JAEA-Technology
2011-021

原子力施設の廃止措置に係る研究

（共同研究）

Research on Decommissioning of Nuclear Facilities
(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

July 2011

Japan Atomic Energy Agency

JAEA-Technology

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, 2011

JAEA-Technology 2011-021

原子力施設の廃止措置に係る研究
(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]，石神　努[+2]，森下　喜嗣[+3]，柳原　敏[*1]，有田　裕二[*1]

（2011 年 5 月 10 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，そのプロジェクト管理データを事前に評価することに加えて，その結果を用いて想定される様々な解体作業の選択肢(シナリオ)の中から，最適なものを選択することが必要かつ重要である．廃止措置の研究分野では，この選択のための意思決定に係る研究はほとんどなされておらず，今後の重要な検討課題である．

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 年度から開始した．本研究では，「ふげん」を対象に設備･機器の解体撤去作業に関する幾つかのシナリオを想定して人工数や廃棄物発生量を計算し，その結果に基づいて，幾つかの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．

平成 21 年度は「ふげん」で実施された給水加熱器の解体撤去作業に基づき，幾つかの解体シナリオを想定して管理データを評価し，多基準意思決定法の 1 つである SMART を用いて最適化に係る検討を行った．

本報告書は，その研究の成果をまとめたものである．

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)
[+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

JAEA-Technology 2011-021

Research on Decommissioning of Nuclear Facilities
(Joint Research)

Yuji SHIBAHARA[+1], Tsutomu ISHIGAMI[+2],
Yoshitsugu MORISHITA[+3], Satoshi YANAGIHARA[*1] and Yuji ARITA[*1]

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

(Received May 10, 2011)

To implement a decommissioning project reasonably, it is necessary and important to beforehand evaluate project management data 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 subjects 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 the research is to construct 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 feed water heater at FUGEN, and an optimum scenario was discussed using the SMART, one of Multi-Criteria Decision Analysis Method.

This report describes the results of the joint research in FY 2009.

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

---

This work was carried out in the joint research of JAEA and University of Fukui.
+1 Fugen Decommissioning Engineering Center, Tsuruga Head Office (Residence)
+2 Nuclear Safety Research Center
+3 Fugen Decommissioning Engineering Center, Tsuruga Head Office
*1 Research Institute of Nuclear Engineering, University of FUKUI

目　次

1.　はじめに ---------- 1

2.　「ふげん」の廃止措置の概要 ---------- 3
　2.1　廃止措置対象施設 ---------- 3
　2.2　廃止措置対象施設の解体方法 ---------- 3
　2.3　使用済燃料搬出期間における廃止措置作業 ---------- 4
　2.4　解体撤去作業に係る解体シナリオの課題 ---------- 5

3.　管理データの評価 ---------- 13
　3.1　評価対象シナリオ ---------- 13
　3.2　評価モデル ---------- 14
　3.3　評価結果 ---------- 14

4.　最適化に関する検討 ---------- 25
　4.1　SMART ---------- 25
　4.2　給水加熱器の解体撤去作業に係る最適化の試計算 ---------- 27

5.　まとめ ---------- 33

謝辞 ---------- 34
参考文献 ---------- 35

CONTENTS

1. Introduction ---------- 1

2. Outline of Decommissioning of FUGEN ---------- 3
   2.1 Facilities of Decommissioning ---------- 3
   2.2 Dismantling Method for Facilities of Decommissioning ---------- 3
   2.3 Decommissioning Work during Spent Fuel Transfer ---------- 4
   2.4 Issues on Dismantling Scenario ---------- 5

3. Evaluation of Project Management Data ---------- 13
   3.1 Dismantling Scenario ---------- 13
   3.2 Evaluation Model ---------- 14
   3.3 Evaluation Results ---------- 14

4. Study on Optimization ---------- 25
   4.1 SMART ---------- 25
   4.2 Trial Calculation of Optimization for Dismantling of Feedwater Heater - 27

5. Summary ---------- 33

Acknowledgement ---------- 34
References ---------- 35

図表一覧

表の一覧

表 2.1　「ふげん」の開発の経緯
表 2.2　「ふげん」の廃止措置の基本工程

表 3.1　設置場所での作業に要する人工数，二次廃棄物発生量及び切断片重量
表 3.2　切断片の細断準備に要する人工数計算結果
表 3.3　作業スペースの開放に要する人工数の計算結果
表 3.4　新設作業スペースでの作業に要する人工数及び二次廃棄物発生量の計算結果
表 3.5　給水加熱器の解体撤去作業に要する人工数及び二次廃棄物の計算結果

表 4.1　各シナリオの基準値とグレード
表 4.2　各基準の重要度と加重係数
表 4.3　各シナリオの総合評価点

図の一覧

図 2.1　「ふげん」の原子炉冷却系と主要仕様
図 2.2　廃止措置対象施設の推定汚染分布
図 2.3　「ふげん」から発生する解体撤去物とその処分
図 2.4　「ふげん」の施設解体イメージ
図 2.5　これまでに実施した解体撤去作業及び汚染の除去作業の範囲
図 2.6　タービン建屋において解体撤去作業が行われた設備
図 2.7　第 3 及び第 4 給水加熱器の解体撤去作業
図 2.8　第 5 給水加熱器の解体撤去作業
図 2.9　主蒸気管及び主要弁の解体撤去作業
図 2.10　解体撤去物の施設内での一時保管

図 3.1　給水加熱器の解体撤去作業の作業フロー
図 3.2　給水加熱器の解体撤去作業に要する人工数の計算結果
図 3.3　給水加熱器の解体撤去作業で発生する二次廃棄物量の計算結果

図 4.1　最適シナリオと加重係数の関係

This is a blank page.

1. はじめに

我が国では現在 53 基の原子力発電所が稼動しているが，古いものは既に 40 年を超えて運転が続けられている．これらは高経年化対策を施すことにより最大 60 年までの運転が可能とされているが，いずれ運転を停止して廃止措置する時が来る．平成 22 年 6 月現在，運転を停止して廃止措置を進めている原子力発電所は，日本原子力研究開発機構（以下，原子力機構）が所有する「ふげん」を含めて 4 基に達している．これらを含め，近い将来に幾つかの原子力発電所が停止して廃止措置が必要になるため，より合理的に廃止措置プロジェクトを進めるための検討が必要である．

原子力機構は中期計画に従って様々な原子力施設の廃止措置を進めている．原子炉廃止措置研究開発センター(以下，センター)で進められている「ふげん」の廃止措置はその計画が平成 20 年に認可されて，廃止措置に係る作業を開始した．「ふげん」廃止措置プロジェクトでは，将来実施される商業用原子力発電所の廃止措置を念頭において，解体撤去や除染等の作業に係る様々なデータを取得し，それらを分析して商業用原子力発電所の安全で合理的な廃止措置の計画策定と実施に役立つよう取りまとめていく予定である．特に，機器の解体撤去作業では，作業に要した人工数，作業員の被ばく線量，廃棄物の発生量等のプロジェクト管理データ(以下，管理データ)を収集するとともに，予め評価したこれらの値と比較して，評価方法の妥当性等の検討を進めている．

他方，福井大学は平成 21 年に附属国際原子力工学研究所を開所した．本研究所は平成 23 年度には原子力施設が集まっている敦賀市に移行する予定であり，原子力機構と密接に連携して原子力の研究開発及び教育を進める予定である．また，原子力工学研究の一分野として廃止措置研究部門が設けられ，センターと連携を取って廃止措置に係る研究開発も進められる．

合理的な廃止措置を進めるためには，管理データを事前に評価することに加えて，その結果を用いて想定される様々な解体撤去作業の選択肢(シナリオ)の中から，より適切な(最適な)ものを選択することが必要かつ重要である．例えば，大型機器の解体撤去作業の場合，機器を細かく切断して容器に収納するまでの作業をその場で連続して行うのか，粗断した機器を別の場所で細断して容器に収納するのかなどについて，様々な条件を考慮したシナリオの選定が必要となる．廃止措置の研究分野では，この様な選択のための意思決定に係る研究はほとんどなされておらず，今後の重要な検討課題である．

このような背景の下，平成 21 年度から原子力機構と福井大学が共同して，解体撤去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研究を実施することとした．本共同研究では，「ふげん」を対象に，設備･機器の解体撤去作業に関して幾つかのシナリオを想定し，人工数や廃棄物発生量を計算し，その結果に基づいて幾つかのシナリオのうち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「ふげん」で最近実施された給水加熱器の解体撤去作業に基づき，幾つかの解体シナリオを想定して管理データを評価し，多基準意思決定法（MCDA : Multi-Criteria Decision Analysis）の１つである SMART（Simple Multi-Attribute Rating Technique）を用いて最適なシナリオを決定するための方法に係る検討を行った.

本報告書は，これらの共同研究の成果をまとめたものである.

2.「ふげん」の廃止措置の概要

「ふげん」は，図 2.1 に示す電気出力 165MWe の重水減速沸騰軽水冷却圧力管型原子炉であり，表 2.1 のように昭和 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，廃止措置の準備として使用済燃料輸送及び重水搬出，解体計画を具体化するために必要な構造物や機器･配管類の放射化評価手法の開発や汚染評価手法の最適化，これらの手法を適用した残留放射能量の調査，原子炉本体解体等の技術開発，放射性廃棄物の処理処分検討，処理設備の設置の検討等を行ってきた．

それらの結果をとりまとめて，平成 18 年 11 月 7 日に原子炉等規制法に基づく「廃止措置計画」の認可を申請し（平成 19 年 12 月 28 日に一部補正），平成 20 年 2 月 12 日に計画の認可を受け，廃止措置段階に移行した．

「ふげん」の廃止措置は，その期間を 4 つに区分して段階的に進める計画であり，原子炉設置許可を受けた原子炉及びその附属施設等の解体撤去を平成 40 年度までに完了する予定である．

2.1 廃止措置対象施設

廃止措置対象施設の範囲は，原子炉本体，核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設等の「原子炉設置許可」または「原子炉設置変更許可」を受けた原子炉及びその附属施設等である．ただし，汚染のないすべての地下の建屋及び構造物並びに基礎は除くこととしている．図 2.2 に廃止措置対象施設の推定汚染分布を示し，図 2.3 に放射性固体廃棄物及び解体廃棄物の推定発生量を示す．

2.2 廃止措置対象施設の解体方法

使用済燃料を貯蔵していること，廃止措置工事に関する経験･実績を蓄積すること，原子炉運転中の定期検査時と同等以下の被ばく線量となる放射能減衰を考慮すること等から，廃止措置の期間を 4 段階に区分し，以下の順序で実施する．表 2.2 に廃止措置の基本工程を，図 2.4 に解体手順のイメージを示す．

① 使用済燃料搬出期間

使用済燃料搬出及び重水搬出を計画的に行うとともに使用済燃料の貯蔵に係る安全確保のための機能を維持管理し，その機能に影響を与えない範囲で，供用を終了した放射能レベルの比較的低い施設･設備及び汚染のない施設･設備の解体撤去作業を行う．

