JAEA-Review
2022-004
DOI:10.11484/jaea-review-2022-004

統計的手法を利用した廃棄物の性状把握のための計画作成法の調査

ーデータ品質目標プロセスー

Survey on the Planning Process for Waste Characterization with Statistical Methods
-Data Quality Objectives Process-

村上 昌史　佐々木 紀樹

Masashi MURAKAMI and Toshiki SASAKI

バックエンド統括本部
バックエンド推進部

Project Promotion Department
Decommissioning and Radioactive Waste Management Head Office

June 2022

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発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。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　JAEA イノベーションハブ　研究成果利活用課
〒 319-1195　茨城県那珂郡東海村大字白方 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.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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, 2022

JAEA-Review 2022-004

統計的手法を利用した廃棄物の性状把握のための計画作成法の調査
–データ品質目標プロセス–

日本原子力研究開発機構　バックエンド統括本部　バックエンド推進部

村上　昌史、佐々木　紀樹

（2022 年 1 月 31 日受理）

日本原子力研究開発機構に保管されている多数の放射性廃棄物を処理処分していくためには、廃棄物の性状把握のために多くの分析データが必要となる。海外の原子力施設においては、費用対効果が大きい性状把握計画を作成する手段として、「データ品質目標（DQO）プロセス」を用いることが一般的になっている。DQO プロセスは、米国環境保護庁（EPA）において開発されてきた多段階の計画作成プロセスであり、環境データ収集を伴う様々なプロジェクトにおいて、科学的に厳密かつ費用対効果が大きいデータ収集計画作成のために利用可能であるとされているものである。

バックエンド推進部では、今後の保管廃棄物の性状把握において、統計的手法を取り入れることにより必要な費用を削減することを検討しており、これに向けて DQO プロセスに関する文献調査を実施してきた。本調査は、EPA がこれまでに刊行した DQO プロセスに関する手引書を中心として行い、これに加えて EPA の品質体系や計画作成後の作業といった関連事項及び原子力施設における適用例についても実施した。

本報告書では、これらの文献調査結果に基づき、DQO プロセスによる計画作成の具体的手順を説明し、DQO プロセスがなぜ開発されたか、どのような変遷を辿ってきたか、及び EPA において現在どのように利用されているかといった背景情報について整理する。また、特に複雑な対象物についての適用例として、過去に生じた多種多様なレガシー廃棄物を有しており、大きな環境汚染問題を抱えている、米国のハンフォードサイトにおける事例についても説明する。本報告書は、統計的サンプリング法を利用する計画を作成する際に重要となる事項や考え方をまとめるだけでなく、複雑な対象物に対する適用事例についても紹介しており、従って様々な廃棄物に対する今後の性状把握計画の作成において参考になると考えられる。

旧本部事務所：〒319-1112　茨城県那珂郡東海村大字村松 4-49

JAEA-Review 2022-004

Survey on the Planning Process for Waste Characterization with Statistical Methods – Data Quality Objectives Process –

Masashi MURAKAMI and Toshiki SASAKI

Project Promotion Department,
Decommissioning and Radioactive Waste Management Head Office,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 2022)

A numerous analytical data will be required for the characterization of the radioactive waste stored in Japan Atomic Energy Agency toward their processing and disposal. A "Data Quality Objectives (DQO) Process" is widely applied as a tool for the development of a cost-effective characterization plan in the overseas nuclear sites. The DQO Process is a multi-step planning process developed by the United States Environmental Protection Agency (EPA), and can be used for the planning of a scientifically rigorous and cost-effective data collection program for the various projects involving the collection of the environmental data.

We have considered to reduce the cost required for the future characterization of the stored waste by applying the statistical methods and have performed a literature survey on the DQO Process. The survey effort was focused on the guidance documents of the DQO Process published by the EPA and was also spent for the related matters such as a quality system of the EPA and the activities beyond the DQO Process as well as the examples of the application at the nuclear sites.

In this report, the details on the planning procedure using the DQO Process are reviewed together with the background information such as why DQO Process was developed, what kind of transition was occurred, and how it is currently used in the EPA. The examples on the application for various objects at Hanford Site in the United States, where has the various legacy waste generated in the past activities and has the big environmental problems, are also reviewed. This report summarizes the important matters and methodology on the planning with the statistical sampling methods. It also provides the examples of the approaches for the complex objects, and will therefore be helpful in the future planning for the various kind of the waste characterization.

Keywords: Literature Survey, Waste Characterization, Planning, Data Quality Objectives Process, Statistical Method

目　次

1.　はじめに……1
1.1　背景と目的……1
1.2　本報告書の構成……2
2.　DQO プロセスの成り立ちと変遷……4
2.1　DQO プロセス開発の経緯……4
2.2　DQO プロセスの変遷……6
2.2.1　1987 年時点の DQO プロセス……6
2.2.2　1994 年時点の DQO プロセス……7
2.2.3　2000 年時点の DQO プロセス……9
2.2.4　2006 年時点の DQO プロセス……9
2.3　EPA の品質体系との関係……11
2.3.1　EPA の品質体系における計画作成の要件……11
2.3.2　EPA の品質体系におけるプロジェクトの要素……12
2.4　DQO プロセスの成り立ちと変遷のまとめ……13
3.　DQO プロセスによる計画作成手順……22
3.1　ステップ 1：問題点の明言……22
3.2　ステップ 2：調査目的の特定……23
3.3　ステップ 3：情報インプットの特定……24
3.4　ステップ 4：調査範囲の決定……24
3.5　ステップ 5：分析アプローチの作成……26
3.6　ステップ 6：性能・許容基準の設定……26
3.6.1　ステップ 6A：統計的仮説検定……27
3.6.2　ステップ 6B：推定……29
3.7　ステップ 7：データ収集計画の作成……30
3.8　DQO プロセスによる計画作成手順のまとめ……32
4.　DQO プロセスの後に実施する作業……36
4.1　計画作成……36
4.2　実施・監視……37
4.3　評価……38
4.4　DQO プロセスの後に実施する作業のまとめ……39
5.　米国ハンフォードサイトにおける DQO プロセスの適用例……42
5.1　ハンフォードサイトの概要……42
5.1.1　原子炉と再処理工場……42
5.1.2　廃棄物と核物質……43
5.2　200 東エリアの地下水の性状把握……44
5.2.1　ステップ 1：問題点の明言……44

5.2.2　ステップ 2：決定の特定 …… 49
5.2.3　ステップ 3：決定へのインプットの特定 …… 49
5.2.4　ステップ 4：調査範囲の決定 …… 50
5.2.5　ステップ 5：決定ルールの作成 …… 51
5.2.6　ステップ 6：決定の誤りに関する許容限界の設定 …… 51
5.2.7　ステップ 7：データ収集のための計画の最適化 …… 52
5.3　KE 貯蔵プールのイオン交換カラムの性状把握 …… 52
5.3.1　ステップ 1：問題点の明言 …… 53
5.3.2　ステップ 2：決定の特定 …… 55
5.3.3　ステップ 3：決定へのインプットの特定 …… 55
5.3.4　ステップ 4：調査範囲の決定 …… 55
5.3.5　ステップ 5：決定ルールの作成 …… 56
5.3.6　ステップ 6：決定の誤りに関する許容限界の設定 …… 57
5.3.7　ステップ 7：データ収集のための計画の最適化 …… 57
5.4　地下タンク保管廃棄物の性状把握 …… 57
5.4.1　ステップ 1：問題点の明言 …… 58
5.4.2　ステップ 2：調査目的の特定 …… 58
5.4.3　ステップ 3：情報インプットの特定 …… 58
5.4.4　ステップ 4：調査範囲の決定 …… 60
5.4.5　ステップ 5：分析アプローチの作成 …… 60
5.4.6　ステップ 6：性能・許容基準の設定 …… 61
5.4.7　ステップ 7：データ収集計画の作成 …… 62
5.5　ハンフォードサイトにおける DQO プロセスの適用例のまとめ …… 63
6.　まとめ …… 74
付録 A.　DQO プロセス（1987 年時点） …… 76
A.1　ステージ 1：決定の種類の特定 …… 76
A.1.1　データ利用者の特定・関与 …… 76
A.1.2　既存データの評価 …… 76
A.1.3　概念モデルの作成 …… 77
A.1.4　目標・決定の設定 …… 78
A.2　ステージ 2：データ用途・ニーズの特定 …… 78
A.2.1　データ用途の特定 …… 79
A.2.2　データ種類の特定 …… 79
A.2.3　データ品質のニーズの特定 …… 79
A.2.4　データ量のニーズの特定 …… 80
A.2.5　サンプリング・分析手段の評価 …… 80
A.2.6　PARCC パラメータのレビュー …… 81
A.3　ステージ 3：データ収集計画の作成 …… 81

A.3.1　データ収集要素の構築 …… 81
A.3.2　データ収集文書の作成 …… 81
付録 B.　DQO プロセス（1994 年時点） …… 84
B.1　ステップ 1：問題点の明言 …… 84
B.2　ステップ 2：決定の特定 …… 84
B.3　ステップ 3：決定へのインプットの特定 …… 85
B.4　ステップ 4：調査範囲の決定 …… 85
B.5　ステップ 5：決定ルールの作成 …… 86
B.6　ステップ 6：決定の誤りに関する許容限界の設定 …… 86
B.7　ステップ 7：データ収集のための計画の最適化 …… 88
付録 C.　DQO プロセス（2000 年時点） …… 91
C.1　ステップ 1：問題点の明言 …… 91
C.2　ステップ 2：決定の特定 …… 91
C.3　ステップ 3：決定へのインプットの特定 …… 92
C.4　ステップ 4：調査範囲の決定 …… 92
C.5　ステップ 5：決定ルールの作成 …… 93
C.6　ステップ 6：決定の誤りに関する許容限界の設定 …… 94
C.7　ステップ 7：データ収集のための計画の最適化 …… 96
付録 D.　VSP ソフトウェア …… 99
D.1　VSP ソフトウェアの概要 …… 99
D.2　DQO プロセスの結果の利用 …… 99
D.3　VSP におけるサンプル数の計算式 …… 100
D.3.1　母集団と閾値との比較 …… 100
D.3.2　2 つの母集団の比較 …… 102
D.4　VSP ソフトウェアのまとめ …… 103
参考文献 …… 104

Contents

1. Introduction ····· 1
1.1 Background and Purpose ····· 1
1.2 Structure of This Report ····· 2
2. History of the Development of the DQO Process ····· 4
2.1 Details of the Development of the DQO Process ····· 4
2.2 Transition of the DQO Process ····· 6
2.2.1 DQO Process at 1987 ····· 6
2.2.2 DQO Process at 1994 ····· 7
2.2.3 DQO Process at 2000 ····· 9
2.2.4 DQO Process at 2006 ····· 9
2.3 Relationship with the EPA Quality System ····· 11
2.3.1 Requirements for Planning in the EPA Quality System ····· 11
2.3.2 Project Components in the EPA Quality System ····· 12
2.4 Short Summary on the History of the Development of the DQO Process ····· 13
3. Planning Procedure with the DQO Process ····· 22
3.1 Step 1: State the Problem ····· 22
3.2 Step 2: Identify the Goals of the Study ····· 23
3.3 Step 3: Identify Information Inputs ····· 24
3.4 Step 4: Define the Boundaries of the Study ····· 24
3.5 Step 5: Develop the Analytic Approach ····· 26
3.6 Step 6: Specify Performance or Acceptance Criteria ····· 26
3.6.1 Step 6A: Statistical Hypothesis Testing ····· 27
3.6.2 Step 6B: Estimation ····· 29
3.7 Step 7: Develop the Plan for Obtaining Data ····· 30
3.8 Short Summary on the Planning Procedure with the DQO Process ····· 32
4. Activities beyond the DQO Process ····· 36
4.1 Planning ····· 36
4.2 Implementation and Oversight ····· 37
4.3 Assessment ····· 38
4.4 Short Summary on the Activities beyond the DQO Process ····· 39
5. Examples of Application of the DQO Process at Hanford Site in the United States ····· 42
5.1 Outline of Hanford Site ····· 42
5.1.1 Reactors and Reprocessing Plants ····· 42
5.1.2 Waste and Nuclear Materials ····· 43
5.2 Characterization of Groundwater at 200 East Area ····· 44
5.2.1 Step 1: State the Problem ····· 44

5.2.2 Step 2: Identify the Decision ····· 49
5.2.3 Step 3: Identify Inputs to the Decision ····· 49
5.2.4 Step 4: Define the Boundaries of the Study ····· 50
5.2.5 Step 5: Develop a Decision Rule ····· 51
5.2.6 Step 6: Specify Tolerable Limits on Decision Errors ····· 51
5.2.7 Step 7: Optimize the Design for Obtaining Data ····· 52
5.3 Characterization of Ion Exchange Column at KE-Basin ····· 52
5.3.1 Step 1: State the Problem ····· 53
5.3.2 Step 2: Identify the Decision ····· 55
5.3.3 Step 3: Identify Inputs to the Decision ····· 55
5.3.4 Step 4: Define the Boundaries of the Study ····· 55
5.3.5 Step 5: Develop a Decision Rule ····· 56
5.3.6 Step 6: Specify Tolerable Limits on Decision Errors ····· 57
5.3.7 Step 7: Optimize the Design for Obtaining Data ····· 57
5.4 Characterization of Stored Waste in Underground Tanks ····· 57
5.4.1 Step 1: State the Problem ····· 58
5.4.2 Step 2: Identify the Goals of the Study ····· 58
5.4.3 Step 3: Identify Information Inputs ····· 58
5.4.4 Step 4: Define the Boundaries of the Study ····· 60
5.4.5 Step 5: Develop the Analytic Approach ····· 60
5.4.6 Step 6: Specify Performance or Acceptance Criteria ····· 61
5.4.7 Step 7: Develop the Plan for Obtaining Data ····· 62
5.5 Short Summary on the Examples of Application of the DQO Process at Hanford Site ····· 63
6. Summary ····· 74
Appendix A. DQO Process at 1987 ····· 76
A.1 Stage 1: Identify Decision Types ····· 76
A.1.1 Identify and Involve Data Users ····· 76
A.1.2 Evaluate Available Information ····· 76
A.1.3 Develop Conceptual Model ····· 77
A.1.4 Specify Objectives/Decisions ····· 78
A.2 Stage 2: Identify Data Uses/Needs ····· 78
A.2.1 Identify Data Uses ····· 79
A.2.2 Identify Data Types ····· 79
A.2.3 Identify Data Quality Needs ····· 79
A.2.4 Identify Data Quantity Needs ····· 80
A.2.5 Evaluate Sampling and Analysis Options ····· 80
A.2.6 Review PARCC Parameter ····· 81
A.3 Stage 3: Design Data Collection Program ····· 81

A.3.1 Assemble Data Collection Components ····· 81
A.3.2 Develop Data Collection Documentation ····· 81
Appendix B. DQO Process at 1994 ····· 84
B.1 Step 1: State the Problem ····· 84
B.2 Step 2: Identify the Decision ····· 84
B.3 Step 3: Identify the Inputs to the Decision ····· 85
B.4 Step 4: Define the Boundaries of the Study ····· 85
B.5 Step 5: Develop a Decision Rule ····· 86
B.6 Step 6: Specify Tolerable Limits on Decision Errors ····· 86
B.7 Step 7: Optimize the Design for Obtaining Data ····· 88
Appendix C. DQO Process at 2000 ····· 91
C.1 Step 1: State the Problem ····· 91
C.2 Step 2: Identify the Decision ····· 91
C.3 Step 3: Identify the Inputs to the Decision ····· 92
C.4 Step 4: Define the Boundaries of the Study ····· 92
C.5 Step 5: Develop a Decision Rule ····· 93
C.6 Step 6: Specify Tolerable Limits on Decision Errors ····· 94
C.7 Step 7: Optimize the Design for Obtaining Data ····· 96
Appendix D. VSP Software ····· 99
D.1 Outline of the VSP Software ····· 99
D.2 Use of the Results of the DQO Process ····· 99
D.3 Sample Size Equations Used in the VSP Software ····· 100
D.3.1 Comparing the Population to a Fixed Upper Limit ····· 100
D.3.2 Comparing Two Populations ····· 102
D.4 Short Summary on the VSP Software ····· 103
References ····· 104

表リスト

表 2.1　DQO のチェックリストの項目 14
表 2.2　EPA の品質体系における体系的計画作成法の要素 15
表 3.1　現在の DQO プロセスの各ステップにおける主要なアウトプット 33
表 4.1　EPA の品質体系における品質保証プロジェクト計画の要素 40
表 5.1　200 東エリアの地下水の性状把握における COPC 及び COC 65
表 5.2　200 東エリアの地下水の性状把握におけるサイトの概念モデル 65
表 5.3　200 東エリアの地下水の性状把握における決定ステートメント 66
表 5.4　KE 貯蔵プールのイオン交換カラムの性状把握における COPC 及び COC 68
表 5.5　KE 貯蔵プールのイオン交換カラムの性状把握における決定ステートメント 69
表 B.1　1994 年時点の DQO プロセスの各ステップにおける主要なアウトプット 89
表 B.2　決定の誤りの限界値表の例 90
表 C.1　2000 年時点の DQO プロセスの各ステップにおける主要なアウトプット 98

図リスト

図 1.1　現在の DQO プロセス 3
図 2.1　開発当初の DQO プロセス 16
図 2.2　スーパーファンド法の浄化プロセス 17
図 2.3　段階的な修復措置調査・実行可能性調査のアプローチと DQO プロセス 18
図 2.4　1994 年時点における DQO プロセス 19
図 2.5　2000 年時点における DQO プロセス 20
図 2.6　プロジェクトライフサイクル 21
図 2.7　DQO プロセスの重要な要素と主に寄与するステージ又はステップ 21
図 3.1　統計的仮説検定において起こり得る 4 つの結果 34
図 3.2　理想的・現実的な決定性能曲線 34
図 3.3　対立状態の取り方が異なる 2 つの図式 35
図 4.1　EPA の品質体系におけるプロジェクトの要素とツール 40
図 4.2　DQA プロセス 41
図 5.1　米国ハンフォードサイトの概略図 71
図 5.2　IXC モノリスの処分に関する論理図式 72
図 5.3　タンク廃棄物の要素に対するサンプル数と検出力の計算例 73
図 A.1　1987 年時点の DQO プロセスの各ステージの要素 83

List of Tables

Table 2.1 DQO Checklist Items 14
Table 2.2 Elements of Systematic Planning in the EPA Quality System 15
Table 3.1 Major Outputs from Each Step of the Current DQO Process 33
Table 4.1 Elements of a Quality Assurance Project Plan in the EPA Quality System.....40
Table 5.1 COPC and COC for Characterization of Groundwater at 200 East Area 65
Table 5.2 Conceptual Site Model for Characterization of Groundwater at 200 East Area.....65
Table 5.3 Decision Statement for Characterization of Groundwater at 200 East Area 66
Table 5.4 COPC and COC for Characterization of Ion Exchange Column at KE-Basin 68
Table 5.5 Decision Statement for Characterization of Ion Exchange Column at KE-Basin 69
Table B.1 Major Outputs from Each Step of the DQO Process at 1994 89
Table B.2 Examples of Decision Error Limits Table.....90
Table C.1 Major Outputs from Each Step of the DQO Process at 2000 98

List of Figures

Fig. 1.1 Current DQO Process 3
Fig. 2.1 Original DQO Process 16
Fig. 2.2 Remediation Process by Superfund Program.....17
Fig. 2.3 Phased Remedial Investigation and Feasibility Study Approach and the DQO Process 18
Fig. 2.4 DQO Process at 1994.....19
Fig. 2.5 DQO Process at 2000.....20
Fig. 2.6 Project Life Cycle.....21
Fig. 2.7 Essential Factors of the DQO Process and Mainly Contributing Stages or Steps 21
Fig. 3.1 Four Possible Outcomes in the Statistical Hypothesis Tests 34
Fig. 3.2 Ideal and Realistic Decision Performance Curve.....34
Fig. 3.3 Two Diagrams with Different Setting of Alternative Condition.....35
Fig. 4.1 Project Components and Tools in the EPA Quality System.....40
Fig. 4.2 DQA Process.....41
Fig. 5.1 Schematic of Hanford Site in the United States.....71
Fig. 5.2 Logic Diagram for Disposition of IXC Monolith.....72
Fig. 5.3 Example of Calculation on Sample Size and Power for Constituents of Tank Waste.....73
Fig. A.1 Elements of Each Stage of the DQO Process at 1987.....83

略　語

AEA	原子力法（Atomic Energy Act）
ALARA	合理的に達成可能な限り低くする（As low as reasonably achievable）
CERCLA	包括的環境対処補償責任法（Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act）
CERCLIS	包括的環境対処補償責任情報システム（Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Information System）
COC	着目汚染物質（Contaminant of concern）
COPC	潜在的着目汚染物質（Contaminant of potential concern）
DOE	米国エネルギー省（Department of Energy）
DPG	決定性能目標（Decision performance goal）
DPGD	決定性能目標図式（Decision performance goal diagram）
DQA	データ品質評価（Data quality assessment）
DQO	データ品質目標（Data quality objective）
EPA	米国環境保護庁（Environmental Protection Agency）
ERDF	環境回復処分施設（Environmental Restoration Disposal Facility）
HLW	高レベル廃棄物（High-level waste）
IXC	イオン交換カラム（Ion exchange column）
LAW	低放射性廃棄物（Low-activity waste）
LDR	埋立処分制限（Land disposal restriction）
MARSSIM	多省庁間共通放射線サーベイ及びサイト調査マニュアル（Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual）
MCL	最大汚染物レベル（Maximum contaminant level）
OU	実施ユニット（Operable unit）
PARCC	精度、正確度、代表性、完全性、及び比較性（Precision, accuracy, representativeness, completeness, and comparability）
PCB	ポリ塩化ビフェニル（Polychlorinated biphenyl）
QA	品質保証（Quality assurance）
QAPP	品質保証プロジェクト計画（Quality assurance project plan）
QC	品質管理（Quality control）
RCRA	資源保護回復法（Resource Conservation and Recovery Act）
SARA	スーパーファンド法修正及び再授権法（Superfund Amendments and Reauthorization Act）
SOP	標準作業手順（Standard operating procedure）
TOC	タンク作業業者（Tank Operations Contractor）
TRU	超ウラン（Transuranic）
TSD	処理、保管、及び処分（Treatment, storage, and disposal）

VSP	ビジュアルサンプルプラン（Visual Sample Plan）
WAC	廃棄物受入基準（Waste acceptance criteria）
WIPP	核廃棄物隔離試験施設（Waste Isolation Pilot Plant）
WTP	廃棄物処理・固化施設（Waste Treatment and Immobilization Plant）

1. はじめに

1.1 背景と目的

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構とする）では、我が国の原子力黎明期からの様々な研究開発に伴って発生してきた放射性廃棄物が多数保管されている。これらの廃棄物は、原子力機構内外の様々な種類の施設から発生しているため、その性状は多様である。今後の廃棄物の処理処分に向けては、これらの廃棄物の性状把握のために、多くの分析データの取得が不可欠である。しかし、多様な性状の多数の廃棄物の分析にかかる費用・時間は膨大なものになることが予想される。このため、できる限り費用対効果が大きい方法により廃棄物の性状把握を進めていくことが強く望まれている。

海外の原子力施設においては、費用対効果が大きい性状把握計画を作成する手段として、「データ品質目標（DQO）プロセス [1)]」を用いることが一般的になっている [2–5)]。DQO プロセスは 1980 年代より米国環境保護庁（EPA）で開発されてきた計画作成プロセスであり、統計的手法の適用を中心に構成されているが、統計的手法を用いないものも含め、幅広く適用可能である。現在の DQO プロセスを図 1.1 に示す。DQO プロセスは、データ収集の目的、利用可能な情報といった前提条件の確認や、調査範囲・時期といった定性的な基準を定めることを目的とした初めの 5 つのステップと、収集するデータが満たすべき定量的な基準を定める 6 つ目のステップに加え、定めた基準を満たす計画の候補を作成し、その中から最適なものを選択するという 7 つ目のステップが順番に並んだ構造となっている [1)]。DQO とは、このプロセスの 6 つ目のステップまでの中で定める基準のことである[*1]。これらのステップは一部を除いて 1 方向の矢印でつながれているが、実際に DQO プロセスを利用する際には、柔軟性を持たせることを意図して、情報の更新に合わせて以前のステップに戻ることとされている。6 つ目と 7 つ目のステップでは、将来的に得られるデータに基づき何らかの統計的手法を適用することを踏まえた DQO を設定し、これを満たすために必要最小限のサンプルを収集・分析するための計画を作成する。従って、DQO プロセスを用いることにより、費用対効果が大きいだけでなく、科学的に厳密で、根拠がしっかりしている計画を作成することができる。

以上のような DQO プロセスの利用については、海外の原子力施設における性状把握のための代表的な手引書 [2,3)]や性状把握に関する報告書 [4,5)]において、一般的に見られるものである。一方、我が国の原子力施設においては、これまでに DQO プロセスを利用した性状把握の事例や、利用に関する検討の事例は殆ど見当たらず、DQO プロセスやその考え方が広く知られているわけではない。この要因はいくつかあると思われるが、大きな要因の一つとしては、上述した簡単な説明のみでは DQO プロセスの有効性や具体的な適用方法が理解し難いため、海外の手引書 [1)]や関連する種々の文献を読解しなければならず、これに要する労力が決して小さくないことが挙げられる。

[*1] DQO の定義は、これまでに刊行された DQO プロセスに関する多数の手引書や関連する文書により多少の違いがあるが、「データ収集を伴う調査の目標を明確にし、適切なデータの種類を定義し、許容できる誤りのレベルを規定する、定性的・定量的なステートメント」とされるのが一般的である [6,7)]。具体的には、DQO は新たに収集するデータの質・量に関する基準である性能基準（Performance criteria）と、既存のデータに関する基準である許容基準（Acceptance criteria）を指している場合が殆どである [1,6,7)]。

バックエンド推進部では、原子力機構における多様な保管廃棄物の性状把握に関して、統計的手法を適用して費用対効果が大きい計画を作成していくための検討の一部として、DQO プロセスに関する詳細な理解や適用事例の探索を目的とした文献調査を実施してきた [8)]。この調査は、EPA がこれまでに刊行した DQO プロセスに関する手引書を中心として、EPA の品質体系（Quality system）に関する文書や計画作成後の作業に関する手引書といった関連事項、及び実際に DQO プロセスを実施したプロジェクトに関連する報告書についても実施した。本報告書は、我が国において DQO プロセスが有効に利用されていない状況を考慮し、これまでの文献調査結果を整理し、DQO プロセスの理解に必要な背景情報や具体的な適用例を含め、DQO プロセスの内容を詳しく解説することを目的としてまとめたものである。

1.2　本報告書の構成

本報告書ではまず 2 章において、DQO プロセスの背景情報として、DQO プロセスが EPA においてなぜ開発されたか、どのような変遷を辿ってきたか、及び EPA において現在どのように利用されているかといった内容について整理する。3 章では、現在の DQO プロセスの手引書 [1)] に基づき、計画作成手順の詳細を説明する。DQO プロセスによる計画作成手順の詳細を見たい場合には、この章が参考になる。4 章では、データ収集を伴うプロジェクトの要素全体を概観し、プロジェクトの目的達成に向けて、DQO プロセス後に実施する作業について説明する。5 章では、原子力施設において性状把握のための計画作成に DQO プロセスを適用した実例を紹介する。ここでは、米国ハンフォードサイトにおける複雑な対象物に対する性状把握計画の検討事例を数例取り上げる。最後に、6 章で本報告書の全体の内容を総括する。

加えて、本文中で述べる一部の事項について、詳しい内容を付録に記載する。付録 A から付録 C では、古いバージョンの DQO プロセスについて説明する。これは、DQO プロセスが開発される過程で内容が多様化・抽象化されて理解し難いものになっているため、比較的シンプルで理解し易い古いバージョンの DQO プロセスの内容を解説することにより、現在のバージョンの理解を助けることを目的にしている。また、DQO プロセスを用いた海外の手引書や報告書では、それらの出版年に応じて主に古いバージョンの DQO プロセスを使用しているが、その内容が現在のものとは一部異なる（即ち、本報告書の本文で説明する DQO プロセスとは違うものであるように見えると考えられる）ため、このような文献を読む際の参考になることも意図している。付録 A では、1987 年の報告書 [9,10)] に基づき、DQO プロセスが開発された当初のプロセスの内容について説明する。付録 B 及び付録 C では、それぞれ 1994 年及び 2000 年の DQO プロセスの手引書 [6,7)] に基づき、1994 年及び 2000 年時点における DQO プロセスの手引書の内容について説明する。付録 D では、サンプリング計画を作成する際の重要な要素であるサンプルの数・位置を決定するために利用できるソフトウェアとして、ビジュアルサンプルプラン（VSP）ソフトウェアについて説明する。

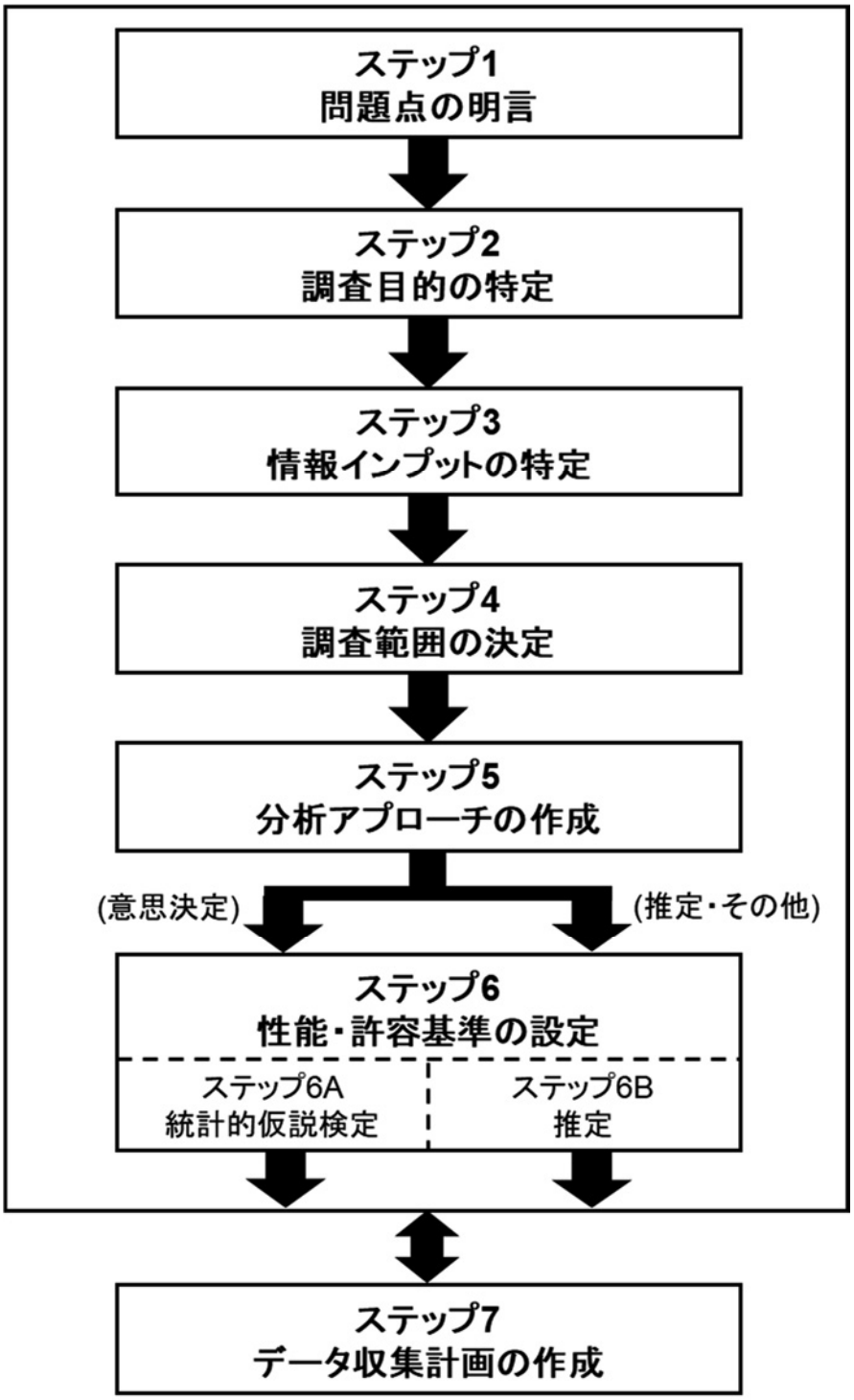

図 1.1　現在の DQO プロセス

2006 年の DQO プロセスの手引書 [1]に基づき作成した。

2. DQO プロセスの成り立ちと変遷

データ品質目標（DQO）プロセスは 1980 年代から米国環境保護庁（EPA）にて開発されてきたものであり、収集するデータの基準である DQO を定め、これを満足するような費用対効果の大きいデータ収集計画を作成するためのプロセスである。DQO プロセスは、開発された後に様々な修正を経て、現在の形（図 1.1）となっている。本章では、後に 3 章で説明する DQO プロセスの現在の形についての理解を助けることを目的として、DQO プロセスの背景情報、例えば DQO プロセスが EPA においてなぜ開発されたか、どのような変遷を辿ってきたか、及び EPA において現在どのように利用されているかといった内容について整理する。

2.1 DQO プロセス開発の経緯

EPA における DQO プロセスの開発に係る初期の経緯は、1987 年の報告書「Data quality objectives for remedial response activities (development process)」[9)]に記載されている。この経緯を要約すると、概ね以下の通りである[*2]。

- 1984 年 5 月：当時の EPA の副長官（Deputy Administrator）が長官補佐ら（Assistant Administrator）宛ての覚書の中で、環境データの品質を保証する最も重要な方法の 1 つが DQO の作成であると述べ、DQO の作成に積極的に参加するように要請するとともに、進行中である重要な環境データ収集作業の特定を求めた。
- 1984 年 10 月：品質保証管理局（Quality Assurance Management Staff）が、DQO 作成に関する手引書を作成した。
- 1985 年 4 月：品質保証管理局の局長（Director）の覚書において、DQO をレビューするためのチェックリストが作成された。
- 1986 年 3 月：品質保証管理局が、DQO 作成に関する追加の手順書を草案文書としてまとめた。

1985 年 4 月に作成されたチェックリストの項目を表 2.1 に示す[9)]。これは恐らく、1984 年 10 月の手引書に基づいて作成した DQO のためのチェックリストであり、今回調査した限りでは、DQO プロセスの原型となる内容が最もよく読み取れるものである。このチェックリストの中にはデータの統計的な取り扱いに関連する項目がかなりの割合で含まれていることから、DQO プロセス開発の最初期から、DQO の作成と統計的手法の利用は密接に関連付けて考えられていたことがわかる。その後の 1986 年 3 月の草案文書における追加分は、主に DQO プロセスのステージ 1 と 2 に関連したものであると述べられている[9)]。これは、後の 1987 年の報告書[9,10)]では、DQO プロセスは図 2.1 に示す 3 つのステージからなるプロセスであると説明されており、このうちステージ 1 と 2 の内容について主に変更があったということである。従って、DQO プロセスが「プロセス」と呼ばれるようになった段階では、プロセスは 3 つのステージで構成されており、図 2.1 は最初の DQO プロセスであると考えられる。そしてこの最初の段階において、

[*2] 後の 1994 年の DQO プロセスの手引書[6)]によると、1987 年までの期間に、DQO プロセスに関する他の手引書及び覚書が幾つかあったようである。但し、本文中で示した手引書や覚書を含め、これらは現在 Web 上で見当たらないことから、公開されていないものであると考えられる。

DQO プロセスは統計的手法の利用を含むものとなっている。

1987 年の報告書[9]は、サイト特有の修復作業について DQO を作成するための手引書であり、DQO タスクフォース（EPA の各部署の技術者と修復事業受託企業により構成）が、品質保証管理局がまとめた手引書を、修復対処措置（Remedial response activities）という複雑なプロセスに適用することにより開発されているものである[*3]。この開発において、DQO タスクフォースが実施した作業としては、既存の計画作成に関する文書から DQO プロセスの要素を特定することと、これらを実施アプローチとして体系的に整理すること等であるとされている[9]。なお、修復対処措置とは、修復措置調査（Remedial investigation）、実行可能性調査（Feasibility study）、修復措置実施計画（Remedial design）、及び修復措置（Remedial action）等の措置であるとされており、これらは米国のいわゆる「スーパーファンド法」に関連するものである。

スーパーファンド法とは、元は 1980 年 12 月に成立した、土壌汚染を中心とした有害物質汚染に対する浄化責任を定めた「包括的環境対処補償責任法（CERCLA）」のことであったが、CERCLA は 1986 年 10 月に「スーパーファンド法修正及び再授権法（SARA）」により大幅な修正を受けており、現在では一般的にこの SARA により修正された CERCLA のことを指す[11]。スーパーファンド法は過去に発生した有害物質による汚染に対処する法律であり、EPA とは以下の通り関連がある[11,12]。

- スーパーファンド法では有害物質や汚染物質が環境中に放出されるか、その重大なおそれがある場合に、大統領に、国家緊急事態対応計画に従って、緊急対策である除去措置（Removal action）か、恒久的浄化対策である修復措置を取ることができる権限を与えている。EPA は政府の実施機関として、環境への現実の脅威全てを対象として、対策を計画・実施できる。
- スーパーファンド法は、施設から有害物質の放出があった場合には EPA への通知を義務付けている。また、施設から有害物質の放出やそのおそれがあると認められる場合、EPA に当該施設等への立入を認めている。
- EPA は汚染サイトに関するデータベースである包括的環境対処補償責任情報システム（CERCLIS）を構築・公表している。CERCLIS の各登録サイトのうち一部がスーパーファンド法による浄化の対象となる。
- スーパーファンド法は、浄化の実施主体を EPA としているが、浄化責任を負担する者を潜在的責任当事者として広範に定めている。潜在的責任当事者は、EPA の命令を受けて自ら浄化を実施するか、政府が除去措置又は修復措置を実施するために支出した費用を負担することとなる。なお、EPA が自ら浄化を実施する場合の費用は、税金等を収入源とする基金（スーパーファンド）から当てられる。

CERCLIS の各登録サイトについての浄化プロセスの概要[12]を図 2.2 に示す。EPA はまず、これらのサイトの予備調査（Preliminary assessment）を実施する。引き続き調査が必要な場合にはサイト調査（Site investigation）を実施し、予備調査・サイト調査により緊急対処が必要と認められたときは、EPA は除去措置をとる。予備調査・サイト調査により、環境への悪影響が判明

[*3] 1987 年の報告書[9]では、DQO は「修復対処措置において EPA の決定を裏付けるために必要なデータの品質を定める、定性的・定量的なステートメント」として、特に限定的に定義されている。

した場合、危険順位システムによりその危険度が測られる。この危険度が一定水準以上であるサイトが、全国浄化優先順位表に記載され、基本的にスーパーファンド法による浄化の対象となる。浄化対象となるサイトについて、EPA は修復措置調査・実行可能性調査を実施するか、これらの実施を潜在的責任当事者に命令する。ここで、修復措置調査は対象サイトの汚染度を決定するための調査であり、実行可能性調査はその結果を利用して修復措置の選択肢を作成・比較する作業である[9,10,12]。その後、修復措置調査・実行可能性調査の報告を踏まえて EPA が選択した措置を案として公表し、関係者の意見を求めた上で決定記録が出される。そして、修復措置実施計画が作成された後、修復措置が実施されることとなる。なお、主なデータ収集作業は修復措置調査において実施し、一部実行可能性調査、修復措置実施計画、及び修復措置中に実施することもある[9,10]。

