© 1985 ISIJ

展望

オイルシェール開発の現状と将来

内田俊春*

Present Status and the Future View of the Research and the Development of Oil Shale Technology in Japan

Toshiharu UCHIDA

1. オイルシェール開発の歴史

オイルシェールはオイルサンドと並んで石油代替エネルギーとしてもつとも有望な資源といわれている．ベクテルの調査によると，石炭液化あるいは石炭ガス化などより，はるかに経済性の実現が早いのではないかとみられている．

オイルシェールはかなり古くから知られていた資源である．1300年代にはすでに医薬品として使用されていたという歴史もあるが，1694年にはすでに，イギリスで乾留技術のパテントが登録されている．1802年にはオーストラリアでオイルシェールが発見され，戦後の1962年まで断続的に生産されてきたといわれる．1840年にはフランスでオイルシェールから油が生産されており，1850年代に入るとアメリカでかなり活発な生産が行われ，スコットランドでは，いわゆる工業生産というかたちで生産が開始された．

スコットランドでは，1956年までつまり戦後まで長い間生産が続けられてきた．一方，アメリカは，1859年に石油を井戸から汲み出す技術が開発され，しかも大規模油田が開発されるといつた事情もあつて，石油に直ぐ取つて代わられ，オイルシェールの役割は極めて短い期間で終わつた．1860年にはブラジルも生産を開始している．

今世紀に入つて1917年頃，アメリカでふたたびオイルシェールが脚光を浴びた．コロラドを中心に多数のレトルト乾留炉が建設され，1920年から24年にかけて12 000 barrelの生産が記録された．1926年から29年の間に3 600 barrelの生産がコロラドでなされたという記録もある．いずれにせよそのころテキサスの大油田が発見されたりして，またオイルシェールは短期間で生産が中止された．

日本は1930年代に満州で大々的な開発を行つた．撫順のオイルシェールによるシェールオイルの生産である．このときにはスコットランドから技術を導入するか自己開発で進めるかと大論争があつた．

余談であるが，石油は英語でpetroleumというが，これは岩石を表すpetroに油という意味のleumがついたものである．これはもともとスコットランドでシェールオイルの生産が始まつたときに，岩石から取つた油であるという意味でpetroleumとつけたといわれている．ところが1859年アメリカでキャプテン・ドレークが油を井戸で生産する方法を開発したときに，petroleumという名前を借用したという．歴史の皮肉であろう，今では本家の方がシェールオイルと改名せざるを得なくなつている．

2. エネルギー資源としてのオイルシェール

オイルシェールの資源の賦存状況をTable 1に示す．

オイルシェールはオイルサンドのように岩石中に油状物質を含んでいるものではなく，ケロゲン(kerogen)と呼ばれる不溶性有機物に富む(数%～数10%)堆積岩である．ケロゲンの起源物質としては，高等植物や藻類，動・植物プランクトンの遺骸などがあげられている．オイルシェールの鉱床の状態を，模式的に示すと，Fig. 1のようになる．オイルシェールの採掘は，地表面のトップソイルならびにオイルシェール鉱床を覆う土砂岩石すなわちオーバーバーデンを取り除いて行われる．

オイルシェールの品位は，採掘コスト，採油コスト，廃シェールの埋めもどしコスト等に大きく関係する．

オイルシェール資源として一般に多量に賦存する10～25 gal/t程度の鉱床は，層厚が厚く，かつオーバーバーデンの層が薄いなど，露天掘コストが極めて安い場合のほかは，当分の間経済的に稼行対象にはなり得ないと考えられている．従つて稼行の対象に考えられるのは，層の厚さとか賦存状況でもちろん違つてくるが，だいたい25 gal/t以上と考えられているが，これは95 l/t (0.6 barrel/t)に相当する．したがつて，若干のロス等を考えると，2 tのオイルシェールから1 barrelのオイルが生産されるという感覚である．

いずれにせよ，原始埋蔵量あるいは可採埋蔵量とも非常に大きな量であり，しかもアメリカがその資源の大半

昭和59年10月23日受付 (Received Oct. 23, 1984) (依頼展望)

* 日本オイルシェールエンジニアリング(株) (Daiichitoyokaiji Bldg. 1-16-3 Nishishinbashi Minato-ku 105)

Table 1. Oil shale resources in the world.

Reserves	In-Place				Recoverable	
Estimated by / Area	DUNCAN/SWANSON (1965)[1]		U.S.G.S[2] (1976)	IIASA[3] (1981)	DUNCAN/SWANSON[4] (1965)	WEC[5] (1980)
	>10 gal/T	>25 gal/T				
North America	2 120	520	2 044.2	2 044.2	80	204.40
South America	750	—	801.2	802.4	50	0.62
Africa	90	90	101.2	195.2	10	54.03
Asia	84	70	29.9	31.7	20	20.55
Europe	46	40	154.5	141.0	30	28.12
Oceania	1	—	0.3	0.6	—	0.01
Total	3 120	720	3 130	3 278	190	337.73

(billion barrels)

1) 4) *D. C.* DUNCAN and SWANSON: U.S.Geol. Survey Circ. 523 (1965)
2) U.S.Geological Survey 1976
3) 6th IIASA Resources Conference (1981)
5) Survey of Energy Resources 1980, 11th World Energy Conference (1980). Synthetic Fuels: Worldwide Outlook for the 80'S (1981)

