

本資料は 2000年 3 月 31日付けで登録区分
変更する。

研究調整 Gr 【管理担当箇所名】

インシチュ・リーチング採鉱技術開発

1 9 9 8 年 2 月

社団法人 資源・素材学会

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

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)

1998

~~この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。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特に注意して下さい。~~

~~本資料についての問い合わせは下記に願います。~~

~~〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺宇園戸959-31~~

~~—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~~
PNC 特J7552 98-003
1998年2月

インシチュリーチング（ISL）採鉱技術開発

山内 睦 文*

要 旨

財資源・素材学会は、動力炉・核燃料開発事業団より、インシチュリーチング採鉱技術開発の研究を委託され、そのため委員会を発足させた。本委員会の研究目的は、インシチュリーチング採鉱法の現状と将来展望をまとめたものである。当初5ヶ年の計画であったが、諸般の事情から平成9年度のみ研究となった。単年度の研究であるため、意を尽くせぬ点も多々あるが、委員各位の努力と事業団からも多大な協力を得られたことにより、まとまりのある研究成果が得られたものと考えている。

第1章では、近年堆積型のロールフロント鉱床がインシチュリーチング採鉱法（以下ISL採鉱法と記す）に適していることが判明し、今では世界のウラン生産量の1割をこの技術で生産していることを述べた。又将来的にも有望視されているカザフスタン等の中央アジア地域を視野に入れて調査研究を実施したことを述べている。

第2章では、ISL採鉱法の歴史と現状について述べ、次に在来型採鉱法では高品位不整合型鉱床を対象とし、ISL採鉱法では低品位ウラン鉱床を対象とするように分極化して来たことを述べている。更にISL採鉱法の適用条件、開発方法について述べている。又、ISL採鉱法と在来法との比較を米国に於ける実例について説明した。

第3章では、ISL採鉱法の課題として、実収率の問題があること、および閉山後の修復工場の必要性等について述べた。

第4章では、ISL採鉱法を採用しているウラン鉱床の実例について詳述した。即ちISL採鉱法に適した鉱床が、堆積型のロールフロント型鉱床であり、実例として、カザフスタンでISL採鉱法を適用している鉱床について詳しい記述をしている。

第5章では、まず坑井の掘削法について述べた。ここでは、スピンドル型、ロータリー型およびダウンザホール型という3種の採掘機械につて、夫々の特徴について述べると共に、適用深度の検討についても記述した。次に坑井の仕上げについては、岩盤の状況に応じたケーシングの使用法やケーシングの材質の選定等について述べた。

第6章では浸出と精製について、その基礎的な理論について述べた。まず、ウラン鉱物の組成を明らかにし、次に浸出工程で酸とアルカリを使い分ける基準として、随伴鉱物の浸出性が大きく関与していることを述べた。

精製については、各種のイオン交換法、溶媒抽出、化学沈澱によるイエローケーキの生成について夫々の具体的な方法について記述した。

第7章では、環境に関与する問題点について記述した。即ち、ISL採鉱法の利点として、在来型採鉱法に比べて環境負荷が軽いものであること、ただし地下水については、水

質と水位の回復には注意を要すること等について述べた。次に放射線からの被曝の可能性は、在来型採鉱法に比べかなり低いこと、I S L採鉱法の場合は、主として各工程における含ウラン溶液で発生するラドンの吸入によるものであるから、設備からラドンの洩出がないように設計する必要性のあることを述べた。

第8章では、I S L採鉱法のコストについての検討結果を記述した。ここでは米国のI S L鉱山生産コストデータ(NAC International 社編)を基準にして、I S L採鉱法が生産コストに影響を与える要因について感度分析を行った。また、生産コストの特徴を在来型採鉱法のそれと比較するためのカテゴリー分析を、経済性の検討としてDCF分析を実施した結果について記述した。

第9章では、I S L採鉱法が、将来的には、ウラン供給の主体となり得る可能性を持つものであり、我が国は、独自にウラン資源の開発と供給の多様化を図ることが急務であることを提言している。

本報告書は、(株)資源・素材学会が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究内容結果である。

契約番号：090D0148

事業団担当部課室および担当者：東濃地科学センター技術開発課 石堂 昭夫

※：(株)資源・素材学会 会長

Development of the Technology of In-Situ Leaching Mining

Chikabumi Yamauchi*

Abstract

The Research Committee organized by MMIJ (The Mining and Materials Processing Institute of Japan) has begun to study the technology of In Situ Leaching (ISL) mining since August, 1997. The task of the Research Committee is to assess the current and future situation of ISL technology. This report summarizes the results obtained in 1 year.

The amount of uranium production from ISL mining makes up 10 percent of the world uranium production. It is estimated that the production from ISL mining will continue to grow in the next century. While ISL has been considered one of the best mining methods, its use is not widespread due to problems with leaching technology. However, it was found that sandstone type uranium deposits provided suitable conditions for the ISL method.

The occurrence of sandstone type uranium deposits was geologically studied. It is expected that most future deposits will be found in Kazakhstan which holds a significant amount of the world reserves.

Technological problems of the ISL mining system including design, operating and productivity are described in detail. Three boring methods—spindle, rotary and down hole type were examined to select the best boring machinery for drilling and completion of injection and production wells. The sulphuric acid leach system was compared to the bicarbonate leach system based on leaching and refining processes of uranium minerals and gangue minerals from Kazakhstan uranium deposits.

Finally, cost problems and safety considerations regarding environment and radiation are described.

Work performed by the Mining and Materials Processing Institute of Japan under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract Number 090D0148

PNC Liaison : Resources Appraisal Section Tono Geoscience Center ; Akio Ishido

* : The Mining and Materials Processing Institute of Japan ; President

目 次

1. はじめに	1
2. I S L採鉱法の概要	2
3. I S L採鉱法の課題	24
4. I S L採鉱法を適用したウラン鉱床	35
5. 坑井の掘削と仕上げ	46
6. 浸出と精製	59
7. 環境に関すること	78
8. I S L採鉱法のコスト試算	92
9. あとがき	114

1. はじめに

インシチュ・リーチング採鉱技術は、現在鉱山で行われている採鉱・選鉱および製錬の一部を地下でまとめて行おうとするもので、坑内作業をとまなわず、低品位鉱にも、深部鉱床にも適応可能で、きわめて魅力的な資源技術である。しかしながら、鉱石と浸出液との効果的な接触方法などに問題を残し、経済的な回収システムが確立できず、小規模な研究開発にとどまっていた。

ところが、近年、堆積性ウラン鉱床の採鉱には、インシチュ・リーチングにとって最適な条件が備わっていることが明らかになった。すなわち、堆積型のロールフロント鉱床では、もともと地下水の酸化、還元の微妙な変動によりウラン鉱物が沈積したもので上下盤は不透水層からなり、鉱石中には浸出液を流すのに十分な間隔が自然状態で存在している。また、弱酸あるいはアルカリによりウラン鉱物が容易に浸出することが判明したからである。この種の鉱床の賦存が知られるのはアメリカおよび中央アジアで、すでに、インシチュ・リーチングによるウラン回収が積極的に始められている。現在、インシチュ・リーチング採鉱によるウラン生産量は世界生産量の1割を超え、今後も増え続け、将来、ウランの安定供給を左右する存在となるものと推察される。このようなウラン資源開発の現況を考慮すると、すでに50基の原子炉をもち、積極的な原子力開発を検討しているわが国にとって、インシチュ・リーチング採鉱技術の修得と開発は、現・近未来における日本ひいては世界のウラン資源の安定供給に欠かせないことである。

本報告書は、インシチュ・リーチング採鉱技術開発の手がかりを得るものとして主に文献調査により、インシチュ・リーチング採鉱技術の概要と課題を整理し、適用可能な鉱床、生産井と注入井、浸出液、環境保全、経済性など項目ごとにまとめたものである。なお、調査項目によっては開発地域を特定しないと作業できない場合もあるが、そのような場合は、今後の開発対象として有望視されているカザフスタンなど中央アジアを想定した。

平成9年度のインシチュ・リーチング採鉱技術開発委員会の構成は下記のとおりである。

委員長	西山 孝	京都大学大学院エネルギー科学 研究科 エネルギー応用科学専攻
委員	山富 二郎	東京大学大学院工学系研究科 地球システム工学専攻
"	山口 勉	資源環境技術総合研究所 地盤工学部 岩盤工学研究室
"	伊藤 信一	資源環境技術総合研究所 素材資源部 素材プロセス研究室
"	境 収	日鉱金属(株)資源開発部
"	須藤 茂昭	(社)資源・素材学会

2. ISL 採鉱法の概要

2.1 ウラン鉱業の現状と ISL 採鉱法の地位

石油や天然ガスなどの流体エネルギー資源採掘の多くが、地表あるいは海上からのボーリング孔/坑井を介して行われる。金属・非金属鉱物資源についても、ボアホールを利用した採鉱法が適用されることがあり、これらを Borehole Mining と呼ぶことがある。例えば、硫黄の採取に Frash 法と呼ばれる Borehole Mining が存在する。熱水をボアホールより硫黄鉱床に注入して、硫黄を溶かし、蒸気とともに回収する。また、岩塩の採取にも、Borehole Mining が古くから取り入れられており、燐鉱石や硼砂の採取にも使われている。これらの Borehole Mining では、対象となる鉱物が水あるいは熱水に溶けやすいという特性を利用している。酸あるいはアルカリ/アンモニア溶液を注入して、目指す鉱物の溶解と浸出を促進することも行われている。特に、銅や金の二次回収に多く見られるが、リーチング法 (Leaching) と呼ばれている。バクテリアの力を借りたリーチング法も研究されているが、坑内あるいは切羽において、破碎した鉱石に直接リーチングを行う、インシチュ・リーチング (In-situ Leaching) と、鉱石を坑外に運び出した後に行うヒープ・リーチング (Heap Leaching) がある。このように、水あるいは生物・化学溶液の物理化学的作用により有用鉱物を溶出させる採鉱法である Borehole Mining と Leaching を総称して Solution Mining と呼ぶこともある。