1987 年の DQO 作成プロセスの報告書[9]では、DQO プロセスは予備調査・サイト調査、修復措置調査、実行可能性調査、修復措置実施計画、及び修復措置を含め、全てのデータ収集作業に適用できると説明されている。同じく 1987 年の報告書「Data quality objectives for remedial response activities (example scenario – RI/FS activities at a site with contaminated soils and ground water)」[10]は、CERCLA と SARA の下での修復措置調査・実行可能性調査について、DQO 作成プロセスの概要を提供するものである。また、これら 2 つの報告書は、国家緊急事態対応計画に従って作成した手引書の一部であり、今後 SARA の規定に矛盾しないように更新する予定であるとされている。以上を考慮すると、DQO プロセスは当初、スーパーファンド法に関連して EPA が実施する一連の措置を念頭に開発されたものであると考えられる。当時の EPA は、スーパーファンド法に基づきサイトの浄化実施主体としての使命を負っていたが、浄化対象となるサイト数が多いこと、図 2.2 に示した浄化プロセスが複雑であり、長期的になること等の理由により、多額の費用がかかることから、できる限り費用対効果が高く、かつ広範に適用可能な方法により浄化を計画・実施したいという動機があったものと推測できる。なお、主なデータ収集作業を伴う修復措置調査・実行可能性調査に対する DQO プロセスの具体的な適用方法として、図 2.3 に示す通り、修復措置調査・実行可能性調査を複数のフェーズに分離し、各フェーズに対して DQO プロセスを段階的に適用するプロセスが示されている[9,10]。これは、データ収集のニーズはデータが収集・評価されるにつれて次第に明らかになってくることから、各フェーズの終了時に、DQO プロセスに基づいてデータ収集のニーズを再定義していくことを意図したものである。

2.2 DQO プロセスの変遷

DQO プロセスが開発されてから現在に至るまで、プロセスの構造は度々見直され、修正されてきた。本節では DQO プロセスの変遷について説明する。

2.2.1 1987 年時点の DQO プロセス

DQO プロセスの開発当初は、図 2.1 に示す通り 3 つのステージによって構成されていた[9,10]。図 2.1 では、3 つのステージは矢印でつながれており、このため一方向のみに進むプロセスのように見えるが、DQO プロセスは相互作用的・反復的なものであり、プロセスの各要素は繰り返

し再検討・再評価することとされている。各ステージの概要は以下の通りである。

- ステージ 1：決定の種類の特定
  サイト修復に関して行う決定[*4]の種類を定める。このために、データ利用者の特定、既存の利用できるデータの評価、概念モデル（Conceptual model）の作成、及びプロジェクトの目的の設定を行う。また、サイトの概念モデルを作成するために、利用できる情報を編集・分析する。このモデルは疑わしい汚染源、汚染経路、及び潜在的レセプター（Potential receptor）を記述するものであり、これにより実施する必要がある決定や、既存の情報の不足分を特定し易くなる。ステージ 1 の結果として、意思決定プロセスを明確にし、なぜ新たなデータが必要かを特定することとなる。
- ステージ 2：データ用途・ニーズの特定
  ステージ 1 で定めたプロジェクトの目的を満たすのに必要なデータの種類を特定し、新たに収集するデータの妥当性を決定するための基準を定める。また、サイトにおけるサンプリングのアプローチや分析オプションを選択する。
- ステージ 3：データ収集計画の作成
  意思決定のために収集する、許容できる質・量のデータを得る方法を明確に示す。この情報はサンプリング・分析計画等の文書に提供し、作業計画（Work plan）においてまとめる。

即ち、ステージ 1 においてまず前提条件を確認・整理し、ステージ 2 において収集するデータの基準を作成した後、ステージ 3 において DQO を満足するようなデータ収集計画を作成するというプロセスとなっている。3 ステージの DQO プロセスに関して、より詳細な内容は、付録 A に記載する。

2.2.2　1994 年時点の DQO プロセス

最初の DQO プロセスがまとめられた 1987 年の報告書 [9,10]に続き、1994 年に、改良された DQO プロセスの手引書が EPA の品質保証管理局により作成されている [6]。この手引書は、1987 年の報告書が修復対処措置への適用に限定していたのに対し、調査の目標が EPA のプログラムを援助するための環境データの収集であり、かつ具体的な決定を実施するために調査の結果を用いる全てのプロジェクトに適用できるものとされている。また、ここでは 1987 年のプロセスと比べて多くの変更がされているが、このうち特に大きなものは、図 2.4 に示すように DQO プロセスが 7 つのステップで構成されたこと、及び DQO プロセスが EPA の品質体系の一部であると明記されたことの 2 つである[*5]。図 2.4 ではステップが矢印でつながれており、このため一方向のみに進むプロセスのように見えるが、実際に利用する際には 1987 年のプロセスと同様に、情報の更新に合わせて以前のステップに戻るという反復性があるプロセスである。

1994 年の手引書における各ステップでは、最終的なデータ収集計画を作成するために用いる

[*4] いわゆる意思決定（Decision making）のことであるが、単に決定（Decision）と表記することが多い。DQO プロセスの手引書を含め、EPA の品質体系（Quality system）に関する文書においては、複数の選択肢から最適なものを選択することを指す場合が殆どである。
[*5] 1994 年の手引書 [6]は、適切な品質体系が作成され、かつ運用されていることを想定したものである。

基準をそれぞれ定める。各ステップの概要は以下の通りである。

- ステップ 1：問題点の明言
  計画作成チームを定め、調査の背景情報として、調査の発端となった問題点を簡潔にまとめる。問題点を定義するのに十分な理解を得るため、以前の調査と既存情報をレビューする。また、利用可能な資源とスケジュールを定める。
- ステップ 2：決定の特定
  主要な調査の論点と、この解決のために実施する可能性がある措置（選択肢となる措置（Alternative action））を定める[*6]。また、主要な調査の論点と選択肢となる措置を組み合わせた「決定ステートメント」を作成する。決定ステートメントは、選択肢となる措置からの選択についてまとめた文のことである。
- ステップ 3：決定へのインプットの特定
  決定ステートメントを解決するために取得する必要がある情報と、必要なデータを得るために実施する必要がある測定法を特定する。
- ステップ 4：調査範囲の決定
  対象とする母集団（Population）と、決定を適用する期間及び空間的範囲を定める。また、決定のスケールを定める。決定のスケールとは、決定をするのに適切な、母集団の最小の部分集合のことである。
- ステップ 5：決定ルール（Decision rule）の作成
  着目する統計的パラメータを定め、措置レベル（Action level）を特定する。措置レベルは、選択肢となる措置からの選択における閾値のことである。これらと、ステップ 2 で定めた措置及びステップ 4 で定めた決定を適用する範囲を、「決定ルール」という 1 つの文にまとめる。これは、選択肢となる措置からの選択に関して、論理的根拠を示すものである。
- ステップ 6：決定の誤りに関する許容限界の設定
  決定の誤り（Decision error）が措置レベルに関連してどのような場合に生じるかを考慮し、その帰結（Consequence）を踏まえて、許容できる誤りの割合を定める。
- ステップ 7：データ収集のための計画の最適化
  ステップ 1 から 6 までの情報を評価し、データ収集計画の選択肢を作成する。全ての DQO に適合する選択肢のうち、データ収集にかかる費用と DQO への適合性のバランスが最もよい選択肢を選択する。

即ち、最初のステップでデータ収集の目的や利用可能な情報といった前提条件を確認・整理した後、ステップ 2 からステップ 6 を通して DQO を作成し、これに基づき最後のステップにおいてデータ収集計画を作成するという構造となっている。この大まかなプロセスの構造は、開発当初のプロセス（2.2.1 項）から変化がないと考えられる。また、1987 年のプロセスでは用いる統計的手法を具体的に定めていなかった（付録 A 参照）のに対し、1994 年のプロセスでは、決定のために統計的仮説検定を利用することとなっており、ステップ 2 からステップ 6 はこの

[*6] ここでいう論点とは、調査により解決したい内容を示す疑問文のことである（例えば、「汚染物の濃度が基準値を超えるか」等）。

ための必要事項を設定するステップとなっている[*7]。この変更は、EPA の立場を考慮すると、統計的仮説検定が二者択一の判断に有効であり、例えば汚染サイトの浄化に関する決定といった、浄化の実施主体として EPA が行うこととなる決定に対して適しているためであると推測できる。図 2.4 では DQO 作成ステップ（ステップ 6 まで）と計画の最適化ステップ（ステップ 7）とが両方向の矢印でつながれているが、これはステップ 7 において実行可能かつ適切なデータ収集計画を作成するために、最初の 6 つのステップのうち 1 つ以上を再検討する必要が生じる可能性があることを示している。1994 年の手引書における各ステップの具体的な内容は、付録 B に記載する。

2.2.3　2000 年時点の DQO プロセス

1994 年の手引書は、刊行から 5 年間有効であるとされていた [6),*8]。この期間の後、この手引書の次のバージョンとなるものが 2000 年に刊行されている [7)]。この手引書における DQO プロセスを図 2.5 に示す。図 2.5 を図 2.4 と比較してわかる通り、プロセスのステップ数やステップの内容について、1994 年のものと大きな変化はない。但し、2000 年の手引書では全体的により詳細になっており、特に EPA の品質体系における DQO プロセスの位置付けがより明確に示されている（EPA の品質体系との関連については 2.3 節で説明する）。なお、図 2.5 では、図 2.4 とは異なり DQO 作成ステップ（ステップ 6 まで）と計画の最適化ステップ（ステップ 7）のつなぎ方が全て 1 方向になっている。このため、ステップ 7 におけるデータ収集計画作成のために、最初の 6 つのステップのうち 1 つ以上を再検討する必要が生じる可能性があるとしていた考え方（2.2.2 項参照）からの違いが生じたように見えるが、手引書の内容には本質的な違いがないことから、これは表現上の違いに過ぎないと考えられる。2000 年の手引書における各ステップの具体的な内容は、付録 C に記載する。

2.2.4　2006 年時点の DQO プロセス

2000 年の手引書の次のバージョンとなる手引書は、2006 年に刊行されている [1)]。2006 年の手引書における DQO プロセスを図 1.1 に示す。図 1.1 ではステップ 6 に 2 つの分岐があるが、これが従来のプロセスとの大きな違いである。分岐の一方（ステップ 6A）は、統計的仮説検定を実施するステップであり、これは 1994 年と 2000 年のプロセスにおけるステップ 6 に相当するものであると考えられる。分岐のもう一方（ステップ 6B）は、データの使用目的が決定以外となる場合（主に推定）に実施するステップであり、これは従来のプロセスにはなかったもの

[*7] 1994 年の手引書 [6)]は、ステップ 6 において統計的検定の適用を特に重点的に説明しているために、計画作成において統計的検定を利用する前提の手引書となっているように見える。しかし、手引書の序論では、DQO プロセスは統計的検定の利用を強く推奨しているが、これを用いない場合においても DQO プロセスを利用できると記載されている（この記載は、後の 2000 年の手引書 [7)]においても見られる）。これはデータを決定の裏付けのために直接使用しない場合のことである。この場合には、研究形式の調査に対して決定をするという形で取り組むか、調査のニーズに合わせてこの手引書に示す作業を修正することが可能であるとされている。

[*8] 現在では 2000 年の EPA の品質マニュアル CIO 2105-P-01-0[13)]において、全ての EPA の品質に関連する文書は、刊行より 5 年間有効であると定められている。このマニュアルに対応する 2000 年以前の文書は見当たらないが、1994 年の時点でもこの通りであったものと思われる。なお、EPA の品質マニュアル CIO 2105-P-01-0 では、刊行の 5 年後に、文書の追認、修正又は EPA の品質体系からの削除のうち、何らかの措置をとることとされている。

である。即ち、ここでの変更は、脚注[*7]に示したデータを決定以外に用いる場合について、DQOプロセスの適用に関する手順をより具体的に定めることを意図したものであると考えられ、この点において従来よりも汎用的なプロセスになっていると言える。

ステップ 6 における変更に伴い、それ以前のステップについても若干の変更が加えられている。各ステップの概要は以下の通りである。

- ステップ 1：問題点の明言
  計画作成チームを定め、調査の背景情報として、調査の発端となった問題点を簡潔にまとめる。問題点を定義するのに十分な理解を得るため、以前の調査と既存情報をレビューする。また、利用可能な資源とスケジュールを定める。更に、データの使用目的を予備的に定める。これには大きく分けて決定と推定（Estimation）の 2 つがある。
- ステップ 2：調査目的の特定
  主要な調査の論点と、この解決のための選択肢となる措置を特定する。データの使用目的が決定である決定問題については、主要な調査の論点と選択肢となる措置を組み合わせた決定ステートメントを作成する。一方、データの使用目的が推定である推定問題については、調査したい値やその範囲等をまとめた推定ステートメントを作成する。
- ステップ 3：情報インプットの特定
  決定ステートメントや推定ステートメントを解決するために取得する必要がある情報と、必要なデータを得るために実施する必要があるサンプリング・分析法を特定する。
- ステップ 4：調査範囲の決定
  対象とする母集団（Population）を定める。また、決定や推定に関しての空間的・時間的な範囲と決定・推定のスケールを定める。決定・推定のスケールとは、決定や推定のためにデータを収集、分析、及び評価する最小の面積、体積、又は時間単位のことである。
- ステップ 5：分析アプローチの作成
  着目する母集団パラメータを定め、結果から結論を導くための論理を作成する。決定問題については、措置レベルを特定し、これを母集団パラメータ、ステップ 2 で定めた措置、及びステップ 4 で定めた決定を適用する範囲と組み合わせ、決定ルールとしてまとめる。一方、推定問題については、母集団パラメータをステップ 4 で定めた推定のスケールと組み合わせ、推定量の仕様を定める。
- ステップ 6：性能・許容基準の設定
  - ステップ 6A：統計的仮説検定
    決定の誤りが措置レベルに関連してどのような場合に生じるかを考慮し、その帰結を踏まえて、許容できる誤りの割合を定める。
  - ステップ 6B：推定
    推定値の不確かさを表す方法を選択し、許容できる不確かさのレベルを定める。
- ステップ 7：データ収集のための計画の最適化
  ステップ 1 から 6 までの情報を用いて、データ収集計画の選択肢を作成する。全ての DQO に適合する選択肢のうち、データ収集にかかる費用と DQO への適合性のバランスが最もよい選択肢を選択する。

なお、2006 年の手引書以降、新たなバージョンの手引書は刊行されておらず、現状ではこれが最新版となる。現在の DQO プロセスの手引書に関するより詳細な内容は、3 章に記載する。

2.3 EPA の品質体系との関係

EPA では DQO プロセスの開発当初より、DQO の作成は環境データの品質を保証する最も重要な方法の 1 つであると認識されており [9]、1994 年の手引書 [6]より、DQO プロセスの手引書と EPA の品質体系[*9]との関連が明確になっている。品質体系とは組織が提供する製品やサービスの品質を保証する手段のことであり、様々な管理上、技術上、及び経営上の要素が含まれる [14]。また、品質体系は組織が実施する作業の計画作成、実施、評価、及び改善の枠組み、並びに品質保証（QA）・品質管理（QC）の実施の枠組みを提供するものである [14]。本節では、EPA の品質体系における DQO プロセスの位置付けについて説明する。

2.3.1 EPA の品質体系における計画作成の要件

1979 年より、EPA の方針として、環境プログラム[*10]を支援する全ての EPA 内部の組織や、EPA の委託により作業を実施する EPA 外部の組織に、EPA の品質体系に参加することを要求している [15]。EPA の品質体系は、EPA が関係する環境プログラムに適用される QA・QC の計画、実施、文書化、及び有効性評価のために必要な要素を提供する管理体系であり、米国の合意規格 ANSI/ASQC E4-1994[16]に基づくものである。EPA の品質体系の主な目的は、以下を保証することである [13–15]。

- 環境プログラムや決定が、データの使用目的に対して必要かつ期待される種類と品質のデータにより裏付けられていること。
- 環境技術[*11]の設計、構築、及び運用に関する決定が、適切に品質が保証された工学的基準や経験により裏付けられていること。

このための必要最小限の要件は、EPA Order CIO 2105.0[15]（以下、EPA オーダーとする）に示されている。

EPA オーダーにおいて要求されている品質体系の様々な項目のうち、計画作成に係るものは以下の 2 項目である。

- EPA オーダーの適用範囲である全ての作業に対して、性能・許容基準の作成のために、体系的計画作成法[*12]を使用すること。

[*9] EPA の品質体系は、方針（Policy）、組織・プログラム、及びプロジェクトの 3 つのレベルで構成される。方針には、EPA の組織や EPA が出資する外部組織が考慮する必要がある EPA 全体の品質の方針や規制が含まれる。組織・プログラムには、個別の品質システムの管理・実施に関する要素が含まれる。プロジェクトには、組織のニーズに適合することを保証するために、個別のプロジェクトに適用する要素が含まれる。

[*10] 環境に関する作業のこと [14,15]。環境プロセスや性状把握、環境モニタリングや環境に関する研究開発等を含む。

[*11] 汚染管理装置とシステム、廃棄物処理プロセスと保管施設、及び汚染物の環境からの除去や環境への進入を防ぐために用いるサイト修復技術とその要素を指す包括的な用語である [15]。

[*12] EPA では体系的計画作成法は、科学的手法に基づき、アプローチの客観性や結果の許容性といった概念を含む計画作成プロセスのことであると説明されている [7]。体系的計画作成法では、計画作成における詳細さのレベルが、作業の重要性や利用できる資源の使用目的に見合ったものであることを担保するために、等級別アプローチ（Graded approach）を用いる。

- 環境データに関する EPA のプロジェクトや作業について、認可された QA プロジェクト計画（QAPP）又は同等の文書を所持すること。急な作業を要する場合を除き、データ収集作業又はデータの使用の前に QAPP を作成し、認可を受ける必要がある（QAPP については、4 章でより詳細に説明する）。

ここで、QAPP は EPA が関与するプロジェクトにおける、プロジェクトライフサイクル（Project Life Cycle）の中で実施する必要がある QA の手順、QC の仕様等を記載した文書であり、QAPP の中で計画作成の成果を文書化することとなる（プロジェクトライフサイクルについては、2.3.2 項で説明する）[1,13,17]。

EPA の組織について、EPA オーダーの履行のために必須な要件は、EPA の品質マニュアル CIO 2105-P-01-0[13]（以下、EPA 品質マニュアルとする）に記載されている。EPA 外部の組織についても、外部ユーザー向けに要件を記載した文書もあるが、要件は EPA 品質マニュアルと同等である。EPA 品質マニュアルにおいては、体系的計画作成法について文書化すべき要素を列挙しているとともに、EPA が開発してきた DQO プロセスについて、多くの EPA のデータ収集作業において必須ではないが推奨される計画作成法であると記載されている。即ち、EPA の品質体系においては、体系的計画作成法を使用した計画作成と、作成した計画の文書化が、EPA が関与する環境プログラムについて必須な要件であり、特に計画作成法の 1 つとして、DQO プロセスの使用が推奨されているということである[*13]。

なお、EPA 品質マニュアルにおいて、文書化すべきであると列挙されている体系的計画作成法の要素は、表 2.2 に示す 8 項目である [1,13]。DQO プロセスは主に、これらの要素のうち、QA と分析を除く 6 項目の内容に関連するものである [1]。QA と分析の内容は、DQO プロセスの実施後に、QAPP[17]の作成において考慮するものである。表 2.2 には、体系的計画作成法の各要素について、主に DQO プロセスと QAPP のどの段階に関連するかについても示した。

2.3.2 EPA の品質体系におけるプロジェクトの要素

EPA の品質体系の要素（脚注[*9]参照）のうち、プロジェクトの要素を図 2.6 に示す。図 2.6 における各要素（計画作成、実施・監視、及び評価）の並べ方は、データを生成してから最終的に使用するまでの、プロジェクト全体の一連の流れを示しており、プロジェクトライフサイクルと呼ばれる [1,14),*14]。プロジェクトライフサイクルでは 3 つの主要なフェーズを経て、決定・推定に至る。これらのフェーズにおける作業を適切に実施することにより、収集データが望みのレベルの品質を満たし、収集データを決定・推定といったプロジェクトの目的を達成するために用いることを担保できる。これらの作業を適切に実施することを支援するために、EPA は各フェーズで利用できる様々なツールを作成してきており[*15]、DQO プロセスを含め、体系的計

[*13] 2000 年の DQO プロセスの手引書 [7]では、体系的計画作成法を通して収集データの品質と決定の品質についての性能・許容基準を作成できるとされており、特にデータを 2 つの具体的な条件からの選択という意思決定に用いる場合に、このための体系的計画作成法のことを DQO プロセスと呼ぶと具体的に記載されている。但し、後の 2006 年の手引書 [1]では、データの使用目的として推定等が加わっているため、現在では、体系的計画作成法の中で DQO プロセスが占める範囲がより広くなっていると考えられる。
[*14] データライフサイクル（Data Life Cycle）と呼ばれることもある [2,18]。
[*15] 具体例は後に 4 章で示す。

画作成法は計画作成フェーズにおけるツールの 1 つである [14)]。

体系的計画作成法は、EPA 品質マニュアルに基づき、プロジェクトライフサイクルの最初のフェーズの初めに用いる必要があるツールである [13,14)]。計画作成後には、プロジェクトの目的達成に向けて、プロジェクトライフサイクルの 3 つのフェーズの作業を実施していくこととなる。これらの作業の詳細は、4 章で説明する。

2.4 DQO プロセスの成り立ちと変遷のまとめ

DQO プロセスは、EPA において、データを収集する作業を含む計画に関して、大きな費用対効果が得られることを意図して開発されてきたプロセスである。DQO プロセスはその開発当初より統計的手法を利用することを念頭に置いた計画作成プロセスであり、初めは 3 つのステージにより構成されていた。後に、二者択一の判断に有効で、意思決定に適している統計的仮説検定の適用を中心に据えるとともに、この適用を容易にするように 7 つのステップに細分化した構造にされた。更にその後、データを決定以外に用いる際の手順を具体的に定めてより汎用化され、現在の形に至った。既に述べた通り、DQO プロセスの主な要素は、データ収集の目的や利用可能な情報といった前提条件の確認・整理、定性的・定量的基準である DQO の作成、及びこれらの DQO を満足するデータ収集計画の作成であるが、この主な要素は開発当初から引き継がれてきているものである。

図 2.7 に、DQO プロセスの主な要素と、1987 年、1994 年、2000 年、及び 2006 年時点での各プロセスにおける各要素に主に寄与するステージ又はステップとの関係を示す。DQO プロセスの開発当初では、ステージ 1 においてまず前提条件を確認・整理し、ステージ 2 において収集するデータの基準を作成した後、これに基づいてステージ 3 でデータ収集計画を作成するという構造であった。1994 年の手引書より、統計的仮説検定の適用を中心に据えるに伴い、これに対応するように、収集するデータの基準の作成に関してステップが分割され、ステップ 2 からステップ 5 を通して定性的基準を作成していき、その後ステップ 6 において定量的基準を作成するという構造となった。但し、現在に至るまで、最初のステージ又はステップにおいて前提条件を確認・整理する点と、最後のステージ又はステップにおいて、それ以前のステージ又はステップで作成した基準を満たすようなデータ収集計画を作成するという点に関しては変化していない。

DQO プロセスは、それを開発してきた EPA においては、その品質体系に関連付けられたプロセスである。EPA では DQO プロセスの開発当初より、DQO の作成は環境データの品質を保証する最も重要な方法の 1 つであると認識されており、後に DQO プロセスの手引書と EPA の品質体系との関連が明確にされてきた。EPA における品質体系の主な目的の 1 つが、「環境プログラムや決定が、データの使用目的に対して必要かつ期待される種類と品質のデータにより裏付けられていること」である。EPA の品質体系においては、この目的を担保するための具体的な手段として、DQO プロセスをはじめとした体系的計画作成法の使用が必須となっている。即ち、EPA では、データ収集を伴うプロジェクトの目的を確実に達成することを支援するために、品質体系において大まかな枠組みを定めるとともに、この中で要求している体系的計画作成法の 1 つとして、DQO プロセスの手引書を整備している。これは、特に米国の汚染サイト浄

化の実施主体である EPA においては、DQO プロセス及びこれを通して実施する統計的仮説検定が、収集データに基づく決定とその根拠の整理に有効であるという考えに基づくものであると推測される。

表 2.1　DQO のチェックリストの項目

1987 年の DQO 作成の報告書 [9]に基づき作成した。

番号	項目
A-1	意思決定者とデータの利用者が明確に特定されている。
A-2	意思決定者とデータの利用者が DQO の作成に関与している。
B-1a	このデータ収集作業の結果に依存する決定のステートメント。
B-1b	データ収集作業が予備的な性質のものであり、正式に規制の決定に結びつかない場合には、文書において環境データを用いる目的を明確に説明するべきである。
B-2	データ収集活動において取り組む特定の論点それぞれのステートメントと、それらへの適切な回答として予測される結論の種類。結論は、測定データのみに依存するべきである。
B-3	データを用いて実施する統計的な計算結果から、調査のそれぞれの結論を述べる方法の明確なステートメント。
B-4	測定データによるそれぞれの結論に関して許容できる精度と正確度レベルのステートメント。
B-5	それぞれの結論を適用する母集団の定義。これは全ての部分母集団又は層（Strata）の定義を含む。
B-6	測定する変数の定義。
B-7	実施する測定について許容できる精度と正確度レベル。
B-8	測定データとこれによりなされるそれぞれの決定の関係を表すフローチャートかスプレッドシート。

表 2.2　EPA の品質体系における体系的計画作成法の要素

要素	内容	DQO プロセス及び QAPP との関連 [a]
組織	プロジェクト管理者、スポンサー組織、プロジェクト要員、利害関係者等の特定	DQO プロセス：ステップ 1 QAPP：グループ A
プロジェクトの目的	プロジェクトの目的、目標、及び調査の論点と調査の課題の記述	DQO プロセス：ステップ 2
スケジュール	プロジェクトのスケジュール、資源（予算を含む）、マイルストーン、及び当てはまる全ての要件（例えば、規制の要件、契約の要件）の特定	DQO プロセス：ステップ 1
データのニーズ	必要なデータの種類とプロジェクトの目標を支援するためにどのようにデータを用いるかの特定	DQO プロセス：ステップ 3
基準	必要になるデータ量の決定と品質の尺度となる性能基準の指定	DQO プロセス：ステップ 5・6・7
データ収集	いつ・どこで・どのようにデータを取得するか（既存データを含む）の記述、及びデータの収集における全ての制約の特定	DQO プロセス：ステップ 4・7
QA	品質性能基準を評価するために必要な QA・QC（例えば、QC サンプル、監査、技術的評価等）の明確な記載	QAPP：グループ B・C
分析	どのように取得データを分析し、使用目的と品質性能基準に対して評価するかの記述	QAPP：グループ D

