

PNC-^ISJ199 84-04(1)

3

分書

本資料は2001年11月30日付けで
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力部]

高レベル廃棄物地層処分システムの設計研究(Ⅳ)

概要報告書

(昭和58年度)

1984年3月

清水建設株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱いには十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

1984年 3月

高レベル廃棄物地層処分システムの設計研究(Ⅳ)^{*}

(昭和58年度)

荒 弘重・福光健二・飯塚友之助・石井 卓・泉谷泰志・今津雅紀・櫛田吉造
 長谷川 誠・前田政也・矢部幸男・大石晃嗣・奥野哲夫・木下直人・態谷充洋
 齊藤鉄夫・嶋田 純・橋本修左・羽根 義・日比一素・若林成樹・渡辺浩平^{**}

要 旨

地層処分場の処分ピットの間隔は小さいことが経済性や施設規模の面から望ましいが、固化体は発熱体なので許容上限岩盤温度に見合う間隔を設けなければならない。冷却貯蔵期間・埋設密度・岩盤熱物性が異なる場合について軸対称熱伝導解析と3次元熱伝導解析を行なって、許容上限岩盤温度を100℃とした場合の処分ピット間隔を次のように得た。

- ・ 固化後30年貯蔵した後に埋設する場合：処分ピット間隔 8～4m
- ・ 固化後100年以上貯蔵した後に埋設する場合：処分ピット間隔 2m

さらに、施設のスケールファクター(1万本, 2万本, 4万本), 岩盤の種類(硬岩, 軟岩), 冷却貯蔵期間(30年, 100年, 500年)を変えた中から6案の処分施設を設計し、コストを概算した結果、固化体1本当りの処分コストは3600万円/本(貯蔵期間100年以上, 硬岩の場合)から8000万円/本(貯蔵期間30年, 軟岩の場合)と推定された。

また、岩盤内空洞の地震時の被災例、観測例および安定性に対する解析的研究例について文献調査した結果、良好な岩盤に掘削した空洞の耐震性の高さが明らかとなった。

なお、昭和55年～58年度の研究開発成果について総括し、報告書は2分冊に分けて作成した。^{***}

※ 本報告書は、清水建設株式会社が動力炉・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。

※※ 清水建設株式会社

※※※ 成果報告書その1 — 地震処分施設ワーキンググループ報告書第1分冊 —

成果報告書その2 — 埋戻し後の熱解析およびその結果に基づく処分施設レイアウト、コストのケースタディ、他 —

NOT FOR PUBLICATION

PNC-SJ 199 84-04

March, 1984

Design Study on H.L.W. Geologic Repository (IV)*

(For 1984)

Hiroshige ARA, Kenji FUKUMITSU, Yunosuke IIZUKA,
Takashi ISHII, Yasushi IZUMIYA, Masanori IMAZU,
Yoshizo UTSUGIDA, Makoto HASEGAWA, Masaya MAEDA,
Yukio YABE, Kouji OISHI, Tetsuo OKUNO,
Naoto KINOSHITA, Mitsuhiro KUMAGAI, Tetsuo SAITO,
Jun SHIMADA, Shusa HASHIMOTO, Tadashi HANE,
Kazuyoshi HIBI, Naruki WAKABAYASHI, Kohei WATANABE

Abstract

Distance between disposal pits in a geological repository is desirably short in view of economics and the facility size, but waste form which generates heat must be buried at a sufficient distance from each other so that the temperature of surrounding rock is maintained below the limitation. Cylindrical and three-dimensional heat transfer model analyses were conducted under different conditions including cooling/storage period, distance between disposal pits and thermomechanical properties of the rock. Based on the analyses, adequate distance between disposal pits for the case where the temperature limitation is given 100°C is calculated:

- . for burial after 30 years of cooling/storage:
distance = 8 - 4 m
- . for burial after 100 years of cooling/storage:
distance = 2 m

Further, six plans selected from cases with different factors such as scale factor of repository (10,000, 20,000 and 40,000 waste forms), rock type (hard rock and soft rock), cooling/storage period (30, 100 and 500 years) were drafted to roughly estimate the cost. Geological disposal cost per one waste form is estimated to be between 36 million yen (storage period of more than 100 years, hard rock) to 80 million yen (storage period of 30 years, soft rock).

Review of reports on seismic disasters, observations of seismic responses of rock cavern as well as analytical studies on seismic stability of rock cavern revealed that rock cavern excavated in a stable rock mass has excellent seismic resistance. The present report forms Volume 2.

Results of R&D for the years 1980 through 1983 were compiled to form the Volume 1.

* Work performed by Shimizu Construction Co., Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

** Shimizu Construction Co., Ltd.

1. まえがき

昭和58年度の受託研究「高レベル廃棄物地層処分システムの設計研究(N)」では、新規および追加の検討を実施する作業とともに、第1段階研究開発の総合評価に資するための昭和55～58年度総合報告書をまとめた。成果報告書は下記の2分冊にしてある。

高レベル廃棄物地層処分システムの設計研究(N)成果報告書その1
—— 地層処分施設ワーキンググループ報告書 第1分冊 ——

: 昭和55年～58年度の総合報告書としてまとめたもの。

高レベル廃棄物地層処分システムの設計研究(N)成果報告書その2
—— 埋戻し後の熱解析およびその結果に基づく処分施設レイアウト、コストの
ケーススタディ、他 ——

