

**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**

Study on Applicability of Evaluation Model of Manpower Needs  
for Dismantling of Equipments in FUGEN -1  
Dismantling Process in 3<sup>rd</sup>/4<sup>th</sup> Feedwater Heater Room

芝原 雄司 立花 光夫 石神 努 泉 正憲 南光 隆

Yuji SHIBAHARA, Mitsuo TACHIBANA, Tsutomu ISHIGAMI  
Masanori IZUMI and Takashi NANKO

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

October 2010

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

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

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<sup>※</sup>, 立花 光夫, 石神 努

泉 正憲<sup>+</sup>, 南光 隆<sup>+</sup>

(2010 年 7 月 21 日受理)

「ふげん」において 2008 年度に実施した第 3・4 給水加熱器室の機器撤去作業のうち解体工程に掛かる人工数を管理データ評価システム (PRODIA コード) により計算し、既存の評価式の「ふげん」への適用性を評価した。その結果、JPDR 解体の実績データから得た既存の評価式による人工数の計算結果は実績データと大きく異なった。特に、第 3・4 給水加熱器の撤去に掛かる人工数の計算結果はそれぞれ実績データの 1.8 倍、および 3.3 倍となった。また、第 3 給水加熱器と第 4 給水加熱器の重量がほぼ同じであるにもかかわらず、その撤去に掛かる人工数は約 2 倍の違いが見られた。これらの違いについて検討し、違いの主な要因は 1) 既存の評価モデルの作業構成 (粗断・細断・収納) と第 3・4 給水加熱器の作業構成 (粗断・仮置き) が異なっている、2) 切断回数が第 3 給水加熱器と第 4 給水加熱器で異なっている、にあることから、給水加熱器の切断回数を含めた作業構成を考慮できる新たな評価式を作成し、再度、第 3・4 給水加熱器の撤去に掛かる人工数を評価した。計算結果は実績データと良く一致し、新たに作成した評価式の妥当性を確認した。

Study on Applicability of Evaluation Model of Manpower Needs  
for Dismantling of Equipments in FUGEN -1  
Dismantling Process in 3<sup>rd</sup>/4<sup>th</sup> Feedwater Heater Room

Yuji SHIBAHARA<sup>※</sup>, Mitsuo TACHIBANA, Tsutomu ISHIGAMI

Masanori IZUMI<sup>+</sup> and Takashi NANKO<sup>+</sup>

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

(Received July 21, 2010)

Manpower needs for the dismantling process on the dismantling of equipments in FUGEN 3<sup>rd</sup>/4<sup>th</sup> feedwater heater room was calculated with the management data evaluation system (PRODIA Code), and it was inspected whether the conventional evaluation model had applicability for FUGEN or not. It was confirmed that the conventional evaluation model for feedwater heater had no applicability. In comparison of the calculated value with the actual data, we found two difference: 1) the calculated value were significantly larger than the actual data, 2) the actual data for the dismantling of 3<sup>rd</sup> feedwater heater was twice larger than that of 4<sup>th</sup> feedwater heater, though these equipments were almost same weight. It was found that these were brought 1) by the difference in the work descriptions of dismantling between JPDR and FUGEN, and 2) by that in the cutting number between 3<sup>rd</sup> feedwater heater and 4<sup>th</sup> one. The manpower needs for the dismantling of both feedwater heaters were calculated with a new calculation equation reflecting the descriptions of dismantling, and it was found that these results showed the good agreement with the actual data.

**Keywords:** Decommissioning, FUGEN, PRODIA Code, Management Data, Evaluation Model, Dismantling Process

---

<sup>+</sup>Fugen Decommissioning Engineering Center, Tsuruga Head Office

<sup>※</sup>Senior Post-Doctoral Fellow, Fugen Decommissioning Engineering Center

## 目次

|      |                              |    |
|------|------------------------------|----|
| 1.   | 緒言                           | 1  |
| 2.   | 「ふげん」廃止措置プロジェクトの概要           | 3  |
| 2.1. | プロジェクトの概要                    | 3  |
| 2.2. | 第3・4 給水加熱器室の機器撤去             | 3  |
| 3.   | 管理データ評価システムの概要               | 7  |
| 3.1. | PRODIA コードの概要                | 7  |
| 3.2. | 解体作業の WBS                    | 7  |
| 3.3. | 人工数の評価式                      | 8  |
| 4.   | 第3・4 給水加熱器室の機器撤去到掛かる管理データの評価 | 9  |
| 4.1. | 計算範囲および対象                    | 9  |
| 4.2. | WBS                          | 9  |
| 4.3. | 計算条件                         | 10 |
| 4.4. | 管理データの計算結果                   | 10 |
| 5.   | 解体工程の管理データ評価の結果に対する考察        | 13 |
| 5.1. | JPDR 解体実績データとの比較             | 13 |
| 5.2. | 単位作業係数の補正による検討               | 15 |
| 5.3. | 単位作業係数の補正による計算結果             | 16 |
| 6.   | 「給水加熱器の撤去」の評価式の検討            | 17 |
| 6.1. | 人工数の評価方法の検討                  | 17 |
| 6.2. | 人工数の評価式                      | 17 |
| 6.3. | 「給水加熱器の撤去」の評価式の検討結果          | 20 |
| 7.   | 結言                           | 21 |
|      | 謝辞                           | 21 |
|      | 参考文献                         | 22 |
|      | 付録：「吊ピースの加工・取り付け」に掛かる人工数の評価式 | 41 |

## CONTENTS

|    |                                                                                                 |    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | Introduction                                                                                    | 1  |
| 2. | FUGEN Decommissioning Project                                                                   | 3  |
|    | 2.1. Outline of Decommissioning Project                                                         | 3  |
|    | 2.2. Dismantling of Equipments in 3rd/4th Feedwater Heater Room                                 | 3  |
| 3. | Outline of Evaluation System of Management Data                                                 | 7  |
|    | 3.1. Brief Overview of PRODIA Code                                                              | 7  |
|    | 3.2. WBS of Dismantling Activities                                                              | 7  |
|    | 3.3. Calculation Equation of Manpower Needs                                                     | 8  |
| 4. | Evaluation of Management Data on Dismantling of Equipments<br>in 3rd/4th Feedwater Heater Room  | 9  |
|    | 4.1. Object of Evaluation                                                                       | 9  |
|    | 4.2. WBS                                                                                        | 9  |
|    | 4.3. Conditions of Evaluation                                                                   | 10 |
|    | 4.4. Results of Evaluation of Management Data                                                   | 10 |
| 5. | Discussion of Results of Evaluation of Management Data in Dismantling Process                   | 13 |
|    | 5.1. Comparison of Management Data of JPDR and FUGEN                                            | 13 |
|    | 5.2. Corrections of Unit Productivity Factors                                                   | 15 |
|    | 5.3. Results of Corrections of Unit Productivity Factors                                        | 16 |
| 6. | Investigation of Calculation Equation of Management Data<br>for Dismantling of Feedwater Heater | 17 |
|    | 6.1. Study on Evaluation Method for Dismantling of Feedwater Heater                             | 17 |
|    | 6.2. Calculation Equation of Management Data                                                    | 17 |
|    | 6.3. Results of Investigation of Calculation Equation<br>for Dismantling of Feedwater Heater    | 20 |
| 7. | Conclusions                                                                                     | 21 |
|    | Acknowledgement                                                                                 | 21 |
|    | References                                                                                      | 22 |
|    | Appendix: Detail of Calculation Equation for “Preparation/Installation of Hanger”               | 41 |

図表リスト

表リスト

- 表 1. 準備・後処理工程の人工数の計算に使用した単位作業係数
- 表 2. 解体工程の人工数の計算に使用した単位作業係数
- 表 3. 第 3・4 給水加熱器室の機器物量データ
- 表 4. 機器撤去に掛かる作業員の人工数の実績データと  
既存の評価式による計算結果-1 との比較

## 図リスト

- 図 1. 第 3・4 給水加熱器室およびタービン発電機室
- 図 2. 機器解体作業フロー
- 図 3. 第 3・4 給水加熱器室の機器撤去に要した作業員人工数の割合
- 図 4. 機器の数量割合
- 図 5. 機器の重量割合
- 図 6. 機器重量の度数分布
- 図 7. 機器撤去作業フローより作成した WBS
- 図 8. 機器撤去に掛かる作業工程毎の作業員人工数（計算結果-1）と実績データとの比較
- 図 9. 準備工程に掛かる作業員人工数の比較
- 図 10. 解体工程に掛かる作業員人工数の比較（計算結果-1）
- 図 11. 後処理工程に掛かる作業員人工数の比較
- 図 12. JPDR と「ふげん」での「空調機の撤去」に掛かる人工数比較
- 図 13. JPDR と「ふげん」での「保温材の撤去」に掛かる人工数比較
- 図 14. JPDR と「ふげん」での「配管の撤去」に掛かる人工数比較
- 図 15. JPDR と「ふげん」での「タンクの撤去」に掛かる人工数比較
- 図 16. JPDR と「ふげん」での「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数比較
- 図 17. JPDR と「ふげん」での「コンクリート基礎の撤去」に掛かる人工数比較
- 図 18. 単位作業係数の補正による解体工程における作業員の人工数の計算結果の比較
- 図 19. JPDR と「ふげん」での「給水加熱器の撤去」に係る作業
- 図 20. 「ふげん」での「給水加熱器の撤去」の作業フロー
- 図 21. 「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数と切断片数との関係
- 図 22. 「給水加熱器の撤去」の WBS
- 図 23. タンクおよび給水加熱器の体積と重量との関係
- 図 24. タービン建屋で行われた「開口部閉止」に掛かる人工数と機器重量との関係
- 図 25. 「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数計算結果
- 図 26. JPDR と「ふげん」の「給水加熱器の撤去」に掛かる機器重量と人工数の実績データと切断数を考慮した評価モデルによる評価結果
- 図 27. 各機器の撤去に必要な人工数計算結果（計算結果-3）
- 図 A.1. 第 3・4 給水加熱器の撤去の概要
- 図 A.2. 使用した吊ピース数と「吊ピースの加工・取り付け」に要した作業員人工数



## 1. 緒言

現在，日本原子力研究開発機構（以下，機構）では，“中期目標を達成するための計画”<sup>1-2)</sup>における“自らの原子力施設の廃止措置及び放射性廃棄物の処理・処分に係る技術開発”に基づいて，以下に示す様に各種原子力施設の廃止措置に必要な技術の開発を進めている．

第 1 期中期計画（2005,10,1～2010,3,31）においては，廃止措置およびその準備に係る作業において，各種データを取得すると共に，それらを基に合理的な廃止措置を行うための廃止措置エンジニアリングシステム（DENESYS）の構築を進める．

第 2 期中期計画（2010,4,1～2016,3,31）においては，廃止措置エンジニアリングシステムを本格運用し，廃止措置計画立案に適用すると共に，廃止措置に係る各種データを収集し，大型炉の原子炉周辺設備の評価モデルを 2014 年度までに整備する．

そこで，機構では DENESYS の一部として，COSMARD コードの考え方をベースとした核燃料取り扱い施設を含めた原子力施設の廃止措置における管理データを評価する PRODIA コードの開発を進めている．COSMARD コード<sup>3-6)</sup>とは，原子炉施設の解体作業時の管理データを評価するために旧日本原子力研究所で開発された計算コードである．現在，PRODIA コードを用いた管理データの計算精度の向上のために，年度毎の作業計画や詳細な作業要領を下に実際の解体作業の管理データ評価を実施前に行い，解体作業を通じて収集した実績データの分析結果との比較を行っている．この結果は，その後の作業計画の策定の際に，作業範囲や作業量，そして作業手順が適切であるかの判断に利用される．

現在 PRODIA コードで使用している既存の評価モデル，並びにそれに用いる単位作業係数は，比較的小規模な原子炉である JPDR の解体における作業手順および実績データを中心に作られている．このため，将来行われる大規模な商業用原子炉の廃止措置に係る管理データの評価には，中規模な原子炉であるふげん発電所（以下，「ふげん」）の解体で得られる実績データの分析および評価が重要になる．2008 年に開始した「ふげん」の解体は，商業用規模の原子炉としては国内で 2 番目のケースであり，その実施により得られる経験やそれに伴い実施される技術開発は商業用原子炉の廃止措置に有用である．

本研究の目的は，PRODIA コードを用いた「ふげん」の解体作業計画の評価および既存の評価モデルの「ふげん」への適用性の検討を行い，「ふげん」の解体に最適な評価モデル（「ふげん」モデル）を構築することにある．その第 1 歩として，2008 年度に「ふげん」で行われたタービン建屋内第 3・4 給水加熱器室の機器撤去に掛かる解体工程の管理データを評価した．また，第 3・4 給水加熱器の機器撤去の管理データの計算結果と実績データとの比較を行い，給水加熱器の解体に掛かる人工数を計算するための評価モデルの検討結果を報告する．

This is a blank page.

## 2. 「ふげん」廃止措置プロジェクトの概要

### 2.1. プロジェクトの概要

「ふげん」は、1979年から運転を始め（熱出力：557 MWt、電気出力：165 MWe）、2003年の運転終了（運転時間：130,000 時間）までの間に 21 TWh の電力を生産した。その後、「ふげん」は原子炉施設の廃止措置に向けた準備として廃止措置計画の策定や技術開発などを進めると共に、原子炉等規制法の改正に基づき 2005 年に廃止措置計画の認可申請を行い、2008 年に許可を得て施設の解体作業と原子炉施設の廃止措置に係る研究開発を行うことになった。

「ふげん」廃止措置プロジェクトは以下の 4 段階に分けて実施し、2028 年までに完了する予定となっている。

- i) 使用済燃料搬出：使用済燃料および減速材である重水の撤去・搬出、並びに使用済燃料の保管に係る安全機能を維持し、その機能に影響を与えない範囲内での放射能レベルの低いあるいは汚染のない施設・設備の解体撤去を行う。この期間の解体撤去作業は、在来工法により行われる。
- ii) 原子炉周辺設備解体撤去：使用済燃料の搬出の完了に伴い不要となった放射能レベルの低い施設・設備、および原子炉領域の解体作業に使用する遠隔操作装置の設置に干渉する設備・機器の解体撤去を行う。この期間の解体撤去作業は、在来工法により行われる。
- iii) 原子炉本体解体撤去：放射能レベルの比較的高い原子炉領域の解体撤去、および汚染した全ての設備・機器の解体撤去と建屋・構造物の除染を行い、管理区域を解除する。この期間の原子炉領域での解体撤去作業は、主に遠隔操作装置により行われる。
- iv) 建屋解体：建屋等の全ての解体を行う。

### 2.2. 第 3・4 給水加熱器室の機器撤去

#### (1) 機器撤去作業の概要

2008 年度に行われた解体撤去作業の 1 つにタービン建屋地下 2 階にある第 3・4 給水加熱器室の機器撤去がある。機器撤去作業では、図 1 に示す様に第 3・4 給水加熱器室（約 650 m<sup>2</sup>）の 74% にグリーンハウスを設置し、残りの 26%（約 150 m<sup>2</sup>）に資材等の仮置き場を設置すると共に、復水器搬入ピット内にも解体撤去を行った機器等の仮置き場を設けた。第 3・4 給水加熱器室の機器撤去の主要な作業項目は以下に示すものであった。図 2 に機器解体作業のフローを示す。

- 1) 準備工程：作業手順の確認、作業員の教育などを行った後に第 3・4 給水加熱器

室でのグリーンハウスおよび足場、復水器搬入ピットでの仮置き場設置。

2) 解体工程：

- 2-1) 電気・計装品の撤去：電源の停止措置，電気・計装品の撤去，および解体撤去物の運搬。
  - 2-2) 保温材の撤去：撤去準備，外装の撤去，保温材の撤去，および解体撤去物の運搬。
  - 2-3) 配管・サポートの撤去：撤去準備，配管の撤去，サポートの撤去，および解体撤去物の運搬。
  - 2-4) 湿分分離タンクの撤去：撤去準備，解体・撤去，および解体撤去物の運搬。
  - 2-5) 第 4 給水加熱器の撤去：吊りピース設置などの撤去準備，給水加熱器の切断，および解体撤去物の運搬。
  - 2-6) 第 3 給水加熱器の撤去：吊りピース設置などの撤去準備，給水加熱器の切断，および解体撤去物の運搬。
  - 2-7) コンクリート基礎の撤去：撤去準備，給水加熱器のコンクリート基礎撤去，床面補修，および解体撤去物の運搬。
- 3) 後処理工程：グリーンハウスからの資材等の搬出，グリーンハウス撤去，清掃，および片付け後の終了確認。

(2) 実績データの分析

第 3・4 給水加熱器室の機器撤去作業では，監督員，作業員および放管員のクルー構成は作業項目により 0:1:0～1:17:0 で変動していたが，平均すると 2.6:7.5:1 であった．このため，本報告では以後作業員の人工数のみにについて言及する．

図 3 に第 3・4 給水加熱器室の機器撤去に掛かった作業員の実績データを，準備工程，解体工程，および後処理工程に分けて示す．なお，本報告では，準備工程，解体工程，後処理工程の全工程で要した作業員人工数の実績データで規格化したものを用いる．

実績データを分析すると，準備工程では「足場設置」，「解体準備」，「付属設備設置」，「吊ピース加工・取り付け」，「仮置き場増設」，「グリーンハウス設置」，「作業領域養生」，「資材等搬入」，および「設備停止措置」の作業項目で構成されており，全工程の人工数の 26%を占めた．図 3 に示す作業項目の中で，「解体準備」は，「作業領域調査」および「解体範囲設定」の 2 つの単位作業項目（以後，単位作業項目を斜体に下線を加えて示す）に対応し，同様に，「資材等搬入」は「資材機器搬入」および「収納容器搬入」の 2 つの単位作業項目が対応している．準備工程では，「解体準備」，「吊ピース加工・取り付け」，および「グリーンハウス設置」に掛かる人工数が特に多く，これらの作業項目で準備工程の 72%（全工程の 18%）を占めていた．

解体工程は全工程の 64%の作業員人工数を要しており，「電気・計装品の撤去」，「保温材の撤去」，「配管・サポートの撤去」，「第 3 給水加熱器の撤去」，「第 4 給水加熱器の撤去」，「コンクリート基礎の撤去」および「湿分分離タンクの撤去」の作業項目で構成されていた．「電気・計装品の撤去」は「空調機の撤去」および「検出器の撤去」の 2 つの単位作業項目で構成されており，同

様に「配管・サポートの撤去」は、「配管の撤去」および「サポートの撤去」の2つの単位作業項目から構成されていた。解体工程に掛かる人工数の内、その65%（全工程の42%）が「配管・サポートの撤去」に掛かる人工数であった。

後処理工程に掛かった作業員の人工数は、図3に示す様に全工程の10%を占めていた。後処理工程を構成している作業項目は、「グリーンハウス撤去」、「資材等搬出」、「片付け整理」および「廃棄物搬出」であり、「資材等搬出」は「資材機器搬出」および「解体用機器搬出」の2つの単位作業項目に対応している。後処理工程の51%（全工程の5%）が「片付け整理」に掛かる人工数であった。

This is a blank page.