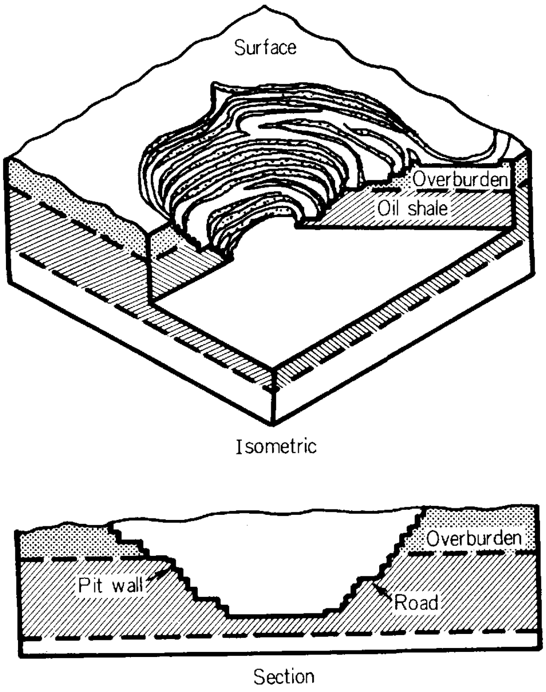


Fig. 1. Schematic open pit development.

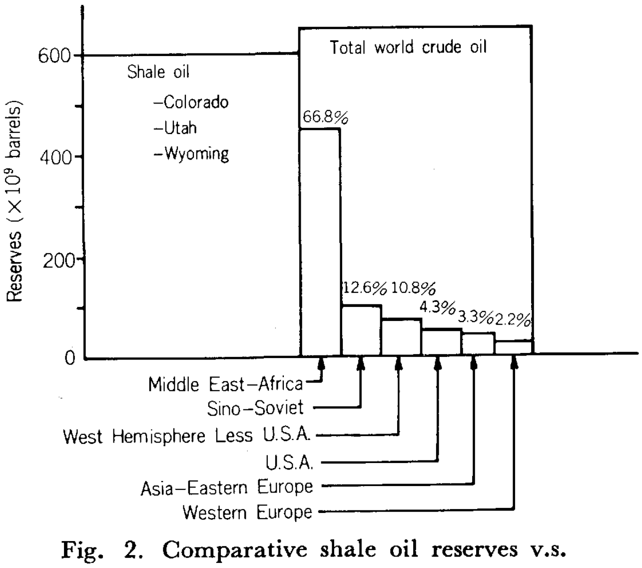


Fig. 2. Comparative shale oil reserves v.s. crude oil reserves.

を占めている．ただ，オイルシェールの資源調査はまだ必ずしも十分に行われているとはいえず，例えばオセアニアなど調査の度に資源量が増えている．

Fig. 2 はアメリカのオイルシェールの埋蔵量を世界の石油の埋蔵量と比較して示したものである．

オイルシェールの埋蔵量は 6000 億 barrel, 世界中のクルード・オイルの埋蔵量にほぼ匹敵する．しかもそれが，コロラド，ユタ，ワイオミングの3州にまたがる鉱床だけである．

地図で見ると，だいたい関東平野ぐらいの鉱床が三つないし四つ，日本の面積の半分近くがオイルシェールで埋まつている．グランドキャニオンの上流で，コロラド川が海抜 5000 ft (1700 m) あたりを流れているが，約 8000 ft の高原が連なつている．つまり 3000 ft の落差

Table 2. Major oil shale projects in the world.

	Project	Developer	Proposed technology	Production target (bbl/d)
USA	PACIFIC	Superior, Sohio and Cleveland Cliffs	Superior circular grate	15000 by 1987
	PARAHO-UTE	Paraho Development and 14 industrial sponsors	Paraho	11300 by 1985 39500 by 1990
	LONG RIDGE	Union Oil	Union "B"	10000 by 1983 90000 by 1994
	WHITE RIVER	Sunedco, Phillips and Sohio	Union "B"	14000 by 1989 100000 by 2000
	SAND WASH	Tosco	Tosco II	48000 by 1988
	COLONY	Exxon	Undecided	suspended
	CLEAR CREEK	Chevron and Conoco	Chevron STB	10000 by 1985 100000 by mid-1990 s
	CATHEDRAL BLUFFS	Occidental and Tenneco	Oxy MIS and Union "B"	117000 by 1988
	RIO BLANCO	Gulf and Standard Oil of Indiana	MIS and Lurgi	50000 by 1991
	SEEP RIDGE	Geokinetics	Horizontal in.-situ	unknown
	MEANS	SPP/CPM	Dravo circular grate	13440 by 1988
Bra-zil	IRATI	Petrobras	Petrosix	undecided
Australia	RUNDLE	SPP/CPM and Exxon	Undecided	undecided
	CONDOR	SPP/CPM and JAOSCO	Undecided	undecided
	JULIA CREEK	CSR	Undecided	undecided
China	FUSHUN	Fushun PIC	Fushun shaft type	unknown
	MAOMING	Maoming PIC	Fushun shaft type	unknown

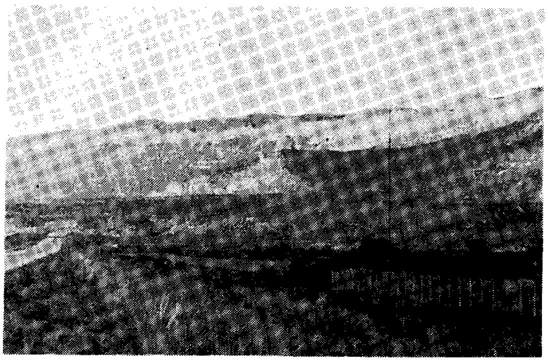


Photo. 1. Oil shale bed in Piceance Creek basin, Colorado.

がコロラド川で削られて断崖状になつているが，それがほとんどオイルシェールの層となつているわけで，まことに壮大な眺めである (Photo. 1).

3. オイルシェールの開発プロジェクト

オイルシェールの開発プロジェクトの状況を Table 2 で紹介する．

3分の2ぐらいが米国のプロジェクトである．ほとんどコロラドを中心に進められている．

オーストラリアのコンドル・プロジェクトは，JAOSCO つまり，日豪オイルシェール(株)(Japan Australia Oil Shale Corporation) がフィージビリティ・スタディを行つた．

中国は撫順 (FUSHUN) と茂名 (MAOMING) で，撫順では昭和の初めからずつと生産を継続している．

それぞれのプロジェクトが採用し，またしようとしている技術が紹介されているが，現在，なお，いろいろな技術が開発中である．オイルシェールの性状によつて最適の乾留技術が異なるということもあろうが，要はまだ決定的な技術が見いだされていないというべきであろう．

そのなかで，ずつと生産を継続してきたのは中国である．経済体制，社会体制の違いがあるとしても，非常に感心すべきことではないかと思う．

Table 3 は中国の撫順の状況で，1930年つまり生産を始めたときの状況と，1940年ほぼ最盛期の状況であ

Table 3. Shale oil production at Fushun, China.

	Unit Capacity t-shale/d		Number of Units	Nominal Capacity t-oil/y	Actual Production t-oil/y
1930	50	×	80		70 000
1940	100	×	80	260 000	160 000
	180	×	60		

る.

4. 日本におけるオイルシェールの技術開発

このような背景のもとに，わが国でも 1981 年 7 月以来，オイルシェール研究開発プロジェクトが進められている．このプロジェクトは，資源エネルギー庁と石油公団との主導のもとに 1981 年に設立された日本オイルシェールエンジニアリング(株) (Japan Oil Shale Engineering Co., Ltd., 通称 JOSECO)が中心となりオイルシェールの研究開発を行つている．この JOSECO は，鉄鋼，重機，プラント，資源，セメント，商社等有力36社のジョイント・ベンチャーで，この中の主要株主 13 社が研究を分担している．

Fig. 3 に研究開発のスケジュールを示す．前半のいわゆる基礎研究，後半のパイロットプラントによる開発段階に分けられる．最初は 5 カ年計画だつたが，財政事情を反映して 6 カ年計画に修正された．基礎研究の段階が 40 億円で全額政府資金，パイロットプラント段階は約 100 億円で，これには 25% 民間資金が投入される．

Table 4 は JOSECO での研究調査分野で，一例として基礎物性試験では，Table 5 に示すように 12 鉱床，85 種類のサンプルがテストされた．すなわち，オイルシェールおよびそれから得られたシェールオイルについて，各種の分析，化学的・物理的特性試験，あるいは，顕微鏡観察，X線回折等によるオイルシェールの組織解析などが実施された．これらは昨年アメリカの学会でも発表され，これだけ網ら的に詳細な調査をやつた例はな

Table 4. JOSECO's research and development project.

- Basic investigation
  - Characterization of oil shale
  - Characterization of shale oil
- Basic technological study
  - Mining technology
  - Crushing technology
  - Beneficiation technology
  - Agglomeration technology
  - Retorting technology
- Study on spent shale
  - Characterization of spent shale
  - Spent shale utilization technology
- Environment protection technology
- Total engineering system designing
- Bench-scale plants tests (3 t/d)
  - Shaft type plant
  - Circular grate type plant
  - Cross flow type plant
- Pilot plant test (300 t/d)

Table 5. Oil shale samples tested by JOSECO.

Country	Number of deposit	Number of kinds
Australia	4	37
Brazil	1	1
Jordan	1	10
Morocco	1	4
Sweden	1	2
U. S. A.	4	31
Total	12	85

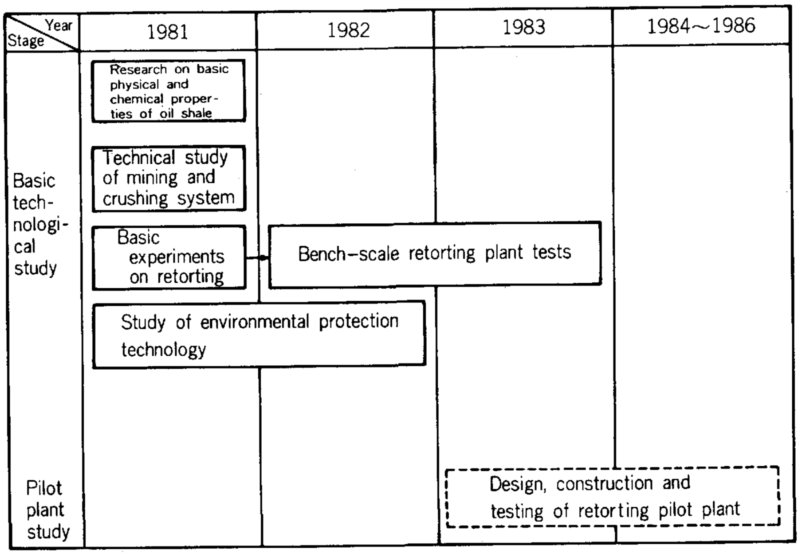


Fig. 3. JOSECO's research and development program.

Table 6. Properties of oil shale.

Oil shale sample	Ash content (%)	Volatile matter (%)	Calorific value (cal/g)	Total carbon (%)	Organic carbon (%)	Hydrogen (%)	Nitrogen (%)	Sulphur (%)	SiO_2*
U.S. (Colorado)	69. 98	29. 43	806	12. 82	7. 52	1. 10	0. 29	0. 48	40. 10
〃 (Utah)	62. 87	36. 16	1 060	16. 44	9. 52	1. 36	0. 46	0. 16	33. 12
〃 (Wyoming)	75. 68	23. 40	1 106	12. 29	10. 15	1. 67	0. 50	0. 60	51. 60
〃 (Kentucky)	80. 94	14. 46	1 360	10. 33	10. 17	1. 36	0. 36	6. 24	60. 85
Australian (Rundle)	62. 07	35. 00	3 010	25. 50	24. 88	4. 12	0. 24	1. 06	63. 72
〃 (Condor)	79. 08	20. 85	1 115	10. 16	9. 92	1. 80	0. 41	0. 83	66. 52
〃 (Julia Creek)	56. 16	37. 44	1 433	20. 92	13. 50	1. 30	0. 46	1. 62	22. 70
〃 (Yaamba)	61. 35	30. 60	2 128	22. 62	21. 27	2. 36	0. 92	0. 82	58. 60
Brazil (Irati)	80. 74	17. 56	1 314	11. 52	10. 43	1. 39	0. 31	3. 44	57. 25
Morocco (Timhadit)	67. 76	31. 40	868	13. 78	8. 16	1. 04	0. 21	1. 87	36. 62

	Al_2O_3*	Fe_2O_3*	CaO*	MgO*	Ni*	V*	As*	Bulk specific gravity	Oil content ratio (wt%)
U.S. (Colorado)	10. 44	3. 89	28. 30	7. 87	0. 008	0. 011	0. 0004	2. 27	6. 1
〃 (Utah)	7. 14	3. 32	39. 32	10. 84	0. 006	0. 015	0. 0001	2. 27	8. 9
〃 (Wyoming)	14. 46	4. 79	9. 48	5. 92	0. 006	0. 018	0. 0003	2. 08	8. 0
〃 (Kentucky)	13. 84	13. 76	1. 14	1. 46	0. 018	0. 026	0. 0009	2. 32	4. 1
Australian (Rundle)	16. 22	6. 58	5. 22	2. 24	0. 006	0. 035	0. 0001	1. 64	21. 4
〃 (Condor)	17. 86	8. 01	0. 42	1. 70	0. 006	0. 017	0. 0001	1. 12	5. 5
〃 (Julia Creek)	3. 16	2. 00	71. 18	0. 48	0. 028	0. 41	0. 0008	1. 56	7. 0
〃 (Yaamba)	13. 28	18. 84	1. 82	1. 32	0. 033	0. 026	0. 0001	1. 66	4. 8
Brazil (Irati)	11. 81	8. 32	4. 72	3. 50	0. 006	0. 013	0. 0003	2. 14	6. 4
Morocco (Timhadit)	8. 12	3. 75	38. 96	5. 88	0. 018	0. 020	0. 0002	2. 01	4. 8

* Weight ratio of ash content

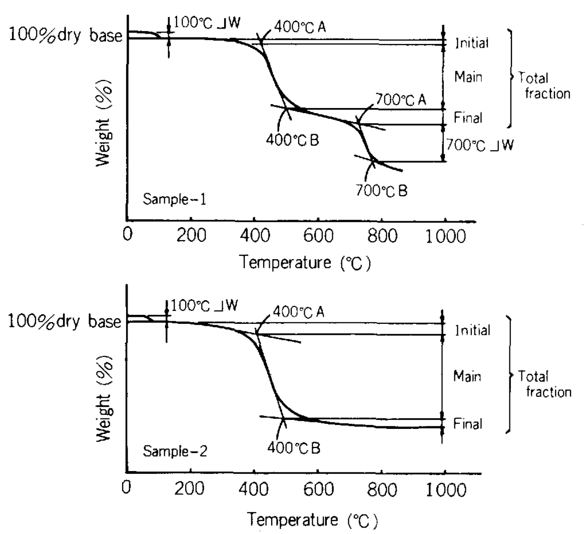


Fig. 4. Typical configuration of T.G.A.