② 原子炉周辺設備解体撤去期間

使用済燃料の搬出完了等に伴って供用を終了した放射能レベルの比較的低い施設･設備及び汚染のない施設･設備の解体撤去作業を行うとともに，原子炉領域の解体撤去作業に用いる遠隔解体装置等の設置範囲にある干渉設備･機器等の解体撤去作業を行う．

③ 原子炉本体解体撤去期間

原子炉運転中の定期検査時と同等以下の被ばく線量となる放射能減衰を考慮，かつ，上記①，②の期間に蓄積した廃止措置工事に関するデータ，経験･実績を活かして，放射能レベルの比較的高い原子炉領域の解体撤去作業を行う．また，汚染したすべての設備・機器等の解体撤去作業を行い，建屋及び構造物の汚染の除去工事完了後に，すべての管理区域を順次解除する．

④ 建屋解体期間

管理区域を解除した建屋及び汚染のない建屋も含めて廃止措置対象施設を解体する．

2.3 使用済燃料搬出期間における廃止措置作業

使用済燃料搬出期間においては，認可された廃止措置計画に従って，使用済燃料及び重水の搬出を計画的に実施するとともに，使用済燃料の貯蔵の安全確保に係る機能を維持管理しながら，その機能に影響を与えない範囲で供用を終了した設備･機器等の解体撤去作業に着手している．

使用済燃料搬出期間に解体に着手する対象施設は，供用を終了した放射能レベルの比較的低いもしくは汚染のない「原子炉冷却系統施設」「計測制御系統施設」「気体廃棄物の廃棄施設」「放射線管理施設」「原子炉格納施設」である．

図 2.5 に示すように，これまでに「原子炉冷却系統施設」のうちタービン設備の一部の解体撤去工事を行うとともに，重水･ヘリウム系統の汚染の除去工事に着手している．

(1) 解体撤去工事

原子炉本体の本格的な解体撤去の開始時期までに解体撤去物等の保管場所や廃棄物の物流ルートの確保，解体撤去物等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若しくは汚染のないタービン設備等の解体を行っている．図 2.5～図 2.9 に示すように，これまでに，主蒸気管及びタービン主要弁，第 3～5 給水加熱

器等の解体撤去を行うとともに，解体撤去物は図 2.10 のように施設内に一時的に保管している．

これらの解体撤去物は，解体撤去作業と並行して，今後，クリアランス制度を適用して再利用等を進めていく計画である．

(2) 汚染の除去工事

重水･ヘリウム系統には，系統構造上，重水や運転中に生成されたトリチウムが残留している箇所があることから，ドレン操作や重水が残留している箇所の切断，穿孔等によりトリチウムを含む重水を回収している．また，機器･配管等の内面に付着して残留する重水とトリチウムを除去するため，乾燥空気の通気，局所加熱や真空引きを行う専用の除去装置を系統に接続して除去･回収作業を進めている．

さらに，残留する重水とトリチウムを除去した系統のうち，汚染の程度が大きい機器・配管等に対して，解体撤去作業時の放射性腐食生成物の拡散防止や作業者の被ばく低減を図るため，化学除染等を適用して汚染を低減・除去する準備を進めている．

2.4　解体撤去作業に係る解体シナリオの課題

これまでに実施された解体撤去作業の中で，第 3･4 給水加熱器の撤去については，なるべく早くその設置場所を開放し，そこにクリアランス対象物の除染装置を設置することが有効であるとされた．このため，これら給水加熱器をその場で細断して収納容器に収納せず，粗断した切断片を別の場所へ移動し，そこで一時保管するという方法がとられた．しかし，粗断された切断片は最終的には細断し収納容器に収納する作業が必要であるため，解体撤去作業を 2 段階に分けて実施することは，設置場所で連続して進める作業（収納容器への収納）に比べて作業効率が低下すると考えられる．このように解体撤去作業を実施するうえでは，何を重要と考えるか（ここでは，評価基準として給水加熱器設置場所の開放時期か作業効率）によって，解体シナリオが変わってくる．その場合，一方の評価基準が必ずしも絶対的に優先されるわけではなく，評価基準間の重要度を比較することにより，解体シナリオが決められることになる．従って，解体シナリオを検討するに当たっては，これらの要因を含めて総合的に考慮した扱いが必要となる．

今後，「ふげん」の解体工事が進められる中で様々な状況を考慮して上述したような作業シナリオの設定や最適なシナリオの選択が求められることになる．以下は，その例である．

- 機器を解体撤去前に除染するか，解体撤去後に除染するか

- 高濃度に汚染した設備・機器の解体を遠隔操作で行うか，直接解体で行うか
- 廃棄体化に至る手順で，廃棄体化のための一部作業（分別，測定）を解体直後に行うか，解体物を一時保管しておき本格的な廃棄体化の段階で行うか
- コンクリートのクリアランスについて，解体前にクリアランス検認を行うか，解体後に行うか
- 除染してクリアランスするか，除染せずに廃棄物とするか

本報告書では，最適化の検討事例として，給水加熱器解体撤去工事において，その場で解体収納するか，別の場所へ移動して解体収納するか，というシナリオを取り上げ，最適なシナリオの選択について検討する．

表 2.1　「ふげん」の開発の経緯

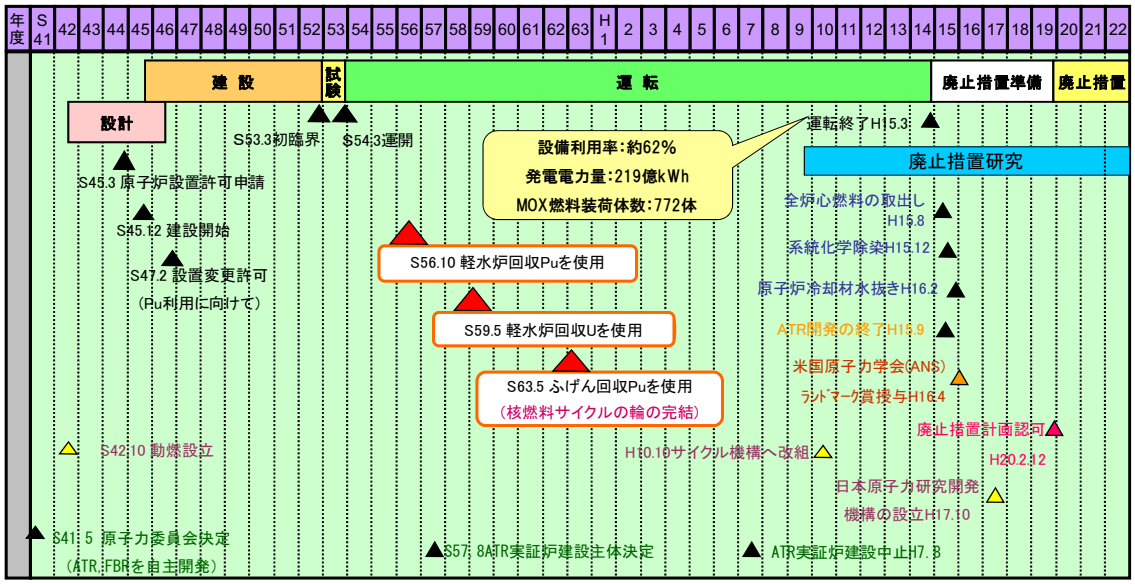
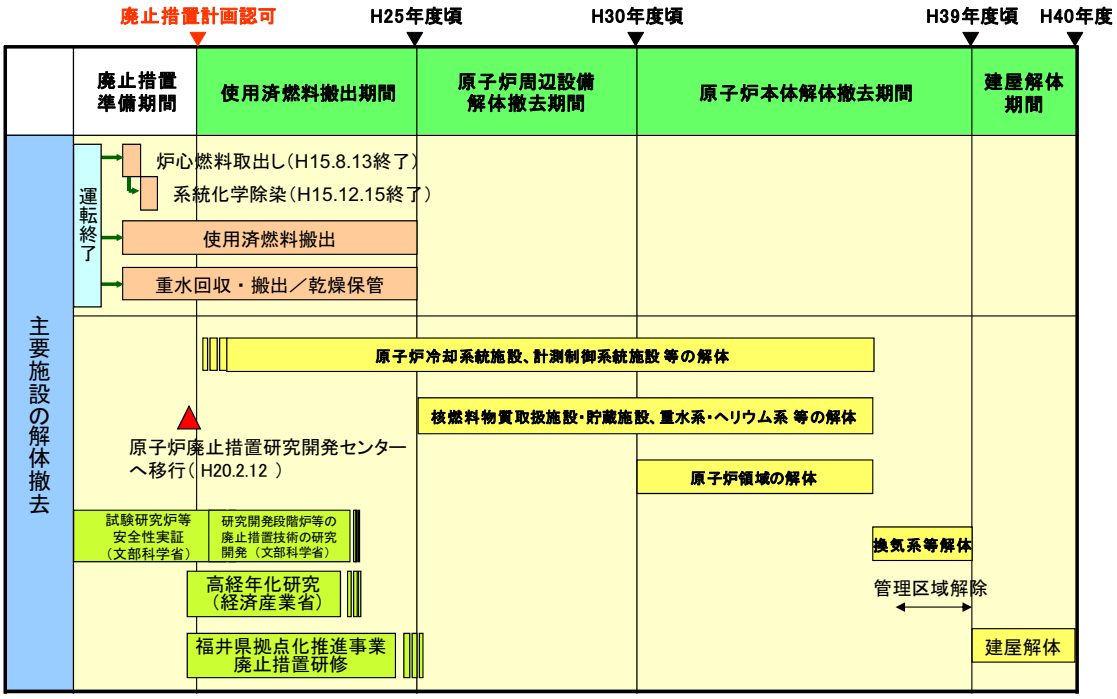
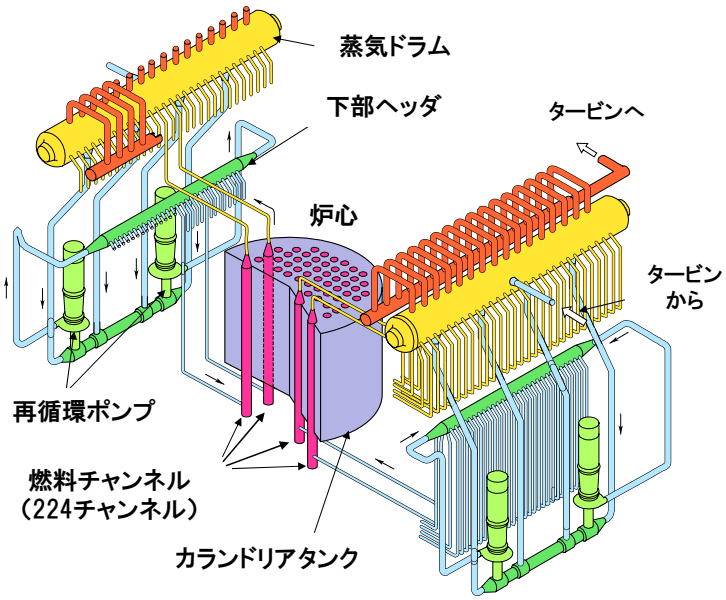