### 3. 管理データ評価システムの概要

#### 3.1. PRODIA コードの概要

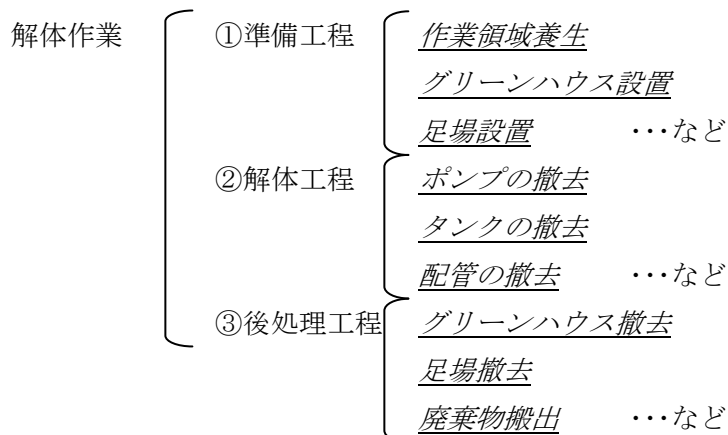
PRODIA コード (Project Management Data Evaluation Code for Dismantling Activities)は、解体作業で得られた実績データを基に単位作業項目毎の評価式を求め、その評価式および機器・構造物の重量などを用いることにより、単位作業項目に掛かる人工数などを計算する。

PRODIA コードでは原子炉施設解体の管理データ<sup>5)</sup>を評価するコード：COSMARD コード<sup>3)</sup>の考え方に基づいて、原子力施設の解体作業における作業手順やその条件などを入力データとし、単位作業項目毎の管理データ（作業人工数、被ばく量および廃棄物発生量）を計算し、作業手順に沿って管理データを積算し出力データとして得ることができる。管理データをより精度高く評価するには、実際の作業手順を忠実に再現した作業項目の階層構造（WBS：Work Breakdown Structure）およびそれに基づいた人工数を算出するための評価式が重要である。ここでは、WBSと評価式のことを評価モデルと定義する。また、最適な評価モデルの構築には、実際の解体作業から得られた実績データに基づく単位作業係数の整備が重要である。

#### 3.2. 解体作業の WBS

一般的な解体作業の WBS は、①準備工程、②解体工程および③後処理工程の3つから構成される。①準備工程には「グリーンハウス設置」や「作業領域養生」などの単位作業項目が存在している。②解体工程は、「ポンプの撤去」、「タンクの撤去」などの機器毎の解体に関する単位作業項目が存在している。また、③後処理工程についても同様に、「グリーンハウス撤去」などの幾つかの単位作業項目が存在している。①～③の各工程を組み合わせることによって、解体作業全体の WBS が表される。PRODIA コードでは WBS の最下位の階層の作業項目（単位作業項目）毎に人工数を計算し、それを上位の階層に向かって積み上げ、各階層での作業項目に掛かる人工数などを計算する。

各工程での主な作業項目は以下のとおりである：



### 3.3. 人工数の評価式

PRODIA コードで使用している人工数の評価式は、JPDR の実績データから以下の様に求められている<sup>7)</sup>。

#### 1) 準備・後処理工程の人工数の評価式

準備・後処理工程において人工数： $Y$ （人・時）を算出するための評価式は、作業の種類及び面積を指標とし、作業レベルに応じた以下の定数式である。

$$Y = a_{wi} \quad \cdots(3-1)$$

ここで、 $a_{wi}$  は作業の種類： $w$  と作業レベル： $i$  に応じた単位作業係数で、その指標は人・時である。また、作業レベルは面積範囲に応じて、たとえば、単位作業項目「設備停止措置」ではレベル 1：～30 m<sup>2</sup>，レベル 2：30～50 m<sup>2</sup>，およびレベル 3：50 m<sup>2</sup>～の 3 段階に分かれている。

#### 2) 解体工程の人工数の評価式

解体工程において人工数： $Y$ （人・時）を算出するための評価式は、機器の種類およびその重量を指標とし、機器重量： $m_e$ （ton）に応じた以下の一次式である。

$$Y = a_e \times m_e \quad \cdots(3-2)$$

ここで、 $a_e$  は機器の種類（機器種別）に依存した単位作業係数で、その指標は人・時/ton である。

これら単位作業係数のうち、本報告で行った在来工法での準備・後処理工程および解体工程での管理データ評価に使用した単位作業係数を表 1 および 2 に示す。これらの単位作業係数は、JPDR の解体作業で得られた実績データを分析したものであり、クルー構成比率（監督、作業員、放管員）を 1:5:1 としたものである。したがって、作業員だけの人工数を求める場合には、この単位作業係数に作業員の構成比率（5/7）を掛けたものが用いられる。



#### 4. 第3・4 給水加熱器室の機器撤去に掛かる管理データの評価

第3・4 給水加熱器室の機器撤去に掛かる管理データの評価に関する計算範囲, 計算対象, WBS および計算条件を以下に示す.

##### 4.1. 計算範囲および対象

管理データの計算範囲および対象は以下の通りである.

- ・ 計算範囲 :

第3・4 給水加熱器室 (タービン建屋, 地下2階, 床面積 *ca.* 650 m<sup>2</sup>),  
復水器搬入ピット (タービン建屋, 地下2階, 床面積 *ca.* 270 m<sup>2</sup>),  
タービン発電機室 (タービン建屋, 1階, 床面積 *ca.* 2,080 m<sup>2</sup>).

- ・ 計算対象 :

|                |        |                       |
|----------------|--------|-----------------------|
| 第3・4 給水加熱器室の機器 | 機器重量 : | <i>ca.</i> 132.3 ton, |
|                | 機器数 :  | 108 件,                |
| 作業員の人工数.       |        |                       |

図1に計算範囲であるタービン建屋地下2階の第3・4 給水加熱器室, 復水器搬入ピットおよび解体撤去物の保管場所のあるタービン建屋1階のタービン発電機室の平面図を示し, 表3, 図4, 5 および 6 に第3・4 給水加熱器室の機器物量データ, 機器重量割合, および機器重量の度数分布を示す. 計算対象とした機器数は108件であり, その重量は約132.3 ton である. また, 機器重量のうち全体の45%が給水加熱器で占められており, 機器数の53%を占めている配管類 (配管および弁) は全重量の34% (45.5 ton) を占めていた. 図6に示す様に, 機器重量の度数分布は100~500 kg の配管類, 架台および保温材が多く, 全体の42%近くを占めており (うち配管類: 16%, 架台 (ハンガ等): 19%, 保温材: 7%), また, 25 kg 以下の配管類 (弁) も全体の30%程度を占めていた.

##### 4.2. WBS

図2に示している解体作業フローより作成したWBSを図7に示す. 準備工程のWBSは, 作業エリア設置と仮置き場増設の作業項目を分けてある. 復水器搬入ピット内に増設した仮置き場はグリーンハウス設置と同様にコーナーに骨組みを用いてビニールシートにより壁を設置した構造となっている. ただし, グリーンハウスの様な天井へのビニールシートの設置は行っていない. この作業は単位作業項目「グリーンハウス設置」で代替している. また, 作業領域全体に対する準備作業のほかに, 各機器の撤去の前後で「解体範囲設定」や「資材機器搬入」および「廃棄物

搬出」などを個別の機器撤去準備および機器撤去後処理として評価している。

#### 4.3. 計算条件

管理データ評価は、以下に示す計算条件で行った。

仮置き場面積（5 箇所）：

ca. 48 m<sup>2</sup> (ca. 12 m<sup>2</sup> x 4 箇所) …復水器搬入ピット (ca. 270 m<sup>2</sup>)

ca. 150 m<sup>2</sup> …第 3・4 給水加熱器室 (ca. 650 m<sup>2</sup>)

グリーンハウス面積（1 箇所）：

ca. 480 m<sup>2</sup> …第 3・4 給水加熱器室

足場面積：

ca. 100 m<sup>2</sup> …第 3・4 給水加熱器室

解体撤去物の保管場所（1 箇所）：

ca. 200 m<sup>2</sup> …タービン発電機室。

準備工程および後処理工程における人工数の算出には、評価式(3-1)および表 1 に示している単位作業係数： $a_{wi}$  を使用し、解体工程の人工数の算出には評価式(3-2)および表 2 の単位作業係数： $a_e$  を用いた。

準備工程および後処理工程うち、作業領域全体に対する準備・後処理工程、ならびに電気・計装品、配管・サポートおよび保温材の撤去の前後にある機器撤去準備および機器撤去後処理での単位作業係数： $a_{wi}$  は、エリア面積、仮置き場面積およびグリーンハウス面積を考慮し、表 1 に示すレベル 3 である 50 m<sup>2</sup> 以上の場合のものを使用した。給水加熱器は、その大きさが 17 m×1.3 m (第 3 給水加熱器)、15m×1.3 m (第 4 給水加熱器) ある。そこで、給水加熱器および湿分分離タンク、コンクリート基礎の撤去の前後にある機器撤去準備および機器撤去後処理での単位作業係数： $a_{wi}$  は、これら機器の投影面積および作業スペースを考慮して、レベル 2：30～50 m<sup>2</sup> の領域内での作業とした。また、作業項目のうち、「吊ピース加工・取り付け」に関しては、現在、評価式が装備されていないため、管理データ評価では実績データを定数項 (30.7 人・時/個) として用いた。一方、保温材およびコンクリート基礎の物量はデータベースに含まれていなかったため、実績データより得たそれぞれの廃棄物量を解体撤去物の物量として用いた。

「湿分分離タンクの撤去」に掛かる人工数の評価では、胴体部の大まかな切断（以後、粗断）をした後の移設（以後、仮置き）により撤去が行われたので、表 2 にある粗断による撤去の単位作業係数： $a_e$  を使用した。

#### 4.4. 管理データの計算結果

既存の評価式を用いた第 3・4 給水加熱器室の機器撤去に掛かる人工数の計算結果を計算結果

-1 とし、計算結果-1 と実績データの作業工程ごとの作業員の人工数を図 8 に示す。また、各作業工程を構成している作業項目毎に分類したものを図 9～11 にまとめる。なお、作業項目「解体準備」、「資材等搬入」、「電気・計装品の撤去」、「配管・サポートの撤去」および「資材等搬出」に関しては、実績データの分析において、これら構成している単位作業項目「解体範囲設定」、「作業領域調査」、「資材機器搬入」、「収納容器搬入」、「空調機の撤去」、「検出器の撤去」、「配管の撤去」、「サポートの撤去」、「資材機器搬出」および「解体用機器搬出」を分離することが困難であったため、管理データの計算結果をそれぞれ合計した。計算結果-1 は、全工程の実績データの 70%となった。

作業項目毎に計算結果と実績データとを比較すると以下のとおりになる：

#### (1) 準備工程

計算結果-1 は実績データの 59%の人工数を示した。準備工程では、作業項目のうち「解体準備」、「グリーンハウス設置」において計算結果と実績データに大きな差が生じた。

#### (2) 解体工程

計算結果-1 は、実績データの 78%の人工数を示した。解体工程全体では、「保温材の撤去」を除いた作業項目で計算結果-1 と実績データとの間に大きな差を確認した。解体工程に掛かる人工数を機器毎に実績データと比較したものを図 10 に示す。計算結果-1 は実績データの 78%程度の人工数を示し、準備・後処理工程の場合と比較して実績データに近い計算結果となっているが、機器ごとに実績データと比較すると以下の様に必ずしも良好な結果とは言えなかった。

「電気・計装品の撤去」に掛かる人工数は実績データの 13%であった。また、「配管・サポートの撤去」に掛かる人工数も同様に実績データよりも少なく、49%であった。一方、「湿水分離タンクの撤去」に掛かる人工数は実績データよりも多く、283%を示した。「配管・サポートの撤去」に掛かる人工数は、解体工程全体に掛かる人工数の 65%を占めているので、その影響は大きい。「保温材の撤去」および「コンクリート基礎の撤去」に掛かる人工数を実際の解体より発生した廃棄物量から計算した。「保温材の撤去」は実績データとよい一致を示したが「コンクリート基礎の撤去」に関しては実績データよりも少なかった。2 つの「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数は実績データと比べて大きく異なっていた（第 3 給水加熱器：183%，第 4 給水加熱器：329%）。

#### (3) 後処理工程

計算結果-1 は実績データの 73%の人工数を示した。後処理工程では、「片付け整理」において、実績データとの間に大きな差が生じた。

This is a blank page.