いと，高く評価された．

調査結果の一例として，Table 6 には世界の各産地別のオイルシェールの一般性状を，Fig. 4 にはオイルシェールの T.G.A 特性を，Fig. 5 にはシェールオイルの各留分の得率を示している．

鉱石によつて，乾留特性が大きく異なつていることがわかる．また，得られた油も，油の比重と C/H のアトミック・レシオの関係等鉱石によつて大きく相違することがわかる．

中心となる乾留の研究は 3 t/d のベンチスケールプラントを 3 種類つくつて，それぞれについて実験を行つた．

Fig. 6 はシャフト炉型で，上から鉱石を入れ，下から加熱されたガスを吹き込むことによつて油が留出されるという単純な構造である．

乾留を終わつたシェールはそのまま重力で下りて，ここで残つたカーボン（約 4～8%）が燃焼され，その熱が熱交換器で乾留ガスの加熱に使われ，スペント・シェールは炉底から排出される．

Fig. 7 が炉の断面を模型的に示したものである．

レトルティング・ゾーンと燃焼ゾーンとの間には，シーリング・ゾーンを設けていて，上と下とを分離するという構造になつている．シャフト炉タイプは新日本製鉄(株)が研究を担当した．

Fig. 8 はサーキュラー・グレート型のもので，三菱重工業(株)が実験を行つた．

これは焼結機のクーラーなどで使われているプロセスをオイルシェールに応用しようというものである．

ドーナツ状に設けられたグレートベッドの上に鉱石をのせ，このベッドが回転する間に予熱，乾留，残カーボンの燃焼が行われる．燃焼熱は回収されて予熱，乾留用

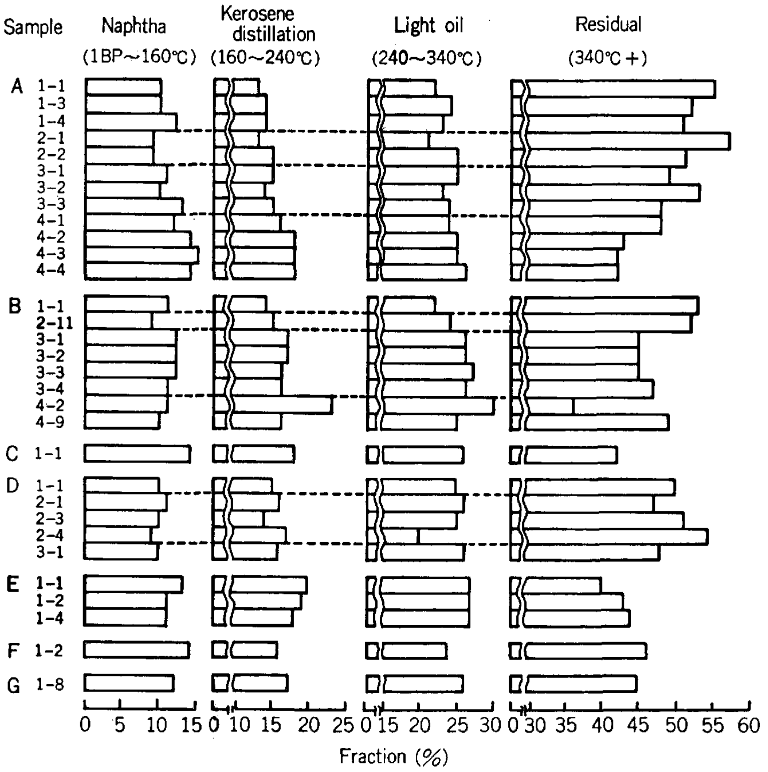


Fig. 5. Distillation yield of shale oil.

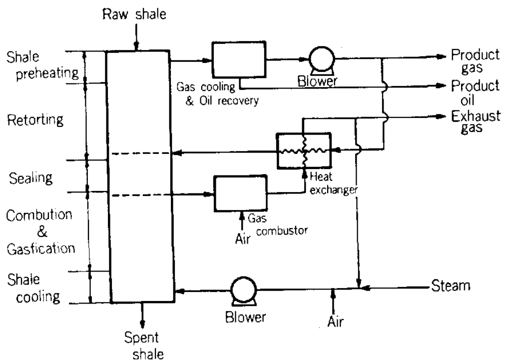


Fig. 6. JOSECO's shaft type retorting process.

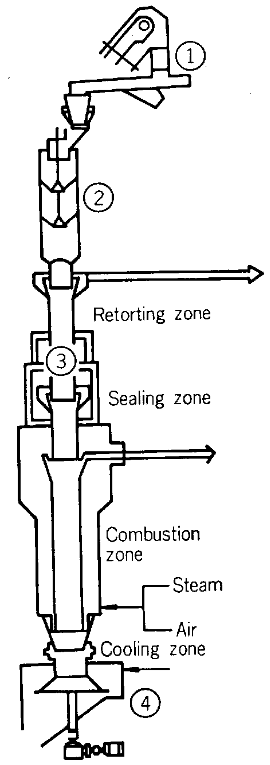
の熱源になるというシステムである.

サーキュラー・グレートに供給されたオイルシェールは, 予熱, 乾留, 燃焼, 冷却, 排出というステップで1回転の間にプロセスが完了する.

