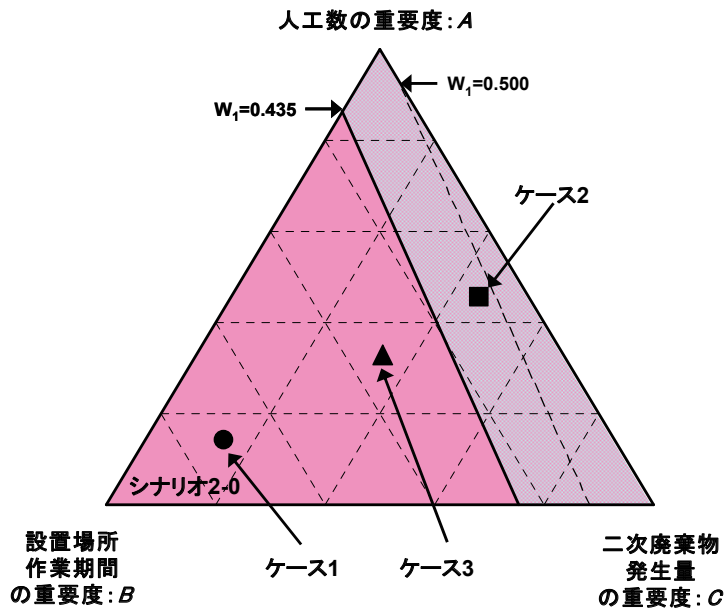


図 4.14 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の
評価結果による最適な解体シナリオの関係（機器重量 50ton, 「高所・狭隘部作業」, AHP)

This is a blank page.

5. まとめ

廃止措置計画の策定では、想定される幾つかの解体シナリオを検討し、様々な制約条件の下で最適な解体シナリオを選定して実際の解体作業に適用することが必要である。これまでに福井大学と原子力機構は、共同研究を通して、「ふげん」で行われた給水加熱器の解体作業を対象に、最適な解体シナリオを選定する方法について検討した。

基本的な評価基準にプロジェクト管理データを用いて、最適な解体シナリオを選定するために、平成 21 年度に行った検討では評価手法に SMART を適用し、平成 22 年度の検討では AHP を適用した。

評価の対象とした解体シナリオは、給水加熱器を設置場所で解体し、切断片を収納容器に収納する一括解体シナリオおよび給水加熱器を切断せず一体として撤去し、他の場所で解体して切断片を収納容器に収納する分割解体シナリオである。分割解体シナリオは、給水加熱器の設置場所を別の目的に有効利用できる利点がある。

プロジェクト管理データに関する評価基準としては、人工数、二次廃棄物発生量、設置場所作業期間とした。

評価の結果、評価基準として設定した人工数、二次廃棄物発生量の重要度を大きくした場合には、一括解体シナリオが有効になること、設置場所作業期間の重要度を大きくした場合には、分割解体シナリオが有効となることが明らかになった。

さらに、評価基準の重要度を変化させた感度解析を行い、重要度と最適な解体シナリオの関係を検討した。この結果、重要度の設定に応じて選択される最適な解体シナリオは、評価点の算出方法、作業性および機器重量に大きく影響を受けることを確認した。

以上、各解体シナリオの特徴と解体作業の状況を反映した最適な解体シナリオの選択手法としての AHP の有用性を確認した。AHP は、定性的な項目も評価基準として検討することができるため、他の多基準意思決定法（SMART を含む）に比べて最適な解体シナリオの選定手法としての適用性は高いと思われる。

一方、本研究を実際の廃止措置で運用するためには、

- (1) 作業リスク、および廃止措置を進める上で考慮に入れるべき被ばく線量についての評価基準の設定方法。
- (2) AHP と SMART での最適な解体シナリオを示す領域に差があること、またこの差が評価点の設定方法に影響を受けていることを考慮した、評価点の設定方法。
- (3) 重要度に関して、本研究は昨年度と同様にケーススタディと感度解析による検討を行った。重要度が当該作業の状況などで大きく異なることを踏まえた設定方法。