## 5. 解体工程の管理データ評価の結果に対する考察

4.4 に述べた様に、既存の評価式による人工数の計算結果では、「ふげん」で行われた第 3・4 給水加熱器室の機器撤去に掛かる人工数を全ての工程において再現できない。準備工程および後処理工程に掛かる人工数の結果の考察に関しては別途報告しているので、本報告では解体工程についての考察を進める。管理データ評価に影響を及ぼすパラメータの検討の方法の 1 つとして、単位作業係数の補正が考えられる。単位作業係数の補正の必要性を考慮するために、以降では、JPDR の解体で得られた実績データと「ふげん」で得られた実績データを比較し、単位作業係数の補正の妥当性について検討した。

### 5.1. JPDR 解体実績データとの比較

#### (1) 「電気・計装品の撤去」

第 3・4 給水加熱器室の電気・計装品は、表 3 に示している様に空調機と検出器に分類されており、それぞれ 0.360 ton および 0.014 ton ある。空調機に分類される機器の重量が電気・計装品の大半を占めているので、「電気・計装品の撤去」に掛かる人工数の JPDR と「ふげん」での実績データの比較を「空調機の撤去」に掛かる人工数で比較する。「ふげん」での実績データと JPDR でのそれ<sup>7)</sup>とを比較した結果、図 12 の様になった。既存の評価式では「ふげん」での実績データよりも少ない人工数を示していた。図 12 の「空調機の撤去」に掛かる人工数と機器重量との関係を、①JPDR での実績データだけで行った場合と、②「ふげん」での実績データも踏まえた場合で評価したところ、①の場合の単位作業係数は  $24.4 \pm 4.4$  (人・時/ton) であり、②では  $24.7 \pm 4.5$  (人・時/ton) とほぼ同じ結果を示した。ここで、誤差範囲は回帰分析により得た標準誤差 (SE) であり、 $\pm 1SE$  で示してある。「空調機の撤去」に掛かる人工数評価では、JPDR での「空調機の撤去」に係る手順などについて再調査が必要である。

#### (2) 「保温材の撤去」

第 3・4 給水加熱器室での「保温材の撤去」に掛かる人工数の実績データと JPDR でのそれとの比較結果は図 13 の様になる。「保温材の撤去」に関しては JPDR での実績データと高い相関を示している。JPDR の解体実績データとの比較でも、①JPDR の実績データだけの場合の単位作業係数は  $74.0 \pm 5.6$  (人・時/ton) であり、②「ふげん」での実績データを含めた場合には  $68.1 \pm 2.7$  (人・時/ton) になった。誤差範囲を考慮すると両者の間には差が無い。また、「ふげん」での実績データを含めた方が誤差範囲は小さくなる。今後「ふげん」で得られるデータを踏まえることで更に精度の高い単位作業係数が求められると期待できる。

## (3)「配管の撤去」

図 14 には、JPDR での「配管の撤去」に掛かる人工数と機器重量との関係を示している。JPDR での一般的な配管の撤去到に掛かる実績データは、「一般部」と「狭隘部」の 2 種類が存在している。JPDR での実績データと「ふげん」での実績データを比較した。ただし、(i)「ふげん」での「配管・サポートの撤去」に掛かる人工数を「配管の撤去」と「サポートの撤去」に分けることが出来なかつた、(ii)表 5 に示す様に、「配管の撤去」と「サポートの撤去」の単位作業係数はそれぞれ 38.9 (人・時/ton) および 35.0 (人・時/ton) と 1 割程度しか差が無いので、「ふげん」での実績データを人工数・機器重量ともに配管とサポートの合計値で示した。図 14 に示している JPDR と「ふげん」での実績データを比較すると、「ふげん」での作業は「一般部」での作業の場合、①JPDR での実績データだけの場合では  $26.5 \pm 1.4$  (人・時/ton) であるが、②の「ふげん」の実績データも含めた場合には  $36.6 \pm 2.3$  (人・時/ton) と誤差範囲を超えて単位作業係数は増加した。一方、JPDR での「狭隘部」での作業の実績データと比較すると、①の場合  $45.5 \pm 3.4$  (人・時/ton) であり、②の場合でも  $49.0 \pm 2.6$  (人・時/ton) になり誤差範囲で一致している。このことより、第 3・4 給水加熱器室での作業が JPDR の「狭隘部」での作業性に匹敵するが、難易度の違いであるかは今後「ふげん」で得られるデータによる分析が必要である。

## (4)「湿分分離タンクの撤去」

「湿分分離タンクの撤去」に関しても、同様に JPDR での解体実績との比較を行った。図 15 に示す様に、JPDR で行われた「タンクの撤去」に掛かる人工数は大きなバラツキがある。「タンクの撤去」の粗断・仮置き単位作業係数を用いた結果でも第 3・4 給水加熱器室での解体実績よりも多い結果を示していたが、図 15 に示している JPDR の解体実績との比較の結果、この差はバラツキの範囲内であると思われる。これまでの機器と同様に JPDR での実績データとの比較を行うと、①JPDR での実績データだけを用いた場合、単位作業係数は  $13.1 \pm 0.5$  (人・時/ton) であり、②「ふげん」での実績データを含めても単位作業係数は  $13.0 \pm 0.6$  (人・時/ton) とほぼ変化が無い。今後の「ふげん」で行われる実績データの蓄積により、精度の向上が期待できる。

## (5)「給水加熱器の撤去」

「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数の実績データと JPDR での解体実績との比較を行った結果を図 16 に示す。図 16 より、「給水加熱器の撤去」に関しては、データのばらつきなどを考慮しても有意の差が確認できる。また、「ふげん」での「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数は、JPDR の場合と比べて、機器重量との間の相関性が低い。

## (6)「コンクリート基礎の撤去」

「コンクリート基礎の撤去」に関しては図 17 の様になった。①JPDR での「コンクリート基

「礎の撤去」の撤去に掛かる人工数と機器重量との関係より、単位作業係数は  $10.9 \pm 1.1$  (人・時/ton) である。「ふげん」での「コンクリート基礎の撤去」に掛かる人工数は、JPDR での実績データとの間に良い相関を示さなかった。これまでと同様に JPDR での実績データに②「ふげん」での実績データを含めて評価すると、「コンクリート基礎の撤去」の単位作業係数は、 $18.3 \pm 3.4$  (人・時/ton) と誤差範囲を超えて増加した。JPDR 解体の実績データの分析結果によると、JPDR での「コンクリート基礎の撤去」は、大まかな塊のまま処分している<sup>7)</sup>のに対して、「ふげん」ではコンクリートを中にある鉄筋とコンクリートに分け、かつ、コンクリートは細かく砕いて土のう袋に収納している。この差が JPDR と「ふげん」での傾向の原因であると考えられる。

## 5.2. 単位作業係数の補正による検討

4.4 に述べた様に、機器の解体工程に掛かる人工数計算結果も実績データとの間に差を見せた。解体対象機器のうち、「ふげん」での「配管の撤去」に掛かる人工数は、図 14 に示す様に JPDR での「狭隘部」での作業に匹敵することを確認した。このため、それを支持している「サポートの撤去」も同様であることが想像できる。また、「電気・計装品の撤去」に関しても「配管の撤去」および「サポートの撤去」と同様であると推測した。

PRODIA コードでは、作業スペースが「狭隘」な場合や天井部などの「高所」での作業による作業効率の変化に対して、単位作業係数の補正による対応が出来る。補正を考慮に入れた場合、単位作業係数は以下の式、

$$\begin{aligned} \text{補正後の単位作業係数} &= \text{標準的な単位作業係数} \times (1 + \sum (C(i) \times W_{cr}(i))) \quad \cdots(5-1) \\ C(i) &: \text{補正の有無 (0: 無, 1: 有)} \\ W_{cr}(i) &: \text{補正係数} \end{aligned}$$

になる<sup>5)</sup>。ここで、「狭隘部」による補正係数は 0.5 である。「電気・計装品の撤去」および「配管・サポートの撤去」に掛かる人工数評価に単位作業係数の補正を行い、再計算を行った。電気・計装品および配管・サポートは共に天井部に集中しており、図 1 に示す足場を設置した「高所」での作業になる。また、給水加熱器と天井との間での「狭隘部」での作業も含まれる。このため、単位作業係数に「高所」および「狭隘部」の補正を行った。「高所」による補正係数も 0.5 であるので、「電気・計装品の撤去」および「配管・サポートの撤去」での補正後の単位作業係数は、(5-1)式より、

$$\begin{aligned} \text{補正後の単位作業係数} &= \text{標準的な単位作業係数} \times (1 + (0.5 + 0.5)) \\ &= 2 \times \text{標準的な単位作業係数} \quad \cdots(5-2) \end{aligned}$$

になる。

「高所・狭隘部」での作業による補正を施すことにより、「電気・計装品の撤去」に掛かる人工

数は改善された。しかし、実績データとの差はまだ大きい。これに関しては先述の通り、JPDR の実績データにバラツキがあるため、今後の「ふげん」での実績データの蓄積が重要になる。「配管・サポートの撤去」に掛かる人工数は補正の結果実績データとの差に大幅な改善を示した。

### 5.3. 単位作業係数の補正による計算結果

計算結果-1 に対して、「電気・計装品の撤去」および「配管・サポートの撤去」に掛かる人工数の計算に単位作業係数の補正を行った結果を用いたものを計算結果-2 とし、結果をまとめると図 18 になる。各作業項目の計算結果と実績データとを比較すると、以下の通りになる：

- 電気・計装品の撤去： 計算結果-2 は実績データの 27%の人工数を示し、計算結果-1 よりもその差は改善された。
- 保温材の撤去： 計算結果-2 は計算結果-1 と同じである。
- 配管・サポートの撤去： 計算結果-2 は実績データの 97%の人工数を示し、良い一致を示した。
- 湿分分離タンクの撤去： 計算結果-2 は計算結果-1 と同じである。
- 第 3 給水加熱器の撤去： 計算結果-2 は計算結果-1 と同じである。
- 第 4 給水加熱器の撤去： 計算結果-2 は計算結果-1 と同じである。
- コンクリート基礎の撤去： 計算結果-2 は計算結果-1 と同じである。

単位作業係数の補正により「電気・計装品の撤去」および「配管・サポートの撤去」に掛かる人工数に改善が見られた。これにより解体工程の人工数の計算結果と実績データとの差は大きく改善されたが、「給水加熱器の撤去」に関しては、「ふげん」での 2 つの給水加熱器の間でも大きく人工数が異なっているため、現在使用している評価モデルではなく、新たな評価モデルの構築を検討する必要がある。



## 6. 「給水加熱器の撤去」の評価式の検討

### 6.1. 人工数の評価方法の検討

前章で述べた様に、既存の評価式を用いた「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数の計算結果は実績データよりも多くなった。また、図 16 に示す様に、「ふげん」での「給水加熱器の撤去」に掛かった人工数の実績データは、機器重量との相関が低い。その原因は、機器重量は第 3 給水加熱器、第 4 給水加熱器ともに 30 ton 程度であるのに対して、「第 3 給水加熱器の撤去」に掛かる人工数が「第 4 給水加熱器の撤去」に掛かる人工数の約 2 倍を示しているためである。本節では、既存の評価式による計算結果と「ふげん」での実績データとの差、および「ふげん」での 2 つの「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数の差の原因について検討を行った。

図 19 に、JPDR と「ふげん」での「給水加熱器の撤去」に係る作業の違いを示す。JPDR では「給水加熱器の撤去」に粗断を行ってそれらを細かく切断（細断）し、収納容器へ収納後に撤去・保管を行っている。一方、「ふげん」での「給水加熱器の撤去」の実際の作業項目は、粗断・仮置きと、JPDR での熱交換器等の作業項目（粗断・細断・収納）に比べて簡略化している。これが「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数の既存の評価式を用いた計算結果と「ふげん」での実績データとの差の原因であると思われる。

「ふげん」での「給水加熱器の撤去」フローを詳細に示したものが図 20 である。「ふげん」での「給水加熱器の撤去」作業は、①仮置き架台設置などの「切断準備」、②給水加熱器の外殻切断および伝熱管切断（以下、粗断）および切断部閉止などの「切断・閉止」、および③切断片の仮置き場へ移設するための床養生（鉄板）、撤去準備および撤去の「仮置き」の 3 段階で構成されている。第 3 給水加熱器、第 4 給水加熱器の重量は共に 30 ton 程度であるが、第 3 給水加熱器は図 20 に示す様に切断数が 2 回であるのに対して、第 4 給水加熱器の切断数は 1 回しかない。「第 3 給水加熱器の撤去」では切断数の増加に伴い、発生した切断片の処理に関する作業項目（「切断・閉止」2 回目および中部「仮置き」）が「第 4 給水加熱器の撤去」の場合より増加している。図 16 に示す様に機器重量との間に高い相関を示さなかった「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数は、図 21 に示す様に発生した切断片数との間に高い相関を示した。これより、切断数の増加に伴う切断片の処理に関する作業項目の増加が、「ふげん」での 2 つの「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数の差の原因であると考えられるが、既存の評価式は(3-2)式に示す様に、人工数は機器重量にのみ依存するため、これを再現できない。

### 6.2. 人工数の評価式

前節では、ほぼ同じ重量の 2 つの「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数の実績データが機器重量ではなく切断片数との間に高い相関を示していること、この原因として図 20 に示す発生した切断片の処理のための作業項目の数の増加が原因であることを述べた。また、図 21 には、既存の

評価式を用いた 30 ton の「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数評価を行った結果も示す。図 21 に示す「ふげん」での「給水加熱器の撤去」の実績データから得た相関式と既存の評価式より求めた人工数は切断片数が 5～6 のところで交差する。このことは、図 20 に示す作業では、粗断・仮置きしか行っていないにもかかわらず 5～6 個の切断片を発生・処理しただけで JPDR での「給水加熱器の撤去」の様に粗断・細断・収納まで行ったときの人工数を上回ってしまい、その後に細断・収納を行うことを考えると非常に効率が悪くなることを意味している。「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数は、既存の評価式ではその機器重量： $m_e$ 」にのみ依存するため、発生した切断片数との相関を示した「ふげん」の第 3・4 給水加熱器の撤去に対応できない。そこで、切断数： $n$ 」に対応した評価式を検討した。

新しい評価式を検討するために、図 20 に示す作業フローを基に「ふげん」での「給水加熱器の撤去」の WBS を構築した。構築した WBS を図 22 に示す。新しく構築する「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数の評価式はこの WBS に基づいており、以下にその各工程に掛かる人工数を計算する評価式を示す。

#### (1) 「切断準備」の評価式

図 22 に示す様に、「切断準備」は転倒防止用の「仮置き架台設置」および「コンクリート基礎のハツリ」で構成される。「仮置き架台設置」は既存の評価式の「解体機器設置」：L3, 20.43 (人・時)、で代替した。この作業に掛かる人工数は切断数に依存するとし、 $20.43 \times n$  (人・時) で求めた。

給水加熱器が設置されている「コンクリート基礎のハツリ」に掛かる人工数の評価には、既存の評価式の「壁除染」の単位作業係数を使用した場合を用いた。第 3 給水加熱器のコンクリート基礎の表面積は約  $6 \text{ m}^2$  であったので、これと既存の評価式の「壁除染」の単位作業係数：2.51 (人・時/ $\text{m}^2$ ) を用いることにより、 $2.51 \times 6 / 30.9 \times m_e = 0.49 \times m_e$  (人・時) で求めた。

「仮置き架台設置」および「コンクリート基礎のハツリ」に掛かる人工数より、「切断準備」に掛かる人工数： $Y_{\text{①}}$  (人・時) は、

$$Y_{\text{①}} = 20.43 \times n + 0.49 \times m_e \quad \cdots(6-1)$$

になる。

#### (2) 「切断・閉止」の評価式

図 22 に示す様に、「切断準備」の後、給水加熱器は「切断 (外殻側・伝熱管)」および切断によりできた「開口部閉止」による「切断・閉止」が行われる。給水加熱器の「切断」に掛かる人工数の評価には、タンクの粗断の単位作業係数を使用した。これは、1)タンクと給水加熱器は互いによく似た形状をしていること、2)タンクと異なる点は、給水加熱器の内部には伝熱管が存在していること、によるものである。ただし、図 23 に示すタンクと給水加熱器の重量と体積の関係<sup>7)</sup>

より、内部に伝熱管の存在している給水加熱器の単位体積当たりの重量はタンクのそれと比べて 10.3 倍程度大きい。このことは、同じ重量のタンクと給水加熱器を扱った場合、タンクの方が 10.3 倍程度体積の大きなものを扱う必要があることを意味しており、切断に掛かる人工数もそれに伴って増加することが推測される。よって、給水加熱器の切断の人工数に関してはタンクの粗断の単位作業係数を約 1/10.3 にしたもので評価した。以上より、切断に掛かる人工数を、機器重量と切断数より、 $13.64 \times 0.127 / 1.309 \times m_e \times n = 1.32 \times m_e \times n$  (人・時) とした。

「切断」を行った後に「開口部の閉止」を行うが、現在、既存の評価モデルの単位作業係数にはこの作業項目に関するものが含まれていない。そこで、JAERI Data/Code 98-010<sup>7)</sup>にある「開口部の閉止」に関する実績データから単位作業係数の導出を試みた。図 24 に「開口部の閉止」に掛かる人工数と機器重量との関係を示す。ただし、データの評価にはタービン建屋、特に領域を構成している機器が類似していると予測される給水ポンプ室および主復水器のデータのみを用いて評価した<sup>7)</sup>。図 24 から、「開口部閉止」の単位作業係数：1.17 (人・時/ton) を求め、これを使用し、 $1.17 \times m_e \times n$  (人・時) とした。

「切断」および「開口部の閉止」に掛かる人工数より、「切断・閉止」に掛かる人工数： $Y_2$  (人・時) は、

$$Y_2 = 1.32 \times m_e \times n + 1.17 \times m_e \times n = 2.49 \times m_e \times n \quad \cdots(6-2)$$