[a] QAPP のグループの分類については、4 章で説明する。

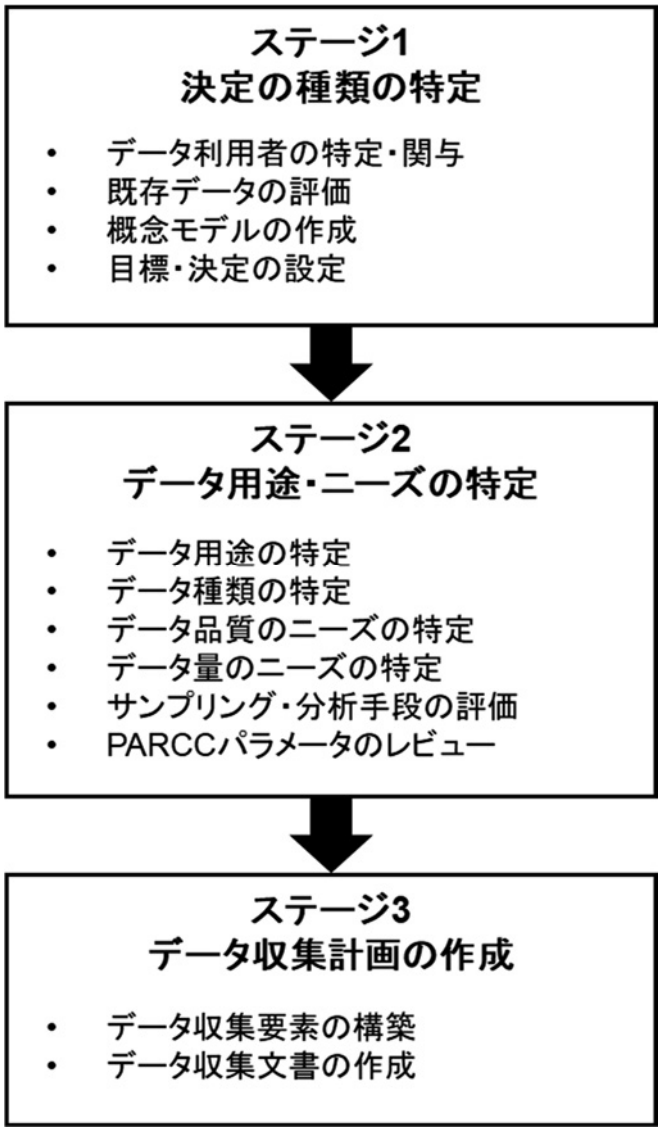

図 2.1　開発当初の DQO プロセス

1987 年の報告書 [9,10]に基づき作成した。

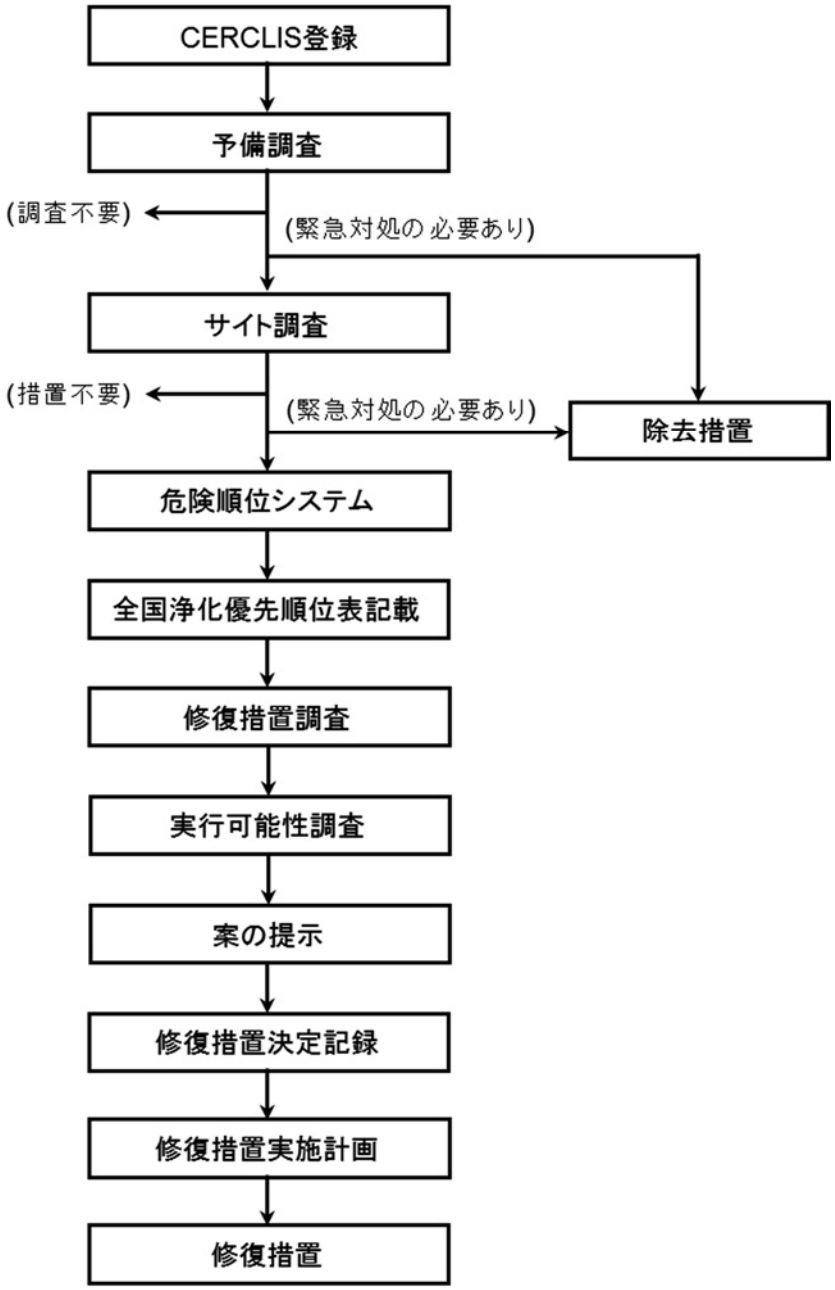

図 2.2　スーパーファンド法の浄化プロセス

文献 [12]を参考に作成した。

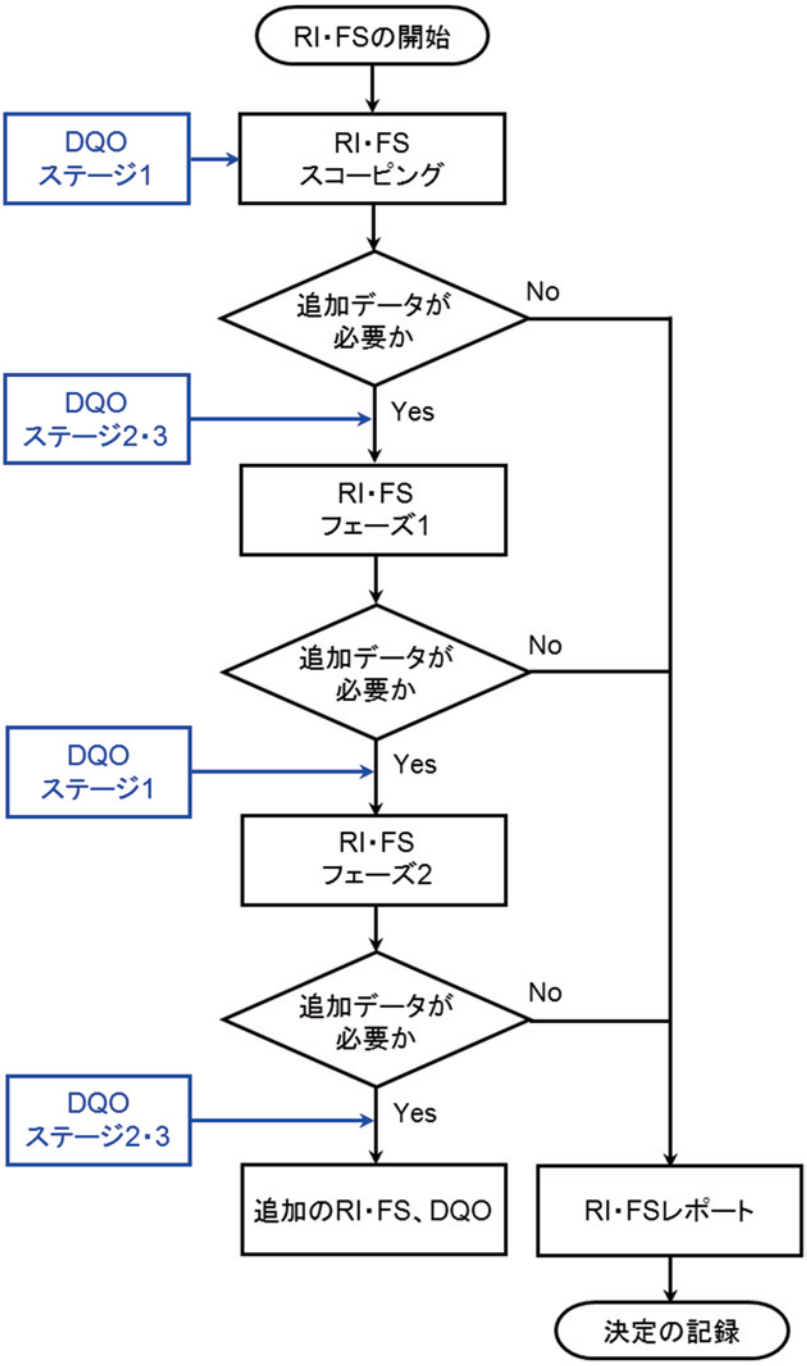

図 2.3　段階的な修復措置調査・実行可能性調査のアプローチと DQO プロセス

1987 年の報告書 [9,10]に基づき作成した。RI は修復措置調査、FS は実行可能性調査を表す。

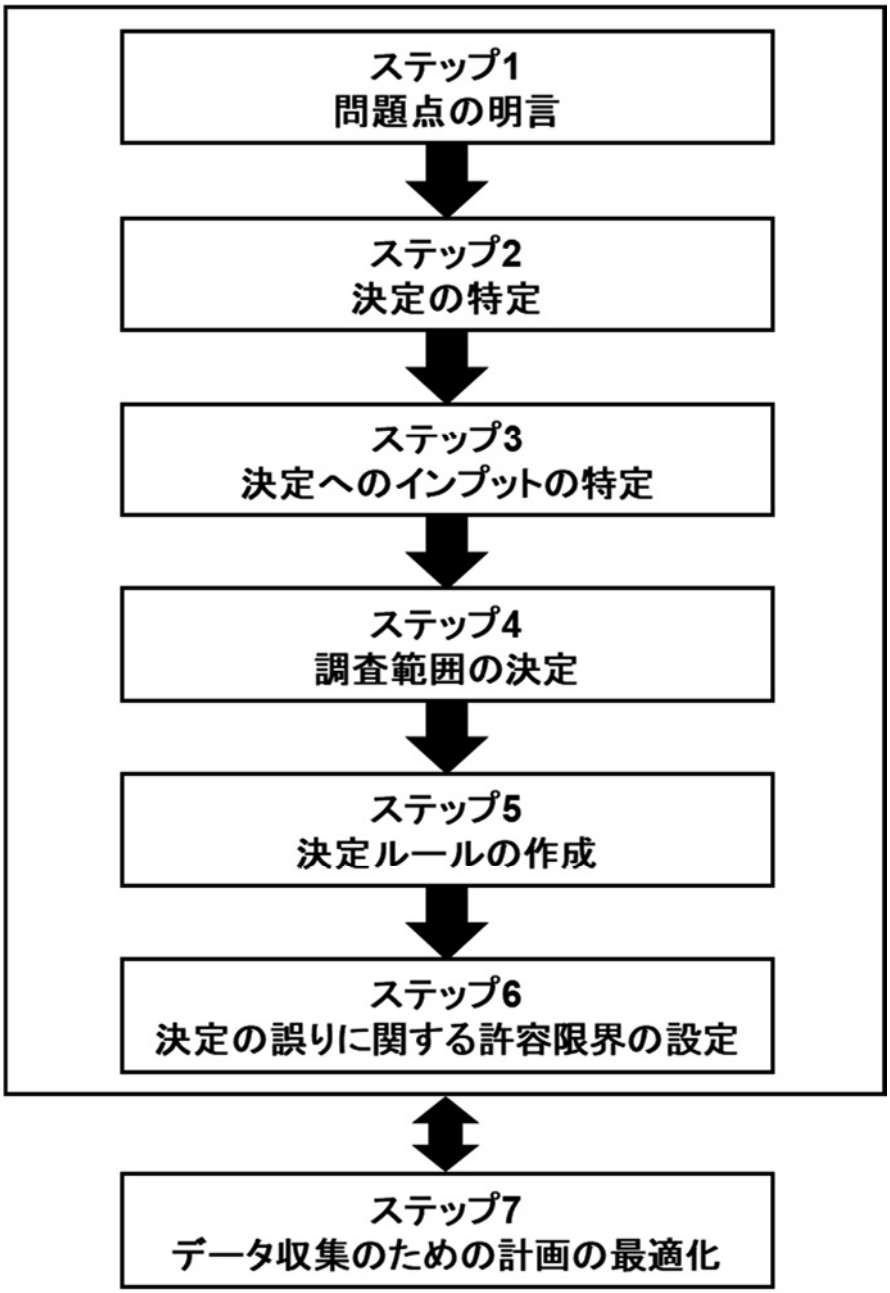

図 2.4　1994 年時点における DQO プロセス

1994 年の DQO プロセスの手引書 [6]に基づき作成した。

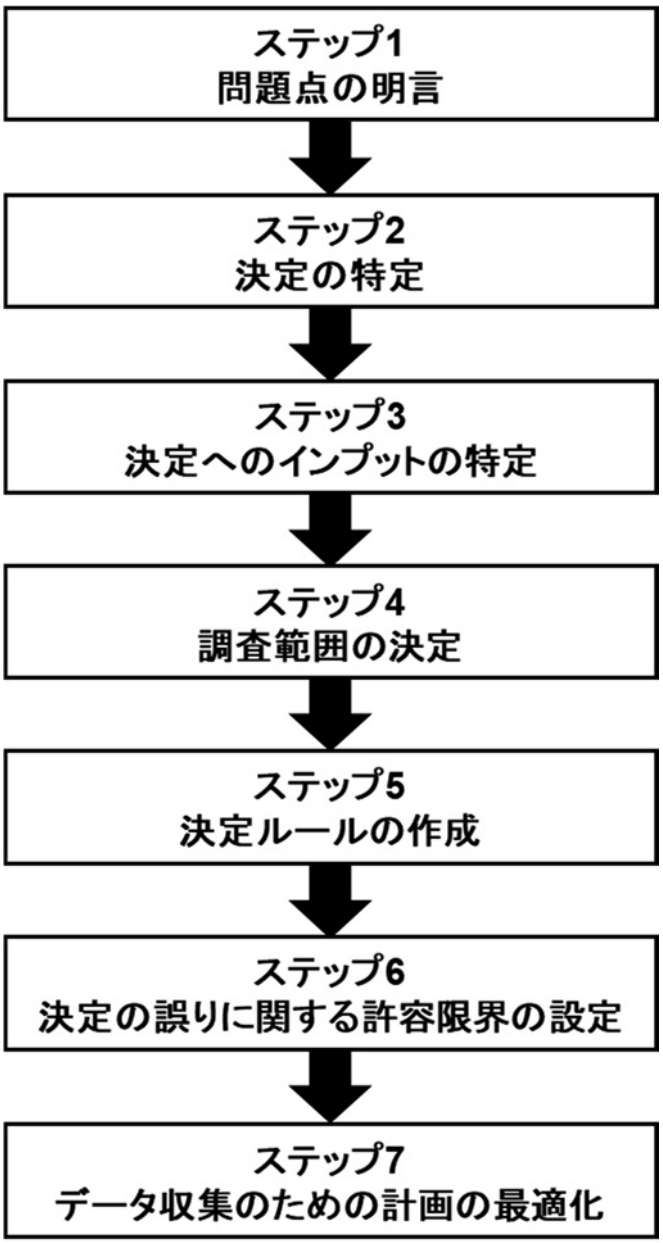

図 2.5　2000 年時点における DQO プロセス

2000 年の DQO プロセスの手引書 [7]に基づき作成した。

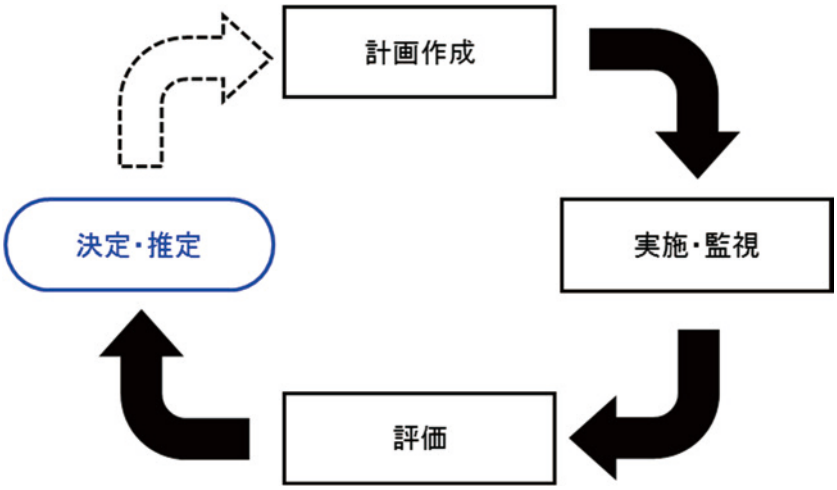

図 2.6　プロジェクトライフサイクル

2006 年の DQO プロセスの手引書 [1]に基づき作成した。破線の矢印は、プロジェクトの最終的な結果を将来の調査に利用することを示している。

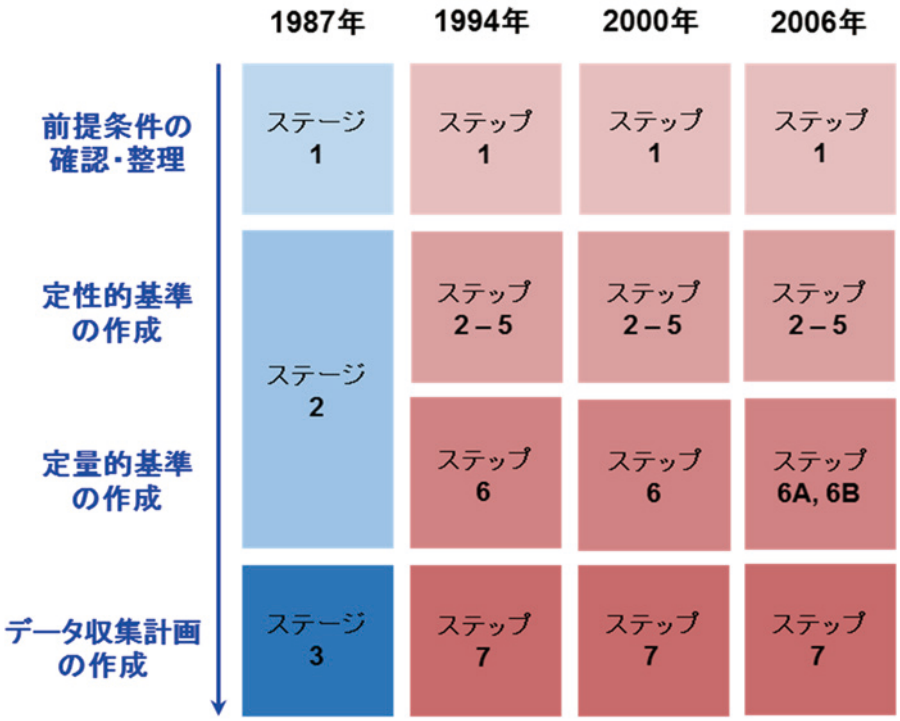

図 2.7　DQO プロセスの重要な要素と主に寄与するステージ又はステップ

3. DQO プロセスによる計画作成手順

現在のデータ品質目標（DQO）プロセスは、2006 年の DQO プロセスの手引書 [1)]に示されているものである。このプロセスは、図 1.1 に示す 7 つのステップで構成されており、これらのステップを通して費用対効果の大きいデータ収集計画を作成できる。7 つのステップは、ステップ 1 からステップ 7 までの基本の流れはあるが、情報の更新に合わせて任意の必要なステップに戻ることとされている。本章では、2006 年の手引書に基づき、7 つのステップそれぞれについての要点を以下の各節に示す。また、各ステップの主なアウトプットは表 3.1 にまとめる。

3.1　ステップ 1：問題点の明言

全ての体系的計画作成プロセスにおいて、最初のステップは調査の発端となった問題点を定義することであり、DQO プロセスにおいても同様である。以下に、ステップ 1 における実施内容や重要事項を示す。

- 計画作成チームを作成する。典型的な例として、このチームにはプロジェクトの管理者、技術スタッフ、データ利用者、及び利害関係者が含まれる。チームの人数は、問題点の複雑さや重要性に比例して多くなる。プロジェクトの管理者は問題点や予算・時間の制限を把握していることから、意思決定者（Decision maker）の 1 人となる。DQO プロセスの初期段階において利害関係者を含めることにより、調査や意思決定プロセスへの信頼感を促進できる。
- 問題点を定義する。以前の調査で同様な問題点を解決したものを探し、サンプリング・分析の性能等の重要な情報をまとめ、信頼性を評価しておくことが望ましい。規制要件、調査に関心がある組織、政治的課題、サンプリングに影響する非技術的課題等についても考慮することが望ましい。

  環境問題に関する概念モデル（Conceptual model）を作成することが重要である。これは後のプロセスや決定の基礎となるものである。概念モデルは、既知か予測される汚染源の位置、潜在的汚染源、汚染された土壌・地下水等や汚染されそうな土壌・地下水等、及び曝露（Exposure）シナリオを示す図である。透明性を十分に確保するために、概念モデルの根底にある理論と仮定を把握しておくことが重要である。
- 利用可能な資源、制約、及び締切を特定する。ここでは、データ収集と作業の実施に関する時間的制約を特定・調査することが望ましい。この作業としては、DQO プロセスの完了、データ収集・分析のための品質保証プロジェクト計画（QAPP）の作成、及び収集データの解釈・評価等がある。可能な範囲で、アクセス権限、季節による変動、又はサンプリングに影響する位置といった実際的な制約を文書化しておくことが望ましい。
- データの使用目的（Intended use）を予備的に定める。データの使用目的は大きく分けて意思決定（Decision making）と推定（Estimation）の 2 つがある（以下、データを意思決定に用いる場合の問題を決定問題、推定（決定と推定以外の場合も含む）に用いる場合の問題を推定問題とする）。

調査において高度な分析アプローチ（ベイズ統計や地球統計学[*16]等）を用いるかについて、定めることが望ましい。これらの方法を用いると、通常 DQO プロセスにおける作業の修正を要することから、DQO プロセスの早期にこれらの方法の使用を定めておくことで、より効率的になる。

3.2 ステップ 2：調査目的の特定

このステップでは、調査における主要な論点（脚注[*6] 参照）を特定し、選択肢となる措置（Alternative action）を定める。選択肢となる措置とは、主要な論点の解決のために実施する可能性がある措置のことである。決定問題に対しては、主要な論点と選択肢となる措置を組み合わせてまとめる（まとめたものを以下、決定ステートメントとする）。推定問題に対しては、調査したい値やその範囲等をまとめる（まとめたものを以下、推定ステートメントとする）。以下に、ステップ 2 における実施内容や重要事項を示す。

- 主要な論点を定め、明確に示す。これにより、調査の問題点に的を絞った情報収集ができる。また、主要な未知条件や未解決問題を特定することを支援し、これらは問題点の解決につながる可能性がある。主要な論点への回答は、決定問題の解決に向けた一連の措置を決定するための基礎となるか、又は推定問題において正確な推定をするのに必要な欠落情報を与える。まず、1 つの主要な論点を定めることに集中し、その後計画作成プロセスの中で、他の問題点や論点に検討を広げることが望ましい。
- 調査の論点を示した後、選択肢となる措置を定める。基本的には、主要な論点に対して解決策となり得るものを複数考慮し、その後可能性がある解決策それぞれについて、特定の結果に対する措置を定める。ここでは、措置を講じないという選択肢を含める可能性がある。選択肢となる措置が問題点を解決できるかを確認し、規制に適合するかを判断することが望ましい。
- 決定問題においては、主要な論点と選択肢となる措置を組み合わせ、決定ステートメントを作成する。これは、選択肢となる措置からの選択について簡潔に表現したものである。決定ステートメントは、「（主要な調査の論点において着目する環境条件・問題・基準）が、（1 つ以上の選択肢となる措置）を必要とする（又は裏付ける）かどうかを決定すること」という定型文を用いて表すことができる。複雑な決定問題においては、1 つ以上の決定ステートメントが必要となる可能性がある。この場合には、それぞれの決定がどのように他に関連するか調査し、優先度のリストを作成する必要がある。
- 推定問題においては推定ステートメントを作成する。ここでは、未知量の推定に関して、可能性がある結果の範囲を考慮する。これらの結果は特定の措置に直接結びつかない可能性があるが、他の調査結果の解釈を改善するか、続く調査の基準となる可能性がある。推定ステートメントについては、かなり広い範囲の応用が考えられるため、ある定型文で表すことは実用的ではない。複雑な推定問題においては、複数のパラメータの推定が必要となる可能性がある。この場合には、複数の推定量（Estimator）及びインプットす

[*16] 自然界における様々な現象の空間的、時間的な関連性をモデル化して推定を行う統計学の一分野のこと。

る変数の関係を図示することが有用である。

3.3 ステップ 3：情報インプットの特定

このステップでは、決定ステートメントの解決や推定のために必要となる情報の種類と情報源、及び適切な分析アプローチと性能基準（Performance criteria）・許容基準（Acceptance criteria）を作成するために必要となる基礎情報を定める。また、新たなデータ収集が必要か、及び適切なサンプリング・分析法が存在するかについて決定する。以下に、ステップ 3 における実施内容や重要事項を示す。

- 必要な情報の種類を定める。この際、測定する必要がある項目のリストを作成することが有用である。
- 既存のデータが情報源となる場合もある。この場合には、データがニーズに対応するかを評価するために、品質保証（QA）・品質管理（QC）の情報について調査することが望ましい。また、新たに収集するデータを既存のデータと合わせる場合には、新たなデータを適切な方法により取得できるよう、既存データを取得した方法を調査する必要がある。
- 後に定める性能・許容基準の根拠として用いる情報は、情報源を特定する必要がある。決定問題においては、情報を分析するアプローチとして「決定ルール（Decision rule）[*17]」を作成することとなるが、これには措置レベル（Action level）が関係する。措置レベルは、主にステップ 2 において特定した選択肢となる措置について、実施するかどうかを決定するために用いられる閾値のことである。このステップにおいては、措置レベルを決定するための情報源を特定するが、具体的な数値はステップ 5 まで定める必要はない。措置レベルではなく、何らかのバックグラウンドに関する決定を予定している場合には、バックグラウンドの性状に関する情報源を特定することが望ましい。
- 適切なサンプリング・分析法を特定し、評価する。決定・推定に必要な特性リストを用いて、必要な情報を得るのに適した、既存のサンプリング・分析法のリストを作成することが望ましい。適切な手法が指定できない場合は、ステップ 2 に戻り、異なる調査目的に改めるのがよいと考えられる。決定問題においては、ステップ 6 で作成する決定性能目標（DPG）は、偏り（Bias）に依存する[*18]。このため、データの偏りを生じやすい方法は可能な限り避けることが望ましい。

3.4 ステップ 4：調査範囲の決定

このステップでは、着目する対象の母集団（Population）や、決定・推定を実施するのに適切な空間的・時間的な範囲を定める。サンプリングを妨げる可能性がありそうな、実際的な制約についても特定する。また、推論のスケール（Scale of inference）を定める。推論のスケールと

[*17] 「A である場合には B を実施し、そうでない場合には C を実施する（If A then B otherwise C）」という形の論理的なルールのこと。

[*18] データの偏りは主に、(1) 非代表的サンプリング、(2) サンプリング・分析中のサンプルの不安定な状態や汚染、(3) 分析における干渉やマトリックス効果、(4) 測定するパラメータが適切な形で決定できないこと、(5) 較正、及び(6) ブランク補正の失敗による。

は、決定・推定のためにデータを収集、分析、及び評価する最小の面積、体積、又は時間単位のことである。以下に、ステップ 4 における実施内容や重要事項を示す。

- 対象とする母集団を定義する。これはサンプルの単位全てを集めたものである。
- 対象の母集団からサンプリングする際に考慮する必要がある以下の 2 種類の範囲について定める。1 つは空間的範囲であり、これは調査する物理的な領域やサンプリングを実施する場所を定めたものである。もう 1 つは時間的範囲であり、調査結果が代表する期間やサンプリングを実施する時期を示すものである。
  - 対象母集団の空間的範囲を定める際、ステップ 1 で作成した概念モデルが重要な情報となる。また、この際の重要な検討事項は、決定・推定が適用可能な地理的領域の定義、及び母集団の比較的等質な部分集合への分割である。適切な分割により、ステップ 7 でサンプリング計画を作成する際に、必要なサンプル数を減らせる可能性がある。
  - 時間的範囲を定める際に考慮すべき重要な事項は、データが代表する期間の決定と、決定・推定を適用する期間の決定である。気象条件、季節、又は異なる環境条件における装置の操作等の時期に関連する現象により、条件が調査の過程で変化する可能性がある。この場合、どの時期が対象母集団を代表するデータの収集に最も適しているかを決定する。また、特に将来のことを考える場合には、決定・推定を適用する期間全体にわたってデータを収集できるとは限らない。このため、対象が経時変化する可能性や実施する決定・推定に関連する調査の時間的制約を考慮することが望ましい。
- データ収集に関する実際的な制約を特定することが望ましい。これはサンプル収集対象物へのアクセス、機器の利用可能性や操作、及びサンプリングが不可能な環境条件等のことである。
- 決定・推定問題についての推論のスケールを定める。誤った決定をするか、許容できない不確かさの推定をする帰結（Consequence；ステップ 6）は、推論のスケールの大きさに関連することとなる。
  - 決定問題については、決定を実施する単位の現在・将来の使用や、決定を実施する単位の位置等を考慮することが重要である。また、誤った決定による帰結は、注意深く検討することが望ましい。例えば、収集したデータに基づいて広い土地の浄化措置が必要であると決定した場合、実際にはこの決定が誤りであったとすると、不要に大きな費用がかかることになる。従って、誤った決定が許容できない資源の浪費を引き起こしてしまうほど、スケールは大きくしない方がよいということになる。
  - 推定問題については、推論のスケールは調査目標や調査結果の使用可能性に関連する。不正確な推定による帰結を特定することは困難であると考えられるが、再調査の必要が生じた場合にかかる時間と費用を示すことは可能である。
  - 複数の決定が関係する決定問題については、複数の決定に関連した誤りの割合をどのように適切に制御するかを検討することが望ましい。

3.5 ステップ 5：分析アプローチの作成

このステップでは、どのように調査結果を分析し、どのようにデータから結論を導出するかを示す分析アプローチを作成する。決定問題については、ステップ 2 とステップ 4 におけるアウトプットと、このステップで定めるパラメータを組み合わせることにより、論理的な決定ルールを作成する。一方で、推定問題については推定量の仕様を定める。以下に、ステップ 5 における実施内容や重要事項を示す。

- 母集団に関する重要な特性・特徴を示す母集団パラメータを選択する。母集団パラメータの例としては、平均値、中央値、又はパーセンタイル値がある。これは規制により定まる場合もあるが、そうでないときは、プロジェクト特有のニーズや検討に基づいて選択する。最も一般的に選択されるパラメータは、母集団の平均値である。
  - 決定問題においては、母集団パラメータに加えて、選択肢となる措置からの選択に用いるための措置レベルを定めることが望ましい。措置レベルは、規制基準等のように予め決定されたものと、DQO プロセスの中で定める調査特有のものがある。
  - 推定問題においても、措置レベルや閾値の種類の検討が関連することがある。例えば、推定するパラメータが閾値を超える母集団の割合という場合である。
- ステップ 3 で特定した分析法について、それぞれの検出限界値を文書化する。検出限界値が措置レベルを超えるか、非常に近い場合には、より感度の高い方法を指定するか、異なる分析アプローチを用いることが望ましい。
- 決定問題については、母集団パラメータと措置レベルを、決定のスケール（ステップ 4）と選択肢となる措置（ステップ 2）と組み合わせることにより、論理的な決定ルールを、「A である場合には B を実施し、そうでない場合には C を実施する」という形で作成する。この決定ルールは、母集団パラメータの真値に関しての理論的法則である。即ち、母集団に関する完全な知識があるとした場合に、どのように決定するかを定めたものである。
- 推定問題においては、選択した母集団パラメータを、推定のスケールや他の母集団の範囲（ステップ 4）と組み合わせることにより、推定量の仕様を定める。

3.6 ステップ 6：性能・許容基準の設定

ステップ 5 では、完全な情報を持っているという想定の下で決定ルールを作成したが、現実的には完全な情報は持ち得ない。また、収集するデータはサンプリング・分析に伴う誤差を有する[*19]。このため、収集したデータに基づいて誤った結論が導かれるか、推定値の不確かさが許容範囲を超える可能性がある。このステップでは、これらの可能性を最小限にするために、データが適合する必要がある性能・許容基準を定める。性能基準は、適切なレベルの QA の実施と合わせて、新たなデータ収集作業の計画に用いる基準である。一方で許容基準は、既存データを収集・評価するために用いる基準である。

このステップでは、図 1.1 に示すように、データの使用目的に基づく 2 つの分岐がある。決

[*19] 一般的に、サンプリングの誤差は分析の誤差よりもかなり大きく、従ってそれを制御するためにはより多くの資源を要する。

定問題においては、収集データを用いて統計的仮説検定を実施することとなる[*20]。一方で、推定問題においては、収集データを用いて未知の母集団パラメータの推定や不確かさの評価を実施することとなる。これらの内容はそれぞれ、続く 3.6.1 項及び 3.6.2 項に記載する。

3.6.1 ステップ 6A：統計的仮説検定

決定問題では通常、収集データに対してパラメータの分布を仮定し、適切な統計的仮説検定法を適用する。この際、収集データの不確かさにより、検定により誤った判断をする可能性がある。この可能性は常に存在することから、ある程度は受け入れる必要がある。以下に、ステップ 6A における実施内容や重要事項を示す。

- 決定をする際、ある状況が正しいか誤りであるかの 2 つの場合がある。仮説検定を行うにあたり、2 つの結果のうち一方を基準状態（Baseline condition）と分類し、検定を受ける真の状態（例えば、許可基準に適合している）を表すと仮定する。もう一方の条件は対立状態（Alternative condition；例えば、許可基準を超えている）と分類する。統計学的には、基準状態である場合を帰無仮説と呼び、対立状態である場合を対立仮説と呼ぶ。基準状態と対立状態は、合わせてパラメータの取り得る真値の範囲を網羅し、措置レベルがこれらの境界となる。データにより、基準状態が殆ど正しくなさそうであることが示されない限り、基準状態を正しいと考えることとなる。仮説検定を適用することにより、結果に基づいて以下のように意思決定ができる。
  - 基準状態が誤っていることを示すには証拠不十分なデータしかないため、基準状態を棄却せず、基準状態が正しいままであると結論付ける。
  - 基準状態が誤っていることを示すための十分な証拠となるデータがあるため、基準状態を棄却し、対立状態が真であると結論付ける。
- 統計的仮説検定においては、2 つの状態のうち実際にどちらが真であるか、及びデータに基づきどちらの状態を真であると決定するかにより、結果は図 3.1 に示す 4 つの可能性がある。この 4 つのうち、2 つは正しい決定であるが、残り 2 つは誤った決定（誤った棄却と誤った採択）である。このステップの主要な目的は、これら 2 つの誤りが生じる確率について、どこまで許容するかを定めることである。
  - 誤った棄却（又は第一種の過誤）は、基準状態（帰無仮説）が実際には真である場合に、これを棄却するときに起こる。この確率はαと表し、仮説検定の有意水準とも呼ばれる。
  - 誤った採択（又は第二種の過誤）は、基準状態（帰無仮説）が実際には誤りである場合に、これを棄却できない場合に起こる。この確率はβと表す。

[*20] 統計的仮説検定とは、何らかの仮説（仮定のこと）について、サンプルのデータとつきあわせてこの仮説が正しいと言えるかどうかを調べる手法のことである。これは、以下の手順により実施する[19]。(1) 仮説を設ける。(2) 仮説を検定するために適当なサンプルの統計量を選ぶ。(3) その統計量の値についてある境界値を設定し、仮説の成立にとってその値よりも不利な値の領域（仮説が正しいと言い難い領域（棄却域））、即ち仮説が正しいとするとその統計量の値が得られる確率が非常に小さくなる領域では仮説を否定し、有利な値の領域（採択域）、即ち仮説が正しいとしてその統計量の値が得られる確率が小さくない領域では仮説を肯定する（少なくとも否定はしない）ことにする。(4) サンプルのデータにより、統計量の値が棄却域に入れば仮説を否定し、採択域に入れば仮説を肯定する。

DQO プロセスのステップ 6 とステップ 7 において、決定の誤りによる帰結と、性能・許容基準を満たすデータを収集するために負担する費用とのバランスを考える必要がある。このバランスを取るために、ステップ 6 とステップ 7 を数回繰り返す必要が生じる。

- 収集データに統計的仮説検定を適用する際、決定性能曲線（Decision performance curve）というグラフを利用することが有用である。このグラフの例を図 3.2 に示す。図 3.2 では、パラメータの真値が措置レベル以下（基準状態）であるという帰無仮説と、措置レベルを超える（対立状態）という対立仮説の検定における、2 つの例を示している。グラフの横軸はパラメータの真値が取り得る範囲であり、措置レベルを含む。縦軸はパラメータの真値が措置レベルを超える（即ち、対立状態が正しい）と決定する確率の範囲を表す。仮に、パラメータ真値に関する完全な知識を持っているとすると、誤った決定が起こらないことから、措置レベル以下である全ての値について決定性能曲線は 0 を示し、逆に措置レベル以上では 1 となる（図 3.2 中の破線）。実際には収集データにばらつき（Variability）や不確かさがあるため、パラメータ真値の増加に従い、確率は 0 から 1 まで次第に増加する（図 3.2 中の実線）。
- 基準状態は、規制により定められる場合がある。そうでない場合には、決定の誤りによる帰結を考慮して決定することが望ましい。この際、特にパラメータ真値が措置レベルに近いときに、上述した 2 つの決定の誤りのうちどちらがより重大な結果を招くかを決定し、この誤りが起こりにくくなるように基準状態を設定する。また、パラメータ真値が措置レベルよりも高いと信じられる理由がある場合には、基準状態をこのように定義することにより、そうではないことをデータにより証明することを要求できる。
- 対立状態は、措置レベルから、基準状態の反対側の値全てである。図 3.3 に、基準状態が措置レベル（便宜上、平均濃度 100 ppm としている）より平均濃度が低い場合と高い場合の 2 つの例を示す[*21]。図 3.3(a)においては、基準状態は措置レベル以下である平均濃度の真値であり、グラフは基準状態を棄却する確率を表す。即ち、措置レベル以下の濃度範囲では、グラフは誤った棄却率αを表し、措置レベル以上においては、グラフは上から下に見て誤った採択率βを表す。一方、図 3.3(b)においては、基準状態は措置レベルを超える平均濃度の真値であり、グラフは基準状態を棄却できない確率を表す。即ち、措置レベル以下の濃度範囲では、グラフは誤った採択率βを表し、措置レベル以上においては、グラフは上から下に見て誤った棄却率αを表す。
- 図 3.3 に示す通り、対立状態の中にグレー領域（Gray region）と呼ばれる領域がある。この領域は措置レベルに近く、決定の誤りの帰結が比較的重大でない値の範囲であり、誤った採択の確率βが比較的大きくなる。グレー領域の取り方は基準状態の定義により変わり、その値の範囲は、一方を措置レベルとし、もう一方を誤った採択の帰結が重大であると考えられる値とする。一般にグレー領域を小さくすると、高いβ値が許容できると考えられる範囲が減少し、必要なサンプル数は多くなる。統計学においては、この幅は最小検出差と呼ばれ、通常はΔと表す。

[*21] 2000 年の DQO プロセスの手引書 [7]では、決定性能目標図式（DPGD）と呼ばれており、決定性能曲線に近いものであるとされている。これらは、数点のみを示すか、連続的な曲線かという違いがある。

- 許容できる決定の誤りの限界値を設定する。これは、あるパラメータ真値において、決定の誤りが生じる可能性を許容する、最大の確率のことである。これを設定することにより、不確かさに対する許容性や決定の誤りに対して想定するリスクを表現することとなる。ここでは、最低限以下の 2 つを設定することが望ましい。
  - 措置レベルにおいて許容できる誤った棄却率の限界値。
  - もう一方のグレー領域の境界において許容できる誤った採択率の限界値。

  これらの設定における初期値として、それぞれの誤り率を 0.01 とすることを推奨するが、これを規定値として捉えることは望ましくない[*22]。ある決定の誤りにより、保健への大きなリスクのように重大な結果が生じる可能性がある場合は厳しい（低い）限界値を設定し、そうでない場合には厳しくない限界値を設定する。なお、片方又は両方の決定の誤りを設定せずに、収集したデータに基づく決定をする場合もあると考えられる。特に、誤った採択率を設定しない場合には、グレー領域を定めないこととなる。例えば、規制によりパラメータの信頼区間の上限値を措置レベルと比較することが要求されている場合は、誤った棄却率は設定するが、誤った採択率は設定しない。

3.6.2 ステップ 6B：推定

データには固有の不確かさがあるため、推定値には不確かさを伴い、これは推定値とともに報告する必要がある。データ収集プロセスを適切に計画することにより、パラメータの推定値に伴う不確かさを、許容できる基準を満たすように制御できる。

収集データに伴う偏り（Bias）・精度（Precision）は、データの品質の主要な要素であり、収集データに基づく推定値の不確かさのレベルに直接影響する[*23]。これらについての情報は、QAPP において文書化することが望ましい。以下に、ステップ 6B における実施内容や重要事項を示す。

- パラメータの推定値の不確かさを、通常、絶対的・相対的な標準誤差か、取り得る値の区間として表す。統計的仮説検定（ステップ 6A）の場合と同様に、許容できる不確かさの大きさは、大きな不確かさに伴って生じる可能性がある帰結を考慮し（3.4 節参照）、利用可能な資源や他の制約とのバランスを取ることにより定める。
  - 標準誤差：標準誤差の計算は、利用できるデータ数、基になる分布、パラメータの推定値の計算に用いるデータのばらつき（Variability）といった多数の要因に依存する。標準誤差は絶対的な形（即ち、推定値に伴う単一の数値）か、パラメータ推定値に対して相対的な形（即ち、推定値の割合や百分率）で表すことができる。例としては、標準誤差がパラメータ推定値の 30%を超えないという目標を定めることができる。この目標は、（ある程度の精度で）十分な数のデータを収集することのみによって達成することができるため、収集データに対して設定する性能・許容基準として扱うことができる。

[*22] 典型的に、環境データに対する最も厳しい決定の誤りの限界値は、誤った棄却・誤った採択ともに 0.01（1%）であるとされているためである [1)]。

[*23] 偏りは系統誤差を表し、精度は偶然誤差を表す。

- 統計的区間：母集団のパラメータを推定する場合、それをある 1 つの値で指定する方法を点推定という。この推定値は真の値に近いと考えられるが、一致するわけではない。この不確かさを表す 1 つの方法が、点推定値の周囲に統計的区間を設定することである[*24]。

3.7 ステップ 7：データ収集計画の作成

このステップの目的は、ステップ 1 からステップ 6 までを通して作成した性能・許容基準を収集データが満たすような、費用対効果が大きい計画を作成することである。これは、調査目標を満たすのに十分かつ最もかかる費用が小さいデータ収集計画を作成するか、定められた予算内で、利用できる情報量を最大化するデータ収集計画を作成することに相当する。ここでは主に環境データの収集に関して記載するが、データ収集計画の作成に関する基本的な概念は、モデル作成や既存データの収集といった、他の種類のデータ収集作業にも使用できる。以下に、ステップ 7 における実施内容や重要事項を示す。

- 1 つ以上のサンプリング・分析計画の候補を作成する。計画候補の作成には、DQO プロセスのステップ 1 からステップ 6 までのアウトプット、予測されるデータのばらつき、及びデータの分布についての予備的な情報等が必要になる。これらの情報を、空間的・時間的なサンプリング計画の選択や分析技術の選択に利用することにより、全体としてのデータのばらつきを抑えることができる。
- 確率ベースのサンプリングのみを検討するか、判断に基づくサンプリングがある程度許容されるかを、調査における制約の度合いに応じて決定する必要がある。確率ベースのサンプリング計画では、全サンプリング単位の中から無作為に選択されたサンプリング単位のみのデータを取得する。一方で、判断に基づくサンプリング計画では、サンプリング単位を無作為に選択せず、サンプリングを担当する個人の裁量において選択する。これら 2 つのサンプリング計画では、データから導かれる結論は全く異なる種類のものとなる。
  - 確率ベースのサンプリング計画は、統計的推論法（例えば、仮説検定、信頼区間）を使用する際に用いる必要がある。用いるアプローチとしては、単純なランダムサンプリング、層化サンプリング（Stratified sampling）、及び体系的なグリッドサンプリング等がある。確率ベースのサンプリング計画を用いることにより、対象母集団に関する定量的な結論を得ることができ、同時に信頼区間の計算、決定の誤りの確率の設定等により、結論の不確かさを適切に表現できる。DQO プロセスはデータの不確かさの適切な取扱いに重点を置いているため、確率ベースのサンプリング計画は大いに推奨されるものである。
  - 判断に基づくサンプリング計画では、サンプリング単位の選択は専門的知識や専門家の判断に基づく。確率ベースのサンプリングと比較して、サイトの状態やサンプ

[*24] 最もよく用いられるものは信頼区間である。信頼区間は、指定された信頼係数（パラメータ値がその区間に含まれると考えたとき、それが正しいと確信できる程度）で、パラメータ値を含む可能性がある値の範囲のことである。

リング単位の履歴・知識を活用する点が強みである。しかし、判断に基づくサンプリングでは不確かさを適切に表現できないことから、この方法は科学的に厳密な結論を出すためには使用できない。

- 計画候補においては、最低限として、サンプル選択法、サンプルの種類、サンプル数、及びサンプル当たりの分析数を指定することが望ましい。計画候補を作成するために、サンプル数や空間的・時間的位置、収集するサンプルの種類、用いるサンプリング・分析法、又は繰り返し分析数を変化させるという方法がある。ここで重要なことは、可能な限り母集団の自然のばらつきを減らすことであり、この方法の 1 つが、母集団をできる限り等質的な層（Strata）に分割することである（3.4 節参照）。
- データの代表性は極めて重要な要素であり、測定値が実際のサンプリング単位を反映する程度と、サンプルが実際に対象母集団を表す度合いを示す。調査計画においてサンプルの数と位置を適切に定めることで、代表性を一部考慮できる。代表性のあるサンプリング計画を作成するためにも、確率ベースのサンプリング計画を使用することが推奨される。但し、対象母集団全体の代表性が、サンプリング計画作成の要件とはならないこともある。例えば、対象サイトに関して適切な事前情報が利用可能であり、サンプリングに高い費用がかかる場合には、サイト内で最も高い濃度の領域からサンプルを採取するように、スクリーニングのためのサンプリング計画を作成できる。これらのサンプルについて測定した濃度が措置レベルより低ければ、サイトの汚染物のレベルが低いことを決定できることとなる。
- 必要最小限のサンプル数の決定は、収集するデータのばらつきの推定値に依存する。この情報源としては、同じ母集団の予備的な調査、又は他の類似した母集団に対して実施した調査等がある。また、ばらつきの正確な推定が出来ればサンプル数は適切になるが、概算でしかわからない場合には、サンプル数の過小評価を避けるために、保守的に仮定することが望ましい。サンプル数の計算には、ソフトウェアを使用することが便利である。この例としてはビジュアルサンプルプラン（VSP）があり、性能・許容基準に適合するために必要なサンプル数、全サンプリング費用、及び地図上のサンプル採取点が計算できる。VSP ソフトウェアの概要は付録 D に記載する。
- 計画候補の中で、プロジェクトに課された非技術的、経済的、及び保健的要因を考慮し、性能・許容基準を満たすために必要となる費用（又は予想される費用）と基準への適合性のバランスが最もよい計画候補を、費用対効果が大きい計画として選択する。
- 性能・許容基準を満たす計画候補がない場合には、サンプリング法の代替案を検討する必要がある。この結果でもまた計画候補がない場合には、DQO プロセスの以前のステップに戻り、アウトプットを修正する必要がある。この例としては、決定の誤りの許容限界値の増加、グレー領域幅の増加、信頼区間の幅かデータ精度の要件の緩和、サンプリング・分析費用の増加、及び調査範囲の変更等が考えられる。
- EPA の品質体系においては、サンプリング・分析計画を、計画の実施に関する要件や手順と共に文書化する必要がある。ここではサンプル数、サンプルの種類、一般的に用いる採取法、各サンプルの量、各サンプルが代表する範囲、サンプル位置と選択法、時期

的な問題、及び分析法等を文書化することが望ましい。概念モデル、分析アプローチ、及びデータ収集と統計的分析に対する仮定を適切に文書化することにより、元の計画から何らかの相違が発生した際に、調査全体としての妥当性を維持するための重要な情報源として参考にできる。これはまた、最終的な決定をする際に、データ品質評価（DQA）における重要な情報源となる。

3.8　DQO プロセスによる計画作成手順のまとめ

DQO プロセスは、データ収集の目的、利用可能な情報といった前提条件の確認をするステップ 1、調査範囲・時期といった定性的な基準を定めることを目的としたステップ 2 からステップ 5、収集するデータが満たすべき定量的な基準を定めるステップ 6、及び定めた基準を満たす計画の候補を作成し、その中から最適なものを選択するというステップ 7 の、計 7 つのステップが並んだ構造となっている。DQO プロセスでは、7 つのステップをステップ 1 からステップ 7 まで順番に 1 回ずつ進めていくことを意図しておらず、柔軟性を持たせるために、情報の更新に合わせて以前のステップに戻り、計画を見直して改善していくことを前提としている。このプロセスを通して、科学的に厳密で、かつ費用対効果が大きい計画を作成できる。

DQO プロセスの手引書 [1)]の中で最も重点的な説明がなされている部分は、ステップ 6 における定量的な基準の作成についてである。特に、DQO プロセスの成り立ち（2 章）を考慮すると、ステップ 6A における統計的仮説検定のためのパラメータ値（誤った棄却率、誤った採択率等）の設定が最も重要な項目であると言える。統計的仮説検定の実施においてはパラメータ値の設定には任意性があり、従ってプロジェクト管理者に有利になるようにサンプル数を少なくなるような設定が可能ではあるが、DQO プロセスでは、計画作成チームに利害関係者を加えて議論しつつ進めることによりこのような不透明性を削減するとともに、パラメータ値を設定する前提・過程を明確にするような構造となっている。このように、意思決定に統計的仮設検定を用いる際のパラメータ値の設定に関して説明性を持たせ、データ収集計画に関する合意形成をすることにより、科学的かつ費用効果が大きい計画の作成が可能となる。

表 3.1　現在の DQO プロセスの各ステップにおける主要なアウトプット

ステップ 1：問題点の明言	
• 計画作成チームのリスト • 問題点の簡潔な記述 • 調査に使用できる資源と締切のまとめ • 環境問題の概念モデルと仮決定したデータの使用目的	
ステップ 2：調査目的の特定	
• 調査における主要な論点 • 選択肢となる措置のリスト • 決定問題について、決定ステートメントのリスト • 推定問題について、推定ステートメントのリスト	
ステップ 3：情報インプットの特定	
• 必要な情報の種類 • 決定・推定に必要な特性のリスト、及び用いる可能性のある情報源のリスト • 適切なサンプリング・分析法の性能についての情報	
ステップ 4：調査範囲の決定	
• 対象母集団と空間的な範囲の定義 • データ収集と決定・推定の実施に適切な時期 • データ収集を妨げる可能性がある実際的な制約 • 適切な決定・推定のスケール	
ステップ 5：分析アプローチの作成	
• 母集団パラメータの特定 • 決定問題において、選択した措置レベルに基づく論理的な決定ルール • 推定問題において、用いる推定量の仕様	
ステップ 6：性能・許容基準の設定	
ステップ 6A：統計的仮説検定	ステップ 6B：推定
• 基準状態に対応するパラメータ真値の範囲の設定 • 対立状態における、グレー領域の設定 • 許容できる決定の誤りの限界値一式	• パラメータ真値を含む可能性を定める信頼水準 • 絶対的・相対的な、許容できる区間の幅
ステップ 7：データ収集計画の作成	
• サンプリング・分析計画 • どのように計画を実施していくかの詳細	

