



JAEA-Research

2006-078



JP0650730

地層処分技術に関する知識管理システムの 基本的概念

Fundamental Concept of Knowledge Management System
of Geological Disposal Technology

梅木 博之 大澤 英昭 内藤 守正 中野 勝志
牧野 仁史

Hiroyuki UMEKI, Hideaki OSAWA, Morimasa NAITO, Katsushi NAKANO
and Hitoshi MAKINO

地層処分研究開発部門
知識化グループ

Knowledge Management Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

JAEA-Research

December 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

地層処分技術に関する知識管理システムの基本的概念

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 研究開発統括ユニット
知識化グループ

梅木 博之, 大澤 英昭, 内藤 守正, 中野 勝志, 牧野 仁史

(2006年10月17日受理)

地層処分技術の特徴は、社会がこれまでに経験のない数万年以上といった極めて長期間にわたり放射性廃棄物を安全に人間と環境から隔離することを目的としていることである。このため、地層処分計画は、段階的な意思決定に基づき、社会的な合意を得つつ進められ、一般に数十年から百年といった長い事業期間を要する。こうした意思決定の材料の一つとして、長期間にわたる地層処分の安全性を示すための技術的論拠（セーフティケースと呼ばれる）が用意される。

処分事業の実施主体や安全規制機関など、地層処分計画に関わるステークホルダーは、セーフティケースの作成や様々な意思決定において、多様な技術的情報やデータ、知見を用いる。地層処分の長期的な安全性に対する信頼を長期間にわたる事業全体を通じて高めていくためには、これらを知識基盤として体系化し、常に最新の科学技術的知見を取り込みながら、次世代へ継承できるようにしておくことが必要である。

地層処分技術に関する研究開発は、日本においても四半世紀を経て、これまで段階的に行ってきた総合的な技術報告書の内容にも示されるように、時間の経過に伴いこのような知識は多様化するとともに、その量は激増している。このため、日本原子力研究開発機構では、セーフティケースに関する一般概念に基づいてシステムの安全評価などにおいて必要となる多様かつ大量な情報を知識として構造化し、ステークホルダーの要望に応じて提供するとともに、新たな知識の創造や次世代への知識継承などの機能を備える知識管理システムと、その主要な要素である知識ベースの開発を進めている。

本報告書では、昨年公表した研究開発報告書「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－地層処分技術の知識化と管理－」に示したナレッジ・ヴィジョンに基づき、地層処分技術に関する知識管理システムおよび知識ベースを具体的に設計・開発していくための基本的概念を明らかにし、当面、平成21年度までの計画について概観する。

Fundamental Concept of Knowledge Management System
for Geological Disposal Technology

Hiroyuki UMEKI, Hideaki OSAWA, Morimasa NAITO, Katsushi NAKANO,
and Hitoshi MAKINO

Knowledge Management Group
Research and Development Integration Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Uchisaiwaicho, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received October 17, 2006)

Geological disposal technology is a multi-disciplinary field and needs a wide range of relevant information to develop its safety case. Knowledge is defined here in the very widest sense to include all of the information, both explicit and tacit, which underpins a repository project. Knowledge management covers all aspects of the development, integration, quality assurance, communication and maintenance/archiving of such knowledge – including data, information, understanding and experience. In order to ensure that required knowledge is accessible to all stakeholders, including the implementer, the regulator, political decision-makers and general public and that gaps can be identified and prioritised, it is important that knowledge base are structured in a clear and logical manner.

In this report, the fundamental concept of the knowledge management system (KMS) for the Japanese high-level radioactive waste (HLW) disposal programme is discussed by illustrating characteristics of an ideal formal KMS and associated knowledge base which could be supported by sophisticated information technology tools, based on the knowledge vision described in the research report “H17: Development and management of the technical knowledge base for the geological disposal of HLW - Knowledge Management Report -”. In addition, a mid-term plan up to the fiscal year 2009 is discussed for development and installation of the KMS.

Keywords: Geological Disposal Technology, Stakeholders, Knowledge Management System, Knowledge Base, Safety Case

目次

1. はじめに	1
2. 地層処分技術の知識管理	3
2. 1 ナレッジ・ヴィジョンと知識の構造化	3
2. 2 知識管理の実際的な課題と対応	9
3. 知識管理システム	14
4. 知識ベース	16
4. 1 知識ベースの構成要素	16
4. 2 知識項目間の関連性の検討に基づく知識構造の変更	22
4. 3 知識ベース開発のアプローチ	32
5. 知識創造	34
6. ユーザーとのコミュニケーション	36
7. ナレッジ・オフィス	38
8. 国外の知識ベースとのインターフェース	39
9. 平成 21 年度までの実施概要	40
10.まとめと結論	41
謝辞	41
参考文献	42
付録：用語解説	44

Contents

1. Introduction	1
2. Knowledge management of disposal technology.....	3
2.1 Knowledge vision and structuring of knowledge	3
2.2 Problem and challenge for knowledge management	9
3. Knowledge management system	14
4. Knowledge base	16
4.1 Components of knowledge base	16
4.2 Discussion of the interrelations between individual knowledge and improvement of knowledge structure	22
4.3 Approach for development of the knowledge base	32
5. Knowledge creation	34
6. Communication system with users	36
7. Knowledge office.....	38
8. Interface with world knowledge base through Web	39
9. Overview of R&D plan up to the fiscal year 2009	40
10. Summary and conclusions	41
Acknowledgement	41
References	42
Appendix: glossary	44

1. はじめに

地層処分事業の実施主体や安全規制機関など、地層処分計画に関するステークホルダーは、セーフティケース¹⁾の構築や地層処分計画の様々な時期における意思決定において多様な技術的情報やデータ、知見を用いる。地層処分の長期的な安全確保と長期間にわたる事業全体に対する信頼を支えるうえでは、これらを知識基盤として体系化し、常に最新の科学技術の知見を取り込みながら、次世代へ継承できるようにしておくことが必要である。

このため、核燃料サイクル開発機構（現、独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構））では、地層処分の安全確保の考え方の構築、また、システムの安全評価といった作業を実施するうえで必要となる多様かつ大量な情報を知識として構造化し、ユーザーであるステークホルダーの要望に応じて提供するとともに、新たな知識の創造や次世代への継承などを行うため、研究開発報告書「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年度取りまとめ－地層処分技術の知識化と管理－」²⁾（以下、H17 取りまとめ）において、地層処分技術を知識管理の枠組みで捉えるアプローチを提案した²⁾。

このような取り組みの重要性は、2005年10月に公表された原子力政策大綱³⁾において、「研究開発成果については、海外の知見も取り入れつつ、地層処分に係る最新の知識基盤として整備・維持され、NUMO の最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることが重要である」と示されている。

また、原子力安全委員会による「原子力の重点安全研究計画」⁴⁾では、原子力機構が中核的機関となって安全研究を進め、深地層の研究施設計画等における地質環境に関する様々なデータをもとに、処分システムの設計や安全性と関連づけた評価の考え方や手法を整備することが期待されている。このためには、透明性、追跡性、客観性、中立性の確保に留意しながら、研究開発の成果を知識基盤として整備することが重要であるとされている。

これらを受け、「独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）（平成17年10月1日～平成22年3月31日）」⁵⁾（以下、中期計画）では、処分事業と安全規制の両面を支える地層処分技術の知識基盤を整備していくため、「地層処分研究開発」と「深地層の科学的研究」の二つの領域において他の研究開発機関と連携して研究開発を進め、地層処分の安全確保の考え方や地質環境条件の調査技術や評価手法、処分場の工学技術や安全評価に関する様々な技術的成果を、上記アプローチに従って知識ベースとしてまとめるとともに、それらを適切に管理・利用できるように、品質管理や新たな知識創造に基づく更新の考え方を含めた知識管理システムを構築することとしている。

平成17年7月に設置された地層処分基盤研究開発調整会議⁶⁾⁷⁾（以下、調整会議）では、原子力機構や資源エネルギー庁の調査等事業の実施機関が進める「国の基盤研究開発」に関する成果の体系化や関連機関間の連携の促進について議論され、当面5年程度の全体計画が検討されている。こうした研究開発の成果を含めた国内外の最新の知見は、原子力機構が構築する知識ベースに適切に取り込むことが重要であるとの認識にいたっている。

また、最近取りまとめられた総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委

¹⁾ セーフティケース⁸⁾とは、経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）によって提唱された概念で、地層処分システムが長期的に安全であることを示すため、安全評価の結果や様々な議論、証拠を統合して、地層処分計画の種々の段階において作成されるものであり、信頼性のレベルやその段階において残されている不確実性と以降の段階における対応などを併せて記述される。セーフティケースは基本的に処分の実施主体によって作成され、規制当局など意思決定に関わるステークホルダーにとって満足のいくものとなることが要求される。段階的に進められる処分計画において、計画を次段階に進めるかどうかの意思決定のための技術的な入力情報となることがセーフティケースの本質的な役割である。

員会報告書^⑨では、広く関係者の処分事業の安全性に関する理解を深め、関係者との信頼醸成を図る観点から、その基礎となる安全について様々な論拠等を収集したセーフティケース（総合的安全説明書）^⑩を事業者が事業に係る意思決定の各段階で作成、改定および精緻化することが重要かつ有益であるとしている。

本報告書では、H17取りまとめに示した考え方に基づき、地層処分技術を知識として管理するための知識管理システムおよび知識ベースの基本概念について論ずる。第2章では、H17取りまとめに示したナレッジ・ヴィジョンと知識の構造化の考え方、これらを具体化するための実際的な課題や留意点について述べる。これらを背景とした知識管理システムが備えるべき機能や基本構成などについて第3章で論ずる。以下、第4章から第8章まで順に、知識管理システムの主要な機能である知識ベース（第4章）、知識創造（第5章）、ユーザーとのコミュニケーション（第6章）、ナレッジ・オフィス（第7章）、国外の知識ベースとのインターフェース（第8章）について説明する。第9章において、このような知識管理システムと知識ベースを開発するための当面（平成18年度～平成21年度）の研究開発計画について概観した後、まとめと結論を第10章に示す。

^⑨ 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会報告書では、経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）によるセーフティケースの定義^⑩を踏襲した上で、それをまとめた文書という観点から「総合的安全説明書」と称している。

2. 地層処分技術の知識管理

2. 1 ナレッジ・ヴィジョンと知識の構造化

H17 取りまとめでは、第1章に述べたような地層処分技術に関する多様かつ大量なデータや情報を知識基盤として体系化し、ステークホルダーの要望に応じた知識の提供や、次世代への知識の継承などの課題に対応するため、知識管理の枠組みに基づくアプローチを提案している。ここで、「知識（knowledge）」という語は、地層処分プロジェクトを支える全ての科学技術を示す広範な意味で用いている。データ、情報、知識を明確に区別する議論もある（<http://w3.informatik.gu.se/~dixi/km/chap3.htm> 2006.03.14など）。例えば、文献10)では次のように区別し、説明されている。

- ・一般にデータは文字などの記号や数値で表され、情報の構成要素となるが、それだけでは意味を持たない「素」な状態。一方、情報はデータの集合体であると同時に構成されることで作成者の意図が与えられるもの。情報の場合は、作成者の主観性よりも客觀性や正確性が重視される。情報はなんらかの媒体によって表現されるため複写したり、空間を超えて伝播・流通させることが可能。
- ・知識は、物事や事象の本質についての理解や信条、あるいはメンタルモデルと考えることができ、情報を認識し行動に至らしめる「秩序」。知識は、人間が「事象・現象の経験」と「信条・信念への思念」を融合する中から生まれるもの。

このように、データ、情報、知識の順により主觀的な内容が含まれる度合いが増し、「意味のレベル」と「行動の意思決定に役立つ度合い」が大きくなる。意思決定という行為を考える場合、これらが総合的に用いられる。データや情報を獲得、参照することで知識が付加されたり、訂正されたりすることもあり、また知識が伝わる過程で断片化した情報になることもある。これらの境界は必ずしも確定的なものではなく、状況や時間によって変化する。このような知識の流動化により、知識体系をいったん構築すればそれで終わりということではなく、変化し続ける知識を捉え活用する技術を提供する必要がある。また、個々の人間が世界をどのように認識するかということも知識を考えるうえで重要な因子である。こうした主觀化した知識を様々な角度から検討し、相互に比較することによって、社会で共有し活用するための努力が重要である。地層処分については、これらの点が特に顕著である。上記の議論から、地層処分技術をデータ、情報、知識として厳密に区別することはあまり重要ではなく、それらの知識の持つ「意味のレベル」と「行動の意思決定に役立つ度合い」に応じて、管理の仕組みを構築することが合理的であるということができる。

一方、「知識管理（knowledge management）」は、地層処分に関する技術を知識基盤として構築する（知識化）ために行なう管理のことであり、知識に関する開発、統合、品質保証、コミュニケーション、維持・記録保存、知識の継承や人材育成といった全ての側面を意味する語として用いている。また、「知識管理システム（knowledge management system）」とは、このような知識管理の体系を示すもので、知識管理を運用・促進する仕組みと、それに必要なツール（計算機支援システムなど）からなる。

地層処分は多岐にわたる多量の科学技術的な知識によって支えられるとともに、処分事業を進めるうえで必要となる新たな知識を継続的に創出していくことが不可欠である。地層処分の最終的な目的は、処分場の閉鎖後長期間にわたって放射性廃棄物を人間や環境から安全に隔離することである。

とである。この目的を達成するために、まず適切な処分場サイトが選定され、そのサイトにとつて適切な工学的対策がとられたうえで、システムの長期安全性がセーフティケース⁸⁾に基づいて総合的に判断される。セーフティケースの作成は実施主体が行う重要な作業であり、規制側がこれを評価することによって、地層処分計画の段階的な進め方における意思決定の重要な材料とされる。セーフティケースの作成にあたっては地層処分技術に関する知識の殆どが関連することになる。その中心をなすものが安全評価である。そのため、セーフティケースに関する一般的な構成要素⁸⁾を分析することによって、多くの知識領域の現状について検討することができ、今後研究開発を集中すべき不足している知識を明らかにすることも可能である。しかしながら、これだけでは十分ではなく、何十年もの長期にわたる地層処分の事業を進めていくうえでは、常にステークホルダーなどユーザーからの新たな知識の要求を認知し、これに対応した知識を開発するための枠組みを構築しておくことが必要である。このような点が地層処分技術に特徴的に求められる要件となる。

(1) ナレッジ・ヴィジョン

知識管理においては、全体の戦略と知識共有・知識創造の方向性を一致させた目標・目的であるナレッジ・ヴィジョンを設定することが必要である。ナレッジ・ヴィジョンには、現在拠点にしている世界、今後拠点としなければならない世界、および探求し創造されなければならない知識の内容を示すことが求められる¹¹⁾。

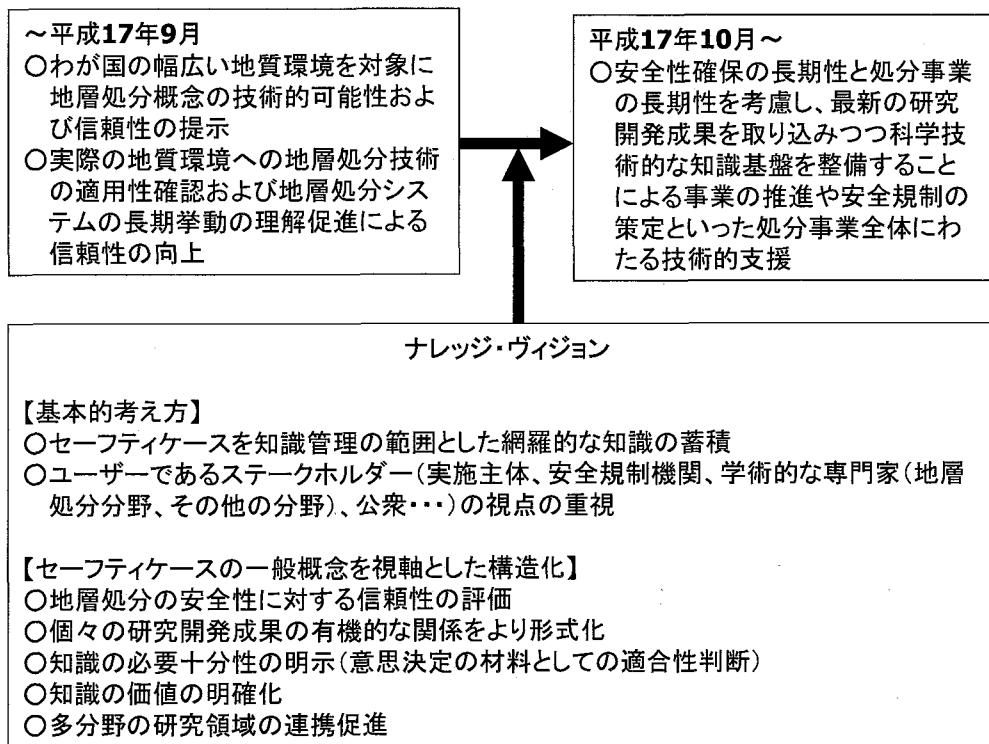


図1 地層処分技術の知識管理におけるナレッジ・ヴィジョンと研究開発戦略

- H17 取りまとめで示されているナレッジ・ヴィジョンでは、基本的な考え方として、
- ・ セーフティケースの作成に関する知識を管理の範囲とした上で、網羅的な知識の蓄積
 - ・ ユーザーであるステークホルダー（実施主体、規制機関、学術的な専門家（地層処分分野、