になる。

### (3) 「仮置き」の評価式

「切断」および「開口部閉止」が行われた給水加熱器は、「仮置き」が行われる。この作業の中で、鉄板を用いた「床養生」が行われる。この「床養生」に掛かる人工数評価は既存の評価式の「遮蔽板設置」の単位作業係数：25.00 (人・時) を用いた。ただし、遮蔽板には通常鉛が使用されており、鉄よりも比重が大きいために実際より多くの人工数が見積もられる可能性がある。そこで、この作業に掛かる人工数評価の際、通常の「遮蔽板設置」に掛かる単位作業係数に鉄・鉛の比重の比 (0.7) を考慮し、17.50 (人・時) とした。最後に、解体物の「仮置き場への移送」に掛かる人工数評価は仮置き架台の設置を「解体機器設置」としたのと同様に「解体機器撤去」：L3, 21.43 (人・時) の単位作業係数を用いて評価した。切断数を  $n$  とすると、発生する切断片は  $(n+1)$  になるので、「仮置き」に掛かる人工数： $Y_3$  (人・時) は以下の様になる。

$$Y_3 = 17.50 + 21.43 \times (n+1) = 21.43 \times n + 38.93 \quad \cdots(6-3)$$

(6-1)式、(6-2)式および(6-3)式を用いることで、機器重量と切断数を考慮に入れた粗断・仮置きに掛かる人工数： $Y$  (人・時) の評価式を以下の様にまとめることができる：

$$Y = Y_1 + Y_2 + Y_3$$

$$\begin{aligned}
 &= 20.43 \times n + 0.49 \times m_e + 2.49 \times m_e \times n + 21.43 \times n + 38.93 \\
 &= 0.49 \times m_e + 41.86 \times n + 2.49 \times m_e \times n + 38.93 \quad \cdots(6-4)
 \end{aligned}$$

(6-4)式を用いた計算結果では、「第3 給水加熱器の撤去」および「第4 給水加熱器の撤去」とともに実績データと良い一致（第3 給水加熱器：92%，第4 給水加熱器：102%）を示した。(6-4)式を用いた「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数の計算結果を実績データおよび既存の評価式を用いた場合とあわせて図 25 に示す。図 25 に示す新しく構築した評価式による計算結果は、第3 給水加熱器では粗断を2 回行ったために、「粗断2 回目」、「仮置き3 回目」の作業項目に掛かる人工数の部分が第4 給水加熱器に比べて増えており、第3・4 給水加熱器間での人工数の違いについても再現できている。

(6-4)式を用いた10～50 ton の給水加熱器の撤去で、粗断・仮置きを行った場合に掛かる人工数の計算結果を図 26 に示す。この評価式によると、切断数3 回以上の場合、機器重量によっては既存の評価式より得た人工数を超過しており、粗断・仮置きをするよりも JPDR での作業の様に粗断・細断・収納をその場で行った方が効率的であると分かる。

### 6.3. 「給水加熱器の撤去」の評価式の検討結果

計算結果-2 に加えて、6.2 節で行った2 つの「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数の計算結果を踏まえた解体工程全体に掛かる人工数を計算結果-3 とし、計算結果-3 と実績データとの比較を図 27 に示す。計算結果-3 では、解体工程に掛かる人工数は、実績データの90%を再現している。単位作業係数の補正や新しい評価式を用いていない図 10 と比較して、図 27 に示す計算結果-3 と実績データとの差が大きく改善されていることが確認できる。

計算結果-3 と実績データとの間に差があるものとして、「電気・計装品の撤去」、「湿分分離タンクの撤去」および「コンクリート基礎の撤去」の作業項目が挙げられる。これらのうち、「電気・計装品の撤去」および「湿分分離タンクの撤去」に掛かる人工数に関しては、5 章で行った JPDR 解体で得た実績データと「ふげん」での実績データとの比較より、機器重量と人工数との関係を①JPDR の実績データだけで評価した場合と②「ふげん」の実績データを含めた場合でほぼ同じであることを確認している。しかしながら、「コンクリート基礎の撤去」については、①と②では有意の差があるため、この項目については今後さらに検討していく必要がある。

## 7. 結言

平成 20 年度に行われた「ふげん」のタービン建屋・第 3・4 給水加熱器室の機器解体撤去の解体工程に掛かる人工数を既存の評価式を用いて計算し、以下の知見を得た：

1. 既存の評価式を用いた第 3・4 給水加熱器室の機器撤去に掛かる人工数の計算結果は、実績データの 70%の値を示した。
2. 計算結果と実績データとの間に大きな差を示す機器について、「ふげん」の実績データと JPDR でのそれとを比較した。比較結果を踏まえて、「電気・計装品の撤去」および「配管・サポートの撤去」をそれぞれ構成している「空調機の撤去」, 「検出器の撤去」, 「配管の撤去」および「サポートの撤去」の単位作業係数に関しては「高所」および「狭隘部」の作業スペースを考慮した補正を行った。単位作業係数の補正の結果、「電気・計装品の撤去」に掛かる人工数の計算結果は実績値の 27%となり、補正前の 13%から改善された。また、「配管・サポートの撤去」に掛かる人工数は単位作業係数の補正により実績データとの比が 49%から 97%へと改善された。
3. JPDR と「ふげん」の実績データとの比較で、特に顕著な差のあった「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数は、「ふげん」での 2 つの実績データ間でも 2 倍程度異なっていた。作業要領などの分析により、これらは①JPDR では、粗断・細断・収納が行われていたのに対して「ふげん」では粗断・仮置きで終わっている、②第 3 給水加熱器は 2 回切断されているのに対して、第 4 給水加熱器は 1 回しか切断されていない、ことが原因であると推測された。既存の評価式では、②の切断数に応じた人工数を再現することは難しい。
4. 給水加熱器の粗断・仮置きによる撤去に掛かる人工数の評価式を、機器重量と切断数との関数で構築した。新たに作成した評価式は、「ふげん」での 2 つの「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数を良く再現しており、「第 3 給水過熱器の撤去」では実績データとの差が 183%から 92%へと改善され、「第 4 給水過熱器の撤去」でも 329%から 102%への改善が見られた。

## 謝辞

本報告書をまとめるにあたって、バックエンド推進部門の諸氏に数々の御助言・御援助いただきました。また、原子炉廃止措置研究開発センターの諸氏から種々の助言を頂きました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) ”独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）”，独立行政法人日本原子力研究開発機構，平成 22 年 3 月 30 日（認可変更）。
- 2) ”独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）”，独立行政法人日本原子力研究開発機構，平成 22 年 3 月 31 日（認可）。
- 3) 柳原敏，”COSMARD: The Code system for management of JPDR decommissioning”，J. Nucl. Sci. Technol., 30(9), pp. 890-899 (1993).
- 4) 柳原敏，萩原博仁，”原子炉デコミッションング管理のための計算コードシステムの開発・I，JAERI-M94-005 (1994).
- 5) 助川武則，大島総一郎，白石邦生，柳原敏，”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/Code99-005 (1999).
- 6) S. Yanagihara, T. Sukegawa, K. Shiraishi, ”Development of computer systems for planning and management of reactor decommissioning”，J. Nucl. Sci. Technol., 38 (3), 193-202 (2001).
- 7) 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/Code98-010 (1998).

表 1. 準備・後処理工程の人工数の計算に使用した単位作業係数

| 作業項目      | 対応した<br>単位作業項目   | 単位作業係数: $a_{wi}$ (人・時) *  |                                        |                           |
|-----------|------------------|---------------------------|----------------------------------------|---------------------------|
|           |                  | レベル 1                     | レベル 2                                  | レベル 3                     |
| 足場設置      | <u>足場設置</u>      | 11.0                      | 22.9                                   |                           |
|           |                  | (~30m <sup>2</sup> , 1 段) | (30~50m <sup>2</sup> , 1 段)            |                           |
|           |                  |                           | 44.0                                   | 74.2                      |
| 解体準備      | <u>解体範囲設定</u>    |                           | (30~50m <sup>2</sup> , 2 段)            | (50m <sup>2</sup> ~, 2 段) |
|           |                  | 10.2                      | 18.8                                   | 33.4                      |
|           |                  | (~30m <sup>2</sup> )      | (30~50m <sup>2</sup> )                 | (50m <sup>2</sup> ~)      |
| 解体準備      | <u>作業領域調査</u>    | 15.0                      | 27.0                                   | 46.0                      |
|           |                  | (~30m <sup>2</sup> )      | (30~50m <sup>2</sup> )                 | (50m <sup>2</sup> ~)      |
|           |                  |                           |                                        |                           |
| 付属設備設置    | <u>解体用機器設置</u>   | 6.4                       | 15.7                                   | 28.6                      |
|           |                  | (切断機)                     | (工事用電源)                                | (重機器)                     |
|           |                  |                           |                                        |                           |
| グリーンハウス設置 | <u>グリーンハウス設置</u> | 10.3                      | 23.7                                   |                           |
|           |                  | (壁・配管)                    | (3x4x3m)                               |                           |
|           |                  |                           |                                        |                           |
| 作業領域養生    | <u>作業領域養生</u>    | 12.6                      | 23.4                                   | 68.5                      |
|           |                  | (~30m <sup>2</sup> )      | (30~50m <sup>2</sup> )                 | (50m <sup>2</sup> ~)      |
|           |                  |                           |                                        |                           |
| 資材等搬入     | <u>資材機器搬入</u>    | 10.0                      | 19.5                                   | 36.5                      |
|           |                  | (~30m <sup>2</sup> )      | (30~50m <sup>2</sup> )                 | (50m <sup>2</sup> ~)      |
|           |                  |                           |                                        |                           |
| 資材等搬入     | <u>収納容器搬入</u>    | 0.4                       | 2.5                                    | 16.0                      |
|           |                  | (200L ドラム缶)               | (1m <sup>3</sup> , 3m <sup>3</sup> 容器) | (遮蔽容器)                    |
|           |                  |                           |                                        |                           |
| 設備停止措置    | <u>設備停止処置</u>    | 4                         | 7                                      | 12.0                      |
|           |                  | (~30m <sup>2</sup> )      | (30~50m <sup>2</sup> )                 | (50m <sup>2</sup> ~)      |
|           |                  |                           |                                        |                           |
| グリーンハウス撤去 | <u>グリーンハウス撤去</u> | 5.8                       | 11.0                                   |                           |
|           |                  | (壁・配管)                    | (3x4x3m)                               |                           |
|           |                  |                           |                                        |                           |
| 資材等搬出     | <u>資材機器搬出</u>    | 14.3                      | 24.9                                   | 38.5                      |
|           |                  | (~30m <sup>2</sup> )      | (30~50m <sup>2</sup> )                 | (50m <sup>2</sup> ~)      |
|           |                  |                           |                                        |                           |
| 資材等搬出     | <u>解体用機器搬出</u>   | 10.0                      | 20.0                                   | 30.0                      |
|           |                  | (切断機)                     | (工事用電源)                                | (重機器)                     |
|           |                  |                           |                                        |                           |
| 片付け整理     | <u>片付け整理</u>     | 27.9                      | 41.6                                   | 78.9                      |
|           |                  | (~30m <sup>2</sup> )      | (30~50m <sup>2</sup> )                 | (50m <sup>2</sup> ~)      |
|           |                  |                           |                                        |                           |
| 片付け整理     | <u>足場撤去</u>      | 9.5                       | 14.4                                   |                           |
|           |                  | (~30m <sup>2</sup> , 1 段) | (30~50m <sup>2</sup> , 1 段)            |                           |
|           |                  |                           | 21.8                                   | 36.1                      |
| 廃棄物搬出     | <u>廃棄物搬出</u>     |                           | (30~50m <sup>2</sup> , 2 段)            | (50m <sup>2</sup> ~, 2 段) |
|           |                  | 1.2                       | 3.1                                    | 18.5                      |
|           |                  | (200L ドラム缶)               | (1m <sup>3</sup> , 3m <sup>3</sup> 容器) | (遮蔽容器)                    |

\*JPDR 解体作業で得た単位作業係数を使用<sup>7)</sup>.

表 2 解体工程の人工数の計算に使用した単位作業係数

| 作業項目        | 対応した単位作業項目         | 単位作業係数： $a_e^{*1}$<br>(人・時/ton) |
|-------------|--------------------|---------------------------------|
| 電気・計装品の撤去   | <u>空調機の撤去</u>      | 26.9                            |
| 電気・計装品の撤去   | <u>検出器の撤去</u>      | 17.2 <sup>*2</sup>              |
| 保温材の撤去      | <u>保温材の撤去</u>      | 98.1                            |
| 配管の撤去       | <u>配管の撤去</u>       | 38.9                            |
| サポートの撤去     | <u>サポートの撤去</u>     | 35.0                            |
| 湿分分離タンクの撤去  | <u>タンクの撤去</u>      | 27.3(19.1)                      |
| 給水加熱器の撤去    | <u>給水加熱器の撤去</u>    | 26.3                            |
| コンクリート基礎の撤去 | <u>コンクリート基礎の撤去</u> | 14.9                            |

\*1：JPDR 解体作業で得た単位作業係数を使用<sup>7)</sup>。

\*2：既存の評価モデルでは、検出器は小型計器類に含まれているため、

「小型計器類の撤去」の単位作業係数を使用。

カッコ内は粗断による撤去を行った場合。

表 3. 第 3・4 給水加熱器室の機器物量データ

| 作業項目        | 機器種別                   | 物量 (ton)             | 機器数              |
|-------------|------------------------|----------------------|------------------|
| 電気・計装品の撤去   | 空調機                    | 0.360                | 1                |
| 電気・計装品の撤去   | 検出器                    | 0.014                | 1                |
| 保温材の撤去      | 保温材                    | 8.9 <sup>*2</sup>    | 15 <sup>*2</sup> |
| 配管の撤去       | 配管 (4 B 以上)            | 36.157               | 5                |
| 配管の撤去       | 配管 (4 B 未満)            | 3.330                | 7                |
| 配管の撤去       | 弁                      | 6.004                | 45               |
| サポートの撤去     | 架台 (ハガ <sup>8</sup> 等) | 4.217                | 27               |
| 湿分分離タンクの撤去  | タンク                    | 1.660                | 1                |
| 給水加熱器の撤去    | 給水加熱器                  | 59.300 <sup>*1</sup> | 2                |
| コンクリート基礎の撤去 | コンクリート基礎               | 12.4 <sup>*2</sup>   | 5 <sup>*2</sup>  |
| 合計          |                        | 132.3                | 108              |

\*1：第 3 給水加熱器：30.9 ton, 第 4 給水加熱器：28.4 ton

\*2：解体実績より得た廃棄物量を使用

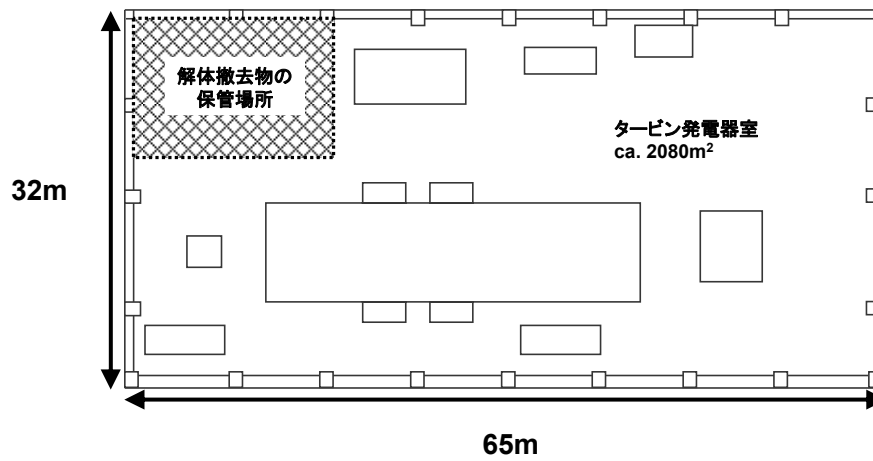


表 4. 機器撤去に掛かる作業員の人工数の実績データと既存の評価式による計算結果-1 との比較

| 作業工程      | 作業員人工数割合* (%) |               |
|-----------|---------------|---------------|
|           | 計算結果-1        | 実績データ         |
| 準備工程      | 14.95         | 25.53         |
| 解体工程      | 47.63         | 64.34         |
| 後処理工程     | 7.41          | 10.13         |
| <b>合計</b> | <b>69.99</b>  | <b>100.00</b> |

\* : 全工程の実績データを用いて規格化した値.