表 2.2　「ふげん」の廃止措置の基本工程





原子炉出力	熱出力: 557 MWt 電気出力: 165 MWe
炉心	高さ : 3,700 mm 直径 : 4,050 mm 燃料チャンネル数 : 224
重水系	重水装荷重量 : 160 t 重水温度: 70 °C
原子炉 冷却系	冷却材 : 軽水（H_2O） 圧力 : 68 kg/cm^2 温度 : 284 °C （蒸気ドラム部） 炉心流量: 7,600 t/h 再循環回路数: 2ループ

図 2.1　「ふげん」の原子炉冷却系と主要仕様

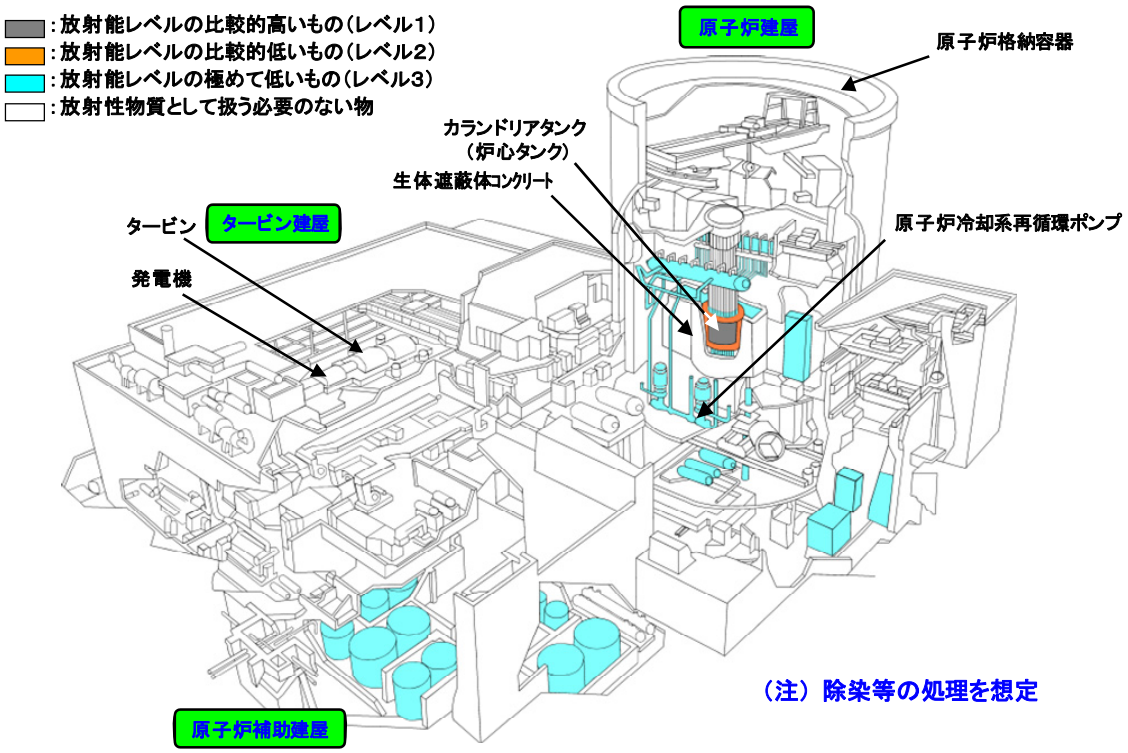


図 2.2　廃止措置対象施設の推定汚染分布

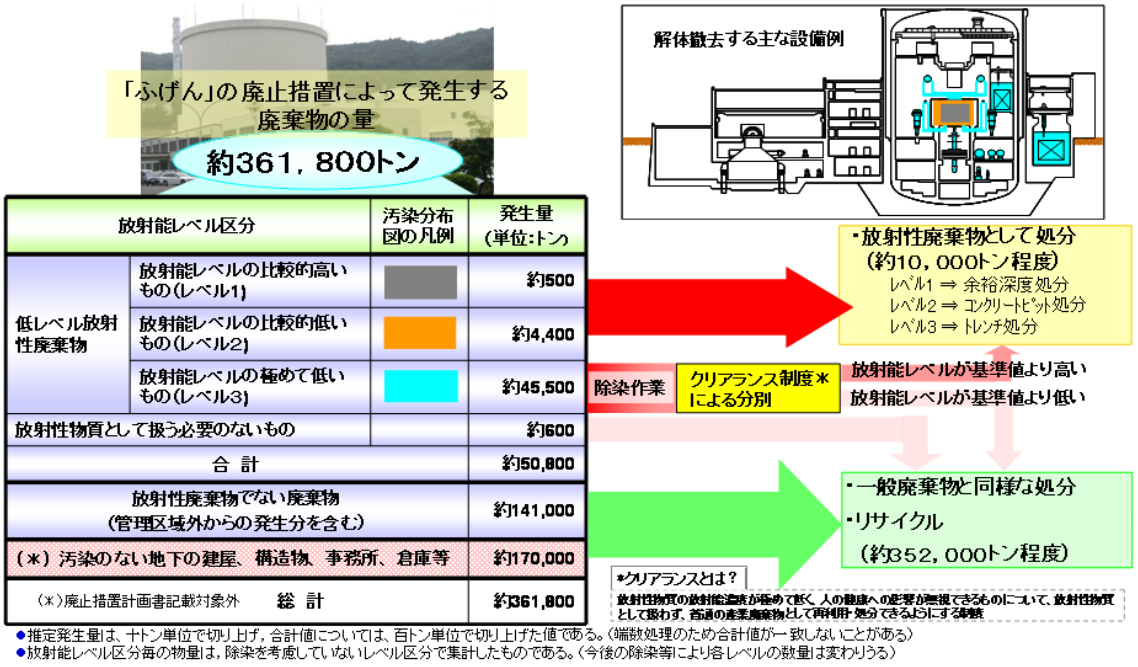


図 2.3 「ふげん」から発生する解体撤去物とその処分

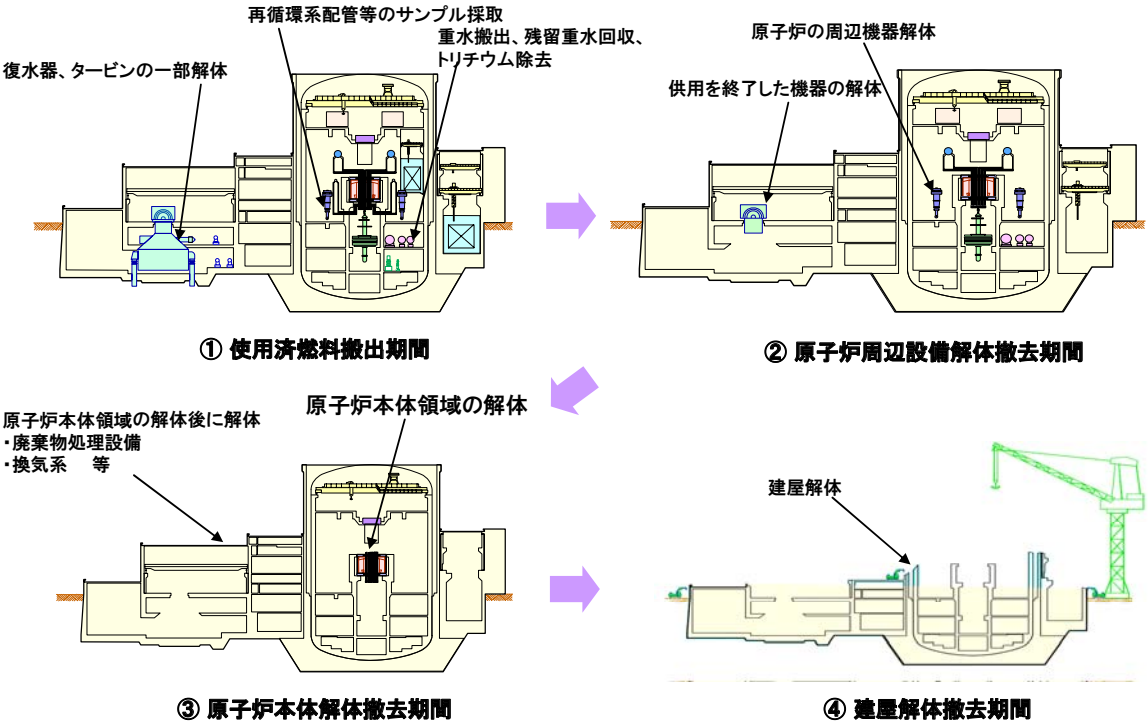


図 2.4 「ふげん」の施設解体イメージ

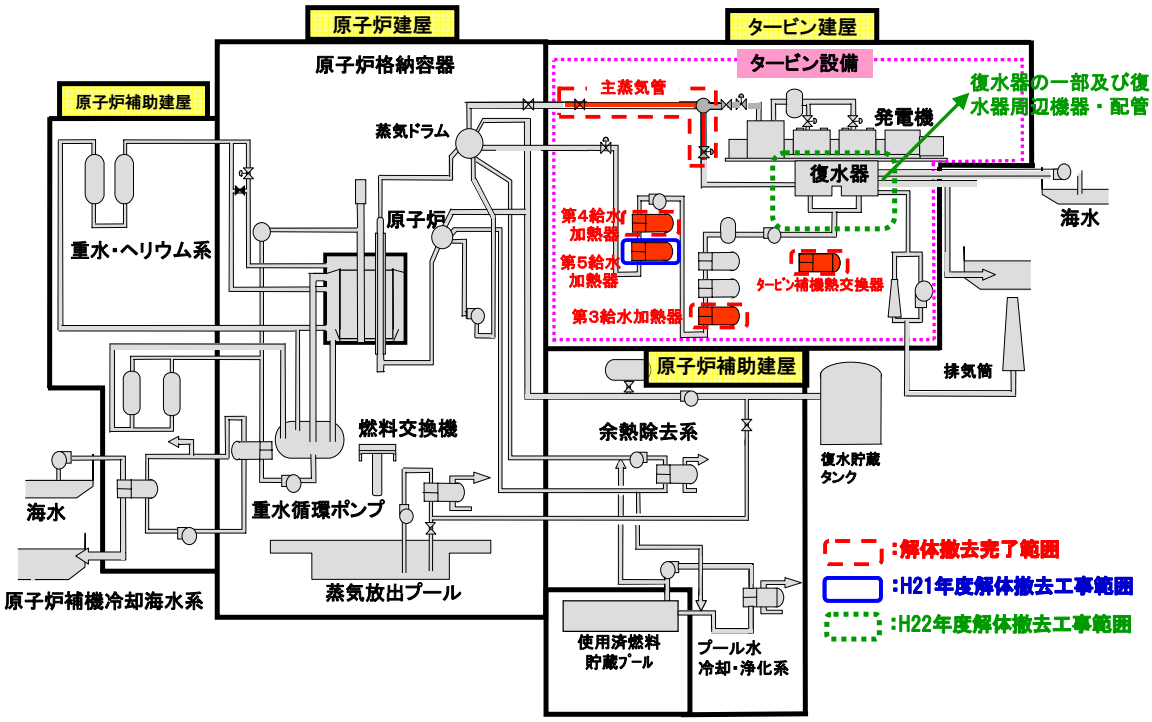


図 2.5　これまでに実施した解体撤去作業及び汚染の除去作業の範囲

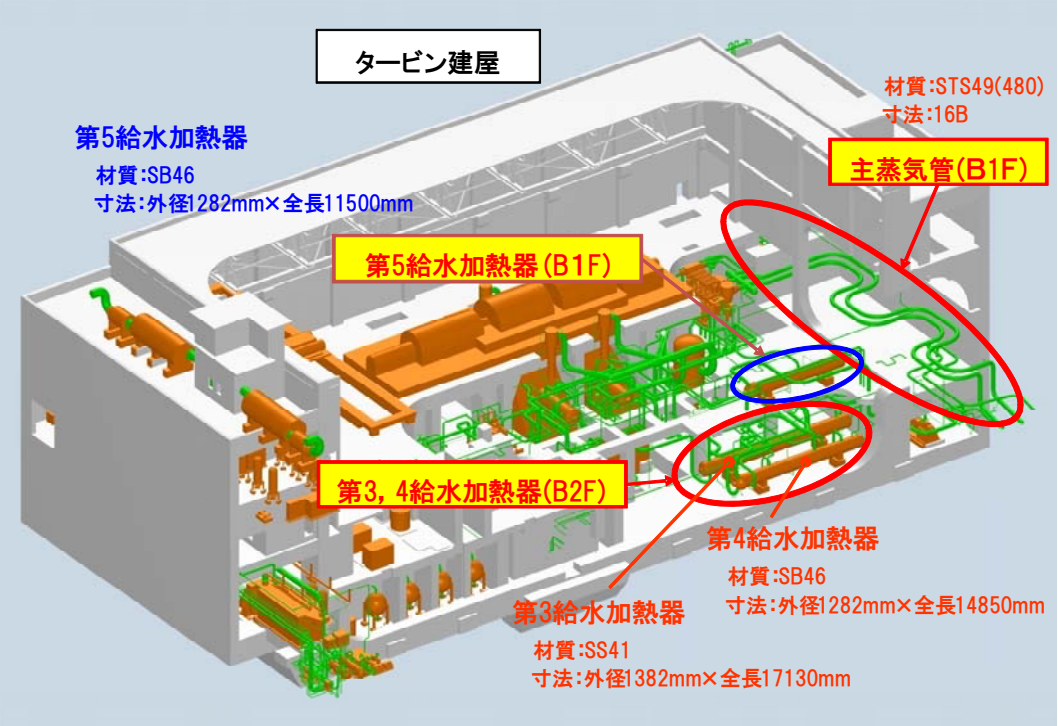


図 2.6　タービン建屋において解体撤去作業が行われた設備

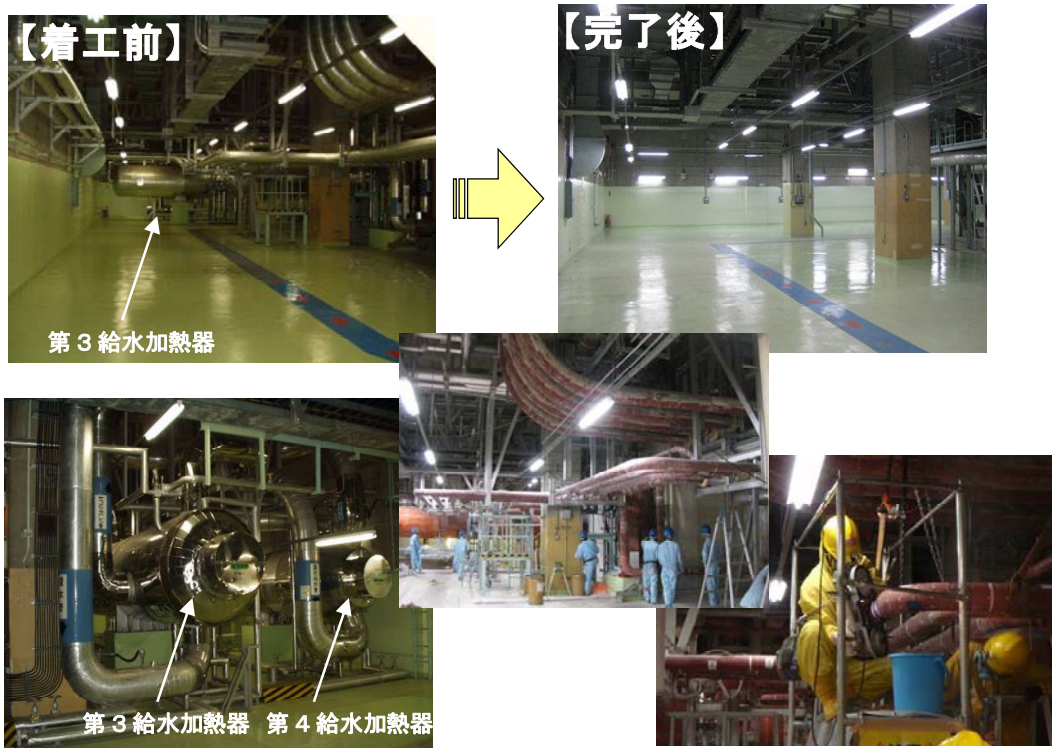


図 2.7　第 3 及び第 4 給水加熱器の解体撤去作業

図 2.8　第 5 給水加熱器の解体撤去作業

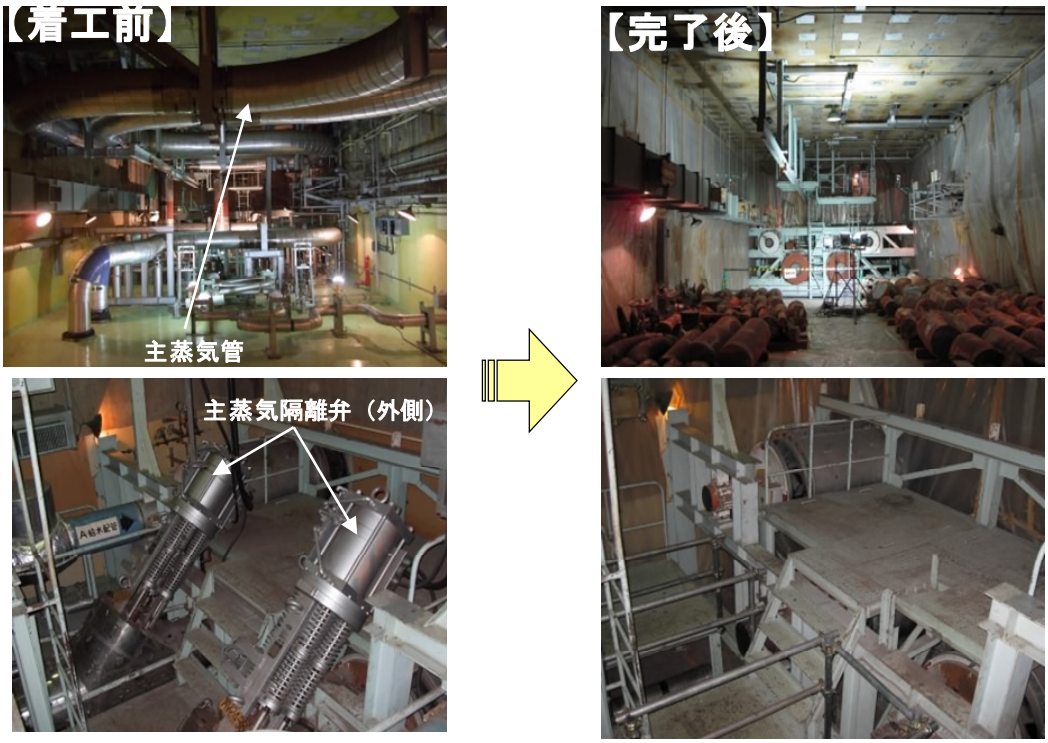


図 2.9　主蒸気管及び主要弁の解体撤去作業

図 2.10　解体撤去物の施設内での一時保管

3. 管理データの評価

平成 20 年度に「ふげん」で実施された給水加熱器に係る解体撤去作業を参考に，給水加熱器の解体撤去作業に関して様々なシナリオを想定して，作業人工数，撤去に要する人工数及び二次廃棄物発生量等の管理データを評価した．以下に，評価対象シナリオ，評価モデル，及び評価結果を述べる．

3.1 評価対象シナリオ