: 昭和58年度の新規および追加検討成果をまとめたもの。

本概要報告書では後者の内容についてその要旨を記述する。

2. 埋戻し後の熱解析

2.1 熱解析の目的

高レベル放射性廃棄物地層処分場における熱解析の目的は、主に次の3つを挙げることができる。

- 1) キャニスターの内部および表面の温度、バッファ材および処分ピット周辺岩盤の熱に対する健全性を検討するためのデータを得ること。(very-near-field)
- 2) 処分トンネル内の埋戻し材および処分トンネル周辺岩盤の熱に対する健全性を検討するためのデータを得ること。(near-field)
- 3) 放射性核種の地中移行に大きな役割を果たす地下水流に対する熱の影響を検討するためのデータを得ること。(far-field)

今回は、1)と2)に対する検討を行う。

2.2 計算条件

- 固化体(使用済核燃料1MT相当から生ずる廃棄物を110ℓのガラス固化体中に含有)
- 処分トンネル
断面：巾3.5m×高3.9m;間隔1.05m
- 処分ピット 径0.8m, 深さ4.0m(キャニスター1本)
径0.8m, 深さ6.0m(キャニスター2本)
径0.8m, 深さ8.0m(キャニスター3本)
- 岩盤
許容上限温度：100℃, 300℃
熱伝導率：2.50kcal/mhr℃
比熱：0.220kcal/kg℃
初期温度：地熱15℃, 温度勾配：3℃/100m

2.3 解析結果

図-2.3.1, 図-2.3.2は, それぞれ30年貯蔵, キャニスター3本, 処分ピット間隔4m, 及び30年貯蔵, キャニスター2本, 処分ピット間隔8mの時の3次元解析の結果であり, 図-2.3.3は前者のケースについての主要断面における温度分布図である。

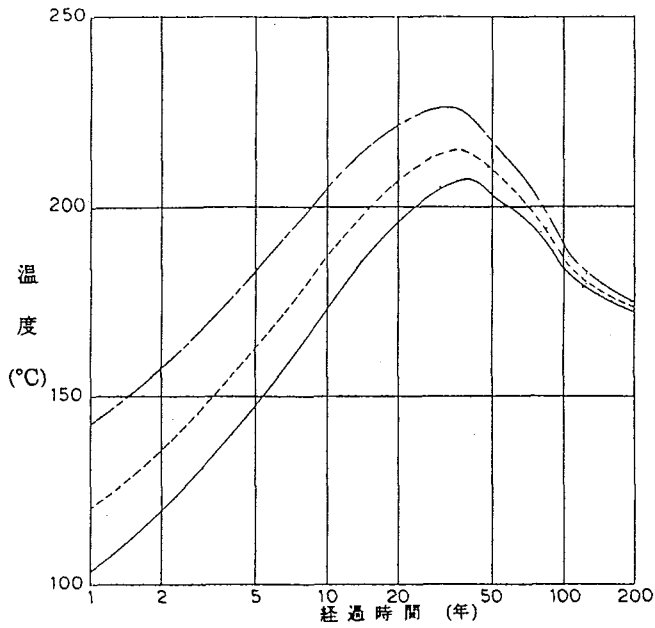


図-2.3.1 3次元解析, 30年貯蔵,
キャニスター3本, 処分ピット間隔4m

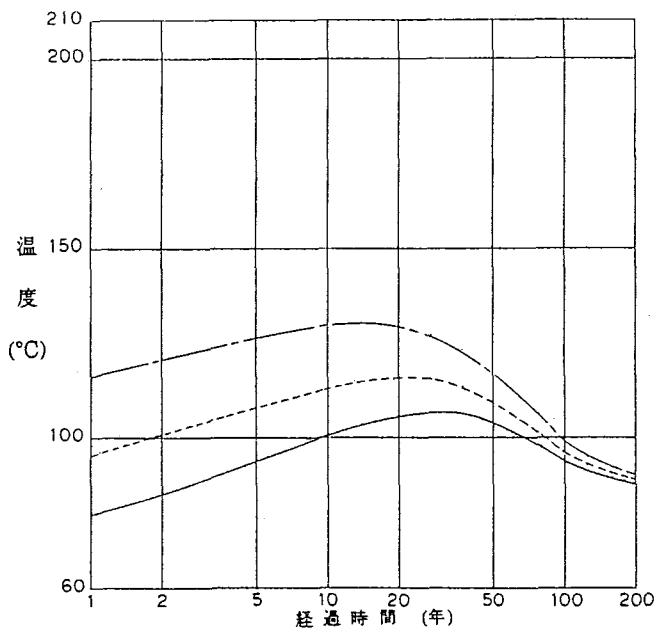
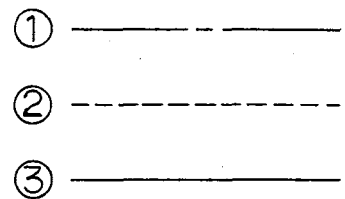
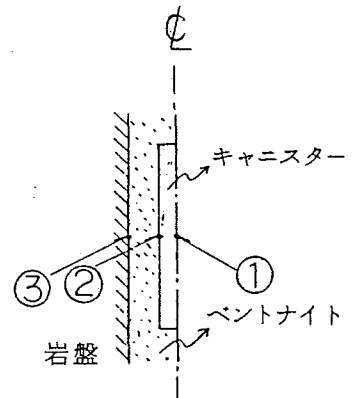