タービン建屋:1F



タービン建屋:B2

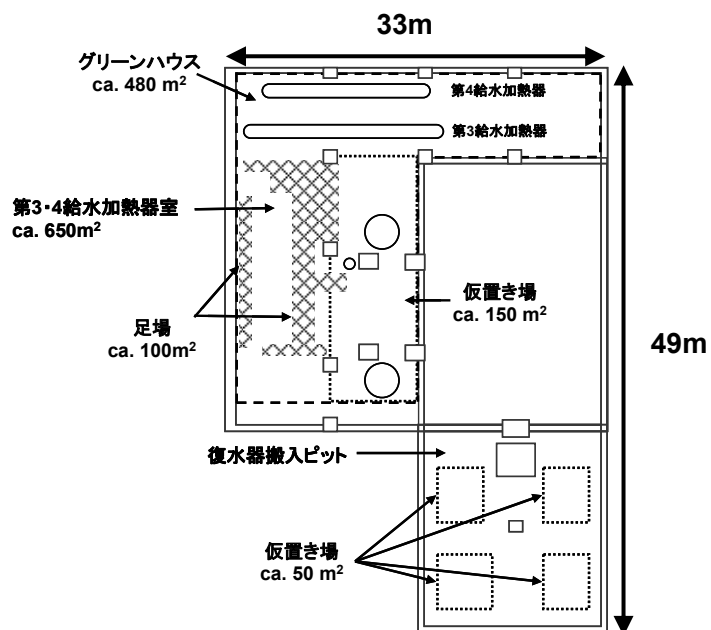


図 1. 第 3・4 給水加熱器室およびタービン発電機室

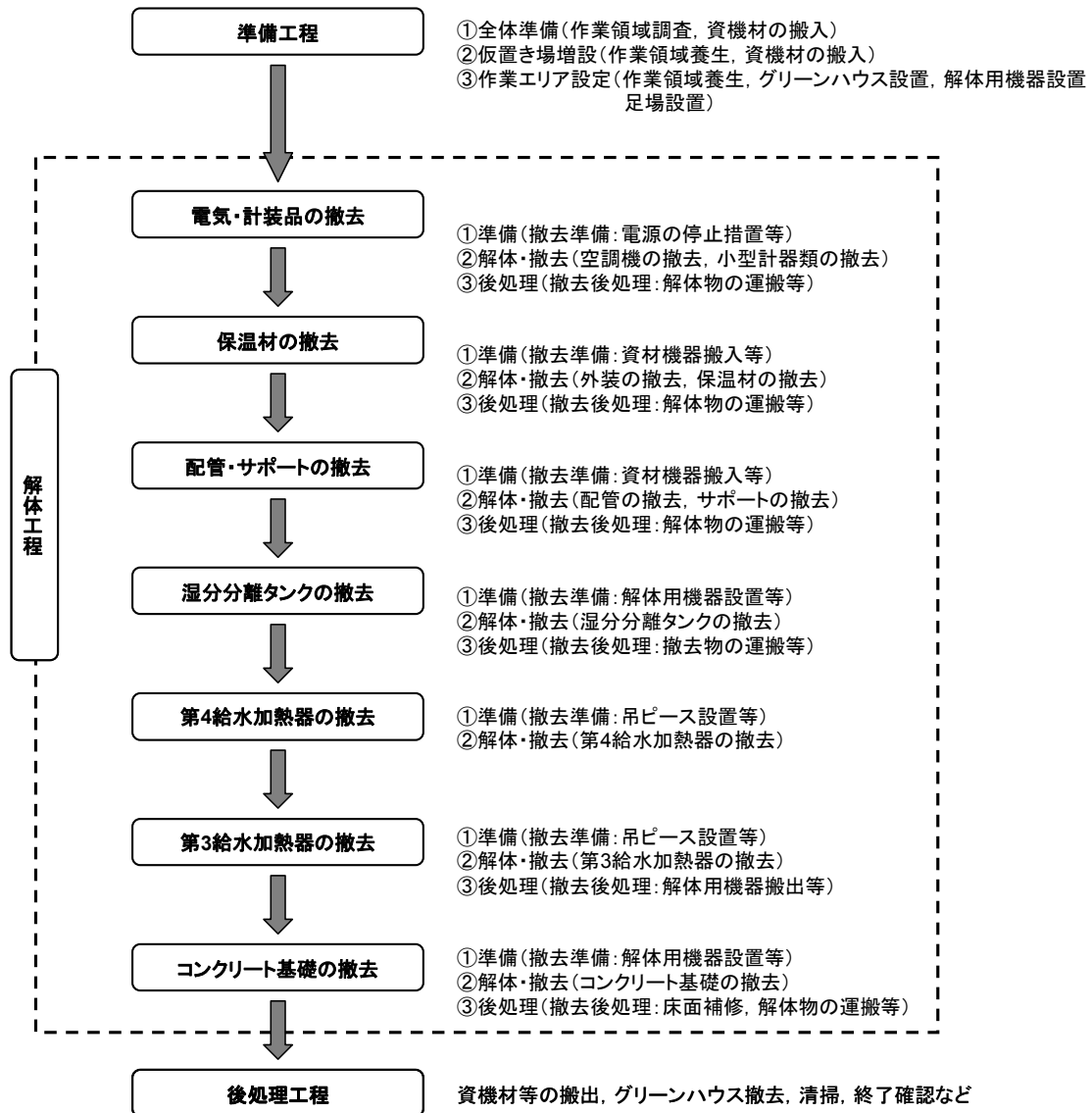


図 2. 機器解体作業フロー

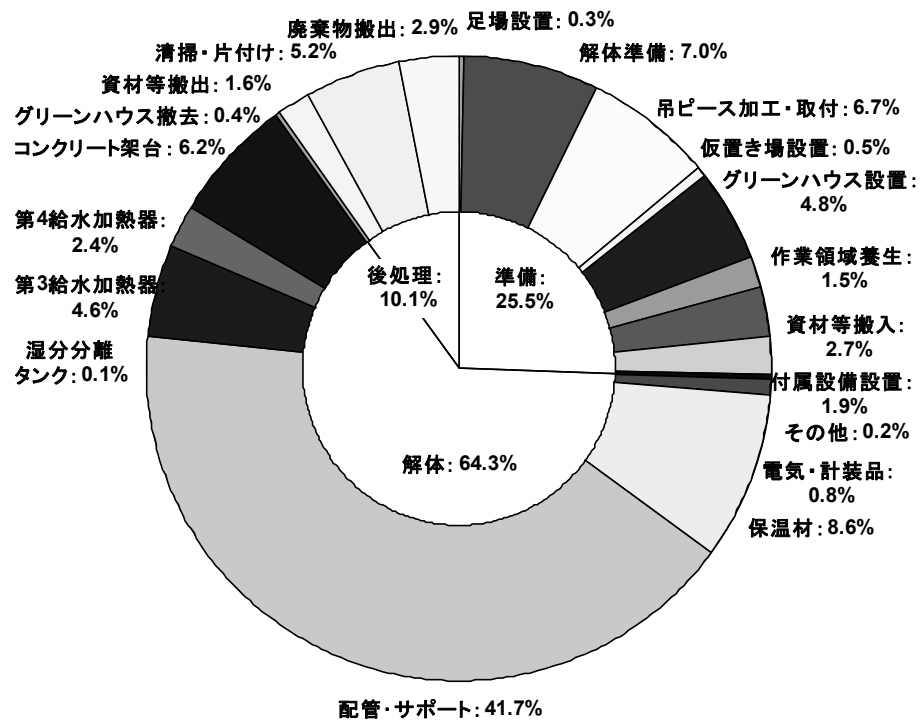


図 3. 第 3・4 給水加熱器室の機器撤去に要した作業員人工数の割合（実績データ）

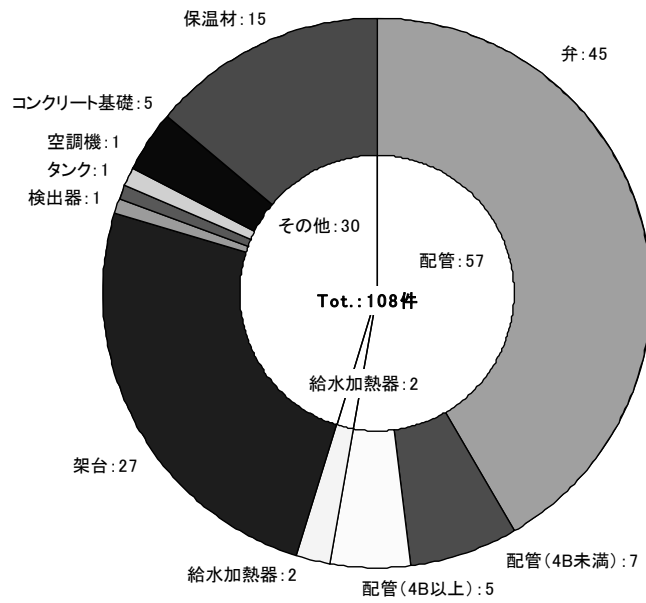


図 4. 機器の数量割合

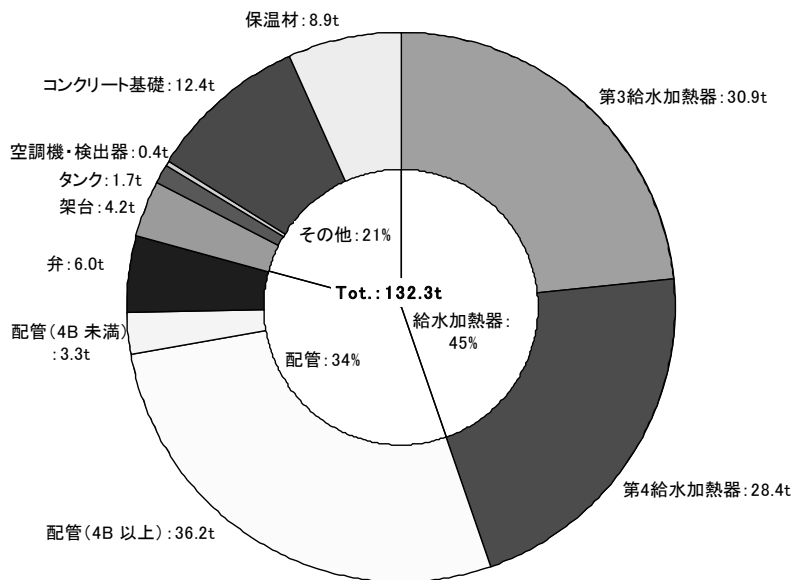


図 5. 機器の重量割合

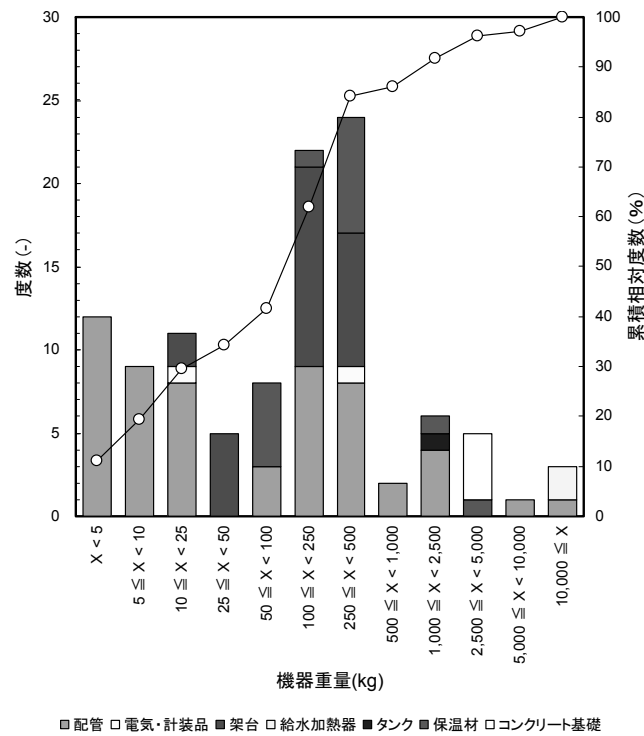


図 6. 機器重量の度数分布

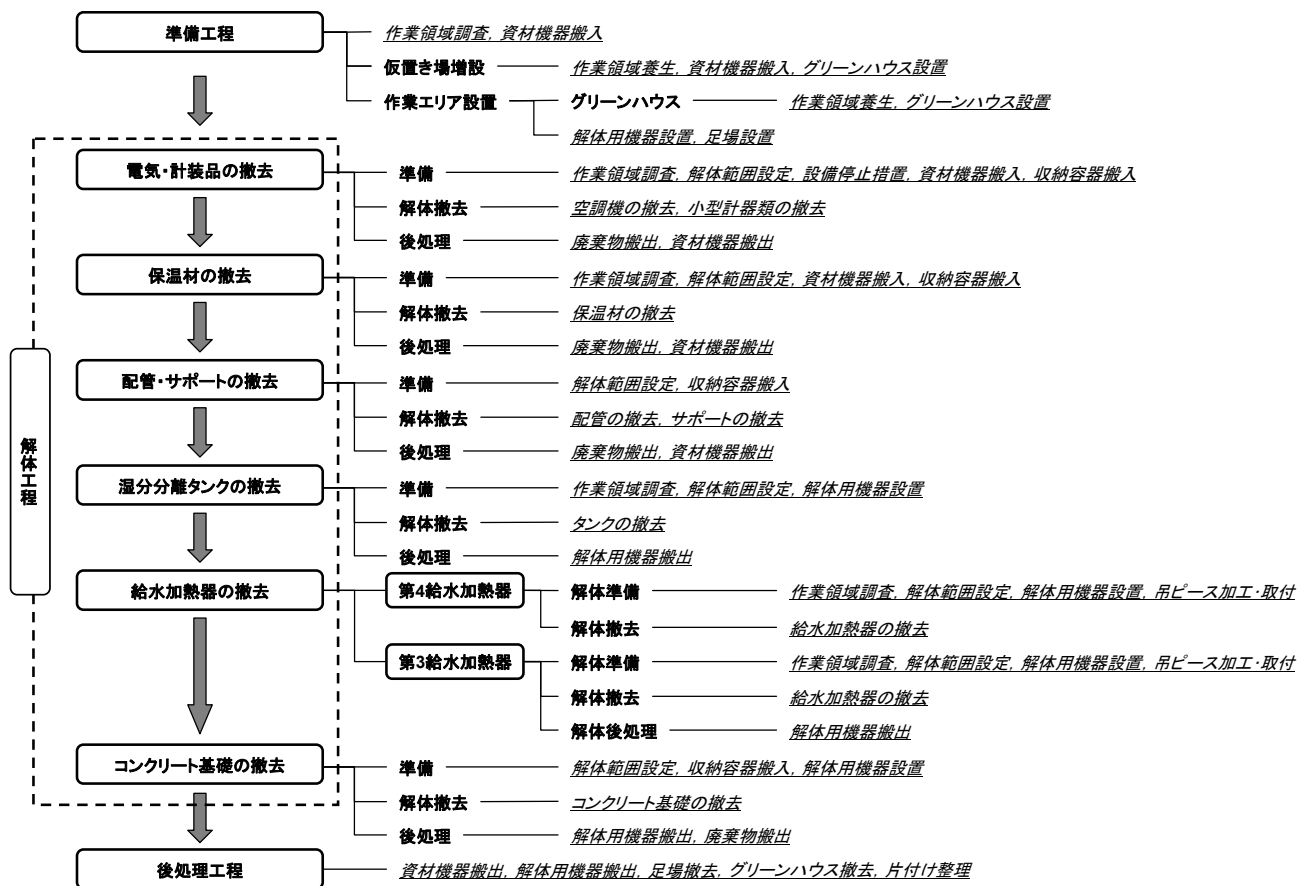


図 7. 機器撤去作業フローより作成した WBS

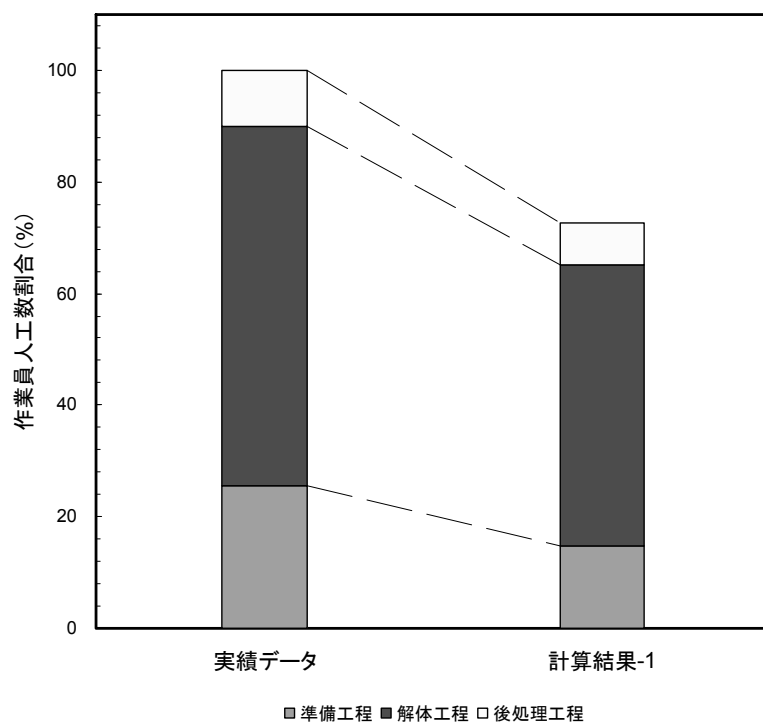


図 8. 機器撤去に掛かる作業工程毎の作業員人工数（計算結果-1）と実績データとの比較  
（全工程の実績データを用いて規格化した値）

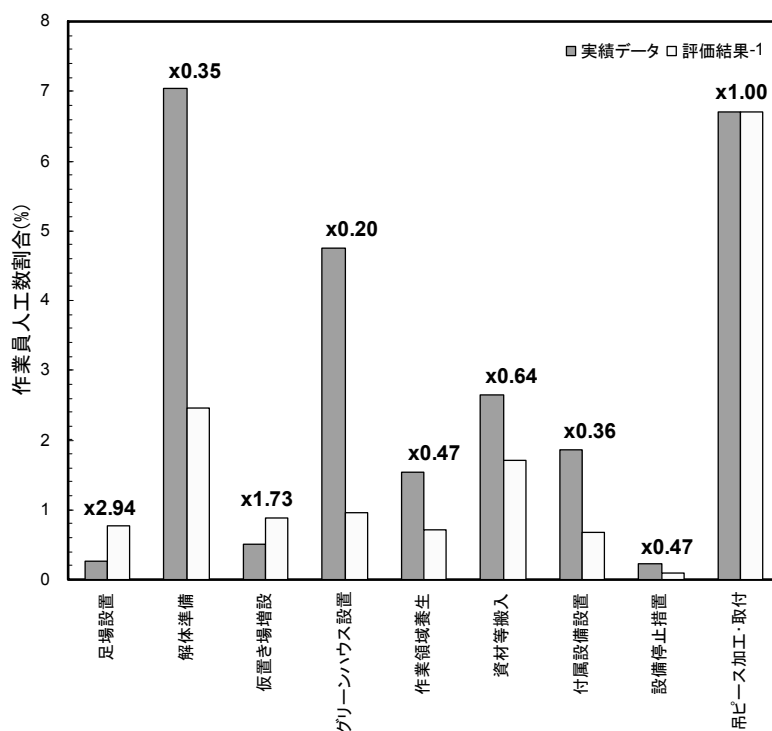


図 9. 準備工程に掛かる作業員人工数の比較  
（全工程の実績データを用いて規格化した値）

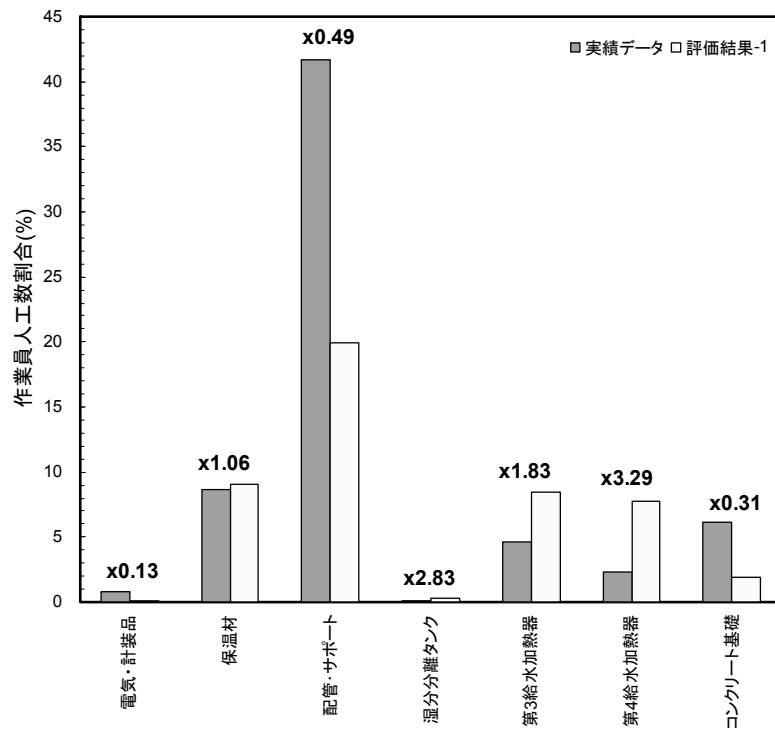


図 10. 解体工程に掛かる作業員人工数の比較 (計算結果-1)

(全工程の実績データを用いて規格化した値)

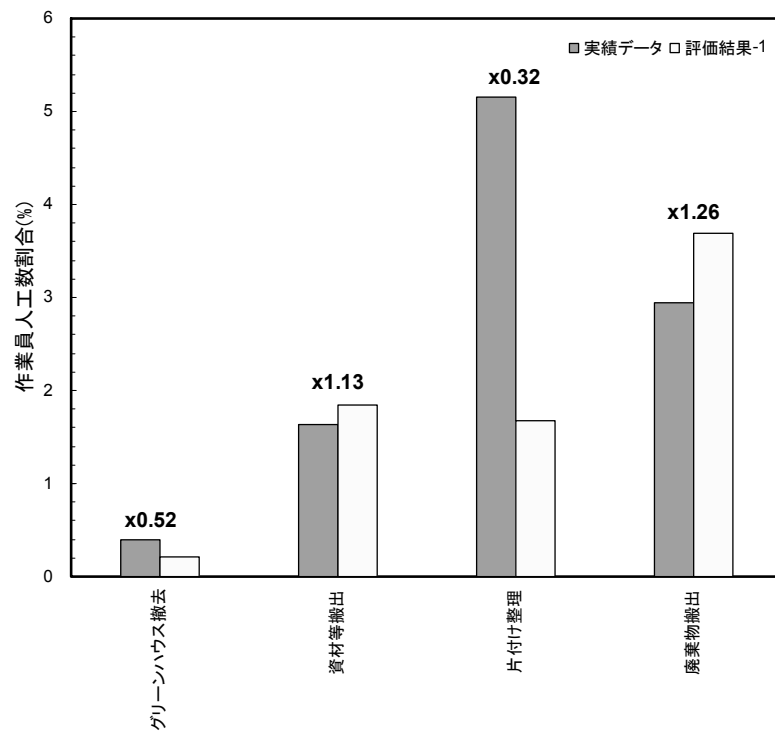


図 11. 後処理工程に掛かる作業員人工数の比較

(全工程の実績データを用いて規格化した値)