		実際に真である状態	
		基準状態	対立状態
検定により行う決定	基準状態が真	正しい決定	決定の誤り（誤った採択）
	対立状態が真	決定の誤り（誤った棄却）	正しい決定

図 3.1　統計的仮説検定において起こり得る 4 つの結果

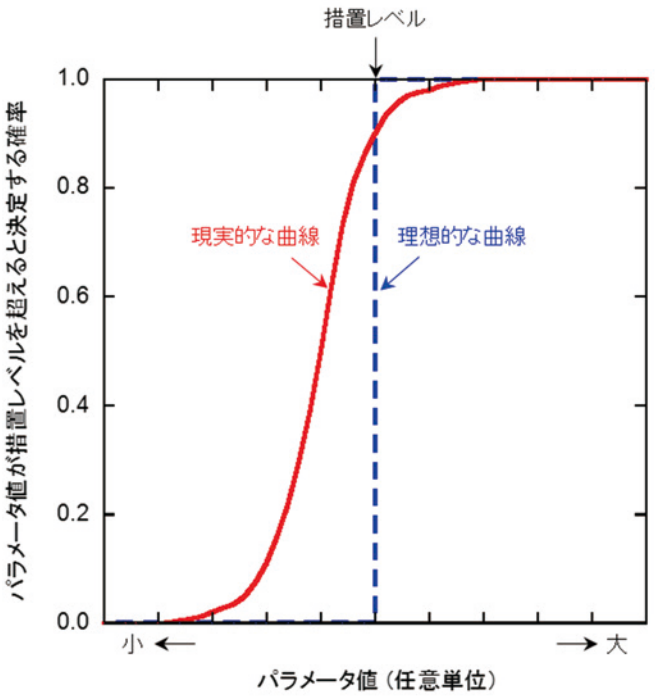

図 3.2　理想的・現実的な決定性能曲線

破線は理想的な曲線、実線は現実的な曲線を表す。

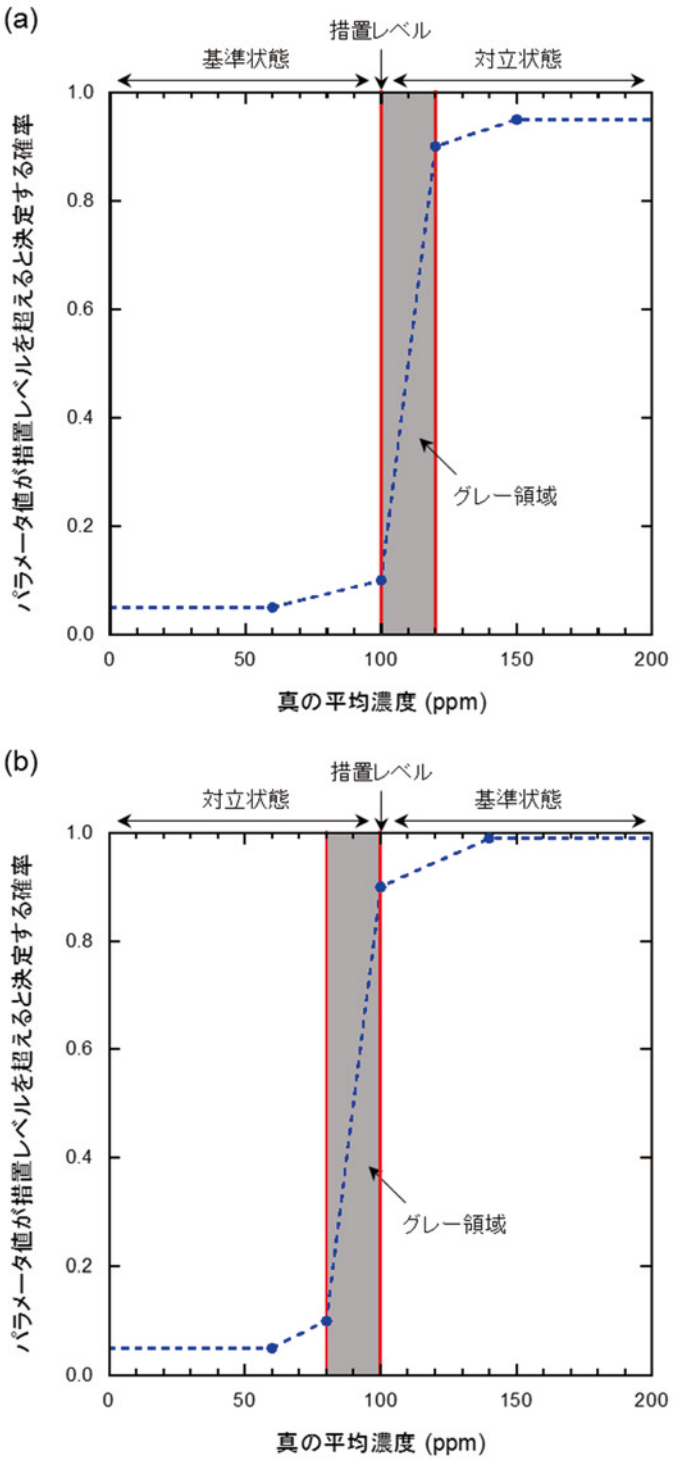

図 3.3　対立状態の取り方が異なる 2 つの図式

(a) 対立状態が措置レベルを超える場合の図式、(b) 対立状態が措置レベルを超えない場合の図式。

4. DQO プロセスの後に実施する作業

本報告書ではこれまでに、データ品質目標（DQO）プロセスの開発に関する経緯やどのような枠組みの下で利用されているか、及びプロセスの内容について説明してきた。既に説明した通り、DQO プロセスは費用対効果が大きいデータ収集計画を作成するための方法の 1 つであり、これは図 2.6 に示したプロジェクトライフサイクルの全体像から見ると、最初のフェーズ（計画作成フェーズ）の初めに実施するものである。DQO プロセスの実施後には、プロジェクトの目標達成に向けて、計画作成フェーズを含むプロジェクトライフサイクルの 3 つのフェーズの作業を順次実施していくこととなる。従って、DQO プロセスを利用して、プロジェクトの目標達成のために有効な計画を作成するためには、プロジェクトライフサイクル全体の広い視点を持ち、計画作成フェーズにおける作業と後のフェーズのものとの関連を理解しておくことが重要となる。米国環境保護庁（EPA）では、このような全体的な視点に基づいて、各フェーズにおける作業を支援することを目的としたツールを作成している [14)]。これらのツールを図 4.1 に示す[*25]。本章では、主に 2006 年の DQO プロセスの手引書 [1)]に基づき、EPA が関係するデータ収集プロジェクトの各フェーズにおける作業について、EPA が作成してきたツールとの関連を含め、要点を整理する。

4.1 計画作成

既に説明した通り、計画作成フェーズではまず収集するデータの使用目的を定め、データ収集計画を作成する。DQO プロセスを含め、体系的計画作成法を用いることにより、収集データが使用目的を満たすための性能・許容基準を作成できる。

EPA の方針としては、体系的計画作成法の成果を、品質保証プロジェクト計画（QAPP）か他の同様な文書にて文書化することを要求している [13,15)]。QAPP は、プロジェクトライフサイクルの中で実施する必要がある品質保証（QA）・品質管理（QC）の手順や他の技術的作業を記載した文書である。また、EPA 品質マニュアルでは、関係する全ての作業者に、認可された QAPP のコピーを配布することが望ましいとされている [13)]。QAPP の利点は、作業関係者に計画の実施についての詳細を伝達し、最終的な結果がプロジェクトの目標を達成することを保証することである [17)]。

QAPP はプロジェクト全体（計画作成、実施、及び評価）を網羅する、標準化した要素で構成する必要がある。QAPP について、EPA 品質マニュアルに示されている全 24 要素を表 4.1 に示す [13)]。これらの要素は、以下の 4 つの主要なグループに分類されている。

- グループ A：プロジェクト管理
  このグループには、プロジェクトの管理、プロジェクトの履歴や目標、及び関係者の役割や責任に関する要素が含まれる。これらの要素は、プロジェクトの目的が明確に述べられていること、全ての関係者がプロジェクトの目標やアプローチを理解すること、及び計画作成プロセスが文書化されていることを確認するのに役立つ。

[*25] 図 4.1 に示したツールのうち、EPA の品質体系において使用が必須であるものは、体系的計画作成法と QAPP の 2 つである。

- グループ B：データの生成と取得
  このグループには、プロジェクトの計画や実施に関する要素を網羅的に含む。これらの要素は、サンプリング、分析、データの取扱い、及び QC について適切な方法を用い、文書化されていることを保証する。
- グループ C：評価と監視
  このグループの要素は、プロジェクト実施の有効性や関連する QA・QC の要件に着目したものである。評価の目的は、QAPP が規定通りに実施されることを保証することである。
- グループ D：データの妥当性確認（Validation）と有効性
  このグループの要素は、データを収集や生成した後に生じる QA に着目したものである。これらの要素は、データが定めた基準に適合するかを確認することに役立つ。

但し、環境データ収集作業は多様かつ複雑であることから、実施する作業の性質やデータの使用目的に従い、プロジェクトごとに QAPP の内容や詳細レベルが異なることとなる [13)]。

計画作成フェーズにおける重要事項は、以下の 2 点であると考えられる。

- 将来のデータの利用目的を考慮して、費用対効果が大きいデータ収集計画を作成する。
- 作成した計画は十分な詳細さで文書化し、関係者全員と共有する。

4.2 実施・監視

計画作成フェーズを終了する際に、標準作業手順（SOP）を定めるか、又は準備する。SOP は、どのようにルーチン作業や繰り返し作業を実施することが望ましいかを記載した説明書[*26]であり、実施・監視フェーズにおいて利用する。SOP の情報を利用することにより、各作業者が作業を適切に実施できるとともに、プロセスや手順を一貫して実施することで、製品や最終的な結果の品質の一貫性を促進できる [20)]。

実施・監視フェーズでは、体系的計画作成プロセスにおいて、プロジェクトの目標を達成するために必要であると特定した情報を取得する。データは QAPP や SOP 等で定めた仕様に従って収集する。ここで実施するデータ収集作業は、既知の情報源からの既存データの収集、文献検索、フィールドサンプルの収集、及び実験室におけるサンプルの分析等がある。データ収集作業においては、その作業が正しく行われ、QAPP 等に従うことを保証するために、必要な QA・QC 作業を実施する。これには、技術システム監査（Technical systems audit）と性能評価といった監視を含む [21),*27]。

実施・監視フェーズにおける重要事項は、以下の 2 点であると考えられる。

- データ収集作業の実施に向けて、結果の品質の一貫性を担保するために、予めルーチン作業や繰り返し作業の手順を定め、文書化する。
- 定めた仕様や手順に従いデータを収集し、必要な QA・QC 作業を実施する。

---

*26 作業の例としては、分析並びに機器の維持、校正、及び使用等がある [20)]。

*27 技術システム監査と性能評価は、EPA の技術監査と関連する評価の手引書 [21)]に記載されている、プロジェクト実施の有効性を評価するための、技術監査と関連する評価の一部である。技術システム監査は、認可された QAPP において規定される手順やプロセスが実施されている程度を定性的に文書化するものである。一方で性能評価は、許容できる結果を得るための測定システムの能力を定量的に評価するものである。

4.3 評価

評価フェーズでは、まず収集したデータの検証（Verification）及び妥当性確認を実施し、データが計画作成フェーズで定めた仕様に従って収集されており、データの使用目的に整合していることを確かめる[*28]。ここで、データの検証は、「方法、手順、又は契約上の要件に対し、特定のデータ一式の完全性、正しさ、及び準拠性を評価するプロセス」であると定義されており、フィールドや実験室におけるデータ収集作業の間か、その終了後に実施するものである[22)]。一方、データの妥当性確認は、「特定のデータ一式について分析の品質を決定するための、方法、手順、又は契約上の準拠性以外（即ち、データの検証以外）にデータの評価を拡張した、分析物やサンプルに特有のプロセス」であると定義されており、多くの場合、データの検証後に、データ収集者やデータ利用者とは独立した作業者により実施されるものである[22)]。

データの検証及び妥当性確認の後、最終的なデータ品質評価（DQA）を実施する[*29]。これは、図 4.2 に示す DQA プロセス[18,23)]という多段階のプロセスに従って実施する。図 4.2 の 5 段階のプロセスは、概ねデータを解析する統計学者の作業に類似しているものであり、DQO プロセスと同様に反復性があるものである。以下に、DQA プロセスの各ステップの概要を示す。

- ステップ 1：プロジェクトの目標・サンプリング計画のレビュー
  体系的計画作成法を通して定めた目標をレビューし、依然として適切なものであるかを確認する。目標を定めていない場合（例えば、独立に収集された既存データを用いる場合）には、プロジェクトの目標に対してデータを評価する前に目標を定める。サンプリング計画とデータ収集に関する文書をレビューし、プロジェクトの目標との整合性を確認する。
- ステップ 2：予備的なデータのレビューの実施
  データの妥当性確認について QA 報告書をレビューし、基本統計量を計算し、データのグラフを作成する。これによりデータの構造を知ることができ、パターン、関係性、及び潜在的な異常を特定する。
- ステップ 3：統計的手法の選択
  性能・許容基準とサンプリング計画のレビュー、及び予備的なデータのレビューに基づいて、データを要約・解析するために適切な手順を選択する。統計的検定に関連する主要な仮定を特定する。
- ステップ 4：統計的手法の仮定の検証
  実際のデータや調査における他の情報を考慮し、基本的な仮定が成立するか、又は逸脱が許容できるかを評価する。
- ステップ 5：データからの結論の導出

[*28] EPA のデータの検証及び妥当性確認の手引書[22)]によると、データの検証の目的は、データが実際に行われたことを反映していること（即ち、意図した通りのものであること）を確認し、文書化することであり、一方でデータの妥当性確認の目的は、計画作成段階で作成したデータ品質の目標が達成されたかどうかを評価することであると説明されている。

[*29] データの検証及び妥当性確認と、DQA との大きな違いは、データの検証及び妥当性確認では、特定のサンプリング・分析手順と結果に着目する一方、DQA ではデータの使用目的（例えば、許容できる信頼水準での意思決定、又は望みの不確かさレベルでの推定）の達成やデータが効果的かつ確実にそれを裏付けるかに重点を置くことである[1,22)]。

統計的検定に関連した計算を実施し、これらの計算結果として導き出される結論を文書化する。サンプリング計画を再度利用しようとする場合には、計画の性能を評価する。

以上のプロセスを通して、データが使用目的に対して適切な種類、品質、及び量であるか、即ちプロジェクトの目標を満足するかを評価する。

評価フェーズにおける重要事項は、以下の 2 点であると考えられる。

- 収集したデータが目的通りのものであり、予め定めた基準に適合することを評価する。
- 収集したデータに基づいて、プロジェクトの目標を満足するかを評価する。

4.4 DQO プロセスの後に実施する作業のまとめ

DQO プロセスを開発してきた EPA においては、プロジェクトライフサイクルを通して最終的な決定・推定を実施するという全体像の中で、この最初のフェーズである計画作成フェーズにおいて、DQO プロセスをはじめとした体系的計画作成法を使用することと定めている。また、計画の作成後においても、各フェーズにおける作業を支援することを目的としたツールを整備している。計画作成フェーズでは、DQO プロセス等の体系的計画作成法を用いた成果を QAPP において文書化する。実施・監視フェーズでは、ルーチン作業や繰り返しの作業について SOP を定め、これに従ってデータを収集し、必要な QA・QC 作業を実施する。その後、評価フェーズにおいては、収集したデータに対する検証及び妥当性確認によってデータが目的通りのものであるか、予め定めた基準に適合するかについて評価した後で、最終的に DQA プロセスによって、収集したデータがプロジェクトの目標を満足するかを評価する。このような全体的な流れの中で、初めに将来的なデータの評価を踏まえたデータ収集計画を作成することにより、作成した計画やそれに基づくデータの収集・評価が、最終的な決定・推定というプロジェクトの目標に対して有効に機能することとなる。実際にデータを収集するプロジェクトを進めていく際にこのような枠組みやツールを整備することは容易ではないが、少なくともプロジェクトの全体的な視点や明確な目的を持つこと、収集するデータがどのように評価、使用されるかを理解しておくことは、計画作成段階において、プロジェクトの目標達成に向けて有効な計画を作成するためには重要であると言える。

表 4.1　EPA の品質体系における品質保証プロジェクト計画の要素

A. プロジェクト管理	
A1. タイトルと承認シート	A6. プロジェクト・作業の記述
A2. 目次	A7. 品質目標と基準
A3. 配布先リスト	A8. 特別な訓練・証明
A4. プロジェクト・作業組織	A9. 文書・記録
A5. 問題点の定義・背景	
B. データの生成と取得	
B1. サンプリングプロセス計画（実験計画）	B6. 器具・機器の検査、点検、メンテナンス
B2. サンプリング方法	B7. 器具・機器の較正と頻度
B3. サンプルの取扱いと保管	B8. 供給品と消耗品の検査・採用
B4. 分析方法	B9. データ取得要件（非測定）
B5. 品質管理	B10. データ管理
C. 評価と監視	
C1. 評価・対応作業	C2. 管理のための報告
D. データの妥当性確認と有用性	
D1. データのレビュー、検証及び妥当性確認の要件	D2. 検証及び妥当性確認の方法 D3. 利用者の要求との一致

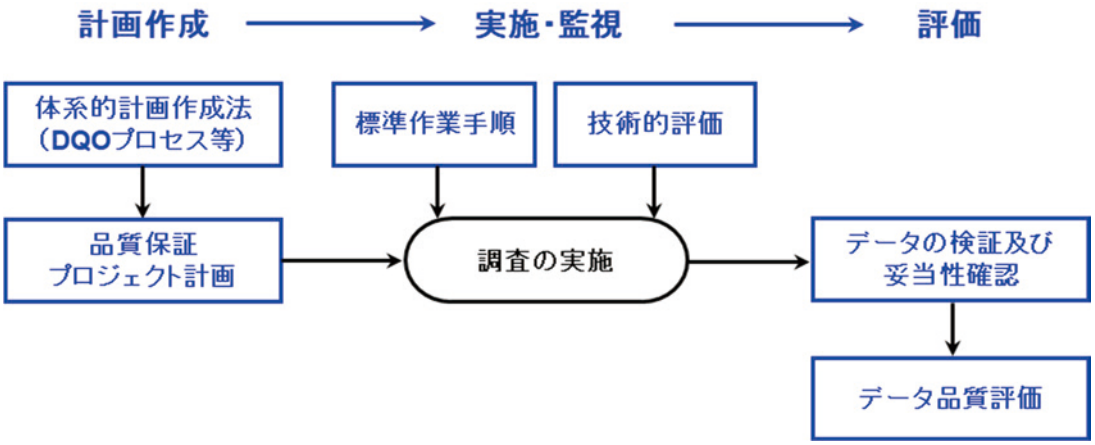

図 4.1　EPA の品質体系におけるプロジェクトの要素とツール

文献 [14]に基づき作成した。図中の四角内がツールを表す。

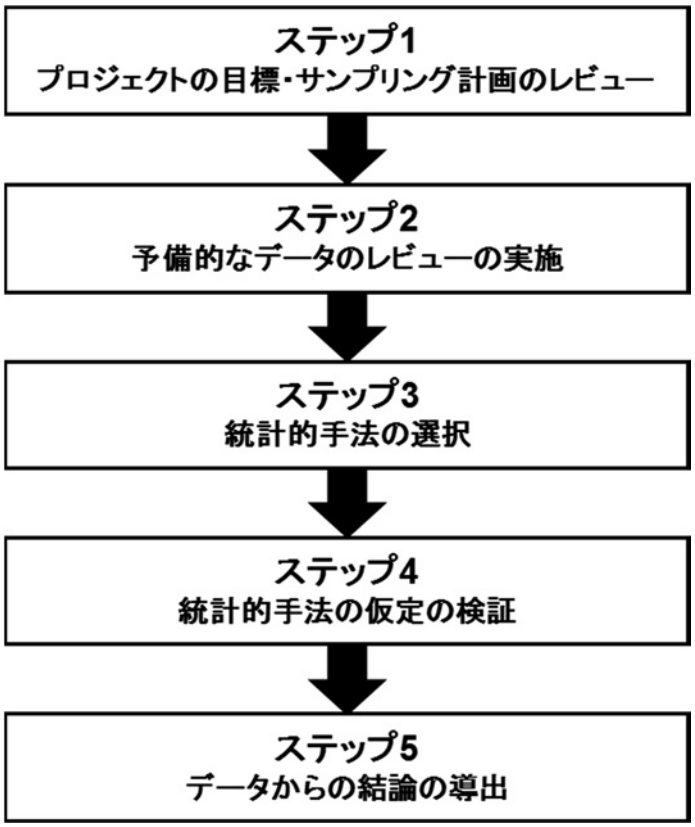

図 4.2　DQA プロセス

2006 年の DQO プロセスの手引書 [1]に基づき作成した。

5. 米国ハンフォードサイトにおける DQO プロセスの適用例

原子力機構に保管されている放射性廃棄物は、原子力機構内外の様々な施設から発生しており、その性状は複雑である。これらの廃棄物について、仮にデータ品質目標（DQO）プロセスを用いて費用対効果が大きい性状把握計画を作成しようとする場合には、DQO プロセスに対する十分な理解があったとしても、相当に困難なものとなることが予想される。そこで本章では、このような場合に参考にすることを考慮し、原子力施設において放射性廃棄物や放射性物質による汚染物の性状把握に関する計画作成のために、DQO プロセスが使用された具体例を紹介する[*30]。原子力施設として、米国のハンフォードサイトに着目し、DQO プロセスの実施例を数例紹介する。これは、ハンフォードサイトは過去に生じた多種多様なレガシー廃棄物を有しており、大きな環境汚染問題を抱えていることから、特に複雑な放射性廃棄物や放射性物質による汚染物を対象とした性状把握が実施されており、かつ実施した DQO プロセスの内容を要約した報告書が多く公開されているためである。なお、それぞれの DQO プロセスの実施例は内容が膨大であるため、これらを紹介するにあたっては DQO プロセスの全体的な流れや検討項目の説明に重点を置き、本報告書ではこれに影響しないと判断した内容については、特に断ることなく省略するか、一部主要な部分に絞って要約するか、又は概要のみを記載する。このため、詳細な内容に興味がある読者は、適宜参考にしている文献を参照していただきたい。

5.1 ハンフォードサイトの概要

ハンフォードサイトは、米国ワシントン州南東部にある、過去に兵器用プルトニウムを生産していた原子力施設群である。図 5.1 にハンフォードサイトの概略図を示す。本節では文献 [24] に基づいて、ハンフォードサイトにおける廃棄物発生、保管、及び放射性核種の放出に関連した過去の出来事の概要を説明する[*31]。これらは、5.2 節から 5.4 節で紹介する、ハンフォードサイトにおける放射性廃棄物や放射性物質による汚染物の性状把握に関する取り組みの背景となるものである。

5.1.1 原子炉と再処理工場

最初の原子炉（B 原子炉）と再処理工場（T 工場）は 1944 年に建設され、運転を開始した。その後 1963 年までの間に、100 エリアにおいて、コロンビア川沿いに B 原子炉を含め計 9 基の原子炉（B、D、F、H、DR、C、KW、KE、及び N）が建設された。これらの原子炉において用いたウラン燃料は、輸送されてきた原料をハンフォードサイト南部の 300 エリアにおいて加工されたものである。照射後のウラン燃料は水中で一定期間保管した後、ハンフォードサイト中心部に位置する 200 エリアの再処理工場に輸送された。

計 5 施設の再処理工場（T、B、REDOX、PUREX、及び U）が、200 エリアに建設された。リン酸ビスマスプロセスを用いてプルトニウムを分離する T 工場と B 工場が、1944 年後半と 1945 年に稼働を開始した。1950 年代から、より高効率かつ安全な溶媒抽出プロセスを用いる REDOX

[*30] 本報告書で紹介する事例の一部は、過去の DQO プロセスの手引書 [6,7] に基づくものであると考えられる。
[*31] 2003 年の文献であるため、現在に関する記載については、現状とは異なる可能性がある。

工場と PUREX 工場が稼働を開始した[*32]。5 施設目となる U 工場は、タンク内廃棄物からウランを回収するために 1952 年から 1958 年まで運転されたが、使用済燃料の再処理は実施されなかった。再処理工場で製造したプルトニウム溶液は、200 西エリアのプルトニウム最終処理工場（Plutonium Finishing Plant）に輸送され、兵器用のプルトニウム金属が製造された。この工場は 1949 年から 1989 年まで稼働された。

5.1.2　廃棄物と核物質

再処理により発生した高放射性廃棄物は、地下タンクに送液されてきた。汚染が大きくない液体や冷却水は、排水溝（Ditch）や貯水池（Pond）に排出され、原子炉からの汚染水は、近くの土壌やコロンビア川に放出されてきた。また、固体廃棄物は浅地中トレンチ処分されたか施設内に保管され、気体状の排出物は大気に放出されてきた。

タンクの高放射性廃棄物は、1944 年から 1980 年代後半までに約 2×10^6 m^3 生成されたが、その後蒸発、地下への放出、化学処理、及びタンクの漏えいにより、体積は 90%減少して約 2×10^5 m^3 となった。文献 [24)]が出版された 2003 年の時点で、このタンク廃棄物には約 1.95×10^8 Ci（1 Ci = 3.7×10^{10} Bq）の放射能と約 2.2×10^5 t の化学物質が含まれている。サイトの 177 基のタンクのうち、149 基は 1943 年から 1964 年に設置された一重殻（Single-shell）の炭素鋼製タンクである。これらの予想耐用年数は 20 年であった。1956 年にタンク廃棄物の漏えいが疑われ、1959 年に漏えいが確認された。廃棄物の封じ込めを良くするために、1968 年より二重殻（Double-shell）の炭素鋼製タンクが製作され、28 基設置された。これらの予想耐用年数は 50 年以上である。長年かけて一重殻タンク内の液体の殆どが二重殻タンクに送液されてきたが、厚いスラッジ層やソルトケーキ層が残っている。

残存する使用済燃料の多くは、KE 原子炉と KW 原子炉における 2 つの老朽化したコンクリート製の貯蔵プール（Basin）に水中貯蔵されている。燃料の一部は腐食しており、放射性核種がプール水、スラッジ、及びコンクリート壁に移行している。また、過去に水の漏えいが生じており、土壌や地下水を汚染している。

固体廃棄物としては、化学物質や低レベルの放射能で汚染した器具等を収納した角型容器やドラム缶等があり、Pu、Np、及び Am といった長寿命の超ウラン（TRU）元素を含むものもある。ハンフォードサイトには埋設施設と地上の保管施設に 7.1×10^5 m^3 の固体廃棄物を有しており、うち 97%は埋設されているものである。これらの廃棄物は 5×10^6 Ci から 6×10^6 Ci の放射能と 6.5×10^4 t の化学物質を含む。1970 年以前は、あまり性状把握や分類がされていない固体廃棄物を埋設していたが、それ以降に埋設された固体廃棄物は、より性状把握がなされたものとなっている。現在、ハンフォードサイトの固体廃棄物は 200 西エリアにおいて埋設されている。

過去 50 年の間に、1.5×10^9 m^3 から 1.7×10^9 m^3 の液体が土壌や地下水に放出された[*33]。その結果、ハンフォードサイトの下の土壌や地下水においては、2×10^6 Ci の放射能と、9×10^4 t から 2.7×10^5 t の化学物質が存在しており、この大部分は 200 エリアにおけるものである。200 東

[*32] REDOX は Reduction and oxidation、PUREX は Plutonium and uranium extraction の略語である [24)]。
[*33] この放出量は、コロンビア川の 5 日毎の平均的な流量に相当する [24)]。

エリアからコロンビア川への 16 km を地下水が移動するのに要する時間は数十年であるが、200 西エリアからはおよそ 1 世紀かそれ以上となる。これは、帯水層における堆積物の透過性が、200 東エリアに比べて低いためである。このため、200 東エリアからの汚染地下水は 250 km^2 に広がっているが、200 西エリアからの広がりはずっと小さくなっている。

5.2　200 東エリアの地下水の性状把握

ハンフォードサイトにおいては、不圧帯水層からコロンビア川への地下水の流入は、最も重要な汚染物質の移行経路の 1 つである。ハンフォードサイトでは、法令等*34の要件に応じるため、地下水のモニタリングを実施している [25)]。ハンフォードサイトでは浄化対象となる区域が数多くある。これらは、効率的に浄化を実施していくために、地理的な区域や廃棄物発生源に基づいて、実施ユニット（OU）に分類されている [25,26)]。修復作業を評価したり、修復作業が活発でない区域の汚染物を監視したりするための地下水のモニタリングは、これらの OU 毎に実施されている。

200 東エリアにおいては、200-BP-5 と 200-PO-1 という 2 つの OU があり、井戸ネットワークによる地下水のモニタリングが実施されている*35。これらの OU は、東西方向の境界線により、200 東エリアを北部と南部の 2 つに分割して設定されているものである。200-BP-5 は 200 東エリア北部の地下水を扱い、このうち重要なプルームは、B 工場のリン酸ビスマス廃液の処分により生じたものである。200-PO-1 は 200 東エリア南部の地下水を扱い、PUREX 工場の運転によるプルームが含まれる。

200 東エリアの地下水汚染プルームは、時間の経過とともに移動する。これに対応するために、DQO プロセスを用いて、実施されている地下水モニタリングのアプローチが評価され、200-BP-5 と 200-PO-1 における井戸ネットワークが再検討されている。本節では 2002 年の DQO の要約の報告書 [27)] に基づき、この事例を紹介する。

5.2.1　ステップ 1：問題点の明言

5.2.1.1　プロジェクトの目標

200 東エリアにおいて、地下水汚染プルームの経時変化による新たなモニタリングの必要性を特定するために、200-BP-5 と 200-PO-1 の地下水モニタリングネットワークは定期的な評価

---

*34 地下水モニタリングは、資源保護回復法（RCRA）、包括的環境対処補償責任法（CERCLA）、米国エネルギー省（DOE）のオーダー（Order）、及びワシントン州行政規則（Washington Administrative Code）の要件に対応したものである [25,27)]。ハンフォードサイトにおける各法令の規制対象は多数に及び、一部重複している。なお、RCRA は廃棄物を適正に管理する枠組みを形成しているものであるが、過去の不適切な廃棄物の投棄、漏えい等の問題に対する記述はなく、これらは CERCLA で触れられるものである [12,28)]。

*35 200-BP-5 は CERCLA ユニットに分類され、主な規制機関は米国エネルギー庁（EPA）である。一方で、200-PO-1 は RCRA の過去操業（Past practice）ユニットに分類され、主な規制機関はワシントン州エコロジー庁（Washington State Department of Ecology）である [25,27)]。ここで、CERCLA ユニットと RCRA の過去操業ユニットとは廃棄物ユニットの分類のことであり、この分類としては、CERCLA ユニット、RCRA の過去操業ユニット、並びに RCRA の廃棄物の処理、保管、及び処分（TSD）ユニットの 3 種類がある [25)]。RCRA の過去操業ユニットは、有害物質の環境放出が生じたユニットのうち、RCRA に基づく是正措置（Corrective action）により調査・浄化するユニットである。RCRA の TSD ユニットは、RCRA の有害廃棄物を処理、保管、又は処分しているユニットである。

が必要である。CERCLA と RCRA の過去操業のモニタリング作業、及びサイト全体のモニタリング作業（脚注[*34,35] 参照）の一般的な目標は、地下水の品質についての基準的な状態を定め、地下水系の水理地質学的・化学的傾向を把握し、地下水の品質の問題点を評価することとなっている。この DQO プロセスに特有の主要な目標と決定は、以下の通りである。

- 200 東エリアについての着目汚染物質（COC）を特定すること。
- COC 地下水プルームの検出とモニタリング、地下水位と水流の方向、及び最適なサンプリング頻度に関して、現在のモニタリングネットワークの妥当性を評価するためのアプローチを定めること。
- ネットワークを再検討するための方法論を定めること。

5.2.1.2　プロジェクトの前提

DQO プロセスにおいては、以下の前提を考慮している。

- CERCLA、RCRA の過去操業のモニタリングの要件、及び原子力法（AEA）の監視モニタリング[*36]の要件を扱い、RCRA の TSD ユニット（脚注[*35] 参照）のモニタリング要件は別途考慮する。
- 既存のモニタリング井戸を最大限利用することとする。
- 200-BP-5 と 200-PO-1 の長期的な目的は、COC の自然な減少をモニターすることである。

5.2.1.3　プロジェクトの課題

プロジェクトの課題は以下の通りである。

- 200 東エリア北部の 200-BP-5 における汚染物の殆どはかなり局在しており、北部に向かって移動してきていることから、200-PO-1 には移っていない。一方で、南部の 200-PO-1 では、主に PUREX 施設周辺で発生した ^{3}H、^{129}I、及び硝酸塩プルームが、北部の 200-BP-5 に移っている。従って、200-BP-5 のモニタリングネットワークは、200-PO-1 のネットワークを補足する必要がある。
- 全ての新たな汚染物の放出や未知の放出は、既知の汚染プルームを対象として実施中の CERCLA や RCRA のモニタリング作業により明らかにすることが望ましい。しかし、新たな汚染や以前に特定されていない汚染が明らかになった場合には、早急に対応できるような柔軟性があることが望ましい。

5.2.1.4　参考文献

DQO の要約の報告書[27)]においては、参考となる 12 の文献とその要約のリストが整理されている。

5.2.1.5　サイトの背景情報

200-BP-5 に関する背景情報は以下の通りである。

- 地下水の汚染は、主に B 工場の過去の運転に伴う廃棄物の処分に関連している。1945 年

[*36] DOE のオーダーにより指示されるものである[27)]。

から 1956 年まで、B 工場ではリン酸ビスマスプロセスを用いて照射済燃料からプルトニウムを回収していた。その後 1968 年から 1985 年まで、タンク内の廃棄物からセシウムやストロンチウムを回収していた。これらの運転に伴い生じた廃棄物は様々な場所において処分された。

- 1954 年と 1955 年に、U 工場の運転に伴う廃棄物の上澄みが、BY クリブ（Crib）[*37]に放出された。この廃棄物は、フェロシアン化物等の化学物質と放射性物質を含んでおり、高濃度の ^{60}Co が地下水中に検出されたために処分が中止された。
- 汚染源が特定の施設に起因する場合がある。例えば、BY クリブや B-5 逆井戸（Reverse well）[*38]等である。しかし、中央台地（Central Plateau）において広く分布している地下水プルームは、B 工場区域や近隣の PUREX 施設群における複数の廃棄物処分の結果であり、廃棄物の化学的性質が類似していることから、特定の施設が原因であると考えることは難しい。
- 主な CERCLA サイトは、B-5 逆井戸、BY クリブ、及びゲイブル山の貯水池である。他にも潜在的な汚染源として、RCRA 施設を含めて多くの施設がある[*39]。B 工場に関連した RCRA 施設の中では、B-BX-BY タンク施設のみが、地下水が有害物により汚染されていると考えられているため、地下水の品質保証（QA）計画の下で監視されている。他の RCRA の TSD 施設も監視されているが、これらのサイトにより地下水が汚染したという証拠はない。
- モニタリングプログラムは、RCRA の TSD モニタリングネットワークを補足するように計画されてきた。主要な目標は、200 東エリアの廃棄物サイト等から生じるプルームをモニタリングすることである。これらの殆どのサイトにおける運転は停止しているが、プルームの速度や散逸を追跡するために、モニタリングが必要である。汚染物の北部への移動を検出する監視井戸（Guard well）群が、ゲイブル山とゲイブル丘の山峡にある。
- 1994 年 4 月から 1995 年 5 月まで、B-5 逆井戸と BY クリブ北部において浄化作業が実施されていた。現在は浄化作業が行われておらず、近い将来における計画もない。

一方で、200-PO-1 に関する背景情報は以下の通りである。

- 地下水汚染は、主に PUREX 工場の運転に関連した廃棄物処分に関するものである。低レベルの PUREX 廃棄物はクリブ、トレンチ、及び排水溝等に処分され、高レベル廃棄物（HLW）はタンクに収容された。特に、PUREX 工場南部と東部の多数のクリブが、広範囲にわたって地下水に影響を与えている。最も広く重大な汚染物は ^{3}H、^{129}I、及び硝酸塩である。
- 多数の施設が RCRA に従いモニタリングされている[*40]。現在までに、RCRA の規制を受

[*37] 地下の箱型構造体のこと [24)]。
[*38] 地下に掘ったボーリング孔のこと [29)]。
[*39] 例としては、B-BX-BY と C タンクファーム（RCRA）、B-7A、B-7B、及び B-8 クリブ、B-37 トレンチ、B-62 クリブ、216-B-63 排水溝（RCRA）、B 工場、廃液貯留施設（Liquid Effluent Retention Facility；RCRA）、並びに廃棄物管理地区（Waste Management Area）1 と 2 の低レベル埋設地（RCRA）がある。
[*40] 例としては、B 貯水池（216-B-3）、216-A-29 排水溝、200 エリアの処理排水処分施設（Treated Effluent Disposal Facility）、及び廃棄物管理地区 A-AX の HLW タンク等がある。

ける廃棄物により地下水が汚染されたという証拠は殆どない。BC クリブは、現在までに汚染は示されていないが、潜在的な汚染源である。

- 廃棄物サイトから生じたプルームをモニタリングするために、複数の監視井戸群も用いられている。200 東エリアの南東にある井戸群が、ハンフォードサイトの南部と東部に移動する汚染物を検出している。他にも、ハンフォードサイトの東端において、コロンビア川沿いに井戸群が配置されている。
- 浄化作業は現在行われておらず、近い将来における計画もない。

5.2.1.6　計画作成チーム

計画作成チームとして、米国パシフィックノースウェスト国立研究所（Pacific Northwest National Laboratory）より、水理地質学者 6 名、地下水プロジェクト管理者 1 名、モニタリング作業管理者 1 名、及び地球統計モデル製作者 1 名が選出されている。また、主要な意思決定者として、EPA の代表者 1 名、ワシントン州エコロジー庁代表者 1 名、及び DOE 代表者 1 名の計 3 名が選出されている。

5.2.1.7　マイルストーン

DQO の要約の報告書 [27]においては、重要な作業と日付がリストされている。作業としては、DQO 作業手引書の作成、サンプリング・分析計画の作成、EPA とワシントン州エコロジー庁のレビューと承認、フィールド作業の実施、実験室での分析、サンプリング・分析計画の改訂、及び調査結果の文書化が挙げられている。

5.2.1.8　着目汚染物質

200-BP-5 と 200-PO-1 についての COC のリストは、まず過去の運転プロセスに基づいて、全ての潜在的着目汚染物質（COPC）をリストし、その後 COPC の中から除外できるものを除くという手順で作成されている。200-BP-5 については CERCLA と AEA の監視の要件、200-PO-1 については RCRA の過去操業の要件について考慮されている（RCRA の TSD 施設に関連するモニタリングは別途検討し、この際追加の汚染物を考慮する可能性がある）。