さて、ウラン鉱床を対象としたインシチュ・リーチングであるが、多くの場合、ボアホールを利用したリーチングを指す。1950 年代半ばまで、インシチュ・リーチングと言えば、通常の坑内採鉱法と同様、立坑や斜坑・水平坑道を開さくして鉱体にアプローチし、坑内において浸出液を散布することを意味していた。しかし、1957 年に Livingston が、石油採掘と同様、坑外からの坑井を使ったインシチュ・リーチングを提案した。ボーリング孔を利用したインシチュ・リーチング (ISL 採鉱法) が、1963 年に Ritchie によって、Utah International 社のワイオミング・ウラン鉱区において、初めて、実証試験が行われた。次に、1975 年、Atlantic Richfield 社が、テキサス州の Clay West 鉱区において、商業ベースのウラン生産 (年間 250,000 lbU₃O₈) に ISL 採鉱法を適用した【Cox & Roushey, 1979】。

1977 年にアメリカのエネルギー省が行った調査によると、ISL 採鉱法によるウラン生産は 31.8 million lb を記録したが、当時世界最大のウラン生産国であったアメリカ合衆国全生産量の 0.15% を占めるものでしかなかった。しかし、1980 年代に入って、事情は異なってくる。ウラン価格が暴落し、Key Lake に代表されるような不整合関連型の高品位ウラン鉱床が開発されたことにより、アメリカのウラン鉱山は国際的競争力を急速に失って、カナダに最大ウラン生産国の席を譲り、ウラン輸入国に転化する【Akin, 1997】。

従来型の露天掘・坑内掘ウラン鉱山が衰退し閉山する一方で、ISL ウラン鉱山の相対的なシェアが拡大した。1997 年の時点で、従来法のウラン鉱山は米国内には存在していない。Smith Ranch (ワイオミング州)・Christensen Ranch (ワイオミング州)・Highland (ワイオミング州)・Crow Butte (ネブラスカ州)・Kingsville Dome (テキサス州)・Rosita (テキサス州) の 6 つの ISL 法鉱山と、坑内水からウラン回収を行っている Ambrosia Lake 鉱山 (ニューメキシコ州)、Sunshine Bridge・Uncle Sam (いずれもテキサス州) の燐酸工場

付帯ウラン回収施設が稼働している。今後、1998 年には、Crown Point(ニューメキシコ州)・Gas Hills(ワイオミング州)の2つの ISL 鉱山と Schwartzwalder 坑内掘鉱山(コロラド州)が操業開始を予定し、Jackpot 坑内掘鉱山が 1998 年または 1999 年の開業を目指している【ウラン・トピックス, 1997】。

目を世界に転じて、ウラン鉱山の現状を見ると、Table 2-1 にまとめたものを、動力炉核燃料開発事業団(PNC あるいは動燃事業団)の資料から作ることができた。操業中はもちろん、開発段階・計画段階・調査段階にあるウラン資源開発プロジェクト、閉山したウラン鉱山や生産を一時休止したウラン鉱山も含め、193 件のウラン鉱山データが収集された。所属国・状態(計画中/操業中/休止中の区別を行った)・鉱床分類(不整合関連型/砂岩型とその他)、埋蔵量、鉱床品位、採鉱法(従来型の露天掘/坑内掘と ISL/リーチング)、生産能力、生産コスト(操業コスト)を記した。

ウランの鉱床は 14 種前後に分類されると言われているが、その中で、現在重要なのは、カナダやオーストラリアに見られる不整合関連型(Unconformity Type)と、砂岩型(Sandstone Type)の二つである。その理由は、不整合関連型ウラン鉱床はその品位が非常に高いために競争力が強いこと、一方、砂岩型鉱床は、品位は低い、コストが安く生産性の高い ISL 採鉱法に適しているためである。

Fig. 2-1 は動燃事業団が行った調査結果である【池田・藤田, 1997】。これによると、ウラン価格が\$80/kgU(= \$30.8/lb U₃O₈)とした場合のウラン資源量(2,100 千 tU)に対して、ISL 採鉱法が適用可能な資源量は 32.4%(680 千 tU)を占め、不整合関連型鉱床の資源量は 23.0%(484 千 tU)を占める —— ウラン価格を\$40/kgU(= \$15.4/lb U₃O₈)

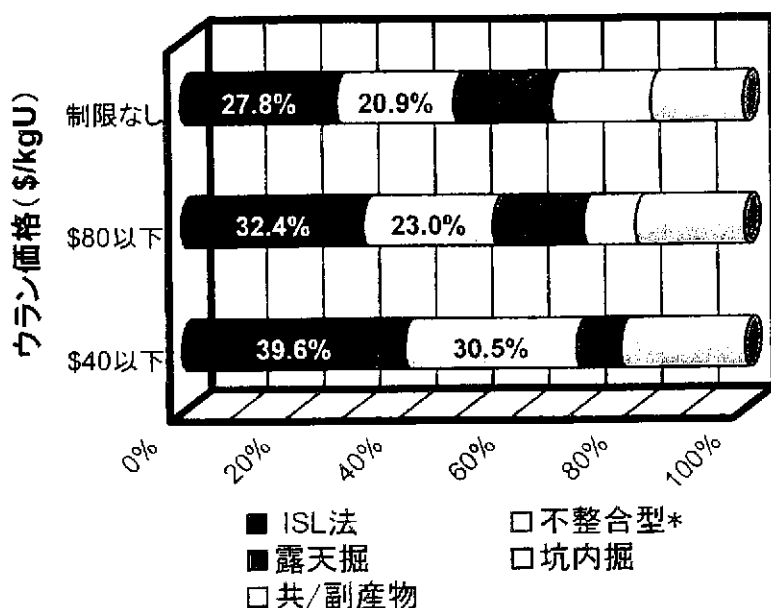


Fig. 2-1 採鉱法別ウラン資源量の比較【池田・藤田, 1997】

*不整合型には、従来法の露天掘と坑内掘不整合関連型鉱床を持つ鉱山が含まれている。

とした場合の資源量(1,502 千 tU)に対して、ISL 法適用可能鉱床と不整合関連型鉱床は、それぞれ、39.6%(594 千 tU)と 30.5%(458 千 tU)を占める。Table 2-1 を整理することにより Table 2-2 を得ることができる。これより、リーチング法がウラン資源プロジェクト総件数の約 1/4 を占め、操業中のもの・計画中のもの約 30%を占め、その 97%が砂岩型鉱床への適用が計画あるいは実施されている。前出の動燃事業団の調査【池田・藤田, 1997】でも、ISL 採鉱法の

Table 2-2 世界のウラン資源プロジェクト(採鉱法－現状－鉱床タイプ)

採鉱法 合計		現在の状態				鉱床タイプ			
		計画	操業	休止	その他	不整合	砂岩	その他	不明
Leaching	50(5*)	24	14	11	1	—	47(2*)	3(3*)	—
露天掘	35	18	7	10	—	6	12	15	2
露/坑	23	4	12(1)	6	1	3.5	6.5	13(1)	2
坑内掘	62	19(2)	12(1)	27(2)	4	6(1)	32(2)	20(2)	4
不明	23	16	1	—	6	2	3	6	12

()内の数字はリーチングとの併用を行っている件数であり、()内に*の付いた数字は ISL ではなく、坑内水・燐鉱石・廃滓からのリーチングを行っている件数である。また、Ga-bon の Oklo/Mounana プロジェクトの鉱床タイプが不整合関連型と砂岩型鉱床の両用であったため端数が生まれた。

生産量シェアは、ウランの総生産量が減少する中において、1990年の6%から1995年の13%に倍増したことを示している(Fig. 2-2)。また、同様な調査結果を OECD が発表しており【レッドブック 1995年版, 1996】、これを Table 2-3 に示す。

世界的に見ると、安価な ISL 採鉱法が生産コスト削減のために採用数が増加しているが、在来型の採鉱法がウラン採鉱では、いまなお主流を占めており、世界の10大ウラン鉱山に数え上げられる鉱山は全て従来式の採鉱法を採用している。

次に、Table 2-1 を再び整理して作成した Table 2-4 より、現在のウラン市況で採算に見合うウラン資源プロジェクトは操業コスト等級の①に属するものだけである(コストデータ

生産量 (tU)

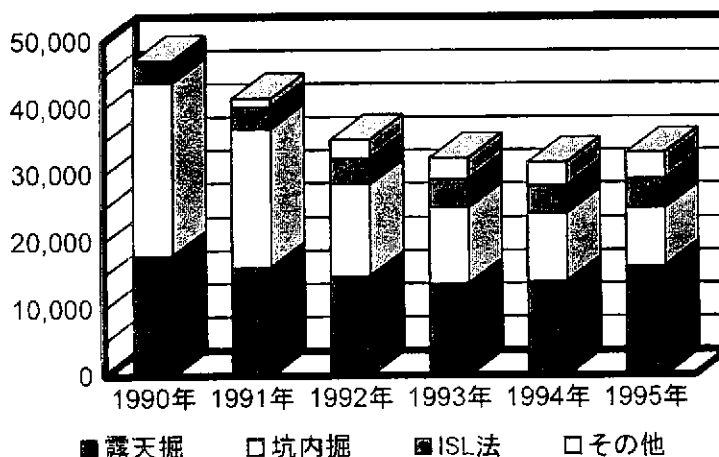


Fig. 2-2 採鉱法別ウラン生産量の推移
【池田・藤田, 1997】

Table 2-3 採鉱法別、世界のウラン生産量

採 鉱 法	1992 年	1993 年	1994 年
露天掘	41.1 %	41.7 %	38.3 %
坑内掘	32.6 %	32.1 %	35.9 %
ISL 法	15.5 %	15.0 %	15.3 %
その他(副産物として回収・ヒープリーチング)	10.8 %	11.2 %	10.5 %

Table 2-4 世界のウラン資源プロジェクト(操業コスト—現状—採鉱法)

操業コスト 等級 合計		現在の状態				鉱床タイプ				
		計画	操業	休止	その他	Leach	露天	露/坑	坑内	不明
①	51	19	23	9	—	26(2*)	7	4	14	—
②	70	29	17	22	2	15(2*)	13	10	30	2
③	25	8	3	11	3	1	6	7	10	1
④	9	1	1	7	0	—	3	1	5	—

()内の*付き数字は ISL ではなく、坑内水・燐鉱石・廃滓からのリーチングを行っている件数である。また、操業コストの等級は、①が\$40/kgU(\$14/lb U₃O₈)以下、②が\$40—\$80/kgU(\$14—28/lb U₃O₈)、③が\$80—\$120/kgU(\$28—42/lb U₃O₈)、④が\$120/kgU(\$42/lb U₃O₈)以上である。

