

1
PNC 7363 96-001 VOL. 1. 1

図書室

限定資料

本資料は 年 月 日付けで登録区分
変更する。

果濃地科学センター 【研究調整グループ】

ウラン I S L コ ス ト 試算手引書 (1995)

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1 9 9 6 年 3 月

日 鉦 探 開 株 式 会 社

本文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下さい。

〒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

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)
1996

~~この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついでに、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。~~

~~本資料についての問い合わせは下記に願います。注)~~

~~〒509-51~~

~~岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸 9 5 9 - 3 1~~

~~動力炉・核燃料開発事業団~~

~~東濃地科学センター~~

~~技術開発課~~



1996年 3月

ウラン ISL コスト試算手引書 (1995)

谷 藤吉郎*

要 旨

近年、世界のウラン市況の低下により、コスト面で利点のあるインシチュー・リーチング採掘法（以下 ISL と記述する）のウラン生産量に対する比率が高まっている。

今後新たにウラン鉱山を開発する場合の設計や、資源情報調査時に手引きとすべきコスト試算項目の取りまとめを目的として、ウラン ISL コスト試算手引書を作成した。

コスト試算の検討は、ISL を適用している米国最大規模のウラン鉱山であるネブラスカ州の CROW BUTTE 鉱山と、今後開発を計画しているワイオミング州の SMITH RANCH 鉱床の文献をもとに行い、両文献を全翻訳して、ウラン ISL のコスト試算に影響を与えと考えられる項目を抽出し、それらの重要性を考察した。また、重要と考えられる項目について両文献の値を比較した。

さらに、上記 2 プロジェクトを例として、主に地質環境、坑井フィールドのレイアウト、処理プロセスおよび環境対策などの法規制の面からウラン ISL プロジェクトを考察し、その特徴を浮き彫りにした。

本報告書は、日鉱探開株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の受託により実施した業務の成果である。

契約番号：07C0998

動燃事業団担当課：東濃地科学センター 鉱床解析室

*：日鉱探開株式会社

目 次

1. ISL 法によるウラン鉱山のコスト試算項目	1
1.1 はじめに	1
1.2 インシチュー・リーチング (ISL) 採鉱法	2
1.3 コストの分類	3
1.4 ISL 鉱山のコスト区分	5
1.5 直接影響する要因の影響評価	8
2. Smith RanchプロジェクトとCrow Butte鉱山の対比	12
2.1 地理的位置	12
2.2 地文学的状況	12
2.3 地質的環境	12
2.4 ウラン鉱床	15
2.5 水文地質学的状況	16
2.6 両プロジェクトの現在のステータス	18
2.7 免許申請・認可の状況	18
2.8 井戸設備関係	21
2.9 製錬関係	23
2.10 環境対策	24

図 表 一 覧

図 1-1 手順	6
図 1-2 浸出液の流路	10
図 2-1 5-スポットの井戸配置パターン	28
図 2-2 7-スポットの井戸配置パターン	29
表 2.1 地理的位置	12
表 2.2 地文学的状况	12
表 2.3 地質的環境	12
表 2.4 ウラン鉱床	15
表 2.5 水文地質学的状况 (Smith Ranch)	16
表 2.6 水文地質学的状况 (Crow Butte)	17
表 2.7 Smith Ranch プロジェクトの現在のステータス	18
表 2.8 Crow Butte プロジェクトの現在のステータス	18
表 2.9 Smith Ranch の状況	18
表 2.10 Crow Butte の状況	20
表 2.11 井戸配置パターン	21
表 2.12 浸出と製錬の化学系と処理能力	23
表 2.13 ブリードの処理	24
表 2.14 モニター井	25
表 2.15 帯水層の復元	27

1. ISL法によるウラン鉱山のコスト試算項目

1.1 はじめに

ISL法によるウラン鉱山のコスト試算項目を下記の資料に基づき整理を行う。コストは探鉱費、税金とロイヤリティを除く鉱山開発および操業および閉山処理に係る費用をウラン製品 1b U₃O₈当たりで示した直接生産コストである。

- (1) 「Crow Butte鉱山のISLプロジェクトのケースヒストリー」 (Crow Butte ISL Project - Case History) Crow Butte Resources 社編 (1994年)
- (2) 「Smith RanchプロジェクトのISL鉱山開発」 (Smith Ranch Project: Developing an ISL Uranium Mine) Rio Algom Mining 社編 (1992年)

Crow Butte鉱山の資料は現在稼働しているISL鉱山での操業経緯と状況、Smith Ranchプロジェクトの資料は計画中のISL鉱山での設定要因に対するコストの影響分析結果を示した資料である。

コスト試算項目を整理するに当たって、ISL鉱山の直接生産コストに影響を及ぼす要因を列挙し、その影響評価について記述した。

Crow Butte鉱山とSmith Ranchプロジェクトは、米国のISL鉱山である。米国のISL鉱山の一般的な操業条件として、浸出剤の種類と貴液処理工程について次のような条件でコスト試算項目を整理する。

・浸出剤の種類

米国での浸出剤の種類は、環境上の理由からアルカリ浸出剤のみが用いられている。硫酸による浸出は試験され、いくつかの場所で良い結果が得られているが、後処理で地下水の水質を元に戻すのが大変困難で、コスト高であると言われている。

・貴液処理工程

米国での貴液処理工程は、井戸設備にサテライト式のイオン交換樹脂処理施設を設け、生産井からの貴液を現場で処理する。イオン交換樹脂に貴液を通してウランを回収し、尾液は再調整して注入井に繰返し注入する。ウランを回収した樹脂は粗製錬所へ運搬し、ここで更に溶媒抽出で

精製した後、ウランを沈殿させ、脱水乾燥してイエローケーキに仕上げる。サテライト方式の採用により、井戸設備と製錬の操業が相互に干渉なくなり、井戸設備における流量や貴液品位の変動が製錬所の稼働へ波及することを防いでいる。

1.2 インシチュー・リーチング（ISL）採鉱法

ISL採鉱法は、透水性を持つ砂岩層に胚胎するウラン鉱体に適した採鉱法で、1960年代の初めにワイオミング州のShirley盆地で最初に実験的に試みられた。商業ベースのISL採鉱法によるウラン鉱山は、1974年にテキサス州のGulf CoastのClay West鉱山で開始された。

この砂岩型ウラン鉱床は、ウラン鉱床の生成過程から鉱体である砂岩層の上下層が不透水性の頁岩および粘土岩から成っており、ウランを浸出させるために注入する化学溶液が他の地層へ拡散することなく、ウランを溶かし込んだ貴液として回収できる地質構造を備えている。

ISL採鉱法と在来型採鉱法との比較を行う。

〈有利な要素〉

① 鉱石を破碎する必要がない。

地下のウラン鉱床から溶液に溶かしてウランを回収する採鉱法であるから、岩石を破碎するための発破、鉱石や捨石の運搬および製錬のための鉱石の破碎、摩鉱が不要である。

② 鉱山操業時の消費エネルギーが少ない。

鉱石の破碎および運搬が不要で、鉱山労働者の人数も少ないので消費エネルギーは少ない。

③ 鉱山災害が少ない。

在来型採鉱法の鉱山特有の危険性がないので、鉱山災害は少ない。

④ 環境への負荷が少ない。

在来型採鉱法での鉱さい堆積場、捨石堆積場が不要であるため、環境への影響は少ない。

⑤ 鉱山開発期間が短い。

坑内掘りの立坑掘下がり、露天掘りの剥土が不要なため鉱山開発準備工事は在来型採鉱法に比べて少ない。

⑥ 起業費、操業費が安価である。

鉱山開発の準備工事が少ないので、起業費は大きくない。鉱石の破碎および運搬が不要なため、操業費も大きくない。

〈不利な要素〉

- ①特殊な地質構造および鉱石性状を備えた鉱床以外には，適用できない採鉱法である。
- ②鉱体の形状が不規則であるため可採ウラン量の確定が難しく，ウランの浸出状況の把握が難しい。
- ③採鉱実収率は，在来型採鉱法より悪い。

1.3 コストの分類

一般的な鉱山のコストは下記の二つに分類することができ，これらの分類に基づきISL鉱山のコスト試算項目を整理する。

分類1：コストは要因によって変動しない固定費と変動する変動費に分類することができる。

$$\text{コスト} = \text{固定費} + \text{変動費}$$

分類2：コストが発生する時期によって起業費，操業費，閉山処理費に分類することができる。
各費用は，また分類1の固定費と変動費に分類される。

$$\text{コスト} = \text{起業費} + \text{操業費} + \text{閉山処理費}$$

一般的な鉱山の1b U₃O₈当たりの直接生産コストは，下記の式で求められる。

1b U₃O₈当たりの直接生産コスト＝

$$\frac{\text{起業費}}{\text{総生産量}} + \frac{\text{年間操業費（固定費＋変動費）}}{\text{年間生産量}} + \frac{\text{閉山処理費（固定費＋変動費）}}{\text{総生産量}}$$

次に，分類2に基づいた直接生産コストをISL鉱山のコスト試算項目に細分化する。

(1) 起業費

ISLウラン鉱山の特殊性として、鉱山開発の決定に至るまでにはパイロット・プラント試験が不可欠である。パイロット・プラントに係る費用および本格操業に必要な井戸設備に係る費用は起業費に計上する。すなわち初期操業に必要な井戸設備の開発費等の計画生産量に達するまでに要する諸費用を起業費とする。コスト試算項目を整理すると下記の10項目からなる。

- ①許認可手続き費
- ②パイロット・プラント建設・運転費
- ③最初の井戸設備の開発費
- ④製錬設備費
- ⑤製錬所建設費
- ⑥建屋の建設費
- ⑦廃水・後処理設備費
- ⑧技術管理費
- ⑨予備費
- ⑩操業時の追加投資

(2) 操業費

操業時の井戸設備、浸出、製錬に係る費用である。生産に伴い追加される井戸掘削費、井戸設備の設置替え費用および生産期間中の井戸設備の後処理である地下水の復元と井戸の閉塞に係る費用は操業費に計上する。コスト試算項目を整理すると下記の8項目からなる。

- ①井戸設備の設置替え費
- ②労務費
- ③薬品費
- ④動力費（生産と後処理）
- ⑤維持費と保険料
- ⑥廃水処理費
- ⑦井戸崩落の修復費
- ⑧一般管理費

(3) 閉山処理費

閉山時の鉱山施設の撤去および生産終了時の地下水の復元と井戸の閉塞に係る費用で、ISL鉱

山の立地条件によって多少異なる。予想される閉山処理費の資金保証を義務づける例が見られる。

1.4 ISL鉱山のコスト区分

ISL鉱山操業する観点からコストを区分し、ISL鉱山の直接生産コストに影響を及ぼす要因の抽出につなげる。

ISL 操業に要する費用は 1)井戸設備費：井戸の掘削と維持に要する費用，2)浸出費：浸出液を循環し，ウランを溶解した貴液をイオン交換樹脂に通すに要する費用，3)製錬費：イオン交換樹脂からウランを溶離して精製しイエローケーキを生産するに要する費用，および 4)全般的な費用に区分される。

直接生産コスト算出とプロジェクト評価手順

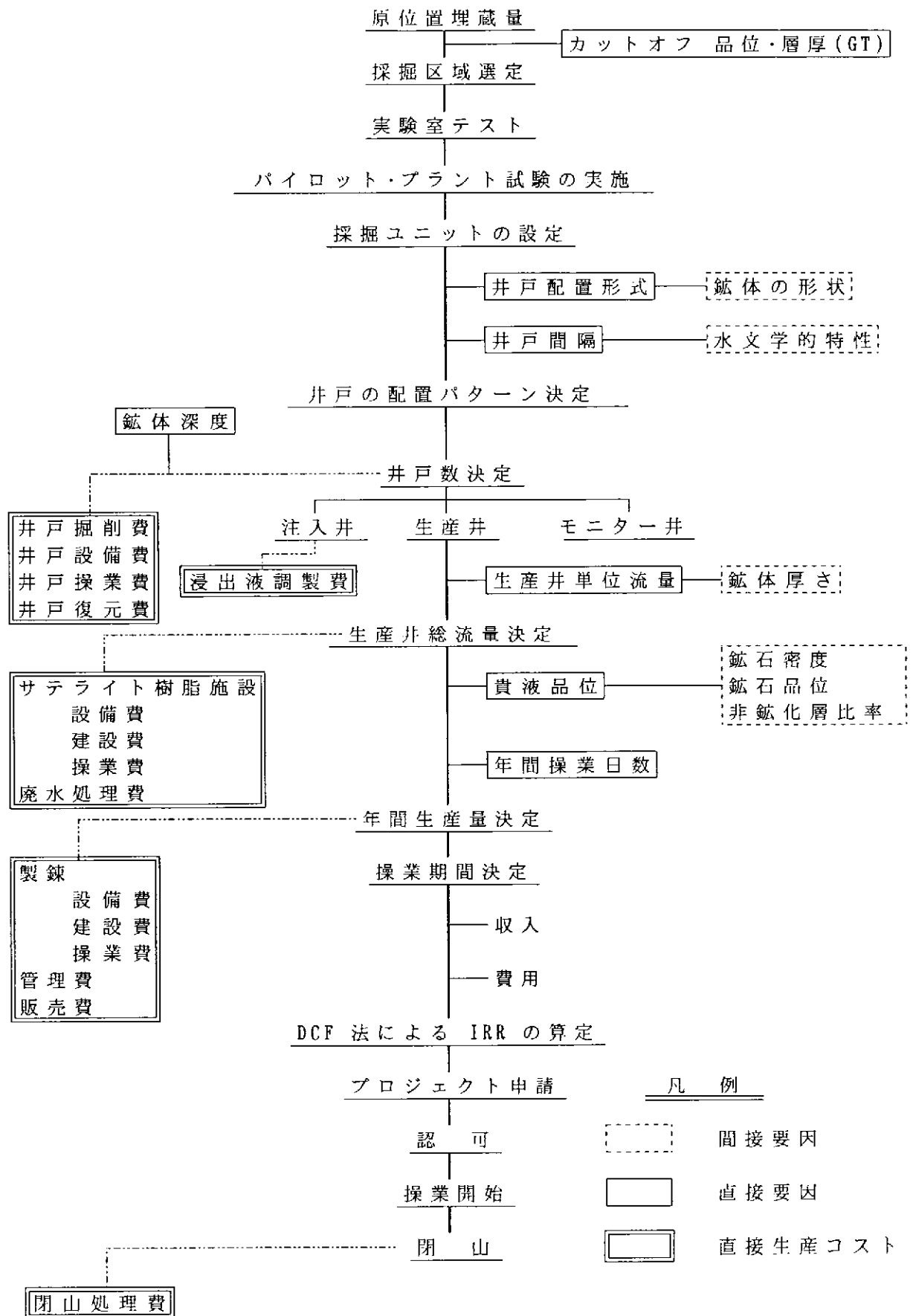


図 1-1 手順

(1) 井戸設備費

井戸設備費は下記の要素で構成される：

井戸掘削費：井戸本数×井戸の深さ（≡鉱体深度）×掘削単価

井戸設備費：ケーシング費（原則として井戸の総延長に比例するが、盤が悪い場合や深部では補強された材質を使用するので割高となる）、ポンプ設備費（生産井とモニター井のポンプ、モーター、配線）、および地表の配管設備費からなる。

井戸操業費：注入井から浸出液を注入し、生産井から貴液を回収する費用。

井戸復元費：操業終了後、注入井から水あるいは還元剤を注入し、地下水を復元するに要する費用。汲み上げた水が水質基準を満足していないと廃水処理へ回す。

(2) 浸出費

浸出費は下記の要素で構成される：

サテライト・イオン交換樹脂処理施設設備費：設備規模は生産井からの浸出液の流量によって決まる。イオン交換樹脂に貴液を通す装置、浸出液調製装置（酸化剤として酸素を用いる場合はその溶解装置）、流量制御装置、サンプリング装置などが含まれる。

樹脂施設建設費：イオン交換樹脂処理施設を建設する費用。

樹脂施設操業費：イオン交換樹脂費（劣化したものを補充する費用）、浸出液調製薬剤費、動力費、分析費、樹脂運搬費などが含まれる。概ね浸出液の総流量に比例する。

(3) 精製費

精製費は下記の要素で構成される。

製錬設備費：イオン交換樹脂からウランを溶離し、溶媒抽出で精製した後、沈殿・脱水・乾燥してイエローケーキを生産する設備であり、生産規模は年間ウラン生産量によって決まる。

製錬所建設費：製錬所の土地造成、設備の据付、建屋の建設に対する費用。

製錬所操業費：主な薬剤は溶離剤、樹脂再生用薬剤、抽出用溶媒、逆抽出用薬剤、沈殿用薬剤および廃水処理用薬剤である。これらに動力費、労務費、燃料費、修繕費などが加わる。

(4) 全般的な費用

この費用は下記で構成される

管理費

販売費

許認可手続き費

閉山処理費：閉山時の鉱山施設撤去および生産終了後の地下水の復元と井戸の閉塞に係る費用。

1.5 直接影響する要因の影響評価

ここでは 4. で掲げた要因が、直接生産コストにどのように影響を及ぼすかについて考察する。影響の大きさを評価するに当たっては、要因を変数として直接生産コストの算出式を使うが、算出式で因果関係を律することが出来る変数は少ない。また現段階ではその算出式で用いる定数の多くが未知であるので、評価は定性的とならざるを得ない。

(1) カットオフ品位・層厚(GT)

カットオフ品位・層厚(GT)は直接生産コストには直接的には影響を及ぼさない。むしろ逆に、原位置埋蔵量のうち採算に合う品位・層厚の資源量に対するの費用と収入からカットオフ品位・層厚(GT)が決定される。鉱石を直接採掘する採鉱法の場合には採鉱と製錬の実収率を原位置埋蔵量に乗じて可採ウラン量が求められ、過去の経験からかなりの精度で予測が可能である。一方、ISLの場合には原位置浸出回収率は数多くの要素に影響され、一般的には予測が困難であるので、パイロット・プラント試験で求めた原位置浸出回収率が採用される。カットオフ品位・層厚(GT)を下げれば採掘対象の資源量は増加し総生産量は増加するが、総費用もまた増加する。

(2) 井戸の配置パターン

井戸の配置パターンと井戸間隔が決まれば 1 パターンの面積が求められ、それと採掘ユニット面積から生産井と注入井の総数が決定される。また井戸を結ぶ配管の延長が求められ、そのための設備費が計算される。

いま、注入井と生産井の間隔を d 、注入井間の間隔を s とすれば、1 パターン当たりの面積と配管の長さは下記の通りである（図 2-1, 2-2 参照）。

	面 積	配 管 の 長 さ	
		浸出液供給用	貴液回収用
5-スポット	$2d^2$	$\sqrt{2} \cdot d$	$\sqrt{2} \cdot d$
7-スポット	$\frac{3\sqrt{3}}{2}d^2$	$2d$	$\sqrt{3} \cdot d$

一方、縦方向のパターンの数をL、横方向のパターンの数をWとすれば、生産井と注入井の数は次のように求められる。

	生産井の数	注入井の数	注入井／生産井の比
5-スポット	$L \cdot W$	$(L+1) \cdot (W+1)$	$1 + \frac{1}{L} + \frac{1}{W} + \frac{1}{WL}$
7-スポット	$L \cdot W$	$2(LW + L + W)$	$2 + \frac{2}{L} + \frac{2}{W}$

注入井／生産井の比は、縦、横方向のパターンの数が増えてくれば、5-スポットでは 1 に、7-スポットでは 2 にそれぞれ収斂する。

(3) 井戸間隔

井戸間隔は鉱体の水文学的特性によって決まる変数であり、生産井 1 本当たりの生産性を決定する重要な要因である。井戸間隔を小さくとれば 1 パターンの面積は小さくなり、生産井の流量が増えて早期にウランが採取される。しかし生産性は向上するが、パターン数を増やせばコストが上昇する。

(4) 鉱体深度

鉱体深度は変えることが出来ない自然が与える要因である。また最重要費目である井戸設備費に直接影響を与える、最も決定的な要因である。その他の要因、例えば貴液品位は高くなることによって処理費を増大させるが、一方では生産量を増加させるので、直接生産コストへの影響が

小さくなる。それに対して鉱体深度は、深くなることによって直接生産コストを増大させる。

井戸掘削費と井戸設備費のうちのケーシング費は 井戸総数 $\times$ 鉱体深度 に比例し、ポンプのための動力費は（生産井 + モニター井） $\times$ 鉱体深度 に比例する。

鉱体が深いことによるメリットとしては静水頭に基づく自噴の可能性が考えられるが、その鉱体の水文学的特性に左右されるので、常にそれが期待できるとは限らない。

（5）生産井単位流量

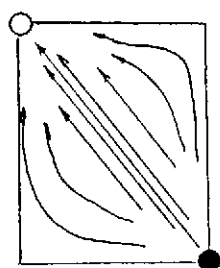
生産井 1 本当たりの単位流量は鉱体の水文学的特性、井戸間隔、鉱体の厚さ、注入井における浸出液の注入方法などによって決まる複合的要因である。この要因は貴液品位と共に、プロジェクトの根幹をなす年間生産量を決定する重要な因子である。また、生産井単位流量は貴液からウランを回収するサテライト樹脂施設の処理能力を決定するので、サテライトの設備費、操業費および廃水処理費に大きい影響を与える。この要因を決定するに当たっては、パイロット・プラント試験を実施する必要がある。

（6）浸出貴液品位

浸出貴液品位は鉱石品位と開口部（スクリーン）の長さにおける鉱化層と非鉱化層の比率および地下水の混入量に最も影響され、その時間的経過は浸出剤の化学系や井戸の配置パターンにも左右され则认为られる。しかしそれらの要因から貴液品位を予測することは困難で、生産井単位流量と同様にパイロット・プラント試験で決定しなければならない。

いま、5-スポット・パターンについて 1 本の注入井と 1 本の実産井がそれ

それ対角線上の頂点に位置する正方形を考へ



○…生産井

●…注入井

図 1-2 浸出液の流路

る。

注入井から生産井に向かう浸出液の流路は正方形全体に分布するが、対角線に沿ったものが最短距離となるので抵抗が最小となり、最も短時間で生産井に到達する则认为られる。

従ってウラン浸出は最初是对角線付近で進行し、この部分のウランが減耗する

につれて浸出は周辺部へ移っていく。しかし対角線付近の流路の流量は浸出が終了した後も変わらず、浸出液は流れ続ける。このため貴液品位は操業開始後暫くして最大値に達し、その後は徐々に低下し続ける経過をたどると认为られる。

操業するに当たっては貴液の流量と品位はある程度平均化する必要があるので、採掘ユニットの操業時期を重複させて対処する。

貴液品位が上昇した場合に直接増加する費用は、粗製錬の操業費、特にイエローケーキ処理費とその販売費等で、一方では生産量が増大するので、浸出貴液品位の上昇は直接生産コストに有利に作用する。逆に貴液品位が計画を下回った場合は、生産量が減少するので何らかの方法でそれを補償する必要がある。Crow Butte鉱山の場合には特殊な井戸掘削法である下部拡孔法（under-ream method）の採用が地下水の混入量を少なくすることによって貴液品位上昇に寄与している。Smith Ranchプロジェクトにおいても下部拡孔法の採用を予定している。

（7）年間操業日数

ウラン ISL 操業は連続操業を建て前としており、週 7 日、1 日 24 時間、3 ～ 4 方勤務が原則である。従って年間操業日数は 365 日から故障や定期修理に要する日数を差し引いたものになる。年間操業日数の増減は費用と生産量の双方に影響を与えるので、直接生産コストに与える影響は非常に小さい。

（8）単価に直接影響を与える要因

これに含まれるのは労務費単価、物品の価格、および電力単価等であるが、具体的な数量が与えられないとその影響度が評価できない。

（9）総括

以上で取り上げた直接要因のうち、カットオフ品位・層厚（GT）、井戸の配置パターン、および年間操業日数は、直接生産コストを直接左右するものではない。井戸間隔、生産井単位流量、および貴液品位はコストと生産量の双方に影響を与えるので、これらの要因に対する直接生産コストは双曲線関数をなす。Smith Ranchプロジェクトにおける影響分析の結果は、その関係を裏書きしている。一方、鉱体深度は一部の費用を深度に比例して増大させるので、直接生産コストは深度に対して右上がりの直線関係となる。

以上のことから直接生産コストに影響を及ぼす最も重要な要因は鉱体深度であり、井戸間隔、生産井単位流量、および貴液品位がそれに次いで重要である。

2. Smith RanchプロジェクトとCrow Butte鉱山の対比

2.1 地理的位置

表 2.1 地理的位置

《Smith Ranch》	《Crow Butte》
ワイオミング州 Converse 郡。 Glenrock の北方約 15 km に位置する。	ネブラスカ州 Dowses 郡。 Crawford の南東数 km に位置する。 標高 1,190 m (3,900 feet)

両鉱山ともワイオミング／ネブラスカ州境近くに位置し、直線距離で約190 km しか離れていない。

2.2 地文学的状况

表 2.2 地文学的状况

《Smith Ranch》	《Crow Butte》
東西南の三方を山岳や隆起で囲まれた構造的盆地である Powder 川流域の南端に位置する。	付近は 30 m (100 feet) 以下の局所的な起伏を伴った波打つ平野の地形をなしている。地表は主として家畜の放牧と干し草と小麦の栽培に向けられている。

2.3 地質的環境

表 2.3 地質的環境

《Smith Ranch》	《Crow Butte》
Powder 川流域にある重要なウラン鉱床は全て古第三紀層、すなわち暁新世 Fort Union 累層と始新世 Wasatch 累層の中に存在する。	白亜紀の Pierre 頁岩がウラン鉱化作用に対する下部賦圧累層である。これは暗灰色ないし黒色の海成頁岩であり本質的に不透水性層である。

表 2.3 (続き)

《Smith Ranch》	《Crow Butte》
Fort Union 累層の基盤岩はほぼ白垂紀頁岩と砂岩の細粒の碎屑岩からなる。始新世初期に中山形から侵食された碎屑物が大きな扇状地を形成した。 Wasatch 累層の堆積は石炭沼沢が形成される静穏な時期と粗粒碎屑物堆積の時期のサイクルからなる。碎屑物の供給源は Granite Mountains である。 漸新世，中新世および鮮新世において，砂岩の大量な堆積物と凝灰岩堆積物が古 Powder 河川として堆積した。古河川の流れが火山灰で閉塞するほど火山作用は活発であった。	Pierre 頁岩の上位に漸新世の White River 群がありこれは Brule 累層と Chadron 累層で構成される。Chadron 砂岩は Chadron 累層の基底部に存在し，薄い粘土層と粘土瘤を頻繁に介在する粗粒アルコース砂岩である。 Chadron 砂岩が Crow Butte 鉱床の母岩であり，採掘ユニットである。 Chadron 砂岩の上位には Chadron 累層の上部と Brule 累層の下部が被い，上部賦圧層となる。Chadron 累層の上部は明るい緑灰色のベントナイト粘土からモンモリロナイトと方解石からなる緑色および赤色の粘土に変化する。 Brule 累層は Chadron 累層の上位に整合的に被覆し，Brule 累層の下部はシルト岩と粘土岩からなっており，上方粗粒となっており淡黄色ないし褐色の砂岩，シルト岩である。 鉱化作用の源は被覆している火山灰から浸出されたウランの二次的沈着であり，主な還元剤は硫酸塩還元バクテリアによって生成された黄鉄鉱であると考えられている。

両プロジェクトの地質の最も著しい相違点は Smith Ranch (以下 SR と略す) ではウランを胚胎する累層で多数の砂岩層がシルト岩および粘土岩と互層をなしているのに対して，Crow Butte

(以下 CB と略す) では Chadron 砂岩の単層で形成されることである。

一方、共通する地域の特徴としては、デグラデーション (degradation) *1を有することが挙げられる。C 字形のロール・フロントの向きはデグラデーションの向きと一致するようである。

SR: 北向きに 1.5° のデグラデーションを有する。

CB: 南向きに $0.5 \sim 1.0^{\circ}$ のデグラデーションを有する。

母岩:

いずれもアルコース (花崗砂岩: 花崗岩などの機械的風化によって生じた碎屑物が固化したもの) であり、粘土層を介在する点でも共通している。

母岩が形成された地質時代は SR が晩新世～始新世であるのに対して、CB は漸新世である。SR の主力をなす Fort Union 累層と CB の Chadron 累層は少なくとも 17 百万年の違いがある。

地質時代		年（百万年）	
.....			
白亜紀		～ 65	
古第三紀	暁新世	65 ～ 55	 Fort Union 累層
	始新世	55 ～ 38	 Wasatch 累層
	漸新世	38 ～ 24	 Chadron 累層
新第三紀	中新世	24 ～ 5.1	
	鮮新世	5.1 ～ 1.7	
.....			

*1河川が平衡状態に達せんとする作用のうち、侵食によって到達する作用。

ウラン鉱化作用：

ウラン鉱化作用の時期については両者とも明確な記述はないが、CB についてはウラン鉱化作用の起源として“被覆している火山灰であろう”と推定されているのに対して、SR については“漸新世，中新世および鮮新世の火山灰”と記載されている。これらのことから新第三紀に起こった火山作用による火山灰がウランの起源であると考えられ，地理的距離を考えるとこれは両者に共通するのではないかと思われる。還元剤としては CB では硫酸塩還元バクテリアによって生成された黄鉄鉱が挙げられている。このバクテリアは従属栄養細菌であるので，付近に栄養源となる有機物が存在した筈である。Crow Butte 鉱床発見の端緒が石油とガスの探査ボーリングであったことからすれば，有機物の存在は充分考えられる。

2.4 ウラン鉱床

表 2.4 ウラン鉱床

	《Smith Ranch》	《Crow Butte》
鉱石の形態	ロールフロント・タイプの砂岩型鉱床	ロールフロント・タイプの砂岩型鉱床
主要ウラン鉱物	コフィン石とセンウラン鉱 (推定)	コフィン石とセンウラン 鉱
鉱体深度	137 ～ 305 m (450 ～ 1,000 feet)	84 ～ 250 m (275 ～ 820 feet) 平均 200 m (650 feet)
鉱体の平面的大きさ	鉱区面積で 21,450 ha.。	長さ約 10 km (6 mile) 最大幅 914 m (3,000 feet)。
鉱石の厚さ	最も厚い 0 sand 層は 75 ～ 90 m (250 ～ 300 feet) の厚さを有するが 鉱化作用はそのユニット の下部 3 分の 1 で起こ っている。	5 ～ 15 feet (1.5 ～ 4.5 m) 平均 5 feet。

表 2.4 (続き)

	《Smith Ranch》	《Crow Butte》
プロジェクトの原 位置資源量	15,420 t (34 百万 lb) U ₃ O ₈ 平均品位 0.11% U ₃ O ₈ (1990 年 12月31日 現在)。	13,600 t (30 百万 lb) U ₃ O ₈ 平均品位 0.25% U ₃ O ₈ (一部許可区域外の ものも含む)。

2.5 水文地質学的状況

表 2.5 水文地質学的状況 (Smith Ranch)

《Smith Ranch》
Smith Ranch については水文地質学的データは皆無に近い。シルト岩と粘土岩が賦圧層として砂岩層と互層を成しているが、それらの岩石の透水性などに関するデータも見あたらない。ただブリード*2 に関する記述が見られる。各採掘ユニットにおいては注入されたより多くの浸出液が生み出されるので、局所的な水位降下円錐が形成される。周囲の区域から採掘ユニットへ向かう自然の地下水の動きを引き起こすことによって、この圧力勾配による浸出剤の封じ込めが達成される。この浸出液の注入量と汲み上げ量の差がブリードと呼ばれ、生産量の 0.5%(Q sand の場合) ～ 1.5% (O sand の場合) に達すると予想されている。これらのブリードはイオン交換でウランを回収した後、廃水処理へ回される。

*2医学においては瀉血に相当し、余った余分なものを放出する意に用いられる。

表 2.6 水文地質学的状況 (Crow Butte)

《Crow Butte》
ウランの母岩である基底の Chadron 砂岩は水で飽和しており，局所的地形が沈下している自噴（流動）状態をつくり出す地域的に広大な被圧帯水層を形成している。Chadron 砂岩は粗粒のアルコース砂岩で，プロジェクト区域では平均 12 m (40 feet) の厚さを有する。鉾体の帯水層で，Chadron 帯水層と呼ばれるものは，北ないし北西へ緩やかに傾斜し鉾山の付近では砂の最上層の約 151 m (495 feet) 上に被圧面を有する Chadron 帯水層に最も近い上位の帯水層は Brule 砂層（帯水層）でありこれは Chadron 帯水層とは約 61 - 152 m (200 - 500 feet) の粘土，粘土岩およびシルト岩によって分離されている。プロジェクト区域における Chadron と Brule 帯水層の被圧面の高低差は約 18 m (59 feet) である。
採掘ならびに環境対策の目的で水文地質的なパラメーターを確立するために，プロジェクト区域において二つの大きな帯水層ポンプ試験が行われた。帯水層ポンプ試験は 51 時間と 72 時間にわたって行われ，Chadron 帯水層と上下の賦圧層の水文的な特性を決定するのに用いられる定性的なデータが得られた。帯水層ポンプ試験の結果は，Chadron（鉾体）砂岩は約 2.8 m/d (9.10 feet/d) の平均動水伝導度（透水率）を有する，非漏洩性で被圧された，やや異方性の帯水層であることを示している。平均貯留率は 1.04×10^{-4} であると計算されている。ポンプ試験は上下の賦圧ユニットが Chadron 帯水層からの水の垂直方向の動きを充分制限することを示しており，監督官庁も満足している。

2.6 両プロジェクトの現在のステータス

表 2.7 Smith Ranch プロジェクトの現在のステータス

《Smith Ranch》
Rio Algom Ltd. は 1989 年に Kerr McGee Corp. から鉱区を買い取り、さらに探鉱によって一部の埋蔵量を追加して、合計埋蔵量 34 百万lb U_3O_8 を獲得した。Kerr McGee Corp. によるパイロット・プラント試験の結果と、Everest Minerals Corp. による付近の Highlands ウランプロジェクトの操業を参考にして、Rio Algom Ltd. は再度パイロット・プラント試験を実施した。その結果を基礎に 907 t (2 百万lb) U_3O_8 /年の生産能力を有するウラン ISL 商業的プロジェクトが申請された段階である。

表 2.8 Crow Butte プロジェクトの現在のステータス

《Crow Butte》
Crow Butte Resources, Inc. は 1991 年 4 月に Crow Butte ISL ウラン鉱山でイエローケーキの商業的生産を開始した。現行の生産量は 700,000 lb U_3O_8 /年であるが、段階的に生産規模を増大して 1997 年までに 1 百万 lb U_3O_8 /年に増やす予定である。

2.7 免許申請・認可の状況

Smith Ranch の商業的操業のための免許申請・認可の状況は、報告書の表 4 に詳細に記載されている。その認可の状況を要約すると下記ようになる。

表 2.9 Smith Ranch の状況

免 許	現 状
放射性物質取り扱い 免許	1991 年の第 4 四半期に免許が与えられる予定である

表 2.9 (続き)

鉱山保安 認定番号	商業的操業開始の事前通知が、資格がパイロットから商業的活動に変わる時点が必要。
採掘許可	1991 年 6 月に許可が与えられた。
探査のための許可	認可済み。
廃水处理井に対する 許可	申請準備中。1991 年に提出の予定。
土地投与による液体 廃棄物処理に対する 許可	申請準備中。1992 年に提出の予定。
蒸発池／廃水池に対 する許可	全般的な許可は与えられている。個々の池は最終設計の認可が必要である。
鉱業のための帯水層 の公共的用途からの 免除	認可済み。
非放射性核種放出に 対する大気質の許可	真空乾燥システムに対する大気質許可に関する申請を提出済み。
腐敗システムに対す る許可	認可済み。
危険性の無い土地埋 立てに対する許可	認可済み。

表 2.9 (続き)

井戸を建設するための許可	初期の井戸設備に対するモニター井の許可は出されている。
池を建設するための許可	ワイオミング州環境品質局の権限とは独立した行為であり、適切な堰堤安定性について最終設計を審査する。
建築許可	建設開始前に書面による申請を提出する予定。

表 2.10 Crow Butte の状況

関係監督官庁	環境的免許申請の状況
《連邦政府》 米原子力規制委員会	1986 年に水文学、植生、土壌、野生動物および放射線の状態に関する広範な情報を含む商業的免許申請の準備を開始し、1987 年 10 月に申請書類を左記の三機関へ提出した。 本件がネブラスカ州における最初のウラン鉱山であり、法制面での整備が遅れていたことにより、1990 年 4 月に漸く必要とする環境面での免許と認可が与えられた。
《ネブラスカ州政府》 Nebraska Department of Environmental Quality	
Nebraska Department of Water Resources	

2.8 井戸設備関係

表 2.11 井戸配置パターン

《Smith Ranch》	《Crow Butte》
井戸の配置は 5-スポット・パターンを基本とし、鉱体の形状に合わせて修正される。注入井の間隔は 23 ～ 46 m (75 ～ 150 feet) に設定されるので、注入井と生産井の間隔は 16 ～ 32 m となる。Smith Ranch では 1 本の井戸が複数の鉱化層準を貫いているが、ある操業期で採取の対象となるのは 1 枚の層準だけであり、他の層準は絶縁して浸出液が回らないようにする。モニター井は採掘ユニットの外縁からほぼ 150 m 離れて、井戸間最大間隔 150 m で設置される他に、生産層準のすぐ上とすぐ下の帯水層にも 1.6 ha. に 1 本の割合で設置される。	井戸の配置は鉱体の形状に合わせて 5-スポット、6-スポット（五角形）および 7-スポットと変化させる。注入井と生産井の間隔は 70 feet (21 m) である。操業用生産井の総数は 130 で、生産井に対する注入井の比率は 1.9 倍である。

(1) 井戸配置パターンの比較

幾何学的な性質から 5-スポットと 7-スポットの得失を考察する。いま、注入井と生産井の間隔を d (m)、注入井間の間隔を s (m)、生産井 1 本当たりの流量を q (L/s) とする（図 2-1 および 2-2 参照）。

5-スポットでは 1 本の実産井を 4 本の注入井で囲み、1 本の注入井を 4 本の実産井で囲むので、左右前後にパターンを拡張すると注入井対実産井の比率は 1:1 に近づく。7-スポットでは 1 本の実産井を 6 本の注入井で囲むのに対して、1 本の注入井を 3 本の実産井で囲むので、注入井対実産井の比率は 2:1 に近づく。従って実産井の流量が等しいとすると、同じ流量を確

保するには 7-スポットでは 5-スポットに比べてほぼ二倍の数の注入井を必要とする。

次に注入井から入った浸出液が生産井から汲み上げられる過程を考える。5-スポットの場合 1 本の注入井から 1 本の生産井へ向かう液量は $q \times 1/4$ であり、1 本の注入井と 1 本の生産井が関係した面積、すなわち浸出液が行き渡る面積は $d^2 \times 1/2$ である。一方、7-スポットの場合には液量は $q \times 1/2 \times 1/3 = q/6$ であり、行き渡る面積は $d^2 \times \sqrt{3}/4$ である。いま、スクリーン付き間隔が等しく t (m) とすれば、流量 ÷ (面積 × スクリーン付き間隔) は速度のディメンションとなり、化学工学で用いられる空間速度 (S.V. : space velocity) を与える。

$$\text{5-スポットの場合の S.V.} \quad \frac{1}{4}q \div \frac{1}{2}d^2t = \frac{1}{2} \frac{q}{d^2t} = 0.5 \frac{q}{d^2t}$$

$$\text{7-スポットの場合の S.V.} \quad \frac{1}{6}q \div \frac{\sqrt{3}}{4}d^2t = \frac{2\sqrt{3}}{9} \frac{q}{d^2t} \doteq 0.38 \frac{q}{d^2t}$$

計算上は 5-スポットの方が空間速度は大きいことになる。すなわち透水速度が良い場合は 5-スポットが良いが、透水速度が悪い場合は 7-スポットにする必要がある。

一方、パターン内の地上配管の長さは

5-スポットの場合 : $2\sqrt{2} \cdot d$

7-スポットの場合 : $(2 + \sqrt{3}) \cdot d$

となる。

(2) 井戸の孔内形状とその完成方法

井戸の孔内形状とその完成方法は両鉱山でほぼ共通している。直径 7" ~ 10" の鉛直な孔を掘削し、これに内径 4" ~ 6" のケーシング・パイプを入れ、孔壁との間にセメントを充填する。