図-2.3.2 3次元解析, 30年貯蔵,
キャニスター2本, 処分ピット間隔8m

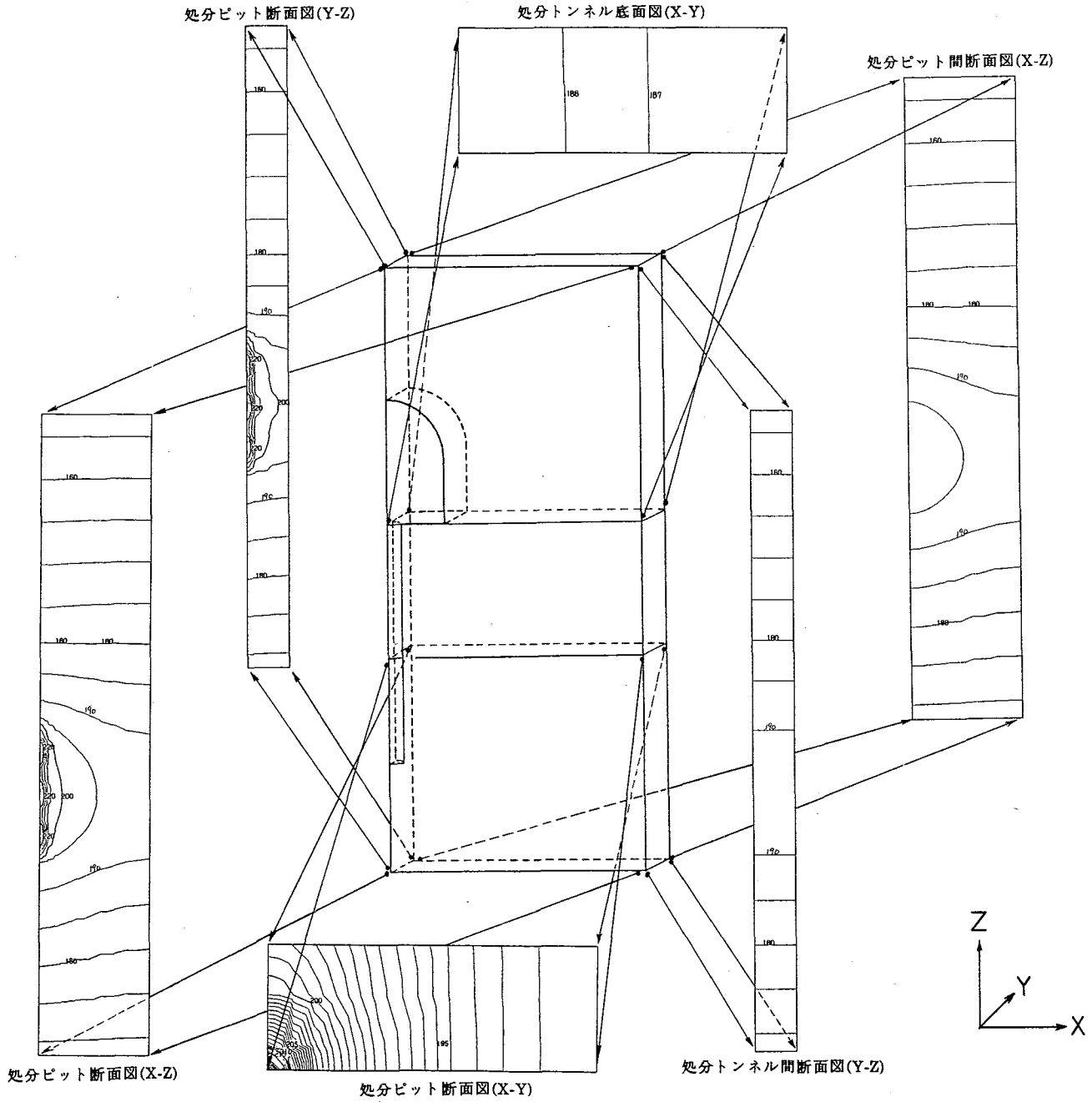


図-2.3.3 30年貯蔵, キャニスター3本, 処分ピット間隔4m, 40年後温度分布図

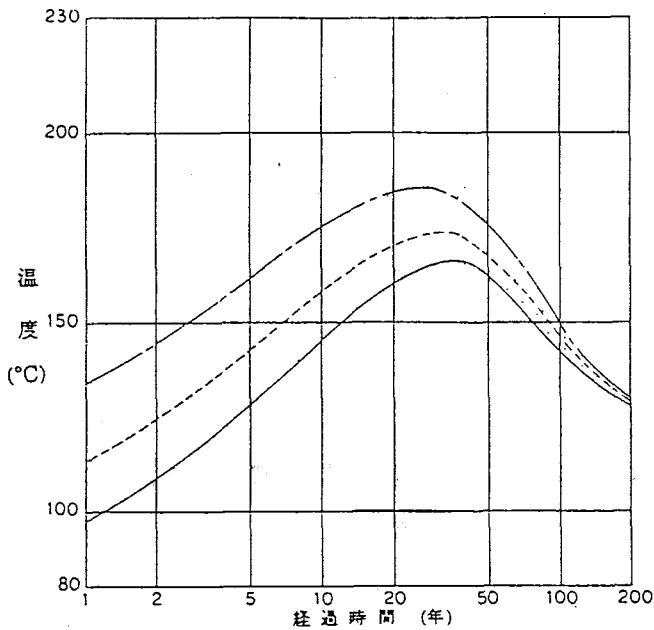
2.4 岩盤の熱的な条件による影響

熱解析で用いられる定数は、熱伝導率、比熱、密度の3つである。岩盤の熱定数に関しては、一般にバラツキがあり、その要因としては次のことが考えられる。

- ① 同一岩種における間隙率や含水状態の違い。
- ② 岩種による違い。
- ③ 熱定数の温度依存度

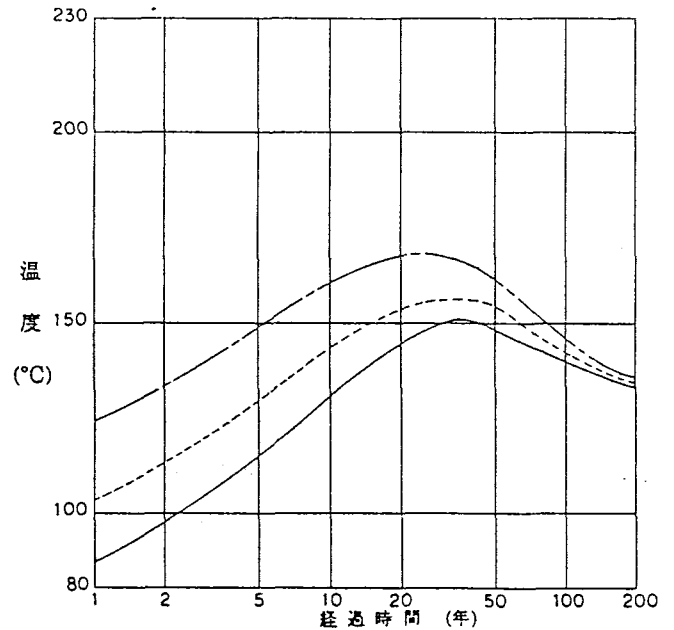
過去の測定例から、熱伝導率の変動幅は±20%程度有り、上下限値は3.0～2.0 kcal/mhr°Cと推定される。また、比熱の変動幅は、±10%程度有り、密度を一定値2650 kg/m³と仮定すると、熱容量の上下限値は636～530 kcal/m³°Cと考えられる。

この岩盤の熱伝導率と比熱の変動による影響を処分条件30年貯蔵のもとで熱解析すると、図-2.4.1及び図-2.4.2に示すように15°C程度の温度変化が求められた。岩盤の熱的な条件による影響は若干ある訳であるが、概念設計に反映させる必要性は現時点ではないものとする。



($\lambda = 2.0 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$, $pc = 636.0 \text{ kcal/m}^3\text{C}$)

図-2.4.1 3次元解析, 30年貯蔵,
キャニスター2本, 処分
ピット間隔4m



($\lambda = 3.0 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$, $pc = 530.0 \text{ kcal/m}^3\text{C}$)

図-2.4.2 3次元解析, 30年貯蔵,
キャニスター2本, 処分
ピット間隔4m

2.5 工学的貯蔵期間の設置ピッチへの影響

工学的貯蔵期間を30年貯蔵、100年貯蔵、500年貯蔵と変えた時の設置ピッチへの影響を処分ピット表面の岩盤温度に着目すると次表のように分類される。

表-2.5.1 岩盤内温度による分類

工学的貯蔵期間	キャニスター本数	処分ピット間隔		
		2 m	4 m	8 m
30年貯蔵	1本	△※	△※	○
	2本	×※	△	△
	3本	×※	△	△
100年貯蔵	1本	○	○	○
	2本	○	○	○
	3本	△	○	○
500年貯蔵	1本	○	○	○
	2本	○	○	○
	3本	○	○	○

○：最高岩盤温度が100℃以下に分類される組合わせ

△：最高岩盤温度が100℃～300℃に分類される組合わせ

×：最高岩盤温度が300℃以上に分類される組合わせ

注) ※は推定による分類

上記の表は、上限温度を300℃と100℃の2種類で分類している。300℃という上限温度は、花崗岩における岩盤加熱試験から得られた値で、岩盤の熱応力の面において目安とすべき値である。100℃は充填材の安定性や水分の変化等を考慮して目安とした値である。現在においては、上限温度は100℃の方を用いる方が無難であろう。この場合、30年貯蔵では設置ピッチ8m、100年貯蔵後では設置ピッチ2mが適当である。

3. 地下施設の概念設計

3.1 トンネル群の深度

トンネル群の深度については、外部インパクトに対する安全性や廃棄物に対する隔離性能の面から見れば、その深度は大である程望ましく、地層処分の経済性、建設規模の面では、処分トンネル相互間隔が、できるだけ狭いことが望ましい。一方トンネル群の力学的安定に影響を及ぼす地圧は、深度に比例して増大するので、深度が大きくなると、それに応じたトンネルの形状、配列と、立地させる岩体の選択が重要となる。

弾塑性有限要素法（林・日比野の方法）で、トンネル断面形状（断面の大きさ幅 3.5 m × 高 3.9 m）を解析し考察した結果

- ① 硬岩（岩盤等級：菊地・斉藤による岩盤分類 — C_H 級）では、深度 1,000m の地圧に対して幌型形状で十分安定で、支保としてのライニングは不要であり、処分トンネル相互間隔は 10m 程度あれば良く、更に再来期間 1,000 年～10,000 年に対応するとされている地震（通産省軽水炉改良標準化耐震設計小委員会：標準設計用地震動）に対しても震度法による解析は、十分に安定であることを示している。
- ② 軟岩（岩盤等級 — C_M 級）では、深度 200m の地圧に対して、円形形状、かつコンクリートライニングが必要であり、処分トンネル相互間隔は約 30m であれば安定である。

等のことがわかったので、深度については

- 硬岩（岩盤等級 C_H 級）：1,000m
- 軟岩（岩盤等級 C_M 級）：200m

の範囲が一応の目安と考えられる。

3.2 処分ピットの間隔

地層処分の経済性、建設規模の面からみれば、処分ピットの間隔はできるだけ小さいことが望ましい。しかし、埋設固化体が発熱体であることから、埋設された固化体による地層の温度上昇が地層の持つ特性へ悪影響を及ぼすことを避けるため、許容上限岩盤温度に見合う処分ピット間隔を設けなければならない。

結晶質岩（花崗岩）中に発熱固化体を埋設した場合の固化体及び周辺岩盤の温度について軸対称熱伝導解析と 3 次元熱伝導解析によるケーススタディでは次のような結果を得た。

- 固化後 30 年貯蔵し埋設する場合処分ピット間隔 8 ～ 4 m
- 固化後 100 年貯蔵し埋設する場合処分ピット間隔 2 m

3.3 地下施設のレイアウト

地下施設の広がりとそのレイアウトは、トンネル群の深度、処分ピットの間隔、固化体格納能力と容量でその骨格が定まり、地層処分施設を安全確実に運営するための通気、排水、搬送等の諸設備が効率よく操作されるよう機器設備と地下施設を配置することで基本レイアウトを行い、断層、断裂等、地質環境に応じて修正される。

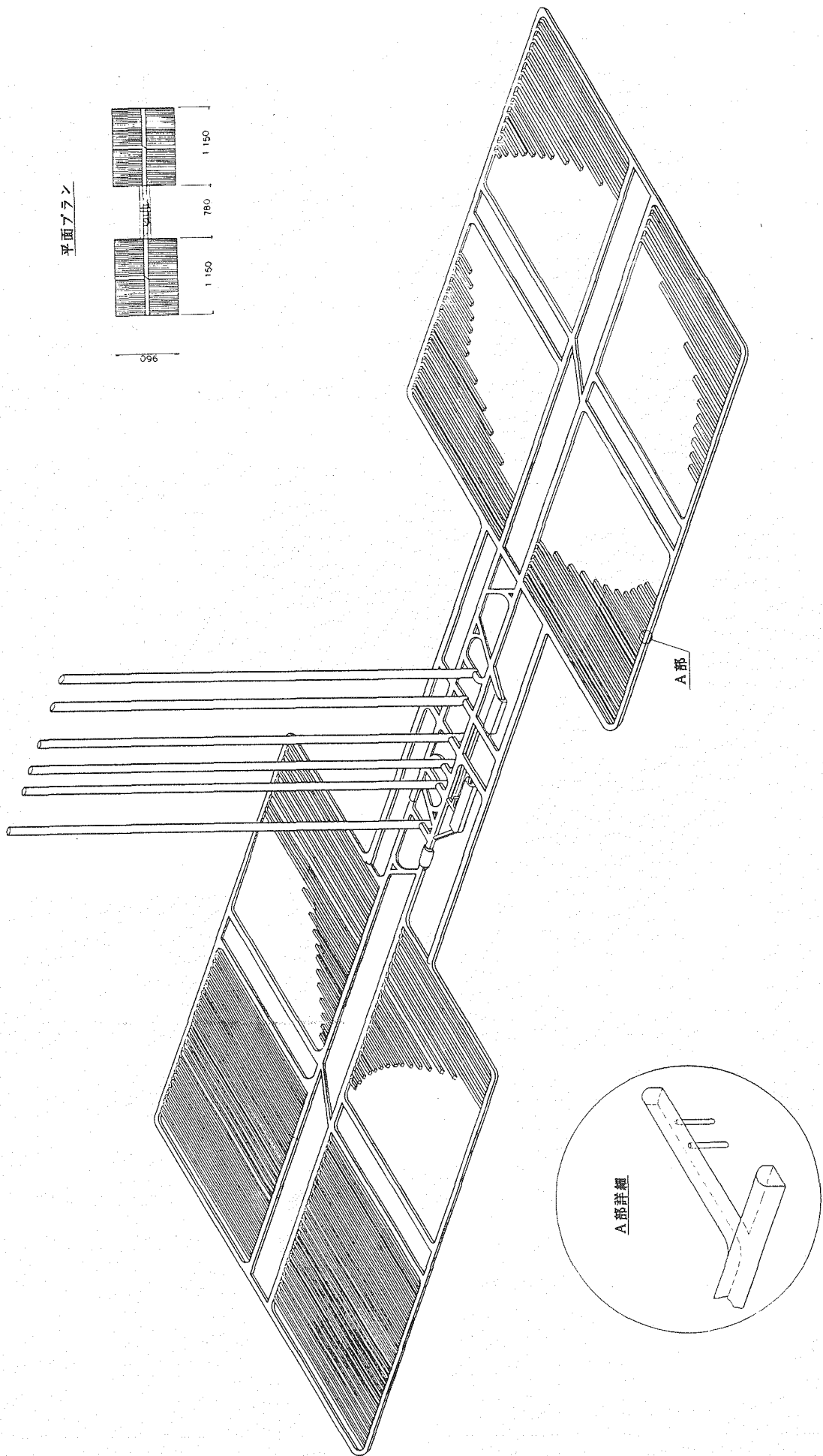
表-3.3.1 に示す6案について施設の設計を行なった。ケースVとケースVIの全体レイアウト図を図-3.3.1, 図-3.3.2 に示す。

表-3.3.1 処分施設のレイアウト検討結果一覧

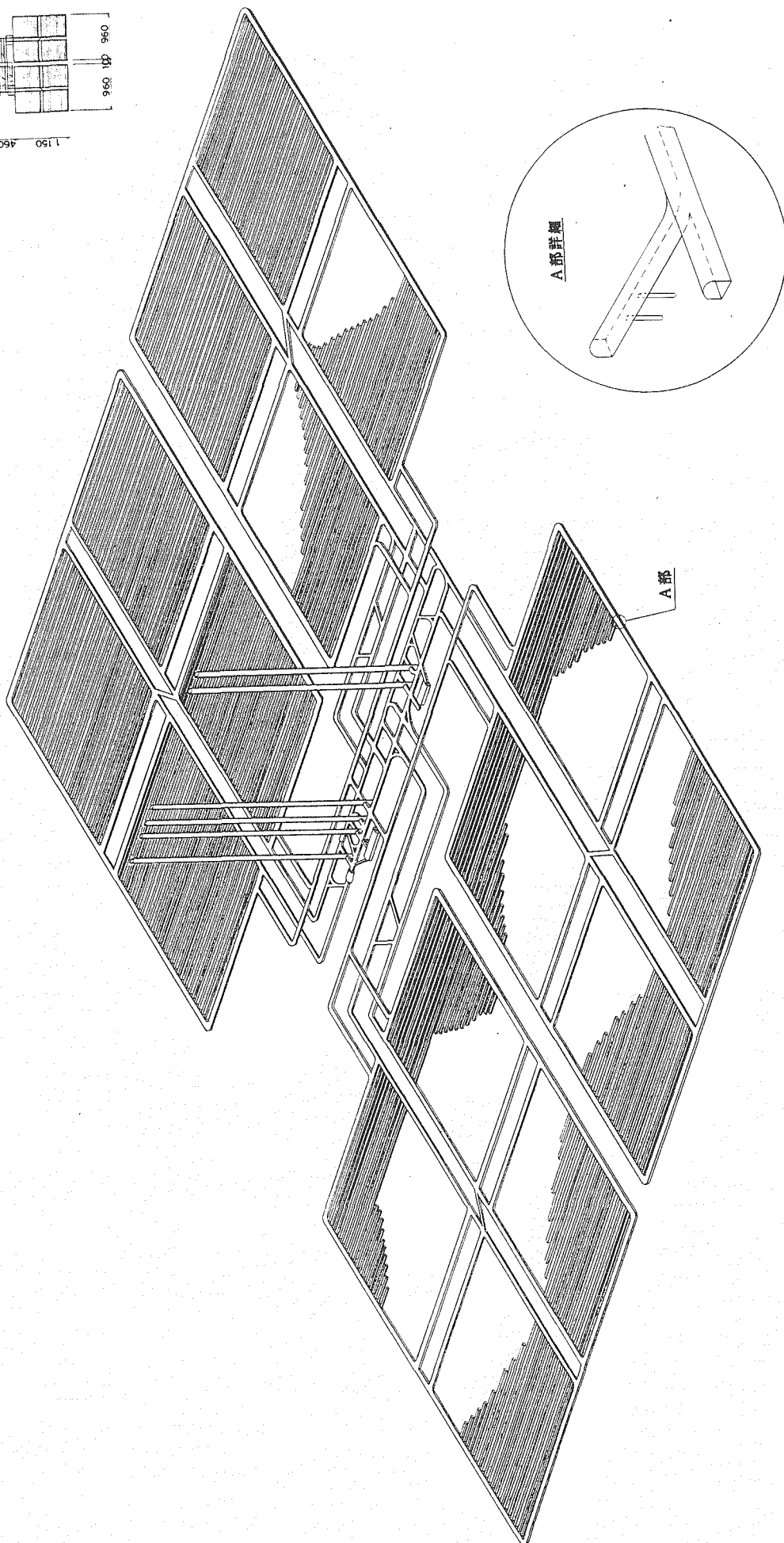
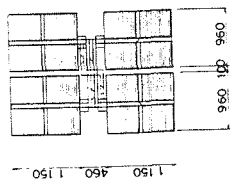
ケース	工学的貯蔵期間	容量	岩種	処分ピット 間隔	処 分 ト ン ネ ル				備 考
					本 数	離 間 距 離	断面形状	支 保	
I	100年以上	1万本	花崗岩類	2m	20	10.5m (トンネル幅の3倍)	馬テイ形	無支保構造	
II		"	"	4m	25	"	"	"	貯蔵期間は不明 (30~100年の間)
III	30年	"	"	8m	50	"	"	"	
IV	30年	"	泥岩類	"	25	27.0m (トンネル幅の5倍)	円形	コンクリート 覆工	
V	30年	2万本	花崗岩類	"	50	10.5m	馬テイ形	無支保構造	
VI	30年	4万本	"	"	"	"	"	"	

注) 1. 処分トンネル本数は、1区画(処分ピット数2500)当りの本数

2. 岩盤上限温度は100℃, 1処分ピットにキャニスターは1本



図一3.3.1 花崗岩類岩盤における地層分場におけるケースV（深さ1000m，設置ピッチ8m，容量2万本）



図一 3. 3. 2 花崗岩類岩盤における地層分場の全体概念図：ケースⅥ（深さ1000m；設置ピッチ8m；容量4万本）。

4. 地層処分施設建設のシナリオ

4.1 単位施設規模

処分施設の規模は、たとえば5000本／1万本／2万本／4万本等の規模で設定することができる。処分事業としては、1万本もしくは2万本を標準的な施設規模（工事単位）として考える。廃棄物の取扱い量は2500本／年を超えるので、少なくとも1万本以上の規模が建設スピードから見て必要である。

仮に1Km平方の岩体を近接して数ヶ所選ぶことができるサイト条件であれば、数万本の施設規模が可能であるが、この場合は1万本または2万本規模の工事を順次実施していけばスムーズな処分スケジュールが可能である。