Fig. 9 は日本鋼管(株)が担当したクロス・フロー型のプロセスである.

これは焼結排ガスの脱硝用に開発された技術をオイルシェールに応用したものである. 壁面がルーバー状になつた炉の上からシェールが装入され, 炉内を下りてくる. この間に加熱されたガスがシェールの層を横切つて流れ, 乾留が行われる. つまり, クロス・フロー型である. 残カーボン燃焼には流動床炉が使われる.

これら3種類のベンチスケールプラントで, それぞれのプロセスの特性を確かめるための実験が1982年から83年にかけて行われた. 用いた鉱石は, 米国, 中国, オーストラリアおよびモロッコ産である.



①Vibro-feeder ②Bell typed charging equipment
③Retorting furnace ④Table feeder

Fig. 7. Detail of shaft type retort.

石油公団は, 諮問機関であるオイルシェール開発技術委員会がこれらの研究成果を基に審議したパイロットプ

ラントの方式選定に関する答申を受けて，シャフト炉方式を中心としてパイロットプラントを建設するという方針を決定した．

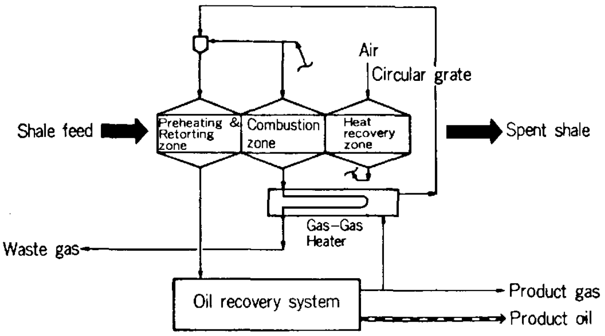


Fig. 8. JOSECO's circular grate type retorting process.

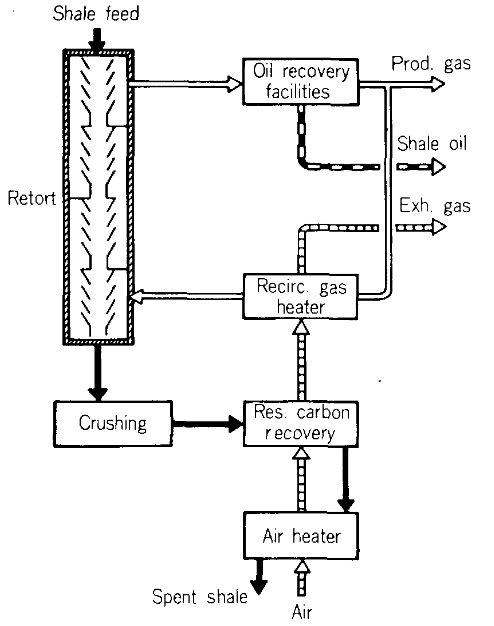


Fig. 9. JOSECO's cross flow type retorting process.

この答申では，3方式がいずれも商業プラントへのスケールアップに値すると評価しながら，パイロットプラントとしては，構造の単純性，操業の容易性に注目して，シャフト炉型が適当であると結論している．

パイロットプラントは，現在，JOSECO によつて設計が進められており，約 300 t/d 規模のものが 1986 年までに北九州市の新日本製鉄(株)構内に完成する予定である．このパイロットプラントでは，オーストラリアなどから鉱石を数万 t 輸入して，エンジニアリングに関する

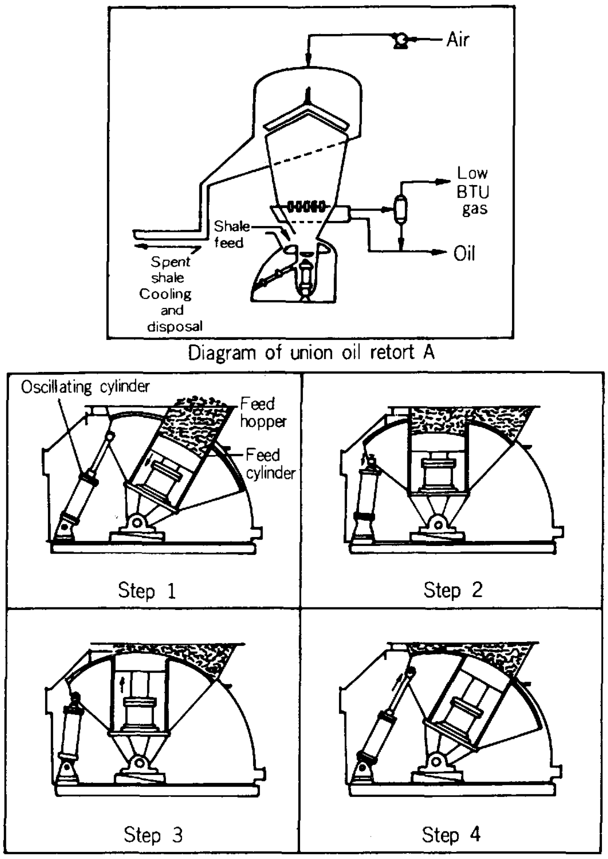
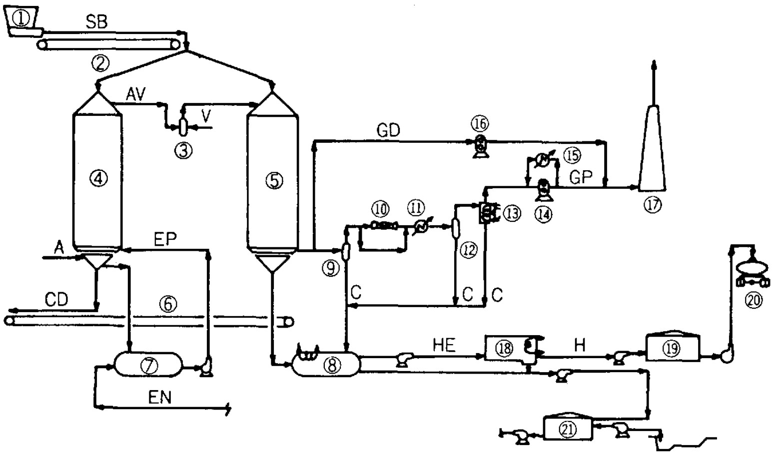