の 3 点について、今後更に検討する必要がある。

謝 辞

本報告書の作成に当たり、バックエンド推進部門および敦賀本部原子炉廃止措置研究開発センターの諸氏には多くの労力や貴重な助言を頂きました。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 芝原雄司, 石神努, 森下喜嗣 他, “原子力施設の廃止措置に係る研究（共同研究）”JAEA-Technology 2011-021 (2011).
- (2) 柳原敏, 萩原博仁, “原子炉デコミッショニング管理のための計算コードシステムの開発・I”, JAERI-M 94-005 (1994).
- (3) 助川武則, 大島総一郎, 白石邦生 他, “原子力施設の解体作業に関する管理データ計算モデルの開発”, JAERI-Data/Code 99-005 (1999).
- (4) S. YANAGIHARA, T. SUKEGAWA, K. SHIRAIISHI, “Development of Computer Systems for Planning and Management of Reactor Decommissioning”, J. Nucl. Sci. Technol., 38 (3), 193-202 (2001).
- (5) 白石邦生, 助川武則, 柳原敏, “動力試験炉 (JPDR) の解体における作業データの分析”, JAERI-Data/Code 98-010 (1998).
- (6) 芝原雄司, 立花光夫, 石神努 他, “ふげん発電所の機器撤去に掛かる人工数評価モデルの検討-1: 第3・4 給水加熱器室の機器撤去の解体工程”, JAEA-Technology 2010-033 (2010).
- (7) 芝原雄司, 立花光夫, 泉正憲 他, “ふげん発電所の機器撤去に掛かる人工数評価式の検討-2: 第3・4 給水加熱器室の機器撤去の準備・後処理工程”, JAEA-Technology 2011-010 (2011).
- (8) Y. SHIBAHARA, M. IZUMI, T. NANKO 他, “Study on Evaluation Models of Management Data for Decommissioning of FUGEN”, ICEM2010-40102, Tsukuba, Japan, October 3-7 (2010).
- (9) 芝原雄司, 立花光夫, 泉正憲 他, “ふげん発電所の機器撤去に掛かる人工数評価式の検討-3: 第5 給水加熱器室の機器の解体作業”, JAEA-Technology (投稿予定).
- (10) F. A. Lootsma: “Fuzzy Logic for Planning and Decision Making”, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- (11) 刀根薫: “ゲーム感覚意思決定法 AHP 入門”, 日科技連, 1986.
- (12) 木下英蔵: “孫子の兵法の数学モデル 最適戦略を探る意思決定 AHP”, 講談社, 1998.

付録 A 作業リスクの評価

A.1 作業リスク

解体作業での作業リスクとして、解体対象物やその周辺機器などの放射線による外部被ばくのリスク（以下，“放射線リスク”）と、作業時の人的被害や事故発生に伴う解体作業の遅延のリスク（以下，“非放射線リスク”）が考えられる。本研究で対象とする給水加熱器は放射線レベルが低いと見做されるため、放射線リスクを検討に含めないこととし、非放射線リスクとして人的被害に起因する解体作業の遅延を考慮する。

解体作業時に人的被害を引き起こす要因として、以下を考えた。

- ①足場の崩壊： 解体作業時に使用する足場の崩壊事故
- ②作業員の転落： 解体作業時の作業員の足場からの転落事故
- ③物の落下： 解体作業に使用する機器などの物の落下事故
- ④接触： 解体作業時の接触事故
- ⑤火災： 発生した火災に起因する事故

人的被害の発生するリスク（以下，“事故リスク”）は、給水加熱器の解体作業では作業性が「高所作業」の方が「通常作業」に比べて高くなり、「高所・狭隘部作業」の方が「高所作業」より比べて高くなる。

「通常作業」の場合には、シナリオ1とシナリオ2の間で事故リスクに大きな差はない。一方、「高所作業」および「高所・狭隘部作業」の場合、シナリオ1では、設置場所作業期間がシナリオ2より長くなるために、事故リスクが高くなる。