その他の分野), 公衆・・・) の視点の重視

が設定され, セーフティケースの一般概念を視軸とした知識の構造化が提案されている。これによって, 図1に示すように研究開発戦略の転換が指向されている。

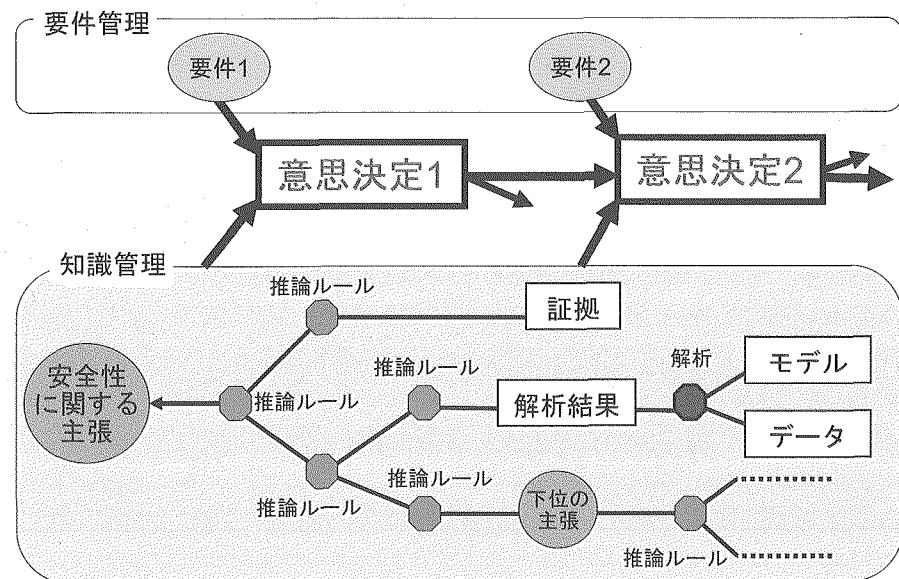
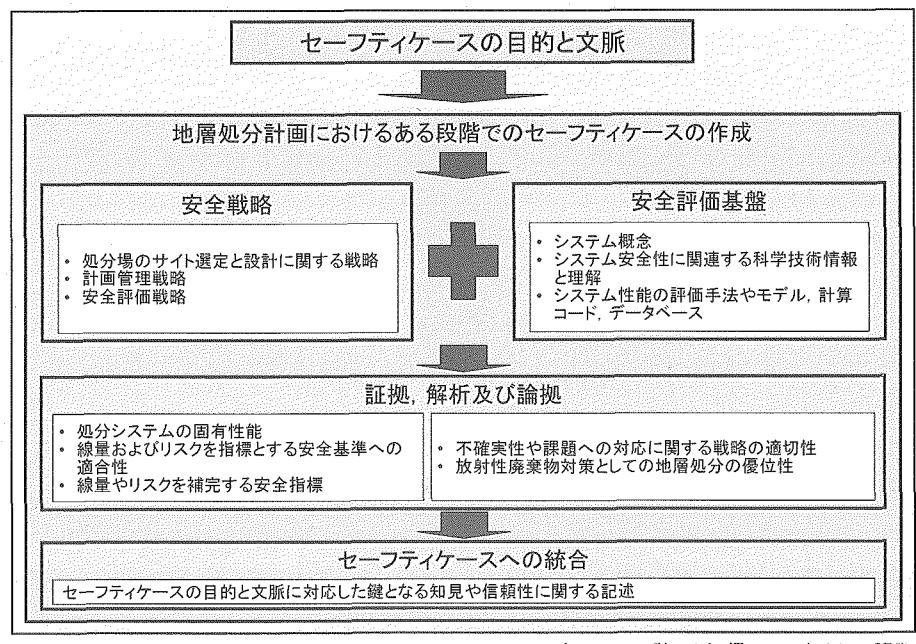
知識の構造化においては, 地層処分の安全性に対する信頼性の向上を図るため, 個々の研究開発成果の有機的な関係をより形式化するとともに, 意思決定の材料としての適合性に留意しながら情報の必要十分性を明示する。また, こうした観点から知識の価値を明確にしながら, それを高めるように多分野の研究領域の連携の促進や成果の統合を行うことによって, 役に立つ知識を創出する。知識の構造化の具体的な考え方については次項に述べる。

(2) 知識の構造化の考え方

ナレッジ・ヴィジョンに基づき知識化された地層処分技術は, 「知識ベース (knowledge base)」として具体化される。知識ベースは, データや情報, 事実や経験などに基づく知見やノウハウなどの知識をユーザーが活用しやすい形態に整えて蓄積・保管している場所と, 蓄積・保管された知識そのものを指すものと定義する。知識管理には, 多様な情報ソースを適切に操作し構造化された知識ベースを作成するための作業が含まれる。このような構造化にあたっては, 最終的な利用形態だけでなく, 実施主体や規制機関, 専門家(地層処分分野, その他), 公衆といったステークホルダーなど, 想定される幅広いユーザー全ての技術的なレベルを勘案しておく必要がある。

プロジェクトの展開は原理的に意思決定のネットワークによって表すことができる。それぞれの意思決定はある要件に対する「結果」であり, これは知識ベースとそれ以前の意思決定に基づいて行われる。したがって, 知識の構造化を行うための効果的な方法はユーザーの要件に関係づけることである。こうした要件には, 法律や安全規制, 地域の要求(安全対策など)といった政治社会的な側面に関するものや人工バリアの設計に関わる詳細なレベルの技術的要件など, 様々なものが含まれる。要件は相互に関連性をもつとともに, 地層処分計画の進展や社会の変化などによってダイナミックに変化する。要件管理が実施されていれば, そこで明らかにされる要件に即してほぼ自動的に知識を構造化することが可能である。

実施主体や規制機関などのユーザーによって要件に関する検討が進められている現段階においては, 知識の構造化を行う視点としてセーフティケースの一般概念を用いることは合理的であり有効と考えられる(図2)。セーフティケースについてはOECD/NEAによって一般的な構成要素(図3)とその相互関係が示されている⁸⁾。セーフティケースには, 階層的に構造化され, 相互に関係するいくつもの要素が含まれており, さらに, これらの要素にはそれぞれに関係して行われる作業の集合が含まれている。要素とそこに含まれる作業についての境界や関係性は, 一般的な議論のレベルではすべてを精密に規定することは難しく曖昧さを含んでいる。また, プロジェクトの進行に伴って時間的に変化する。しかし, 知識の構造化の考え方を示すという目的に対しては, このような一般的な構造で十分役に立つ。

図2 セーフティケースの一般的な論証構造に基づく知識管理と要件管理との関係¹⁾図3 セーフティケースの一般的な構成要素⁸⁾

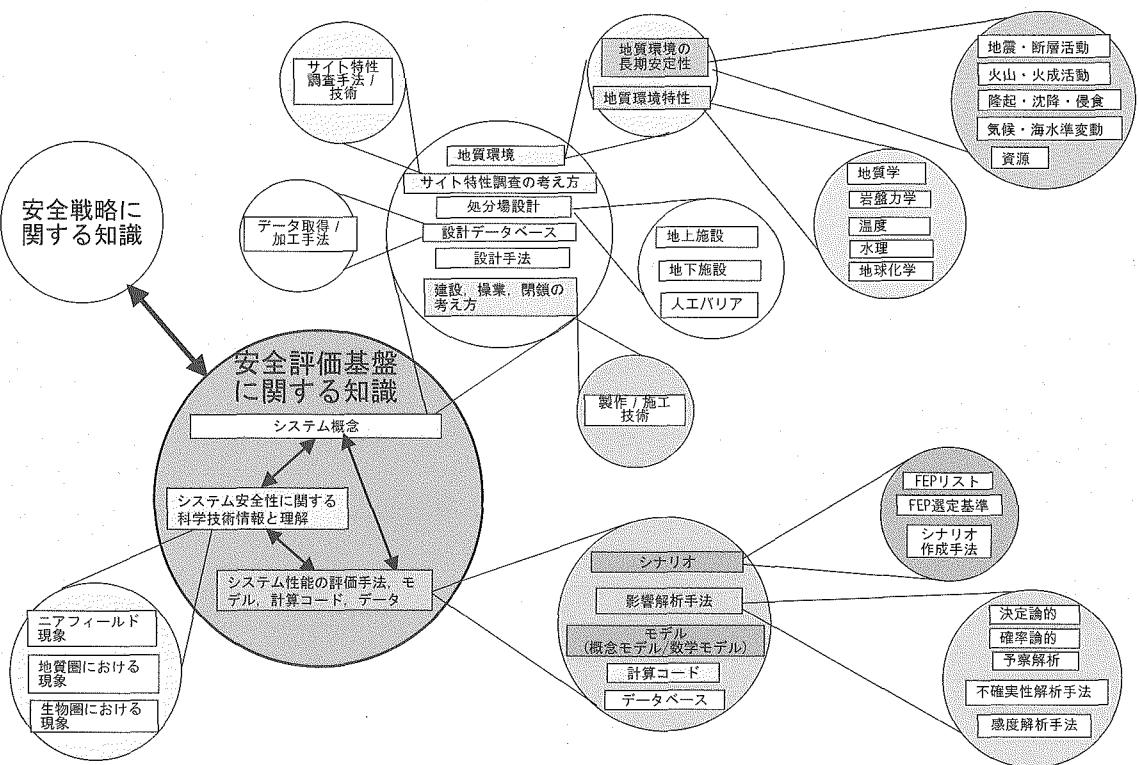
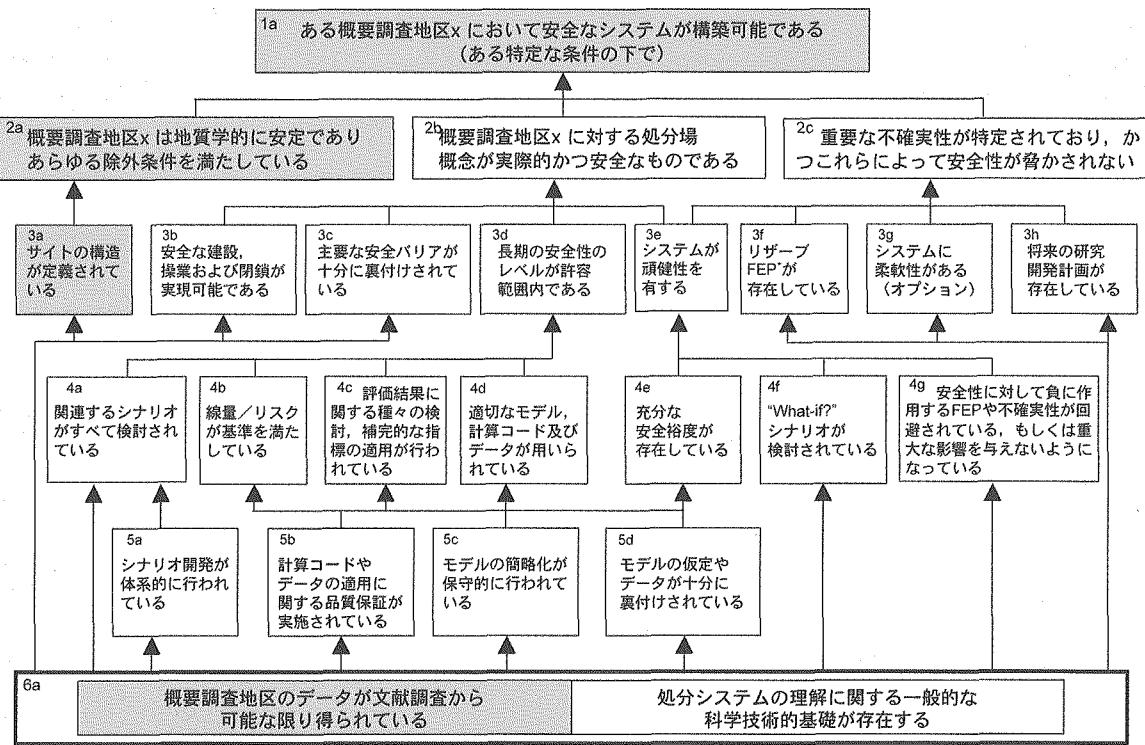
図4 知識の構造化の例（安全評価基盤）¹⁾

図4に、セーフティケースの一般的な構成要素の一つである「安全評価基盤」に関する知識の構造化を行った例を示す。安全評価基盤の主要な構成要素は、「システム概念」、「システム安全性に関する科学技術情報と理解」、「システム性能の評価手法、モデル、計算コード、データ」である。これらはさらに下位の知識へと階層的に分類されている。例えば、システム概念に関しては、システムを構成する地質環境と処分場（人工バリアと地上及び地下施設）についての記述、設計手法や調査技術などの知識が必要である。また、事業の実施や閉鎖後の安全性への影響という観点から、処分場の建設、操業、閉鎖の考え方、関連する製作／施工技術などが含まれる。

H17取りまとめでは、こうした個別的な知識の分類整理とともに、これらを用いて「セーフティケースへの統合」を行うための知識について触れている。これは、個々の知識とは別種のものであり、セーフティケースの一般的な論証構造に含まれる「主張（あるいは要件）」の関係性を示したテンプレートとして捉える方法を例示している。地層処分計画の中で時間的に変化するセーフティケースの構造的变化と必要となる知識の変化は、テンプレートの構造を変化させることによって把握することができる。

図5は、OECD/NEAの議論⁸⁾によって極めて抽象的なレベルで示されたセーフティケースの一般的な論証構造をより具体的な形に変換した一例であり、わが国における地層処分計画の次のマイルストーンである概要調査地区の選定においてセーフティケースを作成するという仮定のもとに作られたものである⁹⁾。テンプレートを構成する種々の「主張（あるいは要件）」とこれらを支持するために必要な論拠との関係を論ずることにより、現在不足している知識を明らかにし今後の研究開発の方向性を探るうえで有益な指針を与えることが可能である。ここで、概要調査地区選定の段階においても地質環境などに関する得られる情報は限られており、「地層処分研究開発の第2次取りまとめ」^{12)~16)}（以下、「第2次取りまとめ」）で示された一般的なレベルでのセーフティケースと大きな差はないと考えられることを注意しておく。この意味では、サイトスペシフィック

クでより厳密なセーフティケースが必要となるのは、さらに後の段階（例えば、精密調査地区的選定段階）である。このような地層処分技術に関する知識の構造化と現状の知識に関する分析は、今後、具体的な知識ベースを開発していくうえで起点となるものである。



*リザーブFEP：システムの安全性に寄与するが、安全評価にあたっては考慮せず保留しているFEP

図 5 概要調査地区を選定するために作成されるセーフティケースに対する議論
と情報の流れ¹⁾

以上のような考え方の下に知識管理を進めていくためには、一般に次のような要件に留意する必要がある¹⁾。

- ・運用と維持の容易性
- ・数十年の時間スケールでの情報の保存性
- ・セキュリティの確保（許認可申請と規制機関及びステークホルダーによる評価への情報源として重要）
- ・データと知識管理プロセスの十分な品質保証
- ・内容の変更に伴う全体的な整合性と両立性の自動確認
- ・自動的な知識創出機能（推論機能、データマイニングなど）
- ・様々なユーザーに対する利便性
- ・ユーザーが利用するツールとのインターフェースの機能
- ・時間的な変遷に対する柔軟性
- ・長期間の支援保証
- ・同様のプロジェクトにおける十分な実績

2. 2 知識管理の実際的な課題と対応

半導体メーカーIntel社の創設者の人である Gordon Moore は 1965 年に経験則として「半導体の集積密度は約 2 年で倍増する」ことを提唱した。これは後にムーアの法則（図 6, <http://www.intel.co.jp/jp/developer/technology/mooreslaw/index.htm> 2006.11.09）と呼ばれ、データ処理の機器開発の指針として示されてきた。これにより処理容量の向上が先行したため、それに伴うデータ生産の飛躍的増加については覆い隠される傾向となつたが、結果的にはデータ生産からの要件に見合うように処理容量が指数関数的に向上されることになった。

高レベル放射性廃棄物地層処分の分野では、1980 年代あるいは 1990 年代に入った段階においても、プロジェクトの統括責任者が処分計画につながる広範囲のあらゆる技術的な内容を合理的に把握しておくことは可能であった。それ以降、基盤的な知識においては驚くべき進展があり、その内容もより国際的なものになった。また、パブリック・アクセプタンスや開かれた対話など非技術的な視点もますます強調されるようになり、より広い層による精査に向けた新しい局面が開かれるようになってきた。このことは、規模が小さいあるいは独立色の強い個別テーマに沿ったプロジェクトを除き、統括、統合、柔軟性の点で地層処分プロジェクト全体にとって明らかな損失を被るに至る要因となる可能性が高くなっていることを意味している。プロジェクト管理が今後十年といったスケールで完全に崩壊すると予測してしまうことは悲観的に過ぎるともいえなくはないが、処分事業計画が最終の段階を迎える処分場閉鎖の許認可を得るまでの数十年あるいは世紀を超えるような長期間を待たずにこのような事態を招かないように、速やかに対策を練つておくことが重要であると考えられる。

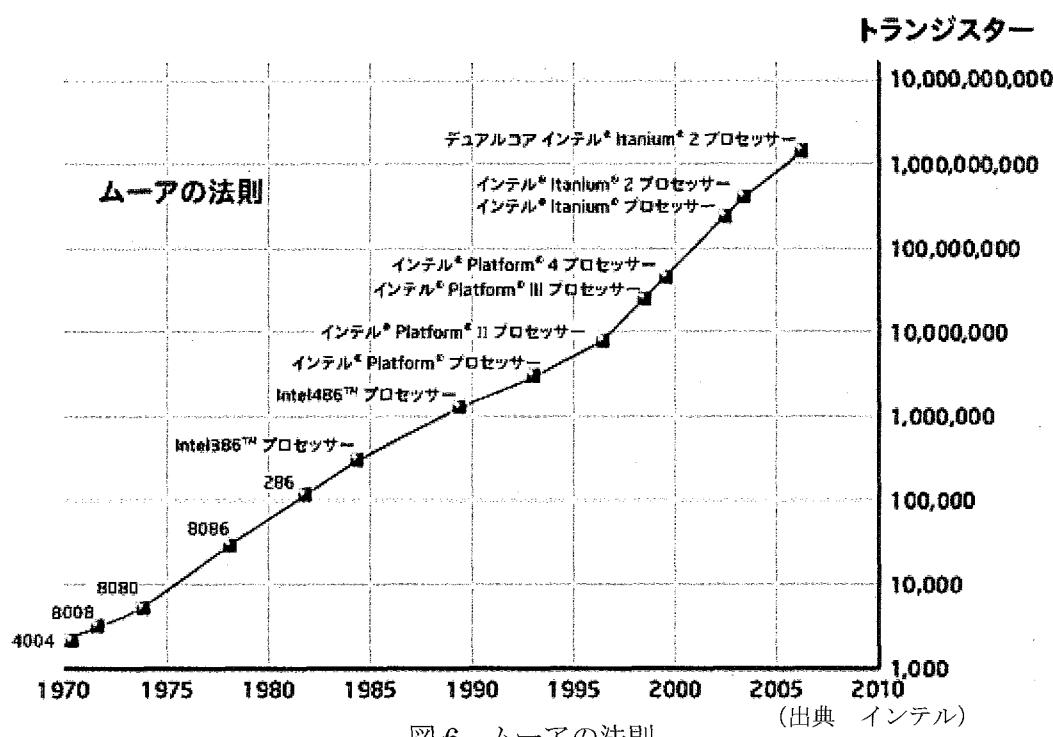


図 6 ムーアの法則
(ムーアの予測にしたがい、機器あたりのトランジスター個数と
処理速度は、1970 年以降、指数関数的な伸びを示している)

最近の研究によれば、情報の飛躍的増加、いわゆる“情報爆発 (information explosion) ”の現象に関して、いくつかの興味深いデータが示されている（例えば、<http://www.sims.berkeley.edu:8000/research/projects/how-much-info-2003/execsum.htm> 2006.03.29）。

- 2002年の1年間において、印刷物、フィルム、磁気および光学を媒体とする約5エキサバイト（500京バイト）もの新しい情報が生まれ、その92%は磁気媒体に記録されてほとんどがハードディスク中に存在している。
- 紙、フィルム、磁気および光学の媒体で記録される新しい情報量は1999年から2002年の3年間にかけて約2倍に膨れ上がり、情報保管の年間の伸び率は約30%であったものと推定される。
- 2000年から2003年にかけてハードディスクに記録された情報量は926ペタバイトから1.99エキサバイトに伸び（114%贈）、全容量では約一桁の増加となっている（表1）。
- インターネットは最も伸び率の高い情報媒体であり、2002年の時点で、全情報量は約500ペタバイト（50京バイト）と推定される。

表1 ハードディスク容量の時間的推移

年	個数(百万個)	容量(ペタバイト)
1992	42	-
1995	89	105
1996	106	184
1997	129	344
1998	144	724
1999	166	1,395
2000	200	4,630
2001	196	7,279
2002	213	10,850
2003	235	15,890
合計	1,520	41,400

このような情報爆発の現象は、わが国の高レベル放射性廃棄物地層処分の研究開発分野においても顕著に見られるようになった。その最初の兆候が現れたのは、第2次取りまとめの時期である。第2次取りまとめは、サイトや岩種を特定せずわが国で一般的に認められる幅広い地質環境を対象としたジェネリックな方法で進められた研究開発の集大成として取りまとめられ、わが国における地層処分の成立性に関する技術的な信頼性を概括的に示すとともに、以降の処分予定地の選定や安全基準策定の技術的な基盤を提供したものである。このような研究開発成果を、追跡性をもって示すため、第2次取りまとめは総論レポート¹²⁾と主要な研究開発分野に対応する3つの分冊（分冊1「わが国の地質環境」¹³⁾、分冊2「地層処分の工学技術」¹⁴⁾および分冊3「地層処分システムの安全評価」¹⁵⁾）から構成され、総ページ数は約2,300ページに及んでいる。また、技術的な内容だけでなく、地層処分に関する国際的な議論の流れや重要な概念、原則的な考え方など、背景となる情報が取りまとめられている（別冊「地層処分の背景」¹⁶⁾）。

これは、総ページ数約400ページであった最初の取りまとめ報告書である「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－」(以下、「第1次取りまとめ」)¹⁷⁾とは対照的である。地層処分の安全性をより確かなものとするために、第2次取りまとめ以降においても研究開発は継続して進められ、2005年時点での追加のデータや情報が、約1000ページのH17取りまとめ分冊^{18)・20)}としてまとめられている。ここで注意しなければならないのは、こうした総合的な取りまとめの内容をサポートするために作成されている技術資料や学術論文などの参考文献は優に数百を超え、これらに含まれる多様な知識も膨大な量にのぼるということである。これらの知識も管理すべき対象として念頭においておく必要がある。

一例として、第2次取りまとめからH17取りまとめにかけ、処分場の設計や安全評価にとって重要となる主要なデータ数がどのように推移したかを表2に示す。個々のデータには、例えばデータ取得にあたっての実験条件やデータ提供者、不確実性、品質保証、信頼性の度合いなどに関わる多大な情報が付随している。今後も引き続いてこのような情報が増大していくことになる。

表2 処分場の設計と安全評価において重要となる主なデータ数の推移

データ	第2次取りまとめ	H17取りまとめ
熱力学データ	383	425
分配係数（緩衝材、岩盤）	19,825	21,061
拡散係数（緩衝材、岩盤）	648	1,424
緩衝材特性データ（熱的、水理学的、力学的、化学的など）	1,328	1,818
炭素鋼腐食データ（ナチュラルアナログ含む）	~ 1,800	~ 2,640

最新の地質環境調査技術を適用することによってもたらされる情報には、生データに加え、3次元のデジタルモデルやランドサットなど衛星からのマルチスペクトラル画像などが含まれ、その情報量は拡大を続けている。図7は、その具体例として瑞浪超深地層研究所を対象とした3次元デジタル地質モデルとそれに対応する地質図を示している²¹⁾。

上記の3次元デジタル地質モデルは、関連する透水係数データを用いて3次元の水理地質モデル（図8(a))を構築するために直接用いられ、これにより取り扱うべき情報量がさらに拡大している。3次元水理地質モデルは、支配的となる流動経路を特定するための地下水流动のシミュレーション（図8(b))に用いられ、それに基づいてさらに物質移動の予測解析に用いることが可能である。これらのモデル開発や計算の過程で用いられるすべての関連する情報やデータは、首尾一貫した、かつ品質が保証された方法にしたがって取り扱い、細心の注意を払って記録保管されることが必要である。

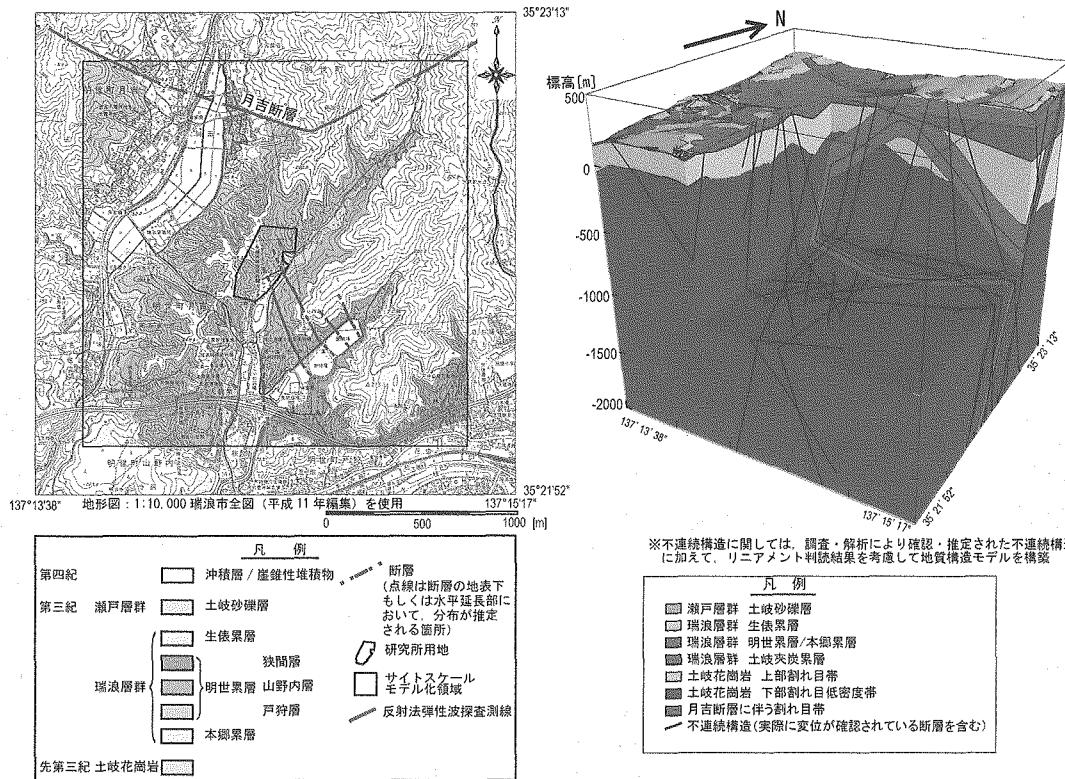
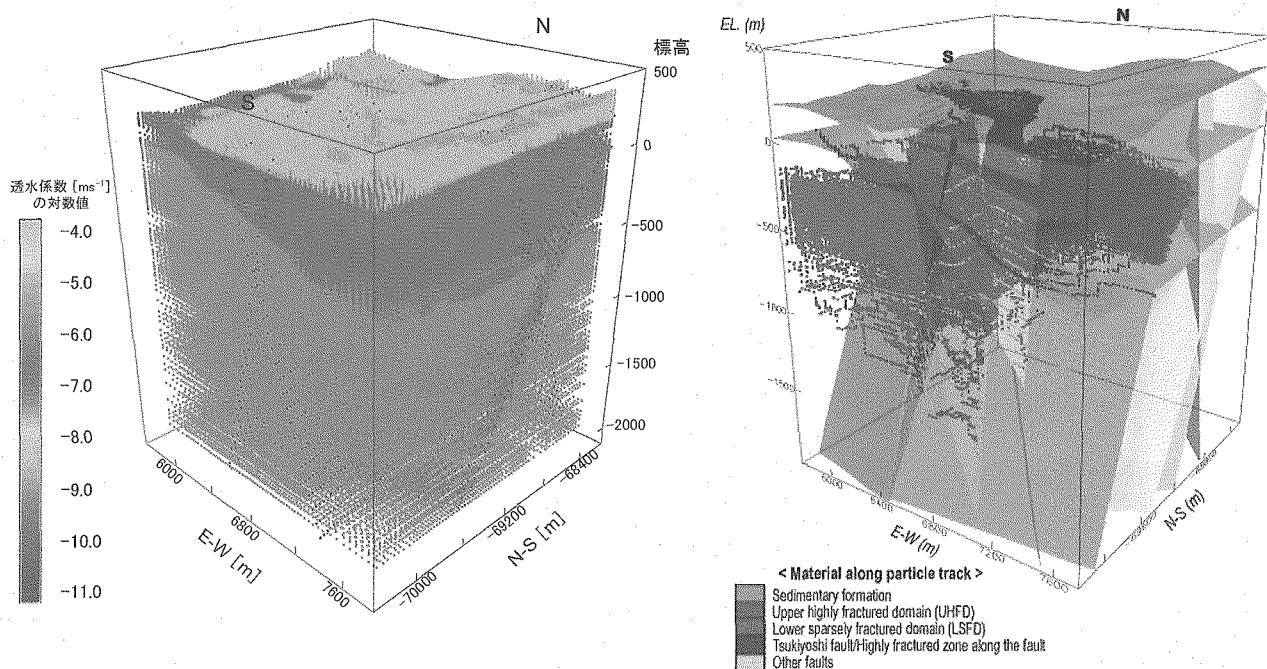


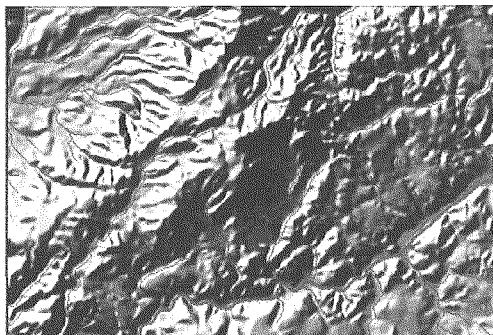
図 7 瑞浪超深地層研究所周辺の3次元デジタル地質モデルと地質図の例



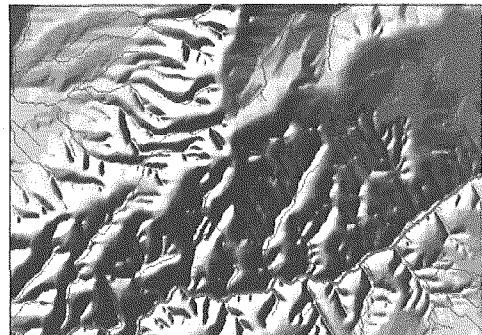
(a) 3次元水理地質モデル

(b) パーティクルトラッキング法を用いた
シミュレーション例図 8 3次元水理地質モデル(a)と支配的な流动経路を特定するための
地下水流动シミュレーション(b)¹⁷⁾

現在、過去の隆起・侵食データに基づく3次元長期地形変化シミュレーション手法（図9）を開発中であり、この先進的な手法を上記3次元水理地質モデルと動的に連成させることにより、将来に想定される広域地下水流动系の変化を推定することも可能となると考えられる。このような研究によってモデルは複雑なものとなり、取り扱う情報量を大きく増大させることにつながる。



(a) 現在の地形



(b) 12万年後の地形の予測

図9 東濃地域における3次元地形の予測評価例¹⁸⁾

以上事例的に述べたように、地層処分技術には多岐にわたる多くの知識が関連し、その情報量から考えて、これを適切に管理していくためにはすでに従来の方法では限界を超えていいるといえる。このため、地層処分技術が有する特徴を十分に考慮に入れ、計算機支援による知識ベース化を含めた新たな考え方に基づく知識管理が不可欠となっている。

このような課題に対応するために、最近、急速に進歩しているエキスパートシステム、人工知能などの知識工学の技術を活用することが可能であると考えられる。例えば、

- ・ 地層処分に関する主要な情報を、インターネット/イントラネットでアクセス可能な電子情報として活用する（これらについては100パーセント実現できるものと期待される）、
- ・ 洗練されたコンテンツ認識やクロスリファレンスシステムにより、従来のラベリング/キーワードアプローチに比べドキュメントや様々な形態のデータベースをより明確に関係づける、
- ・ 開発が進んでいるネットワークエージェントなどによるデータマイニング技術を用いることにより、情報の収集、分類、編集を自律的に行う、
- ・ エキスパートシステムとニューラルネットワークなどをベースとした自律的学習機能を組み合わせることにより、自律的に情報の照合、統合、レビューからなる品質保証プロセスを行う、
- ・ オントロジーなどにより、ユーザーと知識ベースを「概念レベル」で関連づける、
- ・ 自然言語処理を用いたテキストマイニングなどにより、膨大な量の情報から必要な情報をより確かに検索することを可能とする、

といったアイディアを挙げることができる。

3. 知識管理システム

知識管理システムは、地層処分に関する技術の知識基盤を構築する（知識化）ために行われる、知識に関する開発、統合、品質保証、コミュニケーション、維持・記録保存、知識の継承や人材育成といった全ての側面を運営・管理するための体系を示すもので、知識管理を運用・促進する仕組みと、それに必要なツール（計算機支援システムなど）からなる。

H17 取りまとめで提案された知識管理のアプローチを具体化するために必要な知識管理システムは、情報を保管、普及するだけの受動的なツールではない。ピアレビューーやアドバイザーが果たしているような、多様な情報の統合、傾向や矛盾の認識、知識生産者へのフィードバックといった機能も要求される²²⁾。また、知識管理システムは、激増する知識に対応する能力、ユーザーからの要件・要望への柔軟な対応、ユーザーの利用しやすさなども考慮に入れて構築する必要がある。

このような機能を満たすために必要な知識管理システムの要素と構造を図 10 に示す。知識管理システムの基本機能は、構造化した知識を収納する知識ベース（4章参照）、研究開発セクター やシンクタンクなどにおける知識創造（5章参照）、ユーザーとのコミュニケーション（6章参照）、知識管理全体をマネジメントするナレッジ・オフィス（7章参照）、インターネット（ウェブ）を介した国外の知識ベースとのインターフェース（8章参照）から構成される。また、調整会議を通じて実施される国際基盤研究開発における他研究開発機関の成果を知識基盤として統合することも考慮しておく必要がある。

上述した知識管理システムの各々の機能では、知識創造プロセスの概念¹⁰⁾に基づけば、知識の共同化（身体・五感を駆使した、経験による暗黙知の共有、創出）、表出化（対話・思慮を通じた概念・デザインの創造（暗黙知の形式知化））、連結化（形式知の組み合わせによる新たな知識の創造）、内面化（形式知を行動・実践のレベルでの伝達、理解、学習）が行われる。これにより、以下に示す内容に関する知識の継承や人材育成が可能となる。

- 研究開発セクター：深地層の研究施設、地層処分放射化学研究施設（QUALITY）、地層処分基盤研究施設（ENTRY）などの経験の場において蓄積される、各分野の調査・解析・評価の方法論などの経験・ノウハウ
- シンクタンク：社会の将来シナリオの構築方法などの経験・ノウハウ
- コミュニケーションシステム：社会的な動向の理解の方法、地層処分に関する国民的理解や社会的信頼性の向上の方法などの経験・ノウハウ
- ナレッジ・オフィス：知識管理の経験・ノウハウ

また、知識管理システムの開発にあたっては、最終的に知識ベースが地層処分計画に関する社会的な意思決定に用いられることを視野に入れておくことが重要である。研究開発によって生産される地層処分技術の知識は、知識ベースに蓄積され、コミュニケーション機能を介して、ステークホルダーである実施主体、規制機関、専門家（地層処分分野、その他の分野）、公衆など、全てのユーザーが活用する。知識ベースの利用を通してユーザーから示される要件や要望に沿うよう研究開発が行われ、品質が管理された新たな研究開発成果が知識ベースに蓄積される。このように、知識管理システムは、共通のプラットフォームとしての知識ベースをユーザーが利用し、また、ユーザーの要件・要望を反映することなどにより、地層処分の安全性の論証とその妥当性に関する技術的評価、地層処分に関する国民的理解および社会的信頼性の向上に貢献し、段階的な社会的意思決定を支援する（図 11）。

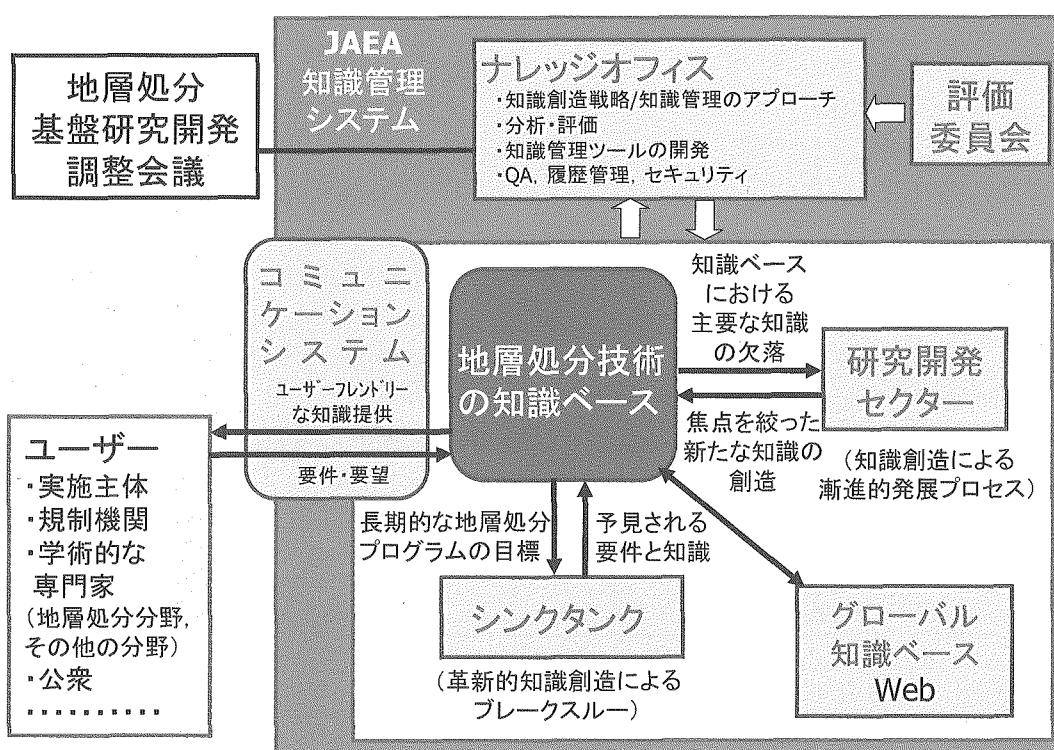


図 10 知識管理システムの主要な要素と構造

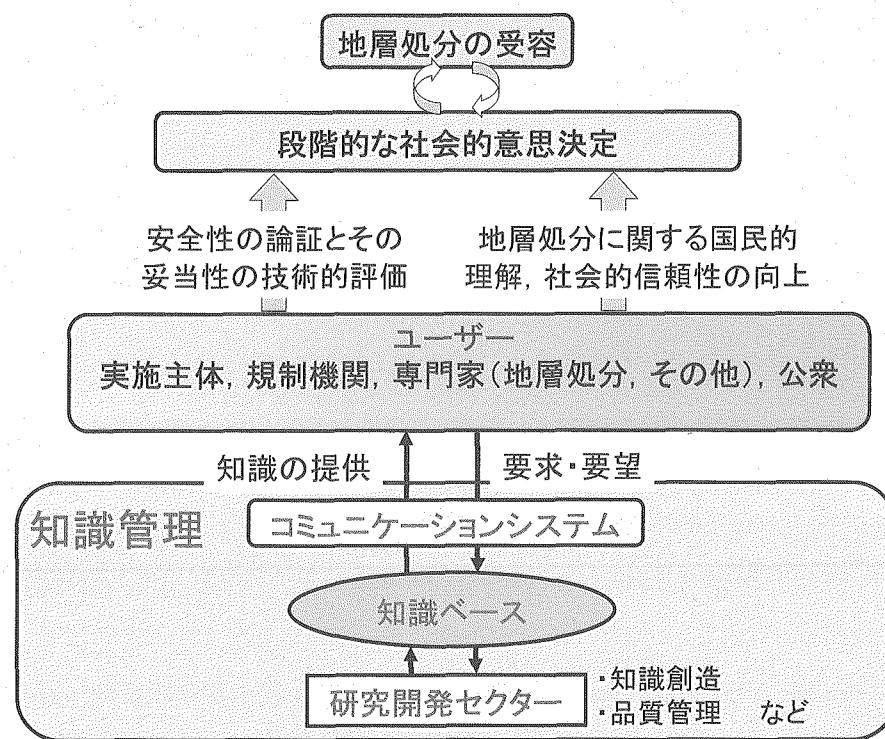


図 11 知識管理の役割

4. 知識ベース

4. 1 知識ベースの構成要素

知識ベースは知識管理の中核をなすものである。知識ベースを役に立つものとするためには、明確な考え方に基づく構造化が必要である。このような構造化にあたっては、最終的な利用形態だけではなく、ステークホルダーである地層処分の実施主体や規制機関、学術的な専門家（地層処分分野、その他の分野）、公衆など、全てユーザーの技術的なレベルを勘案し柔軟に対応できるようになることが必要である。構造化を行うための効果的な方法は、ユーザーが求める要件を的確に抽出し、それと直接関連づけた枠組みを与えることである。ただし、現段階では、実施主体や規制機関によって進められている地層処分プロジェクトに関する要件の検討は途上にあることから、上記のようなユーザーの要件は明確になっておらず、2.1節で述べたようにセーフティケースの一般概念を用いることが合理的である。

このように構造化された知識項目は、それぞれ一次的にはドキュメントの形態で管理される。しかし、これらの知識は、実際に利用するという観点からいかの形態に分類することができる。例えば、構造化された知識の中には、データやモデルといったものが含まれている。これらはそのまま利用可能な知識の形態である。構造化された知識に基づいて、類型化された知識ベースの構成要素は表3のように考えることができる²²⁾。これらの構成要素は、セーフティケースの一般概念を用いて構造化した、ある時点での知識を、利用しやすい形態で表現するための要素区分（以下、類型）である。このような構成で知識ベースの開発を進めることにより、わが国の地層処分計画を進めるにあたり実施主体や規制機関などにとって活用しやすい形態を模索しつつ、知識を提示できると考えられる。以上のような考えに基づく知識ベースの構造を概念的に示したもののが図12である。2.1節に示した考え方沿って構造化された知識は、知識ベースの一次的要素として収納される。これらは利用形態として考えられる類型に変換され、ユーザーからの要件や要望に柔軟に対応できるよう整備される。

表3 利用形態の観点から類型化された知識ベースの構成要素

類型	内容	例
データ	・生データ ・プロセスデータ（処理データ） ・外部発掘データ	・熱力学・収着データ ・人工バリアの基本特性データ
ドキュメント	・内部技術資料 ・公開技術資料	・技術メモ ・研究報告書、論文
ソフトウェア	・関連ソフト/データベースのアーカイブ ・マニュアル、ハンドブックなどのアーカイブ ・関連する研究成果のアーカイブ	・地下水流动解析モデル/コード ・地形変化シミュレーションモデル/コード ・物質移行解析モデル/コード ・熱-水-応力-化学連成解析モデル/コード
経験・ノウハウ（方法論など）	・手順マニュアル/ガイドブック ・エキスパートシステム ・トレーニング資料	・断層の推定手法 ・ボーリング調査手法 ・分析手法マニュアル
統合化した知識	・エキスパートシステム	・地質構造の推定手法 ・地下水の化学特性の推定手法
ガイダンス	・技術的、社会政治学的な将来シナリオとそれに基づく知識ベースへの要求・要望事項	・将来シナリオ ・予見される要件と知識
プレゼンテーション素材	・ユーザーフレンドリーインターフェースを考慮に入れたグラフィック表示素材	・地質環境の長期変動のビジュアル画像

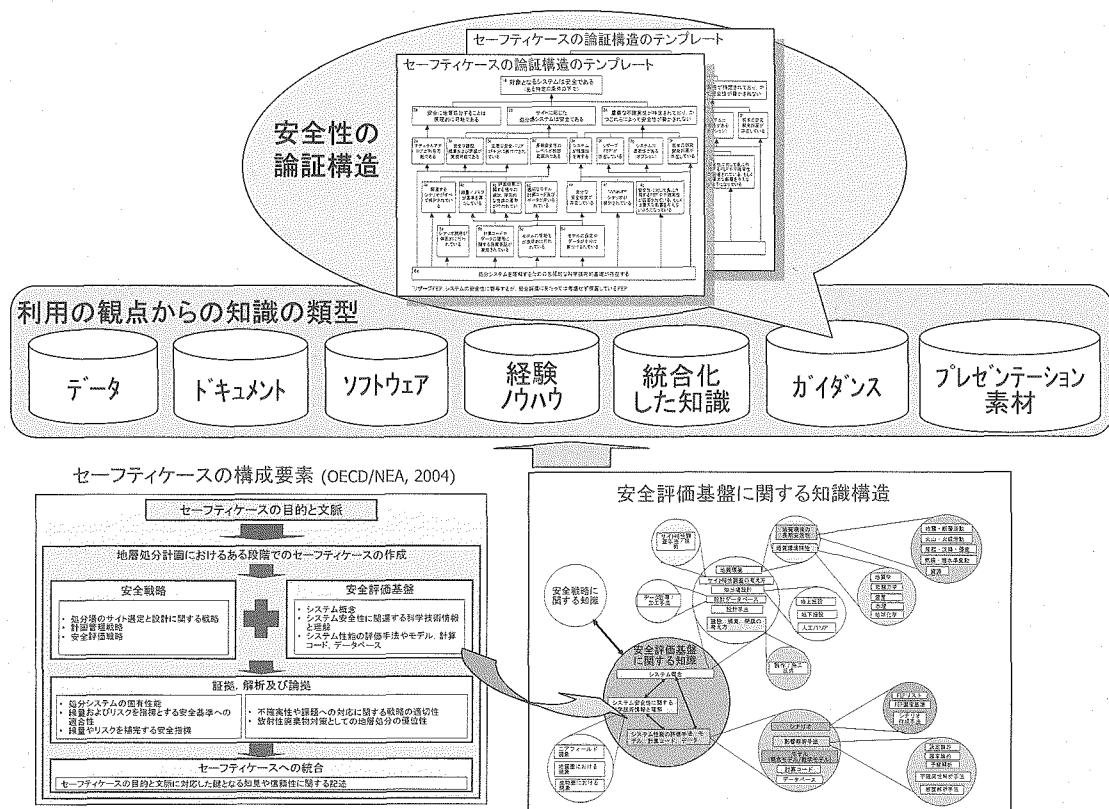


図 12 構造化された知識と利用の観点からの知識の類型化

以下に、それぞれの構成要素について説明する。

① データ

データは、生データ³、プロセスデータ（処理データ）、外部発掘データに大きく区分できる。データの管理には様々な方法が提案されており、現状で広く活用されているデータベースにおいても、単にデータを管理するだけでなく、ユーザーが活用しやすいうように様々な機能が備えられている。

生データには、原子力機構が取得する、処分場の設計や安全評価に関わるパラメータの設定の元となる室内試験データや、地質環境のモデル化（例えば図7）やシミュレーション（例えば図8,9）に用いられる地質環境特性に関する調査データなどが含まれる。これら全てのデータについて厳格な品質管理が行われることが必要である。例えば、データの生産性が向上していくと大量のデータを迅速にチェックする必要が生じ、限られた専門家が従来の方法に基づいてこれを行うことは現実的に困難となる。仮に、それが実施できたとしても必要となる人的資源や経済的な負担は大きくなる。このような状況を想定して柔軟性に富み先行きの見通せる品質保証体系を整えるために、自動化されたシステムの構築が望まれる。この場合は、様々な品質保証レベルに応じて基準を規格化し、加えてトレンド分析などを介して品質に疑いのあるデータを抽出するなどの機能を備えた一貫性のあるチェック機能の構築が必要である。

³ 生データとは、測定あるいは分析で得られた一次データを指す。例えば、地下水水圧モニタリングであれば、直接、測定で得られた水圧を生データと呼び、温度や圧力で補正されたものはプロセスデータ（処理データ）と呼ぶ。

生データの信頼性を向上させていくためには、原子力機構以外の研究者などが取得した情報（外部発掘データ）を必要に応じて選択的に活用するとともに、こうしたデータを積極的に発掘していくことが重要である。このため、通常はその生データを取得した原子力機構の研究者が、公開されている文献あるいは国際的なデータベースなどから情報を収集するといった方法が採られている。これについても、将来的には、インターネット上で継続的かつ自動的にデータを発掘していくシステムを用いて国際的な最新動向に関する有益な情報を効率的に入手する方法などを利用することが考えられる。

生データは、その情報を利用する技術者のニーズ、例えば地層処分システムの安全評価におけるパラメータ設定といった処理プロセスに耐えられる高品質の情報でなくてはならない。データの生産・加工過程の透明性が明示され品質が保証されることにより、その情報はエキスパートシステムへの活用など幅広い利用が可能な価値の高い情報となる。

原子力機構では、これまで蓄積してきたデータの一部を、データベース（ソフトウェア）に登録し、公開している（「③ソフトウェア」参照）。得られたデータをデータベース（ソフトウェア）として順次登録するにあたっては、データベース化することの目的や価値を明確にすることが重要である。その上で、作成するデータベースを、インターネット/イントラネットでアクセス可能な情報とすることが必要である。「工学技術の開発」および「安全評価手法の開発」で整備されているデータの多くは、目的に応じたプロセスデータを対象としており、品質保証の観点からどのように生データを管理しておくかといった検討も重要となる。

② ドキュメント

ドキュメントの主たる内容は技術資料であり、これには、会議や打ち合わせの結果を記した技術メモ、調査研究の計画や成果を取りまとめた技術報告書、学会などへの投稿論文や発表要旨などが含まれる。また、上記のデータについても技術資料群において関連する全ての情報を網羅的に提示する必要がある。技術資料の管理もデータ管理と同様に種々の方法が提案され広く活用されている。

知識ベースにおいては、全ての技術資料は電子媒体としてアーカイブで管理し、Webなどを活用して検索・閲覧できることが基本的な機能として必要である。また、品質をチェックし迅速に公開していくことも運用上極めて重要である。研究開発を通じて開発・改良された技術項目は、例えばカタログとして整備し開示してインデックス化を図るとともに、技術資料に記載された情報はクロスリファレンスによって関連付け、ある情報の更新があった場合などは関連する技術資料すべての記載を自動的にチェック／更新できる機能を設けておくことが有効である。技術資料の品質管理の自動化および電子媒体のアーカイブの頑健性の確保は、今後取り組むべき大きな課題であるといえる。

膨大な技術資料群の蓄積に伴い、現状のピアレビューのシステムでは対応できなくなると思われる。最近では、科学技術専門誌においてさえ、成果捏造の事実の発覚やそれに伴う論文棄却といった問題が現実のものとなり、従来のピアレビューの限界が問題提起されている。現状で想像しうる最先端の技術を用いても、専門家集団による高度なレビューを完全に実現することは難しいように思われる。しかし、最低レベルの基準にすら到達しない不良文書の識別（例えば文書校正、誤差や不確実性の定量化、内部-外部情報間の整合性の確認など）に、エキスパートシステムなどを活用するといった方法には現実味があると考えられる。

電子媒体の保存技術については、近年、10年より短い間隔で革新的な発展が遂げられている。このことは、知識ベースの利用期間が長期にわたることを考慮すると、知識ベースの構築上優先的に対処しなければならない重要課題であるが、世界的な動向に追随して集中的な

取り組みが可能であると考えられる。

原子力機構では、これまで、第1次取りまとめ、第2次取りまとめ、H17取りまとめといった地層処分技術に関する包括的な技術報告書を取りまとめるとともに、それらの基盤情報となる研究報告書・技術報告書を作成し公表を行ってきた。また、研究成果の多くは学術的な論文として投稿されてもいる。今後は、これらデータベースに個々に登録されているドキュメントを、知識の構造化に基づき、知識ベースの中で一括して管理できるよう検討を行うことが必要となる。

③ ソフトウェア

この類型では、計算プログラムなど関連するソフトウェアを一元的かつ適切に管理することに加え、ソフトウェアを利用する際の情報源となるデータ、マニュアルやハンドブックなどの管理が行われる。ドキュメントと同様、ここでもソフトウェアのカタログを整備し、一カイブで管理しつつWebなどを活用して検索・閲覧できる機能が必要である。また、ソフトウェアのバージョンアップなどは自動的に更新できる機能を持たせることが有効である。さらに、ウィルス対策などを含めた品質管理が重要であり、その自動化および電子媒体の一カイブの頑健性の確保が将来的に重要な課題になるとを考えられる。

ソフトウェアに関する知識管理上の課題は、②に記述したドキュメントに類似するが、品質保証や、将来利用することが可能な保存形態（フォーマット）について、より十分な配慮が求められる。

原子力機構では、これまでに、地下水流动解析、地形変化シミュレーション、物質移行解析、熱-水-応力-化学連成解析などを目的とした様々な計算プログラムの開発を行うとともに、それらのソフトウェアを用いた解析事例を蓄積している。これらのソフトウェアは、個々のプロジェクトに特化して開発、使用されていていることが多いため、他のユーザーが使用するために必要な汎用マニュアルやガイドブック（コードやモデルの検証、確認の情報を含む）、解析事例集などの整備が必ずしも十分になされていない。今後は様々なユーザーの利用を想定してその環境を整備するため、必要なマニュアルやガイドブックなどを知識ベースとして提供することが必要である。

すでに述べたように、データに関しては、H17取りまとめまでの研究成果の一部を、データベース（ソフトウェア）として整備するとともに広く公開を行ってきている。例えば、「深地層の科学的研究」¹⁸⁾では、地質環境の長期安定性に関するデータベースとして、第2次取りまとめ以後、「最近約10万年間の隆起速度分布図」、「地すべり地形分布図」、「坑井温度プロファイルデータベース」、「温泉化学データベース」などの整備を行い、このうち「坑井温度プロファイルデータベース」は原子力機構のホームページで公開している（<http://www.jaea.go.jp/04/tono/siryou/welltempdb.htm> 2006.0906）。2つの深地層の研究施設計画のうち、瑞浪における超深地層研究所計画では、地層科学研究データベース²³⁾や瑞浪超深地層研究所における工程情報管理システム²⁴⁾などの整備が進められており、幌延深地層研究所計画においても同様なデータベースの開発が今後整備される予定である。

「工学技術の開発」¹⁹⁾では、これまでに緩衝材基本特性データベースが整備され、原子力機構のホームページにおいて公開されている（<http://migrationdb.jaea.go.jp/bufferdb/> 2006.0906）。「安全評価手法の開発」²⁰⁾においては、熱力学・収着データベースが整備され、同様に原子力機構のホームページにより公開されて幅広い利用者を得ている（<http://migrationdb.jaea.go.jp/> 2006.0906）。

また、ドキュメントに関しては、現在、原子力機構全体で整備されている「研究開発報告

書類データベース」、「外部発表データベース」に個別に登録・管理が行われている（<http://jserv-internet.jaea.go.jp/JP/toppage.asp> 2006.09.06）。第2次取りまとめに関しては、「H12 総合評価システム」（ドキュメントベース）として整備し、平成17年度まで原子力機構のホームページにおいて公表を行ってきた。今後は、成果として得られる情報量が急増すると予想される深地層の研究施設計画などを勘案して、知識管理に基づく包括的なデータベース開発戦略を検討することが重要である。この際、従来個別に開発が行われてきたデータベースは、知識としての複雑な相互関係が十分に考慮されていないことに留意する必要がある。このため、すでに述べた知識の構造化に基づき、相互関係を考慮したリレーションデータベースによるアプローチなどを視野に入れた検討を行うことが有効と考えられる。

④ 経験・ノウハウ

経験に基づく知識については、上述した技術報告書の他にマニュアルやガイドブックとして、可能な限り文書化することが重要である。ただ、専門家（あるいはその集団）が有する知識の全てがこのような文書によって明示的に捉えることができるかというとそうではない。専門家が参加する適切に構造化されたトレーニングプログラムを立案できれば、上記のような知的資源の本質的な部分をより多く引き出し管理できると考えられる。例えば、特別に開発したエキスパートシステムを、一線を退いた経験的知識の豊かなスタッフが運営するといった方法によって、知識の継承とともに、人的資源の有効活用を図ることが重要と考えられる。

原子力機構では、これまで地質環境条件、処分場の工学技術、システムの安全評価に関する調査や解析、評価において様々な経験・ノウハウを蓄積してきた。例えば、ボーリング調査手法に関しては、実際の調査を通じた経験・ノウハウが取りまとめられ¹⁸⁾、次のボーリング調査計画^{例えば25)}の策定に活かされている。しかし、これらの経験・ノウハウの多くは文書化されずに研究者個人に蓄積されているのが現状である。今後は、こうした経験・ノウハウに関して可能な限り文書化し、手順マニュアル/ガイドブックなどとして蓄積していくとともに、その一部に関してはエキスパートシステム化の検討を行っていくことが必要である。このような文書化と併せて、人から人へと経験・ノウハウを継承していく仕組みを知識管理システムの中に構築することも重要である。

⑤ 統合化した知識

様々な学問的領域にわたる知識を一元的に集積する一方で、総合性能評価のようなプロセスを経て、多角的な情報を目的とする方向に統合していくことが必要となる。図5に示したセーフティケースの論証構造のテンプレートも地層処分システムの安全性を示すための知識統合の一つと考えることができる。これは、知識を積み重ねた、構造的には上位の統合の一例であるが、深地層の科学的研究で検討が進められている、地下水流动解析による移行経路や移行時間の推定結果や放射性同位体による地下水年代測定値、さらには水質形成メカニズムに関する情報間の整合性の確認などもより下位のレベルでの知識統合も存在する。知識ベースには、一元的／包括的に集積した知識を基盤として統合を行うための作業環境を整え、それがユーザーによる活用を通じて新たに統合化した知識を創出していくための空間として機能することが重要である。

エキスパートシステムによって、いくつかの領域においてこのような機能を効果的に支援できる可能性がある。そのためには、先進的かつ高度なIT技術や知識工学の技術を継続的

に調査し必要に応じてそれを導入し、繰り返し改善していくことが必要である。知識統合のための作業内容をすべて自動化することは極めて難しいと思われるが、部分的にこれを行うことは可能と考えられる。長期的な視点に立てば、少しづつ自動化が進むことにより、知識と経験を持った限られた人材が統合に向けて作業する時間を短縮するとともに、統合作業をより広い層の人材に開放することが期待できる。

具体的な知識の統合化に関しては、例えば「地質構造の推定」、「地下水の化学特性の推定」、「地質環境条件を考慮した性能評価用分配係数（Kd 値）の設定」といった作業を挙げることができ、これらに関連してどのような知識をどのように整理して知識統合として示すかをユーザーの要件・要望を取り入れながら明確にするとともに、エキスパートシステム化も視野に入れて検討を行っていく必要がある。

⑥ ガイダンス

知識を効率的に創出／統合していくためには、セーフティケースを作成するために必要でこれまでに十分に整備されていないような知識項目を明確にするとともに、将来的な予想も含めたユーザーからの要件や要望を的確に把握し、知識を生産している研究開発セクターへその生産活動のガイドンス（指針）として示していくことが必要である。ガイドンスは、技術的な視点に加え実施主体や規制機関の動向、社会環境の変化、国の政策などを考慮しつつ作成される知識の一種であり、研究開発セクターで創造される知識がユーザーや社会にとって有益なものであるかどうかを判断するための根拠となるものである。ガイドンスを作成するためには、セーフティケース作成のためのテンプレート（図 5）の利用や、知識管理システムにおけるコミュニケーション機能を活用して明らかにされるユーザーからの要件や要望を考慮するとともに、シンポジウムなどあらゆる機会に発せられる質問や懸念を念頭においておくことが重要である。

研究開発セクターにおける知識の創出作業は、場合によっては長い期間を必要とする。知識の開発に非常に時間がかかる場合には、そのような知識がいつ求められるかを見し必要であれば現時点で直ちに研究開発を開始することが必要である。ガイドンスの要件としてこのような予見性をあげることができ、これを可能とするためには、知識管理システムに他分野の先進的な知識やアイディアを活用するシンクタンクを持つことが有効と考えられる。シンクタンクのメンバーは、地層処分に直接的に関係のない様々な分野から広く選ばれることが望ましい。

以上のように、ガイドンスについては、セーフティケースの論証構造のテンプレートなどの技術的な知識やユーザーからの要件・要望、シンクタンクによって示される将来シナリオや予見される要件によって構成される。ガイドンスの開発は、研究開発を実施する過程でのボトムアップ的な課題抽出という古典的なアプローチだけではなく、社会状況などを考慮したいわばトップダウン的な知識創出の視点を与えるという意味で、これまでに類のない新しい課題と言える。

⑦ プрезентーション素材

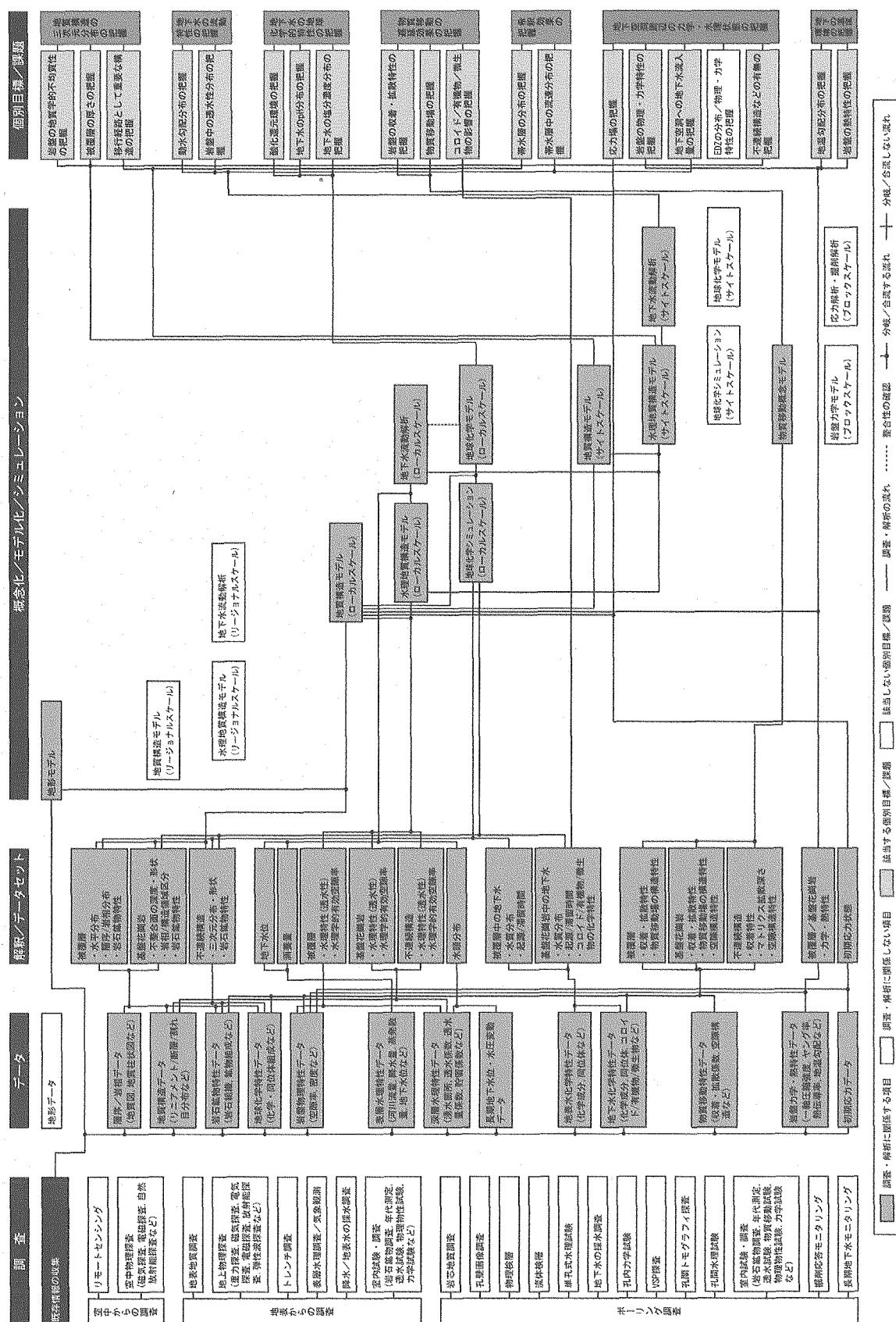
知識の提供を行ううえでは、幅広いユーザーが存在することを常に意識しなければならない。こうしたユーザーの視点に立てば、大量の知識の詳細を閲覧できるということだけではなく、必要な知識に的確にアクセスできることが必要である。このため、凝縮された情報を簡潔かつグラフィカルにプレゼンテーションするなど、知識発掘のための創造的な環境やユーザーフレンドリーな環境の整備を行うことが知識ベースの開発においては極めて重要

な要素の一つである。

プレゼンテーション素材については、例えば「地質環境の長期変動のビジュアル画像」などが挙げられるが、従来はユーザーとして主に専門家を対象とした知識の開発が行われてきたため、「Geofuture 21」²⁶⁾のような良い例もあるが、上記のような観点での知識化についての検討はそれほど進んでいるとはいえない。今後は、ユーザーの要件・要望を取り入れながら、プレゼンテーション素材としての知識化を進めていくことが必要である。

4. 2 知識項目間の関連性の検討に基づく知識構造の変更

これまでの地層処分技術の取りまとめ（第2次取りまとめ、H17 取りまとめ）では、「深地層の科学的研究」、「工学技術の開発」、「安全評価手法の開発」の個々の分野において、一般に調査、解析、評価といった流れの中で知識の関連性が捉えられているということができる。例えば、「深地層の科学的研究」では、安全評価および地下施設の設計・施工への情報提供という観点から整理した調査研究の個別目標と課題に対し、地上からの調査手法の種類とその組み合わせ、取得するデータの種類（量についてはフローには明示されていないが付随情報として明らかにされている）、データの解釈および解析のためのデータセットの設定、モデル化とシミュレーションの実施および結果の評価に関して、種々の情報の流れの関係を統合的に示した統合化データフローを作成している（図 13）¹⁸⁾。「工学技術の開発」では、人工バリアの設計から処分場の建設、操業、閉鎖に至るまでの一連の検討の流れが示されている（図 14）¹⁴⁾。また、「安全評価手法の開発」の研究成果^{15) 20)}から、分配係数の生データから最終的に安全評価のためのパラメータとして設定を行うまでの作業の流れは、図 15 のように整理することができる。

図 13 統合化データフロー（深地層の科学的研究）の例¹⁸⁾

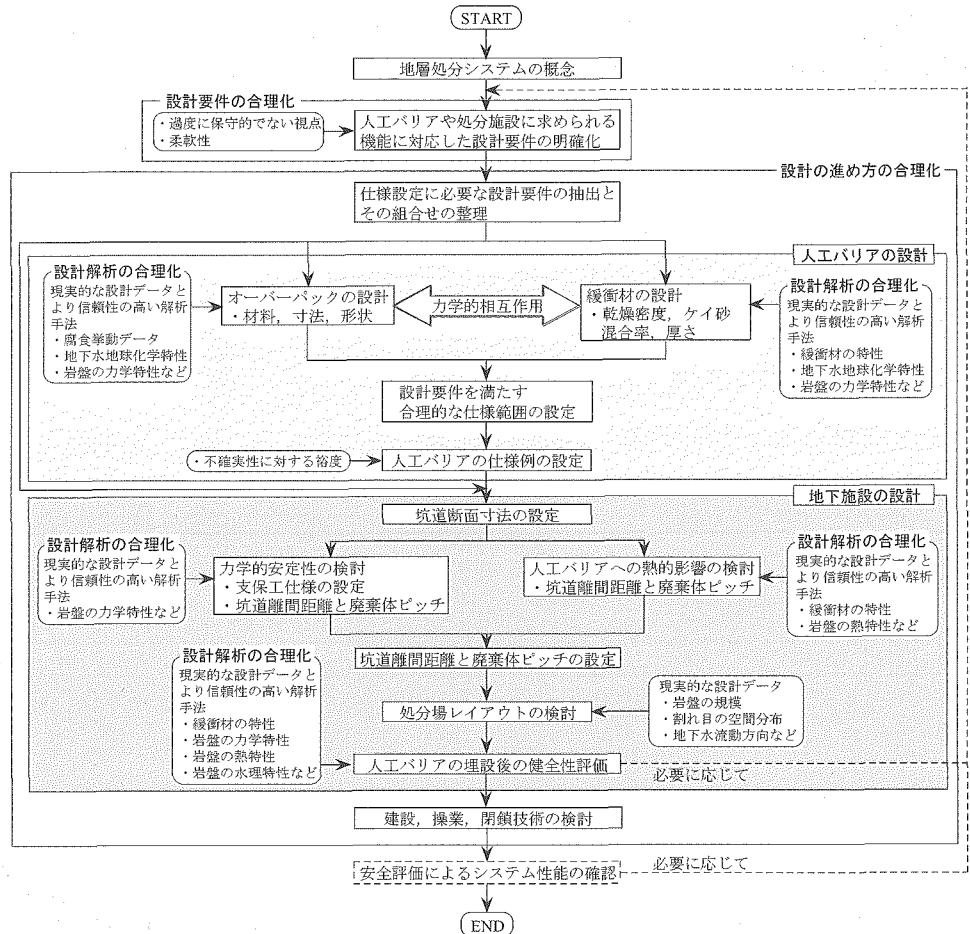


図 14 人工バリア設計から処分場の建設、操業、閉鎖に至るまでの
一連の検討プロセス（工学技術の開発）¹⁴⁾

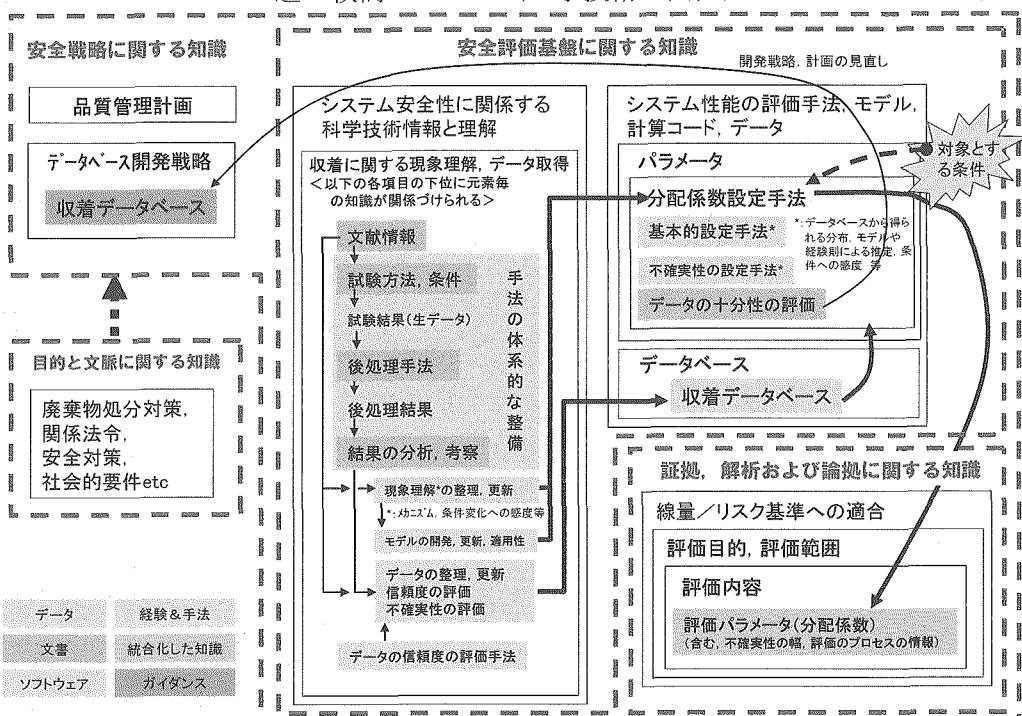


図 15 分配係数の測定から安全評価のためのパラメータ設定までの流れ

調査、解析、評価といった流れの中で知識の関係性を検討することによって、2.1 節で示した知識構造をより実際的なものとして変更していくことが可能である。以下に、図 13、14、15 で示した情報の内容と関連性を、図 4 に示した「安全評価基盤に関する知識」に関する構造にフィードバックして構造変更を試みた例を紹介する。

「深地層の科学的研究」に関しては、図 13 に示した統合化データフローにおける知識とそれらの関連性に基づき、図 4 に示した安全評価基盤の要素である「システム概念」の下位の知識項目である「地質環境」に関連するさらに下位の知識項目の詳細化が行なわれ、図 16 に示すような構造に変更することが一例として示されている。ここで「地質環境」の下位の知識項目として、戦略的な知識を格納する「サイト特性調査の考え方」、地質環境データの品質を管理しつつ一元的に格納する「地質環境データベース」、個々の地質環境調査技術や体系的な方法論を格納する「地質環境調査技術」、および地質環境データの解釈や空間分布の推定を含めた地質環境のモデル化、予測解析技術やこれらのノウハウを格納する「モデル化・解析技術」が設定されている。これら 4 つの項目のうち、「地質環境調査技術」に注目し、段階的な調査を基軸としてさらに詳細な階層構造が部分的に例示されている。

「工学技術の開発」に関しては、図 4 に示された「安全評価基盤に関する知識」のうち、図 14 の内容を参考に、「システム概念」の下位の知識項目を、「適切な処分サイトの選定手法」「適切な処分場施設の構築方法」としたうえで、「適切な処分場施設の構築方法」を対象として、階層的に知識項目の抽出が試みられている（図 17）。「適切な処分場施設の構築方法」の下位の構造は、「人工バリアの設計／施工技術」、「地下（／地上）施設の設計／施工技術」、「処分場の建設、操業、閉鎖」の 3 つに分類し、さらに各々の知識項目が関連づけられている。

「安全評価手法の開発」に関しては、図 15 に含まれる分配係数に関する情報や相互の関連性に基づき、図 4 の「安全評価基盤に関する知識」の中で関係する「システム安全性に関する科学技術情報と理解」および「システム性能評価手法、モデル、計算コード、データ」を対象として、階層的に知識項目の詳細化が試みられている（図 18）。「システム安全性に関する科学技術情報と理解」においては、収着に関する現象理解とデータ取得に関して、下位の知識項目へ展開が図られている。知識項目を階層化することにより、試験方法や条件、測定データの後処理方法、データの信頼度の評価手法などの「個々の作業方法」に関する知識、試験結果や後処理結果としての「個々のデータや情報」に関する知識、それら一連の項目を体系的な手法として整備する知識などが関連づけられている。

ここで注意すべきことは、これらのフィードバック作業がそれぞれの研究分野の専門家によって独立に実施されていることである。図 16～18 を比較してみると、「システム概念」の下位の知識項目は、統合化データフローに基づく知識構造の変更案（図 16）と、処分場の設計フローから出発して展開された構造案（図 17）とで異なっている。一方、統合化フローには処分場の設計や安全評価に必要な情報を生産することが目標として設定されており、また、処分場の設計仕様は安全評価を行ううえで考慮される情報となる。こういった知識の関係性が図 16～18 の間で整合的に関係付けられている必要がある。現在の構造変更案では、図 16～18 間で知識項目の詳細度のレベルに差があり、このような整合性を確認することができるようなものにはいたっていない。作成された構造案に関するこれらの点をさらに横断的に検討するとともに、他の知識項目についてもこのような作業を進め、変更された知識構造全体がセーフティケースの一般概念に即したものであることを確認する必要がある。このような作業の結果は、逆に図 13～15 にフィードバックすることにより、そこに含まれている知識やそれらの関係性について再検討を行う材料とすることができる。

知識ベースの開発にあたっては、以上のような作業を繰り返し体系的に進め、全体として網羅

的で整合の取れたものとすることが必要である。

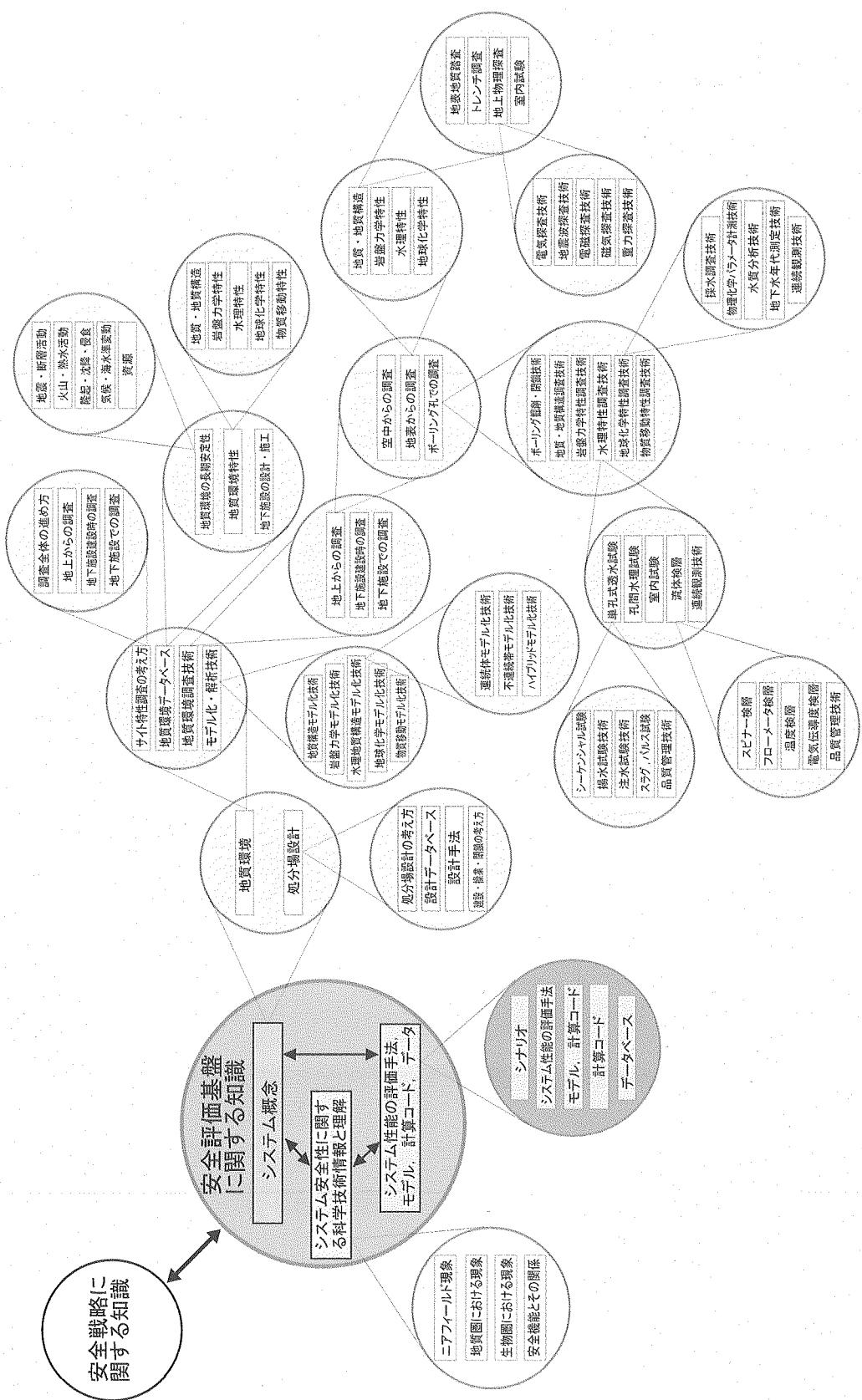


図 16 統合化データフロー（図 13）に基づく知識構造の変更例（本文中の議論参照）

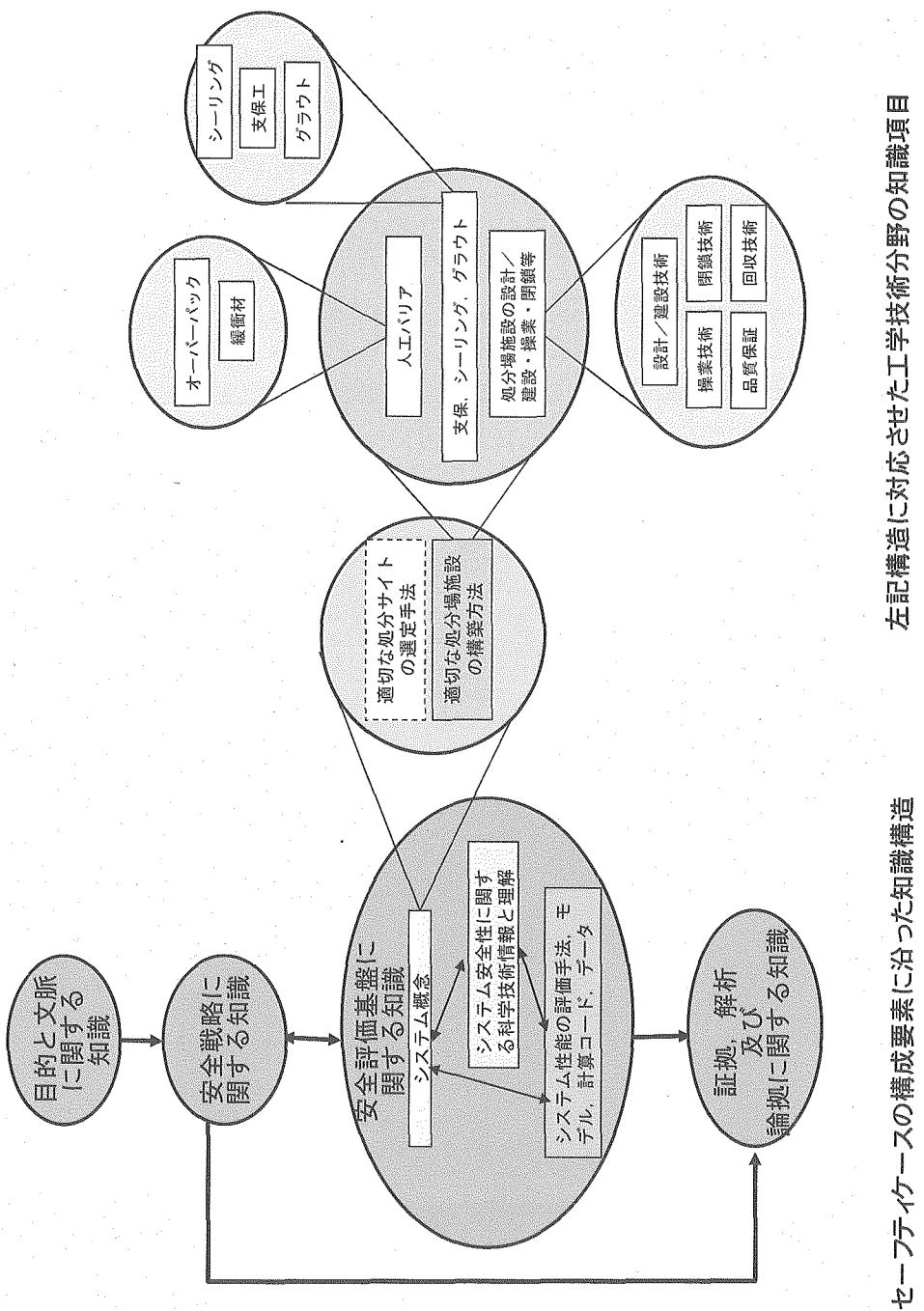


図 17 処分場の設計フロー（図 14）に基づく知識構造の変更例（本文中の議論参照）

左記構造に対応させた工学技術分野の知識項目

セーフティケースの構成要素に沿った知識構造

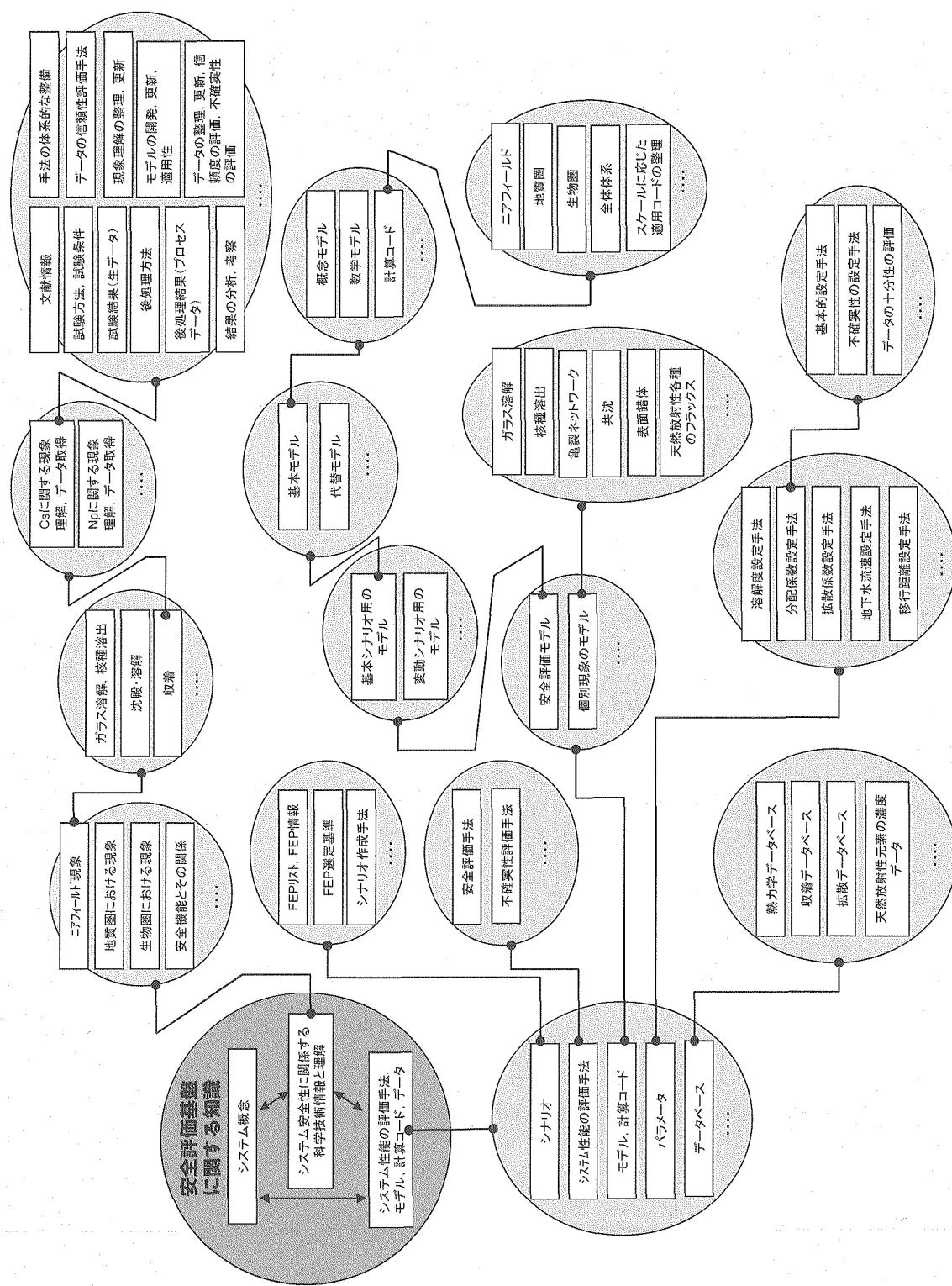


図 18 分配係数の測定から安全評価のパラメータ設定にいたる作業フロー（図 15）に基づく
知識構造の変更例（本文中の議論参照）

以上のような検討を通じて抽出される知識項目のそれぞれについて、知識の類型化の状況を調べることによって、知識化のための今後の方向性を明らかにすることができます。このような作業は、図12に示したような知識ベースを開発していくうえで必要である。上述したように、図16～18に示した知識構造は一次案であり、さらに検討が行われなければならないものであるが、ここでは、これらを例として、知識の類型化の現状を概略的に把握することとする。この作業では、それぞれの知識項目について、その類型化あるいはその試みが認められるかどうかを確認することが主たる目的であり、その充分性について厳密な議論を行っているものではない。こうした現状に基づき、当面目標とすべき類型化について併せて検討を行っている。

表4は、統合化データフローに基づいて抽出された知識項目案(図16)に対する検討例である。知識項目「地質環境データベース」に関わる部分をみると、現在、得られたデータをデータベース（ソフトウェア）として順次登録しつつあるものの十分に整備された状況にはない。また、追跡性や透明性を含めたデータの品質管理についての課題も残されており、品質管理の方法の確立とそれに基づく文書化が今後の重要な課題である。知識項目「サイト特性調査の考え方」と「地質環境調査技術」については、文書化が十分になされていないのが現状であり、早急な対応が必要と考えられる。これらの知識項目は、将来的には「経験・ノウハウ」および「統合化した知識」として整理を行っていくことが重要であり、研究者、技術者が有する経験・ノウハウをより詳細なレベルで洗い出し、表出化していくことが求められる。

処分場の設計フローに基づいて抽出された知識項目案(図17)についての検討例は表5に示すとおりである。知識項目「人工バリアの設計／施工技術」、「地下（／地上）施設の設計／施工技術」、「処分場の建設、操業、閉鎖」については、データベースおよびドキュメントは整備されてきているが、「経験・ノウハウ」、「統合化した知識」としての整備は十分ではなく、今後の課題である。

分配係数の測定から安全評価パラメータの設定にいたる作業フローに基づく知識項目案(図18)については、表6に示すように、例えば、「現象理解、データ取得」に関する知識項目については、論文や技術資料として、目指すべき知識の類型（データ、ドキュメント）に該当するものが存在する。これには、データ取得に関する公開論文や、学会で行われた試験方法の標準化なども該当する。ただし、ページ数の制限や結果に重点を置くことなどにより、実務に関して研究者が有する試験方法の詳細などの知識がユーザーにとって利用しやすい形で整理されている例は少なく、十分とはいえない。分配係数設定手法などについては、「経験・ノウハウ」に該当する知識が特に重要であるが、現状では十分ではなく、具体的に存在しているのは概念的あるいは概要的な記述（ドキュメント）で、しかも部分的なものにとどまっている。これらのことから、今後の知識整備の課題として、データ取得に関する知識については、引き続き論文等で対外的に報告することとあわせ、詳細な試験方法などをユーザーにとって利用しやすい形で文書化することが必要である。また、分配係数設定手法などについては、体系化に関わる検討を進めるとともに、試験方法や条件、安全評価の目的に応じたデータの取捨選択の判断などに関わる知識を、ユーザーにとって利用しやすい形である「経験・ノウハウ」として整理することが必要となる。

表4 統合化データフローに基づく知識項目と類型化の状況（「深地層の科学的研究」の一部）

知識項目	知識の類型						
	データ	ドキュメント	ソフトウェア	経験・ノウハウ	統合化した知識	ガイダンス	プレゼンテーション素材
安全評価基盤に関する知識							
システム概念							
地質環境							
サイト特性調査の考え方							
調査全体の進め方		✓					
地上からの調査		✓					
地下施設建設時の調査							
地下施設での調査							
地質環境データベース							
地質環境の長期安定性							
地震・断層活動							
火山・熱水活動	✓						
隆起・沈降・侵食	✓						
気候・海水準変動	✓						
資源	✓						
地質環境特性							
地質・地質構造	✓						
岩盤力学特性	✓						
水理特性	✓						
地球化学特性	✓						
物質移動特性	✓						
地下施設の設計・施工							
....							
地質環境調査技術							
地上からの調査							
空中からの調査		✓					
....							
地表からの調査		✓					
地質・地質構造	✓						
地表地質踏査	✓						
....							
トレンチ調査		✓					
....							
地上物理探査		✓	✓				
電気探査技術		✓	✓				
地震波探査技術		✓	✓				
電磁波探査技術		✓	✓				
磁気探査技術		✓	✓				
重力探査技術		✓	✓				
室内試験		✓	✓				
....							
岩盤力学特性		✓					
....							
水理特性		✓					
....							
地球化学特性		✓					
....							
ボーリング孔での調査		✓			✓		
ボーリング掘削・閉鎖技術		✓			✓		
....							
地質・地質構造調査技術		✓			✓		
....							
岩盤力学特性調査技術		✓			✓		
....							
水理特性調査技術		✓			✓		
単孔式透水試験		✓					
シーケンシャル試験		✓					
揚水試験		✓					
注水試験		✓					
スラグ・パルス試験		✓					
品質管理技術		✓					
孔間水理試験		✓					
....							
室内試験		✓					
....							
流体検層		✓					
スピナ検層		✓					
フローメータ検層		✓					
温度検層		✓					
電気伝導度検層		✓					
品質管理技術		✓					
連続観測技術		✓					
....							

凡例:

■: 当面、目標とすべき知識の類型
✓: 現在、主として存在する知識の類型

表 5 設計フローに基づく知識項目と類型化の状況（「工学技術の開発」の一部）

知識の階層構造	知識項目	知識の類型					
		データ	ドキュメント	ソフトウェア	経験・ノウハウ	統合化した知識	ガイダンス
人工バリア	オーバーパック	✓	✓				
	緩衝材	✓	✓	✓			
支保・グラウト・シーリング	シーリング	✓	✓				
	支保工(低pHセメント)	✓	✓				
	グラウト	✓	✓				
処分場施設の設計／建設・操業・閉鎖等	施設設計／建設技術	✓	✓				
	操業技術	✓	✓				
	閉鎖技術	✓	✓				
	品質管理		✓				
	回収技術		✓				

凡例:

□: 当面、目標とすべき知識の類型

✓: 現在、主として存在する知識の類型

表 6 知識項目と類型化の状況（「安全評価手法の開発」の一部）

知識の階層構造	知識項目	知識の類型					
		データ	ドキュメント	ソフトウェア	経験・ノウハウ	統合化した知識	ガイダンス
安全評価基盤に関する知識	システム安全性に関係する科学技術情報と理解						
	ニアフィールド現象						
	収着						
	Csに関する現象理解、データ取得						
	文献情報		✓				
	試験方法、試験条件		✓				
	試験結果(rawデータ)	✓	✓				
	後処理方法		✓				
	後処理結果(processedデータ)	✓	✓				
	結果の分析、考察		✓				
	手法の体系的な整備		✓				
	データの信頼性評価手法		✓				
	現象理解の整理、更新		✓				
	モデルの開発、更新、適用性		✓				
	データの整理、更新、信頼度の評価、不確実性の評価		✓				
	...						
	システム性能の評価手法、モデル、計算コード、データ						
	バラメータ						
	分配係数設定手法						
	基本的設定手法		✓				
	不確実性の設定手法		✓				
	データの十分性の評価		✓				
	データベース						
	収着データベース		✓	✓			

凡例:

□: 当面、目標とすべき知識の類型

✓: 現在、主として存在する知識の類型

4. 3 知識ベース開発のアプローチ

4.2 節の検討を通じて、知識ベース開発のためのアプローチを論ずるうえで重要となる、以下のことが明らかとなった。

- ・セーフティケースの一般的な構成要素から知識項目を階層的に詳細化することが可能であり、この知識の構造化は有効である。個々の研究開発分野で進められる「調査、解析、評価」という一連の作業の流れに沿って知識を分析することによって明らかにされる知識項目とそれらの関連性に基づいて、上記の知識構造を更新することが可能となる（こうした作業フロー自体、「統合化した知識」の一種である）。このような作業を、包括的かつ体系的に繰り返し行うことによって全体として整合の取れた知識ベースの開発を進めが必要である。
- ・知識ベースの構成要素である「知識の類型」のうち、「経験・ノウハウ」、「統合化した知識」としての整備が一般に不足している。これらに留意し、今後の研究開発においては、データ、ドキュメントの整備はもとより、経験・ノウハウの知識や統合化した知識を整備していくことが重要な課題として挙げられる。

2.1 節に示した考え方に基づき、地層処分技術の知識は、セーフティケースの一般的な構成要素（図3）から次の手順で階層的に構造化を行う。

- ・セーフティケースの構成要素を特徴づける内容を「知識項目」として明らかにする。知識項目は関連する知識の集合体である。
- ・知識項目は、関連性を考慮して階層的に構造化する。上位の知識項目は、より分解された下位の知識項目から構成される。
- ・それぞれのレベルで相互に関連性の高い知識項目は知識の集合体として取りまとめておく。この知識の集合体の最上位に位置する構造として、図3に示したセーフティケースの構成要素を対応させる。

階層化された知識の相互関係はその内容によって様々な形態を有する。また、このような関係性は、セーフティケースがどのように作成されるかに依存して、また知識の時間的変遷に伴って変化する。そのため、これら知識の関係性を緩やかな表現によって包括的に示すとともに、動態的変化に柔軟に対応することが可能になるよう、エージェントなどの知識工学的手法²⁷⁾²⁸⁾を活用しながら関連づけを行うことが有効であると考えられる。

このように階層化された知識は、活用のしやすさに留意しながら、データベースやドキュメントベースを基本として保管するとともに、知識の活用の視点に応じて、ソフトウェア、経験・ノウハウ、統合化した知識、ガイダンス、プレゼンテーション素材に類型化し保管する。また、研究開発における実際の調査、解析、評価という一連のプロセスで知識を関連づけることによって、方法論などの経験・ノウハウ、エキスパートシステムなどの統合化した知識として必要な項目を明確にすることができます。例えば、ある知識が更新されると知識構造に反映されている関連性にしたがって更新内容が適切に伝播するようするため、エージェントなどの知識工学の手法を活用しながら、知識の動態的変化に柔軟に対応することが可能なシステムを構築することが必要である。

知識の類型の一つであるガイダンスには、セーフティケースの論証構造（図5に示されたテンプレートがその一例）を含めることができる。この論証構造は、実施主体や安全規制機関など、地層処分計画に関わる様々なステークホルダーが行うセーフティケースの作成やその妥当性の評価、地層処分計画の様々な時期における意思決定への活用という観点から重要な知識である。こ

のため、上記のように構造化された知識は、「概念レベル」でセーフティケースの論証構造と関連づけることが必要である。この関連づけについては、地層処分計画の進展により動態的に変化することに留意し、構造化した知識が再利用可能となるよう、オントロジーなどの知識工学的手法²⁹⁾³⁰⁾を活用することが考えられる。

また、ユーザーの要件・要望に留意しながら、これらに対応する課題を明確とするための支援、性能評価および処分場の設計とリンクしたサイト調査計画策定の支援、性能評価や処分場設計の支援など、ユーザーの活用という視点に立った汎用的知識を、同様にオントロジーなどの手法で構築し、ガイダンスとして蓄積する。さらに、情報検索機能として自然言語処理技術を用いたテキストマイニングやデータマイニング、ニューラルネットワーク技術などを用いた機械学習²⁸⁾などの機能を適宜構築し、ユーザーが活用しやすい、かつ自律的な知識ベースを構築する。

5. 知識創造

知識創造は、研究開発セクターとシンクタンクの2つの機能（図10参照）によって実現される。

研究開発セクターは、研究開発を継続的に実施することによって主に漸進的知識創造を担う。研究開発セクターは、知識ベースにおける主要な知識の欠落を把握し、研究開発の課題を設定するとともに、知識創造のための様々な研究の場を設定し、焦点を絞って新たな知識を創造する。得られた知識は可能な限り形式知として表出化（図20に関連して以下に説明する知識創造プロセスのモデル（SECIモデル）参照）し、構造化された知識の一部として組み入れるとともに、その内容に応じてデータベース、ドキュメント、マニュアルやガイドブック、エキスパートシステムの推論エンジンといった類型として知識ベースに蓄積する。例えば、深地層の研究施設計画で行った地上からの調査では、地質の専門家がこれまでの経験・ノウハウを基にして断層かどうかを判定し、地質構造モデルを構築している（図19(a)）。このような経験・ノウハウをエキスパートシステム化するとともに、新たな知識に基づいて継続的に推論ルールを進化させていくことが重要である（図19(b)）。

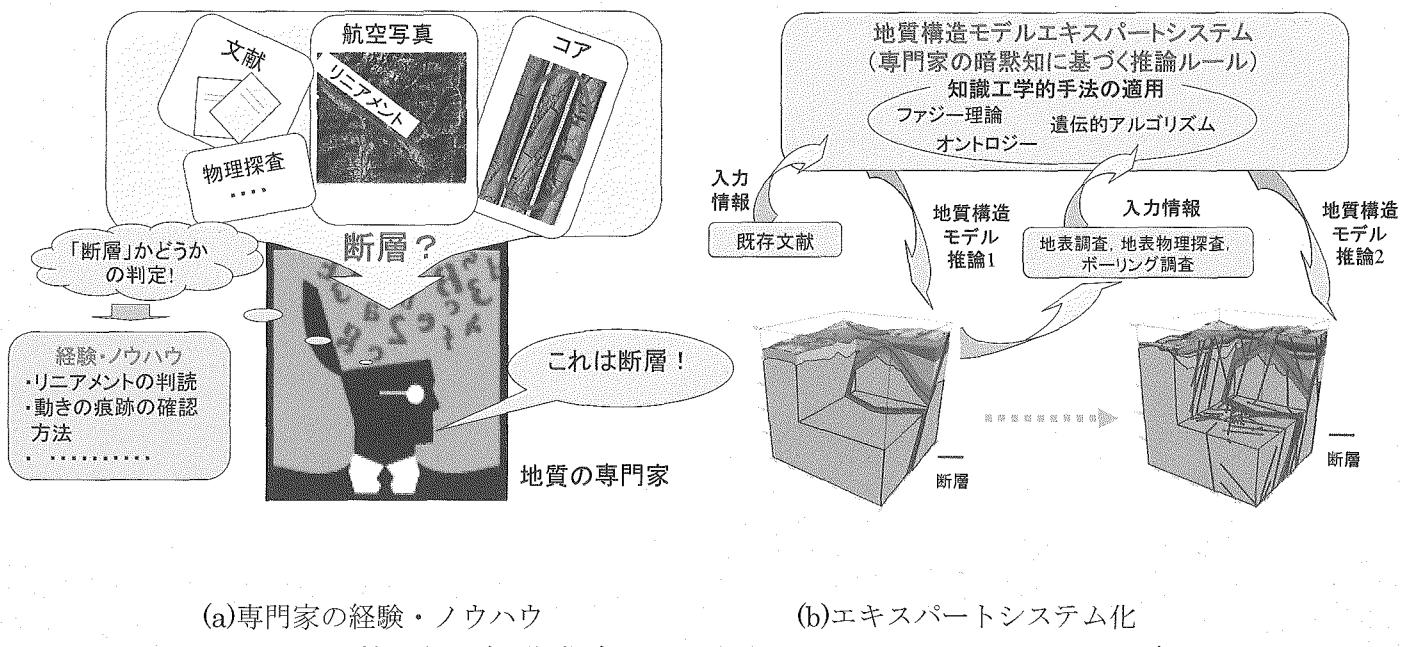


図19 地質構造モデル作成プロセスのエキスパートシステム化のイメージ

一方、表出化が困難な暗黙知は、研究開発の“場”の中で、経験者と未経験者が協働作業することによってこれを共有するといった人材トレーニングを通して知識の伝承を行う。これらを通して作成されるトレーニングマニュアルも知識ベースの重要な要素である。

これらの知識創造プロセスは個々の研究開発において、これまでにも実際に行われてきている。例えば、瑞浪の超深地層研究所計画では、ボーリング調査に豊富な経験を有するスイス放射性廃棄物管理共同組合（Nagra）の研究者が、ボーリング現場において共に掘削・調査を行いながら原子力機構の研究者を指導した。これらの協働作業を通じて理解した内容をボーリング調査技術の方法論に関するマニュアルとして取りまとめるとともに、次のボーリング調査計画に活かしている（図20）。

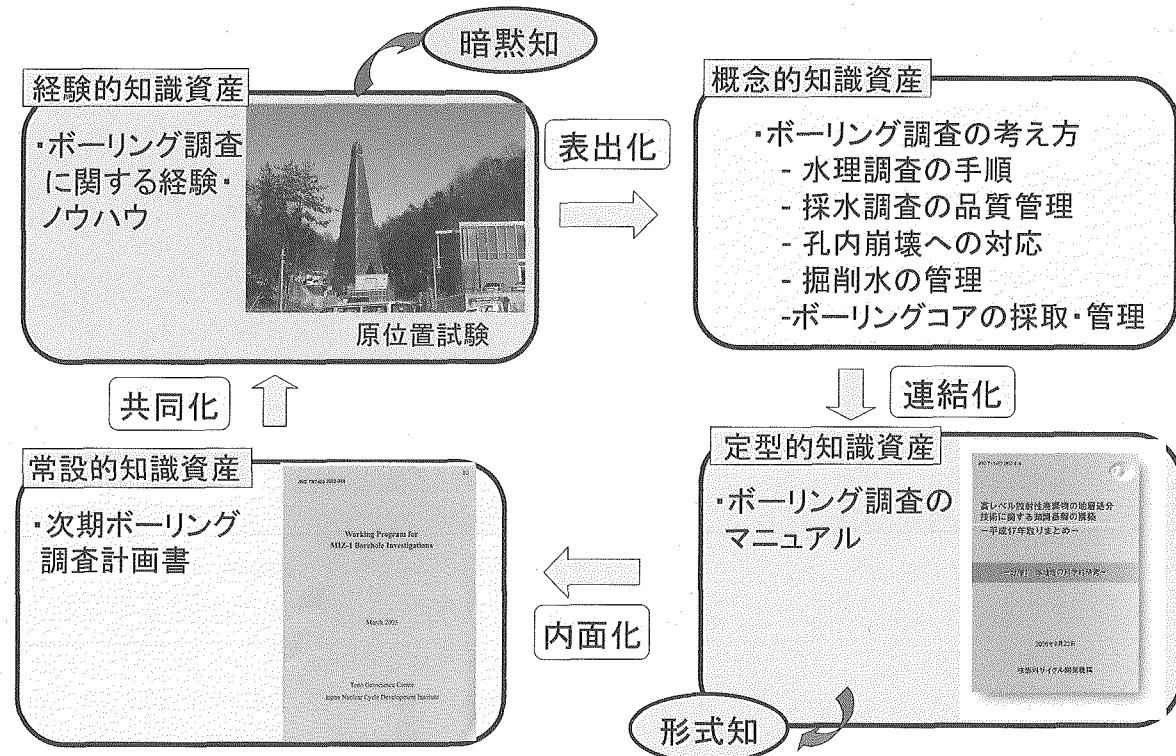


図 20 暗黙知から形式知への変換の例

このように、研究開発セクターでは、知識経営の分野で提案されている知識創造プロセスの概念³¹⁾が適用可能である。知識創造プロセスは、暗黙知と形式知の相互変換であり、その循環的なプロセスを通じた知識の質的・量的な発展のことである⁴⁾。この知識創造プロセスにおいては、適切な“場”造りが重要とされている。“場”とは、「単に物理的な場所ではなく、ネット上の議論も含め、人々の間で共有されている文脈や状況、場面、さらに、関わる人々の関係性を意味する」ものであり、雑談から、オフィスでの会議、大規模なコンファレンスまで、あらゆる“場”が知識創造の場となる。

シンクタンクは、様々な分野の知識人グループによる革新的知識創造の機能である。シンクタンクは、長期的な地層処分プログラムの目標を知識ベースによって確認しながら、技術的、社会的な将来のシナリオを想定しつつ、予見される要件や知識を提案する。革新的知識創造によるブレークスルーは、シンクタンクにおける議論や洞察によって、技術的、社会的な将来シナリオなどの革新的な知識を創造するプロセスである。本プロセスには、技術評価法の一つとして発展してきたシナリオ・プランニングの考え方や方法などが適用可能であると考えられる。シナリオ・プランニングは、現実の世界に不確実性が存在することを否定せず、将来を的確に予測することはできないという事実を出発点として、想定される未来の事業環境を複数の一貫性あるストーリー（シナリオ）として明らかにする。想定されるシナリオが実現しても対応可能な戦略オプションを用意することで不確実な未来に備えようという考えが、シナリオ・プランニングの基本コンセプトである。正確に唯一無二の未来を予測するのではなく、起こり得る可能性の高い未来を複眼的に捉えることで、合理的な意思決定をサポートすることを目的としたものである³²⁾³³⁾。

⁴⁾ こうした暗黙知と形式知の相互変換のプロセスは、SECI モデルと呼ばれ、共同化 (Socialization)、表出化 (Externalization)、連結化 (Combination)、内面化 (Internalization) の 4 つの変換モードからなる。

6. ユーザーとのコミュニケーション

地層処分技術の知識ベースは公開を前提としており、これに対しては実施主体、安全規制機関、学術的な専門家（地層処分分野、その他の分野）、公衆など、様々なユーザーが想定される。

コミュニケーションシステムには、これら様々なユーザーとの課題の共有を可能とする機能を備える必要がある。具体的には、コミュニケーションシステムを通して得られるユーザーの要件・要望や、研究開発の成果報告会などの意見などから地層処分技術に関する課題を抽出、整理、更新する機能が必要となる。コミュニケーション機能は、すでに述べたように知識ベースの開発にあたって重要な役割を果たす。

ユーザーとの間には、いわゆる“情報の非対称性”が存在することに留意し、コミュニケーションの仕組み（コミュニケーションシステム）を作ることが必要である¹⁾。ユーザーのうち、実施主体、安全規制機関、学術的な専門家（地層処分分野）は、各々の知識の質と量とは異なるものの、地層処分技術に関する基本的な知識を有している。このため、コミュニケーションシステムの構築においては、効率性、迅速性、効率性、合目的性などが重要な視点となる。単に知識ベースを活用し、要件・要望を示すだけではなく、例えば、「現在与えられた地質環境条件において、想定される what-if シナリオのオプションは？」といった課題に対し、共通の知識ベースにアクセスして分析、議論を行いながら知識を共有し、ユーザーが問題解決や意思決定を行うことができるよう支援するといったコミュニケーションシステムを構築することが必要である。このようなコミュニケーションシステムとしては、一般に用いられる検索やオーダーメード検索、電子会議室（掲示板）の他に、知識管理の分野で提案されているグループウェアの適用が可能と考えられる。グループウェアとは、共同作業するグループワーク専用に設計されたコンピュータ支援システムの総称であり、小集団、チーム、組織などの時間と空間の制約を取り去り、それぞれの抱える問題の創造的解決のための各種機能を実現する³⁴⁾。グループウェアは、非同期・遠隔型グループウェアの一種である電子メールからスタートし、同期・同室型グループウェアであるデジジョンルームの研究開発を経て、現在は、マルチメディア・ネットワークを駆使した同期・遠隔型グループウェアである在席型会議システムの研究が行なわれるなど、様々な形で発展してきている³⁴⁾。また、知識創造理論³¹⁾を用いて知識創造を支援するツールの研究開発も行われている³⁵⁾。また、将来のグループウェア研究として、暗黙知の伝達を可能とするグループウェア環境の構築を目指したアウェアネス支援などの研究も行なわれている³⁴⁾。

一方で、学術的な専門家（地層処分以外の分野）、公衆などは、わが国の地層処分計画には直接的には関係していないものの、地層処分の国民的理解の促進にとって重要な役割を果たす（第3章参照）。このため、コミュニケーションシステムの構築においては、地層処分計画へのインボルブメント、理解のしやすさなどが重要な視点となる。例えば、地層処分計画や地層処分技術の開発の現状、あるいは地層処分の専門家などの意見交換の議事録や動画を情報提供することにより、地層処分技術に関する課題についての社会的あるいは倫理的な視点での意見を抽出したり、ある課題に対する意見交換の場を提供するようなコミュニケーションシステムを構築することが重要である。このようなコミュニケーションシステムとしては、活用のしやすさを考慮した検索システム、電子会議室（掲示板）の他に、コミュニケーションに参加を呼びかけるような工夫が必要となる。例えば、知識管理の分野で研究開発が進められているソーシャルウェア（コミュニティウェア）が参考となる³⁴⁾。ソーシャルウェアは、各ユーザーが面白いと思った展示内容や発表は何であったかを登録あるいは自動認識することなどによって各ユーザーの興味情報を収集し、これらを比較することにより興味が類似したユーザーに対し「○○さんはあなたと興味が近いので、一度お話ししてみてはいかが？」というような提案を行うことで、コミュニティの形成を支援

するシステムである³⁴⁾。これを活用することによって、地層処分計画へのインボルブメントの弱いユーザーから、意見を収集し、知識管理にフィードバックすることが可能となる。また、ソーシャルウェアの他にも、昨今、eシンポジウムやeコミュニティカルテといったものが、例えば三鷹市の基本計画の改定において試されている（<http://www.nttdata.co.jp/release/2004/070200.html> 2006.07.03）。eシンポジウムは、パネリストがシンポジウムで議論を行い、その様子を議事録とともにインターネットで動画として放映し、これらの内容に対する意見交換を電子会議室で行なうというものである。eコミュニティカルテは、電子会議室で地域の課題などを自由に記述することにより、地域の抱えている問題を抽出していくものである。最近では、ブログやソーシャルネットワーキングなどの利用が拡大したり、Web2.0³⁵⁾という次世代 Web の概念が提示されており、コミュニケーションシステムを構築する際はそれらが大いに参考になるものと思われる。ただし、これらの手法は開発段階にあり、その適用にあたっては、十分な検討が必要である。

7. ナレッジ・オフィス

ナレッジ・オフィスは、知識管理全体を統括する機能を果たす。

具体的には、知識創造戦略や知識管理のアプローチを構築するとともに、これらの方針に基づいて行なった知識管理の利用状況やユーザー、研究開発セクター、評価委員会における意見の分析・評価結果をフィードバックして、利用しやすい環境を整備するという視点で知識管理システムの運用や知識ベースの改良を行なう。また、必要に応じて新たな知識管理ツールの開発を行い、これを適用する。

知識ベースの利用環境を整えるためには、ナレッジ・ポータル（ワークプレースと融合した情報へのゲートウェイ（さまざまなサービスやコンテンツをポータルに一括して表示し、活用する））の活用が有効であるとされている³⁷⁾。知識の蓄積に関しては、例えばベストプラクティスを集め、それを提示するなどして、知識の登録を促進させる機能が必要である。

また、ナレッジ・オフィスは、知識ベースに登録する各々の知識の類型（データ、ドキュメント、ソフトウェア、経験・ノウハウ、統合化した知識、ガイダンス、プレゼンテーション素材）の品質管理の考え方、知識ベースの登録・更新の履歴管理やセキュリティの考え方の整備を行なう。特に地層処分技術の知識管理は、長期にわたり行なわれるため、知識を蓄積した時期の前提・制約条件や、それによる知識の質に関する状況にも留意して、知識ベースの構築・更新を行なう考えが必要となる。

さらに、知識管理システムを運営・管理するため、知識管理全般にわたり、知識創造戦略や知識管理のアプローチの内容、知識管理システムの運営・管理状況、知識ベースを評価する機能（評価委員会）が必要となる。

第1章で述べたように、調整会議においては原子力機構が行なう研究開発と資源エネルギー庁が進める調査等事業の研究開発マネジメントを行なうこととしており、この方針に基づいて他の研究開発機関における成果の知識ベースへの統合や、地層処分技術の知識基盤として不足している課題を提示する役割を果たすこともナレッジ・オフィスの役割である。

8. 国外の知識ベースとのインターフェース

本機能は、原子力機構の知識ベースに蓄積された知識を諸外国の関係機関などに向けて発信するとともに、諸外国の関係機関の知識を活用したり知識ベースに対する意見・質問を集約するためのインターフェース機能である。高レベル放射性廃棄物の地層処分に関しては、これまで地下研究施設の場としての利用など様々な形態で国際協力や共同研究が行われ、その成果は一国の知識のみならず国際的な知識基盤として共有されてきた。また、OECD/NEAなどの国際機関で作られる国際的なコンセンサスはすべての国にとって知識基盤となりうる。このため、知識基盤の国際化を図ることは、知識基盤としての信頼性を獲得するうえで、また資源配分の最適化や効率性の観点から有益である。

知識の類型のうち、特にデータ（データベース）は国際的な協力が行いやすい領域である。国際的な知識基盤を原子力機構の知識ベースとして用いる試みとして、例えば放射性元素の熱力学的データベース（TDB）や収着データベース（SDB）の開発を挙げることができる（<http://migrationdb.jaea.go.jp> 2006.08.21）。前者は、原子力機構で整備したデータベースに他で整備されたデータベース（OECD/NEAのデータベースなど）を加え、主要な地球化学計算コードで読み込みが可能なフォーマットで統一的に整備したものである。これにより、多くのデータベース群の中から計算対象として適切なものを選択し多様な計算を行うことが可能となっている。このように、データ（データベース）に関しては、諸外国の関係機関との相互補完を行ないながら、知識ベースとして整備することが有効である。

9. 平成 21 年度までの実施概要

(1) 当面の目標

中期計画に示したように、既存の知識管理の考え方や方法論を発展的に用いて、地層処分技術に関する知識ベース、及びそれを運用・管理するための知識管理システムのプロトタイプを構築し公開することを当面の目標としている。

(2) 実施概要

当面の目標達成に向け、知識管理システムおよび知識管理システムの一機能である知識ベースの開発、これらを機能させるために必要な計算機支援ツールの構築を行う。

知識管理システムに関しては、本報告書で示した基本概念に基づき、平成 18 年度に知識管理システム全体の基本設計を行う。基本設計に基づき、平成 19 年度以降に知識管理システムの各機能の詳細設計を進める。また、知識管理システムを運用するために必要なルールおよびマニュアルを作成する。

知識ベースについては、本報告書で示した基本概念に基づき、平成 18 年度に知識ベースの基本設計を行う。基本設計に基づき、平成 19 年度以降、これまでの研究開発成果の構造化、および利用の観点から適切と考えられる知識の類型化を進める。また、知識ベースの開発にあたっては、最新の知識工学的手法や IT 技術の適用を図る。

知識管理システムや知識ベースを実装する計算機支援ツールの設計・製作に関しては、知識管理システムおよび知識ベースの開発と平行をあわせながら、特に計算機支援ツールの更新性や汎用性に留意しつつ、知識管理システムや知識ベースの機能を最大限引き出せるような仕様を検討するとともに実際に計算機支援ツールを製作する。このため、設計、製作、試行を段階的に進める。

平成 21 年度には、全体機能の確認を行う。

10. まとめと結論

処分事業の実施主体や安全規制機関など、地層処分計画に関わるステークホルダーは、セーフティケース（安全性を示す論拠）の構築やその妥当性の評価、地層処分計画の様々な時期における意思決定において、地層処分に関わる多様な技術的情報やデータ、知見を用いる。このため、地層処分の長期的な安全確保と長期間にわたる事業全体に対する信頼を支えるうえで、これらを知識基盤として体系化し、常に最新の科学技術の知見を取り込みながら次世代へ継承できるようにしておくことが必要である。

このため原子力機構では、セーフティケースの一般的な構成要素に従って、システムの安全評価などにおいて必要となる多様かつ大量な情報を知識として構造化し、ユーザーの要件・要望に応じて提供するとともに、新たな知識の創造や次世代への知識継承などの機能を備える知識管理システムの開発を進めることとした。H17取りまとめでは、これをナレッジ・ヴィジョンとして示すとともに、実現に向けた具体的なアプローチを提案している。

本報告書では、H17取りまとめに示したナレッジ・ヴィジョンを実現していくため、知識管理システムの基本概念を構築した。知識管理システムは、構造化した知識を収納する知識ベース、シンクタンクや研究開発センターによる知識創造、ユーザーとのコミュニケーション、知識管理全体を統括するナレッジ・オフィスなどの機能で構成される。また、知識ベースには、セーフティケースの一般概念に基づいて構造化された知識とともに、ユーザーの利用という観点から、「データ」、「ドキュメント」、「ソフトウェア」、「経験・ノウハウ」、「統合した知識」、「ガイダンス」および「プレゼンテーション素材」に類型化された知識が格納される。

中期計画に従って、平成21年度を目指して知識管理システムのプロトタイプを開発しこれを公開する計画である。特に、社会共有の財産となるようにするために、ユーザーとの対話を進めながら要件・要望を的確に把握しつつ、システムの設計、構築、試行を実施する。また、調整会議を通じた研究開発の調整や協力の枠組みの下、他の関連研究開発機関の成果も知識ベースに取り込んでいくことによって、地層処分研究開発の中核的機関としての役割を果たすこととしている。

本報告書で示した知識管理システムや知識ベースの基本概念は、今後、具体的にシステムの開発を行っていくための出発点となるものである。

謝辞

本報告書を作成するにあたり、地層処分研究開発部門において意見交換会を行い、多くの有益なご意見やご助言をいただきました。関係者に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“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年度取りまとめ－地層処分技術の知識化と管理－”, JNC TN1400 2005-020, 2005.
- 2) 梅木博之：“21世紀の地層処分研究開発：技術的知識基盤の構築”, 日本原子力学会誌, Vol.48, No.3, p.14-19, 2006.
- 3) 原子力委員会：“原子力政策大綱”, 平成17年10月11日, 2005.
- 4) 原子力安全委員会原子力安全研究専門部会：“原子力の重点安全研究計画”, 原子力委員会原子力安全研究専門部会, 平成16年7月, 2004.
- 5) 日本原子力研究開発機構：“独立行政法人原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）（平成17年10月1日～平成22年3月31日）”, 独立行政法人日本原子力研究開発機構, 2005.
- 6) 吉野恭司：“地層処分に係る政策動向と基盤研究開発の展開”, 第22回バックエンド夏期セミナー資料集, 平成18年7月27-28日, 北九州市, 日本原子力学会バックエンド部会, 2006.
- 7) 梅木博之, 油井三和, 清水和彦：“HLW地層処分基盤研究開発プログラム”, 同上.
- 8) OECD/NEA: “Post-closure Safety Case for Geological Repositories”, Nature and Purpose, OECD Nuclear Energy Agency, ISBN 92-64-02075-6, 2004.
- 9) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会：“放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について（案）”, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会報告書, 平成18年6月14日, 2006.
- 10) 紺野登：“ビジュアル ナレッジマネジメント入門”, 日経文庫964, 2002.
- 11) ゲオルク・フォン・クロー, 一条和生, 野中郁次郎：“ナレッジ・イネーブリング”, 東洋経済新報社, 2001.
- 12) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－”, 総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999.
- 13) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－”, 分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021, 1999.
- 14) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－”, 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999.
- 15) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－”, 分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999.
- 16) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－”, 別冊 地層処分の背景, JNC TN1400 99-024, 1999.
- 17) 動力炉・核燃料開発事業団(1992): “高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN1410 92-081, 1992.
- 18) 核燃料サイクル開発機構：“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年度取りまとめ－”, 分冊1 深地層の科学的研究－, JNC TN1400 2005-014, 2005.
- 19) 核燃料サイクル開発機構：“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年度取りまとめ－”, 分冊2 工学技術の技術開発－, JNC TN1400 2005-015, 2005.

- 20) 核燃料サイクル開発機構：“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年度取りまとめ－”，分冊3 安全性評価手法の開発－，JNC TN1400 2005-016, 2005.
- 21) Saegusa, H., White, M. J., Robinson, P. and Guimera, J.: "Development of a System for Integrated Geological Modelling and Groundwater Flow Simulation", Proc. Int. Conf. High-Level Radioactive Waste Management Conference, April 30-May 4, 2006, Las Vegas NV USA, 2006.
- 22) Kawata, T., Umeki, H., McKinley, I.G., "Knowledge Management: Emperor's New Clothes?", International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM)2006, Las Vegas, Nevada, April 30-May 4, p.1236-1243, 2006.
- 23) 吉田裕一, 中野勝志, 長谷川健, 志賀貴宏, 三枝博光: “地層科学研究データベースシステム構築の現状”, JNC TN7410 2002-003, 2001.
- 24) 金井貴夫, 今津雅紀, 杉江英雄, 山本 勝: “瑞浪超深地層研究所における工程情報管理システム”, 第10回地下空間シンポジウム, 土木学会, 2004.
- 25) Nakano, K., Amano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saegusa, H., Hama, K., Kumazaki, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S., Sato, T., "Working Program for MIZ-1 Borehole Investigations, JNC TN7400 2002-008, 2003.
- 26) 核燃料サイクル開発機構: “Geofuture 21”, 核燃料サイクル開発機構 CD, 1999.
- 27) 戸内順一: “図解エキスパートシステム入門”, 日本理工出版会, 1997.
- 28) 人工知能学会: “人工知能事典”, 共立出版, 2005.
- 29) 溝口理一郎: “オントロジー工学 知の科学”, 人工知能学会, 2005.
- 30) 西田豊明, 富山哲男, 桐山孝司, 武田英明: “工学知識のマネジメント”, 朝倉書店, 1998.
- 31) 野中郁次郎, 紺野登: “知識経営のすすめ ナレッジマネジメントとその時代”, ちくま新書, 1999.
- 32) ピーター・シュワルツ著, 岛本一雄・池田啓宏訳: “シナリオ・プランニングの技法”, 東洋経済, 2000.
- 33) 寺本義也, 山本尚利, 山本大輔: “最新 技術評価法”, 日経BP社, 2003.
- 34) 北陸先端化学技術大学院大学知識科学研究科監修, 杉山公造, 永田晃也, 下嶋篤編著: “ナレッジサイエンス”, 紀伊国屋書店, 2002.
- 35) 國藤進編集, 國藤進, 加藤直孝, 門脇千恵, 敷田幹文執筆: “知的グループウェアによるナレッジマネジメント”, 日科技連, 2001.
- 36) 小川浩, 後藤康成: “Web2.0 book”, インプレスジャパン, 2006.
- 37) マイクロソフト株式会社ナレッジソリューション部著: “個人と組織のナレッジイノベーション”, アスキー, 2001.

付録

用語解説

知識管理に関する用語については、本文中で逐次説明しているが、読者の便利なように、ここではそれらを一括して再掲した。

知識、データ、情報：

知識という語は、地層処分プロジェクトを支える全ての科学技術を示す広範な意味で用いている。データ、情報、知識を明確に区別する議論もある。文献¹⁰⁾では次のように区別し、説明されている。

- ・一般にデータは文字などの記号や数値で表され、情報の構成要素となるが、それだけでは意味を持たない「素」な状態。一方、情報はデータの集合体であると同時に構成されることで作成者の意図が与えられるもの。情報の場合は、作成者の主観性よりも客觀性や正確性が重視される。情報はなんらかの媒体によって表現されるため複写したり、空間を超えて伝播・流通させることが可能。
- ・知識は、物事や事象の本質についての理解や信条、あるいはメンタルモデルと考えることができ、情報を認識し行動に至らしめる「秩序」。知識は、人間が「事象・現象の経験」と「信条・信念への思念」を融合する中から生まれるもの。

このように、データ、情報、知識の順に主観的な内容が含まれ、「意味のレベル」と「行動の意思決定に役立つ度合い」大きくなる。意思決定という行為を考える場合、これらが総合的に用いられる。データや情報を獲得、参照することで知識が付加されたり、訂正されたりすることもあり、また知識が伝わる過程で断片化し情報になることもある。これらの境界は必ずしも確定的なものではなく、状況や時間によって変化する。このような知識の流動化により、知識体系をいったん構築すればそれで終わりということではなく、変化し続ける知識を捉え活用する技術を提供する必要がある。また、個々の人間が世界をどのように認識するかということも知識を考えるうえで重要な因子である。こうした主観化した知識を様々な角度から検討し、相互に比較することによって、社会で共有し活用するための努力が重要である。地層処分については、これらの点が特に顕著である。上記の議論から、地層処分技術をデータ、情報、知識として厳密に区別することはあまり重要ではなく、それらの知識の持つ「意味のレベル」と「行動の意思決定に役立つ度合い」に応じて、知識管理の仕組みを構築することができる。

知識管理：

知識管理とは、地層処分に関する技術を知識基盤として構築する（知識化）のために行なう管理のことであり、知識に関する開発、統合、品質保証、コミュニケーション、維持・記録保存といった全ての側面を意味する語として用いている。

ナレッジ・ヴィジョン：

経営戦略と知識共有・知識創造の方向性を一致させた目標・目的。ナレッジ・ヴィジョンには、現在拠点にしている世界、今後拠点としなければならない世界、および探求し創造されなければならない知識の内容を示すことが求められる。

知識管理システム：

知識管理システムは、地層処分に関する技術の知識基盤を構築する（知識化）ために行われる、知識に関する開発、統合、品質保証、コミュニケーション、維持・記録保存、知識の継承や人材育成といった全ての側面を運営・管理するための体系を示すもので、知識管理を運用・促進する仕組みと、それに必要なツール（計算機支援システムなど）からなる。

知識ベース：

知識ベースは、地層処分に関わる国内外の様々な情報、研究開発を通じて明らかとなった事実、経験などにもとづく知見やノウハウなどの知識を、ユーザーが活用しやすい形態に整えて蓄積・保管している場所と、蓄積・補完した知識そのものとを言う。

セーフティケース：

セーフティケース⁸⁾とは、地層処分システムが長期的に安全であることを示すため、安全評価の結果や様々な議論、証拠を統合して、地層処分計画の種々の段階において作成されるものであり、信頼性のレベルやその段階において残されている不確実性と以降の段階における対応なども併せて記述される。セーフティケースは基本的に処分の実施主体によって作成され、規制当局など意思決定に関わるステークホルダーにとって満足のいくものとなることが要求される。段階的に進められる処分計画において、計画を次段階に進めるかどうかの意思決定のための技術的な入力情報となることがセーフティケースの本質的な役割である。

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

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

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率(数の)	1	1

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
压力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放熱	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フアラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
光度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(e)}$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	lm/m^2
吸収線量、質量エネルギー一分率、カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個々人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表 4 に示されている。

(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタロジー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表 5. SI 接頭語

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

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーパ	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10(Np)$

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1 eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里每時=(1852/3600)m/s
アール	ル	$1 a=1 dam^2=10^3 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	ル	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボルト	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストーカス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/m^2=10^4 cd/m^2$
ホルト	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	XU	$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 γ=1 nT=10^{-9} T$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^2 \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr=(101.325/760) Pa$
カロリ	cal	$1 atm=101.325 Pa$
ミクログラム	μ	$1 μ=1 pm=10^{-6} m$