下部の鉱化した層準ではケーシングを切断し、孔を拡孔してスクリーンを装着する。この方法を下部拡孔法 (under-ream method) と称するが、詳細な施工方法は報文では詳らかではない。このスクリーン付き間隔 (screened interval) を鉱化層準に正しく一致させることにより、非鉱化の砂岩層を浸出液が通ることを極力抑えて、貴液品位の低下を防ぐことが出来るとされている。

Crow Butte では下部拡孔法を採用することなどによりヘッド品位が 68 mg/L から 84 mg/L U_3O_8 に 24% 上昇しており、そのうちの 10% は下部拡孔法に基づく改善であると推定している。

一方、Smith Ranch では各井戸は複数の鉱化層準を貫いており、浸出は一度に一つの鉱化層準だけを対象としている。その間他の鉱化層準は閉じられているが、一つの鉱化層準の採取が完了して次の層準へ移る時の施工方法は報文では殆ど示されていない。これは複数の鉱化層を 1 本の井戸で開発する際の非常に興味深い点である。

2.9 製錬関係

表 2.12 浸出と製錬の化学系と処理能力

	Smith Ranch	Crow Butte
浸出液 (錯化剤)	地下水 + CO_2	Na_2CO_3 + CO_2
酸化剤	O_2	O_2
貴液品位 ppm U_3O_8	40 ~ 100	55
イオン交換装置	下降流カラム	上昇流カラム
ウラン溶離剤	$NaCl$ + Na_2CO_3	$NaCl$ + $NaHCO_3$
ウラン沈殿剤	H_2O_2 + NH_3	H_2O_2 + $NaOH$
イオン交換樹脂設備		
処理能力	189 L/s (3,000 gpm)	221 L/s (3,500 gpm)
イエローケーキ生産能力	2.54 t U_3O_8 /d または 907 t U_3O_8 /yr	320 t U_3O_8 /yr (700,000 lb U_3O_8 /yr)

鉱石中に他の金属鉱物が随伴して、貴液中に有害成分あるいはウラン以外の有価成分が存在すれば、それらを分離するためにイオン交換工程の後に溶媒抽出工程が付加されることが多い。Smith Ranch と Crow Butte はそのケースではないが、イエローケーキの品質向上のためにイオン交換と溶媒抽出を併用するのが世界の趨勢となりつつある。

2.10 環境対策

(1) 余剰放出水の処理

浸出液の域外への漏洩を防ぐために、鉱石層準への地下水の流動を促す水位降下円錐*3が形成される。そのため注入量より多い液量が生産井から汲み上げられる。汲み上げられた浸出貴液はイオン交換樹脂カラムでウランを採取した後、再調製して再び井戸に注入されるが、余った部分をブリード（余剰放出水）と称する。循環される浸出液には好ましくない化学種が蓄積するので、それを防止する意味でブリードは系外へ放出しなければならない。

表 2.13 ブリードの処理

	《Smith Ranch》	《Crow Butte》
放出量	Q sand では回収液量の 0.5%, O sand では 1.5% がブリード として放出されるように計画 されている。	回収液量の 0.5% ～ 1% のブ リードで操業されている。
処理法	余剰放出水は追加の下降流イ オン交換樹脂カラムでウランを除	余剰放出水は二重ライニングと 漏洩検知システムの付いた蒸発

*3井戸の揚水にともない、井戸のまわりの地下水面、あるいは圧力面が低下する現象が見られる。
水位低下は三次元的には水位降下円錐として描かれる。

表 2.13 (続き)

	《Smith Ranch》	《Crow Butte》
	去した後、バリウム／ラジウム硫酸塩の共沈法によってラジウムを取り除いて放出する。放出された水は灌漑などの土地投与に利用する予定であり、将来は深井戸（深度 10,000 feet）で処理することも計画している。	池で処理する。

(2) モニター井

表 2.14 モニター井

	《Smith Ranch》	《Crow Butte》
設置基準	生産層準の水平方向のモニター井は採掘ユニットの外縁から 91 m (300 feet) 離れたところに位置し、井戸間の最大間隔 150 m (500 feet) で設置される。垂直方向のモニター井は鉍体帯水層の直ぐ上と下の帯水層に、井戸フィールド 1.6 ha. (4 acre) につき各 1本の密度で設置される。	水平方向のモニター井は採掘ユニットの縁から 91 m (300 feet) 離れたところに位置し、鉍石を胚胎する砂岩層まで届いている。垂直方向のモニター井は採掘ユニット内の鉍体帯水層の上の第一帯水層に、井戸設備 1.6 ha. (4 acre) につきモニター井 1本の密度で設置される。
処置	モニターを含む各井戸の流量と圧力の測定により、逸水の有無を検出する。 モニター井は月に 2 回サンプルを採取して分析し、基準値と比較する。基準値となる逸水制	2 週間に 1 回採水して分析する。放出限界は電気伝導度、ナトリウム、硫酸塩、アルカリ度および塩化物に関するベースライン値の20% 増しに設定される もし任意の二つのパラメーター

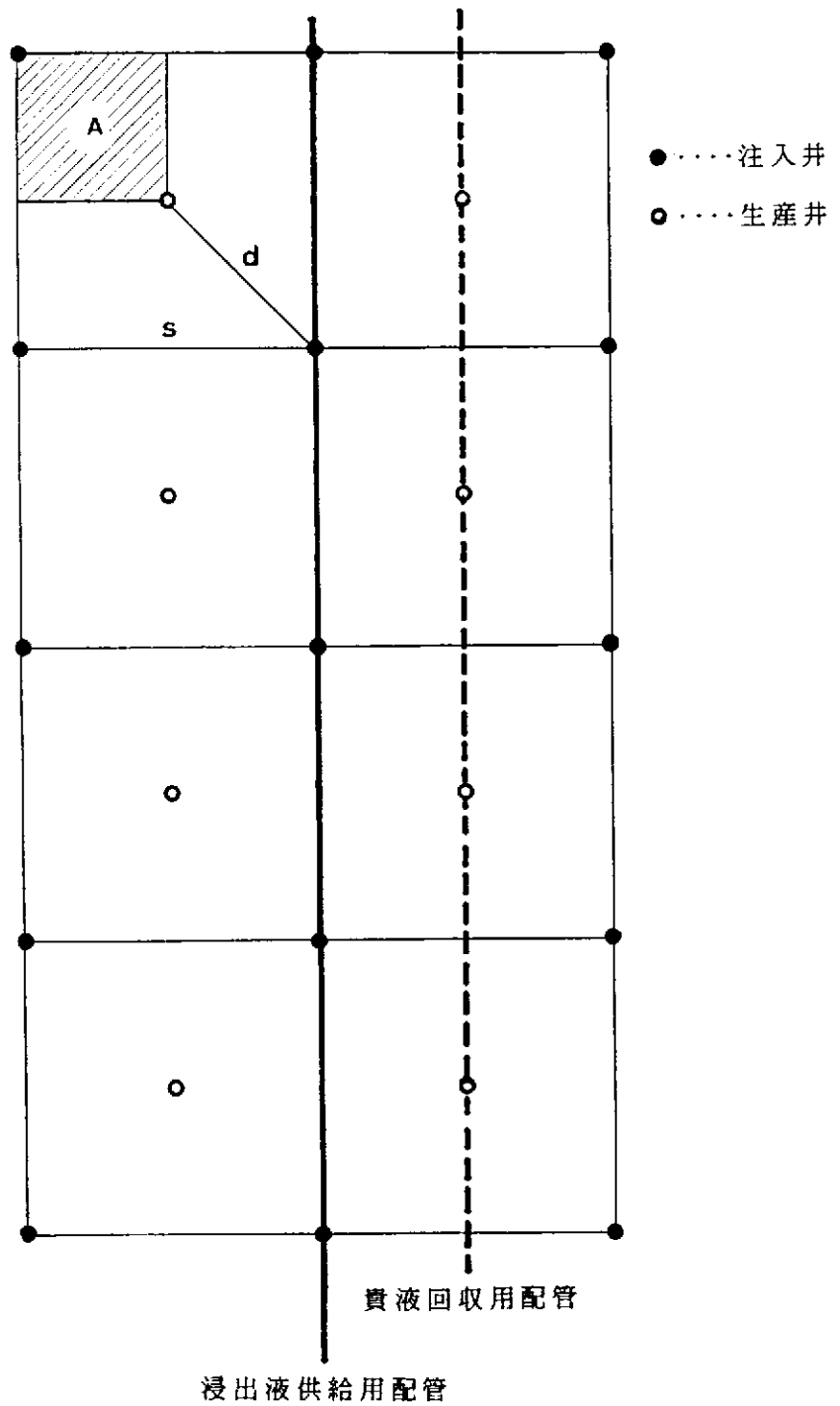
表 2.14 (続き)

	《Smith Ranch》	《Crow Butte》
	御上限値 (UCL) は浸出液を注入する前に集めた種々のベースライン・データを基礎に設定され、監督官庁へ提出される。もし浸出液の徴候がモニター井に現れたら、溶液が井戸設備区域へ戻すように生産井と注入井の流量を調整する。90日以内に逸水制御の効果が現れないと濃度減少の傾向が現れるまで、隣接の注入井への浸出液の注入を中止する。なお、UCL 値は異常値を除いたベースライン値の平均値に 5σ を加えて計算される。	がこれらの限界を超えるか、ある一つのパラメーターがさらに 20% オーバーしていることを示せば監督機関に直ちに通報し、矯正措置を取らねばならない。蒸発池の漏洩検知システムは毎日チェックされる。

(3) 帯水層の復元

表 2.15 帯水層の復元

	《Smith Ranch》	《Crow Butte》
	Smith Ranch では設備パイロットプラント試験の段階で、帯水層復元の試験を実施している。試験が完了した Q sand の結果は以下の通りである。 試験方法としては注入井から清水を注入し、生産井の水質から判断したものと思われる。 ボア・ボリューム 11,730 m³ 生産のためのボア・ボリューム 42 復元のためのボア・ボリューム 20 1 ボア・ボリュームの日数 22 日 復元に 440 日、約 1 年 3 ヶ月要したことになる。	帯水層復元の目標は影響を受けた帯水層の水質をベースラインの状態に戻すことである。各パラメーターについては若干の斟酌が与えられる可能性はあるが、採鉱前の用途に使用できることが最低の条件である。帯水層復元の第一段階は復元中の採掘ユニットの井戸から水を汲み上げ、次ぎに採掘する井戸設備に送ることである。 第二段階では水処理ユニットからの清水を復元している井戸設備に再注入する。汲み上げた水は水処理ユニットで処理し、その廃水は蒸発池で処理する。帯水層で起こっている化学反応を止めるために、処理の最終段階で硫化水素のような還元剤が加えられる。第三段階では地下水水質を均質化するために、鉱体帯水層の中を水を循環させる。 なお、CBR は土地再生契約保証金としてネブラスカ州に 5.0 百万ドルを供託している。



d = 注入井～生産井間隔

s = 注入井間の間隔

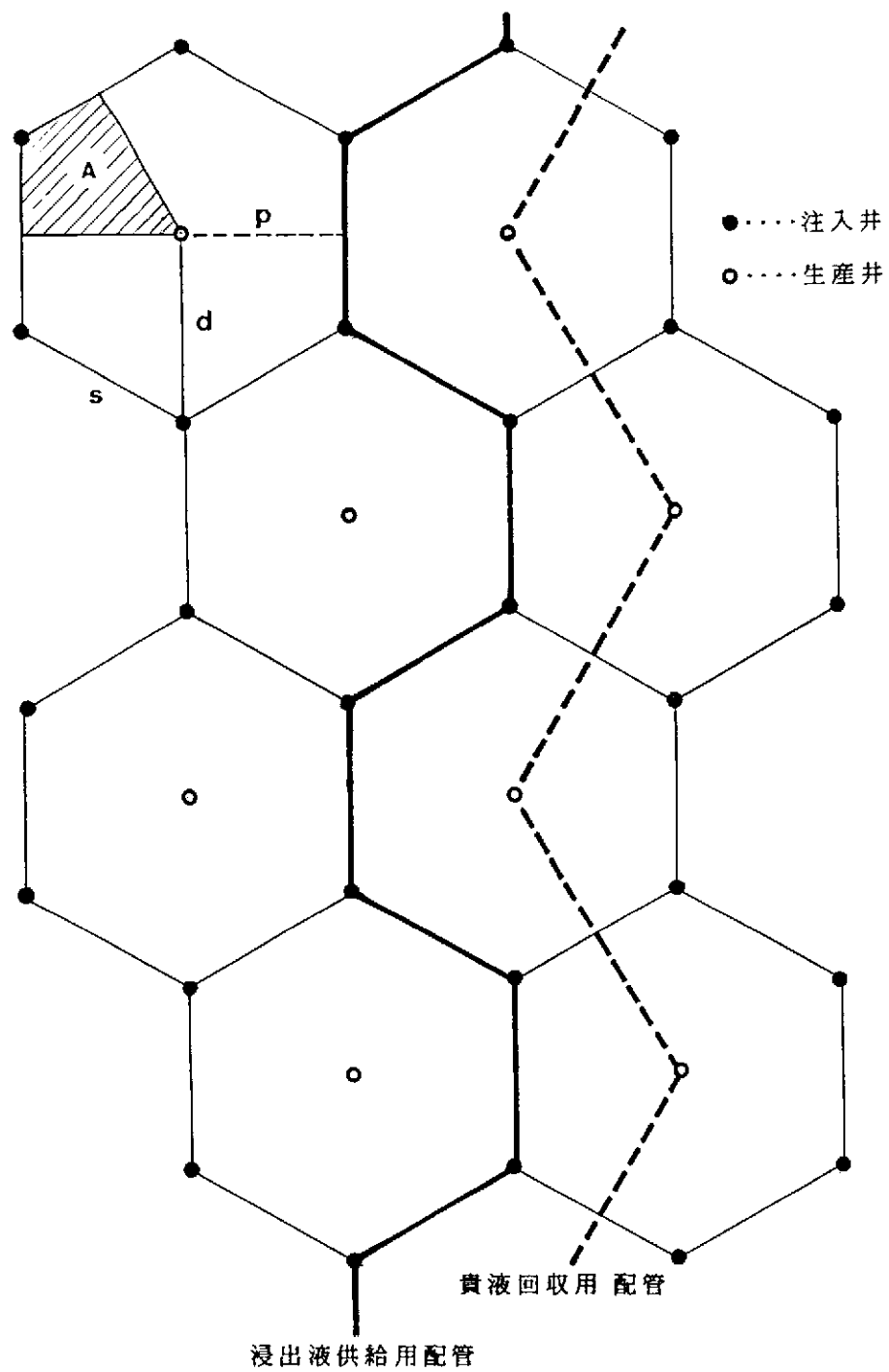
A = 斜線部面積

$s = \sqrt{2} \cdot d$

$$A = \frac{d^2}{2}$$

図 2-1

5-スポットの井戸配置パターン



d = 注入井～生産井間隔 s = 注入井間隔 p = 垂線
 A = 斜線部面積 $s = d$
 $p = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot d$ $A = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot d^2$

図 2-2

7-スポットの井戸配置パターン

〒
PNC 7363 96-001 VOL. 1, 2

図書室

~~限定資料~~

本資料は 年 月 日付けで登録区分
変更する。

東濃地科学センター 【研究調整グループ】

ウラン I S L コ ス ト 試 算 手 引 書 付 属 資 料 (1995)

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1 9 9 6 年 3 月

日 鉱 探 開 株 式 会 社

本文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下さい。

〒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

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)
1996

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。注)

〒509-51
岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸 9 5 9 - 3 1
動力炉・核燃料開発事業団
東濃地科学センター
技術開発課



~~限定資料~~

丁
PNC 寄 7363 96-001 Vol.1.2

1996年 3月

ウランISLコスト試算手引書付属資料 (1995)

谷 藤吉郎*

要 旨

本付属資料は、ウラン ISL コスト試算手引書作成のもととした、米国最大規模の ISL ウラン鉱山であるネブラスカ州の CROW BUTTE 鉱山と、今後開発を計画しているワイオミング州の SMITH RANCH 鉱床に関する以下の2文献の全翻訳である。

(1) CROW BUTTE ISL PROJECT - CASE HISTORY

BY S.P.COLLINGS, G.CACHPOLE AND G.KIRCHNER

(2) SMITH RANCH PROJECT : DEVELOPING AN ISL URANIUM MINE

BY D.E.STOVER

本報告書は、日鉱探開株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の受託により実施した業務の成果である。

契約番号：07C0998

動燃事業団担当課：東濃地科学センター 鉱床解析室

*：日鉱探開株式会社

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY

Technical Committee Meeting on Innovations
in Uranium Exploration, Mining and Processing
Techniques and New Exploration Target Areas
Vienna, 5-8 December 1994

Crow Butte

ISL Project - Case History

S.P.Collings, G.Cachpole, G.Kirchner

(1) CROW BUTTE ISL PROJECT - CASE HISTORY

BY S.P.COLLINGS, G.CACHPOLE AND G.KIRCHNER

C r o w B u t t e

I S L プロジェクト

ケース ヒストリー

Stephen P. Collings

Crow Butte Resources, Inc.

216 16th Street Mall, Suite 810

Denver, Colorado 80202

U.S.A.

Glenn Catchpole

Uranerz U.S.A., Inc.

216 16th Street Mall, Suite 810

Denver, Colorado 80202

U.S.A.

Gerhard Kirchner

Uranerz U.S.A., Inc.

410 - 22nd Street East, Suite 1300

Saskatoon, Saskatchewan S7K 5T6

Canada

概要：ネブラスカの北西隅に位置する Crow Butte プロジェクトは現在米国で稼動している四つの商業的インシチュリーチング（ISL）ウラン鉱山の一つである。施設は砂岩型（ロールフロント）ウラン鉱床が発見されてから 12 年後の 1991 年 4 月に商業的生産を開始した。鉱体は上下に優れた頁岩／粘土賦圧層を伴った、地表下約 213 m (700 feet) の高透水性帯水層の中に存在する。探鉱および開発期間の活動としては、鉱体描出、帯水層の保持を明示したパイロット試験、フィージビリティ・スタディー、環境面での許認可、エンジニアリング設計、および施設の建設が含まれる。商業的な操業開始は、現行の年産約 700,000 LB U_3O_8 *1 から 1997 年までに計画の年産 100 万 LB に増加させる段階的アプローチを採用している。アルカリ系浸出剤を用いた商業的生産の 4 年間における操業は、大きな技術的あるいは規制的な問題を引き起こすことなくスムーズに推移した。221 L/s (3,500 gpm) の処理能力を有するプラント建設の資本費は、テキサスとワイオミングに位置する閉止した ISL ウラン鉱山から中古のプロセス設備を入手することにより最低に抑えられた。現場での全従業員数が僅か 25 人であることが低生産コストに貢献している。

1 緒 論

前報 [1] で本プロジェクトの歴史と最初の 1 年半の操業の結果を説明した。本報は前報を更新し、続く 2 年間の操業の結果を付け加えた。

北西ネブラスカに位置する Crow Butte インシチュリー・リーチング（ISL）ウラン鉱山は、1991 年 4 月にイエローケーキの商業的生産を開始した。井戸設備は 221 L/s (3,500 gpm) の処理能力を有するプラントを用いて、現在 208 L/s (3,300 gpm) で操業している。Crow Butte のパラメーターの総括を表 1 に示した。本鉱山は酸素を酸化剤とするアルカリ浸出剤（重炭酸ソーダ）化学系を用いている。1980 年 [2] に発見された鉱体は現在の採掘区域の地表下約 183-213 m (600-700 feet) に存在する。鉱化作用は典型的な砂岩型（ロールフロント）鉱床である。鉱床は約 0.25% U_3O_8 の全体的品位を有している。1986-87 年の期間に行われたパイロットスケール採掘は、プロジェクトの採掘と帯水層保存の両フェイズについて技術的ならびに経済的フィージビリティを示した。

*1 1 は 1 と間違いやすいので、ポンドとリットルは LB, L と標記する。

表 1 Crow Butte 鉱床 Dawes 郡 ネブラスカ U.S.A.

プロジェクト総括

操業の形式

インシチュアリーチング

原 料

母岩の形態

砂岩

地質的名称／年代

Chadron 累層／漸新世

透水量係数

2,700 gpd/feet

動水伝導度

9.1 feet/day(2.8 m/day)

孔げき率（パーセント）

29%

トン係数 (cu feet/ton)

17

鉍石ゾーン上の静水頭 (feet)

550

鉍石特性

ウラン鉱物

コフィン石，センウラン鉱

平均深度 (feet)

650

平均品位 (% U_3O_8)

0.25

カットオフ品位 (% U_3O_8)

0.02

平均厚さ (feet)

5.0

平均品位厚さ (% feet)

1.25

カットオフ品位厚さ (% feet)

0.5

井戸設備特性

操業生産井の総数

130

生産井に対する注入井の比率

1.9

プロジェクトに対する生産液量 (gpm)

3,300

井戸当たりの平均生産量 (gpm)

25

井戸当たりの平均注入量 (gpm)	13
平均のスクリーン付き間隔 (feet)	15
配置 (井戸パターン)	5-7 スポット
井戸間隔 (生産井～注入井間, feet)	70
ケーシング内径 (inch) 注入井	4.5
生産井	4.5
ケーシング材質	PVC
完成の形式	下部拡孔法
地表標高 (海面から feet)	3,900
地下水温度 (° F)	70
天然地下水水質 (TDS)	1,250

プロセス

酸化剤 (濃度, mg/l)	O ₂ (200)
浸出剤 (濃度, mg/l)	NaHCO ₃ (1,000)
pH	7.7
貴液品位 (ppm U ₃ O ₈)	55
抽出プロセス	上昇流カラムイオン交換
溶離液の化学系	塩化物と炭酸塩
沈澱の化学系	過酸化水素
装置	プロセスタンク, ポンプ, ベルトフィルター, アジテ ーター, シックナー
ドライヤーの形式	真空
廃棄物処理 - 廃水	蒸発池, 深処理井戸, 土地 への適用
- 固体	ミル尾鉱

州および連邦の監督官庁によるプロジェクトの環境面での許認可は、主としてCrow Butte プロジェクトがネブラスカ州における最初のウラン鉱山であったため、米国内の他の ISL 鉱山に比較

してやや遅く困難であった。ネブラスカでは Crow Butte 鉱床が発見されるまでは、ウラン鉱業をカバーするいかなる規制も存在しなかった。従って州は ISL 鉱業に関する規制を研究し、準備し、認可する必要があった。

今では州の係官は規制を有しており ISL 鉱業に詳しくなったので、規制のプロセスはよりスムーズに効率的になり、許認可の修正も通常合理的と考えられる時間内に得られるようになった。

Crow Butte プロジェクトは、ネブラスカの小さな町 Crawford の南東約 6.5 km (4 mile) の標高 1,190 m (3,900 feet) に位置している。30 m (100 feet) 以下の局所的な起伏を伴った波打つ平野の地形は西ネブラスカを代表するものであり、地表は主として家畜の放牧と干し草と小麦の栽培に用いられている。平均年間降水量は 39.5 cm (15.5 inch) であり、気温の上下限は夏の 43 °C (+110 °F) と冬の -35 °C (-31°F) である。

Crow Butte プロジェクトは Crow Butte Resources, Inc.(CBR) によって所有され、CBR が一当事者であるジョイントベンチャーと操業契約 (Operating Agreement) に基づいて操業されている。地下鉱物権の所有者は CBR の子会社 Crow Butte Land Company である。本プロジェクトの使用収益権者と全ての生産の所有主は Uranerz U.S.A., Inc., Kepco Resources of America, Inc., および Geomex Minerals, Inc. である。

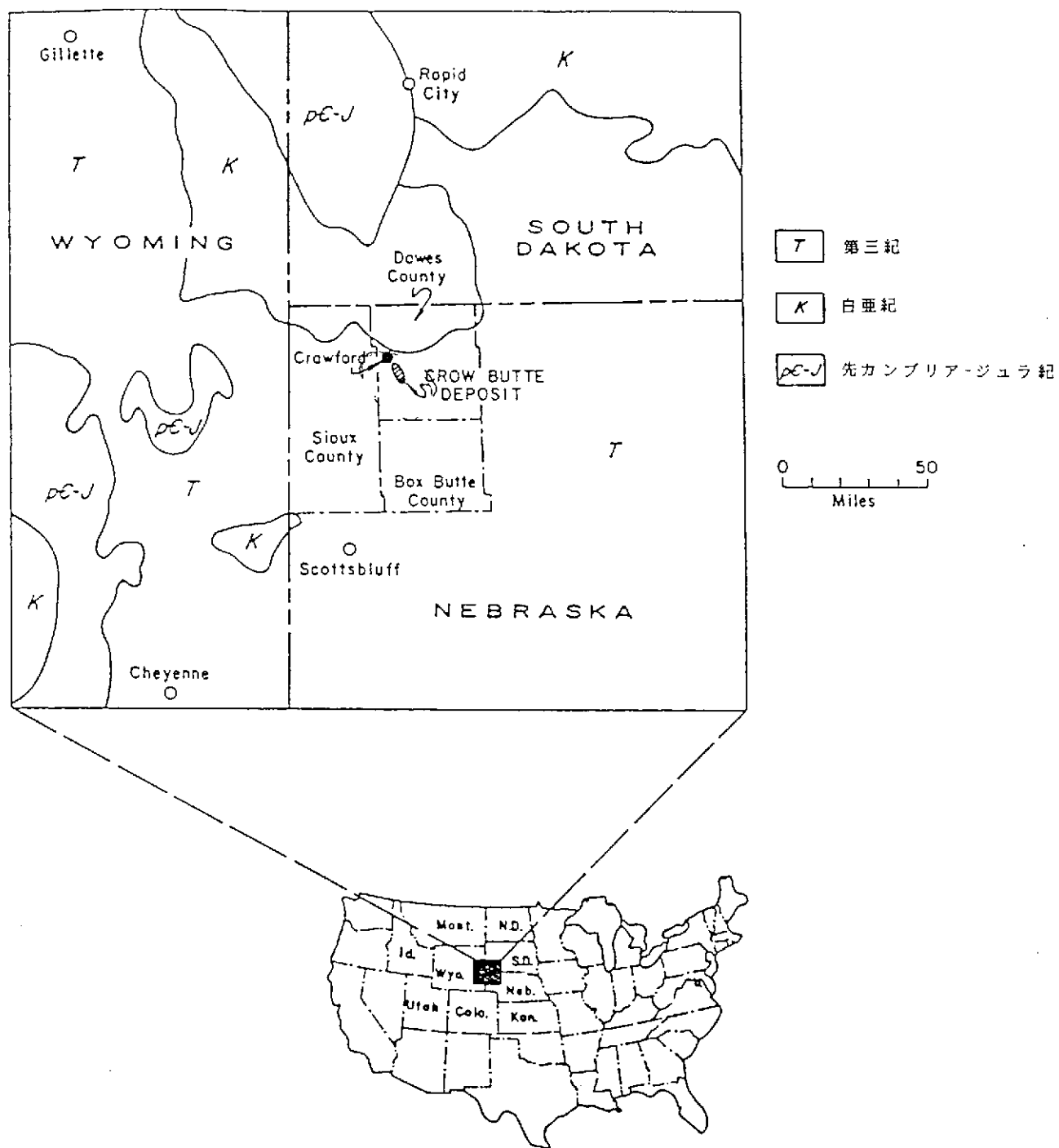


図 1

Crow Butte ウラン鉱床

位置と地域の地質

2. 地質

Crow Butte ウラン鉱床はWhite River 群の Chadron 砂岩ユニット中に賦存する（層序柱状図，図 2 参照）。Chadron 砂岩の下位には白亜紀 Pierre 頁岩が存在し，これはウラン鉱化層の下部賦圧累層にあたり，Crow Butte 地域にとって最も古い累層である。Pierre 頁岩は広く分布する暗灰色ないし黒色の海成頁岩であり，本質的に不透水性である。空中への暴露と侵食により，Pierre 頁岩の厚さは漸新世堆積の前に薄くなっている。Pierre の最上部は大きな不整合で，顕著な古地形を示す[3]。Pierre 頁岩の上位に局部的に古土壌が出現する[4]。

White River 群の年代は漸新世であり，Chadron と Brule 累層から構成される（図 3）。White River 群は北西ネブラスカの Pine Ridge 基底でバンド状に露出する。Chadron 累層は北西ネブラスカで最も古い第三紀累層である。

Chadron 砂岩は一般的に Chadron 累層の基底に存在し，薄い粘土層と粘土瘤を頻繁に介在する粗粒アルコース砂岩である。Chadron 砂岩は粘土層から上方にいくにつれ，耐久性の粘土層を挟み込む種々の量含む細粒砂岩に徐々に変化する。Chadron 砂岩は Crow Butte 鉱床の母岩であり採掘ユニットである。ウラン鉱化作用は上位の地質ユニットには存在しない。

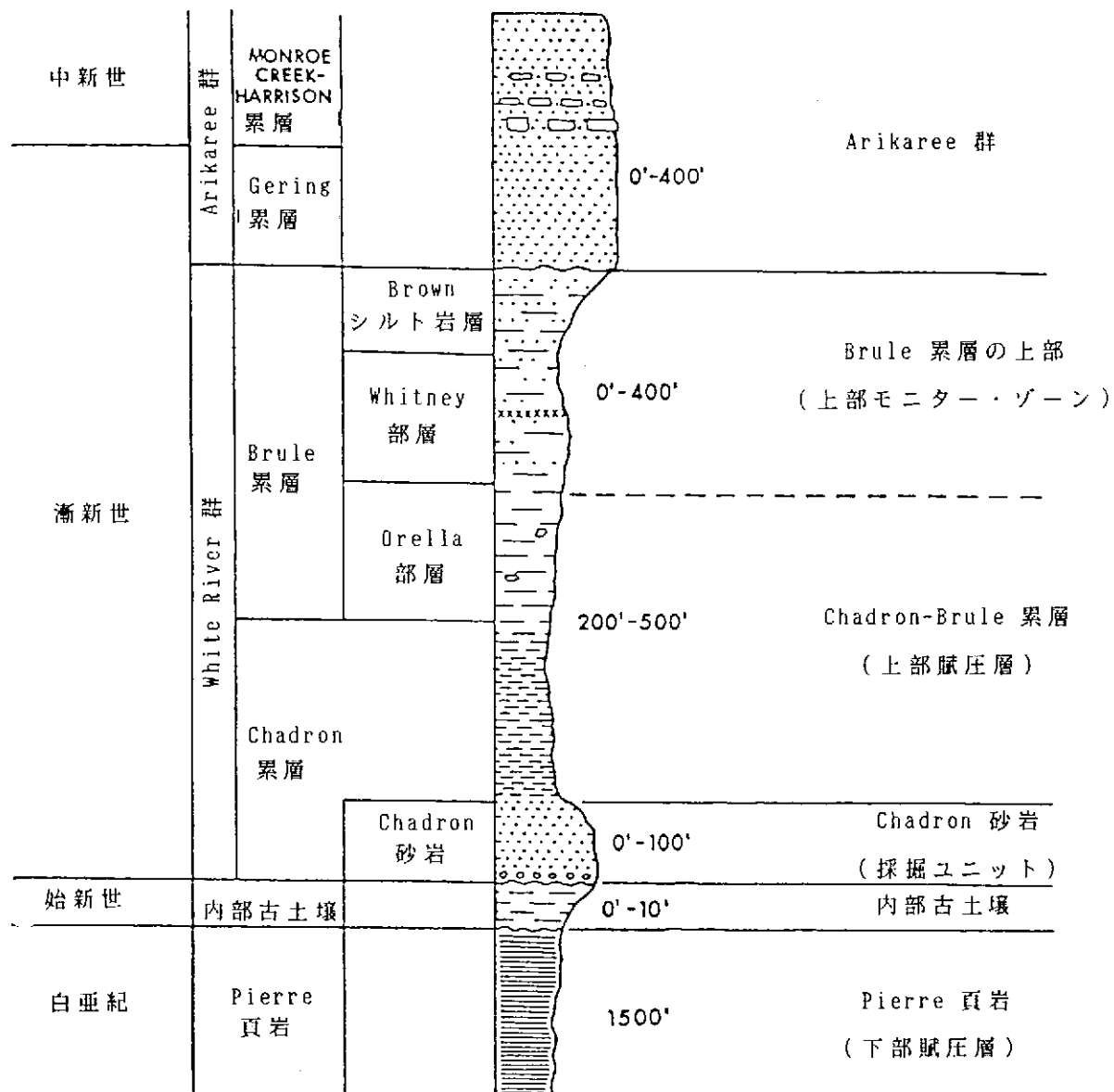
Crow Butte 区域内の Chadron 砂岩の垂直方向の厚さは平均約 60 feet （19 m）である。Crow Butte 地区のChadron 砂岩の等層厚線図から，北東方向の 0 feet から西方向の約 100 feet （30 m）まで層厚が変化することを示している（図 4）。井戸設備区域の東西方向の断面図は，地域の探査孔の電気検層で Chadron 砂岩の圧密性を示している（図 5）。砂岩層は西方でさらに厚く発達している。典型的な赤煉瓦色の連続性のある粘土層準が，一般的に Chadron 砂岩の上限をなす。

地質時代

SWINEHART et al (1985) 層序柱状図
に拠る

FEN 物理検層に拠る

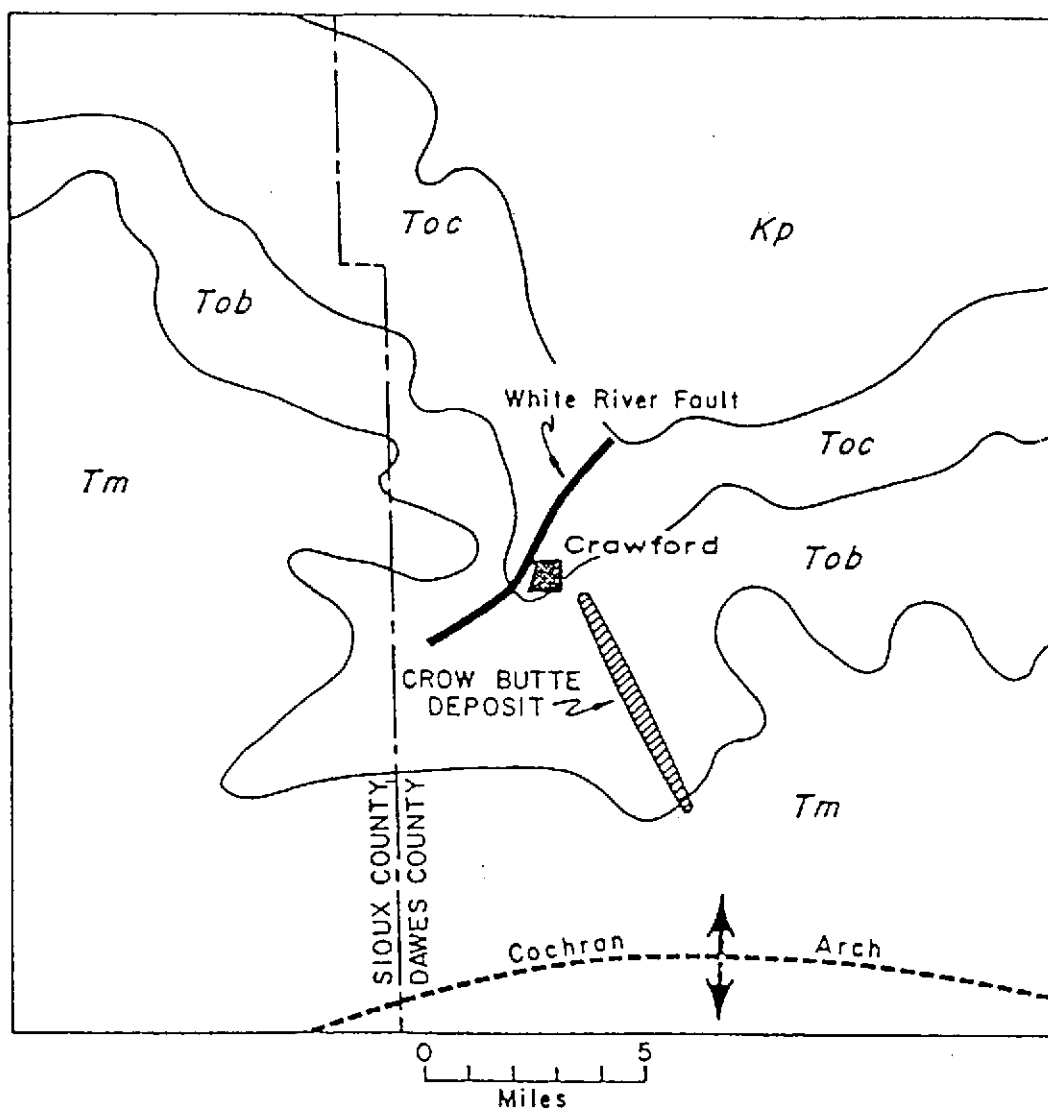
大凡の厚さ



REV. DATE	CROW BUTTE RESOURCES, INC.	
	CROW BUTTE PROJECT	
	Dowes County, Nebraska	
	AREA OF REVIEW	
	STRATIGRAPHIC COLUMN	
	PREPARED BY: F. E. N.	
	DWN. BY: JC	DATE: 2/88