Table 2-5 採算ベースに乗った稼働中鉱山についてリーチング法と従来法の比較

	件数	鉱床規模 (tU)	生産能力 (tU/y)	品位 (%U ₃ O ₈)	操業コスト (\$/lb U ₃ O ₈)
Leaching	12(12)	34,690	627	0.16	11.85
従来法	11(4)	80,901	2,690	0.55	10.51

件数の()内の数字は、Leaching 法の場合、砂岩型鉱床の数を、従来法の場合、不整合関連型鉱床の数を示している。

の存在するものの内 28%)が、その約半数(45.5%)をリーチング法が占めていることがわかる。操業中の鉱山でしかも採算ベースにのった(操業コスト等級①)鉱山に限って、リーチング法と従来法(露天掘・坑内掘)を比較すると Table 2-5 を得ることができる。世界のトップ 10 にあげられるような大規模ウラン鉱山の採掘に、ISL 採鉱法は採用されていない。しかし、Table 2-5 より、現在操業中のリーチング法鉱山は、従来法の鉱山に比べ、鉱床の規模・生産規模がともに小さいが、より低品位のウラン鉱床に適用されていることがわかる。

さきの動燃事業団の資料【池田・藤田, 1997】でも、操業中の ISL 法鉱山の操業コストは約\$32/kgU(=\$12.3

操業コスト (\$/kgU)

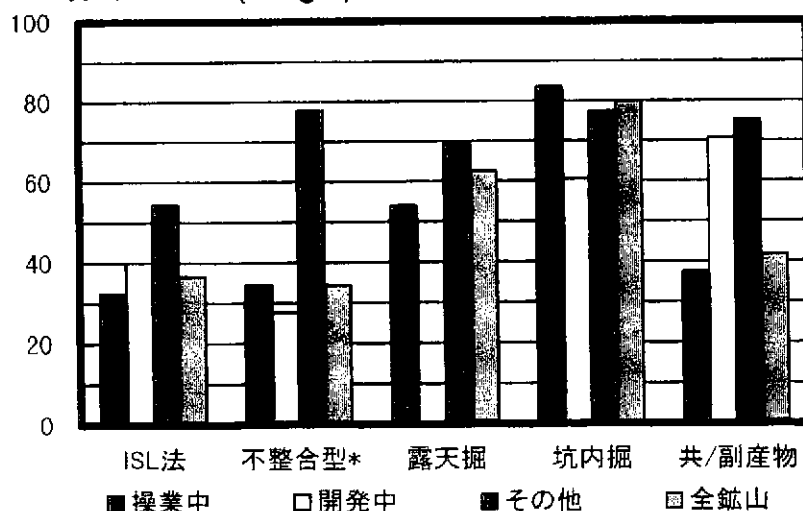


Fig. 2-3 採鉱法別生産コストの比較【池田・藤田, 1997】

ISL法適用可能資源量分布

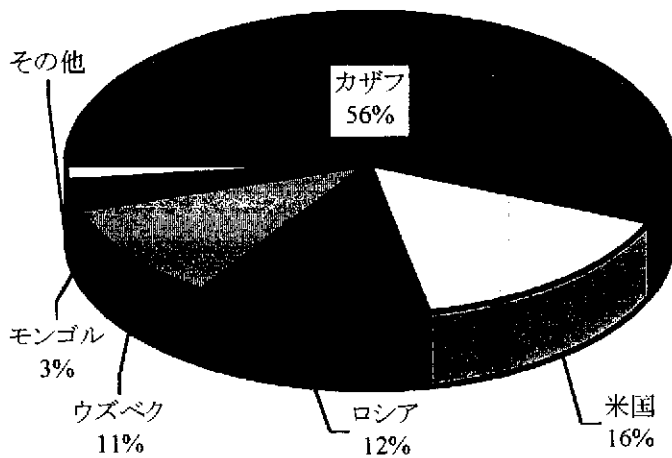


Fig. 2-4 ISL 採鉱法が適用可能なウラン資源量の分布【池田・藤田, 1997】

/lb U_3O_8)で最も安く、次いで不整合関連型鉱山の操業コスト約\$35/kgU (= \$13.5/lb U_3O_8)がつづき、不整合関連型以外の露天掘鉱山と坑内掘鉱山の操業コストは、それぞれ、約\$54/kgU (= \$20.8/lb U_3O_8)と約\$84/kgU (= \$32.3/lb U_3O_8)であった (Fig. 2-3)。このように現在のウラン市況下では、ISL法が適用可能なウラン鉱床か高品位の不整合関連型鉱床のみが、採算ベースに乗る可能性を持っていると言える。従来型の採鉱法が適用可能な鉱山は、金あるいは銅の副産物として、ウラン鉱物の採掘が可能となっているといっても

過言ではなく、先に述べたアメリカ合衆国における従来型ウラン鉱山の衰退を説明することができる。1982年、アメリカ国内には180のウラン鉱山が稼働し、その内の90%前後が従来法の露天掘・坑内掘鉱山であった。しかし、その後2年間でおよそ140の従来型ウラン鉱山が閉山し、ついに1992年初めに、最後の露天掘鉱山が閉山し、従来型のウラン鉱山は現在、米国内では稼働していない【動燃資源情報, 1993】。

また、動燃事業団は、操業コストの低い不整合関連型鉱山とISL採鉱法鉱山について、起業費と操業費を比較し、低品位鉱床を対象とするISL法鉱山は高品位の不整合関連型鉱山に比べ起業費は小さいが、操業費の占める割合が高くなっているとしている。したがって、ISL採鉱法鉱山は比較的少ない資本で生産を始め、徐々に生産規模を拡大する傾向が強い【池田・藤田, 1997】。

当面、採掘の対象となる操業コストが\$40/kgU (= \$15.4/lb U_3O_8)以下であるISL法適用鉱床はカザフスタン・米国・ウズベキスタン・モンゴルに限られるが、ISL法を実施しているあるいはISL法の適用を検討している鉱床の約56%がカザフスタンに存在し、アメリカ(16%)、ロシア(約12%)、ウズベキスタン(約11%)がつづき、少量ではあるがモンゴル(3%)とオーストラリア(2%)にも適用可能鉱床が存在している (Fig. 2-4)。

米国と同様、中央アジアのCIS諸国、カザフスタン・ウズベキスタンでも、コストの高い従来型露天掘鉱山・坑内掘鉱山を閉鎖して、ISL法を全面的に採用する傾向が見られる。カザフスタンでは、1993年から1994年にかけて、コスト高を理由に露天掘ウラン鉱山の操業が休止され、1994年の同国ウラン生産量の約60%がISL法、残りが坑内掘によるものである。今後、坑内掘鉱山を閉鎖し、全面的にISL採鉱法に移行する予定である【McMurray, 1995】。さらに、1994年以降、ウズベキスタンではウランの生産を全てISL法で行っており、周辺のロシア・キルギスタンでも、ISL採鉱法が適用しやすいウラン鉱床の開発が計画されている。

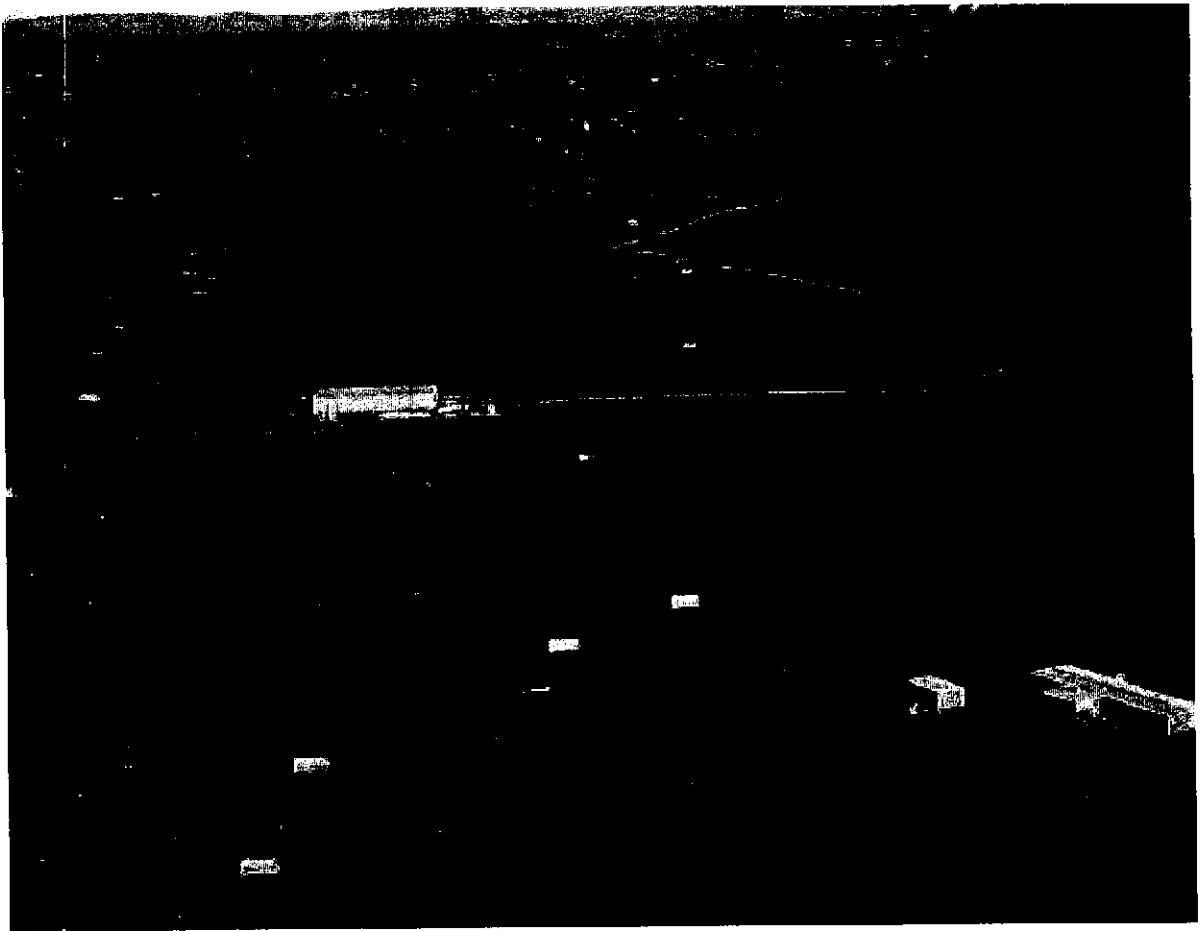


Fig. 2-5 ISL 法を採用しているアメリカ合衆国ワイオミング州の Highland ウラン鉱山の航空写真【Wyoming Uranium, 1997】。

2.2 ISL 法の適用条件

ISL 採鉱法は、砂岩型鉱床あるいはロールフロント型鉱床と呼ばれるウラン鉱床に適している。Fig. 2-5 は、アメリカ合衆国ワイオミング州の北西部、Power River 盆地に所在する Highland ウラン鉱山の航空写真である。この鉱山は Power Resources Inc. が操業する ISL 法ウラン鉱山であるが、1988 年の操業開始から 1991 年までの間、320 万ポンドの U_3O_8 を生産した。しかし、この間、1 トンの鉱石も従来法で採掘せず、ズリあるいは表土の剥土も行っていない【Mining Magazine, 1991】。また、Fig. 2-6 は、ワイオミング州における砂岩型ウラン鉱床に対する ISL 法ウラン採鉱を模式的に描いたものである。

砂岩型ウラン鉱床が ISL 採鉱法に適しているか否かは、鉱床の鉱物学的特性・地質学的特性に支配されている。もちろん、鉱床に含まれている U_3O_8 が経済的にペイしうる程度（カットオフ品位）以上に濃縮しており、その資源量（可採ウラン量）も経済的回収が十分に成り立ち得る規模を持っている必要がある。これらに加えて、以下のような自然条件・地質条件が成り立つことが、ウランの ISL 採鉱法にとって必要である（Fig. 2-8 参照）。

- (1) ウランを胚胎する鉱床は、砂岩のように多孔質であって、鉱床自身の透水係数/浸透率、孔隙率、水理特性が適したものであること。

- (2) ウランを溶出させる浸出液および貴液が流動するために、鉱床が地下水面下にあつて飽和されていること。
- (3) 鉱床が比較的水平であつて、その上下を泥岩・頁岩などの不透水層で挟まれていることにより、浸出液・貴液が上下の地層に漏出しないこと。また、大きな断層や亀裂が存在しないことも望ましい。

これらの条件が満たされるウラン鉱床は、従来型の採鉱法と同様な探鉱・開発手順を経て、ISL 鉱山の操業が始まる。探鉱ボーリングを行つて、鉱床の広がり、深度、ロールフロントの形状と品位を調査する。

2.3 ISL 法ウラン鉱山の開発

Fig. 2-5 のアメリカ・ワイオミング州の Highland 鉱山では、460 m—610 m/day のペースで探鉱ボーリングを実施し、ガンマ線・比抵抗・SP 検層を行つて、砂岩—頁岩/泥岩の積層構造を明らかにし、ウラン品位を測定する。比較的な複雑なロールフロントの構造を詳細に把握するため、ボーリング間隔を最終的に、15 m グリッドまで狭める。調査の終わった探査孔は高粘度のベントナイト泥水で一旦シールし、掘削燥粉の品位分析結果とガンマ線検層のアノマリーを基に鉱床図を作成する【Mining Magazine, 1991】。

IN SITU LEACHING GENERAL ARRANGEMENT

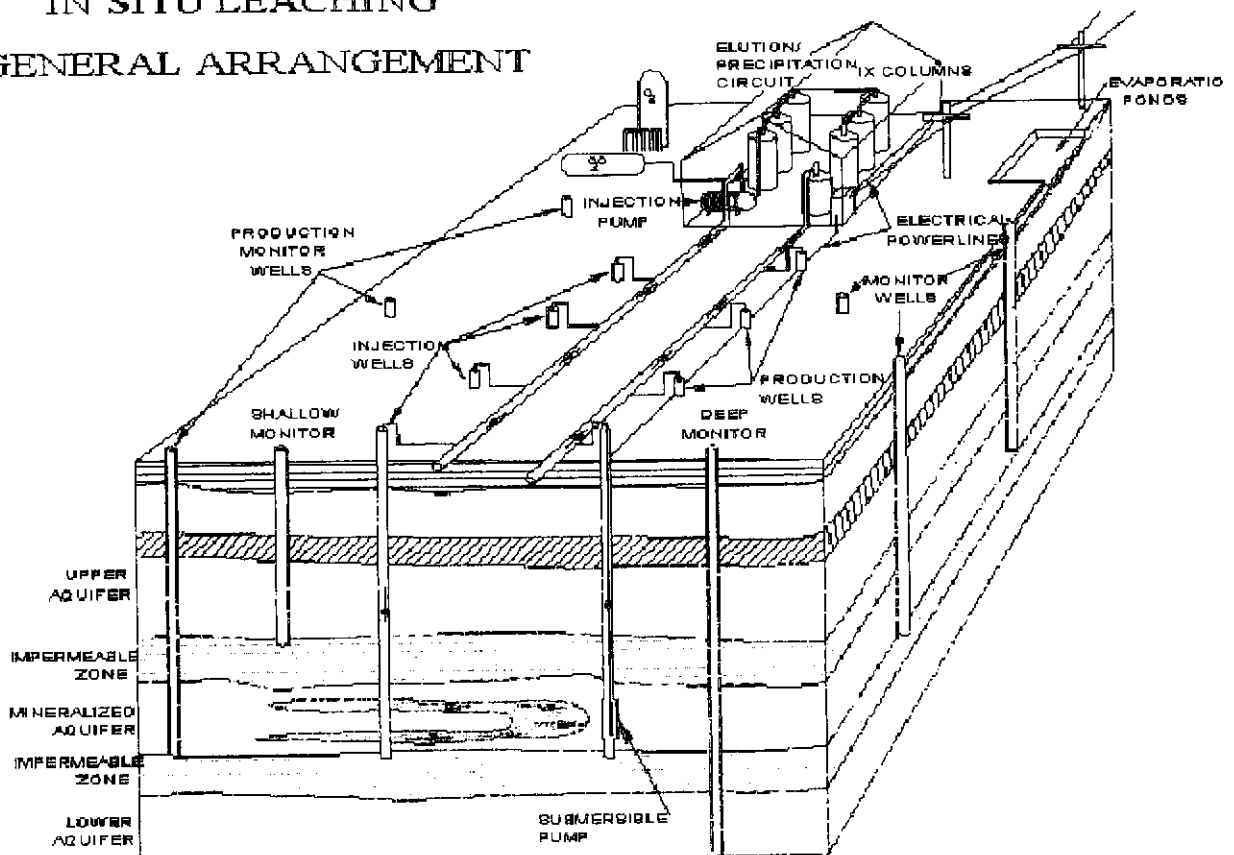


Fig. 2-6 アメリカ合衆国ワイオミング州における ISL ウラン鉱山の模式図。ウラン鉱床と坑井、地表プラントが描かれている【Wyoming Uranium, 1997】。

また、ワイオミング州に隣接するネブラスカ州の北西部に所在する Crow Butte 鉱山では — Crow Butte Resources Inc. がオペレータであるが、1991 年からイエローケーキの生産を始め、増産を続けて 1998 年までに、年間 100 万ポンドの U_3O_8 を生産する体制を整えることになっている。1995 年の統計では、Crow Butte 鉱山は ISL 法ウラン鉱山の中で、最も高い生産性を記録している【Konde, 1996】。— 1979 年から 1985 年にかけて、探鉱ボーリングを行ったが、ボーリング間隔は当初の 200 feet \times 200 feet (61 m グリッド) から、100 feet \times 100 feet (30.5 m グリッド) までに狭め、場合によっては、ボーリングを 50 feet (15 m) 間隔で行った。正確な地質情報を得るためには、探鉱ボーリングの密度をあげる必要があるが、常にコストの増加を伴うので、対象とする鉱体の特性にマッチした探鉱ボーリングを行う必要がある。Crow Butte 鉱山のロールフロント型砂岩鉱床も、Highland 鉱山のものと同様、酸化帯と還元帯の境界に沿って、何枚かのロールフロントが垂直に積み重なった、複雑な構造を持っている。

ボーリングコアを使って、鉱床を胚胎する砂岩層の物理的・化学的性質を調査するが、中でも、透水係数/浸透率、孔隙率の測定が、砂岩層内の浸出液・貴液の流動挙動を予測し、坑井の配置設計を行う上で、重要である。また、現地では、Pumping Test も行って、ISL 法の適用が可能か否かを判断し、坑井配置設計・生産計画を立案する。

ロールフロント中に存在するウランを溶脱する浸出液としては、硫酸に代表される酸性浸出液と炭酸塩溶液を主体とするアルカリ性浸出液の 2 種類がある。硫酸浸出液の方が、一般に、溶出効果が大きく、回収率も高いと考えられている。特に、ウラン鉱物が他の鉱物中に固く閉ざされている場合に有効である。しかし、酸性浸出液は、ウラン鉱物以外に粘土鉱物・方解石・シリカとも反応しやすく、石膏やシリカゲルを生成しやすいので、これら二次生成物が、砂岩層の透水性を低下させ、目詰まりの原因ともなる。

一方、炭酸塩系浸出液は、硫酸浸出液に比べウラン鉱物を溶脱させる能力に劣るが、ウラン鉱物だけに選択的に作用するので、ウラン鉱物が砂岩粒子の表面に付着している場合には有効である。そして、貴液に対する異鉱物混入の問題、透水性低下の問題、目詰まりの問題が起きにくい。

アメリカの ISL 鉱山では、もっぱらアルカリ性浸出液を使用している — 唯一の例外は、Rocky Mountain Energy 社が、ワイオミング州 Casper 市近郊の鉱床で、試験的に硫酸浸出液を使用した。炭酸塩系浸出液として、炭酸ソーダよりも価格の高い炭酸アンモニウムあるいは重炭酸アンモニウムが使われることがある。その理由は、ナトリウムイオンが粘土鉱物の膨潤を起こす可能性があり、したがって、粘土鉱物を含む砂岩層では目詰まりを生じるおそれがあるからである【Cox & Roushey, 1979】。