A.2 非放射線リスクの評価

非放射線リスクとして、A.1節に示す様に、人的被害に起因する解体作業の遅延を想定した。まず、非放射線リスクを評価するために、人的被害の事故リスクを評価した。事故リスクの評価については、まだ、その評価方法が確立されていない。また、事故リスクの詳細な分析に必要な事故事例などのデータ取得が不十分である。このため、エンジニアリングの観点より、AHPを用いて評価した。

人的被害を評価するために、A.1節で挙げた①～⑤に起因する事故リスクを、

$$(\text{事故リスク}) = (\text{事故の発生頻度}) \times (\text{事故の影響}) \quad \text{--- (A.1)}$$

で推定する。ここで、事故の発生頻度は、単位期間での発生頻度とする。

非放射線リスクの評価は、人的被害の観点から、以下の手順で評価した。

- ① 事故リスクの評価： 単位期間で発生する事故の発生頻度とその影響の評価
- ② 解体シナリオの評価： 各解体シナリオでの事故リスクの評価対象となる期間の評価
- ③ 非放射線リスクの評価： 各解体シナリオに対する非放射線リスクの評価

以下に各手順の評価の結果を述べる。

(1) 事故リスクの評価

事故リスクは、式(A.1)を用いて評価した。

事故の発生頻度および影響のレベルについては、経験情報も少なく詳細な定量化が困難なため、ここでは、以下の考察を基に試験的なデータを設定した。

- ・ 足場の崩壊については、その発生頻度は小さいが影響は大きい
- ・ 作業員の転落については、足場の崩壊より発生頻度が高く、影響は同程度である
- ・ 物の落下については、作業員の転落より発生頻度が高く、影響は幾分小さい
- ・ 接触については、発生頻度が比較的高く、影響は比較的小さい
- ・ 火災については、発生頻度は低く、影響は大きい

上記の考え方にに基づき設定した各事故の発生頻度および影響のレベルを、図 A.1 に示す関係を用いて評価した結果を表 A.1 に示す。表 A.1 に基づいて、試験的に設定した各事故の発生頻度と事故の影響のレベルのウェイトを評価し、式(A.1)を用いて事故リスクの評価を行った。結果を以下に示す。

① 事故の発生頻度の評価

表 A.1 を用いて評価した事故の発生頻度のウェイトを表 A.2 に示す。表 A.1 および上述の事故の発生頻度の関係は、物の落下および接触の発生頻度が共に高く、作業員の転落の発生頻度を含めると、全体の 80%程度の割合を示した。

② 事故の影響の評価

表 A.1 を用いて評価した事故の影響のレベルのウェイトを表 A.3 に示す。本検討で設定した条件では、火災の影響のレベルが高く、次いで足場の崩壊および作業員の転落の影響のレベルが高い。これら 3 件で全体の 80%程度の割合を示した。

③ 事故リスクの評価

表 A.2 および表 A.3 に示している事故の発生頻度および影響のレベルのウェイトを用いて評価した事故リスクの評価結果を図 A.2 に示す。評価は、式(A.1)に各事故の発生頻度および影響のレベルのウェイトを用いて行った。評価の結果、本検討で設定した事故の条件では、発生頻度で最もウェイトの大きかった物の落下および影響のレベルで最もウェイトが大きかった火災、並びにそれら両方で 2 番目にウェイトの大きかった作業員の転落がほぼ同じ事故リスクを有する結果となった。ただし、足場の崩壊および接触の事故リスクも共に 14%程度を有しており、無視出来る大きさではない。

(2) 解体シナリオの評価

解体シナリオの評価に当たっては、「高所作業」および「高所・狹隘部作業」が該当する作業期間が長くなるほど、非放射線リスクは高くなると仮定した。また、非放射線リスクが低いほどその評価点は高くなる（ウェイトが大きくなる）と仮定した。