図 2

層序柱状図



第三紀	Tm	Arikaree 群と Marsland 累層
	Tob	Brule 累層
	Toc	Chadron 累層
白亜紀	Kp	Pierre 頁岩

図 3

Crow Butte ウラン鉱床 - 北西ネブラスカ

局地的地質

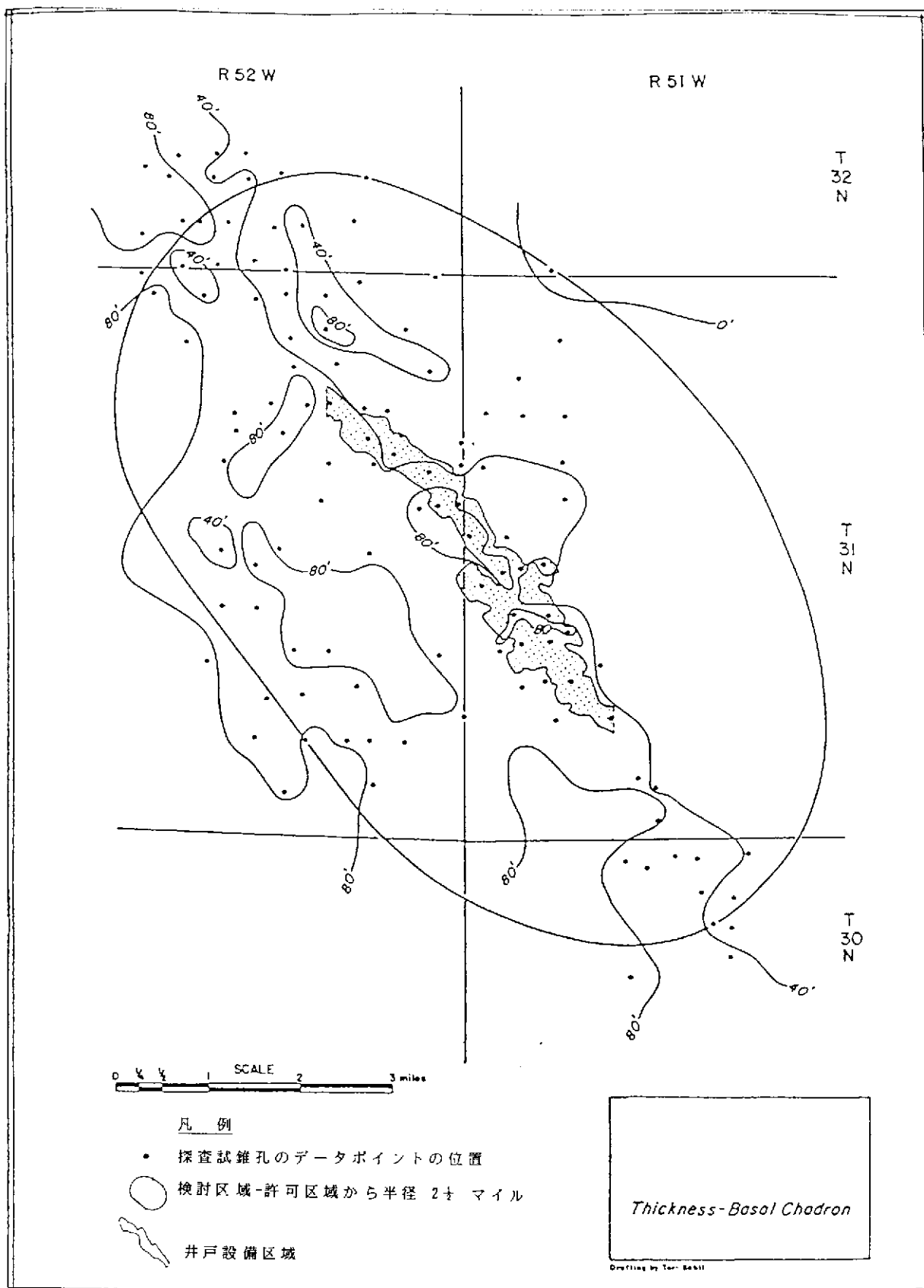


図 4

Chadron 基盤岩の厚さ

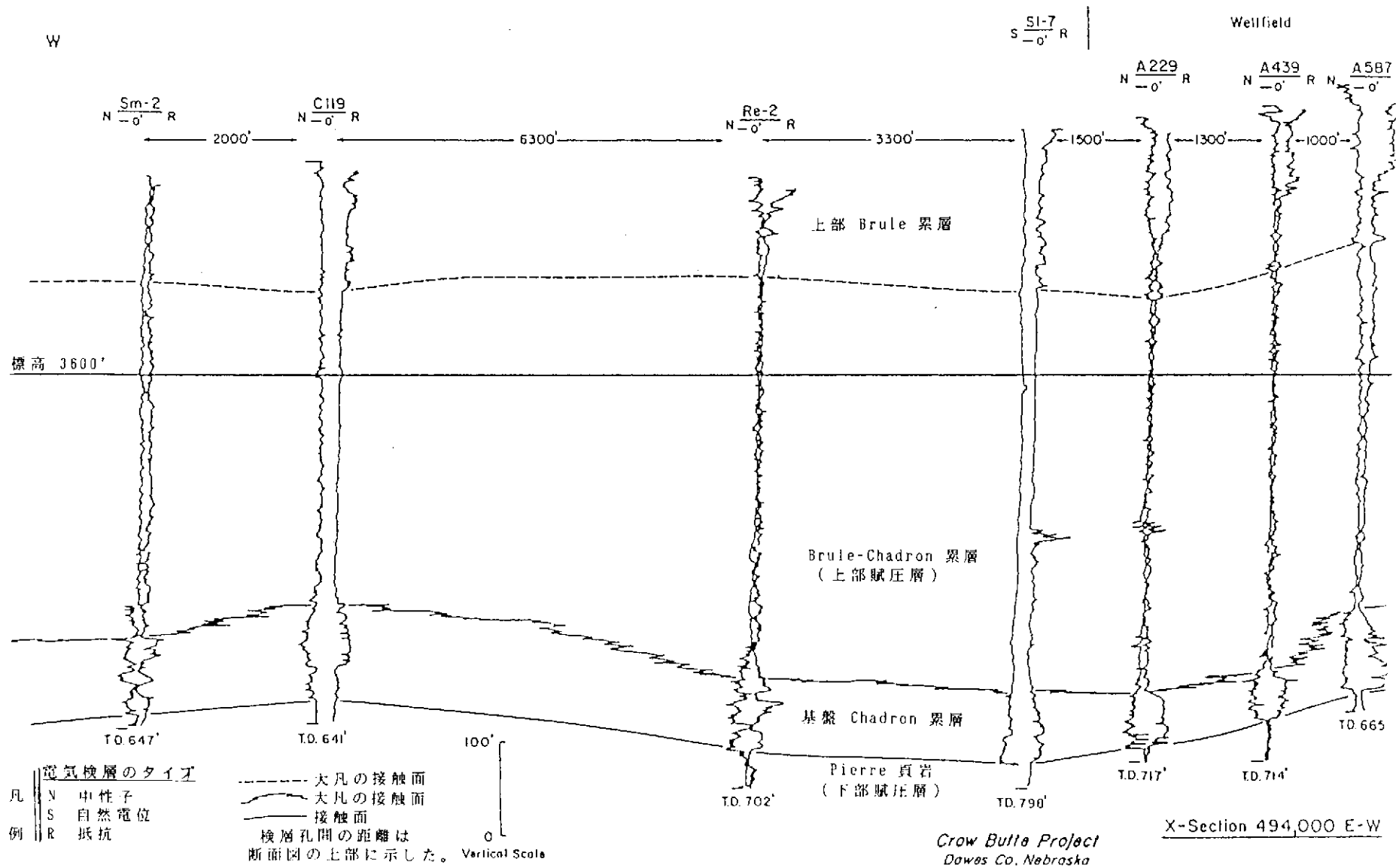


図 5 地層断面図

Chadron 砂岩の薄片観察により，その組成は 50% が単結晶石英，30 ないし40% が未分化の長石，斜長石および微斜長石であることが示されている。その他に多結晶石英，チャート，カルセドニー，種々の重鉱物および黄鉄鉱が含まれる。Chadron 砂岩のX線回折分析は，75% は石英で残りは カリ石英と斜長石であることを示している（表 2）。

表 2

X線回折によって定量した推定重量パーセント

<u>(上部賦圧層)</u>	<u>上部 Chadron 累層(2)</u> <u>(採掘ユニット)</u>	<u>Chadron 累層(4)</u> <u>(下部賦圧層)</u>	<u>Pierre 頁岩(2)</u>
石英	22.5	75.5	26
カリ長石	2	13	4
斜長石	1	9.5	1
カオリン-緑泥石	-	<1	9
モンモリロナイト	44	<1	32
ウンモ-イライト	1	<1	15
方解石	22	-	1.5
蛭石	0.5	-	-
非晶質	7	1	10.5
未同定	-	<1	1
合計	100	100	100

括弧内の数字はコアサンプルの数。

Chadron 砂岩のコアサンプルと露頭には直径が数インチにも達する粘土の瘤が多数認められる。しばしば厚さと連続性が変化するシルトと粘土のレンズが挟在し、上方に向って細粒砂岩となる。これらは恐らく氾濫原あるいは通常は河川の堆積作用の際に起こる低速度堆積を示すのであろう。許可区域内においては種々の厚さの粘土の層とレンズが、Chadron 砂岩を電気検層で示されるようなかなりはっきりしたサブユニットに細分する。

Chadron-Brule 累層，上部賦圧層

Chadron 累層の上部とBrule 累層の下部は Chadron 砂岩の上に横たわる上部賦圧層である（図 5）。この上部賦圧層は Crow Butte 地域で 61 ～ 152 m (200 ～ 500 feet) の厚さを持っている。Chadron の上部はその下に横たわる砂岩ユニットとは明瞭に異なる激しい層相変化を示す。Chadron 累層の上部は、明るい緑灰色のベントナイト粘土から下方に向かって緑色およびしばしば赤色の粘土に変化する。赤色粘土の X 線回折によれば、それは主としてモンモリロナイトと方解石からなることが示されている（表 2）。Chadron のこの部分はしばしば、灰白色のベントナイト粘土を挟む。Chadron の明るい緑灰色の“粘着性”粘土は試錐の際の優れた鍵層として役立ち、Crow Butte 内の殆ど全ての試錐孔で観察されている。上部賦圧層の垂直方向の動水伝導率の測定値は 1×10^{-10} cm/sec 以下である。上位の Brule 累層との接触は漸移的であり、試錐あるいは電気検層で首尾一貫して正確に捉えることは出来ない（図 5）。従って、Crow Butte 地域においては Chadron 累層の上部と Brule 累層の下部は一致する。

Brule 累層は Chadron 累層の上位に整合的に被覆する。Brule 累層は地域の殆どの場所で露出している。Brule 累層の下部は主としてシルト岩と粘土岩からなっている。細粒ないし中粒の砂岩流路が稀に Brule 累層の下部で観察されている。観察される時には、これらの砂岩流路は非常に限られた水平方向の広がりを持っている。

Brule 累層の上部 - 上部モニタリング・ユニット

Brule 累層の上部は主として、Brule 累層の下部より粗い粒径を持つ淡黄色ないし褐色のシルト岩からなる。Brule 累層の上部では時折砂岩ユニットを挟在する（図 5）。小さな砂ユニットは水平方向の広がりには限定され、水分を含んでいるが常に利用できる量の水を生み出すとは限ら

ない。これらの砂岩は Brule 累層の上部に含まれている。これらの含水砂岩の下限は採掘中は、浅いモニター井で監視される。

Crow Butte 地域の構造を図 6 に示した。第三紀 Chadron 累層の基盤である白亜紀 Pierre 頁岩最上部の標高コンターが構造を表している。構造特徴は、Chadron 累層堆積と Chadron 累層堆積の後に起こったある量の構造的な褶曲と断層運動以前の Pierre 頁岩の侵食古地形を示している。地域的にならびに地域内では、White River 群、Chadron および Brule 累層は南方へ 0.5 ないし 1° 緩やかに傾斜している。White River 断層は地域の北西隅に沿って存在しており、Chadron および Brule 累層を切っているので後漸新世の年代と推定される。断層は南に上り落差面を有する 61 - 122 m (200 - 400 feet) の総垂直変位を持っている。White River 断層は許可された井戸設備地域の北限から北西に約 1.5 mile 離れている。

地域全体にわたる密間隔試錐のデータによれば、井戸設備内には特徴的な断層は存在しないことが明らかとなっている。Crow Butte 地域には西側にブランチする東西方向の向斜構造が分布する。関連した東西方向の背斜が地域の南部に沿って存在する。この背斜軸は DeGraw [3] によって提案された Cochran アーチにほぼ平行であり、恐らく関係した特徴であろう (図 3)。

中新世 Arikaree 群は、西から東へ北西ネブラスカを横切る Pine Ridge 海底崖を形成する三つの砂岩累層を含んでいる。これらの砂岩の起源は河成であり、現在の採掘区域では侵食され分布しない。

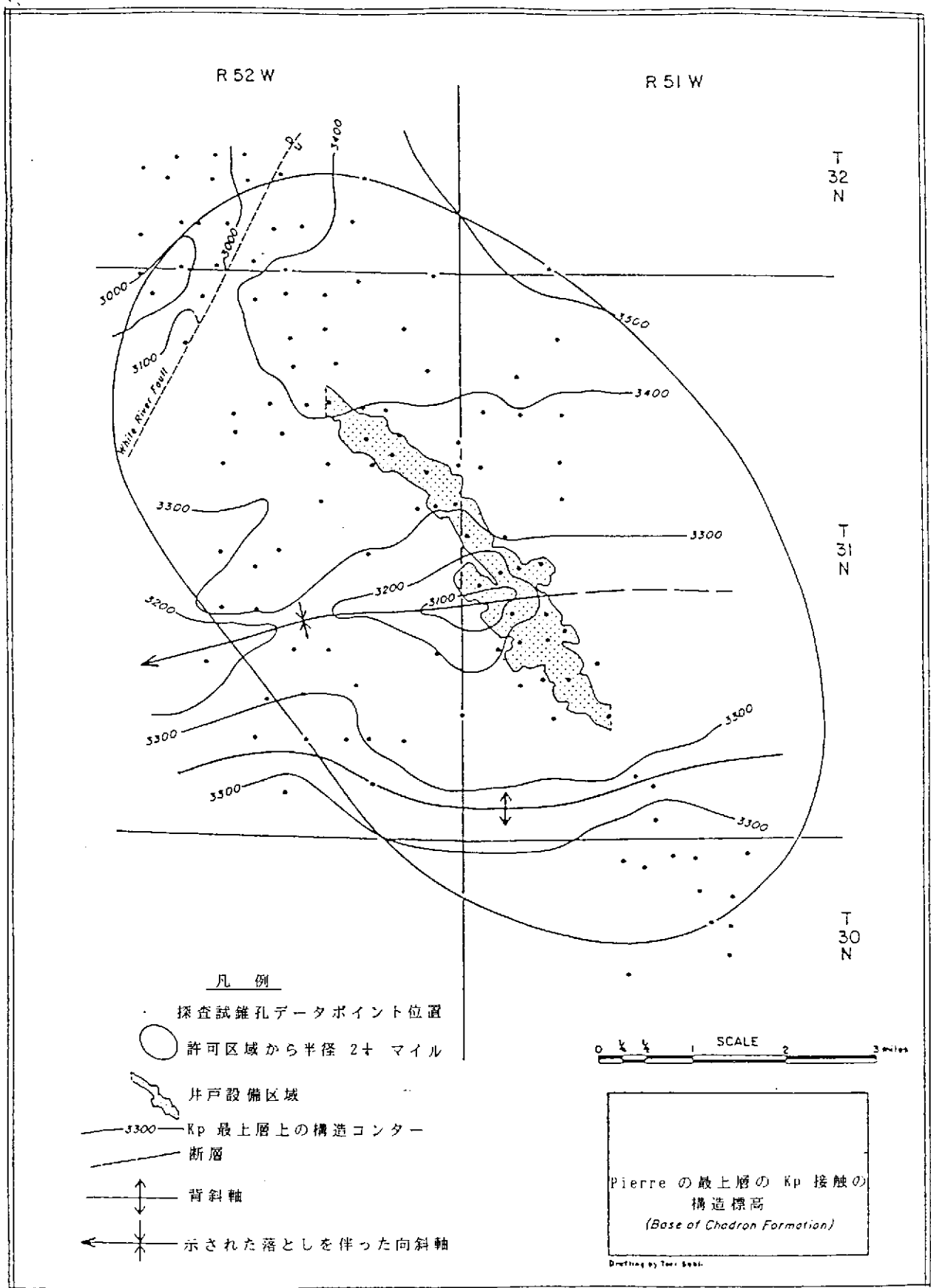


図 6

Pierre の最上層の Kp 境界の構造標高

ウラン鉱化作用の起源は被覆された火山灰から浸出されたウランの二次的堆積（沈澱）であると考えられる[5]。主力の還元剤は硫酸塩還元バクテリアによって生成された黄鉄鉱である[5]。鉱体は長さ約 10 km (6 mile) , 最大幅 914 m (3,000 feet) の酸化／還元フロント・システムを伴った、典型的なロールフロント鉱床である。鉱石はどの場所においても 1 ないし 5 の層準で存在している。鉱石の厚さは 1.5 ～ 4.5 m (5 ～ 15 feet) の範囲にあり、鉱体深度は地表から 84 ～ 250 m (275 ～ 820 feet) である。鉱物学的研究により、ウラン鉱物は主としてコフィン石であり、Chadron 砂岩のマトリックス中の黄鉄鉱に随伴するセンウラン鉱を伴うことが示されている[6]。Chadron 砂岩の有機物含有量は非常に低く、0.02 ～ 0.20% の範囲である[5]。Crow Butte 鉱床の鉱石の平均品位は 0.25% U_3O_8 である。鉱床の原位置ウラン埋蔵量は 30 百万 LB U_3O_8 であると推定され、これには現在の許可区域外の鉱化作用も含まれる。

石油およびガスの検層結果を含む当地域の地質研究により、Pierre 頁岩の直上の第三紀の基盤で広い河成系が明らかにされた。メタンガスの存在と結び付いた、いくつかの石油およびガス井におけるガンマ検層は探査試錐計画に基礎をきずいた。1979 年に合計 95 本の探査孔が Crawford 地域で掘られ、弱いウラン鉱化作用を認めた。1980 年に掘られた 100 本目の追加探査孔が鉱石級のウラン鉱化作用を横切り、Crow Butte 鉱体発見の基礎となった。1980 年の追加試錐により鉱化作用の趨勢が明らかにされた[2]。

3 水文地質

ウランの鉱化母岩である基底の Chadron 砂岩は水で飽和しており、局所的な地形が沈下し、自噴（流動）状態をつくり出す地域的に広大な被圧帯水層を形成している。Chadron 砂岩は粗粒のアルコース砂岩で、プロジェクト区域では平均 12 m (40 feet) の厚さを有する。鉱体の帯水層、地方では Chadron 帯水層と呼ばれるものは、北ないし北西へ緩やかに下がっている鉱山の付近では砂の最上層の約 151 m (495 feet) 上に被圧面を有する。Chadron 帯水層に最も近い上にくる帯水層は Brule 砂岩（帯水層）であり、これは Chadron 帯水層とは約 61 - 152 m (200 - 300 feet) の粘土、粘土岩およびシルト岩によって分離されている。プロジェクト区域における Chadron と Brule 帯水層の被圧面の高低差は約 18 m (59 feet) である。

採掘ならびに環境対策の目的で水文地質的なパラメーターを確立するために、プロジェクト区域において二つの大きな帯水層を対象としたポンプ試験が行われた。帯水層ポンプ試験は 51 時間と 72 時間にわたって行われ、Chadron 帯水層と上下の賦圧層の水文的な特性を決定するのに用いられる定性的なデータが得られた。帯水層ポンプ試験の結果は、Chadron (鉍体) 砂岩は約 2.8 m/d (9.10 feet/d) の平均動水伝導度 (透水率) を有する、非漏洩性で被圧された、やや異方性の帯水層であることを示している。平均貯留率は 1.04×10^{-4} であると計算されている。ポンプ試験は上下の賦圧ユニットが Chadron 帯水層からの水の垂直方向の動きを充分制限すること示しており、監督官庁も満足している[7]。

4 パイロット試験

1981 年と 1982 年における広範な探査試験とその評価の後、鉍床の ISL 採掘に対する適応性と採掘によって汚染された帯水層の復元に関する技術的／経済的フィージビリティを確立するために、パイロット試験鉍山を認可し操業させる決定が下された。この後者の局面は監督官庁の要求であり、商業的鉍山操業に免許を与えるための前提条件であった。1982 年にパイロット試験井戸設備の場所が選択され、パイロット試験免許申請準備のために環境のベースライン・データが集められた。

免許申請が 1983 年初期に監督官庁へ提出され、1985 年には全ての必要な認可が得られた。

6.3 L/s (100 gpm) のパイロット処理プラントの建設が 1985 年半ばに始まり、1986 年初期に完成した。

パイロット試験の採掘は 1986 年半ばに始まり、pH 7.1 ~ 7.4 の範囲で操業するアルカリをベースにした (重炭酸ソーダ) 浸出剤を用いて 1987 年 2 月まで続いた。酸素が酸化剤として用いられ、陰イオン樹脂を用いるイオン交換カラムがウランを採取するのに使用された。影響を受けた帯水層の復元 (再栽培) が採掘完了後すぐ始められ、1987 年 8 月まで続いた (約 6 ヶ月間)。帯水層復元の方法には、地下水による掃除、水処理と還元剤の添加、および最後に帯水層の再循環が含まれる[7]。

パイロット試験の結果はウラン採取と帯水層の復元の双方について、プロジェクトの技術的ならびに経済的実行可能性を成功裡に示した。試験はまた、監督官庁を満足させて、採掘溶液が垂直と水平の両方向で保持されることを示した。パイロット試験期間中、採掘溶液の漏洩は起こらなかった。プロジェクトはパイロット試験において重大な規制上あるいは環境面での問題を起こさず、労働者に対する放射線被ばくに関しても問題なかった。

5 商業的操業

5.1 環境的免許

ネブラスカで ISL ウラン鉱山を建設し操業するためには、オペレーター、Crow Butte Resources, Inc. は州政府と連邦政府からプロジェクトの認可を得る必要があった。ISL採掘に関して権限を有する州の主な監督機関は Nebraska Department of Environmental Quality と Nebraska Department of Water Resources である。連邦レベルではウラン採掘に関して権限を有する中心の機関は米国原子力規制委員会（NRC）である。免許申請書類は上記の三機関にそれぞれ別個に提出しなければならなかった。水文学、植生、土壌、野生動物および放射線の状態に関する広範な情報を含む商業的免許の申請の準備は1986年に始まり、膨大な申請書類の提出は1987年10月に行われた[7]。

本報の緒論の部分で述べたように、環境面での免許は複雑であり、Crow Butte プロジェクトがネブラスカ州で免許を与えられる最初のウラン鉱山であったという事実により遅れた。ウランISL採掘をカバーする規制は適切な州機関が最初に執筆し、そして承認を受ける必要があった。多くの努力と度重なる話合いの後、必要な環境面の免許と認可が1990年4月に与えられた。小さいが発言力のある環境グループからの反対が、公開の会合とヒアリングの数を増加させることによって免許授与を長引かせた。地方の住民は圧倒的にプロジェクトに賛成であり、環境グループはその多くのアピールと抗議において成功しなかった。

5.2 商業的建設

商業的 ISL 採掘施設の建設は 1990 年 5 月に始まり、1991 年 3 月に完成された。施設は三つの主要な構成部分に分けることができる。最初の構成部分は注入井、生産井、モニター井、孔内設備と地表設備からなる井戸設備である。第二の構成部分は建家とプロセス設備を含む処理プラントである。処理プラントと井戸設備は図 7 に示した。第三の構成部分は廃水処理システムであり、これは Crow Butte ではプラスチックで被覆した（二重ライニング）蒸発池からなっている。これらの構成部分はいずれも別個に考察する予定である。

5. 2. 1 井戸設備の設計と建設

Crow Butte ISL 鉱山でウランを生産するのに必要な井戸は、水井戸の掘削業でよく見受けられるロータリー掘削リグを用いる削孔業者によって設置される（図 7）。Crow Butte では注入井、生産井およびモニター井を設置するために、オペレーターによって 3 ないし 4 基の契約掘削リグが用いられている。

CROW BUTTE PROJECT

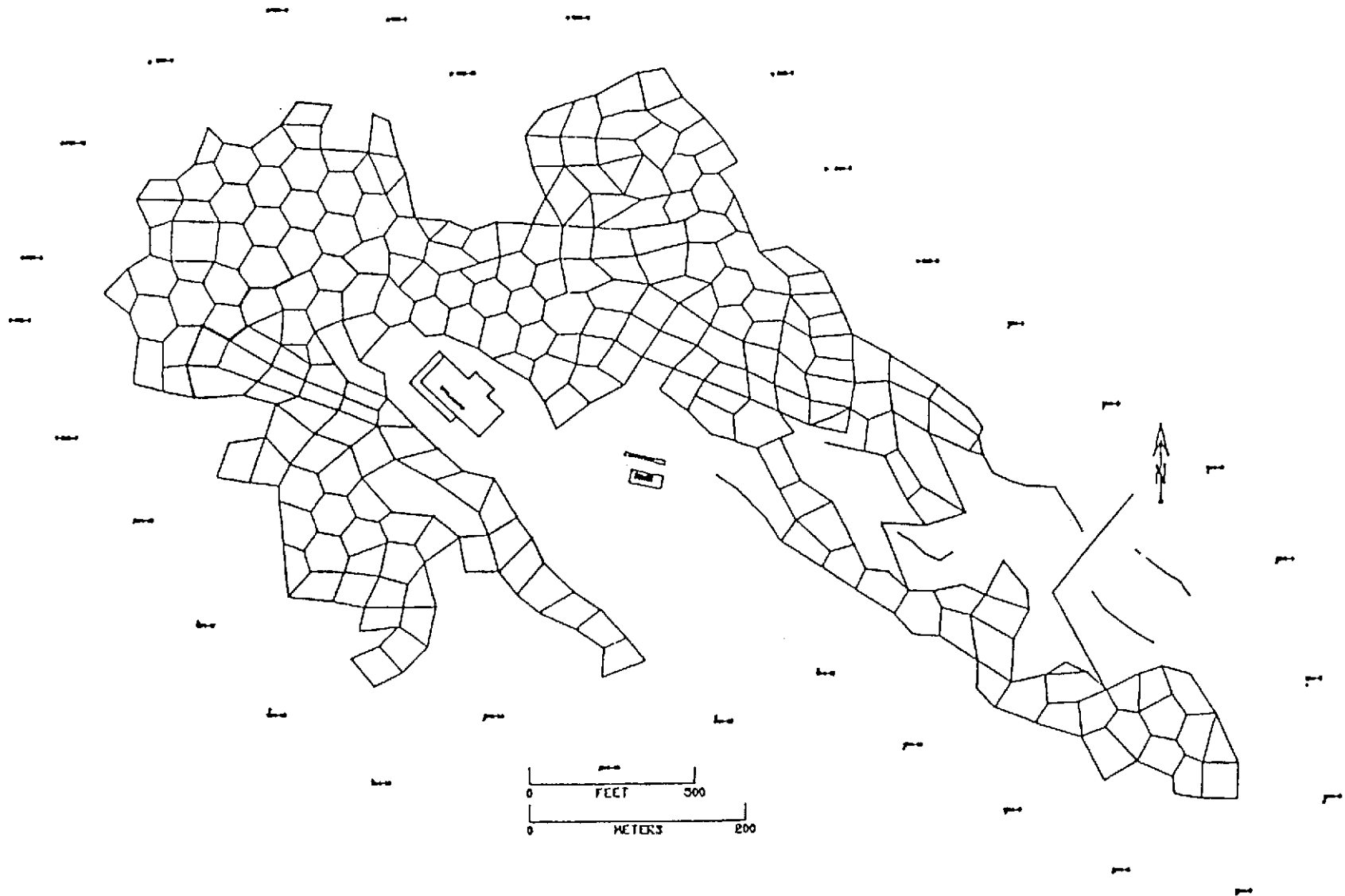


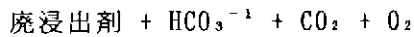
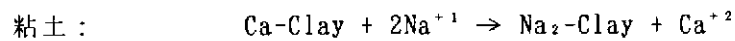
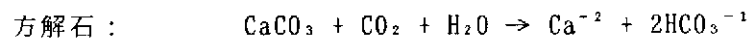
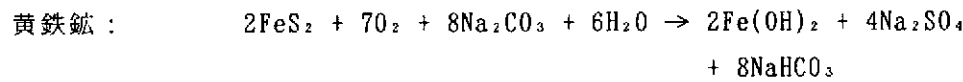
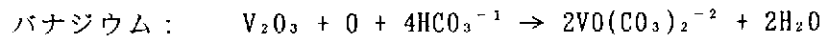
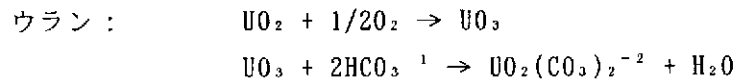
図 7 処理プラントと井戸設備

プロジェクトでは内径 11.4 cm (4.5 inch) の PVC Yelomine ケーシングが用いられている。井戸のリングは底から頂部まで完全にセメントで固めてあり、スクリーンは 0.051 cm (0.020 inch) のスロットサイズを有するステンレスである。井戸の完成は、鉋化した部分だけがケーシングとセメントを切断することによって露出される下部拡孔法によって達成される。3.7 - 5.6 kw (5 - 7.5 HP) の孔内ポンプが各生産井の 5 cm (2 inch) の PVC パイプの中に下げられる。生産井と注入井は同じ直径のケーシングを用いて同じように削孔され完成される。各注入井、生産井およびモニター井の完成に続いて、ケーシングに漏れが無いことを確認するために完成試験を実施しなければならない。完成試験の結果は書面で、審査を受けるため監督官庁に提出しなければならない。30- 40 本の注入井を伴った 15 ないし 20 本の生産井から、埋設プラスチックパイプを用いて井戸設備の分岐室へ配管される。井戸設備分岐室には流量計、流量調節弁および分岐室へ配管された各井戸に対するサンプル採取装置がある。各生産井に対する電力のオン・オフ制御装置も井戸設備分岐室に置かれている。溶液は井戸設備分岐室と中央の処理プラントの間を、埋設された 25.4 cm (10 inch) 高密度ポリエチレン (HDPE) パイプを通して往復する。分岐室は古い井戸設備で要らなくなった時に新しい井戸設備へ移せるように、滑台の上に載せて置く。プロジェクトでは一般的に、約 21 m (70 feet) の生産井と注入井間の公称間隔を持った 5-スポットと 7-スポットパターンが用いられる。

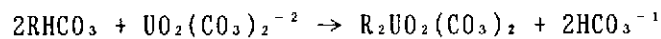
ウランの溶解を引き起こす浸出溶液（または浸出剤）は、重炭酸ソーダのアルカリ性浸出化学系を形成するための、ソーダ灰 (Na_2CO_3) と二酸化炭素 (CO_2) で強化された Chadron 累層の地下水からなっている。浸出剤の pH は 7.6 から 7.8 の範囲に保たれる。酸素は各井戸設備分岐室で注入液に加えられる。井戸設備とプロセス化学系の化学式を表 3 に示す[8]。浸出剤の炭酸塩の濃度は約 1,000 mg/L CO_3 に保たれ、目標酸素濃度は 200 ppm である。

表 3

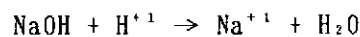
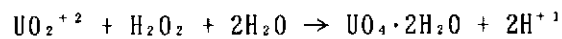
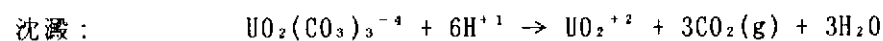
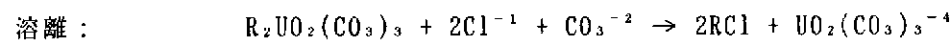
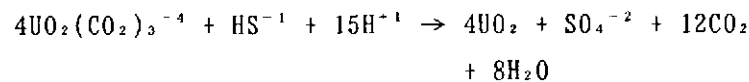
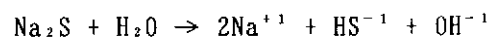
Crow Butte 鉱山の生産の化学

浸出剤の強化注入井鉱体生産井貴浸出液の処理

強塩基性陰イオン交換樹脂のローディング:



注: 炭酸塩に対する塩化物または硫酸塩の置換

復元の化学 — 低 Eh (電位)

Crow Butte Resources, Inc. の Charles E. Miller[8] によって作成。

5. 2. 2 処理プラントの設計と建設

実験室，修理工場，倉庫およびスタッフの事務所を含む処理プラントの建家は，長さ約 91 m (300 feet)，幅 35 m (115 feet) および最も高いところの高さが 16 m (52 feet) の標準的な金属製建物である。イオン交換カラム，溶離および沈澱タンク，産物用ベルトフィルター，薬剤調製タンク，ポンプ，配管および一部の電気製品のような重要なプロセス部品は，テキサスとワイオミングの閉止した ISL ウラン鉱山の中古機材を購入した。中古設備には支持用の構造材も含まれている。中古設備の購入によりプロジェクトに対する資本費の大幅な節約が図られた。建家と処理プラントの建設は予定した時期に予算内で完了し，プラントの建設期においては厄介な問題に遭遇しなかった。

プラントは直径 4.3 m (14 feet)，高さ 10.7 m (35 feet) の上昇流イオン交換 (IX) カラム 8 本を用いている。強塩基性陰イオン樹脂は原位置で溶離 (ストリップ) され，樹脂を移動する必要性が省かれる。ウランをロードされた樹脂は塩化ナトリウム／重炭酸ナトリウムの溶離液でストリップされる。IXカラムの下流には 3 基のアジテーター付き沈澱タンクがある。濃縮された溶離液中の二酸化炭素は酸の添加によって除かれ，ウランの沈澱は過酸化水素 (H_2O_2) とそれに続く苛性ソーダ (NaOH) による pH 調節によって完成される。沈澱したウランはその後シックナーへ送られる。産物はシックナーからベルトフィルターへ送られ，そこではイエローケーキ・スラリーから余分な水分がとりのぞかれる。1994 年 1 月にはイエローケーキ・スラリーを 93% U_3O_8 ，遊離水分 1% 以下の粉体に乾燥する真空乾燥機の操業を開始した。そしてイエローケーキは 55 ガロン缶に入れられ，密閉式のトラックで転換工場へ出荷される。1994 年以前は，鉱山はイエローケーキ・スラリーを特殊なステンレス・タンカーで出荷した。簡略化されたフローシートを図 8 に示す。Crow Butte 鉱山で回収される唯一の産物はウランである：副産物は無い。プラントのプロセスと井戸設備の運転状況の監視と記録はコンピューターによって行われる。コンピューターはまた，一部の処理プラント操業を制御する。

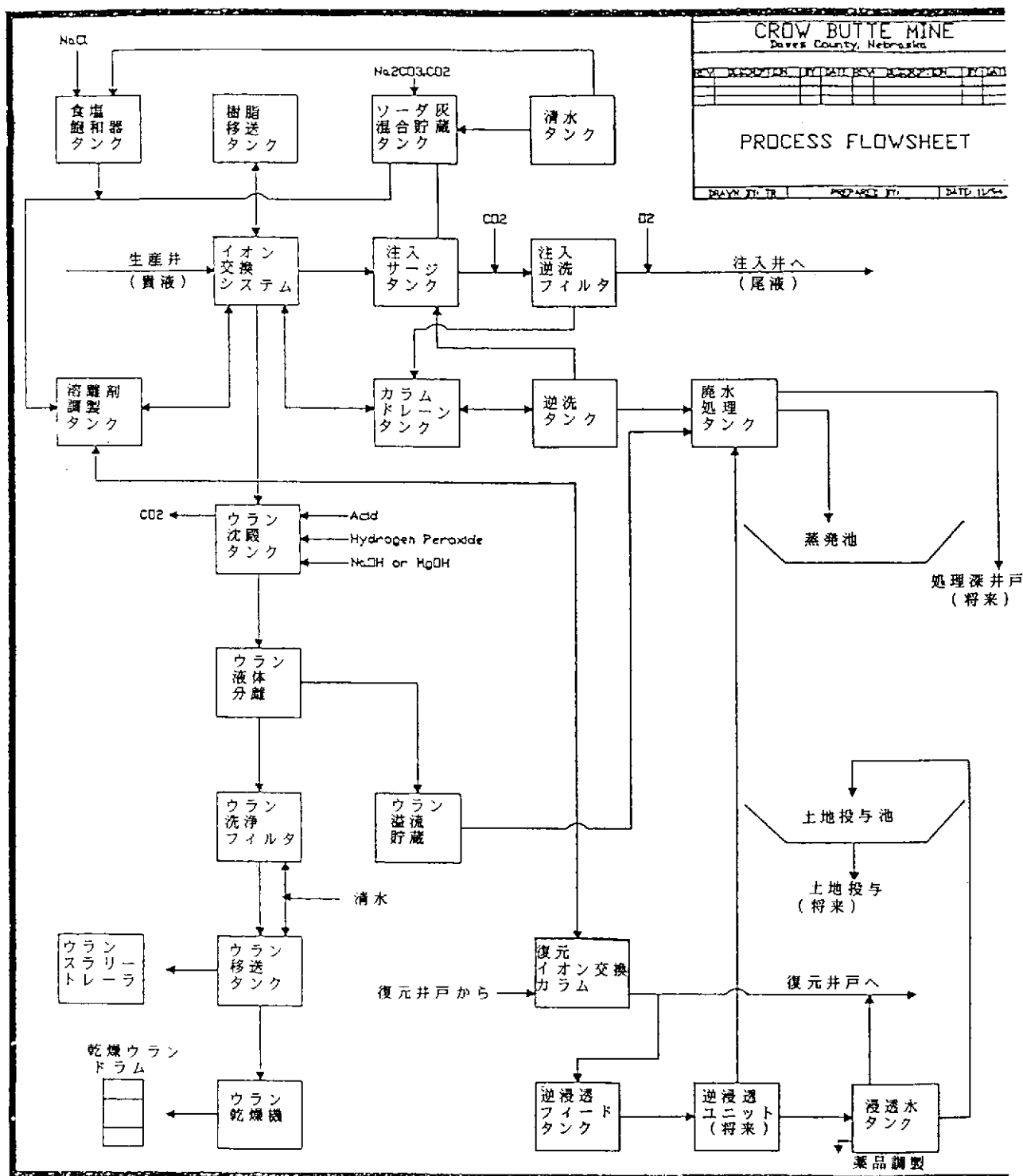


図 8

プロセス・フローシート

5. 2. 3 廃水処理

廃水処理は二重ライニング・システムを用いて、プラスチックで被覆した蒸発池で行われる。廃水の発生源は井戸設備の生産オーバー、プラントの排液および帯水層復元排液（すなわち逆浸透の塩水）である。廃水はプラントから蒸発池まで埋設した PVC パイプを通される。二つの池が商業採鉱の開始前に建設され、1993 年に追加の池が加えられた。二つのより小さい池は、パイロット・プラント操業から用いられている。池は土の堰堤で築かれ、geonet で隔てられた 20 mil 厚さの PVC 底ライナーと 60 mil 厚さの HDPE トップ・ライナーで被覆される。二つのライナーの間に設置された漏洩検知システムが、液体がトップ・ライナーを通り抜けるのを報知する。1994 年のうちに廃水の深井戸処理と土地散布の双方について認可が得られた。これらの施設の建設は 1995 年に行うと計画されており、追加の蒸発池の必要性を最低に抑える筈である。

5. 3 商業採鉱操業

商業的処理プラントと付属施設の建設と最初の採掘ユニットの設置は1991 年 3 月に完了した。採掘操業は 1991 年 4 月に、地下水の循環、採掘薬品（二酸化炭素と重炭酸塩）の添加と酸化剤（酸素）の添加により開始された。Mine Unit 1 と称する最初の商業的井戸設備は約 38 本の生産井と 72 本の注入井で構成されている。酸素システムが運転されてから 3, 4 日後に、酸素添加に対する強い正のレスポンスが、ウランの貴液品位を上昇させる形で起こった。

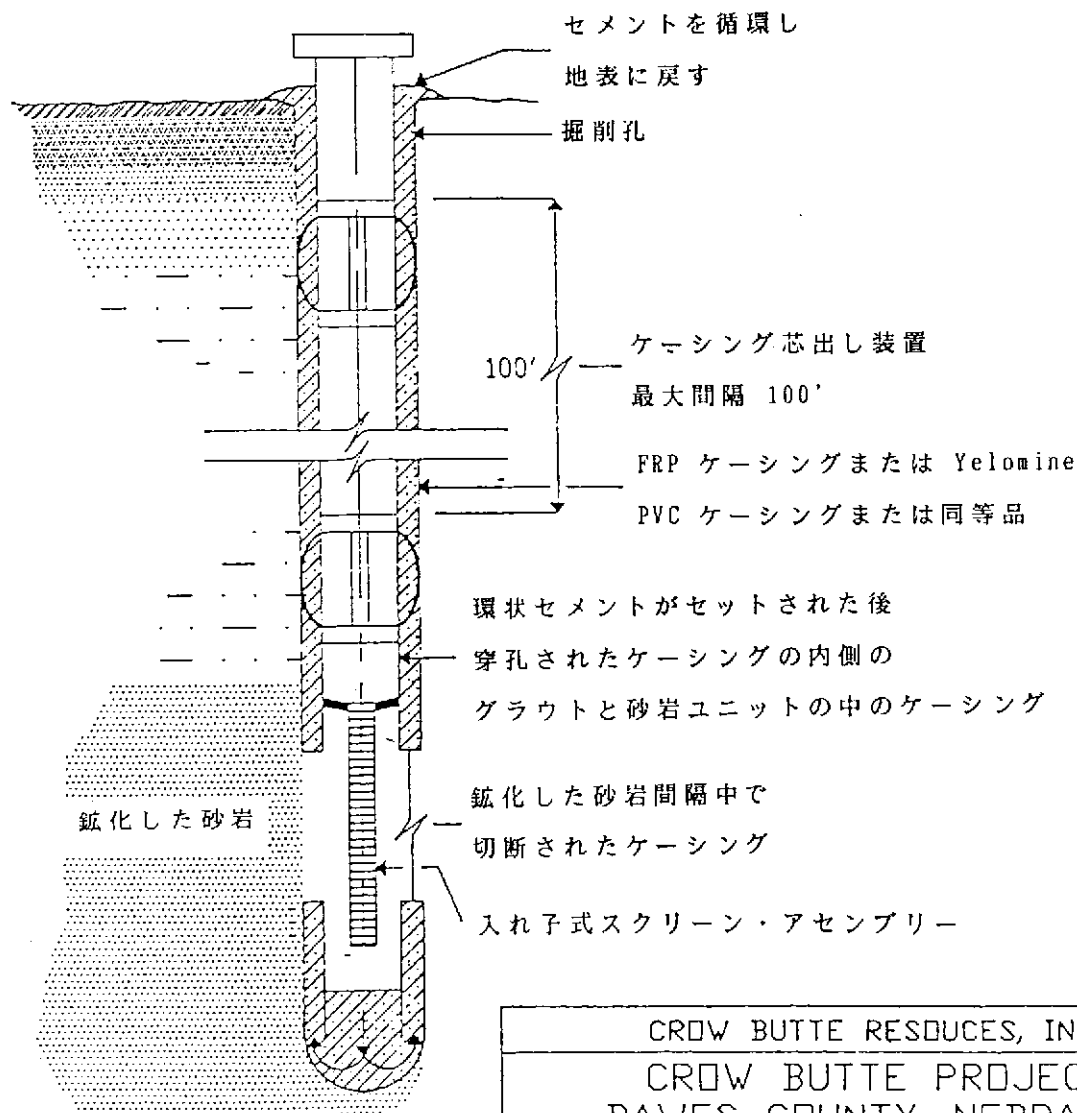
操業開始時には二つの小さな問題しか起きず、これは注目の値することである。一つの問題は、短い時間の間に起動された 38 本の生産井からの沈澱物の初期到来によって引き起こされた、注入液濾過システム（バグフィルター）の頻繁な目詰まりであった。この問題は一時的なものであり、生産井がまもなく著しい量の沈澱物を出さなくなるにつれて本質的に矯正された。他の問題はプラスチックで被覆された蒸発池における漏洩の存在である。池は二重ライニングを有し、二枚のライナーの間には漏洩検知システムが置かれている。監督官庁には漏洩について適切に報告され、漏洩を引き起こしていた小さな穴の位置を速やかに検出して修理した。二重ライニングシステムのおかげで、漏洩した廃水は環境へは排出されなかった。