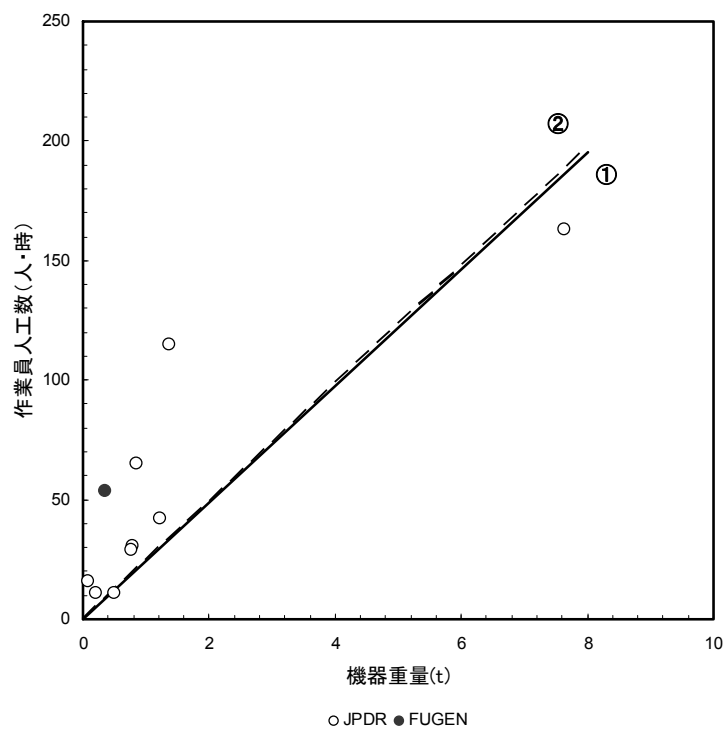


図 12. JPDR と「ふげん」での「空調機の撤去」に掛かる人工数比較

(① : JPDR の実績データのみで評価. ② : 「ふげん」の実績データを含めて評価.)

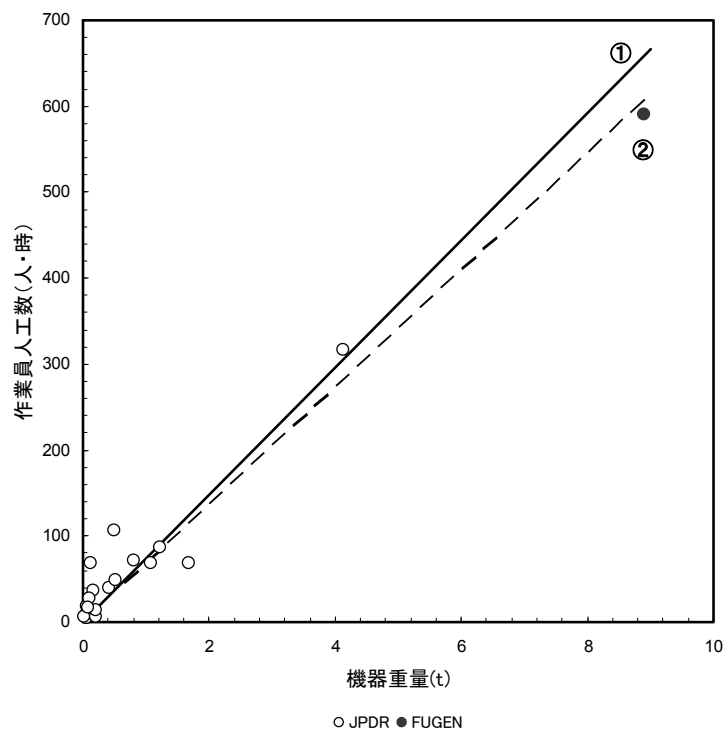


図 13. JPDR と「ふげん」での「保温材の撤去」に掛かる人工数比較

(① : JPDR の実績データのみで評価. ② : 「ふげん」の実績データを含めて評価.)

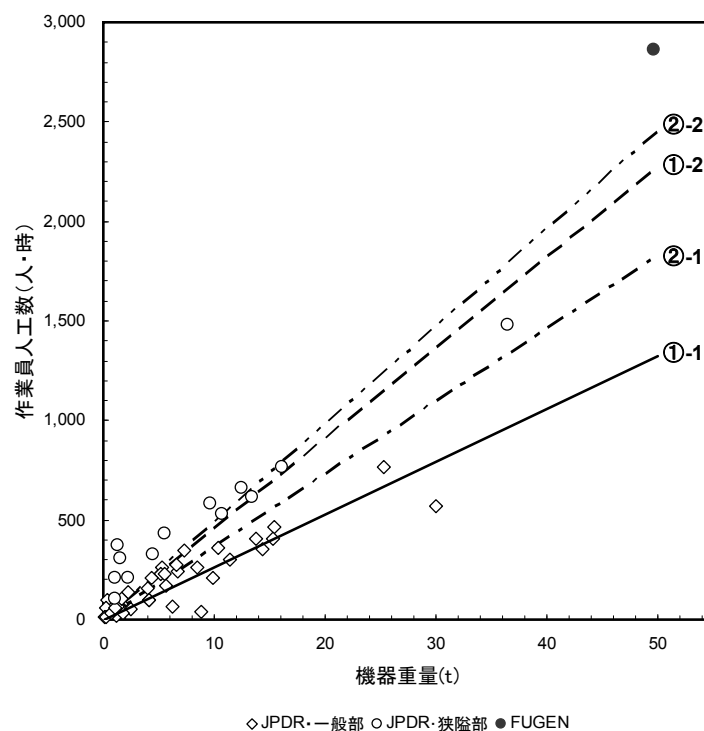


図 14. JPDR と「ふげん」での「配管の撤去」に掛かる人工数比較

(①-1 : JPDR の一般部の実績データのみで評価。②-1 : JPDR の狭隘部の実績データのみで評価。

①-2 : ①-1 に「ふげん」の実績データを含めて評価。②-2 : ②-1 に「ふげん」の実績データを含めて評価。)

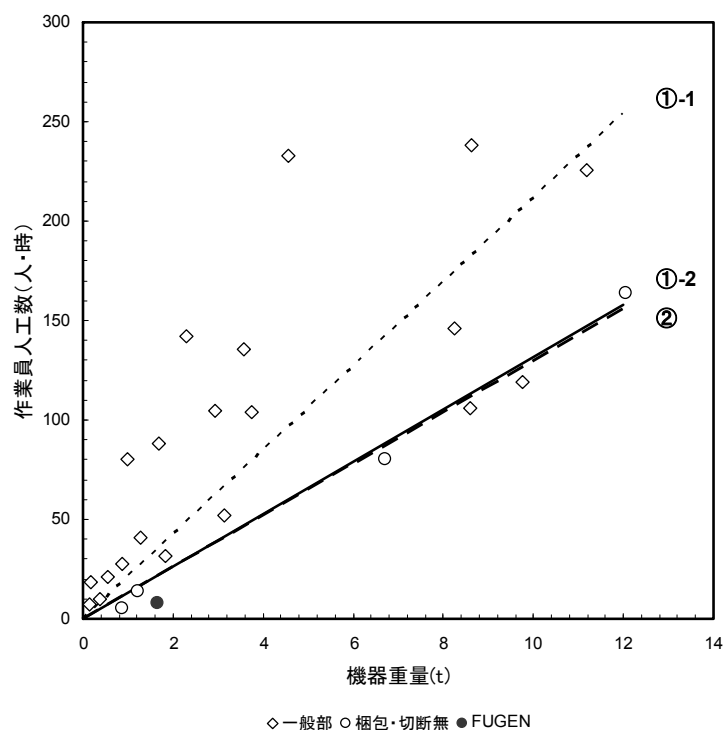


図 15. JPDR と「ふげん」での「タンクの撤去」に掛かる人工数比較

(①-1 : JPDR の一般部の実績データのみで評価。①-2 : JPDR の梱包・切断無しの実績データのみで評価。

② : ①-2 に「ふげん」の実績データを含めて評価。)

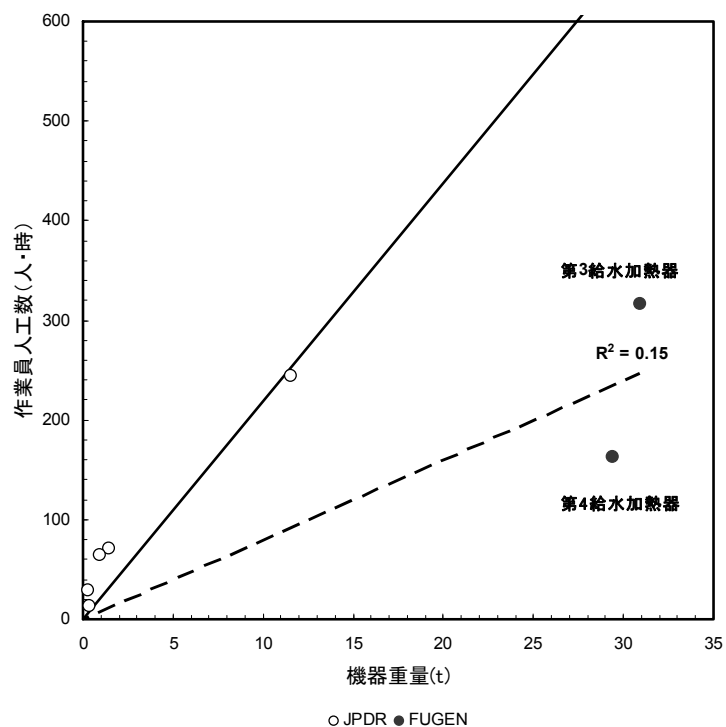


図 16. JPDR と「ふげん」での「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数比較  
(実線：JPDR での解体実績のみ、破線：第 3・4 給水加熱器室での実績.)

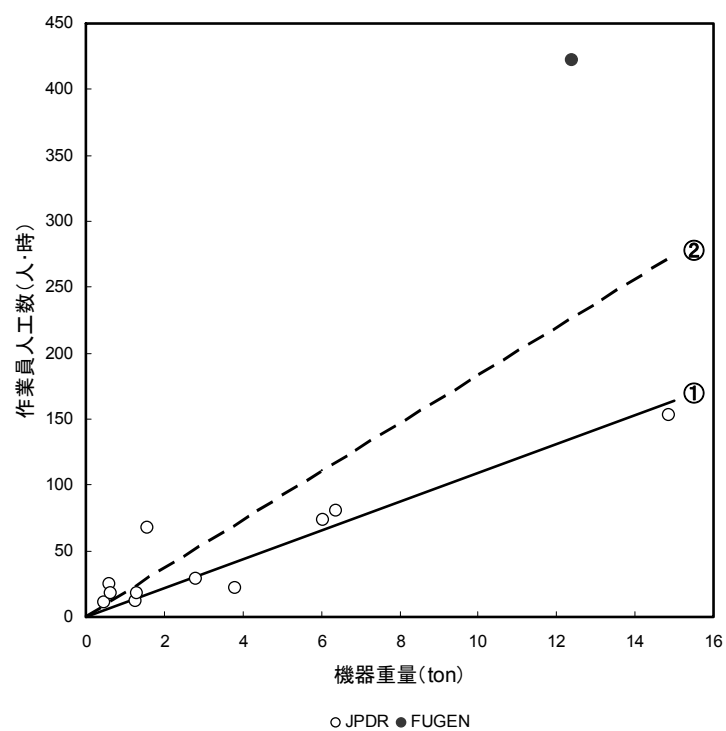


図 17. JPDR と「ふげん」での「コンクリート基礎の撤去」に掛かる人工数比較  
(①：JPDR の実績データのみで評価、②：「ふげん」の実績データを含めて評価.)

