

高レベル放射性廃棄物処理処分に対する 高度基盤技術の適用に関する調査研究(II)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1991年2月

財団法人 原子力環境整備センター

この資料は、
です。従って、
載、引用等には
よう注意して下：

This documen
osure to the tl

Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184

茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

電話:029-282-1122(代表)
ファックス :029-282-7980
電子メール:jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

に配布するもの
供覧、複製、転
には使用しない
ence nor disclo
sent of Power

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

JNC TJ1400 2005-026

~~配布一定~~

PNC ZJ1561 01-001

1991年2月

高レベル放射性廃棄物処理処分に対する高度基盤技術の適用に関する調査研究（Ⅱ）

伊加利勝悟*，稻垣裕亮*，下池辰也*

要旨

我が国は、高レベル放射性廃棄物は、地層処分することを基本方針としている。高レベル放射性廃棄物が実際に処分可能となるまでには、関連する技術開発を含め、なお相当の時間が必要と考えられ、この間、諸般の将来技術（高度基盤技術）の開発の進展により、現在考えられている処理処分技術に大きなブレークスルーをもたらすような技術革新が起こることもあり得る。

このような観点から、本調査研究では、地層処分に関連し得る高度基盤技術を抽出し、それらの研究開発の進展度を調査して、現在の処理処分システム・シナリオへのそれら技術の適用インパクトを検討するとともに、今後の研究開発計画の策定に資するための検討を行う。

本報告書は、平成2年度の研究成果をまとめたものであり、

- ① 高度基盤技術の現状に関する調査の結果（昨年度同項目に対する追加分）
- ② 昨年度抽出した重要要素技術から、地層処分及び代替処理処分への適用可能な技術（以下、適用対象技術という）を抽出した結果、並びに適用対象技術に関する詳細調査の結果
- ③ 適用対象技術の処理処分システム・シナリオに対するインパクトの分析と、次年度以降さらに詳細に検討すべき適用対象技術に関する検討結果

につき記している。

これらの適用対象技術の研究開発が今後どのように進展するかを検討するための技術進展予測についても一次的な調査結果を示している。

本報告書は、財原子力環境整備センターが動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：020D0078

事業団担当部課室および担当者：環境技術開発推進本部処分研究グループ
(増田純男)

* : システム開発調査室

LIMITED DISTRIBUTION
PNC ZJ1561 91-001
FEBRUARY, 1991

Study on Application of Highly Advanced Basic Technology in the Field of High-Level Radioactive Waste Management(II)

Shogo Ikari *
Yusuke Inagaki *
Shinya Shimoike *

Abstract

The Japanese waste management policy has been to dispose of High-Level radioactive waste from reprocessing of spent fuel in a underground geological repository. It will take a long time to be able to dispose of High-Level radioactive waste, and to do some research and development related to technology for geological disposal. As results of extensive development on future technology, so call Highly Advanced Basic Technology, it would be expected that technological innovation give breakthrough to High-Level radioactive waste management.

Therefore, in this study, highly advanced basic technology which can be related to disposal would be choiced, and a status of resarch and development of the technology would be surveyed. It would also be estimated a impact of application of these technology on waste management program. And research and development plans for studying of it would be made.

This report cotains the result of the fiscal year 1990 of this study. There is the result of survey, which has been doing from last year, on present status of highly advanced basic technolgy in this report. The applicable highly advanced basic technology for geological disposal and alternative waste management has been chosen form important and essential technology which has been selected in last year's study. And we describe the results of detailed survey on the applicable highly advanced basic technology. We have investigated how much impact there was on waste managemnet scinario and safety when we would apply the applicable highly advanced basic technology on waste management system and scinario. And we have done further choice of the applicable highly advanced basic technology using the impact and repercussion effect on industries. There is preliminary result of survey on technology assessment, which would be used to examine the future progress of the applicable highly advanced basic technology.

Work performed by Radioactive waste management center, julidial fundation, under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Deveropment Corporation.

PNC Liaison : Radioactive Waste Management Project, Isolation System Research Program (Sumio Masda)

* : System Engineering Division

目 次

まえがき	1
1. 昨年度までの検討経緯と成果の概要	3
2. 対象となり得る高度基盤技術の現状調査	5
2.1 シミュレーション	5
2.1.1 地層の長期安定性のシミュレーション	7
2.1.2 地層中での地下水移行及び核種移行シミュレーション	14
2.2 A I (人工知能) 技術	21
2.2.1 定性推論	22
2.2.2 ニューラルネットワーク	26
2.3 新分離技術	29
2.3.1 新分離技術の概要	29
2.3.2 新分離技術の研究状況	30
3. 適用対象高度基盤技術の抽出及び技術調査	45
3.1 適用対象技術の抽出	45
3.1.1 各重要要素技術の重要度・要求性能による評価	45
3.1.2 重要要素技術適用可能性評価基準の作成	55
3.1.3 対象技術のリストアップ	57
3.2 地層処分に適用可能な技術の調査	67
3.2.1 調査・計測技術関連	67
3.2.2 解析技術関連	97
3.2.3 処分技術関連 (モニタリング, 人工バリア関連)	109
3.3 代替処理処分に適用可能な技術の調査	129
3.3.1 超深孔処分技術関連	130
3.3.2 海洋底下処分技術関連	139

3.3.3 群分離・消滅処理技術関連	148
3.3.4 宇宙処分技術関連	148
4. 処理処分システム・シナリオに対する高度基盤技術の適用インパクトの検討.....	162
4.1 地層処分システム・シナリオへのインパクト	162
4.1.1 適用対象技術の適用方法の検討	163
4.1.2 インパクト分析	169
4.1.3 インパクトの整理	187
4.2 代替処理処分システム・シナリオへのインパクト	190
4.2.1 適用対象技術の適用方法の検討	190
4.2.2 インパクト分析	196
4.2.3 インパクトの整理	211
4.3 適用概念の検討で対象とする高度基盤技術の選定	213
4.3.1 研究開発レベルの整理	213
4.3.2 対象技術の産業界への波及効果分析	213
4.3.3 第2次スクリーニング基準の作成	215
4.3.4 適用対象技術のリストアップ及び今後の検討の方向性	224
5. 技術開発進展予測手法について	226
5.1 既存の予測方法の調査	226
5.2 予測手法に関する検討	233
あとがき	235
謝辞	236
参考文献	237
付録	241

図 目 次

図-1 研究の全体フロー	4
図-2 北アメリカ・コルディエラでの雁行断層	9
図-3 スケールの異なる雁行断層	9
図-4 雁行断層のフラクタル論理を用いたモデル化	9
図-5 石膏供試体を用いた三主応力圧縮破壊実験	11
図-6 石膏モデルの圧縮破壊計算結果	11
図-7 2本の断層にはさまれた部分の1/4モデルの一軸圧縮強度	11
図-8 地層の長期予測シミュレーションの流れ	12
図-9 ニューラルネットワークでのネットワーク構成	26
図-10 3群群分離フローシート	31
図-11 4群群分離プロセスの一例	32
図-12 種々の超ウラン元素含有廃棄物の群分離フロー	35
図-13 T R U E X プロセスによる高レベル廃液の群分離フロー	37
図-14 当初創案の超ウラン元素の分離プロセス	39
図-15 前処理工程	40
図-16 塩素化試験装置概略図	41
図-17 高温冶金分離工程	42
図-18 リモートセンシングの分類	71
図-19 D C S Q U I D の例	73
図-20 R F S Q U I D の例	73
図-21 サイスミックトモグラフィーの適用例	77
図-22 パルス試験概要図	79
図-23 圧力経時変化図	79
図-24 反射法による地下断面図	83
図-25 地下レーダーによる地下断面図	83
図-26 比抵抗映像法による地下比抵抗断面図	84
図-27 中性子検層装置及びニュートロンA P I と孔げきとの関係	86

図-28 ガンマ線検層の校正用ピット	90
図-29 ニュートロン検層の校正用ピット	90
図-30 NMR-CTの原理	92
図-31 MRIシステム構成図	95
図-32 イメージングコイル種類	96
図-33 MRIデータ処理フロー	96
図-34 4分木構造による2次元ランダム・フラクタル格子の生成	103
図-35 8分木構造による3次元ランダム・フラクタル格子の生成	103
図-36 ボクセルデータ	107
図-37 レーザーを用いたスロット工法	111
図-38 レーザー適用概念（その1）	111
図-39 レーザー適用概念（その2）	112
図-40 レーザーによる岩破碎メカニズム	112
図-41 SOS/ISFETを用いるマルチバイオセンサー	118
図-42 フッ素イオン電極の構造	121
図-43 固体多結晶膜電極の構造	121
図-44 隔離型電極の構造	121
図-45 γ 線照射時における光ファイバーの伝送損失の連続測定	123
図-46 水素処理による純石英コアファイバーの 放射線による損失増加の抑制効果	123
図-47 センサーとマイコンの結合形態の変遷	125
図-48 大口径立坑掘削技術の分類	132
図-49 シャフトボーリングマシン	133
図-50 堀削り上げ法	134
図-51 ダウンザホールボーリングマシン	135
図-52 ダウンザホールリーミングマシン	136
図-53 レイズボーリングマシン	136
図-54 現状最大級シャフトボーリングマシン	137
図-55 全断面機械式シールド掘進機	138
図-56 水中ロボットの分類	142

図-57	海底歩行式作業機	142
図-58	海底歩行式作業機全体システム	143
図-59	水中ブルドーザー	144
図-60	クローラ式海底作業機全体システム	145
図-61	クローラ式堆砂排除システム	146
図-62	水没自動掘削機	147
図-63	Gangw e r の提案した光化学再処理スキーム	150
図-64	光酸化還元反応の確認された元素	151
図-65	要素技術開発陽子加速器（B T A）	153
図-66	工学試験用大強度陽子加速器（E T A）概念図	153
図-67	陽子リニアックを用いた核破碎反応によるT R U消滅処理システム	154
図-68	稼働中または計画中の大強度陽子加速器	155
図-69	部分再利用型宇宙往還機	157
図-70	H O P E の打ち上げと回収	157
図-71	N A S P 実験機X-30	158
図-72	C E R M E T の製造プロセス	160
図-73	廃棄物ペイロード加工プロセス	161
図-74	廃棄物ペイロードのパッケージ	161
図-75	地層処分への適用対象技術の適用インパクトの整理	218
図-76	代替処理処分への適用対象技術の適用インパクトの整理	220
図-77	社内デルファイの手順	227
図-78	エネルギー関連の技術課題関連樹木	229
図-79	電着塗装技術の形態学的マトリックス (1974年における4社の特許広報の傾向)	232
図-80	電着塗装技術の開発発展パターン	232

表 目 次

表-1 地層処分での安全性評価の目的とシミュレーション	6
表-2 ニアフィールドの核種移行評価コード	14
表-3 ファーフィールドの地下水水流評価コード	16
表-4 ファーフィールドの核種移行評価コード	18
表-5 群分離・消滅処理に関する研究スケジュール	33
表-6 主な超ウラン元素抽出剤の特徴	36
表-7 各研究機関に於ける研究状況	44
表-8 重要要素技術に対する高度基盤技術	46
表-9 重要要素技術の重要度・要求性能による評価	50
表-10 適用対象となる高度基盤技術の摘出	58
表-11 地層処分での適用対象技術	65
表-12 代替処理処分での適用対象技術	66
表-13 地盤探査の分類とその利用目的	69
表-14 各探査法の概要と特徴	70
表-15 代表的な地球観測衛星とその搭載センサーからみた地質分野での活用法	72
表-16 地層処分に適用可能な技術の調査（高温超伝導体によるSQUID）	75
表-17 地層処分に適用可能な技術の調査（ジオトモグラフィー技術）	81
表-18 調査法とその特徴及び利用の現状	82
表-19 地層処分に適用可能な技術の調査（中性子探査技術）	88
表-20 地層処分に適用可能な技術の調査（核磁気共鳴探査技術）	94
表-21 地層処分に適用可能な技術の調査 （超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術）	101
表-22 地層処分に適用可能な技術の調査 （フラクタル理論による地質の長期評価技術）	105
表-23 地層処分に適用可能な技術の調査 （ボクセル構造による地質構造の表現）	108
表-24 種々の岩盤掘削工法の比較	113

表－25 レーザー掘削工法の特徴	114
表－26 地層処分に適用可能な技術の調査（レーザーによる掘削技術）	116
表－27 地層処分に適用可能な技術の調査（バイオセンサー）	117
表－28 地層処分に適用可能な技術の調査（イオンセンサー）	119
表－29 センサーの種類と妨害元素の関係	120
表－30 地層処分に適用可能な技術の調査（耐放射線性光ファイバー）	122
表－31 地層処分に適用可能な技術の調査（スマートセンサー技術）	127
表－32 地層処分に適用可能な技術の調査（超耐食性材料）	128
表－33 代替処理処分に適用可能な技術の調査（大口径超深部掘削技術）	131
表－34 代替処理処分に適用可能な技術の調査（海底作業用の掘削技術）	141
表－35 代替処理処分に適用可能な技術の調査（レーザーによるアクチニド分離）	149
表－36 代替処理処分に適用可能な技術の調査（核破碎技術（陽子加速器））	152
表－37 代替処理処分に適用可能な技術の調査（ロケット技術の高度化）	156
表－38 代替処理処分に適用可能な技術の調査（C E R M E T）	159
表－39 地層処分での適用対象技術の適用方法	168
表－40 適用対象技術のインパクト（地層処分）	170
表－41 地層処分への適用対象技術の適用のインパクト	189
表－42 代替処理処分での適用対象技術の適用方法	195
表－43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）	197
表－44 代替処理処分への適用対象技術の適用のインパクト	212
表－45 研究開発レベルの整理	214
表－46 産業へのインパクトの整理	217
表－47 地層処分への適用対象技術の適用のインパクトの順位	222
表－48 代替処理処分への適用対象技術の適用のインパクトの順位	223

まえがき

我が国では、高レベル放射性廃棄物は安定な形態に固定した後、30年から50年程度冷却のため貯蔵を行い、その後深地層中に処分するとの基本方針が定められている。

ところが、このように廃棄物の処理から処分に至るまでの時間的な隔たりが大きいことを考慮すると、基盤技術の開発の積み重ねによって、現在の処理処分技術体系に大きな波及効果を与える革新的技術が創出されることがあり得る。したがって、現時点で考慮されている処分技術は実際の処分時点までに相当程度変遷する可能性があると考えることができる。

このような観点から、本調査研究では、地層処分に適用することにより既存技術にブレークスルーをもたらすような将来技術（高度基盤技術），並びに現時点で想定されている地層処分とは基本的に異なる処分概念を実現する上でクリティカルとなる技術領域を抽出し、それらの研究開発進展度について調査することにより、現在想定されている処理処分システム・シナリオに対する当該基盤技術の適用によるインパクトを検討し、高度基盤技術の地層処分への適用に関する研究開発計画の検討に資することを目的とする。

1. 昨年度までの検討経緯と成果の概要

本調査研究は、今後の技術の発展による高度基盤技術の進展状況を想定して、最終的にはそのような技術を適用した地層処分概念及び代替処理処分概念を検討するとともに、適用効果を評価することを目的として平成元年度より調査研究を開始した（図-1参照）。

昨年度の調査研究では、高レベル放射性廃棄物の地層処分及び代替処理処分について、地層処分に関しては、その構成上の主要な要素技術を整理し、他方、代替処理処分技術に関しては成立上のクリティカルな技術を抽出するとともに、それら技術に関連する将来技術（高度基盤技術）についての現在の研究動向等について調査を行った。

(1) 高レベル放射性廃棄物処分に係わる重要技術の整理

現状の地層処分に要求される革新的な技術ニーズを抽出するためアンケートを実施した。アンケートにより得られたニーズを整理することにより、地層処分についての重要要素技術を抽出した。

また、代替処理処分として各国で研究されている概念について、実現のためのクリティカルな技術について検討し、それらを重要要素技術としてまとめた。

(2) 対象となりうる高度基盤技術の抽出

重要要素技術の基礎を構成していると考えられる高度基盤技術として、材料、メカトロニクス、レーザー、超伝導、バイオテクノロジー、センサー、シミュレーションについて調査し、研究開発の状況、重要な研究課題等を抽出した。現状調査は本年度も継続して実施する。

(3) 適用対象高度基盤技術の抽出及び技術調査

地層処分及び代替処理処分へ適用することが考え得る高度基盤技術として、地層処分については光ファイバーセンサーのモニタリング技術への適用を、代替処理処分のうちの宇宙処分についてEMMD（Electro-Magnetic Mass Driver）技術を適用することについて、技術の現状、適用概念、適用上の課題、並びに本技術の今後の展望等をまとめた。

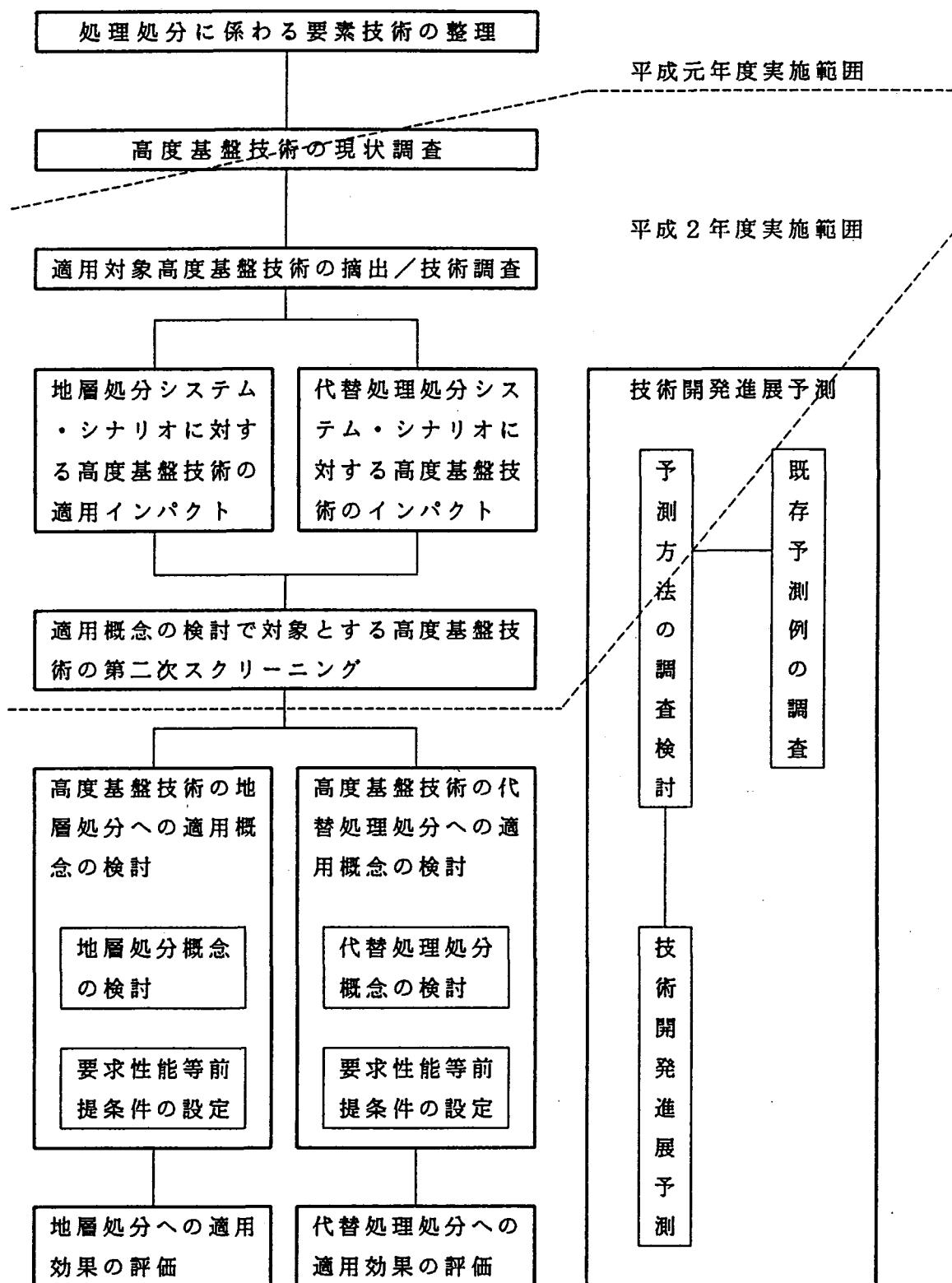


図-1 研究の全体フロー

2. 対象となり得る高度基盤技術の現状調査

高度基盤技術と考えられ得る各種将来技術のうち、平成元年度は材料、メカトロニクス、レーザー、超伝導、バイオテクノロジー、センサー及びシミュレーションについて、研究開発状況、重要研究課題等の調査を実施した。

本年度は、上記の技術に加えてA I 及び新分離技術について調査するとともに、シミュレーションに関しては、前年度は数値情報の視覚化に重点を絞って調査したことから、調査範囲をシミュレーション手法自体に移して調査を実施した。

本年度の高度基盤技術の調査内容は、以下のとおりである。

- ① シミュレーション：実際に生じる現象を計算機を用いて模擬的に評価・表現するシミュレーションに関して、処分の性能評価、安全性評価等に適用が可能な手法について調査する。
- ② A I 技術：定性推論及びニューラルネットに関して、工学的な応用分野・方法について調査する。
- ③ 新分離技術：放射性廃棄物から元素を回収するための技術に関して、湿式、乾式及びレーザー分離技術について調査する。

2.1 シミュレーション

地層処分は、母岩となる地層の超長期的な安定性を基礎として成立し得る概念であり、その地層の隔離性能は極めて重要な位置付けにあるものと考えられる。

地層処分において、シミュレーションは主として処分の安全性を評価することに目的が置かれている。安全性の評価は、処分ステップの進捗に従って、目的、要求される精度、入手データの範囲等が変化していく（表-1参照）。

これらの過程を通じ、地層処分に関するシミュレーションは、下記の2項目が主要な評価対象となると考えられる。

- ① 地層の長期安定性
- ② 地層中での地下水移行及び核種移行

地層処分に関わるシミュレーションでは、良好な母岩の存在と賦存する地下水の状態について、現在の状態を詳細に把握することが大前提となり、さらに得られたデータを解析した結果、将来にわたる変化が許容し得る範囲に入っていることを解析する評価シ

表－1 地層処分での安全性評価の目的とシミュレーション

処分ステップ	安全性の評価の目的	要求される精度	入手データの範囲	シミュレーションの役割
フィージビリティ研究	地層処分が安全に実施できることを概略的に示すことを目的として実施される。	精度は高いものではなく、一般的な条件・データを用いて評価を行っても十分安全であることが言えることが必要。	実測データよりも文献等により入手したデータが中心となる。	・被曝評価のための地下水 水、核種移行評価
サイト選定・特性調査	候補となっているサイトにおいて安全な処分が実施できることを示す。 -広域調査 -精密調査 -原位置試験	複数の候補サイトを比較してサイト特性が最も適している場所であることが示せることが必要とされ、精度は非常に高いものとなる。	ボーリング調査、原位置試験により得られたサイト固有のデータを使用する。ただし、過度にボーリングを行うことはコスト的並びにサイトの全体としての健全性の観点から好ましくない。	・地層の長期安定性 ・地下水の状態 ・処分場建設による環境影響 ・施設設計に必要なデータの取得 ・被曝評価のための地下 水、核種移行評価
設計・安全審査	処分サイトに施設を建設することが安全性を確保しながら実現できることを示す。長期的な観点からも評価が必要となる。	対象サイトについて不確実性を低減した極めて高い精度を要求される。	サイト特性調査により得られた詳細なデータを使用する。 ・環境影響 ・被曝評価のための地下 水、核種移行評価	・地層の長期安定性 ・処分施設の長期健全性評価

システムを作り上げる必要がある。また、評価を精度良く行うには、広範なデータの収集と地層の状態を適切にモデル化することが必須である。

以上の観点から、地層の長期安定性のシミュレーションについては、データの入手方法、モデル化の方法、並びに長期評価の可能性を中心に調査を行う。一方、地層中での地下水移行及び核種移行については、各国が協力して実施している評価コードの検証研究で取扱われているコードを中心に調査する。

2.1.1 地層の長期安定性のシミュレーション

(1) 概 要

従来の地層処分の安全評価は、深地層は本来安定なものとして、地層の構造や物性はあまり変化しないことを前提に、核種の移行評価を行おうとするものであった。

しかし、日本のように地質構造が複雑で、テクトニックな影響も無視できないと想定される場合、地層処分を実施するためには、その長期の安定性を定量的なシミュレーションで確認し、有意な変化が予想される場合には、その変化も織り込んだ評価を実施する必要があるとの考えが有力となりつつある。

(2) シミュレーションの方法

地層の長期の安定性を定量的にシミュレーションするためには、地層の特性を考慮した数値計算による構造解析が必要である。

近年の大型コンピュータの急激な大容量化、高速化により、数値計算手法を用いた構造解析も大幅な発展を遂げ、超高層ビル等の大型構造物の正確な解析も可能になってきた。しかし、これらの構造解析の主目的は弾性的な微小変形の範囲の応力解析であり、地層の長期の安定性を解析するためには、次の項目を織り込んだ構造解析手法を開発する必要がある。

- ① フラクタル理論、ボクセル構造解析等の手法を導入した地下構造の正確なモデル化
- ② 割れ目、断層、破碎帯等の不連続性の考慮
- ③ 非弾性的な大変形の解析追隨
- ④ 長期の岩盤クリープ等の時間依存性の考慮

これらの個々の課題に対しては、研究レベルでの試行はなされており、原理的には統合的大規模コードの開発は可能と考えられる。すなわち、②に関してはFEM（有限

要素法) に J O I N T 要素を織り込む方法, R B S M (剛体バネモデル) の利用, D E M (個別要素法) の利用等, ③に関しては F E M, R B S M で要素の大変位を組み込む方法や D E M の利用が考えられる。また, ④に関しては粘弾塑性の組込みや, 確率過程論による逐次塑性化の考慮等が研究されている。

(3) シミュレーションの研究例

地震断層は単なる一本の割れ目ではなく, 沢山の割れ目帯によって形成される場合が多い。その割れ目の列が, 丁度, 雁が編隊を組んで飛ぶときに似ていることから, 雁行地震断層, 或はエシュロン状地震断層とよばれている。図-2 に示される北アメリカ・コルディエラでの断層はこのような断層系の一典型と理解されている。¹⁾

また, 図-3 は同じ断層を拡大したものであるが, スケールは異なっても, やはり同じような雁行現象が観察される。²⁾ 地震断層の地割れのでき方がモデル実験とよく一致していることが判明し, 更に実験によって生じる割れ目は従来言われていたより複雑であり, 雁行配列が地震の発生メカニズムに重要な役割を果たしていることが指摘されている。ここでは, 数値解析的にこうした地震断層の形成過程を明らかにした例を示す。

(i) 解析手法及びモデル化³⁾

解析に対しては剛体バネモデル (R B S M) を適用した弾塑性解析が用いられている。母岩の構成則はドラッカー・プラーガー則を R B S M に修正したものであり, 初期断層部はモール・クローンの直線則を用いている。⁴⁾ メッシュ分割に際しては, 小さいスケールと大きなスケールにおける相似則を表現するためにフラクタル特性からフラクタル次元 (直線の傾きがフラクタル次元である) を基に計算機上で割れ目を発生させ, 各割れ目の中点を選びこれらの中点群から図-4 のように最終的にはボロノイ分割を得る。⁵⁾ こうしたボロノイ分割に似た構造は柱状摂理等, 自然界の中でしばしば観察されている。

(ii) モデル化及び結果

雁行配列断層の形成メカニズムを石膏供試体を用いた試験と, これに対する R B S M による解析との比較が行われた。³⁾ 図-5 は石膏供試体を用いた三主応力実験結果であり, 拘束圧を静水状態で載荷した後, 鉛直方向軸圧を増加させたものである。図-6 はこれに対する R B S M による解析結果であり, 拘束圧のない場合, 主として縦割れが生じ, 拘束圧 5 kgf/cm² の場合には縦割れと斜めのせん断

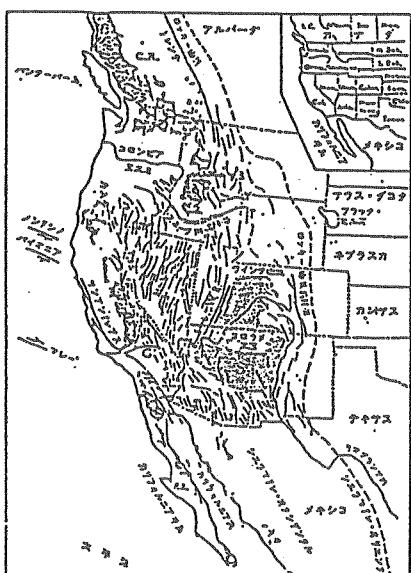


図-2 北アメリカ・コルディエラでの雁行断層

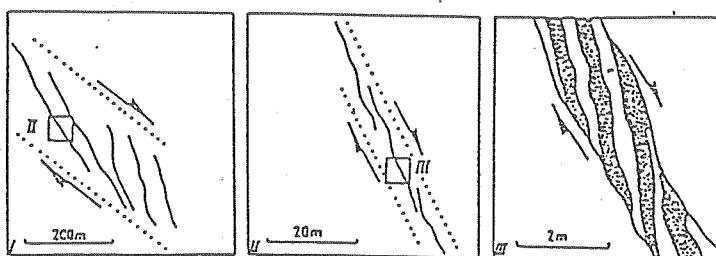


図-3 スケールの異なる雁行断層

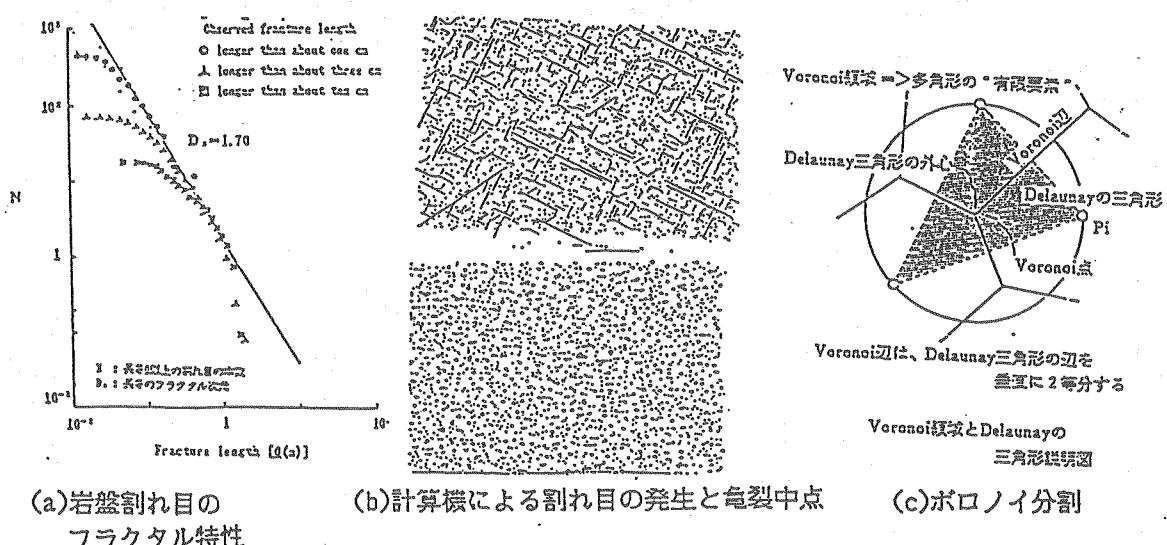


図-4 雁行断層のフラクタル理論を用いたモデル化³⁾

割れ目が混在して生じている。また、縦方向の割れ目が雁行配列している。拘束圧 20kgf/cm^2 の場合にはせん断割れ目のみが生ずる。拘束圧の大きさによって、このようなせん断面に沿った割れ目の雁行配列が発生する可能性があることが示されている。

上記の研究では室内での石膏実験との対応から物性値その他を選んでおり、必ずしも現場に対応したものではないが、こうした解析手法で、比較的よく観察される雁行地震断層の性状をシミュレートできることが示されている。こうした手法は、さらに熱、流体との連成を考えることによって、構造地質学的な問題にも幅広い適用性があるものと考えられる。

雁行現象の不連続部は、断層にかかっている応力がある程度の大きさになったところで、それまでに蓄積されたエネルギーを一挙に解放するという特性があり、このようなエネルギー解放を解析した例として図-7に示したようなものがRBSMを用いてシミュレーションされている。

以上のように、RBSMのメッシュ分割としてボロノイ分割を用いることにより、自然界に生じている地震断層の性状をある程度表現することが可能になると考えられる。

(4) 長期評価の可能性

地層の長期の安定性を定量的にシミュレーション可能な統合的なコードが開発され、実際のサイトを対象に解析計算を実施しようとする際には次の項目が必要になる。

- ① 対象地域の地質構造のモデル化
- ② 岩盤物性値の3次元分布の把握
- ③ 境界条件の設定

①、②に関しては、地表探査、リモートセンシング、各種の物理探査、3次元ジオトモグラフィー、ボーリング調査、試掘坑による原位置岩盤試験、岩石物性室内試験等により極力岩盤を乱さずに、しかも精度の良い3次元データを取得する必要がある。また、③に関しては既存の地球科学データや長期の地表変位測定データの利用、対象地域の周辺の地盤初期応力の測定等により、境界変位または境界外力を設定する。

以上のようにシミュレーションコードを開発し、高度化された地質調査技術により対象地域のデータを取得すれば、地層処分の安全性に関わる地質条件の長期シミュレーションが可能になるとと考えられる（図-8参照）。

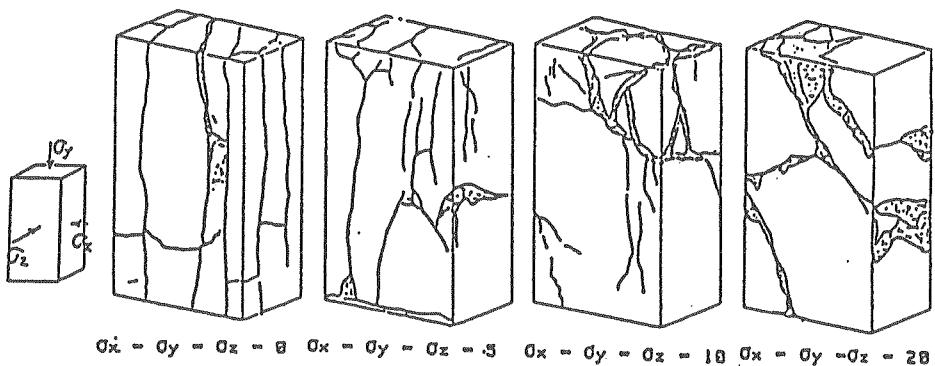


図-5 石膏供試体を用いた三主応力圧縮破壊実験³⁾

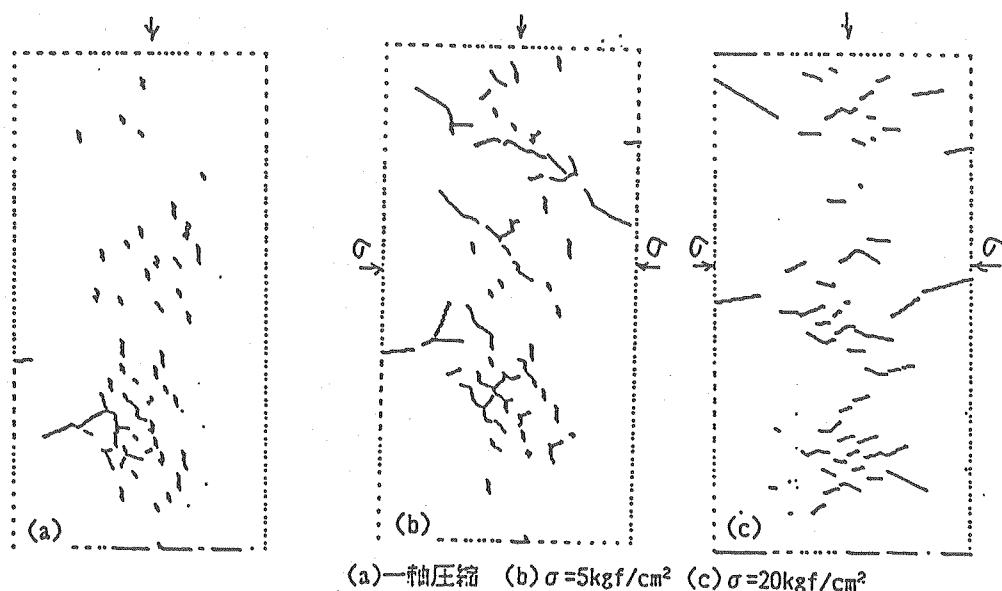


図-6 石膏モデルの圧縮破壊計算結果³⁾

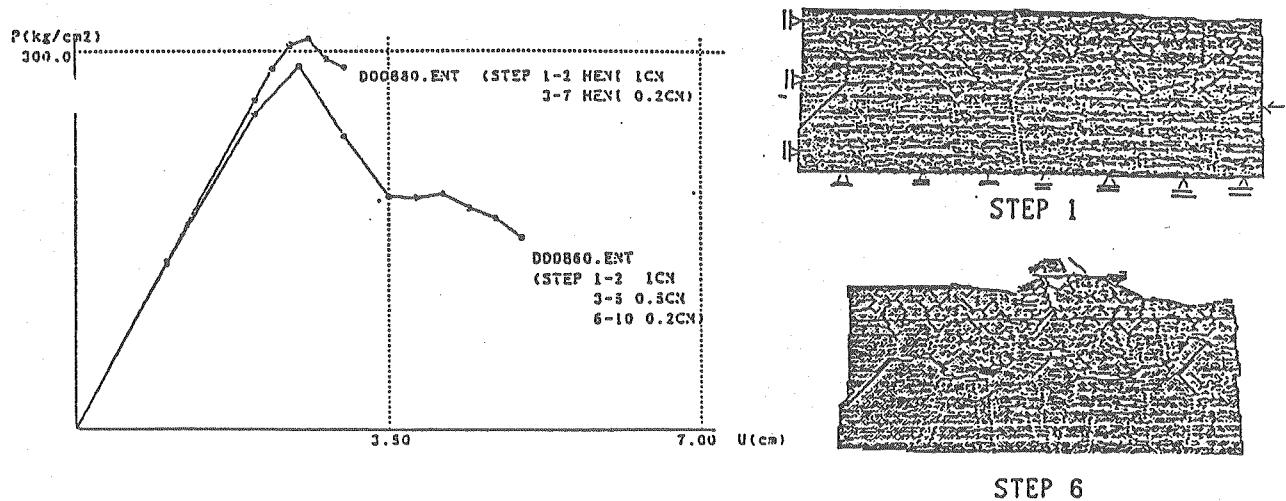
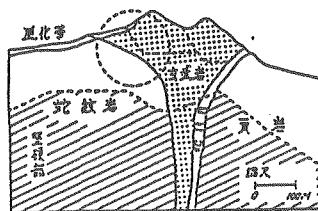


図-7 2本の断層にはさまれた部分の1/4モデルの一軸圧縮強度

<地層構造のモデル化>

- ・地質境界、断層や破碎帯位置、地表地形等を3次元的に把握し、地質構造を幾何的にモデル化する

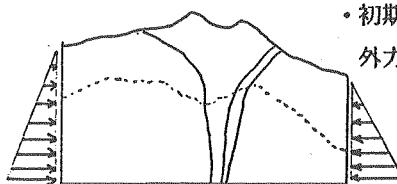


・モデル化の例

<境界条件の設定>

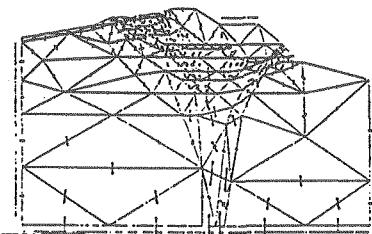
- ・既存地質データを用いた広域部分のシミュレーション結果、及びサイト周辺の初期地圧試験の結果から、解析対象地域境界の外力等の境界条件を設定する

・初期地圧試験より求めた外力境界条件の例

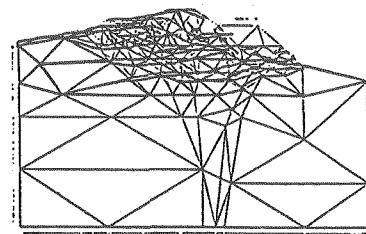


<シミュレーションの実施>

- ・地層構造のモデルを3次元メッシュ分割する
- ・外力、拘束条件等の境界条件を入力
- ・3次元メッシュ各要素の物性値データを入力
- ・シミュレーション計算実施



・解析例（応力）



・解析例（変位）

図-8 地層の長期予測シミュレーションの流れ

このシミュレーションの結果、有意な地質条件の変化が認められる場合には、この解析計算に、浸透流、熱、核種の移行の解析を連成することにより、長期の地質条件の変化を織り込んだ安全評価が可能になる。

2.1.2 地層中の地下水移行及び核種移行シミュレーション

地層処分の安全性を評価することを目的とし、次の分野にてコードが開発されている。

- ・ニアフィールドの核種移行
- ・ファーフィールドの地下水水流
- ・ファーフィールドの核種移行

総合的な安全評価を行うためには、各々のコードを組み合わせて統合する必要がある。

現在、我が国では動燃にて統合化研究が行われつつある。

以下では、NEAデータバンクに登録されているコード、INTRACOIN (International Nuclide Transport Code Intercomparison Study) 及び HYDROCOIN等で対象とされている評価コードのうち、現在一般に使用されている主要と考えられるものについて選択し、そのコードの目的、解法等について概要を示す。

(1) ニアフィールドの核種移行評価コード

今までに開発された主要なコードを表-2に示す。

表-2 ニアフィールドの核種移行評価コード

項目	コード名	DREG	STRAW	STRENG
○時間変化分解		○	○	○
○拡散移行		-	○	○
○アデクティブ移行		-	○	○
○バリアの劣化		-	-	-
○溶解度限度		○	○	○
○ニアフィールドでの収着		-	-	○
○解法		数値積分	1次元差分法	1次元差分法

(i) D R E G

D R E G コードは、スイスの Paul Scherrer Institute (PSI) が開発したガラス固化体からの核種の浸出をモデル化するために作られた計算コードである。計算に用いられているのは数値積分であり、固化媒質の溶解速度と一致した速度での核種の浸出挙動（固化媒質より溶解度の大きな元素に対するもの）及び溶解度の制限による核種の浸出挙動（固化媒質より溶解度の小さな元素に対するもの）を取り扱うことができる。また、元素のトータルの溶解度に対する各同位体の寄与に関しても考慮することが可能となっている。

(ii) S T R A W

S T R A W コードは、英国 U K A E A の Harwell 研究所で開発されたセメント固化体からの核種の浸出を計算するコードである。1次元の差分法による解法を用いており、固化媒質の溶解速度と一致した速度での核種の浸出挙動及び溶解度限度による浸出を取り扱うことができる。また、人工バリア中での移行についても評価することができる。

(iii) S T R E N G

S T R E N G コードは、英国の Intera ELC 等が開発し N A G R A が使用しているガラス固化体からの浸出及び充填材中の拡散を評価するコードである。ガラス固化体からの浸出に対しては、D R E G コードと同様な浸出挙動に対して数値積分により評価するようになっており、元素のトータル溶解度に対する各同位体の寄与も取り扱えるようになっている。また、充填材中の拡散については、1次元の差分法による解法を取り入れている。

(2) ファーフィールドの地下水流評価コード

今までに開発された主要なコードを表-3に示す。

表-3 ファーフィールドの地下水流評価コード

項目 \ コード名	ECLIPSE	FEM301	FEFLOW2	METROPOL	NAMMU	TOUGH
○次元	3	3	2	3	3	3
○解法	FD ¹⁾	FE ²⁾	FE	FE	FE	FD
○過渡	○	-	-	○	○	○
○不飽和	○	-	-	-	-	○
○多層	○	-	-	-	-	○
○異方性	-	○	○	○	○	-
○2重の多孔性	○	-	-	-	-	-
○密度効果	-	-	-	○	○	-
○パーティクルトラッキング	○	○	-	○	○	-
○フラックス	-	○	-	-	-	-
○等高線	-	○	-	○	○	-

1) FD: 差分法

2) FE: 有限要素法

(i) ECLIPSE

ECLIPSEコードは、米国のIntera Inc. が開発した地下水流評価コードであり、3次元の多相の流れを差分法により評価するものである。3相のうち1相は気体の流れについてのものであり、毛細管の効果、dual porosity の溶液及び溶解を評価することができる。

(ii) FEM301

FEM301コードは、スイスの colenco AGが開発した3次元の多層多孔質中の地下水の流れを評価するコードであり、有限要素法による解法を用いている。

本コードでは、不均質性及び異方性について考慮することができる。

(iii) FEFLOW2

FEFLOW2コードは、フィンランドのTechnical Research Center of Finland (VTT) が所有しているコードであり、2次元の地下水水流を有限要素法により評価するものである。対象とする問題は、定常状態の流れについてであり、異方性について考慮することが可能である。

(iv) METROPOL

METROPOLコードは、オランダのRIVM (National Institute of Public Health and Environment Protection) が所有しているコードであり、3次元の地下水水流及び溶解した物質の移行を有限要素法を用いて評価するものである。

本コードは、自動的にメッシュを作成する機能を持っている。

(v) NAMMU

NAMMUコードは、ドイツのGRS (Company for Reactor Safety)が開発したコードであり、多孔質媒体中での3次元の地下水水流及び熱移動を評価するものである。解法は有限要素法を用いており、浮力の効果を入れることが可能となっている。

(vi) TOUGH

TOUGHコードは、米国のLawrence Barkeley Lab. が開発したコードであり、多孔質及び割れ目系中での3次元多相（水、蒸気、空気）の流れ及び熱移動等を差分法で解くプログラムである。本プログラムでは、飽和及び2相不飽和流を解析することができる。

(3) ファーフィールドの核種移行評価コード

今までに開発された主要なコードを表-4に示す。

表-4 ファーフィールドの核種移行評価コード

コード名 評価項目	COLUMN	GEOS	GETOUT	METIS	NEFTRAN	RANCHMD	SWIFT II	TROUG
○次元	1	1	1	2	1	1	3	1
○解法	FD	FD	A ¹⁾	FE	A	FD	FD	FD
○多層	○	○	-	○	○	○	○	○
○一般的リースターム	○	○	-	○	-	○	-	○
○非線形吸着	-	-	-	-	-	○	○	○
○吸着挙動	-	-	-	○	-	-	-	○
○マトリックス内拡散	-	-	-	○	-	○	○	-

1) A : 解析法

(i) COLUMN

COLUMNコードは、デンマークのRisoe National Lab. が開発した核種移行評価コードであり、物理化学的影響を考慮した1次元の移行を差分法により解析するものである。評価の中では、イオン交換、一次反応及び二次反応を取扱うことができる。

(ii) GEOS

GEOSコードは、英国のNRPBが所有している評価コードであり、分散及び収着を伴った1次元の核種移行を評価するものである。本コードで用いている解法は差分法とGear法による時間積分である。

(iii) GETOUT

GETOUTコードは、PNLが開発した1次元の核種移行評価コードであり、分散及び収着を評価することができる。解法はラプラス変換を用いた解析法を用いており、半無限体系での取扱いが可能である。

(iv) METIS

METISコードは、フランスのCIG(Centre d'Informatique Géologique)が所有している核種移行評価コードであり、割れ目を持った多孔質中の2次元の地下水流及び核種移行を取り扱っている。解法は有限要素法であり、崩壊系列及びマトリックス中の拡散を取扱うことができる。

(v) NEFTRAN

NEFTRANコードは、米国のSNLが開発したものであり、3次元の流れ場での1次元の核種移行を解析法又はDVM(Distributed Velocity Method)を用いて解いている。DVMでは流体力学的な分散をモデル化するためにガウス分布を用いている。

(vi) RANCHMD

RANCHMDコードは、スイスのPSIが開発したコードであり、1次元のマトリックス中の拡散をGear法による時間積分により解いている。媒体としては、平面又は柱状の構造を取扱うことができる。

(vii) SWIFT II

SWIFT IIコードは、米国のIntera Inc.が開発した核種移行評価コードであり、差分法により割れ目を持った多孔質中の3次元の地下水流と核種移行が評価できる。本コードでは、処分場での核種移行を評価できるよう球又は平板への1次元マトリックス拡散を取扱うことができる。

(viii) TROUGH

TROUGHコードは、スイスのPolydynamics Ltd.が開発した核種移行評価コードであり、差分法を用いて分散及び収着を伴う1次元の核種移行が評価できる。本コードでは、非線形及び非平衡の収着、並びに溶解度限度を取扱うことが可能である。

(4) 課題

- (i) 放射性核種の移行等のシミュレーションを扱うコードは数多く存在するが、広く一般に用いられているのは数少ない。
- (ii) 最も良く使われているコードは処分場の特別な状況をモデル化したものが多く、取扱える問題は比較的単純な物理プロセスによる主要な核種の挙動に限定される傾向がある。

(iv) 現在、種々のコードでの差異は非常に少ないものとなっているため、生物圏のシミュレーションでの相違が直接結果に影響するものとなっている。

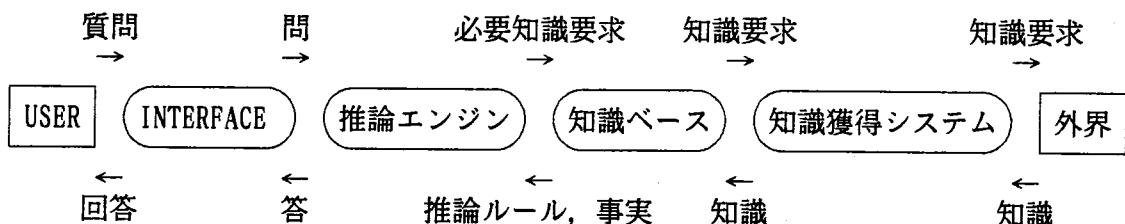
他方、ニアフィールドと地層については、十分信頼性のあるデータを得ることが重要な課題であり、現実的な評価を行うにはサイト固有のデータは不可欠となる。

2.2 A I (人工知能) 技術^{1), 2)}

A I (人工知能) とは、研究者によりさまざまな定義がなされているが、基本的にはコンピュータに人間の知的行動を代行させるための手法、或はコンピュータを人間の共同作業者としてより使いやすくする手法であるといえる。

1960年代においては、コンピュータによる機械翻訳（自動翻訳）の研究が行われていたが、当時はコンピュータの能力不足、言語理論の未整備等により、あまり進展がみられず下火になった。1970年代に入ると、医学の専門知識を使って、専門医なみの診断を行う医療用エキスパートシステム（例えばMYCIN）のような、一種の専門家代行システムがA I の応用分野として登場してきた。エキスパートシステムの機能としては診断、設計支援、分析等が主で、現在では医療をはじめ原子力から分子生物学等の各分野で応用がなされている。1980年代では、我が国において第五世代コンピュータプロジェクトが始まり世界の注目を集めた。このプロジェクトは知識情報処理システムの並列処理が目標であり、現在までに並列処理言語としてGHCが、開発用ツールとしてマルチ・PSI（逐次型推論マシン）が開発された。1992年上記プロジェクトの最終年度にはPSIマシンを1000台接続したPIM（並列推論マシン）が製作される予定である。

A I 技術は、ルールや事実を集めた知識ベース、出された問題に対して持っている知識から解を導き出すための推論エンジン、必要となる知識を外界から得るための知識獲得システム、利用者とのインターフェイス等から構成される。



最近のA I 技術の開発動向の一つは、専門家の知識を持ちその代替を行うエキスパートシステムの構築及び構築の為のツールの開発である。

他一つは人間の脳自体をモデルとしたハードウェア及びソフトウェアの開発であり、この方面において重要と考えられているのは、知識の獲得と学習であり、前者の目標は必要とされる知識を自律的に獲得することであるが、現在のところまだ基礎的な技法の摸索段階である。後者は、反復動作や知識追加により増大する知識ベースと推論機構を

組合せてより正しい結論に到達することや、頻繁に使用される外部知識ループの内部ループ化や簡略化、複数データ間の重みづけによるスイッチング等により処理速度の大幅な向上を達成することを目指しており、結論に到達するための各種の選択的推論技術も研究されている。ハードウェア面では、先に述べた P S I を始めとした並列処理コンピュータや人間の脳神経細胞の活動を模倣したニューラルネット等の研究開発が進められている。

今後は、必要とする知識を自律的に獲得し、その知識が既存の知識と矛盾していないかを判断するシステムの開発、効率的な推論方式の研究、さらにそれらを実現するためのツールやハードウェアの開発が進められるものと考えられる。

ここでは、A I 技術のうち膨大なデータを駆使する地下深部の解析にブレークスルーをもたらす可能性の高い技術として推論方式について定性推論を、ハードウェアとしてニューラルネットワークについて概要を示す。

2. 2. 1 定性推論³⁾

(1) 定性推論の概要

定性推論の先駆けとなった研究はいくつかあるが、代表的なのは1970年代における下記の諸研究がある。

- ① メカニズムの因果解析 C. Rieger
- ② 素朴物理学 (Naive Physics) P. Hayes
- ③ 経済モデルの定性解析 H. A. Simon

1970年代後半からJ. de Kleer, J. S. Brown, K. Forbus, B. Kuipers, B. Williamsらが中心となり現在の定性推論の基礎となる基本的方法を定式化した。1984年までにForbusの定性プロセス理論(QP), Kuipersの定性シミュレータ(QSIM), de Kleerの定性微分方程式 (cofluence)などが確立されたが、これらの方法は定性推論の概念定式化と基本原理の確立が主眼であって、根本的に論理学の世界における小規模で簡単な問題が対象であった。

これらの論理の性格を大雑把に表現すると以下のようになる。

- 定性プロセス理論 例えは”ビーカーの下にアルコールランプを置いてアルコールランプに火がついていればお湯が沸く”といったプロセスを定性的に記述するための理論構築。

- ・定性シミュレータ 対象間の定性的関係を記述することによって、対象の定性的な挙動をシミュレートすることが可能となる。
- ・定性微分方程式 例えば微分方程式を作成する上で微分関係などが部分的にしかわからない段階で、解の定性的挙動を推定することが可能となる。

これらの理論がベースとなって初めてツールの開発や応用問題への適用がなされるようになり、現在では工学的問題解決におけるブルークスルーのための要素技術として注目されるようになってきている。

(2) 定性推論の手法

定性推論の手法は、一般にはなかなか理解しづらいが、例えば定性微分方程式を例にして定性推論の手法の概要を記述すると以下のようなになる。

定性推論で扱う基本概念は特殊なものであり、全ての値は量子化された定性値として扱われる。典型的な例としてには0をしきい値として（このしきい値をLand Markという）値xが正であれば $[x]=+$ 、値xが負であれば $[x]=-$ と表す。すなわち、

$$[x]=+ \Leftrightarrow x>0, [x]=- \Leftrightarrow x<0, [x]=0 \Leftrightarrow x=0$$

とする（これが0より大きい、小さいといった定性的表現と理解される）。

次に、対象の挙動を解析するためのモデルとして定性方程式を組み立てる。定性方程式は対象のバランス方程式や微分方程式から構成することができるものである。

この定性方程式に先に設定した定性値と定性演算を適用して挙動予測(Envisioning)を行う。挙動予測は2つのパートからなり、1つは状態内解析(Intrastate Analysis)、ついで状態間解析(Interstate Analysis)である。状態間解析では対象の制約条件を満たす全ての定性値の組み合わせを求めつくすことにより解の挙動の解析を行う。ここでは定性値を扱うため情報が欠落しているので、通常1つの状態に複数の定性値の組み合わせが得られる（このように与えられた制約条件を充足する状態を求める問題は探索的に行われるが、この手法はA.Iにおいてはよく使用されるものである）。

すべての状態が得られたところで、状態が時間的にどのように遷移するのかを求めるのが状態間解析である。これにより着目状態間の因果関係（時間的にどのように状態が遷移していくか）が得られることになり、これをもとに状態の定性的な挙動を把握することができるようになる。

以上が一般的な定性推論の手法であるが、現在のところ複雑な問題には利用することが難しく、また解の正当性が保証されるとは限らないといった問題点があるが、逆に未知事象（未知の挙動）を発見できる可能性も秘めており、従来の述語論理では記述できないような問題を記述可能とすることに対する期待とあわせ、定性推論が現在の技術に対してブレークスルーを与えてくれるものと期待される。

(3) 定性推論の工学的応用研究の状況

定性推論は、一階述語論理（現在の一般的なルールベースシステムで取り扱う論理）の融通のきかないところを埋めるような性格を持つものであるので、単独で有効なシステムが構築できるものではないと考えられている。研究室ベースでの応用の中でいくつかの問題点が明らかになってきており、それらに対処する方法論がいくつか検討されている。

(i) 量の大きさの管理

例えば0をLand Markに取ったるとすると、[+]と[-]の和は不定である。あるいは逆に32と-15といった完全な数が与えられたときその符号だけに着目したいような場合などに対応するような、量の部分的情報を扱うためにいくつかの研究が進んでいる。

① 常識算術 (Commonsense Arithmetic)

R. Simmonsにより提案された量束(Quantity Lattice)という算術システムにそった算術である。量束が対象とする演算は四則演算で、量束を用いることで算術式の値に対する推論を効率的に行える。量に関して知られている情報は、量をノードとし大小関係をリンクとするグラフで管理することにより、例えばある代数計算がどのような解を与えるか、その解は大きいのか小さいのか、また正なのか負なのか、その定性的な性質について知ることができる。

② Order of Magnitude Reasoning(OMR)

Order of Magnitude Reasoningでは量は量の大きさの程度 (Order of Magnitude, OM) によってクラス分けされ、量間の演算はクラス間の演算で置き換える。Raimanは具体的なOMの相対的表現法と推論規則を示した。

Raimanが示した例として剛体の弾性衝突問題がある。

質量M、速度Viの物体と、質量m、速度v_iの物体が同一直線上で反対方向から完全弹性衝突し、その後それぞれVf、vfになったとする。このとき変数間には

$$MV_i^2 + mv_i^2 = MV_f^2 + mv_f^2$$

$$MV_i + mv_i = MV_f + mv_f$$

が成立する。さらに $M \approx m$, $v_i \ll V_i$, $V_i > 0$, $v_i < 0$ という情報を与えると, Raiman の推論規則によって $V_f \ll V_i$, $v_f \approx V_i$, $v_f > 0$ などを推論することができる。

(ii) 時間の取り扱い

対象の速さに着目して対象の記述を階層化する方法が Kuipers などによって提案されている。これは主に生体系の解析に用いられている。生体系にはホルモンループと神経系ループという 2 大制御ループがあり、その応答速度はオーダーが違っている。このような系のすべてのイベントについて記述しようとすると、速い現象と遅い現象が等価に扱われ無意味な状態間遷移を生じることになる。そこで、応答の速さを定性的に分類し、速い系が平衡状態になったところで 1 段遅い系に状態を引き渡しそこでの平衡状態を決定する。その情報は速い系に再び戻され新たな平衡状態を決定する。このやりとりを経て速い系と 1 段遅い系の平衡状態が決定されるとさらに遅い系に情報が引き渡され平衡状態が新たに決定される。一般に大規模システムにはタイムスケールの異なる応答が混在するので、何らかの時間的取り扱いが必要になるが、こういった問題解決に役立つものと期待される。

(iii) 曖昧性の制御

定性値を取り扱う定性推論では、情報が不完全であるので解析がある程度曖昧になる。これが定性推論の有効性とも言えるが、極端に曖昧さが大きくなると有効性が損なわれてしまう。Kuipers や Lee などは、状態内解析にいくつかの制約を課すことによって曖昧性を有効に制限できることを示している。この曖昧性の制御により、初めて定性推論の工学的応用が可能となるものと期待される。

2.2.2 ニューラルネットワーク

(1) 概 要

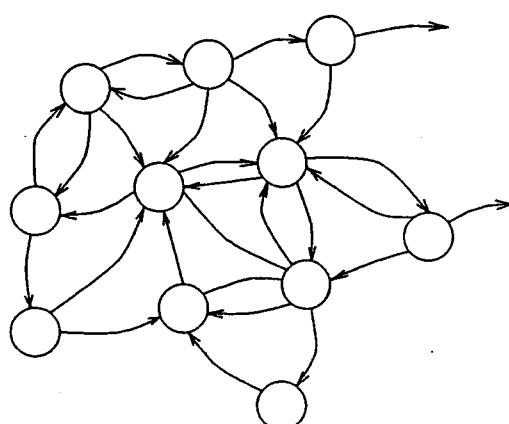
物事をシンボライズし、記号として情報処理を行うのが論理的情報処理であるのに對して、脳の持つ優れた性質を模倣して、人間の脳が行うように‘ひらめき’や学習をとおして情報処理を行うような直観的情報処理をめざすのがニューラルネットワークである。

ニューラルネットワークの基本的態度は人間の脳から学ぶということだと言える。

ニューラルネットワークの特長として、

- ・人間の脳のような柔軟な情報処理能力
- ・高い機械学習、自己組織化の能力
- ・並列化、超並列化が可能であり次世代コンピュータの基本フレームとなる可能性があげられる。ニューラルネットワークの持つポテンシャルは高いと考えられるが、まだその能力の限界は確かめられておらず、解決されていない基礎的問題もまだ残っている。

ニューラルネットワークは図-9に示すように、ニューロンと呼ばれる要素（記憶素子：前回の状態を記憶する）が互いに複雑に結合したネットワークで構成されている。ニューラルネットワークは、外から与えられる刺激によって、刺激のパターンに応じた形でネットワーク内に記憶を蓄積し、学習をするといった構造を持っている。



○ 比較的単純な情報処理要素
→ 信号の流れ

図-9 ニューラルネットワークでのネットワーク構成

(2) ニューラルネットワークの研究状況

以下ではニューラルネットワーク研究の全体的流れを整理する。ニューラルネットワークに関しては脳の機能を模倣するために様々なモデルが提唱されている。これらのモデルは各々挙動が異なることから、現在のニューラルネットワークの研究ではこれらのモデル（要素アーキテクチャと呼ぶ）の能力や限界を十分調べることが大きな課題となっている。現在、要素的アーキテクチャとして研究されているものとしては、層構造型、ランダム結合型（Hopfieldモデル）、ボルツマンマシン等がある。また、このような要素的アーキテクチャを数学的に調べていくための道具として、甘利により情報幾何学が提唱され、こちらも精力的に研究が行われている。

- ・ 層構造型ネットワークは、逆誤差伝播法(BP)による教師付き学習手法が開発されたこともあり、一般的に用いられている。層構造型は一種のパターン変換装置であるので、制御、画像認識、音声認識などに応用されている。
- ・ ランダム結合型はHopfieldモデルとも呼ばれる。ランダム結合ネットワークのエネルギー最小化原理が数学的に明らかにされ、これを用いた最適化問題の解法をHopfieldが示したことでの、応用研究が進んでいる。
- ・ ボルツマンマシンはランダム結合型であるが、ネットワーク全体の挙動が確率的に変化するようにしたもので、統計力学的アナロジーから出発しているのが特徴的である。

これまでの研究では、ニューラルネットワークのパターン変換能力に着目した応用研究が多かったが、近年、ネットワークの動的挙動を、特に数理的側面から研究していく傾向がでている。甘利が提唱する情報幾何学はこのような流れを支援するものである。

現在では多数の応用研究が発表されているが、ニューラルネットワークのポテンシャルの高さの割には根本的ブレークスルーがあったといえない。ブーム的ニューロ研究の反省から、今後は要素的アーキテクチャの能力を調べていき、その過程で生理学や心理学の事実と照らして、脳が持つ特定の機能を実現するように神経回路モデルを模索する方向に移っていくことになるものと考えられている。そうすることで、脳において本質的なアーキテクチャや神経回路モデルの体系がみえてくるようになり、直観的情報処理の本質も理解されるようになってくることが期待されており、また最終的に、工学的応用に最も必要と考えられるニューラルネット情報処理システムの設計

原理もこのような過程の中で得られることが期待される。

(3) ニューラルネットワークの工学的応用

ニューラルネットワークの工学的応用は様々に行われており、その多くは階層型ネットワークかランダム結合ネットワークを利用したものである。以下に、特徴的な応用について紹介する。

(i) 運動学習⁴⁾

伊藤らは、運動の習熟は人間の小脳の内部に制御対象のモデルができ、外部フィードバックループの代わりに内部ループを使うようになるため円滑になっていく、という仮説を提唱している。このモデルに基づき、宇野らは運動学習のアルゴリズムを与えており、瀬戸山らは産業用ロボットに目標軌道を与えて実際に宇野のアルゴリズムが正しく進行することを確かめている。ここでは階層型ネットワークをもちいて学習を行っている。また、宇野はロボットの目標軌道そのものを決定するアルゴリズムと神経回路モデルを提案している。^{5), 6)}

(ii) 画像処理^{7), 8)}

画像処理に関する種々のアルゴリズムが提案されたが、逐次処理では時間がかかりすぎるため、高速化が望まれている。画像処理問題は、その問題のタイプに応じて一定の評価関数の最適化問題として扱うことができる。ランダム結合ネットワークを用いて最適化問題を解くことができることはHopfieldによって最初に示されたが、画像処理問題にも応用され、1チップアナログVLSI化も進められている。

(iii) 連想記憶^{9), 10), 11)}

連想記憶はデータベースへの応用が期待できるが、ニューラルネットワーク上の基本的原理について研究が続けられているのが現状である。まだ具体的応用分野もはっきりしていないが、連想記憶のような柔軟な記憶機能を実現するには現状ではニューラルネットワークを用いざるを得ない。

2.3 新分離技術

2.3.1 新分離技術の概要¹⁾

新分離技術に関する動きとしては、高レベル放射性廃棄物に含まれている核種を分離して長寿命の放射性核種を短寿命又は安定な核種に変換すること、あるいは分離した元素を有効利用することで、高レベル放射性廃棄物の処分の負担軽減化や資源の有効利用等を図ることなどを目標に、群分離・消滅処理研究が行われている。

群分離・消滅処理については、1970年代には欧米においてかなり研究が行われたが、1980年代はじめに実施された総合評価の結果において、経済性及び新たな廃棄物発生による短期リスクが増加すること等の点で有利でないと判断され、それ以来欧米では各国とも群分離・消滅処理に関する研究をほとんど中断している。ただし、フランスでは1984年のカスタン報告により研究の必要性が勧告されたため、その後数年間研究が継続され、EC超ウラン元素研究所でも燃料研究の一つとして研究が行われた。

最近、我が国を中心に、処理処分を含めて総合的な観点から群分離技術を見直す動きが見られ、米国においても軍事用再処理廃液の処理を中心に、研究が復活する傾向が見られる。

既存の分離技術としては湿式法及び乾式法で実用化されているものがある。高レベル放射性廃棄物からの核種の分離には、これら湿式法及び乾式法の他に、基礎研究段階ではあるがレーザー分離法が適用可能と考えられる。

これらの分離技術の概要は次の通りである。

- (1) 湿式法：高レベル廃液を脱硝、抽出、イオン交換することにより3群又は4群に分離することなど。
- (2) 乾式法：高レベル廃液を脱硝、固化し、冶金的に3群に分離することなど。
- (3) レーザー分離法：高レベル廃液を前処理した後、目的の元素を選択的に励起し、原子価を変化させて分離することなど。

以下それらについて技術の現状調査を行った結果を示す。

2.3.2 新分離技術の研究状況

(1) 湿式法

(i) 我が国における研究状況¹⁾

原研における群分離の研究開発は昭和48年頃に始まり昭和59年までは、高レベル廃液中の元素を3群、すなわち超ウラン元素群、ストロンチウム-セシウム群、他の核分裂生成物群(FP群)に分離する方法の開発が進められた。超ウラン元素の回収率は最大許容水中濃度を基準にした高レベル廃液の潜在的毒性指標に基づいて決定されている。

再処理プラントとの関連を考慮して、プロセス機器にはステンレス鋼材が使用できるよう硝酸系を主体とした分離プロセスとしている。

超ウラン元素が分散することのないよう超ウラン元素の分離を最優先に行う方法となっている。

超ウラン元素の分離に新しい抽出剤であるジイソデシルリン酸(DIDAP)が開発されている。

分離に使用した交換体がそのままストロンチウム及びセシウムの安定な処分固化体に転換できることから、ストロンチウムの分離にチタン酸を、セシウムの分離にゼオライトが使用されている。

3群群分離法(図-10)について、昭和56年度には、動燃再処理試験プラントから搬入した高レベル廃液による実廃液試験を行っている。

プルトニウムはTBPより98%以上、アメリシウム、キュリウムはジイソデシルリン酸により99.99%以上が抽出されており、群分離の所期の目標値を十分満足していることが確認されている。

しかしながら、高レベル廃液の潜在的毒性について、ICRP Pub.30(1980)で示された年摂取限度を基準にして解析した結果、ネプツニウム-237に関する毒性が従来の最大許容水中濃度基準の場合の約240倍に増加し、これまでの分離回収率の目標値では不十分であることが分かった。

地層処分における環境影響評価からは、ネプツニウムを中心とした超ウラン元素及びテクネチウムの分離回収が重要となることが明らかとなった。

これにより従来の3群にテクネチウム-白金族元素群を加えて、昭和60年度には4群(Npを中心とした超ウラン元素群、Tc-白金族元素群、ストロンチウム-

セシウム群及びその他の元素群)に分離する改良群分離プロセスの研究開発に移行している(図-11参照)。

昭和60年からの研究項目及び将来の研究計画を以下に示す(表-5参照)。

① 基礎的研究(昭和60年~)

- Npを中心とした超ウラン元素群分離技術の開発
(過酸化水素添加DIDPA抽出法, シュウ酸塩沈殿法)
- Tcを中心としたTc-白金族元素群分離技術の開発
(脱硝沈殿法, 活性炭吸着法)
- 希土類元素からのAm, Cm分離技術の開発(溶媒抽出法)

② 模擬廃液群分離試験(平成2年~)

実廃液群分離試験に向けた群分離プロセスの構築

③ 群分離プロセス工学的予備試験(平成2年~)

高レベル廃液の脱硝・沈殿・ろ過に関する工学的試験

④ 実廃液群分離試験(平成4又は5年~)

NUCEFでの試験

⑤ 再処理工程の変更を含めた統合群分離プロセスの開発(平成5年~)

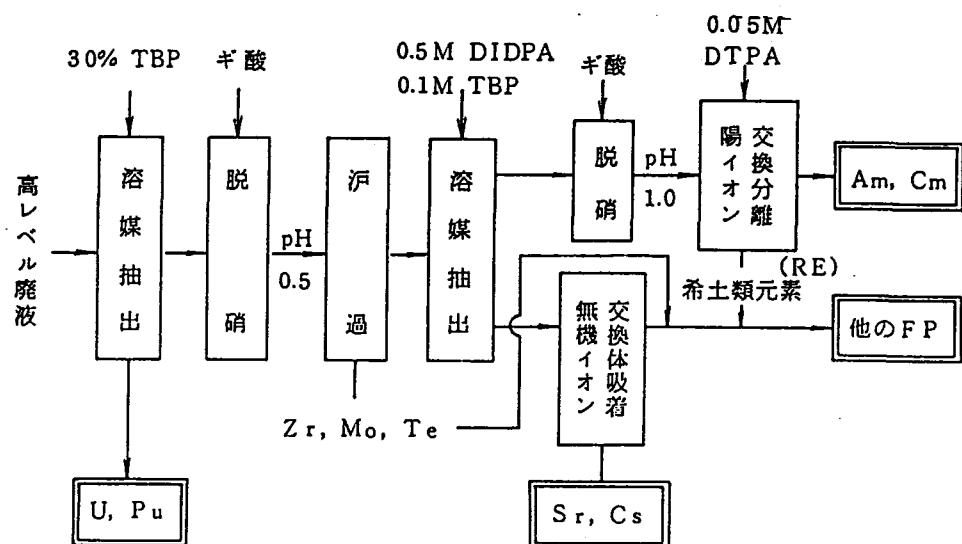


図-10 3群群分離フローシート

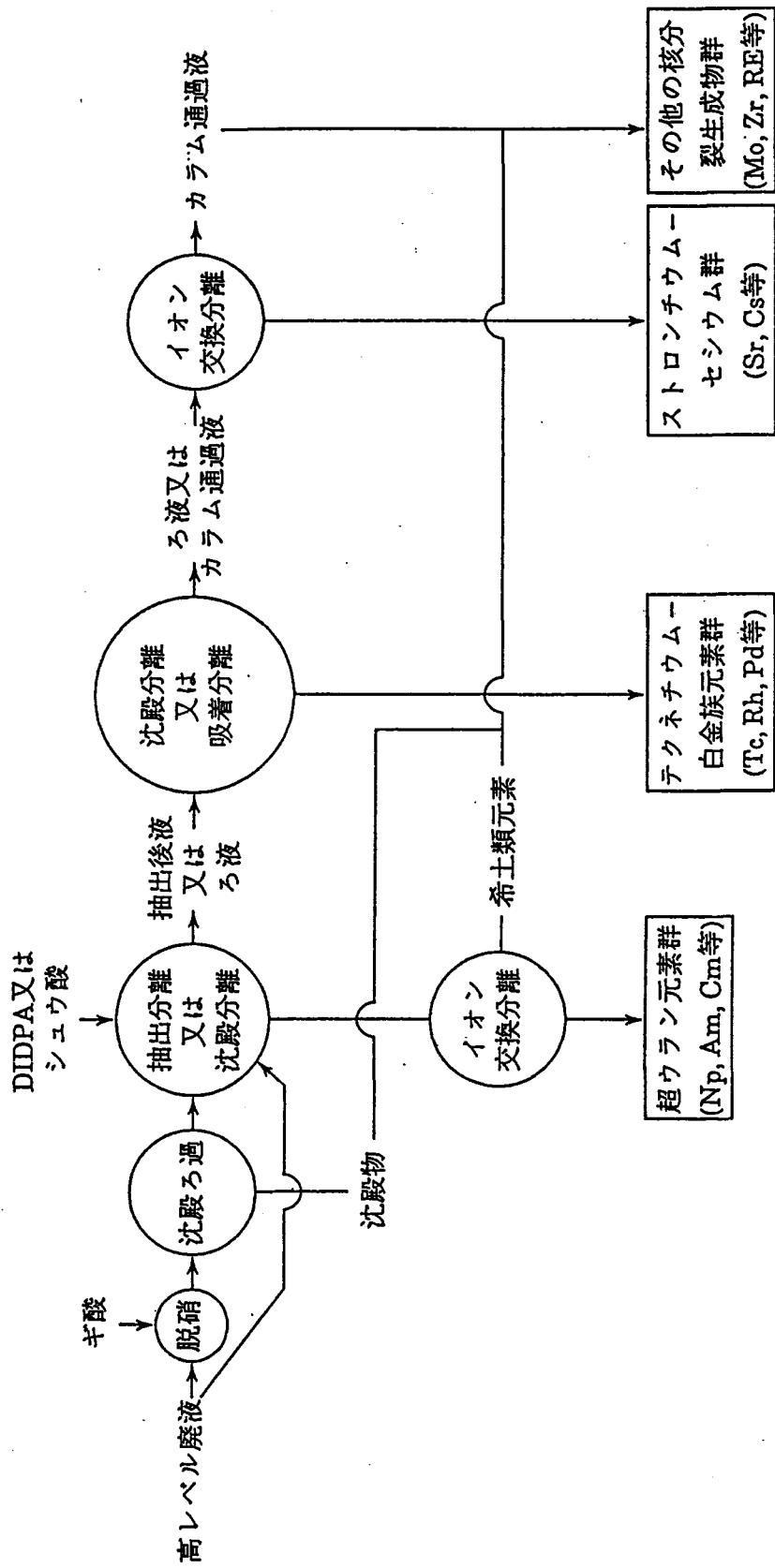


図-11 4群群分離プロセスの一例

表-5 群分離・消滅処理に関する研究スケジュール

項目	成果の反映	～63年度	元年度	2年度	3年度	4年度
(1) 群分離	国とのオメガ計画作成への協力					
1) 超ウラン元素群の分離	NP 抽出速度の向上による NP 連続抽出試験 (第7回)					
2) テクネチウム・白金族元素群の分離	シウ酸沈澱法の開発 キ酸脱明沈澱法の開発					
3) ストロンチウム・セシウム群の分離	活性炭吸着による Tc 分離法の開発 無機イオン交換体吸着法の開発					
4) 群分離後の有用元素の資源化	Tc・白金族元素の单離精製法の開発					
(2) 消滅処理	超ウラン元素の单離精製法の開発					
1) 原子炉による消滅処理の研究	専焼炉の炉心予備用ウラン元素核断面積データの評価・修正					
2) 高エネルギー陽子による消滅処理の研究	専焼炉概念の検討 核データ取得					
	原子核スポーツレーション反応解析・コードシステムの開発					
	加速器・ターデットハイブリッド型消滅処理プラントの概念検討・設計研究					
	高エネルギー陽子核破壊実験					
	技術開発用場所リニアックの要素技術開発・建設					

(ii) 海外における研究状況

海外では米国のオークリッジ国立研究所、アルゴンヌ国立研究所及びバッテルノースウエスト研究所、西欧ではイスプラ研究所（伊）及び超ウラン元素研究所の他スウェーデンで群分離に関する技術開発が行われている。

イスプラ研究所では、HDEHP、TBP及びシュウ酸を使用した3種のプロセスが開発されたが、高レベル廃液からTRUを分離回収することは可能だがプラント化のためには様々な技術的課題があると評価されている。

超ウラン元素研究所では、高レベルガラス固化体からよりもアルファ廃棄物から漏洩するTRUによる環境影響の方が大きいとの考えから、あらゆる廃棄物からのTRUの除去に関する研究が進められている。

また、スウェーデンではTRU以外にテクネチウム、白金族元素、セシウム及びストロンチウムの分離ができる群分離プロセスを開発している。

これらの動きの中では、近年、軍事用再処理廃液の処理処分に関して、この方面的研究開発を再開した米国の動きが若干際だっている。

米国ではオークリッジ国立研究所が主体となり、1980年迄に群分離・消滅処理に関する総合的な評価研究を完了したが、この際に検討された群分離システムは図-12に示すように、高レベル廃液からのTRUの抽出分離にはCMP（表-6参照）を使用し、希土類元素からのTRUの分離には陽イオン交換分離法を使用する標準的な方法である。

アルゴンヌ国立研究所では、その後高レベル廃棄物やアルファ廃棄物からTRUを分離することは地層処分する廃棄物量や処分費用を低減するとの考えから研究が行われており、ここで開発されたTRUEXプロセスによる高レベル廃液の群分離フローを図-13に示す。図中TRUEX溶媒とはCMPO（表-6参照）を主体とした抽出剤である。

最近（1990年）アルゴンヌ国立研究所は、上記のTRUEXを発展させて高レベル廃棄物からSr-90を除去する化学プロセスを開発した。このSREX（ストロンチウム抽出）プロセスは、化学抽出剤（オクタノール）と溶剤を組合せて、高レベル廃棄物からSr-90のみを除去するもので、主要な発熱核種であるSr-90（廃棄物の主要な発熱源）を、地層処分前に除去することは、地層処分の安全性への寄与が大きいと考えられている。SREXプロセスで回収されたストロンチウムは化学的

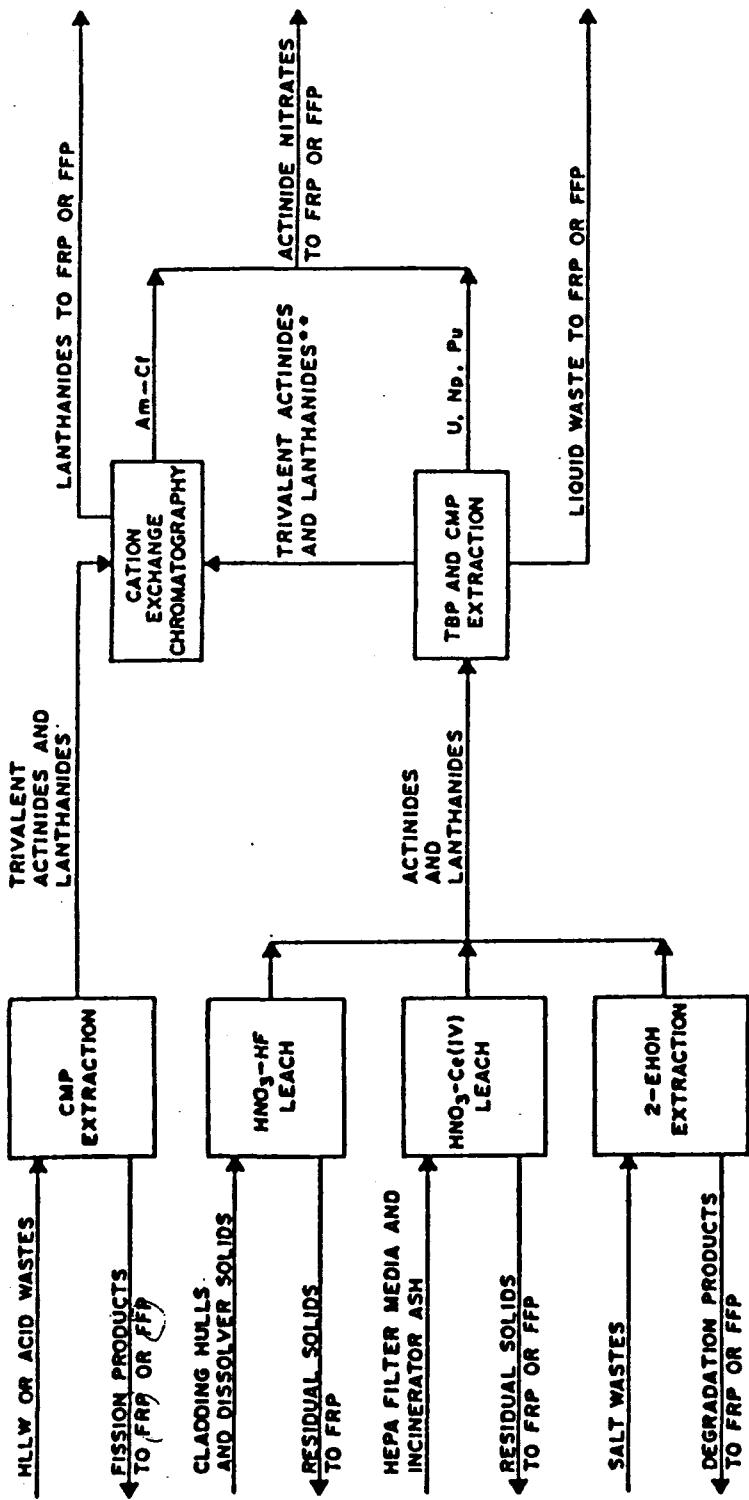


図-12 種々の超ウラン元素含有廃棄物の群分離フロー

表-6 主な超ウラン元素抽出剤の特徴

略号	名称	構造式	特徴
DEHPA	di(2-ethylhexyl) phosphoric acid	$ \begin{array}{c} \text{C}_8\text{H}_{17}\text{O} \\ \\ \text{P}=\text{O}-\text{H}^+ \\ \\ \text{C}_8\text{H}_{17}\text{O} \end{array} $	pH>1でTRU抽出、沈殿生成
DIDPA	di-isodecyl phosphoric acid	$ \begin{array}{c} \text{C}_{10}\text{H}_{21}\text{O} \\ \\ \text{P}=\text{O}-\text{H}^+ \\ \\ \text{C}_{10}\text{H}_{21}\text{O} \end{array} $	<1MHNO ₃ でTRU抽出、耐放射線性大、鉄抽出
CMP	dihexyl-N,N-diethylcarbamoyl methylphosphonate	$ \begin{array}{c} \text{nC}_6\text{H}_{13}\text{O} \\ \\ \text{nC}_6\text{H}_{13}\text{O} \end{array} \begin{array}{c} \text{P}-\text{CH}_2-\overset{\text{C}}{\underset{\text{O}}{\text{N}}}(\text{C}_2\text{H}_5)_2 \\ \\ \text{O} \end{array} $	>2MHNO ₃ でTRU抽出、Zr, Mo抽出、希釀剤、試薬純度、耐放射線性小
CMPD	octyl(phenyl)-N,N-diisobutyl carbamoyl methylphosphine oxide	$ \begin{array}{c} \text{C}_8\text{H}_{17} \\ \\ \text{P}-\text{CH}_2-\overset{\text{C}}{\underset{\text{O}}{\text{N}}}(\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2)_2 \\ \\ \text{O} \end{array} $	>0.5MHNO ₃ でTRU抽出、Zr, Mo抽出、第3相生成フェニル基

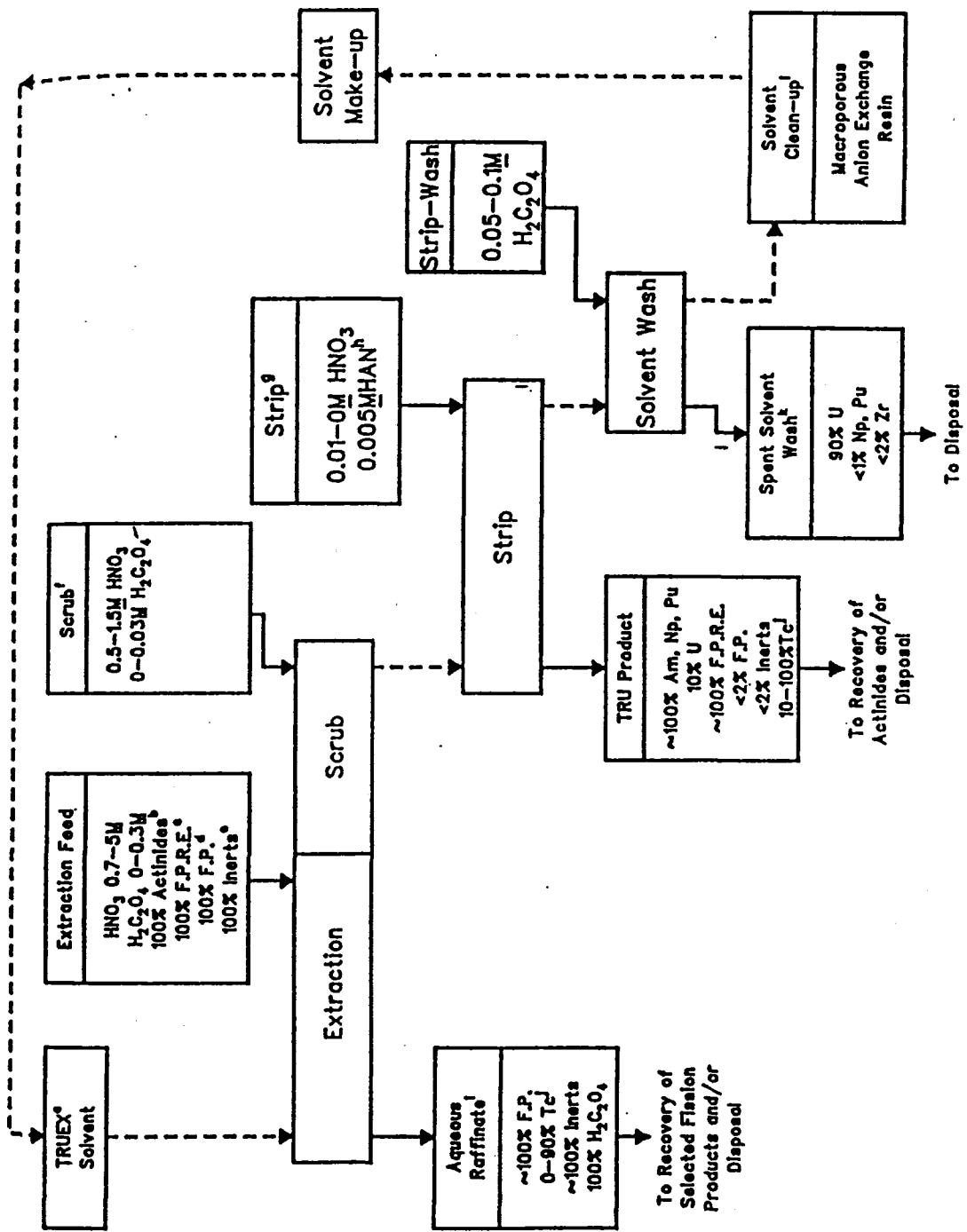


図-13 TRUEXプロセスによる高レベル廃液の群分離フロー

に純粹であり、宇宙船や港湾灯など、長期間放置される場合の電源であるアイソトープ熱発電器（R T G）などに利用価値がある。

(2) 乾式法¹⁾

乾式法は電中研を中心に昭和62年度より本格的な研究開発に取り組んでおり、平成10年頃に実用化の見通しを得ることを目標としている。

(i) 基本構想

- ① P U R E X 法で発生する高レベル廃液を対象として高温冶金法を用いた乾式法でT R U を分離する。
- ② 分離したT R U は、P u と混合し、F B R 用の金属燃料とする。金属燃料中でT R U をU、P u と同様に燃焼させ、発電に寄与させるとともに短半減期核種等に変換する。
- ③ F B R の使用済燃料は再処理と同時にT R U を分離し、最終的にT R U を金属燃料サイクル内に閉じ込める。

(ii) 研究状況

電中研の提案した乾式分離法の主要工程は図-14に示すように、高レベル廃液の脱硝・固化、塩素化からなる前処理工程と、還元及び電解精製からなる高温冶金分離工程よりなっている。

脱硝・固化工程（図-15）では硝酸塩である高レベル廃液を加熱、濃縮により脱水した後、硝酸塩を分解して粉末状の酸化物に転換する工程であり、これまでにマイクロ波加熱により高レベル廃液が高効率で酸化物に転換できることを明らかにするとともに、実機概念まで検討している。

塩素化工程（図-16）は脱硝・固化工程で生成した酸化物を塩素物に転換する工程である。塩素化剤としては分離後の塩化物の廃棄物から塩素ガスを回収して再利用することを考慮して塩素ガス-炭素を用いる方法を採用し、これまでに塩素化試験装置を用いた試験により、基本的に本方法で高効率で塩化物に転換できることを明らかにするとともに、実機概念も明らかにしている。

高温冶金分離（図-17）の第一工程である還元・抽出工程は塩化物の溶融塩から還元剤としてL i を用いて、溶解C d 相にT R U と化学的に類似した一部の希土類元素を還元する工程であり、これまでに希土類元素を用いた基礎試験により、C d 相中に希土類元素が基本的に抽出できることを明らかにしている。

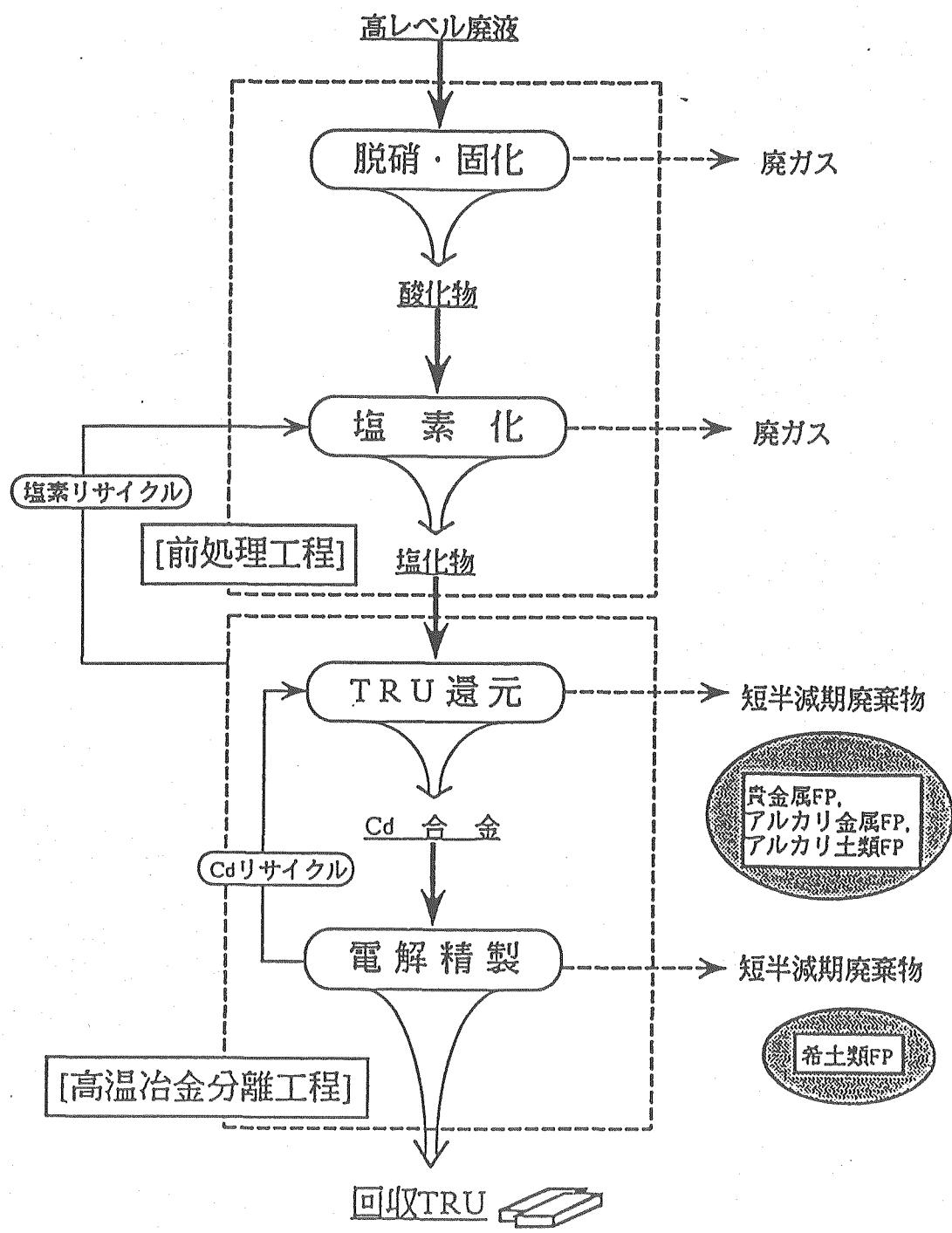
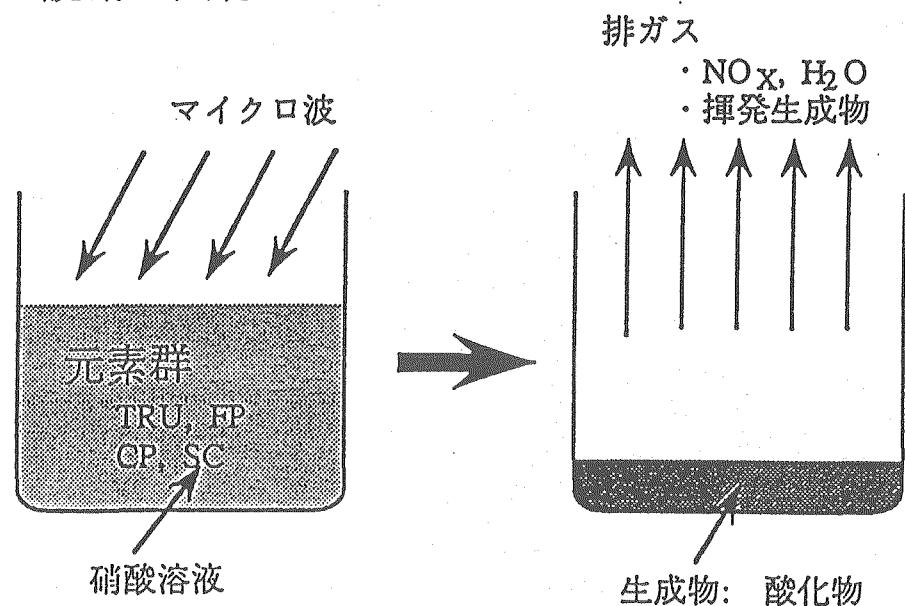


図-14 当初創案の超ウラン元素の分離プロセス

脱硝・固化



塩素化

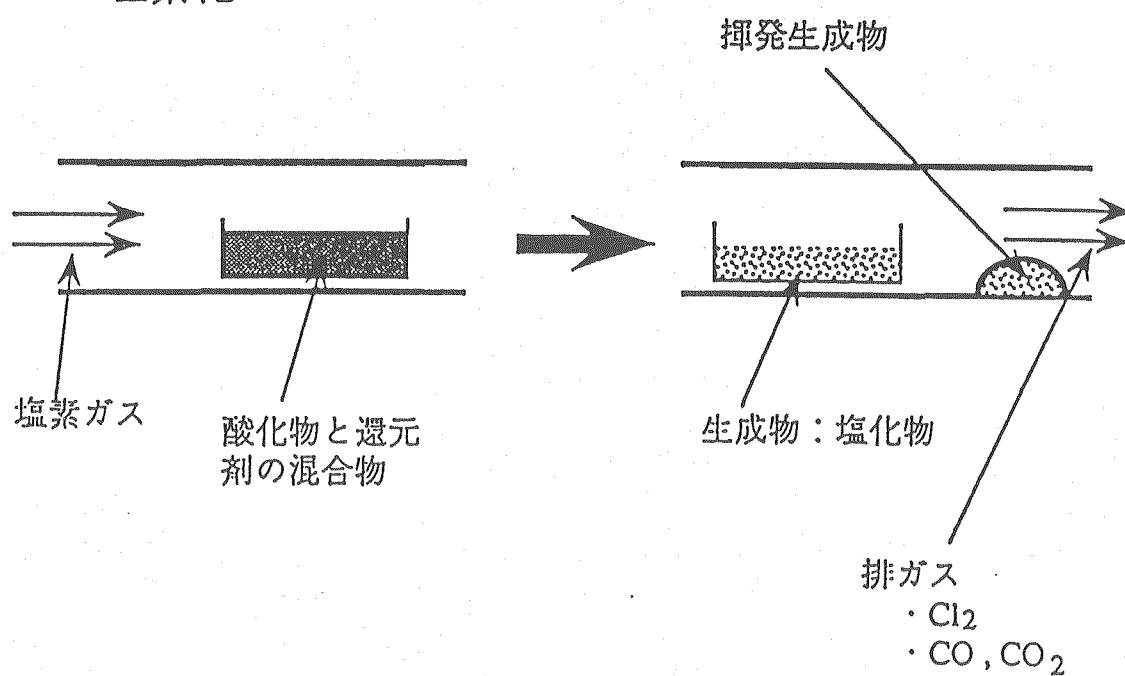


図-15 前処理工程

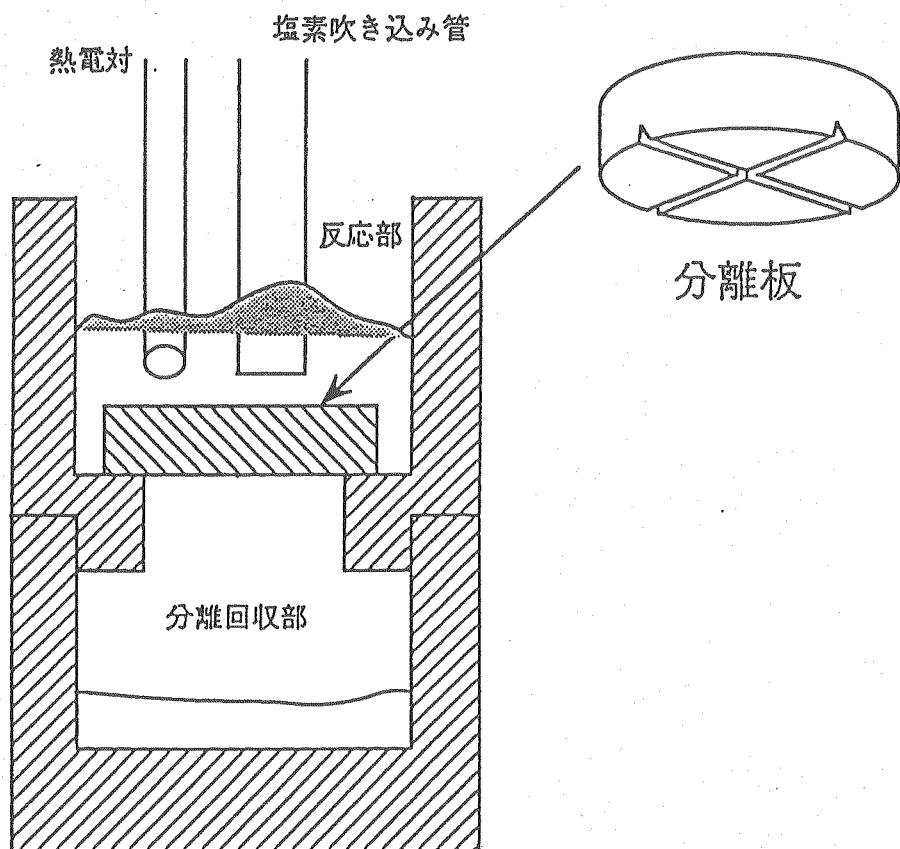
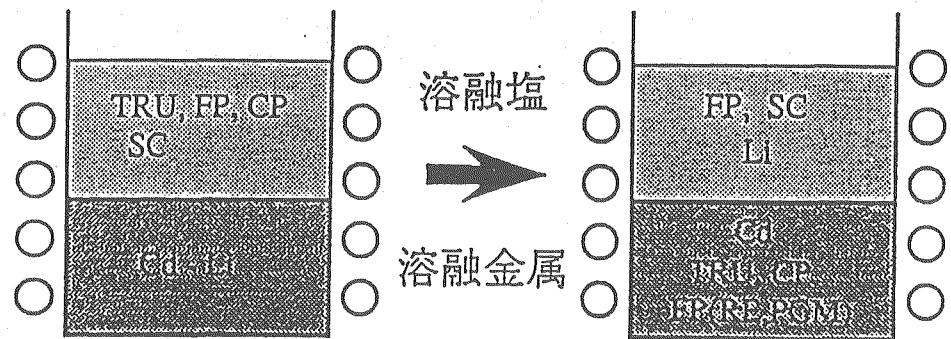


図-16 塩素化試験装置概略図

還元・抽出



電解精製

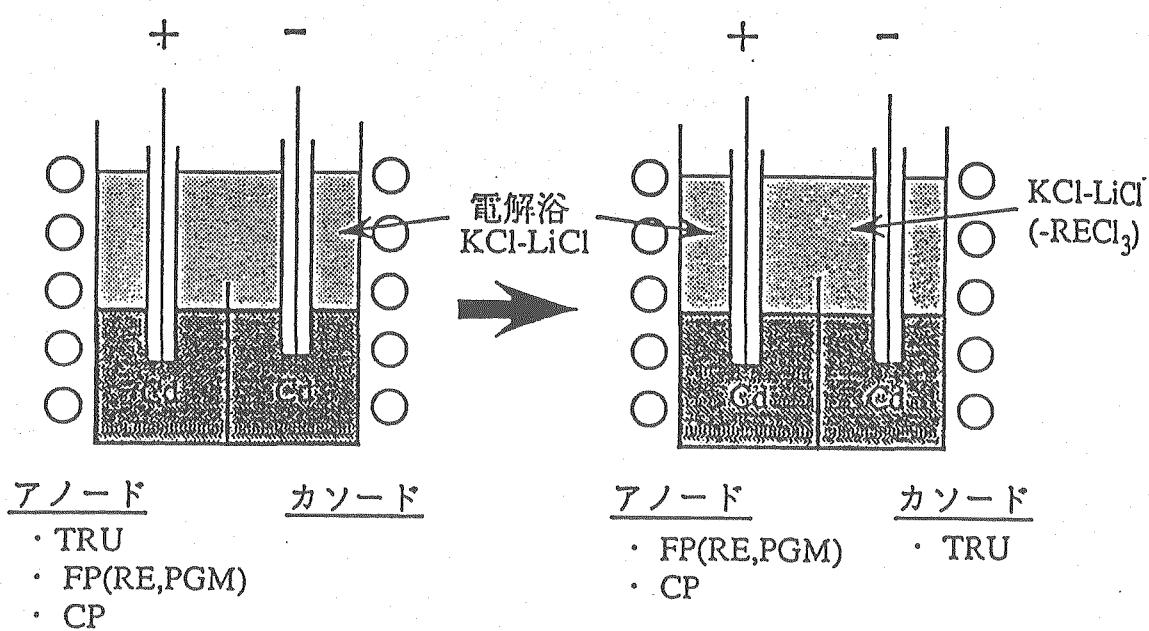


図-17 高温冶金分離工程

第2工程であるTRUの電解生成工程については、希土類元素とTRUとの分離効率、並びに回収されるTRUの純度を評価することを目的に、昭和63年度より米国ロックウェル・インターナショナル社との共同研究により基礎試験を実施しており、これまでにTRUの分離・精製に最も問題となる希土類元素について、熱力学的基礎データ（塩化物の活量、活量係数等）を取得している。今後ウラン、TRUについて基礎データを取得し、さらにTRUと希土類元素との分離試験を実施する予定である。

(3) レーザー法

レーザ法については米国のオークリッジ国立研究所²⁾が本分野の中核的研究を行ってきた。我が国では近年東大、並びに原研にて再処理及び群分離への適用の可能性を見極めるための基礎的試験がなされている。

表-7に研究状況を示す。

表-7 各研究機関に於ける研究状況

研究機関	東京大学	日本原子力研究所
目的	現状再処理プロセスの高度化を目指した研究を行っている。	レーザー励起化学反応を利用し、新しいプロセスの可能性を検討することを目的とした研究を行っている。
研究内容	<ul style="list-style-type: none"> ○ 昭和56年頃から、アクチニド元素、ラントニド元素の基礎的な分離プロセスの研究を始めたが、現在はウランの濃縮に重点を置いている。 ○ Npの溶媒抽出効率を向上させるための原子価調整にKr-F(249nm)のようなエキシマレーザーをNpのイオンを含んだ溶液に照射して光化学的に酸化又は還元する方法について研究を実施している。 ○ 再処理オフガスを対象として炭素の同位体分離の試験を行っている 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 二段階パルスレーザー照射によるラントニド元素の選択分離プロセスの基礎研究

3. 適用対象高度基盤技術の抽出及び技術調査

3.1 適用対象技術の抽出

高レベル放射性廃棄物の地層処分及び代替処理処分の実現のために必要となる技術として昨年度抽出を行った重要要素技術、並びに重要要素技術に対応させてピックアップした高度基盤技術に関して、実際に適用される適用箇所、環境条件を考慮して、適用の可能性があると想定される高度基盤技術（以下「適用対象技術」という）の抽出を行う。

3.1.1 重要要素技術の重要度・要求性能による評価

各重要要素技術を実現可能とする高度基盤技術に関しては、昨年度の調査で分析抽出を行った。この対応分析の結果で得られた重要要素技術と高度基盤技術の一覧表を表-8に示す。

重要要素技術の中には、地層処分及び代替処理処分に直接関係して重要性を持っているものが多く抽出されている一方で、基本的には間接的な影響しか持っていないものも含まれている。

また、昨年度実施したアンケートの中で、多くの回答者が革新ニーズとして挙げているものについては、これが直接今後の研究開発の必要性につながっていくものと考えられる。

さらに、重要要素技術を具体的に適用し、実効あるものとすることを考えた場合、適用する箇所の環境条件が非常に厳しいもの、測定範囲、精度等の要求性能のレベルが現状技術よりかなり高いものが含まれている。しかも、このような環境条件、要求性能等を満足するような技術が現実のものとなった場合を想定すると、現状で考えている地層処分や代替処理処分の概念に実現性が増加するような変化、ブレークスルーをもたらす可能性が高いものもある。

以上の観点から、以下に示す項目に関しては、各重要要素技術についての重要度及び要求性能を評価する。

- ① 地層処分又は代替処理処分の具体化に直接関連し重要な位置付けにある技術
- ② 関係者のニーズが大きい技術
- ③ 適用の箇所の環境条件が厳しいか、又は要求性能が高い技術
- ④ 現行の概念に変化、ブレークスルーを与える技術

表-8 重要要素技術に対する高度基盤技術（1／3）

コード 【地層処分】	重要要素技術	高度基盤技術
A01 a	地下作業者の安全確保のための技術	高度安全管理技術 / 教育システム技術；坑道、作業場 インテリジェント化技術
A01 b	地下作業者の安全確保のための技術	高度安全管理技術 / 教育システム技術；坑道、作業場 インテリジェント化技術
A02 a	人工衛星を用いた地質調査技術	衛星技術 / リモートセンシング（スペクトラルセンシング）
A02 b	人工衛星を用いた地質調査技術	AI技術
A03 a	非破壊で地層の三次元的情報を得る技術	高度計測技術
A03 b	非破壊で地層の三次元的情報を得る技術	CT技術 / ジオトモグラフィ（プロトン、超音波、レーザパルス、電磁波）
A04 a	コンピュータを導入した無人化技術	AI技術 / 知能ロボット技術
A04 b	コンピュータを導入した無人化技術	メカトロニクス技術
A05 a	CT的手法を用いた地質調査技術	CT技術 / 非破壊検査（中性子、超音波、X線）技術
A05 b	CT的手法を用いた地質調査技術	高度計測技術
A05 c	CT的手法を用いた地質調査技術	高度計測技術
A06	航空機を用いた地質調査技術	評価技術 / リモートセンシング（スペクトラルセンシング）
A07 a	リモートセンシング手法の高度化による調査技術	高度計測技術
A07 b	リモートセンシング手法の高度化による調査技術	評価技術 / LDV（レーザドップラ流速計）、レーザレーダ、CCDカメラ等
A08	少量のデータから実際の状態を正確に推定する技術	AI技術 / シミュレーション技術
A09 a	断層の状態を正確に推定する技術	高度計測技術
A09 b	断層の状態を正確に推定する技術	高度計測技術
A09 c	断層の状態を正確に推定する技術	AI技術 / 推論技術、シミュレーション技術
A10 a	リアルタイムな地質推定を可能にする技術	高度計測技術
A10 b	リアルタイムな地質推定を可能にする技術	大規模コンピュータ技術 / エキスパートシステム技術
A11 a	ボーリングの高度化による地質調査技術	メカトロニクス技術
A11 b	ボーリングの高度化による地質調査技術	材料技術 / 超耐熱耐圧切削材料創製技術
A12 a	ボーリングの低成本化	メカトロニクス技術
A12 b	ボーリングの低成本化	材料技術 / 超耐熱耐圧切削材料（合成ダイヤモンド、セラミクスコーティング）
A13 a	現存する技術の複合による高度地質調査技術	AI技術 / エキスパートシステム技術
A13 b	現存する技術の複合による高度地質調査技術	システム化技術
A13 c	現存する技術の複合による高度地質調査技術	システム化技術
A14 a	ロボットを導入する技術	AI技術 / 知能ロボット技術
A14 b	ロボットを導入する技術	メカトロニクス技術
A15 a	非破壊で地下水脈を把握する技術	高度計測技術
A15 b	非破壊で地下水脈を把握する技術	AI技術 / フラクタル解析技術
A16 a	新素材を用いた試料サンプリング技術の高度化	メカトロニクス技術
A16 b	新素材を用いた試料サンプリング技術の高度化	材料技術 / 超耐熱耐圧度材料（セラミクスコーティング）創製技術
A17	コンピュータを導入した自動化システム	AI技術 / エキスパートシステム技術
A18 a	地下環境を精密に再現できるシステム	高度計測技術
A18 b	地下環境を精密に再現できるシステム	AI技術 / UGインテリジェント化技術
A19	現実に忠実な大型試験炉の確立	評価技術 / 大型システム化技術
A20	AI的手法を導入した解析システムの開発	AI技術 / エキスパートシステム技術
A21	数千年にわたる地盤変動の正確な予測システム	AI技術 / コンピュータシミュレーション技術 / 大規模データベースの基礎
A22 a	正確な超圧密試験法を可能にする技術	材料技術 / 長期寿命評価・試験技術
A22 b	正確な超圧密試験法を可能にする技術	材料技術
A23 a	低透水性岩盤に対する透水性試験技術	高度計測技術 / MRT技術
A23 b	低透水性岩盤に対する透水性試験技術	高度計測技術 / MRT技術
A23 c	低透水性岩盤に対する透水性試験技術	評価技術
A24 a	水みちの同定が可能な透水試験技術	高度計測技術
A24 b	水みちの同定が可能な透水試験技術	高度計測技術
A24 c	水みちの同定が可能な透水試験技術	評価技術 / ジオトモグラフィ技術
A25 a	コンピュータシミュレーションとグラフィックス技術	AI技術 / 大規模コンピュータ技術
A25 b	コンピュータシミュレーションとグラフィックス技術	高度計測技術
A26 a	地熱地帯の地質調査、解析技術	評価技術 / リモートセンシング技術
A26 b	地熱地帯の地質調査、解析技術	CT技術
A26 c	地熱地帯の地質調査、解析技術	CT技術
A27 a	トレーサ技術を用いた調査法の高度化	高度計測技術
A27 b	トレーサ技術を用いた調査法の高度化	レーザ技術 / レーザ分光計測技術
A27 c	トレーサ技術を用いた調査法の高度化	評価技術
A28 a	地層内の微量元素をもじり好みに測定可能な装置の開発	高度計測技術
A28 b	地層内の微量元素をもじり好みに測定可能な装置の開発	レーザ技術 / レーザ分光計測技術（LIF, LPAS）
A28 c	地層内の微量元素をもじり好みに測定可能な装置の開発	評価技術
A29 a	放射性核種の地層内挙動の定量的把握	高度計測技術
A29 b	放射性核種の地層内挙動の定量的把握	レーザ技術 / レーザ分光計測技術
A29 c	放射性核種の地層内挙動の定量的把握	評価技術
A30 a	地下水脈の正確な状況を把握する技術	高度計測技術
A30 b	地下水脈の正確な状況を把握する技術	CT技術 / ジオトモグラフィ技術
A30 c	地下水脈の正確な状況を把握する技術	CT技術 / ジオトモグラフィ技術
A31 a	孔内スキャニング記憶装置	高度計測技術
A31 b	孔内スキャニング記憶装置	AI技術 / 知能ロボット技術
A32	斜坑アクセス	高度土木建築技術 / 斜坑掘削、坑道維持技術
A33	新しい処分方法の検討	評価技術 / 総合評価技術
B01 a	数万年単位での地層、地質構造変化を予測する技術	評価技術 / 超長期の地盤変化（地盤）予知技術
B01 b	数万年単位での地層、地質構造変化を予測する技術	大規模コンピュータ技術 / 大規模データベースの蓄積
B02	地下作業者への心理的影響についての研究	ヒューマンテクノロジテクノロジ技術 / メンタルヘルス技術
B03	国際協力による地質研究体制の確立	情報ネットワーク技術 / 國際ネットワーク技術
B04	地質データバンク等データバンクの整備	大規模データベースの整備 / システム化技術
B05	AI的手法を導入したサイト選定技術	AI技術 / サイト選定技術
B06	海底下サイトを可能にする技術	総合エンジニアリング技術 / 超耐圧構造材技術、超深度掘削技術
B07	バイオテクノロジーを導入し構造固定を行う技術	バイオ技術 / 遺伝子組み換え技術、細胞融合技術
B08	ガラスよりも耐久性、固定性に優れる固化材の技術	材料技術 / スーパーエンジニアリングプラスチクス、セラミクス技術
B09	核種遮蔽材料およびそのシステムの開発	材料技術 / インテリジェントマテリアル技術
B10	セラミック系固体化材料の開発	材料技術 / 信頼性評価技術
B11	自己消滅処理がマトリクス中で起きるような材料の開発	材料技術 / インテリジェントマテリアル技術
B12	自己修復機能を持った材料の開発	材料技術 / インテリジェントマテリアル技術
B13	平衡論的に漏洩を防止する技術	材料技術 / インテリジェントマテリアル技術
B14	核種の化学反応により核種を固定化する技術	材料技術 / インテリジェントマテリアル技術
B15	地盤変動に耐えられる容器の開発（柔らかいもの）	材料技術 / 高粘性液体、磁性液体技術
B16	防蝕、防錆性に優れる新素材の開発	材料技術 / 高耐食性材料技術
B17	強固な皮膜の簡易生成技術	材料技術 / コーティング技術（塗料樹脂材料）

表-8 重要要素技術に対する高度基盤技術（2/3）

コード	重 要 要 素 技 術	高 度 基 盤 技 術
B18	軽量の複合材料を用いたオーバーパック技術	材料技術/FRP(繊維強化プラスチックス; ホイスカ強化)
B19	放射線遮蔽性の高いオーバーパック材料の開発	材料技術/FRP(エポキシマトリクス, ポリイミドなどスーパーエンプラマトリクス)
B20	不透水性緩衝材の開発	材料技術/高機能性緩衝技術(高吸収材等)
B21	薬葉廃棄物の有効利用技術	材料技術/資源リサイクリング技術(燃焼・製鉄技術)
B22	特定核種のみを選択的に吸収する材料の開発	材料技術/機能性材料技術(分子ふるい; バイオ材料)
B23	化学的に安定な新素材の開発	材料技術/人工乾物合成技術, セラミックス合成技術
B24	安定性、優れ性に優れた材料の開発	材料技術/機能材料技術, 信頼性評価技術
B25	処分場全体程度の広域グラウト技術	高度土木建築技術/地盤改良技術
B26	地層同化材といったような材料の開発	材料技術/人工乾物合成技術
B27	周辺地質の懸念性を向上技術	高度土木建築技術/地盤改良技術
B28	地下水流路固定材料およびその技術	超導電技術/極低温技術
B29	新しい評価技術の確立	評価技術/体系化技術
B30 a	岩盤の長期安定性評価システムの開発	評価技術/長期シミュレーション技術, 高精度データ取得・解析技術
B30 b	岩盤の長期安定性評価システムの開発	AI技術
B31	新しいモニタリング概念, システムの開発	高度計測技術/センサーシステム化技術
B32	地球化学的試験推進機関	情報ネットワーク技術/データバンク技術
B33 a	グラウト以外の増強工法の開発	高度土木建築技術/掘削技術
B33 b	グラウト以外の増強工法の開発	超導電技術/極低温技術
B34	核種移行閉サイクル	超導電技術/極低温技術
B35 a	局所的腐食, 腐食の防止及び検知システムの開発	材料技術/インテリジェントマテリアル技術
B35 b	局所的腐食, 腐食の防止及び検知システムの開発	高度計測技術/光センサー技術, システム化技術
B36	固化体の低温合成技術及びシステム	材料技術/人工乾物合成技術, システム化技術
B37 a	高圧継ベントナイトの開発	材料技術/人工乾物合成技術(高圧合成)
B37 b	高圧継ベントナイトの開発	高度土木建築技術
B38 a	高耐久セメント系材料の開発	材料技術/寿命評価・試験技術(加速寿命試験), 複合材料技術
B38 b	高耐久セメント系材料の開発	高度土木建築技術
C01 a	高精度な地質評価システムの開発	評価技術
C01 b	高精度な地質評価システムの開発	AI技術/大規模データベースの蓄積
C02	精密なコンピューターシミュレーション技術	AI技術/データ高精度化技術 ソフトウェア(モデル化)技術
C03 a	ダルシー法則以外の法则に基づいた地下水解析技術	評価技術
C03 b	ダルシー法則以外の法则に基づいた地下水解析技術	大規模コンピュータ技術 AI技術/ソフトウェア技術(ビンガム流モデル化技術)
C04 a	地下水と地表水の相互関係の解析技術	評価技術
C04 b	地下水と地表水の相互関係の解析技術	AI技術/地下水解析技術
C05 a	岩盤の核種吸着特性分布の測定技術	高度計測技術
C05 b	岩盤の核種吸着特性分布の測定技術	材料技術/表面分析技術(ESCA, 等)
C06 a	放射性核種を用いた移行試験技術	高度計測技術
C06 b	放射性核種を用いた移行試験技術	レーザ技術/レーザ分光計測技術
C07	核種移行挙動解析コードの開発	大規模コンピュータ技術/ソフトウェア技術, コンピュータシミュレーション技術
C08 a	人工バリアの機能の劣化要因の評価手法の開発	高度計測技術
C08 b	人工バリアの機能の劣化要因の評価手法の開発	材料技術/寿命評価・試験技術
C09	CTの手法を用いた劣化現象の把握技術	CT技術/超音波, レーザパレス, X線技術
C10 a	人工バリアの経時変化の予測技術	評価技術
C10 b	人工バリアの経時変化の予測技術	材料技術/寿命評価・試験技術
C11 a	バリア内の各種バーマの経時変化評価, 解析手法の開発	大規模コンピュータ技術
C11 b	バリア内の各種バーマの経時変化評価, 解析手法の開発	評価技術
C12 a	材料の自動監視技術	高度計測技術/モニタリング技術
C12 b	材料の自動監視技術	大規模コンピュータ技術
C13 a	耐久性評価のためのデータの整備	大規模データベース
C13 b	耐久性評価のためのデータの整備	評価技術
C14	コンピュータを導入した可視化技術	CT技術/コンピュータグラフィックス技術
C15 a	将来の変化を考慮にいれたシステム評価技術	評価技術/長期予測技術, シミュレーション技術
C15 b	将来の変化を考慮にいれたシステム評価技術	AI技術
C16 a	他モデルとの比較, 相互評価	評価技術/比較技術
C16 b	他モデルとの比較, 相互評価	AI技術
C17 a	ファジー理論を導入したデータ評価技術	AI技術
C17 b	ファジー理論を導入したデータ評価技術	評価技術
C18 a	不確実性の範囲を限定できるようなシステム	評価技術
C18 b	不確実性の範囲を限定できるようなシステム	AI技術/インテリジェントシステム技術
C19 a	リスクアセスメントを導入した不確実性評価技術	評価技術
C19 b	リスクアセスメントを導入した不確実性評価技術	AI技術/インテリジェントシステム技術
C20 a	ナチュラルアナログ研究	大規模データベースの蓄積
C21	最適化のための不確実性の評価	評価技術/モデル化技術
C22 a	再取出が不要となる補修, 強張技術の開発	高度土木建築技術
C22 b	再取出が不要となる補修, 強張技術の開発	材料技術/インテリジェントマテリアル技術
C23 a	地層固化石の開発	高度土木建築技術
C23 b	地層固化石の開発	材料技術/人工乾物合成技術
C23 c	地層固化石の開発	超導電技術/極低温技術
C24 a	特定核種を選択的にモニタリングできるシステム	高度土木建築技術
C24 b	特定核種を選択的にモニタリングできるシステム	レーザ技術/レーザ分光計測技術
【超深孔処分】		
D 1	超深部掘削技術, 坑道維持技術	高度土木建築技術/超深部掘削技術, 坑道維持技術
D 2	超深部環境材料, 設計技術	材料技術/耐高圧・耐温材料, 耐食材料
D 3 a	超深部モニタリング技術	高度計測技術
D 3 b	超深部モニタリング技術	超深部運統計測技術
D 3 c	超深部モニタリング技術	材料技術/耐高圧・耐温材料
D 4 a	超深部(3,000 ~ 15,000m)の環境, 岩体調査及び評価	高度計測技術
D 4 b	超深部(3,000 ~ 15,000m)の環境, 岩体調査及び評価	超深部掘削技術 高度土木建築技術/超深部掘削技術
D 5 a	廃棄体ハンドリング技術	メカトロニクス技術/知能ロボット技術
D 5 b	廃棄体ハンドリング技術	材料技術/耐環境材料技術
D 6 a	超深部シーリング技術, モニタリング技術	高度土木建築技術/超深部シーリング技術
D 6 b	超深部シーリング技術, モニタリング技術	材料技術/長寿命, 高信頼性材料技術 センサー技術/超深部(連続)計測技術
D 6 c	超深部シーリング技術, モニタリング技術	高度計測技術/超深部(連続)計測技術
【岩石溶離処分】		
E10	材料技術(クラックフリー材料)	材料技術/インテリジェント材料技術(自己修復機能材料)
E11 a	廃棄体ハンドリング技術	メカトロニクス技術/知能ロボット技術
E11 b	廃棄体ハンドリング技術	材料技術/耐環境材料技術
E12	深部モニタリング技術	センサー技術/深部運統計測技術
E13	深部(2,000m)掘削技術, 坑道維持技術	高度土木建築技術/深部掘削技術, 坑道維持技術

表-8 重要要素技術に対する高度基盤技術（3／3）

コード	重 要 要 素 技 術	高 度 基 盤 技 術
E8 a	迅速シーリング技術	高度土木建築技術/迅速シーリング技術
E8 b	迅速シーリング技術	材料技術/高速シール材料技術
E9	モニタリング技術（耐震）	高度計測技術/高溫導熱計測技術
【島内処分】		
F13 a	島内地下水理に関する研究技術	高度計測技術
F13 b	島内地下水理に関する研究技術	CT技術/ジオトモグラフィ技術
F13 c	島内地下水理に関する研究技術	高度計測技術
F14	耐震食性材料技術	材料技術/耐食性材料技術
【水床処分】		
G15	耐食性容量（含温湿度）材料技術	材料技術/耐食・耐熱・耐寒・耐候性材料技術、密閉設計技術
G16 a	海没キャスク回収技術	メカトロニクス技術/ソナー技術
G16 b	海没キャスク回収技術	海洋探査技術/深海潜水船技術
G17	廢棄物輸送技術（含インフラ技術）	メカトロニクスAI技術/知能ロボット技術（運搬ロボット）
G18	氷層内モニタリング技術	高度計測技術/低溫導熱計測技術
G19	氷層・基盤岩探査技術	高度計測技術/ジオトモグラフィ技術
G20	氷層穿孔技術	高度土木建築技術/低温掘削技術
【井戸注入処分】		
H21	廃棄物性状の最適化技術	材料技術/材料設計技術
H22	地下安定性評価技術	評価技術/長期シミュレーション技術、高精度土質データ取得・解析技術
H23 a	注入・固形化材料技術	材料技術/材料設計技術
H23 b	注入・固形化材料技術	超電導技術/電気炉技術
H24 a	シーリング技術	高度土木建築技術/シーリング技術
H24 b	シーリング技術	材料技術/長寿命・高信頼性材料技術
【海岸底下処分】		
I25 a	サイト選定技術	海洋探査技術/深海掘削技術、海底ケーブル地震探査技術
I25 b	サイト選定技術	海洋探査技術/深海掘削技術、海底ケーブル地震探査技術
I25 c	サイト選定技術	海洋探査技術/深海掘削技術、海底ケーブル地震探査技術
I25 d	サイト選定技術	評価技術/長期シミュレーション技術
I26 a	輸送システムの設計技術	海洋探査技術/深海潜水船設計技術
I26 b	輸送システムの設計技術	メカトロニクス技術
I27 a	ペストレータ設計技術	宇宙・航空技術/ロケット設計技術
I27 b	ペストレータ設計技術	海洋探査技術/深海潜水船設計技術
I28	処分孔掘削技術	高度土木建築技術/深海掘削技術
I29 a	廃棄体ハンドリング・定置・確認技術	A.I.技術/知能ロボット
I29 b	廃棄体ハンドリング・定置・確認技術	高度計測技術/海岸底センシング技術（ソナー）
I30 a	人工バリア材料技術（耐圧・耐食性・海水中・容器材料技術）	材料技術/耐圧・耐食容器・材料設計技術
I30 b	人工バリア材料技術（耐圧・耐食性・海水中・容器材料技術）	評価技術
I31 a	安全性評価技術	評価技術/長期シミュレーション技術
I31 b	安全性評価技術	材料技術/性能評価試験技術
I32	原位置試験技術	海洋探査技術/ソナー技術
【幹分離】		
J33	幹分離の定量的評価技術	高度計測技術/レーザ分光分析技術
J34	有用金属性分離回収技術	新分離技術/パクテリアリーニング技術
J35 a	工業プロセス化技術 →高効率化	システム技術/効率向上技術
J35 b	工業プロセス化技術 →高効率化	メカトロニクス技術/オートメーション技術
J36 a	分離技術高度化技術	システム技術/効率向上技術
J36 b	分離技術高度化技術	メカトロニクス技術/オートメーション化技術
【消滅処理】		
K37 a	基本物性データ整備技術	大規模データベースの整備/システム化
K37 b	基本物性データ整備技術	センサー技術/高精度データ計測技術
K38 a	消滅効率確認・評価技術	評価技術
K38 b	消滅効率確認・評価技術	高度計測技術センター技術/TRU高精度計測技術
K39 a	炉（処理システム）運動向上技術	メカトロニクス技術/システム効率向上技術
K39 b	炉（処理システム）運動向上技術	A.I.技術/オートメーション化技術
K40	炉（処理システム）本体開発技術	システム技術/炉（システム）設計技術
【宇宙処分】		
L41	廃棄物固形化技術	材料技術/材料設計技術
L42	耐熱性容器設計技術	材料技術/耐熱材料設計技術
L43 a	宇宙移送システム設計技術	宇宙・航空システム技術/システム設計技術
L43 b	宇宙移送システム設計技術	宇宙・航空システム技術/システム設計技術
L44	モニタリング技術	高度計測技術/長期運転計測技術
L45 a	安全評価技術	評価技術/長期シミュレーション技術
L45 b	安全評価技術	材料技術/寿命評価試験技術

①については、各種処理処分の重要なステップである調査、解析、評価、建設、運転、長期管理等への関連性の観点から、関連性の高いものを○、比較的関連性に乏しいものを×とした。

②については、アンケートの中で具体的な革新ニーズとして挙げられたものが、各々の重要要素技術毎に何件あったかを数量で示した。

③、④では、環境条件が厳しいもの、要求性能が高いもの、概念に変化・ブレークスルーを与えると考え得るものに○、そうでないものに×を与えた。

重要度・要求性能により重要要素技術を評価した結果を表-9に示す。

表-9 重要要素技術の重要度・要求性能による評価(1/5)

D 地層区分又は代替処理処分の具體化に直接関連する技術

技術大綱

第三章 環境問題と資源利用

現行の概念に變化、フレームワークを導入する

表一 9 重要要素技術の重要度・要求性能による評価 (2/5)

コード	重要素技術	高度基盤技術		①	②	③	④
A25 b	コンピュータシミュレーションとグラフィックス技術 地盤地帯の地質調査、解析技術	高度計測技術／モートセンシング技術 開発技術／CT技術		×	3	3	×
A26 a	地熱地帯の地質調査、解析技術	高度計測技術／レーザ分光計測技術		×	3	3	×
A26 b	トレーーサー技術を用いた測量方法の高度化	高度計測技術／レーザ分光計測技術		5	5	5	5
A27 a	トレーーサー技術を用いた測量方法の高度化	高度計測技術／レーザ分光計測技術		5	5	5	5
A27 b	トレーーサー技術を用いた測量方法をもつて地盤の高精度化	高度計測技術／レーザ分光計測技術		5	5	5	5
A27 c	トレーーサー技術を用いた測量方法をもつて地盤の高精度化	高度計測技術／レーザ分光計測技術 (LIF, LPAS)		7	7	7	7
A28 a	地盤内の微量元素元素をもつて地盤の高精度化	高度計測技術／レーザ分光計測技術		15	15	15	15
A28 b	地盤内の微量元素元素をもつて地盤の高精度化	高度計測技術／レーザ分光計測技術		15	15	15	15
A28 c	地盤内の微量元素元素をもつて地盤の高精度化	高度計測技術／レーザ分光計測技術		15	15	15	15
A29 a	放射性核種の地層内挙動の定量化技術	高度計測技術／レーザ分光計測技術		13	13	13	13
A29 b	放射性核種の地層内挙動の定量化技術	高度計測技術／レーザ分光計測技術		14	14	14	14
A29 c	放射性核種の地層内挙動の定量化技術	高度計測技術／レーザ分光計測技術		3	3	3	3
A30 a	地下水脈の正確な状況を把握する技術	高度計測技術／ジオトモグラフィ技術		12	12	12	12
A30 b	地下水脈の正確な状況を把握する技術	高度計測技術／ジオトモグラフィ技術		22	22	22	22
A31 a	孔内スキャナーステップ開発装置	高度計測技術／超長距離測定技術		28	28	28	28
A31 b	孔内スキャナーステップ開発装置	高度計測技術／超長距離測定技術		3	3	3	3
A32	新らしい地層の地盤構造変化を予測する技術	高度計測技術／超長距離測定技術		12	12	12	12
A33	数万年単位での地層、地質構造変化を予測する技術	高度計測技術／超長距離測定技術		2	2	2	2
B01 a	地下作業者への心的影響を軽減する技術	地盤改良技術／地盤改良技術		14	14	14	14
B01 b	地下作業者への心的影響を軽減する技術	地盤改良技術／地盤改良技術		16	16	16	16
B02	国際協力によるデータバンクの整備	地盤改良技術／地盤改良技術		4	4	4	4
B03	A.I. の手法を導入してデータサイド開拓技術	地盤改良技術／地盤改良技術		17	17	17	17
B04	B05	地盤改良技術／地盤改良技術		7	7	7	7
B05	地盤改良技術／地盤改良技術	地盤改良技術／地盤改良技術		8	8	8	8
B06	B07	地盤改良技術／地盤改良技術		4	4	4	4
B07	B08	地盤改良技術／地盤改良技術		10	10	10	10
B08	地盤改良技術／地盤改良技術	地盤改良技術／地盤改良技術		4	4	4	4
B09	B10	地盤改良技術／地盤改良技術		7	7	7	7
B10	B11	セラミック技術／セラミック技術		20	20	20	20
B11	B12	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B12	B13	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B13	B14	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B14	B15	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B15	B16	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B16	B17	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B17	B18	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B18	B19	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B19	B20	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B20	B21	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B21	B22	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B22	B23	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B23	B24	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B24	B25	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B25	B26	セラミック技術／セラミック技術		4	4	4	4
B26	B27	セラミック技術／セラミック技術		4	4	4	4
B27	B28	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7
B28	B29	セラミック技術／セラミック技術		7	7	7	7

①

地盤区分又は代替地盤区分の具体化に直接関連し重要な位置付けにある技術

② 國係者の二つの大きな技術

③ 道用の技術が厳しいか。又は要求性能が高い技術

④ 現行の観念に変化、ブレーカー等を用いた技術

表-9 重要要素技術の重要度・要求性能による評価(3/5)

コード	重 要 基 本 技 術	高 度 基 本 技 術		④
		①	②	
B30 a	岩盤の長期安定性評価システムの開発	評価技術／最期シミュレーション技術，高精度土質データ取得・解析技術		
B30 b	新しいモダリティゾン概念，システムの開発	A.I技術／測定技術／センサー／システム化技術	4	④
B31	地盤力学的実験手法の開発	高精度ネットワーク技術／データバンク技術	4	
B32	グラウト以外の増強工法の開発	高精度土木工法技術／掘削技術	36	
B33 a	機械移行開発サイクル	超電導架構／極低温技術	1	
B33 b	局所的腐食，劣化の防止及び検知システム	材料技術／セメント／光電子合成技術，システム化技術	1	
B34 b	耐久性ベントナイトドクトの開発	材料技術／人工試験物合成技術（高圧合成）	1	
B35 a	高圧土木技術／寿命評価・試験技術（加速寿命試験），複合材料技術	材料技術／寿命評価技術	1	
B35 b	高圧土木連続接着技術	材料技術／接着／耐久性	1	
B36	高圧耐久性セメント系材料の開発	評価技術／大規模データベースの蓄積	16	
B37 a	高圧耐久性地盤強度システムの開発	A.I技術／データ高精度化技術	6	
B37 b	高圧耐久性地盤強度システムの開発	評価技術／コンピュータ技術 A.I技術／ソフトウェア技術（ビンガムモデル化技術）	23	
B38 a	地下水解分析技術	評価技術／表面分析技術（E S C A. 等）	22	
C01 a	岩盤の物理的性質と分布の関係	高精度計測技術／表面分析技術	3	
C01 b	岩盤の物理的性質と分布の関係	レーザ分光計測技術	2	
C02	岩盤の物理的性質と分布の関係	大規模計測技術	2	
C03 a	岩盤の物理的性質と分布の関係	レーザ分光計測技術／評価技術	2	
C03 b	岩盤の物理的性質と分布の関係	CT技術／表面評価技術，レーザハルス，X線技術	2	
C04 a	地下水と地盤の接觸面特性分布の解剖技術	材料技術／表面評価技術	3	
C04 b	地下水と地盤の接觸面特性分布の解剖技術	大規模計測技術	3	
C05 a	岩盤の物理的性質と分布の関係	高精度計測技術／モニタリング技術	3	
C05 b	岩盤の物理的性質と分布の関係	大規模コマータベース	3	
C06 a	岩盤の物理的性質と分布の関係	評価技術	3	
C06 b	岩盤の物理的性質と分布の関係	CT技術／コンピュータグラフィックス技術	3	
C07	接觸移動挙動解析手法の開発	評価技術／表面評価技術	3	
C08 a	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	A.I技術／表面評価技術	3	
C08 b	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	評価技術／モニタリング技術	3	
C09	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	A.I技術／表面評価技術	3	
C10	人工パリア内の各種の接觸変化評価，解析手法の開発	評価技術／モニタリング技術	3	
C11 a	材料の自動監視技術	A.I技術／表面評価技術	3	
C11 b	耐久性評価のためのデータの整備	評価技術／モニタリング技術	3	
C12 a	材料の自動監視技術	評価技術／モニタリング技術	3	
C12 b	耐久性評価のためのデータの整備	評価技術／モニタリング技術	3	
C13 a	耐久性評価のためのデータの整備	評価技術／モニタリング技術	3	
C13 b	耐久性評価のためのデータの整備	評価技術／モニタリング技術	3	
C14	将来の変化を予測するためのデータ化システム評価技術	CT技術／表面評価技術	12	
C15 a	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C15 b	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C16 a	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C16 b	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C17 a	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C17 b	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C18 a	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C18 b	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C19 a	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C19 b	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C20 a	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C20 b	人工パリアの機能の劣化要因の把握技術	CT技術／表面評価技術	12	
C21	地盤固結化材の開発	評価技術／モニタリング技術	13	
C22 a	地盤固結化材の開発	特定機種を選択的にモニタリングできるシステム	7	
C22 b	地盤固結化材の開発	特定機種を選択的にモニタリングできるシステム	7	
C23 a	地盤固結化材の開発	評価技術／モニタリング技術	7	
C23 b	地盤固結化材の開発	評価技術／モニタリング技術	7	
C24 a	地盤固結化材の開発	評価技術／モニタリング技術	7	
C24 b	地盤固結化材の開発	評価技術／モニタリング技術	7	

地層焼成分又は代替物の具体化に直接関連し重要な位置付けにある技術

技術書籍出版社

技術的性質と要求仕様の関係

表-9 重要要素技術の重要度・要求性能による評価（4／5）

コード	重 要 要 素 技 術	高 度 基 本 技 術	①	②	③	④	⑤
【超深孔処分】							
D 1	超深部掘削技術、坑道維持技術	高深度土木建築技術／超深部掘削技術、坑道維持技術	○	1	○	○	○
D 2	超深部耐環境材料、耐食技術	材料技術／耐高压・高温材料、耐食材料	○	1	○	○	○
D 3 a	高深度計測技術	高深度計測技術	○	1	○	○	○
D 3 b	超深部計測技術	超深部計測技術	○	1	○	○	○
D 3 c	超深部モニタリング技術	材料技術／耐高压・高温材料	○	1	○	○	○
D 4 a	超深部(3,000～15,000m)の環境、岩体調査及び評価技術	高強度前掘削技術／耐高压・高温材料 メカトロニクス技術／知能ロボット技術	○	1	○	○	○
D 4 b	超深部(3,000～15,000m)の環境、岩体調査及び評価技術	材料技術／耐高压・高温材料	○	1	○	○	○
D 5 a	産業体ハンドリング技術	高強度土木建設技術／深部掘削技術	○	1	○	○	○
D 5 b	産業体ハンドリング技術、モニタリング技術	材料技術／耐高压・高温材料	○	1	○	○	○
D 6 a	超深部シーリング技術、モニタリング技術	高強度土木建設技術／超深部シーリング技術	○	1	○	○	○
D 6 b	超深部シーリング技術、モニタリング技術	材料技術／耐高压・高温材料	○	1	○	○	○
D 6 c	超深部シーリング技術、モニタリング技術	高強度計測技術／超深部(遠隔)計測技術	○	1	○	○	○
【岩石溶融処分】							
E 10	材料技術(クラックフリー材料)	材料技術／インテリジェント材料技術(自己修復機能材料)	×	1	×	○	○
E 11 a	産業体ハンドリング技術	メカトロニクス技術／耐高压・高温材料	×	1	×	○	○
E 11 b	産業体ハンドリング技術	材料技術／耐高压・高温材料	×	1	×	○	○
E 12	深部(2,000m)掘削技術、坑道維持技術	センサ・システム技術／深部掘削技術	○	1	○	○	○
E 7	超深部シーリング技術	高強度土木建設技術／深部掘削技術	○	1	○	○	○
E 8 a	超深部シーリング技術	高強度土木建設技術／迅速シール材料技術	○	1	○	○	○
E 8 b	超深部シーリング技術(耐熱)	材料技術／高強度材料技術	○	1	○	○	○
E 9	モニタリング技術	高強度計測技術／高温蒸気計測技術	○	1	○	○	○
【島内処分】							
F 13 a	島内地下水理に関する研究技術	高強度計測技術／ジオトモグラフィ技術	○	1	○	○	○
F 13 b	島内地下水理に関する研究技術	CT技術／耐食性材料技術	○	1	○	○	○
F 14	島内地下水理に関する研究技術	材料技術／耐食性材料技術	○	1	○	○	○
【氷床処分】							
F 15	耐食性接着(含温差)材料技術	材料技術／耐食・耐熱新素材技術、容器設計技術	○	1	○	○	○
G 16 a	清波キャスク回収技術	メカトロニクス技術／ソナーソナー技術	○	1	○	○	○
G 16 b	清波キャスク回収技術(含インフラ技術)	海洋探査技術／深海潜水艇技術	○	1	○	○	○
G 17	清波内モニタリング技術	メカトロニクスAI技術／知能ロボット技術(遠隔ロボット)	○	1	○	○	○
G 18	水層、基盤岩探査技術	高強度計測技術／低温掘削技術	○	1	○	○	○
G 19	水層穿孔技術	高強度土木建設技術／ジオトモグラフィ技術	○	1	○	○	○
G 20	水層穿孔技術	高強度計測技術／低温掘削技術	○	1	○	○	○
【井戸注入処分】							
H 21	産業物性状の最適化技術	材料技術／材料設計技術	○	1	○	○	○
H 22	地下安定性評価技術	評価技術／長期シミュレーション技術、高精度土質データ取得・解析技術	○	1	○	○	○
H 23 a	注入、固化化材料技術	材料技術／材料設計技術	○	1	○	○	○
H 23 b	注入、固化化材料技術	超電導技術／極低温技術	○	1	○	○	○
H 24 a	シーリング技術	高強度土木建設技術／シーリング技術	○	1	○	○	○
H 24 b	シーリング技術	材料技術／長寿命、高信頼性材料技術	○	1	○	○	○
【海洋底下処分】							
I 25 a	サイト選定技術	材料技術／深海掘削技術、海底ケーブル地盤探査技術	○	1	○	○	○
I 25 b	サイト選定技術	海洋探査技術／長期シミュレーション技術	○	1	○	○	○

① 地層処分又は代替処理処分の具体化に直接関連し重要な位置付けにある技術

② 関係者のニーズが大きい技術

③ 通用の箇所に変化、ブレーカースルーを与える技術

④ 現行の概念に変化、ブレーカースルーを与える技術

表-9 重要要素技術の重要度・要求性能による評価(5/5)

卷之三

毛髪の性質は、毛髪の構造によって決まります。毛髪は、表皮層（角質層）、真皮層、皮下組織から成ります。毛髪の主成分は、角蛋白（ケラチン）で、これは、毛髪の強度と伸縮性をもたらす重要な要素です。

卷之三

3.1.2 重要要素技術適用可能性評価基準の作成

地層処分及び代替処理処分への適用対象技術を重要要素技術より選定するために、各技術の適用性を判断するための評価基準を作成する。

3.1.1において重要性及び要求性能等により、各々の重要要素技術毎に地層処分への関連性、ニーズの多さ、適用環境条件・要求性能の高さ及び概念の変化・ブレークスルーの可能性により概略的な評価を行った。

ここでは、上記の評価結果を用いて重要要素技術をスクリーニングする。スクリーニングにあたっては、3.1.1での評価を数量化できるような係数を設定し、さらにポイント数の大きいものを選択するという手順を用いる。

(1) 評価結果の定量化

表-9に示した重要性・要求性能の評価を下記の方法により定量化する。

重要性・要求性能	○	×
①地層処分又は代替処理処分の具体化に直接関連し重要な位置付けにある技術	× 5	× 0
②関係者のニーズが大きい技術	アンケートのニーズの数量(件数) をそのまま用いる(代替処理処分はすべて1点とする)	
③適用箇所の環境条件が厳しいか、又は要求性能が高い技術	× 2	× 1
④現行の概念に変化・ブレークスルーを与える技術	× 10	× 1

①については、直接関連しないものとして×を与えたものは、基本的にはその後の検討の価値はないものとして係数は0とした。

①、③、④で○としたものについては、④が最も重要な項目と考え10倍、①と③では①の方がより重要なものとして5倍、③を2倍とするものとした。

(2) 評価基準の設定

前項の①, ②, ③, ④の積が 100ポイントを上まわるものを重要要素技術として選択する。従って、②のニーズが1件であっても、他の項目全てが○であるならば選択対象となり、逆にニーズが極めて高くても他の評点が極端に低ければ選択対象とはならない。

なお、代替処理処分については、②のニーズの件数はすべて1点としているため、①, ③, ④のすべてが○と判断されたものののみを選択することになる。

3.1.3 対象技術のリストアップ

(1) 評価基準による絞り込み

3.1.2で設定した定量化方法及び評価基準により、重要要素技術を選択した結果を表-10に示す。

(2) 技術の具体化

表-10でリストアップされた基盤技術（及び基盤技術の細分類）を分類すると以下の技術に分けられる。

① 地層処分関連技術

高度基盤技術	基盤技術細分類
評価技術	リモートセンシング/ジオトモグラフィ技術/ 超長期の地殻変動（地震）予知技術/ 長期シミュレーション技術、高精度土質データ取得・解析技術/ 長期予測技術、シミュレーション技術
A I 技術	フラクタル解析技術/推論技術/シミュレーション技術/ 地下水解析技術/コンピュータシミュレーション技術/ 大規模データベース技術/データ高精度化技術
C T 技術	ジオトモグラフィー技術/ 非破壊検査（中性子、超音波、X線技術）/ コンピュータグラフィックス技術
メカトロニクス技術	—
高度計測技術	MR I技術/センサーシステム化技術/光センサー技術
高度土木建築技術	掘削技術/地盤改良技術
材料技術	F R P（処分環境）/超耐熱耐圧切削材料創製技術/ スーパーエンジニアリングプラスチック（処分環境）/ セラミックス技術（処分環境）/高耐食性材料技術（処分環境）/ 長期寿命評価・試験技術（処分環境）/ インテリジェントマテリアル技術/ 人工鉱物合成技術（処分環境）/機能性材料技術/複合材料技術

表-10 適用対象となる高度基盤技術の抽出（1／2）

コード	重 要 素 技 術	高 度 基 盤 技 術	①	②	③	④
〔地層区分〕						
A02 a	人工衛星を用いた地質調査技術	評価技術／リモートセンシング（スペクトラルセンシング）	○	○	○	○
A03 a	非破壊で地層の三次元的情報を得る技術	高度計測技術／ジオトモグラフィ（プロトン、超音波、レーザーパルス、電磁波）	○	○	○	○
A03 b	非破壊で地層の三次元的情報を得る技術	CT技術／非破壊検査	○	○	○	○
A05 a	CT的手段を用いた地質調査技術	高度計測技術／LDV（レーザドップラ流速計）、レーザレーダ、CCDカメラ…etc.	○	○	○	○
A05 b	CT的手段を用いた地質調査技術	評価技術／レーベン技術、シミュレーション技術	○	○	○	○
A07 a	リモートセンシング手法による地質調査技術	A.I.技術／推論技術、シミュレーション技術	○	○	○	○
A07 b	リモートセンシング手法による地質調査技術	メカトロニクス技術	○	○	○	○
A08	少量のデータから実際の状態を正確に推定する技術	材料技術／超耐熱耐圧切削材料創製技術	○	○	○	○
A09 b	断層の状態を正確に推定する地質調査技術	高度計測技術／A.I.技術／フレクタル解析技術	○	○	○	○
A11 a	ボーリングの高度化による地質調査技術	高度計測技術／コンピューターシミュレーション技術／大規模データベースの基盤	○	○	○	○
A11 b	ボーリングの高度化による地質調査技術	A.I.技術／長期寿命評価・試験技術	○	○	○	○
A15 a	非破壊で地下水脈を把握する技術	材料技術／N.M.R.技術	○	○	○	○
A15 b	非破壊で地下水脈を把握する技術	評価技術／ジオトロニクス技術	○	○	○	○
A18 a	地下環境を精密に再現できるシステム	高度計測技術／機能性材料技術（分子ふるい：バイオ材料）	○	○	○	○
A21	数千年にわたり地盤変動の正確なシステム	CT技術／ジオトロニクス技術	○	○	○	○
A22	正確な超深井戸を可能にする透水試験技術	評価技術／長期間地盤変化（地盤）予知技術	○	○	○	○
A23 a	低透水性岩盤に対する技術	大規模コンピューターベースデータベースの構築	○	○	○	○
A23 b	水みちの同定が可能な透水試験技術	材料技術／スリーブアライアンスチクス、セラミックス技術	○	○	○	○
A24 b	低透水性岩盤に対する技術	材料技術／インテリジェントマテリアル技術	○	○	○	○
A30 a	地下水脈の正確な状況を把握する技術	材料技術／高融食性材料技術	○	○	○	○
A30 b	地下水脈の正確な状況を把握する技術	材料技術／機能性材料技術	○	○	○	○
B01 a	数万年単位での地層、地質構造変化を予測する技術	材料技術／人工駆動物合成技術、セラミックス合成技術	○	○	○	○
B01 b	数万年単位での地層、地質構造変化を予測する技術	高精度計測技術／地盤改良技術	○	○	○	○
B08	ガラスよりも耐久性、固定性に優れる固化体の技術	高精度土木建築技術／地盤改良技術	○	○	○	○
B09	核種無効化材料およびそのシステムの開発	大規模土木建設技術／光センサードライブ技術	○	○	○	○
B16	防塵、防砂特性に優れる新素材の開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
B22	特定核種のみをを選択的に着色する材料の開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
B23	化学的に安定な新素材の開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
B27	周辺地質の長期安定性評価概念、システムの開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
B30 a	岩盤の長期安定性評価概念、システムの開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
B31	新しいモニタリング技術の開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
B33 a	グラウト以外の増強工法の開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
B33 b	局所的腐食、劣化の防止ひび割れの開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
B35 b	高耐久性セメント系材料の開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
B38 a	高精度なコンピューターシーシュミュレーション技術	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
C01 a	地下水と地表水の相互関係の解説技術	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
C02	地下水の機能の劣化要因の評価手法の開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
C04 b	人工パリアの機能の劣化要因の評価手法の開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
C08 a	人工パリアの機能の劣化要因の評価手法の開発	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
C08 b	人工パリアの経時変化の予測技術	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
C10	パリア内の各種、データを導入した可視化技術	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
C11 b	コンピュータを考慮にいれたシステム評価技術	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
C14	将来の変化を考慮した可視化技術	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○
C15 a	将来の変化を考慮した可視化技術	高精度土木建設技術／高精度土質データ取得・解析技術	○	○	○	○

表-10 適用対象となる高度基盤技術の抽出（2／2）

コード	重要技術	高度基盤技術	①	②	③	④
【超深孔処分】						
D 1	超深部掘削技術、坑道維持技術	高度土木連続技術／超深部掘削技術、坑道維持技術	○	1	○	○
D 2	超深部耐環境材料、設計技術	材料技術／耐高压・高温材料、耐食材料	○○○○○○○○	1	○○○○○○○○	○○○○○○○○
D 3 c	超深部モニタリング技術	材料技術／耐高压・高温材料、高信頼性材料技術	○○○○○○○○	1	○○○○○○○○	○○○○○○○○
D 6 b	超深部シリーリング技術、モニタリング技術	材料技術／長寿命、高信頼性材料技術	○○○○○○○○	1	○○○○○○○○	○○○○○○○○
D 6 c	超深部シーリング技術、モニタリング技術	高度計測技術／超深部（連続）計測技術	○○○○○○○○	1	○○○○○○○○	○○○○○○○○
【岩石溶離処分】						
E12	深部モニタリング技術 E9 モニタリング技術（耐熱）	センサー技術／深部連続計測技術 高度計測技術／高温連続計測技術	○	1	○	○
【島内処分】						
F13 b	島内地下水理に関する研究技術	CT技術／ジオトモグラフィ技術	○	1	○	○
【水床処分】						
G19	氷嚮、基盤岩探査技術	高度計測技術／ジオトモグラフィ技術	○	1	○	○
【井戸注入処分】						
H22	地下安定性評価技術	評価技術／長期シミュレーション技術、高精度土質データ取得・解析技術	○	1	○	○
【海洋底下処分】						
I28	廻分孔掘削技術	高度土木連続技術／深海掘削技術	○	1	○	○
【群分離】						
J36 a	分離技術高度化技術	システム技術／効率向上技術	○	1	○	○
【消滅処理】						
K40	炉（処理システム）本体開発技術	システム技術／炉（システム）設計技術	○	1	○	○
【宇宙処分】						
L41	廃棄物固化化技術	材料技術／材料設計技術	○	1	○	○
L42	耐燃性容器設計技術	材料技術／耐燃材料設計技術	○	1	○	○
L43	宇宙移送システム設計技術	宇宙・航空システム技術／システム設計技術	○	1	○	○

② 代替処理処分関連技術

	高度基盤技術	基盤技術細分類
超深孔処分	高度土木建築技術	超深部掘削技術／坑道維持技術
	材料技術	超高压高温材料／耐食材料／長寿命・高信頼性材料
	センサー技術	超深部（連続）計測技術
	高度計測技術	超深部（連続）計測技術
岩石溶融処分	センサー技術	深部連続計測技術
	高度計測技術	高温連続計測技術
島内処分	CT技術	ジオトモグラフィー技術
水床処分	高度計測技術	ジオトモグラフィー技術
井戸注入処分	評価技術	長期シミュレーション技術／高精度土質データ取得・解析技術
海洋底下処分	高度土木建築技術	深海掘削技術
群分離	システム技術	効率向上技術
消滅処理	システム技術	炉（システム）設計技術
宇宙処分	材料技術	材料設計技術／耐熱材料設計技術
	宇宙・航空システム技術	システム設計技術

これらの技術を具体化して適用対象技術を選定するに際して以下の点に留意して検討を行った。

- ① 評価技術／システム技術／材料技術に関しては対象が明らかになって始めて技術の具体性が出ることから、対象を明確化した上で技術の具体化を行った。
- ② 基盤技術細分類においてすでに具体的な技術が提示されているものに関してはこれを取り上げるものとした。
- ③ 代替処分に関しては、処分方法と対応させて整理することとした。

上記の留意点を踏まえた結果、現実に技術の具体的な絞り込みが必要となったのは以下の技術となった。これ以外の技術に関しては直接リストアップされているものを適用対象技術とする。

① 地層処分関連技術

高度基盤技術	基盤技術細分類
評価技術	リモートセンシング/長期シミュレーション技術/長期予測技術/ フラクタル解析技術/超長期の地殻変化(地層)予知技術/ 高精度土質データ取得・解析技術
A I 技術	推論技術/シミュレーション技術/地下水解析技術
C T 技術	コンピュータグラフックス技術
メカトロニクス技術	
高度計測技術	センサーシステム化技術
高度土木建築技術	掘削技術/地盤改良技術
材料技術	F R P(処分環境)/ スーパーエンジニアリングプラスチック(処分環境)/ セラミックス技術(処分環境)/高耐食性材料技術(処分環境)/ 長期寿命評価・試験技術(処分環境)/ 人工鉱物合成技術(処分環境)

② 代替処分関連技術

高度基盤技術	基盤技術細分類
評価技術	長期シミュレーション(地層)/ 高精度土質データ取得・解析技術
システム技術	効率向上技術(群分離)/炉設計技術(消滅処理)
センサ技術	深部連続計測技術
航空宇宙システム技術	システム設計技術
高度計測技術	高温連続計測技術/超深部連続計測技術
高度土木建築技術	超深部掘削技術/坑道維持技術
材料技術	耐食・耐熱衝撃材料(氷床)/容器設計技術(氷床)/ 耐熱材料設計技術(大気中・墜落時)/ 耐高温・高压材料(海洋底・処分環境)/ 長寿命・高信頼性材料(処分環境)

次にこれらの技術については、以下の方法で適用対象技術としての具体化を行った（以下では地層処分／代替処分を同時に整理している）。

(a) 評価技術：

長期シミュレーション、超長期の地殻変化予知技術等としては、地層について長期評価としてモデル化にフラクタル理論を用いて解析的に予測を行う研究が近年進歩しつつあり、この技術を取り上げて「フラクタル理論による地質の長期評価技術」を適用対象技術とした。

リモートセンシングおよび高精度土質データ取得・解析技術に関しては、基本的には従来技術の改善が主流であったが、近年の高温超伝導体の研究により SQUID の高度化が期待されることが具体的な技術革新として想定されることから、適用対象技術として「高温超伝導体による SQUID」を取り上げた。

(b) システム技術：

「効率向上技術（群分離）」に対しては従来の分離技術の性能・精度を大幅に超えるレーザー分離技術を、また「炉設計技術（消滅処理）」に対応する技術としては現在高速炉、消滅処理専用原子炉、反応核変換技術（電子加速器）および核破碎技術（陽子加速器）などの技術が考えられているが、これらの技術のうち、原子炉は従来技術の延長線上にあることから、加速器に関する技術を適用対象技術として選択した。

(c) 航空宇宙システム技術：

宇宙移送システム設計技術としてはより高い信頼性を目指したロケット技術の高度化と EMMRD を適用技術として選択した。この点では、現在、他のオプションとして具体的な技術を特定することはできなかった。

(d) A I 技術：

推論技術／シミュレーション技術／地下水解析技術に関しては、重要要素技術として「非破壊で地下水脈を把握する技術／断層の状態を正確に推定する技術／地下水と地表水の相互関係の解析技術」があげられているが、これらは評価技術での地質の長期評価技術の基礎となっているものと考えて具体的に適用対象技術の抽出は行わなかった。

(e) CT技術：

CT技術としては、各種の測定・調査、シミュレーション計算による3次元データの視覚化の手法として、情報量が膨大なものや高解像度を要求される事例への適用が研究されている「ボクセル構造」を適用対象技術とした。

(f) メカトロニクス技術：

重要要素技術として「ボーリングの高度化による地質調査技術」があげられているが、これらの技術は、高度土木建築技術の一部と考えて具体的な技術を抽出していない。

(g) 高度計測技術／センサー技術：

これには多くの重要要素技術が対応しており、地下深部の地下水の状態を含めた信頼性が高く長寿命のセンサーシステムが求められている。この点に関しては次のように適用対象技術を具体化した。

(i) 地下水用のセンサー

地層処分においては地下水中の溶存物質の検知が重要となり、この点からはバイオセンサー／イオンセンサーが有効と考えられている。

(ii) センサーシステムの耐環境性向上

伝送系の耐環境性向上技術としては光ファイバーが最も有効と考えられる。この他にノードの耐環境性が重要となる。ノードの耐環境性向上と同様な点から、超深孔処分、岩石溶融処分での極限環境（熱、圧力）に耐えることが重要なものとして適用対象技術とした。

(iii) センサーシステムの信頼性向上

ネットワークとしての頑健性の向上、並びにセンサの自己診断機能の複合化（スマートセンサ）が重要となる。

(h) 高度土木建築技術：

掘削技術としては機械掘削技術の開発が進んでおり、また、岩盤を傷めない技術としてスムースプラスティングの適用が考えられる。しかし、今後の開発ターゲットとしては機械掘削としては特に超深部における大口径超深部掘削が、また岩盤を傷めない掘削法としてはレーザー掘削法が有効と考えて適用対象技術として抽出した。

(i) 材料技術：

材料技術に関しては、具体的な材料開発の方向性を明らかにすることが重要となる。ここでは、FRP／スーパーエンジニアリングプラスチック等の有機系材料の耐環境性に問題があることから、超深孔及び地層処分環境において超長期の廃棄物閉じ込めを実現する材料として、耐食性を極限まで高めるオプション、並びに腐食により環境機能を維持するオプションを適用対象技術とした。

以上の検討により具体的な技術を抽出し整理した結果を表-11, 12に示した。

表-11 地層処分での適用対象技術

適用処分方法	カリオでの適用箇所	適用環境	ニーズ	適用対象技術
地層処分	調査・解析	空	人工衛星からの広範的な地質情報	高温超伝導体によるSQUID
地層処分	調査・解析	地上、地下 地上、地下 地上、地下	地質の三次元情報 非破壊の透水性試験方法 非破壊の透水性試験方法	ジオトモグラフィー技術(抵抗、電磁波、弾性波) 中性子探査技術 核磁気共鳴探査技術
地層処分	調査・解析	室内 室内 室内	材料の長期評価 地層の長期評価 三次元構造を表現可能なソフトウェア技術	超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術 ブラックタル理論による地質の長期評価技術 ボクセル構造による地質構造の表現
地層処分	建設	地下坑道	クラックの発生が抑えられるボーリング技術	レーザーによる掘削技術
地層処分	処分後	モニタリング	環境変化を検出するセンサー	バイオセンサー
地層処分	処分後	モニタリング	環境変化を検出するセンサー	イオンセンサー
地層処分	処分後	モニタリング	環境変化を検出するセンサー	光ファイバーセンサー
地層処分	処分後	モニタリング	センサーからのデータ転送技術	耐放射線光ファイバー
地層処分	処分後	モニタリング	耐環境性のセンサー技術	ノードの耐環境性
地層処分	処分後	モニタリング	耐環境性のセンサー技術	センサーのネットワークとしてのロバストネス
地層処分	処分後	モニタリング	耐環境性のセンサー技術	スマートセンサー技術 (故障自己診断機能等)
地層処分	処分後	処分環境	耐食性能	超耐食性材料
地層処分	処分後	処分環境	耐環境性	環境条件を環境維持作用をもつ鉄等の材料の腐食厚により保持

表-12 代替処理処分での適用対象技術

適用処方法	シナリオでの適用箇所	適用環境	ニーズ	適用対象技術
超深孔処分 超深孔処分 超深孔処分 超深孔処分	建設 モニタリング 処分後 処分後	地下坑道 処分環境 処分環境 処分環境 処分環境	掘削技術 耐環境性のセンサー技術 耐化学環境、構造強度 耐環境性	大口径超深部掘削技術 耐熱性(200~300度)、耐圧センサー 環境条件を環境維持作用をもつ鉄等の材料の腐食厚により保持 超耐食性材料
岩石溶融処分	処分後	処分環境	耐環境性のセンサー技術	耐熱性(200~300度)、耐圧センサー
島内処分	調査・解析	地上	地質の三次元情報	ジオトモグラフィー技術(比抵抗、電磁波、弾性波)
氷床処分	調査・解析	地上	地質の三次元情報	ジオトモグラフィー技術(比抵抗、電磁波、弾性波)
井戸注入処分	調査・解析	地上	地質の三次元情報	ジオトモグラフィー技術(比抵抗、電磁波、弾性波)
海洋底下処分	建設	海底	海底での作業機械	海底作業用の掘削技術
群分離	運転	地上	高効率の分離技術	レーザーによるアクリニド分離
消滅処理	運転	消滅処理施設	高効率の消滅処理	反応核変換技術(電子加速器)、核破砕技術(陽子加速器)
宇宙処分	打ち上げ	大気中	耐熱、耐衝撃、軽量	(CERNET)
宇宙処分	打ち上げ	大気中	安全性の向上	ロケット技術の高度化
宇宙処分	打ち上げ	大気中	安全性の向上	EMD

3.2 地層処分に適用可能な技術の調査

本節では、3.1で摘出した適用対象技術のうち、地層処分への適用が考えられる次の技術について調査、整理を行った結果を示す。

(1) 調査・計測技術関連

- ① 高温超伝導体による量子干渉装置（S Q U I D）
- ② ジオトモグラフィー技術
- ③ 中性子探査技術
- ④ 核磁気共鳴探査技術

(2) 解析技術関連

- ① 超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術
- ② フラクタル理論による地質の長期評価技術
- ③ ボクセル構造による地質構造の表現

(3) 処分技術関連（モニタリング、人工バリア関連）

- ① レーザーによる掘削技術
- ② バイオセンサー技術
- ③ イオンセンサー技術
- ④ 耐放射線光ファイバー技術
- ⑤ スマートセンサー技術
- ⑥ 超耐食性材料

なお、光ファイバーセンサーは昨年度調査を実施した。ノードの耐環境性、センサーのネットワークとしてのロバストネス、環境条件を環境維持作用をもつ鉄等の材料の腐食厚により保持については、具体的な調査を行っていない。

3.2.1 調査・計測技術関連

地層処分を実施するための重要な技術のひとつとして非破壊による地下情報の探査がある。従来、地盤情報の取得に地質踏査、ボーリング、検層、原位置試験、土質試験などが主要な手段として用いられてきたが、最近では、工事の広域化や大型化に伴って、自然災害の予知・実態調査、環境アセスメント調査なども必要になり、従来の点的な調査だけでなく、広域的・即時的な情報も必要になってきた。

このため、宇宙開発の成果の一つであるリモートセンシング技術や高精度の各種地盤

探査技術がハードとソフトの両面にわたって発展・進歩してきた。

地盤探査手法とその利用目的を整理したものを表-13に示す。ここでは、この表に示した種々の探査法のうちで、比較的新しい探査法といえる浅層反射法、電磁探査法、ジオトモグラフィー、リモートセンシングについてその概要、特徴等につき表-14にまとめて示す。

また、以下に3.1項で摘出した適用対象技術の概要及び現状を示す。

(1) 高温超伝導体による量子干渉装置（S Q U I D）

(i) S Q U I D の概要¹⁾

超伝導エレクトロニクスのキーデバイスは、超伝導体を用いて構成されるジョセフソン・デバイスである。典型的なジョセフソン・デバイスは2枚の超伝導薄膜の間に絶縁体をはさんで形成される接合素子である。ジョセフソン・デバイスの市販品はまだ僅かしかなく、S Q U I D センサーが唯一のものと考えられる。

最近は単体のセンサーだけでなくシステムとして心磁計、脳磁計が市販され始めた。将来、高温超伝導体が開発されれば、さらに広範囲に利用され始めるものと考えられる。

S Q U I Dには直流（D C）と交流（R F）の両者があり、各々の基本構造の例を図-19と図-20に示す。前者のD C S Q U I Dはその構造から平面結合方式と呼ばれるもので、S Q U I Dの主リングは中央に四角の小孔（一辺数 μm ）をあけた一辺1mm程度の四角の超伝導薄膜で、図では下方に裂け目を入れて、ベース超伝導膜と一枚構成となる。主リング膜の下には絶縁膜をはさんでグランドプレートが裂け目を裏打ちするようになっている。主リングの上面に絶縁層を介して入力コイルと帰還コイルが図示のように形成される。ベース超伝導膜の上に対向超伝導膜を絶縁して乗せるが、絶縁の一部を孔明けしてジョセフソン素子を2個作成する。入力コイルに電流を流すと、その作る磁束は主リングの反磁性のために、中央の小孔に集中する。このために入力コイルと主リングの結合係数は0.7かそれ以上にすることが容易となる。主リングの裂け目から磁束が漏れるのを防ぐためにグランドプレーンの裏打ちが役立つことになる。

後者のR F S Q U I Dはバイアス用の結線が不要で構造が簡単である。図は超伝導薄膜に1個のジョセフソン素子を共通にした2個のR F S Q U I Dが並列に形成された例である。

表-13 地盤探査の分類とその利用目的

区分	種類	自然・人為事象の別	主な利用分野
リセモンシング	航空機リモートセンシング	自然人為	地すべり、資源、地形、地質、地質構造、土質、土壤区分、災害予知・実態調査、植生、地下水、地表含水状況、地熱、リニアメント解析
	衛星リモートセンシング		
物理探査	弾性波探査	人為 (音波、人工地震)	地質構造、岩盤・地盤調査、地下空洞、断層、埋没谷
	電気探査	自然人為	地すべり、地下水、資源、旧河道、空洞、遺跡、変質等
	電磁探査	人為	地質構造、断層、浅層地質、空洞、埋設物遺跡、水理地質構造、地盤構造
	重力探査	自然	地質構造、断層
	放射能探査	自然	資源、地下水、漏泉、断層
	磁気探査	自然	資源、磁性埋設物
	音波探査	人為	測深、海底下地表調査
	地温探査	自然	地熱、温泉、地下水

表—14 各探査法の概要と特徴

探査法	内 容	適 用	特 徴 等
浅層反射法	弹性波を用いる反射法で、振源としてはP波の他、最近では解析精度向上のためSH波が利用される。	数百m以下の浅地層を対象として地盤調査用に開発された。	このほか、超振動機により振動数の異なるレーリー波を発生させ、地震調査、空洞探査、道路調査を行う特殊探査技術も開発されている。
インダクション法 (EM法)	絶縁変化させた磁場を大地に印加した時、地中に誘導電流が発生して生じる二次電磁場（地下比抵抗分布に依存）を地表面のコイル、ループなどて受信する方法。	金属鉱床探査を目的として発展。水平探査用を中心。	最近は深度方向の情報を得るために、周波数をマルチ化した装置が増加する傾向にある。
C-SAMT ^{1*} 法	大地内に生じた自然変動電界および磁界の測定にもとづく電気探査法であるDT法のもう一つの測定時の信号源、信号強度の不安定性を補う方法。	鉱床探査で成果をあげており、土木地質調査用として有望。	任意の強さ、任意の方向、任意の周波数に人工信号源を設定できるため真のデータが得られ、作業性も良好。また調査データは、地質区分や岩層区分とよく一致し、生データのまま地下構造が推定できる。
ELF-MT ^{2*} 法	自然界に存在する電磁波を用いて大地の比抵抗を求めるMT法の1種。	地熱探査、金属鉱床探査、広範囲の地質探査（特に断層構造）に適する。	信号が安定しているので比較的容易に測定でき、能率的で広範囲にわたる比抵抗マッピングができる。
VLF ^{3*} 法	VLF(3~30kHz)電波による地表での一次磁場が、送信局を中心とした同心円の接線方向に生ずるという原理に基づくもので、地下媒質中に断層破碎帯、金属鉱床等があると比抵抗が異常に低下し、過電流が誘導され二次磁場が生じる性質を利用する方法。	探査可能深度は100m程度。広範囲の比抵抗マッピング（探査）、高密度測点配置による微細な地質構造変化（精査）に適する。	表皮深度が比較的浅いので比抵抗の水平方向変化の把握態度良好。電波も常時送信され強度が安定しており、また比較的簡単な受信装置で迅速に測定可能。
地下探査 レーダー法	電磁波パルスを地中に放射して電気的性質の異なる地層の境界面での反射信号をアンテナで受信し、これにより境界面の形状、深度などを測定する方法。	探査可能深度は地盤比抵抗に支配され、數百Ω・m以上で數mまで數十Ω・m以下では1m以下。	十分な探査深度、分解能を得るには、高周波成分を含む広帯域スペクトラムを有し、かつ十分に高出力の単一パルスを用いること、電磁波パルスの発生間隔は目的深度まで電波が伝播して地表に戻るまでの所要時間より長いことが必要。
ジオトモグラフィ法	地下を対象とした不可探情報の可視化技術で、現在もっとも実用化への研究開発が進んでいるのは地盤波を用いたトモグラフィである。地表、坑井内で得られた震源から地盤波レスポンスを地下の遮さ分布、減衰率等のデータに再構成する。	土木構築物のための地盤調査に用いられる。カナダ、イスラエル等では放射性同位元素②坑井内部源の必要性③透過及び散乱波を対象としたデータ処理体系の点で改良が進んでいる。	技術的には開発途上にあるが、従来よりも①坑井を利用した測定系の幾何的配置が進んでいる。
リモートセンシング	対象物から反射される電磁波（可視、近赤外線／赤外線／マイクロ波域）などにより対象物を識別したり、周囲環境条件を判断する方法。記録方式はセンサーによって異なり、図-18のように分類される。	地形、地質、断層、土壌、土地利用、地表水、地下水、地表面温度、水温、水質、気象、自然災害と広範囲の利用可能性分野がある。	現状土木地質分野では空中写真判読技術を除いては十分に活用されていないが、従来踏査、ボーリングでは把握できない広域的、経済的、定量的な情報入手のため利用が進むものと考えられる（表-15参照）。最近ではリニアメント解析の面でかなり見展が見られる。

* 1 Controlled source audio magnetotelluric method

* 2 Extreme low frequency-magnetotelluric method

* 3 Very low frequency

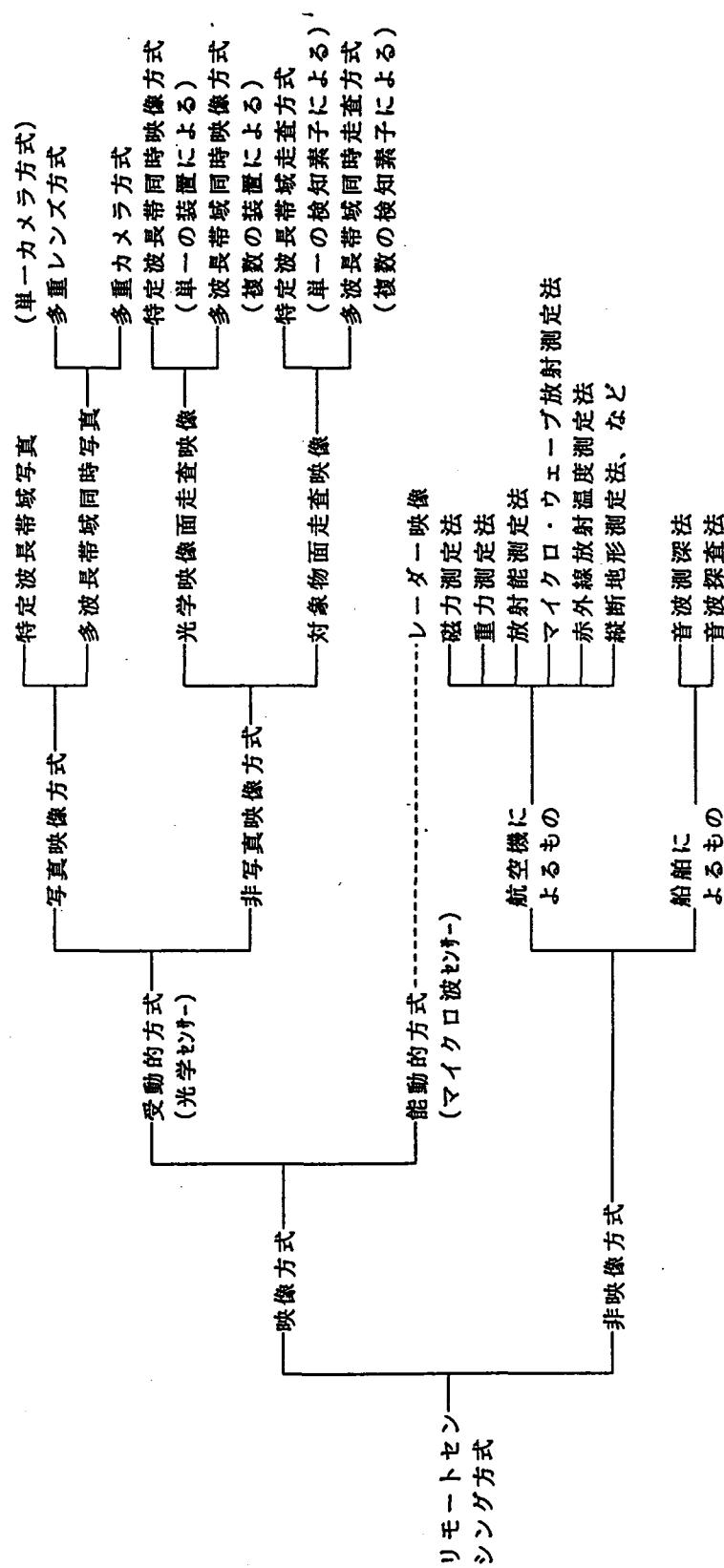


図-18 リモートセンシングの分類

表-15 代表的な地球観測衛星とその搭載センサーからみた地質分野での活用法

地球観測衛星	打上げ年	打上げ度	国	搭載センサ	観測波長領域 (μm)	分解能 (m)	観測幅 (km)	航速 (km)	観測時間 (日)	特 性・そ の 他			利 用 度 の 檢討			
										地形区分	地質構造区分	土壤土性区分	地水区分	地表下水位	火災監視地帯	土砂災害
LANDSAT 1号、2号	1972年1月 1974年1月	U.S.A		MSS	0.5~0.6 0.6~0.7 0.7~0.8 0.8~1.1	80	185	920	18	土地質分野で初めて起用された 2号は打上げ2週間後に故障	×	○	×	△	△	×
				RBV	0.475~0.575 0.580~0.680 0.680~0.890	40	185	920		熱赤外バンドはスキミングで トランブルが発生、画像として 利用できず	×	○	×	△	△	×
LANDSAT 3号	1978年3月	U.S.A		MSS	0.5~0.6 0.6~0.7 0.7~0.8 0.8~1.1 10.4~12.6	80 (無制限 240)	185	920	18	隣接するPATH ROWを使用する ことによって部分的に立体撮影	○	○	△	△	×	△
				RBV	0.50~0.75	40	95	920		1~3号と同様	×	○	×	△	△	×
LANDSAT 4号、5号	1982年 1984年	U.S.A		MSS	0.5~0.6 0.6~0.7 0.7~0.8 0.8~1.1 10.4~12.6	80 (無制限 240)	185	706	16	地熱調査をはじめとする熱分 布調査の効率化が可能	○	○	△	△	○	○
				TM	0.45~0.52 0.52~0.60 0.63~0.69 0.76~0.90 1.65~1.75 2.08~2.56 10.40~12.50	30 (無制限 120)	185	705		地熱調査をはじめとする熱分 布調査の効率化が可能	○	○	△	○	△	◎
Spot	1985年 予定			HRV	0.50~0.59 0.61~0.69 0.79~0.80 0.80~0.90	20 } 20 10	2×60	632	26 (最短 6日)	Y体根可動道から一対の観測 異なるによる	○	○	○	○	△	◎
				MESSR	0.51~0.59 0.61~0.69 0.72~0.78 0.80~1.1	60	100	900		地質では、土地利用区分に若 干干渉がある	×	○	×	△	×	×
MOS-1	1986年 予定	日本		VTIR	0.50~0.70 6.0~7.0 10.5~11.5 11.5~12.5	可視 熱赤外 3 km	1,500	900	17	土地質分野ではほとんど利 用できず	×	×	×	×	○	○
				MSR	中心周波数 23.6GHz, 31.4GHz	32km 23km	300	900		全天候型のマイクロ波データ	○	○	○	○	△	○
ERS-1	1990年 予定	日本		SAR	1.35~9GHz, 可視近 赤外計	25~50	200	560		地熱調査に有効	△	○	△	○	△	○

◎：最適 ○：適 Δ ：不完全 \times ：不適 —：センサー故障により利用できません

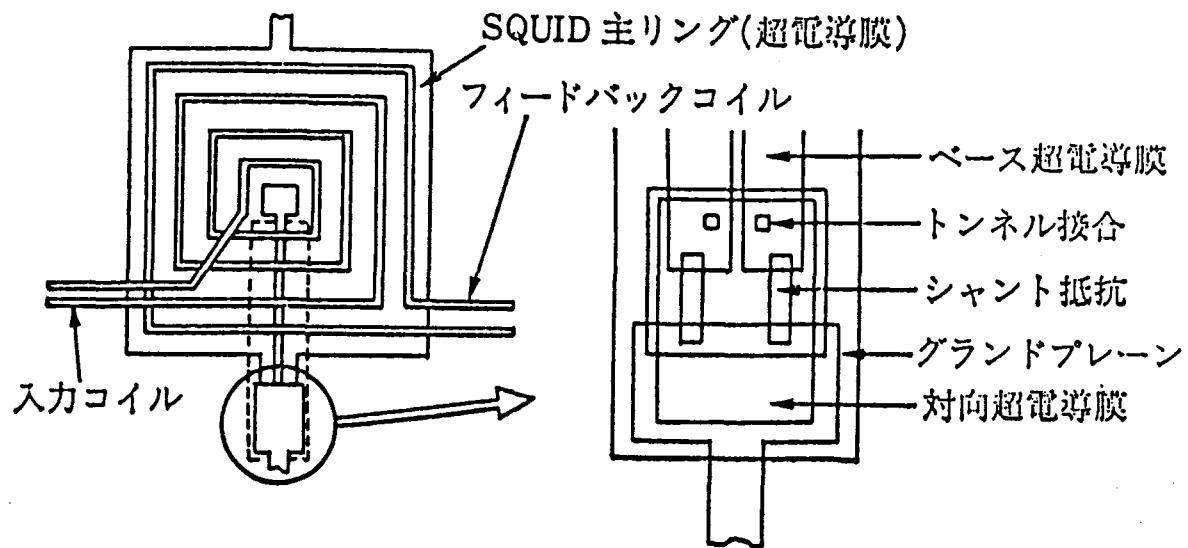


図-19 D C S Q U I D の例

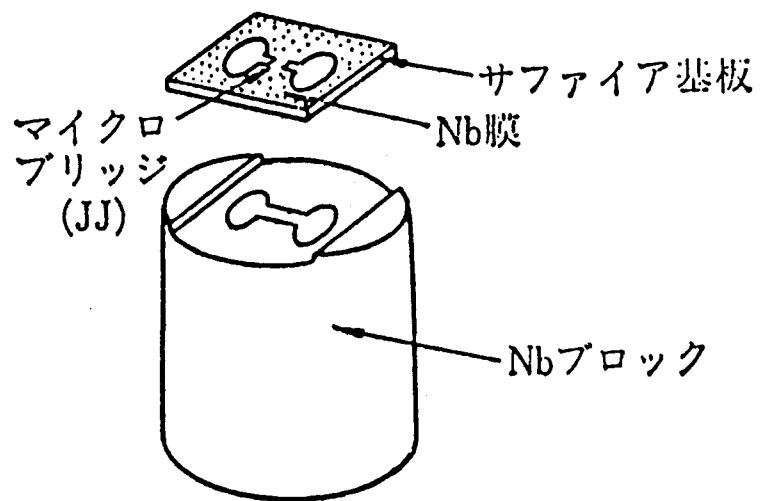


図-20 R F S Q U I D の例

(ii) S Q U I Dの適用予想概念

S Q U I Dは他のいかなる磁場検出器よりも高感度で、応答も適当に速い磁場・電流および電圧測定が可能である。現在は医療の分野において心磁計、脳磁計として利用されているが、磁場の変化を高感度に測定できるため、広域地質調査や資源探査などに適用が可能と考えられるが、地層処分場の近傍の地層探査には地盤内では磁場が通りにくいことや磁場強度をかなり高める必要があると考えられるため可能性については不明である。しかしながら少なくとも高温超伝導体の開発を含めて超伝導技術の高度化が必要になると考えられる。

地層処分場の近傍の地層探査が可能な場合の概念は、ジオトモグラフィー技術とほぼ同等と考えられる。

(iii) まとめ

S Q U I Dについて調査、整理した結果を表-16に示す。

表-16 地層処分に適用可能な技術の調査

(高温超伝導体による S Q U I D)

分 野	地層処分
適用技術	高温超伝導体による超伝導量子干渉装置 (S Q U I D) (S Q U I D : Super Conducting Quantum Interface Device)
新技術の現状	現在、SQUIDで測定できる地場の強さは 10^{-13} T (T : 磁束密度を現す) のオーダーであるので、十分に微少な地場の変化を測定可能である。
新技術の適用概念	<p>人工衛星からのデータ</p> <p>I G R F (国際標準地球磁気磁場)</p> <p>1. 位置データ 2. 磁気値</p> <pre> graph TD A[人工衛星からのデータ] --> B[1. 位置データ] A --> C[2. 磁気値] B --> D[時間変動分除去] C --> D D --> E[磁気値の位置を] E --> F[マコグネットテロイツルク] F --> G[I残差計算] G --> H[I空G中R磁F氣差異常図] I[IGRF] --> E I --> G </pre> <p>地上定点磁気測定</p>
従来技術と新技術との比較	現在、空中探査に用いられている航空機やヘリコプターに磁力計を搭載して測定を行う方式と比較して、人工衛星にSQUIDを搭載して測定を行った場合、①広範囲を迅速に、②測定位置の精度が向上、③磁気値の精度が向上、等のメリットが考えられる。また、①の理由により地磁気の時間変化を低減することが可能となり、地上定点における磁気測定による磁気値の補正が軽減されることも考えられる。
新技術適用に当たっての課題	超伝導状態を保持するためには冷却装置が必要となり大型化するため、高温超伝導（現在のところ約130 K (約-140°C)）技術の利用によるコンパクト化が必要になる。
今後の展望	SQUID技術はコンピュータのスイッチング素子として、その高速動作化を目指した研究が行われている。これらの分野から要素技術が進歩し、適用分野が広がるものと考えられる。