解体シナリオの評価結果は次の通りである。

非放射線リスクに影響を及ぼす要因の中で解体シナリオ間で違いが現れるものは、設置場所作業期間である。シナリオ1では、給水加熱器の解体作業が終了するまでが設置場所作業期間となり、その際の作業性は「高所作業」および「高所・狹隘部作業」となる。シナリオ2では給水加熱器を別の場所へ移動するために切り離して床に置くまで（〔粗断・仮置〕）が設置場所作業期間となり、その際の作業性は「高所作業」および「高所・狹隘部作業」となる。このため、両解体シナリオ共に「高所作業」および「高所・狹隘部作業」に要する時間が短いほど、非放射線リスクは低くなる。

シナリオ1とシナリオ2のうち〔粗断・仮置〕の作業期間の比、すなわち設置場所作業期間の比は、3.3節および3.4節より、全ての作業性で16:1である（ $n=0$ の場合）。このデータ間の比を比較値とした。

(3) 非放射線リスクの評価

(1)および(2)で行った評価結果を基に、各解体シナリオに対する非放射線リスクの評価を試みた。

(1)で行った様に、事故の発生頻度および影響のレベルを仮定することにより、事故リスクの総合評価（どの事故リスクが重要となるかの評価）が行える。また、(2)で行った様に、シナリオ1はシナリオ2よりも設置場所作業期間が長くなるため、シナリオ2より非放射線リスクは高くなる；4章では、(2)の結果を基にして、解体シナリオの評価を行っている。

(1)で行った事故リスクのウェイトの合計値は“1”である。非放射線リスクの評価モデルが、事故リスクを係数とする設置場所作業期間の一次式で表されとした場合、設置場所作業期間の比が非放射線リスクの比となる。

一方、作業リスクとして、放射線リスクと非放射線リスクを挙げているが、放射線リスクに対しては、放射能レベルが低いために放射線リスクのウェイトを非常に軽く取り扱い、考慮していない。このことは、非放射線リスクに対しても当てはまる。

非放射線リスクのウェイトが軽い場合、「高所作業」および「高所・狹隘部作業」の場合に適用している解体シナリオの選定に係る階層構造は、「通常作業」と同様の階層構造（図4.2参照）と同様になる。一方、非放射線リスクのウェイトが重い場合、非放射線リスクの影響が出てくる。

非放射線リスク（および高放射能レベル下での放射線リスクを含めた作業リスク）に関して、ウェイトをどの様に行うかおよび作業リスクをどの様なモデルで表すのかが今後の検討課題となる。

表 A.1 事故リスクのレベル

事故	事故の発生 頻度のレベル	事故の影響の レベル
足場の崩壊	1	3
作業員の転落	2	3
物の落下	3	2
接触	3	1
火災	1	4

発生頻度のレベルは、足場の崩壊を 1 とした

表 A.2 事故の発生頻度の一対比較表

	足場の 崩壊	作業員の 転落	物の落下	接触	火災	ウェイト
足場の崩壊	1	1/2	1/3	1/3	1	0.099
作業員の転落	2	1	1/2	1/2	2	0.176
物の落下	3	2	1	1	3	0.313
接触	3	2	1	1	3	0.313
火災	1	1/2	1/3	1/3	1	0.099

表 A.3 事故の影響の一対比較表

	足場の 崩壊	作業員の 転落	物の落下	接触	火災	ウェイト
足場の崩壊	1	1	2	3	1/2	0.219
作業員の転落	1	1	2	3	1/2	0.219
物の落下	1/2	1/2	1	2	1/3	0.123
接触	1/3	1/3	1/2	1	1/4	0.075
火災	2	2	3	4	1	0.381

事故の発生頻度			事故の影響		
レベル	相対確率	代表値	レベル	作業の停止期間	代表値(日)
5	>75%	1	5	1年以上	1000
4	50～75%	0.75	4	3ヶ月～1年	360
3	25～50%	0.5	3	1ヶ月～3ヶ月	90
2	10～25%	0.25	2	1週間～1ヶ月	30
1	<10%	0.1	1	～1週間	7