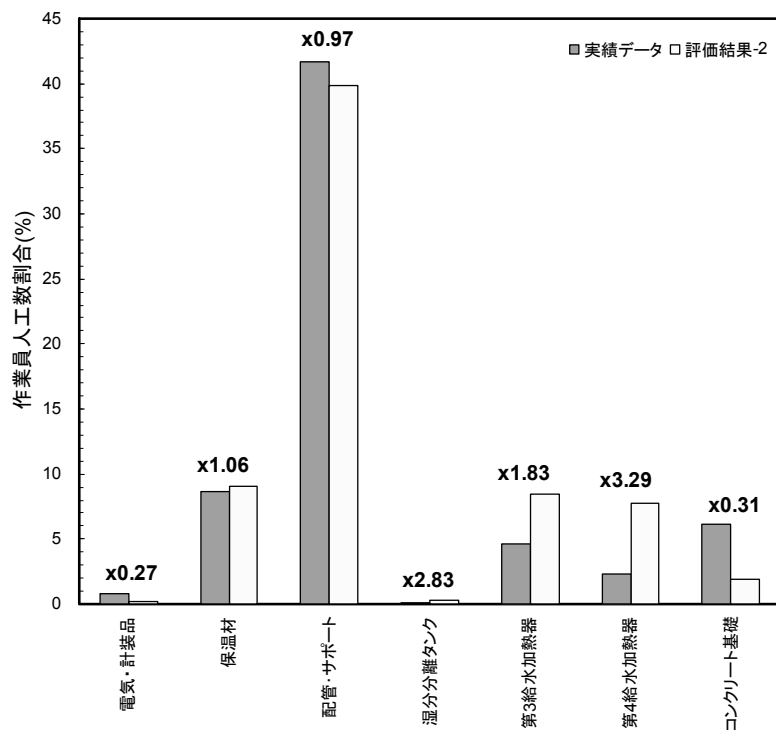


図 18. 単位作業係数の補正による解体工程における作業員の人工数の計算結果の比較  
(全工程の実績データを用いて規格化した値)

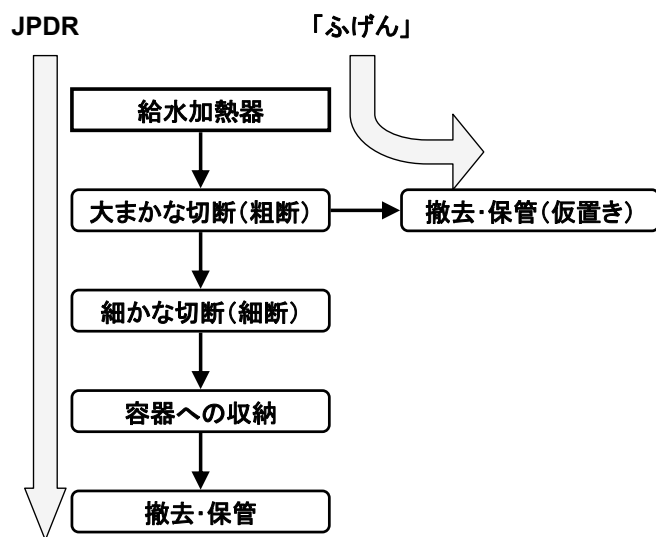


図 19. JPDR と「ふげん」での「給水加熱器の撤去」に係る作業

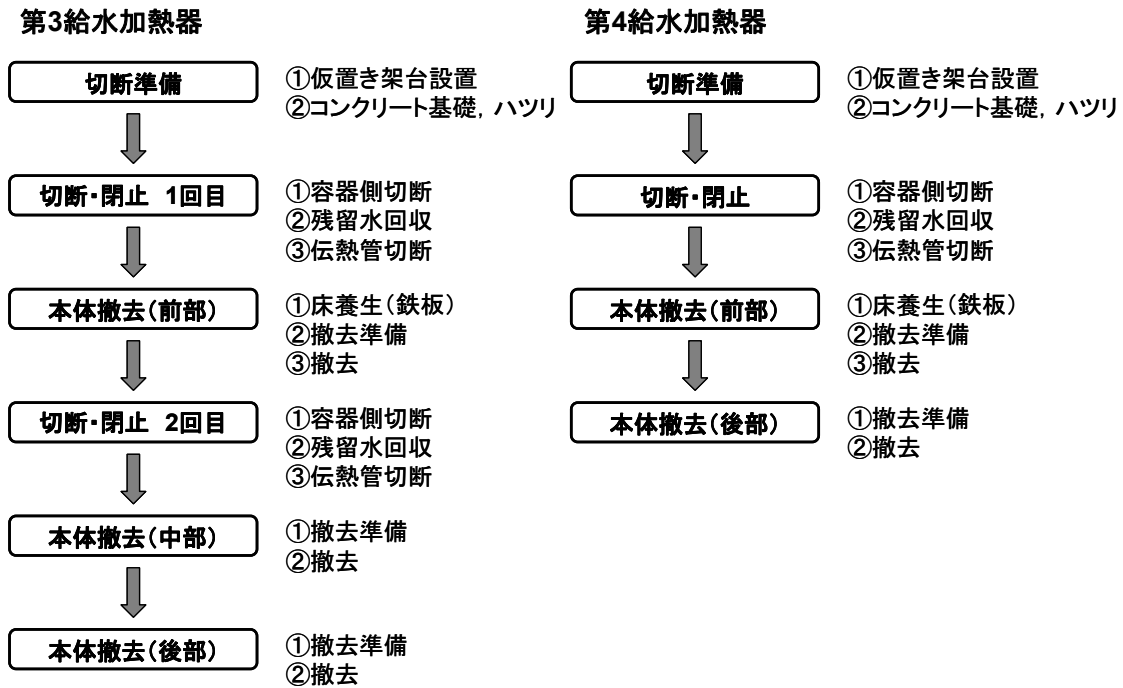


図 20. 「ふげん」での「給水加熱器の撤去」の作業フロー

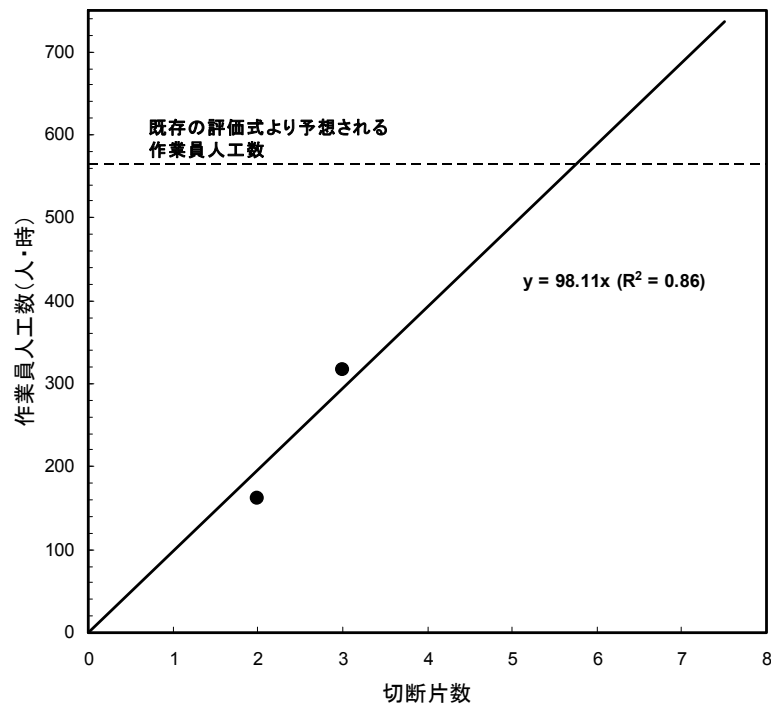


図 21. 「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数と切断片数との関係

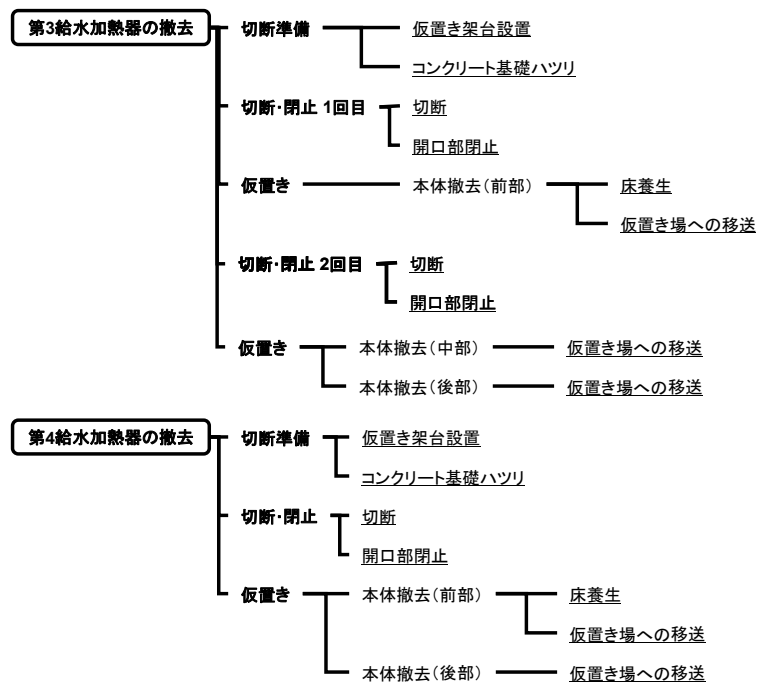


図 22. 「給水加熱器の撤去」の WBS

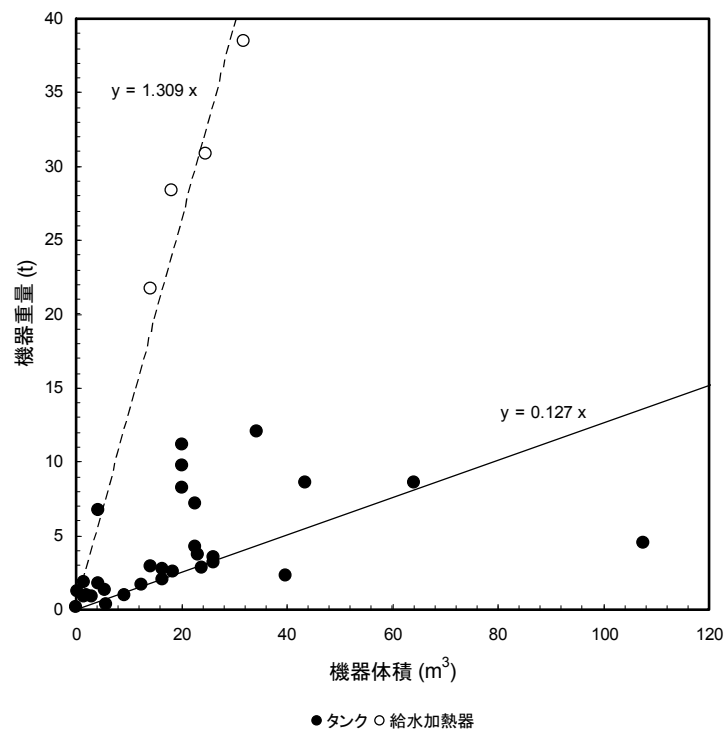


図 23. タンクおよび給水加熱器の体積と重量との関係  
(タンクの体積と重量との関係は JAERI Data/Code 98-010 より参照し、  
給水加熱器の体積・重量は「ふげん」の給水加熱器の値を使用.)

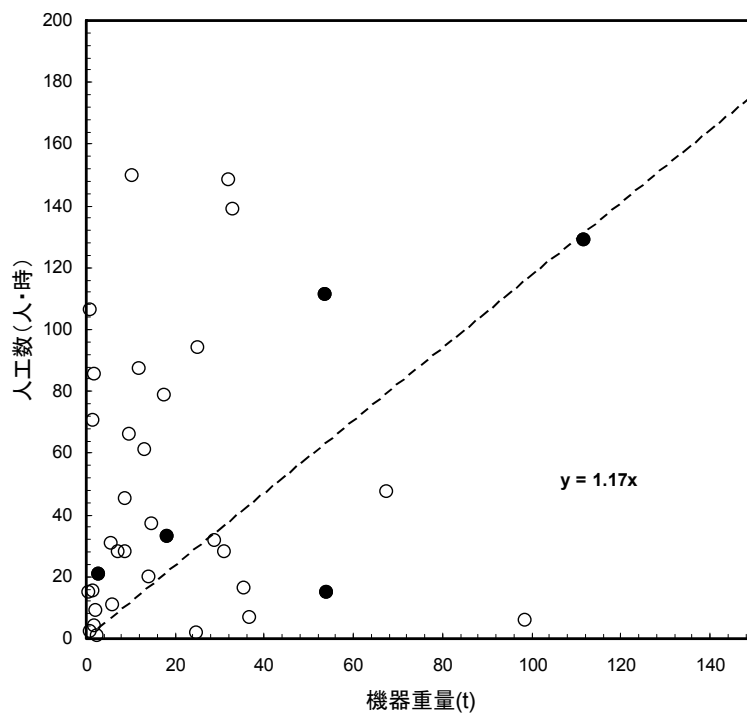


図 24. タービン建屋で行われた「開口部閉止」に掛かる人工数と機器重量との関係  
(●：給水加熱器室での作業のみ (JAERI Data/Code 98-010 より))