給水加熱器の撤去に要するモデルケースとして，30 ton の給水加熱器の撤去を想定した．この重量に対応する給水加熱器の体積は，「ふげん」の第 3･4 給水加熱器の機器重量 m (ton)と体積 V (m^3)との関係（V=1.075×m）を用いると，32.25 m^3 になる．また，その長さは給水加熱器の半径を 1 m としたときに 10.3 m になる．本計算では，給水加熱器に対してこれらの形状データを設定した．

解体撤去作業のシナリオについては，①給水加熱器を設置されている場所及びその周辺（以下，設置場所）で切断し解体物を収納容器に収納する場合，及び，②初めに粗断した粗断片を別の場所に移動･保管（以下，仮置）し，その後に別の場所で切断(細断)･収納する場合を想定した．後者は，給水加熱器が設置されているスペースをその撤去後になるべく早く別の目的，例えば，収納容器の一時保管場所，機器の除染装置の設置等に利用したい場合に想定されるシナリオである．ここでは，その利用開始時期が粗断の回数に依存すると考え，粗断の回数をパラメータとして以下のケースを想定した．

シナリオ 1 : 設置場所で細断･収納まで行うケース

シナリオ 2 : 設置場所で粗断せず給水加熱器を仮置し，後に細断場所まで移動してそこで細断･収納するケース．

シナリオ 3 : 設置場所で 1 回粗断した粗断片を仮置し，後に細断場所まで移動してそこで細断･収納するケース．

シナリオ 4,5,6,7 : 設置場所でそれぞれ 2,3,4,5 回粗断した粗断片を仮置し，後に細断場所まで移動してそこで細断･収納するケース．

上記シナリオでは，給水加熱器の他にこの領域に設置されている他の機器の解体撤去も行われる状況を想定しており，「作業領域養生」，「グリーンハウス設置」及び「作業領域調査」等のエリア全体に係る準備作業が必要となる．しかし，これらの作業はシナリオに依らず共通でありシナリオ間で作業人工数に相違がない．最適なシナリオの検討に当たっては，シナリオ間の相違が問題となる．そこで，ここではこれらの作業人工数の評価は対

象外とし，給水加熱器の設置場所での作業として，「給水加熱器の撤去」及び解体撤去物を入れる「収納容器搬入」及び「廃棄物搬出」を評価の対象とした．上記の各シナリオで，評価の対象とした作業のフローを図 3.1 に示す．