図 A.1 各事故のリスク（例）

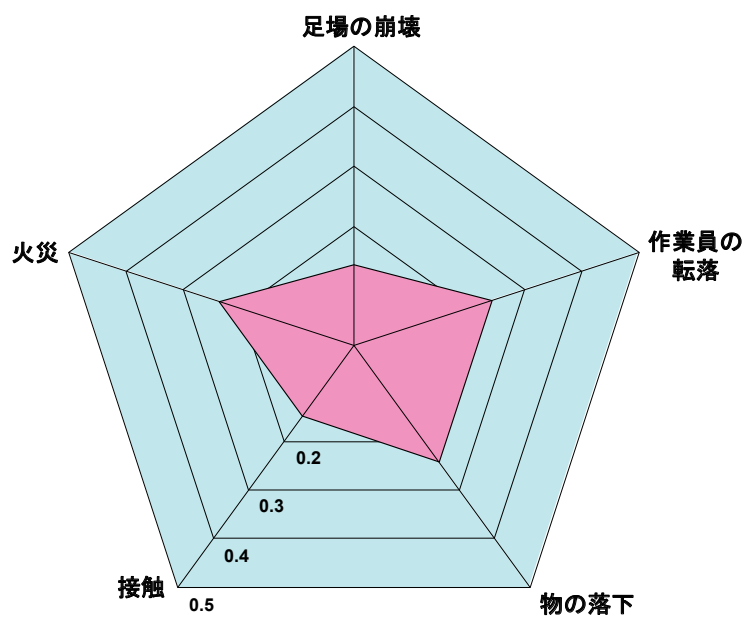


図 A.2 事故リスクの総合評価結果

This is a blank page.

付録 B シナリオ 1, 2-0 および 2-1 を対象とした最適な解体シナリオの検討結果

ここでは、各作業性について、シナリオ 1, 2-0, 2-1 を対象に評価基準として、人工数、二次廃棄物発生量、および設置場所作業期間を設定し、AHP を用いて実施した最適な解体シナリオの検討結果を示す。

表 B.1 は、表 3.8 のプロジェクト管理データの計算結果に基づいて AHP を用いて求めた各解体シナリオの評価点である。評価点の計算は、以下の通りに行った。

- (1) 各プロジェクト管理データの計算結果を基に一对比較表を作成する(表 B.2 参照)。
ここで、プロジェクト管理データは値が小さいほうを高得点とするために、逆数の比を用いる。
- (2) 一对比較表を行列式と見立て、各解体シナリオでの主固有ベクトルを計算する。ここで、この計算には以下に示す幾何平均法を用いた。
 - ① 各行で幾何平均を求め、幾何平均の合計値を計算する。
 - ② 各行の幾何平均を幾何平均の合計値で割る。
 - ③ ②で得た値を各解体シナリオの評価点とする。

人工数、二次廃棄物発生量、および設置場所作業期間の各評価基準の重要度をそれぞれ、 $A + B + C = 1$ ($0 \leq A, B, C \leq 1$)、解体シナリオ j ($j=1$:シナリオ 1, $j=2$:シナリオ 2-0, $j=3$:シナリオ 2-1) の各評価基準の評価点を a_j, b_j, c_j (それぞれ、人工数、設置場所作業期間、二次廃棄物発生量) とすれば、解体シナリオ j の総合評価点 W_j は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} \quad \text{--- (B.1)}$$

重要度 A, B, C を変動パラメータとしたとき、各解体シナリオが最適な解体シナリオとなる条件は次式で与えられる。

シナリオ 1 が最適な解体シナリオ： $W_1 > W_2$ かつ $W_1 > W_3$

シナリオ 2-0 が最適な解体シナリオ： $W_2 > W_1$ かつ $W_2 > W_3$

シナリオ 2-1 が最適な解体シナリオ： $W_3 > W_1$ かつ $W_3 > W_2$

得られた最適な解体シナリオと各評価基準の重要度の関係を図 B.1 に示す。これから、どのような値の重要度を設定しても、シナリオ 2-1 は最適な解体シナリオとならない。これは、表 B.1 に示す様に、人工数と二次廃棄物発生量の評価点はシナリオ 2-0 とシナリオ 2-1 では大きな差は現れていないが、設置場所作業期間の評価点で大きな差が出ていることが原因である。