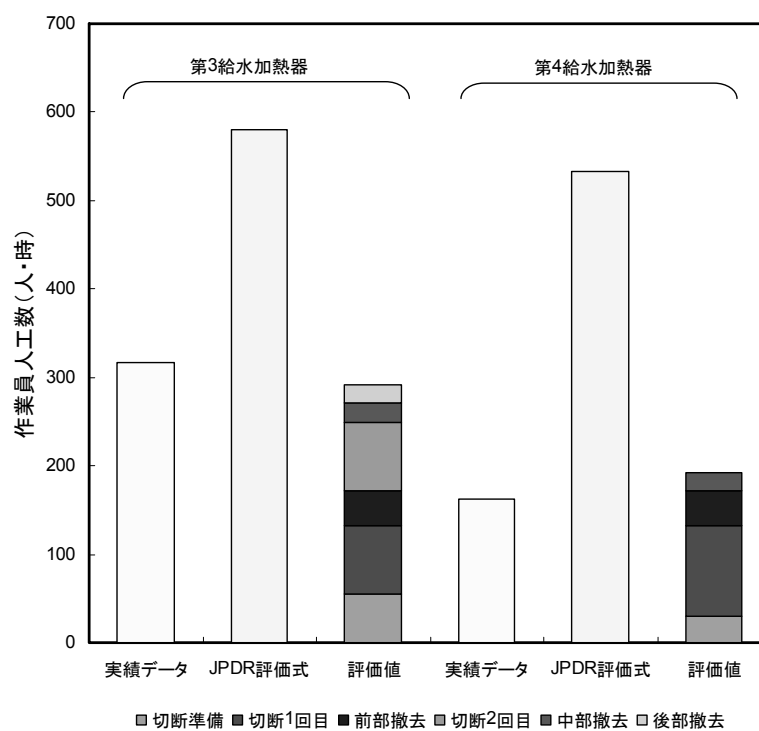


図 25. 「給水加熱器の撤去」に掛かる人工数計算結果

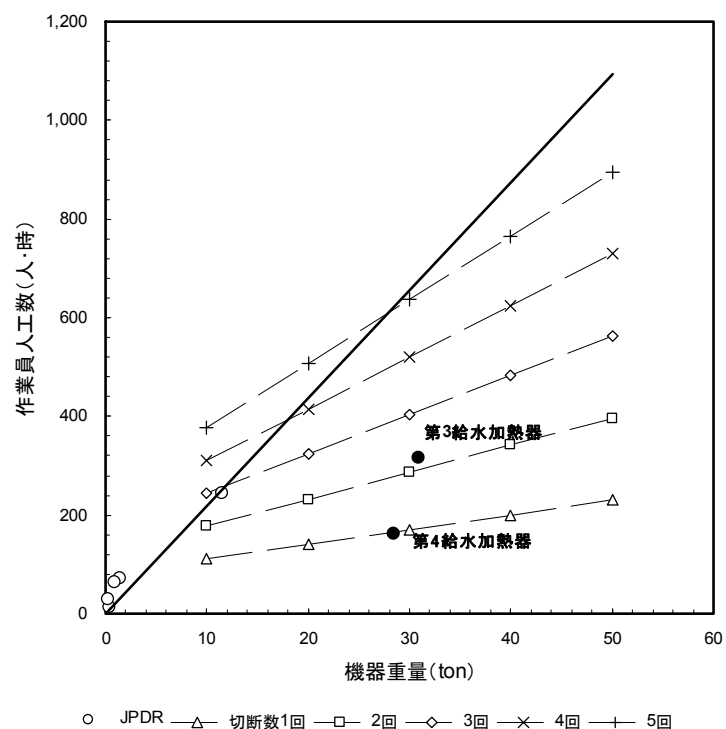


図 26. JPDR と「ふげん」の「給水加熱器の撤去」に掛かる機器重量と人工数の実績データと  
切断数を考慮した評価モデルによる評価結果

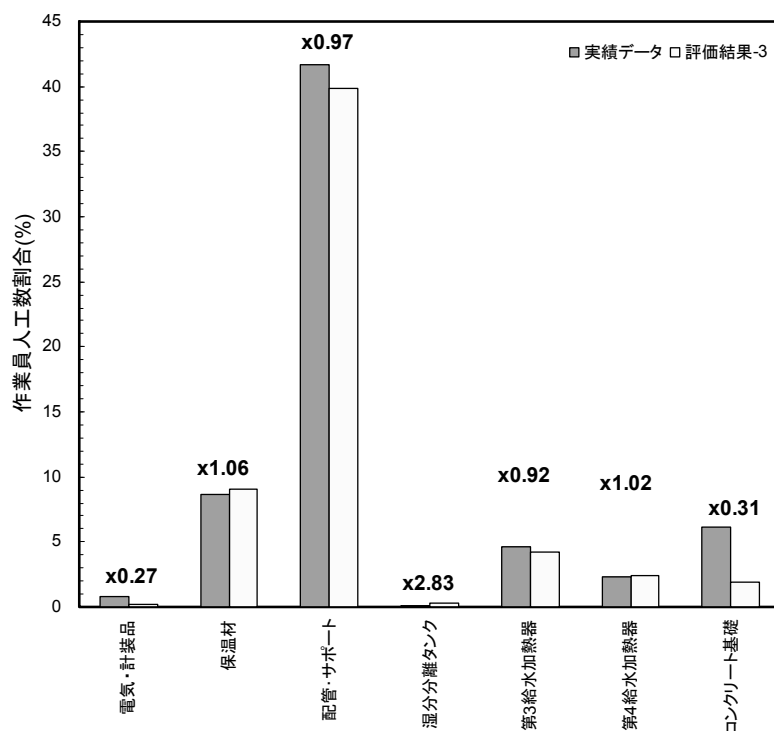


図 27. 各機器の撤去に必要な人工数計算結果 (計算結果-3)  
(全工程の実績データを用いて規格化した値)



付録：

「吊ピースの加工・取り付け」に掛かる人工数の評価式

図 19 に示す様に，第 3・4 給水加熱器の撤去は「粗断」の後に「仮置き」をするだけで終わっている．「粗断」の回数は第 3 給水加熱器では 2 回であり，第 4 給水加熱器は 1 回である．「粗断」により発生した切断片は図 1 に示すタービン発電機室内で「仮置き」されるが，切断片は 10 ton 以上の重量であるために，図 A.1 に示す様にクレーンにより吊り上げて移動させる必要がある．このとき，切断片にチェーンを取り付けるために吊ピースを溶接した．

第 3 給水加熱器 (30.9 ton) の切断回数は 2 回であるため切断片は 3 個発生し，その重量は 10.3 ton となる．同様に，第 4 給水加熱器 (28.4 ton) の場合，切断回数が 1 回であるために，切断片の重量は，14.2 ton となる．

第 3・4 給水加熱器の撤去の時には，5 ton 用の吊ピースを使用しているため，吊ピース 1 個に対する重量は 5 ton 以下にしておく必要がる．このため，切断片 1 個の撤去に使用した吊ピースの数は，第 3 給水加熱器の場合，安全のために 3 個であり，第 4 給水加熱器も 3 個となる．これより，第 3 給水加熱器を撤去するときに必要な吊ピースの総数は，切断片が 3 個あるために 9 個であり，第 4 給水加熱器では 6 個であるために，全体として 15 個必要になる．

「吊ピースの加工・取り付け」の人工数と使用した吊ピース数との関係を図 A.2 に示す．これより，吊ピース 1 個の加工・取り付けに掛かる人工数は，30.7 (人・時/個) になる．これを単位作業項目「吊ピースの加工・取り付け」に掛かる人工数の単位作業係数として用いた．

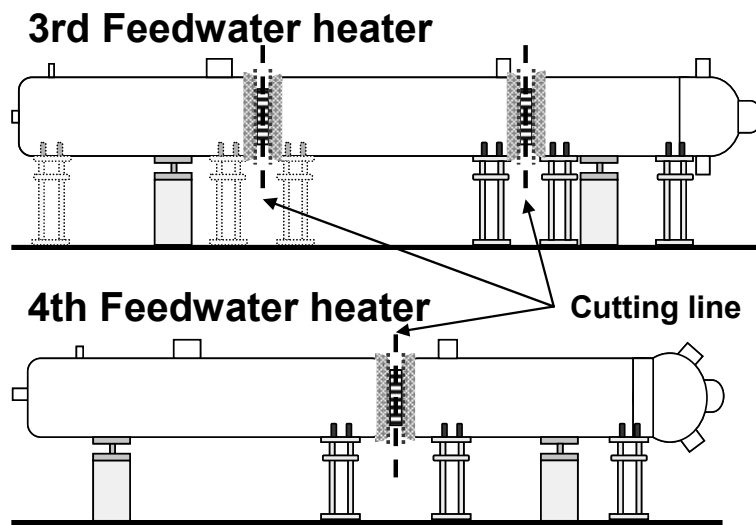


図 A.1. 第3・4 給水加熱器の撤去の概要

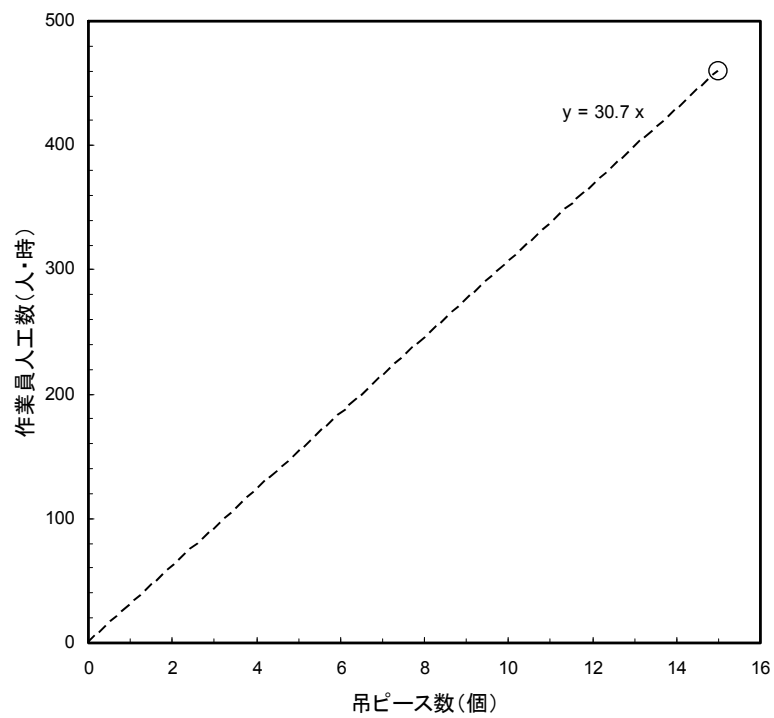


図 A.2. 使用した吊ピース数と「吊ピースの加工・取り付け」に要した作業員人工数

# 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   |
| 物質モル  | 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 <sup>2</sup>     |
| 体積                      | 立方メートル       | m <sup>3</sup>     |
| 速さ, 速度                  | メートル毎秒       | m/s                |
| 加速度                     | メートル毎秒毎秒     | m/s <sup>2</sup>   |
| 波数                      | 毎メートル        | m <sup>-1</sup>    |
| 密度, 質量密度                | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 面積密度                    | キログラム毎平方メートル | kg/m <sup>2</sup>  |
| 比体積                     | 立方メートル毎キログラム | m <sup>3</sup> /kg |
| 電流密度                    | アンペア毎平方メートル  | A/m <sup>2</sup>   |
| 磁界の強さ                   | アンペア毎メートル    | A/m                |
| 量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度 | モル毎立方メートル    | mol/m <sup>3</sup> |
| 質量濃度                    | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 輝度                      | カンデラ毎平方メートル  | cd/m <sup>2</sup>  |
| 屈折率 <sup>(b)</sup>      | (数字の)        | 1                  |
| 比透磁率 <sup>(b)</sup>     | (数字の)        | 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 <sup>(b)</sup>   | rad               | 1 <sup>(b)</sup>  | m/m                                                            |
| 立体角                           | ステラジアン <sup>(b)</sup> | sr <sup>(c)</sup> | 1 <sup>(b)</sup>  | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>                                 |
| 周波数                           | ヘルツ <sup>(d)</sup>    | Hz                |                   | s <sup>-1</sup>                                                |
| 力                             | ニュートン                 | N                 |                   | m kg s <sup>-2</sup>                                           |
| 圧力, 応力                        | パスカル                  | Pa                | N/m <sup>2</sup>  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                             |
| エネルギー, 仕事, 熱量                 | ジュール                  | J                 | N m               | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                              |
| 仕事率, 工率, 放射束                  | ワット                   | W                 | J/s               | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>                              |
| 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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 静電容量                          | ファラド                  | F                 | C/V               | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> |
| 電気抵抗                          | オーム                   | Ω                 | V/A               | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>              |
| コンダクタンス                       | ジーメンズ                 | S                 | A/V               | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> |
| 磁束                            | ウェーバ                  | Wb                | Vs                | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 磁束密度                          | テスラ                   | T                 | Wb/m <sup>2</sup> | kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>                             |
| インダクタンス                       | ヘンリー                  | H                 | Wb/A              | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>              |
| セルシウス度 <sup>(e)</sup>         | セルシウス度 <sup>(e)</sup> | °C                |                   | K                                                              |
| 光強度                           | ルーメン                  | lm                |                   | cd sr <sup>(c)</sup>                                           |
| 放射線量の放射能 <sup>(f)</sup>       | ルクス                   | lx                | lm/m <sup>2</sup> | m <sup>-2</sup> cd                                             |
| 吸収線量, ビエネルギー当分, カーマ           | ベクレル <sup>(d)</sup>   | Bq                |                   | s <sup>-1</sup>                                                |
|                               | グレイ                   | Gy                | J/kg              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 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 <sup>(g)</sup>  | Sv                | J/kg              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 酸素活性                          | カタール                  | kat               |                   | s <sup>-1</sup> 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付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                                                                        |
| 粘度              | パスカル秒             | Pa s                  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>                                                   |
| 力のモーメント         | ニュートンメートル         | N m                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                    |
| 表面張力            | ニュートン毎メートル        | N/m                   | kg s <sup>-2</sup>                                                                   |
| 角速度             | ラジアン毎秒            | rad/s                 | m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>                                   |
| 角加速度            | ラジアン毎秒毎秒          | rad/s <sup>2</sup>    | m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>                                   |
| 熱流密度, 放射照度      | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>      | kg s <sup>-3</sup>                                                                   |
| 熱容量, エントロピー     | ジュール毎ケルビン         | J/K                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                    |
| 比熱容量, 比エントロピー   | ジュール毎キログラム毎ケルビン   | J/(kg K)              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                       |
| 比エネルギー          | ジュール毎キログラム        | J/kg                  | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                                       |
| 熱伝導率            | ワット毎メートル毎ケルビン     | W/(m K)               | m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>                                                 |
| 体積エネルギー         | ジュール毎立方メートル       | J/m <sup>3</sup>      | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                   |
| 電界の強さ           | ボルト毎メートル          | V/m                   | m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>                                                 |
| 電荷密度            | クーロン毎立方メートル       | C/m <sup>3</sup>      | m <sup>-3</sup> sA                                                                   |
| 表面電荷            | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> sA                                                                   |
| 電束密度, 電気変位      | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> sA                                                                   |
| 誘電率             | ファラド毎メートル         | F/m                   | m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>                        |
| 透磁率             | ヘンリー毎メートル         | H/m                   | m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>                                                 |
| モルエネルギー         | ジュール毎モル           | J/mol                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>                                  |
| 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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>                  |
| 照射線量 (X 線及びγ 線) | クーロン毎キログラム        | C/kg                  | kg <sup>-1</sup> sA                                                                  |
| 吸収線量率           | グレイ毎秒             | Gy/s                  | m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>                                                       |
| 放射強度            | ワット毎ステラジアン        | W/sr                  | m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> |
| 放射輝度            | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m <sup>2</sup> sr) | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>                |
| 酵素活性濃度          | カタール毎立方メートル       | kat/m <sup>3</sup>    | m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol                                                   |

表 5. SI 接頭語

| 乗数               | 接頭語 | 記号 | 乗数                | 接頭語  | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 <sup>24</sup> | ヨタ  | Y  | 10 <sup>-1</sup>  | デシ   | d  |
| 10 <sup>21</sup> | ゼタ  | Z  | 10 <sup>-2</sup>  | センチ  | c  |
| 10 <sup>18</sup> | エクサ | E  | 10 <sup>-3</sup>  | ミリ   | m  |
| 10 <sup>15</sup> | ペタ  | P  | 10 <sup>-6</sup>  | マイクロ | μ  |
| 10 <sup>12</sup> | テラ  | T  | 10 <sup>-9</sup>  | ナノ   | n  |
| 10 <sup>9</sup>  | ギガ  | G  | 10 <sup>-12</sup> | ピコ   | p  |
| 10 <sup>6</sup>  | メガ  | M  | 10 <sup>-15</sup> | フェムト | f  |
| 10 <sup>3</sup>  | キロ  | k  | 10 <sup>-18</sup> | アト   | a  |
| 10 <sup>2</sup>  | ヘクト | h  | 10 <sup>-21</sup> | ゼプト  | z  |
| 10 <sup>1</sup>  | デカ  | da | 10 <sup>-24</sup> | 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=60 s                                                                                  |
| 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   | 1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>                                      |
| リットル  | L, l | 1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| トン    | t    | 1 t=10 <sup>3</sup> kg                                                                      |

表 7. SI に属さないが、SI と併用される単位で、SI 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 | 1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J   |
| ダルトン     | Da | 1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg  |
| 統一原子質量単位 | u  | 1 u=1 Da                                    |
| 天文単位     | ua | 1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa                                                       |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1 mmHg=133.322 Pa                                                                              |
| オングストローム  | Å    | 1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m                                                          |
| 海里        | M    | 1 M=1852 m                                                                                     |
| バイン       | b    | 1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup> |
| 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 <sup>-7</sup> J                                                                |
| ダイン                   | dyn | 1 dyn=10 <sup>-5</sup> N                                                                |
| ボアズ                   | P   | 1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s                                                  |
| ストークス                 | St  | 1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> |
| スチルブ                  | sb  | 1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>                         |
| フォトル                  | ph  | 1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx                                        |
| ガリ                    | Gal | 1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>                           |
| マクスウェル                | Mx  | 1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb                                           |
| ガウス                   | G   | 1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T                                           |
| エルステッド <sup>(c)</sup> | Oe  | 1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>                                          |

(c) 3 元系の 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 <sup>10</sup> Bq                                         |
| レントゲン     | R    | 1 R = 2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg                                     |
| ラド        | rad  | 1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy                                      |
| レム        | rem  | 1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv                                      |
| ガンマ       | γ    | 1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T                                          |
| フェルミ      | f    | 1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m                                      |
| メートル系カラット |      | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg                          |
| トル        | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa                                            |
| 標準大気圧     | atm  | 1 atm = 101 325 Pa                                                   |
| カロリ       | cal  | 1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー) 4.184 J (「熱化学」カロリー) |
| ミクロン      | μ    | 1 μ =1 μm=10 <sup>-6</sup> m                                         |