3.2 評価モデル

評価には，原子力機構が開発した原子炉施設解体計画のための管理データ評価システム[1]を用いた．この評価システムは，解体対象機器の物量(機器の重量等)及び解体作業手順等を入力とし，解体撤去作業に係る人工数，廃棄物発生量等を計算する．人工数の評価に関する計算モデルは，解体撤去作業の内容を階層構造で表現した作業構成（WBS：Work Breakdown Structure）で表す部分と，各作業項目に対する人工数評価のための評価式から構成される．WBS は，作業手順を含む一連の作業内容を大項目から中項目，小項目と順次分類整理し，最終的に計算モデル上の最小単位となる作業（以下，単位作業）までの階層構造として表現したものである．一方，各単位作業に対しては，例えば機器の重量等に依存した人工数を計算するための評価式が与えられている．こうして，WBS を作成し，各機器の重量等のデータを与えることにより，評価式に基づいて対象とする機器の解体撤去作業に要する作業人工数を求めることができる．

これまでに開発された従来の評価モデルは，JPDR における解体撤去作業の実績データの分析に基づいて作成されたものである．この評価モデルが，そのまま「ふげん」における解体撤去作業に適用できるかは自明でないことから，その適用性を検証し適用不可の部分については改良または作成する必要がある．従来の評価モデルの適用可能性を検討するために，平成 20 年度に実施されたタービン建屋給水加熱器室内機器の解体撤去作業に従来の評価モデルを適用するとともに，実績データの分析を行い[2]-[4]，その結果に基づき評価モデルを改良した．改良した評価式は実績データをよく再現しその有効性を確認した．

本共同研究では，上記の検討に基づき作成された評価モデルを用いて，管理データを評価した．

3.3 評価結果

(1)設置場所での作業に要する人工数の計算結果

ここでの作業は，図 3.1 における(A)a-1，a-2，a-3；(B)b-1；(C)c-1 に対応している．

給水加熱器の粗断･細断･収納の作業を設置場所で行った場合(シナリオ 1)に係る作業員の人工数は，既存の評価モデルの単位作業係数を用いて，

解体（粗断，細断，収納）：26.3×30×5/7 = 563.6 人･時, (3.1)

収納容器搬入に要する作業：(0.4×30) /0.18×5/7 = 47.6 人･時, (3.2)

収納した廃棄物の搬出に要する作業：(1.2×30)/0.18×5/7 = 142.9 人･時, (3.3)

合計：563.6 + 47.6 + 142.9 = 754.0 人･時, (3.4)

となる．ここで，係数 5/7 を考慮したのは次の理由による．単位作業係数は，JPDR で行われた解体撤去作業を基に作成されており，監督者 1 人，作業員 5 人，放射線管理者 1 人の作業クルー構成（作業者全員：7 人）として設定されている．このため，作業員の人工数の割合は作業者全員の人工数の 5/7 倍になる．ここで，作業員の人工数を評価しているのは，作業期間(作業に要する時間または日数)は作業員のみの全人工数を1日あたりの作業員の投入人工数で除したものとなるからである．

一方，給水加熱器の設置場所では粗断･仮置しか行わないとした場合（シナリオ 2～7）には，「ふげん」で行われた作業と同様に，設置場所では「収納容器搬入」及び「廃棄物搬出」に要する人工数は発生しないとした．これらの作業は，切断片を別の場所まで移動し，そこで細断･収納する作業の中で考慮した．粗断･仮置に要する人工数は，「ふげん」の第 3･4 給水加熱器室での実績データの分析より得た分割数も考慮に入れた以下の評価式を用いて [4]，求めることが出来る．

$$[\ 3.49\times m\times n + 28.6\times n + 30\times(n + 1) + 0.68\times m + 24.5\ ]\times 5/7. \qquad (3.5)$$

ここで，n は分割数である．分割数は，粗断を行わずにそのまま撤去するシナリオ 2 では 0 回，他のシナリオ 3～7 では，それぞれ 1～5 回となる．

作業員の装備による二次廃棄物発生量は，係数（0.0982 kg/人･時）と人工数を与える式(3.4)又は(3.5)を用いて評価した．設置場所での作業に要する人工数，二次廃棄物発生量及び切断片重量を表 3.1 にまとめる．

(2)切断片の細断に要する人工数

粗断･仮置により別場所に移設した給水加熱器の切断片の細断･収納までに要する人工数は，①細断を行うための作業スペースの設置及びそのスペースへの切断片の移動，②細断及び収納，③作業スペースの開放の 3 段階に分けることが出来る．以下では，これらを個別に評価する．

① 作業スペースの設置及び切断片の移動に要する人工数

ここでの作業は，図 3.1 における(B)b-2，b-3 及び(C)c-2，c-3 に対応している．

細断･収納の作業は設置場所とは別の場所で行うために，作業スペースを新たに設置する必要がある．これに係る作業項目は，通常の準備工程と同様に，「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」,「足場設置」,「解体範囲設定」及び「収納容器搬入」であるとした．ここで，管理データ評価システムにおいて，「解体範囲設定」とは“解体撤去する機器や構造物を特定し，解体する機器，切断箇所，放射能レベル区分を設定して印をつける作業”と定義されている[5]．

これらの作業項目に要する人工数のうち，「作業領域養生」,「グリーンハウス設置」,「資材機器搬入」,「足場設置」，及び「解体範囲設定」は作業対象域の面積に依存する．そのために必要な面積の計算を行った．

足場面積：

幅 1 m とし，切断片の両脇の 2 箇所に設置することとした．給水加熱器の長さは 10.3 m であるので，分割数 0 回の場合は，1×10×2 = 20 m^2 となる．分割数が 1 回，2 回･･･5 回と増加するに伴い，切断片の長さは 5 m，3.3 m･･･1.7 m となる．

設置するグリーンハウスの面積：

エリア面積と機器重量との関係より評価した．すなわち，報告書「JAERI-Data/Code 98-010」[5]に示された作業エリア面積と機器重量との間には相関が確認できることから，そのデータを用いて面積 Y(m^2)と重量 m(ton)の間に $Y = 4.42 \times m$ の相関式を導いた．この相関式と表 3.1 に示す切断片重量を用いて設置するグリーンハウスの面積を求め，この面積を「作業領域養生」,「グリーンハウス設置」,「資材機器搬入」の面積とした．

「解体範囲設定」の面積：

分割前の給水加熱器の投影面積（2×10.3 = 20.6 m^2）で一定とした．

(3.5)式で示している給水加熱器の粗断･仮置に要する人工数の評価式において，切断片の移動に要する人工数は，管理データ評価システムにある単位作業「解体用機器撤去」: L3 重機類の撤去に要する人工数で評価している．また，新たに設置した作業スペースへの切断片の移動に要する人工数も同様に「解体用機器撤去」: L3 重機類の撤去に要する人工数で評価した．このとき，切断片の重量は今回の評価では考慮に入れていない．

「収納容器搬入」に要する人工数は，設置場所で粗断･細断･収納を行った場合と同じである．

以上の評価方法で得られた，切断片の細断準備に要する人工数の計算結果を表 3.2 に示す．

② 細断及び収納に要する人工数：

ここでの作業は，図 3.1 における(B)b-4，(C)c-4 に対応している．

粗断･仮置した切断片もその重量は数 ton 以上であり，開口部にも溶接で蓋をしており，外観上は切断片 1 つが新たに給水加熱器のようなものになっている．このため，切断片の細断･収納に要する人工数は，式(3.1)で示しているのと同じく，30 ton の給水加熱器を粗断･細断･収納する作業に要する人工数と同等とした．すなわち，

切断片の細断･収納に要する人工数：26.3×5/7×30 = 563.6 人･時，

である．

③ 作業スペースの開放に要する人工数：

ここでの作業は，図 3.1 における(B)b-5，(C)c-5 に対応している．

作業スペースの開放に係る作業項目は，「資材機器搬出」，「足場撤去」，「片付け整理」，「グリーンハウス撤去」，「解体用機器搬出」及び「廃棄物搬出」で構成されているとした．ここで，「廃棄物搬出」に要する人工数は，設置場所で粗断･細断･収納を行った場合の「廃棄物搬出」に要する人工数と同じとした．これらの作業項目の中で，「資材機器搬出」，「片付け整理」，「グリーンハウス撤去」及び「足場設置」は，それぞれ面積に依存する評価式を用いて計算した．①の作業スペースの設置と同様にして行った作業スペースの開放に要する人工数の評価結果を表 3.3 に示す．

他方，作業スペースの設置及び切断片の移動に要する人工数（表 3.2），細断及び収納に要する人工数，及び作業スペースの開放に要する人工数(表 3.3)の計算結果を基に，切断片の細断の全工程に要する人工数及び二次廃棄物発生量を求めた．ここで，二次廃棄物には作業員の装備品に由来するものに加えて，グリーンハウスや床の養生で使用したビニールシートも考慮する必要がある．このビニールシートの発生量は 1 m² 当たり 0.1012 kg になることが見込まれる．表 3.4 に，切断片の細断･収納に要する全人工数，及び，そのときに発生する二次廃棄物発生量の合計を示す．

(3)人工数と二次廃棄物発生量のシナリオ間の比較

給水加熱器を設置場所で粗断･細断･収納を行った場合と，設置場所では粗断･仮置を行い，別の場所において細断･収納を行った場合に要する人工数及び二次廃棄物発生量の比較を行う．式(3.4)，表 3.1 及び表 3.4 より，全工程に要する人工数及び二次廃棄物発生量を表 3.5 及び図 3.2，3.3 に示す．

給水加熱器の設置場所で，粗断･細断･収納までを一括で行う場合(シナリオ 1)，廃棄物の搬出に使う収納容器の搬入などに要する人工数を考慮に入れると，754.0 人･時を要することが見込まれる．この作業におけるクルーが 7 人（監督：1 人，作業員：5 人，放射線管理員：1 人）1 日当たりの作業時間を 4 時間としたとき，37.7 日の工程になる．一方，設置場所では粗断･仮置しか行わない場合，その後行う細断･収納に要する人工数を考慮すると設置場所で一括に行う場合よりも人工数が多くなるが，設置場所での作業期間は分割数を 0 回としたとき(シナリオ 2)は 2.7 日，1 回のとき(シナリオ 3)は 8.5 日の工程になる．また，分割数を 6 回以上行った場合，設置場所での作業に要する人工数は粗断･細断･収納を一括で行った場合よりも多くなる．この場合，設置場所での作業が多くの制約を受ける場合で無い限り，この方法を用いるのは得策ではない．

設置場所では粗断･仮置の作業を行い，その後別の場所で細断･収納までの工程を行う場合，別の場所での人工数は分割数が 0 回の方が最も多く，分割数が多くなるにつれて減少する．これは，細断を行うための準備及び後処理に要する人工数が新たに設置する作業スペースの面積に依存していること，そしてこの面積は切断片の大きさ及び重量に依存していることによる．この結果，設置場所では粗断･仮置を行い，別の場所で細断･収納を行ったときに要する人工数は分割数が 1 回のときが最も少なかった．

また，これらの作業による二次廃棄物発生量は粗断･仮置を行った場合には人工数と同じで分割数が 1 回のときが最も少ない値を示したが，分割数が 0 回のときの二次廃棄物発生量は 5 回のときより多い値を示した．これは，細断･収納のための作業スペースの設置のために必要な作業員の装備及び設置したグリーンハウスの大きさが切断片の大きさに大きく依存しているためである．