(2) ジオトモグラフィー技術

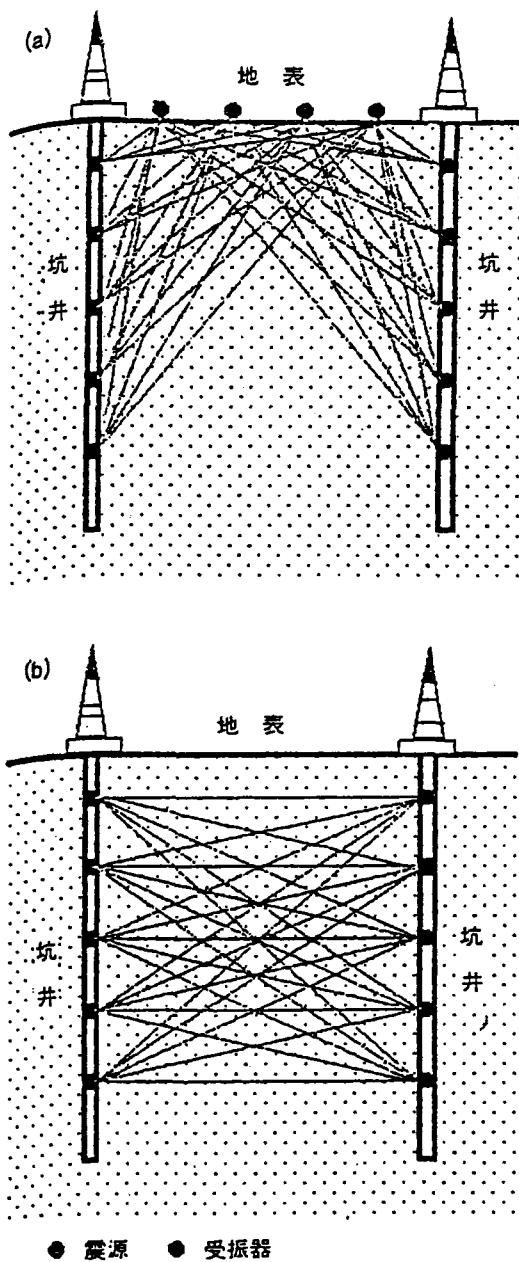
(i) ジオトモグラフィー技術の現状

複数のボーリングを使用して孔間の区域を探査する方法は、ジオトモグラフィーと呼ばれている。“ジオ”は地球を、“トモ”はスライスする或いは断面を切るを、そして“グラフィー”は画像化、可視化することを意味しており、このように新しい探査法ではコンピュータを活用して探査結果を実際の地質断面を見るように表現することに努めている。

ジオトモグラフィーは医療で用いられているCTスキャナーとよく対比されるもので、調査の対象領域周辺に測定点を配置し、その領域から地質状況を極力詳細に求めようとする方法である。この方法により地表から測定する既存の方法では求めることができなかった複雑な地下の状況をかなり正確に知ることが出来るようになった。その例を図-21に示す。

現状のジオトモグラフィー技術には、次の3つの種類がある。

- ① サイスミックトモグラフィー：弾性波の速度分布を測定する。構造物の基岩盤として硬岩や軟岩の分布、断層・破碎帯の分布や規模及び地下空間掘削に係わる岩盤のゆるみ挙動の把握などの調査に利用されている。
- ② レーダートモグラフィー：電磁波の速度分布を測定する。地盤内にレーダーを発射し、地層の境界や割れ目、空洞などからの反射を測定して、その存在を画面や記録紙の上に表現する。サイスマックに比較して測定事例は少ない。
- ③ 比抵抗トモグラフィー：電気比抵抗の分布を測定する。地下における電気比抵抗の分布を求めることにより地質区分、風化、割れ目の分布を把握するもので、電気比抵抗が水に関する性質に敏感なことから、割れ目に沿った地下水の追跡など割れ目、空隙などの性質を反映する情報が得られる。



(a) 地表に震源をおき、坑井で受振する透過型VSPの場合：
波線の分布が坑井および地表周辺にかたよっていることがわかる。
(b)一方の坑井を震源井、他方を受振井とする坑井間トモグラフィーの場合：透過型VSPにくらべ波線がより一様に分布している。

図-21 サイスマイクトモグラフィーの適用例²⁾

我が国のジオトモグラフィー技術の研究は、1983年頃からその成果が学会等で発表されその緒についたと考えられる。以後、トモグラフィー技術の研究開発は年々盛んになり、1986年には物理探査技術協会の学会誌「物理探査」にインバージョン技術の特集号が発行され、その中でそれまでの研究経過と現況が報告されている。

その3年後の1989年には同学会主催の「ジオトモグラフィーシンポジウム」が開催され、その後の探査技術の進歩と対象物への応用の現状が紹介されている。

また、1989年から1990年にかけては研究開発成果の発表の中に、実際のフィールドにおける具体的な適用事例がみられるようになってきている。

以上の技術はいずれも地球物理学的な手法についてであるが、最近透水性の分布を複数のボーリング孔間の測定から求める透水試験が開発されている。この方法はウェルテストトモグラフィーと呼ばれており、上記のジオトモグラフィーと組み合わせて岩盤の透水性の評価に効果を発揮している。

ウェルテストトモグラフィーは、対象領域内の透水係数を求める新しい試験法で、地盤の透水性の分布が初期透水分布モデルの逐次修正によって得られる。この方法は図-22に示すように2本のボーリング孔間で測定するもので、一方に水圧パルスの発信装置を設置し、他方の孔内に受信装置を挿入して孔間の水圧パルスの伝播状況を測定するものである。2孔間で発信と受信の点をできるだけ多くとり、それらの組合せの和を多くするように計画する。図-23はこの試験で得られた水圧の分布で最も大きい部分($1.00 \times 10^{-1} \text{ kg/cm}$)の分布が発信孔から受信孔の底部へかけて広がっているのが見られる。

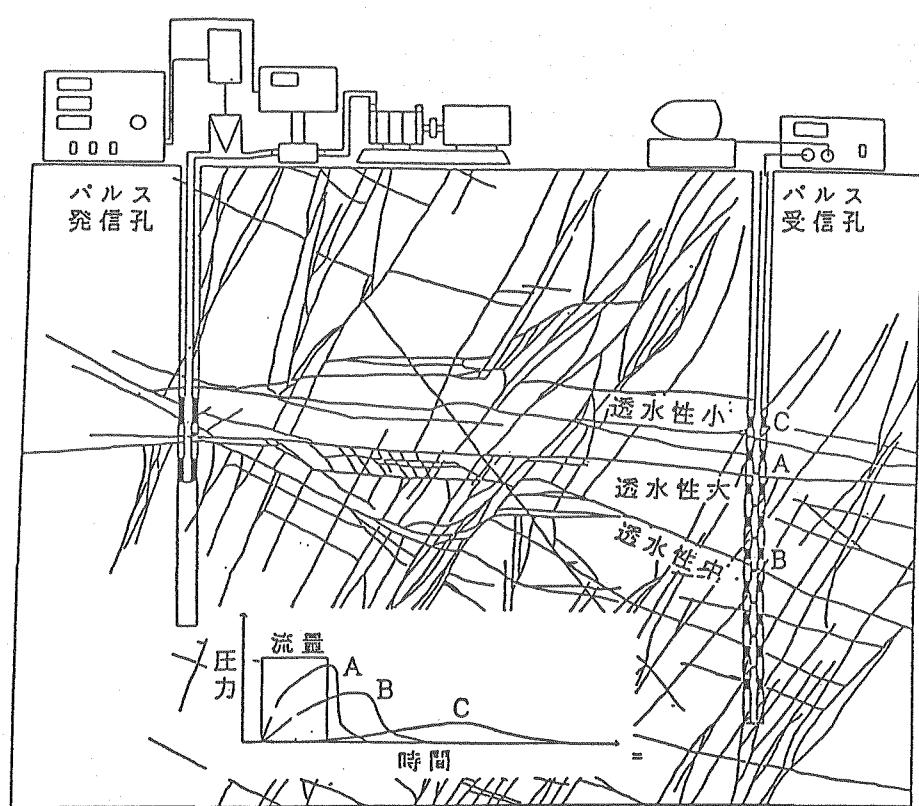


図-22 パルス試験概要図

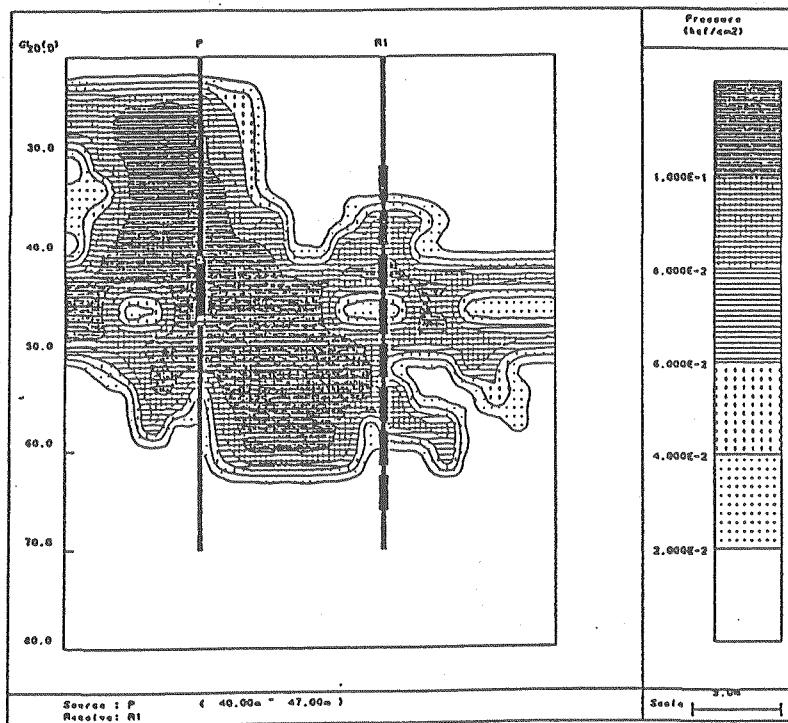


図-23 圧力経時変化図

(ii) ジオトモグラフィー技術の適用予想概念

ジオトモグラフィー技術は、地層処分場建設のための事前の地質および透水性分布の探査手法としての適用が考えられる。これらの適用には、現状の概念と同様に探査対象をはさんで少なくとも2か所に小孔径の測定用立坑を掘削し、一方を発信孔、他方を受信孔として各々発信源、受信センサーを立坑に設置し、地上の探査装置本体で情報処理及びユーティリティ供給を行うという概念が予想される。しかしながら、地層処分場内及び周辺は極力地質を乱さずに探査を行う必要があるが、現状の技術は測定範囲（発信源から受信装置まで）が数十m程度であり、このままでは処分場内に多数の測定孔（坑井）を掘る必要があり適切ではない。従って、この目的のためには、測定範囲のさらに広いジオトモグラフィー技術を開発することが前提となる。

上記のジオトモグラフィー技術のなかで、透水係数を求める新しい方法であるウエルテストトモグラフィーは地層処分にも有用なものとして期待されている。

発信エネルギーを高めるだけでもある程度測定範囲を拡大することが可能と考えられるが、原理的に非現実的である可能性もある。今後、各々の特性を見極めたうえで比較評価を行う必要があると考えられる。

(iii) まとめ

ジオトモグラフィー技術について調査、整理した結果を表-17に示す。

表-17 地層処分に適用可能な技術の調査

(ジオトモグラフィー技術(比抵抗、電磁波、地震波))

分 野	地層処分
適用技術	ジオトモグラフィー技術(比抵抗、電磁波、地震波)
新技術の現状	<p>ジオトモグラフィーは、調査の対象となる領域近傍に測定点を配置し、その領域の地質状況を出来るだけ詳細に求めようとする方法であり、我国においては、1983年頃から研究が始まった。主なジオトモグラフィーには現状次の3種類がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① サイスマミクトモグラフィー(弾性波の速度分布を得る) ② レーダートモグラフィー(電磁波の速度分布を得る) ③ 比抵抗トモグラフィー(電気比抵抗の分布を得る) <p>(表-18、図-24、25、26参照)</p>
新技術の適用概念	<ul style="list-style-type: none"> ① サイスマミクトモグラフィー 硬岩や軟岩の分布、断層・破碎帯の分布や規模の調査に利用されている。原理的にはP波の到達時間よりP波の速度分布をインバージョンで求め2~3次元速度断面を求めている。 ② レーダートモグラフィー 地盤内にレーダーを発射し、地層の境界や割れ目、空洞などからの反射を測定し、2~3次元断面を求める。 ③ 比抵抗トモグラフィー 電気比抵抗の分布をインバージョン解析法で求めるもので、地下における電気比抵抗分布を求ることで地質区分、風化、割れ用分布を把握する。これらの機能を利用し地層処分の地質調査が可能である。
従来技術と新技術との比較	従来法では、求めることのできなかった複雑な地下の状況を求めることが可能。
新技術適用に当たっての課題	<ul style="list-style-type: none"> ① 採査範囲の拡大(サイミックトモグラフィー) ② 透過距離の拡大(レーダートモグラフィー) ③ 解析ソフトの開発
今後の展望	地下情報把握に関するニーズは今後益々大きくなると予想されること、又は電気的な要素技術の著しい進歩が期待されることから、ジオトモグラフィーの適用領域は拡大するものと思われる。

表-18 調査法とその特徴及び利用の現状

分類	調査法	得られる結果	調査範囲等	利用の実態
地表イックス	浅層反射法	地層境界の深度 形状などを示す 反射断面	地表下数百メートルまで調査可能	土質地盤の地層境界
地表電磁気	地下レーダー法	電磁波の速度分布、反射面位置	地表下数メートル~十数メートル	道路直下の空洞等地層境界
	比抵抗映像法	比抵抗断面図 (地層の比抵抗分布)	地表から500m程度まで	地下空洞、トンネル、ダム、地下水温泉、地すべり
	I P 法	地層の応答周波数効果断面など	地表から数百メートル程度	おもに鉱床探査
	C S A M T 法	比抵抗分布図 (地層の比抵抗)	地下1000mを超える深度	地熱地帯、高温岩体地区、
孔間イックス	◎サイスミックトモグラフィー	p 波速度分布 深度	幅 100 m、 100 m以内	ダム基礎岩盤分布 岩盤ゆるみ程度ほか
	オフセット V S P	地層境界、断面 面など不連続面 の存在、形状	オフセット2~300 m 深度数100 m程度	ダム基礎岩盤など地層境界、断層
孔電間電磁波	◎比抵抗トモグラフィー	比抵抗値分布 (地層比抵抗分布)	幅 100 m、 深度 100 m以内	ダム基礎岩盤、橋梁 基礎岩盤、トレーサ 試験など
	◎レーダートモグラフィー	地層電磁波速度 分布	孔間距離 50 m 以内 (岩盤)	橋梁基礎岩盤、岩盤 試験箇所の岩盤評価
孔透間水試験	ウエルテストトモグラフィー	孔間区域の地層 の透水係数分布	孔間距離 100 m 深度 100 m 程度	ダム基礎岩盤など

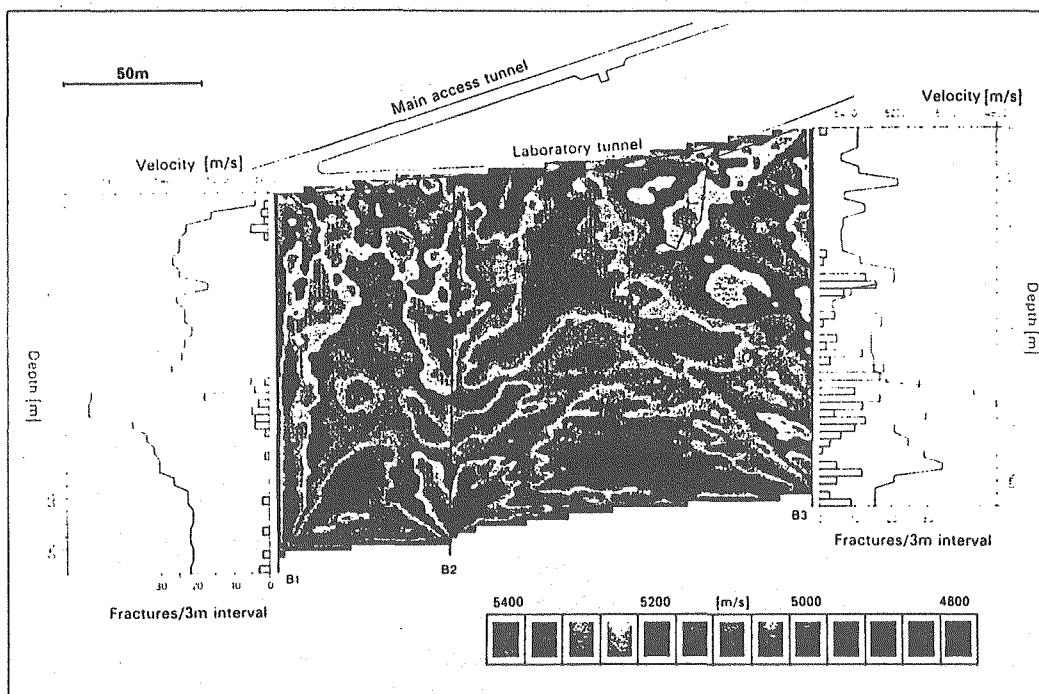


図-24 反射法による地下断面図³⁾

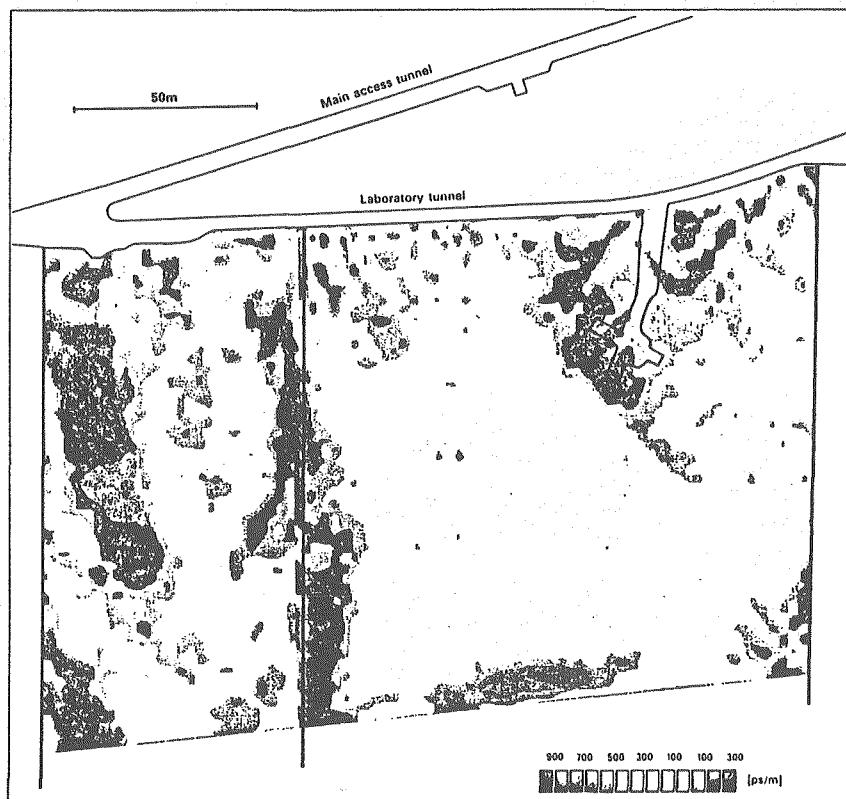
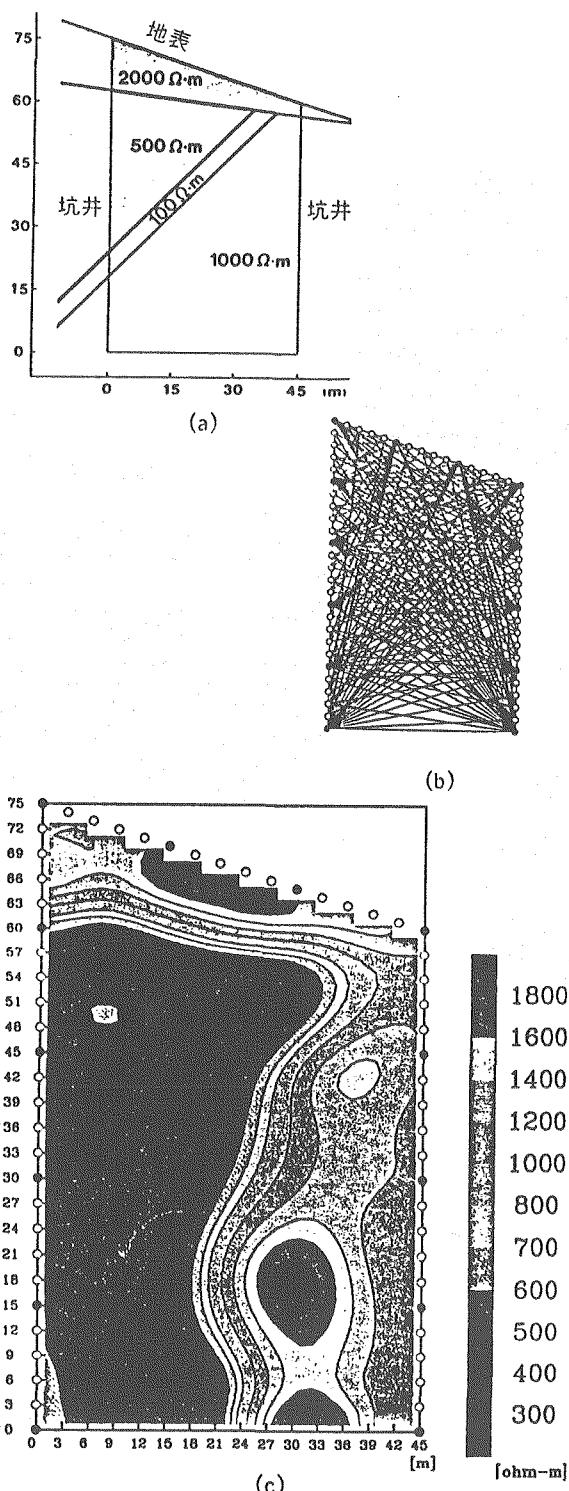


図-25 地下レーダーによる地下断面図³⁾



坑井内にも電極を配置して測定をおこなう比抵抗トモグラフィについて、数値実験により解析法のテストをおこなったもの。
(a)あたえた構造モデル、(b)計算をおこなった電極の組合せ（白丸が電位電極、黒丸が電流電極）、(c)(a)および(b)から計算された325個の見掛け比抵抗値を用い、トモグラフィ処理によつて解析して得られた構造モデル

図-26 比抵抗映像法による地下比抵抗断面図²⁾

(3) 中性子探査技術

(i) 中性子探査技術の原理

中性子検層は測定ゾンデ内に装備した中性子線源から地層中に高速中性子を放射して地層を構成している物質の原子核と反応させ、その反応過程で減速された熱中性子の強度を深度に対応させて連続的に測定記録し、孔隙に関するデータを得るものである。熱中性子の強度はニュートロンAPI（ガンマ線検層やニュートロン検層の目盛設定をするために使用する一種の単位で米国石油協会APIが定めた方法による。詳細は後述）で測定される。

高速中性子のエネルギーレベルは数MeVである。高速中性子を地層に放射すると中性子は地層中の水素原子と殆ど同一の質量をもっているため、弾性衝突となって高速中性子は急速に減速され、熱中性子（エネルギーレベル～0.025eV）となって水素原子に捕獲される。この減速される割合は地層中の水素原子の量（水素濃度）に大きく左右される。従って、熱源から一定の距離（約18インチ）に検出器を置いて熱中性子の強度を測定することによって地層中の水素濃度がわかる。即ち、検出器で計測される熱中性子の量（ニュートロンAPI）は線源周囲の水素濃度が増加すれば減少し、逆に水素濃度が減少すれば増加することになる。

水素濃度は地層の孔隙に含まれている流体の量に関係するので、計測される熱中性子の強度は地層の孔隙に反映する。

この関係をグラフで表すと図-27のようになる。図のようにニュートロンAPIが大きい程孔隙は小さく、逆にニュートロンAPIが小さくなると孔隙は大きく表現される。また孔径が大きくなる程計測されるニュートロンAPIは減少する傾向にある。更に中性子検層では頁岩などの粘土鉱物がもっている結合水にも反応するため著しく水素の存在量に影響され、頁岩質の地層では計測される孔隙率は有効孔隙率より大きくなる。

中性子検層器の検出器はヘリウム-3プロポーショナルニュートロンデテクターを使用している。

中性子線源はAm-B_eの放射性同位元素から構成され、その強さは3Ciである。1秒間に 6.6×10^8 個の中性子を発生する。Amから放出されたアルファ粒子が中性子をつくりB_eと結合される。その関係は次式で表される。

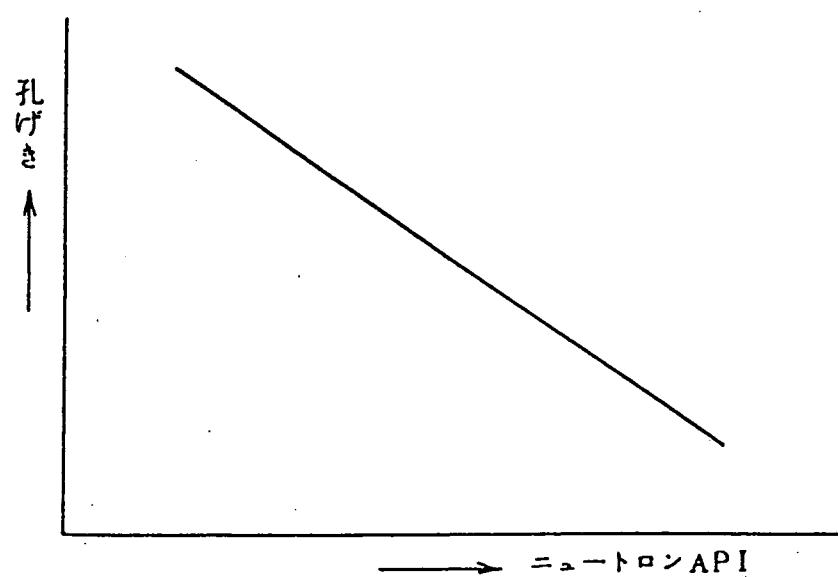
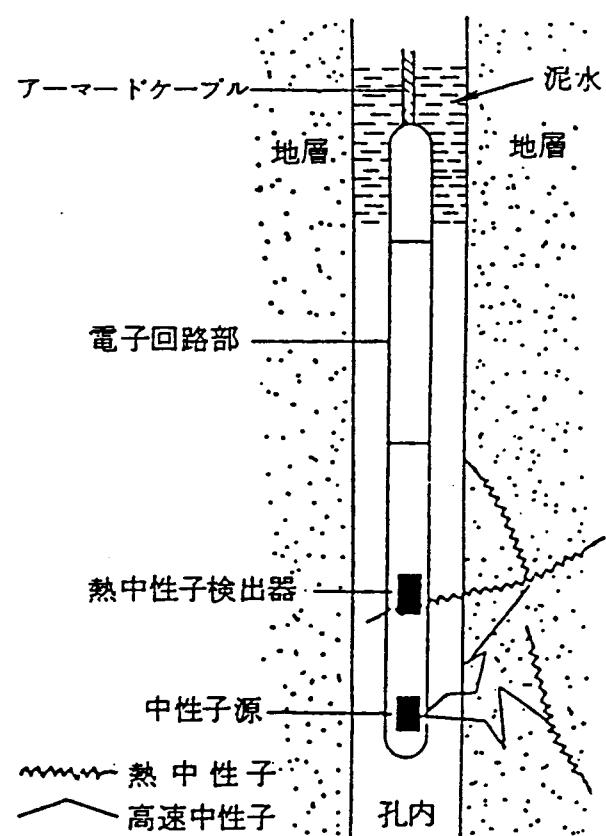
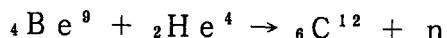


図-27 中性子検層装置及びニュートロンAPIと孔隙率との関係⁴⁾



Am-241の半減期は、458.1年で、強度は3.24Ci/gである。

計測される熱中性子の計数率は、地層のパラメータが一定である場合でも変動するが、これは放射能測定がその性格上、統計的であるという理由によるものである。

十分な計数率を得て、良好な平均的読みを得るために、計数率は時定数回路(CR回路)を使用して平均化している。

記録される検層曲線の形状や正確さは、時定数の設定と検層速度の両方の関数である。普通、良好な品質の検層記録をとるために、時定数2秒、検層速度は0.5フィート/秒(あるいは1,800フィート/時間)が使用されているが、孔径が大きい場合や放射能のコントラストを殆ど示さないような地層では更に長い時定数やより遅い検層速度が必要となる。

(ii) 中性子探査技術の適用予想概念

地層の孔隙に含まれる水素濃度を測定できることから岩盤の水含有に関するデータを取得することが可能であり、このことから所定の位置でのデータから広範な水の流れの変化の予測手法への適用が考えられる。

(iii) まとめ

中性子探査技術について調査、整理した結果を表-19に示す。

[参考] APIユニットとは

ガンマ線検層やニュートロン検層の目盛設定をするために使用する一種の単位でAmerican Petroleum Institute (API) が定めた方法によっている。その目的は検層器の検出器(デテクター)に到達するガンマ線あるいはニュートロンの量を計測するカウント数が検層サービス会社の検層器によって異なるためユーザーにとって不便であることから、統一した単位で標準化したものである。

その方法は、アメリカのテキサス州ヒューストン大学のAPI放射能較正施設内にあるAPIテスト用較正ピットを基準にして、検層サービス会社で個々に較正用ピットを作成し、ガンマ線検層やニュートロン検層のレスポンスをAPIユニットに較正あるいは標準化している。

表-19 地層処分に適用可能な技術の調査

(中性子探査技術)

分 野	地層処分
適用技術	中性子探査技術
新技術の現状	廃棄物処分場の安全性にとって重要な要素のひとつは、非飽和層中の地下水の移行状態のモニタリングであり、近年、中性子を利用し、含水量の変化及び流速を測定することが米国等で試みられている。 また、岩盤の間隙率の測定にも適用されている。
新技術の適用概念	中性子検層は、中性子線源から地層に高速中性子を放射して地層を構成している物質の原子核と反応させ、その反応過程で形成される熱中性子の強度を深度に対応させて連続的に測定記録し、データを得る。 このことを利用し局所的ではあるが、処分場の地層の含水量、地下水流などの測定可能である。
従来技術と新技術との比較	従来の探査技術（抵抗法、弾性波、電磁波法）では岩層の間隙率、含水量、地下水流速を測定できないが、中性子を用いることでこれらの情報が得ることができる。
新技術適用に当たっての課題	① 測定範囲が狭い。 ② 粘土鉱物がもつ結合水にも反応するため、測定値の補正が必要。
今後の展望	CT技術との融合、解析ソフトの高度化が予想され、有力な地下情報手得手法の一つになり得ると考えられる。

(a) ガンマ線検層曲線の較正（図-28）

API ガンマ線較正用ピット内のモデル地層で放射能の高い層と低い地層間の曲線の偏れにおける差は 200 API ガンマ線ユニットである。これの偏れの 1/200 は 1 API ガンマ線ユニットである。

(b) ニュートロン検層曲線の較正（図-29）

API ニュートロン較正用ピット内のインディアナライムストン (19% 孔隙率) 層に対する電気的零と曲線の偏れの差は 1,000 API ユニットである。この偏れの 1/1,000 は 1 API ニュートロンユニットである。

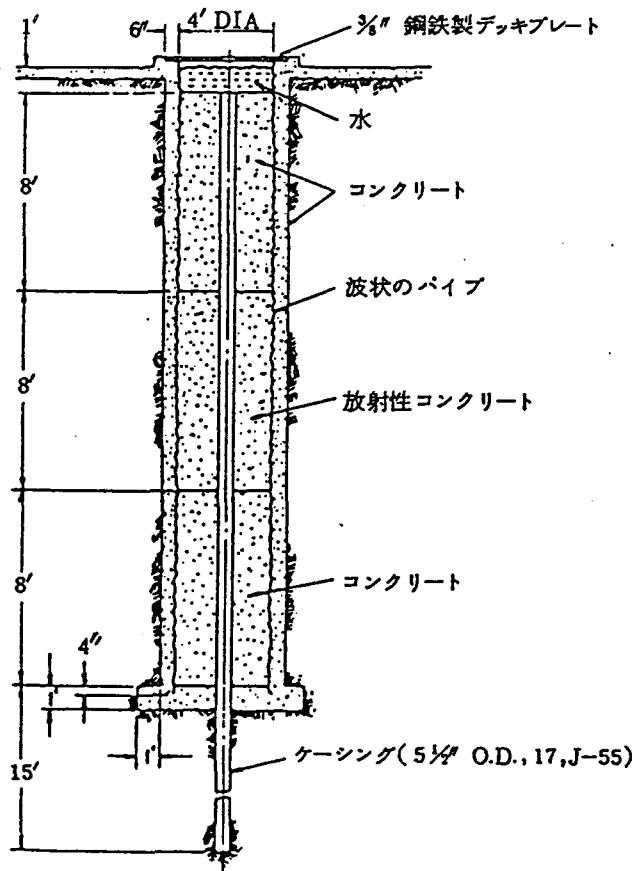


図-28 ガンマ線検層の校正用ピット⁵⁾

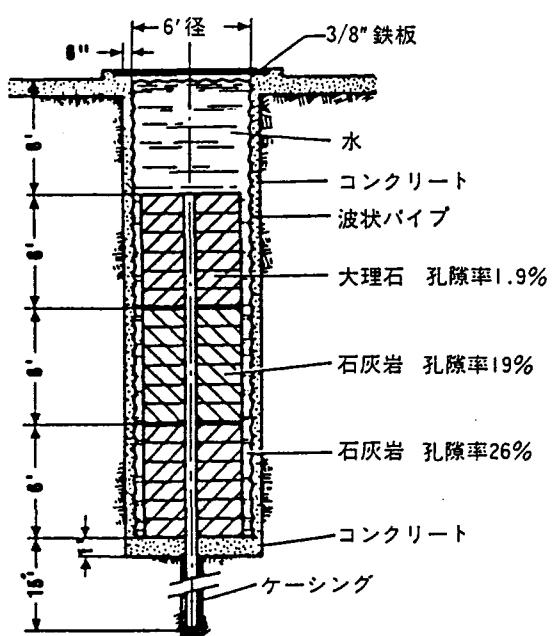


図-29 ニュートロン検層の校正用ピット⁵⁾

(4) 核磁気共鳴探査技術

(i) 核磁気共鳴探査技術の概要

核磁気共鳴探査（MRI）技術は、人体に高均一な直流磁場と高周波磁場を印加し、核磁気共鳴の原理（次項に示す）で人体内の水素の密度と緩和時間の分布に関する情報を画像化して医学診断に適用するためのものである。

この特徴は、X線CTに比較して得られる情報が正確で多いこと、X線による人体の放射線障害のないことなどであり、既に数多くの装置が実用に供されている。MRIシステムで最も重要なコンポーネントは、広い空間に高均一度（ 10^{-5} 以上）の直流磁場を発生させるマグネットである。

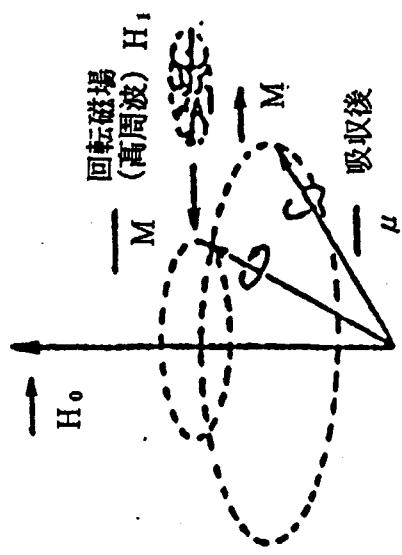
MRIに用いられる超伝導材料は、必要とする磁場が比較的低いNbTiが用いられているが、磁場の高均一性が要求されているので寸法精度の高い線材が必要とされる。MRIは全ての点でX線CTより優れているが、装置が高価であることが最大の欠点である。しかしながら、高磁場化による画質の鮮明さ、運転経費や保守の点で超伝導マグネットが有利になってきていることや、将来高温超伝導体の出現が期待されることなどから、今後さらに大きな市場が見込める。

(ii) 核磁気共鳴探査技術の原理

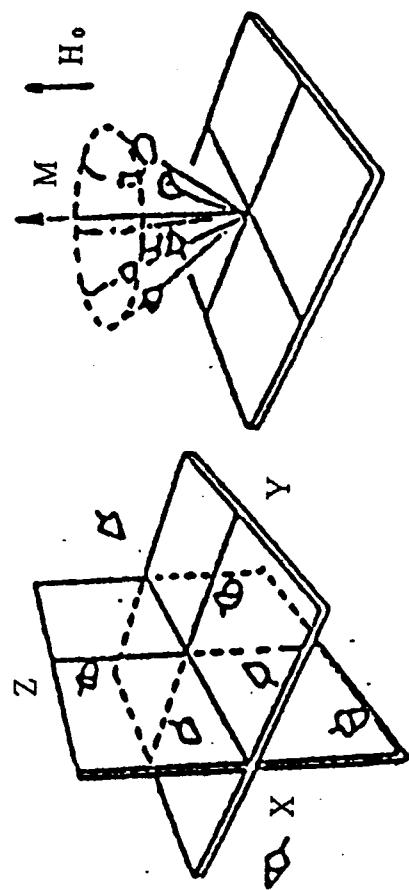
原子番号と原子量が共に偶数でない原子核は磁気モーメントをもち、自転運動（スピニン）を行う性質がある。なかでも水素原子は、静磁場中に置くと棒磁石のように磁場の方向に向き、磁場の方向を軸として、そのまわりでミソスリ運動をする。

この運動をラーモア歳差運動といい、磁場の強さが一定であれば、その周波数は一定である。水素原子の場合、静磁場が1kGのときラーモア周波数は4.2MHzとなる。次に静磁場と垂直方向に高周期磁場をかけ、その周波数を変えていき、その周波数がラーモア周波数に一致したとき、スピニン系はそのエネルギーを吸収し、歳差運動はより激しくなる。これが核磁気共鳴である。

この方法を人体全部に適用すれば、水素原子、すなわち水の体内分布が把握できることになる。以上の原理を図-30に示す。



回転磁場 (H_1) が直角に
加えられると、エネルギー
一を吸収して歳差運動の
軸が倒れる。



静磁場 (H_0) のなかに入
れられると、集団的に歳
差運動を始める。

各原子核はコマのよう
に描かれてる。通常は勝
手な方向を向いている。

図-30 NMR-CTの原理

従来の物性研究用MRIは、均一な磁場を用い、試料全体が同一強度磁場内にある条件で測定しているが、生体用のMRIは、均一な磁場（静磁場）に勾配磁場（高周波磁場）を重畠させたり、特定の場所だけ共鳴条件を満たす磁場強度にしたりして信号を観測する点が異なる。

ガン細胞は正常細胞より水分、すなわち水素原子が多いといわれているので、水素原子の密度の高い組織がガン化されている可能性が高い。ガン細胞の識別のもう1つの方法は、核磁気共鳴現象を起こした水素原子は高周波が解かれると原子核は外から与えられたエネルギーを周囲の原子（格子）に放出しながら、回転軸を元にもどそうとするが、この時の時間（スピノ・格子緩和時間）が、正常細胞よりもガン細胞のほうが長くかかるという特性がある。このスピノ・格子緩和時間の体内分布像がガン発見の有力な手掛かりになる。

(iii) 核磁気共鳴探査技術の適用予想概念

地層処分場の近傍の地層探査、特に地下水探査、割れ目測定などに適用できる可能性がある。但し、地盤内は磁場が通りにくいことや高精度な測定のためには磁場強度をかなり高める必要があると考えられるため、高温超伝導体の開発を含めて超伝導技術の高度化が必要になると考えられる。

地層処分場の近傍の地層探査の概念は、ジオトモグラフィー技術とほぼ同等と考えられる。

(iv) まとめ

核磁気共鳴探査技術について調査、整理した結果を表-20に示す。

表-20 地層処分に適用可能な技術の調査
(核磁気共鳴探査技術)

分野	地層処分
適用技術	核磁気共鳴探査技術 (MRI ; magnetic resonance imaging)
新技術の現状	MRIは1971年に米国のDamadianによる悪性腫瘍の緩和時間が正常組織のそれに比べて長いという報告により本格的に始まり、X線CTで培われた技術を基に発展してきた。MRIは開発当初の予想とは反対に、頭部画像などでX線CTを凌駕するまでに至っており、生体からのさまざまな情報（緩和時間、プロトン密度）を含んだ形で画像診断に供するものとなっている。（図-31、32、33参照）
新技術の適用概念	NMR信号から測定対象物中の目的の原子核に関する次の情報が取り出せる。 ① 密度：測定領域内の共鳴に関与する磁気モーメントの数はNMR信号強度に比例することから、目的の原子核の存在量が分かる。 ② 移動：物質内の流れや拡散はNMR信号の強度・周波数・位相を変える。 これらの特徴を地下情報取得へ利用するには対象領域に数テスラ以上の均一静磁場と高周波磁場を同時に発生させる必要があるが、大規模な装置が開発されれば適用の可能性が出てくると思われる。
従来技術と新技術との比較	従来の地下情報を得る手段としてはボーリングを行いセンサー等にて測定されているため局部的な情報しか得られていない。 MRIが地層情報調査に適用できれば広い領域にてその情報が3次元的に得られる。
新技術適用に当たっての課題	① 静磁場発生方法と高周波磁場発生方法及びその配置 ② 水の存在量と検出感度の関係把握 ③ 大きな磁場強度を要する。
今後の展望	MRIの医療分野への適用は今後一層進むと考えられるが、地下情報調査分野へは基礎的な適用研究を実施し、その可否を検討することが前提となる、と思われる。

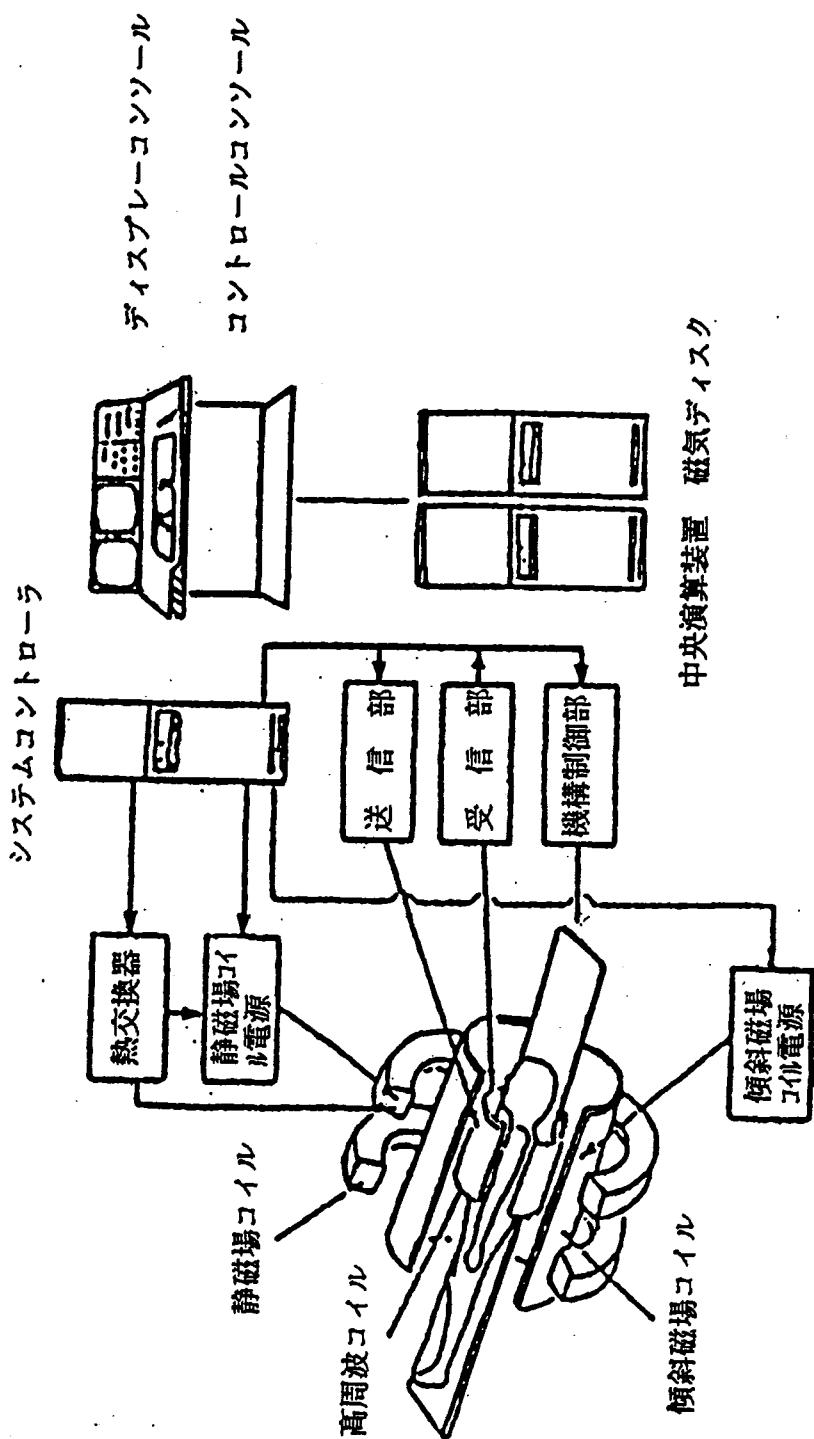


図-31 MRI システム構成図

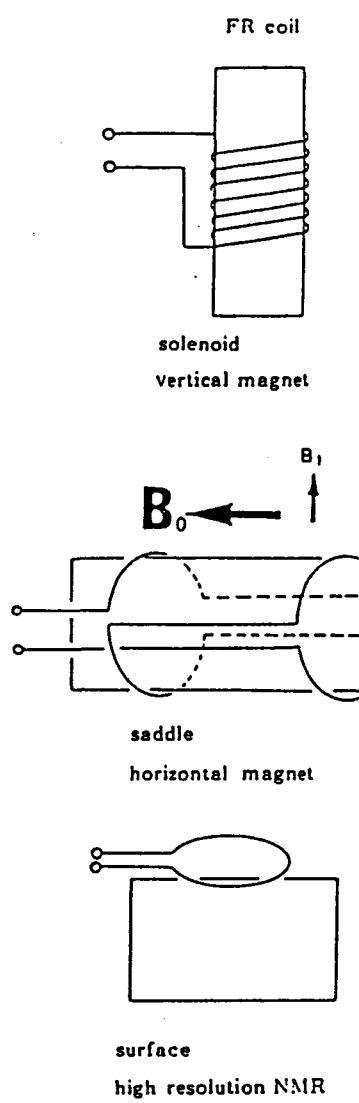


図-32 イメージングコイル種類⁶⁾

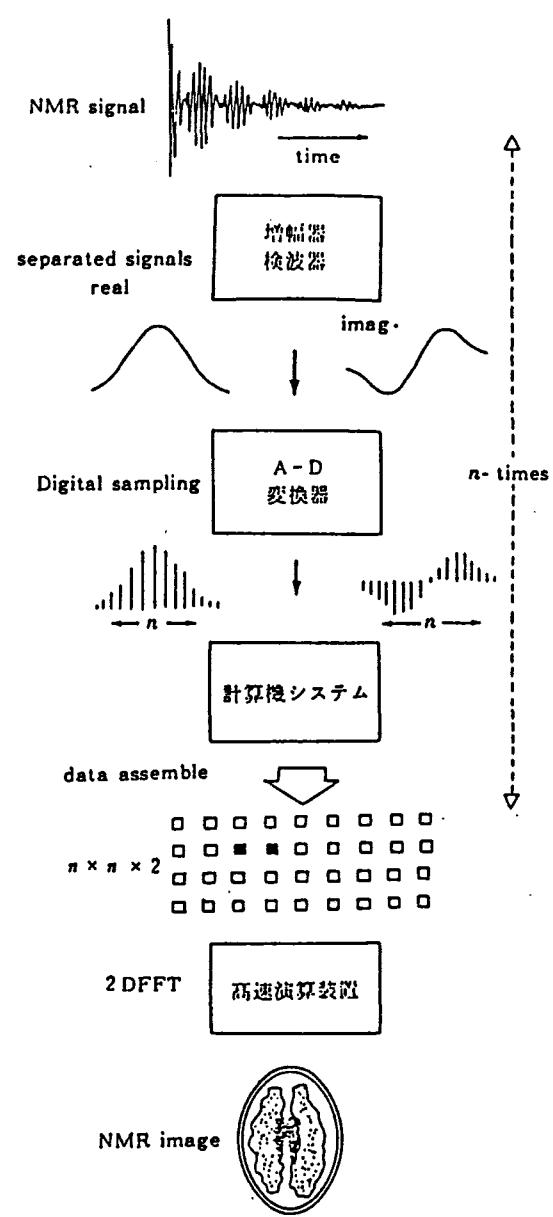


図-33 MRI データ処理フロー⁶⁾

3.2.2 解析技術関連

(1) 超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術

地層処分で廃棄物パッケージ、緩衝材、支保等に適用が考えられる各種材料のうち、鉄、ベントナイト、コンクリート等の構造材料についての長期評価の手法として、超加速試験技術及びナチュラルアナログ技術を調査する。ただし、現状では評価の実施方法については、鉄を除いて研究の緒についたばかりと言え、確立された技術となっていない。

従って、ここでは上記の材料についての劣化要因を明らかにするとともに、現在用いられている評価予測手法、並びに長期評価の可能性について調査する。

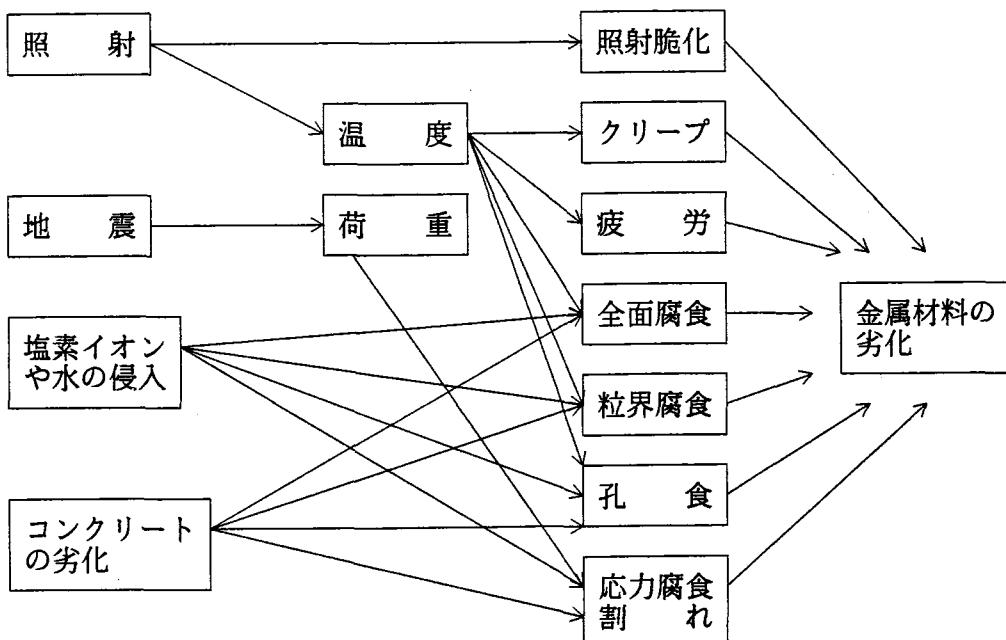
(i) 鉄の長期評価

(a) 材質の劣化要因

鉄（金属）の主な劣化要因としては、

- ① 放射線による劣化（照射脆化）
- ② 力学的要因による劣化（クリープ、疲労）
- ③ 腐食による劣化（全面腐食、粒界腐食、孔食、応力腐食割れ）等

があるが、長期健全性に関与する因子としては腐食による劣化要因が最も大きいと考えられる。



(b) 材質劣化の評価予測方法

劣化の評価方法としては、電気化学的反応速度論に基づく理論的な劣化の評価・予測と、腐食試験データ（加速試験、暴露試験）を基にした評価・予測がなされている。

- ① 理論的腐食反応速度については、大野らの深地層地下水のような中性自然水環境における腐食速度式の提案等がある。
- ② 腐食試験データによる評価・予測については、陸上鉄骨構造物防食研究会による各種金属素材類の5ヶ年間（昭和35年～40年）の暴露試験結果からの腐食量の予測等がある。

(c) 長期健全性評価のための手法

現在の材質劣化の評価手法は、高々100年オーダーでの対象しか取扱っておらず、高レベル放射性廃棄物の処分で考えられている超長期的な評価に対しては不十分である。そのために、

- ① 従来の電気化学的速度論を中心とした腐食現象の評価の他に、確率統計論的手法による評価の試み
- ② 腐食現象のコンピュータシミュレーションによる評価の試み
- ③ ナチュラルアナログ・考古学的アナログによる評価の補間（トルコ・オーストリア等の4500～3000年前の鉄剣の遺物や我が国の七廻り鏡塚古墳の約1200年前の鉄剣等の調査例がある）

等が行われている。

(ii) ベントナイトの長期評価

(a) ベントナイトの長期健全性

ベントナイトは、その生成年代により古いもので約1億5千万年（中生代ジュラ紀）、新しいもので約1千万年（新生代第三紀）の間、非常に長期間安定して存在していたと考えられている。しかし、この場合はベントナイトの生成環境、存在環境の下での安定性があり、環境の変化に対応した若干の材質の変化は認められる。

(b) ベントナイトの劣化要因

ベントナイトの劣化要因としては、①イオン交換反応、②イオン交換後の物性変化、③乾燥環境条件下における加熱変化、④水熱変質等がある。また、水に膨

潤・分散することによる流失が考えられる。

(c) 長期健全性の評価

考えられる劣化要因についての各種の実験がなされ、その劣化の程度の確認が行われている。

- ① イオン交換反応についてはイオンに選択性がある
- ② イオン交換後の物性については膨潤圧、透水係数に変化が生じる
- ③ 加熱変化については、300 °Cまで物性に変化が認められない
- ④ 水熱反応については、イオン交換性のあるスクメタイトがイライト化する
反応速度が計算されている（100°Cで約1万年～1000万年、150°Cで500年
～50万年）
- ⑤ 流失については、地下水流速の100～200倍の流速試験でもあまり流失は
みられない

等の試験結果がでており、健全性についてはイオン交換後の物性について変化が
みられるものの、おむね長期的に安定した材料であるものと考えられている。

(d) 今後の課題

以上の評価試験は、短期間での評価であり、今後長期間における性能評価試験
を行うには、加速試験法の開発が重要な課題である。

(Ⅲ) コンクリートの長期評価

(a) 材質の劣化要因

コンクリートの劣化要因としては、①凍害、②塩害、③疲労腐食、④アルカリ
骨材反応、⑤化学的腐食、⑥中性化があり、その中でも①～④はコンクリート構
造物が設置されている環境やコンクリートに使用されている骨材によるもので、
環境を改善したり、骨材を選別することで、劣化の改善が行えるが、⑤、⑥は長
期的観点から健全性を評価する上で重要な要因と考えられる。

(b) 材質劣化の評価方法

コンクリートは、セメント、粗骨材、細骨材などの複雑な組成体であり、劣化
のメカニズムにも多くの要因がからみあっており、現段階では暴露試験や100年
程度の比較的古いコンクリートに関する知見をもとに若干の研究が行われている
にすぎない。

短期の劣化要因の①～⑥に関する試験方法、データ採取例及びその結果につい

てはASTM, JIS等に規格として定められている。

(c) 長期健全性評価のための方法

従来の評価方法を用いて、ある程度長期的な健全性の評価は行えるものと考えられるが、その評価期間を延長し、評価精度を上げるため、現在地下水成分（特に Mg^{2+} , SO_4^{2-} ）がコンクリートの劣化に及ぼす影響について組成変化の面から研究しようとする試みや、電気科学的にCaイオンの溶出を加速しようとする試みなどが、行われている。これらの方法は長期健全性の評価を行う有用なデータを提供する可能性が高いと考えられ、今後の展開が期待されている。

一方、最近の遺跡調査において、ローマの壁やパンテオンで使われた古代のコンクリートが2000年の健全性を保っていること、約5000年前の中国住居跡のコンクリートが健全性を保っていることが判明しており、環境条件が満足されれば長期間の健全性は確保されると考えられるが、その材質、条件設定の場所（地域）で、どの程度確保されるかが、今後の課題であると考える。

(iv) まとめ

超加速試験・ナチュラルアナログ技術について調査、整理した結果を表-21に示す。

表-21 地層処分に適用可能な技術の調査
(超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術)

分 野	地層処分
適用技術	超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術
新技術の現状	鉄、ペントナイト、コンクリート等の地層処分に用いられる材料の健全性については、鉄に関しては劣化要因を把握した上で比較的短い(100年程度)期間での評価測定方法(加速試験、暴露試験)がかなり確立したものとなっている。しかし、ペントナイト、コンクリートについてはその研究はまだ緒についたばかりである。ただし、地層処分で対象とするような超長期の評価に関しては試験による実証がきわめて困難であるので、ナチュラルアナログ或は考古学的アナログのような現象を参考として、予測の傍証とすることが試みられているが、実際に想定される環境、材料と類似現象との相関の取り方等にはさらなる研究の必要がある。
新技術の適用概念	<p>下図のような評価方法を確立して、各材料の超長期の健全性を評価する。</p> <pre> graph TD A[鉄] --> B[コンクリート] A --> C[ベントナイト] B --> D["ナチュラルアナログ 考古学的アナログ"] C --> D D --> E[超加速試験] E --> F[コンピュータシミュレーション] F --> G[超長期の健全性] </pre>
従来技術と新技術との比較	現在用いられている各種の評価手法は高々数十年程度の評価期間を対象としているが、超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術により、千年程度の評価が可能となれば、処分の安全性を不確実性を低減させることができる。
新技術適用に当たっての課題	<ul style="list-style-type: none"> ① 超加速試験の加速方法、環境の模擬方法 ② ナチュラルアナログ、考古学的アナログでの類似現象と対象としている環境との相関方法
今後の展望	地層処分の置かれる環境についての研究、各種材料の長期健全性の評価が鋭意行われているが、原位置での試験、閉鎖後の環境変化等についての試験により多くのデータを入手していく必要がある。

(2) フラクタル理論による地質の長期評価技術

フラクタルはマンデルブローにより考案された概念で、特徴として自己相似性と複雑さをもっている図形の構成要素も、全体と同じ程度に複雑であるという概念に基づいており、不規則な形状の表現が可能である。具体的には、海岸線、雲、樹木、葉脈、岩肌等の自然の自己相似性をもつ不規則形状を表現するのに応用が可能である。

自己相似图形の複雑さの程度は、フラクタル次元の大きさにより表される。全体が自分自身と自己相似な n 個の图形からなり、その縮尺率が r の時、全体のフラクタル次元（相似次元ともいう）は、

$$I = n \cdot r^D$$

を満たす実数 D で定義される。上式の両辺の対数を取ると

$$\log n = -D \log r$$

$$D = -\log(n) / \log(r)$$

となる。

この定義は、全体を構成する各ミニチュアの、縮小率 r_i ($i=1, 2, 3, 4, \dots, n$) が異なる場合にも拡張することができる。その場合、全体のフラクタル次元は

$$I = \sum_i r_i^D$$

を満たす実数で与えられる。

フラクタル次元は、線分を次々に二等分していった場合には $D = 1$ 、正方形を正方形に 4 等分割していった場合には $D = 2$ であるが、フラクタル图形の場合、フラクタル次元は非整数となる。

形状ではなく、統計的な観点で自己相似性を有する場合はランダム・フラクタルと表現される。この概念は、現在、自然界の不規則な模様等を画像表現するのに用いられている。

次元平面上に定義された不規則形状を持つ局面を生成する手法としてランダムフラクタルを用いる方法がある。これは平面上の方形格子の 4 頂点に乱数によってある値を与え、この格子の 1 つのます目を 4 分割して新たにできる 5 つの格子点の値を元の 4 頂点の変異量を線形補間した値と乱数による値の和とするものである。この手順を再起的に繰り返すことにより 2 次元ランダムフラクタル格子が得られる(図-34参照)。

この手法を 3 次元格子に拡張することにより、3 次元ランダムフラクタル格子を得ることが可能で、3 次元の揺らぎを表現することが可能である(図-35参照)。

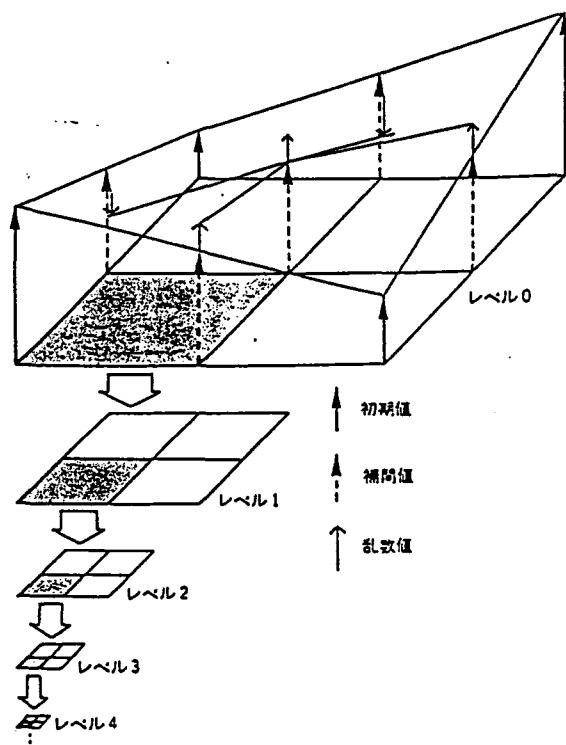


図-34 4分木構造による2次元ランダム・フラクタル格子の生成¹⁾

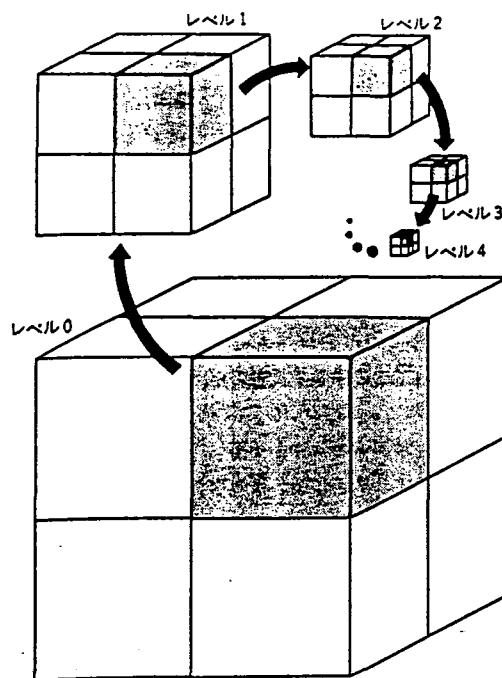


図-35 8分木構造による3次元ランダム・フラクタル格子の生成¹⁾

岩盤割れ目の構造表現を人間の観察に基づいて行う場合、細かい割れ目の省略、計測の取りこぼしが生じたり、非常に大きな割れ目の場合、計測領域からはずれる場合があり、取りこぼしの危険性がある。

実際の岩石中の割れ目の分布を精密に観察を行うと、割れ目の長さとその超過本数の分布は、フラクタル分布に近づくことが確認されている。岩石の割れ目では破碎幅の分布もフラクタル分布に従うと考えられる。このことから岩盤割れの構造表現を行なう方法として、フラクタルの適用が有効であると考えられている。

岩盤割れ目がフラクタル構造であるとした場合、岩盤の評価において

- ① 異なった任意の大きさの岩盤割れ目の予測・評価
- ② 計測の対象とする割れ目の大きさの定量的な判断
- ③ サイトがその地域の中で平均値からどの程度離れているか

等が評価項目となる。

以上の調査結果を表-22にまとめた。

表-22 地層処分に適用可能な技術の調査
(フラクタル理論による地質の長期評価技術)

分 野	地層処分
適用技術	フラクタル理論による地質の長期評価技術
新技术の現状	フラクタルはマンデルブローにより考案された概念で、特徴として自然の自己相似性と複雑な事象の単純化に特徴を持っている。複雑な图形の構成要素も比較的単純な構成要素に分解し再構成することにより表現が可能である。具体的には、海岸線、雲、樹木、葉脈、岩肌等の自然の自己相似形状を表現するのに応用されている。視覚的にフラクタルを表現するにはランダムフラクタルを用いる方法が開発されている。図3.2(2)-1、2にその概念図を示す。
新技术の適用概念	実際の岩石中の割れ目の分布を精密に観測を行うと、割れ目の長さとその本数の分布は、フラクタル分布に近づくことが確認されている。岩石の割れ目では破碎幅の分布もフラクタル分布に従うと考えられる。このことから岩盤割れ目の構造表現を行う方法として、フラクタルの適用が有効であると考えられている。地層内の割れ目、クラック等の構造を画像的に表現する、あるいは構造的な評価を行う場合に適用が可能であると考えられる。
従来技術と 新技术との 比較	従来の人間の観察に基づく岩盤割れ目の構造表現の場合、細かい割れ目の省略、計測の取りこぼしが生じたり、非常に大きな割れ目の場合、計測領域からはずれる場合があり、取りこぼしの危険性がある。フラクタルを用いることにより上記の危険性を取り除くことが可能であると考えられる。
新技术適用に 当たっての 課題	岩盤割れ目がフラクタル構造であるとした場合、岩盤において ①異なった任意の大きさの岩盤割れ目の予測・評価 ②計測の対象とする割れ目の大きさの定量的な判断 ③サイトがその地域のなかで平均値から程度離れているか等の情報も入手する必要がある。
今後の展望	従来は視覚的なフラクタル形状の表現に適用されてきたが、統計的にフラクタル分布をするものへの適用が進むと考えられる、地層割れ目は統計的なフラクタル構造を持つと考えられ、地層での水分移動・物質の評価に適用が可能であり、水分・物質の移動量の推定への適用が考えられる。

(3) ボクセル構造による地質構造表現

近年、物体内部の様子を映像化する必要性が強まっている。例えば3次元の流体計算、CTスキャン、MRIで得られた人体の内部構造等のボリュームデータの三次元視覚化に対する必要性等を挙げることができる。このようなボリュームデータの三次元視覚化を行う表現手法の形状モデルのひとつとしてボクセル法がある。

ボクセル法では、ボリュームデータを3次元格子で分割した個々の格子内をボクセル(Voxel)と呼ぶ。個々のボクセルが有しているデータは温度、密度、速度といった物理量である。三次元データ中の表示したい場所を、形状モデルで定義し、見えるボクセルの物理量を輝度で表す(図-36参照)²⁾。

このような技術は可視化技術と呼ばれる。本来は見えないものを理解しやすく見えるようにするための技術であり、例えば特定の濃度値のボクセルのみを表示し他は半透明にするなど多くの手法が研究されている。

ボクセルは3次元的空間を素直に表現しているため、彫刻や粘土細工のような操作をすぐ反映させることができる。しかし、精度を良くしようとすれば細かな格子にしなければならず、例えば $100 \times 100 \times 100$ でも莫大なデータ量となり実用的ではない。

一方、大きくて粗いボクセルを単一濃度で映像化すると得られる像の輪郭がギザギザになる。非常に細かいボクセルであるかのように、例えば補間で滑らかに等濃度面表示するような処理も、ボリュームレンダリング技術(質感の表現)として行われている。

ボクセルの概念を用いて、3次元立体の内部構造の視覚表現への適用が行われている。MRI、MNR、超音波探査などによるデータや、CTなどによるトモグラフィーデータを3次元画像として視覚化するのに用いることが検討されている³⁾。具体的には、医療での3次元データ(脳、動脈等の体内組織の内部構造データ)の視覚化への適用が研究されている。またコンピュータグラフィックスでの3次元画像の表現にも用いられている。

地質データに対して、ボクセルの概念を用いて、地質の内部構造の視覚化を行うことにより、地質構造の把握が容易になることが考えられる。

以上の調査の結果を表-23に示す。

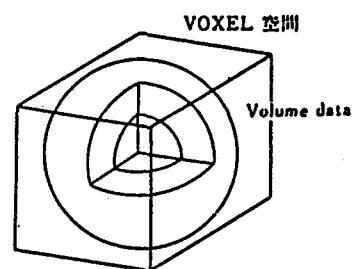


図-36 ボクセルデータ²⁾

表-23 地層処分に適用可能な技術の調査
(ボクセル構造による地質構造の表現)

分 野	地層処分
適用技術	ボクセル構造による地質構造の表現
新技術の現状	<p>ボリュームデータを3次元格子で分割した個々の格子内をボクセル（Voxel）と呼び、各ボクセルは温度、密度、速度といった物理量をデータとしてもっている。ボクセル空間の概念図を図3.2(2)-3に示す。ボクセルを用いて、3次元データを視覚化する場合、3次元の内部構造まで表現することが可能である。</p> <p>3次元の流体計算、CTスキャン、MRIで得られた人体の内部構造等のボリュームデータの3次元視覚化への適用が試みられている。</p> <p>3次元ボリュームのスクリーンへの投影方法としては、レイ・スキャニング法、多重面合成法等がある。</p>
新技術の適用概念	<p>MRI、NMR、超音波探査等によるデータや、CTなどによるトモグラフィデータを3次元画像として視覚化するのに用いることが検討されている。具体的には、医療での3次元データ（脳、動脈等の体内組織の内部構造データ）の視覚化への適用が研究されている。</p> <p>地層処分への適用としては、地層の内部構造の視覚化を行うことが考えられ、ジオトモグラフィ等による地層データの視覚化に適用することにより、地質構造の把握がより容易になることが考えられる。</p>
従来技術と新技術との比較	従来のポリゴン、プリミティブを用いたサーフェイスレンダリング手法のみでは、3次元の内部構造を表現していない。ボクセルから構成されるボリュームを直接処理するボリュームレンダリング手法を用いることにより、3次元の内部構造の表現が可能となる。
新技術適用に当たっての課題	ボクセルデータは3次元であり、精度をよくしようとすれば細かな格子にしなければならず、例えば $100 \times 100 \times 100$ でも膨大なデータ量となるため、計算時間がかかるため、計算時間の短縮は不可欠である。
今後の展望	ボクセルデータの視覚化にレイ・トレーシング法を適用することにより、よりリアルな表現方法が開発されると考えられる。いずれにせよ、データの取り扱いでは計算時間の短縮がクリティカルであると考えられる。

3.2.3 処分技術関連（モニタリング、人工バリア関連）

(1) レーザーによる掘削技術

(i) 掘削技術への要求条件

地層処分場建設のための掘削技術には地下水流、核種移行経路等の安全性に影響を及ぼす可能性のあるゆるみ領域の低減化が要求される。一般にトンネルのゆるみ制御は、掘削方式及び支保方式によって行われており、従来工法及びNATM工法の各々に対策が施されてきている。トンネルボーリングマシンによる掘削もゆるみ域が小さい。大出力レーザーによる岩盤を掘削する技術が開発されれば、使い方によつては、効率的掘削、ゆるみ防止の点でかなりの効果が期待できる。

(ii) 掘削へのレーザー技術適用の現状

1960年にレーザーが発明されてから約30年が経過しており、これまで数万種を超えるレーザーの発振が報告されており、その応用分野は、光通信に使われる半導体レーザーから、距離計測に欠かせないヘリウムネオンレーザー、金属や生体を非接触で切断する炭酸ガスレーザー等、多岐にわたっている。一方土木分野においては、測量に広く利用されているものの、掘削関連としては廃炉における生体遮蔽用コンクリートの解体を目的とした研究が行われている程度である。岩掘削への適用についても、1960年代に低出力の装置を使った基礎研究が行われた後、注目すべき研究成果は報告されていない。

(a) 廃炉解体用レーザー

(イ) CO₂ レーザー

廃炉解体への適用を目的としてCO₂ レーザーによる鉄筋コンクリートの切断要素試験が行われており、D10 鉄筋入りコンクリートの場合、出力15kW、切断速度2.5 cm/min の条件で厚さ 180mmまで切断可能との結果が得られている。

しかし、実機への適用についてはなお、切断性は勿論のこと、レーザー発振器、電源装置等の小型化、ビーム伝送のハンドリング性能の向上、施工時安全性の確立、コスト低減等、課題が多い。

(ロ) COレーザー

COレーザーはCO₂ レーザーに比較して波長が約半分になるので水に対する吸収性が良好であると考えられる。5 kW出力のレーザーによる実験では切断速度と切断深さの関係等でCO₂ レーザーの場合と類似の傾向が見られるが、COの方

がやや深い切断が可能との結果が得られている。

(b) 岩掘削への適用

レーザーによる岩の切削実験例は少なく、未だ十分なデータの蓄積がないが、岩石中の石英分が少ない程切断性能が低下する、出力増大とともに切削能力が向上する等の結果が得られている。今後、特に岩種の違いに対する影響の定量的な把握が必要である。

(iii) レーザーによる岩掘削技術の適用予想概念

レーザーによる岩掘削技術の予想概念を図-37、38及び39に示した。レーザー掘削技術は現時点では、出力、効率、装置コスト、装置ハンドリング性等の点で、そのまま単独で実用に供することは難しく、従って上記概念のうち、図-39については効率的に難点がある。

ゆるみ低減の観点からは、図に示した、スロット工法を用いて、既存の発破工法、機械掘削工法等と如何に組み合わせるかがポイントとなる。特にレーザーの焦点を絞ることなく（非フォーカス）、広く浅く岩に照射し、その部分に熱応力によるクラックを発生せしめて、緩め、機械掘削で除去するといった図-38の概念や、切削溝中に注水し、レーザー照射により分解して出てくる水素の爆発を利用して粉碎効率を増やすといった図-40の概念の実用化が望まれる。なお、非フォーカスレーザーや、水素爆発レーザー法はゆるみ低減の目的には反すると考えられるので、この点については検討が必要である。

表-24に種々の岩盤破碎工法の比較を示す。これより、レーザーの効率が低いこと、同じレーザーによっても、上述した方法により効率が変化すること等がわかる。

岩種により、またトンネル施工径によりレーザー法の優位性が顕著になることがわかる。表-25にレーザー工法と既存の3～4m級TBM工法との性能比較を示す。

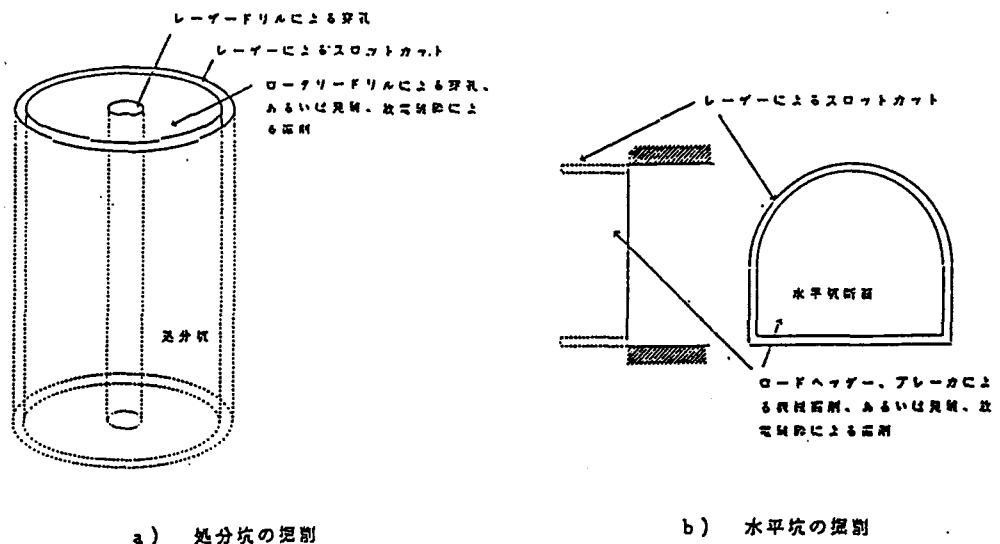


図-37 レーザーを用いたスロット工法

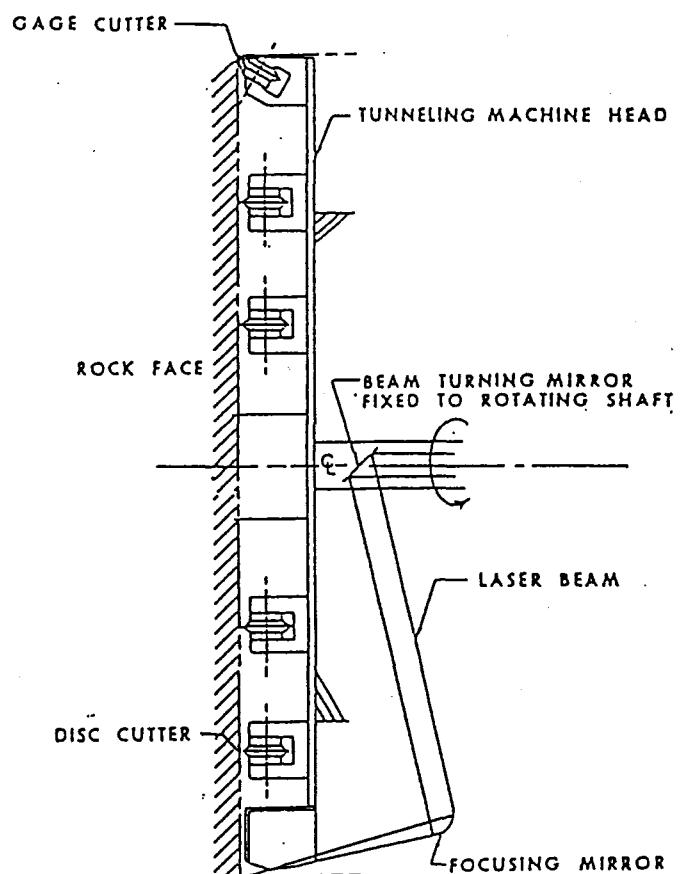


図-38 レーザー適用概念（その1）¹⁾

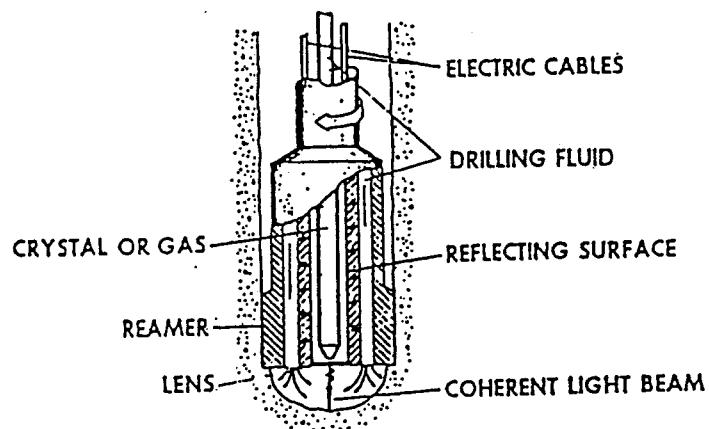


図-39 レーザー適用概念(その2)¹⁾

LASER DRILL AND BLAST CONCEPT

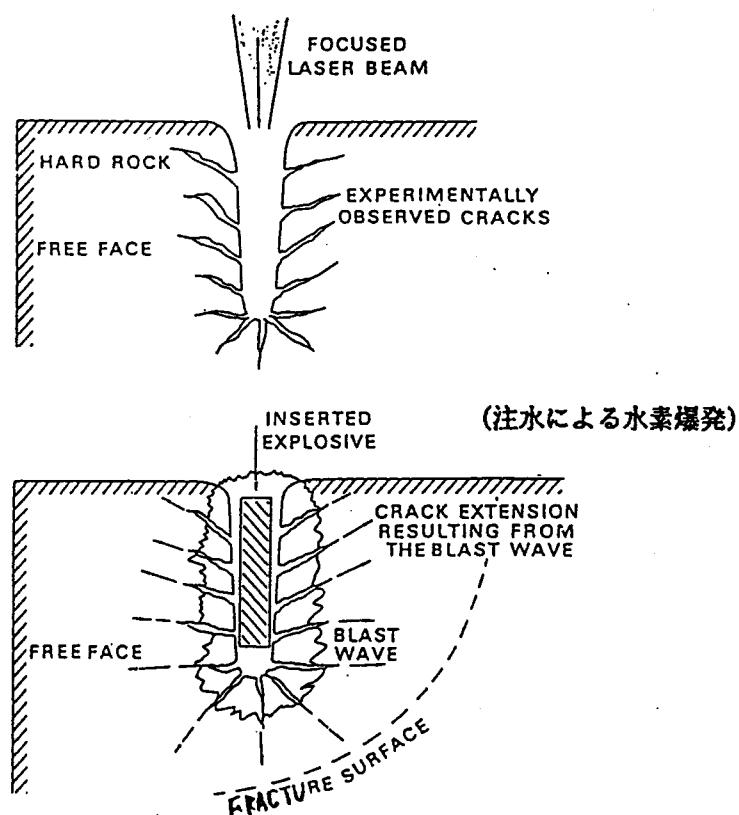


図-40 レーザーによる岩破碎メカニズム¹⁾

表-24 種々の岩盤掘削工法の比較

方 式		原 理	比エネルギー J/cm ²	最 大 電 力 P.H.P.	最 大 掘 削 速 度 cm/s	特 徴 等
M	従 来 式	超硬ビットにより回転・打撃破碎する。	33~300	20~30	14~85	パワーに限界があるが、効率は最も高い。
M	水 中 放 電	~10kJ程度の水中放電エネルギーを利用する。	200~400	100~200	35~140	新方式の中では最も効率が高く、実用化の可能性も大である。
M	水 ジ ェ ッ ト (EROSION)	超高压噴流水を用いる。	2000~4000	1000~2000	35~140	実験例も多く、一部実用化されているが、効率が低い。
M	爆 草 薬 (EXPLOSIVE)	爆薬カプセル、成形弾(SHAPED CHARGE)等で穿孔方向に爆発力を集中させる。	200~400	75~100	28~70	実用化されており、効率も比較的良好であるが、危険である。
T	強 制 火 焰 (FORCED FLAME)	ジェット燃料を高速燃焼させて破碎するが、酸素の代りに硝酸を用いる。	1500	300~600	28~56	一部実用化されているが高騒音であり、燃料代も高い。
T	ジ ェ ッ ト・ ビ ア シ ン グ	強制火炎と同じであるが、酸化剤として酸素を用いる。	1500	100~200	9~10	一部実用化されているが高騒音である。比較的低成本である。
T	電 気 分 解	1kV程度の高電圧を低周波で岩石中に印加し、抵抗熱を利用して破碎する。	1500	100~150	9~14	電気抵抗が小さい鉄鉱石等に効果的に利用できる。
M	ペ レ ッ ト	2~3cm径の鋼球を水流を利用して20~30m/sの速度で岩石に衝突させて破碎する。	200~400	10~20	4~14	ドリル本体がペレットにより急速に摩耗し、問題がある。
M	タ ー ピ ン	ダイヤモンドカッターホイールを200~300H.P.の流体力により回転させて穿孔する。	400~1300	30~40	3~14	一部実用化されたが、効率、速度共従来式より劣る。
T F	ブ ラ ズ マ	20000℃までの高温プラズマを照射することにより破碎溶解される。	1500 5000	80~120 " 2~3	8~11	溶融を主体とすると効率が低くなる騒音、INITIAL COSTが問題
T F	エ レ ク ツ ロ ア ー ク	10~1000V、数百Ampの電流を電極間に負荷し5000~20000℃の熱により破碎する。	1500 5000	45~90 " 1~3	4~8	効率も低く、掘削速度も不十分である。
T	高 周 波	1~20メガサイクル×電圧1~20kVの高周波電流により抵抗熱と誘導熱の作用で破碎する。	1500	30~60	3~6	多くの研究例があり、一部実用化されている。
F	電 気 ヒ ー タ ー	タンクステンあるいはイリジウム等の抵抗線に5kWの電力を付加し発生する1200~1600℃の熱を利用。	5000	50~100	1~3	装置の冷却のために半分以上の熱が消費される。
F	核 分 裂	小型の原子炉をドリルの先端に付けて1000~2000℃の反応熱により岩石を溶融する。	5000	1250~2500	1~3	小規模な穿孔には使用できない。安全性に問題がある。
T.F.V	レ ー ザ ー	レーザービームを照射し、岩石を熱破碎、溶融蒸発させる。	1500 5000 12000	12~24 10~20 7~14	1~2 0.3~0.6 0.1~0.2	出力が小さく、小孔径の穴にのみ使用される。
T.F.V	電 子 ビ ー ム	30kV程度の電圧とし、0.3cm程度のビーム焦点を用いる。	1500 5000 12000	10~20 " " " "	1~2 0.3~0.6 0.1~0.2	ビームを絞り過ぎると効率が低下しX線も多く発生するので問題がある
T	マ イ ク ロ 波	1000~3000メガサイクルのマイクロ波による誘導加熱を利用し破碎する。	1500	10~20	1~2	マグネットロンの大きさにより、小孔径の穴には使用できない。
T	誘 導 加 热	磁化率の高い岩に高周波の磁場を利用せしと誘導加熱し、破碎できる。	1500	5~10	0.5~1.0	効率も低く、また磁鐵鉱等の磁化率の高い岩石に制限される。
M	超 音 波	20~30kHzの超音波により予め添加している研磨剤が加速されて、衝突破碎する。	20000	5~10	0.04~0.07	効率も低く、また絶対パワーも小さい。
C	化 学 的	圧縮気体を利用して、フッ素を高速で岩石に衝突させて破碎する。	?	?	?	フッ素高価であり、また大量に扱うことができない。
T	TERRA-JETTER	250~500℃のスチームと-196℃の液体窒素を交互に吹き付け破碎する。	?	?	?	アイデアのみで試験結果なし

○ E = P/AKただし P : 単位が J/m, A : 穿孔断面積cm²

○ M : MECHANICAL STRESS による破碎, T : THERMAL STRESS による破碎, F : 溶解, V : 蒸発, C : 化学的分解

表-25 レーザー掘削工法の特徴

項目	従来工法（機械式）	レーザー工法	
		レーザーのみ	スロット工法
危険性	問題無し	やや危険	やや危険
火炎	注意要	危険	危険
騒音・振動	やや問題あり	問題無し	従来工法より良い
粉塵	水が無いと問題あり	問題無し	従来工法より良い
取扱性	掘削反力大のため装置重量大で、難あり	反力少のため、取扱良好	掘削反力が低減される
能率	数～数十 m^3/hr	せいぜい 1 m^3/hr	従来工法より良い
施工性	乾式掘削の場合発熱による周辺岩盤への影響大	岩石溶融により水密性が得られる可能性あり	岩石溶融により水密性が得られる可能性あり
適応地質	硬岩不可	問題無し	従来工法より適応範囲大
装置寿命	摩耗によるピット損耗大	問題無し	ピット損耗低減効果あり
施工費	1万～2万円/ m^3	動力費のみで1万円/ m^3 , 但しづりの発生量が極めて少ないのでコストダウンの可能性あり	従来工法より良好と考えられる
装置費	4.5 億円/TBM 1台	1億円/台程度か	機械式より高価

(iv) 今後の課題

(a) 基礎的な課題

- ① 各種の岩盤の切断破碎に関する最適レーザー波長の明確化
- ② 非フォーカスレーザーによる熱応用を利用した岩盤の一次破碎能力の解明
- ③ 含水比の影響明確化
- ④ 必要レーザー出力の明確化
- ⑤ 水素爆発利用の可能性明確化

(d) 岩盤掘削システム検討

- ① 機械掘削との組合せ工法の効果確認
- ② 機械掘削とレーザーを組合わせた装置の具体化
- ③ 大出力レーザー装置の開発
- ④ 大出力レーザーのコンパクト化ないしレーザー伝送法の検討
- ⑤ レーザー装置の低コスト化

(v) まとめ

レーザーによる掘削技術について調査、整理した結果を表-26に示す。

(2) バイオセンサー技術

バイオセンサー技術について調査、整理した結果を表-27に示す。

(3) イオンセンサー技術

イオンセンサー技術について調査、整理した結果を表-28に示す。

(4) 耐放射線光ファイバー技術

耐放射線光ファイバー技術について調査、整理した結果を表-30に示す。

(5) スマートセンサー技術

(i) スマートセンサー技術の概要

スマートセンサー、インテリジェントセンサー、知能化センサーは同じ意味で使われる。マイコンとセンサーとが1チップになったデバイスのみをスマートセンサーと呼ぶとすれば開発中ではあり実用例はまだほとんどない。

スマートセンサーの定義は、まだ統一的には確立されておらず、デルフト工科大学のMiddelhoekによれば「1個または複数のセンシング要素と信号処理回路が同一のシリコンチップ上に集積されたもの」と定義されている。センサーデバイスと信号処理回路とが近接するが、同一チップではない場合にはhybrid smart sensorと呼びintegrated smart sensorと区別しようと提案している。NASA Langley Research CenterのBreckenridgeとHussonらはスマートセンサーに関して次のような必要条件をあげている。

- ① センサー自体が異常値や例外値を除く
- ② センサー自身にデータ処理が組み込まれている。
- ③ 自動校正機能自動補償機能をもつ。
- ④ アルゴリズムを内蔵し、変更可能である。

表-26 地層処分に適用可能な技術の調査

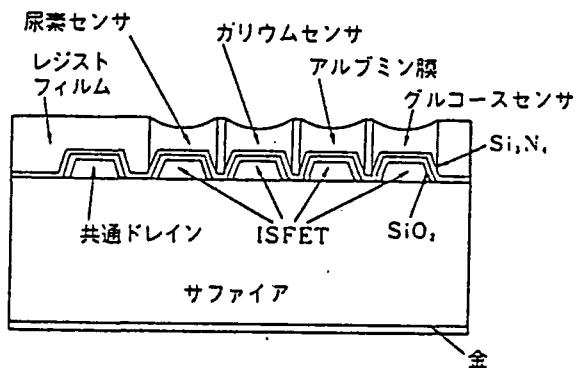
(レーザーによる掘削技術)

分 野	地層処分
適用技術	レーザーによる掘削技術
新技術の現状	1960年にレーザーが発明されてから約30年が経過しており、これまで数万種を超えるレーザーの発振が報告されている。レーザーの応用分野は、光通信に使われる半導体レーザーから、距離計測に欠かせないヘリウムネオンレーザー、金属や生体を非接触で切断する炭酸ガスレーザー等、多岐に渡っている。土木分野においては、測量に広く利用されているが、掘削に関しては廃炉における生体遮蔽用コンクリートの解体を目的とした研究が行なわれている段階である。岩掘削への適用についても、1960年代に低出力の装置を使った基礎研究が行なわれた後、注目すべき研究成果は公表されていない。
新技術の適用概念	レーザーによる岩掘削技術の予想概念を図-37~40に示した。レーザー掘削技術は現時点では、出力、効率、装置コスト、装置ハンドリング性等の点でそのまま単純で実用に供することは不可能と考えられる。従って、これらの概念の内、図-39については、効率的に不可能である。緩み低減の観点から、図-37に示したスロット工法を用いて、既存の発破工法、機械掘削工法等と如何に組み合わせるかがポイントとなる。特に、レーザーの焦点を絞ることなく（非フォーカス）、広く浅く岩に照射し、その部分に熱応力によるクラックを発生せしめて緩め、機器掘削で除去するといった図-39の概念や切削溝中に注水し、レーザー照射により分解して出てくる水素の爆発を利用して破碎効率を増すといった図-40の概念の実用化が望まれる。実用化された場合、処分場の坑道掘削に適用できる。
従来技術と新技術との比較	将来の掘削法に比べ、次の点で優れている。 ① 緩み領域の低減 ② 掘削自動化の可能性大。
新技術適用に当たっての課題	① 各種岩盤を切断破碎するのに最適なレーザー波長の明確化 ② 必要レーザー出力の明確化と大出力レーザーの開発 ③ 機械掘削とレーザーを組み合わせた装置の具体化
今後の展望	現在レーザーによる岩盤掘削の基礎研究が行なわれており、波長及び出力等と掘削量との基本関係が明らかになり、さらに現実的な工法が考案されれば、将来レーザーの高度化に伴いその適用性は現実的なものとなり得ると考えられる。

表-27 地層処分に適用可能な技術の調査

(バイオセンサー)

分 野	地層処分
適用技術	バイオセンサー
新技術の現状	酵素などの生体材料のもつ優れた分子認識機能を利用したバイオセンサーが開発され医療分野へ応用されている。このようなバイオセンサーのトランスデューサとして半導体素子や半導体加工技術を利用して作られた微小電極が用いられる。現在では水素イオン濃度、Naイオン、イオンのさらに中性脂質、尿素等の測定できるものが開発されている 図-41参照
新技術の適用概念	地層処分場のモニタリング対象が無機イオンのほか有機物質まで可能となり、幅広い環境モニタリングができる。
従来技術と新技術との比較	従来のセンサーでは、測定対象が单一のもの多かったが、各種酵素等を用いたマルチバイオセンサーとすることで、複数の物質を1つのセンサーで測定できる。
新技術適用に当たっての課題	① バイオ技術と半導体技術の融合 ② 微小センサーのため出力が小さく、誤差が大きい。
今後の展望	バイオと半導体技術の進歩により、従来検出が困難であった多種類の化学物質の計測が可能となり得る。



(日本電気製, Science and Technology in Japan
P.40, July / Sept., 1986)

図-41 SOS/ISFET を用いるマルチバイオセンサー²⁾

表-28 地層処分に適用可能な技術の調査

(イオンセンサー)

分 野	地層処分
適用技術	イオンセンサー
新技術の現状	イオンセンサーによる測定はそのほとんどがネルンストの式に基づく電位差測定を基礎としている。すなわち、測定対象成分に応じて適当に選んだセンサーを参照電極と共に試験溶液に浸漬したときに生ずる電位差が、測定対象成分の濃度によって定まる現象を利用するものである既に数多くのイオンセンサーが開発されている。表-29及び図-42~44参照。
新技術の適用概念	溶液中のイオン濃度が精密に測定することができるので、地層処分場周辺の地下水中的イオンのモニタリングに適用できる。
従来技術と新技術との比較	イオンセンサーは従来技術。
新技術適用に当たっての課題	① 共存成分に基因する誤差を小さくする。 ② 放射性物質のイオンの検量線作成。
今後の展望	既に技術的にはほぼ完成されており、今後は信号処理の高度化が期待される。

表-29 センサーの種類と妨害元素の関係

センサーの種類 選択係数	CN ⁻	Cd ²⁺	Cl ⁻	Br ⁻	I ⁻	Ag ⁺	S ²⁻	Cu ²⁺	Pb ²⁺	F ⁻	K ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	CN ⁻	
	(固 体 膜 形 センサ)										(液膜形センサ)		(隔膜形センサ)		
共存しても影響が少ない・ ・共存の影響大	10 ⁻⁵		Ca ²⁺					K ⁺ , Ca ²⁺ , Mn ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻							
	10 ⁻⁴	Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , Cr ³⁺ , Br ⁻	Na ⁺ , K ⁺ , Zn ²⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻ , Al ³⁺	NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻	F ⁻ , Cl ⁻ , Br ⁻	Fe ³⁺ , Cu ²⁺ , Ca ²⁺ , Zn ²⁺	Cl ⁻ , Br ⁻ , I ⁻ , NO ₃ ⁻	Na ⁺ , Mg ²⁺ , Cd ²⁺ , Zn ²⁺ , NH ₃		Cl ⁻ , Br ⁻ , I ⁻ , SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻					
	10 ⁻³	SO ₄ ²⁻ , CO ₃ ²⁻ , HPO ₄ ²⁻ , SO ₃ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺			PO ₄ ³⁻	PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻		Fe ³⁺ , Al ³⁺ , CrO ₄ ²⁻			NO ₃ ⁻ , CH ₃ COO ⁻ , Mg ²⁺ , HPO ₄ ²⁻	HClO ₄ ⁻ , CH ₃ COO ⁻ , CO ₃ ²⁻			
	10 ⁻²		Cr ²⁺	F ⁻	Cl ⁻						Ca ²⁺		CN ⁻ , Cl ⁻		
	10 ⁻¹	S ₂ O ₃ ²⁻			S ₂ O ₃ ²⁻			S ₂ O ₃ ²⁻	Cd ²⁺			HS ⁻ , NO ₃ ⁻			
	1							Ag ⁺		Fe ¹⁺		Br ⁻			
	10	I ⁻	Cu ²⁺					Hg ²⁺ , S ²⁻	Ag ⁺ , Hg ²⁺ , Cu ²⁺	Al ³⁺ , OH			揮発性アミン類		
	10 ²		Ag ⁺	Br ⁻	I ⁻						NH ₄ ⁺	I ⁻			
	10 ³		Hg ²⁺	I ⁻							Na ⁺	ClO ₄ ⁻			
共存不可	S ²⁻ , ハイドロキノン等の還元性の強い物質		S ²	S ²⁻	S ²						Li ⁺ , Ag ⁺			S ²⁻	

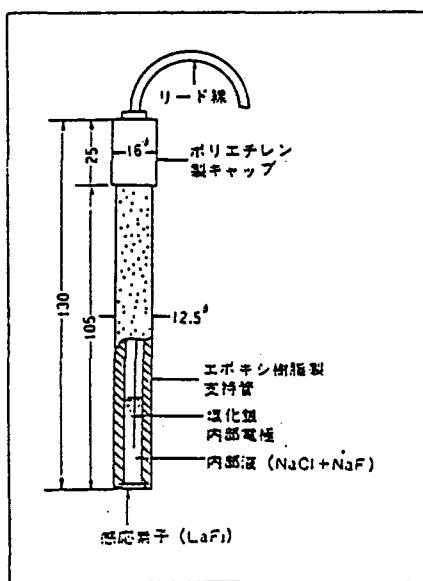


図-42 フッ素イオン電極の構造

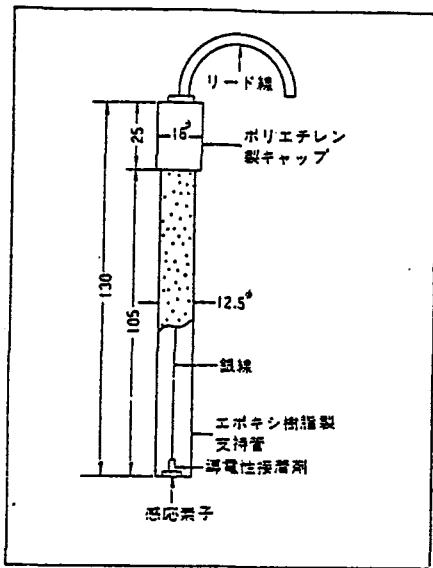


図-43 固体多結晶膜電極の構造

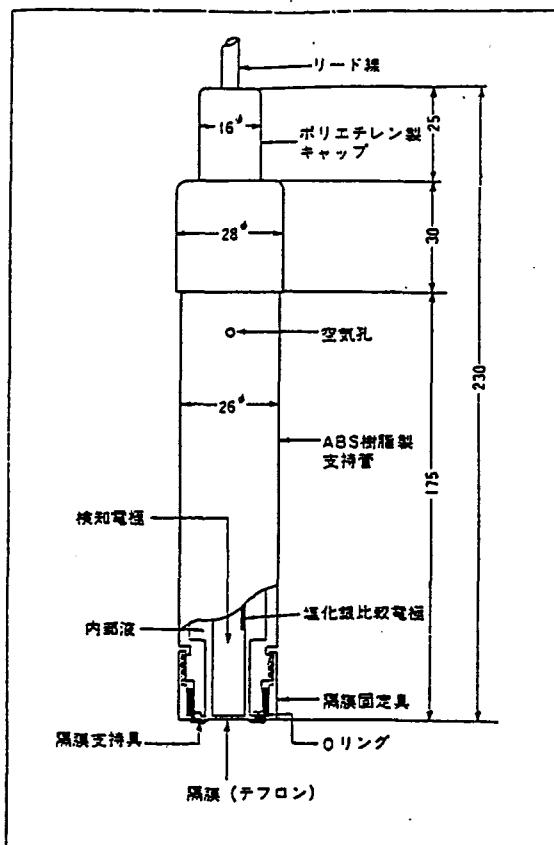


図-44 隔離型電極の構造

表-30 地層処分に適用可能な技術の調査

(耐放射線光ファイバー)

分 野	地層処分
適用技術	耐放射線光ファイバー
新技術の現状	<p>現在公衆通信用として広く使われているGeO_2をドーバントした光ファイバーは、放射線特性が悪く、B_2O_3を用いたものが比較的よい。</p> <p>一方、純粋石英が最も耐放射線性が良好であるが、不純物のOH、Clのため影響を受ける。これらは、作製法及び条件に依存する。最近では耐放射線強化法として水素ガスを利用したものがある。</p> <p>図-45、46参照</p>
新技術の適用概念	<p>現在、再処理、原子力発電、核融合などの放射線環境下において、信号伝送、画像伝送に使用されている。</p> <p>同様に地層処分においても各種センサーからのモニタリング信号の伝送に適用できる。</p>
従来技術と新技術との比較	光ファイバーは銅線に比べ、線量、データ伝送量、誤り率とも優れている。
新技術適用に当たっての課題	地下に光ファイバーを敷設した場合、取り換えが困難なので、長期にわたり、高い伝送率が保持される必要がある。
今後の展望	石英系光ファイバーの耐放射線性は格段によくなってきており、劣化、回復などの原因が解明され、さらに耐放射線性の優れた光ファイバーが開発されるものと思われる。

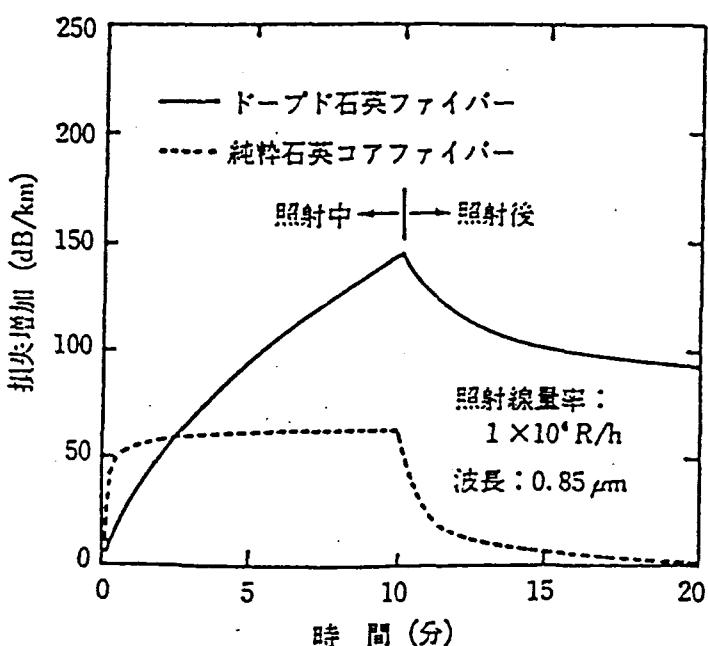


図-45 γ 線照射時における光ファイバーの伝送損失の連続測定³⁾

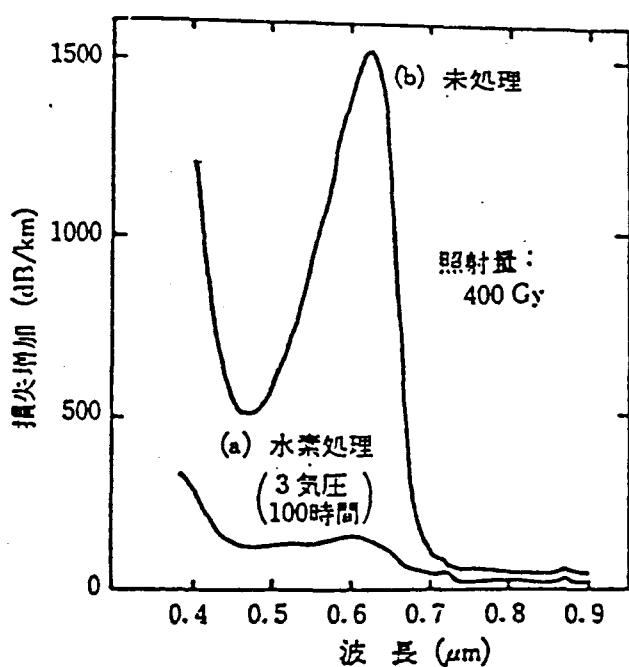


図-46 水素処理による純石英コアファイバーの放射線による損失増加の抑制効果³⁾

⑤ ある程度のメモリー機能を持つ。

また、望ましい特性として他のセンサーと連携、環境条件の変化への適応、判断機能などがあげられている。

センサーの知能化の段階と具体的な効果を次の3段階に分けて考えると、次の通りになると考えられる。

I段階：影響量の補償や直線性などの特性改善、精度の向上、設計の自由度増大などがもたらされる（知能化初步的段階）。

II段階：自動校正、自己診断などの自律的機能付与、自動化、省略化、分散処理などセンシングシステムの基本的機能が確立される（自立化段階）。

III段階：多次元計測、像校正、特徴抽出、パターン認識などの機能創出。

複雑な対象から知的操縦により有効な情報を効率良く得られる。分散処理システムが相互に連係を保ちつつ状況に適応して適切な動作をとる（知能化本格的段階）。

I段階は知能という言葉を用いることは適切ではないと考えられる。従来、センサーデバイスと分離されていた補償機能などを組み込んだ集積化とセンサーの近傍において分散処理を行うことについては知能化としての意義がある。工業計測ではレベルが統一された信号を出力することによって標準化が可能となる。その結果、センサーをブラックボックスとして扱えるようになる。

II段階となるとセンサーの機能が自律的に実行され自立化が進む。また、状況に適応するための一種の判断機能が必要であり、その判断機能はセンサーの保守点検や故障の修理において作業者の負担を大幅に軽減する。

III段階において前述した情報的側面が本格的に強化されて、必要な情報が直接得られ、また自立性の確立と相まって人間の知的行為の一部がセンサーによって代行されることになる。この意味で知能化の本格的段階といえる。センサー技術の知能化に関する現状は、IとIIの段階が実現した程度と考えられる（図-47参照）。本格的なIII段階については今後の発展が期待される。

IIやIIIのアナログ信号処理は従来から見られるものであるが、センサーの知能化に関してはむしろ本格的発展はこれからと考えられる。

(ii) スマートセンサー技術の適用予想概念

地層処分のモニタリングに要求される特性は長期にわたり性能が変わらないこと

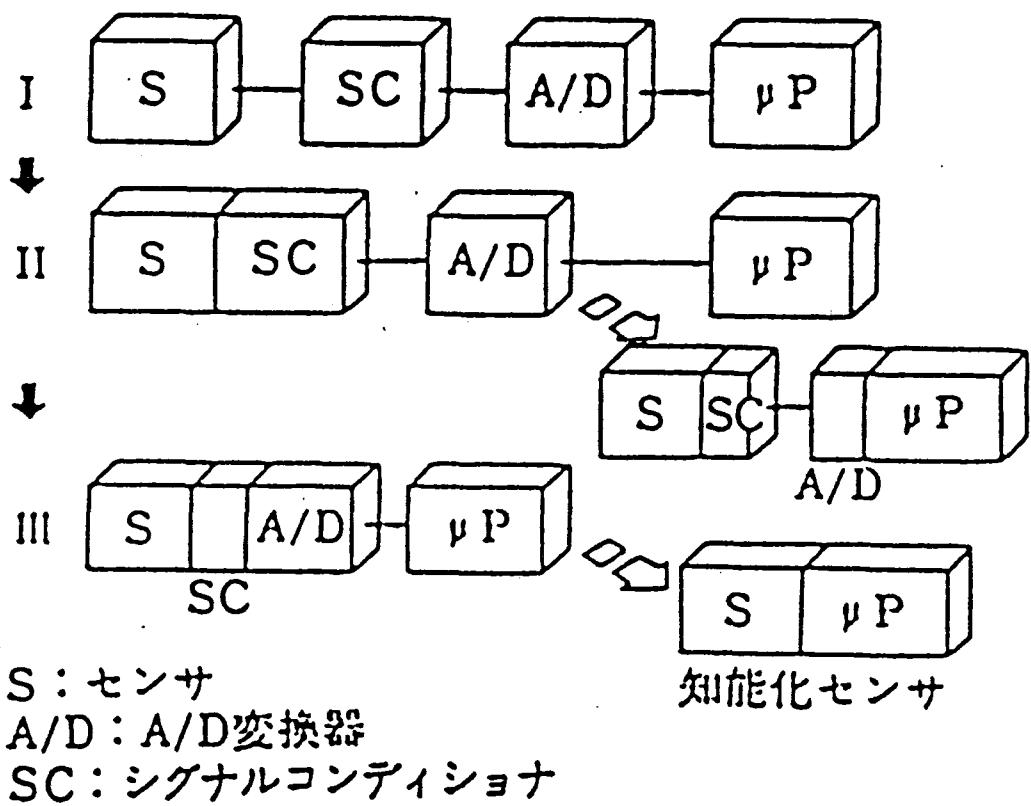


図-47 センサーとマイコンの結合形態の変遷

が重要であり、スマートセンサー技術が発達しセンサー部とマイコン部が一体化されても、このことは知能の高度化とは直接結びつかないものと考えられる。間接的にはモニタリングシステムの高度化に影響を与えると考えられるが、モニタリングする内容により影響の度合いが異なると考えられる。

(ⅲ) まとめ

スマートセンサー技術について調査、整理した結果を表-31に示す。

(6) 超耐食性材料

超耐食性材料について調査、整理した結果を表-32に示す。

表-31 地層処分に適用可能な技術の調査

(スマートセンサー技術（故障自己診断機能等）)

分野	地層処分
適用技術	スマートセンサー技術（故障自己診断機能等）
新技術の現状	センサーの知能化は①影響量の補償や直線性などの特性改善、②自動校正、自己診断などの自律的機能付与の段階、がセンサデバイスと信号処理デバイスとの機能集積化により実現した程度であり、機能材料の物性を応用した信号処理機能付与や形態や構造自体がもつ信号処理機能の応用が今後発展するであろう。
新技術の適用概念	スマートセンサーシステムとして利用することで、地下情報を大局的に把握することが可能となる。例えばトモグラフィや地下埋設物の検出して適用することができる。 また、長期のモニタリングを行う場合、自動校正機能は重要である。
従来技術と新技術との比較	現在のセンサー技術は確立した状態量の検出には優れているが、空間的な広がりをもった状態の認識は不得手であったが、センサーとデバイスの融合したスマート化により特徴抽出た情報の圧縮が可能となる。
新技術適用に当たっての課題	① アナログ処理機構をもつ知能化デバイスの実現 ② 超格子やマイクロマシニングのような微細加工技術 ③ バイオテクノロジーとの融合
今後の展望	マイクロプロセッサやメモリの進歩に伴ないスマートセンサーの機能はより人間に近いものになると考えられ、有機的なモニタリングシステムへの可能性がある。

表-32 地層処分に適用可能な技術の調査
(超耐食性材料)

分 野	地層処分
適用技術	超耐食性材料
新技術の現状	<p>超耐食性材料は、ガラス固化体のオーバーパック材として用いられるが、オーバーパックには一定期間にわたって放射性廃棄物を完全に閉じ込めることが期待されているので、長期にわたる耐食性が要求される。現在新しいオーバーパックの材質としてはセラミックスを含む各種の候補材料や複合材料について検討されており、その性能評価の方法を開発しながら、基礎データを蓄積している段階にある。研究においては鉄鋼や銅についての腐食速度の予測や、チタン、ハステロイ等の耐食性材料についての腐食形態とその条件の評価が主として行われており、原位置環境を模擬した試験や緩衝材中の試験が国内外で実施されている。</p> <p>さらに新しい材料として、①アモルファス合金、②金属間化合物、③エンジニアリングプラスチック、④複合材料、⑤FRM(繊維強化金属)、⑥ファインセラミックス、⑦非酸化物セラミックスが考えられる。</p>
新技術の適用概念	超耐食性材料は高レベルガラス固化体のオーバーパックとして用いられる。なお、超深孔処分ではさらに耐熱、耐圧性が要求される。
従来技術と新技術との比較	鉄をオーバーパック材に用いた場合の腐食しろは、通常の地下水環境では1000年で50mm程度と考えられている。
新技術適用に当たっての課題	<p>① 長期にわたる耐食性の評価手法の確立 ② コスト</p>
今後の展望	新しく開発されつつある上記の①～⑦の材料は主として機能材であり、構造材として使用するには製造方法の確立が重要であり、かなり長期にわたり基礎研究が必要である。

3. 3 代替処理処分に適用可能な技術の調査

本項では、3.1項で摘出した適用対象技術のうち、次の各々の代替処理処分への適用が可能と考えられる技術、あるいは代替処理処分に必要と考えられる技術について調査、整理を行った結果を示す。

(1) 超深孔処分技術関連

- ① 大口径超深部掘削技術

(2) 海洋底下処分技術関連

- ① 海洋作業用の掘削技術

(3) 群分離・消滅処理技術関連

- ① レーザーによるアクチニド分離技術

- ② 核破碎技術（陽子加速器）

(4) 宇宙処分技術関連

- ① ロケット技術の高度化

- ② CERMET

なお、岩石溶融処分、島内処分、氷床処分、井戸注入処分での適用対象技術は、他の処理処分概念と重複することから、各々の調査結果を参考として以後の検討を進めるものとした。

3.3.1 超深孔処分技術関連

超深孔処分は、安定で透水性の低い堆積岩、結晶質岩などの岩体中に、直径50cm、深度3,000m～15,000m程度の垂直孔を掘削してケーシング施工し、ガラス固化体を封入したキャニスターを多段に積み重ねて定置した後埋め戻す方式である。

超深孔処分における主要な技術課題である大口径超深部の掘削技術の概要および現状について以下に示す。

(1) 大口径超深部掘削技術

米国では、超深孔処分は石油及びメタンガス資源との関連で調査することが勧告されており、本処分方式への適用が考えられる技術としては石油産業で一般に使用されている油井掘削用ロータリードリルがあるが、処分に必要と考えられる直径50cm程度の大口径超深部の掘削技術は、現状では試験的な施工例が若干見られる程度で、今後技術革新が必要である。人工的に掘られた最も深い孔はソ連のコラ半島にあり、その深さは12,000m程度で最終的には15,000mまで掘る計画であるが、現段階ではこの程度が掘ることのできる限界と考えられる。

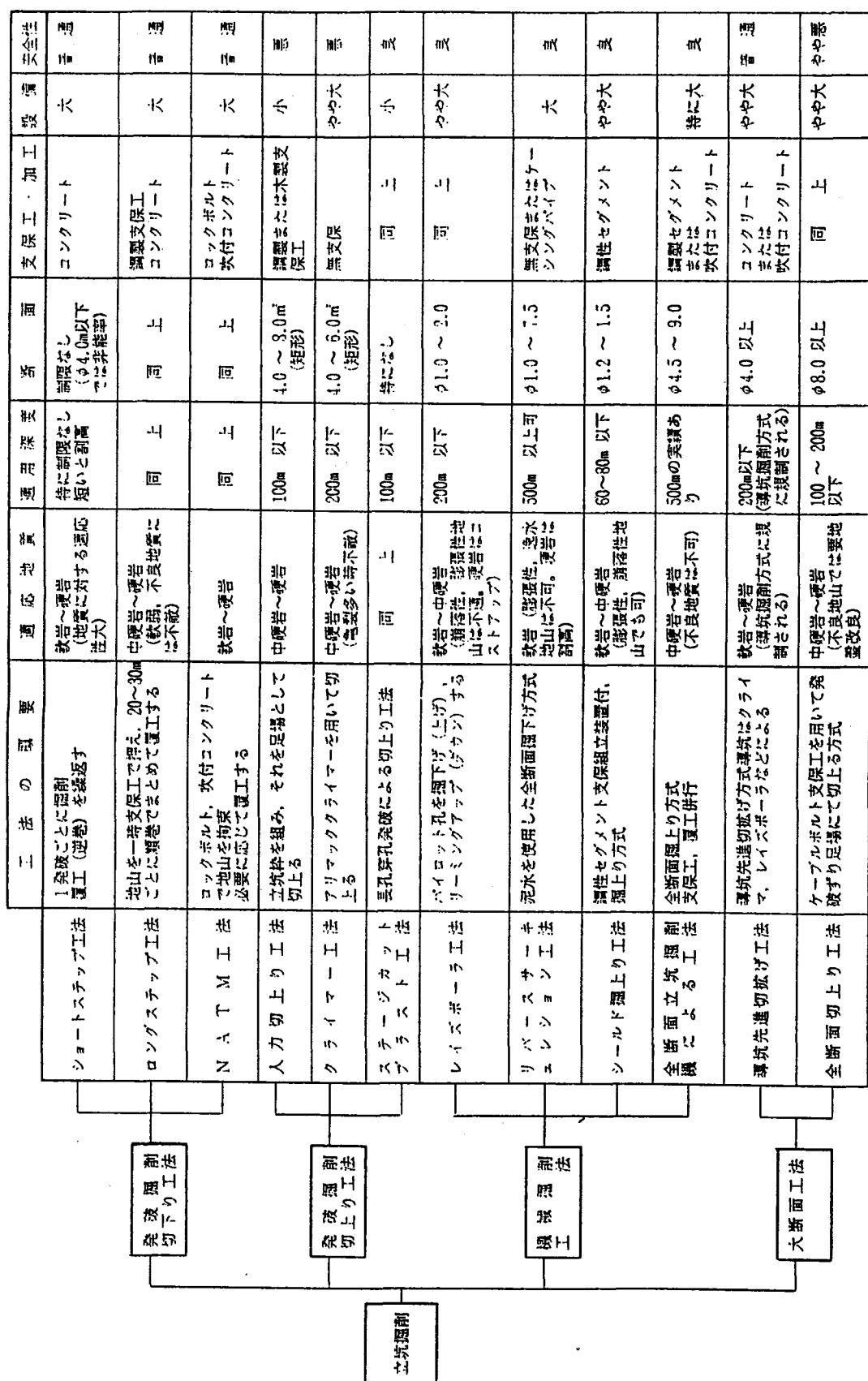
また、大口径という観点からは、現在シャフトボーリングマシン形式での最大級のものは口径6～8m、深度1,000m程度である。この方式の現状技術では口径10m程度、深度千数百mが限界であると考えられる。

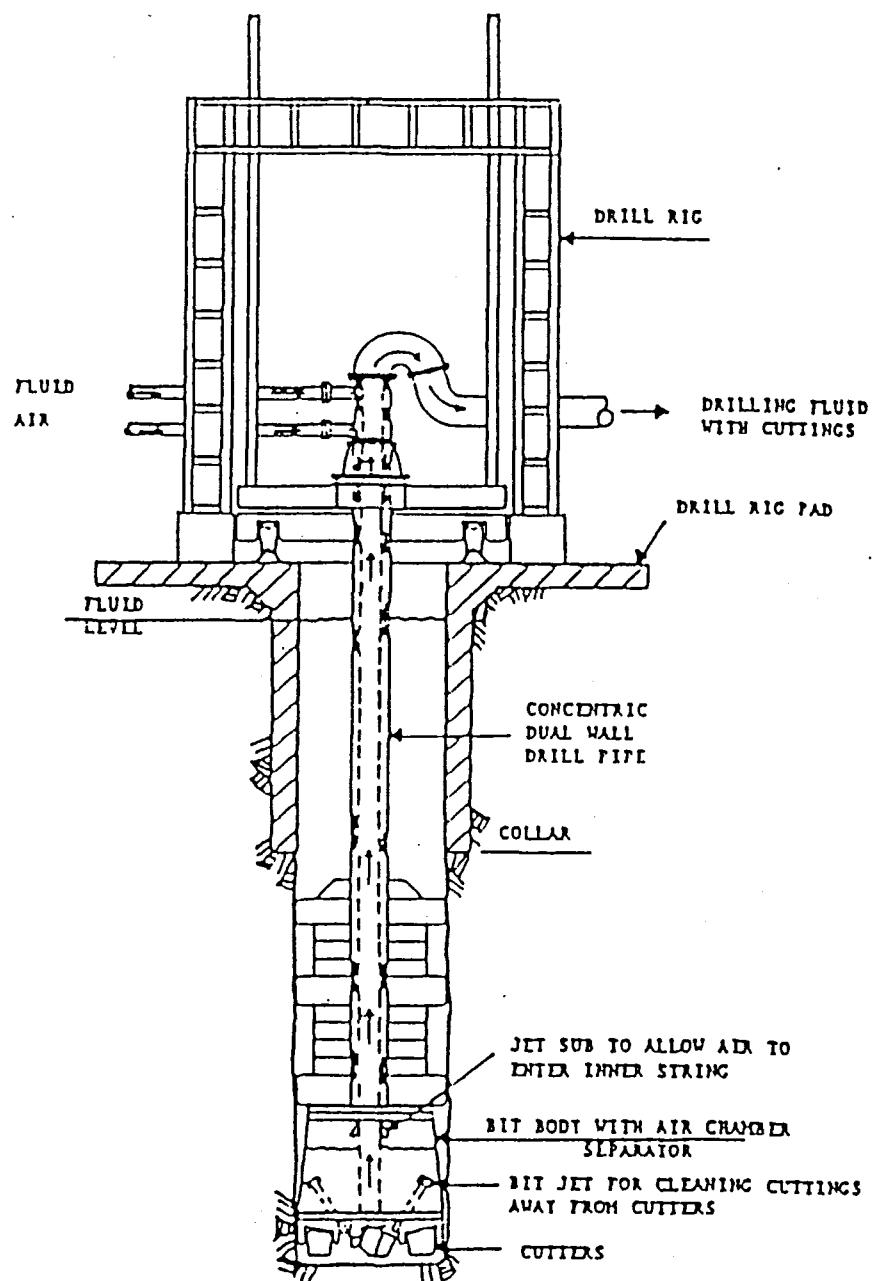
なお、例えば地下10,000mの掘削地点では温度が400°Cまで上昇すると考えられるので、ドリルビッドやパイプは耐高温用への設計、材質の改良改善が必要となる。

大口径の掘削技術について調査、整理した結果を表-33に示す。

表-33 代替処理処分に適用可能な技術の調査
(大口径超深部掘削技術)

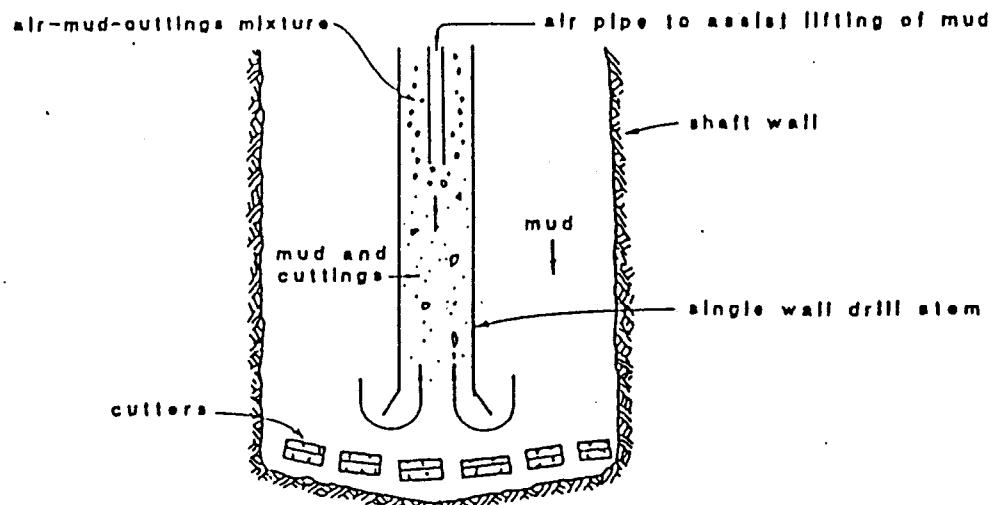
分野	超深孔処分
適用技術	大口径超深部掘削技術
新技术の現状	<p>大口径立坑掘削技術は大別して、4つに分類できる(図-48)。立坑掘削において注意しなければならない項目は、周辺岩盤へ与える緩み損傷程度、ずり上げ性、安全性等である。これらの項目に着目して、各現場の地質状態に最適な掘削工法が選定される。超深孔掘削に関しては、特に増大する周辺地圧に対して、孔壁を如何に安定させるかが重要であり、その観点からすると、全断面機械掘削工法が適していると考えられる。機械掘削工法には種々の方法があるが(図-49~53)、緩みの観点からすると泥水を使用しながら、ケーシングチューブを設置し、孔壁安定化を図るシャフトボーリングマシンが最適である。現状、本法として最大級のものは孔径6~8m、掘削深度としては1000m程度である。(図-54)</p>
新技术の適用概念	<p>現状の技術では、シャフトボーリングマシン形式で直径10m程度、深度千数百mが限界であろう。この根拠は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① ビット摩耗寿命に限界があり、地上にて行う交換作業に大きな手間が掛かる。 ② 駆動力を伝達するシャフトの強度、剛性に限界があり、孔の直進度、方向性を確保するのが困難となる。 <p>従って、これらを改善することが超深孔地層処分用大孔径の掘削技術を開発するポイントとなる。適用概念をまとめると以下のようである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 現状の全断面機械式シールド掘進機(図-55)の立て型を開発する。 ② カッタビットの長寿命化を図ると共に、機内からのカッタビット交換を可能とする装置を設ける。 ③ セグメント等、機材の上下搬送設備を設ける。 ④ 切羽に於ける掘削ずり取り込み装置を設ける。 ⑤ セグメントと孔壁とのアンカリングを考慮する。 ⑥ 機械本体自重、カッタトルク反力支持のためのグリッパ機構を設ける。
従来技術と 新技术との 比較	<p>従来、掘削技術は主として、爆破工法であり、NATM工法を用いて、緩みの低減、地質変化に対する対応性を向上させるのが一般的である(図-48)。但し、湧水があったり、崩壊性の地盤であったり、大深度となり地圧が高くなると周辺地盤の緩み領域の発生、安全性の観点から本法は適用不可となり、泥水工法を利用するシャフトボーリングマシン等、全断面掘削機利用による工法のみ適用可能となる。</p> <p>これら従来方法に対して、立て型機械式シールド機の長所は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 方向制御が容易であり、直進性に優れる。 ② 大孔径に必要なカッタトルクが確保可能である。
新技术適用に 当たっての 課題	<p>立て型機械式シールド機開発のための課題は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① カッタビット摩耗寿命の向上と交換システムの開発。 ② 孔底に溜る掘削ずりの収集技術の考案。 ③ 機材上下搬送設備の開発。 ④ セグメントの孔壁固定化技術の開発。
今後の展望	<p>石油掘削技術、科学調査のための大深度ボーリングプロジェクト等、数十cm程度の小孔径であるならば、数km~十数kmの大深度掘削の実績があるが、m単位の大孔径立坑掘削技術については1000mが実用限界である。</p> <p>孔径10m、深度数千mの大孔径立坑掘削技術を開発するには、ここで提案した立て型機械式シールド機のように、全く新しい考えを適用する必要がある。このような立て型機械式シールド機については、ニーズさえあれば、現状技術にて十分開発可能なシステムであると言える。</p>



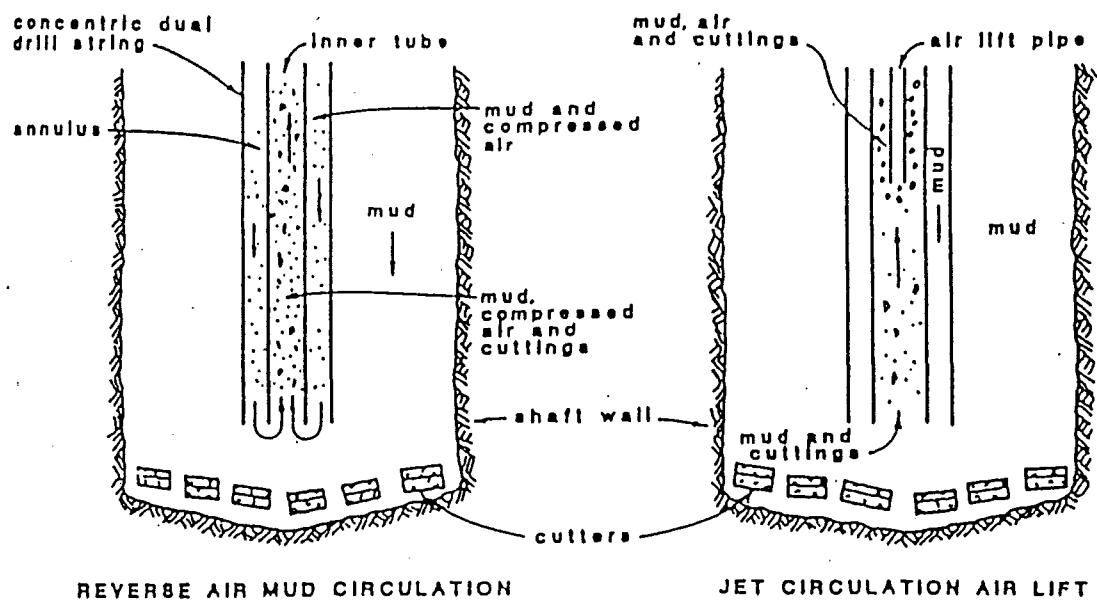


After Carone and Whitley, 1980

図-49 シャフトボーリングマシン



REVERSE AIR ASSIST CIRCULATION



JET CIRCULATION SYSTEMS

図-50 掘削すり上げ法

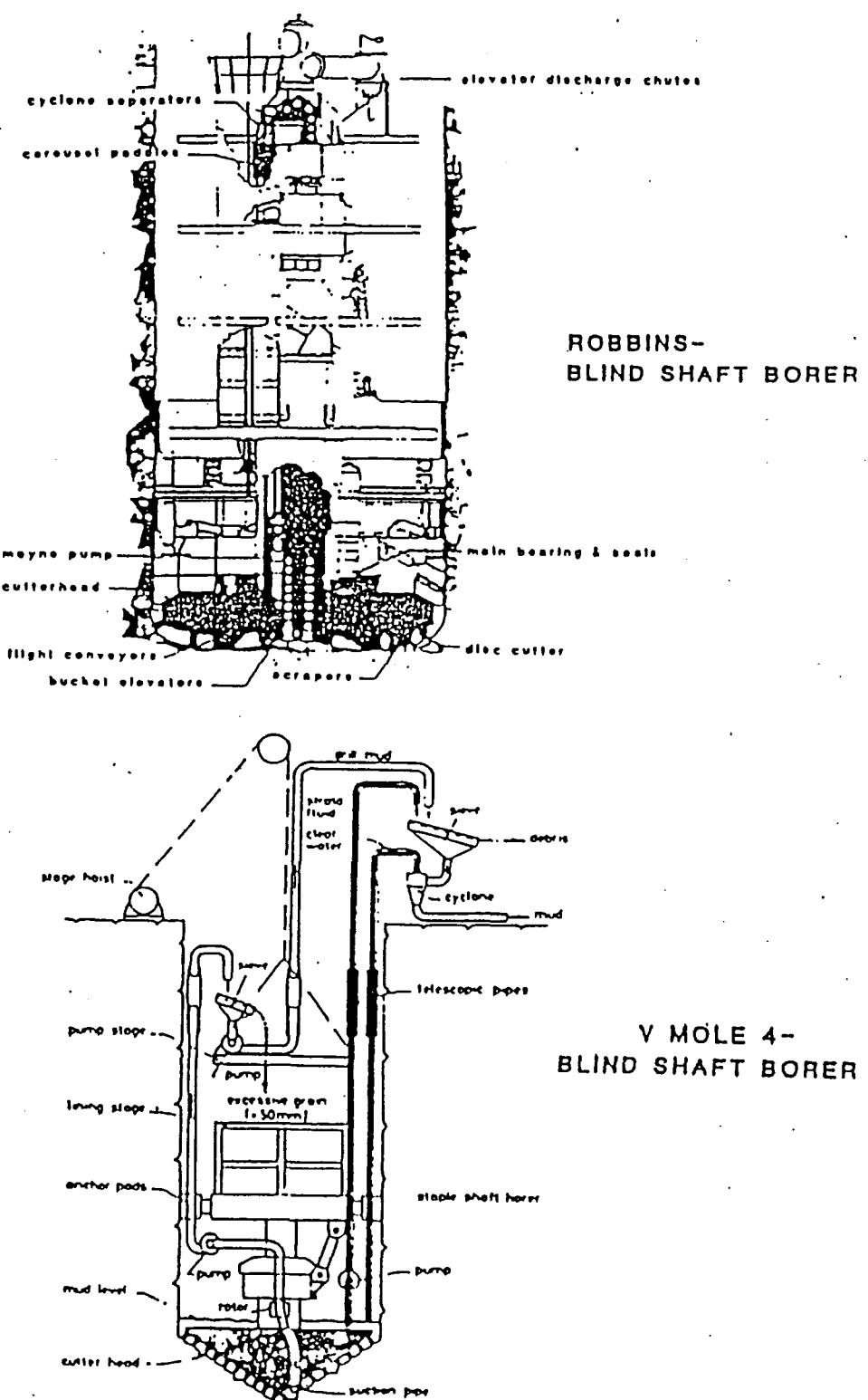
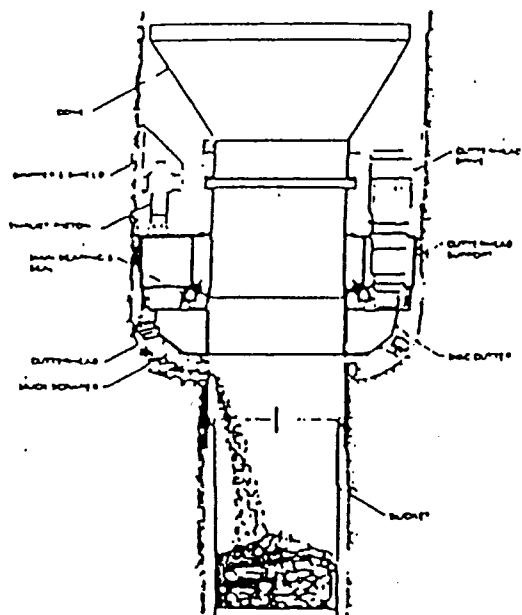
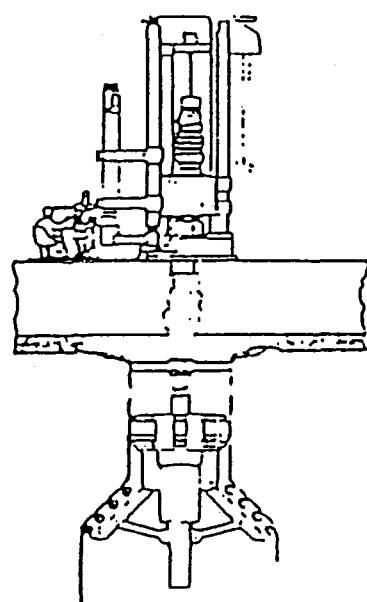


図-51 ダウンザホールボーリングマシン



ROBBINS 1211SR SHAFT REAMER

図-52 ダウンザホールリーミングマシン



ROBBINS 121BR EXPANDABLE RAISE REAMER

図-53 レイズボーリングマシン

THE GSD 300
HUGHES MICON

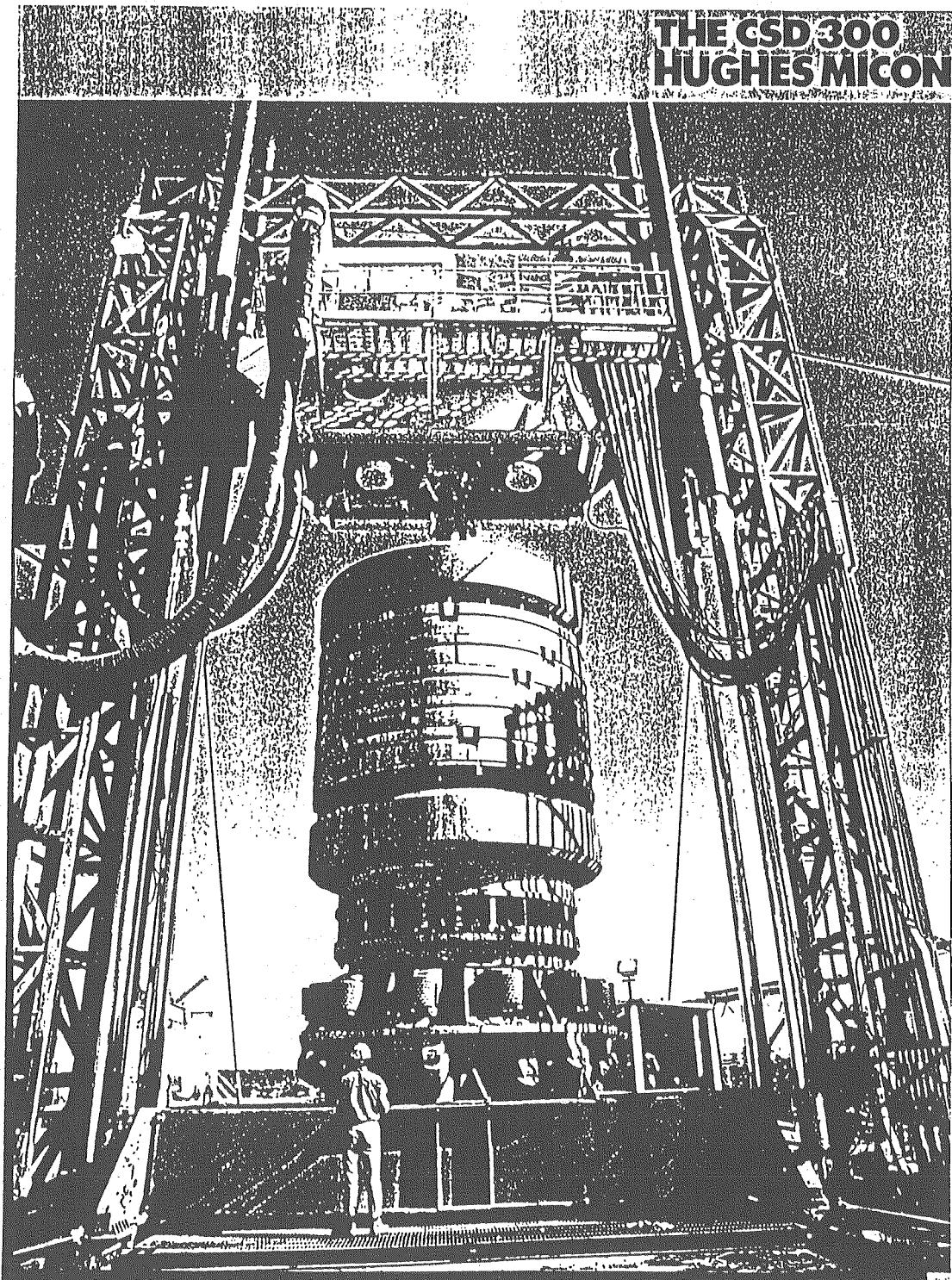
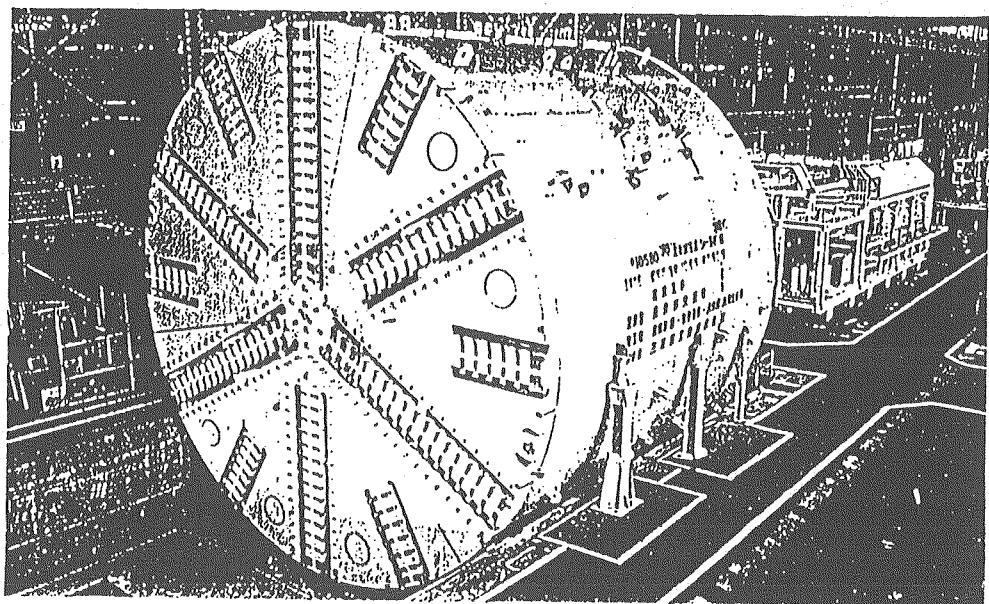


図-54 現状最大級シャフトボーリングマシン



Φ10,580mm泥水式シールド

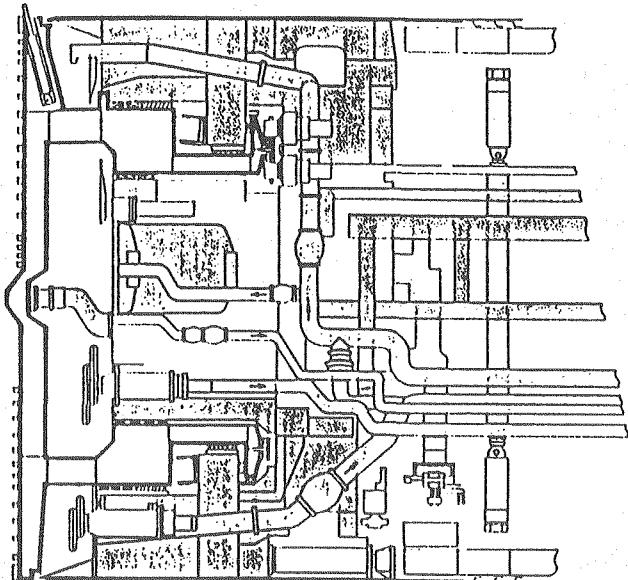
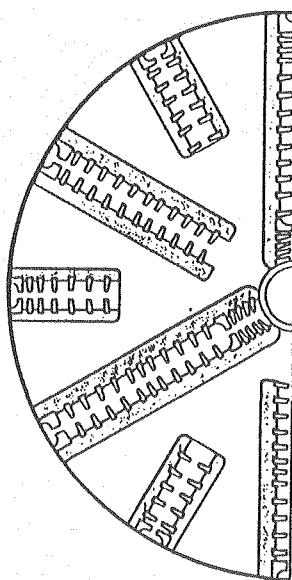


図-55 全断面機械式シールド掘進機

3.3.2 海洋底下処分技術関連

高レベル放射性廃棄物の代替処理処分技術のうち、従来の地層処分方式の延長上、あるいは高度化技術として位置づけられるのは海洋底下処分である。海洋底下処分は、3,000～6,000m程度の深海底の安定な堆積層、あるいはさらにその下部の基盤岩中に穿孔してガラス固化体を封入したキャニスタを多段に積み重ねて定置する方式である。海洋底下処分が従来の地層処分方式の延長の技術と考えられるため、それに適用可能な技術は本質的には地層処分に適用可能な技術と共通のものであると考えられるが、海洋での作業のための技術は特有のものと考えられる。

そのため海洋底下処分における主要な技術課題である海洋作業用の掘削技術の概要及び現状について以下に示す。

(1) 海洋作業用の掘削技術

(i) 海洋底下処分用の掘削技術への要求条件

3,000～6,000m程度の深海底で海洋底下処分用の掘削を行うことを想定すると、まず300～600気圧の耐圧性能が問題となる。さらに海洋底の堆積層からさらにその下部の基盤岩中を掘削することを想定すると、地層処分の掘削圧にさらに300～600気圧を加えた環境条件となる。

(ii) 関連技術の現状

海洋石油開発、海洋空港、港湾などの海洋土木工事及びダム貯水池堆積土砂の排除などは、近年大水深化、沖合化が進んでおり、その作業環境条件はかなり苛酷になってきている。このような情勢を背景に、悪環境下での潜水作業の高精度化、高能率化や安全確保のため、海中作業ロボットが近年メカトロニクス、ロボット技術を取り入れて急激に発展している。

欧米では既に海底石油開発や海洋調査等において多数の実績があり、我が国でも次第に実績が多くなりつつある。しかしながら、これらの海中作業ロボットは、精々水深50m程度が限界であり、大深度での高精度作業への適用性はほとんどない。

一方、マニピュレータ付きの深海探査船は、我が国においても“しんかい6000”に見られるように実績を積んできており、深度の上では海洋底下処分に必要な深度まで到達している。

(iii) 海洋底下処分用の掘削技術の適用予想概念

海洋底下処分に適用が可能と考えられる海洋作業用の掘削概念としては、着脱可

能な掘削機械を具備した深海探査船という概念になると考えられる。

(iv) まとめ

海洋底下処分用の掘削技術の適用概念、適用に当たって課題及び今後の展望などを調査、整理した結果を表-34に示す。

表-34 代替処理処分に適用可能な技術の調査

(海底作業用の掘削技術)

分 野	海洋底地層処分
適用技術	海底作業用の掘削技術
新技術の現状	<p>海洋土木工事は近年大水深化、沖合化が進んでおり、悪環境下での潜水作業の安全性確保及び作業の高精度化並びに高能率化を促進するために、各種の水中作業用ロボットが開発されている(図-56)。最近の傾向として、高い作業精度並びに作業能力に対応させるため、海底に接地して移動しながら作業する走行式が使用されることが多い。大別すると歩行式とクローラ式に分類され(図-57~61)、海底地盤の状態によって使い分けされる。何れの場合も海上より有線にて操作されるが、最も進んだ形式のものは、半自立制御型自動掘削機で、自らの位置と掘削面形状を検知しながら、泥水中でしかも水圧駆動で作業するものであり、平成7年度完成を目指して国家プロジェクトとして研究が進められている。</p>
新技術の適用概念	<p>海洋底地層処分に適用可能な、水没自動掘削機の技術的特徴は以下の通りである(図-62)。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 地上より有線で作業内容を送信することにより、泥水霧囲気下で半自律作業が可能である。 ② そのため、泥水中で作動する自己位置検出センサー並びに掘削面の凹凸状況を非接触で検出可能なセンサーを持つ。 ③ 軟岩を高効率で掘削し、その掘削土砂を高濃度で地上に搬出可能な砂搬出装置を持つ。これらの装置部品は高寿命で、長時間メンテナンスフリーである。 ④ 凹凸の激しい地盤上を高速移動可能で、且つ位置決め精度が良好な走行装置を持つ。 ⑤ 水圧駆動であり、無公害である。 <p>これらの各技術に加えて、数千m以深の海底作業に耐える耐水圧技術、完全自律制御方式が採用されるべきである。</p>
従来技術と新技術との比較	<p>従来、海底作業は作業船による海底浚渫作業、精度が要求される場合は潜水夫による直接作業が一般的であった。従って、以下の点で海洋底地層処分に伴う海底作業に適用できない。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 精々水深50mの作業が限界である。 ② 透明度が低く、視界が確保できない場合、精度良い作業が不可能であった。 ③ 精度が要求される作業については、潜水夫に頼るため、大規模且つ効率的な作業が不可能であった。 <p>最近、開発された各種水中ロボットにおいても、大深度での高精度作業は不可能である。</p>
新技術適用に当たっての課題	<ul style="list-style-type: none"> ① 数千mの水圧に耐える機構が必要である。 ② 泥水中でも自己位置、周辺地盤状況の計測が可能のこと。 ③ 動力及び制御用ケーブルが長くなるため、効率的な動力の補給方法や新たな制御方法が必要になる。 ④ 海底地盤被掘削強度増大に対処するため、掘削力の向上が必要であるが、反力増大のため、ロボット化や作業中の位置固定が困難となる。従って、掘削反力の少ない、ウォータージェットやレーザー等のエネルギーームを用いた掘削工法の適用が必要である。 ⑤ 長期間にわたって海底下で作業させるために、装置の信頼性、耐久性向上の必要性は言うまでもなく、自己故障診断及び修復技術も採用されるべきである。
今後の展望	<ul style="list-style-type: none"> ① 上記水没自動掘削機は平成7年度に完成予定である。 ② 耐水圧技術は深海艇の技術を適用可能である。 ③ 自動化については、極限作業用ロボット技術の適用が可能である。

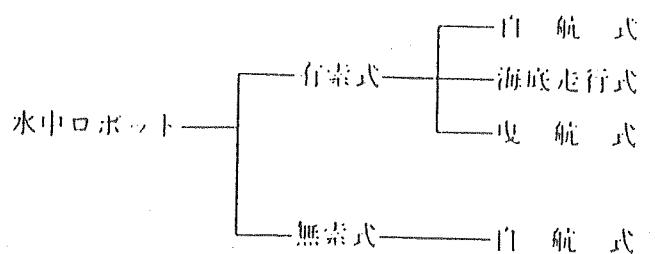


図-56 水中ロボットの分類

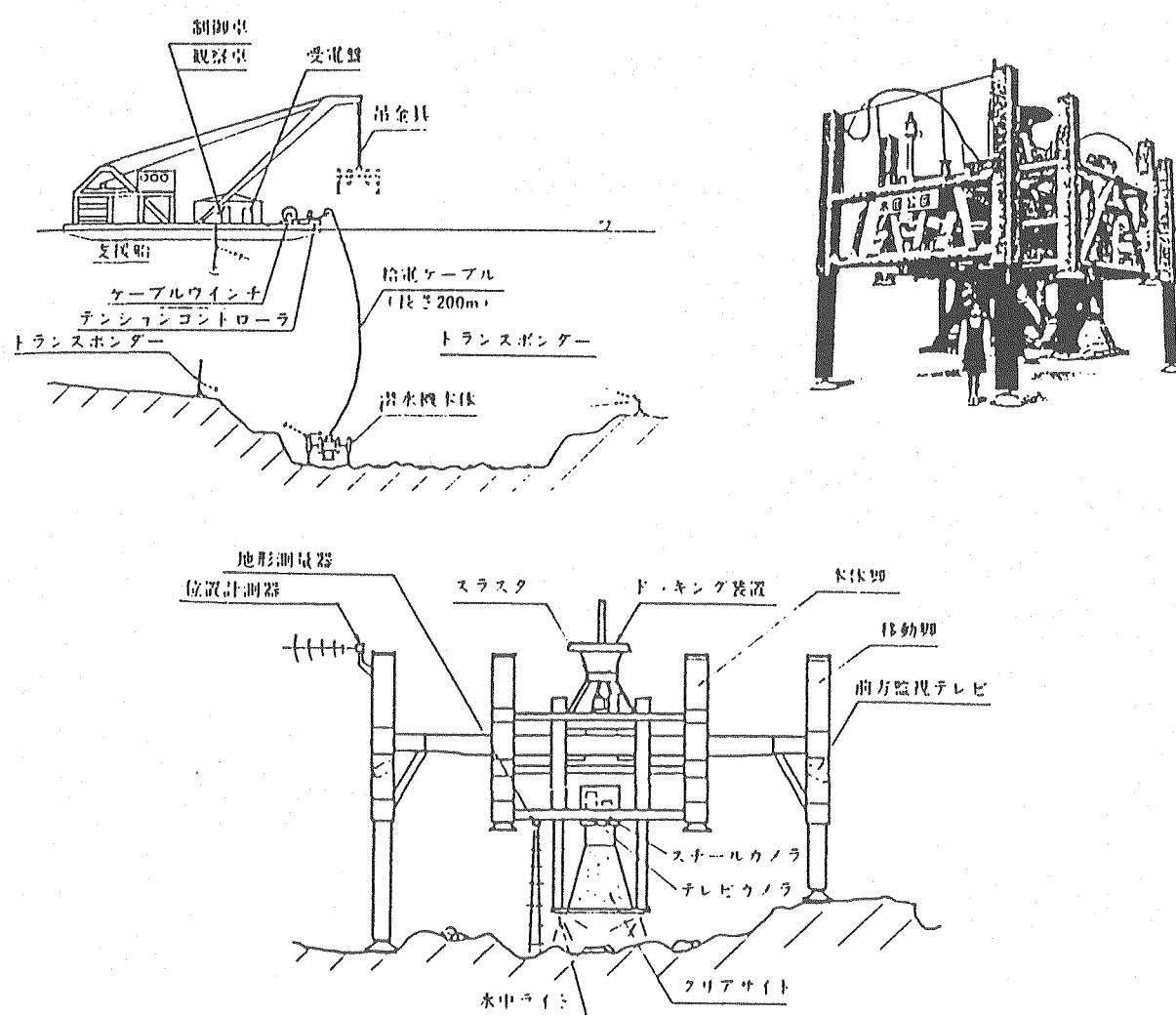


図-57 海底歩行式作業機

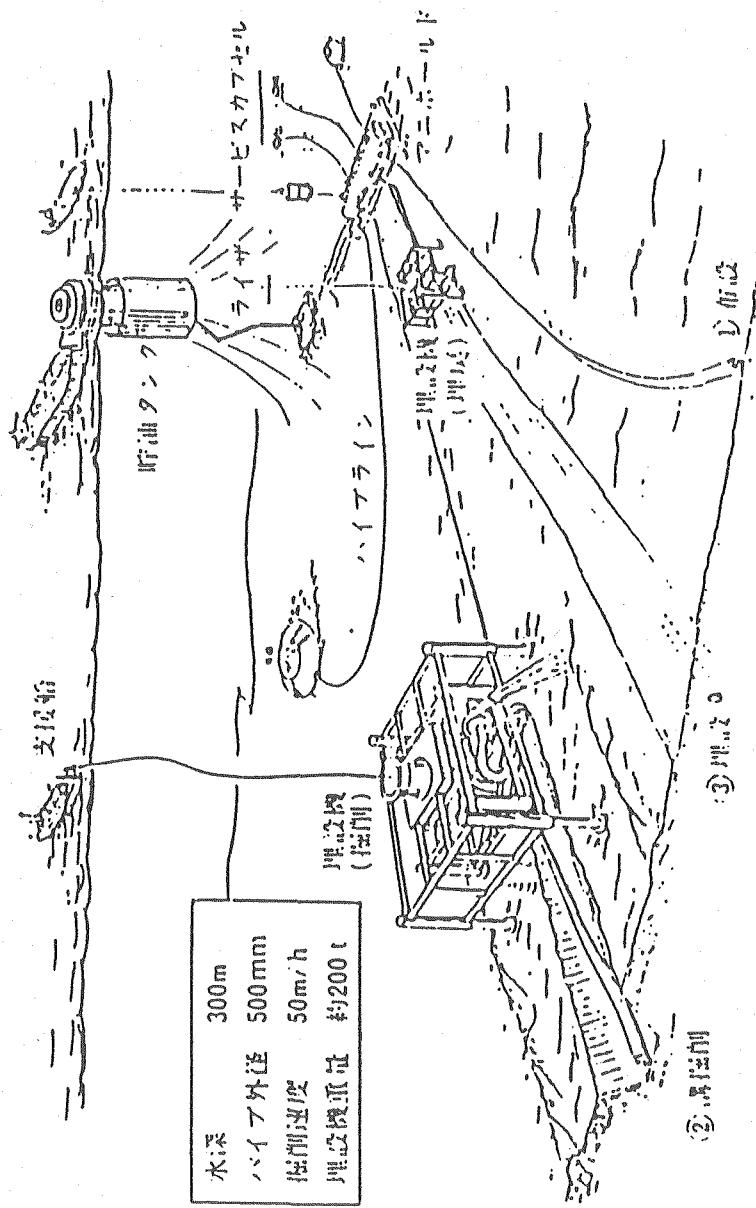


図-58 海底歩行式作業機全体システム

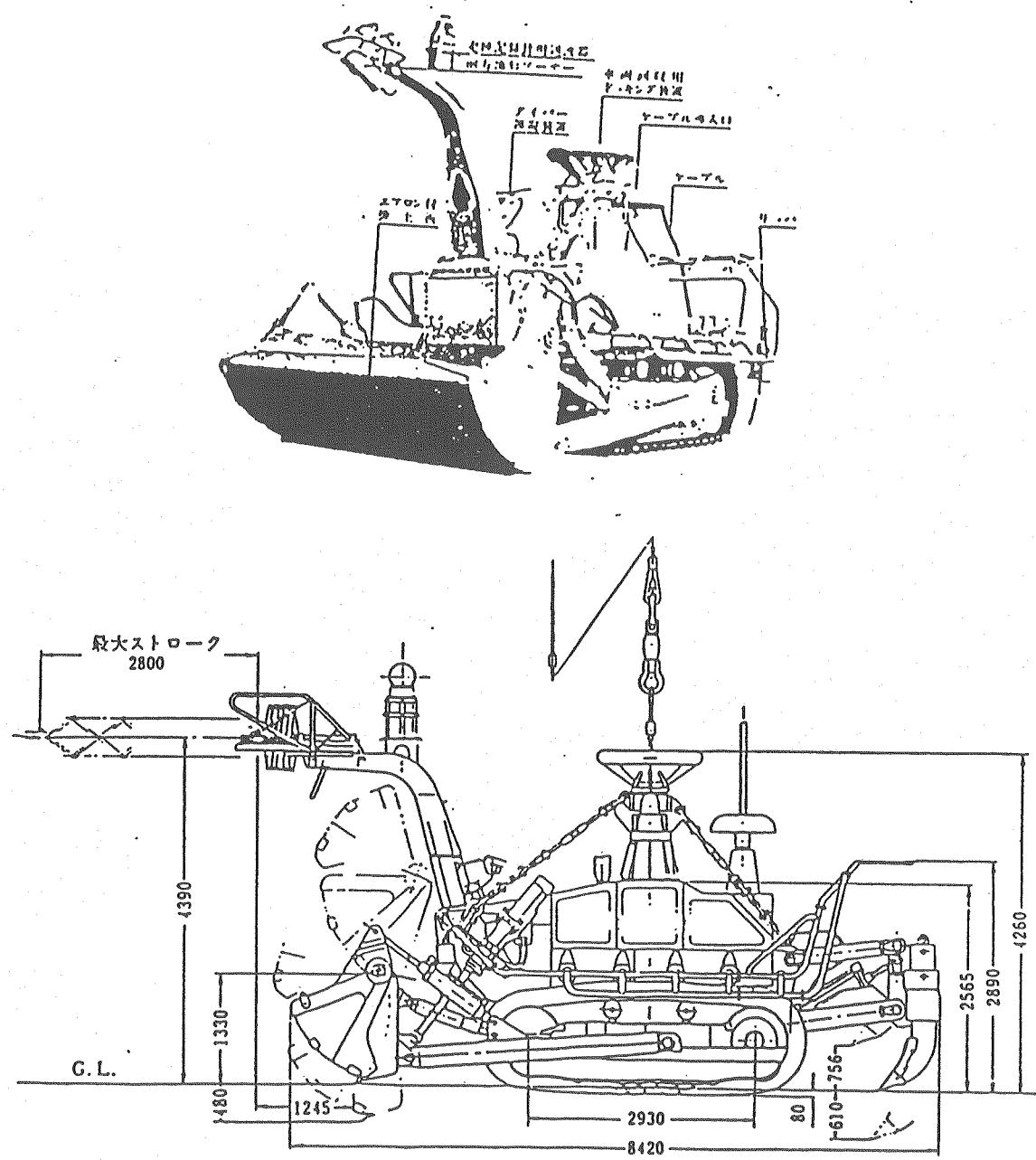
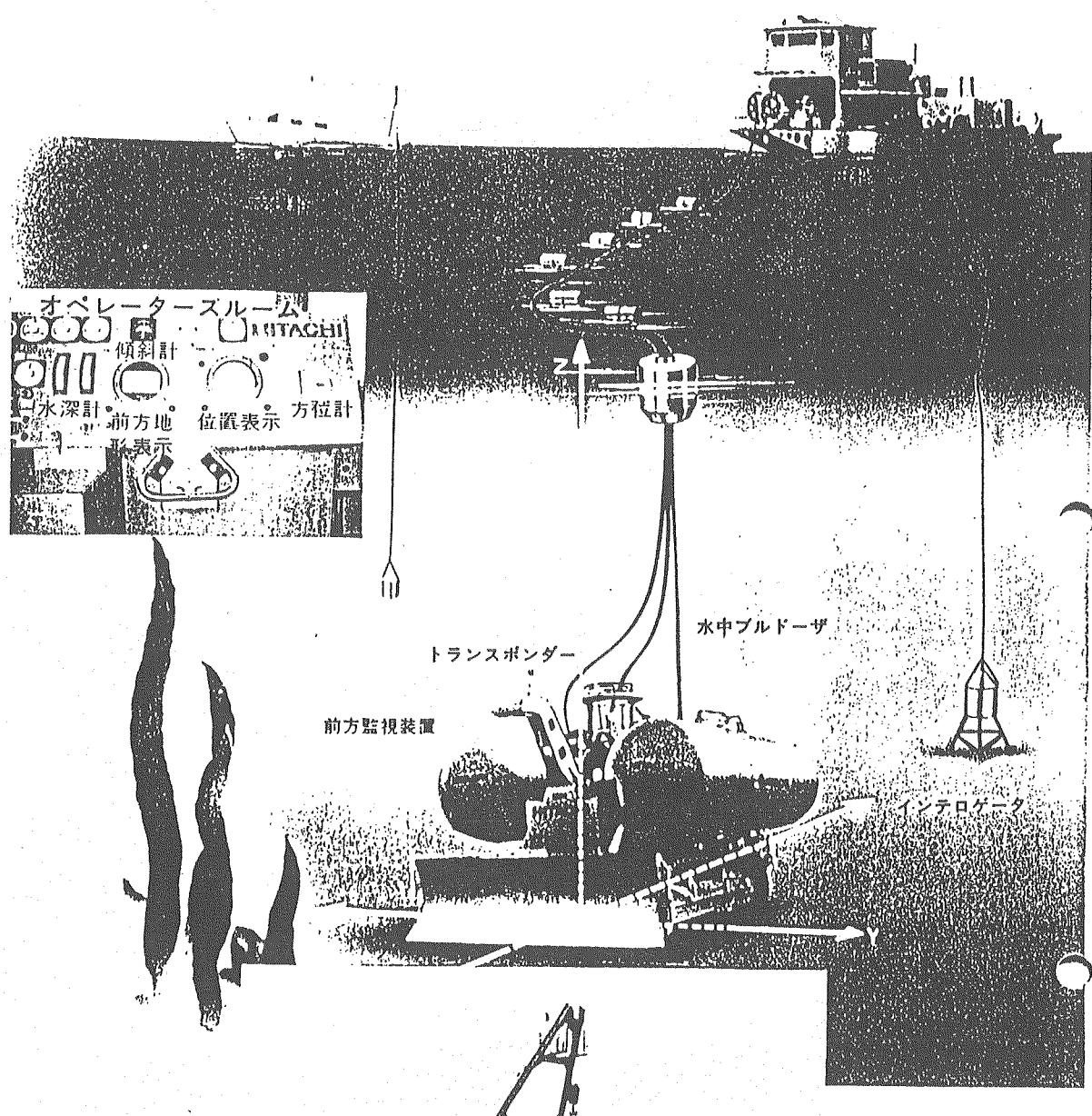


図-59 水中ブルトーザー



主要諸元

(1) ブルーザ本体 深浮タンク付	(2) 水中暗視装置	搭載機器
全 備 重 量 路上32t 水中24t	ブルーザ位置監視用ソーラ	発電装置 主ディーゼルエンジン 360PS
長さ×幅×高さ 7.2m×5.1m×4.2m	フレーム前方監視用ソーラ	主発電機 300KW 3,300V
走 行 速 度 前後進とも 0~3km/h	ブルーザ姿勢監視装置	ブルドーザ用ウインチ
走 行 駆 動 可変ポンプ+低速モータ	他各種計器	電動油圧式 一式
200kg/cm ² 100PS×2		空気圧縮機 7kg/cm ² 10.3m ³ /min
電 動 機 150KW 3,300V	(3) 母 船 (水中ブルーザ用)	
最 大 作 業 水 深 60m	非自航発電指揮船	(4) 送電、操縦用ケーブル
作 業 範 囲 母船を中心直径約	船 体 全備重量 約100t	110m 特殊複合キャップタイヤ
100m の円周内	長さ×幅×高さ 16.5m×10.2m×1.8m	

図-60 クローラ式海底作業機全体システム

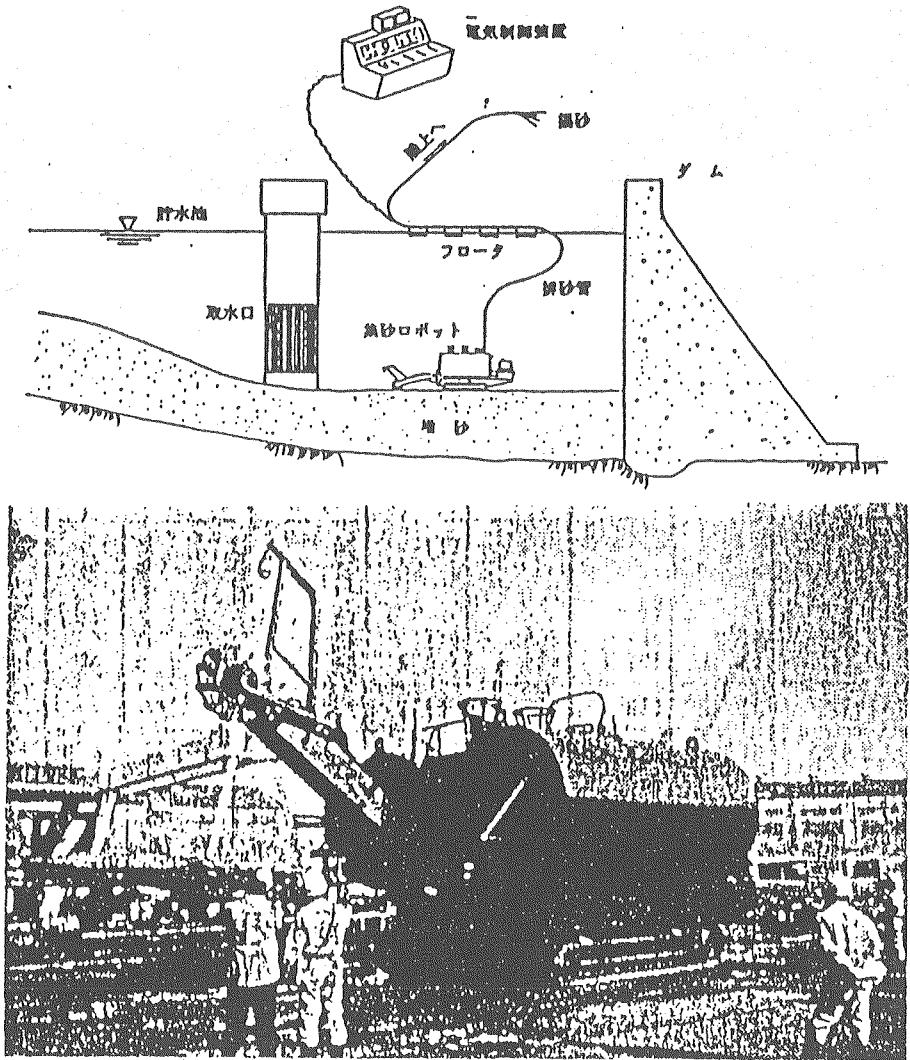


図-61 クローラ式堆砂排除システム

開発技術の概念図

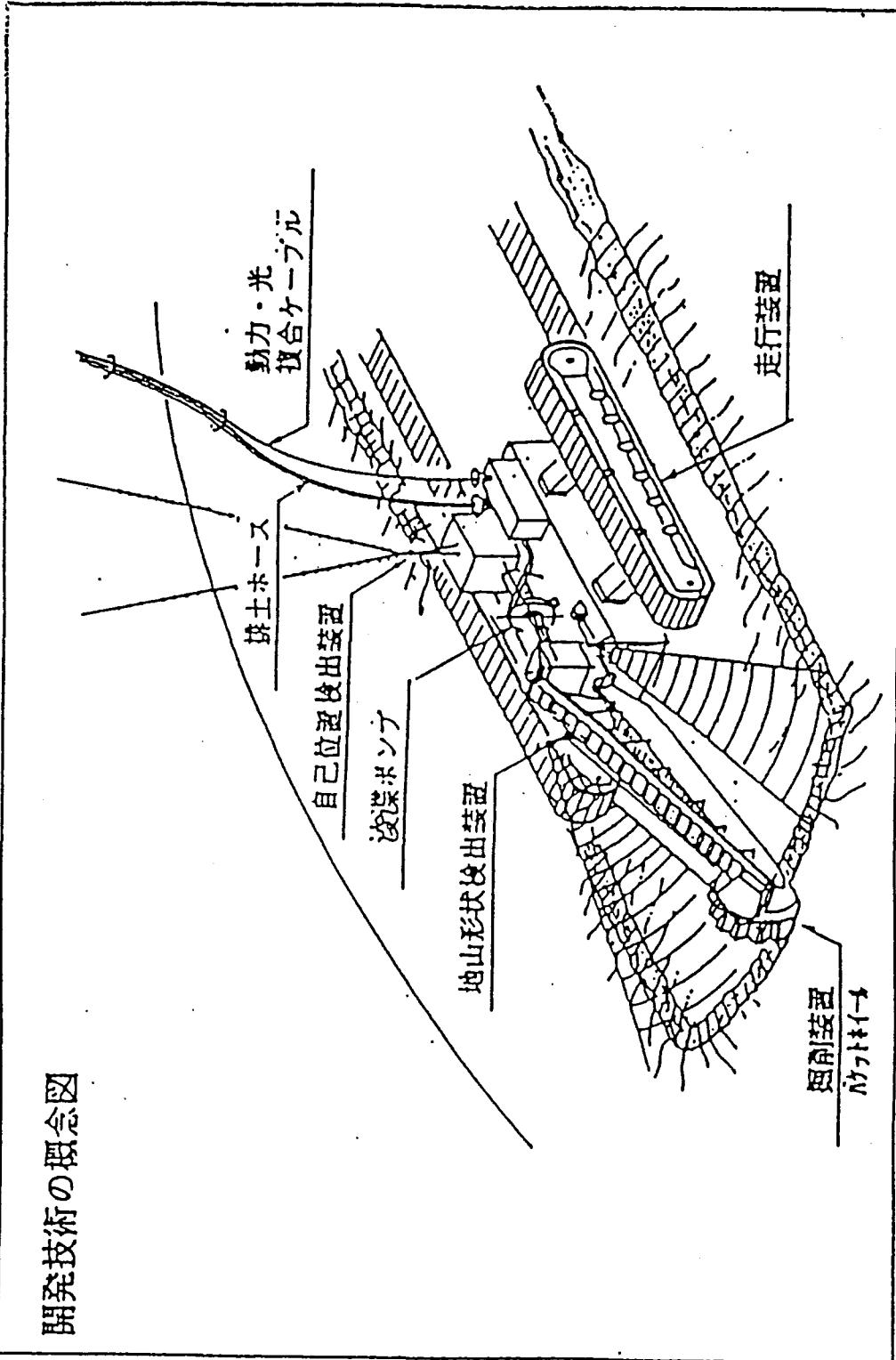


図-62 水没自動掘削機

3.3.3 群分離・消滅処理技術関連

(1) レーザーによるアクチニド分離技術

(i) アクチニドの光化学の研究概要

アクチニドの光化学の研究は、1930年代のウランに関する研究に始まり、 Np , Pu に関してもなされるようになってきた。再処理などで考慮の対象となる光化学系は、アクチニドの他、 FP を含む硝酸溶液及び TBP -有機溶媒（抽出剤）が考えられ、光による反応以外に、放射線による水、硝酸、抽出剤の分解が生じるため反応機構は複雑なものとなる。従って、再処理などへの光化学法の適用の際、個々の元素の光化学データがそのまま使えることはまれであり、関与する溶質の全てに対して光吸收、酸化還元反応の競合による効果を考慮する必要がある。

再処理に関するアクチニドの主な酸化還元反応は、 $\text{U}(\text{IV}) \longleftrightarrow \text{U}(\text{VI})$, $\text{Pu}(\text{III}) \longleftrightarrow \text{Pu}(\text{IV})$, $\text{Np}(\text{V}) \longleftrightarrow \text{Np}(\text{VI})$, $\text{Np}(\text{IV}) \longleftrightarrow \text{Np}(\text{V})$ などである。これらの反応はいずれも光化学的に可能であり、既に幾つかの光化学プロセスが提案されている。

液相以外にも気相でのレーザー光吸収に基づくイオン化現象を利用した分離方式も検討され始めている。

(ii) レーザーによるアクチニド分離技術の適用予想概念

レーザー光により固有元素を選択的に分離することで、発生する二次廃棄物の発生の低減が可能となる。また、高い分離性能が達成されれば、群分離後の消滅処理の安定化にも繋がり、合理的なTRU処分への可能性が開ける。

(iii) まとめ

レーザーによるアクチニド分離技術について調査、整理した結果を表-35に示す。

(2) 核破碎技術（陽子加速器）

陽子加速器による核破碎技術について調査、整理した結果を表-36に示す。

3.3.4 宇宙処分技術関連

(1) ロケット技術の高度化

ロケット技術の高度化について調査、整理した結果を表-37に示す。

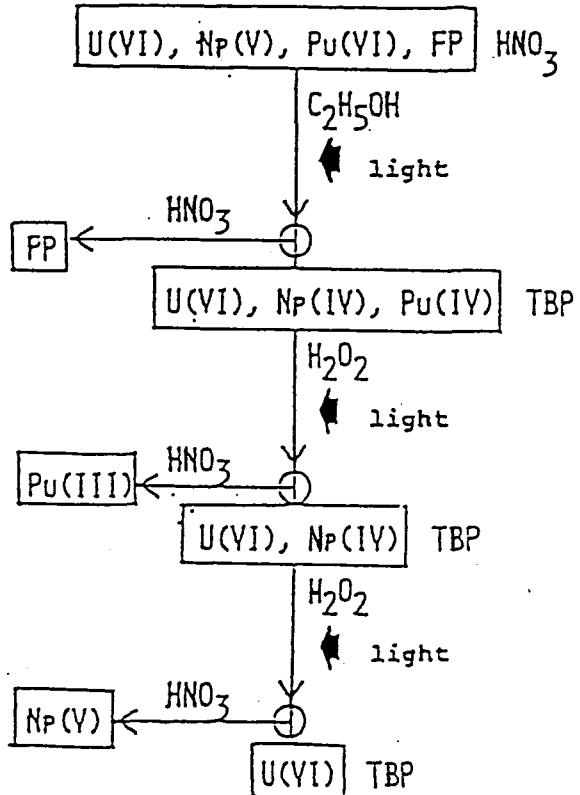
(2) CERMET

CERMETについて調査、整理した結果を表-38に示す。

表-35 代替処理に適用可能な技術の調査¹⁾

(レーザーによるアクチニド分離)

分野	群 分 離
適用技術	レーザーによるアクチニド分離
新技術の現状	<p>再処理プロセスへのレーザー分離技術の適用化研究は米国の大クリッジ国立研究所にて1960～1986年に実施された。対象はU、Pu、Npであり、各種液中の吸収スペクトルと反応量子収量等の研究がなされている。東大でも同様な研究がなされている。</p> <p>他方、近年我が国においても原子炉レーザーウラン濃縮法の研究が電力会社中心に、分子レーザーウラン濃縮法は動力炉・核燃料事業団等で工学規模試験が実施されるまでになっている。</p>
新技術の適用概念	群分離にレーザー分離を適用した研究事例はなく、群分離プロセス自体が基礎研究段階であり、湿式法（抽出とイオン交換が主体）、乾式法の研究が行なわれている。レーザーをアクチニド分離へ適用したのは再処理でのU、Pu及びNpの原子価調整においてであり、レーザーを適用したプロセス検討案は図-63の通りである。
従来技術と新技術との比較	<p>従来技術である抽出、イオン交換では薬品及び反応材が多いために発生する2次放射性廃棄物が多くなるが、レーザーで選択的励起及び分離が可能となれば2次放射性廃棄物が低減できる。</p> <p>また、化学的方法では分離しにくい元素に対し分離の可能性がある。</p>
新技術適用に当たっての課題	<ul style="list-style-type: none"> ① 基礎データ整備（図-64参照） ② 波長可変高出力レーザーの開発 ③ 液相プロセス及び気相プロセスの検討及び実証研究
今後の展望	オメガ計画の一環として1991年から原研にて、①気相レーザー分離の研究、②液中原子価制御の研究が計画されており、基礎的研究が実施される。



Ⓐは溶媒抽出過程を示す。

図-63 Gangwer の提案した光化学再処理スキーム

IA

1 H	2 He
3 Li	4 Be

IIA

5 Na	6 Mg
---------	---------

III A

7 K	8 Ca
9 Rb	10 Sr

IVB

11 Sc	12 Ti
13 V	14 Cr
15 Mn	16 Fe

VB

17 Tc	18 Ru
19 Rh	20 Pd
21 Ag	22 Cd

VIIB

23 Os	24 Ir
25 Pt	26 Au
27 Hg	28 Tl

IIB

29 Fr	30 Ra
31 Ac	32 ?

d. Series of Transition Metals

III A IV A VA VIA VIIA

5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar

IB IIB

31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe

VIII B

55 Cs	56 Ba	57 La	58 Hf	59 Ta	60 W	61 Re	62 Os	63 Ir	64 Pt	65 Au	66 Hg	67 Tl	68 Pb	69 Bi	70 Po	71 At	72 Rn
----------	----------	----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

f Series of Transition Metals

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

■ photoredox observed

光酸化・還元

□ photoredox speculative

図-64 光酸化還元反応の確認された元素

表-36 代替処理処分に適用可能な技術の調査

(核破碎技術(陽子加速器))

分野	消滅処理
適用技術	核破碎技術(陽子加速器)
新技術の現状	<p>1988年に群分離・消滅処理技術開発長期計画の国レベルでの推進することが決定した。その中で陽子加速器によるTRU消滅処理は原研等で研究されることになり、現在、次のテーマについて研究中である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 核破碎過程シミュレーションコードの改良開発及び消滅処理プラント設計研究用コードシステムの開発 ② TRU消滅処理プラントの概念設計・設計研究 ③ 高エネルギー陽子核破碎積分実験 ④ 大強度陽子加速器の開発(目標1.5GeV, 300mA)、図-65,66参照
新技術の適用概念	<p>数GeVの高エネルギー陽子ビームをTRUターゲットに入射させると、主として核破碎生成物を作るカスケード反応を起こす。例えば、使用済核燃料中に生成されるTRUの主成分である²³⁷Npのターゲットを陽子ビームで照射する。生成核種のうち長寿命核種はトリチウム以外は僅かである。計算に基づき核破碎反応だけでTRUを消滅するシステムを検討すると1.5GeV、300mAの陽子加速器による核破碎で、年に約100kgのTRUが消滅処理でき、これは1GWeの軽水炉発電炉より排出されるTRUの約4基分に相当する。</p> <p>図-67に陽子加速器のTRU消滅への適用概念を示す。</p>
従来技術と新技術との比較	<p>世界で現在、稼動中又は計画中の大強度陽子加速器を図-68に示す。原研が考えている工学試験用大強度陽子加速器(ETA)は、陽子エネルギー及び電流値において世界最高のものである。陽子エネルギーレベルはアルゴンヌのASPUNで1.0GeVを超えており、電流が3~4×103μAしかなく、消滅システムに適用させるには大きな技術的革新が必要である。</p>
新技術適用に当たっての課題	<ul style="list-style-type: none"> ① 核データ整備 ② ターゲット中の核反応の評価法の確立 ③ 加速器のビーム強度の増加、連続化 ④ ターゲットの熱的実証試験・材料試験・ターゲットの製造法 ⑤ 消滅処理のエネルギー収支の評価・改善
今後の展望	国レベルのR&Dとして2000年まで基礎的研究及び技術開発用加速器が建設され、工学試験が実施され、2000年にチェック&レビューが行なわれる。

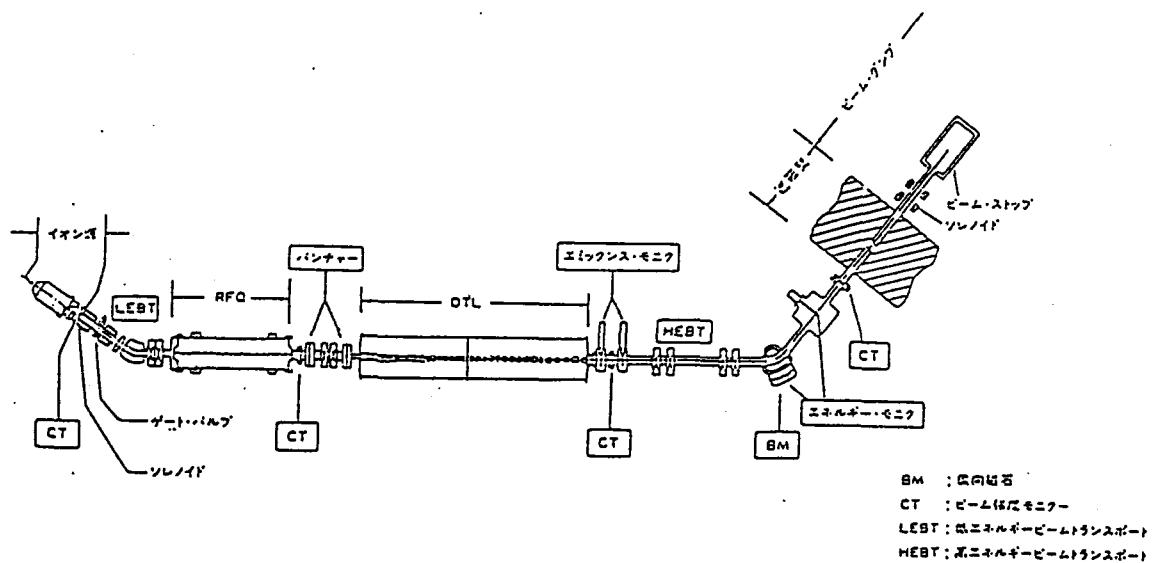


図-65 要素技術開発陽子加速器 (B T A)

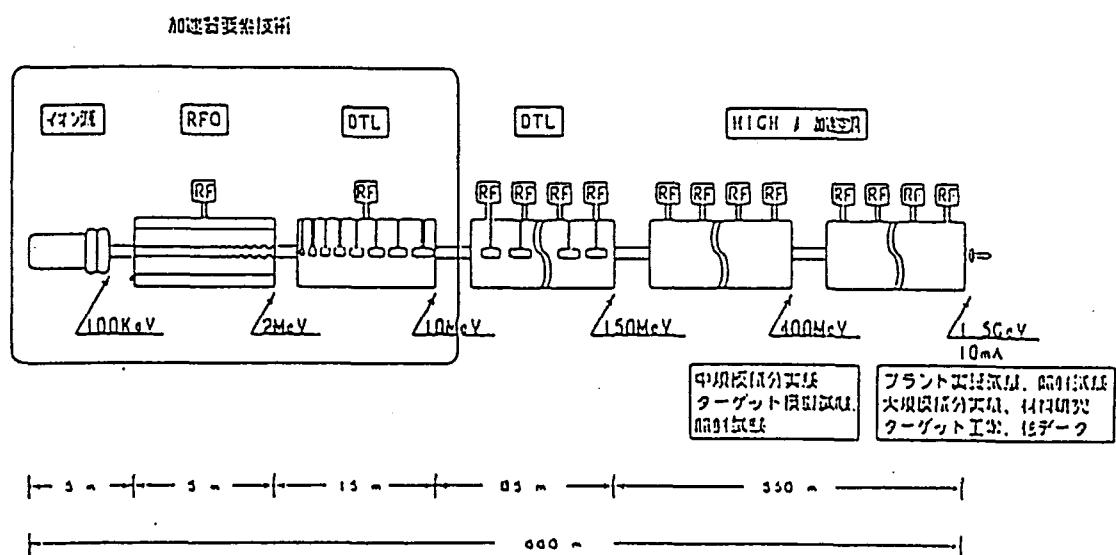


図-66 工学試験用大強度陽子加速器 (E T A) 概念図

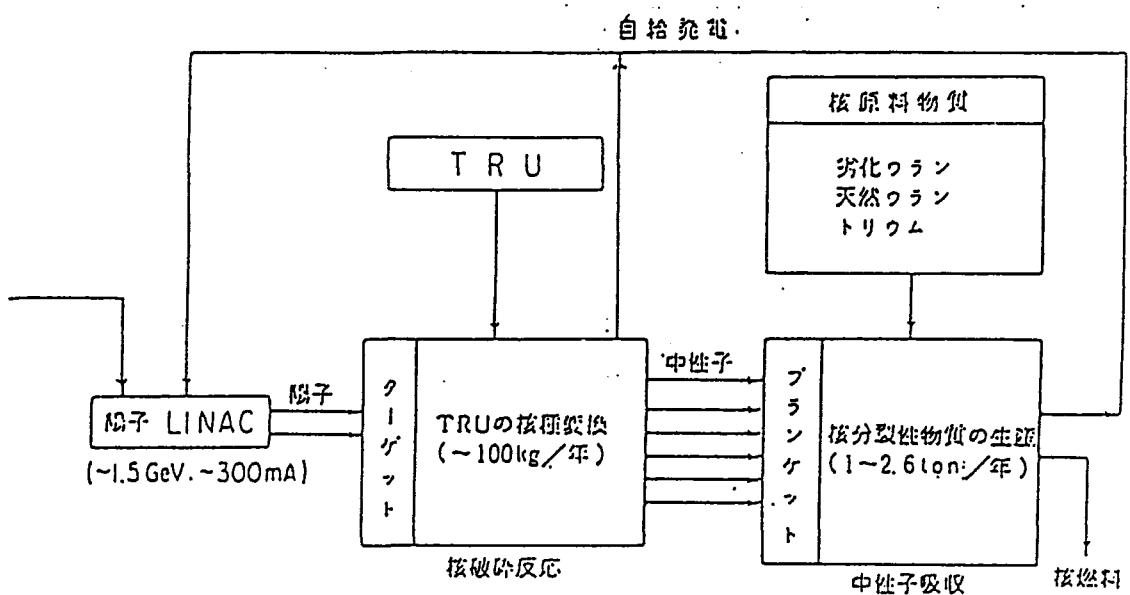


図-67 陽子リニアックを用い核破碎反応によりTRU消滅処理システム

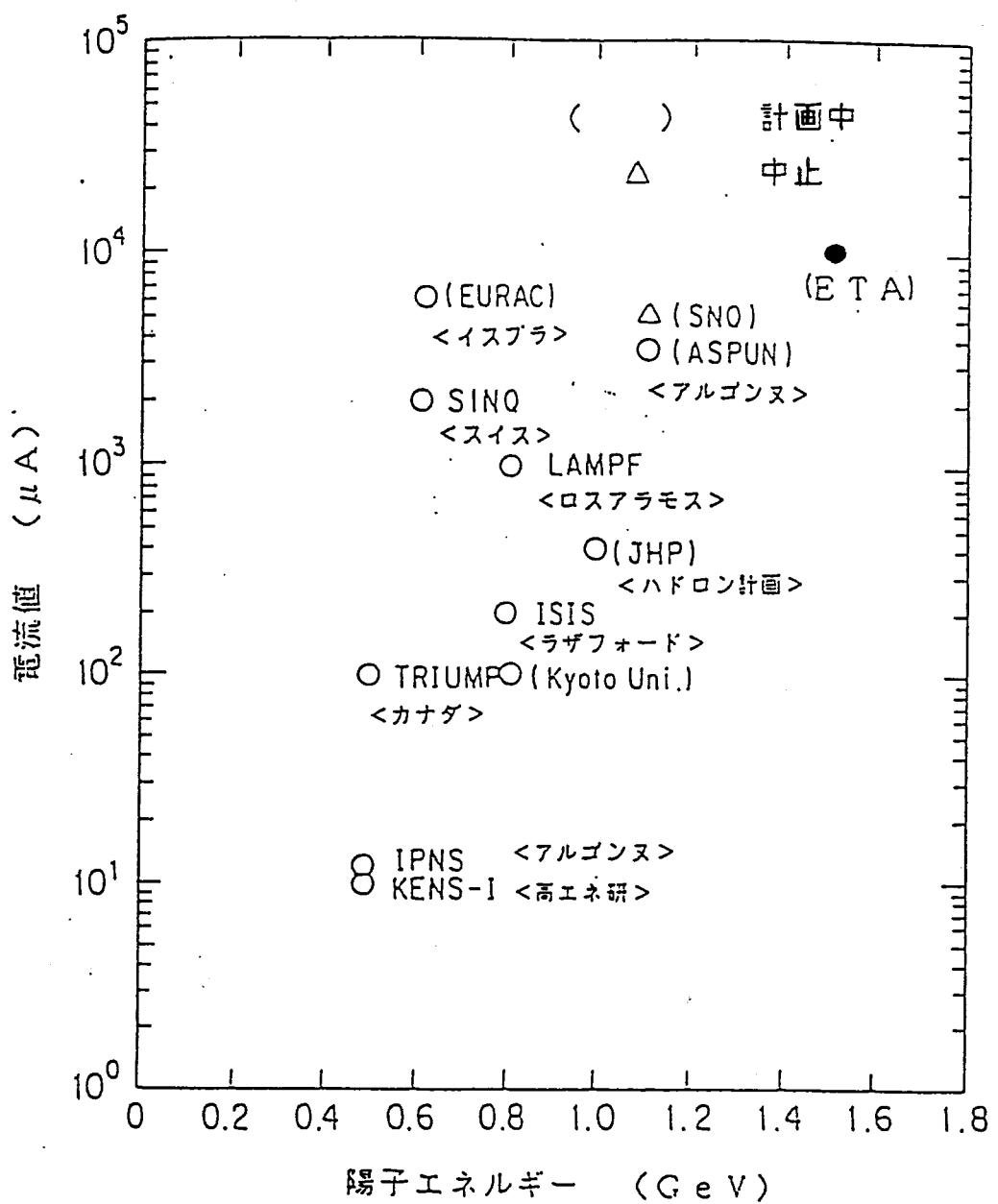


図-68 稼働中または計画中の大強度陽子加速器

表-37 代替処理処分に適用可能な技術の調査^{2), 3), 4)}

(ロケット技術の高度化)

分 野	宇宙処分技術
適用技術	ロケット技術の高度化 ¹⁾
新技術の現状	<p>1981年には、有人部分再使用型宇宙往還機スペースシャトルが初飛行し、さらに20年後の21世紀には、完全再使用型の宇宙航空機が飛行しようとしている。</p> <p>このうち各段階にある世界の部分再使用型宇宙往還機を図-69に示した。我が国でも、科学観測用のMロケット、実用衛星用のN-I、N-II、液酸液水エンジンを装備したH-Iから、現在H-IIロケットへ開発が進展してきた。H-IIロケット打上げ型有翼回収機H O P E (H-II Orbiting Plane) の計画も進行中で、その打上げ手順と帰還誘導着陸までの過程を図-70に示した。</p> <p>アメリカの航空研究開発目標は、極超音速機H S T (Hypersonic Transport) と宇宙往還機T A V (Trans-atmospheric Vehicle) が重点で、図-71のようなN A S P (National Aerospace Plane) の実験機X-30の計画が、発表された。</p>
新技術の適用概念	ロケット技術が高度化され安全性が向上されれば高レベル廃液から群分離したT R U を処分用カプセルに入れこの高度化されたロケットに搭載し、宇宙処分可能な空間、軌道へ放出する。
従来技術と新技術との比較	従来のロケット技術を高度化することにより信頼性が向上（打ち上げの失敗や爆発等の事故の減少）すれば、放射性廃棄物を宇宙へ処分することが可能となる。
新技術適用に当たっての課題	<ul style="list-style-type: none"> ① 安全性、信頼性の確立 ② 新しい推進装置の開発 ③ 高温材料の開発
今後の展望	ロケットは、将来宇宙往還機が中心になると思われるが、その技術的な成否となるのは推進装置の開発でありスクラムジェット等が検討されている。

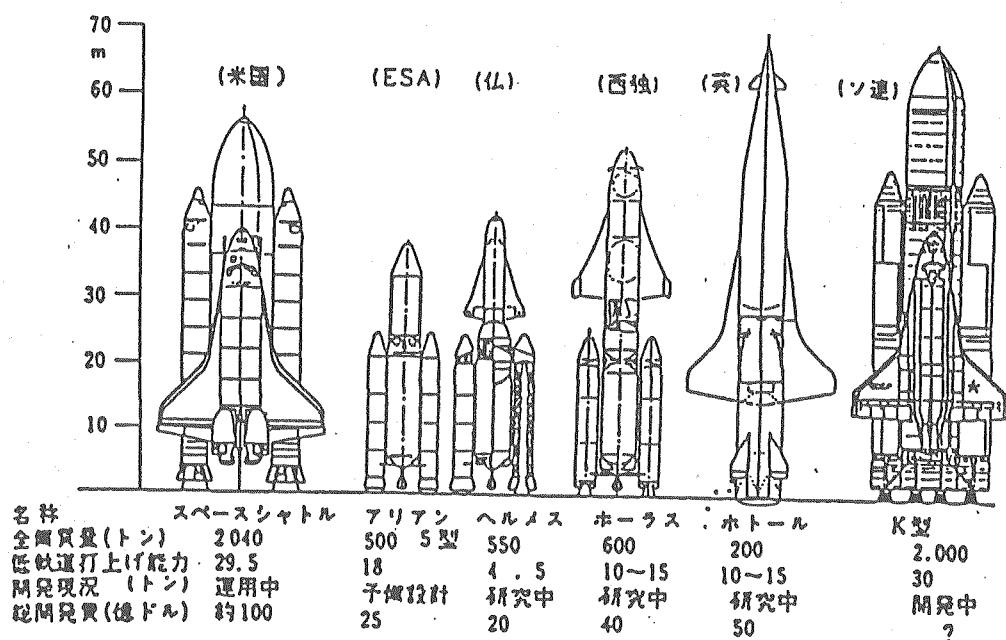


図-69 部分再利用型宇宙往還機

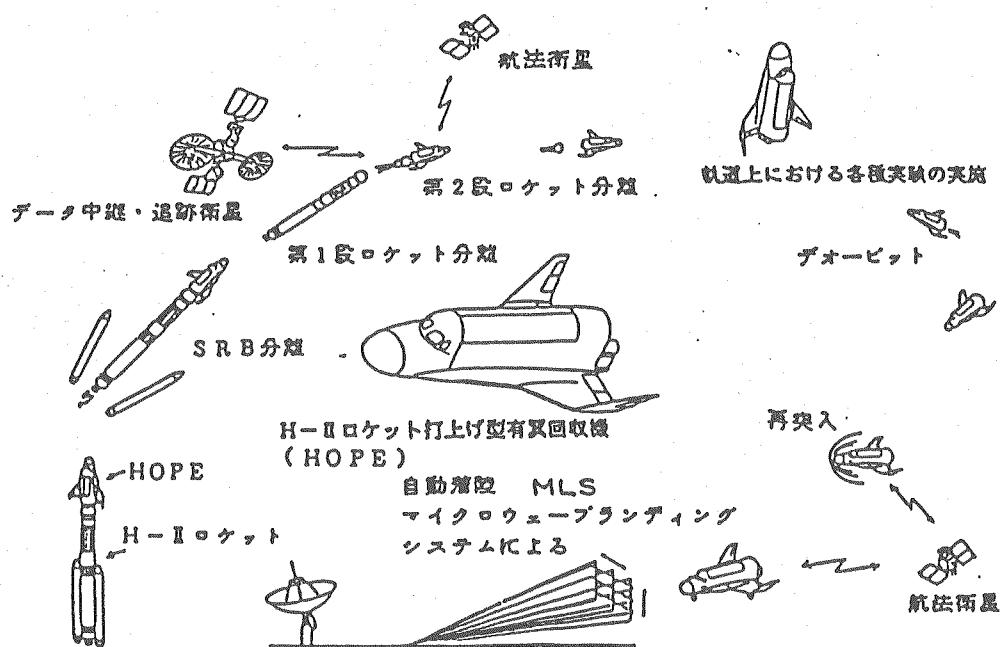


図-70 HOPEの打ち上げと回収

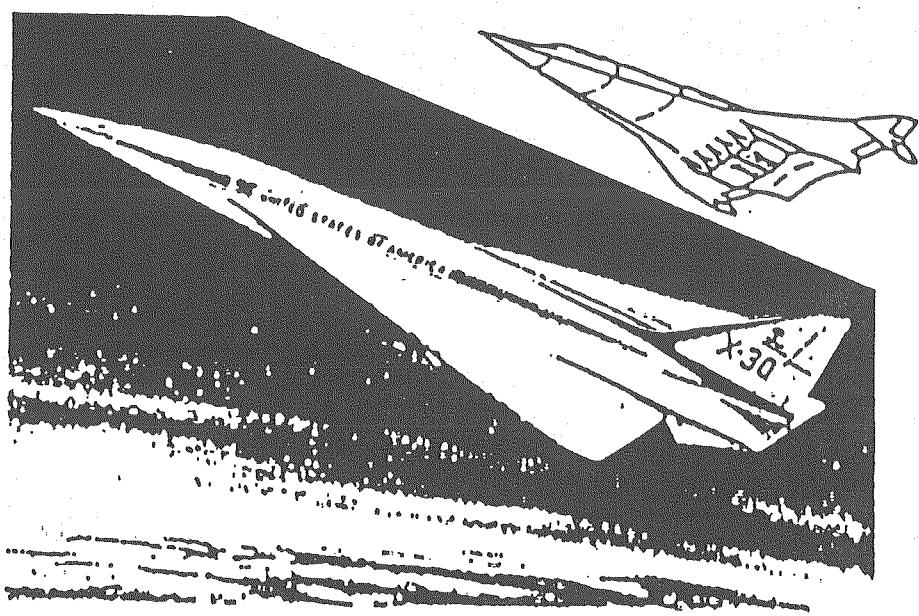


図-71 NASP実験機 X-30

表-38 代替処理処分に適用可能な技術の調査

(C E R M E T)

分 野	宇宙処分技術
適用技術	C E R M E T
新技術の現状	<p>宇宙処分システムとして、米国で宇宙処分する廃棄物の形状等について検討された。その結果、高レベル放射性廃棄物はC E R M E T（セラミック粒子を金属相に分散させたもの）として処分する方針が打ち出された。</p> <p>C E R M E T（鉄合金系）は、オークリッジ国立研究所で開発された固化体で、廃棄物含有率60%程度まですることが可能で、機械強度も大きいことから、宇宙処分は適した固化体といえる。（図-72参照）</p>
新技術の適用概念	<p>C E R M E Tは、宇宙への打ち上げに適したペイロード（弾頭）に加工する。C E R M E Tは、柱状片（直径約6cm×高さ約6cm）に加工後、ステンレススチールのサポートのなかに六角形の配列に積む。</p> <p>これらを厚さ224mmのInconel 625超合金の上下に二分割された球状コンテナーに収容し、縫目を密封溶接する。さらに、その外側をグラファイト及び304ステンレス・スチールの二層タイルでシールドし、廃棄物ペイロードパッケージとする。</p> <p>廃棄物ペイロードの加工プロセスを図-73に、廃棄物ペイロードのパッケージを図-74に示す。</p>
従来技術と 新技術との 比 較	従来技術がない。
新技術適用に 当たっての 課 題	<p>① 酸化し、ぜい化する可能性あり。</p> <p>② 高温強度</p>
今後の展望	現在、一般に切削工具及び耐摩耗材としてタングステンカーボナイト系及びTiC系のC E R M E Tがあるが、上記の処分用とはまったく異なるため、産業のニーズからオーカリッジ国立研究所が開発した以上のものが開発される可能性は少ない。

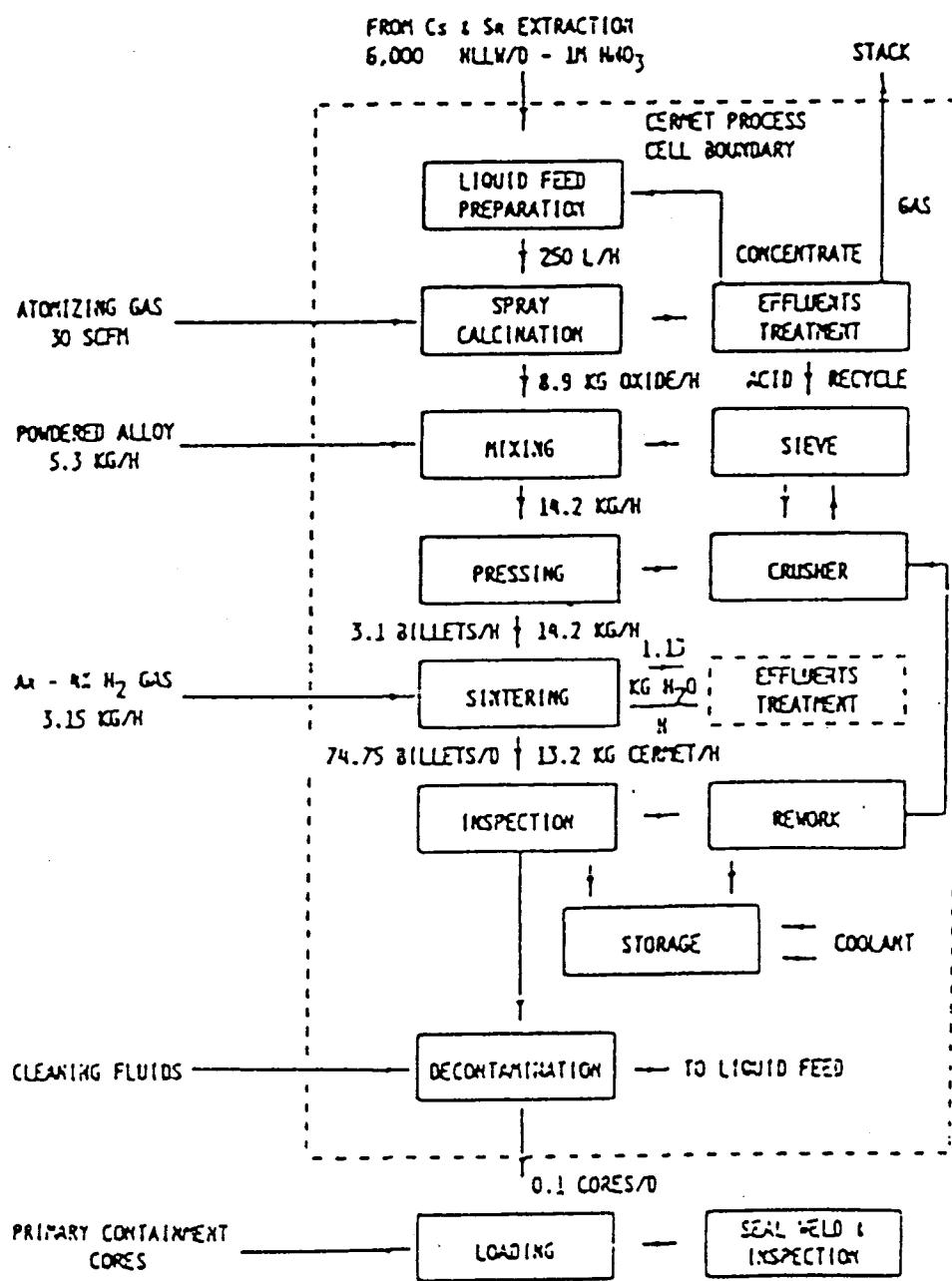


図-72 CERMETの製造プロセス

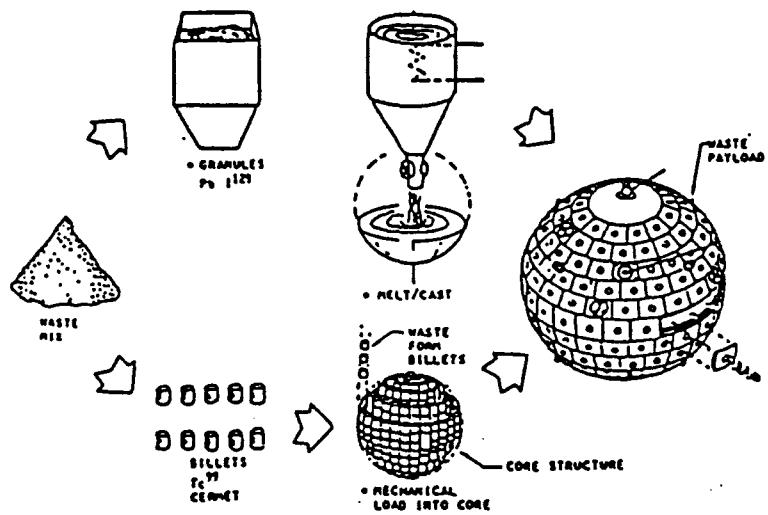


図-73 廃棄物ペイロード加工プロセス

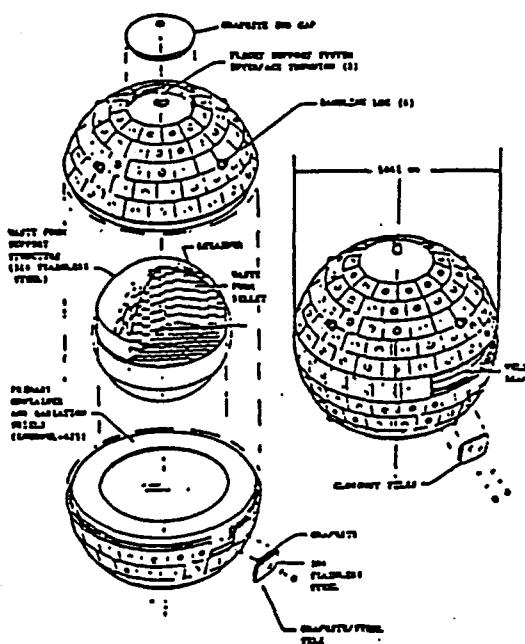


図-74 廃棄物ペイロードのパッケージ

4. 処理処分システム・シナリオに対する高度基盤技術の適用インパクトの検討

3.2, 3.3の適用対象技術についての技術調査により得られた現状及び今後の展望等の結果に基づき、処理処分システム・シナリオに高度基盤技術を適用した場合のインパクトの検討を行い、今後の適用概念を検討する上で対象とすべき高度基盤技術を選択する。

4.1 地層処分システム・シナリオへのインパクト

地層処分に対する適用対象技術と考えられた高度基盤技術を現在考えられている地層分概念に適用することにより、廃棄物管理シナリオ、安全性、処分システムの構成、処分実施の容易さ、経済性等にどの程度のインパクトを与えるかの検討を行う。

各々の適用対象技術について、以下の項目毎に影響の度合いを定性的に評価する。

① 廃棄物管理シナリオ

廃棄物の処分に係る管理シナリオに関して、具体的な管理の考え方、処分実施のスケジュール・方法、サイトの選定、性能評価等にどのような変化をもたらすかを検討する。

② 安全性

処分の安全性を評価するために考慮される項目として、バリアの評価及びシステムの評価について検討する。

③ 処分システムの構成

現在考えられている多重バリアシステムに基づいた地層処分システムが、適用対象技術を用いることにより、どのように変化するかを検討する。

④ 処分実施の容易さ

適用対象技術により、地層処分の実施の可能性が向上するか否かを評価する。

⑤ 経済性

適用対象技術を適用した場合、コストを低減できる可能性の有無につき検討する。

4.1.1 適用対象技術の適用方法の検討

3.1で摘出を行った適用対象技術に関して、地層処分への適用方法について以下に検討を行う。

(1) 高温超伝導体による S Q U I D

S Q U I D (超伝導量子干渉素子, Super-Conducting quantum Interface Device) は、地磁気の変化を詳細にとらえることが可能となるため、サイト選定での調査の 1 つとして岩体の厚さの調査への適用が考えられる。さらに、断層、貫入岩体の形状・方向についても調査できることから、安定した地層を選択することへも適用が考え得る。また、現在量子干渉素子を航空機等に搭載し、空中磁気探査を行い石油等の資源調査を行っていることから、地層処分場サイトを選定する上での要因の 1 つである「資源が存在しないこと」という観点からの調査への適用も考えられる。

(2) ジオトモグラフィー技術

ジオトモグラフィー技術は、数少ないボーリング孔や地表面から電流（比抵抗）、電磁波（レーダー）、弾性波（地震波）等を用いて地下構造を非破壊で調査し、得られたデータを C T の技術を応用して画像化する技術である。地層処分場のサイト選定では、地表調査及びリモートセンシング等によりある程度の候補地を絞り込んだ時点での調査（広域調査の最終段階），並びに候補地域からさらに適切なサイト地点として絞り込んだ時点での調査（精密調査）への適用が考えられる。

広域調査の段階では、地表面からの調査が中心となるものと想定されることから、比抵抗法、地震波を用いた方法の適用が考えられ、これによりある程度の厚み・広さを持った岩体を探し出すことが可能となるものと考えられる。

精密調査の段階では、ボーリング孔を掘削して調査するものと考えられることから、ボーリング孔等に電極、レーダー装置、地震源等を配置し、精度の高い地下情報（地層境界、断層）が得られるものと考えられる。

ジオトモグラフィー技術を応用することにより、精度の高い情報が得られるとともに、処分サイトの調査に要求される母岩をできるだけ擾乱しないという要求も満足されるものとなる。

(3) 中性子探査技術

中性子探査（検層）技術は、地層の間隙率、水分含有量を調査する技術であり、ボーリング孔の周辺の岩についての情報を得ることが可能となる。

地層処分への適用については、精密調査及び深地層での地質・水理調査が想定される。また、処分ピットの周囲の岩の状況を調査することへの応用も考え得る。

(4) 核磁気共鳴探査技術

核磁気共鳴を利用して水分子（水素核）の量を測定できることを応用して、地層中の水分量、透水性、間隙率を測定することが考えられる。また、得られたデータをCT技術を応用して画像化することも考えられる。

本技術の地層処分への適用については、精密調査でのボーリングコアに対する室内試験において、コアを破壊・状態変化させることなく透水性等を試験することが可能となるものと想定される。また、深地層での試験においては、地下の原位置での非破壊により透水試験、間隙率測定等を可能にすることも考え得る。

(5) 超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術

材料の劣化要因及び現象を把握することにより、影響する劣化因子の時間経過を早めて超長期的な劣化挙動を模擬するのが超加速試験である。一方、劣化環境と同様な状態に置かれた天然の物質について、影響を受けた時間を知ることにより対象材料の将来的な劣化状況を推定するのがナチュラルアナログ技術である。

これらの技術は、施設の安全性を評価するための重要なデータと成り得るものであり、容器、構築物の設計、安全評価への適用が考え得る。

(6) フラクタル理論による地質の長期評価技術

広域調査や精密調査により得られた岩盤構造、断層等の情報をもとに、処分サイト内の詳細な構造や、サイト周辺にわたる広い範囲での構造をフラクタル理論を用いてモデル化し、FEM、RBSM等の評価技術を用いて解析することにより、処分場全体での構造、断層を把握することにより現在の岩盤割れ目構造及び将来の予測・評価が可能となる。

地層処分への適用では、処分施設の設計での断層を避けた施設のレイアウト設計、地層評価での岩盤の安定性評価に適用することが考え得る。

(7) ボクセル構造による地質構造の表現

測定や計算により得られた3次元データを視覚化する手法としてボクセル法があり、これを地質構造の把握・視覚化に適用することが考えられる。

地層処分においては、精密探査により得られた種々の地質データをボクセル法を用いて表現することにより、最適なサイト地点を選び出すための情報と成り得る。

(8) レーザーによる掘削技術

レーザーを地下坑道、立坑、処分ピット等の掘削に適用することが考えられる。本方式によると、地層処分での地下水の水みちや核種移行の経路と成り得るゆるみ領域を低減できる可能性があり、安全性の向上を計れるとともに、支保工の低減による経済性の向上、運転時の作業安全場のメリットもあるものと想定される。

(9) バイオセンサー

酵素や微生物の有する機能を応用したバイオセンサーは、低分子の有機物やナトリウムイオン等を検出・測定することができ、これを地下水中の物質の濃度測定に適用することが考えられる。

地層処分への適用としては、定置後の廃棄物から漏洩してくる放射性物質や腐食生成物等の測定、地下水の性状等の把握のモニタリングへの応用が想定される。

(10) イオンセンサー

溶液の電位差により成分濃度を測定できるイオンセンサーは、地下水中の物質の濃度の測定に適用し得るものと考えられる。

地層処分への適用法としては、バイオセンサーと同様に地下環境の状態の把握のためのモニタリングが考え得る。

(11) 光ファイバーセンサー／耐放射線光ファイバー

温度、ひずみ、変位等の物理量、濃度、成分等の化学量、放射線量等の測定が可能な光ファイバーセンサーは、地下環境の多目的な測定に適用することが考えられる。

地層処分では、各種のセンサーを組み込んだ多点形のピックアップとして用いる方法やレーザー蛍光分析法等による地下水中の物質濃度の測定に適用することが考えられ、処分場周辺や廃棄物近傍の状況把握への応用も考え得る。また、光ファイバーは測定データを伝送することにも使用することが考えられ、その場合には各目的に応じたセンサーと変換器を組み合わせたピックアップ部をファイバーの先端部に取り付けたものを処分場内に設置することになる。

このように、光ファイバーを地下環境、廃棄物自体へのモニタリングに使用することが考え得る。

(12) ノードの耐環境性／センサーのネットワークとしてのロバストネス

計測システムを構成する検知・計測部又は他の計測系との接続点であるノードは、電気的又は光学的接合を必要とするが、この部分が地層処分場のような高圧、高温、

放射線等の環境に耐え得るものとすることは計測・モニタリングの高信頼性、耐久性につながる。また、耐環境性を有するノードを実現することによりセンサーのネットワークのロバストネス（高健全性）の向上を計れるものと考えられる。

このような耐環境性、高健全性を持ったノード、ネットワークは、地層処分の運転中のモニタリングに採用した場合、故障が少なく測定の信頼性の高い計測系を実現できるとともに、かなりの時間（健全性の維持が必要な期間）の寿命の確保により処分後の埋戻しが完了した以降での長期間のモニタリングが可能となる。

(13) スマートセンサー技術（故障自己診断機能等）

センサー部の健全性を自己診断できるようなスマートセンサーは、計測データを解析・評価する上での信頼性・確実性を向上させ得るものと考えられる。

地層処分でのモニタリングに多数のセンサーを配置することを考える場合、異常な計測データを示したセンサーが正常に機能しているかどうかを知ることが可能となれば、迅速な対策も立て得るものとなる。また、故障している可能性が高いセンサーからのデータは、解析上無視できることになり、計測自体の信頼度が高まる。このように、処分後での取替やセンサーの健全性のチェック及び校正が不可能なモニタリング系へは、スマートセンサーの適用が主要な意味を持つと想定される。

(14) 超耐食性材料

地下水の pH, E h, 溶存イオン, 温度等のどのような状態下でも、極めて高い耐食性を有する材料を使用することは、地層処分の安全性の向上にとどまらず、多重バリアの考え方、サイトの適性評価、施設の設計等への影響は非常に大きなものと考えられる。

超耐食性材料の地層処分への適用としては、廃棄体パッケージ（キャニスター、オーバーパック）が最も効果の高いものと想定される。

(15) 環境条件を環境維持作用をもつ鉄等の材料の腐食により維持

地下部を閉削して廃棄物を定置、貯蔵、モニタリングを行うことにより、地下には地上からの大量の新鮮な空気が持ち込まれるため、掘削する以前の地下の化学的環境に変化をもたらすことが考えられる。特に、酸素量の増加は、地下水の特性を大きく変えることが想定される。

このような状態で鉄等をオーバーパックとして用いると、材料が腐食するときに酸素を消費することから、埋戻し後の処分場周辺に溶け込んだ酸素を腐食により減らす

ことができるものと想定される。酸素量が低減した環境を維持することにより、調査により得られた地下水の特性での核種・元素の挙動に関するデータの有効性が発揮できるものと考えられる。また、腐食厚が十分であれば、溶存酸素量の十分な低下による腐食の進行も抑えられ、パッケージ自体の健全性を維持できるものと考えられる。

以上の適用方法についての検討結果を表-39に示す。

表-39 地層処分での適用対象技術の適用方法

適用対象技術	ニーズ	シナリオ上の適用箇所	具体的な適用方法・データの使用方法
高温超伝導体による SQUID	人工衛星からの広域的な地質情報	サイト選定 (広域調査)	・岩体の厚さ調査の調査 ・資源が存在しないことの調査
「ドット」ラーフ-技術(比抵抗、電磁波、弾性波)	地質の三次元情報	サイト選定、精密調査 (広域調査、精密調査)	・厚み、広さを持つた岩体の透水性 ・地層境界、断層等の地下構造の入手
中性子探査技術	非破壊の透水性試験方法	サイト選定 (精密調査、深地層での試験)	・地層の開拓率 ・水分含有量
核磁気共鳴探査技術	非破壊の透水性試験方法	サイト選定 (精密調査、深地層での試験)	・ガーリングコアの透水係数、開拓率の測定 ・原位置の非破壊の透水係数、開拓率の測定
超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術	材料の長期評価	解析・評価	・容器、搬送物の超长期の健全性評価 ・設計及び安全評価
フラークタル理論による地質の長期評価技術	三次元構造を表現可能なワイヤ技術	サイト選定、精密調査 (広域調査、解析)	・岩盤の安定性評価
ボクセル構造による地質の長期評価技術	三次元構造を表現可能なワイヤ技術	サイト選定、精密調査 (広域調査、深地層での試験)	・3次元地盤モデルへのデータの取得
レーザーによる掘削技術	クラックの発生が抑えられるボーリング技術	サイト選定 (精密調査、深地層での試験)	・岩盤調査、原位置試験用ボーリング、坑道の掘削
バイオセンサー	環境変化を検出するセンサー	サイト選定 (モニタリング)	・地下水性状等の把握
イオンセンサー	環境変化を検出するセンサー	サイト選定 (モニタリング)	・地下水性状等の把握
光ファイバーセンサー	環境変化を検出するセンサー	サイト選定 (モニタリング)	・温度、ひずみ、変位等の測定
蓄放射線光ファイバー	センサーからのデータ転送技術	サイト選定 (モニタリング)	・成分組成、濃度等の測定 ・放射能自体のモニタリング ・測定データの伝送
ノードの耐環境性	耐環境性のセンサー技術	サイト選定 (深地層での試験)	・無交換モニタリング系の実現
センサーのネットワークとしてのロバストネス	耐環境性のセンサー技術	サイト選定 (深地層での試験)	・無交換モニタリング系の実現
スマートセンサー技術(故障自己診断機能等)	耐環境性のセンサー技術	サイト選定 (モニタリング)	・健全性チェック、校正が不要なモニタリング系の実現
超耐食性材料	耐食性	サイト選定 (設計建設)	・パリア構成の設定の材料
環境条件を環境条件維持作用をもつ供給の材料	耐環境性	サイト選定 (連続)	・パリア構成の設定の健全性評価 ・設計及び安全評価

4.1.2 インパクト分析

地層処分に3.1.3でリストアップを行った適用対象技術をした場合のインパクト分析を行った。各適用対象技術の地層処分への適用インパクトについて次の5項目について分析を行っている。

- ① 廃棄物管理シナリオ
- ② 安全性の評価
- ③ 処分システムの構成
- ④ 処分実施の容易さ
- ⑤ 経済性へのインパクト

各々評価項目毎にどのようなインパクトが想定されるかのインパクトの内容及びその影響の度合を4段階(◎, ○, △, ×)で評価している。4段階評価は、以下の基準に則して行った。

評価段階	評価基準
◎	影響の及ぶ範囲が全体的で、かつ影響度が大きい。
○	影響の及ぶ範囲は部分的であるが、その影響度自体は大きい。
△	影響の範囲は全体的又は部分的であるが、比較的影響度は小さい。
×	影響がまったくないか、もしくは極小さい。

これらの分析項目にしたがってインパクト分析を行った結果を表-40に示す。

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（1／17）

適用対象技術	高温超伝導体による S Q U I D	
ニーズ	人工衛星（航空機）からの広域的な地質情報	
適用技術項目	地質調査	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	・処分地選定のための広域的な情報の収集がより容易になる。	△
安全性の評価	・得られる地質データの増加により安全性の評価・解析が容易になる。	△
システムの構成	インパクトなし	×
処分実施の容易さ	・広域を一様な精度で調査することにより、適正なサイト選定が行える。	△
経済性へのインパクト	・広域調査費用が削減される可能性がある。	△

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（2／17）

適用対象技術	ジオトモグラフィ技術（比抵抗、電磁波、弾性波）	
ニーズ	地層の三次元情報	
適用技術項目	地質調査	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・処分地選定のための詳細な情報の収集がより容易になる。 ・施設の設計・施工に関するデータが容易に得られる 	○
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・地質評価、並びに地下水流动に関するデータが大量かつ詳細に得られる。 	○
システムの構成	インパクトなし	×
処分実施の容易さ	<ul style="list-style-type: none"> ・処分場候補地を精密に調査することにより安全評価等が確実に行える。 ・処分場の地質構造を擾乱させずに得ることが可能となる。 	○
経済性へのインパクト	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング本数が減少する可能性がある。 ・施設の設計・施工に関するデータが容易に得られる 	◎

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（3／17）

適用対象技術	中性子探査技術	
ニーズ	非破壊の透水性試験方法	
適用技術項目	地質調査	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	・地下水理解明上重要なポイント（処分孔）の計測を精密に行うことができる。	△
安全性の評価	・地下水理解明上重要なポイント（処分孔）の計測を精密に行うことができる。	△
システムの構成	インパクトなし	×
処分実施の容易さ	インパクトなし	×
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（4／17）

適用対象技術	核磁気共鳴探査技術	
ニーズ	非破壊の透水性試験方法	
適用技術項目	地質調査	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	・地下水理解明上重要なポイント（処分孔）の計測を精密に行うことができる。	△
安全性の評価	・地下水理解明上重要なポイント（処分孔）の計測を精密に行うことができる。	△
システムの構成	インパクトなし	×
処分実施の容易さ	インパクトなし	×
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（5／17）

適用対象技術	超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術	
ニーズ	材料の長期評価	
適用技術項目	材料試験技術	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	・超長期管理が不要であるというシナリオを確立できる。	◎
安全性の評価	・容器、並びに構造体の超長期の評価が可能となる。	◎
システムの構成	・容器、並びに構造体の寿命を正確に評価することにより、施設・バリア構成を的確に設計できる。	○
処分実施の容易さ	・処分の安全性の論証が容易になる。	○
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（6／17）

適用対象技術	フラクタル理論による地質の長期評価技術	
ニーズ	地質の長期評価	
適用技術項目	データ分析・シミュレーション	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	・地層の長期安定性についての確証を得ることが可能となる。	○
安全性の評価	・地層の安定性、地下水流動に関する長期的な予測が可能となる。	◎
システムの構成	インパクトなし	×
処分実施の容易さ	・処分の安全性の論証が容易になる。	◎
経済性へのインパクト	・地層の安定性に関する長期間にわたる観測・計測を簡素化できる可能性がある。	△

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（7／17）

適用対象技術	ボクセル構造による地質構造の表現	
ニーズ	三次元構造を表現可能なソフトウェアの開発	
適用技術項目	データ分析・可視化	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・広域及び精密データについても容易に表現が可能となる。 	△
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・地質構造を三次元的に明確に表現できる。 ・大量のデータを容易に視覚化することが可能となる 	○
システムの構成	インパクトなし	×
処分実施の容易さ	<ul style="list-style-type: none"> ・地質構造を三次元的に明確に表現できる。 ・大量のデータを容易に視覚化することが可能となる 	○
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（8／17）

適用対象技術	レーザーによる掘削技術	
ニーズ	クラックの発生が抑えられるボーリング技術	
適用技術項目	建設技術・ボーリング	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	インパクトなし	×
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・水みちとなるゆるみ域の低減の可能性がある。 ・掘削の際の地層の乱れが低減される。 ・地下水、核種移行量を低減できる可能性がある。 	◎
システムの構成	インパクトなし	×
処分実施の容易さ	<ul style="list-style-type: none"> ・安全性の高い処分場の建設が可能となる。 	○
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（9／17）

適用対象技術	バイオセンサー	
ニーズ	環境変化を検出するセンサー	
適用技術項目	モニタリング	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	インパクトなし	×
安全性の評価	インパクトなし	×
システムの構成	・モニタリングの対象が拡大し得る。	△
処分実施の容易さ	インパクトなし	×
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（10／17）

適用対象技術	イオンセンサー	
ニーズ	環境変化を検出するセンサー	
適用技術項目	モニタリング	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	インパクトなし	×
安全性の評価	・ 化学的な計測が可能になり材料の置かれている環境に側した材料評価の可能性が高くなる。	△
システムの構成	・ モニタリングの対象が拡大し得る可能性がある。	△
処分実施の容易さ	インパクトなし	×
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（11／17）

適用対象技術	光ファイバセンサー	
ニーズ	環境変化を検出するセンサー	
適用技術項目	モニタリング	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリングが容易、かつ高い信頼性をもって実現できる可能性が高い。 	○
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・閉鎖後の処分環境の的確な把握により、評価上の不確実性を持ったデータを補間して評価を実施することができる。 	○
システムの構成	<ul style="list-style-type: none"> ・新しい高機能センサーシステムを構築し得る可能性が高い。 	○
処分実施の容易さ	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリングが容易、かつ高い信頼性をもって実現できる可能性が高い。 	◎
経済性へのインパクト	<ul style="list-style-type: none"> ・簡素化したモニタリングシステムの構築が可能となる。 	◎

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（12／17）

適用対象技術	耐放射線光ファイバー	
ニーズ	センサーからのデータ転送技術	
適用技術項目	モニタリング	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	・センサーからのデータ転送方法での耐久性、保守インターバルの長期化を期待できる。	△
安全性の評価	・センサーからのデータの信頼性が期待できる。	○
システムの構成	インパクトなし	×
処分実施の容易さ	・モニタリングの信頼性の向上が期待できる。	○
経済性へのインパクト	・耐久性の高いモニタリングシステムの構築が期待できる。	○

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（13／17）

適用対象技術	ノードの耐環境性	
ニーズ	耐環境性のセンサー技術	
適用技術項目	モニタリング	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・センサーからのデータ転送方法での耐久性、保守インターバルの長期化を期待できる。 	△
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・センサーからのデータの信頼性が期待できる。 	○
システムの構成	インパクトなし	×
処分実施の容易さ	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリングの信頼性の向上が期待できる。 	○
経済性へのインパクト	<ul style="list-style-type: none"> ・耐久性の高いモニタリングシステムの構築が期待できる。 	○

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（14／17）

適用対象技術	センサーのネットワークとしてのロバストネス	
ニーズ	耐環境性のセンサー技術	
適用技術項目	モニタリング	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	・センサーからのデータ転送方法での耐久性、保守インターバルの長期化を期待できる。	△
安全性の評価	・センサーからのデータの信頼性が期待できる。	○
システムの構成	インパクトなし	×
処分実施の容易さ	・モニタリングの信頼性の向上が期待できる。	○
経済性へのインパクト	・耐久性の高いモニタリングシステムの構築が期待できる。	○

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（15／17）

適用対象技術	スマートセンサー技術（故障自己診断機能等）	
ニーズ	耐環境性のセンサー技術	
適用技術項目	モニタリング	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	・モニタリングの信頼性が高くなる可能性がある。	○
安全性の評価	・閉鎖後の処分環境の的確な把握により、評価上の不確実性を持ったデータを補間して評価を実施することができる。 ・センサーからのデータの信頼性が期待できる。	○
システムの構成	インパクトなし	×
処分実施の容易さ	・モニタリングの信頼性が高くなる可能性がある。	○
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（16／17）

適用対象技術	超耐食性材料	
ニーズ	耐食性能	
適用技術項目	廃棄体パッケージ	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・サイト選定要件の大幅な緩和が期待できる。 ・設計の簡素化が大きい。 ・処分後の貯蔵及び管理の軽減が期待できる。 ・閉鎖方法の簡素化が期待できる。 	◎
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水移行シナリオでの線量当量の低減が大きい。 ・シナリオ分析の結果が大きく変化する可能性が高い。 ・評価上の不確実性が大幅に減少する可能性が高い。 	◎
システムの構成	<ul style="list-style-type: none"> ・多重バリアの構成要素の大幅な変化が想定される。 ・地層処分自体の採用に変化を与える可能性が高い。 	◎
処分実施の容易さ	<ul style="list-style-type: none"> ・信頼性、安全性の高い処分が実現できる。 	◎
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-40 適用対象技術適用のインパクト（地層処分）（17／17）

適用対象技術	環境条件を環境維持作用をもつ鉄等の腐食厚により保持	
ニーズ	耐環境性	
適用技術項目	廃棄体パッケージ	
評価項目	インパクト内容	評価
廃棄物管理シナリオ	・ 設計上でのバリア機能の強化が期待できる。	◎
安全性の評価	・ バリア性能の強化が期待できる。	○
システムの構成	・ 使用材料の変化による多重バリア構成の変化が想定される。	◎
処分実施の容易さ	・ 安全性の高い処分の実施が可能となる。	○
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

4.1.3 インパクトの整理

適用対象技術を地層処分へ適用した場合に廃棄物管理シナリオ、処分システムの構成等へのインパクトを表-40の結果に基づいて整理したものを表-41に示す。以下に、各々のインパクト検討項目毎に影響が大きいと考えられた項目を示す。

(1) 廃棄物管理シナリオ

- ① 超加速試験・ナチュラルアナログ技術
- ② 超耐食性材料
- ③ 環境条件を環境維持機能をもつ鉄等の材料の腐食厚により保持

(2) 安全性の評価

- ① 超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術
- ② フラクタル理論による地質の長期評価技術
- ③ レーザーによる掘削技術
- ④ 超耐食性材料

(3) 処分システムの構成

- ① 超耐食性材料
- ② 環境条件を環境維持機能をもつ鉄等の材料の腐食厚により保持

(4) 処分実施の容易さ

- ① フラクタル理論による地質の長期評価技術
- ② 光ファイバーセンサー
- ③ 超耐食性材料

(5) 経済性へのインパクト

- ① ジオトモグラフィー技術
- ② 光ファイバーセンサー

(6) まとめ

以上の5項目についての適用インパクトの結果からは、材料に関する試験・評価に関連した技術として、超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術が、材料それ自体として耐食性材料等がインパクトの大きいものとして挙げられる。

また、地質についての長期評価のためのフラクタル理論に関しても安全性等の観点からはウェイトが大きいものとなった。

モニタリングに関しては、光ファイバーセンサーが処分の実施上での容易化に寄与す

るものとして挙げられる。

いずれの技術も、高レベル放射性廃棄物の含有核種が長寿命のものが多いことから長期にわたる性能維持、機能維持及び評価可能性を要求しており、この点を見据えてブレーカスルーを見出すことが重要なものと考えられる。

表-41 地層処分への適用対象技術の適用のインパクト

	廃棄物管理シナリオ	安全性の評価	処分システムの構成	処分実施の容易さ	経済性へのインパクト
高温超伝導体によるS QUID	処分予定地選定の容易化 △	評価・解析の容易化 △	インパクトなし ×	サイト選定の広域調査の容易化 △	調査費用の削減 △
ジオトモグラフィー技術	処分予定地選定の容易化及び施設設計・施工の容易化 ○	評価データの増加 ○	インパクトなし ×	安全評価の確実度の向上及び調査時の地質への影響の低減 ○	処分予定地の選定での向上が大きい。処分施設開発での向上が期待できる。 ●
中性子探査技術	重要ポイント計測の精密化 △	重要ポイント計測の精密化 △	インパクトなし ×	インパクトなし ×	インパクトなし ×
核磁気共鳴探査技術	重要ポイント計測の精密化 △	重要ポイント計測の精密化 △	インパクトなし ×	インパクトなし ×	インパクトなし ×
超加速試験・ナチュラルアナログ技術	超長期管理が不要となるシナリオの確立 ●	容器等の超長期評価が可能 ●	設計の的確化 ○	安全性論証の容易化 ○	インパクトなし ×
フラクタル理論による地質の長期評価技術	長期安定性の確認の取得 ○	地層の長期予測が可能 ●	インパクトなし ×	安全性論証の容易化 ●	観測・計測の簡素化 △
ポクセル構造による地質構造表現	地質状況の表現の容易化 △	三次元的表現及び視覚化が可能 ○	インパクトなし ×	三次元的表現及び視覚化が可能 ○	インパクトなし ×
レーザーによる掘削技術	インパクトなし。 ×	地下水及び核種移行量の低減化 ●	インパクトなし ×	安全性の向上 ○	インパクトなし ×
バイオセンサー	インパクトなし ×	インパクトなし ×	モニタリングの拡大 △	インパクトなし ×	インパクトなし ×
イオンセンサー	インパクトなし ×	化学的な計測が可能 ×	モニタリングの拡大 △	インパクトなし ×	インパクトなし ×
光ファイバーセンサー	モニタリングの容易化及び高信頼化 ○	不確実性の低減 ○	高機能センサーシステムの構築 ○	モニタリングの容易化及び高信頼化 ●	モニタリングシステムの簡素化 ●
耐放射線光ファイバー	データ転送方法での耐久性向上 △	データの信頼性の向上 ○	インパクトなし ×	モニタリングの信頼性の向上 ○	モニタリングシステムの耐久性向上 ○
ノードの耐環境性	データ転送方法での耐久性向上 △	データの信頼性の向上 ○	インパクトなし ×	モニタリングの信頼性の向上 ○	モニタリングシステムの耐久性向上 ○
センサーのネットワークとしてのロバストネ	データ転送方法での耐久性向上 △	データの信頼性の向上 ○	インパクトなし ×	モニタリングの信頼性の向上 ○	モニタリングシステムの耐久性向上 ○
スマートセンサー技術	モニタリングの高信頼化 ○	不確実性の低減及びデータの信頼性の向上 ○	インパクトなし。 ×	モニタリングの信頼性の向上 ○	インパクトなし ×
超耐食性材料	サイト選定要件の緩和、設計の簡素化、管理の軽減及び開鋤方法の簡素化 ●	総量当量の低減及び不確実性の低減 ●	バリアの構成要素の変化 ●	信頼性及び安全性の向上 ●	インパクトなし ×
環境条件を環境維持機能をもつ鉄等の材料の腐食厚により保持	バリア機能の強化	バリア性能の強化 ○	バリア構成の変化 ●	安全性の向上 ○	インパクトなし ×

4.2 代替処理処分システム・シナリオへのインパクト

代替処理処分に適用対象技術を適用したことにより、代替処理処分の実現性、廃棄物管理シナリオ、安全性、経済性等にどの程度のインパクトを与えるかの検討を行う。

各々の適用対象技術について、以下の項目毎影響の度合を定性的に評価する。

① 代替処理処分の実現性

適用対象技術が実現されることにより、代替処理処分のネックとなっていた事項が解決されるなど、その実現性についてどの程度変化を与えるか検討する。

② 廃棄物管理シナリオ

代替処理処分を現在の地層処分に代わる処分方法として採用した場合、従来の廃棄物管理シナリオにどのような変化を与えるかを評価する。

③ 安全性の評価

適用対象技術が適用されることにより、代替処理処分の安全性がどの程度向上するかを検討する。

④ システムの構成

適用対象技術を適用した場合、従来考えられていた代替処理処分を構成していたシステムにどのような変化を与えるか評価する。

⑤ 経済性へのインパクト

適用対象技術により代替処理処分の経済性が向上する可能性の有無を検討する。

4.2.1 適用対象技術の適用方法の検討

3.1で摘出を行った適用対象技術の代替処理処分への適用方法について検討を行った。

(1) 超深孔処分

(i) 大口径超深部掘削技術

超深孔処分は、直径約50cm、深さ約10,000mの立坑に廃棄物を多段積みする方法であり、この程度のボーリング孔を掘ることが可能となること自体が、本方式の成立性の重要なポイントとなっている。

(ii) 耐熱性、耐圧性のセンサー

本方式では10,000m級のボーリング孔を用いるため、その温度は 200～300°C、掘削中に泥水が用いられれば、圧力は1,000atm程度までになることが考えられるため、ボーリング孔に対する各種の計測にはこのような環境に耐え得るようなセンサ

ーが必要となる。

このようなセンサーは、処分孔の掘削時の各種物理的特性の把握、掘削岩の亀裂、ゆるみの状態の観測等に用いられる他、ボーリング孔にケーシングを設置した後は定置したパッケージやスペーサの状態をモニタリングすることに適用されるものと考えられる。

(iii) 環境条件を環境維持作用を持つ鉄等の材料の腐食厚により保持

地下部を掘削するときには、地上から大量の泥水や空気が地下に運び込まれることとなり、定置される廃棄物は初期の地下環境とは異なる状態の中に置かれるものと想定される。

この場合、地層処分と同様に廃棄物パッケージに鉄等の材料を用いれば、特に酸素の溶存量に関しては低減させることが可能と考え得る。また、ケーシング、スペーサの材料についても同様なことが言える。

(iv) 超耐食性材料

温度が 200~300°Cに達する地下環境においてもきわめて高い耐食性を持った材料を用いることは、超深孔処分についても安全性等への寄与は大きい。

超耐食性材料の適用方法としては、廃棄体パッケージが有効と考えられるが、ケーシングに用いた場合は、それ自体がパッケージに対するオーバーパックと見なせる可能性がある。

(2) 岩石溶融処分－耐熱性、耐圧性のセンサー

岩石溶融処分は、高レベル廃液自体が持つ熱を利用して地下 2,000m程度に掘削したキャビティ中に廃液を注入し、周辺の岩石を溶融し、その後冷却に従ってマトリックス内に核種が閉じ込められることを利用した方法である。

この方法は原理自体の確証に相当の努力が必要と考えられる他、期待したような溶融、地下水の浸入バリア（ヒートバリア効果）が予想通りであるかを確認するための耐熱性、耐圧性を持ったセンサーの開発が重要となる。

これらのセンサー技術を用いて、岩石の溶融状態、地質の亀裂の発生、冷却時の体積減少によるクラックの発生状況をモニタリングすることが想定される。

(3) 島内処分－ジオトモグラフィー技術

島内処分は、島特有の地下水理条件（真水レンズの形成とその中の水の循環、深部での塩地下水が安定して存在している）を補助的に応用した地層処分の一変形と考

えることができる。

従って、応用している技術のほとんどは地層処分と同様であるが、地下水理が重要なポイントとなっていることから、地下の状態、地層構造を的確に把握しておくことが非常に重要である。

島内処分でのジオトモグラフィーの応用としては、サイトとしての島を選定するための広域調査、精密調査において、地下水理、構造を調査することが考えられる。また、処分場を建設したことによる地下水理の変化をとらえるための、建設、運転、処分後でのモニタリングへの適用も想定される。

(4) 氷床処分－ジオトモグラフィー技術

氷床処分では、基本的に氷そのものの挙動が重要であると考えられるため、対象としている氷床の構造、安定性、移動性を十分調査する必要がある。

そのために、処分地点を的確に選定し、将来の状態を予測できるよう、精密調査の段階でのジオトモグラフィー技術の適用が考えられる。また、氷床表面に置いたキャニスターの熱と自重により深部に降下させていく概念を考えた場合は、降下中のキャニスターの状態や岩盤に到達したときの状態を把握することに対しても本技術の適用が考えられる。

(5) 井戸注入処分－ジオトモグラフィー技術

井戸注入処分は、上部を透水係数の低い地層で覆われた多孔質、又は割れ目系地層中へ注入する概念と、頁岩層の破碎により生成した間隙中へ注入する2つの概念が考えられているが、いずれも地層自体の特性に依存したことから地質構造の把握は重要なものとなる。

本処分へのジオトモグラフィーの適用は、サイト選定のための広域調査、精密調査に対するものが考えられ、上記のような地質構造を持ったサイトを選定することへの有効性が高いものと考えられる。

(6) 海洋底下処分－海底作業用の掘削技術

現在の海洋底下処分は、ペネトレータ方式及びドリル方式の2方式が考えられるが、後者には掘削船からの海底作業を行う方式や海底に定置した掘削リグからの掘削等の方式が検討されている。ドリル方式での海底の掘削や処分孔のケーシング等の作業には海底を自走して作業を行う深海用ロボット等の適用が考えられる。このような技術を適用するにはいずれも相応の技術開発が必要である。

(7) 群分離－レーザーによるアクチニド分離

現在の液－液接触を中心とした群分離では、アクチニドの分離について 100%の抽出を期待することは困難であるとともに、原子価や酸濃度の調整のために添加した試薬や使用済みの溶媒が二次廃棄物として発生してくるという問題点がある。

アクチニドの分離にレーザーを適用する方法としては、ウラン濃縮で考えられているような分離自体に適用する方法、並びにアクチニドの原子価調整に利用することが考えられ、前者によると廃溶媒や試薬が二次廃棄物として発生してくることがなくなるとともに、アクチニドの完全分離の可能性もある。また、後者の場合では、試薬の添加が不要となり二次廃棄物の発生量の低減も考え得る。

(8) 消滅処理－反応核変換技術、核破碎技術

群分離により分離したアクチニド、F P等の消滅には、原子炉、専焼炉での燃焼が考えられているが、完全な消滅が期待できない場合があること、燃料の取扱が難しくなること、燃焼後には再処理が必要になり廃棄物の発生が必然的であることなど多くの問題が含まれている。

消滅処理に対して加速器を用いた核破碎技術等の適用が可能となれば、完全な消滅を行うことも考えられ、処理後の複雑な廃棄物処理の必要性もなくなることが期待できる。

(9) 宇宙処分

(i) CERMET

宇宙処分では、処分の対象を I, Tc, アクチニド等のみとした場合、量が少ないことにより打ち上げコストが多少高い場合でも成り立つ方式と考えられる。さらに、費用の低減をはかるため打ち上げ回数を低減することも考えられ、そのために廃棄物の含有量をできるだけ多くし得る固化媒質が要求され、CERMET（廃棄物を30wt%程度含有することが可能）が開発されている。また、CERMETは、機械的強度が高く、本概念に適した固化体であると考えられる。

(ii) ロケット技術の高度化／EMMD

宇宙処分の安全性で最も重要なのは、打ち上げの信頼性の向上である。また経済性を追求するために、一回あたりの打ち上げ重量の増加と打ち上げ装置・機器の再使用化を計ることが考えられる。

このような点を満足する技術として、再使用型のロケットやスクラムジェットの

推進装置への適用が考えられる。また、EMMDは、打ち上げに必要な速度をレールガンの技術を応用して得るものであり、打ち上げ装置自体は地球上に設置されたものを何度も使用できること、廃棄物として打ち上げられる部分は必要最小限の機器以外に推進装置を持たせる必要がなく、非常に経済性及び安全性の高いものとなる可能性がある。

以上の適用方法の検討結果を表-42に示す。

表-42 代替処理処分での適用対象技術の適用方法

	適用対象技術	ニーズ	シリオ上の適用箇所	具体的な適用方法・データの使用方法
超深孔処分	大口径超深部掘削技術 掘削技術	建設	・直進約50m、深さ約10,000mの立坑掘削	
	耐熱性(200~300度)、耐圧のセンサー	耐環境性のセンサー技術 モニタリング	・掘削時の亀裂、ゆるみ等の把握 ・バッケージ、スペーサーのモニタリング	
	環境条件を環境条件維持作用をもつ鉄等の材料の腐食性により保持	耐化学環境、構造強度 サイト選定・解析	・パリア構成の設定 ・バッケージの健全性評価 ・設計及び安全性評価のデータ	
超耐食性材料		耐環境性 サイト選定 設計	・パリア構成の設定 ・腐食性バッケージ、ケーシング材料	
岩石溶融処分	耐熱性(200~300度)、耐圧のセンサー	耐環境性のセンサー技術 モニタリング	・岩石の溶融状態モニタリング ・地質の亀裂の発生モニタリング ・クラック発生のモニタリング	
	シートモガラフィー技術(比抵抗、電磁波、弹性波)	地質の三次元情報 サイト選定(広域調査、精密調査) モニタリング	・地下水理、構造の調査 ・地下水理の変化のモニタリング	
島内処分	シートモガラフィー技術(比抵抗、電磁波、弹性波)	地質の三次元情報 サイト選定(広域調査、精密調査) モニタリング	・水床の構造、安定性、移動性の調査 ・降下中キャニスターの状態把握	
水床処分	シートモガラフィー技術(比抵抗、電磁波、弹性波)	地質の三次元情報 サイト選定(広域調査、精密調査) モニタリング		
井戸注入処分	シートモガラフィー技術(比抵抗、電磁波、弹性波)	地質の三次元情報 サイト選定(広域調査、精密調査)		
海洋底下処分	海底作業用の掘削技術	海底での作業機械 建設	・海底ボーリング孔の掘削	
群分離	レーザーによるアクチニド分離	高効率の分離技術 核種分離	・レーザー分離 ・原子炉調整	
消滅処理	反応核変換技術(電子加速器)、核破砕技術 (陽子加速器)	高効率の消滅処理 消滅	・アクチニド、FPの核変換 ・アクチニド、FPの核破砕	
宇宙処分	CERMET	耐熱、耐衝撃、耗量 安全性の向上	運転(廃棄物処理固化) 運転(打上げ)	・Tc、I、アクチニド等の固化 ・安全性の高い打上げ
	ロケット技術の高度化			
	E.M.M.D	安全性の向上 運転(打上げ)		・安全性の高い打上げ

4.2.2 インパクト分析

代替処理処分に3.1.3でリストアップを行った適用対象技術を実際に適用した場合を想定し、そのインパクト分析を行う。各適用対象技術の代替処理処分への適用インパクトについて、下記の5項目について分析を行う。

- ① 代替処理処分の実現性
- ② 廃棄物管理シナリオ
- ③ 安全性の評価
- ④ システムの構成
- ⑤ 経済性へのインパクト

各々の評価項目毎にどのようなインパクトが想定されるかのインパクトの内容及びその影響の度合いを4段階（◎、○、△、×）で評価している。評価基準は4.1.2の地層処分の場合と同様とした。

分析結果は表-43に示す。

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）【超深孔処分】（1／14）

適用対象技術	大口径超深部掘削技術	
ニーズ	掘削技術	
適用技術項目	建設・ボーリング	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	<ul style="list-style-type: none"> ・クリティカル技術の克服により概念が成立する可能性が高い。 	◎
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・想定される処分深度が地層処分の場合と比較して深い位置となることが考えられるため、サイト選定基準が大幅に変更され得る。 ・処分施設の設計、建設、操業の計画への変更が大きい。 	◎
安全性の評価	インパクトなし	×
システムの構成	インパクトなし	×
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）【超深孔処分】（2／14）

適用対象技術	耐熱性（200～300度）、耐圧センサー	
ニーズ	耐環境性のセンサー技術	
適用技術項目	モニタリング	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	・掘削した岩の状況、特性の把握により、安全性、確実性の高い処分の実現が期待できる。	○
廃棄物管理シナリオ	・想定される処分深度が地層処分の場合と比較して深い位置となることが考えられるため、サイト選定基準が大幅に変更され得る。 ・処分施設の設計、建設、操業の計画の変更が大きい	◎
安全性の評価	・原位置でのデータの収集により、評価の不確実性の低減が期待できる。 ・地質評価、並びに地下水流动に関するデータが大量かつ詳細に得られる。	△
システムの構成	・モニタリングの機能を付加、または強化することが可能となる。	△
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）〔超深孔処分〕（3／14）

適用対象技術	環境条件を環境維持作用をもつ鉄等の材料の腐食厚により保持	
ニーズ	耐化学環境、構造強度	
適用技術項目	廃棄体パッケージ	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	<ul style="list-style-type: none"> ・安全性の高い処分の実現が可能となる。 	○
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・想定される処分深度が地層処分の場合と比較して深い位置となることが考えられるため、サイト選定基準が大幅に変更され得る。 ・処分施設の設計、建設、操業の計画への変更が大きい。 	◎
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体、並びに周辺環境のバリアの性能の強化が期待できる。 	○
システムの構成	インパクトなし	×
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）【超深孔処分】（4／14）

適用対象技術	超耐食性材料	
ニーズ	耐環境性	
適用技術項目	廃棄体パッケージ	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	<ul style="list-style-type: none"> ・安全性の高い処分の実現が可能となる。 	○
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・想定される処分深度が地層処分の場合と比較して深い位置となることが考えられるため、サイト選定基準が大幅に変更され得る。 ・処分施設の設計、建設、操業の計画への変更が大きい。 	◎
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・線量当量の低減が大きい。 ・評価上の不確実性が大幅に減少する可能性が高い。 	◎
システムの構成	<ul style="list-style-type: none"> ・バリアの構成要素の変化が想定される。 	△
経済性へのインパクト	<ul style="list-style-type: none"> ・概念の簡素化が期待できる。 	△