Kogema Mining Inc. が所有するアメリカ合衆国ワイオミング州の Christensen 鉱山では、重炭酸ソーダの浸出液に酸化剤として酸素ガスを封入して使用している【Rowson, 1996】。Crow Butte 鉱山でも、ソーダ灰 (Na_2CO_3) と炭酸ガス・酸素ガスを使用している【Akin, 1997】が、さきの Highland 鉱山では、酸素ガスと炭酸ガスを浸出液に溶かし、注入井から鉱床内に流送する。酸素ガスは鉱体中のウランを酸化させて ($2UO_2 + O_2 \rightarrow 2UO_3$)、炭酸ガスと反応させ、水溶性のウラン炭酸塩錯合体を生成させて溶脱させている ($UO_3 + 2HCO_3^- \rightarrow UO_2(CO_3)_2^{2-} + H_2O$)【Mining Magazine, 1991】。

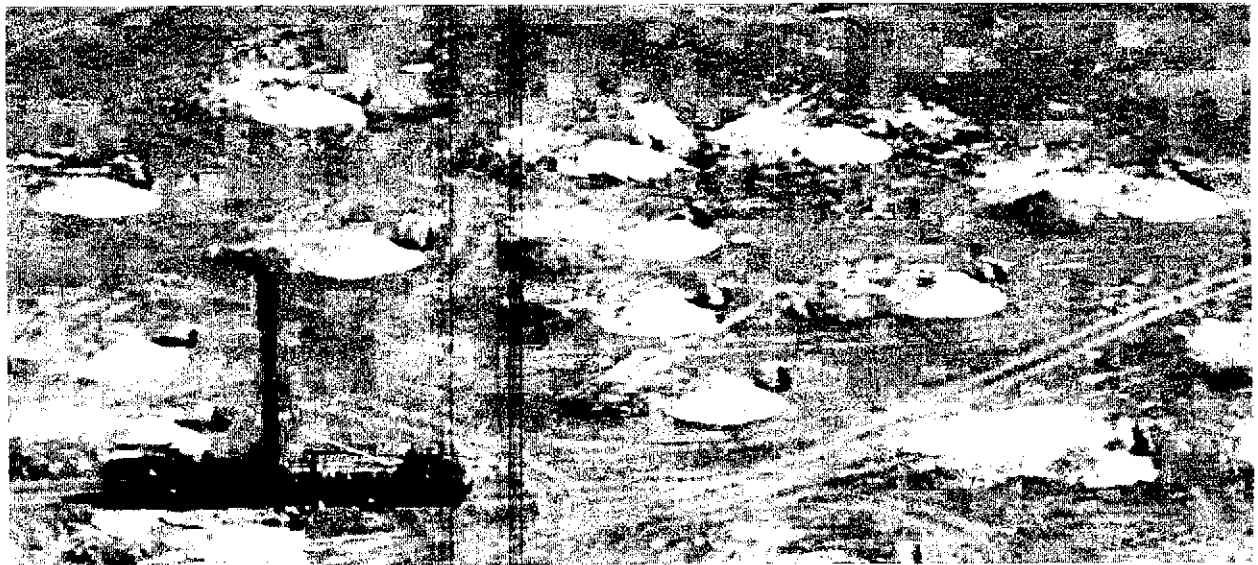


Fig. 2-7 ISL ウラン鉱山における坑井の掘削作業【Wyoming Uranium, 1997】

ボーリングコアを使って、浸出液の選択・調整を行うが、現地実験でも、浸出液の有効性を確認する必要がある。

ISL 採鉱法は、従来型の採鉱法に比べ、開発に要する期間が短い。これは、従来法の露天掘採鉱では、表土・ズリの先行剥土作業、ズリ捨て場の確保等を行う必要があり、従来法の坑内掘採鉱でも、立坑・斜坑等の開さく、切羽の開坑準備作業、運搬・巻上設備等を建設する必要があるためである。さらに、従来型採鉱法では、露天掘・坑内掘を問わず、破碎・摩鉱のための坑外設備、ウラン粗製錬のための処理設備、廃津ダムの建設も必要となるが、ISL 採鉱法では、これらが不要となり、開発期間が短く、初期投資も少なくてすむ。

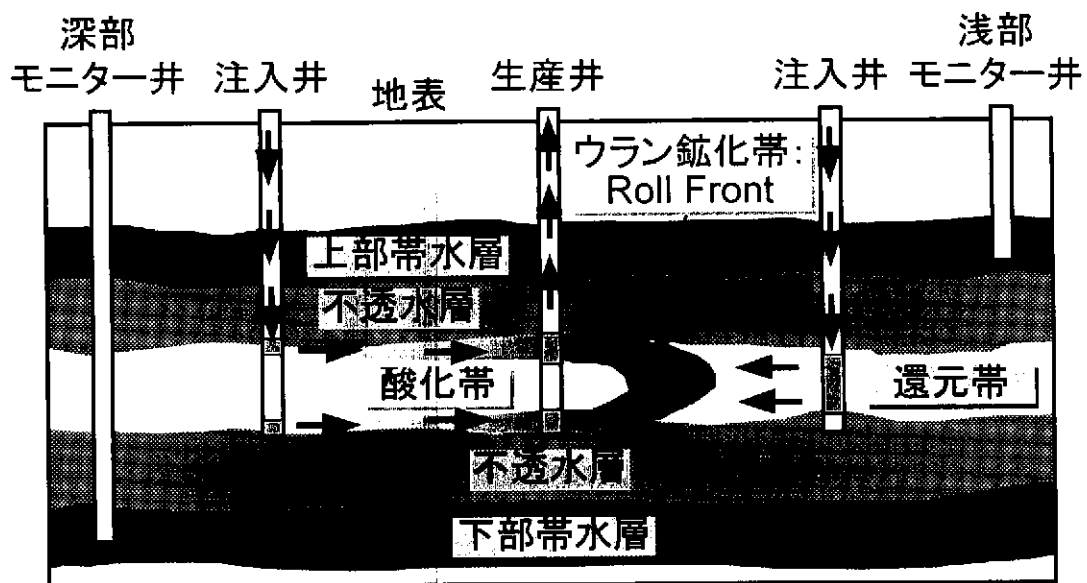


Fig. 2-8 砂岩中のロールフロント型ウラン鉱床と ISL 採鉱のための注入井・生産性・モニター井の配置(垂直断面図)

2.4 ISL 法ウラン鉱山のオペレーション

探鉱結果に基づいて F/S (Feasibility Study) を行い、開発の意志決定を行うと、ウラン鉱床を胚胎する砂岩層に対して、浸出液を注入するための注入井 (Injection Well)、貴液を回収するための生産井 (Production Well)、浸出液・貴液が上下の帯水層や鉱区外の帯水層に漏洩しているか否かをチェックするためのモニター井を掘削する (Fig. 2-7, Fig. 2-8 および Fig. 2-9)。

ウラン鉱床の形状と規模、鉱床の水理学的特性 (透水性と地下水圧) に適した坑井配置を行うが、コストとウラン回収率のバランスを考慮した合理的な設計が求められる。Fig. 2-9 に示したように、生産井と注入井の配置パターンの基本形としては、5点配置 (生産井1本に対して注入井4本)、7点配置 (生産井1本に対して注入井6本)、線形配置 (生産井列と注入井列を交互に繰り返す) などがある。

ワイオミング州の Highland 鉱山では、厚さ 6 m - 30 m のウラン鉱床が、深さ 90 m - 300 m の範囲に存在する。主として5点配置パターンを使用し、注入井と生産井の間隔を条件に応じて、15 m - 30 m としているが、鉱体の幅が狭くなっている部分では、線形配置パターンも使用している。また、モニター井を、採掘領域の外側 120 m - 180 m に配置して、浸出液・貴液の漏洩を監視し、上下の帯水層に対してもモニター井を掘削し、鉱床を挟む頁岩層の難透水性を確認している【Mining Magazine, 1991】。

同じワイオミング州の Christensen 鉱山では、最大層厚 300 feet (91 m) のウラン鉱床が深さ 300 feet - 600 feet (91 m - 183 m) の範囲にある。5点配置パターンを使っており、1

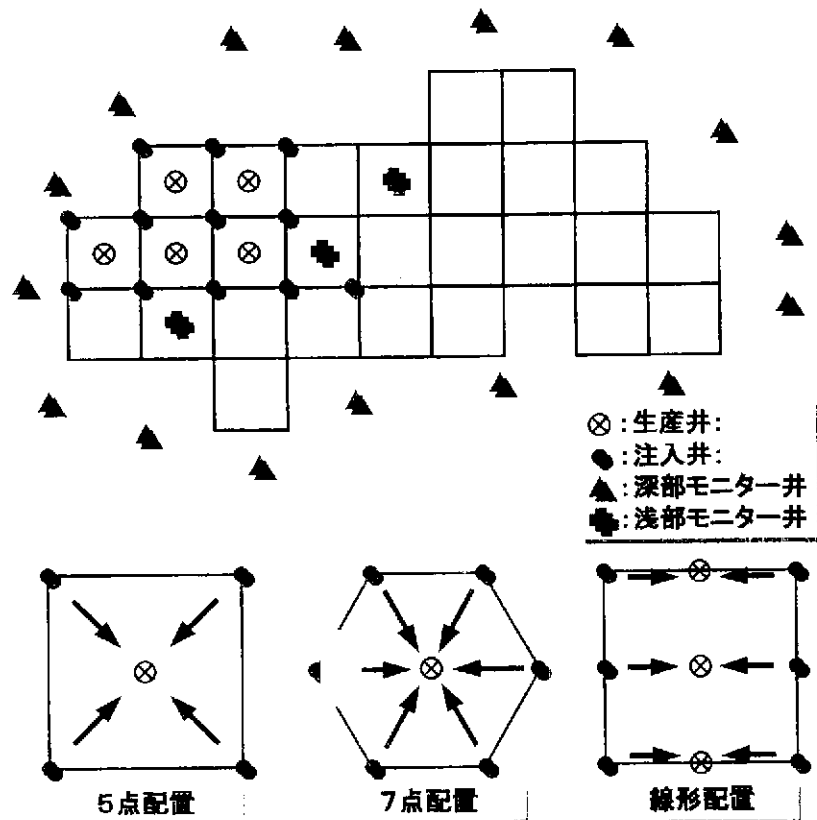


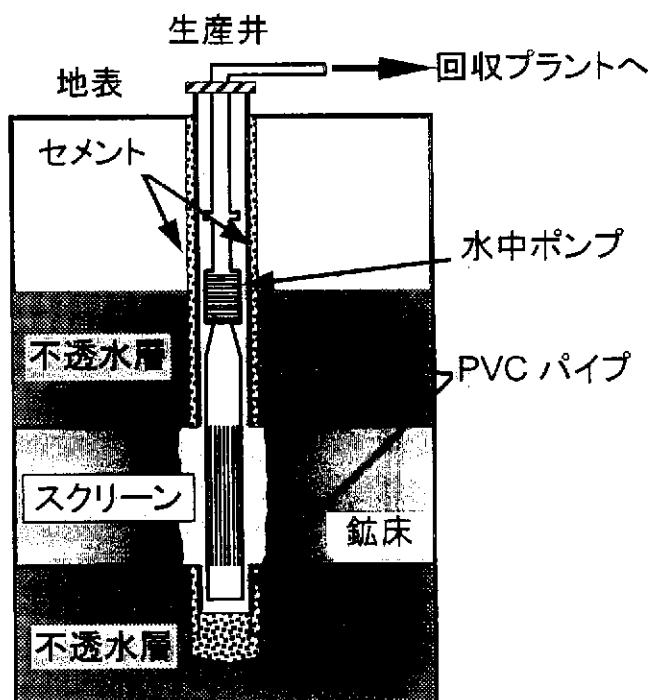
Fig. 2-9 砂岩中のロールフロント型ウラン鉱床と ISL 採鉱のための注入井・生産性・モニター井の配置 (水平断面図)

辺 85 feet (29.5 m) の正方形を一つのユニットとしている【Rowson, 1996】。

ネブラスカ州の Crow Butte 鉱山では、地表の地形も考慮して、坑井配置パターンを選択している。モニター井に関しては、採掘区域から 300 feet (91 m) 離れて、配置し、2 週間に一度サンプリングを行って、ナトリウムイオン・塩素イオン・硫酸イオンなどを測定している【Konde, 1996】。

Fig. 2-10 は、Highland 鉱山で使用している生産井の概略図である【Mining Magazine, 1991】。同鉱山は、 U_3O_8 の年間生産量が約 100 万ポンド (≈ 384.5 tU) であるが、深さ 120 m - 240 m の坑井を年間 300 - 500 本掘削しており、常時、20 乃至 30 の生産井 - 注入井が稼働している。直径 9.875 inches (242 mm) のボアホールを所定の深さまで掘削すると、ボアホールを検層して、鉱化帯の深さと厚さを正確に捉える。次に、孔壁崩壊を防ぎ、鉱化帯以外からの湧水の流入を防ぐためにケーシングを行うが、直径 5 inches (127 mm) のポリ塩化ビニールパイプ (Polyvinyl Chloride Pipe) をケーシングパイプとして挿入する。その後セメントをケーシングパイプと孔壁の隙間に充填して、養生を 24 時間待った後、鉱床部分を 11 inches (280 mm) まで拡孔して、ケーシングパイプ・セメントを切り取り、鉱化帯を露出させる。特許となっている縦にスロットが開いたスクリーンとバルブユニットを所定位置まで下ろし、スクリーンと拡孔した孔壁の間に砂礫を充填する。貴液の汲み上げには、直径が 4 inches (102 mm) で、5 - 10 馬力の水中ポンプを使用する。汲み上げた貴液は、他の生産井からのものと一緒に、パイプラインで、イオン交換樹脂による回収プラントに送られるが、冬季の凍結を防ぐために、パイプラインは地下 1.5 m に埋設されている。

Highland 鉱山では、新しい生産井からの U_3O_8 濃度は 250 - 400 ppm と高く (1,000 ppm



に達することもある)、また汲み上げ量も 95 - 130 liters/min (25 - 35 gallons/min) と多く、最初の2ヶ月で 25 - 30% が回収される。貴液の濃度は時間の経過とともに減少するが、通常、一つの5点配置ユニットは 12 - 24 ヶ月稼働して、最終的な実収率は 80 % となる。場合によっては、生産井と注入井を交換して、水流の向きを変え、実収率の向上を図ることもある。

5点配置のユニットが生産を終わるまでの間に、対象となる鉱体に含まれていた間隙体積の 50 - 80 倍に相当する水が循環されると言う。Highland 鉱山の場合、年間の U_3O_8 生産量は 100 万ポンドであるが、このために注入 - 汲上 - 処理される

Fig. 2-10 Highland 鉱山における生産井の概略

総水量は 15 億 gallons (568 万 m^3) を数える。生産に使用する水の化学的組成・pH を常にモニターして、調整し、インシチュ・リーチングプロセスの最適化を図るとともに、孔壁のスケーリングを予防し、膨潤性粘土の悪影響を抑制する。

Crow Butte 鉱山の坑井直径は 8 inches (203 mm) で、外径 5 inches (127 mm) — 内径 4.5 inches (114 mm) — のポリ塩化ビニールパイプをケーシングパイプに使用している【Konde, 1996】。坑井の深さが 1,000 feet (305 m) 以下では、PVC パイプは、ステンレスパイプやグラスファイバよりも経済的で、必要な強度を持っているためである。また、注入井のケーシングパイプとしても、十分、水圧に耐えることができ、化学的腐食にも強い。ケーシングが終わると、鉱化帯を横切るケーシング部分を回転する刃物で切り取り、砂岩層の表面も 1 inch (25 mm) ほど削り取り、その後、ステンレス製あるいはポリ塩化ビニール製のスクリーンを取り付け、パッカーにより固定する。エアリフトによって、坑井中に残っている掘削マッドや微粒子を取り除き、スクリーンの周辺に粗い砂粒子だけを残し、フィルターとして役立てる。Crow Butte 鉱山でも、生産井の貴液汲み上げには、直径 4 inches (102 mm) の水中ポンプを使用しているが、汲み上げ量は 20–50 gallons/min (76–189 liters/min) の範囲である。

Christensen 鉱山【Rowson, 1996】では、まず直径 127 mm のパイロットホールをまず掘削し、物理検層を行って、探査技師が有望か否かを判断する。有望と判断されると、直径 200 mm に拡孔し、直径 127 mm の PVC パイプをケーシングパイプとして挿入した後、ケーシングパイプと孔壁の間を、孔底から孔口に向かってセメントで充填する。物理検層で確認した鉱化帯の部分は、ケーシングパイプとセメントを切り取り、直径 267 mm に拡孔する。エアリフトまたは Swab によってボアホールを掃除し、ケーシングパイプに漏れがないかどうかをチェックする。1辺が 29.5 m の正方形をした 5 点配置パターンを使用しているが、約 35 本の生産井と 45 本の注入井が稼働している。個々の坑井と処理プラントの間はポリエチレンパイプで結ばれ、凍結防止のために地下 0.6 m に埋設されている。同鉱山では、より広い間隔の坑井配置パターンを試験しており、鉱体の形に応じた不規則坑井配置パターンも今後検討することになっている。

Christensen 鉱山では、重炭酸ソーダを浸出液に使用しているが、炭酸ガスを使って pH 調整を行った後、常に浸出液の $NaHCO_3$ 濃度を 1,700 ppm に保っている。注入井に圧力をかけて浸出液を注入するが、その時、網目が 1 μm であるフィルタを通し、微粒子が混入しないように注意している。生産井には、2–10 馬力の水中ポンプが取り付けられており、流量計・圧力計などによって、モニターされている。

常に、生産井からの貴液汲上量を、注入井への浸出液注入量よりも多く保っているが、これは、浸出液・貴液が外部に漏れ出さないようにするためである。このため、Highland 鉱山では、20 gallons/min (76 liters/min) 程度の水を循環使用しない。回収プラントではウラン回収後、循環使用するものは、酸素ガスと炭酸ガスを封入して、注入井に送る。全体の 1–3 % は、廃水にとけ込んでいるウラン・ラジウム・重金属・SS を取り除いて、飲料水としての基準に合格するまでに浄化して、深井戸に処分するか、管理された牧草地に散水している (Fig. 2-11)。