表 3.1　設置場所での作業に要する人工数，二次廃棄物発生量及び切断片重量

	分割数（回）	人工数（人･時）	Δ1	二次廃棄物発生量（kg）	Δ2	切断片重量（ton）
粗断･細断･収納	－	754.0	－	74.0	－	－
粗断･仮置	0	53.6	700.4	5.3	68.8	30
	1	170.2	583.9	16.7	57.3	15
	2	286.8	467.3	28.2	45.9	10
	3	403.3	350.7	39.6	34.4	7.5
	4	519.9	234.2	51.1	23.0	6
	5	636.4	117.6	62.5	11.6	5

・仮置場までの移動に要する人工数評価には，回数のみを考慮し，切断片重量は考慮していない

・吊りピース加工・取り付けに要する人工数は考慮していない

・Δ1：給水加熱器設置場所での人工数の差であり，（「粗断・細断・収納」の人工数）　－　（「粗断・仮置」の人工数）で定義される

・Δ2：二次廃棄物発生量の差であり，（「粗断・細断・収納」の二次廃棄物発生量）　－　（「粗断・仮置」の二次廃棄物発生量）で定義される

表 3.2　切断片の細断準備に要する人工数計算結果

分割回数	切断片重量（ton）	切断片長さ（m）	作業エリア面積（m^2）	足場面積（m^2）	設置及び移動の人工数（人･時）
0	30	10.3	130.4	20.0	414.5
1	15	5.2	89.2	10.0	274.1
2	10	3.4	75.5	6.7	240.9
3	7.5	2.6	68.6	5.0	234.5
4	6	2.1	64.5	4.0	238.8
5	5	1.7	61.7	3.3	248.5

表 3.3　作業スペースの開放に要する人工数の計算結果

分割回数	人工数 （人･時）
0	392.9
1	275.0
2	235.7
3	216.1
4	204.3
5	196.4

表 3.4　新設作業スペースでの作業に要する人工数及び二次廃棄物発生量の計算結果

分割回数	人工数	二次廃棄物発生量（kg）		
	（人･時）	作業員装備	グリーンハウス	合計
0	1371.0	134.6	40.8	175.5
1	1112.7	109.3	23.3	132.6
2	1040.2	102.1	17.0	119.2
3	1014.1	99.6	13.7	113.3
4	1006.7	98.9	11.6	110.5
5	1008.5	99.0	10.2	109.2

表 3.5　給水加熱器の解体撤去作業に要する人工数及び二次廃棄物の計算結果

	分割数（回）	人工数（人･時）				二次廃棄物発生量（kg）
		設置場所	新設作業スペース	合計	Δ*1	
シナリオ 1*2	－	754.0(37.7)*3	－	**754.0**	－	**74.0**
シナリオ 2	0	53.6(2.7)	1371.0	**1424.6**	700.4	**180.7**
シナリオ 3	1	170.2(8.5)	1112.7	**1282.9**	583.9	**149.3**
シナリオ 4	2	286.8(14.3)	1040.2	**1326.9**	467.3	**147.3**
シナリオ 5	3	403.3(20.2)	1014.1	**1417.4**	350.7	**152.9**
シナリオ 6	4	519.9(26.0)	1006.7	**1526.6**	234.2	**161.5**
シナリオ 7	5	636.4(31.8)	1008.5	**1645.0**	117.6	**171.7**

*1 設置場所での作業期間の差

*2 設置場所で粗断・細断・収納の作業を実施

*3 (　)は人工数を日で表したもの

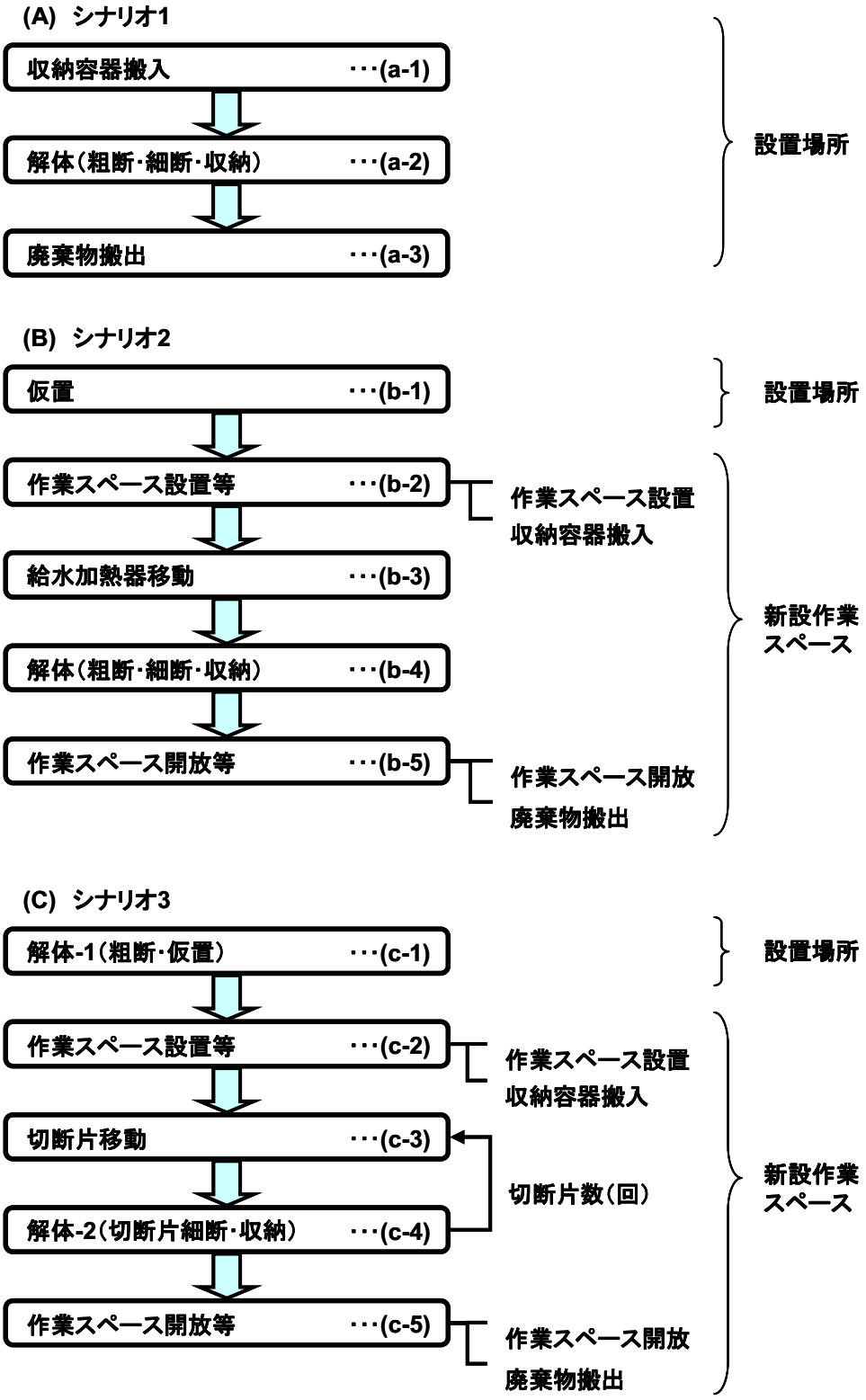


図 3.1　給水加熱器の解体撤去作業の作業フロー

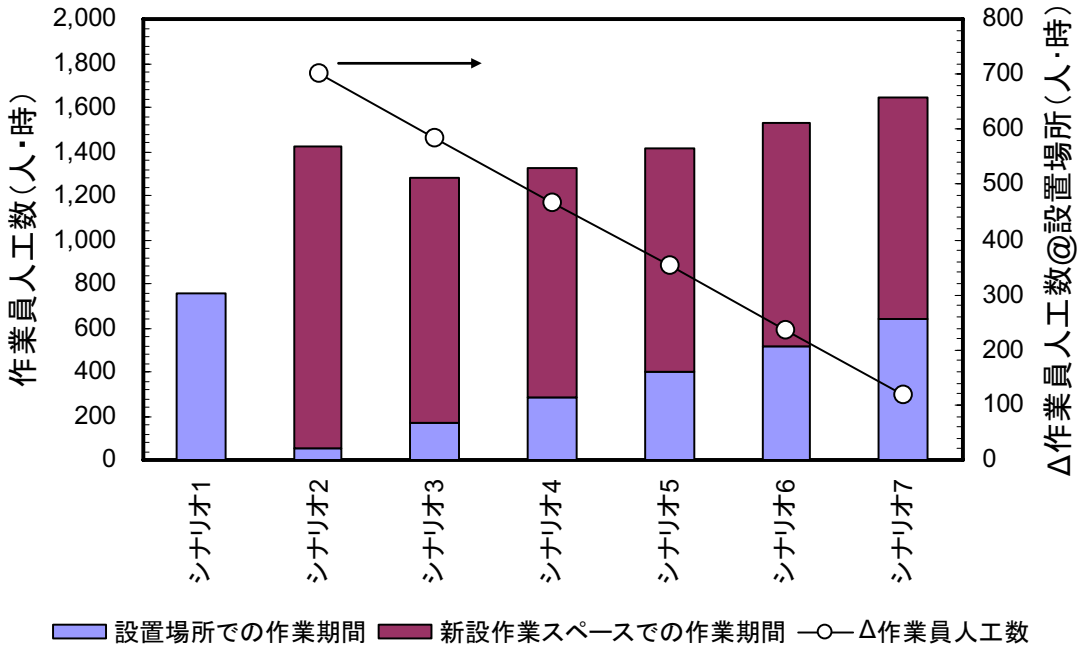


図 3.2　給水加熱器の解体撤去作業に要する人工数の計算結果

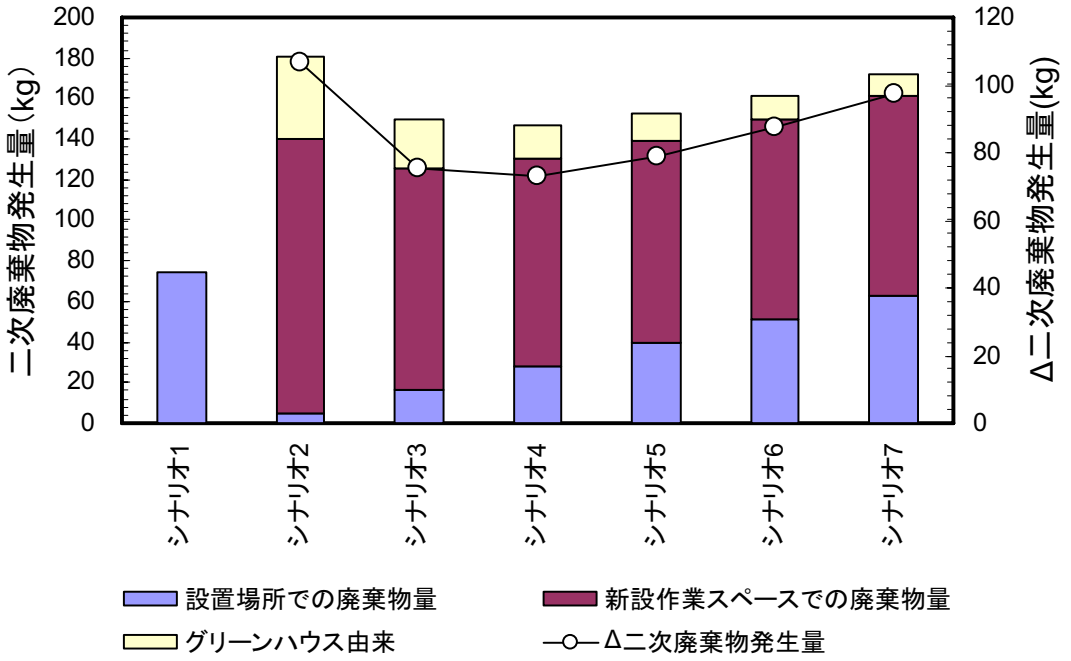


図 3.3　給水加熱器の解体撤去作業で発生する二次廃棄物量の計算結果

This is a blank page.