1992 年 3 月に Mine Unit 2 の始動操業が、累層が浸出剤で前処理できるように一度に数パターンだけを始動する方法を用いて開始された。1992 年 7 月終わりまでに、Mine Unit 2 の全ての生産井と注入井が操業に入った。Mine Unit 2 が操業期に入った時、Mine Unit 1 の多くは生産状態にあった。非常に低いウランの貴液品位を有する Mine Unit 1 のいくつかのパターンは閉止された。Mine Unit 2 は 52 本の生産井と 89 本の注入井を持っている。現時点で Mine Unit 2 の全パターンと Mine Unit 1 の約 80% のパターンが、合計約 151 L/s (2,400 gpm) の井戸設備流量で操業中である。操業開始以来のウランの貴液品位は約 66 mg/L の予測平均品位より低かった。問題は回収溶液の希釈に関係していると考えられた。希釈量を減らすために、CBR は 1993 年と 1994 年に Mine Unit 3 と 4 を建設する際の井戸の設置で下部拡孔法 (under ream procedure) を開始した。下部拡孔井戸仕上げ法はプロジェクトにより高いウランの平均貴液品位をもたらし、従ってウランをより短い期間で回収するのを可能にすると感じられる。実際の貴液品位は採掘ユニットに存在する鉱体の部分の品位・厚さに強く依存している。

井戸仕上げの下部拡孔法を図 9 に示した。掘削孔は鉱化部分でケースがつけられる。スクリーン間隔の決定に続いて、ケーシングは下部拡孔ツールを用いて切断される。スクリーン・アセンブリーが開かれた間隔にはめ込まれる。

Mine Unit 3 は 1992 - 1993 年に連続して建設された。州の認可は Mine Unit に対する全てのモニター井とベースライン復元井が設置されていれば、部分的な Mine Unit の操業開始を許容する。このことは他のやり方より速やかに操業に入る予定の新しい Mine Unit からの初期生産を可能にし、より効果的な資源の活用である。

WELL UNDER-REAM METHOD



CROW BUTTE RESOURCES, INC.		
CROW BUTTE PROJECT		
DAWES COUNTY, NEBRASKA		
TYPICAL MINERALIZED ZONE COMPLETION FOR INJECTION/PRODUCTION WELLS		
PREPARED BY: C.B.R.	DWN BY: TR	DATE: 11/94

図 9

井戸下部拡孔法

Mine Unit 3 の建設は 1992 年の 72 本の開発のための試錐孔の掘削に続いて行われた。これらの試錐孔は 1980 - 1991 年における Crow Butte 鉱山の発見と開発の時期に掘削された 41 本の試錐孔に追加されたものである。試錐孔は鉱床のこの部分の上の約 30 m x 30 m (100 feet x 100 feet) のグリッドからなる (図 10)。探査および開発の試錐孔は Chadron 砂岩内のいくつかのロールフロントにおけるウランの鉱化形状把握に利用された。五層準のロールフロントが Crow Butte 鉱床のこの部分で把握されている。これらのフロントは下部および下部上層黄色フロント、中央および上部黄色フロントおよび赤色フロントからなっている。0.5 カットオフ GT 以上の鉱体の輪郭を図 11 - 15 に示した。これらのフロントは準平行でオーバーラップしており、Chadron 砂岩中では西から東に上昇している。これらのフロントの複雑な性質により、井戸設備パターンと個々の井戸のスクリーン間隔の注意深い立案が必要である。

個々のロールフロントの注意深い形状把握に続いて、ウラン回収のための井戸設備パターンが設計された (図 16)。最終的なデザインは 55 のパターンと 107 本の注入井により、1:1.9 の生産井/注入井比で構成された。井戸設置中に小さな調整が行われた結果、57 パターンと 95 新注入井となった。ロールフロントのマップが改訂され、埋蔵量がカットオフ 0.5 % U_3O_8 -ft (GT) を用いてフロントごとに再計算された。全ての探査および開発孔と井戸が、最終的な埋蔵鉱量を推定するのに用いられた。

Mine Unit 3 はスクリーン設備の下部拡孔法を利用した Crow Butte 最初の採掘ユニットだった。かつて Mine Unit 1 と 2 を設置した時は、Crow Butte は複合的スクリーン完成法を利用した。複合的スクリーン完成法はスクリーン間隔の拡大を招き、Crow Butte ロールフロントの複雑性により溶液の大幅な希釈をもたらした。複合法は井戸壁のケーシングの設置と同時に、スクリーンの設置を必要とする。下部拡孔法では隣接する井戸の穿孔に続いて、スクリーン間隔を計画することが出来る。その結果、スクリーン間隔は Mine Unit 1 の 19.6 feet から Mine Unit 3 では 12.8 feet の 35% 減に抑えることが出来た。狭められたスクリーン間隔は希釈を減じ、貴液品位を高めると期待される。

MINE UNIT 3

EXPLORATION and DEVELOPMENT HOLES

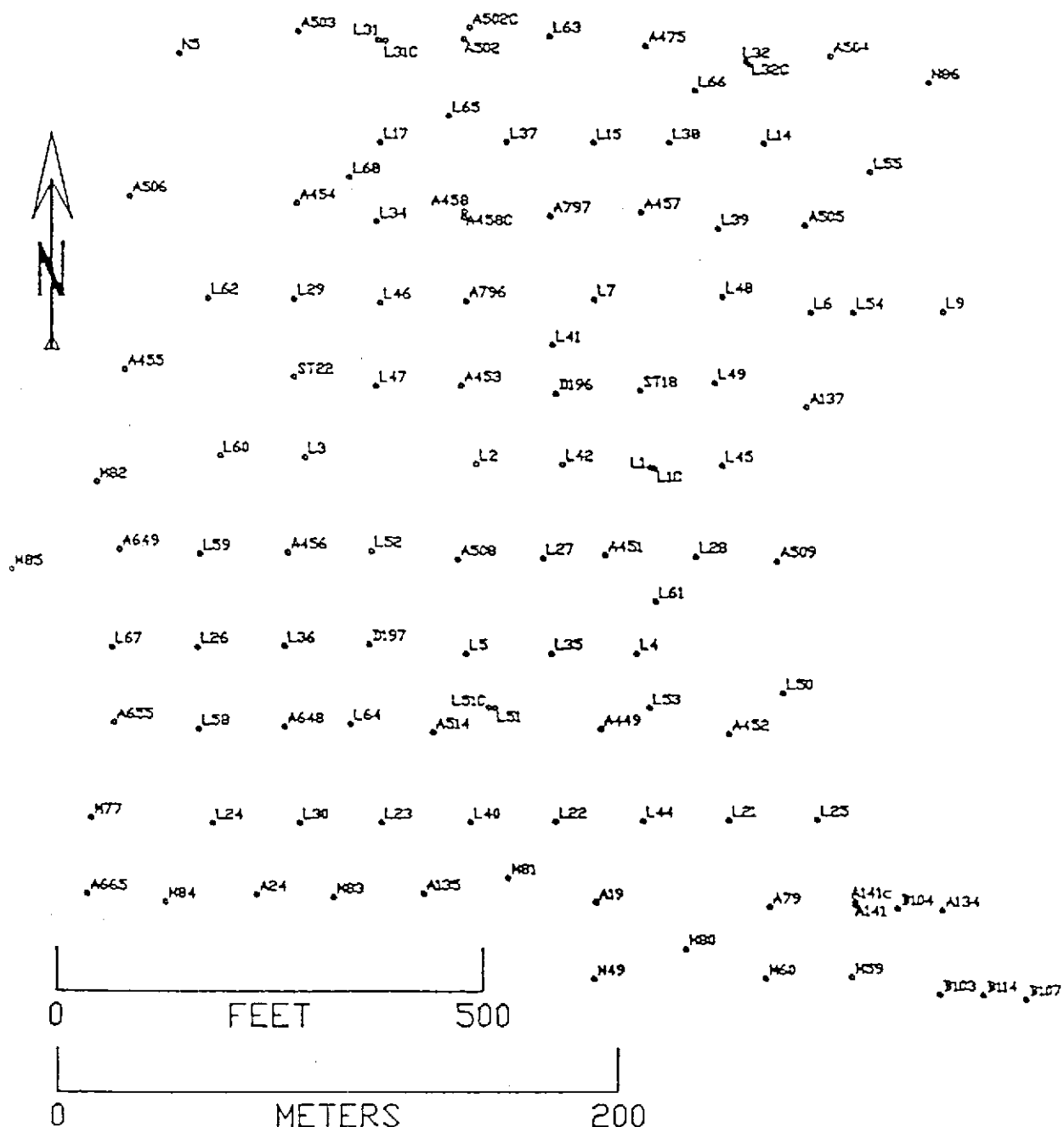


図 10

Mine Unit 3

探査および開発孔

MINE UNIT 3

EXPLORATION and DEVELOPMENT HOLES

LOW/LOWER YELLOW FRONT

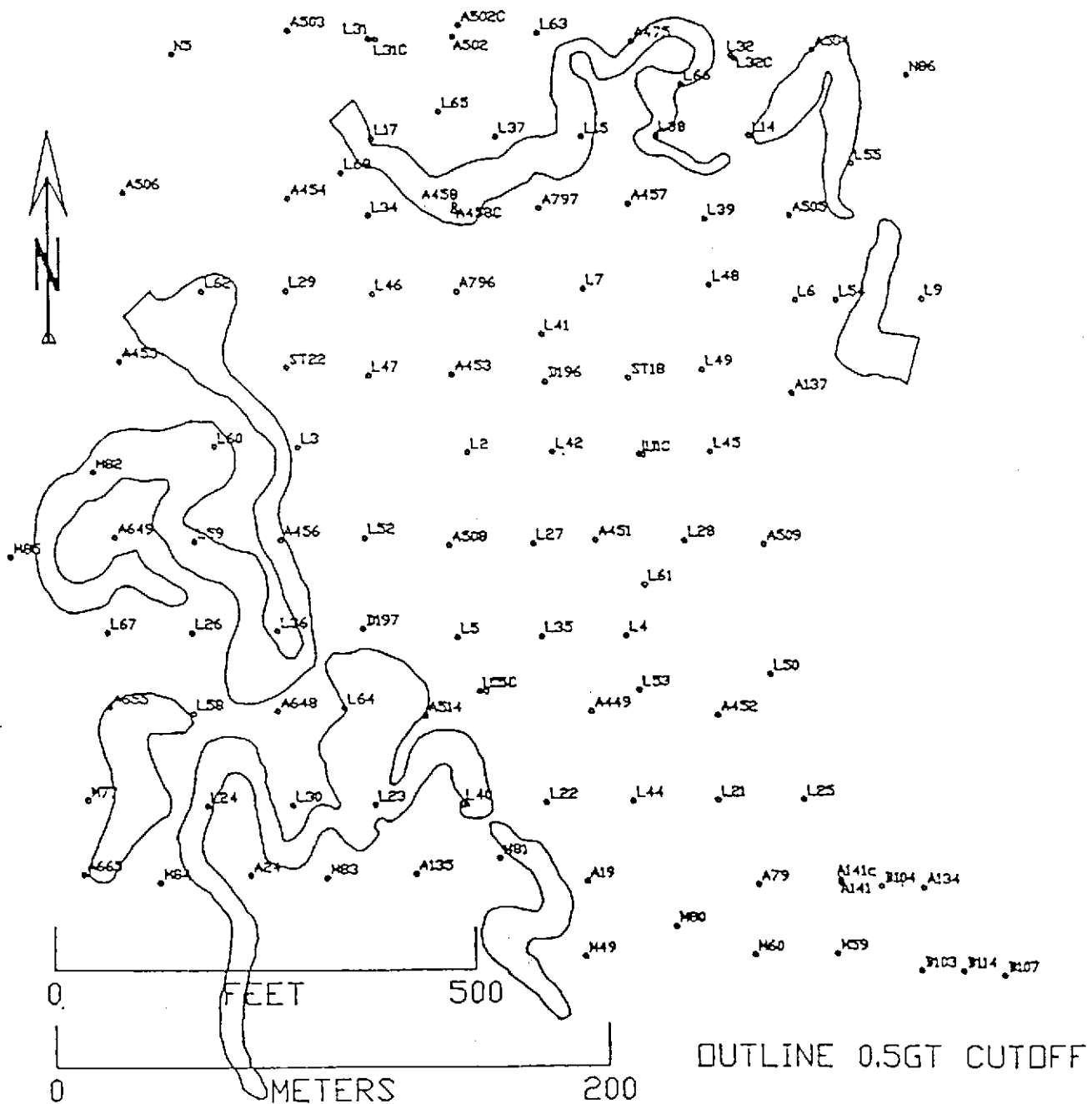


図 11 Mine Unit 3

探査および開発孔

Low/Lower Yellow Front

0.5 GT カットオフ輪郭

MINE UNIT 3

EXPLORATION and DEVELOPMENT HOLES

UP/LOWER YELLOW FRONT

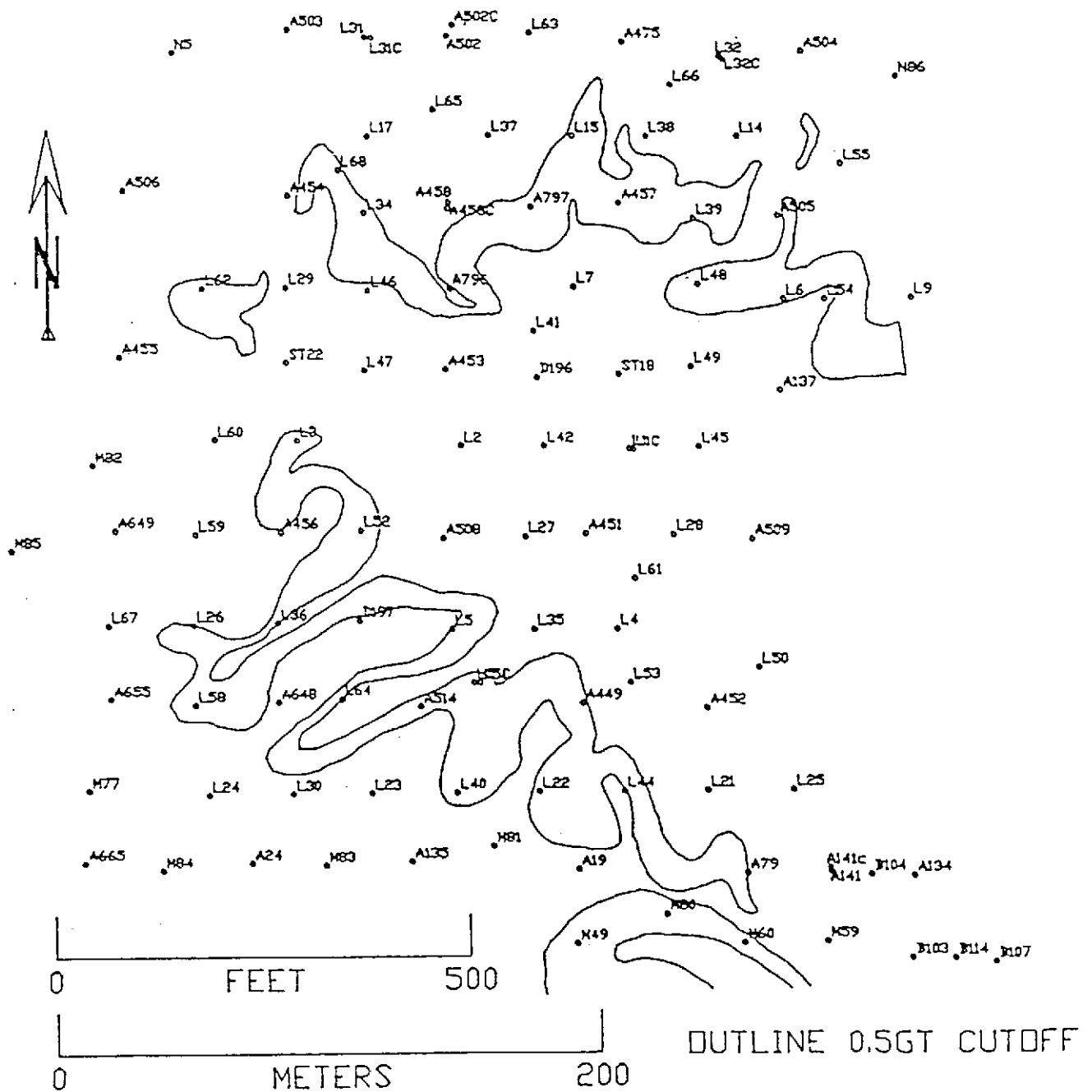


図 12 Mine Unit 3

探査および開発孔

Up/Lower Yellow Front

0.5 GT カットオフ輪郭

MINE UNIT 3

EXPLORATION and DEVELOPMENT HOLES

MIDDLE YELLOW FRONT

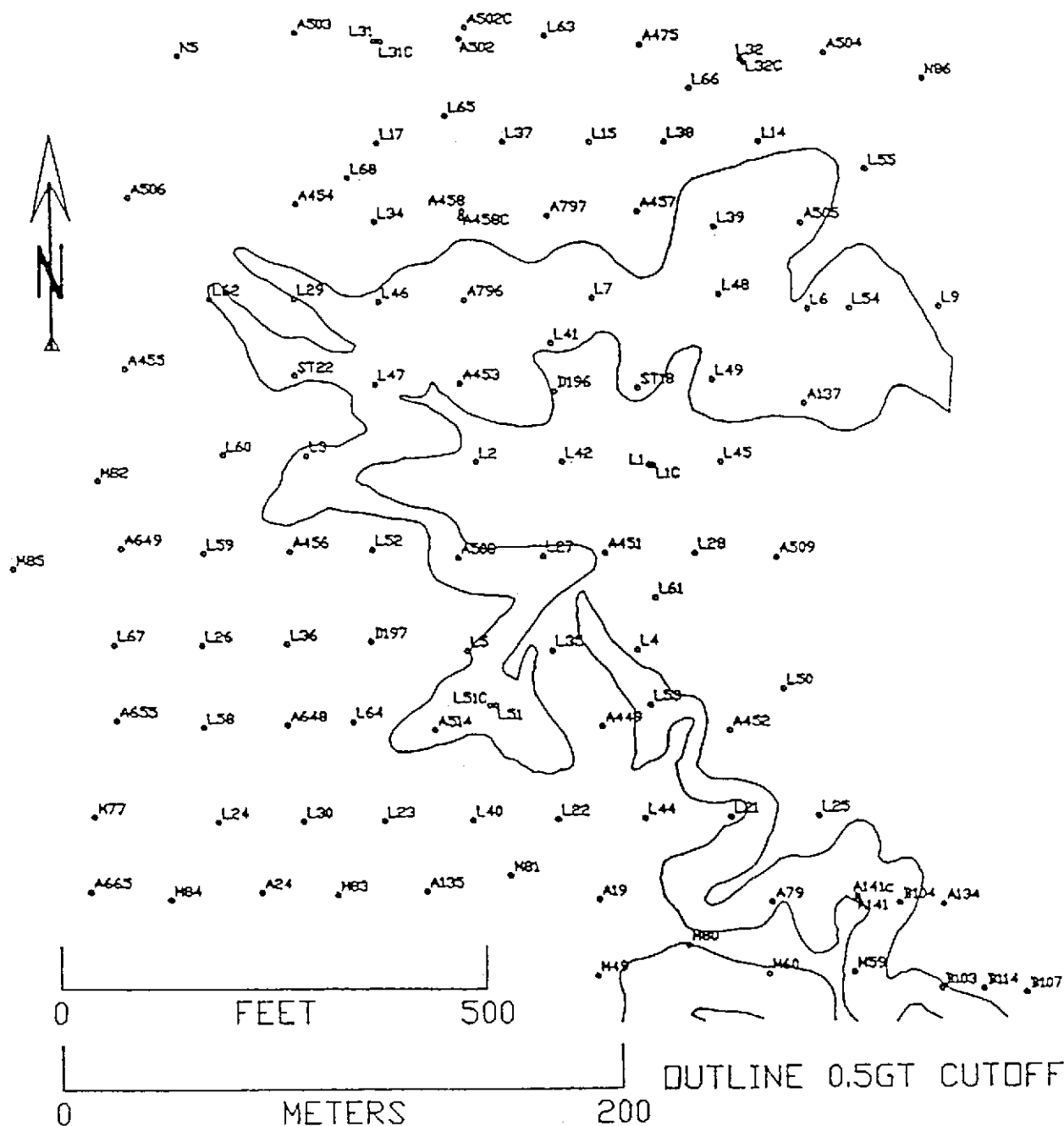


図 13 Mine Unit 3

探査および開発孔

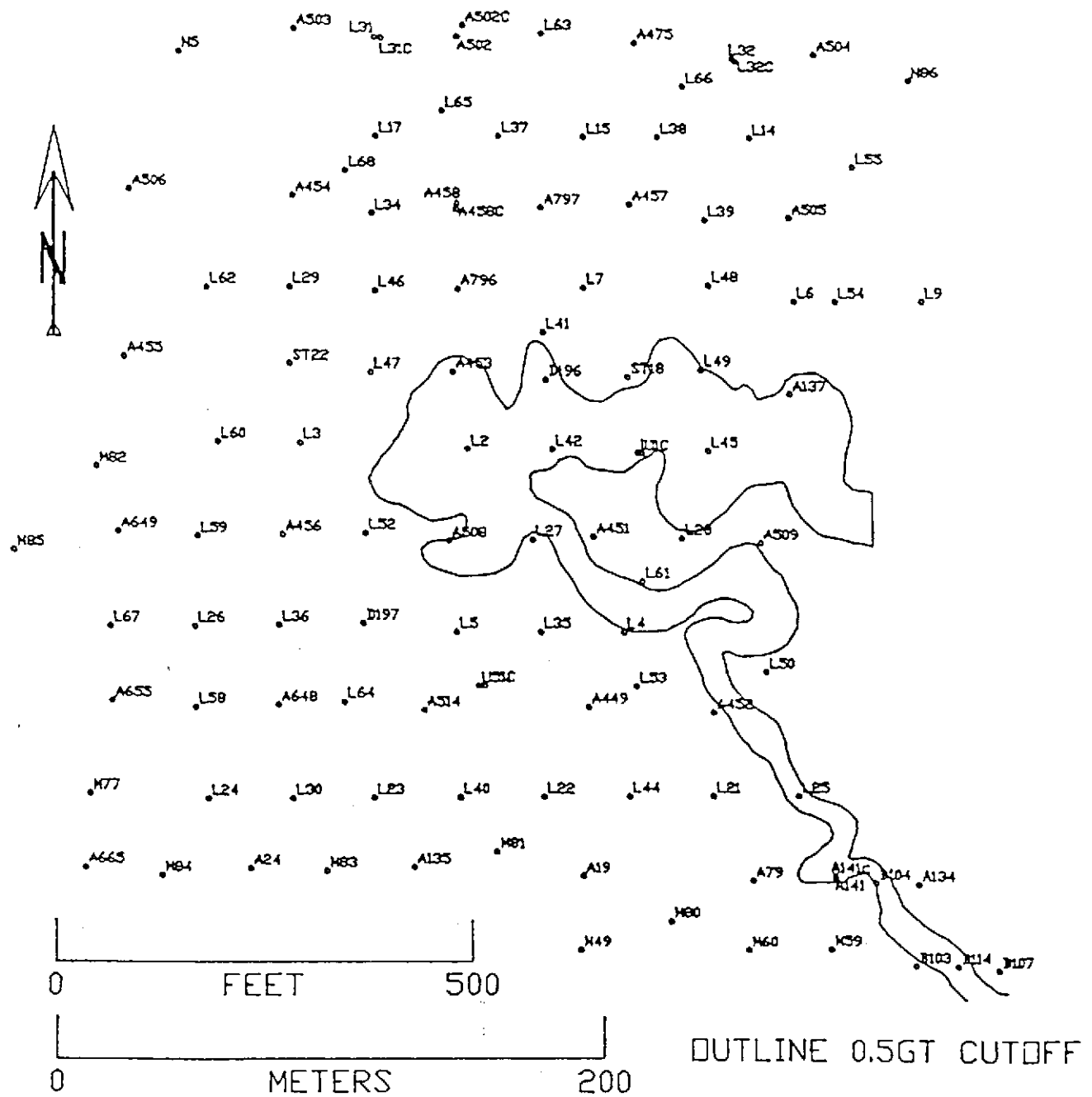
Middle Yellow Front

0.5 GT カットオフ輪郭

MINE UNIT 3

EXPLORATION and DEVELOPMENT HOLES

UPPER YELLOW FRONT



☒ 14 Mine Unit 3

探査および開発孔

Upper Yellow Front

0.5 GT カットオフ輪郭

MINE UNIT 3

EXPLORATION and DEVELOPMENT HOLES

ORANGE FRONT

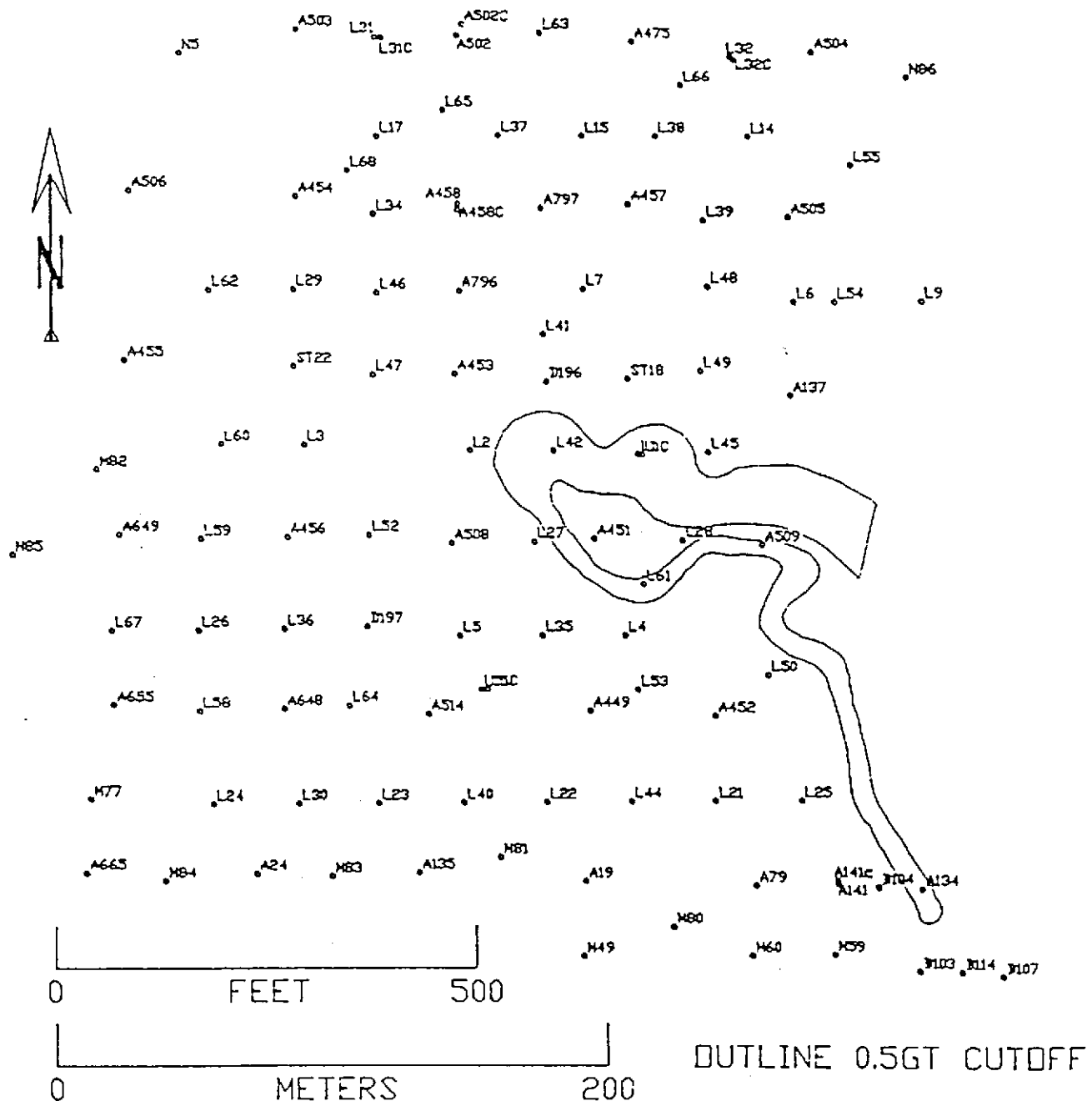


図 15 Mine Unit 3

探査および開発孔

Orange Front

0.5 GT カットオフ輪郭

影響を受ける体積が少ないこと、従って復元のコストが少ないことも恩恵として加えられる。

Mine Unit 1 と Mine Unit 3 の比較を表 4 に示す。

表 4

Mine Unit	パターン		スクリーン		平均	平均貴液品位
	大きさ	間隔	品位・層厚	流量	mg/L U_3O_8	
<u>Unit</u>	<u>パターン数</u>	<u>feet²</u>	<u>feet</u>	<u>%U_3O_8-ft.</u>	<u>gpm</u>	<u>1 年</u>
1	38	10,247	19.6	1.11	30.9	68
3	57	10,284	12.8	1.26	28.8	84

1 年間の平均貴液品位は 68 mg/L U_3O_8 から 84 mg/L U_3O_8 に改善され、24% 上昇した。この上昇をもたらした第一のファクターは、スクリーン設置における下部拡孔法である。その他の寄与要因としてより高い平均鉱石品位（1.26GT 対 1.11 GT）と井戸当たりのより少ない平均流量が挙げられる。下部拡孔法に基づく改善は 10% であると推定される。

Mine Unit 1 - 3 における原位置埋蔵量の採取率は現在 70% を越えている。Mine Unit 1 は目下復元中であり、Mine Unit 2, 3, および 4 が操業中である。Mine Unit 5 は建設中であり、1995 年半ばから操業を開始する計画である。

鉱山は採掘サイトの管理を含めて 31 人の従業員で操業している。さらに 9 ないし 12 名の人々が新しい井戸設備を設置する穿孔リグに従事している。穿孔員は請負であり、鉱山のオペレーターの従業員ではない。プラントは週 7 日 24 時間体制で 3 方 8 時間勤務者によって運転される。サイトにある試験室は最新鋭の自動分析装置を用いて 2 人の人によって運営される。

6 環境ならびに照射の安全に関する考察

プロジェクトはおよそ 0.5% ないし 1% の産出オーバー、あるいは井戸設備余剰液放出で操業

されている。この放出液は二つの事を行う。第一に、汚染された水が採掘区域から逸脱して法的に定義された逸水を引き起こすことがないことを保障するために、井戸設備内に水位降下円錐が形成される。余剰液放出の第二の理由は、浸出液中におけるある化学種の好ましくない蓄積を防ぐことである。放出液は処理プラントの回路から取り出され、プラスチックで被覆された蒸発池に送られる。現時点では、Crow Butte 鉱山では井戸設備の逸水はまだ起こっていない。

Crow Butte 操業の採掘期における環境モニタリング計画の主要な構成部分は、垂直ならびに水平方向の逸水監視井のサンプリングである。水平方向のモニター井は井戸設備の採掘ユニットのへりから 91 m (300 feet) のところに位置し、鉱体を胚胎する同じ砂岩（この場合は、基盤の Chadron 砂岩）まで届いている（図 7）。垂直方向の逸水監視井は採掘ユニット内の鉱体帯水層の上の第一帯水層に、井戸設備 1.6 ha. (4 acre) につきモニター井 1 本の密度で設置される。モニター井のベースライン水質は採掘前に決定され、規制ガイドラインに則って放出限界が設定される。逸水モニター井は、採掘中は 2 週間に 1 回サンプルを採取し分析する。放出限界は伝導度、ナトリウム、硫酸塩、アルカリ度、および塩化物に対するベースラインの 20% 増しに設定される。もし分析が任意の二つのパラメーターがこれらの限界を越えるか、ある一つのパラメーターがさらに 20% オーバーしていることを示せば、監督機関に直ちに通報し、矯正措置をとらねばならない[9]。蒸発池の漏洩検知システムは毎日チェックされる。ネブラスカ環境品質局は週に数回サイトに立ち寄る駐在監視官に、環境的な適合について操業を細かにモニターさせる。

鉱山で働く各従業員は常勤のサイト放射線安全担当者が行う、放射線の安全に関する広範な訓練を受けねばならない。承認された放射線安全計画には従業員が処理プラントを立ち去る度に行われる個人的アルファ・モニタリングが含まれ、サイトの職員に対しては四半期毎にウランに対するバイオアッセイが行われる。さらに、各自由従業員は四半期毎に交換される個人的 TLD（ガンマ）バッジをつけねばならない。放射線安全担当者は多くの場所においてラドン、ラドン娘核種、ウラン浮遊粉塵、およびアルファ/ガンマの測定を行うことによって、プラント内の放射線チェックを頻繁に実施する。ラドンとガンマ線のレベルについての環境放射線モニタリングはプラントの建家の外で行われる。原子力規制委員会（NRC）放射線安全計画を強制し、少なくとも年に一回は操業の大がかりな抜き打ち検査を実施する。

7 帯水層復元と閉山処理

一旦ある採掘ユニットで採掘が完全に停止すれば、監督官庁はオペレーターに帯水層の復元（地下水の清浄化）を開始することを求める。帯水層復元の目標は影響を受けた帯水層の水質を、パラメーター毎にベースライン（採鉱開始前）の状態に戻すことである。全てのパラメーターがずっとベースライン値に帰されるとは限らず、それらのパラメーターについては斟酌が与えられることを官庁も認めている；しかし復元後の帯水層の全体的な水質が完全であることは、水が採鉱前の同じ用途に使用できることでなければならない。例えば、もし帯水層が ISL 採鉱前に家畜の給水に適していたのであれば、復元が完了した後も帯水層は家畜の給水に適していなければならない。オペレーターは鉱体帯水層の採鉱前の水質を文書で証明するために、しっかりした地下水モニタリング計画を実施しなければならない。

Crow Butte ではオペレーターは、パイロット操業で上首尾に試験したのと同じ帯水層復元技術を利用する。第一のフェーズは地下水掃除と呼ばれ、復元中（注入無し）の採掘ユニットから井戸を汲み上げ、その水を次に採掘する井戸設備へ送ることが含まれる。この作用が井戸設備のすぐ外側の汚染された水の輪（または羽毛）を採掘ユニットに引き戻す。第二フェーズはこの水から汚染を取り除くために水処理を用いる。水処理ユニットからの清水（浸透水）は復元されている井戸設備へ再注入される。水処理ユニットからの汚染水（塩水）は蒸発池に送られる。復元が行われている帯水層で起こっている化学反応を止めるために、水処理の最終段階で硫化水素のような還元剤が注入されている浸透水に加えられる。第三フェーズは地下水の水質を均質にするために行う、鉱体帯水層の中の単なる水の循環である。

Crow Butte では Mine Unit 1 の帯水層復元が 1994 年に始まった。Mine Unit 1 の復元プロセスが完成するのに 2 ないし 3 年要すると考えられる。Mine Unit 1 に隣接して採掘が行われているので、時間が必要である。帯水層復元の第二フェーズでは、オペレーターは水処理システムとして逆浸透（R.O.）ユニットを使うことを計画している。

小さい R.O. ユニットがパイロット試験計画で使われて成功している。復元プロセスを助けるために 200 gpm の R.O. が 1995 年中に設置される予定である。

一旦全ての採掘が完了し、影響を受けた帯水層が適切に復元されると、監督官庁はサイトを鉱業前の状態と用途に戻すことによってサイトが完全に閉山されることを要求する。これをなしと

げるためには、全ての設備と建物をサイトから取り除き、池の中の汚染残査やその他の放射性物質を認可された処理施設に入れ、池は埋め戻して整形し、全ての井戸は頂部から底まで栓をし、乱された土地の表面は元の草で再植栽しなければならない。埋設パイプラインは回収し、認可された処理サイトに運ばねばならない。閉山の要件と地下水復元基準への適合を保障するために、オペレーターはこれらの閉山活動の全コストをカバーするのに十分な大きさの土地再生契約保証金を積みねばならない。Crow Butte 鉱山に対しては、ネブラスカ州は CBR によって提出された 5.0 百万ドルの土地再生契約保証金を保有している。保証金の金額は毎年州と NRC によってその妥当性が吟味される。

8 結論

Crow Butte ISL 鉱山は商業的生産を 1991 年 4 月に開始した、米国で最も新しいウラン生産施設である。プロジェクトは ISL 採掘で影響を受けた帯水層の水質復元能力を示すためのパイロット試験フェーズを含む、厳しい環境免許プロセスを通過してきた。プロジェクトは酸化剤として酸素を用いるアルカリ（重炭酸ナトリウム）浸出化学系を用いる。鉱石は二つの厚い賦圧頁岩と粘土層に挟まれた、透水性の高い砂岩累層中の水文的には理想的な層準に位置している。開発の資本費は閉止した ISL 鉱山から非常に安いプロセスおよび電気設備を入手することによって、最低に抑えられた。生産量は商業生産の 4 年間に毎年増加し、現在の年間 700,000 ポンド U_3O_8 に達した。増加は新しい採掘ユニットの追加による井戸設備流量の増加と、操業効率によるものである。市場の状況が許せば、生産量を年間 1 百万ポンド U_3O_8 に増やすことを計画している。比較的低い操業費はプロジェクトに対する予測範囲内である。環境的に、Crow Butte 鉱山は全ての州と連邦の規制に完全に適合している。

9 謝辞

著者は本報文の作成に際して与えられた援助に対して、操業会社、Crow Butte Resources, Inc. のスタッフに感謝の意を表したい。また、井戸完成の下部拡孔法を試験する際の洞察と激励に対して、Uranerz U.S.A. の Dr.Gerhard Kirchner に感謝する。

1 0 参考文献

- [1] CATCHPOLE, G and Kirchner, G : "Crow Butte ISL project - Case History", IAEA Uranium in-situ leaching, (1991), p. 81, 93.
- [2] COLLINGS, S.P. and KNODE, R.H., "Geology and discovery of the Crow Butte uranium deposit, Dawes County, Nebraska", Practical Hydromet '83: 7th Annual Symposium on Uranium and Precious Metals, American Institute of Metallurgical Engineers (1984), p.5-14.
- [3] DEGRAW, H.M., "Subsurface relations of the Cretaceous and Tertiary in Western Nebraska", University of Nebraska, MS Thesis, (1969) 137p.
- [4] SCHULTZ, C.B. and STOUT, T.M., "Preliminary Remarks on the Oligocene of Nebraska (Abs.)", Geological Society of America Bulletin v.49, (1938), p.1921.
- [5] GJELSTEEN, T.W. and COLLINGS, S.P., "Relationship between groundwater flow and uranium mineralization in the Chadron Formation, Northwest Nebraska", Wyoming Geological Association Guidebook, Thirty-ninth Field Conference, (1988), p.271-283.
- [6] HANSLEY, P.L., COLLINGS, S.P., BROWNFIELD, I.K., and SKIPP, G.L. "Mineralogy of uranium ore from the Crow Butte uranium deposit Oligocene Chadron Formation, Northwestern Nebraska", U.S. Geological Survey, Open-File Reports 89-225, (1989).
- [7] CROW BUTTE URANIUM PROJECT, DAWES COUNTY, NEBRASKA, Application and supporting environmental report for USNRC, commercial source material license", Submitted to the U.S. Nuclear Regulatory Commission, Denver, Colorado (1987).

- [8] MILLER, C.R., KNODE, R. and COLLINGS, S.P., "In situ uranium mining extractive metallurgy at the Crow Butte uranium project" Presented to the Extractive Metallurgy Chapter of Denver, March 8, 1990, Denver, CO (1990).
- [9] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, "Crow Butte source material license, sua-1534", Denver, Colorado (1989).

(2) SMITH RANCH PROJECT : DEVELOPING AN ISL URANIUM MINE

BY D.E.STOVER

SMITH RANCH PROJECT:
DEVELOPING AN ISL URANIUM MINE

by

Dennis E. Stover, Ph. D.
Director ISL Technology

Rio Algom Mining Corp.
6305 Waterford Blvd., Ste. 325
Oklahoma City, OK 73118

目 次

頁

標題と梗概	1
緒論	2
地域の地質的環境	2
地文	2
地形	5
地質と層序	5
地域地質	8
ISL 採掘への適応性	11
実験室研究	11
ワイオミングの ISL 経験	11
Smith Ranch パイロット試験	12
フィールド・パイロット試験の地質的評価	22
Highlands ISL プロジェクト	22
地質的ウラン資源	23
免許／認可	24
Smith Ranch プロジェクトの土地保有	24
商業的操業計画	27
ウラン ISL 採掘プロセスの説明	27
井戸設備採掘ユニットの概念	28
井戸設備設計概念	29
井戸設備パターン	29
井戸の仕上げ	31
井戸ケーシングの完全性	34
処理プラント設計概念	34
樹脂ローディング	35
余剰放出液処理	39

溶離回路	39
沈澱回路	39
産物の濾過，乾燥および包装	39
計装のフィロソフィー	42
環境に及ぼした結果	43
プロセスから環境への排出物	44
ガス状	44
粒状物と固体	45
液体	45
環境へのインパクト	45
地表へのインパクト	45
表流水へのインパクト	46
地下水へのインパクト	46
放射線のインパクト	47
野生動物へのインパクト	48
環境的責任	49
タンク事故	49
パイプライン事故	50
火災と爆発	50
井戸ケーシング事故	50
探査試錐孔を通しての漏洩	51
イエローケーキ輸送事故	51
薬品出荷	52
池の事故	52
環境モニタリング	52
気体モニタリング	52
粒状物と固体のモニタリング	53
液体のモニタリング	53

操業前井戸モニタリング	53
稼働井戸のモニタリング	54
パイプラインのモニタリング	55
表流排水のモニタリング	55
資本の必要条件	56
操業費予測	56
薬品コスト	59
ユーティリティーのコスト	59
メンテナンス，部品，および供給品	60
その他	60
産物出荷と転換工場の料金	60
プロジェクト G & A	60
感度分析	61
地表施設の資本費に対するプロジェクトの感度	61
回収貴液品位に対する操業費の感度	61
減少した流量に対する操業費の感度	62
埋蔵量のカットオフ品位-厚さに対する感度	66
ISL に対する総コスト	67
競争的地位	68
結論	71
参考文献	72

表 と 図

	頁
表 1 Smith Ranch ISL パイロット試験要約	16
表 2 パイロット区域原位置埋蔵鉱量	17
表 3 計算された採収率	19
表 4 商業免許の現状	25, 26
表 5 採掘ユニット開発スケジュール	30
表 6 典型的な資本投資	58
表 7 井戸設備投資の感度	65
表 8 井戸設備投資増分の感度	69
表 9 フル生産時における操業費	70
図 1 Powder 川流域の位置図	3
図 2 Powder 川流域における地文	4
図 3 Powder 川流域後第三紀累層の一般化された地質図	6
図 4 地質断面図	7
図 5 Powder 川南部流域の RAMC 砂岩の分帯	10
図 6 South Powder 川流域と Smith Ranch プロジェクト地図	13
図 7 Q sand 井戸配置パターン	14
図 8 O sand 井戸配置パターン	15
図 9 Q sand パイロット生産データ	20
図 10 O sand パイロット生産データ	21
図 11 Smith Ranchプロジェクトの代表的な井戸フィールド展開パターン	32
図 12 典型的な溶液の流れパターン	33
図 13 井戸仕上げ法	36
図 14 回収プラントのプロセス構成図	37
図 15 中央処理プラントの構成図	38
図 16 直接操業費（貴液品位の関数として）	63
図 17 直接操業費（井戸流量の関数として）	64

Smith Ranch プロジェクト:

ISL ウラン鉱山の開発

Dennis E. Stover

Rio Algom Mining Corp.

1980 年代において、ウランのインシチュリーチングが経済的に魅力があり環境的にも好ましいウラン抽出の方法として、米国で登場した。この技術を上首尾に適用するには、鉱床の層序的、地球化学的、ならびに地質的性質に関する広範な知識を必要とする。資本と労働力に対する比較的控え目な要求が、その経済的優位性に貢献している。Smith Ranch プロジェクトに対するこれらのファクターの適用について考察を加えた。

1989 年に Rio Algom Limited は Kerr McGee Corp. から、ワイオミング州Converse 郡にある Bill Smith 資産を取得した。初期の研究の見直しと、補足的な地質的研究、許認可、およびエンジニアリングに対する本質的な検討の後に、Rio Algom は資産を商業的な ISL 鉱山、907 t (2 百万 LB*1) U_3O_8 の計画年間処理能力を有するSmith Ranch プロジェクトとして開発している。

鉱床内にあるウランの埋蔵量は現在 15,900 t (34 百万 LB) U_3O_8 を越えている。潜在的な埋蔵量ベースは 23,000 t (50 百万 LB) を越えるかもしれない。広範な実験室ならびにフィールドテストにより、鉱石がインシチュリーチングに適用できることが示された。このプロジェクトを支える中心的な技術的ならびに経済的ファクターを、ISL 採掘に特有の生産性と柔軟性を強調して提示した。

*1 1 は 1 と混同しやすいのでポンドを LB と標記する。

緒 論

1989 年 1 月に Rio Algom Limited (RAL) は Kerr McGee Corp. から、ワイオミング州 Converse 郡にある Bill Smith 資産を取得した。資産の所有権と管理は同時に、RAL の子会社である Rio Algom Mining Corporation (RAMC) へ移された。

元来は坑内掘りウラン鉱山として計画されたのであるが、資産のインシチュアライジング (ISL) プロジェクトとしてのポテンシャルは Kerr McGee によって認められ、開発に至る前の広範な努力が取得前になされている。この研究結果の見直しに引き続いて、補足的な地質研究、許認可、およびエンジニアリングの研究が RAMC によってなされた。RAMC は資産を、Smith Ranch プロジェクトとして知られる商業的 ISL 操業として開発している。

地域の地質的環境

地文

Smith Ranch 商業的採掘許可区域は、ワイオミング州 Douglas の近くの Powder 川流域 (図 1) の南部に位置している。

Powder 川流域は北方へ開いた構造性盆地で、南を Laramie Range と Hart-ville 隆起によって、東を Black Hills によって、西を Big Horn Mountains と Casper Arch によってそれぞれ囲まれている。流域には大凡 3,100 ha. (12,000 平方マイル) の面積が含まれる (図 2)。

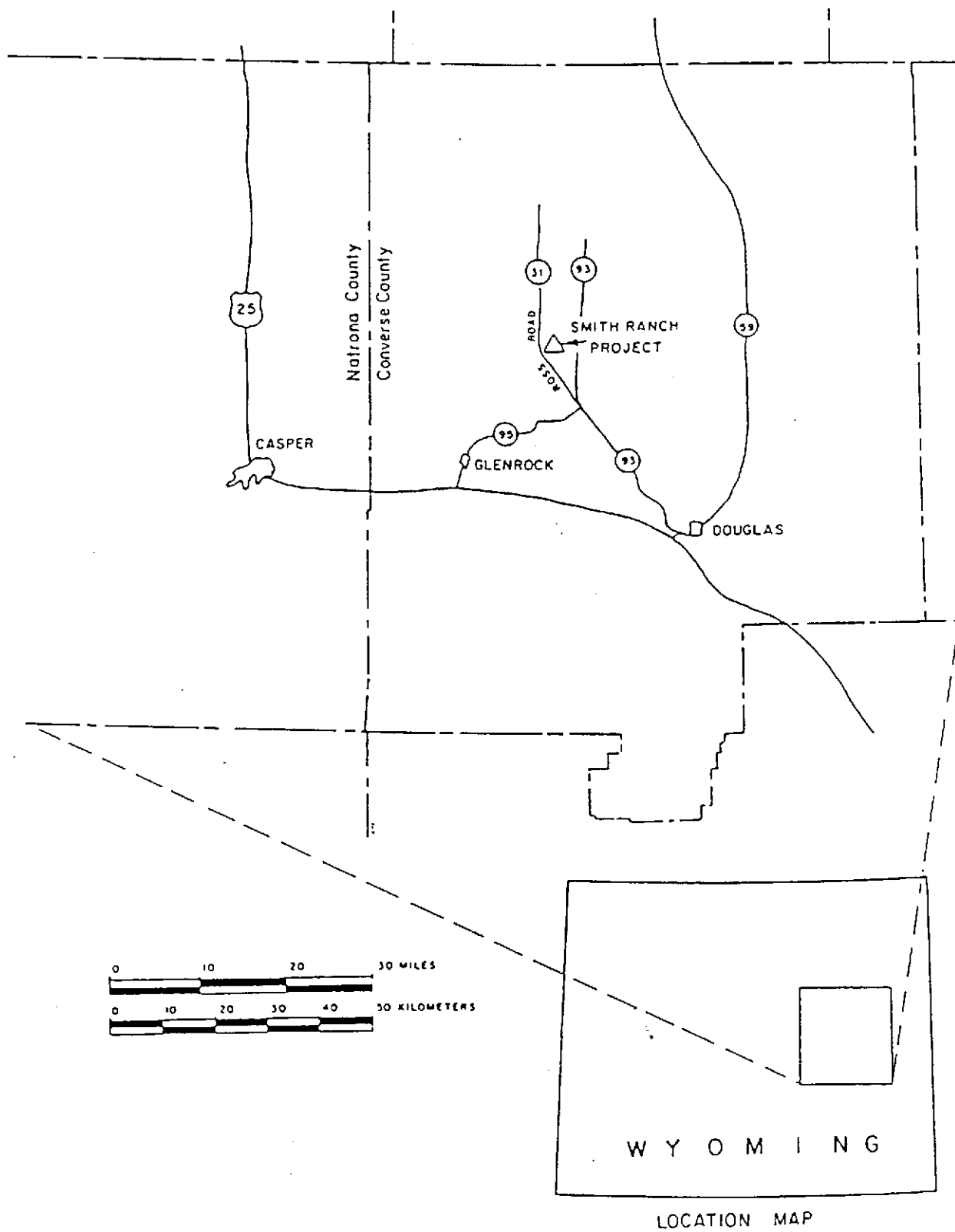


図 1

Powder川流域の位置図

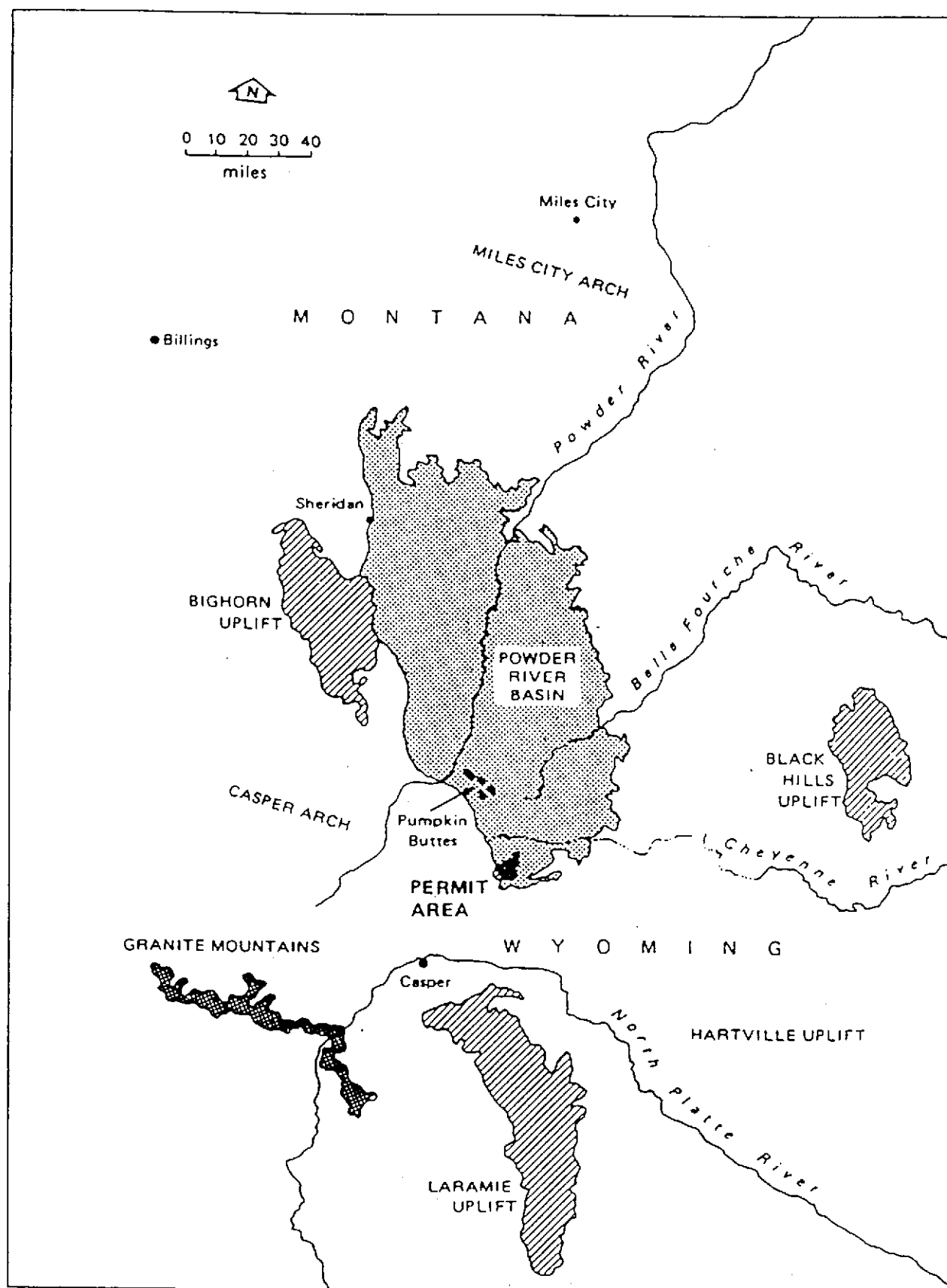


図 2

Powder 川流域における地文

地形

Powder 川流域の現在の地形は，河川が漸新世，中新世，および鮮新世の堆積物の切削と洗掘を開始した更新世の隆起により形成された。

許可区域の地形は，緩やかに起伏する丘陵，広い河川谷，急峻な側を持った谷および丸くなった山稜によって特徴づけられる。

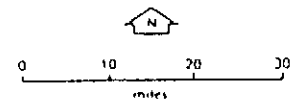
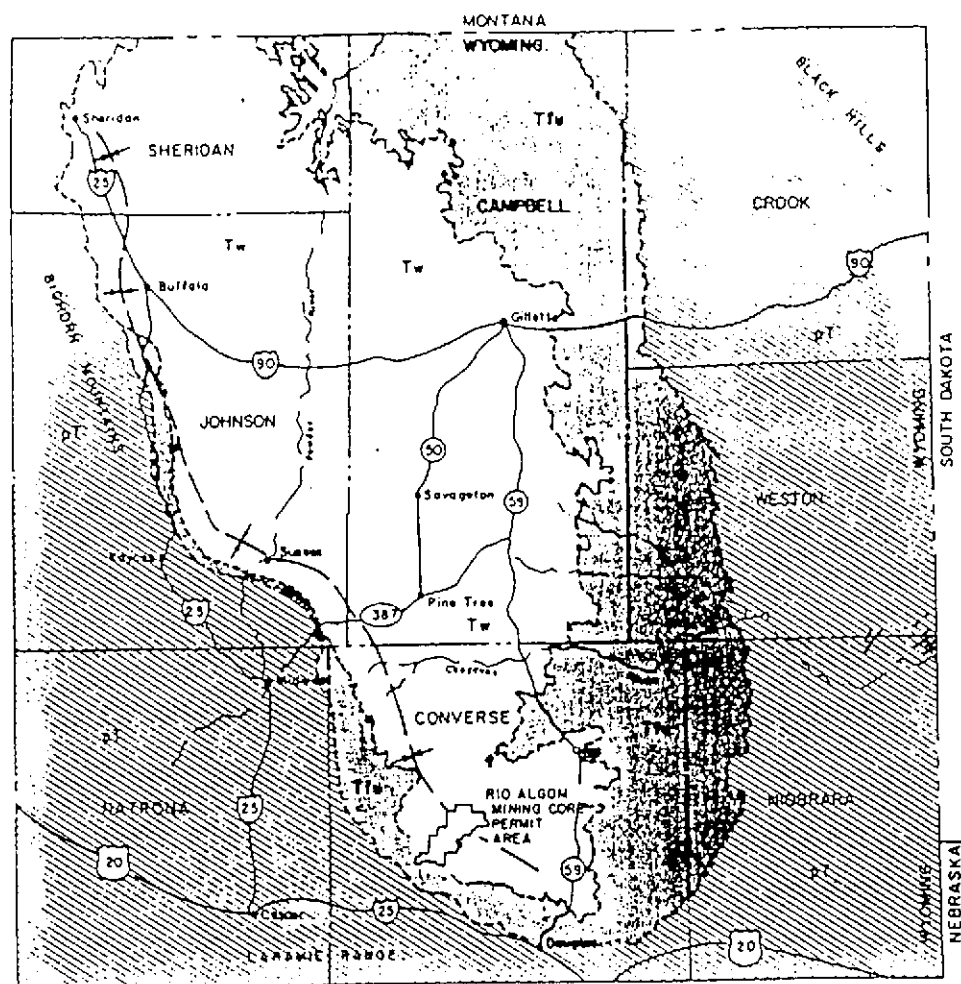
地質と層序

後 Laramie 変動だけが簡単に触れる。Powder 川流域にある重要なウラン鉱床の全ては，第三紀層，すなわち晩新世 Fort Union 累層と始新世 Wasatch 累層中に存在する（図 3 および図 4）。

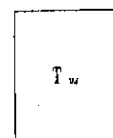
白亜紀の終わりに構造的隆起が起こり，晩新世に大陸性堆積物が堆積しはじめた。晩新世 Fort Union 累層は基盤岩の白亜紀頁岩や砂岩の侵食から得られた概ね細粒の碎屑岩からなる。晩新世後期までには侵食は先 Laramie Mountains を形成する結晶質岩まで切り込み，アルコース堆積物の間欠的な供給が現在の Powder 川流域の南端に流入している。

晩新世後期から始新世初期にかけて Powder 川流域は，周囲の山塊の隆起に対応して更に沈下を起こしている。この期間の堆積は主として，石炭沼沢を伴った大きな流速の遅い河川によるものである。

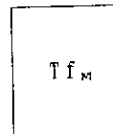
始新世初期には後背地から侵食された碎屑物が大きな扇状地や網状流路を形成した。Powder 川流域の Wasatch 累層の堆積はかなりの程度，石炭沼沢の形成を可能にする静穏期間と，それに続く粗粒碎屑物サイクルの隆起と再生の期間が繰り返している。堆積物の研究によって，Granite Mountains が碎屑物の主な供給源であり，少量の碎屑物が先 Laramie Mountains と Hartville 隆起から供給されたことが示されている。



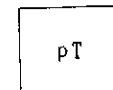
凡 例



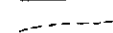
Wasatch 累層：少量の薄い石灰岩と石炭を伴った、不規則に成層した粘土岩、シルト岩、および砂岩



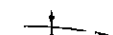
Fort Union 累層：厚い石炭層を伴った、互層をなす粘土岩、シルト岩、および砂岩



先第三紀岩石（未分離）



地質的接触，大凡の位置



Powder 川流域の向斜軸（先カンブリア基盤岩複合体の表面に位置する）



断層，大凡の位置

(Sharp and Gibbons: Sharp et al., 1964 から一部修正)

図 3 Powder 川流域後第三紀累層の一般化された地質図

Wasatch 累層の堆積に続いて、Powder 川流域の小さな沈降は始新世とそれより古期岩石におよそ 1.5° の北向きの局地的な傾斜を引き起こした。地域のデグラデーションは、後に漸新世の堆積物によって埋められた成熟した地形の発達を伴って始新世の中期から後期にかけて継続している。

漸新世、中新世および鮮新世においては、砂岩の多量な堆積物と凝灰岩質堆積物が Powder 川流域に集められた。この期間中、流れが火山灰で閉塞するほど火山作用が絶え間がなかった。

鮮新世の終わり近くには大きな局地的な隆起が起こり、河川は既存の堆積物の侵食と切り込を始めた。この侵食は継続し、現在の地形をもたらした。

ウランの鉱化作用は暁新世 Fort Union 累層と始新世 Wasatch 累層の双方で起こっている。局地的な地質とそれに結び付いたウラン資源は次のセクションで考察する。

地域地質

許可範囲内でのウラン鉱化作用に対する砂岩の母岩は、上部暁新世 Fort Union 累層のアルコース砂岩ユニットと始新世 Wasatch 累層の下部砂岩ユニットである。

Wasatch 累層は厚さが許可区域の北部と南部の 61 m ~ 91 m (200 ~ 300feet) から中央部の 152 m (500 feet) まで変化する、許可区域内で最も若い基盤岩ユニットである。

Fort Union 累層は 305 m (1,000 feet) 以上の厚さを有する。しかし上部の 213 m (600 ~ 700 feet) だけがウランの鉱化作用を伴ったアルコース砂岩を含んでいる。

RAMC は許可区域内の主要な砂岩と頁岩のユニットを任意に命名した。砂岩ユニットは若いものから古いものへ、E, W, U, S, Q, O, M および K である。Fort Union 累層と Wasatch 累層の間の実際の境界は、School 石炭層の基盤あるいは許可区域中に存在する School 石炭層と対比出来る亜炭層準として定義される。一般には境界は W 砂岩の最上部である (図 5)。

許可区域中の資源は先ず第一に、晩新世 Fort Union 累層中に存在する。資源の大勢は O, M, および K 砂岩ユニットに賦存し、Q, S, および U 砂岩ユニットにも重要な浸出可能な資源を局部的に賦存している。より小規模の資源が始新世 Wasatch 累層の E 砂岩中にも含まれている。これらの砂岩ユニットの厚さは 3 ~ 60 m (10 ~ 200 feet 以上) で、O 砂岩が最も厚くかつ最も連続している。

鉍石の産状は典型的なワイオミングで認められるロールフロント型であり、一般的に北を向いた C 字形の特徴を有する。砂岩ユニットは厚さ、層間頁岩、および高石灰石ゾーンに左右されて 1 ないし 20 の鉍化フロントを含むが、O 砂岩ユニットが最も複雑である。

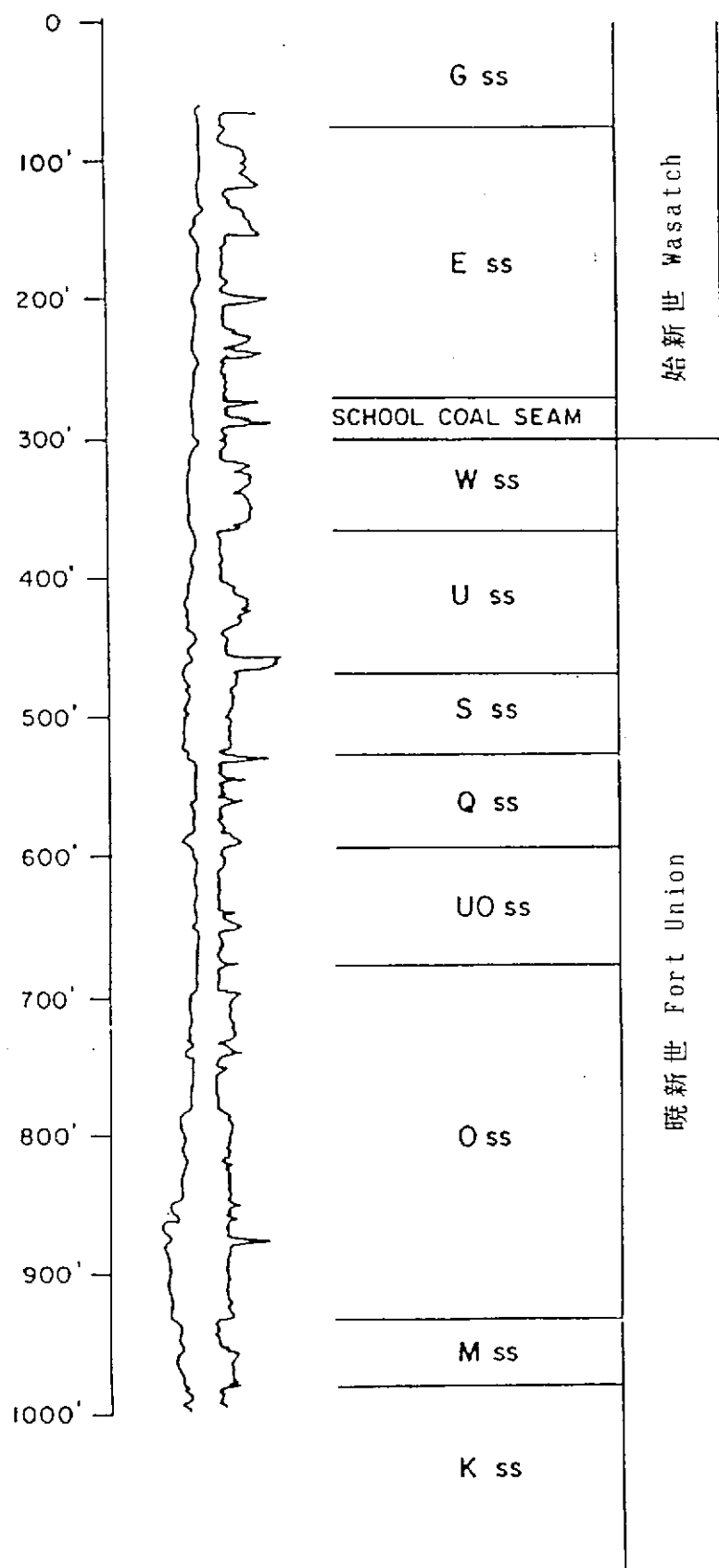


図 5

Powder 川南部流域の RAMC 砂岩の分帯

ISL 採掘への適応性

Smith Ranch のウラン鉱体は徹底的に試験され、アルカリ ISL 採掘へのその適応性を示すために評価された。これらの研究努力の中心的な様相は以下の通りである：

実験室研究

Kerr McGee Corp. による実験室規模の試験によって、マイルドなアルカリ浸出剤に対する主鉱床の適応性が示された。これはまた、二つの成功したフィールド・パイロット試験によっても確かめられた。

しかし、プロジェクト内にある若干の鉱体は RAL による取得前には徹底的に研究されていない。これらの地域からコアサンプルが掘削され試験された。実験室の結果はこれらの区域も同様にアルカリ ISL 採掘に適していることを示した。

これらの実験室ならびにフィールド試験はプロジェクトを支える中心的なファクターである。

ワイオミングの ISL 経験

ワイオミング州においては、二つの商業的 ISL 操業と 25 のパイロットプラントが種々の成功度で存在する。South Powder 川流域では二つのプロジェクトが重要である：a) Kerr-McGee/RAMC の Smith Ranch における成功したパイロットプラントと、b) Everest Minerals, Inc./Power Resources, Inc. の隣接鉱区で継続している商業的操業、Highland プロジェクトである。これらの両プロジェクトからの結果は（図 6）、提案された商業的プロジェクトに高い信頼性を与える上で役立った。

Smith Ranch パイロット試験

パイロット操業は ISL の経済的分析に必要なプラントおよび井戸設備の情報を入手し、免許のためのワイオミングの環境的質に対する要求を満足させるために行われた。可能な限りにおいてパイロット操業は商業的操業をシミュレートした。

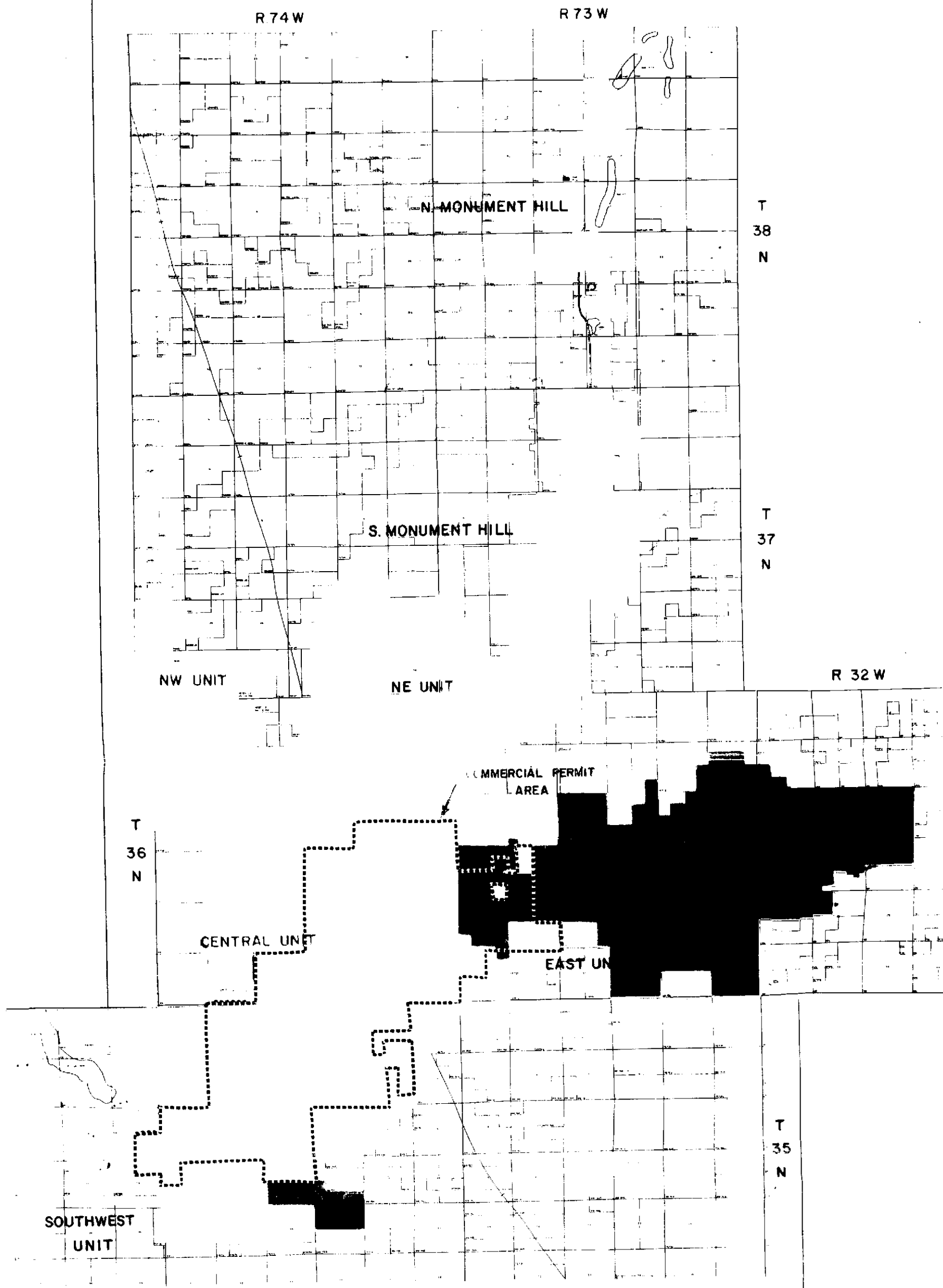
セクション 36 の Q sand ユニットとセクション 26 の O sand ユニットにおいてそれぞれ一回づつの、二つの試験が行われた。各試験はそれぞれ図 7 と図 8 に示すように 5-スポット・パターンで構成されている。

Q 試験は 1981 年 10 月から 1984 年 11 月にかけて行われ、復元試験は 1986 年 4 月まで続いた。Q 試験の帯水層の安定性と復元は 1987 年 8 月に州によって承認された。O パターンは 1984 年 8 月に操業を開始し、1990 年中続いた。結果は表 1 に総括してある。

条件は ISL の工業的井戸設備とプラント操業の典型的なものであった。井戸設備は 5-スポットであり、回収プラントは標準的な陰イオン交換樹脂システムであった。両試験はある時期同時に操業されたので、二つのイオン交換システムが設置された。酸素ガスを溶解させた標準的な重炭酸塩浸出剤が用いられた。

Q sand は Smith Ranch 地域でも最も薄い鉱石胚胎ユニットの一つである。Q sand の層厚は時には 1 m かそれ以下に薄くなり、また鉱化は砂層の全体に亘ることも有り得る。試験区域内での層厚は 3 - 15 m (10 - 45 feet) の厚さを有する。

O sand は一般に、Smith Ranch 内の最も厚い層準である。それは多くの細分された砂ユニットによって形成されている。試験区域においては、それは 75 - 90 m (250 - 300 feet) の厚さを持ち、無数の層間非連続性泥岩ユニットを含んでいる。試験区域内でのウランの鉱化作用は砂ユニットの下部 3 分の 1 で起こっている。



RIO ALGOM MINING CORP.

POWER RESOURCES, INC.

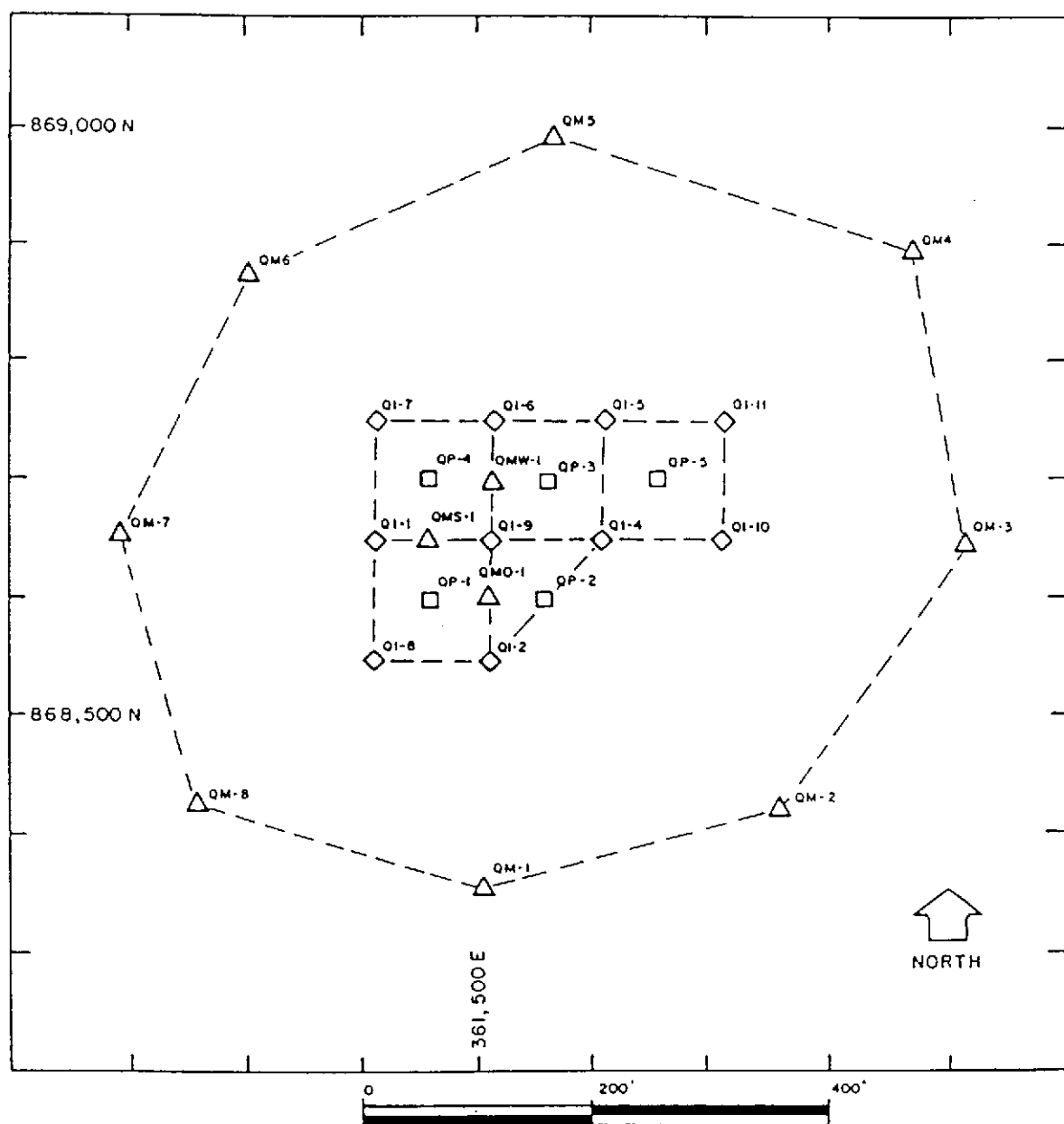
SCALE: 1" = 2 MILES

6

商業的採掘許可区域

Rio Algom Mining Corp.

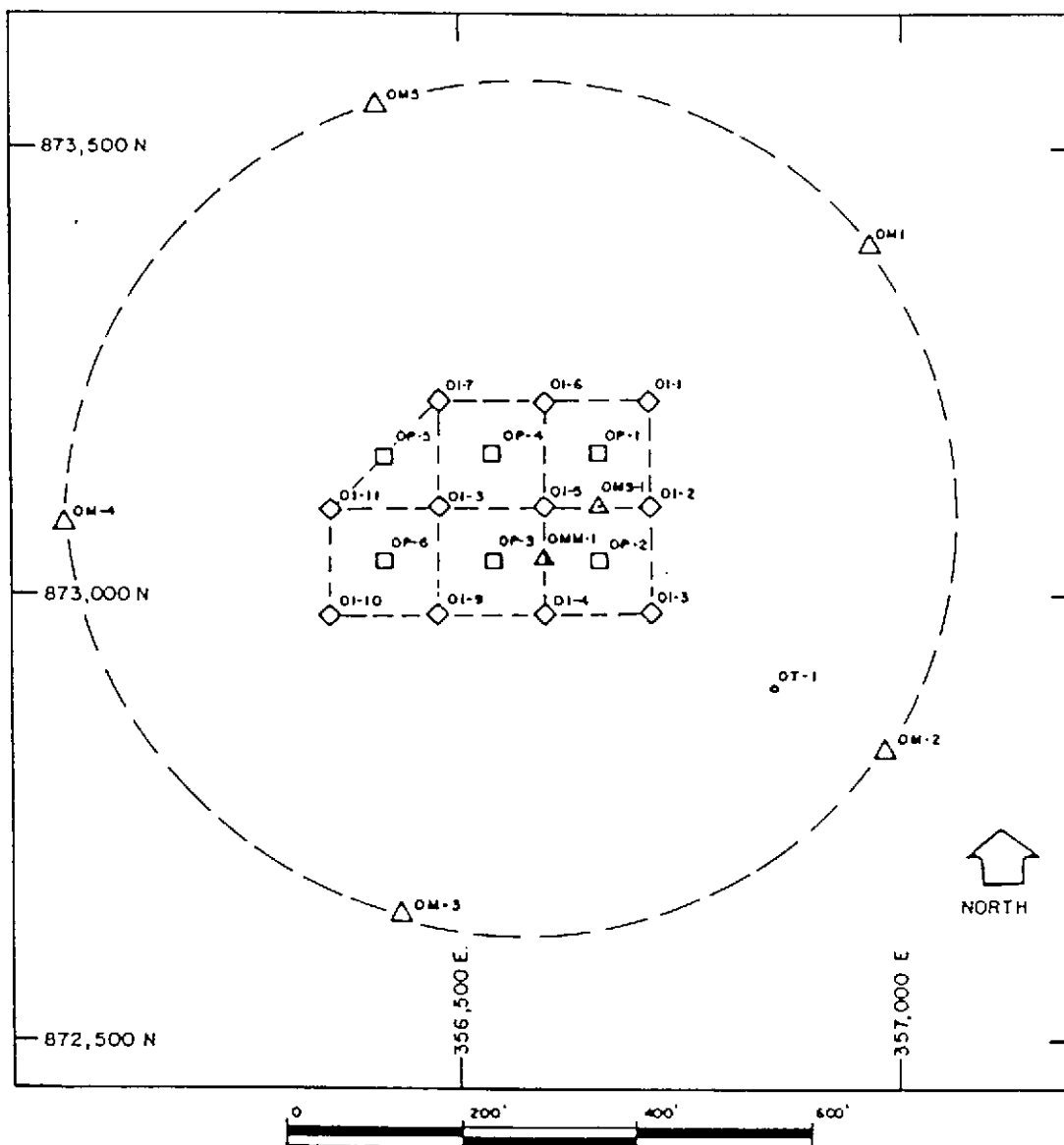
South Powder 川流域と Smith Ranch プロジェクト



- 凡 例
- △ モニター井
 - 生産井
 - ◇ 注入井

図 7

Q sand 井戸配置パターン
 セクション 36-T.36N., R.74W.
 Converse 郡, ワイオミング



凡 例

上位ゾーン・モニター井	△	モニター井
下位ゾーン・モニター井	□	生産井
	◇	注入井

注入井間の間隔 120 FT.

図 8

0 sand 井戸配置パターン

セクション 26-T.36N.,R.74W.

Converse 郡, ワイオミング

表 1
Smith Ranch ISL パイロット試験要約

	Q sand	0 sand
没出期間	1981 年 10 月 - 1984 年 11 月	1984 年 8 月 - 1991 年 1 月
復元期間	1984 年 11 月 - 1986 年 5 月	-
復元の証明	1987 年 8 月	-
パイロットの流量	378L/m (100 gpm)	568 L/m (150 gpm)
5-スポット・パターンの大きさ	30 m x 30 m (100 feet x 100 feet)	36 m x 36 m (120 ft x 120 ft)
鉱石深度	152 m (500 feet)	229 m (750 ft)
原位置埋蔵量	61,235 kg	103,480 kg
生産量	35,380 kg	96,615 kg
実収率	58%	93%
流体の処理		
ボア・ボリューム	11,730 m ³	45,800 m ³
生産のためのボア・ボリューム	42	45
復元のためのボア・ボリューム	20	-
1 ボア・ボリュームの日数	22	56

Kerr McGee は 1.8 m/0.05% (6 feet/0.05%) カットオフを用いて埋蔵鉱量を計算している。いずれの鉱石切片の計算に含まれる最低品位も 0.05% であった。全てのケースにおいて各試験井戸設備の周囲の 3 m ゾーンが埋蔵量に含まれている。原位置埋蔵鉱量は下記に示す通り：

表 2

パイロット区域原位置埋蔵鉱量, U₃O₈ t

井戸設備	1.8 m/0.05%
<u>区域</u>	<u>カットオフ</u>
Q	61,200
0	103,400

両井戸設備とも 5-スポットパターンで、つまり、4 本の注入井を正方形の頂点に、その中心に 1 本の回収あるいは採取井が配列されている。Q 井戸設備に対しては、正方形は公称 30 m x 30 m (100 feet x 100 feet) であった。実際の間隔は 26 m ないし 34 m (85 feet - 110 feet) であった。0 井戸設備に対しては公称の間隔は 36.5 m x 36.5 m (120 feet x 120 feet) であった。モニター井を含む全ての坑井は井戸設備 “header house” に連結されており、そこには注入および回収流量計、圧力計、注入および回収流量制御、酸素ミキサー、およびサンプル・ポートが置かれていた。各モニター井には header house でのサンプリングを容易にするために、ポンプが設置されていた。

各坑井へ至る注入および回収のためのパイプラインは 1.5 m (4 - 5 feet) の深さに埋設した。各生産井からの貴液は header house で混合され、プラントへ直接流送された。注入浸出液は header house へ流送され、個々の注入井に分配された。プラントと header house 間のパイプラインも 1.5 m (4 - 5 feet) の深さに埋設した。

坑井は完成されたオープン孔、つまり注入あるいは回収の区間にスクリーンを持たない孔であった。各注入井と生産井の完成間隔は、予め掘られた探査孔から決定された。

そして最初の孔がこの間隔の頂部の 1 ~ 2 feet 以内に掘られ、孔を広げてケーシングを付

け、セメントでその場所に固定した。その後、孔は完成間隔の少し下まで掘り下げられ、空気によるフラッシングと producing により掃除された。

流量が受け入れられる限界以下に下がった時は、坑井は塩酸で洗浄するか堅い剛毛ブラシで単にブラッシュした。低い注入性は概して、坑井孔への方解石のスケール生成か微粉の沈積によるものであった。坑井は開いた状態で保たれ、不適当なケーピングは起きなかった。

方解石のスケールは浸出液の調製を重炭酸ソーダから二酸化炭素 (CO_2) に切り替えることにより最低に抑えられた。ソーダが粘土上のカルシウムと交換される。カルシウムは徐々に系の中で蓄積し、pH 調節の問題と方解石沈澱を引き起こす。 CO_2 の注入は系中に既にキャリアーとして存在する陽イオンに依存する。

井戸設備で操業されているウランの全般的な濃度と流れを図 9 と図 10 に示した。0 sand 試験における 1986 年後期のウラン濃度の上昇は、重炭酸塩の増量あるいは排出液量の低下に基づく希釈の減少による可能性が強い。1983 年中頃の Q 試験における濃度の上昇は恐らく、パターンの中で最も厚い鉱石孔の一つである QI-10 をポンプアップするための井戸設備配置の変更に基づくものである。1985 年後期の 0 試験における過酸化水素の添加はウラン濃度に影響を与えておらず、系が酸素欠乏の状態には無いことを示唆している。

開始から平均濃度が 20 mg/L (復元を開始すべきカットオフ・ポイントであると一般的に認められている濃度) に達するまでの Q 試験に対する平均ウラン濃度は、90 mg/L に極く近かった。これにはそのカバーされていない南東側からの大きい希釈を伴った QP-2 セルからの劣った成績が連続して含まれている。

例えば、1984 年 2 月に、商業的井戸設備であれば復元にかけられたであろう時期のすぐ後に、全般的に低品位鉱石セルであった QP-1 はその寿命期間を通して平均 52 mg/L であった；カバーされていないセル QP-2 は平均 21 mg/L であった；他の三つのセルは 90 mg/L 以上であった。このことは商業的操業ではいずれの井戸設備においても、坑井の順番的な、あるいは選択的な閉鎖が起こることを明確に示している。生産井は一斉に枯渇することは無い。

0 井戸設備はその寿命期間を通して平均約 70 mg/L であった。ここにもカバーされないセル (P-5) が存在した。1987 年 12 月の時点で、P-1 は平均 82 mg/L, P-2 は平均 53 mg/L, P-3 は平均 76 mg/L, P-4 は平均 81 mg/L, P-5 は平均 60 mg/L, P-6 は平均 66 mg/L であった。この井戸設備が示すより大きい開口部間隔と全般的により大きい希釈が恐らく、全ての坑井における全般的に比較し得る結果の原因である。

Q sand 生産井が 0.95 - 1.25 L/s (15 - 20 gpm) 産出したのに対して、0 sand 生産井は 1.25 ~ 1.89 L/s (20 - 30 gpm) を産出した。その違いは各試験に対する免許の条件によるものである。帯水層の水位低下は問題でなかった。

井戸設備圧力は稀には 345 kpa (50 psig) を越え、坑井のブラッシングや酸処理で低下できた。バランスのとれた注入は 0.65 L/s (10 gpm) 付近で維持された。

上記に引用した埋蔵量と最新の生産データ (12-31-'90) から採取率が下記のように計算される：

表 3
計算された採取率

試験	1.8 m/0.05% 埋蔵量からの	
	採取率	
Q	58%	
0	93%	

操業開始以来 0 試験に対して循環されたポアボリューム当たりの埋蔵量採取率は 2.6% であった。Q sand は操業開始から復元のために閉鎖すべき時期 (1984 年初期) までの間に、循環されたポアボリューム当たり平均 2.1% の採取率であった。

循環されるポアボリューム当たり 2% - 2.5% の埋蔵量採取率は、計画の段階で使うことが出来る。

浸出剤の化学系は標準的な酸素を伴った重炭酸塩浸出剤である。Q sand 試験の初期には、過酸化水素が孔内酸素源として用いられた。後にガス状の酸素が用いられ、従ってコストが低減された。現在では全ての ISL 操業が酸化剤としてガス状の酸素を用いている。

ウラン濃度 mg/L U_3O_8

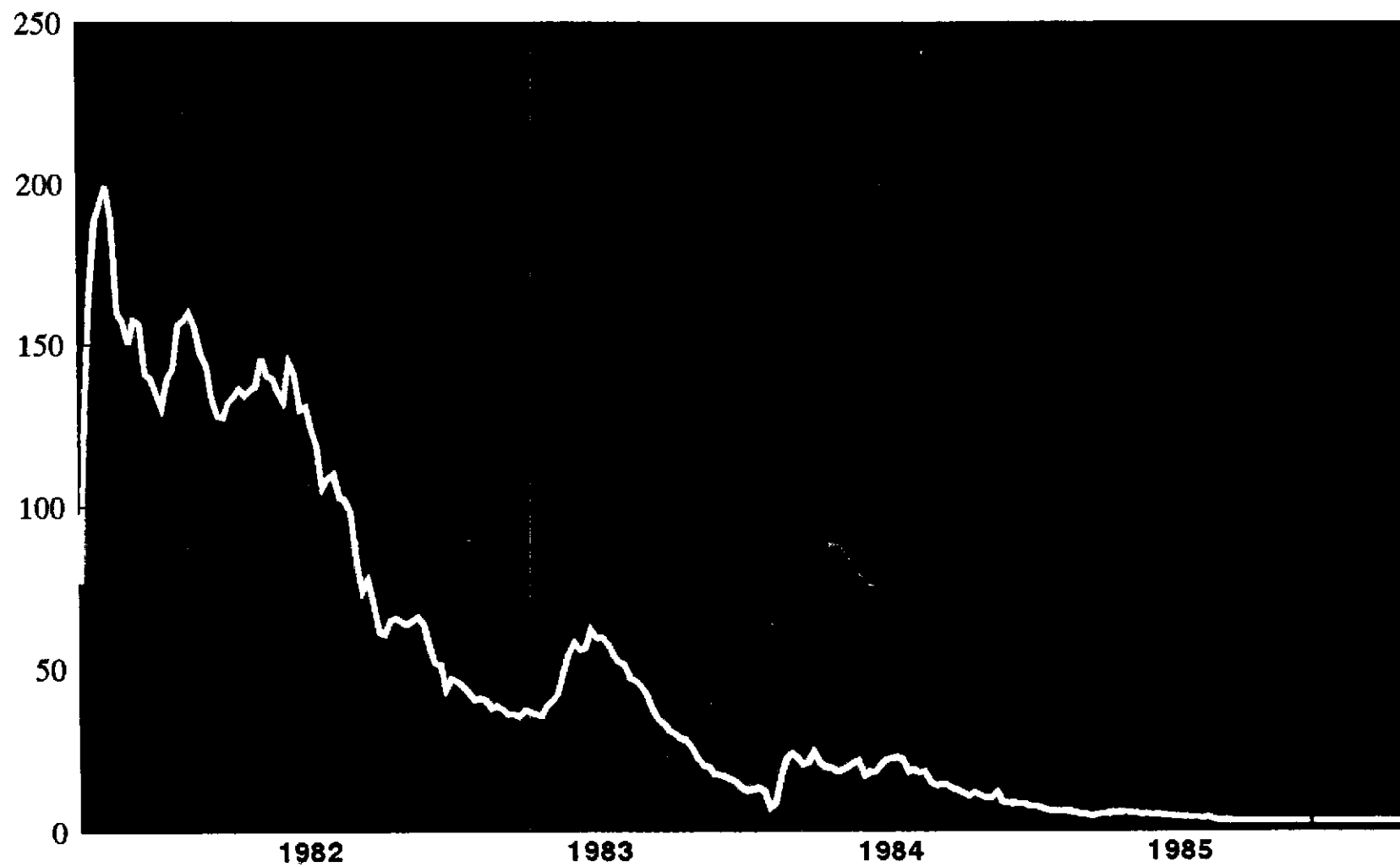


図 9 Q sand パイロット生産データ

ウラン濃度 $\text{mg/L U}_3\text{O}_8$



図 10 0 sand パイロット生産データ

フィールド・パイロット試験の地質的評価

パイロット試験計画の最終段階として、1990 年の二つの井戸設備から多くのコアが採取された。コアの分析は長期の浸出作業の後の、鉱体の物理的ならびに地球化学的状态に関して直接的な情報を提供する。

Q sand パイロットでは 2 本のコアが掘削され、O sand サイトでは 5 本のコアを採取した。コアは残留ウランについて分析され、記載岩石学的な研究に付された。Q sand パイロット内の清浄な砂からは 90% 以上のウラン鉱物を取り除かれていた。残存している唯一の重要な鉱物是非浸透性の粘土、頁岩、および有機質残渣と緊密に結び付いたものである。残存鉱石品位（原位置尾鉱）は 0.005% 以下が一般的であった。O sand パイロット試験では高い効率浸出を確認した。残存鉱物は主として不透水性層準と結び付いている。このことは ISL 操業では浸出剤に接近できる埋蔵量だけが採掘できる、という基本的な事実を表している。頁岩や不透水性のこう結層準中の埋蔵量は、可採鉱量（すなわち、原位置資源）として計上すべきでない。

Highlands ISL プロジェクト

Highlands ウランプロジェクトは Everest Minerals Corp. によって、1983年初めに Exxon Minerals から取得された。1972 年に開始して Exxon は在来型の鉱山とサイトにおける酸を用いた製錬所を操業し、約 10,400 t (23 百万LB) U_3O_8 を生産した（参考文献 2）。二つの成功した ISL パイロット・プロジェクトも Exxon 時代に行われた。1985 年には、T.V.A. から隣接の North Morton Ranch 資産を取得することにより、Everest プロジェクトの面積は 6,070 h a. (15,000 acre) に拡大された。

1987 年半ばにおける商業的免許の取得に続いて、907 t (2 百万 LB) U_3O_8 /年の ISL施設が建設された。商業的生産は1988 年 1 月 15 日に開始した。1988 年 3 月までにウラン採取量は 453 t (1 百万 LB) U_3O_8 /年の持続した生産量に達した。1988 年の合計の生産量は、目標の 401 t (885,000 LB) U_3O_8 に対して 419 t (923,000 LB) U_3O_8 であった（参考文献 3）。

この最初の 1 年間、イオン交換樹脂へのウランのロードは 64 g/L (4.0 LB/ft³) を越え、リークは 2 mg/L 以下であった。溶離、沈澱、および乾燥の工程は順調に作動した。個々のプロセス・ユニットの評価により、設置処理能力は 907 t (2 百万 LB) U₃O₈/年以上であることが示された。

操業開始前に、135 本のモニター井と 225 本の生産井と注入井を含む 67 の 5-スポットパターンが建設された。各パターンは最低 4,500 kg (10,000 LB) U を取り囲んでいる（参考文献 3）。

パターンの建設は ISL プロジェクトの操業寿命期間を通して継続される。Highlands では 200 以上の 5-スポットパターンが稼働した。

1989 年から 1991 年にかけての生産量は目標の 453 t (1 百万 LB) U₃O₈/年で推移している。51 人の操業人員がこの生産レベルを維持している。最初のサテライト/井戸設備複合体からの採取量は現在、680 t (1.5 百万 LB) U₃O₈あるいは原位置埋蔵量の 85% を越えている。第二のそのような複合体が1989 年 7月 に操業に入り、これも 680 t (1.5 百万 LB) U₃O₈以上を産出している。報告された埋蔵量は約 9,070 t (20 百万 LB) U₃O₈である（参考文献 1）。

1989 年中頃 Everest グループはこのプロジェクトを Nuclear Electric, PLC および Scottish Nuclear, Ltd. に売却した。Power Resources, Inc. が現在の所有者に対するオペレーターである。

地質的ウラン資源

1990 年 12 月 31 日現在の Smith Ranch プロジェクトに対する原位置資源量は、平均品位 0.11% U₃O₈ で合計 15,420 t (34 百万 LB) U₃O₈ であった。

それに加えて、地下水面かすぐその下にある浅い鉱床中には、さらに 2,720t (6 百万 LB) U₃O₈ の埋蔵量が存在する。これらの埋蔵量のある部分は ISL 採掘の適用が可能と考えられる。

75% という控え目な採取率を採用すると、11,500 t (25,400,000 LB) U_3O_8 の ISL で採取可能なウラン可採埋蔵量が得られる。

Kerr McGee から取得の時点では、総可採埋蔵量は 10,385 t (22.9 百万 LB) U_3O_8 であった。現在報告されている埋蔵量の増加は主に、後続の試錐計画による追加の埋蔵量の発見によるものである。

資産の全ポテンシャルはまだ吟味されていない。いくつかの既知の鉱化作用区域では将来、追加の試錐が行われるだろう。我々はそのような試錐の結果、原位置資源量は増加し続けると期待している。23,000 t (50 百万 LB) U_3O_8 の最終的なポテンシャルが見込まれるかもしれない。

会社はワイオミングの他の場所で総計 2,310 t (5.1 百万 LB) U_3O_8 の追加的な埋蔵量を有している。

免許／認可

プロジェクトに対する第一義的な規制監督は米国原子力規制委員会（NRC）、米国鉱山保安衛生局（MSHA）、およびワイオミング環境品質局（the Wyoming Department of Environmental Quality, WDEQ）によって行われる。他の連邦および州の官庁の管轄に属する適用規制は主管官庁によって管理される。必要とする免許の総括と現在の状態を表 4 にしめた。

施設は現在、全ての免許／認可の要件を満足している。

Smith Ranch プロジェクトの土地保有

Rio Algom Mining Corp. (RAMC) は現在、ワイオミングの South Powder 川流域に位置する Smith Ranch プロジェクト区域において 21,450 ha. (正味 53,000 鉱業acre) を支配している。この全体の内、ほぼ 15,780 ha. (正味 39,000 鉱業acre) は Kerr McGee Corp. から 1989 年 1 月に取得されている。RAMC は追加の 5,670 ha. (正味 14,000 鉱業acre) の支配権を租鉱権と所有権主張計画を通して獲得した。RAMC は同じ広さの地上権を Smith Ranch プロジェクト区域で支配している。

表 4 (その1)
Smith Ranch プロジェクト
商業免許の現状

免 許	認 可 官 庁	目 的
放射性物質取り扱い 免許	米国原子力規制委員 会	連邦の法律と規則の下で天然に出現するウラン を所持する権利を認める基本的な許可。
鉱山保安 認定番号	米国鉱山保安衛生局	連邦の保安規則と規制の下で鉱山を営むための 認可。
採掘許可	ワイオミング環境品 質局（土地質部）	ウランをインシチュール法で採掘する権利を認め る基本的な許可。
探査のための許可	ワイオミング環境品 質局（土地質部）	ウランを探すための試錐活動を行う権利を与え る。
廃水処理井に対する 許可	ワイオミング環境品 質局（水質部）	液体廃棄物処理のための注入井を建設し操業す るための権利を与える。
土地投与による液体 廃棄物処理に対する 許可	ワイオミング環境品 質局（水質部）	液体廃棄物処理のために灌漑システムを建設し 操業するための権利を与える。
蒸発池／廃水池に対 する許可	ワイオミング環境品 質局（水質部）	液体廃棄物処理のために蒸発池を建設し操業す る権利を与える。
鉱業のための帯水層 の公共的用途からの 免除	ワイオミング環境品 質局（水質部）	鉱石を胚胎する帯水層を ISL ウラン採掘に使 用する権利を与える。
非放射性核種放出に 対する大気質の許可	ワイオミング環境品 質局（大気質部）	規制された量の浮遊粉塵を放出する権利を与え る。
腐敗システムに対す る許可	ワイオミング環境品 質局（水質部）	腐敗システムを建設する権利を与える。
危険性の無い土地埋 立てに対する許可	ワイオミング環境品 質局（固形廃棄物 部）	サイトで土地埋立てを行うための許可。
坑井を建設するた めの許可	ワイオミング州エン ジニア	全てのモニター井と操業井を建設する権利を与 える。
池を建設するた めの許可	ワイオミング州エン ジニア	廃水池を建設する承認を与える。
建築許可	Converse 郡	工業的施設を建設する権利を与える。

表 4 (その 2)
Smith Ranch プロジェクト
商業免許の現状

免 許	現 状
放射性物質取り扱い 免許	米国原子力規制委員会は環境アセスメントを完了している。 1991 年の第 4 四半期に免許が与えられる予定である。
鉱山保安 認定番号	公式的な申請は必要としない。商業的操業開始の事前通知が、 資格がパイロットから商業的活動に変わる時点で必要。
採掘許可	1991 年 6 月に許可が与えられた。
探査のための許可	認可済み。
廃水処理井に対する 許可	申請準備中。1991 年に提出の予定。
土地投与による液体 廃棄物処理に対する 許可	申請準備中。1992 年に提出の予定。
蒸発池／廃水池に対 する許可	全般的な許可は与えられている。個々の池は最終設計の認可 が必要である。
鉱業のための帯水層 の公共的用途からの 免除	認可済み。
非放射性核種放出に 対する大気質の許可	真空乾燥システムに対する大気質許可に関する申請を提出済み。
腐敗システムに対す る許可	認可済み。
危険性の無い土地埋 立てに対する許可	認可済み。
坑井を建設するため の許可	初期の坑井フィールドに対するモニター井の許可は出されてい る。
池を建設するための 許可	ワイオミング環境品質局の権限とは独立した行為。適切な堰堤 安定性について最終設計を審査する。
建築許可	建設開始前に書面による申請を提出する予定。

商業的操業計画

Smith Ranch プロジェクトは深度 137 ないし 305 m (450 - 1,000 feet) に位置する透水性含ウラン砂岩からウランを採取するのに、ISL (インシチュー・リーチング) を利用する予定である。一旦採取されると、ウランは商業的に利用可能な陰イオン樹脂を用いるイオン交換法により回収される。イオン交換樹脂は周期的にウランで飽和されてくる。ウランは通常の溶離プロセスによって樹脂から取り除かれる。ウランを取り除かれたイオン交換樹脂は、さらにウランを回収するために循環される。溶離されたウランは沈澱され、不純物を取り除くために洗浄され、乾燥されて出荷のために包装される。

このプロジェクトは Q sand と O sand のパイロット試験計画や他の商業的プロジェクトで開発されたプロセスと技術を使用する。商業的開発のためには新しい技術を必要としない。

ウラン ISL 採掘プロセスの説明

ウラン ISL 採掘の仕組みは比較的簡単である。その土地本来の地下水にガス状の二酸化炭素と酸素を加えて調製される浸出溶液 (浸出剤) が、一連の注入井を通してウラン鉱石を胚胎する砂岩に注入される。浸出剤が鉱石と接触しながら帯水層を進むにつれて、酸素が反応してウランを +6 価の状態に酸化する。酸化されたウランはそこで二酸化炭素と水と可溶性の二炭酸塩ウラニル・イオン $[UO_2(CO_3)_2]^{-2}$ を生成して錯化される。ウラン溶液 (貴液) は生産井へ流れて行き、そこで水中ポンプによって地表に汲み上げられ、埋設された配管システムを通して地表の回収プラントへ運ばれる。回収プラントにおいては、ウランはイオン交換によって液体から分離される。尾液は二酸化炭素と酸素によって再強化され、さらにウランを採取するために再注入される。

ISL 採掘法はウランを選択的に鉱体から取り出す。プロセスによって尾鉱は生成されず、従って従来のウラン採掘法と結び付いた主な懸念が払拭される。ISL 井戸設備を設置する時にも、極く限られた地表の乱れしか起こらない。これの多くは井戸設備の操業寿命中に再植生されて再生

される。回収プラントの最終産物は浮遊ウラン粉塵の可能性を最低限に抑える，真空乾燥されたイエローケーキ（酸化ウラン）である。

プロジェクトの各採掘期の後には，その区域の再生が行われる。ワイオミング環境品質局（DEQ）と原子力規制委員会（NRC）によって承認される地下水復元の完了後，全てのケースのついた坑井は永久に栓をして上を覆う。ケーシングは耕作深さ以下で切断され，サイトは再植生される。同様に，その他の全ての地表の乱れは埋め立てて耕地に戻し，州が承認した草木種の混合物が植生を再構築するのに用いられる。

プロジェクト寿命の終わりにおいては，全ての影響を受けた土地と地下水は鉱業前の用途に適したものとなるだろう。

井戸設備採掘ユニットの概念

井戸設備区域は，開発を計画したり，ベースライン・データ，モニタリングの要件および復元の基準を確立するために，採掘ユニットに分けられる。各採掘ユニットは 8 ないし 24 ha. (20 - 60 acre) の埋蔵量ブロックからなっている。およそ 13 のそのようなユニットがつくられる予定である。どの時点においても 2 ないし 3 の採掘ユニットが生産段階にあり，さらにいくつかのユニットが開発と復元の様々な段階にあることになる。1 採掘ユニットはただ一つの採掘層準に充てられ，典型的に 189 L/s (3,000 gpm) 程度の流量を有するだろう。採掘ユニットの帯水層の復元は，そのユニットの採掘が完了後出来るだけ速やかに開始されるだろう。もし終掘ユニットが稼行中のユニットに隣接しているのであれば，そのユニットの一部分の復元は操業中のユニットへの干渉を抑えるために延期されるだろう。採掘ユニットの大きさと位置は，鉱床の最終的な形状，その区域の成績および開発の要件に基づいて決定されるだろう。

各採掘ユニットに対する予定された採掘計画を，予想される地下水復元計画と共に表 5 に示した。実際の開発計画は，生産計画と契約委託に合致するように修正されるだろう。

井戸設備設計概念

井戸設備は 5-スポット・パターンに基づいて開発される予定である。採掘ユニット中の注入井と生産井は、どの時点においてもたった一つの生産層準の鉱化間隔で完成されるだろう。注入井と生産井は他の全ての帯水層から鉱石胚胎間隔を絶縁して完成される。生産層準のモニター井は採掘ユニットを取り巻くパターンで設置されるだろう。生産層準のすぐ上と下の帯水層の中で 1 本の上位モニター井と 1 本の下位モニター井が、1.6 ha. (4 acre) の各井戸設備区域について完成される。

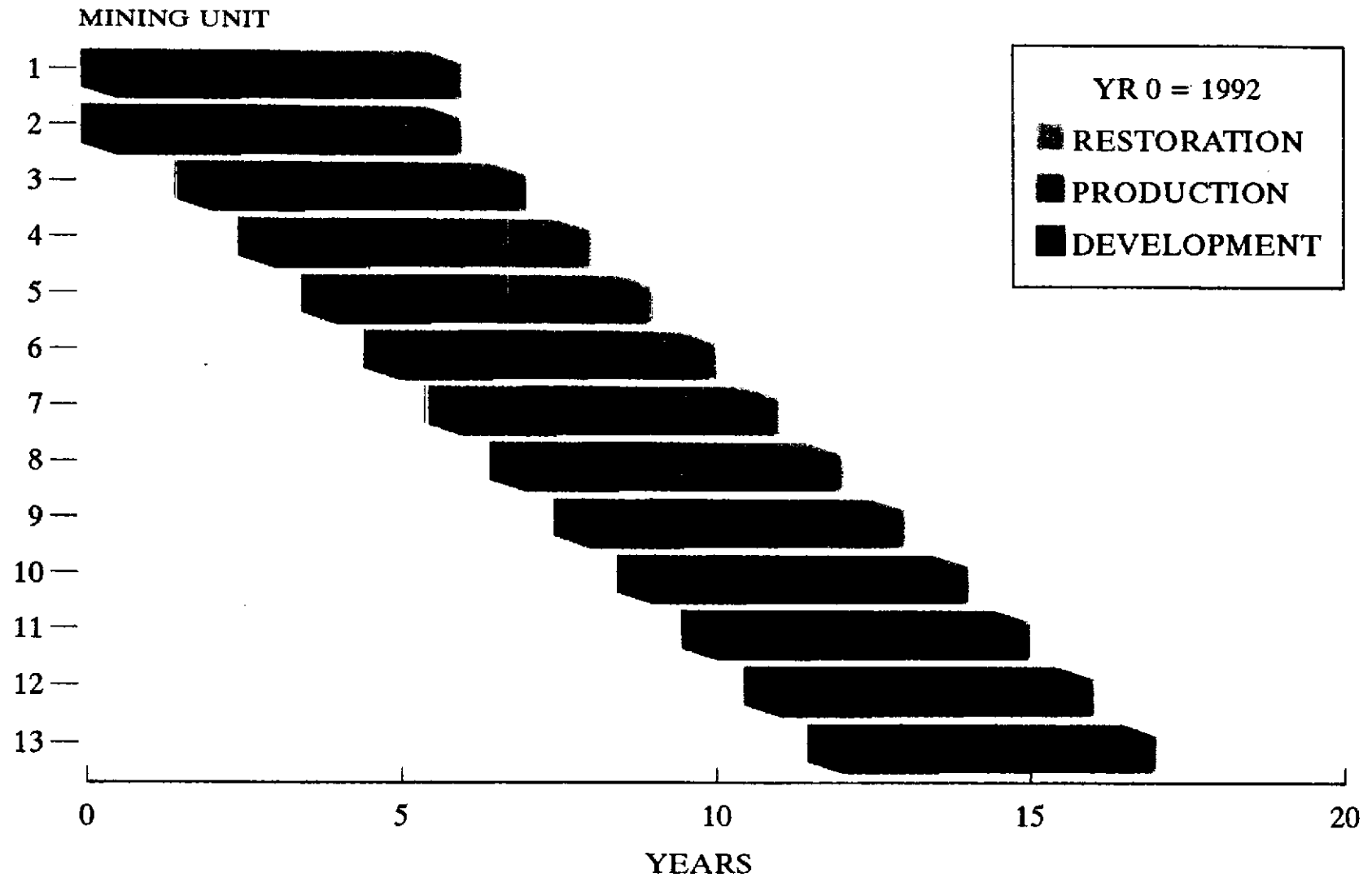
井戸設備・パターン： 井戸設備パターンは 5-スポット・パターンである。しかしそれは鉱体の形状に合うように修正されるだろう。セルの寸法は果層と鉱体特性に従って変化するだろう。注入井は 23 ないし 46 m (75 - 150 feet) の間隔で設置されるだろう。全ての坑井は注入井、生産井のいずれとしてでも使えるように建設されるだろう。これによりウラン採取率と地下水復元を最適化するために流れの向きを容易に変更することが可能となるだろう。

各採掘ユニットにおいては、注入された以上の浸出剤が生み出されるだろう。

これによって局所的な水文的負圧コーンまたは低圧帯が形成される。周囲の区域から採掘ユニットへ向かう自然の地下水の動きを引き起こすことによって、この圧力勾配が浸出剤の封じ込めを達成する。生産オーバーあるいは排液量は Q sand 採掘ユニットに対しては生産量の公称 0.5%, 0 sand 採掘ユニットに対しては公称 1.5% であると予想される。

生産層準のモニター井は採掘ユニットの外縁からほぼ 150 m (500 feet) 離れて、坑井間の最大間隔 150 m (500 feet) で設置される。モニター井はまた、生産層準のすぐ上と下の帯水層にも完成されるだろう。そのようなモニター井は井戸設備の各 1.6 ha. (4 acre) に対して 1 本の上位モニター井と 1 本の下位モニター井の割合で、採掘ユニット区域で均一に分布される。

表 5 採掘ユニット開発スケジュール



各注入井と生産井は通水管建家の中にあるそれぞれの注入あるいは回収マニホールドに接続されるだろう。マニホールドは浸出溶液を、イオン交換施設との間で溶液を往復させる配管に導く。個々の坑井の流量をモニターし制御するために、流量計、調節弁、および圧力計が個々の坑井の流路に設置される。井戸設備の配管には高密度ポリエチレン・パイプ、PVCおよび鋼管が使用される予定である。ここの井戸設備の流路と回収プラントへの幹線流路は凍結を防ぐために埋設される。フィールドの通水管建家と埋設流路の使用は、パイプラインを保護するための確立された方法である。Smith Ranch のパイロット試験計画はこの方法を採用し、凍結やその他の天候に関係した深刻な問題に煩わされることなく、冬中連続的に操業された。典型的な井戸設備を図 11 に示した。0 sand パイロットの浸出剤の流れパターン（図 12）が典型的である。

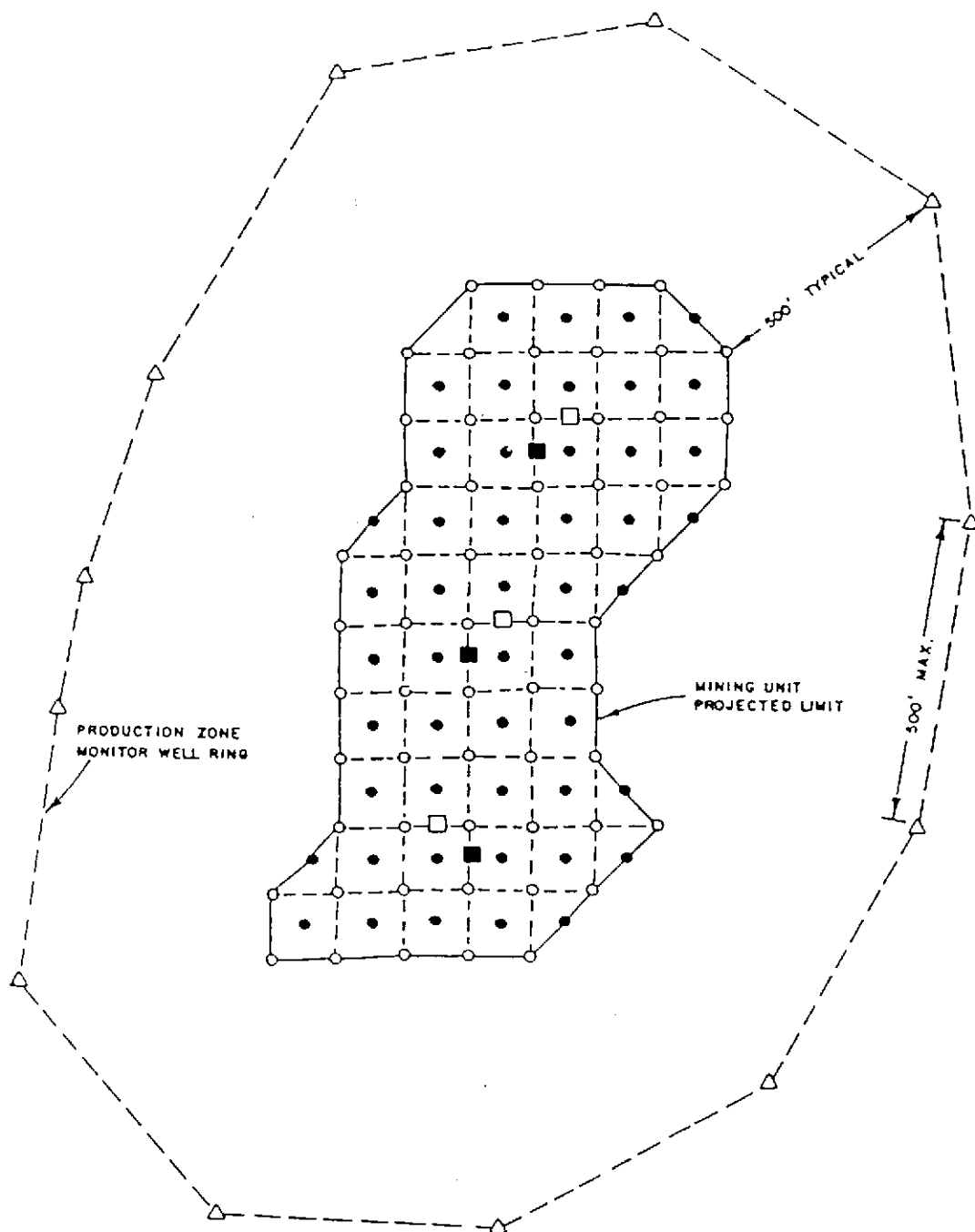
井戸の仕上げ： モニター井、生産井、および注入井が、目標の仕上げ間隔の上部までトラック搭載ロータリー掘削装置で地元の泥と少量の市販の粘度調節剤を用いて穿孔される。井戸はケーシングを取付け、全ての上位の帯水層から仕上げ間隔を絶縁するためにセメントで固められる。セメントはケーシングをポンプで流下させ、ケーシングの下端で放出させることによって定置し、ケーシングと掘削孔リングの間を埋める。

井戸のケーシングは 6 m (20 feet) ジョイントで入手できる Schedule 40 PVC の予定である。典型的なケーシングは最小肉厚 6.55 mm (0.258 inch) と耐圧 1,480 kPa (200 psig) の 127 mm (5 inch) 直径である。

ケーシング・シューの上約 9, 27, および 46 m (30, 90, および 150 feet) に位置する三つのケーシング芯出し装置が、ケーシングが掘削孔の中心にきて、セメントによるシール効果が発揮されるのを確実にするために、ケーシング上に置かれる。

各井戸に対するセメント量は、リングを埋め地表へ戻ってくるセメントに必要な計算量の 110 % である。過剰量がセメントが地表へ戻るのを確実にする。時折掘削が予想より大きいリング容積を生み出し、セメントが地表へ戻らないことがある。このような状況ではリングの上の部分は地表からセメント注入を行う。

セメントの養生が終わった後、芯金が穿れて井戸が完成する。井戸はその後残っている掘削泥や削り屑を取り除くために約 30 分間エアリフトがかけられる。最終的な清掃とサンプリングの



凡 例

- | | |
|-------|--------------|
| ○ 注入井 | △ 生産ゾーンモニター井 |
| ● 生産井 | □ 上位帯水層モニター井 |
| | ■ 下位帯水層モニター井 |

図 11

Smith Ranch プロジェクトの代表的な井戸設備展開パターン

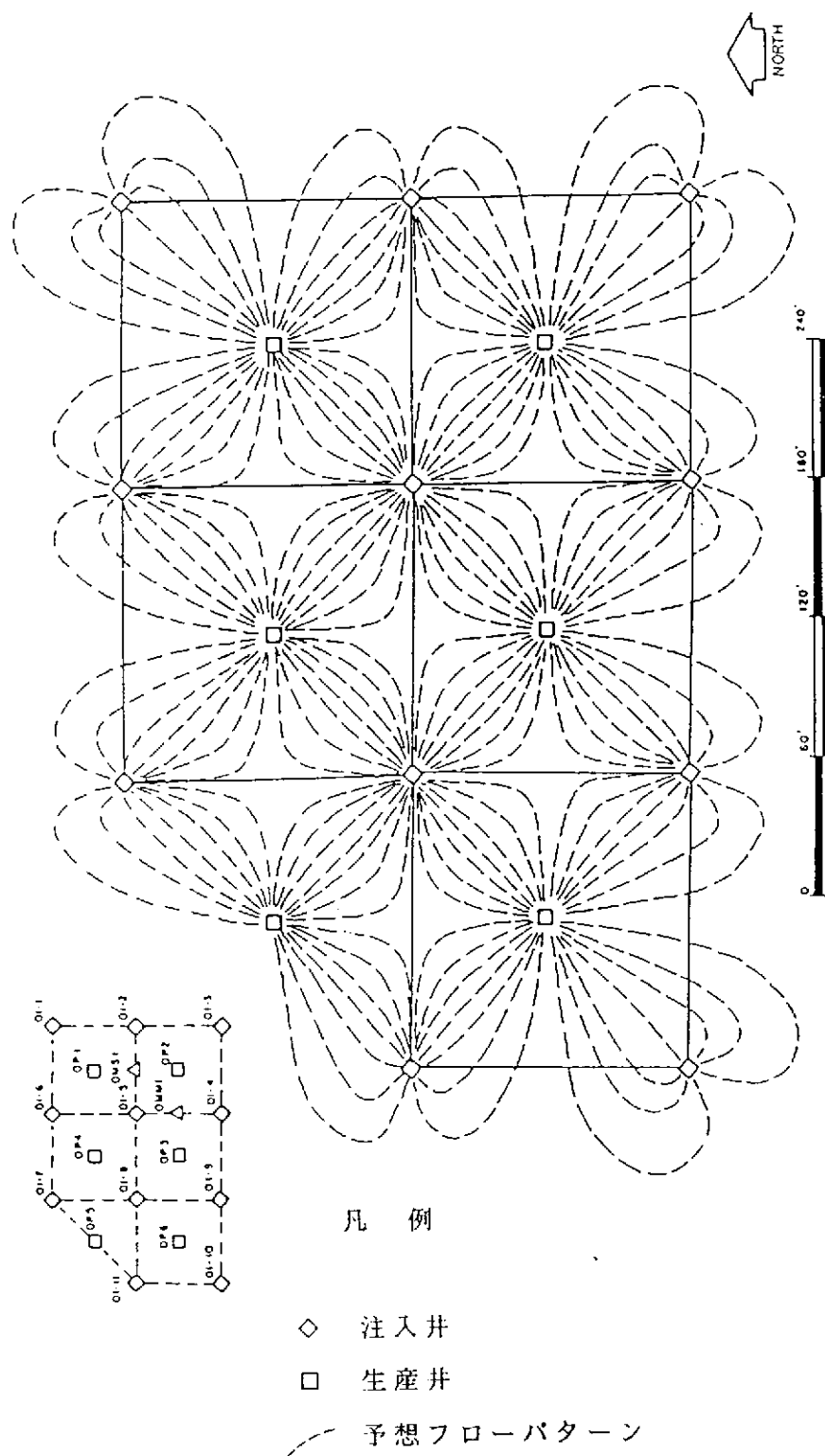


図 12

典型的な溶液の流れパターン

“0” sand ISL パイロット

セクション 26-T.36N., R.74W.

Converse 郡, ワイオミング

ためには小型の水中ポンプが用いられる。砂の生成や孔の安定性の問題が予想されれば、Johnson wire を巻いたスクリーンかそれに似たような装置が仕上げ間隔について設置されるだろう。典型的な井戸の仕上げを図 13 に示した。

井戸ケーシングの完全性： 井戸が仕上げられた後で、それが使用される前に井戸ケーシングの機械的完全性試験（MIT）が行われるだろう。MIT においては、賦圧層に隣接するかその下のケーシングの底が下降孔パッカーか他の適当な装置で閉じられる。そしてケーシングの頂部が閉じられ、圧力計がケーシングの内側に取り付けられる。シールされたケーシングの中の圧力を、予想最大操業圧力 791 kPa (100 psig) より最低 20% 上昇させ、そして井戸を閉じて全ての部品を漏洩についてチェックする。圧力が安定した後、圧力の読みを 2分間隔で 10 分間記録する。

もし井戸のケーシングが MIT に適合しないと、ケーシングを修理して再試験を行う。もし修理されたケーシングが MIT をパスすればその意図された用途に採用される。もし井戸の欠陥が深いところで起これば塞いで、後続の MIT をパスすれば浅いところで使用するため再仕上げを行う。もし修理後受け入れられる MIT が得られない場合は、井戸は栓をする。下降孔ドリルビットや下部リーマーを用いて井戸を修理した後には、新しい井戸ケーシング完全性試験が行われるだろう。

モニター井も生産井や注入井と同じ方法で掘削され、完成されるが、三つのタイプの井戸は全て MIT をパスしなければならない。

処理プラント設計概念

プロジェクトの処理プラントは二つのイオン交換回収プラントと一つの中央処理プラントからなっている。最初のイオン交換回収プラント（IX 施設 #1）は中央処理プラントに隣接して設置されるが、第二のイオン交換回収プラントはサテライトユニット（IX 施設 #2）である。イオン交換回収プラントと中央処理プラントにおける主要なプロセスの流れを示す構成図を図 14 と図 15 にそれぞれ示した。

イオン交換樹脂を用いるウラン回収には、次の処理回路が含まれる：

1. 樹脂のローディング
2. 放出液の処理
3. 樹脂の溶離
4. 沈澱
5. 産物の濾過，乾燥および包装

IX 施設には樹脂のローディングと放出液処理の工程が備えられている。各施設は 189 L/s (3,000 gpm) の浸出液を処理することが出来る。パイロット試験のデータに基づいて，生産される浸出溶液として 40 ないし 100 mg/L U_3O_8 のウラン濃度が予想される。パイロットプラントはこれらの条件で標準的なイオン交換樹脂は良好に作動することを示している。

イオン交換樹脂は IX 施設 #1 と中央処理プラントの間をパイプラインで輸送される。IX 施設 #2 に対してはトレーラトラックが使用されるだろう。

中央処理プラントは両 IX 施設から来た樹脂を溶離する。沈澱，産物濾過，乾燥および包装の回路は，最大 2.54 t (5,600 LB) /d あるいは 907 t (2 百万 LB)/yr の U_3O_8 を処理する予定である。

樹脂ローディング： 各 IX 施設の樹脂ローディング回路は，それぞれ 14.2 m³ (500 feet³) の陰イオン交換樹脂を収めることの出来る 6 基の圧力容器からなっている。これらの容器は 3 列の 2 段下降流ローディングとして配置される。ブースターポンプが列の上流と下流に設置される。

貴液が IX 施設に入ると，上流のブースターポンプが液体を 791 kPa (100psig) に加圧する。貴液中の溶存ウランはイオン交換樹脂に化学的に吸着される。貴液中に混入した砂やシルトは伝統的なサンドフィルターのように樹脂床で捕捉される。第二段を出る貧浸出液中のウラン濃度は通常，2 mg/L 以下である。この液体はブースターポンプによって 791 kPa (100 psig) に加圧され，井戸設備へ再注入のために返される。

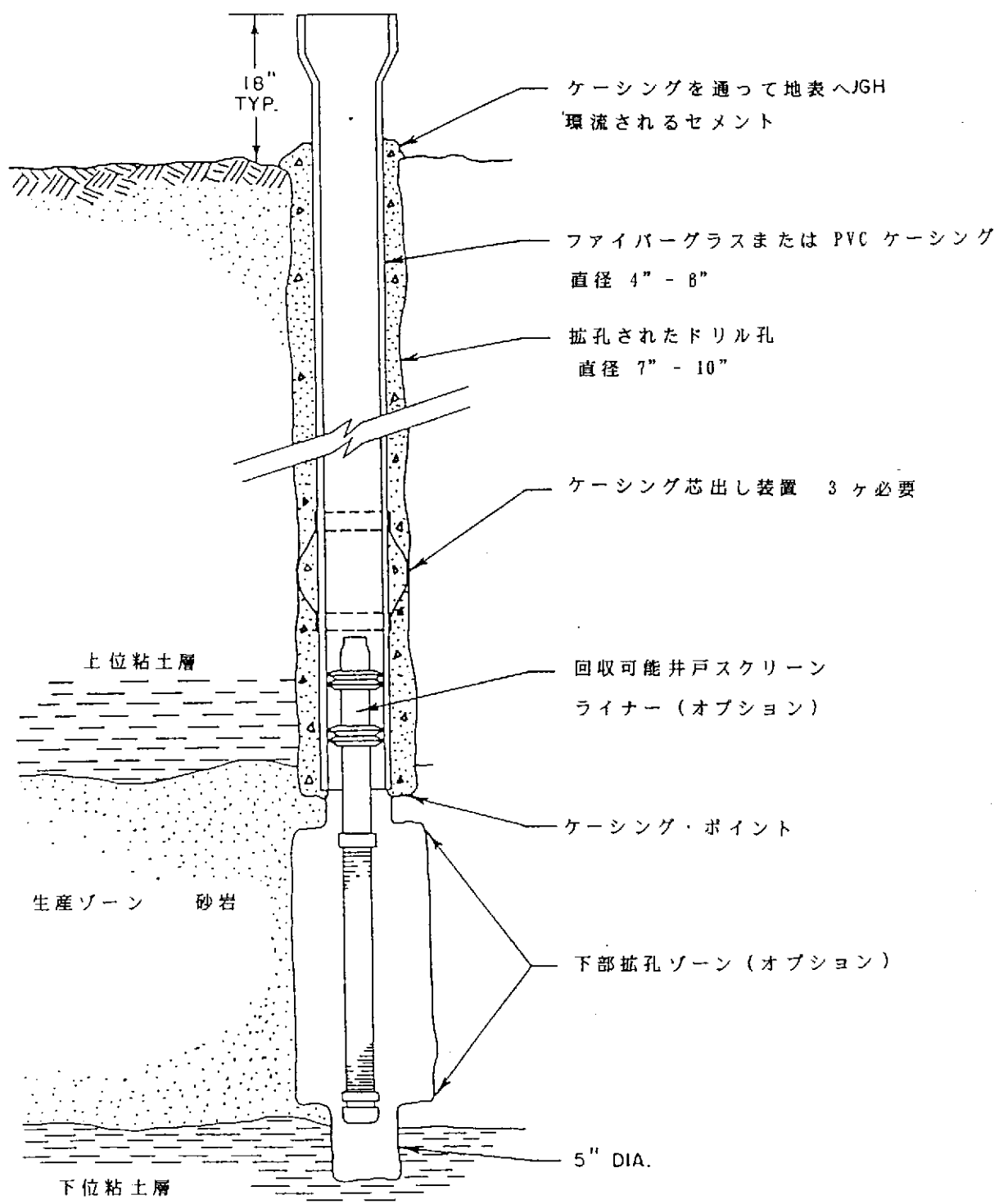


図 13
井戸仕上げ法

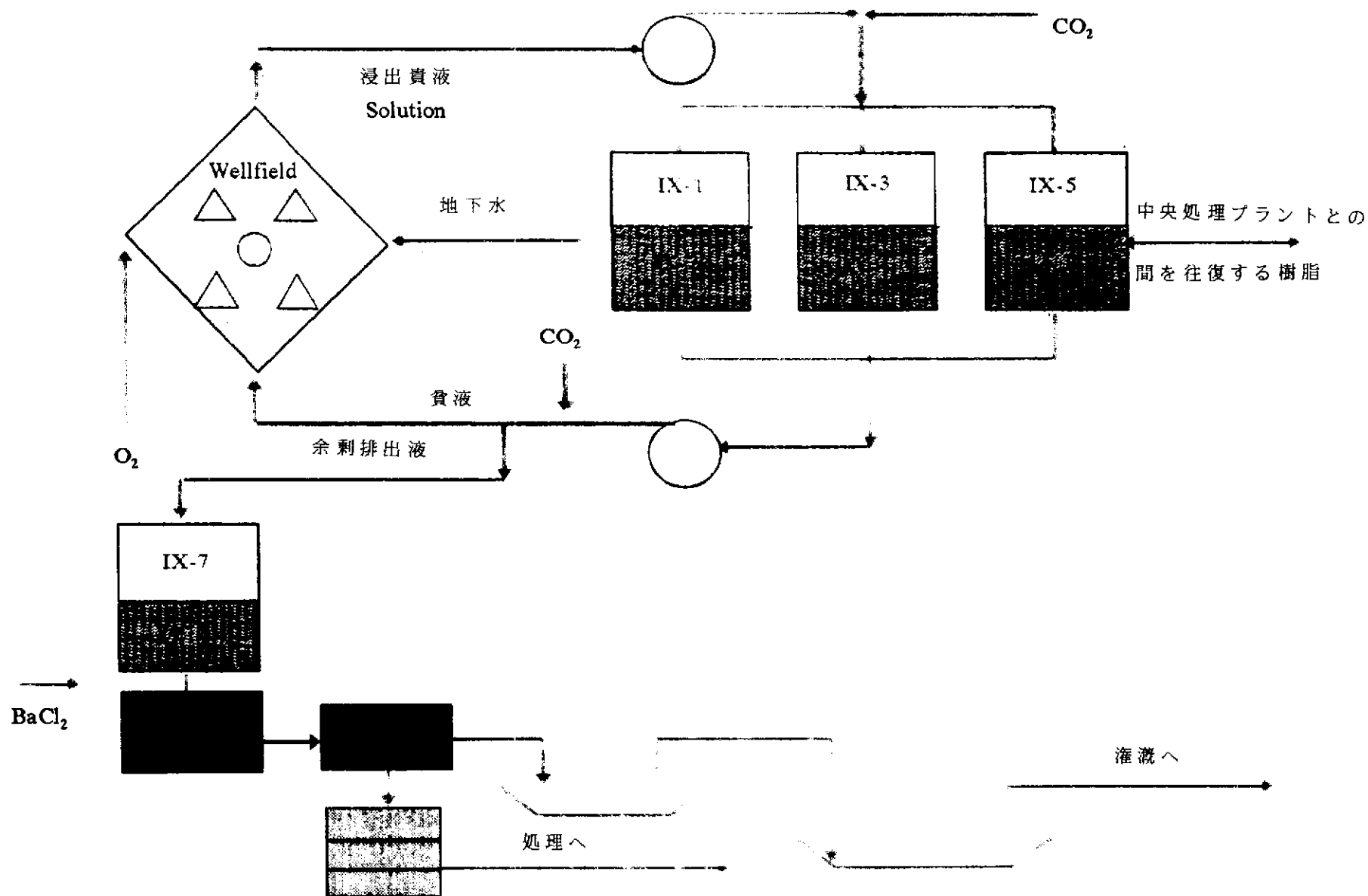


図 14 回収プラントのプロセス構成図

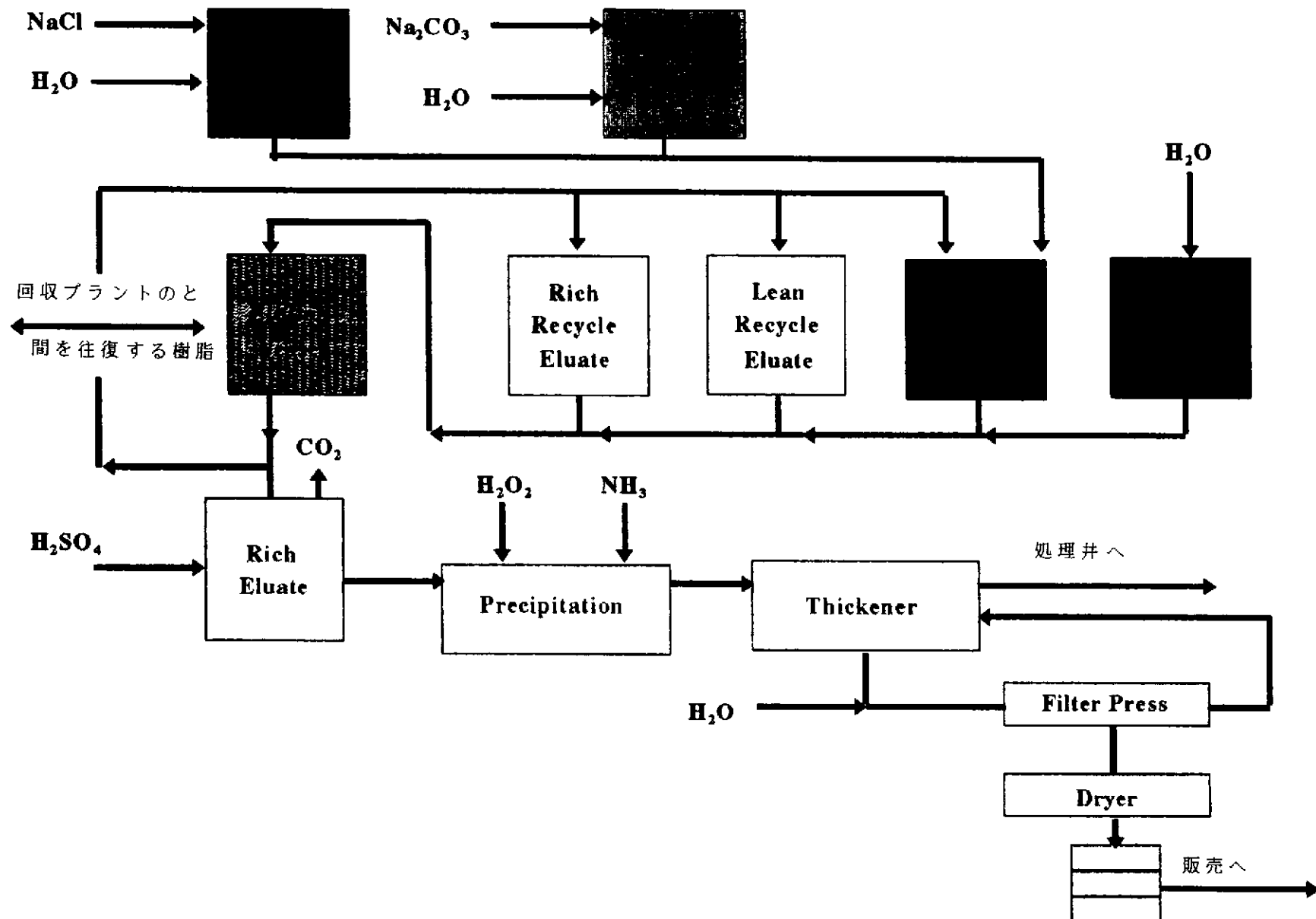


図 15 中央処理プラントの構成図

浸出液は地元の地下水、二酸化炭素および酸素で構成される。二酸化炭素はIX 施設で、樹脂容器の上流と下流で添加される。酸素は注入マニホールドに入る前の井戸設備ヘッダー室で、貧浸出液に加えられる。浸出液中の二酸化炭素濃度はおよそ 2,000 mg/L に保たれるが、酸素濃度はおよそ 500 mg/L となるだろう。

余剰放出液処理： 鉱化層準中における浸出液の動きを制御するために、貧浸出液の一部が絶えず取り除かれる。注入するよりも多い量の液体がつくり出される。この液の放出あるいは排出は鉱化層準の中で、周りの区域からの自然の地下水の鉱化層準への流動を引き起こす負圧コーンを形成する。この負圧勾配が浸出液を好ましい鉱石胚胎領域内に保持し、鉱石からの浸出液の好ましくない逸水を防止する。これはまた、制御されない液体の運動による浸出液の希釈を最低限に抑える。水文学的研究によれば、Q sand 採掘ユニットに対する放出量は産出液量の約 0.5%，O sand 採掘ユニットに対しては 1.5% である。放出された液体は土地への投与（灌漑）によって処置される。

灌漑する前に、放出液は貧浸出液に普通含まれる残留ウランと共に、ISL 採掘プロセスによって流動化されたラジウムを除去するために処理される。ウランの除去は 2 段下降流容器の 1 列による追加のイオン交換処理によって行われる。ラジウムの除去は通常バリウム／ラジウム硫酸塩の共沈法によって行われる。フィルタープレスによって大部分のバリウム／ラジウム共沈物が除かれる。一旦濾過されると、放出液は灌漑の前に残りのバリウム／ラジウム硫酸塩の固形物が沈降する二重ライニング池を通して放流される。

灌漑水には 30 pCi/L 以下のラジウムと 1 mg/L U_3O_8 以下のウランしか含まれないだろう。

溶離回路： 第一段の IX 容器中の樹脂がロードされて追加のウランが極く僅かしか取り除かれなくなった時、その容器は正常なプロセス流から切り離される。樹脂は 14.2 m³ (500 feet³) ロットで中央処理プラント (CPP) へ送られる。IX 施設 #1 においては、輸送は専用のバイピングを利用した水力輸送である。サテライト IX 施設 #2 に対しては、バラ積みタンク・トレーラーが用いられる予定である。CPP においては混入した砂粒子やその他の細かいゴミを取り除くために、樹脂は洗浄水を伴った振動スクリーンの上を通過する。樹脂はウラン回収と樹脂再生の

ために、加圧下降流溶離容器に重力で供給される。

溶離容器においては、樹脂は約 90 g/L の塩化ナトリウムと樹脂を再生するための 20 g/L の炭酸ナトリウム（ソーダ灰）を含んだ溶離液と接触される。溶離された樹脂は清水で水洗し、再使用のため IX 容器へ返される。

三段階の溶離回路を用いて、170 m³ (45,000 ガロン) の溶離液を 14.2 m³ (500 feet³) の樹脂と接触させ、10 ないし 20 g/L U₃O₈ を含む 57 m³ (15,000 gal.) の貴溶離液が得られる。溶離 1 回当たり 57 m³ (15,000 gal.) の新鮮な溶離液が、定められた量の飽和塩化ナトリウム（食塩）溶液、飽和炭酸ナトリウム（ソーダ灰）並びに水を混合することによって調製される。食塩溶液は市販の食塩飽和装置（塩水製造装置）でつくられる。飽和ソーダ灰溶液は熱水 (>314° K) をソーダ灰の層を通すことによって得られる。両方の飽和装置とも市販のものが利用できる。

沈澱回路： 溶離回路では、二炭酸塩ウラニル・イオンがロードされた樹脂から取り除かれ、少量の濃い塩化ナトリウム／ソーダ灰によって三炭酸塩ウラニルに転換される。その結果得られる高品位の溶離溶液は、経済的な沈澱に十分なウランを含んでいる。

炭酸塩ウラニル錯塩を分解するために高品位溶離溶液に硫酸が加えられ、二酸化炭素と遊離ウラニルイオンが放出される。酸性の高品位ウラン液が攪拌タンクに流送され、そこで不溶性の過酸化ウラニル化合物を生成するために連続回路で過酸化水素が加えられる (0.2 kg H₂O₂/kg U₃O₈)。そして消化のために pH を中性まで上げるべく、アンモニアが添加される。ウラン殿物（スラリー）は直径 11.6 m (38 feet) のシックナーへ重力で流下する。ウランを取り除かれた上澄水はシックナーをオーバーフローして、深注入井で処理するためにサージタンクに入る。

このプロジェクトで採用された沈澱サイクル法は、ISL 計画と通常のウラン・ミル操業で用いられている。

産物の濾過、乾燥および包装： 沈澱の後、沈降したイエローケーキは制御区域内で洗浄、濾過、乾燥されて包装される。洗浄は余分な塩化物やその他の可溶性汚染物質を取り除く。濾過と脱水はフィルタープレスで行われる。その後フィルターケーキはイエローケーキ乾燥機の上にある保

持タンクへ移される。

イエローケーキは乾燥サイクルの間完全に密閉される 2 台の低温 ($<394^{\circ}\text{K}$) 真空乾燥機の一つで乾燥される。乾燥サイクルの間に発生する排ガスは、巻き込まれた粒状物を取り除くために濾過され洗浄される。ケーキがドラムに入っている間は、水封真空ポンプも通気を行う。多段炉システムによる通常の高温乾燥に比較して、この乾燥機は浮遊粉塵の排出が著しく少ない。

低温 ($<394^{\circ}\text{K}$) で真空の下で運転することにより、測定されるような量の不溶性ウラン固体は生成されず、環境的ならびに職業上の危険をさらに減じる。この乾燥技術は運転温度が汚染物質を気化するのに十分なほど高くないので、高純度のフィードを必要とする。それは IEC

(Zamzow Project), Everest Minerals Corp. (Hobson), および URI (Kingsville Dome) によって商業的に用いられている。

システムの主要な構成要素は次の通りである：

1. 乾燥箱： 外部から加熱される水平な 304 ステンレスの容器で、イエローケーキを攪拌するためのスパイラル・アジテーターが付いている。箱には湿ったケーキを装入するための上部開口部、乾燥粉を排出するための下部開口部、および水蒸気を換気するための第三の開口部がある。
2. バグ・ハウス： この空気と水蒸気の濾過装置は、バグ・フィルターの表面で捕捉された乾燥した固体を乾燥箱にバッチで返せるように、第三の開口部の上に取り付けられている。バグ・ハウスは乾燥サイクル中に水蒸気が結露するのを防ぐために、真空システムにより負圧が掛けられている。
3. コンデンサー： この装置はバグ・フィルターの上流に置かれており、水冷式である。これは乾燥室から来る非圧縮性ガスから水蒸気を取り除くのに用いられる。ガスは真空システムによりコンデンサー中を移動する。バグ・フィルターを通過する粉塵はこの装置のなかで凝結する水分によって湿らされ捉えられる。

4. 真空発生装置： 真空発生装置は、乾燥サイクル中にシステム全体に負圧を与える、水封のロータリー式である。それはまた、乾燥室から 208 リットル（55 ガロン）ドラムへ乾燥粉を移す時の通気も提供する。水封はガス気流中に残存する混入粉体を捕捉する。
5. 包装： システムはバッチ式で運転される。イエローケーキが充分乾燥されると、それは底の開口部を通して乾燥室からドラムへ移される。ドラムが一杯になる時点を決定的ために、レベルゲージ、秤量器、あるいはその他の適当な装置が使用される。上記（4）で述べたように、粉体に移される時は真空ポンプで通気を与えられる。
6. 加熱： 乾燥のための熱は直熱式抵抗ヒーター、スチーム、あるいは Dow-Therm のような間接伝熱媒体やその他の適当な伝熱材によって与えられる。乾燥は 373° K 以下で大気圧より低い圧力で行われる。
7. 排出物モニタリング： 真空ポンプからの排気は大気へ放出される前にモニターされる。非圧縮性ガスに対処するために、煙突は建物の屋根の上まで延長される。コンデンサーから集められた水は沈澱回路に循環されるか、濾過して他のプロセス水と一緒に排出される。室内の空気は、浮遊粉塵について定期的にモニターする。
8. 制御： システムは運転と加熱または真空システムに異状が生じた時の休止に対して、自動制御を装備する。

乾燥されたイエローケーキ産物は、貯蔵とさらに処理するための別のライセンスを有する施設への出荷のために、208 リットル（55 ガロン）スチール缶に包装される。全てのイエローケーキの出荷は、適用される規制に準拠して行われる。浮遊粉塵の放出を抑えるために、包装中は真空ポンプシステムが用いられる。

計装のフィロソフィー

制御とモニタリングの目的で、計装のフィロソフィーは二つの分離された制御システムを提供

する。各システムは以下のプロセスの流れに特徴的な、定常的あるいはバッチの流れ特性に適合する：

1. 定常的

- ・ 井戸設備／樹脂ローディング回路
- ・ 沈澱

2. バッチ的

- ・ 放出液処理
- ・ 溶離
- ・ 産物の濾過，乾燥および包装

井戸設備／樹脂ローディング回路は定常状態で運転されるので，正常な運転流量と圧力からの小さな偏り（±10% 以上）でも大きな運転上の混乱状態となる。圧カスイッチと流量スイッチからなる自動的な緊急停止（ESD）システムがこの回路に装備されている。もし自動停止が起これば，警報がオペレーターに状況を知らせる。一旦大きな混乱であると特定され矯正措置がとられると，そのような場合だけ回路は手動で再スタートされる。このタイプの制御システムは，大きな漏洩事故に対して最高の保護を与える。自動的な ESD システムに対するバックアップは ESD システムがモニターするのと同じ流量と圧力の局所的な表示によってなされる。

溶離，産物濾過，乾燥，および包装回路はバッチ・モードで運転される。これらの回路は一旦手動で始動すると，適切なバルブを自動的に開閉するプログセム・ロジック・コントローラー（PLC）によって制御される。PLC は溶離と沈澱回路において流量の閉ループ・フィードバック制御を行う。全ての自動バルブには，手動による優先制御がついている。圧力，レベル，流量，pH および温度の局所的表示は，必要に応じてこれらの回路の完全手動制御に対して与えられる。

環境に及ぼした結果

ISL ウラン探掘とイエローケーキ処理が環境に与えた影響は軽微である。尾鉱は生成されてい

ない。殆ど全ての放射性娘核種は地下に留まっている。イエローケーキ乾燥に由来する浮遊粉塵の放出は、真空乾燥システムの採用により絶対的な最低量に抑えられている。ラドンガスだけがプロセス中に移動するが、通常のスクラッパー技術で容易に制御される。

井戸、パイプライン、道路、および処理プラントの設置に関しては地表の擾乱は短期間である。この設備の移転、ストックパイルの表土の入れ替え、および植生がプロジェクトの完了時には地表を元の状態かそれより良い状態に戻すだろう。

イエローケーキの処理にはある限られた量の地下水が消費される。さらに追加された量の地下水が浸出によって一時的に乱される。しかしプロジェクトの終わりには、全ての地下水は鉱山時代前の用途に適したものとなるだろう。

比較的小さい労働力（約 75 人の従業員）は、地域に顕著な環境的ストレスも、社会-経済的变化も生み出さないだろう。

プロセスから環境への排出物

ガス状： 人に対する潜在的な放射線線量を代表する最も重要なガス状放出物は、循環する浸出液から大気へ放出されるのと、量はより少ないが溶離と沈澱回路に存在するラドン-222 ガスである。

いくつかの二酸化炭素ガスといくつかの酸ヒュームも、プラントのプロセスから発生する。予想される濃度と放出量においては、これらのガスは健康上も規制上も問題にならない。

大気に対するその他の放出物は限られた自動車交通からの排気ガスと粉塵、並びにアンモニア、二酸化炭素、酸素、過酸化水素、水酸化ナトリウム、硫酸および塩酸のような少量のプロセス薬品に限定される。サイトでは商用電源が利用できるため、プロセス施設からは燃焼に関係した著

しい排出物はないだろう。

粒状物と固体： 操業から発生する粒状の排出物は第一に、自動車交通で発生する粉塵だろう。しかし極少量のイエローケーキが乾燥と包装の段階で放出される可能性はある。排出物制御設備によってそのようなイエローケーキの排出は、実行できる最低量と許容基準を充分下回るレベルに保たれる。

このプロジェクトで発生する固体廃棄物は、ぼろのようなもの、ゴミ、包装材、設備や配管からの消耗または交換部品、プロセス用のポンプや容器から取り除かれた堆積物、使用済みイオン交換樹脂、および液体が蒸発した後に蒸発池に残る固形物からなるだろう。

非放射性廃棄物はワイオミング DEQ によって認可されたように、サイトの現存の固形廃棄物処理施設で処理されるだろう。

管理された処理を必要とする汚染レベルを有する放射性固形廃棄物はドラムやその他の適当な容器に隔離して、NRC が認可した尾鉱施設またはその他の認可されたサイトで処置する。パイロットプラントからの汚染された固形廃棄物は、第二パイロットの建設中に取り除かれた材料と蒸発池の固形物を除いて、年間 208 リットル（55 ガロン）ドラム缶 6 杯分に達した。

液体： 操業からの液体排出物には生産余剰液、溶離および沈澱プロセスからの余剰液体、イエローケーキの洗浄水、プラント洗浄水、復元プラント（EDR/RO）廃液、復元の余剰水、および施設の衛生排水が含まれる。地表から 3,050m（10,000 feet）の深さの深注入井が塩水タイプの廃水の処理に用いられる予定である。より良質の液体廃棄物は、土地投与（灌漑）や天火蒸発による処理のために混入されるだろう。全ての廃水の適切な前処理が処理の前に行われるだろう。

環境へのインパクト

地表へのインパクト： 地表へのインパクトは先ず、サイトの準備と建設からもたらされる。そのようなインパクトは地元の土壌と植生に限られるだろう。

回収プラントはその建設が新たな地表の擾乱をもたらさない、Bill Smith 鉱山サイトに設けられるだろう。インシチュー採鉱プロジェクトの実施はサイトの操業寿命を伸ばすだろうし、家畜の放牧は約 16.2 ha. (40 acre) の Bill Smith 鉱山サイトから除外され続けるだろう。

井戸の掘削とパイプラインの敷設は一時的には、これらの地域の土壌と植生を乱すことになるだろう。しかしパイロット計画で示されたように、インパクトは僅少である。表土は一方の側に寄せられ、その後その場で再び広げられ、建設が完了すれば直ちに播種される。この地域の植生は 2 年間の擾乱の間に正常に再生される。

Q sand パイロットでは 0.4 ha. の生産区域はフェンスをめぐらして家畜の進入を防いだ。しかし 0.73 ha. の O sand パイロットでは、放牧から除外されたのは僅か 0.1 ha. である。プロジェクトの操業寿命の間には総面積は 60 ha. にも達するので、操業開始時には約 12 ha. が放牧から除外されると予想される。パイプラインや井戸設備のために放牧から除外される面積は、プロジェクトの操業寿命を通じて平均 41 ha. 以下であると予想される。

廃水池、灌漑およびアクセス用道路に関連した地表の乱れはプロジェクトの寿命期間中続くだろう。表土は建設の前にこの区域から取り除かれ、堆積される予定である。施設が操業に必要でなくなった時には、この区域は整形し、表土を戻して再播種される。これらの活動の最も大きいインパクトは、池の寿命期間を通じて蒸発池から家畜と野生動物が排除されることだろう。

採掘と地下水の復元が完了した後に、区域全体は再生され鉱業前の用途に復元される。従って操業に基づく長期的な地表へのインパクトは存在しない。

表流水へのインパクト： 表流水水質に対する著しい、あるいは測定可能なインパクトが、操業の結果起こるとは予想されない。

地下水へのインパクト： 最も著しい水へのインパクトは約 2,466 ha.-メートル (20,000 acre-フィート) の地下水をプロジェクトの寿命期間中引き上げて有効利用することであり、この量は Bill Smith 鉱山が 1974 年から 1982 年にかけて取り出した量にほぼ匹敵する。取り出された水の多くは灌漑で処理した後、環境へ返される。残りの水は蒸発するか、深井戸によって自然

の塩水を含む累層に注入することによって処理される。

放射線のインパクト： インシチュール採鉱操業における放射能物質からの放射線照射は、伝統的なウラン採掘とミル操業に関連した照射に比較すると著しく少ない。このプロジェクトに対するインシチュール採鉱法とウラン処理プロセスの環境的な利点は三重である。

第一に、放射性娘核種は大部分地中に留まり、ウランと一緒に取り出されない。第二に、イエローケーキの真空乾燥は、従来のウラン製錬と乾燥施設と典型的に結び付いた潜在的な放射性浮遊粉塵の問題を取り除いてくれる。第三に、尾鉱が存在しない。

インシチュール採鉱操業には鉱石の取り出しと破碎が含まれないので、施設からの大規模な放射性核種粒子の排出は無い。施設から排出される液体は、付録B、表 Ⅱの 10 CFR Part 20 によって特定される非制限地域への許容排出レベルまで含まれる放射線を下げるために、サイトで処理される。従って放射性液体は環境的な関心事ではない。

RAMC の操業計画の下では、環境への放出が想定される放射性核種は、 ^{222}Rn 、 ^{238}U 、 ^{230}Th 、 ^{226}Ra 、および ^{210}Pb である。 ^{222}Rn ガスは採掘中に地表に運ばれる流体に溶解する。ラドンの一部は正常なパイプラインやタンクの孔によって処理水から放出される。微量のイエローケーキ粒子の排出が、スクラッピングの後でも乾燥機の排気ガスに伴うかもしれない。イエローケーキの包装は、もう一つのイエローケーキ粒子の発生源である。

浮遊飛散モデリングの研究が、プロジェクト・サイトとその近くにおける潜在的な放射性核種被ばくを推定するために行われた。 ^{222}Rn を含む総放射線量は、この器官（気管支上皮）に対する米国における平均バックグラウンド線量 30 ミリシーベルト（3,000 mrem）／年（NCP, 1984）に対して、最も敏感な器官（気管支上皮）についてほぼ 0.19 ミリシーベルト（19 mrem）／年である。モデルによって予測される ^{222}Rn の作用レベルは、全ての受容体が受ける線量がこのパラメーターに対する最大許容濃度（MPC）より遥かに低いことを示している。

^{210}Pb 、 ^{210}Bi 、および ^{210}Po のようなラドン娘核種の濃度も、これらの元素に対する MPC より遥かに下がる。イエローケーキの乾燥と包装中に生じる ^{238}U 、 ^{230}Th 、 ^{226}Ra 、および ^{210}Pb の空气中濃度は最大でも、これらの物質の MPC の 100 分の 1 より小さい。

野生動物へのインパクト： プロジェクト区域内には絶滅に瀕した動物種、あるいはそれらの生息地は無い。従って提案されたプロジェクトから絶滅に瀕した動物種へのインパクトは存在しない。

認可エリア内で観察される他の動物種は、東ワイオミングやロッキーマウンテン地域の他の多くのエリアと共通である。擾乱が計画されている地域に現在棲んでいる小さな穴居性哺乳類、蛇類、蜥蜴類、および節足動物のような小動物種の多くの個体は、植生が移された時絶滅するかもしれない。プロジェクトの寿命期間中に乱される区域の総面積は、およそ 200 ha. (500 acre) に達するだろう。

乱された認可エリア内には比較的少数の爬虫類しか生息していないので、これらの動物に対するインパクトは比較的小さいだろう。昆虫やその他の節足動物に対する植生除去の影響は、これらの動物の再生された区域で個体数を速やかに回復できる能力により、比較的小さいだろう。

より大きな哺乳類（エダヅノレイヨウとミュールジカ）や多くの鳥類のような高度に移動性の動物種は、乱された区域から逃げ出すことが可能だろう。しかしこれらの動物の隣接した乱されていない生息地への移動は、食物、避難所、縄張り、仲間やその他の必需物に対する競争の激化を招くだろう。

経済的価値と公共的関心の見地からは、認可区域を利用する最も重要な野生動物種はエダヅノレイヨウである。この区域におけるレイヨウの生息密度は平方マイル当たり 5 ないし 7 個体であり、彼らは年間を通して区域に留まると推定される。その結果、処理プラントと付属の施設による 16 ha. (40 acre) の植生の消失は、認可区域におけるレイヨウの養育能力を 1 個体以下減ずることとなり、一方では平均 16 ha./年の採掘操業も同じ量だけレイヨウの養育能力を減じるだろう。追加の衛星施設（平均 32 ha./年）はレイヨウの養育能力を 1 個体減少させる可能性がある。

いくらかの動物は自動車交通の増加により殺されると思われるので、認可区域内での人口の増加はレイヨウやその他の野生動物の個体数に付加的に影響するだろう。毎年失われる個体数は総個体数の極く少ないパーセンテージであるので、これらの追加的な野生動物の損失はいかなる野生動物の個体数にも長期的な減少はもたらさないと予想される。

区域内における活動に由来する実際の植生の取り除きと事故の可能性を除けば、プロジェクトの活動はレイヨイの個体数に著しい影響は与えないと予想される。

このプロジェクトに対して提案されたのと同じ採掘および処理活動によって、これらの動物は迷惑しているようには見えない。例えば、Rio Algom 認可区域に隣接した Highland ISL ウランプロジェクトにおいては、活動中の採掘区域においてレイヨウは殆ど目立った関心を示さずに普通に観察される。Exxon によって 1970 年代初期に最初に建設されて以来、その施設の近傍ではレイヨウの個体数の減少は観察されていない。

提案されたプロジェクトの建設と操業は認可区域を利用する猛禽類に対して、植生除去の結果失われるであろう獲物は低いパーセンテージに留まるので、著しい影響は与えない筈である。

野生動物種は乱された区域が再生された後は、そこに再び侵入してくるだろう。再侵入に要する時間は各動物種の生息地が必要とする条件の関数である。牧草や雑草を常食とする草食類（例えば、シロアシネズミ、ジュウサンセンジリス、ナゲキバト、およびハマヒバリ）は再植生された地域に定着する最初の動物となるだろう。また、これらの動物は地面に巣を作り、開かれた生息地を好む。オサムシや殺し屋カメムシのような捕食性の節足動物と、グラスホッパーマウス、マキバドリ、モズ、およびツノトカゲのような食虫性の動物もまた、再植生地域の初期の侵入者になると予想される。キク科ヨモギ属の雑草やその他の灌木に食物、カバー、および造巣を強く依存する他の多くの動物種（キジオリチョウのような）は、灌木が再定着するのに時間を要するため、再生された地域に首尾よく再侵入するのに数年かかる可能性が高い。