〔粗断・仮置〕での粗断片の運搬や、〔細断・収納〕で設置する細断スペースに関しては、運搬に掛かる困難度や設置する細断スペースの現実性など、プロジェクト管理データ以外にも評価基準としてなり得るものがあり、それらを組み入れた場合にはシナリオ 2-1 (シナリオ 2-2 以降も含む) でも最適な解体シナリオとなる可能性がある。これらに対して、どの様に組み入れるかが、今後の検討課題となる。

表 B.1 評価基準から見た各解体シナリオの評価点

(1)「通常作業」

解体シナリオ	人工数の評価点： a	設置場所作業期間の 評価点： b	二次廃棄物発生量の 評価点： c
シナリオ 1	0.486	0.045	0.547
シナリオ 2-0	0.247	0.726	0.211
シナリオ 2-1	0.267	0.229	0.242

(2)「高所作業」

解体シナリオ	人工数の評価点： a	設置場所作業期間の 評価点： b	二次廃棄物発生量の 評価点： c
シナリオ 1	0.395	0.045	0.453
シナリオ 2-0	0.297	0.726	0.259
シナリオ 2-1	0.308	0.229	0.288

(3)「高所・狭隘部作業」

解体シナリオ	人工数の評価点： a	設置場所作業期間の 評価点： b	二次廃棄物発生量の 評価点： c
シナリオ 1	0.336	0.045	0.390
シナリオ 2-0	0.331	0.726	0.293
シナリオ 2-1	0.333	0.229	0.317

表 B.2 各解体シナリオの評価点の計算（「通常作業」）

(1)人工数の評価点の計算

解体シナリオ	シナリオ 1	シナリオ 2-0	シナリオ 2-1	幾何平均	評価点
シナリオ 1	1	1,694.6/863.7	1,571.4/863.7	1.528	0.486(=1.528/3.147)
シナリオ 2-0	863.7/1,694.6	1	1,571.4/1,694.6	0.779	0.247(=0.779/3.147)
シナリオ 2-1	863.7/1,571.4	1,694.6/1,571.4	1	0.840	0.267(=0.840/3.147)
	合計			3.147	

(2)設置場所作業期間の計算

解体シナリオ	シナリオ 1	シナリオ 2-0	シナリオ 2-1	幾何平均	評価点
シナリオ 1	1	2.7/43.2	8.6/43.2	0.231	0.045(=0.231/5.100)
シナリオ 2-0	43.2/2.7	1	8.6/2.7	3.700	0.726(=3.700/5.100)
シナリオ 2-1	43.2/8.6	2.7/8.6	1	1.168	0.229(=1.168/5.100)
	合計			5.100	

(3)二次廃棄物発生量の計算

解体シナリオ	シナリオ 1	シナリオ 2-0	シナリオ 2-1	幾何平均	評価点
シナリオ 1	1	220.2/85.0	192.5/85.0	1.804	0.547(=1.804/3.296)
シナリオ 2-0	85.0/220.2	1	192.5/220.2	0.696	0.211(=0.696/3.296)
シナリオ 2-1	85.0/192.5	220.2/192.5	1	0.797	0.242(=0.797/3.296)
	合計			3.296	

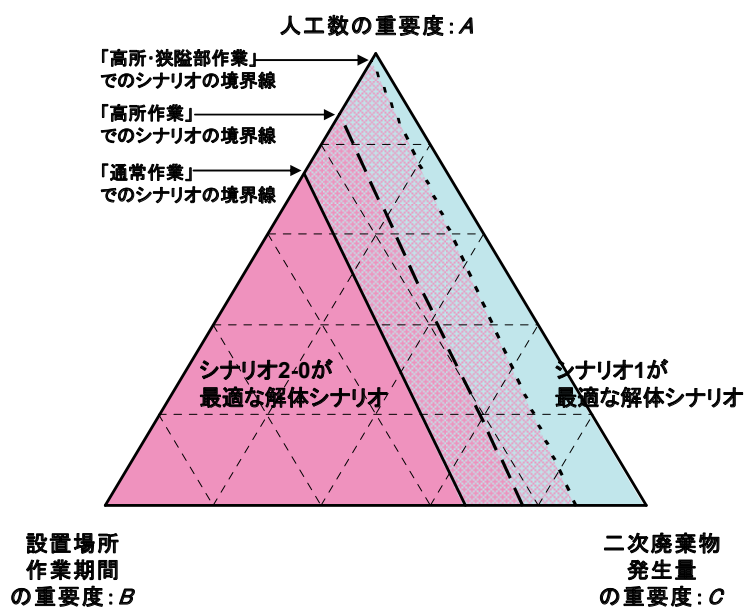


図 B.1 各評価基準の重要度と各解体シナリオの総合評価点の評価結果による最適な解体シナリオの関係

This is a blank page.

付録 C ケース 1, 2 および 3 での各評価基準の重要度の計算

ここでは、各評価基準の重要度を、ケース 1, 2 および 3 について計算する。
各評価基準である人工数、設置場所作業期間および二次廃棄物発生量の関係は、4.3.2 項より、以下の通りとなる。

ケース 1：人工数 $\div$ 二次廃棄物発生量 $\ll$ 設置場所作業期間

ケース 2：人工数 $\div$ 二次廃棄物発生量 $\gg$ 設置場所作業期間

ケース 3：人工数 $\div$ 二次廃棄物発生量 $\div$ 設置場所作業期間

ここで、“ $\div$ ”は同程度に重要を示し、“ $\gg$ ”および“ $\ll$ ”はそれぞれ絶対的に重要およびその逆を示す。表 4.1 に示す一対比較値とケース 1, 2 および 3 での設定よりそれぞれのケースでの各評価基準の一対比較表を表 C.1 の様に作成した。

表 C.1 に示す一対比較表を基に、各ケースでの各評価基準の重要度を計算した。計算には、4.3.1 項で述べている幾何平均法を用いた。

ケース 1 の場合、人工数、設置場所作業期間および二次廃棄物発生量のそれぞれの幾何平均は、

人工数：	$(1 \times 1/5 \times 1)^{1/3}$	= 0.585
設置場所作業期間：	$(5 \times 1 \times 5)^{1/3}$	= 2.924
二次廃棄物発生量：	$(1 \times 1/5 \times 1)^{1/3}$	= 0.585

となり、幾何平均の総和は、4.094 となる。各評価基準の幾何平均および幾何平均の総和より、各評価基準の重要度は、

人工数：	$0.585/4.094$	= 0.143
設置場所作業期間：	$2.924/4.094$	= 0.714
二次廃棄物発生量：	$0.585/4.094$	= 0.143

となる。他のケースでも同様の計算を行い、重要度の計算を行った。

各ケースでの評価基準の重要度の計算結果を表 C.1 に示す。

表 C.1 各評価基準の対比較表

(1) ケース 1

評価基準	人工数	設置場所作業期間	二次廃棄物発生量	重要度
人工数	1	1/5	1	0.143
設置場所作業期間	5	1	5	0.714
二次廃棄物発生量	1	1/5	1	0.143

(2) ケース 2

評価基準	人工数	設置場所作業期間	二次廃棄物発生量	重要度
人工数	1	5	1	0.455
設置場所作業期間	1/5	1	1/5	0.090
二次廃棄物発生量	1	5	1	0.455

(3) ケース 3

評価基準	人工数	設置場所作業期間	二次廃棄物発生量	重要度
人工数	1	1	1	0.333
設置場所作業期間	1	1	1	0.333
二次廃棄物発生量	1	1	1	0.333

国際単位系（SI）

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	数メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
電界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比誘電率 ^(b)	(数字の) 1	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
光束流	ルーメン	lm		K
照射度	ルクス	lx	cd sr ^(c)	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	lm/m ²	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

- (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎平方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁻¹ m ² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ⁻² m ² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトリ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ⁷ /4π)A m ⁻¹

- (c) 3 元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ≐1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J (「15℃」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