4. 最適化に関する検討

廃止措置プロジェクトの立案においては，予め考えられる複数のシナリオを設定して管理データの評価結果等に基づいて，最適なシナリオを検討する必要がある．ここでは，最適な評価シナリオを選定する手法について検討した．

シナリオの設定については，シナリオを特徴づけるパラメータを選定し，想定されるシナリオに関してパラメータの取り得る値を設定し，そのシナリオを具体化することが必要である．これは，廃止措置全体を対象とする場合と，廃止措置の進展に応じて当該の設備･機器を解体撤去する場合が考えられる．前者についてはシナリオを特徴付けるパラメータとして，相当数の設備･機器の解体開始時期やその解体期間等の組み合わせが考えられ膨大な数のシナリオが想定される．このため，シナリオを体系的かつ網羅的に設定することが必要となる．また，膨大な数のシナリオの中から，取扱可能な数のシナリオを効果的かつ効率的に抽出することが重要となる．後者の場合においても，施設の状況(機器の設置状況, 汚染状況等)や廃止措置プロジェクトの制約等を考えると様々なシナリオが想定される．例えば，制約としては，廃止措置の初期の段階では解体撤去物を仮置きするためのスペースの確保が考えられ，それを考慮して解体する設備･機器の範囲や解体の順序，さらに除染と解体の順序等を検討することが必要となる．また，廃止措置プロジェクトでは，例えば，廃棄物発生量をなるべく少なくすることが重要であれば，そのための解体撤去方法や手順に着目して最適なシナリオを検討することが必要となる．ここでは，廃止措置の進展に応じて設備･機器を解体撤去する場合として，3 章で扱った給水加熱器撤去に係るシナリオを対象とする．

最適なシナリオの選定については，最適化の対象とする複数の評価基準(以下，基準)を選定し各基準に対する評価値を基に各シナリオを総合的に評価することが必要である．廃止措置計画の検討に当たっては，廃止措置に要する作業人工数，放射性廃棄物発生量，設備･機器撤去後の設置場所の有効利用等，単位が異なる複数の基準を考慮する必要がある．このような問題を取扱う方法の 1 つとして，多基準意思決定法（MCDA）がある．この方法は，意思決定における各基準を無次元の量に変換したうえで各基準に対する重要度を設定してシナリオを総合評価するものである．

ここでは，MCDA の 1 つである SMART を用いて 3 章で述べた給水加熱器撤去に係るシナリオを対象に，複数のシナリオの中から最適なシナリオを選択することを目的に試計算を行った．

4.1 SMART

SMART では，各基準のとりうる値の範囲を設定し，その範囲を規格化していくつかの

グレード(評価点)に区分する．また，各基準に対して加重係数を設定する．こうして，各基準のグレードと加重係数を掛けて足し合わせたものを総合評価点とするものである．この評価基準は，数値データの様な定量的な基準だけでなく，定性的な基準である作業の難易度などの人の感覚を取り込むことができ，この様な定性的な基準も取り込んだ数値の総合評価による廃止措置の最適化への応用が期待できる．文献(6)では，具体的なグレードの区分や加重係数に対して次のような検討がなされている．

最適化の問題を一般に，m 個の基準 $P(i)$ $(i=1,2,...,m)$ が存在する場合に n 個の選択肢 A_j $(j=1,2,...,n)$ の中から最適なものを選択する問題で考える．

まず，各基準について当該問題に対して考え得る最大・最小値を与える．そして，その間をいくつか，例えば 7(4～10)に分類し，各分類にグレード（グレードが大きいほど高い評価)を与える．分類の区分点の与え方は，次の通りである．いま，最小値 $P_{\min}$ から最大値 $P_{\max}$ に至る区分点を，$P_{\min}$，$P_{\min}+e_1$，$P_{\min}+e_2$，…とする．このとき，心理物理学分野での考え方に基づき，ある区間での増加幅は，その前の区間のそれに比例するとするものとする．すなわち，

$$e_\nu - e_{\nu-1} = \varepsilon\ e_{\nu\text{-}1}\,. \tag{4.1}$$

ここで，ε は 1，すなわち隣り合う区間間の相対比は 2 とされている．このとき，7 区分の場合，ν 番目の区分値 P_ν は，

$$P_\nu = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min})2^\nu / 64\,, \tag{4.2}$$

$$\nu = 0, 1, ..., 6\,, \tag{4.3}$$

となる．こうして区分値を規定する ν とグレード g_ν の間には，グレード数を 4～10 で考えると，次の関係がある．基準値が小さいほど評価が高いものについては，

$$g_\nu = 10 - \nu\,. \tag{4.4}$$

基準値が大きいほど評価が高い場合には，

$$g_\nu = \nu + 4\,. \tag{4.5}$$

すなわち，各基準値はグレードという無次元の数値で表現された．

次に，選択肢間の比較を行うために，各基準値を基に総合評価点を求める．総合評価点は，各基準の重要度に対応する加重係数とグレードを掛けて足し合わせたものとする．基準の重要度の階層は，「極端に重要」，「かなり重要」，「より重要」，「いくぶん重要」，「同

程度」などと表現される．このとき，基準の重要度を 7 段階(グレード：4～10)で表わし，段階が 6 異なればその差 6 に対する重要度の比を 8 : 1 とすることが，人間の感覚に合致すると考えられている．この場合，隣り合うグレード間の相対比は $\sqrt{2}$ になる．

この重要度に対するグレードとその相対比が $\sqrt{2}$ であることを用いると，各基準の加重係数は，$\sqrt{2}$ の $h(i)$ 乗（$h(i)$ は基準 i の重要度）に比例する．そこで，各加重係数の総和が 1 になるように規格化すると，基準 i の加重係数は,

$$c(i) = (\sqrt{2})^{h(i)} / \sum_i (\sqrt{2})^{h(i)} , \tag{4.6}$$

で与えられる．

こうして, 選択肢 j の基準 i のグレードを $g(i, j)$ とすれば, 選択肢 j の総合評価点 $S(j)$ は, 次式で与えられる．

$$S(j) = \sum_i c(i) g(i, j) . \tag{4.7}$$

最大の $S(j)$ を与える選択肢が最適解となる．

4.2　給水加熱器の解体撤去作業に係る最適化の試計算

(1)　評価基準と評価対象シナリオ

3 章では，給水加熱器の解体撤去の方法として，粗断と細断を組み合わせた 7 つのシナリオを想定して管理データを評価した．

本試計算では，評価基準として 3 種の管理データ，すなわち，作業人工数，二次廃棄物発生量，利用開始日とする．ここに，利用開始日は，解体作業開始から給水加熱器が撤去され設置場所が使えるようになるまでの期間(日)であり，設置場所での作業人工数(人・時)を 1 日あたりの作業人工数(5 人×4 時間)で除した値とする．設置場所のスペースが機器撤去後に別の目的（除染装置の設置等）に利用される計画であれば，この期間が短ければ短いほど別の目的に利用できる時間的余裕が長くなり，その評価は高くなる．一方，作業人工数及び二次廃棄物発生量は，少ないほど経済的であり評価が高くなる．

7 つのシナリオに対する 3 種の評価基準の計算結果(表 3.5)から次のことが分かる．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 は利用開始日が最も早い．シナリオ 3 は，人工数，二次廃棄物発生量，利用開始日がすべて，シナリオ 1 とシナリオ 2

の間の値である．シナリオ 4 はシナリオ 3 に比べて二次廃棄物発生量がわずかに少ないが，人工数は多く利用開始日も遅い．また，シナリオ 5～7 はシナリオ 3 に比べて人工数と二次廃棄物発生量が多く，利用開始日も遅い．そこで，本試計算では，最適なシナリオとなる可能性が高いシナリオ 1～3 を最適化の対象とした．

(2) 計算条件

(1)で選定した 3 つのシナリオに対する基準値及びそれから得られたグレードを表 4.1 にまとめる．

各基準の重要度については，当該作業の位置付けや目的に応じて意思決定者が何を重要と考えるか，例えば利用開始日を人工数や二次廃棄物発生量に比べて相当重要視する，あるいはその逆，ということに依存する．ここでは，以下の 3 ケースを想定して各基準の重要度を設定した．

1) ケース 1：人工数～二次廃棄物発生量＜＜利用開始日
2) ケース 2：人工数～二次廃棄物発生量＞＞利用開始日
3) ケース 3：人工数～二次廃棄物発生量～利用開始日

ここに，「基準 A～基準 B」，「基準 A＜＜基準 B」，「基準 A＞＞基準 B」は，それぞれ両基準の重要度が同程度である，基準 B が基準 A に比べてはるかに重要である，基準 A が基準 B に比べてはるかに重要である，を表す．ケース 1 は，利用開始日を最優先する場合であり，例えば，設置場所から機器が撤去された後，その場所を収納容器の一時保管場所，機器の除染装置の設置のために人工数を犠牲にしてまでも早く利用したい場合が考えられる．ケース 2 は，設置場所を早期に利用する必要がなく，人工数や廃棄物発生量をなるべく少なくしたい場合が考えられる．また，ケース 3 は，特に各基準に対する優先度が決めかねずケース 1 と 2 のどちらともいえない場合である．

各ケースに対する基準の重要度を数値化したもの，及びこれから導かれた加重係数を表 4.2 に示す．

(3)計算結果

ケース 1，2，3 の総合評価点の計算結果を表 4.3 に示す．利用開始日を最も重要としたケース 1 では，利用開始日が最も早いシナリオ 2 が最適なものに選定されている．一方，シナリオ 1 は利用開始日が最も遅くなるため最下位のシナリオとなっている．人工数と二次廃棄物発生量を重要としたケース 2 では，人工数と二次廃棄物発生量が最も少ないケース 1 が最適なものに選定されている．シナリオ 2 と 3 では，人工数と二次廃棄物発生量の

相違がそれほど大きくないため利用開始日が早いシナリオ 2 が次に選定される．各基準の重要度が同等としたケース 3 では，人工数と二次廃棄物発生量が少ないシナリオ 1 が選定され，人工数と二次廃棄物発生量が少ないことの方が，利用開始日が早いことより優るという結果になった．この場合，重要度が等しいため，各評価基準のグレード値をそのまま加えた値で順位が決まることになり, 表 4.1 の結果から分かるようにシナリオ 1 のグレード値が最大となっている．

