

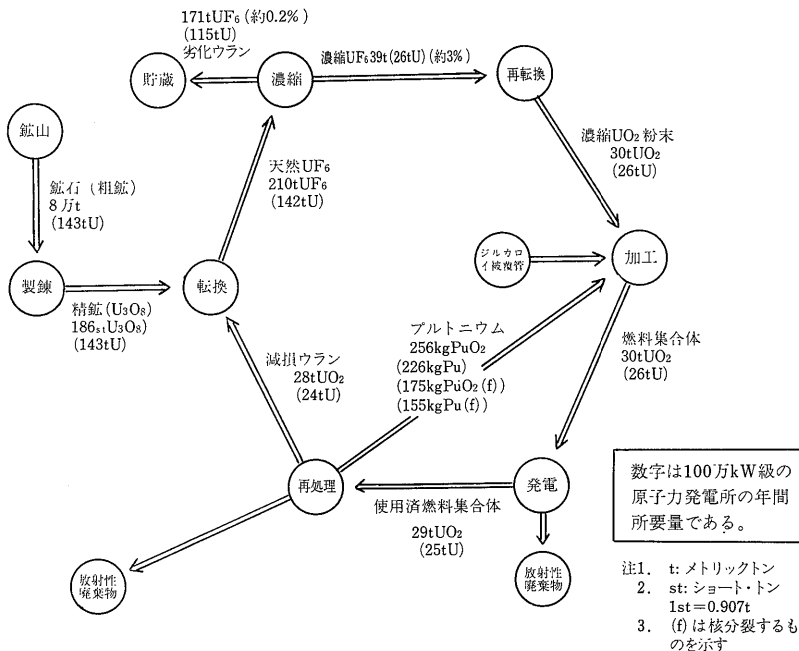
海外諸国における地層処分に関する研究開発

柏木 高明 (三菱金属株式会社)
Takaaki KASHIWAGI

今日は主に欧米の国々が放射性廃棄物の地層処分についてどうしているかということをお話しさせていただきたいと思います。始める前に「廃棄物とはどういうものか」というところから入らせていただくために、核燃料サイクルというものについて説明させていただきます(第1図)。始めに、鉱山からウラン鉱石を採掘いたしまして、精練→転換→濃縮→再転換、それから核燃料に加工いたしましてそれをういて発電する。その原子力発電所から出た使用済燃料を再処理いたしまして、また転換の方へもっていくという一つのサイクルになっております。その廃棄物と申しますのは、簡単にいうと、原子力発電所から出るものを主に低レベル廃棄物再処理工場の廃液から出ます廃棄物を高レベル廃棄物というふうになっております。原子力発電所関係からは気体、固体、液体という形で低レベル廃棄物ができますがそれらの主として固体廃棄物を発電所のサイトの中に保管いたしております。それを海洋処分それから陸地処分という方にもっていく。これが主に低レベ

ルの処分でございます。それから再処理の工場から出ます主に液体は廃液はタンク貯蔵いたしております。それを固化して地層の中に処分する。これが高レベル廃棄物と考えていただきたいと思います。

ここで主に高レベル廃棄物についての事を今日はお話しさせていただきたいと思いますが、処分の形態にどんなものがあるかという事をここでちょっとお話しさせていただきます(第1表)。まず1番目に地層処分がございます。これは御存知のように地層の深部に閉じ込めるといふ考え方でございます。2番目が海洋底処分と申しております。深海の堆積層の中に入れてしまうということでございます。3番目に Very Deep Hole Disposal があります。これは廃液をそのまま小型パッケージにしまして深い孔の中に入れてしまう。一種の地層処分みたいなものでございます。4番目が岩石熔融処分と申しまして、高レベル廃液は非常に熱がございましてそのまま地層の中へ埋め込みますとまわりの岩石が熔融いたしまして一種の固化体をつくる、というよう



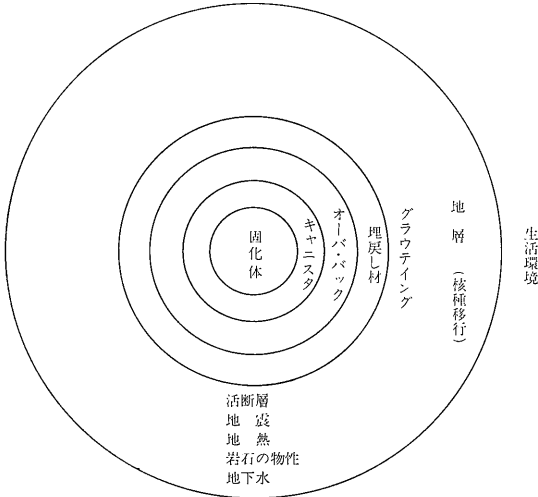
第1図 核燃料サイクル図.

な形で処分する方法。この一つの変形がオーストラリアの Ringwood 教授の提唱している人工岩石中に廃棄物を入れてしま安定な形にして処分する方法です。5番目に島内地層処分：これは地層の中でも特に島をねらってやるという方法で一種の地層処分の変形でございます。6番目に Ice-sheet Disposal：これは極地の数千mあるような厚さの氷の中に廃棄物を入れてしまおうという考えで、熱のためどんどん解けていって下の岩盤まで到着するであろうということでございます。

7番目が Deep Well Injection Disposal：これは深い井戸を掘ってそのの中に入れてしまう。8番目に Space Disposal と申しまして、宇宙ロケットに廃棄

第1表 各種処分法の概念と現状

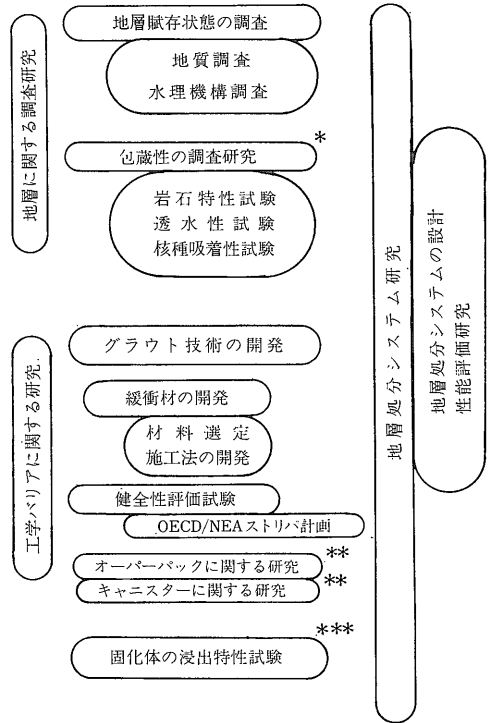
No.	処 分 法	概 念 と 現 状
1	地 層 処 分 GEOLOGIC DISPOSAL	地下深層の定安な岩体中に設置した処分施設に、適切に処理した固化体パッケージを閉じ込める。現在最も有望と見られていて開発中である。
2	海 洋 底 下 処 分 SUBSEABED DISPOSAL	深海底の安定な堆積層あるいはその下の基盤岩中に穿孔して埋め込む。地層処分の変形といえるが、海洋底、海洋底下地質等については不明な点が多いので国際協力下で研究され、その可能性について検討しようとしている。地層処分に比べまだ遙かに遅れている。しかし、将来、これを拡張しプレートテクトニクス説と結びつけて、極めて長期間（数億年のオーグ）安定な、拡大移動する深海底地層中に処分することが、理論的にも技術的にも可能となれば最も望ましい方式といえよう。
3	深 穿 孔 処 分 VERY DEEP HOLE DISPOSAL	安定で透水性の低い岩体中の3,000～15,000m位の深い孔の中に固化体パッケージを埋設する。技術的にも不明な点が多いが、米国IRG報告では石油およびメタンガス資源との関連で調査することを勧告している。
4	岩 石 溶 融 処 分 ROCK MELTING DISPOSAL	廃棄物中のFPの崩壊熱によって周囲の岩石を溶融させ、その中へ廃棄物も溶かし込んだ状態で深くまで埋込みそこで固まらせる。技術的に不明な点が多いが、天然現象としてのOKLO鉱山や人為現象としての地下核爆発の際の状況に似た所がある。
5	島 内 地 層 処 分 ISLAND DISPOSAL	地層処分や深穿孔処分の場所として人間の環境からなるべく離れるよう孤島を選ぶという考えで、旨くゆけば国際処分場としても機能しうる。
6	氷 床 処 分 ICE-SHEET DISPOSAL	極地の1,000mの厚さの氷に蔽れた地点に数10ないし数100mの孔をあけてその中へ固化体を置き、上から水を入れて凍らせて孔を密封する。FPの崩壊熱で氷が溶け固化体は基盤岩まで沈下する。氷床の安定性や将来の気候の変化に関する情報が極めて不確実であるため現状では処分に適しないと見られ、考え方だけで調査は行なわれていない。
7	深 井 戸 注 入 処 分 DEEP WELL INJECTION DISPOSAL	液体またはスラリー状態のままの処分が考えられ、頁岩などの厚い層が地下水を絶縁している箇所を選ぶ。この方法は石油工業で開発された液体廃棄物の処分技術であって、ソ連では低レベル廃液で、米国ではセメントスラリーの形で実証中である。
8	宇 宙 処 分 SPACE DISPOSAL	宇宙空間、例えば、地球と金星の間の軌道に廃棄物を詰めたロケットを打込む。少くも今後100年以上、地球や金星がそのロケット軌道を横切る恐れはないとされているが、現状では打上げ失敗の確率が僅かながらあり、また費用も莫大となるので現実的ではない。
9	群分離および核種転換 WASTE PARTITIONING and TRANSMUTATION	廃液中の放射性核種の特性によっていくつかのグループに分け、それらをそれぞれの特性に応じて適切に処分しようとするもの。分離したTRUグループは長寿命のため、これに中性子を当て核分裂させて短寿命核種に転換し、処分を容易にしようとするのが核種転換であるが、現状ではまだ問題が多い。



第2図 マルチバリア・システム。

物を入れて飛ばして宇宙空間に処分してしまうという方法です。これは技術的・経済的に問題視されています。それから9番目は Partitioning と Transmutation といって群分離や核種転換をいたしまして 処分するにもっとやさしいような形で半減期が短くなるようなものに変え より処分しやすくするという考え方です。

このようにいろいろな形態がございすけれども1番現実的なのは 現在のところ地層処分と考えておるわけでございます。そこで地層処分のシステムというのはどういふのがあるかということの説明いたします。まず放射性核種を主に固化体（ボロン・シリケートみたいなガラス固化体）にいたします。それをキャニスターという一つの工学的バリアであるステンレス・スチール あるいはもっと高級な金属の 1cm位の厚さのボンベみたいな中に入れます。それからそれを場合によってはさらにオーバーバック つまり上にチタンなどの金属のオーバーバックをする。それを地層の中に穴を掘って入れるわけですが そのまわりに緩衝材といたしましてベントナイトとか石英の粉を入れる。もし割れ目があった場合にはその付近をグラウトすると それが一つの工学バリアになるというように考えております。それで核種がもしも漏れた時にはどうなるかという 最後にはまた周りの地層という天然バリアがあるわけです。これらを総称して第2図に示すようにマルチバリア・システムとっております。いずれにしても高レベル廃棄物というのは非常に長寿命なものでございすから 人間の生活環境に出てこないように閉じ込めればいいわけでございますので それを工学バリアと地層の天然バリアでもって防ごうというのがマルチバリア・システムでございます。 どういう研究項目があるかと申し



第3図 地層処分システムの研究課題。

- *第1段階では一般的な岩石の特性 第2段階以降はサイト固有の岩石の特性として評価する。
- **固化処理・貯蔵技術開発計画。
- ***固化処理技術計画。

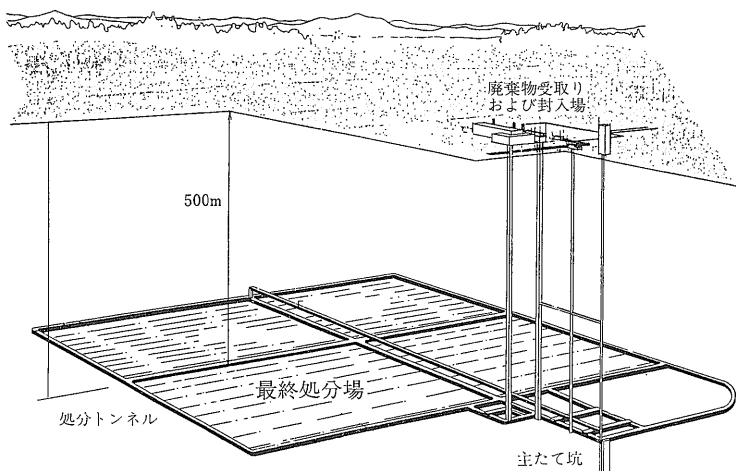
ますと 第3図に示しますように固化体の浸出性の特性試験 工学バリアに関するものとして その上にかぶせるキャニスターに関する腐食の試験研究等があります。オーバーバックにしましても同じでございます。緩衝材とかグラウト技術とかそれから全体をまとめました健全性の評価の研究試験などがございす。また 地層に関する調査といたしましては地層の賦存状態の調査 その中には地質調査 水理機構の調査が入ります。活断層 地熱等の調査も含まれます。それから包蔵性の調査研究 これは岩石特性とか透水性・熱伝導度あるいは岩石の中の各種の吸着性その他の試験をやらなければならない。 こういうものが試験項目に今挙げられているものでございす。 これ全体を地層処分システムとして我が国では昭和51年ごろから研究を実施しているところでございます。

しからば今どういふようなシステムで処分場というのは考えられているかと申しますと 1年間で百万kWの発電所から出てくる廃棄物の固化体は30本くらいのキャニスターしかないということでございますが 熱があ

りますから1本1本を離して埋め処分しなくてはなりません。地表から500-1000mの深度の立坑を掘ります。それに対するサービス立坑あるいは通気の立坑などいろいろな施設がいます。一つの坑道から下向けに数m間隔で太いボアホールを掘りましてその中にキャニスターに入れた高レベルの廃棄物の固化したものを埋めその周りに緩衝材を入れます。この概念図が第4図に示すようなものになると思います。それから監視という時期が過ぎればそれを全部埋めもどしてしまって人間の管理からはずすというようないつのシナリオが今考えられております。これについての試験は

あとで述べますが スウェーデンのストリパ (Stripa) という旧鉄鉱山の坑内でやっております。

本題の欧米における研究開発が今どうなっているかについてこれから入らせていただきたいと思ひます。この計画について第2表および第3表に従って順に御説明いたします。アメリカは対象の岩石といたしまして岩塩があります。その次が玄武岩 その次が凝灰岩 花崗岩というようになっています。レーガン政権になりましてからはカーター政権時代よりも非常に active になっております。1982年に Nuclear Waste Policy Act という一つの法律ができました。この法律は1983年の1月7日に大統領が署名しまして実際に発効になったものでございまして ようするに高レベル廃棄物の処分に向けてのアメリカとしての責任とか役割あるいは政策これからのスケジュール そういふものを明確にした法律でございまして。これによりまして現在は地層処分の一つの方向づけが出されておりました。来年の1月1日には アメリカとして3つの岩石タイプと5つのサイトを大統領が提案するというようになっております。その後 1987年の3月31日までに 最初の disposal をする場所を提案することになっています。我々はこれをレポジトリ (Repository) といっております。それからその2年後の1989年7月には第2番目のレポジトリの予定地として 3か所のレポジトリをまた大統領が提案しなければいけないということになっております。そういうようなことをいたすためには どういうお金のフローが必要かということも この法律は述べておりました。要するに Nuclear Waste Fund というものを現在は使っております。これは原子力発電所で生産されます電気に対しまして 1kWあたり1ミル (0.1セント)日



第4図 地層処分場の概念。

本円ですと25銭くらいになりましようか その1kWあたりについてそれだけを電力会社は積立てをしなくてはいけぬ。それを財務省に支払うと それをファンドにいたしまして 今申し上げたようないろいろな施策それからレポジトリをつくるという研究開発を進めていくという現況でございまして。ちなみに1983年度にはどれくらいファンド収入があったかと申しますと だいたい9800万ドル それから1984年の今年はまだ出ておりませんけれども だいたいの予想といたしましては4億ドル以上のファンド収入があるだろうといわれています。これに對しまして現在3か所のサイトを提案するというのはどういふ所かと申しますと だいたいのところ 1つは basalt でございまして これはワシントン州のハンフォードというところの basalt が一つの候補であるといわれています。それからネバダの これは核実験をやった近くで そうとう厚い tuff がございまして。その tuff が 2番目の所。3番目といたしましてガルフ・コーストとかユタ州のパラドックスベズンなどのパーミアンの岩塩層です。それらの3つについて恐らく提案が出るだろうと予想がされております。これには granite が一つ抜けておりますが アメリカの中でもいろいろな派がございまして granite 派はこれをもっと入れるべきであるということで まきかえしにかかっております。それでは研究開発はどういふところがやっているかと申しますと それは DOE (エネルギー省) が担当でございまして。貯蔵とか処分も DOE が担当しております。ただ 実際に仕事をしておりますのはいろいろな大学の研究機関・USGSそれからユニオンカーバートなどの民間企業でございまして。

それから次に非常に熱心にいろいろな研究開発をして

第2表 各国の高レベル放射性廃棄物地層処分計画

	日本	アメリカ	スウェーデン	スイス	フランス	西ドイツ	イギリス
対象地層	花崗岩 凝灰岩 頁岩 輝緑岩 石灰岩 粘板岩・片岩	岩塩層 玄武岩 花崗岩 凝灰岩	花崗岩	花崗岩	花崗岩 頁岩	岩塩層	花崗岩 粘土層
目標設定時期	～1984 有効な地層選定 ～1995 試験地選定 ～2015 試験的処分	～1983 3サイトを選定 ～1985 ホーリング完了 ～1989 T/E施設建設	～1990 サイト選定 ～2020 処分場運開 ～2050 処分場閉鎖	～1984 地質調査 ～2000 サイト選定	～2010 処分場運開	～1990 処分場運開	～1990 サイト選定 ～1995 試験場処分
実施中の 原位置試験	下川計画(輝緑岩) 細倉計画(凝灰岩)	ハンフォード(玄武岩) ネバダ(凝灰岩等) WIPP等(岩塩層)	ストリパ(花崗岩)	グリムセル(花崗岩)		アッセ(岩塩層)	コンウォール(花崗岩)
	OECD/NEASTトリバ計画(花崗岩)						
地 表 探 査	進行中	完了	完了	進行中	進行中	完了	なし
ボーリング調査	1990～	進行中	進行中	進行中	進行中	進行中	なし
主なる実施期間	PNC	ONWI	S K B F	NAGRA	ANDRA	P T B	UKAEA
	廃液タンク貯蔵(3年) ↓ 固 化 ↓ 貯 蔵 ↓ 処 分	廃液タンク貯蔵 ↓ 使用済み燃料 ↓ 固 化 ↓ 貯蔵(50年) ↓ 処 分	返還固化体 ↓ 使用済み燃料 ↓ 貯蔵(30年) ↓ 処 分	返還固化体 ↓ 中間貯蔵(30年) ↓ 長期貯蔵(50～100年) ↓ 処 分	廃液タンク貯蔵 ↓ 固 化 ↓ 中間貯蔵 ↓ 長期貯蔵(仮処分)	廃液タンク貯蔵(5年) ↓ 固 化 ↓ 一時保管(4年) ↓ 処 分	廃液タンク貯蔵 ↓ 固 化 ↓ 貯蔵(数年) ↓ 中間貯蔵(50年～150年) ↓ 長期貯蔵(1000年) ↓ 処 分
(参考) 管理シナリオ							

第3表 高レベル放射性廃棄物の処理・貯蔵・処分の管理体制

	米 国	英 国	フ ラ ン ス	西 独	ベルギー	スウェーデン	ス イ ス	カ ナ ダ	イタリア・オランダ・ソ連
高処理・レベ ル貯蔵	DOE (エネルギー省) ONRC (基準はEPAも作成) DOE (Energy Technology)	DOE (環境省) (補佐 Wilkinson 委員会)	CEA (原子力庁)	BMFT (研究技術省)	政府 (厚生省)	政府	ASK	カネダ ○エネルギー鉱山資源省	イタリア・オランダ・ソ連
規 制	ONRC MAFF (基準はEPAも作成) NRPB DOE (Energy Technology)	ONI MAFF NRPB UKAEA	SCSIN (技術的支援) IPSK CEA	BMI (内務省) RSK SSK BMFT (パイロットプラントの運転まで) DWK	SKI SSI SKBF (OPRAVの協力) Eurohemic Belgoprocess Belgowaate (将来) Belgowaate (将来)	SKI SSI SKBF (OPRAVの協力) Eurohemic Belgoprocess Belgowaate (将来) Belgowaate (将来)	ASK NAGRA EIR 海外再処理 海外再処理 海外再処理 海外再処理 海外再処理	カネダ ●AECCL	
R & D	DOE (Energy Technology)	BNFL BNFL DOE (将来は●NWD C 設立)	COGEMA COGEMA ANDRA	PTB (保管はXDWK) PTB	国内再処理再開 Belgowaate (将来) Belgowaate (将来)	SKI SSI SKBF (OPRAVの協力) Eurohemic Belgoprocess Belgowaate (将来) Belgowaate (将来)	NAGRA NAGRA (連邦政府)		
処 理	民間再処理は無期延期	国内再処理 国外からの再処理も委託	国内再処理 国外からの再処理も委託	国内再処理を予定 現在海外再処理	国内再処理再開 現在海外再処理	SKI SSI SKBF (OPRAVの協力) Eurohemic Belgoprocess Belgowaate (将来) Belgowaate (将来)	国内再処理はしない 海外再処理	当面はSF貯蔵 (将来は再処理の可能性あり)	
処 理	種々の固化処理プロセスを研究中	ガラス固化 (HARVEST or AVM)	ガラス固化 (AVM, AVH)	ガラス固化 (PAMELA or AVM)	ガラス固化 (PAMELA or AVM)	SKI SSI SKBF (OPRAVの協力) Eurohemic Belgoprocess Belgowaate (将来) Belgowaate (将来)	国内再処理はしない 海外再処理	ガラス固化 (再処理した場合)	
貯 蔵	RSSFの開発を進めてきた	水冷ポンドで貯蔵 (20~25年) (HARVESTの場合)	短期貯蔵 (5~10年) 中間貯蔵 (20~30年)	自然空冷貯蔵 (4年~)	空冷貯蔵 (30年)	SKI SSI SKBF (OPRAVの協力) Eurohemic Belgoprocess Belgowaate (将来) Belgowaate (将来)	調査研究中	SFはコンクリートキャスクによる空冷貯蔵	
処 分	地層処分を最優先 (代替案は9種)	地層処分が海洋底処分	地層処分 (長期貯蔵)	岩塩層への処分 (最終貯蔵)	地層処分 (最終貯蔵)	SKI SSI SKBF (OPRAVの協力) Eurohemic Belgoprocess Belgowaate (将来) Belgowaate (将来)	地層処分 (最終貯蔵)	地層処分	地層処分 (イタリア)
備 考		政策：環境白書 (Cmnd. 6820, 1977) 貯蔵前に全部オーパーンバック ECの共同研究 (処分)花崗岩	ECの共同研究 (処分)花崗岩	州政府からの規制 IRS, VITUV ECの共同研究 (処分)岩塩層 NEZ計画の遅れに備えてSF貯蔵施設を計画	ECの共同研究 (処分)粘土層	SKI SSI SKBF (OPRAVの協力) Eurohemic Belgoprocess Belgowaate (将来) Belgowaate (将来)	政策：ブラウンベーパー ECの共同研究 (処分) イタリア オランダ粘土層岩塩層		

おります国はスウェーデンでございます。花崗岩を対象といたしまして処分のいろいろな研究・試験・開発をしておりますが この国は原子力発電所の新設は 1980年の国民投票によりまして 現在あるのと計画中の12基の原子炉については実施してもいいけれど それ以後はスウェーデンは必要じゃないということが一応決まっております。これも1985年の投票の時どう変わるかわかりませんが 現在は使用済みの燃料そのものを地下の一つの空洞の中に一時貯蔵いたしまして それを2020年ごろに処分場を運開して処分をしたいというふうを考えております。場所その他はまだ決まっております。

OECD NEA にヨーロッパ諸国 日本も入っておりますが これらの国を中心として廃棄物関係の研究計画がございまして 現在はフェーズ1が終わり 第2フェーズに入ろうとしております。その中心的な場所がストリパ (Stripa) というスウェーデンのストックホルムの北西約 180 km くらいのところ です。昔の鉄鉱山の坑内を利用いたしまして この試験場の岩盤は全部 granite でございますが そこでいろいろな試験を今やっております。相当のお金をかけましてここに日本 アメリカ スウェーデン スイス フランスその他にフィンランド カナダと7か国が入っております。第2フェーズは1983年から始まっております。これが約4年間でございまして約18億円くらいの計画が出されています。これは日本も参加しております科学技術庁傘下の動力炉核燃料開発事業団でございます。第2年度はこの7か国の他にイギリスが参加する予定になっております。ここで 日本のこともあとで申し上げますが アメリカにつきましては Office of Nuclear Waste Isolation という組織が実施しておりますし スウェーデンでは核燃料供給公社 SKBF という一つの組織が政府の下でやっている。それからスイスは同じく花崗岩を対象として研究中でございまして やはり2000年くらいにはサイトを選定したいということでございます。これは実施機関といたしましてはナグラ (NAGRA) という国立の組合みたいところで 電力会社関係なども入っているような団体でございます。フランスは花崗岩と頁岩を対象としてございまして やはり2000年以後に処分場を立地したいということでございます。これはアンドラ (ANDRA) と申しまして フランス原子力庁の下部機構の廃棄物管理庁でありましてここが実施担当していると

いう現状でございます。それから西ドイツはやはり岩塩層を対象にして研究しております。処分場所も一応2000年位を目標ということでございますが 実際に試験いたしておりますのはローワザクセン州のアッセ (Asse) というところに昔の岩塩鉱山がありまして その坑内採掘跡を利用して試験をしております。現在は一時試験を中止しておりますけれども これは低レベル 中レベル 高レベルをいっしょにやっております。実施機関としてはPTB (連邦物理工学研究所) でございます。それからイギリスは花崗岩と粘土層を対象しております。これも現在あまり active ではございませんけれども UKAEA という国の原子力機関が実施機関になっております。コンウォール地方の granite その他が一对象になっているところでございます。もう一つカナダも granite を対象にしてございまして AECL (カナダ原子力公社) が実施機関になっております。この下に Geological Survey of Canada がやっております。申し遅れましたがスウェーデンもやはり地質調査所が相当の部分を担当している研究開発しております。

これから少し日本のことも簡単に申し上げます。日本は現在原子力委員会の放射性廃棄物対策専門部会がまとめたスケジュールがございまして5段階に分れてやっています。第5図を御参照願います。今は第1段階の最終年度にあっています。これは可能性のある地層の調査というのが1984年まででございます。1985年から第2段階の有効な地層の研究の調査というのが10年間続けられます。第3段階といたしまして模擬固化体現地試験が昭和70年 (1995年) から始まります。第4段階として実物の固化体の現地試験が昭和80年 (2005年) から始めて10年間 最後の段階の5段階が試験的処分というのが昭和90年 (2015年) から開始 というのが現在の日本のマスタープランでございます*。現在までどういふことをやってきたかと申しますと 地層に関する調査研究 工学バリアに関する研究 地層処分システムの研究というのがメインのテーマでございまして 動力炉・核燃料開発事業団が主体になってやっております。

安全評価は 安全評価に関する試験を日本原子力研究所が主に担当しています。これでだいたい世界の高レベル廃棄物の研究開発をざっと駆足で御説明させていただきました。

* 注 日本の放射性廃棄物処理処分方策は 本講演後 (昭和59年8月) 改訂され 4段階に短縮し スピードアップが計られている (第6図)。現実的問題となってきたことを反映して タイトルも地層処分技術開発スケジュールとなったが 基礎的研究も延長・強化されている。