Christensen 鉱山では、ウラン回収プラントで発生した廃水を、遮水シートを内張りした

池に散水し、蒸発させる。その後、残った高濃度の廃水を地下 2,225 m まで掘削された深井戸に処分する。

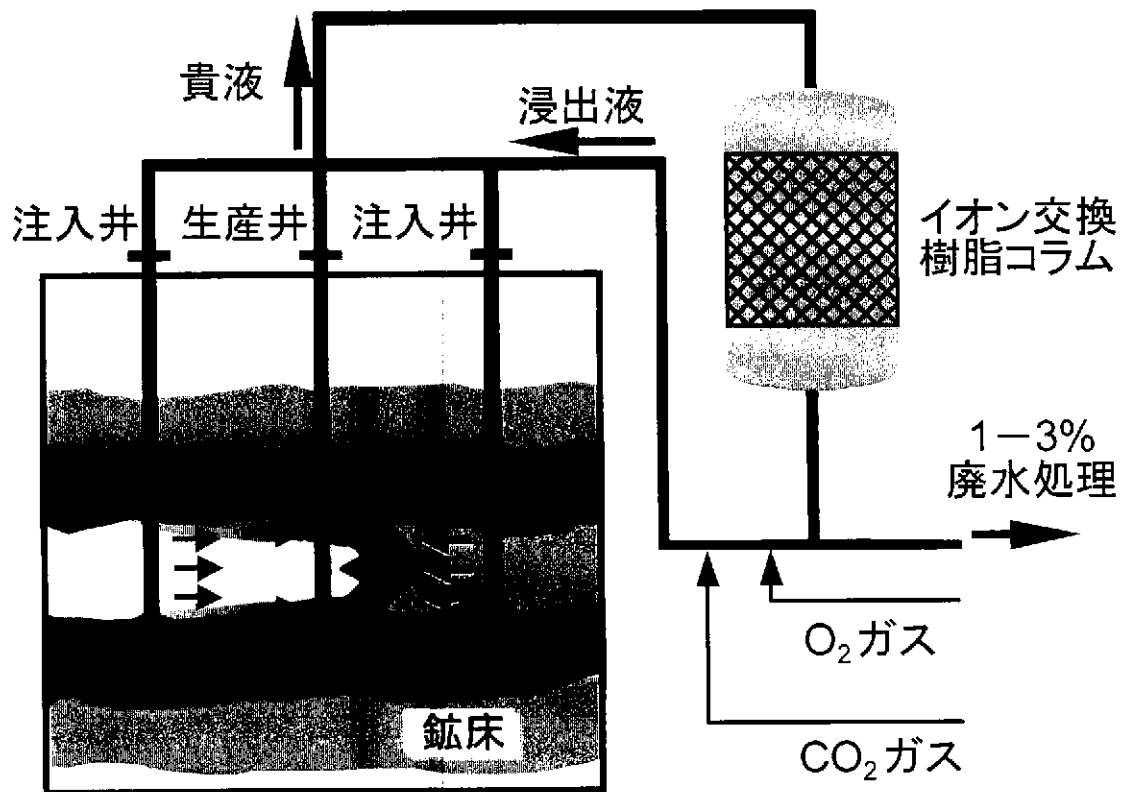


Fig. 2-11 Highland 鉱山における水循環【Wyoming Mining, 1997】

2.5 ISL 採鉱法と従来型採鉱法の比較

ISL 法によるウラン採掘は、従来法に比較して、次のようなメリットを有している。

- ✦ 周辺環境に対するダメージが少ない。露天掘採鉱を行うために、必要な場合には地表覆う森林を伐採し、地下水を汲み上げて地下水位を下げ、鉱床上部の表土・ズリを除去する。その上で、鉱石の採取を行うが、多くの場合、大きな窪地(ピット)を採掘跡として残すことになる。そのため、Fig. 2-12 に示されるように、採掘跡のピットを埋め戻す大規模なリクラメーションが必要となる。これに対して、ISL 採鉱法では、Fig. 2-5 の Highland 鉱山の



Fig. 2-12a ワイオミング州 Bear Creek 露天掘鉱山の採掘ピット【Wyoming Uranium, 1997】

航空写真に示されるように、操業中の環境・景観に対するダメージは極めて少なく、ズリ捨て場を確保する必要もない。

ISL 採鉱法の場合、固体廃棄物として、使い終わったイオン交換樹脂・処理プロセスで回収した残滓/スラッジなどが発生するので、1 ポンドの U_3O_8 採取にともなって、発生する固体廃棄物は 1-2 ポンドと見積もることができる【Cox & Roushey, 1979】。これに対して、ウラン鉱石の品位を 0.1 %と仮定して、1 ポンドの U_3O_8 を従来法の粗製錬 (Conventional Uranium Mill Processing) によって、処理したとすると、1,000 ポンドの廃滓 (Mill Tailings) が発生することになる。したがって、Fig. 2-13 の航空写真に示されるような従来法で必要とする、廃滓ダム (Tailings Impoundment) を作る必要がなくなる。

❖ 放射線被曝・大気汚染の可能性が低い。ISL 採鉱法では、作業員が直接、ウラン鉱石と接触することがなく、ウラン粉塵を吸入する危険性が少ない。また、粗製錬の過程も含まれないので、さらに放射線被曝の可能性が少なくなる。

❖ 従来法に比べ、低品位ウラン鉱床の経済的な採掘が可能である。Fig. 2-14 は、動燃事

業団が収集したウラン鉱山データを基に、採鉱法によって、操業コスト-鉱床規模の関係に特長が見いだされるか否かを明らかにするために作成したものである。現在、開発中・操業中の鉱山が対象となっているが、一般に、大規模な鉱床ほど、(操業規模が大きいので、スケールメリットが働き) 操業コストは安くなると期待され、事実、その



Fig. 2-12b リクレーションと緑化の終わったワイオミング州 Bear Creek 露天掘鉱山の採掘ピット【Wyoming Uranium, 1997】



Fig. 2-13 ワイオミング州で唯一つ現在も稼働している Sweetwater ウラン粗精錬所とその廃滓ポンド【Wyoming Uranium, 1997】

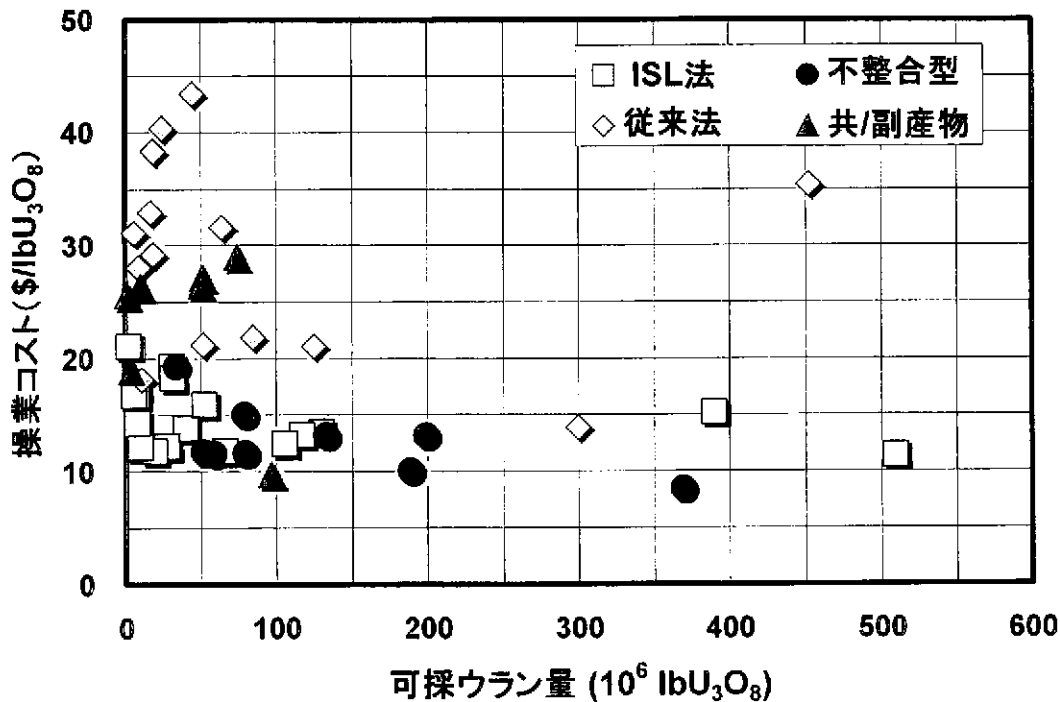


Fig. 2-14 操業コストと鉱床規模（可採ウラン量）の関係を採鉱法間で比較したもの。従来法には、露天掘と坑内掘の両者が含まれている。

傾向を Fig. 2-14 にも見ることができる。ISL 法の特長は、小規模な鉱床であっても、従来法に比べ操業コストが安いことであって、規模の小さな品位の低い鉱床であっても、採算がとれる可能性が高い。したがって、鉱床の特性が ISL 法に適していれば、低品位であっても採算ベースに乗った操業が可能となる。

- ✦ ISL 採鉱法は、従来型の採鉱法に比べ、開発期間が短く、起業費も少ない。これは、従来法の露天掘採鉱では、表土・ズリの先行剥土作業、ズリ捨て場の確保等を行う必要があり、従来法の坑内掘採鉱でも、立坑・斜坑等の開さく、切羽の開坑準備作業、運搬・巻上設備等を建設する必要があるためである。さらに、従来型採鉱法では、露天掘・坑内掘を問わず、破碎・摩鉱のための坑外設備、ウラン粗製錬のための設備、廃滓ダムの建設も必要となるが、ISL 採鉱法では、これらが不要となり、開発期間が短く、初期投資/起業費も少なくてすむ。
- ✦ Table 2-6 は、西側世界のウラン鉱山におけるコスト比較を行った一例であり、高品位ウラン鉱山と ISL 法ウラン鉱山のコスト内訳が示されている【Akin, 1997】。このように、ISL 採鉱法は、坑井掘削・薬品などの変動経費が占める比重が大きく、固定経費が少ない。そのため、従来法に比べ、柔軟な操業が可能であり、ウラン市況に応じて、生産量を調整し、場合によっては、一時操業を中断することもできる。

以上、従来型採鉱法に比べたとき、ISL 採鉱法が持つメリットを列挙したが、次章では、ISL 採鉱法の課題、特に、浸出液が与える地質環境汚染の可能性、終掘後の修復問題 (Remediation/Restoration) について考える。

Table 2-6 西側世界のウラン鉱山におけるコスト比較【Akin, 1997】

項目	高品位ウラン鉱山	ISL ウラン鉱山
初期投資 (\$/lb U ₃ O ₈)	20-30	15-20
操業コスト (\$/lb U ₃ O ₈)	5-10	5-10
中間投資 (\$/lb U ₃ O ₈)	~1	3-5
固定経費の割合	80 %	< 50%

これらには、探鉱費、オーバーヘッド/管理費、資金調達費、ロイヤリティ/Severance Taxが含まれていない。

参考文献

- Akin, H., 1997 : Contribution of in situ leach mining to “filling the gap” in uranium supply, Presented at the World Nuclear Fuel Market’s 24th Annual Meeting and International Conference on Nuclear Energy, June 1-3, 1997, Saskatoon (Canada)
- Cox, C. H. and Roushey, W. J., 1979 : Recovery of uranium by in situ solution mining, Mineral Industries Bulletin, Vol. 22, Number 1, pp.1-12
- Konde, R.H., 1996 : Crow Butte ISL uranium mine: well fields from design through operation, Proc. of IAEA Technical Committee Meeting on In Situ Uranium Mining, September 9-12, 1996, Almaty (Kazakstan)
- McMurray, J., 1995 : Kazakhstan’s alliances with western producers are key to its future, Focus, summer 1995, pp.3-13
- Mining Magazine, 1991 : Highland in-situ leach mine, Mining Magazine, pp.58-63
- Rowson, J., 1996 : The Christensen Mine ISL project summary, Proc. of IAEA Technical Committee Meeting on In Situ Uranium Mining, September 9-12, 1996, Almaty (Kazakstan)
- Wyoming Uranium, 1997 : <http://www.tcd.net/~wma/uranium/uranium.html>
- ウラン・トピックス, 1997 : 米国ウラン鉱業の現況, ウラン・トピックス(動燃事業団), 805号, 1997/09/16号。
- レッドブック 1995年版, 1996 : ウラン 1995 資源・生産・需要
- 池田 幸喜, 藤田 健司, 1997 : ウラン鉱山におけるインシチュ・リーチング採鉱法技術の紹介と生産の見通し, 資源・素材学会誌, Vol. 113, pp.424-429
- 動燃資源情報, 1993 : 米国における ISL ウラン採鉱の現状と将来展望, 動燃資源情報(動燃事業団), 1993/02/25号。