全 COPC のリストは表 5.1 に示す通りである。200-BP-5 についての多くの COPC は、BY クリブ、B-5 逆井戸、及びゲイブル山の貯水池に関連するものである。^{3}H、^{129}I、及び硝酸塩は 200-BP-5 の種々のサイトに関連したものであるが、200-PO-1 からも移動してきている。ウランは汚染源が不明であるが、200-BP-5 における重要な汚染物である。200-PO-1 については、周辺環境（Near field）とその外側領域（Far field）に分割して考える。外側領域のモニタリング対象物は、^{3}H、^{129}I、及び硝酸塩等である。BC クリブに関連する周辺環境の成分は、^{60}Co、^{99}Tc、クロム、シアン化物、硝酸塩等である。RCRA の TSD 施設に関連する周辺環境の成分は、^{90}Sr、バナジウム、クロム、マンガン、砒素等であり、一般に、これらの成分は RCRA の TSD 施設に関連したプログラムの下で監視される。また、RCRA の TSD 施設に関連する成分の殆どは限られた地域において、概して低い濃度でのみ見られている。

最終的に、COC のリストには全ての COPC が加えられている。一部の成分は現在 RCRA の

TSD 施設において監視されているが、見落としがないように COC の最終リストに加えられている。最終的な COC のリストは表 5.1 に示す通りである。DQO の要約の報告書 [27]においては、各 COC について、どのようにサイトに到達したか、輸送過程、及び予測される分布が表にまとめられている。

5.2.1.9　土地の利用

ハンフォードサイトの中央台地の主要部は、工業的に利用する予定であるとされている。他の地域については、サイト全体の地下水戦略（作成中）と矛盾しないよう利用する予定であるとされている。この情報は、決定の誤りの帰結（Consequence）の評価を支援するために用いられる。

5.2.1.10　予備的な措置レベル

DQO の要約の報告書 [27]においては、飲料水に関する規制である米国連邦規則（40 CFR part 141 と 40 CFR part 143）に基づき、各 COC に適用する予備的な措置レベルが表にまとめられている。これらは地下水の最大汚染物レベル（MCL）に基づくものであり、放射性核種は 40 μSv/y の等価線量に相当する濃度が仮定されている。

5.2.1.11　概念モデル

サイトの概念モデルを表 5.2 に示す。表では主な COC について、汚染源、放出過程、移動経路、潜在的レセプター、及び曝露（Exposure）シナリオを示している。

5.2.1.12　問題点のステートメント

200-BP-5 と 200-PO-1 について、内容が一部異なる問題点のステートメントが作成されている。これらは以下の通りである。

- 200-BP-5 における COC プルームの形と濃度は、地下水流、ソースタームのばらつき（Variability）、及び自然な減衰の結果として、経時変化してきている。従って、CERCLA と AEA の監視の要件を満たすかどうかを決定するために、地下水中の既知の COC を監視するために用いる井戸ネットワークや、関連するサンプリング頻度と分析法を再評価する必要がある。現在のネットワークは、主に専門家の判断や、一部は地球統計モデル作成結果に基づいて設定されている。地下水流の方向についても水圧勾配が小さいために評価が難しく、このため、地下水面高さの正確な決定が必要である。加えて、多くの井戸で水位の局所的な低下による枯渇が予想されるため、可能であれば、交換を計画する必要がある。
- 200-PO-1 における COC プルームの形と濃度は、地下水流、ソースタームのばらつき、及び自然な減衰の結果として、経時変化してきている。従って、RCRA の過去操業と AEA の監視の要件を満たすかどうかを決定するために、地下水中の既知の COC を監視するために用いる井戸ネットワークや、関連するサンプリング頻度と分析法を再評価する必要がある。現在のネットワークは、専門家の判断と地球統計モデル作成の組み合わせに

基づいて設定されている。地下水流の方向についても水圧勾配が小さいために評価が難しく、このため、地下水面高さの正確な決定が必要である。しかし、一般的な地下水流の方向は、PUREX の廃棄物放出施設から発生した汚染物プルームの範囲により推定できる。加えて、多くの井戸で水位の局所的な低下による枯渇が予想されるため、可能であれば、交換を計画する必要がある。

5.2.2　ステップ 2：決定の特定

表 5.3 に、調査の主要な論点（Principal study question）、選択肢となる措置（Alternative action）、及び決定ステートメント（Decision statement）を示す。

5.2.3　ステップ 3：決定へのインプットの特定

5.2.3.1　必要な情報

DQO の要約の報告書[27]においては、表 5.3 に示した各決定ステートメントの解決のために必要な情報、既存データがあるか、既存データの情報源、既存データが十分な品質であるか、及び追加データが必要かを表にまとめている。COC、水位、及びサンプリング頻度の全てにおいて既存データが十分な品質であり、追加の情報は必要ではないとされている。

5.2.3.2　措置レベル設定の根拠

DQO の要約の報告書[27]においては、各 COC に対する措置レベルの設定根拠が表にまとめられている。COC とサンプリング頻度については飲料水に関する規制である米国連邦規則（40 CFR part 141 と 40 CFR part 143）、水位については水位モニタリング計画に関する報告書[30]に示されている一般的要件が挙げられている。

5.2.3.3　計算法とサーベイ・分析法

決定ステートメントの解決には、既存データを用いる。^{3}H についてのモニタリングネットワークは、1998 年に専門家の判断により作成され、その後地球統計モデルに基づいて 25%減少した。200-BP-5 と 200-PO-1 についてのモニタリングネットワークの再評価は、専門家の判断に基づくことになると考えられる。当作業により主要なネットワークの再検討が生じる場合は、井戸の数を変更するか、又は計画を修正するかを決定するために、地球統計モデルをやり直す。

5.2.3.4　分析性能の要件

決定ステートメントの解決のために追加のデータは必要ないと決定されているが、DQO の要約の報告書[27]においては、将来のサンプリング作業についての分析性能基準（分析方法、要求精度等）を表にまとめている。

5.2.4 ステップ 4：調査範囲の決定

5.2.4.1 着目母集団

着目母集団（Population）は以下の通りである。括弧内は単位か測定サイズを示す。

- 地下水中の ^{3}H、^{60}Co、^{90}Sr、^{99}Tc、^{129}I、^{137}Cs、^{239,240}Pu、及び硝酸塩（約 1 L）
- 水位データ（メートルかフィート）
- サンプリング頻度（サンプル数/y）

5.2.4.2 空間的範囲

200-BP-5 と 200-PO-1 における地下水モニタリングに関して、地理的な範囲は以下の通り定められている。

- 200-BP-5 については、南部の範囲は 200-PO-1 との境界である。^{3}H の汚染はゲイブル山とゲイブル丘の山峡を通って北部まで広がっており、これが北部の範囲となる。
- 200-PO-1 については、北部の範囲は 200-BP-5 との境界である。西部、南部、及び東部の範囲は、コロンビア川に入る部分を除き、^{3}H プルームの 2×10^{-9} Ci/L の等値線である。コロンビア川に入る部分についてはコロンビア川が東部の境界である。

なお、これらの OU においては帯水層が比較的等質であるため、部分集合に分割できない。

200 東エリアにおける帯水層の垂直な範囲は、不圧帯水層、被圧リンゴールド（Ringold）帯水層、及び被圧上部玄武岩帯水層である[*41]。汚染物分布や地下水の勾配と水流の方向に関して誤った解釈をすることを避けるために、これらを区別することが重要である。

5.2.4.3 時間的範囲

時間的な範囲は以下の通りである。

- COC の一部については、5 年毎の評価の前に最低 2 回以上の頻度で地下水サンプルを収集する。他の COC や水位については、選択した井戸において毎年地下水サンプルを収集する。
- サンプリングの時期について、一般的な制約はない。水位の測定は、経時変化を最小限にするため、概ね同じ時期に実施することが望ましい。また、気圧や暴風の影響を最小限にするために、可能であれば 1 つの季節内に実施することが望ましい。

5.2.4.4 意思決定のスケール

意思決定のスケールは、着目母集団と空間的・時間的範囲を合わせて、以下の通り定められている。

- 各 OU における COC について、一年間の OU 境界内における濃度。
- 各 OU における水位について、一年間の OU 境界内における水位。

[*41] ハンフォードサイトの下の層位には、昇順で、コロンビア川玄武岩層群、リンゴールド層、鮮新世・更新世ユニット、及びハンフォード層等がある [25)]。

5.2.4.5　潜在的な制約

地下水モニタリングプログラムの実施を妨げる可能性がある制約は以下の通りである。

- 水位の減少のため、サンプリングを実施することとしたモニタリング井戸のうち、将来的に枯渇するものが出てくる可能性がある。
- 井戸のメンテナンスやポンプにより、サンプル収集が妨げられる井戸がある可能性がある。

5.2.5　ステップ 5：決定ルールの作成

5.2.5.1　必要なインプット

決定ルール（Decision rule）の作成には、決定ステートメント、意思決定のスケール、着目パラメータ、及び各 COC についての最終的な措置レベルを用いる。一般に、各 COC についての MCL が最終的な措置レベルとされている。

5.2.5.2　決定ルール

表 5.3 の各決定ステートメントに対応する決定ルールは以下の通りである。

- 現在のモニタリングネットワークの評価結果により、COC 地下水プルームの範囲を十分に決められる場合には、措置は必要ではない。そうでない場合には、専門家の判断に基づき、既存の井戸から新たなモニタリングネットワークを選択するか、既存のモニタリングネットワークや新しいモニタリングネットワークを補足するための新たな井戸を設置すること。
- 現在のモニタリングネットワークの評価結果により、水位と水流の方向を決められる場合には、措置は必要ではない。そうでない場合には、既存の井戸から新たなモニタリングネットワークを選択するか、既存か新しいモニタリングネットワークを補足するために新たな井戸を設置するか、又は地下水の水流の方向を決めるための他の方法を適用すること。
- 現在の頻度によりプルームの移動を追跡できる場合には、措置は必要ない。そうでない場合には、プルームを追跡できるよう新たに頻度を選択すること。

5.2.6　ステップ 6：決定の誤りに関する許容限界の設定

サンプリングの前に新たなモニタリング井戸を設置するには約$250,000 の費用がかかるため、地下水調査について従来の統計的サンプリング計画は実施できない。このため、サンプリング計画作成においては、基本的に統計的手法を用いない（専門家の判断に委ねる）こととされている。但し、例えばモニタリングネットワークの設定に大きな変更がある場合には、サンプルを収集する井戸の数が減少する可能性があるため、必要に応じて地球統計モデリングを用いることとされている。

5.2.7　ステップ 7：データ収集のための計画の最適化

5.2.7.1　非統計的計画の方法論

200-BP-5 と 200-PO-1 における井戸のリストは、水文地質学的な専門知識に基づき、200 東エリアの CERCLA、RCRA の過去操業、及び AEA のサイト全体の監視モニタリングの目的を考慮して作成する。サンプリングの計画過程では、現在と過去の COC プルーム図、それぞれの井戸についての COC 濃度対時間のトレンドプロット、及び水位図を評価する。現在はサンプルを収集していないが、今後使用する可能性がある井戸についても特定する。

COC 分布を決定するためのモニタリングネットワークの設定においては、各 COC の年間又は最近の四半期のプルーム図を評価する。以前の COC 図とトレンドプロットにより、最近のプルームの移動を決定し、次の数年における移動の概念モデルを作成できる。この主な目的は、各 COC の措置レベルに相当する等高線の位置を定め、現在のネットワークによりこの位置を十分に知ることができるかを決定することである。そうでない場合には、既存の井戸か新たな井戸を用いてネットワークを再設定する。ここでは、近い将来に枯渇する井戸があり、可能であれば既存か新たな井戸と入れ替えることが望ましいことから、井戸の品質を考慮する。

200 東エリアの地下水位図を調査し、現在の地下水位モニタリングネットワークの妥当性や、データの取得、解決、及び解釈に用いる方法を評価する。この主な目的は、現在のネットワークが水位と水流の方向を定めるのに十分な正確さであり、次の数年における水位図を作成するのに十分であるかを決定することである。他にも、水位測定に関する全ての潜在的な不確かさの要因を可能な限り評価、低減、修正することも意図している。必要であれば、既存の井戸を用いてネットワークを再設定するか、新たな井戸を追加する。ここでも、COC の場合と同様に、近い将来に枯渇する井戸があり、可能であれば既存か新たな井戸と入れ替えることが望ましいことから、井戸の品質を考慮する。許容できる水位モニタリングネットワークが設定できない場合には、水位と水流の方向を測定するための代替案を評価する。

5.2.7.2　実施戦略

DQO プロセスの結果として、200-BP-5 と 200-PO-1 における現在のモニタリング井戸のネットワークの評価には、統計的手法を用いないこととされている。専門家の判断と上述した方法論に基づき、それぞれのネットワークは変更しないか、既存の井戸か新たな井戸を用いて再設定する。現在のモニタリング井戸ネットワークから大きな変更が生じる場合には、新たなモニタリング井戸の数を減少できるか決定するために、地球統計モデリングを用いる。

モニタリングネットワークの設定とサンプリング頻度は、サンプリング・分析計画において定める。全ての新たに提案するモニタリング井戸については、予算の利用可能性に基づいて設置できるよう優先順位付けをする。サンプリング・分析計画は、必要に応じて、過去のデータに基づく現在のモニタリング井戸ネットワークの設定の十分性を評価した後で改訂する。

5.3　KE 貯蔵プールのイオン交換カラムの性状把握

KE 貯蔵プールは、KE 原子炉からの使用済燃料を貯蔵するために、1950 年代に 100-K エリアに建設された、4.9×10^6 L の解放型コンクリート製プールである [31]。KE 原子炉は 1970 年代初

期に廃止され、1975 年より、主に N 原子炉からの使用済燃料が KE 貯蔵プールに貯蔵されてきた。燃料はキャニスタに入れて、水深約 6.1 m で水中貯蔵してきた。貯蔵した燃料が破損・腐食してきており、使用済燃料からの可溶性物質、微粒子、及び燃料片が粉塵等と結びつき、スラッジとして貯蔵プールの底に蓄積してきている。KE 貯蔵プールでは、貯蔵プール水の品質を維持するために 6 つのイオン交換カラム（IXC）を用いてきたが、1993 年に取り出した後は使用が停止されている。6 つの IXC のうち 3 つは貯蔵室（Vault）内のセルにあり、残りの 3 つは貯蔵室に付属した遮蔽体（Cave）の中で保管されている [31,32]。

KE 貯蔵プールのハザードレベルを下げるためには、IXC セル、貯蔵室、及び遮蔽体を撤去する必要がある[*42]。これまでに検討されてきた撤去法は、6 つの IXC を有する貯蔵室と遮蔽体をモルタル充填固化して 1 つのモノリス（Monolith）とし、環境回復処分施設（ERDF）[*43]において処分することである。モルタルは汚染物の固型化、自己遮蔽、空隙の最小化、及び廃棄物の安定化のために、IXC セル、使用済 IXC を含む遮蔽体、及び空隙に注入される。

IXC モノリスは、処分に向けて性状把握する必要がある。性状把握のデータは、ERDF の廃棄物受入基準（WAC）等と比較して評価し、IXC モノリスが ERDF の WAC に適合しない場合は、他の廃棄物管理施設に処分することとなる。IXC の処分に向けたデータの特定、データ品質の管理等のために DQO プロセスが用いられている。本節では、2007 年の DQO の要約の報告書 [31]に基づき、この事例を紹介する。

5.3.1　ステップ 1：問題点の明言

5.3.1.1　計画作成チーム

計画作成チームとして、複数の組織[*44]から、環境の QA、除染・廃止措置技術、放射線、サンプル管理、廃棄物管理、QA、輸送、環境コンプライアンス、及び規制の専門家からなる 14 名のチームが作成されている。また、主要な意思決定者として DOE の代表者 1 名と EPA の代表者 1 名が選出されている。

5.3.1.2　問題点の記述

KE 貯蔵プールの閉鎖に関して、IXC モノリスに特有の問題点は、「IXC モノリスは、ERDF か他の EPA 認可施設での処分に向けて、製作・性状把握をする必要がある」ことである。DQO は以下の仮定に基づいて作成されている。

- IXC は極めて高い線量を示すため、個々のカラムの撤去はできない。放射線源の多くは個々のカラム内にある。関連する配管や遮蔽とセルの内壁の汚染も重大であるが、各 IXC の樹脂と比較して小さい。

[*42] IXC の容器は外径 45.7 cm、厚さ 0.64 cm である。IXC の高さは 150 cm であり、イオン交換体は膨潤した状態で 104 cm となる [32]。鉄筋コンクリート製の貯蔵室は、縦幅 4.6 m、横幅 1.8 m、高さ 3.4 m である。3 つの IXC が、貯蔵室の上部から、1.2 m 四方のセルに収容されている。貯蔵室に付属した鋼製の遮蔽体は、縦幅 4.6 m、横幅 0.8 m、高さ 2.4 m であり、6 つの IXC を収容できる。遮蔽体の外壁は鉛貼りされている。

[*43] サイトの浄化作業において生じた廃棄物を受け入れる処分施設であり、RCRA に準拠した CERCLA 施設である [33]。

[*44] 11 名がフルーア・ハンフォード社（Fluor Hanford, Inc.）からであり、他 3 社から 1 名ずつ加わっている。

- 最終的な廃棄物の形態においては、鉛遮蔽体、ポリ塩化ビフェニル（PCB）、及び毒性金属を除き、有害化学物質はない。これらは、モルタル硬化後には封じ込められており、埋立処分制限（LDR）基準に適合すると考えられる。
- IXC モノリスは、ERDF の WAC に適合するか、WAC に適合するよう処理し、ERDF において処分する。WAC に適合しない場合は、他の施設に送ることとする。
- モノリスの放射能評価は、インベントリが圧倒的に大きい IXC のみに基づく。IXC について、^{90}Sr、^{137}Cs、及び ^{238,239}Pu の放射能インベントリは、IXC に通したプール水の通液前後の濃度差に、流速と使用時間を掛けて計算する。他の核種の濃度は、貯蔵プールのデータが利用できればこれを用い、必要であれば燃料データを用いて計算する。セルと遮蔽体のモルタル充填により、残留汚染物の固定、空隙の最小化、合理的に達成可能な限り低くする（ALARA）原則に整合する遮蔽、及び輸送・処分の要件に従う廃棄物の製作に資する。

5.3.1.3　概念モデル

KE 貯蔵プールでは水の再循環装置により、貯蔵プールの 3 つの区画それぞれにおいて、約 9 L/s で水を処理していた。1981 年までに、それぞれ 142 L の樹脂を内包する 3 つの IXC がループに追加されている。1981 年から 1993 年まで、貯蔵プール水の品質を維持するために IXC を使用し、1993 年に取り出している。IXC は取扱中の放射線被ばくが大きいため、その後 KE 貯蔵プールで用いられておらず、今後追加の IXC を作成する計画もない。

モルタルを充填する前に、IXC モノリスの性状把握を実施し、最終的な性状把握結果を性状把握要件と比較する。処分対象廃棄物はモノリス全体であり、3 つのセル、遮蔽体、セルの下のコンクリート板、及び充填したモルタルを含む。DQO の要約の報告書 [31]においては、KE 貯蔵プールにおける IXC や配管の位置を図示するとともに、モルタル充填前後におけるセルや遮蔽体等の空隙の体積、物質の体積、及び重量の計算値が表にまとめられている。IXC の汚染源は、貯蔵プール水中の核種（即ち、腐食した使用済燃料に由来する核種）である。

5.3.1.4　着目汚染物質

COC は、規制基準や保健上の懸念に基づき評価の焦点となる放射性物質や化学物質であり、以下のプロセスにより最終リストを定める。

- IXC モノリスについてのプロセス知識に基づき、全 COPC のリストを作成する。
- プロセス知識や分析データにより、廃棄物中に存在しないと十分に確認できるか、ないことが合理的に推定できる COPC を除く。
- 無視できる濃度であり、規制の限界値から十分に低い化学的な COPC を除く。
- 天然起源であるか、処分場への報告を要しないレベルで濃度が低いと考えられる場合は、放射性の COPC を除く。

以上により除かれなかった COPC が COC となる。IXC についての COPC、除外物、除外の理由、及び COC を表 5.4 に示す。既存の放射能分析データとプロセス知識は、IXC モノリスの樹脂における放射能濃度を推定するのに十分である。

5.3.1.5　資源の決定

KE 貯蔵プールにおいて製作した IXC モノリスの撤去は、2008 年に開始する予定である。IXC セルと遮蔽体は高線量であることから、IXC モノリスの撤去に関連する作業は、ALARA の原則に従った方法で実施することが望ましい。この作業に関する具体的な資源については別途設定する。

5.3.2　ステップ 2：決定の特定

表 5.5 に、調査の主要な論点、選択肢となる措置、及び決定ステートメントを示す[*45]。複数の決定の関係について定めた論理図式を図 5.2 に示す。

5.3.3　ステップ 3：決定へのインプットの特定

5.3.3.1　必要な情報の特定

必要な情報は、評価対象物の物理的、化学的な特性や放射線特性、既存データが利用可能か、及び新たな測定が必要か等である。DQO の要約の報告書 [31)]においては、表 5.5 の 5 つの決定ステートメントそれぞれについて必要なデータ、データ収集法、既存のデータがあるか、利用可能な情報源（報告書類）、データの品質が十分か、及び追加の情報が必要かについて表にまとめられている。5 つの決定ステートメント全てについて既存のデータがあり、データの品質は十分である一方、追加の情報が必要であるとされている。追加で必要な情報は、IXC モノリスの体積と重量、モルタル充填による遊離水の管理、及び空隙を最小にするモノリスの設定等であるとされている。また、DQO の要約の報告書 [31)]においては、既存の情報源に基づく各放射性 COPC の放射能濃度が表にまとめられている。

5.3.3.2　措置レベルの決定根拠

IXC モノリスについての措置レベルは ERDF の WAC に基づくものであり、これは規制要件に従って設定されたものである。

5.3.3.3　サンプリング・分析法

IXC モノリスの性状把握にはサンプリング・分析が必要ではない。情報の収集は、貯蔵プール水の試験や IXC を通過した貯蔵プール水量に関する既存の報告書の入手に限られる。収集する情報には、IXC モノリスに加えるモルタルの組成、体積、及び密度等も含まれ、モルタル充填後の表面汚染と線量の測定が必要である。

5.3.4　ステップ 4：調査範囲の決定

5.3.4.1　着目母集団

対象母集団は、付属する配管や機器を含む IXC モノリスである。

[*45] 2000 年の DQO プロセスの手引書 [6)]では、選択肢となる措置として措置を講じないという選択肢を含めることとされているが、DQO の要約の報告書 [31)]においては、措置を講じないという選択肢が許容できないために、含められていない。

5.3.4.2　空間的範囲

IXC モノリスはセル、貯蔵室、遮蔽体、IXC と樹脂、及び配管を含む。モノリスの底部はコンクリート板の外面までを含む。

5.3.4.3　時間的範囲

2008 年に IXC セルと遮蔽体がモルタル充填され、その後準備でき次第モノリスを撤去する予定となっている。IXC モノリスの体積と重量、汚染物濃度を計算し、モルタル充填前に、ERDF に廃棄物が受け入れられるかを決定する。

5.3.4.4　実際的な制約

セルと遮蔽体は線量が高いため、個人の被ばくを制限するように作業を計画する。作業は ALARA の原則に従った方法で実施する。

5.3.5　ステップ 5：決定ルールの作成

5.3.5.1　母集団パラメータ

各 IXC における核種の放射能は計算により求められ、難測定核種の放射能は主要な核種の放射能に比例することが知られている。ALARA に配慮して、複数回の測定は必要がないか、推奨されない。既存のデータとしては分析データの平均値が利用できるが、不確かさがある場合には保守的な仮定により計算する。1 つの IXC モノリス全体についての測定であることから、統計的手法は必要ではない。また、樹脂の量と、モノリスの重量と体積のみを測定するため、措置レベルと測定の検出限界値との直接の比較は必要ない。

5.3.5.2　決定ルールの作成

表 5.5 の 5 つの決定ステートメントそれぞれについての決定ルールは以下の通りである。

- 廃棄物が TRU 廃棄物である場合には、核廃棄物隔離試験施設（WIPP）[*46]の WAC に従い、ハンフォードサイトの TSD 施設に処分する。そうでない場合には、ERDF において処分するか、ハンフォードサイトの他の TSD 施設に処分する。
- 廃棄物が危険な廃棄物である場合には、危険な廃棄物として管理する。そうでない場合には、ERDF において処分するか、ハンフォードサイトの他の TSD 施設に処分する。
- 廃棄物が LDR 対象物である場合には、ERDF かハンフォードサイトの他の TSD 施設に処分する前に処理する。そうでない場合には、ERDF において処分するか、ハンフォードサイトの他の TSD 施設に処分する。
- 廃棄物が PCB 廃棄物である場合には、ERDF において処分するか、PCB に関する米国連邦規則（40 CFR part 761）に従い、ハンフォードサイトの他の TSD 施設に処分する。そうでない場合には、ERDF において処分するか、ハンフォードサイトの他の TSD 施設に処分する。

[*46] 米国の核開発で生じた TRU 廃棄物の地層処分施設である [34)]。

- 廃棄物が ERDF の WAC に適合する場合には、ERDF において処分する。そうでない場合には、ERDF においては処分しないが、ハンフォードサイトの他の TSD 施設に処分する。

5.3.6　ステップ 6：決定の誤りに関する許容限界の設定

5.3.6.1　着目パラメータの範囲

測定するパラメータはモノリスの重量と体積であり、統計的手法は用いない。IXC モノリスの重量と体積は、放射性廃棄物の分類を決定するために使用する[*47]。

5.3.6.2　誤った決定の帰結

IXC モノリスについて計算した放射能に基づくと、IXC モノリスはクラス C の限界値[*48]を超えないと考えられる。放射能濃度に関する決定が誤っていた場合には、保健や環境に影響がある。

モノリスには規制を受ける量の鉛や他の有害金属が含まれるが、廃棄物の封じ込めがなされる。また、モノリスには微量の PCB が含まれる可能性があるが、ERDF は固体廃棄物中の PCB を濃度無制限で受け入れられる。このため、化学的な汚染物質に関する誤った決定の影響は小さいことが予想される。

5.3.7　ステップ 7：データ収集のための計画の最適化

IXC モノリスには統計的手法を適用しないため、ここでは考慮する項目が少ない。IXC モノリスの線量は、モルタル充填プロセスにより減少させることができ、用いる可能性があるモルタルの密度は最適化できる。スミヤのみサンプリングを実施するが、これは処理・処分に向けた廃棄物の性状把握を目的としたものではない。

5.4　地下タンク保管廃棄物の性状把握

過去の Pu の生産に伴って発生した HLW の一部は、地下の一重殻タンクや二重殻タンク内に保管されており、これらは主に上澄み、ソルトケーキ、及びスラッジから構成される。今後、タンクに保管されている廃棄物を安定化処理するために、ハンフォードサイトにおいて、廃棄物処理・固化施設（WTP）が建設中である[*49]。WTP には、タンクからの供給廃棄物（Feed）を処理するための 3 つの施設がある[36,37]。前処理施設において、受け入れた供給廃棄物を低放射性廃棄物（LAW）フラクションと HLW フラクションに分離する。HLW フラクションは HLW 施設、LAW フラクションは LAW 施設に輸送され、それぞれガラス固化処理されることとなる。これらの施設における WAC は未整備となっている。

タンクから WTP の施設へ供給廃棄物を輸送するためには、供給廃棄物サンプルの分析により、WAC の要素に関して性状把握を実施する必要がある。供給廃棄物に関する WAC の要素の

[*47] DQO の要約の報告書[31]では、ステップ 1 において、詳細なデータが表にまとめられている（5.3.1 項参照）。
[*48] 放射性廃棄物の浅地中処分の許可要件に関する米国連邦規則（10 CFR part 61）における廃棄物分類のことである[35]。廃棄物は放射能濃度により分類され、クラス A、B、C の順に放射能濃度が大きくなり、処分施設ではより高いレベルの防護措置が要求されることとなる。
[*49] 世界最大の放射性廃棄物処理施設となる予定である[37]。

評価やデータ品質要件の作成について、DQO プロセスが用いられている。本節では、2011 年の DQO 作成の報告書 [36]に基づき、この事例を紹介する。

5.4.1　ステップ 1：問題点の明言

5.4.1.1　計画作成チーム

DOE から 3 名、タンク作業業者（TOC）から 7 名、WTP から 12 名の計 22 名のチームが作成されている。このうち、TOC から 1 名と、WTP から 1 名の計 2 名が主要な意思決定者とされている。

5.4.1.2　問題点のステートメント

問題点のステートメントは、「TOC が WAC に適合する供給廃棄物を WTP に供するには、供給廃棄物に関するデータが必要である」と定めている。

5.4.2　ステップ 2：調査目的の特定

調査の主要な論点は、「供給廃棄物の WTP への輸送について、WAC に適合するか」である。供給廃棄物の WTP への輸送に関する選択肢となる措置は以下の通りである。

- 基準に適合するよう供給廃棄物を変更・処理する
- WAC を変更する
- 他の処理に送る
- 廃棄物の保管を続ける

調査の主要な論点と選択肢となる措置を考慮し、決定ステートメントは「供給廃棄物が WTP の WAC に適合し、WTP に受け入れられるか、WAC に適合するよう変更させる必要があるか、他の処理に送る必要があるか、WAC を変更する必要があるか、又は保管を続ける必要があるかを決定すること」と定められている。

5.4.3　ステップ 3：情報インプットの特定

インプットとする情報は、プロセス知識、DOE の文献、WTP の契約と許可の要件、及びタンク廃棄物に関する運転履歴等である。DQO 作成の報告書 [36]においては、情報源として 78 の文献が列挙されている。

インプットとする情報からの様々な要件等について、まず 3 つの異なるグループに分類されている。これらは、措置限界値（Action limit）[*50]グループ、処理可能性グループ、及びタンク内測定グループ（即ち、サンプルの測定をしない）である。その後、タンク内測定グループは措置限界値グループと合わせ、要件等は 2 つのグループにまとめられている。これらの内容は以下の通りである。

[*50] 測定や分析結果により予め定めた措置を講じることとなる濃度値や WAC のことである。措置限界値は、WTP の設計、WTP の安全性根拠、許可要件、又は処理設備への悪影響を避けるために設定されている。DQO プロセスの手引書 [1]における措置レベルとほぼ同義であると考えられるが、本節では DQO 作成の報告書 [36]に従い、措置限界値の用語を使用する。

- 措置限界値グループは、供給廃棄物において値が超えた場合に、WTP の受取り容器の設計、廃棄物の処理能力、又は安全性の根拠（線量率、遮蔽、水素の発生、引火性、及び臨界安全性の限界値）に影響を及ぼすと思われる要件等（即ち、WTP の WAC となると考えられる要件）を含み、17 要素がこのグループに分類されている[*51]。供給廃棄物について、いずれかの要素が設定した措置限界値を超える場合には、緩和するための更なる評価が必要となる。
- 処理可能性グループは、規制の報告や処理情報において特定される多数の要件等のうち、措置限界値グループの 17 要素以外のものである[*52]。これらの要素は、WTP における廃棄物の受け入れには影響がない。

DQO 作成の報告書 [34)]においては、措置限界値グループについての議論が中心となっている。処理可能性グループのリストは、今後のリスク評価や追加の情報により、変更される可能性がある。

5.4.3.1　品質保証・品質管理

この DQO で定める計画を実施する前に、TOC から供給されるサンプルを分析する実験室を選択する。DQO 作成の報告書 [36)]においては、サンプル分析に関する精度や正確度の要件が表にまとめられている。実験室においては、TOC と WTP の QA 要件を満たす QA 計画を作成し、これが認可され、運用中である必要がある。また、実験室は、要求される州や国家の認定を維持し、能力評価プログラムに参加することにより、技能を証明する必要がある。

LAW のつかみ取り（Grab）サンプリングにおいては、フィールドブランクを用いる。脱イオン水を含むフィールドブランクをタンク内の空間に下ろし、蒸気環境にさらした後、フィールドブランクを回収し、廃棄物サンプルと同じ方法で分析する。各分析バッチについて、最低 2 度の分析が要求される。タンク廃棄物と放射性サンプルについて、認可された標準的分析法の使用が推奨される。実験室は、品質管理（QC）の分析を、参照する方法により定められる頻度で実施する必要がある。

5.4.3.2　サンプル保持時間の要件

DQO 作成の報告書 [36)]においては、分析項目に対するサンプルの保持時間（タンクにおける収集からサンプル調製まで、サンプル調製から分析まで、分析の保持時間、及びタンクにおける収集から分析まで）が表にまとめられている。保持時間を超える場合、分析データは無効にはならないが、このようなデータが後になって受け入れられないと決定され、他のデータがない場合には、サンプリング・分析のやり直しを検討することとなる。

[*51] かさ密度、pH、最大固形分濃度、線量、スラリーの粘性、アンモニア濃度、分離有機物がないこと、PCB 濃度、全有機炭素濃度、Pu 対金属重量比、核分裂性 U 対全 U 重量比、Pu 濃度、Na 濃度、水素発生率、温度、臨界速度、及び温度変化である。LAW 供給廃棄物と HLW 供給廃棄物のそれぞれについて、これらの要素に対する措置限界値が表にまとめられている [36,37)]。

[*52] 例えば、各元素の濃度、各核種の濃度、各イオンの濃度、及び各分子の濃度が含まれる。

5.4.3.3　検出限界値

要求される検出限界値は、一般に措置限界値の 1 桁下である。検出限界値はサンプルの大きさ、分析法、及びマトリクス効果に依存する。また、措置限界値が設定されていない要素に対しては、現実的に最も低い検出限界値を得るために、許容される最大の大きさのサンプルを用い、可能な限り希釈する（ALARA に配慮する）。

5.4.3.4　サンプルの体積

WAC の要素の分析に要するサンプルの体積は、以下の通り推定している。ここでは、QC 分析に要求されるサンプルの体積を含めている。

- LAW 供給廃棄物では、各サンプルについて、約 170 mL の上澄みが推奨される。これらの LAW サンプルは、3.8%以下の固形分を含むと推定される。
- HLW 供給廃棄物では、各サンプルについて、最低 30 g の固形分を含む、約 300 mL のスラリーが推奨される。

5.4.3.5　データの報告

分析結果は実験室で受け取ったサンプル単位に対するものとして報告する必要がある。これは、評価対象とする供給廃棄物におけるパラメータ値の推定を容易にするためである。データの報告書は、公表の前に実験室内部での QA 検証（Verification）やレビューを受けるが、第三者による妥当性確認（Validation）は必要ではない。

5.4.4　ステップ 4：調査範囲の決定

5.4.4.1　空間的・時間的範囲

タンク内の測定を含めて、サンプリング・分析の空間的範囲は供給廃棄物のみである。また、時間的範囲は WTP 運転期間の完了までである。供給廃棄物のサンプルは、合意した廃棄物輸送日から 180 日以上前に、TOC から WTP に提供される。サンプル収集期間は、供給廃棄物の要件と混合基準に依存するが、これらの要件は作成中である。

5.4.4.2　サンプリングの制約

LAW 供給廃棄物のサンプリングについては、つかみ取りサンプリング法の制約を受ける。HLW 供給廃棄物は、流動ループと遠隔サンプラーを用いて採取するため、この制約を受けない。但し、流動ループと遠隔サンプラーはまだ設計中であるため、現在のところ、潜在的な制約は明らかになっていない。

5.4.5　ステップ 5：分析アプローチの作成

決定ルールは、措置限界値グループの要素（脚注[*51] 参照）についてのみ考慮する。分析結果における不確かさを考慮し、統計的信頼限界を措置限界値と比較する。臨界安全性の要件（Pu 対金属重量比、核分裂性 U 対全 U 重量比、及び Pu 濃度）を除く全ての要素について、90%の信頼限界を措置限界値と比較する。この値は決定ルール作成の出発点として選択したものであ

る。臨界安全性の要件については、95%の信頼限界を措置限界値と比較する。措置限界値グループの要素のうち、pH については下側信頼限界と比較するが、それ以外は上側信頼限界と比較する。

作成された決定ルールは次の通りである：「措置限界値グループの要素について、平均値の90%（臨界安全性の要件については 95%）の上側信頼限界（pH については下側信頼限界）が措置限界値より低い場合（pH については措置限界値より高い場合）は、供給廃棄物を WTP に輸送できる。そうでない場合には、基準に適合するよう廃棄物を順応させるか、廃棄物が基準に適合するよう WAC を変更するか、他の処理に送るか、又は廃棄物の保管を継続する。」

5.4.6　ステップ 6：性能・許容基準の設定

廃棄物受け入れの決定では、統計的仮説検定を用いる。帰無仮説（基準状態）は、要素の真の平均値が措置限界値以上であること、即ち供給廃棄物が WAC に適合しないことである。収集したデータの平均値の上側信頼限界が措置限界値より低ければ、帰無仮説を棄却し、供給廃棄物は受け入れ可能であると考える。この仮説検定においては、意思決定はサンプル数、データのばらつき、決定の誤り率、及び要素の真値に影響される。

WAC に適合しない供給廃棄物を誤って受け入れるという決定の誤り（第一種の過誤）と、WAC に適合する供給廃棄物を誤って受け入れないという決定の誤り（第二種の過誤）について、許容できる誤り率をそれぞれの帰結に基づいて定める必要がある。出発点としてこれらの誤り率を等しくするが、帰結については今後更なる検討を実施する。

5.4.6.1　仮定と根拠

サンプル数の計算について、以下を仮定する。

- 輸送前に採取した供給廃棄物サンプルは、輸送対象となる廃棄物を代表する。
- データについて正規分布を仮定する。
- サンプリングの相対標準偏差は 4%と仮定する。加えて、サンプリング数の相対標準偏差に対する感度を示すため、10%と 20%と仮定した場合を計算する。
- 計算に用いるデータは、廃棄物の受け入れに関する決定のために必要なサンプル数決定についてのみ用いる。計算したサンプル数を収集して生成したデータは、実際に廃棄物受け入れの決定に使用する。サンプルの計算に使用した推定値が不正確であっても、廃棄物受け入れの決定が無効になることはない。
- まず、供給廃棄物が WAC に適合しないと仮定する。供給廃棄物を受け入れるためには、収集するデータにより、WAC に適合することを明確に示す必要がある。
- サンプル数の計算は、各要素について別々に実施する。多重の比較を考慮した信頼水準の調整は実施していない。

5.4.6.2　サンプル数の計算

サンプルの計算例を図 5.3(a)に示す。ここでは一例として、Pu 対金属重量比に着目する場合を図示している。横軸は措置限界値（LAW と HLW ともに 6.20 g/kg）を上限とした着目パラメ

ータの真値、縦軸は信頼水準と検出力を 95%とした場合[*53]に、各パラメータ真値において必要となるサンプル数である。図中の 3 つの曲線は、サンプリングの相対標準偏差を 4%、10%、及び 20%とした場合の計算値である。また、分析の相対標準偏差を 3.3%としており、これは既存の分析結果から推定したものである。DQO 作成の報告書 [36]においては、他の要素についても同様にサンプル数が図示されている[*54]。これらのグラフは、供給廃棄物が WTP へ輸送できるかを決定するために要求されるサンプル数の決定において用いられる。

5.4.6.3　検出力

サンプル数と同様に、一例として Pu 対金属重量比に着目した場合の検出力の計算例を図 5.3(b)に示す。縦軸は検出力であり、供給廃棄物を受け入れると決定する確率である。ここでは、サンプル数が 3 つの場合を示している。図 5.3(a)と同様に、信頼水準は 95%である。また、図中の 3 つの曲線は、サンプリングの相対標準偏差を 4%、10%、及び 20%とした場合の計算値であり、分析の相対標準偏差を 3.3%としている。

5.4.7　ステップ 7：データ収集計画の作成

供給廃棄物の種類（LAW か HLW）に応じて、異なるサンプリング法を用いる。LAW については既存のつかみ取りサンプリング装置を用い、HLW については設計中の流動ループと遠隔サンプラーを用いる。サンプルの代表性を担保するためのサンプル収集期間とサンプル間の時間間隔は、サンプリング計画と混合の調査の終了後に利用できる情報を用いて設定する。現状では、要求されるサンプル数の計算に必要となる全パラメータを特定するための十分な情報がないが、図 5.3(a)と図 5.3(b)に示す計算により、様々な場合について要求されるサンプル数の見通しが得られる。これらの検討により、以下のサンプリング計画が推奨されている。

- 要求される分析を完了するために十分な体積の液体と固形分が採取されることを想定し、10 サンプルを収集する。
- まず、10 サンプルのうち 3 サンプルを分析する。これは、経済性や ALARA の配慮と、廃棄物受け入れの決定をするために要求されるデータとのバランスをとった、実際的な最小値である。
- 3 つのサンプルの分析値を評価し、供給廃棄物の WTP への輸送についての意思決定が可能であるかを決定する。
- 供給廃棄物の WTP への輸送についての意思決定が可能ではない場合には、サンプルのデータを用いて、要求されるサンプル数や測定数を計算する。
- 計算したサンプル数が 10 以下である場合は、残りのサンプルを分析する。
- 計算したサンプル数が 10 を超える場合は、今後の進め方を決める。これは追加のサンプ

[*53] 信頼水準は$1-\alpha$のことである。検出力は$1-\beta$のことであり、対立仮説が正しい場合に帰無仮説を棄却する確率を表す。Pu 対金属重量比は臨界安全性の要件であるため、どちらも 95%とされている。

[*54] 多くの要素について、サンプル数計算に用いる標準偏差の保守的な推定値として、仮定した相対標準偏差に措置限界値を掛けた値が使用されている。但し、一部の要素（Pu 対金属比を含む）については、過度に保守的な推定をすることでサンプル数が非現実的になるため、仮定した相対標準偏差にグラフの横軸の値を掛けて標準偏差が算出されている。

ルの収集や、選択肢となる措置の実施等である。
この方法により、必要なサンプリングと分析を最小にできる。最初の 3 つのサンプルを分析したデータは、各要素についての最新の推定値となる。

5.5 ハンフォードサイトにおける DQO プロセスの適用例のまとめ

本章では、DQO プロセスを用いた複雑な対象物の性状把握計画の検討事例として、過去に生じた多種多様なレガシー廃棄物を有する米国のハンフォードサイトにおいて、地下水、大型構造物、及び高レベル廃液を対象とした 3 つの事例を紹介した。これらはいずれも、DQO プロセスの手引書 [1)]の内容を単純に当てはめることができるような簡単なものではなく、応用的なものとなっている。

地下水の性状把握の検討事例は、隣接した 2 つの浄化対象区域において実施されている地下水モニタリングの見直しに関するものである。これらの区域における地下の汚染プルームが時間経過とともに移動することから、これに対応するための地下水モニタリングアプローチや、井戸ネットワークの検討のために DQO プロセスが用いられている。ここでは、合計 10 種類程度の放射性核種及び化学物質の汚染範囲やその移動の追跡、地下水位及び水流の方向に関する主要な調査の論点について、3 つの決定ステートメントが別々に作成され、これらに対応した 3 つの決定ルールがまとめられている。用いるデータについては、決定ステートメントの解決のために必要かつ十分な品質のデータは既に利用できるものがあることが示されており、従って追加のデータ収集は必要ないと決定されている。DQO プロセスのステップ 6 では、新たなモニタリング井戸の設置には高額な費用がかかることから、統計的サンプリング法の適用がなじまず、統計的手法を使用しないことと決定されている。その後、DQO プロセスのステップ 7 では、現在の井戸ネットワークにより各 COC の措置レベルに相当する等高線の将来的な位置を知ることができるかを決定することを目的として、定期的に作成する各 COC のプルーム図から将来のプルームの移動を決定すること、また、将来的な水位図を知ることができるかを決定することを目的として、現在のモニタリングネットワークの妥当性や、データの取得・解釈の方法を評価することとされている。

大型構造物の性状把握の検討事例は、使用済燃料貯蔵プールの浄化に用いてきた IXC と付属の貯蔵室及び遮蔽体に、モルタルを充填して製作するモノリスの処分に向けて、DQO プロセスが適用されたものである。ここでは、合計 50 種類程度の放射性核種や化学物質等に着目し、モノリスの廃棄物としての分類や処分する施設に関しての 5 つの決定ステートメントを作成後、これらの決定の関係を図に示し、各決定ステートメントに対応した 5 つの決定ルールがまとめられている。用いるデータについては、必要かつ十分な品質のデータがある程度利用でき、これに基づいて放射能インベントリを計算できるが、一部追加の情報が必要であり、その種類はモノリスの体積や重量等であると特定されている。また、この例での着目する母集団は 1 つの IXC モノリス全体であるため、統計的手法は必要ではないと決定されている。以上を踏まえて、DQO プロセスのステップ 6 では、モノリスの重量と体積の測定結果に基づいてモノリスの廃棄物としての分類を決定することとされており、これはこの事例における事実上の結論となっている。

高レベル廃液の検討事例は、タンク内の高放射性の廃棄物を安定化するために処理施設に輸送する際の、WAC の要素の評価に関して DQO プロセスが適用されたものである。ここでは、「供給廃棄物の WTP への輸送について、WAC に適合するか」という調査の主要な論点について、4 つの選択肢となる措置と組み合わせて決定ステートメントが定められている。決定ルールは、WTP の WAC となりそうな 17 要素について、分析結果における不確かさを考慮して統計的信頼限界と措置限界値とを比較することとして作成されている。DQO プロセスのステップ 6 では、廃棄物の受け入れの決定のために統計的仮説検定を利用することとされ、帰無仮説は「要素の真の平均値が措置限界値以上であること、即ち供給廃棄物が WAC に適合しないこと」と定められている。また、各 WAC の要素に対して別々に、データについて正規分布を仮定して、要素の真の値とサンプル数の関係が図示されている。DQO プロセスのステップ 7 では、これらの図から得られた、様々な場合について要求されるサンプル数の見通しに基づいて、サンプリング計画が作成されている。この計画ではまず、予め 10 サンプルを収集し、うち 3 サンプルについて分析した結果に基づいて、供給廃棄物の WTP への輸送についての意思決定が可能であるかを決定することとされている。また、これが可能ではない場合には、サンプルのデータに基づいて、追加で必要となるサンプル数を計算することとされている。

以上の調査した事例のうち、地下水と大型構造物の事例については、決定ステートメントの解決には既存のデータが十分であること、統計的な手法を用いないことと決定されている。このような場合には、本来は統計的仮説検定をはじめとした統計的手法を適用する際に効果的になるように開発されてきた DQO プロセスの費用対効果の最大化等の恩恵が十分に受けられるわけではないと考えられるものの、計画の説明性や透明性が大きく向上している。実際に、DQO プロセスのステップ 5 までに膨大な量の情報を整理し、それらに基づいて決定ルールを作成しているのに対し、最終的にはステップ 6 以降で今後の方針を簡潔に述べているだけに過ぎない。しかし、なぜそのような方針に至ったかの過程は詳細に追跡できることに加えて、根拠となるデータ等も整理されており、DQO プロセスの適用によって説明性や透明性が確保されているものであると言える。

一方で、高レベル廃液の事例は、DQO プロセスのステップ 6 において統計的仮説検定を用いるものであり、この場合には DQO プロセスを特に有効に利用することができる。DQO プロセスのステップ 6 で定めた統計的仮説検定のパラメータ値に基づいて、様々な場合に必要となるサンプル数を試算し、これに基づいて経済性や ALARA についても考慮したサンプリング計画が作成されている。結果として、この際に収集する分析データ数はかなり少ないものとなっており、このデータに基づいて目的とする意思決定について判断していくこととなっている。従って、実際に DQO プロセスを適用して、できるだけ少ないサンプルを収集する計画を作成しようとする際には、この事例は特に参考になるものであると考えられる。

表 5.1　200 東エリアの地下水の性状把握における COPC 及び COC

DQO の要約の報告書 [27]に基づき作成した。

OU	既知又は予測される汚染源	COPC	COC
200-BP-5	BY クリブ	^{60}Co、^{99}Tc、U、シアン化物、硝酸塩	^{3}H、^{60}Co、^{90}Sr、^{99}Tc、^{129}I、^{137}Cs、^{239,240}Pu、U、シアン化物、硝酸塩
	B-5 逆井戸、B 工場	^{90}Sr、^{137}Cs、^{239,240}Pu	
	ゲイブル山の貯水池	^{90}Sr	
	B 工場の運転による放出や廃棄物に関連する種々のサイト、200-PO-1 の PUREX 工場に関連した施設	^{3}H、^{129}I、U、硝酸塩	
200-PO-1	23 箇所のクリブ、4 箇所のトレンチ、15 箇所の排水溝、及び B 貯水池	^{3}H、^{90}Sr、^{129}I、V、Cr、Mn、As、硝酸塩	外側領域：^{3}H、^{129}I、硝酸塩
	BC クリブ	^{60}Co、^{99}Tc、Cr、シアン化物、硝酸塩	周辺環境：^{60}Co、^{90}Sr、^{99}Tc、V、Cr、Mn、As、シアン化物

表 5.2　200 東エリアの地下水の性状把握におけるサイトの概念モデル

DQO の要約の報告書 [27]に基づき作成した。

COC	OU	汚染源	放出過程	移動経路	潜在的レセプター	曝露シナリオ
^{3}H ^{129}I 硝酸塩	200-BP-5 200-PO-1	PUREX 工場と B 工場の運転廃液	クリブ、貯水池、及びトレンチに放出された廃液	不飽和帯を通した浸透 地下水の下り勾配の流れ	人間（主に作業者）と生態	汚染表面土壌の摂取、汚染地下水の摂取、汚染生体の摂取、又は汚染土壌粒子の吸入・摂取
^{90}Sr	200-BP-5	B 工場の運転廃液	ゲイブル山の貯水池に放出された廃液	不飽和帯を通した浸透 地下水の下り勾配の流れ		
^{90}Sr ^{137}Cs ^{239,240}Pu	200-BP-5	B 工場の運転廃液	B-5 逆井戸への廃液投入	地下水の下り勾配の流れ		
^{60}Co ^{99}Tc シアン化物	200-BP-5 200-PO-1	U 工場の運転廃液	BY クリブと BC クリブに放出された廃液	不飽和帯を通した浸透 地下水の下り勾配の流れ		主に地下水の摂取

表 5.3　200 東エリアの地下水の性状把握における決定ステートメント

DQO の要約の報告書[27]に基づき作成した。PSQ は主要な調査の論点、AA は選択肢となる措置、DS は決定ステートメントを表す。

項目と番号	主要な調査の論点		
	選択肢となる措置	誤った措置の帰結	帰結の重大さ[a]
	決定ステートメント		
PSQ1	200-BP-5 と 200-PO-1 における現在の井戸ネットワークにより COC プルームを表すことができ、汚染物の等値線図は MCL に関連する濃度等高線を示すか。		
AA1-1	措置を講じない（既存のネットワークを使用する）	COC の等高線が明確に定められない可能性がある（プルームの範囲が明確にはわからない）	中・大
AA1-2	既存の井戸により新たなモニタリングネットワークを選択する	新たなモニタリングネットワークの作成と関連文書の作成に不必要な費用がかかる	中
AA1-3	既存か新たな井戸ネットワークを補足するために、新たな井戸を設置する	新たな井戸を掘るために不必要な費用がかかる	中・大
DS1	200-BP-5 と 200-PO-1 についての現在のモニタリング井戸ネットワークによりプルームの範囲を示すことができ、そのため措置を必要としないか、既存の井戸を用いてネットワークを再設定する必要があるか、又は新たなモニタリング井戸を設置する必要があるかを決定すること。2 つの OU は異なる規制基準の下で運用することに留意すること。		
PSQ2	現在のモニタリング井戸一式により、地下水面の等高線図の作成と水流の方向を定めるために十分な水位の情報が得られるか。		
AA2-1	措置を講じない（既存のネットワークを使用する）	水圧勾配と地下水流の方向がよくわからない可能性がある	中
AA2-2	既存の井戸により新たなモニタリングネットワークを選択する	新たなモニタリングネットワークの作成と関連文書の作成に不必要な費用がかかる	中
AA2-3	既存か新たな井戸ネットワークを補足するために、新たな井戸を設置する	新たな井戸を掘るために不必要な費用がかかる	中・大
AA2-4	水流の方向を定めるために他の方法を用いる	フィールド調査を実施するために不必要な費用がかかる	中
DS2	200-BP-5 と 200-PO-1 における現在のモニタリング井戸ネットワークにおいて、地下水面の等高線図と水流の方向を定められるかを決定すること。一部、水面が低すぎて水面図から水流の方向や流速を決められない地域や、極端に小さい勾配と測定誤差に関する全体の不確かさがサイトにわたる水頭の違いと同じくらいの地域がある。このため、現在の井戸ネットワークは水流の方向と流速を決めるには不十分な可能性があるが、この情報を得るためにネットワークを再設定できない可能性があることに留意すること。		

[a] 小・中・大の 3 通りで定性的に評価されたものである。

表 5.3　200 東エリアの地下水の性状把握における決定ステートメント（続き）

DQO の要約の報告書[27]に基づき作成した。PSQ は主要な調査の論点、AA は選択肢となる措置、DS は決定ステートメントを表す。

項目と番号	主要な調査の論点		
	選択肢となる措置	誤った措置の帰結	帰結の重大さ[a]
	決定ステートメント		
PSQ3	現在のサンプリング頻度でプルームの移動を追跡できるか。		
AA3-1	措置を講じない（現在のサンプリング頻度を維持する）	COC の等高線が明確に定められない可能性がある（プルームの範囲が明確にはわからない）	中
AA3-2	サンプリング頻度を改善する	新たなサンプリングスケジュールの作成と関連文書の作成に不必要な費用がかかる	中
DS3	200-BP-5 と 200-PO-1 における現在のサンプリング頻度によりプルームの移動を追跡することができ、そのため措置を必要としないか、一部か全部の井戸についてサンプリング頻度を変更する必要があるかを決定すること。現在のサンプリング頻度が適切かを判断するためのテストを計画・実施することを検討すること。この決定に用いるアプローチは、考慮する COC や地下水プルームにより若干異なることに留意すること。		

[a] 小・中・大の 3 通りで定性的に評価されたものである。

表 5.4　KE 貯蔵プールのイオン交換カラムの性状把握における COPC 及び COC

DQO の要約の報告書[31]に基づき作成した。

汚染源	COPC	除外物	除外根拠	COC
使用済燃料と貯蔵プール水	^{3}H、^{14}C、^{55}Fe、^{60}Co、^{59,63}Ni、^{79}Se、^{85}Kr、^{89,90}Sr、^{90,91}Y、^{93,95}Zr、^{93m,95,95m}Nb、^{99}Tc、^{103,106}Ru、^{103m,106}Rh、^{107}Pd、^{110,110m}Ag、^{113m,115m}Cd、^{113m}In、^{113,119m,121m,123,126}Sn、$^{124-126,126m}$Sb、^{123m,125m,127,127m,129,129m}Te、^{129}I、^{134,135,137}Cs、^{137m}Ba、^{141,144}Ce、^{143,144,144m}Pr、^{147,148,148m}Pm、^{151}Sm、^{152,154,155}Eu、^{153}Gd、^{160}Tb、$^{232-236,238}$U、^{237}Np、$^{238-242}$Pu、^{241,242,242m,243}Am、$^{242-244}$Cm；Cr、As、Se、Ag、Cd、Ba、Hg、Pb；PCB	^{106}Ru、^{106}Rh、^{126,126m}Sb、^{125m}Te、及び ^{242}Am	半減期が 2 年以下である。	^{3}H、^{14}C、^{55}Fe、^{60}Co、^{59,63}Ni、^{79}Se、^{90}Sr、^{93}Zr、^{93m}Nb、^{99}Tc、^{107}Pd、^{113m}Cd、^{121m,126}Sn、^{125}Sb、^{134,135,137}Cs、^{147}Pm、^{151}Sm、^{152,154,155}Eu、$^{234-236,238}$U、^{237}Np、$^{238-242}$Pu、^{241,242m,243}Am、^{242,244}Cm；Cr、As、Se、Ag、Cd、Ba、Hg、Pb；PCB；pH
		^{85}Kr	気体であり、水中に保持されない。	
		^{89}Sr、^{91}Y、^{95}Zr、^{95,95m}Nb、^{103}Ru、^{103m}Rh、^{110,110m}Ag、^{115m}Cd、^{113m}In、^{113,119m,123}Sn、^{124}Sb、^{123m,127,127m,129,129m}Te、^{129}I、^{141,144}Ce、^{143,144,144m}Pr、^{148,148m}Pm、^{153}Gd、^{160}Tb、^{232,233}U、^{243}Cm	放射能含有量の推定値の上限が 1 pCi/g (=1 × 10^{-12} Ci/g) よりも小さく、報告できない。	
		^{90}Y、^{137m}Ba	娘核である。	
機器	ポリアルカン	ポリアルカン	スキマーシステムが水面付近を吸入するため、プール上部を漂う油圧作動液は除かれている。	
IXC セル、遮蔽体、配管、及び器具	微量の C、N、Si、P、S、Cr、Mn、Ni、Mo を含む Fe；Al、Si、Ca、及び Fe の酸化物；Pb	C、N、Si、P、S、Cr、Mn、Ni、Mo；Al、Si、Ca、及び Fe の酸化物	鋼鉄とコンクリートは RCRA の規制を受けない。	
樹脂	C_3H_9N、C_8H_8、$C_{10}H_{10}$、$C_{10}H_{12}$	C_3H_9N、C_8H_8、$C_{10}H_{10}$、$C_{10}H_{12}$	イオン交換樹脂は無害である。	
モルタル	pH；MgO、Al_2O_3、SiO_2、CaO、及び Fe_2O_3	MgO、Al_2O_3、SiO_2、CaO、及び Fe_2O_3	硬化したモルタルは規制物質ではない。	

表 5.5　KE 貯蔵プールのイオン交換カラムの性状把握における決定ステートメント

DQO の要約の報告書[31]に基づき作成した。PSQ は主要な調査の論点、AA は選択肢となる措置、DS は決定ステートメントを表す。

項目と番号	主要な調査の論点		
	選択肢となる措置	誤った措置の帰結	帰結の重大さ
	決定ステートメント		
PSQ1	IXC モノリスの放射能は TRU の分類限界値を超えて、TRU 廃棄物であるか。		
AA1-1	IXC モノリスの放射能は TRU の分類値より大きく、WIPP に処分する。	IXC モノリスを誤って TRU とし、TRU の確認プロセスに送る。	重大ではない。TRU 確認作業では追加の性状把握をして、最終的な TRU の決定をする。
AA1-2	IXC モノリスの放射能は TRU の分類値より小さく、処理と ERDF での処分について評価する。	IXC モノリスを誤って低レベル廃棄物とし、ERDF での処分について評価する。	重大である可能性がある。ERDF に処分された TRU は、保健や環境に重大な影響を及ぼす可能性がある。
DS1	IXC モノリスが TRU 分類限界値を超え、TRU 廃棄物であるかを決定すること。		
PSQ2	IXC モノリスは危険・有害な廃棄物であるか。		
AA2-1	IXC モノリスは危険・有害な廃棄物を含まない。	IXC モノリスを誤って危険・有害な廃棄物ではないと決定する。	少し重大である。IXC モノリスは低レベル廃棄物として処分し、封じ込めるため、管理要件に少し影響する可能性がある。
AA2-2	IXC モノリスが危険・有害な廃棄物を含む。廃棄物の処理と ERDF での処分について評価する。	IXC モノリスを誤って危険・有害な廃棄物を含むと決定する。	重大ではない。IXC モノリスは認可処分施設に処理・処分され、これは費用に少し影響するが、保健や環境への影響はない。
DS2	IXC モノリスは危険・有害な廃棄物であるかを決定すること。		
PSQ3	IXC モノリスが危険な廃棄物である場合に、LDR 対象物であるか。		
AA3-1	IXC モノリスを LDR 対象物であると決定する。	IXC モノリスを誤って LDR 対象物であると決定する。	重大ではない。保健や環境への影響はないが、処理費用等には影響する。
AA3-2	IXC モノリスを LDR 対象物ではないと決定する。	IXC モノリスを誤って LDR 対象物ではないと決定する。	やや重大である。安全な処分のために既に処理されているが、管理要件にやや影響する可能性がある。
DS3	危険・有害であると決定した IXC モノリスが LDR 対象物であるかを決定すること。		

表 5.5　KE 貯蔵プールのイオン交換カラムの性状把握における決定ステートメント（続き）

DQO の要約の報告書 [31]に基づき作成した。PSQ は主要な調査の論点、AA は選択肢となる措置、DS は決定ステートメントを表す。

項目と番号	主要な調査の論点		
	選択肢となる措置	誤った措置の帰結	帰結の重大さ
	決定ステートメント		
PSQ4	IXC モノリスは管理を要する PCB を含むか。		
AA4-1	IXC モノリスが管理を要する PCB を含まないと決定する。	IXC モノリスが管理を要する PCB を含まないと誤って決定する。	重大ではない。ERDF では廃棄物が固体である限り、PCB を含む廃棄物を濃度無制限で処分できる。液体は廃棄物から除く必要がある。
AA4-2	IXC モノリスが管理を要する PCB を含むと決定する。	IXC モノリスが管理を要する PCB を含むと誤って決定する。	重大ではない。IXC モノリスが、必要ではない PCB の処理を含む管理を要する可能性がある。潜在的影響としては追加の費用や作業員の廃棄物への曝露等があるが、保健や環境への影響はない。
DS4	IXC モノリスが管理を要する PCB を含むか決定すること。		
PSQ5	IXC モノリスが ERDF の WAC に適合するか。		
AA5-1	IXC モノリスが ERDF の WAC に適合しないと決定する。	IXC モノリスが ERDF の WAC に適合しないと誤って決定する。	重大ではない。非制限廃棄物を処理し、認可処分施設に処分する可能性がある。これは費用やスケジュールに影響があるが、保健や環境への影響はない。
AA5-2	IXC モノリスが ERDF の WAC に適合すると決定する。	IXC モノリスが ERDF の WAC に適合すると誤って決定する。	重大である可能性がある。廃棄物を ERDF において不適切に処分するため、保健や環境にとって脅威となる可能性がある。
DS5	IXC モノリスが ERDF における処分の WAC に適合するかを決定すること。		

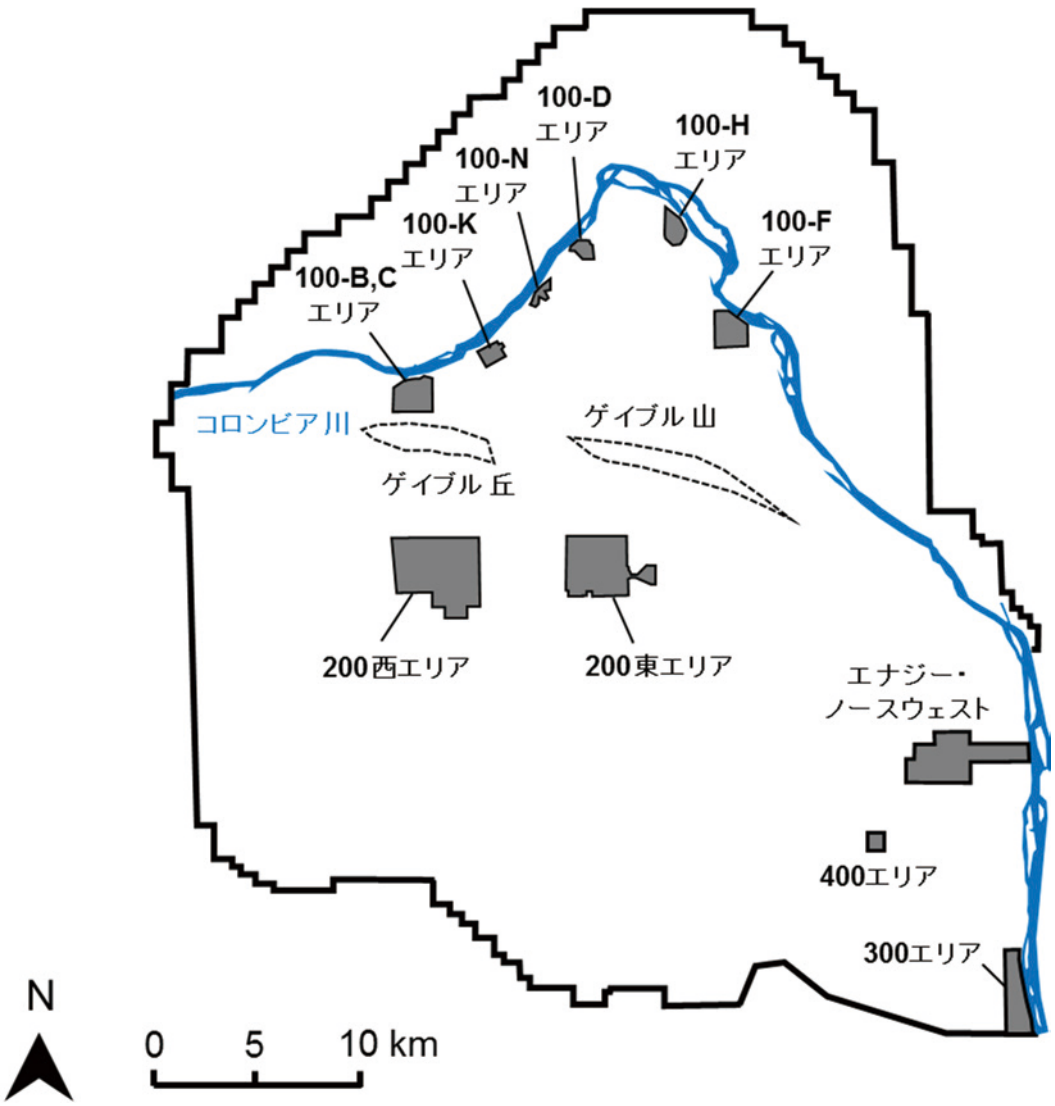

図 5.1　米国ハンフォードサイトの概略図

文献 [25,27]に基づき作成した。太線はサイトの境界を表す。南東部はコロンビア川がサイトの境界となっている。

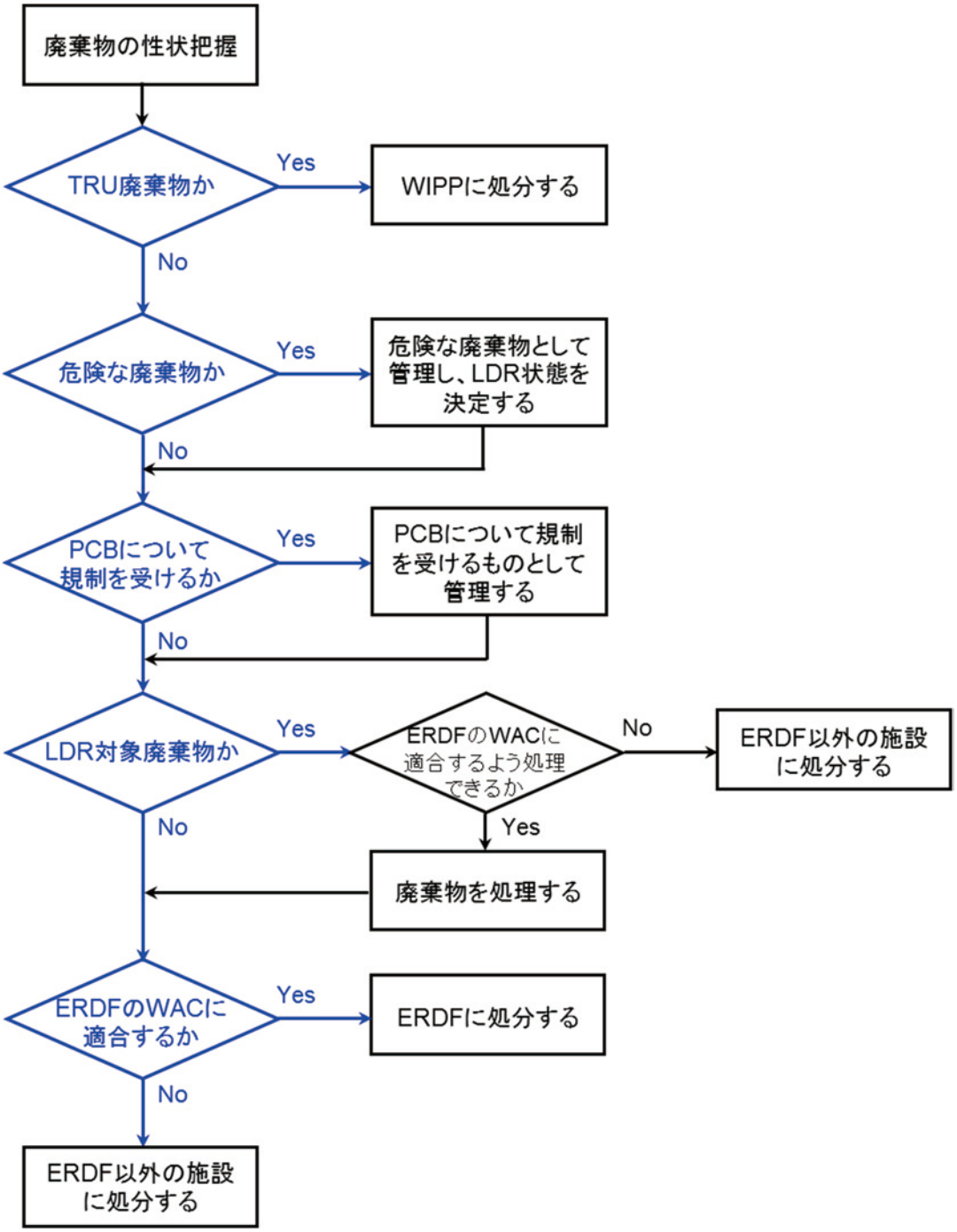

図 5.2　IXC モノリスの処分に関する論理図式

DQO の要約の報告書 [31]に基づき作成した。

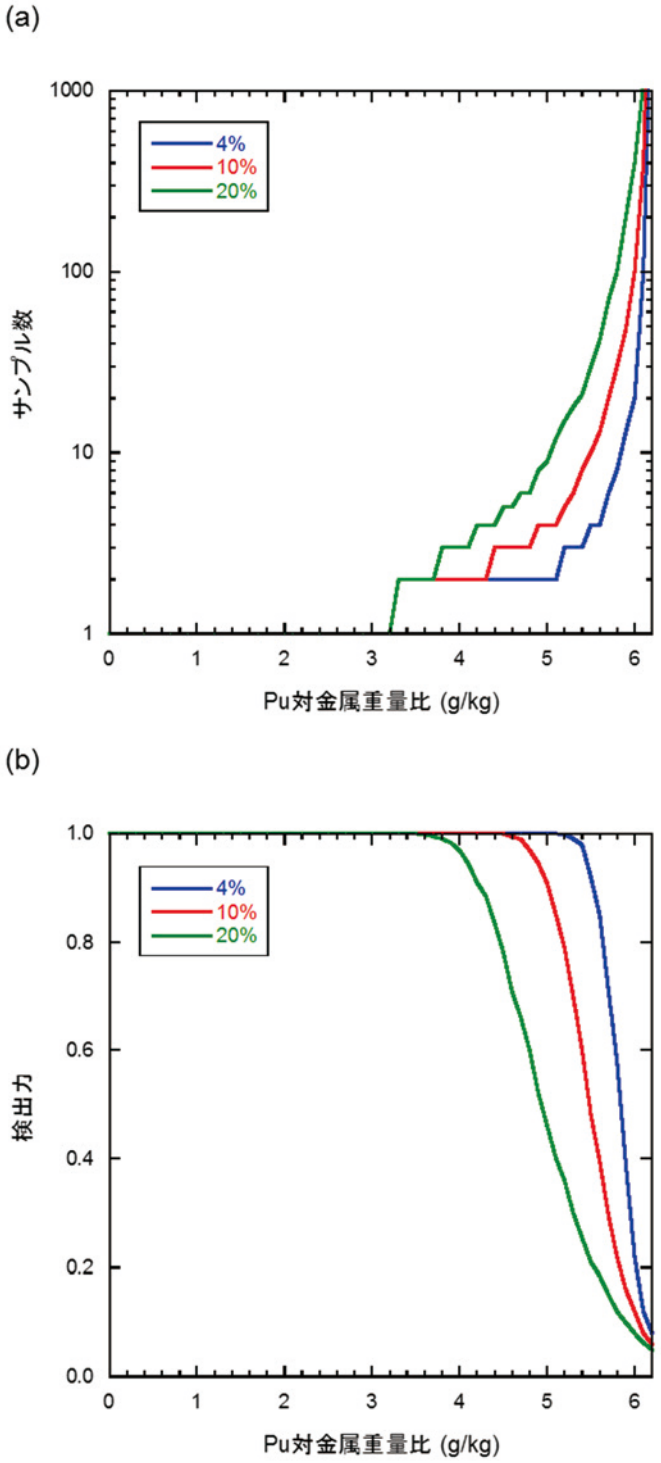

図 5.3　タンク廃棄物の要素に対するサンプル数と検出力の計算例

DQO 作成の報告書 [36]に基づき、Pu 対金属比の例についてのグラフを作成した。信頼水準は 95%、措置限界値は 6.20 g/kg、及び分析の相対標準偏差は 3.3%である。3 つの曲線は、サンプリングの相対標準偏差が 4%、10%、及び 20%の場合を示す。(a) サンプル数の計算例。検出力が 95%の場合を示す。(b) 検出力の計算例。サンプル数が 3 の場合を示す。

6. まとめ

データ品質目標（DQO）プロセスは、米国環境保護庁（EPA）において開発されてきた環境データ収集のための計画作成プロセスである。その最も大きな特徴は統計的手法の適用を中心に据えているところにあるが、統計的手法を用いないものも含め、幅広く適用可能であるとされている。このプロセスを利用することにより、環境データ収集を伴う様々なプロジェクトにおいて、科学的に厳密かつ費用対効果が大きいデータ収集計画の作成ができる。本報告書の前半では、DQO プロセスに関連する文献の調査に基づき、DQO プロセスにおける計画作成の具体的手順、開発の経緯・変遷と現在の運用についてまとめた。

DQO プロセスはその開発当初より、収集するデータの統計的な取り扱いを含んだ計画作成プロセスとなっていた。このプロセスは当初は 3 つのステージで構成されていたが、その後 7 つのステップに構成が変更されている。この変更は特に、二者択一の決定について統計的仮説検定を利用することに重点を置いたものである。これにより、プロセスの中心となる部分では、統計的仮説検定を適用する際に避けることができない誤りを起こす確率について、許容できる最大値を予め定めておき、これを満たすために最低限必要となるデータを得る計画を作成するという流れとなっている。その後、収集データを決定に使用しない場合、即ち統計的仮説検定を実施しない場合についても DQO プロセスを利用し易いように修正が加えられ、現在に至っている。但し、まずデータ収集の目的や利用可能な情報といった前提条件を確認・整理し、収集するデータに関する定性的・定量的基準を作成した後、これらの基準を満たす費用対効果が大きい計画を作成するというプロセス全体の基本的な構造は、開発当初から現在までに変化してきているわけではないと考えられる。現在の EPA においては、DQO プロセスは品質体系において要求される体系的計画作成法の 1 つであるとともに、EPA に関連する環境データ収集を伴うプロジェクトの目標を達成するための、支援ツールの 1 つであるという位置付けとなっている。以上の DQO プロセスの開発経緯や現在の構造、及び EPA における位置付けについては、EPA が汚染サイトの浄化実施主体であり、多数のサイトにおける浄化の実施を費用対効果が高い方法で計画したり決定したりする必要があったという状況に由来するものであると推測できる。

現在の DQO プロセスは 7 つのステップで構成されている。これらのステップは、プロセスに柔軟性を持たせることを意図して、後のステップにおいて新たな情報が得られた後で以前のステップに戻り、計画を改善していくことを前提としている。最初の 5 つのステップにおいては、利害関係者を含めた計画作成チームを組織して、データの使用目的といった調査の前提条件を明確にし、データから調査の結論を導くアプローチを定める。データの使用目的には、主に意思決定と推定の 2 つがあり、これらはそれぞれデータに統計的仮説検定を適用するか、又はデータから母集団の何らかの特性値を推定するかという違いがある。ステップ 6 では、収集するデータが満足する必要がある性能・許容基準を作成する。その後、ステップ 7 において、作成した基準を満たすように、サンプルの種類、サンプル数、及びサンプル当たりの分析数等を指定した計画候補を作成する。ここで、サンプル数とその採取位置については、これらを計算するためのソフトウェアが開発されており、これを利用することができる。最終的に、性能・

許容基準を満たす計画候補のうち、データの収集にかかる費用と基準への適合性のバランスが最もよい計画候補を選択することにより、費用対効果が大きい計画を作成できる。

DQO プロセスは、データ収集を伴うプロジェクトにおいては、計画作成のために最初に実施するべきものである。DQO プロセスを用いて計画を作成した後は、データの最終的な使用目的に向けてプロジェクトを進めていくこととなる。EPA はプロジェクトの目標を確実に達成することを支援するために、品質体系において大まかな枠組みを定めるとともに、プロジェクトの各フェーズで利用できる様々なツールを整備している。これにより、DQO プロセスにより作成した計画が、最終的な決定や推定というプロジェクトの目標に対して有効に機能することを担保している。実際にデータを収集するプロジェクトを進めていく際に、このようなプロジェクトについての全体的な視点を持ち、収集するデータがどのように評価、使用されるかを理解しておくことは、プロジェクトの目標達成に向けて有効な計画を作成するためには重要であると考えられる。

原子力機構に保管されている放射性廃棄物は、原子力機構内外の様々な施設から幅広い期間にわたって発生したものである。これらの廃棄物について、仮に DQO プロセスを用いて費用対効果が大きい性状把握計画を作成する場合には、DQO プロセスに対する十分な理解があったとしても、相当に困難なものとなることが予想される。そこで本報告書の後半では、このような場合に参考にすることを考慮し、原子力施設において複雑な対象物について性状把握計画を作成した事例として、特に複雑な放射性廃棄物や放射性物質による汚染物を多数有する米国ハンフォードサイトにおける事例を調査し、概要を紹介した。

紹介した 3 つの事例のうち、2 つは DQO プロセスの中で統計的手法を用いないと決定されたものである。これらの事例では、DQO プロセスのステップ 5 までに膨大な量の情報を整理し、それらに基づいて決定ルールを作成している一方、ステップ 6 以降については今後の方針を述べているだけに過ぎないものとなっている。DQO プロセスは、統計的仮説検定をはじめとした統計的手法の適用を容易にするために構造が改善されてきたものであり、このような場合には費用対効果の最大化等の DQO プロセスの恩恵を十分に受けているとは言い難い。しかし、このような場合でも、利害関係者を含めた計画作成チームによる議論を通して結論に至るまでの過程は追跡でき、根拠となるデータ等も整理されていることから、DQO プロセスの適用によって説明性や透明性が確保されていると言える。一方で、もう 1 つの事例は、DQO プロセスのステップ 6 において統計的仮説検定を使用するものである。DQO プロセスのステップ 6 で定めた統計的仮説検定のパラメータ値に基づいて、様々な場合に必要となるサンプル数を試算し、これに基づいてサンプリング計画を作成している。結果として、この際に収集する分析データ数はかなり少ないものとなっている。従って、実際に DQO プロセスを適用して、できるだけ少ないサンプルを収集する計画を作成しようとする際には、この事例は特に参考になるものであると考えられる。

付録 A. DQO プロセス（1987 年時点）

本章では、1987 年の報告書[9,10]に基づき、3 ステージのデータ品質目標（DQO）プロセス（図 2.1）の内容について、要点を示す。但し、ここで示すプロセスの具体的内容は、DQO プロセス開発の初期に、修復対処措置という特定のプロセスに対して適用されたものであるため、2.1 節に記載した内容を前提とし、特に主なデータ収集作業を伴う修復措置調査（Remedial investigation）・実行可能性調査（Feasibility study）への適用についての議論を中心とすることに留意すること。

A.1　ステージ 1：決定の種類の特定

ステージ 1 では、決定の担当者とデータ利用者を特定し、各修復措置調査・実行可能性調査の中で実施する決定の種類を定める。ステージ 1 の要素を図 A.1(a)に示す。図 A.1(a)では各要素が別々のステップとされているが、連続的なプロセスである。

A.1.1　データ利用者の特定・関与

DQO を作成する上で、修復措置（Remedial action）の計画作成段階において意思決定者を定め、データ利用者を計画作成の担当者として含める必要がある。加えて、修復措置は複合分野的な性質があるため、適切な技術的専門家を特定し、DQO 作成の担当者として含めることが重要である。

A.1.2　既存データの評価

修復措置調査・実行可能性調査プロセスの最初のステップとして、既存データを評価する。これはサイトでの追加の措置についての根拠や、修復措置調査・実行可能性調査のスコーピング（図 2.3 参照）についてのデータベースとなる。最初にサイト調査（Site investigation）を実施した結果と合わせて、サイトの状態を予備的に判断する。

A.1.2.1　現状の記述

様々な情報源からのデータに基づき、最初のデータのレビューを可能な限り徹底的かつ正確に実施することが望ましい。予備的なデータはサイトでの測定により確認する。最初のサイト調査の際、フィールドについて多少のスクリーニングや分析を実施する場合もある。初期のサンプリングは、土壌・地下水等のばらつき（Variability）の決定、バックグラウンドの情報の提供、又はサイトの状況が変化したかを判断するための一助となる可能性がある。

A.1.2.2　既存データのレビュー

殆どのサイトにおいて、以前の調査結果は、更なる調査の基礎となるものであり、有用な情報を含む。その有用性を決定するために、データの品質を分析することが望ましい。これにより、データから導かれる結論の不確かさを決定する。

データの品質とその妥当性に関しては、データの取得時期、用いた分析手法とその下限値、

及び品質保証（QA）・品質管理（QC）手順と記録等、多くの要素がある。サンプルの分析手法と同様に、サンプリング手法の検討も重要であり、これは統計的な検討と標準作業手順（SOP）の検討の 2 つに大きく分類される。統計的な検討は、データの代表性や信頼水準に関してのものである。SOP については、この手順に従ってサンプリングすることで、サンプルの完全性や比較性が担保でき、サンプリング・分析の誤差を減らすこととなる。検討すべき点としては、サンプリングの目標とアプローチ、サンプリング手法、サンプルの保存技術、サンプル輸送方法、及び保持時間等がある。サンプリング、保存技術、又は保持時間に関して部分的な情報しかないか、もしくは情報がない場合には、データを特に注意深く解釈することとなる。

A.1.2.3　データの妥当性の評価

特定のデータ点の精度レベルが、決定に用いるには十分でない可能性があることから、データを評価する際、各データに伴う不確かさを検討することが望ましい。ここで、測定作業に伴う不確かさと、DQO 作成の中での決定に伴う不確かさは区別する。測定作業に伴う不確かさは、各濃度報告値の統計的分布関数である。一方で、決定に伴う不確かさは、決定を実施するために用いる要素の統計的分布関数である。不確かさの検討後、データの妥当性の評価を、「データの妥当性確認（Validation）」及び「決定に伴う不確かさを許容できるレベルまで低減するためにデータが十分かどうかの決定」の、2 つのステップにより実施する。データの妥当性確認は、無効なデータを特定し、残りのデータの有用性を判断する作業である。

A.1.3　概念モデルの作成

概念モデル（Conceptual model）は、存在する汚染物、それらの移行経路、影響が大きいレセプター（Receptor）に対する潜在的影響に関して、サイトおよびその周辺を図示し、仮定する事項を示すものである。この仮定は、修復措置調査・実行可能性調査の間中に適宜修正する。

A.1.3.1　概念モデルの評価

概念モデルは、潜在的汚染源や予測される汚染源、汚染物の種類と濃度、影響する土壌・地下水等、移行速度と経路、及びレセプターに着目するために、十分に詳細であることが望ましい。データの評価は、修復措置の開始時と、追加データを得た時点で実施する。修復措置調査中に取得した追加データは、概念モデルを拡張し、着目する問題に取り組むために十分な品質のデータが得られたかを決定するために用いる。

A.1.3.2　計算モデル

修復措置においては、汚染程度の定義、措置限界値（Action limit）の設定、及び誤った決定を許容できる尤度（Likelihood）の設定が難しい論点（脚注[*6]参照）である。これらの評価には、何らかのモデルを利用する必要がある。モデルには様々なレベルのもの（例えば、単純な図示や解析的方法）があることから、調査の目標を満たすために、どのレベルのモデルが要求されるかということが重要となる。

モデルは全データを収集後に、修復措置調査の最終段階において利用するものではなく、修

復措置調査の間中に適宜利用する。修復措置調査の早期においては、データ収集計画の手引きのためにモデルを利用できる。修復措置調査の間にデータ収集が進むか、又は以前の調査により多数のデータがある場合には、データをまとめるための手段としてモデルを利用できる。また、後の実行可能性調査の段階においては、将来の挙動の予測のためにモデルを利用できる。

A.1.4　目標・決定の設定

修復措置の目標は、広く見れば、有害物等の放出についての性質と程度、又は放出のおそれを決定し、そのおそれを低減又は除外するために、費用対効果が大きい措置を選択し、実施を決定することである。これを達成するためには、複数の複雑な作業を実施する必要があり、これらはそれぞれ目標、許容できるレベルの不確かさ、及び付随するデータ品質の要件を有する。これらの目標を明確かつ正確に示すことが、費用対効果が大きいデータ収集計画を作成するための最初のステップである。

A.1.4.1　目標

目標を定める際、個々の土壌・地下水等又は汚染源に着目したものになりがちであるが、これらの目標は、サイト全体に着目した修復措置の選択肢からの選択というプロジェクトの最終的な目標に矛盾しないことが望ましい。一般的な修復措置調査・実行可能性調査の目標としては、汚染物が存在するかどうかの決定、汚染物の種類の決定、汚染物の量の決定、及び汚染物放出経路の決定等がある。

A.1.4.2　決定の種類

修復措置において実施する決定の種類を定めるには、論点を明確に理解し、誤った決定をした場合の帰結に配慮することが必要である。これらの帰結が公衆の保健、安全、又は環境に重大な影響を及ぼす場合には、データの収集に対して更なる注意を払うことにより、決定が信用できることを担保する必要がある。

誤った決定をするリスクは、利用可能なデータの質・量に関連し、一般にこれらが増加するにつれてリスクは減少する。データの質・量は、誤った決定の帰結の評価においてそれぞれが独立した変数であるが、これらは一緒に検討する必要がある。これは、低品質のデータを多く収集しても、リスクを著しく低減しない可能性があり、また、多少のデータについて品質を良くしても、意思決定に用いる知識量は著しく増加しない可能性があるためである。

A.2　ステージ 2：データ用途・ニーズの特定

ステージ 2 ではデータの用途を定め、プロジェクトの目標を満たすために必要なデータの種類を指定する。ステージ 2 の要素を図 A.1(b)に示す。ステージ 1 では既存データがプロジェクトの目標を満たすかを決定するが、データが不十分であった場合には、ステージ 2 において収集する必要があるデータの種類や質・量を決定する。

A.2.1　データ用途の特定

A.2.1.1　データ用途の分類

データ用途の分類の一例を以下に示す。

- サイトの性状把握：サイトにおける汚染物の性質や汚染程度を決定するためにデータを使用する。この分類は通常、最も多くのデータの収集を要するものであり、データは廃棄物や環境のサンプルのサンプリング・分析により生成する。
- 保健及び安全：通常、サイトにおける調査者又は作業者について必要となる防護レベルを設定するためにデータを用いる。
- リスク評価:サイトによる公衆の保健や環境への脅威を評価するためにデータを用いる。このデータは、環境や生物学的サンプルのサンプリング・分析により生成する。

これらの分類は、修復措置調査において収集するデータについての全体的な目的を定めるものであり、データ品質の相違を示すものではない。即ち、サイトにおいて収集した一定レベルの品質のデータは、異なる用途に対して使用できる。

A.2.1.2　修復措置調査・実行可能性調査の用途

データの用途を評価する際、修復措置調査・実行可能性調査における潜在的な修復手段を検討する必要がある。この検討のため、スーパーファンド法修正及び再授権法（SARA）により要求される通り、残留物の長期保管を最小限にするものから、主要成分の毒性、移動性、又は体積を著しく減少するものまで、様々な処理の選択肢を作成する。加えて、処理を殆ど要しない封じ込めの手段や措置しないという選択肢を用意することが望ましい。それぞれの手段に対し、最初に候補をスクリーニングする方法とその基準等を検討する。

A.2.2　データ種類の特定

データの使用目的に基づいて、必要なデータの種類に関する簡潔なステートメントを作成する。データの種類は、最初はバックグラウンドのサンプルや土壌・地下水等のサンプルというように広いグループで定め、その後、より具体的なグループに分割する。データの種類としては化学的な分析パラメータに加え、汚染の移行の評価に必要となる透過性や多孔性といった物理的なパラメータがある。データの種類を定める際の詳細レベルは、後の DQO プロセスのステージにおいてサンプリング・分析手段の評価ができるよう十分である必要がある。

A.2.3　データ品質のニーズの特定

A.2.3.1　データ品質の要素

データ品質の定義には様々な要素があり、重要なものは、優先順位付けをしたデータの用途、適切な分析レベル、着目汚染物質（COC）、重要レベル（Level of concern）、要求される検出限界、及び重要なサンプル等である。修復措置調査・実行可能性調査の開始時に、データ品質のニーズを定めるため、これらの要素を簡単に検討することが望ましい。

測定のデータ品質に関して最も利用可能な情報は、分析技術に関してのものである。このため、まずデータの用途に対して適切な分析レベルを定める。このレベルはフィールドにおいて

実施できる可搬型装置を用いた簡単なスクリーニングから、実験室にサンプルを輸送後に実施できる分析まで 5 段階が定められている（本報告書では詳細を省略する）。データ用途のうち、例えばサイトの性状把握に対しては比較的低いレベルの分析で対応できる。一方、リスク評価に対しては比較的高いレベルの分析が必要となる。

汚染物が保健に対して悪影響を及ぼすことが知られているために、COC が明らかなサイトがある。この場合、その重要レベルの設定には適切な保健基準が利用できる。重要レベルは、何らかの措置をとる必要がある濃度範囲を定めるものである。また、定めた重要レベルはデータ品質の要件に直接影響する。用いるサンプリング・分析手法は重要レベルにおいて正確である必要があるが、サンプリングの正確度は評価や制御が難しいことから、選択した分析技術が重要レベルよりも十分に低い検出限界値を有することが重要となる。サイトにおいて多数の汚染物が発見される場合が多いが、この場合において、各汚染物に重要レベルを定めることは不可能であるか、もしくは望ましくない。これよりは、少数の指示物質を選択して重要レベルを定める方が都合がよい。

重要なサンプルとは、サンプリング・分析の目標を満たすために、有効なデータを取得する必要があるサンプルのことである。重要なサンプルについては、複数サンプルの採取が適切である場合が多い。

A.2.3.2　選択肢の費用分析

実行可能性調査における費用推定の目的は、修復措置の選択肢に要する実際の費用を、+50%から–30%の範囲内で推定することである。これは、フィールド調査の際に収集する必要があるデータの種類と量に関する要件に関連する。

A.2.4　データ量のニーズの特定

収集すべきサンプル数は様々なアプローチを用いて決定できる。用いるアプローチの妥当性は、調査対象とする土壌・地下水等の性質やサンプル位置を選択するために用いる仮定に依存する。利用可能なデータがないか、限られる場合には、段階的なサンプリングアプローチが利用できる。この場合、最初のフェーズにおけるデータに基づき、後のフェーズで採取するのに適切なサンプル数を決定することとなる。この場合、意思決定者とデータ利用者は、サンプリング位置の選択に関する根拠を作成する必要がある。一方、十分なデータが利用可能である場合には、要するデータ数の決定において、様々な統計的手法が利用できる。

データの評価後、決定を裏付けるためのデータの妥当性を決定できる。決定において高い信頼性が要求される場合には、後のサンプリングのフェーズにおいて追加データを収集することが望ましい。但し、決定における実際の信頼レベルは、データの収集と評価後にのみ定めることができる。このため、各データ収集作業の終了時に、データを評価することが重要である。

A.2.5　サンプリング・分析手段の評価

データの用途、データの種類、及びデータ品質のニーズを特定した後に、サンプリング・分析手段の評価が実施できる。全てのデータ収集作業に対し、複数のサンプリング・分析手段を

作成する。

A.2.5.1　サンプリング・分析のアプローチ

データ収集作業は、データを最大限使用できるように計画する必要がある。適切なレベルの質・量のデータが得られることを担保するようなサンプリング・分析アプローチは、段階的な修復措置調査のアプローチや、データ収集作業に向けたフィールドスクリーニング技術の利用により作成できると考えられる。データ収集計画を多数のフェーズに分割することで、データを連続的に収集し、それらを続くデータ収集作業に向けて使用することができる。

実験室におけるデータ分析と結果の利用は比較的時間を要することから、修復措置調査において遅延を招くことがある。汚染物の濃度と土壌・地下水等の性状を評価するためのフィールドにおいて利用可能な技術を利用することにより、修復措置調査における遅延を減らすことができる。

A.2.5.2　資源の考慮

データを収集するために必要な時間、人的資源と必要な装置、及びデータ収集にかかる費用を評価する必要がある。この評価はサンプリング・分析手段を特定する際に最も効率的に実施できる。

A.2.6　PARCC パラメータのレビュー

精度、正確度、代表性、完全性、及び比較性（PARCC）パラメータは、データの品質の指標である。データの最終的な用途を考慮し、必要な PARCC パラメータを定めることが望ましい。精度、正確度、及び完全性に関して数値目標を定め、これに基づいて測定法を選択するのが理想的であるが、修復措置調査・実行可能性調査の作業では情報が限られており、その時点で PARCC 目標を設定することは実際的ではない。このため、異なる測定法について精度や正確度を評価し、これにより最も適切なものを選択することが望ましい。

A.3　ステージ 3：データ収集計画の作成

ステージ 3 では、ステージ 1 とステージ 2 で定めた情報を用いて、修復措置プロジェクトのための詳細なデータ収集計画を作成する。ステージ 3 の概要を図 A.1(c)に示す。

A.3.1　データ収集要素の構築

ステージ 3 では、情報と作成した DQO を、包括的なデータ収集計画にまとめることを意図している。収集する全てのサンプルの詳細なリストを、サンプルの種類、サンプル数、サンプル位置、分析手法、及び QA・QC サンプル等を含めた形でまとめることが望ましい。

A.3.2　データ収集文書の作成

A.3.2.1　サンプリング・分析計画

サンプリングを含む全ての修復調査作業について、QA 計画・サンプリング計画書を準備す

る必要がある。これらの計画書は以下を含むことが望ましい。

- データの最終的な使用目的等を含む、サンプリング作業の目標の記述。
- サンプリングの手順の詳細。
- 採取するサンプルの種類、位置、及び頻度の仕様。

サンプリング・分析計画は、フィールドにおける作業やサンプルの分析に対する作業者の責任と手順を定めるものである。サンプリング・分析計画においては、品質保証プロジェクト計画（QAPP）の要素[*55]について記載することが望ましい。

フィールド調査作業は段階的アプローチにより実施できる。分割したサンプリング・分析計画を、分割したフェーズの修復措置調査のために準備することもあると考えられる。追加のフィールド調査のニーズが特定された場合、続く修復措置調査のフェーズのため、追加の計画を作成する。

A.3.2.2　作業計画

作業計画は、修復措置調査・実行可能性調査を実施するための業務範囲、作業レベル、費用、及びスケジュールを定めるものである。一般に、作業計画は、修復措置調査・実行可能性調査の一部として実施する作業の一般的な説明を示すが、どのようにサンプルを採取するか、どのように分析を実施するかの詳細な説明は含めない。これらは、サンプリング・分析計画において示すものである。

修復措置調査の作業計画には、各フィールド作業に関与する作業者数と推定期間、フィールドにおいて収集するサンプル数（ブランクと複数サンプルを含めて）とサンプル採取位置、実施する分析のリスト、及び実施する試験等の情報を含める。これらの情報は、スケジュールおよび費用の推定についての根拠の作成に必要である。

[*55] 1987 年の報告書 [9)]では、タイトルページと概要、内容、プロジェクトの説明、プロジェクトの組織、データ測定に対する QA 目標、サンプリング手順、サンプルと文書の保管手順、校正の手順と頻度、分析手順、データの整理、妥当性確認、及び報告、内部の QC 確認、実施とシステムの検査、メンテナンス、データ測定評価手順、是正措置、並びに QA レポートの 16 項目が示されている。これは、表 4.1 に示した現在の EPA の品質体系における 24 要素とは異なる。

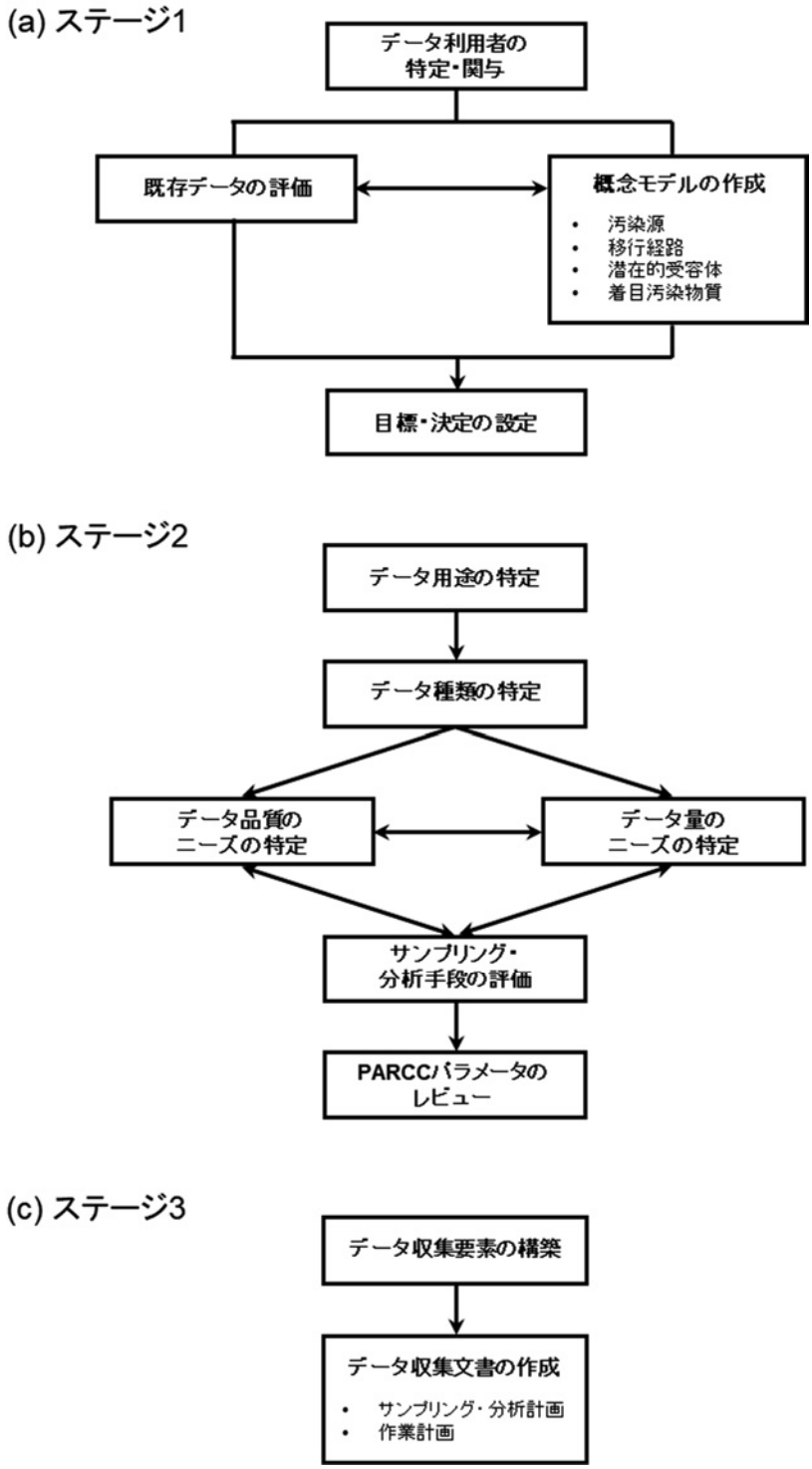

図 A.1　1987 年時点の DQO プロセスの各ステージの要素

報告書 [9]に基づき作成した。(a) ステージ 1、(b) ステージ 2、(c) ステージ 3。

付録 B. DQO プロセス（1994 年時点）

本章では、1994 年のデータ品質目標（DQO）プロセスの手引書[6)]における 7 つのステップ（図 2.4）の内容について、要点を示す。また、各ステップの主なアウトプットは表 B.1 にまとめる。

B.1　ステップ 1：問題点の明言

このステップでは、調査の焦点を明確にするために、問題点を定義する。以下に、ステップ 1 における実施内容や重要事項を示す。

- 計画作成チームを作成する。計画作成チームが調査に関する DQO を作成することとなる。このチームの人数は、問題の大きさや複雑さに直接関係するが、化学者、品質保証（QA）・品質管理（QC）の専門家、地域の代表者、及びデータの利用者等を含めることが望ましい。また、統計学者を含めることが望ましい。
- 計画作成チームの意思決定者（Decision maker）を定める。意思決定者は、最終的な決定の権限を有する。
- 調査の問題点を簡潔にまとめる。このまとめは、調査の背景情報となるものである。ここでは、以下の手順を踏むことが有用である。
  - 問題を引き起こしている状態・状況、及び調査の動機を記述する。
  - 既存情報を簡潔にまとめ、現在理解している通りに問題を記述する。この基本的な要素の例としては、調査の目標・規制に関連する事項、調査に関係があるか、調査に興味がある人員や組織、調査の政治的課題、予算の財源と予算規模、以前の調査結果、及び既存のサンプリング計画の制約がある。
  - 問題点が正しく定義され、以前に解決してないことを確かめるために、文献調査を実施し、過去や現在進行中の調査を調べる。以前の調査を含め、関連情報をレビューし、情報源と情報の信頼性を示す。特に、サンプリング・分析法の性能が重要である。
  - 問題点が複雑な場合には、管理しやすくなるように細分化することを考慮する。細分化したもののうち、別の調査で取り組む部分を定めるとともに、優先順位と相互の関係性を割り当てる。
- 調査において利用可能な資源と関連する締切を定める。予測される予算と利用可能な人員を明記し、調査の完了を含め、全ての守るべき締切を列挙しておく。

B.2　ステップ 2：決定の特定

このステップでは、調査により解決を試みる決定ステートメント（Decision statement）を定めることを目的とする。決定ステートメントとは、定めた調査の論点（脚注[*6] 参照）と、調査の成果に基づいて実施する可能性がある選択肢となる措置（Alternative action）を組み合わせたものである。以下に、ステップ 2 における実施内容や重要事項を示す。

- 主要な調査の論点を定め、可能な限り明確に示す。これにより、論点に取り組むために必要となる情報の調査範囲を狭めることができる。

- 問題点を解決するために実施する可能性がある、選択肢となる措置を定める。ここでは、措置を要しないという選択肢を含める。
- 主要な調査の論点と選択肢となる措置を組み合わせ、決定ステートメントを定める。決定ステートメントは、選択肢となる措置からの選択を表すものである。この基本的な形は、「（主要な調査の論点による未知の環境条件・問題・基準）が、（選択肢となる措置を講じることを）必要とする（又は裏付ける）かどうかを決定すること」というものである。
- 問題点に取り組むために複数の決定ステートメントを定める必要がある場合は、それらを列挙し、解決すべき順番を定める。

B.3　ステップ 3：決定へのインプットの特定

このステップでは、決定ステートメントを解決するために必要な情報インプットを特定し、どのインプットが環境測定を要するかを決めることを目的とする。以下に、ステップ 3 における実施内容や重要事項を示す。

- 決定ステートメントを解決するために、必要になる情報を定める。必要な情報を収集するために、モニタリングやモデル化アプローチ、もしくはそれらの組み合わせを用いるかどうかを検討する。選択したデータ収集アプローチに基づき、決定ステートメントのために必要な情報の種類を定める。
- 必要な情報について、情報源を定め、リストにしておく。情報源としては、以前のデータ収集結果、履歴情報、規制の手引書、専門家の判断、文献、又は新たなデータ収集等が該当する可能性がある。その後、既存データが調査に適するかについて、定性的に評価する。
- 措置レベル（Action level）を設定するために必要な情報を定める。措置レベルは、選択肢となる措置からの選択において基準となる閾値のことである。これは規制上の閾値や標準に基づく可能性があるが、リスク評価のように、問題に特有の検討により導かれる可能性もある。
- 必要なデータを得るために、適切な測定法があるかを確かめる。必要な情報を適切に測定できる可能性がある手法のリストを作成する。この際、各測定手法についての検出限界値と定量限界値に注意を払う。

B.4　ステップ 4：調査範囲の決定

このステップでは、問題点の空間的・時間的な範囲を定めることを目的とする。以下に、ステップ 4 における実施内容や重要事項を示す。

- 着目する母集団（Population）を定義する性質を定める。調査の焦点を明確にするように、この性質を明らかに定めることが重要である。この際、複数の方法があると考えられるが、最も具体的なものを 1 つ選択する。
- 意思決定の空間的範囲を定める。
  - 決定ステートメントを適用する地理的な範囲を定める。地理的な範囲とは、何らか

の物理的な特性（即ち、体積、長さ、幅、境界）により特徴的に示される領域である。

– 既存情報を利用し、母集団の要素を比較的等質な特性の階層（Strata）に分割する（これが適切な場合）。これは、部分母集団の調査、データの部分集合におけるばらつき（Variability）の減少、又は問題の複雑さの減少のために望ましいことである。

- 問題点の時間的範囲を定める。
  – 決定を適用する期間を定める。決定を適用する期間全体からデータを収集できない可能性があるため、データを反映すべき期間を定める。これは着目する母集団全体と部分母集団について定めることが望ましい。
  – データを収集する時期を定める。これは、調査の過程で条件が変化するため、データ収集の完遂や結果の解釈に影響するということを考慮するものである。データ収集に最も適した条件となる時期を決定し、これらの条件を反映したデータを収集するために最も適した期間を選択する。
- 意思決定のスケールを定める。これは、決定をするのに最も適切な、母集団の最小の部分集合のことであり、空間的・時間的範囲に基づく。
- データ収集における全ての実際的な制約を特定する。これは、サンプリングが実施できない季節や気象条件、サイトのアクセスや承諾がないこと、もしくは人員、時間、又は設備が利用不可であること等である。

B.5　ステップ 5：決定ルールの作成

このステップでは、着目パラメータと措置レベルを定め、ステップ 4 までのアウトプットを 1 つのステートメントにまとめることを目的とする。このステートメントは、選択肢となる措置からの選択に関して、論理的根拠を示すものである。以下に、ステップ 5 における実施内容や重要事項を示す。

- 母集団の特徴を示す統計的なパラメータを指定する。これは、真値を知りたい着目パラメータのことであり、平均値、中央値、及びパーセンタイル値等がある。規制によりパラメータが定められる場合もあると考えられる。
- 調査についての措置レベルを定める。ここでは、選択肢となる措置からの選択に用いるために、数値を定めることが望ましい。この措置レベルが、ステップ 3 で特定した測定手法の検出・定量限界より大きいことを確認する。
- 決定ルール（Decision rule）を、「A である場合には B を実施する」というステートメントとして作成する。これは着目パラメータ、意思決定のスケール、措置レベル、及び選択肢となる措置をまとめたものである。

B.6　ステップ 6：決定の誤りに関する許容限界の設定

このステップでは、決定の誤り（Decision error）に関して許容できる限界値を定めることを目的とする。これはデータ収集計画についての性能目標（Performance goal）を設定するために用いる。

環境の真の状態はデータによって推定することしかできないため、測定値に基づく決定は誤りである可能性がある。母集団パラメータの真の状態を知ることができないのは、限られたサンプリングにおいて母集団の空間的・時間的変化を完全に捉えることができないことと、分析法と分析装置に不完全さがあることのためである。

決定の誤りの確率は、完全に除くことはできないが、科学的なアプローチの適用により制御できる。このアプローチでは、環境の 1 つの状態（帰無仮説）と、対立状態（Alternative condition；対立仮説）の選択にデータを用いる。帰無仮説は、逆であるという強い証拠がない限り真であると考える、基準状態（Baseline condition）として扱う。これにより、より望ましくない帰結（Consequence）となる決定の誤りを起こりにくくすることができる。決定の誤りは、帰無仮説が真であるときにそれを棄却するか、誤りのときにそれを棄却できないときに生じ、それぞれ偽陽性の誤り、偽陰性の誤りと分類される。偽陽性の誤りは第一種の過誤とも呼ばれ、この大きさαは有意水準と呼ばれる。偽陰性の誤りは第二種の過誤とも呼ばれ、この大きさβについて、$1-\beta$は仮説検定（脚注[*20]参照）の検出力と呼ばれる。以下に、ステップ 6 における実施内容や重要事項を示す。

- 着目パラメータついて尤もらしい最大値と最小値を推定することにより、着目パラメータが取り得る範囲を定める。これにより、このステップの残りの作業は、パラメータに関する値のみに集中できる。範囲を定める際、過去のデータや文書化されている分析データが大いに参考になる。
- 偽陽性・偽陰性の 2 つの誤りが、措置レベルに関連してどのような場合に生じるか、及びどちらの決定の誤りを帰無仮説とするかを定める。決定の誤りと帰無仮説は、以下の手順により定める。
  - 2 つの決定の誤りを定義し、どちらが措置レベルより上で、どちらが措置レベルより下で生じるかを決定する。
  - 2 つの決定の誤りにより生じ得る帰結を定め、評価する。帰結の評価においては、経済的・社会的コスト、保健・生態系への影響、及び政治的・法的な結果等の深刻度を考慮する。パラメータ値が措置レベルから離れるにつれて、帰結の深刻度が変わってくる可能性があるため、様々な値において潜在的帰結の深刻度を評価する。また、保健の影響の閾値のように、ある値で急に帰結が変化しないかを検討する。
  - 措置レベル付近において、2 つの決定の誤りのうちどちらがより深刻な帰結をもたらすかを決める。ここで措置レベル付近に着目するのは、パラメータの真値がこの付近であるときに、最も決定の誤りを起こしやすいためである。
  - 帰無仮説と対立仮説を定義し、適切な決定の誤りに対して、偽陽性と偽陰性を割り振る。規制の準拠、保健、又は生態学的なリスクの問題においては、最も不都合な潜在的帰結を帰無仮説として定義することが望ましい。統計的仮説検定においては、帰無仮説が間違いであることをデータによってはっきり証明する必要がある。
- グレー領域（Gray region）を指定する。これは、偽陰性の誤りの帰結が比較的重大ではないと考えられるパラメータ値の範囲であり、境界の一方を措置レベル、もう一方を偽陰性の誤りの帰結が重大になり始めるパラメータ値とする。統計学においては、この幅

は最小検出差と呼ばれ、通常はΔと表す。これは、DQO を満たすのに必要なサンプル数の計算において重要な部分である。グレー領域は、実際的には、偽陰性の誤り率を低く抑えるには高い費用がかかるために、実行可能でないか、又は合理的ではないという領域である。

- グレー領域より高い値の範囲と低い値に対し、許容できる決定の誤り率を割り当てる。これらの誤り率は、とり得るパラメータ値において、決定の誤りに対する潜在的な帰結の重大性を評価して選択する。最低限、措置レベルにおける偽陽性の誤りの限界値と、グレー領域のもう一方の境界における偽陰性の誤りの限界値を定めることが望ましい。これらの設定における初期値として、それぞれの誤り率を 0.01 とすることを推奨するが、これを規定値として捉えることは望ましくない。
- このステップで定めた帰無仮説、グレー領域、及び決定の誤り率の許容限界値の情報は、「決定性能目標図式（DPGD）」というグラフ（図 3.3 を参照）にするか、「決定の誤りの限界値表（Decision error limits table）」という表にまとめることで、まとめて視覚的に表現、評価できる[*56]。この表の例を表 B.2 に示す。

B.7　ステップ 7：データ収集のための計画の最適化

このステップでは、DQO を満たすと予測されるデータを収集するための、費用対効果が大きい計画を定めることを目的とする。以下に、ステップ 7 における実施内容や重要事項を示す。

- 以前の 6 つのステップにおける DQO のアウトプットについて、矛盾していないかを見直す。また、既存のデータについて、データ収集計画を裏付けるために用いると考えられる場合には、これらをレビューする。決定のために、既存データを新たなデータと組み合わせて用いようとする場合には、新たなデータ収集計画に適切な事項を含めることにより、解消できそうな不一致や緩和できそうな不足があるかどうかを決定する。
- DQO のアウトプット等に基づいて、データ収集・分析計画の選択肢を作成する。一般に、実行可能なサンプル収集技術や分析技術の選択肢がある場合に、サンプル数と測定の性能のバランスをとった、費用対効果が大きい選択肢を見出すことが目標である。
- 各データ収集計画の選択肢について、問題点の解決に必要な数学的表現を作成する。これは以下の手順で作成する。
  - 統計的検定の方法と、その方法に対応するサンプル数方程式を定める。
  - 測定値と真値の関係を表す統計的モデルを作成する。多くの場合、このモデルは測定値中に存在する誤差や偏りの要素を表す。
  - サンプル数とサンプリング・分析の全費用との関係を表す費用関数を作成する。
- 各データ収集計画の選択肢について、DQO を満たすのに最適なサンプル数を選択する。ここでは、作成した数学的表現を利用する。費用や他の制約の範囲で決定の誤りの限界値を満たす計画がない場合には、1 つ以上の制約を緩和する必要がある。
- 費用や DQO の制約への適合性に基づいて、計画の選択肢を評価する。費用（又は予測さ

[*56] 決定の誤りの限界値表は、これ以降の手引書[1,7]では触れられていない。

れる費用）と DQO への適合性のバランスが最もよい計画の選択肢を選択する。

- 選択した計画の作業の詳細と、理論的仮定をサンプリング・分析計画において文書化する。選択した計画案について、データの効率的かつ有効な統計的解釈ができるようにするため、主要な特徴を文書化する必要がある。フィールドでのサンプル収集手順や分析方法における誤差や実際的な制約により、反する可能性がある統計的仮定を文書化しておくことが特に重要である。
- 全ての作業を完了した後、データ収集計画に見識のある統計学者に助言を得て、評価を受けるのが有用であると考えられる。熟練した統計学者により、より費用対効果が大きいか、実施が容易なデータ収集計画の選択肢が提案される可能性がある。

表 B.1　1994 年時点の DQO プロセスの各ステップにおける主要なアウトプット

ステップ 1：問題点の明言
• 計画作成チームの人員リストと意思決定者の特定 • 問題点の簡潔なまとめ • 調査に関する利用可能な資源と関連する締切のまとめ
ステップ 2：決定の特定
• 主要な調査の論点と、問題点を解決する可能性がある措置をつなげた決定ステートメント
ステップ 3：決定へのインプットの特定
• 決定ステートメントを解決するために必要な情報インプットのリスト • 測定する環境パラメータや特性のリスト
ステップ 4：調査範囲の決定
• 問題点の空間的・時間的範囲の詳細な記述 • 調査に干渉する可能性がある全ての実際的な制約
ステップ 5：決定ルールの作成
• 母集団を特徴付ける統計的パラメータ • 措置レベル • 選択肢となる措置の中から選択する条件を定めた、「A である場合には B を実施する」というステートメント
ステップ 6：決定の誤りに関する許容限界の設定
• 決定の誤りによる帰結の検討に基づく、許容できる決定の誤り率
ステップ 7：データ収集のための計画の最適化
• DQO を満たすと考えられる、最も費用対効果が大きい調査の計画

表 B.2　決定の誤りの限界値表の例

1994 年の DQO プロセスの手引書 [6]に基づき作成した。措置レベルを 100 ppm としており、決定の誤りの許容限界値は、基準状態としてパラメータ値が措置レベルを超えない場合と超える場合について、それぞれ図 3.3(a)と(b)に対応する。

真の濃度値 (ppm)	正しい決定	誤りの種類	決定の誤りの許容限界値
基準状態：パラメータ値が措置レベルを超えない			
<60	超えない	偽陽性	0.05
60–100	超えない	偽陽性	0.10
100–120	超える	偽陰性	グレー領域
120–150	超える	偽陰性	0.10
>150	超える	偽陰性	0.05
基準状態：パラメータ値が措置レベルを超える			
<60	超えない	偽陰性	0.05
60–80	超えない	偽陰性	0.10
80–100	超えない	偽陰性	グレー領域
100–140	超える	偽陽性	0.10
>140	超える	偽陽性	0.01

付録 C. DQO プロセス（2000 年時点）

本章では、2000 年のデータ品質目標（DQO）プロセスの手引書[7)]における 7 つのステップ（図 2.5）の内容について、要点を示す。また、各ステップの主なアウトプットは表 C.1 にまとめる。

C.1　ステップ 1：問題点の明言

全ての体系的計画作成法において、最初のステップは調査の発端となった問題点の定義である。このステップでは、計画作成チームの作成、問題点の記述、並びに利用可能な資源、制約、及び締切の特定を実施する。以下に、ステップ 1 における実施内容や重要事項を示す。

- 計画作成チームと意思決定者（Decision maker）を定める。計画作成チームは通常、プロジェクト管理者、技術スタッフ、データ利用者、及び利害関係者で構成する。計画作成チームの大きさは、問題点の複雑さや重要性に直接比例する。技術プロジェクト管理者は問題点や予算・時間の制約に詳しいため、通常は意思決定者の 1 人となる。DQO プロセスの初期段階において利害関係者を含めることにより、コミュニケーションの場となるとともに、意思決定プロセスにおける信頼感を促進できる。
- 調査対象の問題点や環境ハザードを記述する。問題点については、これを起こしている状態・状況や、調査を理解する理由を記述する。既存情報をまとめることにより、現在理解している通りに問題を記述するか、文献調査を実施し、過去や実施中の調査を調べる。これにより、問題点が正しく定義され、以前に解決していないことを確かめる。環境ハザードについては、環境問題の正確な概念モデル（Conceptual model）を作成することが重要である。このモデルは、以降の全てのインプットや決定の基礎となるものであり、既知か予想される汚染物の位置、汚染物の潜在的発生源、汚染されているか汚染されることとなる土壌・地下水等、及び曝露シナリオを示す。問題が複雑な場合には、管理しやすくなるように細分化することを考慮する。
- 利用可能な資源、制約、及び締切を特定する。ここでは、データ収集の実施における資源の制限や時間的制約を調査することが望ましい。推測する事項としては、性能基準（Performance criteria）・許容基準（Acceptance criteria）の作成の作成、品質保証プロジェクト計画（QAPP）の作成、サンプルの収集と分析、及びデータの解釈等がある。また、利用可能な人員と制約を調べ、データ収集についての中間的・最終的な締切を定めることが望ましい。

C.2　ステップ 2：決定の特定

このステップでは、調査で取り組む主要な論点（脚注[*6] 参照）と、実施する可能性がある選択肢となる措置（Alternative action）を定める。その後、これら 2 つを組み合わせることにより、決定ステートメントを作成する。以下に、ステップ 2 における実施内容や重要事項を示す。

- 主要な調査の論点を定め、可能な限り明確に示す。これにより、論点に取り組むために必要な情報の調査に集中できる。
- 問題点を解決するために実施する可能性がある、選択肢となる措置を定める。ここでは、

措置を要しないという選択肢を含める。

- 主要な調査の論点と選択肢となる措置を組み合わせ、決定ステートメントを作成する。決定ステートメントは、選択肢となる措置からの選択を表すものである。決定ステートメントを作成する際には、「（主要な調査の論点による未知の環境条件・問題・基準）が、（選択肢となる措置を講じることを）必要とする（又は裏付ける）かどうかを決定すること」という定型文を用いることができる。
- 問題点に取り組むために複数の決定ステートメントを定める必要がある場合には、決定がどのように他に関連するかを調査し、優先順位を付けることが望ましい。

C.3　ステップ 3：決定へのインプットの特定

このステップでは、決定ステートメントを解決するために必要な情報の種類と、この情報源となり得るものを特定する。また、環境特性を測定するのに適切な分析手法が存在するかどうかを決定することが望ましい。以下に、ステップ 3 における実施内容や重要事項を示す。

- 必要となる情報の種類を特定する。新たな測定が必要であると決定した場合は、決定のために必要となる特性のリストを作成することが望ましい。決定に既存データを用いる可能性がある場合は、それらが許容できることを確かめるために、可能な限りデータの起源を調べることが望ましい。新たなデータを既存データと合わせることを検討する場合は、新たなサンプルが同じように収集され（又は分析され）、新データと既存データが共通のパラメータを含むように、既存のデータベースにおけるパラメータを調べる必要がある。
- 決定の解決のために必要となる情報の情報源を特定し、文書化することが望ましい。情報源としては、以前のデータ収集結果、履歴情報、規制の手引書、専門家の判断、文献、又は新たなデータ収集等が該当する可能性がある。
- 措置レベル（Action level）についての論拠を定める。措置レベルは、選択肢となる措置からの選択についての基準となる、閾値のことである。ここでは、措置レベルがどのように導出されたかを理解することが重要である。
- データの要件を満たすサンプリング・分析法を特定する。決定に関連する環境特性のリストを用いて、調査する問題点について適切なサンプリング・分析法のリストを作成するとともに、適切な検出限界値の分析法を特定することが望ましい。また、サンプリング・分析の重要な性能特性である偏り（Bias）を最小限にすることが重要である。データの偏りを生じることが知られている方法は、可能であれば避けることが望ましい。その他の検討事項としては、人員の認証や実験室の認定に関する要件がある。

C.4　ステップ 4：調査範囲の決定

このステップでは、着目する対象の母集団（Population）や、意思決定に関連する母集団の空間的・時間的特徴を定める。以下に、ステップ 4 における実施内容や重要事項を示す。

- サンプルを収集する対象の母集団を明確に定義する。通常、対象の母集団は結論を下そうとする環境サンプル一式である。

- 決定ステートメントの空間的範囲を定める。
  - 意思決定を適用する地理的領域を定める。ここでは、体積、長さ、幅、又は範囲といった区別可能な物理的特徴を用いて、データを収集する全体の地理的領域を定めることが望ましい。地理的領域の周辺領域を示す際には、定める空間的範囲に関連しないエッジ効果と汚染に影響されるため、注意が必要である。
  - 母集団を比較的等質な特性の部分集合に分割する。概念モデルに関する知見を用いて、対象母集団について着目する特性が位置や時間でどのように変化するかを検討できる。
- 決定ステートメントの時間的範囲を定める。
  - データを収集する時期を定める。調査中に、時間に関連した現象によって条件が変化する可能性がある。このため、いつの条件がデータ収集に最も適するかを決定し、データ収集に最も適した時期を選択することが望ましい。
  - 意思決定についての期間を定める。決定を適用する全期間にわたって、データが収集できない可能性がある。土壌・地下水等が経時変化する可能性があるか、調査の時間的制約がある場合は、母集団を考慮して、データ収集に最適な期間を定める。これは母集団全体と部分母集団について定めることが望ましい。その後、決定を実施する長い期間に比べて、データ収集の短い期間により起こる不一致に対処する。
- データ収集についての実際的な制約の種類を特定する。実際的な制約は、調査の空間的・時間的範囲、人員の可用性、又は時間や費用の制約に関連し、アクセス、設備の可用性と操作、及びサンプリングが不可能な環境条件等のことである。
- 意思決定のスケールを定める。これは、データを収集、分析、まとめ、及び解釈する最小の領域、体積、又は時間の単位である。誤った決定の帰結（Consequence ; ステップ 6）は、決定単位の大きさ、位置、及び形に関連する。ここで、決定単位の現在・将来の使用、決定単位の位置、及び潜在的な修復の要件を考慮することが重要である。また、誤った決定による帰結は、注意深く検討することが望ましい。意思決定のスケールを設定する際には、決定の誤りにより、許容できない資源の損失や、許容できない保健や環境への脅威を招くほど大きくしないよう注意を払う必要がある。また、1 つの大きな決定の単位とするか、多数の小さな決定の単位とするかを検討することも重要である。多数の決定の単位があり、複数の決定をする場合には、少なくとも 1 つの汚染された単位を浄化しないままとする確率を制限するかについて、検討する必要がある。この可能性は指数関数的に増加することとなるため、これを制御したい場合には、統計学者との協議が推奨される。

C.5　ステップ 5 : 決定ルールの作成

このステップでは、意思決定に完全な情報が利用できることを想定し、以前のステップのアウトプットとこのステップで作成したインプットを組み合わせて、明確な「A である場合には B を実施する」というステートメントを作成する。これは理論的な決定ルール（Decision rule）と呼ばれ、選択肢となる措置を選ぶ条件を示すものである。以下に、ステップ 5 における実施

内容や重要事項を示す。

- 対象母集団を最もよく特徴付ける母集団パラメータを選択する。母集団パラメータの例としては、平均値、中央値、パーセンタイル値、又は総量がある。これは規制により定める場合もあるが、そうでないときは、特定のニーズや検討に基づいて選択する。意思決定において最も一般的に用いられるパラメータは、母集団の平均値である。
- 決定のために必要な措置レベルを定める。これは、一連の措置からの選択に用いるものである。
- 措置レベルが測定の検出限界値を超えることを確かめる。このため、ステップ 3 で特定した各測定法について、検出限界値を決める必要がある。検出限界値が措置レベルを超える場合は、より高感度な方法を特定するか、異なるアプローチを用いることが望ましい。検出限界値は目的に応じて定めるものであり、用いようとする「A である場合には B を実施する」という決定ルールについて最も適切な定義を選択することが望ましい。

C.6　ステップ 6：決定の誤りに関する許容限界の設定

このステップでは、2 つの選択肢となる措置から選択するための性能目標（Performance goal）を定める。この目標は、ステップ 5 で特定した着目パラメータのある真値において決定を誤る確率として表す。以下に、ステップ 6 における実施内容や重要事項を示す。

- サンプル採取計画と測定システムを選択することにより、全体の誤差を管理することが重要である。決定は不完全なサンプルのデータに基づくため、決定を誤る可能性がある。データ収集法と分析法に偏りがないとしても、サンプルのデータには偶然誤差と系統誤差が含まれる。これら全体の誤差が、決定の誤りの確率に影響することとなる。
- 着目パラメータ値について、利用できる情報、専門家の判断、又は履歴情報に基づき、上限値と下限値を見積もることにより、妥当な範囲を定める。これにより、パラメータの関連する値のみに基づき、決定の誤りの確率限界値を定義することに集中できる。
- 決定の誤りを定める。サンプルのデータに基づく決定には固有の不確かさがあるため、真値が措置レベルを超えないのか超えるのかが明確にわからない結果が得られる可能性がある。このような状況においても決定を下せるよう、これら 2 つの可能性のうち一方を基準状態（Baseline condition）、もう一方を対立状態（Alternative condition）と分類する。基準状態は、それを否定するための十分な証拠がない場合には、事実上の決定となる。
  - 決定を誤る確率は、仮説検定という統計的な決定手順を用いて定量化できる（脚注[*20]参照）。仮説検定を意思決定に適用する場合、データを基準状態と対立状態の選択に用いる。検定により、基準状態が誤りであることを示すには不十分な証拠しかないか、基準状態が恐らく誤っているということを示すこととなる。即ち、基準状態を棄却することに立証責任が置かれることとなる。
  - 誤った棄却は、基準状態が実際には真である場合に、限られた数のサンプルデータから恐らく誤りであると決定する場合に生じる[*57]。逆に、誤った採択は、基準状態

[*57] 1994 年の DQO プロセスの手引書 [6)]では、誤った棄却は偽陽性、誤った採択は偽陰性と呼ばれていた（付録 B 参照）。

が実際には誤りである場合に、恐らく真であると決定する場合に生じる。これらを表にしたものが図 3.1 である。

– 統計学的には、基準状態は帰無仮説と呼ばれ、対立状態は対立仮説と呼ばれる。誤った棄却は第一種の過誤とも呼ばれ、この大きさαは仮説検定の有意水準と呼ばれる。誤った採択は第二種の過誤とも呼ばれ、この大きさβについて、$1-\beta$は仮説検定の検出力と呼ばれる。

- 決定の誤りの確率を管理する。このために、全体の誤差のうち最も大きな要素に着目する。サンプリングにおける誤差が比較的大きいと考えられる場合には、より多くのサンプルを収集するか、よりよいサンプリング計画を作成することにより、決定を誤る可能性を管理できる。分析における誤差が比較的大きいと考えられる場合には、個々のサンプルを複数分析するか、より正確で精密な分析法を用いることにより、決定を誤る可能性を管理できる。これらの誤差の両方を考慮する場合もある。
  – 堅実な決定をするために、誤った棄却と誤った採択の両方について、厳しい限界値を設定する必要がないこともある。1 つの決定の誤りの帰結が比較的重大ではない場合には、比較的不正確なデータや少量のデータに基づき、堅実な決定ができる。逆に、決定の誤りの帰結が厳しい場合には、より管理するようなデータ収集計画を作成する。
  – 決定の誤りの帰結と、決定を誤る確率を制限するための費用とのバランスをとる必要がある。このバランスをとるために、ステップ 6 とステップ 7 を数回繰り返す必要が生じる。
  – 統計的仮説検定の使用と関係がない決定の誤りが生じる可能性もある。これは意思決定に用いる前にデータに手を加えられた場合等に起こり、この場合には仮定する誤った棄却率と誤った採択率は無効となる。
- 決定プロセスの品質を表す。決定性能曲線（Decision performance curve）というグラフにより、この品質を図示できる。このグラフの例は図 3.2 に示すものであり、x軸に着目パラメータの真値の範囲（措置レベルを含む）、y軸に着目パラメータが措置レベルを超えると決定する確率（0 から 1）を示している。仮に、着目パラメータに関する完全な知識を持っているとすると、決定性能曲線は措置レベル以下のパラメータ真値で 0 を示し、措置レベル以上では 1 となる。実際には収集データ（誤差を含む）を扱うため、パラメータ真値の増加に従い、確率は 0 から 1 まで次第に増加する。
- 基準状態と対立状態を定め、適切な決定の誤りに対して、誤った棄却と誤った採択を割り振る。規制により基準状態が定まらない場合は、決定の誤りの相対的な帰結に基づいて基準状態を定める。誤った棄却は誤った採択よりも厳しい誤りである。以下の手順により、2 種類の決定の誤りが生じる範囲として、措置レベルより上と下の領域を示す。
  – 2 種類の決定の誤りを定義し、それぞれの誤りについて「真の自然の状態」を定める。「真の自然の状態」は、決定単位における未知の着目パラメータについての実際の状態である。2 種類の決定の誤りを、着目パラメータ、措置レベル、及び選択肢となる措置に関して示すことが望ましい。

  - 各決定の誤りについて潜在的帰結を特定し、評価する。誤った棄却と誤った採択の範囲の数点において、決定の誤りの潜在的帰結を評価することが望ましい。
- グレー領域（Gray region）を指定する。これは定量的な決定性能基準の 1 つの要素であり、特に、非現実的で実施不可能なサンプル数を制限するために用いる。グレー領域の境界の一方は措置レベルとし、もう一方の境界は、誤った採択が起こり得るパラメータ値の範囲において、この帰結を評価することにより設定する。この境界は、誤った採択の帰結が重大であるパラメータ値に対応する。一般に、グレー領域を小さくすると、不確かな領域が減少するため、基準を満たすのに必要なサンプル数は多くなる。統計学においては、この幅は最小検出差と呼ばれ、通常はΔと表す。
- 措置レベルより高い値と低い値に対し、許容できる決定の誤りの限界値を割り当てる。これは、あるパラメータ値において決定の誤りが生じる確率のことである。最低限、措置レベルにおける誤った棄却の限界値と、グレー領域のもう一方の境界における誤った採択の限界値を定めることが望ましい。これらの設定における初期値として、それぞれの誤り率を 0.01 とすることを推奨するが、これを規定値として捉えることは望ましくない。
  - ステップ 6 の主要なアウトプットは図 3.3 に示す決定性能目標図式（DPGD）である。DPGD は決定性能曲線の概略図であり、設定した許容できる決定の誤りの限界値を数点のみ示すものである。これらを決定性能目標（DPG）と呼び、作成するサンプリング計画についての基準として用いる。
  - 図 3.3(a)は、基準状態が、パラメータ値が措置レベルである 100 ppm より低い場合の DPGD の例を示す。この例において、誤った棄却は、実際にはパラメータ値が措置レベルより低い場合に、高いと決定することであり、誤った採択は、実際にはパラメータ値が措置レベルより高い場合に、低いと決定することである。一方で図 3.3(b)は、基準状態が、パラメータ値が措置レベルより高い場合の DPGD の例を示す。この例において、誤った棄却は、実際にはパラメータ値が措置レベルより高い場合に、低いと決定することであり、誤った採択は、実際にはパラメータ値が措置レベルより低い場合に、高いと決定することである。

C.7　ステップ 7 : データ収集のための計画の最適化

このステップでは、DQO と DPG を満たすと予測されるデータを収集するための費用対効果が大きいサンプリング・分析計画を作成することを目的とする。以下に、ステップ 7 における実施内容や重要事項を示す。

- 既存データをレビューすることが望ましい。既存データが利用できない場合は、サンプル数の決定に向けて、ばらつきの予備的な推定値を得るために、多少のフィールド調査を実施することが、費用対効果が大きい方法であると考えられる。決定のために、既存データを新たなデータと組み合わせて用いようとする場合には、新たなデータ収集計画に適切な事項を含めることにより、解消できそうな不一致や緩和できそうな不足があるかどうかを決定する。

- ステップ 5 で作成した理論的な決定ルールは着目パラメータの真値を知っているという仮定に基づくものであるが、サンプルの測定値を決定に用いるため、運用上の決定ルールを理論的な決定ルールと置き換える必要がある。運用上の決定ルールは、信頼区間等の何らかの統計的区間を含む統計的仮説検定の形である可能性が高い。可能性のある運用上の決定ルールを査定し、最適なものを 1 つ選択することが望ましい。各運用上の決定ルールは、DPG を満たすサンプル数の決定について、異なる数式を使用することとなる。
- DQO のアウトプット等に基づいて、データ収集計画の選択肢を作成する。ここで最も重要なことは、空間的・時間的なサンプリング計画や分析技術の注意深い選択により、全体のばらつきを減らすことである。一般に、実行可能なサンプル収集技術や分析技術の選択肢がある場合に、サンプル数と測定の性能のバランスをとった、費用対効果が大きい選択肢を見出すことが目標である。最低限、計画の選択肢には、サンプル選択法、サンプルの種類、サンプル数、及びサンプル当たりの分析数を含めることが望ましい。計画の選択肢を作成するために、サンプル数やサンプルの空間的・時間的位置、収集するサンプルの種類、用いるサンプリング・分析法、又は繰り返し分析数を変化させるという方法がある。
- 各計画の選択肢について DPG を満たすサンプル数を計算する。この支援のために、ソフトウェアが利用できる。その後、各計画の選択肢について、費用を決定する。資源の制約の中で DQO が実行・達成できない場合には、実行可能な選択肢ができるまで、幾つかの DQO や DPG を緩和する。
- 全ての DQO を満たす最も費用対効果が大きいデータ収集計画を選択する。計画案について、費用と、DQO の制約や DPG への適合に基づいて査定することが望ましい。プロジェクトに課された非技術的、経済的、及び保健の要因を考慮し、費用（又は予想される費用）と、DQO への適合性とのバランスが最も良い計画が、最も費用対効果が大きい計画（又は最適な計画）である。
  - 全ての DQO と DPG を満たすデータ収集計画がない場合には、DQO プロセス全体のアウトプットを検査し、修正する必要がある。この例としては、決定の誤りの許容限界値の増加、グレー領域幅の増加、サンプリング・分析費用の増加、及び調査範囲の変更等が考えられる。
  - EPA のプログラムにおいては、データ収集計画の実施に関する運用上の要件を文書化する。ここでは、サンプル数、サンプルの種類、一般的に用いる採取法、サンプルの量、サンプルが代表する範囲、サンプルの位置と選択法、時期的な問題、及び分析法等を文書化することが望ましい。モデル、運用上の決定ルール、及びデータの収集と統計的分析に対する仮定の適切な文書化は、元の計画から何らかの相違が発生した際に、調査全体としての妥当性を維持するために不可欠である。これはまた、データ収集と意思決定プロセスの完了後の、データ品質評価（DQA）プロセスにおける重要な情報源となる。

表 C.1　2000 年時点の DQO プロセスの各ステップにおける主要なアウトプット

ステップ 1：問題点の明言
• 計画作成チーム員と役割のリスト • 意思決定者の特定 • 問題点の簡潔な記述と調査する環境問題の概念モデル • 利用できる資源と関連する締切のまとめ
ステップ 2：決定の特定
• 主要な調査の論点と、問題点を解決するためにとり得る措置を組み合わせた決定ステートメント
ステップ 3：決定へのインプットの特定
• 測定する環境特性のリスト • 各措置レベルをどのように導出したかを示す情報源や方法のリスト • 将来の調査で使用可能な情報のリスト • 収集データに要求される検出限界値に適合する、サンプリング・分析法が存在する（又は開発できる）ことの確認
ステップ 4：調査範囲の決定
• サンプリングする母集団を定める特性の詳細な記述 • データ収集と決定について適切な、空間的境界の詳細な記述 • データ収集と決定について適切な期間 • データ収集に干渉する可能性がある、実際的な制約のリスト • 意思決定について適切なスケール
ステップ 5：決定ルールの作成
• 母集団パラメータと措置レベルを、意思決定のスケールと選択肢となる措置と組み合わせた、「A である場合には B を実施する」という理論的な決定ルール
ステップ 6：決定の誤りに関する許容限界の設定
• 基準状態、グレー領域、及び選択した着目パラメータ真値において決定の誤りを許容できる限界値
ステップ 7：データ収集のための計画の最適化
• 完全なサンプリング計画と、これを裏付ける主要な仮定の議論の文書化

付録 D. VSP ソフトウェア

データ品質目標（DQO）プロセスのステップ 7（3.7 節）においては、サンプリング計画作成の際、どこから・どのくらいのサンプルを採取するかについて決定することとなる。現在の DQO プロセスの手引書 [1]では、このためにビジュアルサンプルプラン（VSP）ソフトウェアを使用することが推奨されている。VSP はウェブサイト [38]から無償でダウンロード可能であり、Windows 上で動作する。本章では VSP について、主に VSP のユーザーズガイド [39]と文献 [40]の内容に基づき簡単にまとめる。

D.1　VSP ソフトウェアの概要

サンプリング計画の中で、明確にすべき重要な事項の 1 つは、どこから・どのような・どのくらい・どのようにサンプルを採取・分析するかである。VSP はこのうち、どこから・どのくらいのサンプルを採取するかについて計算するソフトウェアである。どのように・どのような種類のサンプルを採取・分析するかについては、ユーザーが DQO プロセスで定めることであり、VSP で計算するものではない。

VSP は環境及び建物・部屋の表面についてのサンプル採取計画に使用できる。VSP を使用する際、まず調査対象のマップを読み込むか、作成する。環境については、サイトマップや航空写真を読み込むことができる。建物や部屋については、CAD で作成した図や間取り図を読み込むことができる。その後、サンプルを採取する領域を選択し、サンプリングの目的に応じて推奨されるサンプル数を計算する。ここで、サンプリングの目的とは、データ収集により解決を試みる問題の種類のことであり、平均値と閾値との比較、平均値と参照平均値との比較、平均値の推定等、20 種類以上の中から選択できる。サンプル数の計算においては、サンプリング位置がマップ上に図示されるのに加え、座標が表示される。サンプリング位置の選び方として、単純なランダムサンプリングや体系的なグリッドサンプリングが利用でき、グリッドの種類としては三角形、正方形、又は長方形が選択できる。

D.2　DQO プロセスの結果の利用

VSP のユーザーは、サンプル数計算において必要となるインプットを、DQO プロセスを通して決定する必要がある。即ち、VSP を利用する際、DQO プロセスのステップ 1 からステップ 6 までを完了しておく必要がある。その後、VSP を利用することにより、DQO プロセスのステップ 7 を完了することができる。

多くのサンプリング計画におけるサンプル数に影響するインプットは以下の通りである。

- 帰無仮説の記述：VSP はデフォルトで「サイトが汚染されている」を帰無仮説としており、ユーザーはこれが誤りであることを示すためのデータを揃える必要がある。
- 第一種の過誤率（α）：正しい帰無仮説を棄却してしまう確率であり、DQO の手引書 [1]では誤った棄却率と呼ばれる（3.6.1 項参照）。調査単位が汚染されていると仮定するデフォルトの場合においては、αは汚染されているサイトを汚染されていないものとして開放する可能性である。

- 第二種の過誤率（β）：誤った帰無仮説を採択してしまう確率であり、DQO の手引書[1)]では誤った採択率と呼ばれる（3.6.1 項参照）。調査単位が汚染されていると仮定するデフォルトの場合においては、βは汚染されていないサイトを汚染されていると決定する可能性である。
- グレー領域幅（Δ）：措置レベルからもう一方のグレー領域の境界までの距離である。調査単位が汚染されていると仮定するデフォルトの場合においては、グレー領域は汚染されていないサイトが汚染されていると高い確率（通常 20%–95%）で決定する、真の平均値の範囲であると考えることができる。
- サンプリングの標準偏差の推定値：多数のサンプル間の標準偏差の推定値のことである。この推定値は以前の調査、同様なサイトや汚染物における以前の経験、又は専門家の意見から得られる可能性がある。

VSP を利用する前に DQO プロセスを実施していない場合は、適切な推定値をインプットすることにより、サンプル数を試算できる。サンプリングのコストもインプットできるので、実行可能か予算内となるサンプル数が得られるまで、新たなインプットを用いた試算ができる。このような VSP を用いた試算は、インプットを変化させることによるサンプル数（及びコスト）の変化を見るために役立つが、各インプット値を根拠付けるために、DQO プロセスの実施は必須である。

D.3　VSP におけるサンプル数の計算式

VSP で用いられるサンプル数計算式は、文献[40)]に記されており、サンプル数を計算した際には用いたパラメータ値と共にアウトプットの中で示される。VSP のサンプリング目的のうち、比較的選択する機会が多いと考えられる「母集団と閾値との比較」及び「2 つの母集団の比較」の場合について、用いるサンプル数の計算式を以下の各節に示す。

D.3.1　母集団と閾値との比較

平均値をある閾値と比較することは、一般的な問題の 1 つである。真の平均値がある基準値を超えるかどうかを決定するためのサンプル数nを計算するために選択する計算式は、データを 1 サンプル t 検定、ウィルコクソンの符号順位検定（Wilcoxon signed ranks test）、又は符号検定のうち、どれに使用するかにより変わる[40)]。この選択は、仮定するデータの分布により異なることとなる。具体的には、データについて正規分布を仮定するか、正規分布ではない対称分布を仮定するか、及び対称分布を仮定しないかにより、VSP は適切な計算式を選択する。各検定についてのサンプル数計算式を以下に示す。

D.3.1.1　1 サンプル t 検定

1 サンプル t 検定は、調査サイトにおける着目母集団の平均値がある値を超えるかを検定するために使用でき、データについて正規分布を仮定する場合に用いられる。その他の仮定は、データがサイトを代表しており、空間・時間的に相関がなく、$\bar{x} - ks_t$（kは任意定数）が平均$\mu - k\sigma$、分散$(\sigma^2/n)(1 + k^2/2)$の正規分布であることである[41)]。繰り返し分析数$r = 1$の場合に、VSP

で用いられる、検定について推奨される最小のサンプル数nの計算式は以下である。

$$n = \frac{s_t^2(Z_{1-\alpha} + Z_{1-\beta})^2}{\Delta^2} + 0.5Z_{1-\alpha}^2 \tag{D.1}$$

ここで、s_t^2は真の全母分散の推定値、$Z_{1-\alpha}$、$Z_{1-\beta}$はそれぞれ標準正規分布において、より低い値の割合が$1-\alpha$、$1-\beta$となる値である。なお、各サンプルについてrを 1 以上とする場合には、式(D.1)においてs_t^2を$s_s^2 + s_a^2/r$と置き換える。ここで、s_a^2は全分散の推定値のうち、分析・測定プロセスに関する成分、s_s^2はサンプリング等、他の要因による成分である。この場合、サンプリングの標準偏差、分析・測定の標準偏差、サンプルあたりの繰り返し分析数を変化させた、様々な条件下での試算ができるようになる。

D.3.1.2　ウィルコクソンの符号順位検定

ウィルコクソンの符号順位検定は、調査サイトにおける着目母集団の真の中央値や平均値がある値を超えるかを検定するために使用でき、VSP では、データについて対称分布を仮定する場合（正規分布である必要はない）に用いられる。その他の仮定は、データがサイトを代表しており、空間・時間的に相関がないことである。VSP で用いられる、繰り返し分析数$r = 1$の場合に、検定について必要となる最小のサンプル数nを計算する式は以下である。

$$n = 1.16\left\{\frac{s_t^2(Z_{1-\alpha} + Z_{1-\beta})^2}{\Delta^2} + 0.5Z_{1-\alpha}^2\right\} \tag{D.2}$$

また、rを 1 以上とする場合には、式(D.2)においてs_t^2を$s_s^2 + s_a^2/r$と置き換える。係数 1.16 が掛かることを除き、式(D.2)には式(D.1)と同一である。即ち、ウィルコクソンの符号順位検定について VSP により計算されるnは、常に 1 サンプル t 検定の場合より 1.16 倍大きくなる。ここで定数 1.16 は、2 つの対象母集団分布が平均値の違いを除いて同じである場合、αとβの誤り率を達成するために、ウィルコクソンの符号順位検定は t 検定の 1.16 倍以上のサンプルを必要としないことに由来する。

D.3.1.3　符号検定

符号検定は母集団の真の濃度中央値がある値を超えるかどうかを検定する。VSP では、データが対称な分布であると仮定しない場合に用いられる。その他の仮定は、データが母集団を代表しており、相関がなく、計算した符号検定統計量が近似的に正規分布であることである [42)]。符号検定について、繰り返し分析数$r = 1$の場合のサンプル数nの近似値を計算する式は、米国の多省庁間共通放射線サーベイ及びサイト調査マニュアル（MARSSIM）に記載されている [2)]。

$$n = 1.2\left\{\frac{(Z_{1-\alpha} + Z_{1-\beta})^2}{4(\mathrm{Sign}\,P - 0.50)^2}\right\} \tag{D.3}$$

ここで、

$$\mathrm{Sign}\,P = \Phi\left(\frac{\Delta}{s_t}\right) \tag{D.4}$$

である [42)]。関数Φは標準正規分布の累積分布関数を表し、$\Phi(\Delta/s_t)$は標準正規分布において値がΔ/s_t以下の割合である。$\Delta/s_t > 0$であり、標準正規分布の性質として平均値が 0 であることか

ら、Sign P値は 0.5 より大きくなる。また、Δ/s_t値とともにSign P値が大きくなることから、Δ値が大きくなるか、s_t値が小さくなるにつれて、nは減少することになる。この定性的な傾向は式(D.1)及び式(D.2)と同様である。係数の 1.2 は、統計的検定を望みのレベルで実施するために十分なデータ数を得る上で、データが損失するか、又は使用できない可能性を考慮したものであるとされている [2)]。なお、rを 1 以上とする場合には、式(D.4)においてs_tを$(s_s^2+s_a^2/r)^{1/2}$と置き換える。

D.3.2　2 つの母集団の比較

調査サイトにおける真の平均濃度が、参照領域の真の平均濃度を超えているかを決定するために、調査サイトにおいて収集すべきサンプル数n、及び参照領域において収集すべきサンプル数mを決定したい場合が想定される。VSP ではこの場合、推奨される最小サンプル数nとmを、主に$n=m$という条件で計算するための式を用いる。サンプル数を計算するために VSP が選択する式は、主にデータを 2 サンプル t 検定か、ウィルコクソンの順位和検定（Wilcoxon rank sum test）のどちらに用いるかによる。各検定についてのサンプル数計算式を以下に示す [40)]。

D.3.2.1　2 サンプル t 検定

2 サンプル t 検定は、サイトの真の濃度平均値が参照領域の真の濃度平均値を超えるかどうかを検定するために用いる。仮定する内容は、データが正規分布をしており、相関がなく、サイトと参照領域を代表しており、サイトのデータの分散が参照データの分散と等しいことである。加えて、$\bar{x}_{\mathrm{site}}-\bar{x}_{\mathrm{ref}}-2k\{(s_{\mathrm{site}}^2-s_{\mathrm{ref}}^2)\}^{1/2}$（$k$は任意定数）が、平均値$\mu_{\mathrm{site}}-\mu_{\mathrm{ref}}-2k\sigma$、分散$(\sigma^2/n)(2+k^2)$の正規分布となることを仮定する。検定について推奨されるサンプル数nとmの計算式は以下である。

$$n=m=\frac{2s_t^2(Z_{1-\alpha}+Z_{1-\beta})^2}{\Delta^2}+0.25Z_{1-\alpha}^2 \tag{D.5}$$

また、rを 1 以上とする場合には、式(D.5)においてs_t^2を$s_s^2+s_a^2/r$と置き換える。Guenther は、式(D.5)の計算値は 2 サンプル t 検定に必要となる真の最小サンプル数nとmの近似値であることを示しているが、この式により正確なnとmの値を計算できると確認している [40,41)]。

D.3.2.2　ウィルコクソンの順位和検定

ウィルコクソンの順位和検定は、サイトの真の濃度中央値が参照領域の真の濃度中央値より大きいかどうかを検定するために用いる。仮定する内容は、サイトと参照領域のデータがそれぞれ代表性を有しており、相関がなく、2 つの母集団分布が同じ形であり、同じ分散であることである。2 つの分布が対称分布や正規分布である必要はない。VSP で用いるサンプル数計算式は以下である [42,43)]。

$$n+m=1.2\left\{\frac{(Z_{1-\alpha}+Z_{1-\beta})^2}{3(P_{\mathrm{r}}-0.5)^2}\right\} \tag{D.6}$$

ここで、パラメータP_{r}はサイトからのランダムなデータが参照領域からのランダムなデータよりも大きい確率であり、

$$P_{\mathrm{r}} = \Phi\left(\frac{\Delta}{\sqrt{2}s_t}\right) \tag{D.7}$$

である。式(D.6)において、VSP では$n = m$とすることを推奨しており、係数の 1.2 は符号検定と同様の理由による。なお、rを 1 以上とする場合には、式(D.7)においてs_tを$(s_s^2 + s_a^2/r)^{1/2}$と置き換える。

D.4　VSP ソフトウェアのまとめ

VSP ソフトウェアは DQO プロセスを用いた計画作成の最終段階において、費用対効果の高いサンプリング･分析計画を作成する手助けとなるものである。VSP のインプットとして、DQO プロセスのステップ 1 からステップ 6 までのアウトプットが必要になるが、これらを用いて、必要最小限のサンプル数の計算と、サンプル採取位置の決定ができる。本報告書では VSP のサンプリング目的の代表的な例として、母集団を閾値と比較する場合と 2 つの母集団を比較する場合に必要となるサンプル数の計算式について示したが、VSP では他にも様々な使用目的について利用できるものであり、実際のサンプリング・分析計画作成に対しての幅広い応用が期待できる。

参考文献

1) United States Environmental Protection Agency: “Guidance on systematic planning using the data quality objectives process (EPA QA/G-4)”, EPA/240/B-06/001 (2006) 111p.
2) United States Department of Defense, Department of Energy, Environmental Protection Agency, and Nuclear Regulatory Commission: “Multi-agency radiation survey and site investigation manual (MARSSIM)”, NUREG-1575, Rev.1; EPA 402-R-97-016, Rev. 1; DOE/EH-0624, Rev. 1 (2000) 621p.
3) Co-ordination Network on Decommissioning of Nuclear Installations: “European radiation survey and site execution manual (EURSSEM)”, (2009) 694p.
4) Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development: “Radiological characterisation for decommissioning of nuclear installations”, NEA/RWM/WPDD(2013)2 (2013) 71p.
5) Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development: “Management of radioactive waste after a nuclear power plant accident”, NEA No. 7305 (2016) 225p.
6) United States Environmental Protection Agency: “Guidance for the data quality objectives process (EPA QA/G-4)”, EPA/600/R-96/055 (1994) 69p.
7) United States Environmental Protection Agency: “Guidance for the data quality objectives process (EPA QA/G-4)”, EPA/600/R-96/055 (2000) 92p.
8) 核燃料・バックエンド研究開発部門: “平成 27・28 年度バックエンド対策研究開発課題に関する業務実施報告書”, JAEA-Review 2019-019 (2020) 118p.
9) United States Environmental Protection Agency: “Data quality objectives for remedial response activities (development process)”, EPA/540/G-87/003 (1987) 151p.
10) United States Environmental Protection Agency: “Data quality objectives for remedial response activities (example scenario – RI/FS activities at a site with contaminated soils and ground water)”, EPA/540/G-87/004 (1987) 140p.
11) 志田 慎太郎: “米国スーパーファンド法に学ぶ土壌汚染対策”, 安全工学, vol. 43, no. 1 (2004) pp. 20-27.
12) 畠山 毅一郎: “米国スーパーファンド法の浄化実績と同法改正法案”, 廃棄物学会誌, vol. 5, no. 5 (1994) pp. 407-417.
13) United States Environmental Protection Agency: “EPA quality manual for environmental programs”, CIO 2105-P-01-0 (2000) 59p.
14) United States Environmental Protection Agency: “Overview of the EPA quality system for environmental data and technology”, EPA/240/R-02/003 (2002) 29p.
15) United States Environmental Protection Agency: “Policy and program requirements for the mandatory Agency-wide quality system”, EPA Order CIO 2105.0 (2000) 12p.
16) American National Standards Institute: “Specifications and guidelines for quality systems for environmental data collection and environmental technology programs”, ANSI/ASQC E4-1994 (1995).

17) United States Environmental Protection Agency: “Guidance for quality assurance project plans (EPA QA/G-5)”, EPA/240/R-02/009 (2002) 103p.
18) United States Environmental Protection Agency: “Data quality assessment: a reviewer’s guide (EPA QA/G-9R)”, EPA/240/B-06/002 (2006) 55p.
19) 宮川 公男: “基本統計学 [第 4 版]”, 有斐閣 (2015) 341p.
20) United States Environmental Protection Agency: “Guidance for preparing standard operating procedures (SOPs) (EPA QA/G-6)”, EPA/600/B-07/001 (2007) 55p.
21) United States Environmental Protection Agency: “Guidance on technical audits and related assessments for environmental data operations (EPA QA/G-7)”, EPA/600/R-99/080 (2000) 93p.
22) United States Environmental Protection Agency: “Guidance on environmental data verification and data validation (EPA QA/G-8)”, EPA/240/R-02/004 (2002) 88p.
23) United States Environmental Protection Agency: “Data quality assessment: statistical methods for practitioners (EPA QA/G-9S)”, EPA/240/B-06/003 (2006) 190p.
24) R. E. Gephart: “A short history of Hanford waste generation, storage, and release”, PNNL-13605, Rev. 4 (2003) 37p.
25) M. J. Hartman: “Hanford Site groundwater monitoring: setting, sources and methods”, PNNL-13080 (2000) 125p.
26) United States Environmental Protection Agency: Superfund Glossary, available from https://www.epa.gov/superfund/superfund-glossary (accessed on 2022-04-20).
27) E. C. Thornton and J. W. Lindberg: “Data quality objectives summary report – designing a groundwater monitoring network for the 200-BP-5 and 200-PO-1 operable units”, PNNL-14049 (2002) 37p.
28) 杤山 修: “放射性廃棄物処分の原則と基礎”, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2016) 368p.
29) R. M. Smith: “216-B-5 reverse well characterization study”, RHO-ST-37 (1980) 124p.
30) J. P. McDonald et al.: “Water-level monitoring plan for the Hanford Groundwater Monitoring Project”, PNNL-13021 (1999) 99p.
31) R. M. Jochen: “Data quality objective summary report for the 105 K east ion exchange column monolith”, KBC-31475, Rev. 1 (2007) 43p.
32) S. M. Short et al.: “Assessment of the grouted IXC monolith in support of K east basin hazard characterization”, PNNL-15401, Rev. 1 (2007) 82p.
33) T. A. Nelson and B. C. Covert: “The Environmental Restoration Disposal Facility: Hanford’s onsite solution for cleanup wastes”, WM2010 Conference, Phoenix, Arizona, United States of America, March 7-11 (2010) pp. 1-11.
34) R. A. Nelson and E. J. Ziemianski: “Waste Isolation Pilot Plant status and plans”, WM2012 Conference, Phoenix, Arizona, United States of America, February 26-March 1 (2012) pp. 1-13.
35) 原子力環境整備促進・資金管理センター: “平成 24 年度 放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 報告書 (第 1 分冊) 基礎的研究テーマの整理”, (2013)

385p.

36) A. V. Arakali et al.: “Initial data quality objectives for WTP feed acceptance criteria”, 24590-WTP-RTP-MGT-11-014, Rev. 0 (2011) 65p.

37) A. V. Arakali et al.: “Data quality objectives for WTP feed acceptance criteria”, WM2012 Conference, Phoenix, Arizona, United States of America, February 26-March 1 (2012) pp. 1-9.

38) Pacific Northwest National Laboratory: Visual Sample Plan, available from https://www.pnnl.gov/projects/visual-sample-plan (accessed on 2022-04-20).

39) B. D. Matzke et al.: “Visual Sample Plan version 7.0 user’s guide”, PNNL-23211 (2014) 266p.

40) R. O. Gilbert et al.: “Visual Sample Plan (VSP) models and code verification”, PNNL-13450 (2001) 50p.

41) W. C. Guenther: “Sample size formulas for normal theory *T* tests”, Am. Stat. vol. 35, no. 4 (1981) pp. 243-244.

42) G. E. Noether: “Sample size determination for some common nonparametric tests”, J. Am. Stat. Assoc. vol. 82, no. 398 (1987) pp. 645-647.

43) C. V. Gogolak et al: “A nonparametric statistical methodology for the design and analysis of final status decommissioning surveys”, NUREG-1505, Rev. 1 (1998) 226p.