Fig. 10. Union's upflow retort.



1 Alimentateur	2 Convoyeur à bande
3 Récipient des gaz	4 Four en refroidissement
5 Four en pyrolysa	
6 Convoyeur à chaine	7 Récipient
8 Collecteur huile-eau	9 Séparateur
10 Refroidisseur à air	11 Refroidisseur à eau
12 Séparateur	13 Piège à eau
14 Soufflante	15 Refroidisseur
16 Soufflante de démarrage	17 Torchère
18 Séparateur huile-eau	19 Stockage d'huile
20 Transport d'huile	21 Stockage d'eau
S B : Schistes bitumineux	C D : Cendres
A : Air	V : Vapeur
H : Huile	C : Condensat
G D : Gaz de demarrage	G P : Gaz de pyrolyse
E P : Eau de process	E N : Eau neuve

Fig. 11. DE L'USINE's T3 pilot retort.

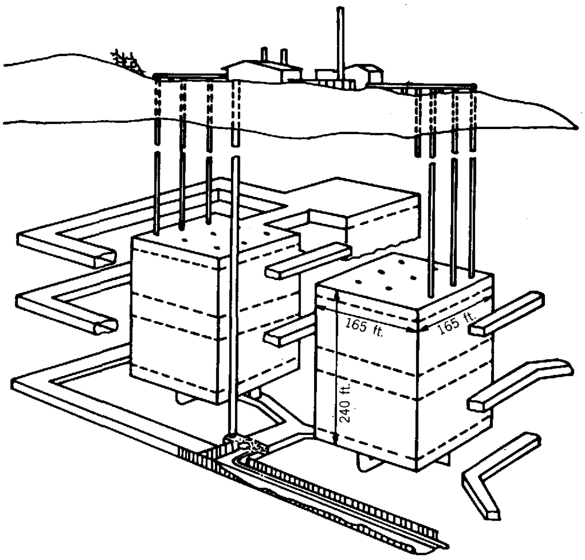


Fig. 12. Cathedral Bluff's modified-in-situ project.

技術知見を得る実験研究を行うことになつている.

5. 外国におけるオイルシェール乾留技術

最近のエネルギー事情・石油事情を反映して, オイルシェールの開発プロジェクト自体はスローダウンしているが, 技術開発は依然として積極的に進められている.

Fig. 10 はユニオン・オイルの方式である. 従来の縦型炉での鉱石が上から下へ, 高温ガスが下から上へという流れの場合に懸念される炉上部でのオイルの還流によるコーキング, あるいは炉下部での鉱石の融着による荷下り不調などを防止しようとして開発されたものである. 図のようにロック・ポンプがステップ1～4の動きを繰り返しながら鉱石を炉の下から上へ押し上げ, 一方, ガスは上から下へ流れて, 留出したオイルとともに炉底から排出されるという仕組みである. ユニオン・オイルは, この方式による日産 10000 barrel の実用プラントを試運転中である.

Fig. 11 は, T3 方式といわれ, スウェーデンで開発されて, モロッコが採用しようとしているものである. 同じ型の炉を2基組み合わせて設置し, 交互に乾留・燃焼と燃焼後シェールの冷却とを繰り返すやり方である. 乾留・燃焼のステップでは, 炉の上から下へ空気を流しつつ, まず炉の上部に着火し, その熱ガスで下部のシェールを乾留しながら火層を徐々に下方へ移動させる. 全体の燃焼を終わつた炉は, 次のステップで冷却され, その後廃シェールが排出され新しいシェールが詰め替えられる. 冷却の際に回収される熱は乾留・燃焼用空気の予熱に利用される.