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）【岩石溶融処分】（5／14）

適用対象技術	耐熱性（200～300度）、耐圧センサー	
ニーズ	耐環境性のセンサー技術	
適用技術項目	モニタリング	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	・溶融した岩の状況、特性の把握により、安全性、確実性の高い処分の実現が期待できる。	○
廃棄物管理シナリオ	・概念上廃棄物を固化体にする必要性がない。 ・想定される処分岩種が地層処分の場合と異なることが考えられるためサイト選定基準が変更され得る。 ・処分施設の設計、建設、操業の計画への変更が大きい。	△
安全性の評価	・溶融岩の状況、地下水挙動に関するデータが詳細に得られる。	○
システムの構成	インパクトなし	×
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）【島内処分】（6／14）

適用対象技術	ジオトモグラフィー技術（比抵抗、電磁波、地震波）	
ニーズ	地質の三次元情報	
適用技術項目	地質調査	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	<ul style="list-style-type: none"> ・地下構造、真水レンズ等の水理状況を的確に把握できる可能性がある。 ・地下環境を擾乱させずに詳細な情報を得ることが可能となる。 	○
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・サイト選定対象地域、基準等の大幅な変更となる。 ・施設の設計、建設、操業での地下水に対する考慮が重要な位置づけを持ってくる。 	◎
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・地質評価、並びに地下水流动に関するデータが大量かつ詳細に得られる。 	○
システムの構成	<ul style="list-style-type: none"> ・インパクトなし 	×
経済性へのインパクト	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング本数が減少する可能性がある。 	○

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）〔氷床処分〕（7／14）

適用対象技術	ジオトモグラフィー技術（比抵抗、電磁波、地震波）	
ニーズ	地質の三次元情報	
適用技術項目	地質調査	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	インパクトなし	×
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・サイト選定基準、方法が大きく異なる。 ・調査、試験項目及び方法が大きく異なる。 ・中間貯蔵が不要となると考えられる。 ・処分施設の設計、建設、操業の計画の変更が大きい 	◎
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・氷床に関するデータの増加により氷床の安定性に関する評価・解析が容易になる。 	△
システムの構成	インパクトなし	×
経済性へのインパクト	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング本数が減少する可能性がある。 	○

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）【井戸注入処分】（8／14）

適用対象技術	ジオトモグラフィー技術（比抵抗、電磁波、地震波）	
ニーズ	地質の三次元情報	
適用技術項目	地質調査	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	<ul style="list-style-type: none"> ・地下構造、水理状況を的確に把握できる可能性がある。 ・地下環境を擾乱させずに詳細な情報を得ることが可能となる。 	○
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・概念上廃棄物を固化体にする必要性がない。 ・想定される処分岩種が地層処分の場合と異なることが考えられるためサイト選定基準が変更され得る。 ・処分施設の設計、建設、操業の計画への変更が大きい。 	△
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・地質構造、岩の状況に関する情報を大量かつ詳細に得ることが可能となる。 	◎
システムの構成	インパクトなし	×
経済性へのインパクト	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング本数が減少する可能性がある。 	○

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）【海洋底下処分】（9／14）

適用対象技術	海底作業用の掘削技術	
ニーズ	海底での作業機械	
適用技術項目	建設・ボーリング	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	<ul style="list-style-type: none"> ・船上からの掘削に比べて位置精度、掘削精度、施工状況の把握が容易となる。 (ペネトレータ方式の方が実現性という観点からは優れた方法と考えられる) 	△
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・サイトを海底に求めることにより、選定方法（国際協力）、対象地域がまったく異なる。 ・処分施設の設計、建設、運転等は地層処分と大きく異なる。 	◎
安全性の評価	インパクトなし	×
システムの構成	インパクトなし	×
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分） [群分離] (10/14)

適用対象技術	レーザーによるアクチニド分離	
ニーズ	高効率の分離技術	
適用技術項目	分離（原子価調整、レーザー分離、製品精製）	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	<ul style="list-style-type: none"> ・群分離の効率性の向上、二次廃棄物の発生量の低減の可能性がある。 ・二次廃棄物（群分離後の高レベル廃液）のα濃度の低減の可能性がある。 	◎
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の発生量が減少する。 ・地層処分の安全性の考え方が大きく変化する可能性がある（TRU核種量の低減）。 ・有用性のある元素の利用の可能性がある。 	◎
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・群分離後の高レベル固化体の処分でのインベントリの減少がある。 ・その他の二次廃棄物のα濃度の低減が期待できる。 	○
システムの構成	<ul style="list-style-type: none"> ・溶媒抽出での試薬の添加が不要となる（原子価調整） ・廃棄物、または製品を気体で取扱う必要がある（レーザー分離、製品精製）。 	△
経済性へのインパクト	<ul style="list-style-type: none"> ・二次廃棄物の発生量、TRU廃棄物の発生量の低減が期待できる。 	○

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）【消滅処理】（11／14）

適用対象技術	反応核変換技術（電子加速器）、核破碎技術（陽子加速器）	
ニーズ	高効率の消滅処理	
適用技術項目	処理	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	・完全な核種の消滅が期待できる。	◎
廃棄物管理シナリオ	・長寿命核種の管理シナリオが大きく変化する。	○
安全性の評価	・消滅対象とした元素が完全に破碎できた場合は非放射性又は短寿命核種として評価が可能となる。 ・発電炉又は専焼炉での消滅に比べて二次的な廃棄物の発生、アクチノイドの高次化を抑えることが可能となる。	◎
システムの構成	・消滅対象物をターゲットとするよう加工する必要がある。 ・専用の消滅処理施設を必要とする。	△
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）【宇宙処分】（12／14）

適用対象技術	C E R M E T	
ニーズ	耐熱、耐衝撃、軽量	
適用技術項目	超耐環境性材料	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 優れた特性を有した廃棄物を作成することが可能となる。 	△
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 処分対象となる廃棄物を制限（量的に）するために群分離を必要とする。 ・ 長寿命核種の管理シナリオが大きく変化する。 	○
安全性の評価	インパクトなし	×
システムの構成	インパクトなし	×
経済性へのインパクト	インパクトなし	×

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）【宇宙処分】（13／14）

適用対象技術	ロケット技術の高度化	
ニーズ	安全性の向上	
適用技術項目	推進システム	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	<ul style="list-style-type: none"> ・打上げの安全性の向上が期待できる。 	○
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・処分対象となる廃棄物を制限（量的に）するために群分離を必要とする。 ・長寿命核種の管理シナリオが大きく変化する。 	○
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・打上げ時の信頼性の向上により概念自体の安全性が高まる。 	△
システムの構成	インパクトなし	✗
経済性へのインパクト	インパクトなし	✗

表-43 適用対象技術適用のインパクト（代替処理処分）〔宇宙処分〕（14／14）

適用対象技術	EMMD	
ニーズ	安全性の向上	
適用技術項目	推進システム	
評価項目	インパクト内容	評価
代替処理処分の実現性	<ul style="list-style-type: none"> ・打上げの安全性の向上が期待できる。 	◎
廃棄物管理シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・処分対象となる廃棄物を制限（量的に）するために群分離を必要とする。 ・長寿命核種の管理シナリオが大きく変化する。 	○
安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・打上げ時の信頼性の向上により概念自体の安全性が高まる。 	△
システムの構成	<ul style="list-style-type: none"> ・打上げに関連した装置をほとんど地上に設置することになる。 ・打上げ対象物には推進機構、燃料を持たせることが不要になる。 	◎
経済性へのインパクト	<ul style="list-style-type: none"> ・打上げ装置の反復利用、再使用が可能となる。 	○

4.2.3 インパクトの整理

適用対象技術を代替処理処分に適用した場合のインパクトを整理した結果を表-44に示す。

代替処理処分の適用対象技術は、以下の2つの性格を持ったものとなっている。

- ・代替処理処分の実現上でのクリティカルな技術としての技術
- ・クリティカルな技術というよりもむしろ安全・確実な実施に向けての技術

前者の例としては、超深孔処分の大口径超深部掘削技術、群分離のレーザー分離等があるのみで、他のものはほとんどが後者に属するものと考えられる。

また、島内処分の場合のように、ほとんどの基本的な技術が地層処分と共通性を持った概念は、上記技術を適用するのみですべての項目に大きく影響するものと評価されている。

表-44 代替処理処分への適用対象技術の適用のインパクト

		処理処分の実現性	廃棄物管理シナリオ	安全性の評価	システムの構成	経済性へのインパクト
超深孔処分	大口径超深部掘削技術 クリティカル技術の克服	○	サイト選定基準の変更及び施設計画の変更	インパクトなし ×	インパクトなし ×	インパクトなし ×
	耐熱性、耐圧性のセンサー	○	安全性・確実性の高い処分の実現	評価の不確実性の低減及び評価データの増加 △	モニタリング機能の強化 △	インパクトなし ×
	環境条件を環境維持作用をもつ鉄等の材料により保持	○	安全性の高い処分の実現	サイト選定基準の変更及び施設計画の変更 ○	バリア性能の強化 ○	インパクトなし ×
	超耐食性材料	○	安全性の高い処分の実現	サイト選定基準の変更及び施設計画の変更 ○	線量等量の低減及び不確実性の低減 ○	バリア構成の変化 △
岩石溶融処分	耐熱性、耐圧性のセンサー	○	安全性・確実性の高い処分の実現	固化処理の不要化、サイト選定基準の変更及び施設計画の変更 △	評価データの増加 ○	インパクトなし ×
島内処分	ジオトモグラフィー技術	○	水理状況の的確な把握及び調査時の地質への影響の低減	サイト選定域・基準の変更及び施設計画の変更 ○	評価データの増加 ○	インパクトなし ×
水床処分	ジオトモグラフィー技術	×	インパクトなし	サイト選定基準の変更、調査項目・方法の変更、施設計画の変更 ○	評価データの増加 △	インパクトなし ×
井戸注入処分	ジオトモグラフィー技術	○	地下構造・水理状況の的確な把握及び調査時の地質への影響の低減	固化処理の不要化、サイト選定基準の変更及び施設計画の変更 △	評価データの増加・詳細化 ○	インパクトなし ×
海洋底下処分	海底作業用の掘削技術	△	施工精度・施工管理の容易化	サイト選定域・基準の変更及び施設計画の変更 ○	インパクトなし ×	インパクトなし ×
群分離	レーザーによるアクチニド分離	○	効率性の向上、廃棄物量の低減及び含有濃度の低減	ガラス固化体の発生量低減及び有用元素の利用 ○	廃棄物含有核種濃度の低減 ○	プロセスの変更 △
消滅処理	反応核変換技術、核破砕技術	○	完全な消滅の実現	長寿命核種管理シナリオの変化 ○	核種の非放射性化・短寿命化及びアクチノイドの高次化の抑制 ○	ターゲット加工及び専用消滅施設が必要 △
宇宙処分	CERMET	△	廃棄物特性の向上	廃棄物量の低減が必要及び長寿命核種管理シナリオの変化 ○	インパクトなし ×	インパクトなし ×
	ロケット技術の高度化	○	打上げの安全性の向上	廃棄物量の低減が必要及び長寿命核種管理シナリオの変化 ○	打上げの信頼性の向上 △	インパクトなし ×
	EMMD	○	打上げの安全性の向上	廃棄物量の低減が必要及び長寿命核種管理シナリオの変化 ○	打上げの信頼性の向上 △	打上げ装置の地上設置及び打上げ対象物の燃料等の不保持 ○

4.3 適用概念の検討で対象とする高度基盤技術の選定

高度基盤技術を組込んだ地層処分、並びに代替処理処分の概念構築に資するため、4.の適用インパクトの結果、さらには研究開発レベル、産業界への波及効果等を踏まえ、適用対象技術の第二次スクリーニングを行う。

4.3.1 研究開発レベルの整理

3.で抽出した適用対象技術の研究開発状況を以下に示すようにレベル分けして整理した。

基礎研究開発段階：実用となるものが開発されておらず、基礎的な研究が進められている段階

応用研究開発段階：実用となるものは開発されているが、実際の普及において適用目的に対して性能上の問題もしくは経済性上の問題があり、技術開発が進められている段階

基礎研究／応用技術開発段階混在：対象とする技術によっては基礎研究段階と応用技術開発段階が混在している段階

整理結果を表-45に示す。

4.3.2 対象技術の産業界への波及効果分析

3.で抽出した適用対象技術の産業への影響を以下に示すようにレベル分けして整理した。

単体では影響はほとんどない：対象技術が処分技術への特殊な要求に対応するような場合であり、この技術開発自体が産業にほとんど影響を与えないレベル

単体では影響は限定的：対象技術が処分技術への要求に対応するといった性格を持つが、この技術自体に幾つかの汎用性があり、限定的ではあるが産業への影響を与えるレベル

現在すでに影響が現れている：処分技術に適応する技術開発の方向性と処分以外の分野における技術開発の方向性が一致しており、すでに産業への影響がでているレベル

表-45 研究開発レベルの整理

処理処分方法	適用対象技術	研究開発レベル		
		ニーズ		
地層処分	高温超伝導体によるSQUID ジエザフライ技術（比抵抗、電磁波、弾性波） 中性子探査技術 核磁気共鳴探査技術 超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術 フラクタル理論による地質の長期評価技術 ボクセル構造による地質構造の表現 レーザーによる掘削技術 バイオセンサー イオンセンサー 光ファイバーセンサー 耐放射線光ファイバー ノードの耐環境性 センサーのネットワークとしてのロバストネス スマートセンサー技術（故障自己診断機能等） 超耐食性材料 環境条件を環境条件維持作用をもつ鉱等の材料の腐食厚により保持 大口径超深部掘削技術 耐熱性（200～300度）、耐圧のセンサー 環境条件を環境条件維持作用をもつ鉱等の材料の腐食厚により保持 超耐食性材料 耐熱性（200～300度）、耐圧のセンサー 岩石溶融処分 島内処分 水床処分 井戸注入処分 海洋底下処分 鉱分離 消滅処理 宇宙処分	応用技術開発段階（医療分野は実用化） 応用技術開発段階（深度100m以内の地層評価で実用化） 応用技術開発段階（局部的測定では実用化） 基礎研究段階（医療分野で実用化） 基礎研究／応用技術開発段階混在 基礎研究／応用技術開発段階混在 基礎研究／応用技術開発段階混在 基礎研究／応用技術開発段階（一般測定では実用化） 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階（一部実用化） 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階 応用技術開発段階	人工衛星からの広域的な地質情報 地質の三次元情報 非破壊の透水性試験方法 非破壊の長期評価 材料の長期評価 三次元構造を表現可能なソリューション技術 三次元構造を表現可能なソリューション技術 ガラスの発生が抑えられるガラス技術 環境変化を検出するセンサー 環境変化を検出するセンサー センサーからのデータ転送技術 耐環境性のセンサー技術 耐環境性のセンサー技術 耐環境性のセンサー技術 耐環境性のセンサー技術 耐食性能 耐環境性 掘削技術 耐環境性のセンサー技術 耐化学会環境、構造強度 耐環境性 耐環境性のセンサー技術 耐環境性のセンサー技術 耐環境性のセンサー技術 地質の三次元情報 地質の三次元情報 地質の三次元情報 海底での作業機械 高効率の分離技術 高効率の消滅処理 耐熱、耐衝撃、難燃 安全性の向上 安全性の向上	人工衛星からの広域的な地質情報 地質の三次元情報 非破壊の透水性試験方法 非破壊の長期評価 三次元構造を表現可能なソリューション技術 三次元構造を表現可能なソリューション技術 ガラスの発生が抑えられるガラス技術 環境変化を検出するセンサー 環境変化を検出するセンサー センサーからのデータ転送技術 耐環境性のセンサー技術 耐環境性のセンサー技術 耐環境性のセンサー技術 耐環境性のセンサー技術 耐食性能 耐環境性 掘削技術 耐環境性のセンサー技術 耐环境性 耐環境性のセンサー技術 耐環境性のセンサー技術 耐環境性のセンサー技術 地質の三次元情報 地質の三次元情報 地質の三次元情報 海底での作業機械 高効率の分離技術 高効率の消滅処理 耐熱、耐衝撃、難燃 安全性の向上 安全性の向上

影響は大きい：技術の汎用性が高く、処分技術開発と産業への応用技術開発の方向が一致し、しかも産業への影響が大きいレベル

影響は極めて大きい：技術の汎用性が高く、処分技術開発と産業への応用技術開発の方向が一致し、しかも産業への影響が極めて大きいレベル

整理結果を表-46に示す。

4.3.3 第2次スクリーニング基準の作成

今後の研究開発対象として選択する基準を考える場合には以下のような視点が必要となるものと考え、これらの3点が高いレベルにあるものを選択することを第2次スクリーニングの基準とした。

- ① 処分技術へのインパクトが極めて大きい
- ② 研究開発段階は基礎的に過ぎず、かつ汎用技術自身の技術開発が必要なレベルにある
- ③ 産業界への影響が大きいこと

評価方法としては、レーダーチャートによる面積比較を採用することとした。

処分技術へのインパクトについては、4.1.3で整理した廃棄物管理シナリオ、安全評価、処分システムの構成、処分実施の容易さ及び経済性へのインパクトとして○、○、△、×の4段階の評価結果をそのまま用いた。研究開発段階については、4.3.1での研究開発レベルで、応用研究開発が進んでいるものを一番高い順位にあるものとし、基礎研究開発段階までの3段階で評価した。また、産業界への影響については、影響の大きい順に5段階で評価しており、この結果を用いる。

以上の手法により作成したチャートを図-75、76に示す。このレーダーチャートの線で囲まれた内側部分の面積に基づいて決定したインパクトの順位を表-47、48に示す。

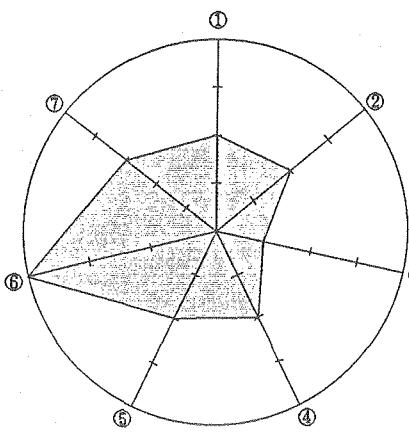
地層処分については、表に示された順位がそのままインパクトの大きい順位として今後の研究開発の重要性につながるものと考えられる。

一方、代替処理処分については、種々の処理処分概念に対応したものとなっており、順位自体の意味付けはそれほど大きいものではない。

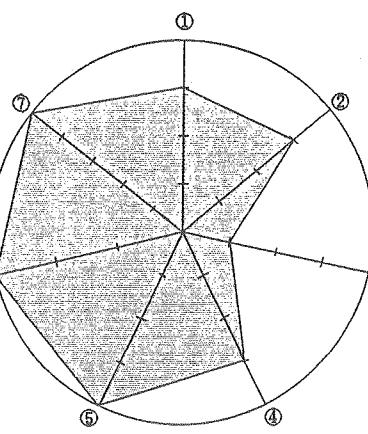
以上のことから、第2次スクリーニングの基準として、地層処分については最大面積（すべての評価点が最高位にあるときに線で囲まれた面積）の1/2以上となった技術を選択することを基本とした。代替処理処分については、概念に対して単独で選ばれている

ものはその技術を選択し、複数が選ばれているときは最大面積の 1/2以上となった技術を選択するものとした。

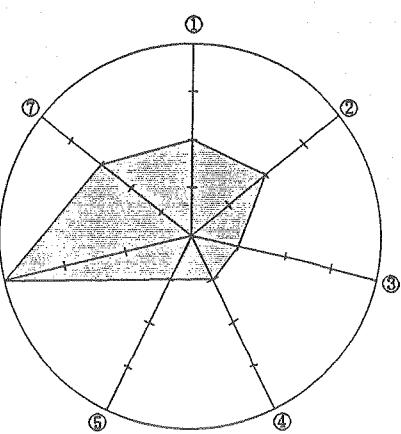
表-46 産業へのインパクトの整理



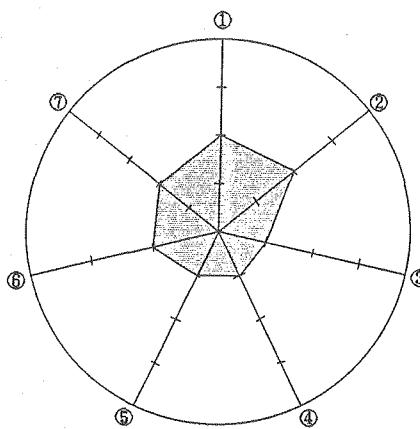
高温超伝導による S Q U I D



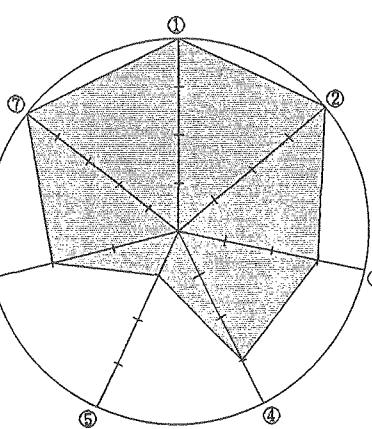
ジオトモグラフィー技術
(比抵抗、電磁波、地震波)



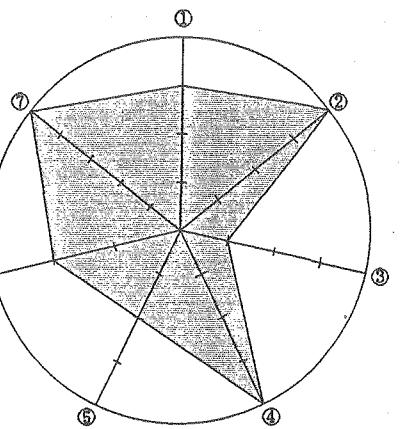
中性子探査技術



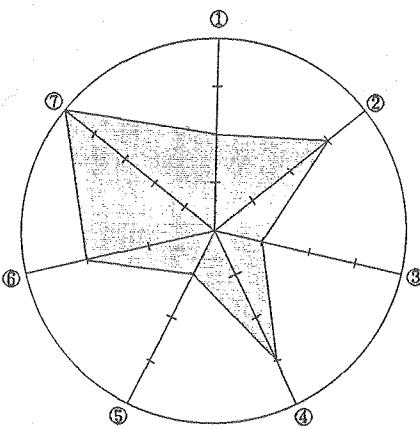
核磁気共鳴探査技術



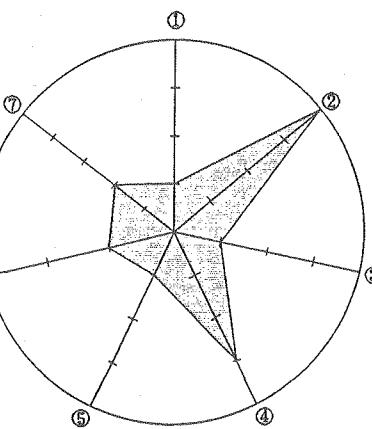
超加速試験技術・
ナチュラルアナログ



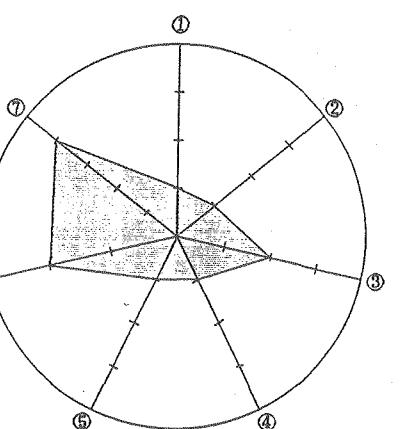
フラクタル理論による
地層の長期評価技術



ボクセル構造による
地質構造の表現



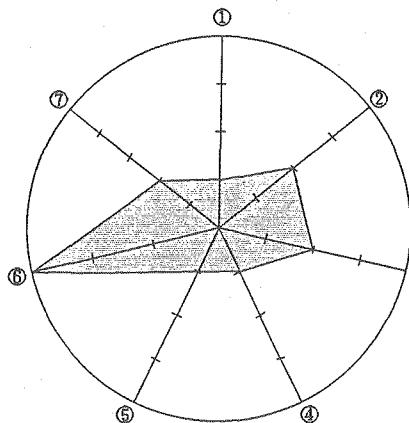
レーザーによる掘削技術



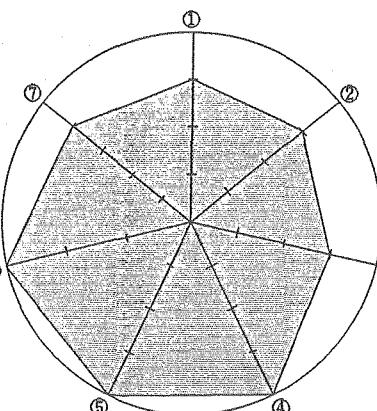
バイオセンサー

<凡例>	
①	廃棄物管理シナリオ
②	安全性の評価
③	処分システムの構成
④	処分実施の容易さ
⑤	経済性へのインパクト
⑥	研究開発レベル
⑦	産業界へのインパクト

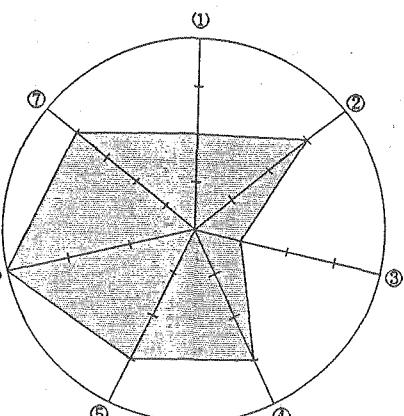
図-75 地層処分への適用対象技術の適用インパクトの整理 (1 / 2)



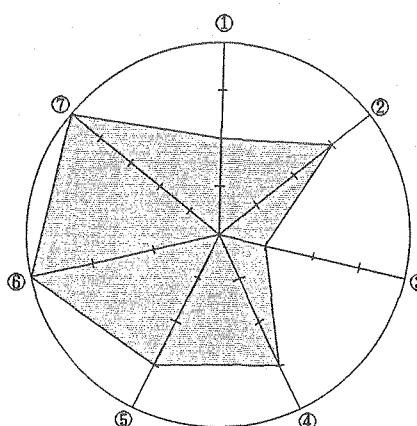
光ファイバーセンサー



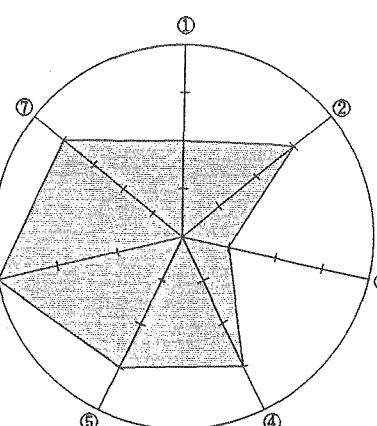
イオンセンサー



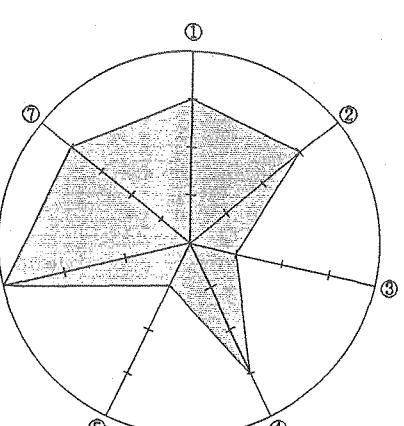
耐放射線光ファイバー



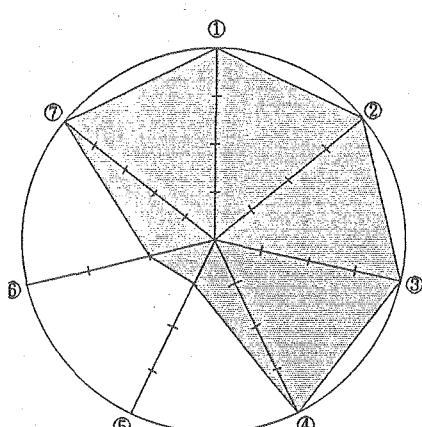
ノードの耐環境性



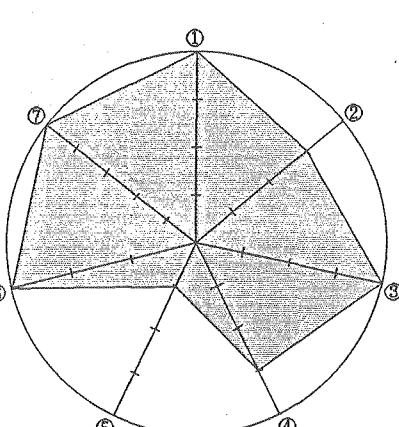
センサーのネットワーク
としてのロバストネス



スマートセンサー技術
(故障自己診断技術等)



超耐食性材料



環境条件を環境維持作用を持つ
鉄等の材料の腐食厚により保持

<凡例>	
①	廃棄物管理シナリオ
②	安全性の評価
③	処分システムの構成
④	処分実施の容易さ
⑤	経済性へのインパクト
⑥	研究開発レベル
⑦	産業界へのインパクト

図-75 地層処分への適用対象技術の適用インパクトの整理 (2 / 2)

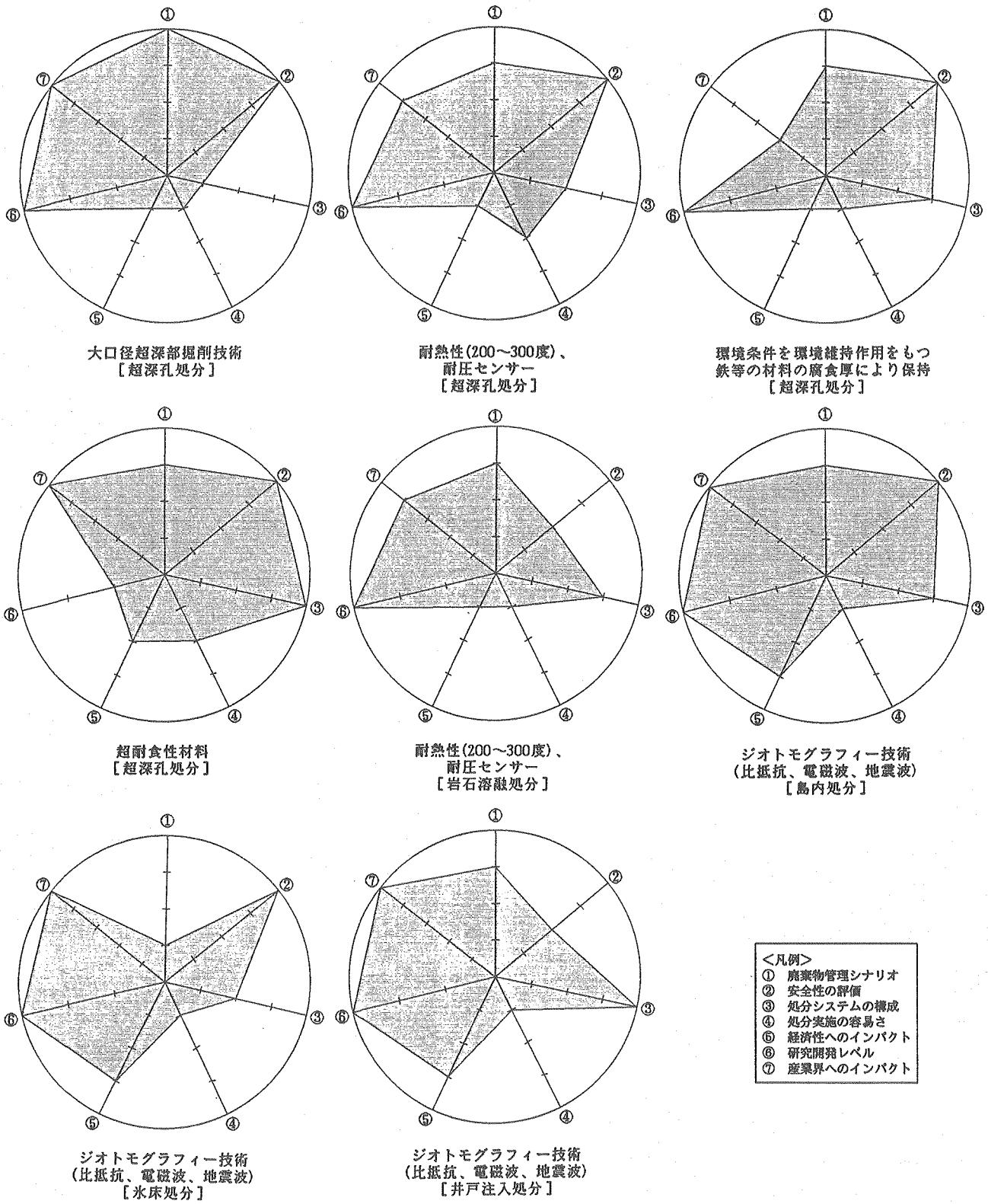
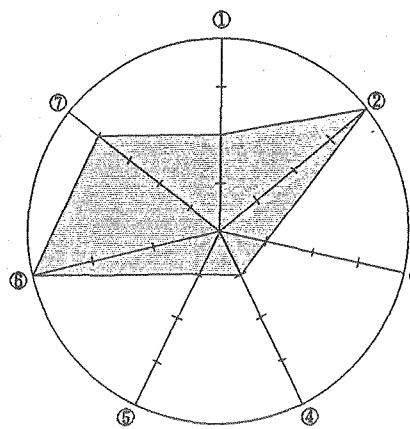
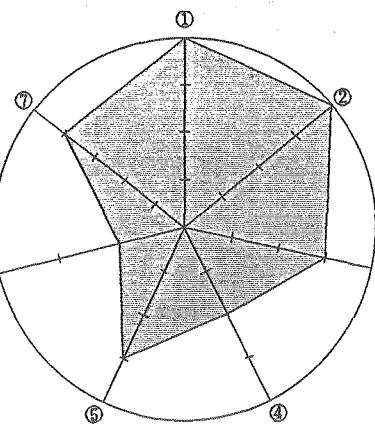


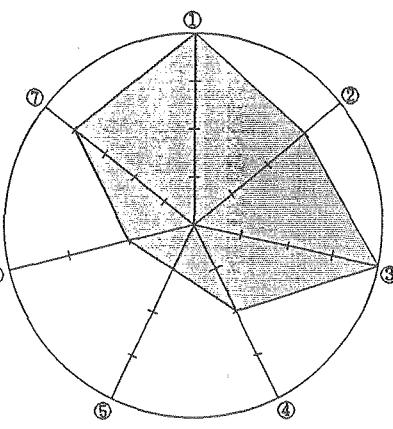
図-76 代替処理処分への適用対象技術の適用インパクトの整理 (1/2)



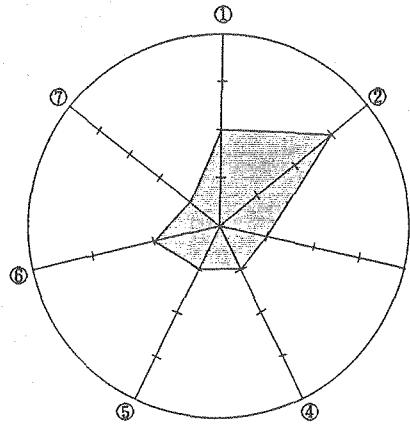
海底作業用の掘削技術
【海洋底下処分】



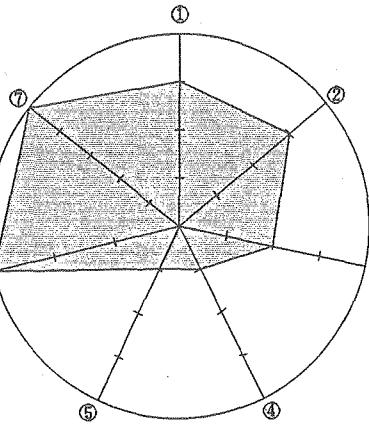
レーザーによるアクチニド分離
【部分離】



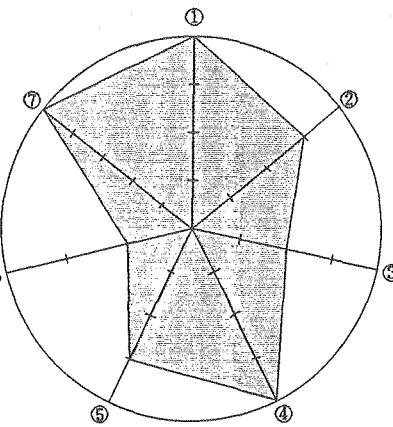
反応核変換技術(電子加速器)、
核破砕技術(陽子加速器)
【消滅処理】



(CERMET)
【宇宙処分】



ロケット技術の高度化
【宇宙処分】



EMM&D
【宇宙処分】

<凡例>	
①	廃棄物管理シナリオ
②	安全性の評価
③	処分システムの構成
④	処分実施の容易さ
⑤	経済性へのインパクト
⑥	研究開発レベル
⑦	産業界へのインパクト

図-76 代替処理処分への適用対象技術の適用インパクトの整理 (2/2)

表-47 地層処分への適用対象技術の適用インパクトの順位

順位 適用対象技術

- 1 光ファイバーセンサー
- 2 環境条件を環境維持作用を持つ鉄等の材料の腐食厚により保持
- 3 超耐食性材料
- 4 ジオトモグラフィー技術（比抵抗、電磁波、弾性波）
- 5 超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術
- 6 ノードの耐環境性
- 7 フラクタル理論による地質の長期評価技術

- 8 耐放射線光ファイバー
- 9 センサーのネットワークとしてのロバストネス
- 10 スマートセンサー技術
- 11 ボクセル構造による地質構造の表現
- 12 高温超伝導体による S Q U I D
- 13 中性子探査技術
- 14 イオンセンサー
- 15 バイオセンサー
- 16 レーザーによる掘削技術
- 17 核磁気共鳴探査技術

表-48 代替処理処分への適用対象技術の適用インパクトの順位

順位	適用対象技術
1	ジオトモグラフィー技術（比抵抗、電磁波、弾性波）【島内処分】
2	EMMD【宇宙処分】
3	レーザーによるアクチニド分離【群分離】
4	ジオトモグラフィー技術（比抵抗、電磁波、弾性波）【井戸注入処分】
5	超耐食性材料【超深孔処分】
6	大口径超深部掘削技術【超深孔処分】
7	耐熱性(200~300度)、耐圧性センサー【超深孔処分】
8	反応核変換技術（電子加速器）、核破碎技術（陽子加速器）【消滅処理】
9	ロケット技術の高度化【宇宙処分】
10	ジオトモグラフィー技術（比抵抗、電磁波、弾性波）【氷床処分】
11	環境条件を環境維持作用を持つ鉄等の材料の腐食厚により保持【超深孔処分】
12	耐熱性(200~300度)、耐圧性センサー【岩石溶融処分】
13	海底作業用の掘削技術【海洋底下処分】
14	CERMET【宇宙処分】

4.3.4 適用対象基準のリストアップ及び今後の検討の方向性

4.3.3で設定した基準により選択された適用対象技術は、以下のとおりである。

① 地層処分

- ・光ファイバーセンサー
- ・環境条件を環境維持作用を持つ鉄等の材料の腐食により維持
- ・超耐食性材料
- ・ジオトモグラフィー技術（比抵抗、電磁波、地震波）
- ・超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術
- ・ノードの耐環境性
- ・フラクタル理論による地質の長期評価技術

② 代替処理処分

(a) 超深孔処分

- ・大口径超深部掘削技術
- ・耐食性材料

(b) 岩石溶融処分

- ・耐熱性（200～300度）、耐圧センサー

(c) 島内処分

- ・ジオトモグラフィー技術（比抵抗、電磁波、地震波）

(d) 水床処分

- ・ジオトモグラフィー技術（比抵抗、電磁波、地震波）

(e) 井戸注入処分

- ・ジオトモグラフィー技術（比抵抗、電磁波、地震波）

(f) 海洋底下処分

- ・海底作業用の掘削技術

(g) 群分離

- ・レーザーによるアクチニド分離

(h) 消滅処理

- ・反応核変換技術（電子加速器）、核破碎技術（陽子加速器）

(i) 宇宙処分

- ・EMMD

以上の技術について、来年度は実際に地層処分及び代替処理処分に適用した場合の概念を検討することを考えている。

今回の第2次スクリーニングで抽出された技術は、調査・解析に関するものとしてはジオトモグラフィー技術、超加速試験技術・ナチュラルアナログ技術、フラクタル理論による地質の長期評価技術等があり、これらは一様に調査・解析技術の開発が重要であることをその数の多さからも推察され、なおかつ長期的な評価を要求している。

また、処分の実施にあたって、容器及び構造物の健全性の確認・モニタリングのための光ファイバーセンサー、ノードの耐環境性等が抽出されており、モニタリングを含めた地層処分での管理の考え方及びこれに関する技術開発が重要な課題となってくることを示しているものと考えられる。

さらに、地層処分施設が置かれる環境を積極的に改善するものとして、環境維持作用を持った材料の利用が抽出されており、この点も重要な課題と成っていくものと考え得る。

一方、代替処理処分については、実現性のクリティカルとなっているところが純技術的なものか、その他の要因によるものかを整理した上で適用概念の検討方法を決定していくことを考えている。

5. 技術開発進展予測手法について

4. 3で第2次スクリーニングを行った適用対象技術が、今後の研究開発によりどの程度技術的な進展が見込めるかについて予測するために、技術開発進展予測を実施する。実施にあたっては、まず研究開発進展に関する既存の予測研究例の調査を実施する。

また、予測例が見られない分野については、予測対象毎に適用すべき予測手法について検討するとともに、モデルの作成、データの収集を行うための検討を実施する。

5.1 既存の予測方法の調査

現在までに行われた各種の技術進展予測研究例について、手法の概略的な内容、予測対象としている技術分野、手法適用の時間的・技術的な制限・制約等を調査する。

(1) デルファイ法

(i) 概念

優れた専門家や天才的な発明家が、今までの数々の成功と失敗の経験の知識の中から獲得した勘や英知を活かし、それらを繰り返しのアンケート方法により、システムティックに集めて、そこから導き出された結果を基に予測する方法である（図-77参照）。

(ii) 特徴

- ① 会議形式の集団討議をせずに個別のアンケート調査であるので、上下関係、力関係の影響がないことや討議に慣れていない人の意見をもらすことなく収集することができる。また、回答者相互の心理的影响が避けられる。
- ② 集計された結果のフィードバックを行い、その集計結果を新たな情報として回答者に提供する。そして、回答者が重要とした判断要因の過大評価、過小評価、見落とし等の修正を行うことができる。
- ③ 回答者がお互いに離れていても、収斂が図れる。
- ④ 回答結果の統計的解析処理が可能である。
- ⑤ ある調査に対して、深い知識と経験をもった専門家のグループが選択できれば、比較的容易に短期間に有効な結果が得られる。

(iii) 問題点

- ① 質問の仕方とその言い回しにより結果が大きく左右される。そのために予測・

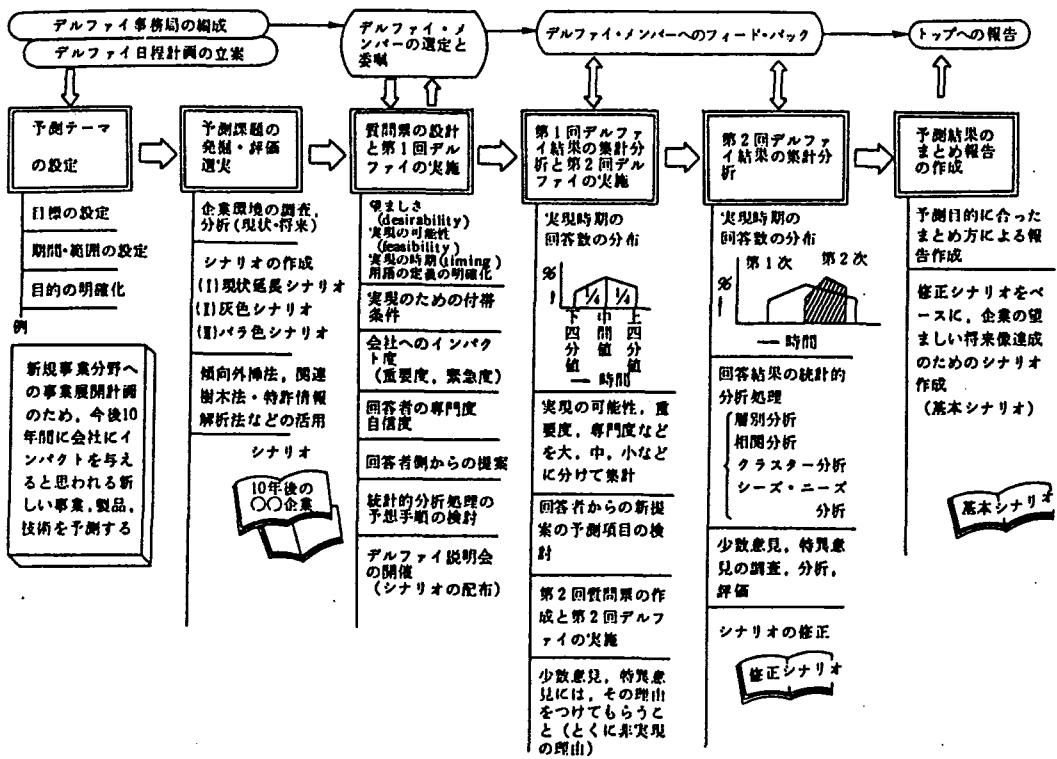


図-77 社内Delphiの手順¹⁾

目的にあった適切な質問を作る必要がある。独創的な質問作りが要求されると同時に、回答のために専門家を時間拘束するのであるから積極的に回答しようという動機づけのための配慮も必要である。

- ② 回答者の選択の仕方により大きく左右される。そのため質問に適したすぐれた回答者を得なければならない。また、一般に専門家は短期的な展望については積極的な見方をするが、長期的なものについては保守的な見方をする傾向があるので、故意に非専門家を参加させるとかえって問題の急所をついてくれる場合もある。
- ③ 適当な意見に一致させるために、極端な回答をした人はその理由を強要され、不一致を正当化しなければならない。
- ④ 権威ある専門家が全面的に非専門家の回答に屈することがありうる。つまり、衆知が英知を押しつぶしてしまうことがありえる。
- ⑤ アンケートにはインタラクティブな効用、つまり他人の意見をきいているうち

に忘れていたことを思い出したり、新しい考え方について刺激を受けたり便乗したりということがない。このためお互いに創造性を刺激する機会がない。

- ⑥ 署名のアンケート形式である場合、回答に対する責任感が弱くなり、質問形態の制約もあって回答者への真剣さと意欲がそがれ、回答の質が低下する。
- ⑦ 予測対象の相互間の因果関係が考慮されない。

(2) 関連樹木法

(i) 概念

ある目的の達成又は問題解決のために必要な、広範で選択可能な種々の代替案を分析、評価する方法である（図-78参照）。さらに、将来の社会、経済、技術等の予測をふまえた新しい評価体系や新しい発想による代替案を創出する手段でもある。

(ii) 特徴

- ① 対象課題に対して洗い出された問題項目を関連性の大きさの順に配列するので一目で比較検討でき、問題群の構造全体を認識しながら問題解決できる。
- ② 事前にあらゆる状況に対応できる対応策を考え、それらのメリット・デメリットを検討しておけるので、状況に応じて適切な計画変更が速やかにできる。

(iii) 問題点

- ① 従来の計画立案のやり方では、ただ一つの最良と思われる案を特定個人の仮説のもとに作成しそれを関係者に認めさせるというものが多い。このため代替案が作り難くなっている。
- ② 問題解決能力がすぐに身につくわけではなく、常日頃から「問題意識を常に持つ」という精神的なトレーニングが欠かせない。
- ③ 既成概念にとらわれずに広い物の見方、複眼思考を持たなければならない。

(3) 先行指標法

(i) 概念

社会や経済や経営、技術変化等のメルクマール（兆候）を予測に結びつけようとする方法である（「兆候予測」とも呼ばれる）。

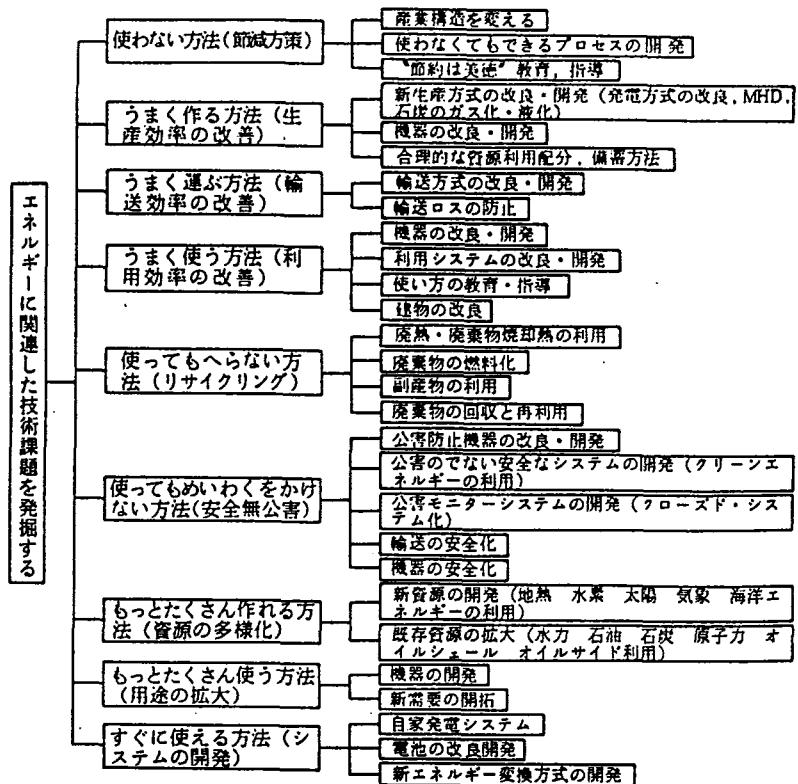


図-78 エネルギー関連の技術課題関連樹木

(ii) 特 徴

先行指標の一般的な種類としては、以下のものを例として挙げることができる

- ① 省力機械や火力発電所の
効率等に関する技術 最初は直線的に進歩し、その後横ばいになる
技術となる



横ばい傾向が見えたたら、次期の技術が出現する
可能性が高い

- ② 航空機や自動車等の
最大速度 壁につき当たるまでは”対数曲線的”な伸び



曲線がねてきたら、次期の技術の出現が近い

- ③ 次期の新製品によって
既存製品が代替されて
いくタイプ ”ロジスティック曲線的”な技術進歩を描く
(Ex. 氷冷蔵庫と電気冷蔵庫) 成熟期に入り、カーブがダウンしたら代替製品
の出現が近い



- ④ 利用の有効限界がある
ような技術 最近はゆっくりと”指数曲線的”に進歩し、
(Ex. 爆弾、ステレオの音) ついで突然急速に伸び最後に水平になる。
カーブが水平になりはじめたら、多様化が始まる



本方法の特徴は、以下のとおりである。

- ① ”フィーリング的ニュアンス”が強いものであり、予測の専門家でなくとも
比較的容易にできる手法である。
- ② 数学的な分析手法での予測の精度を高める決め手となる。

(iii) 問題点

身のまわりにある「先行指標」をどう捉えるかが、この手法の一番の問題である。

(4) パテントマップ

(i) 概念

特許の分析の1つで、時系列的、目的用途、材料、方法等の視点別に整理した技術発展地図を作成し用いる手法である（図-79、80 参照）。

(ii) 特徴

① 既存の特許権網の状況把握

- ・当該技術分野における未開発部分の発見
- ・自社の技術開発力の当該技術分野における位置づけ

これらのが認識でき、技術開発への効果的資源配分、あるいはマーケティング戦略などの方針を決定でき、技術戦略に役立つ。

② 技術動向全体や産業動向全体が正確に、一目瞭然にみわたせる。

③ 急速に展開されつつある分野や、その技術がトランスマッチングしていく方向等の予測ができる、更に、将来現れそうな新技術や新プロセスの予測にも役立てることができる。

(iii) 問題点

- ① 急増する膨大な特許情報を収集して、着実な企業戦略をはかるのは容易ではない。
- ② コンピューターと社外の情報提供機関が不可欠となってくる。

①用 途	道路車両用 鉄道車両用 木工製品用 鉄構築物用 金属製品用 船舶用 電気機械用 機械用 家庭用
②塗 布 原 理	被塗布物表面機構 塗布機構 塗着機構 乾燥機構
③材 料	塗布主材料 塗布補助材料 被覆物の素材 装置材料
④組込み構造	電気的装置の組み合わせ構造 科学的装置の組み合わせ 機械的装置の組み合わせ
⑤方 法 (ソフトウェア)	製造方法 加工方法 制御方法 検出方法 指令方法

特許庁特許情報技術予測研究会:
これからの塗装技術(発明 VoL. 71. No. 2)

図-79 電着塗装技術の形態学的マトリックス (1974年における4社の特許広報の傾向)

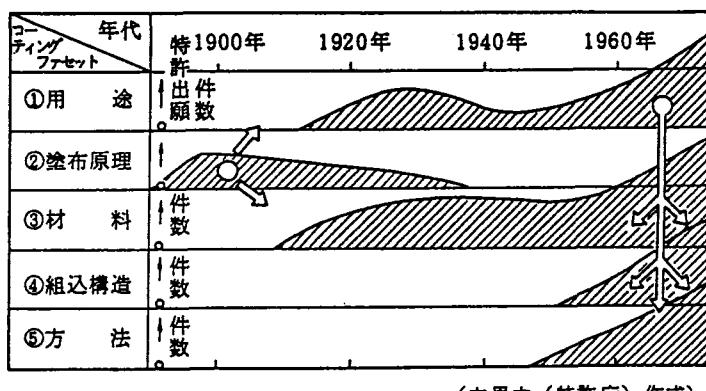


図-80 電着塗装技術の開発発展パターン

5.2 予測手法に関する検討

既存の予測手法としてデルファイ法／関連樹法／先行指標法／パテントマップに関して調査を実施した。これらの手法にはそれぞれ一長一短があり、どれかの手法だけで技術予測を実施することは難しい。特に、本研究で必要とされる技術予測は下記のような性格を持つことが必要であることから、何らかの手法を組み合わせて、独自の手法開発を行う必要があるものと考えられる。

- ① 対象とする技術が廃棄物処分という特殊な対象に関連するものであること
- ② 処分のプロセスを革新する技術を見越す必要があること
- ③ 社会へのインパクトに関する把握が必要があること

特に①の面からは、汎用技術の応用により実現できるもののみを追っていくだけでは不足である点が、また、②の面からは発見的なアプローチが必要となる点で難しさがあるものと言える。また、③の面では特殊な技術が社会に及ぼす影響を予見する必要があり、従来の未来予測技術を越える難しさがある。

こういう点をカバーするために、関連樹法による発見的な技術予測をベースに汎用技術に関してはデルファイ法および先行指標法を利用した技術開発進展度予測を行う技術予測手法の開発が有効であろうと考えられる。

あとがき

本年度は、高レベル放射性廃棄物処理処分に対する高度基盤技術の適用性を検討する2年目として、昨年度に引き続いて対象となり得る高度基盤技術の現状について調査を行った。調査対象とした将来技術は、シュミレーション、AI技術及び新分離技術である。これら技術について、現状での研究動向、具体的な適用例、並びに今後必要となる研究開発事項についてまとめている。

また、昨年度摘出した地層処分及び代替処理処分に対する重要要素技術から、各種の処理処分概念への適用が考えられる適用対象技術を選定するために、重要要素技術に関して重要度、要求性能等を基準としてスクリーニングを行った。

さらに、スクリーニングにより選択した重要要素技術毎に具体的な適用対象技術を選定した。

上記で選択した適用対象技術に関して、技術の適用箇所、要求性能等を考慮した上で、現状の技術レベル、開発進展の程度等について詳細な調査を行い、課題及び今後の展望についてまとめている。

適用対象技術を各種の処理処分に適用した場合の処理処分システム・シナリオに与えるインパクトを検討し、この結果と研究開発レベル及び産業界への波及効果とを加えて、適用対象技術の第2次のスクリーニングを実施した。

また、高度基盤技術の将来の開発進展予測を行うため、本年度は既存の技術開発進展予測方法の調査を実施し、適用が考えられる手法としてデルファイ法、関連樹木法、先行指標法等について、概念、特徴及び問題点についてまとめている。

来年度は、上記で選定した適用対象技術を地層処分及び代替処理処分に適用した概念を検討し、適用効果を検討する。また、適用対象技術の技術開発進展予測を行う計画である。

謝　　辞

本調査は、(株)野村総合研究所、並びに三菱重工業(株)殿のご協力により、遂行することができました。ここに、あらためて御礼申し上げます。

また、本調査研究の進め方、成果のまとめ方に貴重な御助言、ご指導を戴いた、動力炉・核燃料開発事業団環境技術推進本部処分研究グループ大沢正秀主幹、並びに棚井憲治殿に感謝の意を表します。

参考文献

2.1 シミュレーション

- 1) アーサー・ホームズ（上田誠也, 他訳）, 一般地質学, 東京大学出版会 (1986)
- 2) Jaroszewski, W., Fault and fold tectonics, Ellis Horwood (1984)
- 3) 浜島良吉, 小出仁, 川井忠彦, 不連続性岩盤の解析－応力, 熱移動及び浸透流の連成解析へのアプローチ－
- 4) 大野博之, フラクチャー解析におけるフラクタル：日本鉱山地質学会研究委員会資料 (1988)
- 5) 浜島良吉, 川井忠彦, 山下清明, 草深守人, 山田俊雄, 龜裂及び節理系岩盤の進行性破壊の解析に関する研究：応用地質, Vol. 28, p115～125 (1987)
- 6) 山田俊雄, 浜島良吉, 有限要素モデルに岩盤の地質学的情報を導入する研究：第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p127～132 (1987)

2.2 A I (人口知能) 技術

- 1) D. Marr, ビジョン－視覚の計画理論と脳内表現（乾, 安藤訳）, 産業図書 (1987)
- 2) 西田豊明, 情報処理 Vol. 29, No. 9
- 3) 人工知識学会誌, 定性推論の基礎87. 9
- 4) 瀬戸山, 川人, 鈴木, 多層神経回路網内に学習される逆ダイナミクスモデルによるマニピュレーターの制御, 信学技法 : M B E -135, p249-256, (1988)
- 5) 宇野, 川人, 鈴木, ロボットマニピュレーターの最適軌道に対する繰返し学習制御 : 計測自動制御学会論文集, 24巻, 8号, p65-71(1988)
- 6) 川人, 宇野, 鈴木, 隨意運動制御における適応と学習Ⅱ : 日本ロボット学会誌, Vol. 6, No. 3, p50-58 (1988)
- 7) 福島邦彦, 三宅誠, 伊藤崇之, ネオコグニトロンの原理を用いた数字パターン認識 : 電子通信学会論文誌D, J -66D(2), p206-213, (1983)
- 8) 福島, 三宅, 伊藤, 河野, ネオコグニトロンの原理を用いた手書き数字認識－マイクロコンピューターによるシステム情報処理学会論文誌, Vol. 28, No. 6 p. 627-635, (1987)

- 9) J. J. Hopfield, D. W. Tank, Biol. Cygern., 52, 141(1985)
- 10) D. E. Rumclhart, G. E. Hinton, R. J. Williams, Parallel distributed processing, eds. J. L. McClelland, D. E. Rumelhart and PDP Research Group, MIT Press, Cambridge(1986)
- 11) S. Shinomoto, Competition and cooperation in neural net 2, eds. M. A. Arbib and S. Amari, Lecture Notes in Biomath, Springer-Verlag, Berlin (1988)

2. 3 新分離技術

- 1) 日本原子力情報センター, 群分離及び有用金属回収の技術開発, No. 9010485(1990)
- 2) L. M. Tothetal, Photochemistry of the Actinides, 1980 American Chemical Society

3. 2. 1 調査・計測技術関連

- 1) 原宏, 超電導のはなし, 日刊工業新聞社(1987)
- 2) 物理探査学会, 図解物理探査(1990)
- 3) Nagra, Nagra bulletin(1988)
- 4) 日本工業技術振興協会, U R D地下環境工学部会〈第20回定例会〉(1990)
- 5) AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended practice for standard calibration and format for nuclear logs, 3rd ed., API RP 33(1974)
- 6) 尾上守夫, 検査の自動化・システムハンドブック, P307

3. 2. 2 解析技術関連

- 1) 横井茂樹, 岡田稔, ランダム・フラクタルを用いた木目と大理石の表現方法, PIXEL No. 71(1988)
- 2) 映像化マシン, 電子情報通信学会, オーム社(1989)
- 3) K. H. Hohne, M. Bomans, A. Pommert, M. Ricmer, C. Schiers, U. Tiede, G. Wiebecke: 3 D Visualization of tomographic volume data using the generalized voxel model, The Visual Computer (1990)
- 4) 稲蔭正彦, リアリズムを追求するボリューム・レンダリング: PIXEL, No. 92(1990)

- 5) 田山典男, 清水則明, 千葉則茂, 太田原功, 切出し立体画像を高速に生成するボクセル追跡法: 電子情報通信学会論文誌, Vol. J72-D-II, No. 9, p. 32-1340 (1989)

3.2.3 処分技術関連

- 1) B. R. Jnrewicz, Rock Kerting with High Power Lasers, 3rd International Society of Rock Mechanics Congress (1974)
- 2) 軽部征夫, 半導体バイオセンサのインテリジェント化, 計装, Vol. 30, No. 13(1987)
- 3) 角田恒巳, 真田和夫, 光ファイバーへの放射線の影響, 応用物理第55号巻第3号 (1986)

3.3 代替処理処分に適用可能な技術の調査

- 1) 日本原子力研究所, JAERI-memo02-312(1990)
- 2) 内田茂男, 航空宇宙技術の明日, 設計・製図, Vol. 25, No. 1(1990)
- 3) 日刊工業新聞, 1989/11/01
- 4) 日刊工業新聞, 1989/07/28

5.1 既存の予測方法の調査

- 1) 飯沼光夫, 未来を読みとる戦略技法