環境的責任

タンク事故： 正常な操業状態の下では、プロセス流体はイオン交換およびイエローケーキ処理プラント内のプロセス容器やパイピング回路の中に収められている。レベルをモニターし、予め定められた限界内に保つために、警報と自動制御が用いられる。プロセス建家内のプロセス容器やタンクの万一の事故の場合には、流体は建家内に留められ、サンプに集められ他のタンクやライニング付き蒸発池にポンプアップされる。その後その区域は事故の環境的影響を取り除くために、水で洗浄されるだろう。

パイプライン事故： 主処理施設と井戸設備の間のパイプラインの破裂は、貴液か貧液の地中への逸損を招く可能性が強い。流体の損失を最低限に食い止めるために、パイプラインには高低圧閉止システムと流量計が設置されるだろう。そのシステムには、異常が起きれば直ちに操業員に注意が発せられるような警報が含まれるだろう。もしそのような事故で流出した溶液の量や濃度が環境的な懸念を引き起こすのであれば、区域を調査し汚染された土壌を取り除き、NRC や州の規制に従って処置される。パイプラインは通常は地表下約 1.5 m に埋められ、高密度ポリエチレンで建設される。

パイプラインが試験され使用に供された後にこのような事故の起きる確率は低いと考えられる。

火災と爆発： サイトにおける火災と爆発の危険性は非常に小さい。強力な酸化剤（50% 過酸化水素）がイエローケーキの沈澱剤であるにも拘らず、それは屋外で圧力開放弁のついたマグネシウム-アルミニウム合金の貯蔵タンクに貯蔵されている。タンクはタンク容量の 110% を充分収容できるへり付きのコンクリート基礎の上に設置される。分配システム（パイピング、ポンプなど）は承認された材質（マグネシウム-アルミニウム合金、304 および 316 ステンレス）しか建設に使用されない。全ての設備は使用する前に、濃硝酸で不動態化処理を施される。

熱は可燃性の熱伝達流体を通して真空乾燥機に供給される。約 422° K で運転される天然ガス燃焼ヒーターが流体にエネルギーを供給する。ヒーターと熱伝達流体ポンプは、この特殊な用途に対する組合せとして仕様を指定して購入される。システムの設置と運転は、地方および国の火災防止規定と整合するだろう。建物の暖房に用いられる天然ガスは、もう一つの火災と爆発の潜在的な発生源となるだろう。

中央処理プラントにおいては、ウランは溶液中、イオン交換樹脂に吸着された状態、あるいはイエローケーキ・スラリーとして存在するだろう。従って爆発はウランを環境に目に見える程には発散しないだろう。漏れた液体またはスラリーは建家内のサンプあるいは流出制御システムに閉じ込められるだろう。乾燥産物は屋外あるいは別個の建家で、へりの付いたコンクリート基礎の上で貯蔵されるだろう。

井戸ケーシング事故： 注入井におけるケーシングの事故は、浸出液が加圧下で注入されているので最も深刻な環境的インパクトの可能性を秘めている。このタイプの事故は発生して、モニタ

リング・システムで検出されるまでに数日間継続する可能性がある。もしこのような事故が起これば、欠陥井は修理されるか、栓をして放棄される。もし別の帯水層の汚染が検出されれば、井戸を掘削して汚染された帯水層まで完成し、浸出液成分の濃度が許容レベルまで低下するまで汲み出す。適正なケーシング、セメンティングおよび試験方法を用いれば、このような事故の確率は非常に低い。全部で 21 本の注入井が数年間にわたって操業された二つのパイロット計画では、ケーシング事故は起きなかった。

ケーシング事故による環境的インパクトを最低限に抑えるために、鉱化層準の上と下の帯水層でモニター井が完成される予定である。これらの隣接した帯水層における流体のレベルと水質は、これらの帯水層への流体の流入のチェックとして、採掘期間中は定期的にモニターされる。さらに、注入井を使用する前や、ドリルビットやアンダーリーマーのような掘削ジグで井戸に入ることを含んだ作業の後には、全ての注入井についてケーシング完全性試験も行われる。

生産井は帯水層の圧力より低い圧力で操業されるので、生産井のケーシングの事故は普通は逸水を起こさない。しかし、設置の後や井戸中に掘削ジグを入れた後は、生産井とモニター井についてもケーシング完全性試験が行われる。

探査試験孔を通しての漏洩： プロジェクト区域内の古い探査試験孔を通しての、帯水層間の浸出溶液の移動は考えられない。試験孔はベントナイトの掘削泥でカラム全体を充填して放棄される。粘土は掘削で貫通された種々の帯水層ユニットの間の流体交換に対する効果的なシールである。孔の追加的なシーリングは、砂岩帯水層ユニット間の隔離頁岩の急速な膨張と架橋によって与えられる。

帯水層間に流通が無いことを確認するために、鉱化層準の上下の帯水層で完成されたモニター井が、帯水層圧力（水位）と水の成分の変化について定期的にチェックされる。さらに、帯水層間に顕著な流通が存在しないことを示すために、採掘前のポンプ試験が実施される。万一試験中に古い探査試験孔を通して帯水層間で漏洩が示されれば、古い孔は再入して栓をする。もしもう一つの帯水層の汚染が発見されたら、井戸を掘削して汚染された帯水層で完成してサンプルを採取する。そしてもし必要であれば、浸出液流体の濃度を許容限界まで下げるために汲み出される。

イエローケーキ輸送事故： イエローケーキを輸送する自動車を巻き込んだ事故は、イエローケーキのこぼれを引き起こす可能性がある。このような事故が万一起きた場合には、イエローケー

キと汚染された土壌は回収され、製錬所で処理されるか免許を受けた施設で処分されるだろう。そして乱された全ての区域は、適用される州と NRC の規制が要求するように再生されるだろう。

イエローケーキのこぼれを含む事故の危険性は、運輸省 (DOT) 承認コンテナと専用載貨の利用によって最低限に抑えられるだろう。万一事故が起きた場合にさらに環境的インパクトを少なくするために、施設に対して“輸送事故対応ガイド”が用意され、これらの特殊な指示は各イエローケーキ出荷に含まれるだろう。

薬品出荷： プロセス用薬品のプロジェクト・サイトへのトラック輸送にまつわる事故は、局所的な環境的インパクトを引き起こす可能性がある。いかなるこぼれも取り除かれ、区域は清掃され再生される。インシチュール採掘で用いられる薬品は多くの工業と共通しており、異常な危険性をもたらすものではない。これらの薬品には、乾燥炭酸ナトリウム、液体アンモニア、液体二酸化炭素、液体酸素、液体塩化水素酸、液体 50% 過酸化水素、液体硫酸、および乾燥塩化ナトリウム（食塩）が含まれる。これらの物質の多くは回収されたり除去が可能であるので、これらの物質を含む出荷事故からは深刻な長期的環境的インパクトは発生しないだろう。

池の事故： 廃水池は漏洩検知システムを備えて建設され、これらのシステムは毎日モニターされるだろう。もしライニングの漏洩が検出されれば、流体はもう一つの池にポンプアップされ、必要に応じてライニングが修理される。池の区域は調査され、深刻な長期的インパクトを取り除く最終的な土地改良の一部として再生される。

池の堰堤の事故は、池の事故の最も深刻なタイプだろう。堰堤の事故の危険性を最低限に抑えるために、池は堰堤の顕著な劣化が無いかどうか毎日検査される。万一事故が起きればインパクトを受けた区域は調査され、必要に応じて清掃されて再生される。

環境モニタリング

気体モニタリング： インシチュール採掘では液体しか地表にもたらされないもので、唯一の重要な気体状の排出物は生産された溶液からの ^{222}Rn と、処理プラントで排出されるある限られた蒸気である。 ^{222}Rn の制御とモニタリングのために、受動的連続ラドンモニタリング・ステーション

ンが回収プラント建物の約305 m (1,000 feet) 風下に設置される予定である。

粒状物と固体のモニタリング： 一つの採掘ユニットでインシチュア採掘が開始される前に，61 m (200 feet) 間隔の東西南北のグリッド・システムで地域のガンマ線測定が行われる。これらの測定値は，プロセス物質または産物物質の放射能放散を含んだこぼれ，漏洩あるいは事故が起きた場合には，バックグラウンド値として用いられる。

サイトにおける粒状物のモニタリングは主として，イエローケーキの放散を測定するために行われる稼働煙突サンプリングである。サンプリングの頻度はNRC によって指定される。イエローケーキ包装区域では低容量空中粒状物サンプリングが行われる。

ぼろや包装材のような非放射性固形廃棄物は現存の固形廃棄物処理施設で処理される。紙などが処理ピットから飛ばされないように被処理物が正しく覆いを掛けられていることが，検査によって確認されるだろう。

放射性である可能性のある固体はスキャニングにかけ，管理処理を必要とするレベルの汚染を有することが判明したものはドラム管やその他の適当な容器に入れ，指定区域で貯蔵する。NRC が免許を与えた施設におけるこれらの物質の最終的な処理法は，文書によって示される予定である。

液体のモニタリング： 液体モニタリングの主要な目的は，地下水の供給を保護し，従業員と大衆への被ばくを合理的に実行できる限り出来るだけ低く保ち（ALARA の原則），そしてプロセス溶液の漏れあるいはこぼれによって引き起こされる地表汚染のインパクトを防止したり緩和することである。

操業前井戸モニタリング： これらの目標を達成するために，採掘ユニット規模で操業前のデータが集められ，それには次のものが含まれる：

- a. その採掘ユニットに対するベースライン水質データ；
- b. 関連するモニター井に関するベースライン・データ；
- c. 地質的ユニットの水文的能力を決定するためのポンプ試験；
- d. 採掘層準と上下の帯水層の隔離，ならびに採掘層準と周囲のモニター井の間の連絡を証

明するポンプ試験。

採掘ユニットのベースライン・データは対象の採掘区域に浸出溶液を注入する最低 60 日前に、NRC と DEQ へ提出しなければならない。これらのデータは採掘操業のみならず、採掘ユニットに対する復元の基準を確立するための基礎を提供する。

採掘ユニットに対するモニター井は生産層準における採掘ユニットの周りの円形パターンと、生産層準の上下に横たわる帯水層の中で完成される。井戸を掃除して、最低 3 回サンプルを採取し、同じパラメーターについて分析される。追加のサンプルを採取し、塩化物、電導度および全アルカリの逸水パラメーターについて分析する。逸水パラメーターは次の単位で報告される：

<u>UCL パラメーター</u>	<u>単 位</u>
塩化物	Clとして mg/L
電導度	umhos/cm @25°C
全アルカリ度	CaCO ₃ として mg/L

採掘ユニットに対する逸水制御上限値（UCL）は、モニター井ベースライン・データと共に NRC と DEQ へ提出される。与えられたパラメーターと井戸のタイプに対する UCL 値は、孤立値を篩い落とした後に決定された平均値から計算されたベースラインの平均値に 5 標準偏差を加えたものとして定義される。

稼働井戸のモニタリング： 操業中においては、モニタリング計画の主要な目的は浸出溶液の水平方向あるいは垂直方向の逸水につながる状態を検出して矯正したり、一旦起きた際には逸水を検出することである。モニター井、各井戸の流量と圧力、および主パイプラインの流量と圧力がこの計画の中心の構成体である。

浸出溶液が採掘されている帯水層の指定された区域に保持されていることを確認するために、生産層準、上部帯水層と下部帯水層のモニター井は月に 2回サンプルを採取してサンプルを分析し、逸水パラメーターの UCL 値と比較する。各モニター井の流体レベルは月毎に測定して記録し、水質分析報告と共に DEQ に報告される。

もし浸出溶液の徴候がいずれかのモニター井に現れたら、生産井と注入井の流量は溶液を井戸設備区域に戻すのに必要なように調整される。

もしこのような処置が 90 日以内に逸水を制御するのに効果的でなかったら、UCL 値を越えたパラメーターの濃度の減少傾向が確立されるまで、隣接する注入井への浸出溶液の注入は中断されるだろう。

この傾向が確立された後は、この区域の注入は再開されるだろう；しかし生産と注入の流量は、正味の引き抜きがこの減少傾向を保つのに充分なように制御されるだろう。

採掘ユニット内で操業中の各井戸の圧力と流量は毎日読みとって記録される。これらのデータは採掘ユニットについて生産-注入のバランスを維持し、正味の余剰液の排出が確保され、そして注入圧力限度が超過していないことを確認するのに用いられる。

パイプラインのモニタリング： 回収プラントに出入する主パイプラインの圧力と流量の指示計も、状況がパイプラインの安全な動作範囲内にあることを確かめるために、毎日読みとって記録される。

表流排水のモニタリング： モニタリングにかけられる排水流には、余剰排水流（余剰排水と復元時の復元排水の組み合わせ）とライニング付き池や処置井へ向けられる廃液が含まれる。余剰排水は計量され、月毎にサンプルを採取する。サンプルは重炭酸塩、塩化物、ナトリウム、硫酸塩、ウラン、砒素、セレンおよび pH について分析する。

他の廃水と混合する前に、余剰排水はウランを除去し、 ^{226}Ra のレベルを付録 B、制限されていない地域への排出に対する表Ⅱ，10 CFR Part 20 の限界値以下に下げするために処理される。

ラジウム除去システムから出る余剰排水流は四半期毎にサンプルを採取し、 ^{226}Ra 、 ^{230}Th およびウランについて分析する。

ライニング付き池に排出されたり灌漑へ送られる液体の排出物は半年毎にサンプルを採取し、

重炭酸塩，カルシウム，塩化物，ナトリウム，硫酸塩，TDS，ウラン， ^{226}Ra ，および ^{230}Th について分析する。

ライニング付き処理池は集水サンプへ排水するパイプを伴った，ライニングの下の方層の中の孔明きパイプのネットワークからなる漏洩検知システムを設置して建設される。池のモニタリング・システムには，回収プラントで警報が表示される各サンプの中の液レベルセンサーか，操業員による日毎の各サンプの点検が含まれる。池はまた毎日漏洩と堰堤劣化の有無を肉眼で点検する。

資本の必要条件

907 t (2 百万 LB) U_3O_8 /年の施設を建設するための直接資本支出は 25 ～35 百万ドルの範囲であり，表 6 に掲げた項目が含まれる。この総額のうち，約半分が初期のモニター井と操業井の設置に充てられる。それ以降の井戸のコストは基本的に費用として扱われる。

残りの投資は地表施設と免許取得に向けられるが，これらは鉱山資本項目の生命である。15,400 t (34 百万 LB) U_3O_8 の埋蔵量ベースと 11,300 t (25 百万 LB) U_3O_8 の予想採取量をもってすれば，これらの後者の投資の減価償却は \$1/LB 以下である。

操業費予測

井戸設備設置と更新のコストは，生産基礎の単位に対する減価償却の対象となる資本項目として見る事が出来るかもしれない。しかし操業井の典型的なパターンは，2 年以下の有効寿命しか有しないと予想される。その結果，生産単位をベースとした資本の減価償却が非常に速やかに起こるので，井戸設備設置コストは往々にして操業費と見なされる。後続の議論においては，これが取られるアプローチとなるだろう。

ISL ウランプロジェクトの操業費には，五つの主構成要素がある：井戸設備の設置，労働力，

電気、薬品、および供給品。Smith Ranch のような大規模プロジェクトに対しては、井戸設備設置コストは直接操業費の約半分を占め、回収ウラン・ボンダあたり \$3.00 ～ \$5.00 の範囲となるだろう。残りの半分は労働力、供給品、薬品、および電気ではほぼ等分に分けられる。ワイオミングでは電気は中位の値段である。しかし米国の他の地域では電気のコスト要素は Smith Ranch の二倍になるかもしれない。

このようなコストは大規模プロジェクトに典型的なものであり、現存の大規模 ISL 生産センターとも符合している。しかし我々の計画の 907 t (2 百万 LB) U₃O₈/年の生産量には、453 t (1 百万 LB) U₃O₈/年のプロジェクトに対して優位な競争力を与える、スケール・メリットに基づく真の経済性がある。これらのより小規模の施設に対しては通常、50 人ないし 55 人の規模の専門職と時間給スタッフを必要とする。これには、会計、地質計画、エンジニアリング、建設、職業的安全、放射線モニタリング、および環境問題のような分野をカバーできる、技術的ならびに管理的補佐グループが含まれる。

より大きい 907 t (2 百万 LB) U₃O₈/年の施設は一握りの支援要員の追加と運転スタッフの小幅な増員を必要とするのみである。その結果、このより大きい施設は 65 ないし 75 人の人員で効果的に操業できる。生産量の倍増は 30 - 40% のスタッフ増しか必要としない。

表 6

典型的な資本投資

初期のモニター井*
初期の操業井*
中央処理プラント
イオン交換プラント
蒸発池と灌漑
深注入井
可搬設備
地下水復元設備
免許取得費用とサービス
2 百万 LB/年施設に対する総額：25 - 35 百万ドル

* 最初に設計処理能力に達するに要する井戸

薬品コスト

薬品コストは Smith Ranch パイロット・プロジェクトや、その他の商業的プロジェクトにおける経験に基づいている。コストには次のものが含まれる：

- a) 浸出剤調製のための酸素と二酸化炭素。
- b) 塩酸、硫酸アンモニウム、および浸出剤浄化流体を処理するための塩化バリウム。
- c) 溶離のための炭酸ナトリウムと塩化ナトリウム。
- d) 沈澱のための硫酸、過酸化水素、およびアンモニア。
- e) 深井戸注入による塩水処理のための水処理薬品。

(a) グループと (b) グループの薬品の消費量は浸出剤の循環液量に正比例する。従ってこれらの薬品の単位コストは井戸設備流体のウラン濃度に反比例する。

(c), (d), および (e) グループの消費量は行われた樹脂溶離の回数に正比例する。57 m³ (15,000 ガロン) の一定量の溶離液が、沈澱のために一定量の高品位ウラン溶液を生み出す各溶離 1 回について消費される。もし溶離液の平均的なウラン含有量が用いられるとすれば、基本的にはこれらの薬品コストは中央処理プラントの産物処理量に比例する。また、これらのコストは樹脂 1 バッチにロードされるウラン量に反比例する。ウランのロードを二倍にすることは (c) グループの溶離薬品のコストを半分にするばかりでなく、ウラン品位が二倍になった沈澱のための原液をつくり出す。これは (d) グループの単位コストを減少させる。

ユーティリティーのコスト

ユーティリティー・コストは二つの主要な構成要素を持っている：回転設備のための電力と、産物乾燥と建家暖房のための天然ガス。低温真空乾燥機を除いて、プロセスは熱エネルギーの必要性を最低に抑える常温付近で運転される。

井戸設備とイオン交換施設に対する電力必要量は、浸出剤の流量（すなわち、流体ポンピング

・コスト) に正比例する。中央処理プラントと廃水処理井戸の電力必要量は行われた溶離と沈澱の回数に比例しており、従ってイエローケーキ生産量と結び付いている。天然ガスの必要量は主として建家の暖房と結び付いており、ずっと少ない量が産物乾燥で消費される。

メンテナンス、部品、および供給品

推定コストは古い商業的プラントにおける経験に基づいている。新しく建設されたものであるから、コストは最初はより減額されたものになるだろう。

その他

試験室、安全、および環境対策の供給品のコストは、過去の必要額に基づいて予算化される。

産物出荷と転換工場の料金

国内の転換工場と出荷の料金に基づいた、転換工場料金と精鉱出荷の取扱いとサンプリングに対する輸送費は約 \$0.25/LB U.S. である。転換工場の品質規格に合致しなかった時のペナルティーは含まれていない。

プロジェクト G & A

現場のプロジェクト事務所の運営には資金が含まれている。含まれているのは、事務所の供給品と設備、電話サービス、現場スタッフの旅費、保険、および従価財産税に対するコストである。これらは五つの中心的コスト要素の中に含まれている。

感度分析

感度・パラメーターは溶液のヘッド品位，流量，パターン当たりの可採埋蔵量，および全体の可採埋蔵量である。

地表施設の資本費に対するプロジェクトの感度

典型的な地表施設資本費の推定値と 11,530 t (25.42 百万 LB) の可採 U_3O_8 埋蔵量を用いると，資本費は回収 U_3O_8 ポンド当たり \$1.00 以下である。仮に資本費がある予測できない理由によって 50% 増えたとすれば，埋蔵量 U_3O_8 1 ポンド当たりの資本費は \$0.50/LB まで増加する可能性がある。この単純な分析から，プロジェクトの経済性は資本支出の変化によっては大きく影響を受けないことが明かである。単位コストにより大きい影響を与える，その他のパラメーターが存在する。

回収貴液品位に対する操業費の感度

回収溶液のヘッド品位は，ウラン ISL 操業で予測するのが最も難しいパラメーターの一つである。Smith Ranch プロジェクトのパイロットプラントにおける経験は，80 mg/L が合理的な基礎であることを示している。前にも述べた通り，ある種の薬品と電力費は井戸設備の流量だけに依存する。ヘッド品位が変化しても，これらの費用は一定に保たれる。ヘッド品位に関する典型的な操業費の変化性を図 16 に示した。60 mg/L U_3O_8 では操業費は約 \$0.80/LB U_3O_8 増加するだろう；100 mg/L U_3O_8 では操業費はおおよそ \$0.50/L U_3O_8 減少するだろう。

ヘッド品位が変化しても，ある井戸設備から回収できる全体の埋蔵量は不変である。ヘッド品位変化の影響は U_3O_8 の年間生産量に現れる。 U_3O_8 の年間生産量の減少は，生産基礎の単位に対する固定費項目の増大をもたらす。

減少した流量に対する操業費の感度

ベースとなるケースは個々の生産井の採取量は 1.26 L/s (20 gpm) であり、イオン交換プラントは 189 L/s (3,000 gpm) の流量で運転されると仮定する。

流量に対する操業費感度の一つのテストは、同一のヘッド品位を維持しながら、個々の生産井の採取量は 1.26 L/s (20 gpm) ではなくて 0.95 L/s (15 gpm) であると想定する。さらに、新しい井戸の設備流量はより小さい流量を補償するようには調整されない。そしてイオン交換施設は操業処理能力の 75% で運転され、イエローケーキの生産量も同様に減らされる。処理能力の 75% で運転され、イエローケーキの生産量も同様に減らされる。

このケースに対して操業費は、現在の 680 t (1.5 百万 LB) U_3O_8 /年のフル処理能力で \$0.60/LB 増加する (図 17)。このケースは、イオン交換施設をフル能力に保つために、我々が井戸設備の流量増加によってこの欠損に対処する点で仮説的である。これはその代わりに操業費の増加を本質的に抑えるだろう。

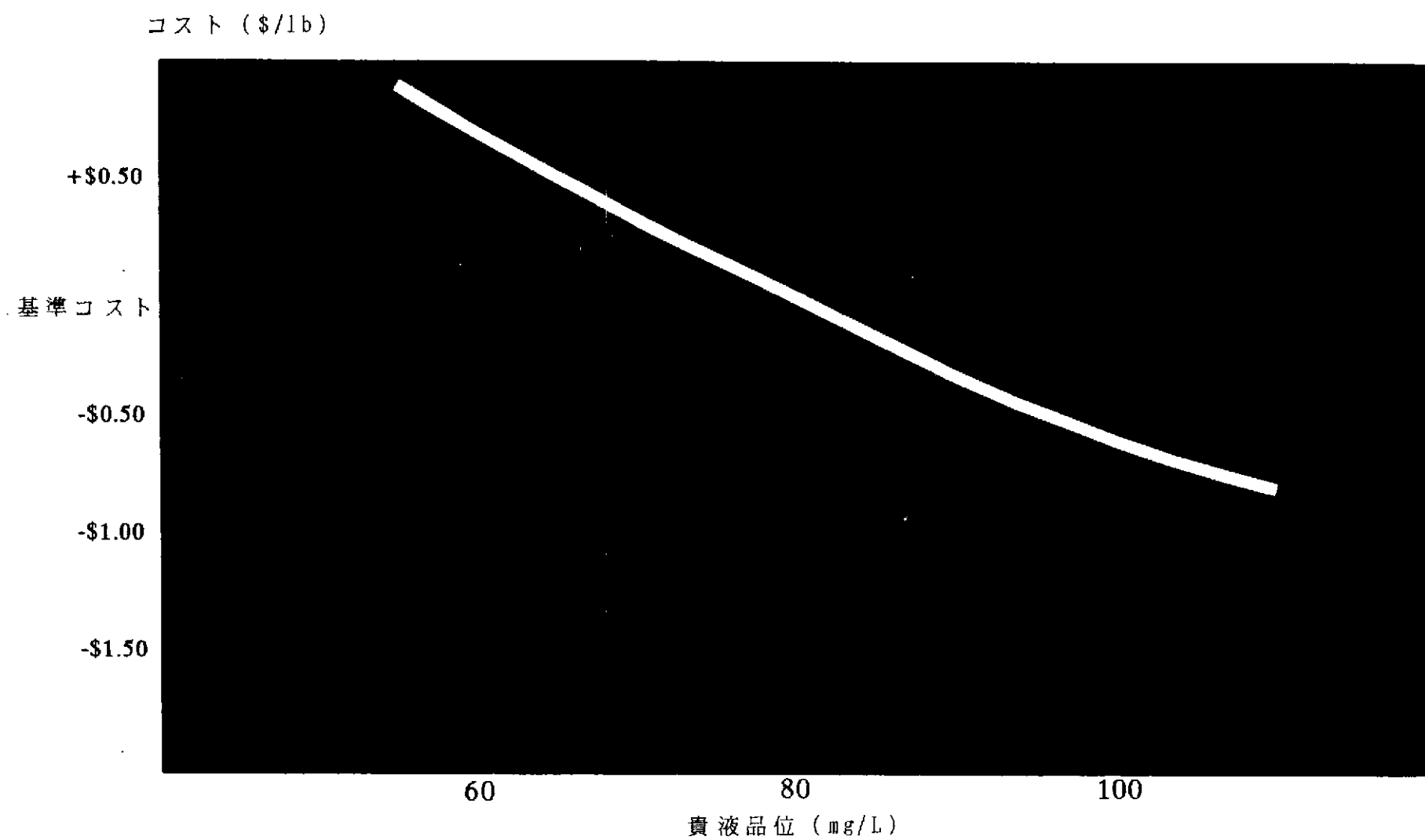


図 16 直接操業費 (貴液品位の関数として)

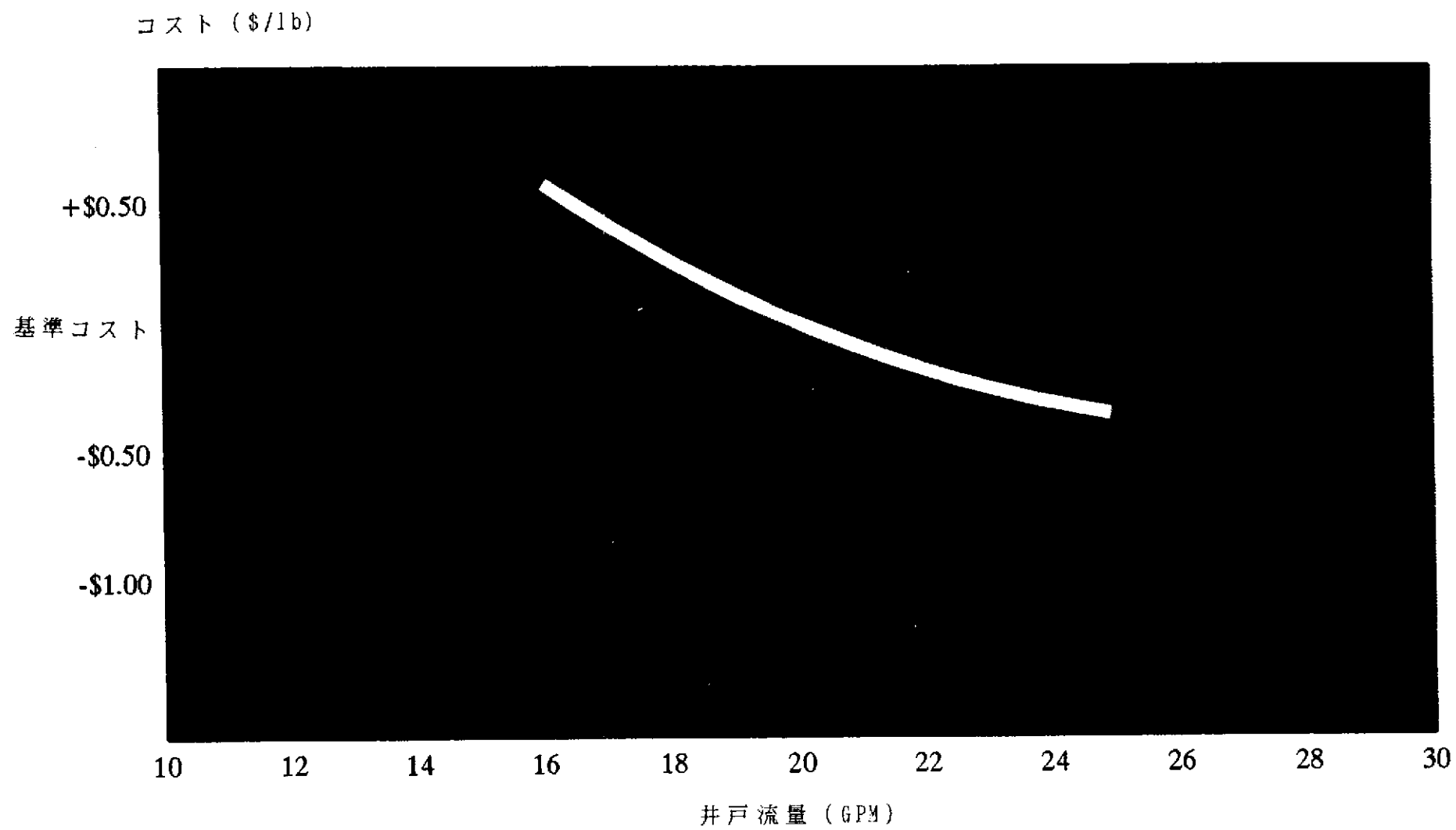


図 17 直接操業費 (井戸流量の関数として)

表 7

GT カットオフに対する井戸設備投資の感度

品位-厚さ カットオフ % - feet	原位置 埋蔵量 t U ₃ O ₈	平均* GT %-feet	鉱体の面積 ha.	30 m x 30 m 5-スポット パターン @\$30,000/パターン		
				#パターン	LB/パターン	原位置 LB 当たり パターン投資
0.25	5,414	0.560	168.3	1,811	6,590	\$4.55
0.50	3,971	0.785	88.0	948	9,235	\$3.25
0.75	2,750	1.110	43.1	464	13,067	\$2.29
1.00	1,876	1.336	24.5	263	15,726	\$1.91
1.25	1,329	1.577	14.7	158	18,544	\$1.62
1.50	863	1.908	7.9	85	22,388	\$1.34
2.00	341	2.259	2.6	29	25,965	\$1.16

* 累層の比容積 : 0.5305 m³/t

埋蔵量のカットオフ品位-厚さに対する感度

従来法によるウラン採掘と ISL 採掘の双方における長年の論争は、経済的に採取できる埋蔵量を決定するための下方カットオフの基準点の選択である。

従来法の採掘に対する経済的限界、あるいはカットオフは恐らく、ISL におけるほど論争的ではない。ISL 採掘においてこの問題を重大化させているのは、ISL 採掘は従来法での採掘が量的にも質的にも不適當である埋蔵量に先ず適用される、二次的な採取方法であるという考え方である。十数年続いているウラン価格の低落は、従来法鉱山が閉山を余儀なくされているのに ISL 鉱業活動は保持されているので、多くの人の目からこの考え方を払拭した。

しかし、代表的な生き残った操業は 10 年前の 45 - 136 t (100,000 - 300,000 LB) U_3O_8 /年の規模ではなくて、340 - 454 t (750 千 - 1 百万 LB) U_3O_8 /年の範囲で生産するので、ISL 活動は著しいリストラを経験した。

ISL 採掘の生き残りと成長は、それが一次的採掘法となった証しである。ISL 採掘法のより小さい環境的なインパクトは確かに、それが第一級のウラン採掘法として出現した一つの要因である；しかし、急激に減退しつつある市場でこの変化をもたらしたのは、典型的な砂岩（ロールフロント）型ウラン鉱床に対する ISL 採掘に特有の経済的利点である。

ISL 採掘は減退する市場の嵐を切り抜けて来たが、この技術に対する経済的なカットオフは従来採掘法と同様に調整されている。ISL 採掘の資本費に対する GT カットオフ基準の影響を表 7 に示した。左側の最初の三つの欄（GT カットオフ、原位置埋蔵量、および平均 GT）が基礎的なデータである。次に掲げる一連の仮定を用いることによって、我々は井戸設備に必要な単位投資に対する GT カットオフの影響を見ることが出来る。

1. 鉱石の比容積は $0.53 \text{ m}^3/\text{t}$ ($17 \text{ ft}^3/\text{ton}$) である。
2. 鉱体は一つの単一の連続した形状である。
3. 45 m (100 feet) の固定した注入井間隔の 5-スポット・パターンが鉱体を開発するのに用いられる。
4. 稼働中の井戸のみならずモニター井、電力、付属施設を含む井戸フィールド投資は、

5-スポット・パターン当たり \$35,000 と固定される。

これらの仮定の影響を表 7 に示したが、そこではパターンの数、パターン当たりの原位置埋蔵量、および井戸設備単位投資コストが、種々の GT カットオフ基準について示されている。予想されたように、著しく厳しい GT カットオフが適用されるにつれて、埋蔵量の大きさと単位投資は大きく減少している。最も著しい増分は GT カットオフが 0.25 GT から 0.50 GT へ移行した時に起こっており、そこでは平均品位-厚さが 0.56%-ft から 0.79%-ft へ増加しているのに対して、埋蔵量の大きさは 27% 減少している。井戸設備投資コストは 29% 減少している。

GT カットオフを変化させた時の差分を表 8 に示した。0.25 GT から 0.50 GT へのカットオフの上昇により、1,450 t (3.2 百万 LB) の埋蔵量が減少したのに対して、原位置埋蔵量ベースの平均 GT の減少は僅か 0.31 GT である。この低品位埋蔵量の増分を開発するには、\$9.51/LB の井戸設備単位投資の増加を必要とするだろう。

同じ様な比較と結論が、より高い GT カットオフ基準に対しても引き出される。しかし、埋蔵量の喪失が急激に増えるのに対して、井戸設備単位投資の減少分は速やかに小さくなる。

従来法採掘と同様に、低品位鉱石の除去は単位投資額を減少させる；しかし、埋蔵量ベースが減少するにつれてその他の単位コストは増加し始めるので、全ての鉱体に対してこのアプローチにはある有限の極限值が存在する。

ISL に対する総コスト

我々は ISL 採掘の建設資本と直接操業費要素を幾分詳細に論じてきた。我々も知っている通り、あるビジネスの全面的なコストに到達するには含まれねばならない、それ以外の多くのコスト要素が存在する。

表 9 に示す代表例は、これらのコストは U.S. ポンド当たり \$12.00 ないし \$15.00 の範囲にあると思われることを示唆している。コストの約 40% が間接資本と費用項目として分類されよう。典型的にこれに含まれるのは、取得費と開発前資本費、復元と再生の増加額、団体レベルの

費用，鉍区税，および州または地方の鉍物分離税である。

個々の要素の相対的な大きさはプロジェクトと州によって変わるかもしれないが，このような間接コストの影響は全ての国内 ISL プロジェクトでほぼ共通している。

競争的地位

プロジェクトに対する長期的展望は，国内的あるいは世界的に見て競争力のあるウラン採掘操業の費用有効度によって影響されるだろう。近年の出来事は，適切に適用されれば ISL 技術は米国内の従来 of 採掘ならびに粗製錬法に対して競争力があるばかりでなく，世界中のより大規模で低コストの従来法プロジェクトに対しても競争力を有している。

表 8
GT カットオフに対する井戸設備投資額増分の感度

品位-厚さ カットオフ % - feet	原位置埋蔵量 増分 t U _{0a}	価値の増分 <u>鉱体の面積</u> ha.	平均 GT %-feet	30 m x 30 m 5-スポット・パターン @\$30,000/パターン		
				#パターン	LB/パターン	原位置 LB 当たり パターン投資額
0.25						
	1,443	80.3	0.313	864	3,682	\$8.15
0.50						
	1,221	44.9	0.473	484	5,562	\$5.39
0.75						
	874	18.6	0.814	201	9,587	\$3.13
1.00						
	547	9.8	0.974	105	11,486	\$2.62
1.25						
	466	6.8	1.20	73	14,069	\$2.13
1.50						
	522	5.3	1.73	56	20,535	\$1.46

表 9

フル生産時における操業費

フィールド・レベルのコスト範疇と範囲	
労務費と間接費	<u>\$3.00 - \$5.00</u>
薬品	
ユーティリティー	
物品と供給品	
イエローケーキの出荷とサンプリング	
井戸設備の更新	<u>\$3.00 - \$5.00</u>
総直接フィールド・コストの範囲	<u>\$6.00 - \$10.00</u>

その他のコスト範疇と範囲	
地下水復元積立金	<u>\$4.00 - \$6.00</u>
地表再生積立金	
販売費，一般管理費	
鉱区税	
州および地方の生産税	
取得／開発費の償却費	
地表施設の資本*	
開発前の資本	<u>\$4.00 - \$6.00</u>
総間接コストの範囲	

代表的な総コストの範囲	<u>\$12.00 - \$15.00</u>
-------------	--------------------------

* 初期井戸設備の減価償却費は井戸設備更新費に含まれる。

結 論

Rio Algom Mining Corp. の Smith Ranch プロジェクトに関する考察を、インシチュー・ウラン採掘の技術と中心的要素を紹介するガイドとして提示した。我々はこの技術の、特に Smith Ranch の費用有効度を強調しようと試みた。途中で我々はある鉱体のインシチュー・リーチングへの適性を評価するのに重要である、地質的並びに地球化学的なファクターについて言及した。全てのウラン鉱床が ISL の候補になるとは限らないことを認識するのが大切である。各候補が、適合させるためには技術を変えねばならないユニークな特徴を示すことを理解することも、同じ様に重要である。この技術の変更の成功、不成功は、プロジェクトの経済的成行きに大きく影響するだろう。

ウランの ISL 採掘は今日、多分野にわたる技術の顕著な例として評価されている。地質学者、水文学者、貯留層エンジニア、化学エンジニア、地球化学学者および機械エンジニアの技術が、全ての成功したプロジェクトには織り込まれている。強力な管理技術と環境の重要性を意識した組織がこれらの技術的手腕に結び付いたものが、ISL への真の鍵である。

過去十年間におけるウラン価格の劇的で長引く低迷は、ISL のチャンスであった。こうした混乱した状況下においてのみ、ウラン鉱業は ISL の経済的な強さをはっきりと見る事が出来た。もはや二次的採掘法として見られることもなく、ISL は米国の生産者がこの最も困難な市場で競争できる第一の手段として登場した。

我々は大きな ISL 型確定埋蔵量を有する Smith Ranch プロジェクトは、世界で最も競争力のある鉱山の一つであると信じている。我々は経験豊かな RAMC のチームが技術をその鉱山寿命が続く限り洗練させ、特性に合ったように改良し続け、その競争力が現在の予想を越えて増大することを期待している。

参考文献

1. Lueders, Mike R., Mine Manager - Highland Uranium Project, in the Riverton Ranger, Vol. 85, No. 78 Riverton, Wyoming, (19 June 1991), pg. 9B.
2. Mays, Wallace M., Highland Uranium Project: A New In Situ Uranium Mining Operation, "Assessment of Uranium Resources and Supply", International Atomic Energy Agency, Vienna, (April 1991), pp 145- 150.
3. Stover, Dennis E., "The Highland In Situ Mining Project: A Status Report", "In Situ All Mineral Symposium", Wyoming Mining and Metal Section of SME-AIME, (May 1989), Chapter 3.