ここでは1万本を1ユニットとして事業スケジュールを立案することにする。ただし、2ユニットあるいは4ユニットの施設を計画することについても考慮した。

4.2 処分施設必要数

処分すべき廃棄物固化体はほぼ4年で1万本程度ずつ増加してくるから、工事単位1ユニットを1万本とした場合には、4年ごとに処分施設の増設が必要である。

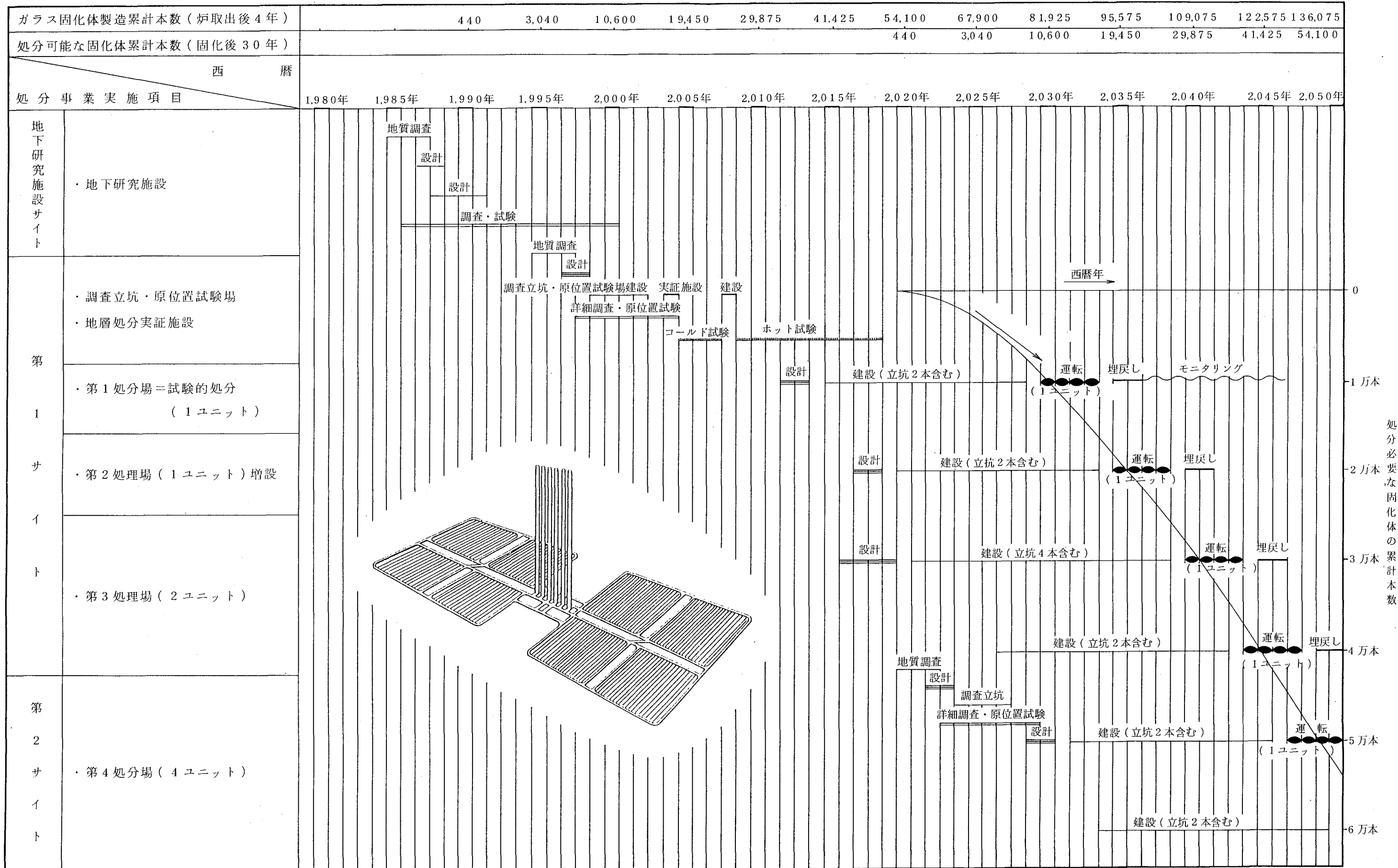
仮に1サイトで4ユニットまで拡張が可能であるとすれば、16年ごとに新規のサイトを開発する必要がある。本章では各サイトで4ユニットまで拡張が可能であると想定して、処分事業のスケジュールを検討した。

4.3 処分事業スケジュール

処分事業スケジュールの一例として、昭和90年（西暦2015年）に容量1ユニットの処分施設を建設開始する場合についての処分事業スケジュールを図4.3.1に示す。このスケジュールを達成するためには調査立坑・原位置試験・実証試験に相当の年月を必要とするので、昭和70年までに立地場所を決める必要がある。それ以前に実施すべき研究開発を行なうための地下研究施設は早期の実現が望まれる。

This is a blank page.

図-4.3.1 処分事業スケジュール案(2015年に処分場建設開始の場合)



処分必要な固化体の累計本数

This is a blank page.

5. 処分コストの概算

5.1 検討ケース

処分コストを概算するに当たり、下記変動パラメータによるコストの変化を検討できるように検討ケースを設定する。

- 変動パラメータ：① 貯蔵期間・上限温度
② スケールファクター
③ 岩種

①の貯蔵期間・上限温度は熱的な条件（発熱条件・許容温度）による設計の変化がコストに及ぼす影響を検討するパラメータである。

②のスケールファクターは、処分施設の容量を大きくした場合のコストの変化を検討するためのパラメータである。1万本・2万本・4万本の場合について比較する。

③の岩種については、き裂の性状が岩体の特性に強く影響を与える硬岩の代表として花崗岩類を、また均質な軟岩の代表として泥岩類について処分コストを比較する。

検討ケースは以上の条件を考慮して表-3.3.1に示す6ケースとする。

5.2 コスト概算結果

コスト概算結果を以下にまとめる

(1) 貯蔵期間・上限温度の異なる場合（ケースⅠ・Ⅱ・Ⅲ）

花崗岩類の岩盤に容量1万本の処分施設を建設する場合の熱的な条件による固化体1本当たりの処分コストの相異は以下のようによまとめられる。

- ① キャニスター周囲の岩盤の許容上限温度を100°Cとした場合
- ・30年貯蔵後の処分コスト：ケースⅢ=15,900万円/本
 - ・100年貯蔵後の処分コスト：ケースⅠ=3,600万円/本
 - ・500年貯蔵後の処分コスト：ケースⅠ=3,600万円/本
- ② キャニスター周囲の岩盤の許容上限温度を300°Cとした場合
- ・30年貯蔵後の処分コスト：ケースⅠ=3,600万円/本
 - ・100年貯蔵後の処分コスト：ケースⅠ=3,600万円/本
 - ・500年貯蔵後の処分コスト：ケースⅠ=3,600万円/本