以上の計算結果から，人工数，二次廃棄物発生量，利用開始日を考慮して，給水加熱器の撤去計画を立案する場合，全体の作業工程上の制約から早急に給水加熱器室設置場所を利用する必要がある場合を除いて，その場で粗断・細断・収納するシナリオの方が，粗断した切断片を別の場所に運びそこで粗断・収納するシナリオより人工数と二次廃棄物発生量が少なくなり有効ということになる．

なお，最適なシナリオの選定は，重要度の与え方に大きく依存する．これらの値の与え方は，対象としたシナリオの中で，各基準がどのような範囲の値をとるか，また，解体計画を策定する上でどのような制約があるか，といった諸条件に依存する．例えば，二次廃棄物発生量がどのシナリオでも少なく，また，保管廃棄物容量に十分な余裕がある場合には，その重要度は低くなる．一方，廃棄物容量の余裕がなく二次廃棄物発生量が多い場合には, 二次廃棄物発生量の重要度は高くなる. また, SMART を用いた最適化の検討では，管理データの評価結果が与えられたとき，基準値のグレードを規定する最小値，最大値の与え方も重要になると考えられる．

ここでは, さらに重要度を表わす加重係数と最適シナリオの関係について, シナリオ 1, 2，3 がそれぞれ最適解となるような各基準の加重係数を検討した．人工数，二次廃棄物及び利用開始日に対する加重係数を，それぞれ $c(1), c(2), c(3)$ とすれば，シナリオ 1，2，3 に対する総合評価点は次式で与えられる．

$$S1 = 10c(1) + 8c(2) + 4c(3)\,, \tag{4.8}$$

$$S2 = 4c(1) + 4c(2) + 9c(3)\,, \tag{4.9}$$

$$S3 = 4c(1) + 4c(2) + 6c(3)\,, \tag{4.10}$$

$$c(1) + c(2) + c(3) = 1\,. \tag{4.11}$$

以下に，各シナリオが最適となるための加重係数の条件を示す.

<u>シナリオ 1 が最適となる場合</u>

$S1 > S2, S1 > S3$ の条件から，次式が得られる．

$$c(3) < 2c(1)/9 + 4/9\,, \tag{4.12}$$

$$c(3) < c(1)/3 + 2/3\,. \tag{4.13}$$

また

$$0 < c(2) < 1, \tag{4.14}$$

より

$$c(3) < 1 - c(1). \tag{4.15}$$

<u>シナリオ 2 が最適となる場合</u>

同様に次式が得られる.

$$c(3) > 2c(1)/9 + 4/9, \tag{4.16}$$

$$c(3) < 1 - c(1). \tag{4.17}$$

<u>シナリオ 3 が最適となる場合</u>

シナリオ 3 が最適となる解は存在しない.

図 4.1 は，以上の結果を $(c(1), c(3))$ 平面に表わしたものである．これから，利用開始日の重要性(加重係数)が 44%程度以下とみなされる場合には，設置場所で給水加熱器を粗断・細断・収納する作業(シナリオ 1)を，55%程度以上とみなされる場合には，設置場所で粗断せず切断場所へ移動しそこで粗断・細断・収納する作業(シナリオ 2)を採用することが，適切な意思決定となる.

表 4.1　各シナリオの基準値とグレード

	作業人工数		二次廃棄物発生量		利用開始日	
	基準値（人･時）	グレード（-）	基準値（kg）	グレード(-)	基準値（日）	グレード(-)
シナリオ 1	754.0	10	74.0	8	37.7	4
シナリオ 2	1424.6	4	180.7	4	2.7	9
シナリオ 3	1282.9	4	149.3	4	8.5	6
最小値*	750.0		70.0		2.0	
最大値*	1430.0		160.0		40.0	

*区分値を与えるために用いたデータ（入力）

表 4.2　各基準の重要度と加重係数

	作業人工数		二次廃棄物発生量		利用開始日	
	重要度	加重係数	重要度	加重係数	重要度	加重係数
ケース 1	4	0.1	4	0.1	10	0.8
ケース 2	10	0.47	10	0.47	4	0.06
ケース 3	6	1/3	6	1/3	6	1/3

表 4.3　各シナリオの総合評価点

	ケース 1	ケース 2	ケース 3
シナリオ 1	5	8.7	7.3
シナリオ 2	8	4.3	5.7
シナリオ 3	5.6	4.1	4.7

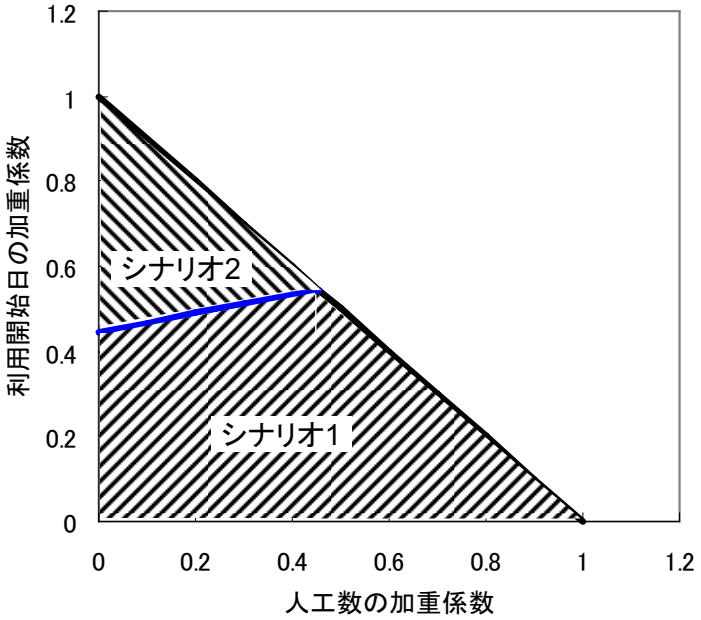


図 4.1　最適シナリオと加重係数の関係

5. まとめ

「ふげん」の廃止措置作業の中で実施された，第 3・4 給水加熱器の解体撤去作業を参考に，ある給水加熱器の解体撤去作業について幾つかのシナリオを想定した管理データ(作業人工数，二次廃棄物発生量，利用開始日)を評価した．これら単位の異なる管理データを評価基準として，最適なシナリオを選択する手法に係る検討を行った．そこでは，単位の異なる複数の評価基準の最適化に有用な手法の 1 つとされる SMART を適用し，同手法の廃止措置作業のシナリオ選択への有効性について検討した．

本検討では，まず，実際の第 3・4 給水加熱器の解体撤去作業の内容を参考に，給水加熱器が設置されている機器をその場で切断して容器に収納する場合とそれらを別の場所に運搬して切断し，容器に収納する場合を考慮してシナリオを設定した．これは，給水加熱器が設置されているスペースがその後に別の目的，例えば，収納容器の一時保管場所，機器の除染装置の設置などに利用されることを想定したものであり，「ふげん」において実際に第 3・4 給水加熱器が設置されているスペースがその後に別の目的に利用されることに基づいている．給水加熱器の別の場所での解体作業に関しては，運搬のための粗断の回数を変数として人工数及び二次廃棄物発生量を計算した．この結果，2 回以上の粗断は有効でないことが判明したため，以下の 3 つの解体作業シナリオを対象に最適性の評価を行った．

解体撤去作業シナリオは，給水加熱器をその場で切断して，切断片を容器に収納する作業を連続して実施する場合（シナリオ 1），給水加熱器を別の場所に運搬してそこで解体撤去作業を実施する場合（シナリオ 2），給水加熱器の解体撤去作業を粗断と細断に分け，粗断（2 分割）はその場で実施し，細断は別の場所で実施する場合（シナリオ 3）とした．これらのシナリオに対して作業に必要となる人工数，二次廃棄物発生量，利用開始日（給水加熱器設置場所における作業日数）を計算するとともに，SMART を用いてこれらの評価量を点数化した．また，人工数，二次廃棄物発生量，利用開始日の諸量がプロジェクトに対して持つ重要度を考慮して，シナリオの総合評価点を求めた．さらに，各シナリオの総合評価点を比較することにより，最適なシナリオを定量的に判定した．

評価の結果，解体撤去作業後のスペースの有効利用（利用開始日が早い場合）をかなりの割合で重視する場合には給水加熱器を別の場所に運び，そこで細断する作業（シナリオ 2）が最適となり，人工数及び二次廃棄物発生量の低減を重視する場合にはその場で連続して給水加熱器を解体する作業（シナリオ 1）が最適となることが判明した．この評価結果は，感覚的にも妥当なものであり，SMART を用いて定量的に最適なシナリオを選択する方法の有効性を示している．

他方，より現実的なシナリオの評価には，評価基準として今回検討した管理データのみならず，例えば，切断した給水加熱器の運搬に係る困難度等の定性的な評価基準を組み入れることが考えられ，その場合最適なシナリオも変わりうる．この定性的な評価基準の

組み入れにおいては，評価基準のランク付けのためのグレードの選定方法や加重係数計算のための重要度の評価方法などの異なる意思決定の方法論についての検討が重要となる．このため，これらの評価をより定性的に評価しやすい AHP（Analytic Hierarchy Process）等の MCDA における他の評価手法の検討が，最適化手法における次の検討項目となりうる．さらに，原子力施設の解体作業においては，設備･機器を別の場所に運搬して細断した後に収納するという作業シナリオは，様々な工程で考慮されることが予想される．今後，原子力施設の解体工程の中でこのような作業シナリオの可能性についても具体的に検討することが必要と考えられる．その場合には，作業環境によっては，放射線防護における ALARA を考慮したり，作業時の事故のリスクを評価基準に組み込むことが必要になる．

謝　辞

本報告書の作成に当たり，バックエンド推進部門及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) 柳原敏，荻原博仁：“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 管理データ計算プログラムの概要と取扱い説明”，JAERI-M 94-005 (1994).

(2) 泉正憲，芝原雄司，立花光夫　他：“管理データ評価システムのふげん廃止措置への適用性について；(1)平成 20 年度実績データ（準備・後処理工程）の評価及び分析”，日本原子力学会「2010 年春の年会」，2010 年 3 月.

(3) 芝原雄司，立花光夫，石神努　他：“管理データ評価システムのふげん廃止措置への適用性について；(2)平成 20 年度実績データ（解体工程）の評価及び分析”，日本原子力学会「2010 年春の年会」，2010 年 3 月.

(4) 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).

(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(受託研究)”，　JAERI-Data/Code 98-010 (1998).

(6) F. A. Lootsma: “Fuzzy Logic for Planning and Decision Making”, Kluwer Academic Publishers (1997).

This is a blank page.

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	立法メートル	m^3
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^2
波数	毎メートル	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
磁界の強さ	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
比透磁率[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	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		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
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，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)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	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	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	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	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
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	1h =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	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
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、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	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

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	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
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
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
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	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	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	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(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	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
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=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
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	$1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています