

地層処分システム セーフティケースの品質保証

- 規制の見地 -

2009年1月28日

放射性廃棄物処分の品質保証
に関するワークショップ

増田純男

課題設定の背景と根拠

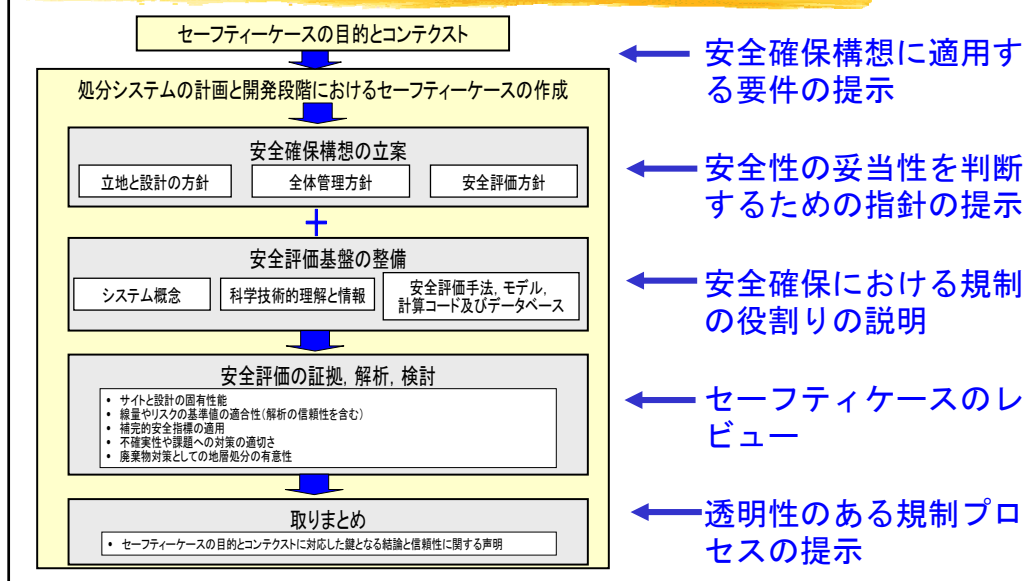
- 我が国の地層処分計画の重要な時期
- 質の高いセーフティケースは地層処分計画推進の各段階における様々な意思決定の前提である。
 - 実施主体は地層処分計画の安全性への確信をステークホルダーに示し、説明することが求められている。
 - 規制機関は規制によって如何に安全が確保されるかについて、ステークホルダーから求められることになる。
- セーフティケースの品質保証は、意思決定を支持し、信頼を構築する上で重大な鍵となる。

セーフティケース (NEA, 2004; IAEA&NEA, 2006)

- 地層処分システムの安全性を示すためのすべての論述 (arguments) の集合体
 - 対象とする全時間・空間スケールに対して文字通りの実証は不可能
 - 性能評価によるシステムの安全性能の定量化を核にしたセーフティケースの提示
 - 性能評価に加え、多様な証拠 (multiple lines of evidence) による信頼性の向上
- 地層処分計画の各段階での作成/更新による継続的な信頼性向上 (未解決の課題と次段階における対策の明示)
 - 情報 (例えば地質環境) の質と量の段階的な充実
 - 品質保証の重要性

3

セーフティケースの概要と規制の役割



セーフティケースの開発

●処分場閉鎖前安全性

- 処分場の建設, 操業, 閉鎖~事業廃止までの期間
- 線源は物理的・化学的に安定
- 通常の原子力施設と同様に扱うことが可能

●処分場閉鎖後安全性

- 人間の関与が終了した後の時期
- 地質学的要素と工学的要素を複合して構成されるシステム
- 数万年以上の長い時間スケール
- 各種のデータやモデルの不確実性の存在
- 地層処分に特有なものとして考慮しなければならない

5

安全機能の要求品質 (1/2)

●工学的機能

■オーバーパックにより地下水との接触を抑制する、放射性核種をガラスに固め、溶け出し難くする、ベントナイトに放射性核種を吸着させる等、人工バリアシステムに期待する機能を工学的に折込み、個々のコンポーネントを的確に設計、製造、施工すること。

◆人工バリアや処分施設に関する「技術」の品質がポイントであり、原子炉等を含め一般的な工学システムと同様な品質管理が可能。

安全機能の要求品質 (2/2)

● 受動的機能

■ ガラス固化体が岩盤中に安定的に隔離される、地下水によって溶かされ運ばれる放射性核種が岩石に収着され、地下水に希釈される等、地質環境（岩石と地下水）が本来的に有する天然のバリアとなり得る機能であり、これらの機能を的確に評価し知識とすること。

◆ 受動的機能に関する科学的な「知識」の品質が地層処分システムの性能の鍵となるという点が、「地層処分に特有なものとして考慮しなければならない」所以である。

諸外国における性能評価に対するQA適用例

- 米国
 - NRC・ユッカマウンテン・レビュープラン
 - DOE・ユッカマウンテン許認可申請書
 - DOE・WIPP品質保証計画書
- スウェーデン
 - SKI・原子力施設の安全性に関する規則
 - SKB・SR-Canプロジェクト
- フィンランド
 - POSIVA・Safety Case 2008

NRC・レビュープラン：性能評価への要求（抜粋）

- Review Method 1 Model Integration
 - Examine **assumptions, technical bases, data, and models** used by the U.S. Department of Energy in the abstraction of **flow paths in the saturated zone** for consistency with other related U.S. Department of Energy abstractions. **Evaluate whether the descriptions and technical bases provide transparent and traceable support for the abstraction of flow paths in the saturated zone.**
 - Review Method 2 Data and Model Justification
 - Evaluate whether sufficient **justification** has been provided for **climatological and hydrological values** used in the license application, and whether the description of **how the data are used, interpreted, and appropriately synthesized into the parameters** is sufficiently **transparent and traceable.**
 - Review Method 3 Risk Significance Categorization of Structures, Systems, and Components Important to Safety
 - **Verify** the documentation, analysis, and criteria used for risk significance categorization of structures, systems, and components important to safety is **transparent and traceable with a well defined technical basis.**
- Model Abstraction**
- Mechanical Disruption of Engineered Barriers
 - Quantity and Chemistry of Water Contacting Engineered Barriers and Waste Forms
 - Radionuclide Release Rates and Solubility Limits
 - Climate and Infiltration
 - Flow Paths in the Unsaturated Zone
 - Radionuclide Transport in the Unsaturated Zone
 - Flow Paths in the Saturated Zone
 - Radionuclide Transport in the Saturated Zone
 - Volcanic Disruption of Waste Packages
 - Airborne Transport of Radionuclides
 - Concentration of Radionuclides in Ground Water
 - Concentration of Radionuclides in Ground Water
 - Redistribution of Radionuclides in Soil
 - Biosphere Characteristics
- NUREG-1804 July 2003 9

DOE・ユッカマウンテン許認可申請書（抜粋） (1/3)

Management systems will ensure that **sufficient data exist to confirm TSPA bases** are satisfied and that the Performance Confirmation Program provides appropriate confirmatory bases as part of making the determination to permanently close the repository.

5.1 QUALITY ASSURANCE

[NUREG-1804, Section 2.5.1.3]

The Office of Civilian Radioactive Waste Management (OCRWM) **Quality Assurance Requirements and Description (QARD)** describes the requirements of the Quality Assurance Program that apply to quality-related activities at the Yucca Mountain repository. The QARD is prepared in accordance with the requirements of **10 CFR 63.21(c)(20)** and 10 CFR 63, Subpart G, addresses the acceptance criteria contained

10 CFR 63.21(c)(20) A description of the quality assurance program to be applied to the structures, systems, and components important to safety and to **the engineered and natural barriers important to waste isolation.** The description of the quality assurance program must include a discussion of how the applicable requirements of § **63.142** will be satisfied.

63.142 Quality assurance criteria. DOE is required by § 63.21(c)(20) to include in its safety analysis report a description of the quality assurance program to be applied to all structures, systems, and components important to safety, to design and characterization of barriers important to waste isolation, and to related activities. These **activities include: site characterization; acquisition, control, and analyses of samples and data; tests and experiments; scientific studies; facility and equipment design and construction; facility operation; performance confirmation; permanent closure; and decontamination and dismantling of surface facilities.**

(DOE,YMR_LA_SAR, 2008) 10

DOE・ユッカマウンテン許認可申請書（抜粋） (2/3)

SAR (Safety Assessment Report): "Data and Model Justification" の記述例

2.3.1.3.3 Infiltration Modeling and Uncertainty

[NUREG-1804, Section 2.2.1.3.5.3: AC 1(3), (5) to (7), AC 2(2) to (6), AC 3(1), (3), (4), AC 4)]
Development of the MASSIF model and uncertainties associated with both the MASSIF model and the input parameters for the model are addressed below.

2.3.1.3.3.1 MASSIF Model

The MASSIF model estimates net infiltration at the Yucca Mountain site based on a daily water balance calculation of the near-surface soils. The water balance includes net precipitation as input, water storage and movement within the soil (including evapotranspiration), and water moving either from soil into the underlying bedrock or directly into bedrock where it is exposed at the surface.

The model domain is composed of a number of cells with equal surface area that extend from the surface to the contact with the underlying bedrock. The description of each cell includes the cell depth as defined by the soil layer depth; soil type and associated properties; cell elevation, azimuth, and slope; fraction of the surface covered by the vegetation canopy; and vegetation related characteristics. Each cell is composed of one to three soil layers, depending on the soil depth (Figure 2.3.1-22). However, some grid cells have no soil and therefore have no soil layer in the model (SNL 2008a, Table 6.5.7.6-2[a]).

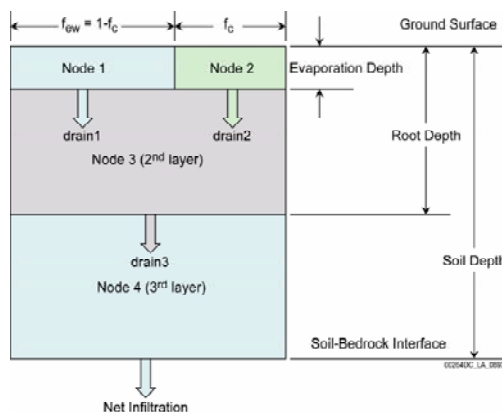


Figure 2.3.1-22. Schematic Showing the Vertical Soil Layers and Computational Nodes Present in a Single Model

(DOE, YMR_LA_SAR, 2008) 11

DOE・ユッカマウンテン許認可申請書（抜粋） (3/3)

SAR: "Data and Model Justification" の記述例（続き）

2.3.1 Climate and Infiltration

[NUREG-1804, Section 2.2.1.3.5.3: AC 1, AC 2, AC 3, AC 4, AC 5]

(前略)

2.3.1.2.1.2.1 Relations between Present and Past Climate

The present-day earth climate system is a three-component system (Figure 2.3.1-5) consisting of two active components—the tropical (Hadley) cell and polar cell air masses—and a more passive mixing zone between them (the westerlies or Ferrel cell) (BSC 2004a, Section 6.2).

(中略)

2.3.1.2.1.2.3 Earth-Orbital Parameters and the Timing of Past and Future Climate Change

The precession methodology was used to forecast the timing of climate change over the next 100,000 years (Figure 2.3.1-12). The timing of possible climate change toward and away from the next glacial period is the same as for the cycle beginning about 400,000 years ago because of a repeat of the earth's long eccentricity cycle (Figures 2.3.1-10 and 2.3.1-11). The duration of the period between the initiation (I) of climate change toward the glacial climate at 399,000 years ago and the climate change away (T) from the glacial climate is 44,000 years. In Figure 2.3.1-12, the time between a change toward the glacial climate (I) at 1,000 years ago to the change away (T) at 44,000 years in the future is 45,000 years. As shown in Figure 2.3.1-11, the timing for the change toward and away is much longer for the remaining three glacial periods in the 400,000-year cycle, with durations of 58,000, 80,500, and 83,000 years, respectively.

(後略)

(DOE, YMR_LA_SAR, 2008)

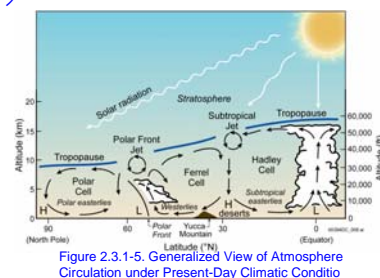


Figure 2.3.1-5. Generalized View of Atmosphere Circulation under Present-Day Climatic Conditions

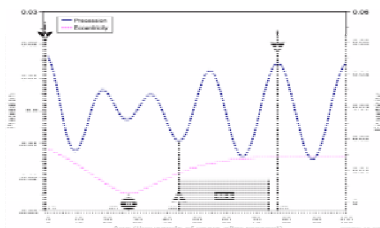


Figure 2.3.1-12. Forecast of Timing of Future Climate Change during the Next 100,000 Years

12

DOE・WIPPのQA基準書

- 根拠 : NQA-1,2a,3 (ASME, 1989) 及び40CFR194 (EPA, 1996)
- 管理プロセス :
 - 岩石サンプリングによる試験や保管
 - 性能評価の解析作業
 - 研究開発業務
- 管理対象
 - 解析
 - サンプル管理
 - ソフトウェア
 - 実験計画
 - 研究ノート、等
- QAの原則 : “T2R3”概念*:
 - ① Traceable (跡をたどれる)
 - ② Transparent (透明性がある)
 - ③ Reviews (レビューされている)
 - ④ Reproducible (再現性がある)
 - ⑤ Retrievable (直ぐに取り出せる)

(* Piking, 2000)

13

SKI・原子力施設の安全性に関する規則 (抜粋)

• Chapter 4.1 § Safety analyses

(前略)

A safety analysis should generally be of **high quality with respect to documentation, references, review procedures** etc. The objective of the analysis should be clearly specified as well as the uncertainties and limitations of the analysis. Furthermore, **the analysis should have a good traceability and well-justified assumptions** and data which are relevant for the facility. The report of results should contain an **explicit conclusion regarding the safety** of the facility within the conditions and limitations of the analysis.

(後略)

(SKIFS 2004:1, November 18, 2004)

14

SKB・SR-Canプロジェクト

- *Quality assurance of SR-Can*
 - Now that SKB is approaching the stage of license applications for new installations, the importance of quality assurance and traceable documentation increases. Future safety reports need to be **traceable and transparent**, and it should be possible to **reproduce analyses** that are important for long-term safety and radiation protection.

(SKB Technical Report TR-06-09)

15

POSIVA・セーフティケース2008（抜粋）

5 MANAGEMENT OF QUALITY

- **5.1 Goals and principles**

The purpose of Posiva's management system is to ensure, in a documented and traceable way, that Posiva's products - whether in the form of abstract knowledge and information published reports or physical objects - fulfil the requirements set for them. The general quality objectives, requirements and instructions defined in **Posiva's management system will also form the foundation for the quality management of safety case activities** carried out in the future. However, special attention will be paid to the management of the processes that are applied to produce the safety case and its basis. **The purpose of this enhanced process control is to offer full traceability and transparency of the data, assumptions, modeling and calculations.**

(POSIVA 2008-05, July 2008)

16

性能評価の品質における特に重要なキーワード

“Transparency and Traceability”

Transparency- a safety case should be presented in ways that are both **clear and understandable to the intended audience**; the objective is to inform the audience's organisational or personal decisions regarding safety;

Traceability- with respect to the step by step decision making process and for more **technical audiences**, it must be possible to **trace all key assumptions, data and their basis**, either through the main documents or supporting records;

(OECE/NEA 2004)

17

Traceability : “追跡性”

定義 : “an unambiguous and complete record of the decisions and assumptions made, and of the models and data used in arriving at a given set of results”(NEA, 1998).

「なされた決定と仮定、および結果に到達する際に使われるモデルとデータの明白で完全な記録」

“Traceability exists when there is an unbroken chain linking the result of an assessment (e.g., final dose calculation) with models, assumptions, expert opinions, and data used in the formulation of the result.”

(Standards Laboratories,1994)

「評価の結果（例えば最終的な線量計算）と使われたモデル、仮定、専門家の意見とデータを関連づけている完全なチェーンがあるときは、追跡性があることになる。」

追跡性の要件 : (NEA,1998)

- ① 何時、誰によっていろいろな決定と仮定がなされたかについての情報
- ② 仮定の根拠
- ③ 如何にしてこれらの決定と仮定が実行されたか
- ④ コードとデータセットはどのバージョンが使われたか

18

Transparency : “透明性”

定義 :

“... written in such a way that its readers can gain a clear picture, to their satisfaction, of what has been done, what the results are, and why the results are as they are ...” (NEA, 1998)

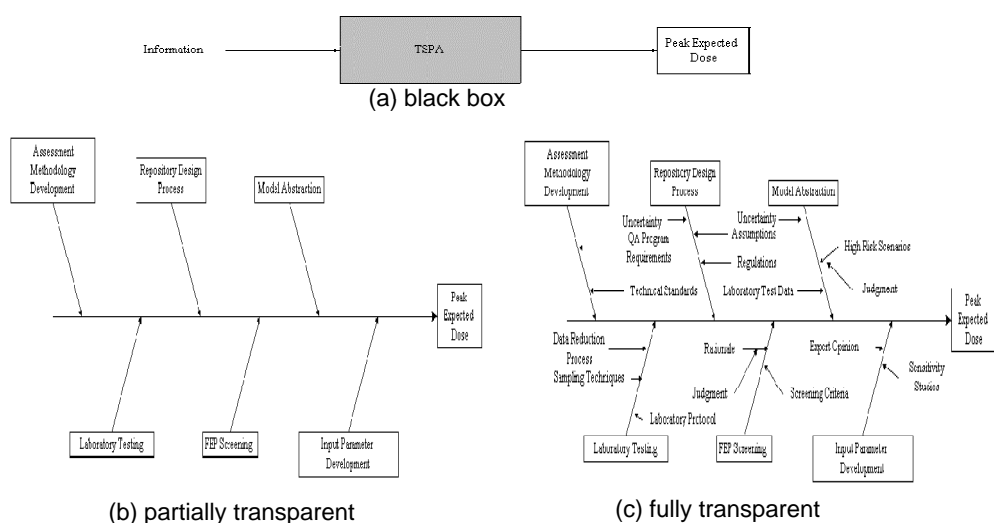
「(性能評価報告書の) 読者が、それぞれの欲求に応じて、何がなされたか、結果が何であるか、またなぜ結果がそのようになったのかについて理解し、鮮明な像を得ることができるように書かれている属性」

“Transparency exists when there are systems (e.g. procedures, protocols, and conventions) in place that ensure the reliability of data, processes, and methods and provide the reviewer or user with clear evidence of reliability.” (King, 1992)

「データ、プロセスと方法の信頼性を保証すると共にユーザーに信頼性のはっきりした証拠を提供するシステム(例えば、手順、手続き、慣例)がある時に、透明性が存在する。」

19

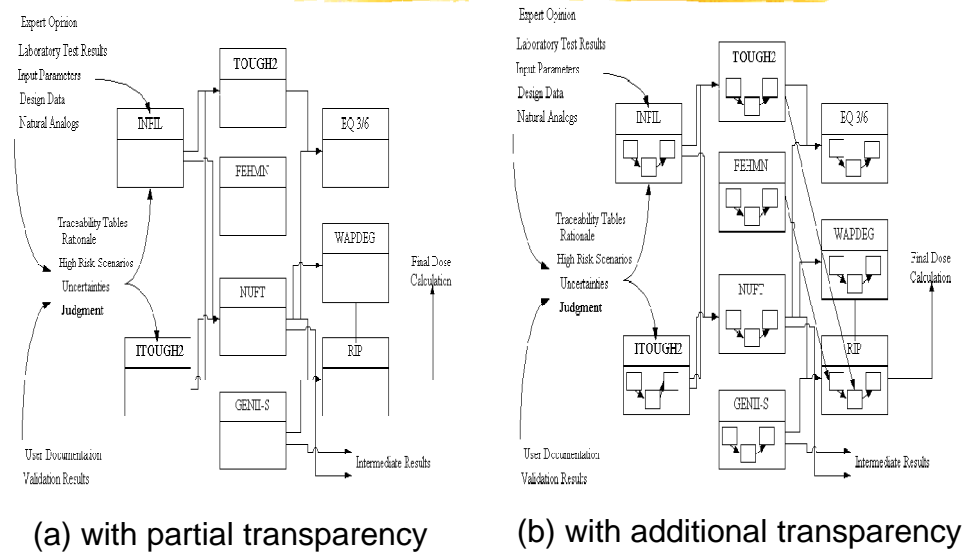
性能評価の透明性の程度の例



(Mohanty, et al., 2001)

20

性能評価モデルのモジュール性の例



(Mohanty, et al., 2001)

21

性能評価の品質管理項目 (1/3)

1. シナリオ、モデルの検証 (Validation)

- ✓ シナリオ、モデルの仮定に用いるデータの適用限界
- ✓ シナリオに沿った解析に用いるモデルの検証と解析コードの検証
- ✓ 専門家の判断に基づくデータやモデルについては、判断の透明性と不偏性を示すためにその導出過程を明示 (POSIVA Safety Case 2008-5)

管理項目	対象過程	品質要件
シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> • FEPの特定とスクリーニング • シナリオ分類 (例えば①基本②変動③仮想) 	FEPリストの妥当性、選別の根拠を示す知見の存在、シナリオ分類の客観的妥当性
モデル	<ul style="list-style-type: none"> 重要な現象の抽象化と概念モデル構築 • 数学モデル化 	モデルの正当性を裏付ける客観的なデータの存在と不確実性の特徴付け

性能評価の品質管理項目 (2/3)

2. データの確証

- ✓ フィールド試験・実験
- ✓ ナチュラルアナログ
- ✓ 他の学術領域で取得されたデータの意味付け
- ✓ 専門家の判断（表出化された暗黙知も含む）

✓ 処分システムデータ

構成要素	対象過程	品質要件
廃棄体	固化体特性評価試験	浸出（溶解）能力の説明とそれらの不確実性の特徴の説明
人工バリア 処分施設	設計・製造・施工	人工バリア設計に折込んだ知識と施工後の試験により得られるデータと併せてEBS性能の理解と説明
地質環境	サイト特性調査	物理探査や原位置試験によるデータを地質環境に関する知識として統合
	地質学的知見の収集	地層処分の観点からの適切な意味付け

23

性能評価の品質管理項目 (3/3)

3. 性能評価結果の解釈

重要な仮定、入力パラメータと性能評価で使われるモデルを特定する感度解析や他の適用できる分析に遡って追跡可能とするための知識

4. 性能評価コードの透明性を保証する属性

- ✓ コード設計
- ✓ データフロー
- ✓ 解析コードの検証
- ✓ 支持資料

24

品質管理手法の適用例 (1/2)

■ 試験研究の実施プロセス

- I. 文書化された試験研究計画、試験研究手順と科学ノート*の遵守
- II. 独立した専門家の試験・調査の追跡により相当する結果が得られることの定期的な確認
- III. データの取得・分析に用いられた技術、器材、試験方法の適切性の検証と不正操作の防止と適切な実行の管理
- IV. データの収集と分析手順の管理： サンプルの複製・スパイク・分割、管理チャート、ブランク試験、試薬チェック、代替分析法等によるチェック
- V. 試験媒体は使用の都度、特性調査・管理
- VI. 科学ノートと関連文書をQA記録として保持

* 記載内容：

1. 目的と実行ジョブ
2. 試験方法
3. サンプルの識別
4. 試験・計測装置
5. 実施内容と結果、実施者、実施日、サイン
6. 使用方法の変更の記述
7. 試験計画、手順及びパラメータの潜在的な不確実性と誤差の源の測定・管理

(DOE/CBFO-94-1012 ; CBFO QA program requirements から抜粋)

品質管理手法の適用例 (2/2)

■ データの確証

データの要求品質が得られていることを保証するための系統的プロセス

- A. 確証方法の計画と文書化
データの有効性決定に用いられる受容基準
- B. 収集された全適用データの確証
 1. 技術的妥当性、使用目的への適合性及びQA記録の適切性評価 のための関連文書レビュー
 2. レビュー結果の文書化
 3. 収集活動から独立した評価者
- C. 別の専門家による独立した再現性の確証
- D. 科学・技術分野で確立した事実と看做されるデータは確証不要

(DOE/CBFO-94-1012 ; CBFO QA program requirements から抜粋)

JAEAによる知識マネジメントシステム（KMS） の開発

- JAEA-KMSの基本構想と概念具体化の状況

- 基本概念（JAEA H17レポート）

- セーフティケース概念を視軸とした知識の構造化
- 知識マネジメントの導入による関連知識の創出、維持、更新、伝承

- 知識工学やIT分野の最先端技術を用いたシステム開発

- プロトタイプの一部試作によって実証

- ISIS（Information synthesis and interpretation system）
- 性能評価All-in-oneレポート
- “Coolrep”：KMS利用のプロトコル

- JAEA KMS国際レビューワークショップ（2008年11月11-14日）

- 世界の最先端をいく研究開発であると高く評価、今後に大きな「期待感」が寄せられるとともに、課題の明確化や改良に関する示唆

（JAEA KMS国際WS資料（2008年11月）より作成）

27

JAEA-KMSの性能評価QAへの活用可能性

- ISIS

- ✓ セーフティケース作成に必要なデータの充分性の保証
- ✓ データ・情報の品質管理
- ✓ サイト調査のT&T確保

- 性能評価All-in-oneレポート

- ✓ 解析ツールの品質管理（仮定、モデル、データの設定とその根拠のリンク）
- ✓ 解析プロセスの品質管理
- ✓ 性能評価解析のT&T確保

- 知識ベース

- ✓ 解析ツール、データベース、ノウハウ、事例の利用
- ✓ 文書（報告書、論文、etc）の参照

- Coolrep

- ✓ セーフティケース作成に関わる地層処分技術全体像の提示
- ✓ 電子化された生きた文書による関連技術への自由なアクセス

28

今後の方向性

- 外国の規制におけるQA要件の我が国への適用性検討
 - ボランティア・アプローチの配慮
 - 処分概念における工学的/受動的機能の分担比率の差異
 - 倫理的・文化的特徴の考慮
- 類似事例におけるQAの事例調査
 - ソフトウェア開発利用事業
 - 海洋資源探査事業等
 - 気象予報、宇宙開発等
 - 資源探査等
- JAEA/KMSは実施者、規制者、ステークホルダーの共通的な知識基盤となるのが合理的であるが、その前提はKMS自体の品質であり、システム開発段階から適用するQCマニュアルの確立・運用が鍵
 - データ：取得過程の品質管理と学術データの意味づけ根拠の客観性レビュー
 - 情報：データの抽出、解釈、合成、判断過程の履歴
 - 知見：情報の抽出、解釈、合成、判断過程の履歴
 - その他

参考資料

1. 原環機構,原子力発電環境整備機構(2002c): 処分場の概要, 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料-2.
2. OECD.Nuclear Energy Agency (NEA):" Lessons Learnt From Phase-1 activities (1995-1996)". NEA/IPAG/DOC(97)1. Paris, France: Committee on Radioactive Waste Management, 1998..
3. S.Y Pickering, S.A. Orrells., "Product Traceability and Quality as Applied to The United States Transuranic and HLW Repository Programs",SAND 99-2608C,2000
4. Sitakanta Mohanty, Budhi Sagar, Michael P. Miklas, Jr.". TRANSPARENCY AND TRACEABILITY IN PERFORMANCE ASSESSMENT OF HIGH-LEVEL NUCLEAR WASTE REPOSITORIES" Waste Management 2001 Conference, February 25-March 1, 2001, Tucson, AZ
5. U.S. Nuclear Regulatory Commission,"Yucca Mountain Review Plan", NUREG-1804,2003
6. 10 CFR.PART 63:"DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN A GEOLOGIC REPOSITORY AT YUCCA MOUNTAIN, NEVADA "
7. U.S. Department of Energy:"Yucca Mountain Repository License Application, SAFETY ANALYSIS REPORT",DOE/RW-0573, June 2008
8. Svensk Kärnbränslehantering AB," Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation,Main Report of the SR-Can project", TR-06-09,2006
9. Swedish Nuclear Power Inspectorate:" The Swedish Nuclear Power Inspectorate's Regulations concerning Safety in Nuclear Facilities",
10. National Conference of Standards Laboratories.:1994. American National Standard for Calibration –Calibration Laboratories and Measuring and Test Equipment B General Requirements, American National Standards Institute,
11. King, B. ."Data Quality in the 1990s: Targets and Approaches. Analytical Proceedings, Volume 29". May 1992.
12. POSIVA Oy: "SAFETY CASE PLAN 2008", POSIVA 2008-05, 2008
13. U.S. Department of Energy _OCRWM:"Quality Assurance Requirements and Description",DOE/RW-0333P, 2006
14. U.S. Department of Energy Carlsbad Field Office, "QUALITY ASSURANCE PROGRAM DOCUMENT", DOE/CBFO-94-1012, Revision9, 2007
15. 核燃料サイクル開発機構(2005): 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成17年取りまとめ-, JNC, TN1400 2005-020.