貯蔵期間が長い程、また上限温度を高く設定できる程、固化体1本当たりの処分コストは小さくなる。しかし、貯蔵期間100年以上の場合については今回の検討範囲では有意差を認めることができなかった。

(2) スケールファクターの検討

花崗岩類の岩盤に8 mピッチで処分ピットを設ける場合の処分施設について、処分容量1万本(ケースⅢ)、2万本(ケースⅤ)、4万本(ケースⅥ)の3つの場合の処分コストを算定して比較した結果、下記のように容量が大きくなるに従って、固化体1本当りの処分コストは小さくなることがわかった。

1万本 : ケースⅢ = 5,900 万円/本

2万本 : ケースⅤ = 5,100 万円/本

4万本 : ケースⅥ = 4,600 万円/本

(3) 岩種が異なる場合(ケースⅢ・Ⅳ)

容量1万本、処分ピット8 m間隔の場合について、硬岩でき裂性の岩盤の代表として花崗岩類(深さ1000 m)を、軟岩で非き裂性の代表として泥岩類(深さ200 m)を選び、それぞれの処分コストを選び算定した。

固化体1本当りの処分コストは下記のように泥岩類の場合の方が高い。

花崗岩類: 深さ1,000m, 処分ピット8 m間隔, 容量1万本: ケースⅢ = 5,900 万円/本

泥岩類: 深さ200m, " , " : ケースⅣ = 8,000 万円/本

6. 岩盤内空洞の耐震性

放射性廃棄物の地層処分に関連して、トンネルや地下発電所などの岩盤内空洞の地震観測および耐震性に関する解析的研究の現状を文献に基づいて調査した。今回の文献調査から得られたおもな結果を述べると以下のようになる。

(1) 地震観測の結果について

- ① 風化層では卓越周期が存在して地震動は増幅されるが、クラックなどの少ない硬岩部での増幅は少ない。
- ② 岩盤内の加速度に比べると、坑口では平均的にみて2倍程度になる。
- ③ トンネル継ぎ目の軸ひずみは、他の部分の軸ひずみに比べて約10倍程度大きくなっており、継ぎ目で軸ひずみが吸収されている。
- ④ クラウン部の円周方向のひずみは、軸ひずみに比べると大きい。
- ⑤ 地下発電所の空洞内では、加速度が若干(1.2~1.5)増幅される傾向がある。
- ⑥ ひずみ波形と速度波形はよく対応している。
- ⑦ 地下空洞の変形モードは必ずしもせん断型ではなく、一様な膨張・収縮型の挙動を示すこともある。

(2) 耐震性に関する解析的な研究について

- ① 地震波の波長が非常に長い場合は、反射波の影響が少ないため、空洞の設計を静的に行ってもとくに問題はないと考えられる。
- ② 入射波の波長が円孔の半径の十数倍のときは、反射波の影響が現れるので、静的設計の場合は多少余裕を持たせるべきであろう。
- ③ 覆工を厚くしてもあまり得策ではない。
- ④ 動的解析結果と静的震度法による解析結果は比較的よく対応しており、静的震度法による設計は合理的であろう。

これらの結果から、岩盤内空洞は、従来の経験が示すように耐震的であるということが、今回の調査でも裏付けられた。さらに、岩盤内での加速度の増幅も地表付近にくらべると小さいことも示された。したがって、岩盤内における放射性廃棄物の地層処分は、地震の影響という面からみると、岩盤が堅固であればあるほど地上にくらべて有利であると判断される。

しかしながら、岩盤内空洞の耐震性に関する本格的な研究は、最近始まったばかりであり、岩盤内での地震観測や耐震性に関する解析的な研究の数はまだ少ない。特に、地下発電所の空洞が今までに大地震を受けた例がほとんどないこと、および、放射性廃棄物の地層処分で想定している地表面下500m~1000m付近における地震観測例は少なく、地下深部での地震動特性(周波数, 振幅, 増幅)や空洞の地震挙動に関しては不明な点が多い。

したがって、今後は地下深部での地震観測を行い地震動特性を把握するとともに、これらのデータを用いて震度法や動的解析法など耐震設計手法を検証し、合理的な設計方法を確立する必要がある。さらに、解析については、解析手法そのものの研究と並行して、岩盤の物性評価法、クラックなど不連続面を含む岩盤のモデル化の方法あるいは安定性の判定基準なども研究すべきであろう。

7. 今後の課題

昭和58年度は前年度までの研究成果をもとにして、詳細な熱解析とレイアウト設計を実施し、コストを概算した。

処分施設のレイアウトを設計する目的で現在まで種々の検討を行ってきたが、力学的安定解析・耐震解析・熱解析の検討は設計条件を代表的なものに設定した場合のものであり、具体的な実測データに基づいたものではない。また、今後は下記のような未検討項目が残されている。

- ・ 深部岩盤の地震時挙動データが得られていない。
- ・ 深部岩盤中の地下水挙動を把握できていない。
- ・ 熱解析において地下水との相互影響を評価できていない。
- ・ 上限温度に関する設計条件を確定できていない。
- ・ 掘削による岩盤のバリア性能の損傷を評価できていない。
- ・ 岩盤および工学バリアの設計基準を設定できていない。

地層処分施設をより現実的な設計とし、処分場としての性能を定量化して設計研究を完成させるためには、他の研究の成果を応用するとともに、いくつかの研究課題を解決しなければならない。

いずれの研究についても地下研究施設における現実のデータ入手やメカニズム研究およびモデルの検証が有効に寄与するものと考えられる。