ルルギの方式は, 粉シェールを用いて乾留するプロセスである. 乾留のための熱源は, 乾留後の粉シェールを燃焼させてできる高温の廃シェールで, これをスクリュー・フィーダー型の乾留炉の中で, 生の粉シェールと混

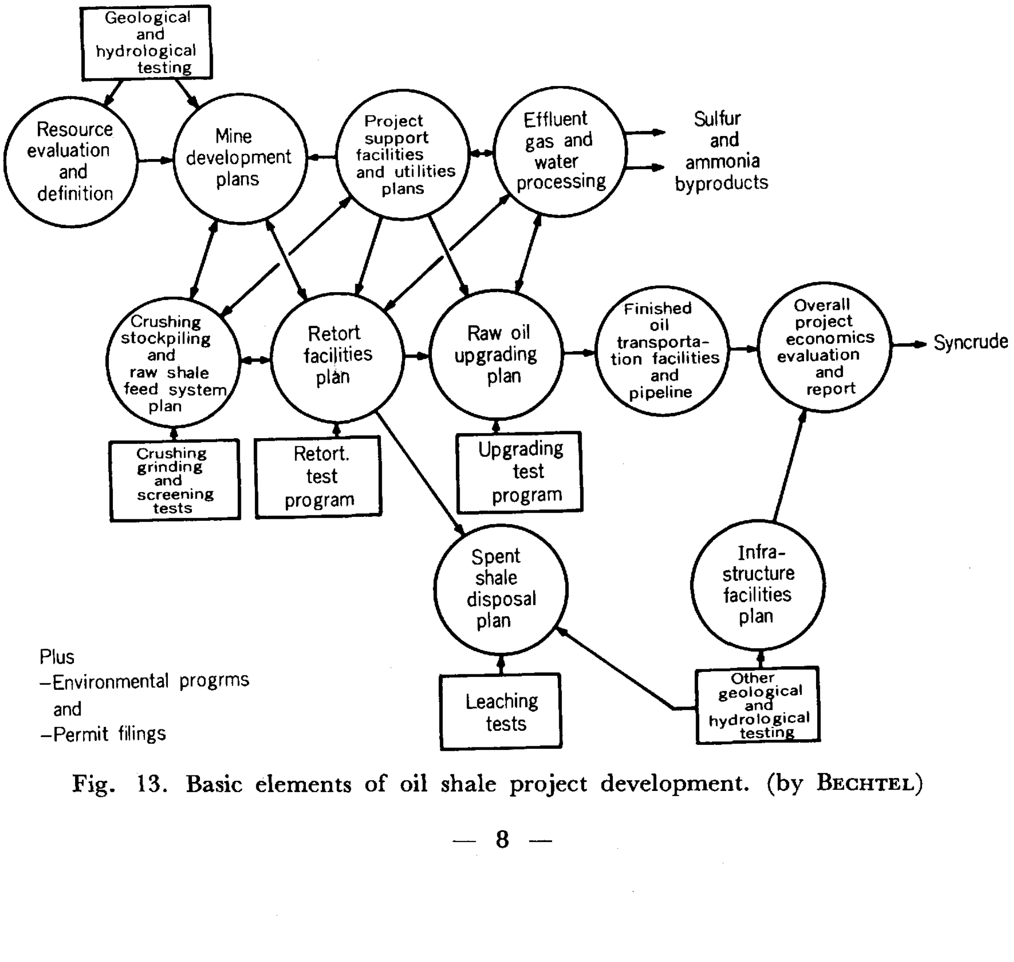


Fig. 13. Basic elements of oil shale project development. (by Bechtel)

合して乾留するという原理である．これとよく似た原理によるものに，STB 方式と呼ばれるシェブロンが開発中の技術がある．この場合には，生の粉シェールと，燃焼によつて加熱された廃シェールとが流動層中で混合され，乾留が行われる．

Fig. 12 は，地下のオイルシェール鉱床に天然のレトルトをつくつて乾留しようというもので，MIS (Modified-in-situ) 方式といわれている．レトルト予定スペースから一部の鉱石を層状に採掘搬出してゆとりをつけ，残りの鉱石に発破をかけてグズグズにしておく．上の方から火をつけて，下からガスを引き抜きながらオイルを取り出すという方式である．地中のレトルト部分の高さが 200 ft 以上あり，乾留，燃焼の進むスピードが 1 日約 1 ft というから，一つのレトルトで約 1 年かかつてゆつくりオイルをとるというアメリカならではの方法である．この方式は，オープン・ピットなどで鉱石を掘り，廃シェールをまた埋めもどすというやり方に比べて，環境破壊が少ないという点で注目されている．

6. まとめ

オイルシェールの開発には，広い分野の総合的な技術力が必要とされる．Fig. 13 は，ベクテルが整理したもので，オイルシェール開発技術の展望を示している．

オイルシェールは他のエネルギー源に比して品位が低く，1 barrel のオイルをとるために約 2 t の鉱石を処理しなくてはならないというのが最大の悩みである．

量との闘いであり，1 日に 5 万 barrel の油を生産するためには 1 日 10 万 t の鉱石を処理しなくてはならない．年間に直すと 3 650 万 t ということになつて，これは最大級の褐炭鉱山あるいは鉄または銅鉱山にほぼ匹敵するわけで，しかも同時にほぼ同量のスペント・シェールが排出される．

従つて，環境破壊に気をつけながら開発を進めていくという極めて困難な問題があり，コスト的にも量をいかにうまくこなすかということが重要な問題となる．オイルシェールの開発は，多方面の技術開発ばかりでなく，ソーシャル・インパクトへの対策まで含めて広範な研究を必要とするビッグ・プロジェクトである．