Table 2-1 世界のウラン鉱山(その1)

鉱山	状態	国	鉱床	埋蔵量 tU	品位 %U ₃ O ₈	採鉱法	生産能力 tU ₃ O ₈ /y	生産コスト \$/lbU ₃ O ₈
Blizzard	1	Canada	S	4,000	0.22	P	730	27.1
Calgary Phosphate	3	Canada	O	N/A	N/A	L ***	45	N/A
CigarLake	1	Canada	U	136,000	13.57	U	5,443	8.1
Cluff Lake	2	Canada	U	16,000	0.85	P/U	1,474	13.1
Dawn Lake	1	Canada	U	8,580	1.68	U/L ***	1,361	17.4
Denison	3	Canada	O	94,351	0.06	U	2,377 ****	27.8
Hornby	1	Canada	U	2,693 *	N/A	-	N/A	N/A
Key Lake	2	Canada	U	70,180	2.32	P	6,351	7.1
Kiggavik	1	Canada	U	15,510	0.55	P	1,588	19.6
Kitts Michelin	1	Canada	O	8,920	0.12	P/U	590	32.9
McArthur River	1	Canada	U	72,600	18.75	U	8,140	7.6
McClellan Lake	1	Canada	U	19,327	3.28	P/U	2,722	11.6
Midwest Lake	1	Canada	U	14,000	4.48	U	2,722	11.6
Panel	3	Canada	O	77,000	0.10	U	1,044 ****	27.8
Quirke	3	Canada	O	2,600	0.08	U	1,498 ****	27.8
Rabbit Lake	2	Canada	U	18,425	1.40	P/U	5,443	8.0
Sissons	1	Canada	U	19,300	0.53	U	1,588	19.6
Stanleigh	3	Canada	O	N/A	N/A	U	979	27.8
Angela	1	Australia	S	9,754 *	0.11	-	N/A	N/A
Ben Lomond	3	Australia	O	4,589	0.26	P/U	590	26.0
Beverley (Lake From)	1	Australia	S	13,732	0.27	L	450	13.7
Honeymoon	1	Australia	S	2,882	0.16	L	450	16.3
Jabiluka	1	Australia	U	79,385	0.45	U	3,002	7.7
Kintyre	1	Australia	U	30,516	0.28	P	1,213	12.0
Konngarra	1	Australia	U	11,450	0.68	P	1,345	10.0
Lake Way	1	Australia	O	3,052	0.10	P	N/A	26.1
Manyngee	1	Australia	S	3,393	0.10	L	N/A	15.0
Maureen	1	Australia	O	2,493 *	0.12	-	N/A	N/A
Mount Painter	1	Australia	O	28,211	0.06	-	N/A	N/A
Mulga Rock	1	Australia	S	13,000 *	0.10	P	N/A	N/A
Nabariek	3	Australia	U	11,837	1.91	P	1,500	3.5
Olympic Dam	2	Australia	O	294,991	0.07	U	3,000	8.5
Ranger	2	Australia	U	161,152	0.42	P	4,074 ****	10.5
Valhalla	1	Australia	S	10,348 *	0.10	-	N/A	N/A

Table 2-1 世界のウラン鉱山(その2)

鉱山	状態	国	鉱床	埋蔵量 tU	品位 %U ₃ O ₈	採鉱法	生産能力 tU ₃ O ₈ /y	生産コスト \$/lbU ₃ O ₈
West Moreland	1	Australia	N/A	8,812	0.21	-	N/A	N/A
Yeelirrie	1	Australia	O	44,503	0.15	P	2,501	18.1
Alta Mesa	1	USA	S	3,400	0.25	L	454	14.3
Arizona Strip (Blanding)	3	USA	O	5,000	0.59	U	1,946	17.3
Big Red	1	USA	S	6,800	0.20	L	454	15.1
Charlie	1	USA	S	4,000 *	0.17	L	448	17.3
Christensen Ranch/Irigary	2	USA	S	12,100 *	0.12	L	448	13.7
Church Rock	3	USA	S	5,700	N/A	L	354	7.9
Colorado Plateau (Uravan)	3	USA	S	14,200	N/A	U	802 ****	12.1
Crow Butte	2	USA	S	10,700	0.10	L	454	10.6
Crown Point	1	USA	S	3,800	0.11	L	590	18.2
Crown Mesa(Hosta Butte)	1	USA	S	5,002 *	0.04	L	N/A	N/A
Dewey Burdock	1	USA	S	2,400 *	N/A	L	N/A	13.9
Gas Hills (Power Resources)	1	USA	S	7,003 *	0.17	L	N/A	14.0
Grants (Homestake)	3	USA	S	2,810	0.17	U	N/A	16.0
Grants (Old Deposit Leaching)	3	USA	S	N/A	N/A	L ***	91	8.3
Grants Ambrosia Lake	2	USA	S	10,800	0.24	L/U ***	3,893	25.9
Green Mountain (Jackpot)	1	USA	S	16,100	0.35	U	1,770	20.4
Hansen	1	USA	S	7,700 *	0.07	L	N/A	25.5
Highland	2	USA	S	7,500	0.17	L	908	10.5
Hobsohn-Gruy Ranch	3	USA	S	300 *	0.08	L	448	N/A
Holiday/El Mesquite	3	USA	S	3,000	0.24	L	283	20.7
Jeffrey City	3	USA	N/A	4,500 *	0.17	U	1,770	18.2
Kingsville Dome-Rosita	2	USA	S	1,884	0.14	L	908	10.3
Leuenberger	1	USA	S	1,900 *	0.08	L	590	16.6
Lucky Mac	3	USA	S	4,500	0.10	P/U	908	35.4
Midnite (Ford)	3	USA	S	300 *	0.09	P	236	N/A
Moore Ranch	1	USA	N/A	1,600 *	0.10	P	N/A	32.0
Mt. Taylor	3	USA	S	4,600 *	0.25	U	731 ****	N/A
New Wales - Plant City Florida	3	USA	O	19,200	0.01	P	1,003	19.9
North Butte and Ruth (Christensen Ranch)	3	USA	S	4,000	0.24	L	271	17.4
Panna Maria - Rhode Ranch	2	USA	S	2,700	0.26	P	708 ****	9.1
Plant City	3	USA	O	12,800	0.03	P	1,180	16.8
Red Desert PNC	1	USA	S	3,066 *	N/A	L	N/A	N/A

Table 2-1 世界のウラン鉱山(その3)

鉱山	状態	国	鉱床	埋蔵量 tU	品位 %U ₃ O ₈	採鉱法	生産能力 tU ₃ O ₈ /y	生産コスト \$/lbU ₃ O ₈
Red Desert/East Shirley Basin	1	USA	S	11,312 *	N/A	L	N/A	14.1
Reno Creek	1	USA	S	2,300 *	N/A	L	N/A	15.7
Reynolds Ranch	1	USA	S	3,155 *	N/A	L	N/A	N/A
Rosita	2	USA	S	2,310	N/A	L	590	10.0
Ruby Ranch	1	USA	S	1,200 *	0.14	L	908	17.9
Ruth	1	USA	S	1,400	0.20	L	115	20.4
Schwartzwalder-Canon City	1	USA	S	5,420	0.25	U	731	22.3
Sheep Mountain	3	USA	S	15,400	0.24	U	50 ****	17.5
Sherwood	3	USA	S	4,200	0.09	P	165 ****	28.4
Shirley Basin	3	USA	S	5,500	0.17	P	354 ****	27.3
Shooting Canyon	3	USA	S	6,500	0.12	U	448	33.0
Smith Ranch	2	USA	S	15,384	0.15	L	118	12.2
Sunshine Bridge - Uncle Sam	2	USA	O	10,740	0.01	P	543	18.8
Sweetwater	3	USA	S	8,000	0.05	P	646 ****	20.7
Ticaboo - Shooting Canyon	3	USA	S	6,500	N/A	U	N/A	26.7
West Cole	3	USA	S	200 *	0.04	L	94	25.0
West Colorado	3	USA	S	5,420	0.29	P	908	N/A
West Largo	1	USA	N/A	3,900 *	0.13	U	N/A	28.6
Western Slope	1	USA	N/A	3,900 *	0.31	-	731	23.2
White Mesa (Blanding) - Arizona Strip	3	USA	O	5,000	0.59	U	972 ****	10.4
White Mesa (Blanding) - EZ	1	USA	O	1,900	N/A	U	N/A	11.4
White Mesa (Blanding) - SAGE	1	USA	O	1,150	N/A	U	N/A	11.4
White Mesa (Blanding) -Colorado Plateau	3	USA	S	14,200	0.29	U	802 ****	12.1
Hogger	1	Algeria	N/A	26,915 *	0.09	-	N/A	34.6
Bakouma	1	Central Africa	O	4,681 *	0.24	P	637	54.7
Oklo/Mounana	2	Gabon	S/U	15,860	0.53	P/U	1,770	31.3
Langer Heinrich	1	Namibia	O	32,000 *	0.40	P	N/A	27.8
Rossing	2	Namibia	O	88,500	0.04	P	4,719	11.4
Abkrourum	1	Niger	S	8,000	0.24	P/U	661	40.0
Afasto	1	Niger	S	25,000	0.25	U	2,359	28.1
Akouta	2	Niger	S	37,000	0.50	U	2,359	21.1
Arlit/Arini (SMTT)	2	Niger	S	32,000	0.29	P	1,770	21.6
Imouraren	1	Niger	S	60,000	0.06	P	3,539	31.2
Madaouela	1	Niger	S	4,385 *	0.16	U	354	21.7

Table 2-1 世界のウラン鉱山(その4)

鉱山	状態	国	鉱床	埋蔵量 tU	品位 %U ₃ O ₈	採鉱法	生産能力 tU ₃ O ₈ /y	生産コスト \$/lbU ₃ O ₈
Buffelsfontein	3	RSA	O	N/A	0.04	U	354 ****	13.6
Ergo	3	RSA	O	N/A	0.05	L ***	173 ****	14.0
Freegold Joint Metallurgical Scheme	3	RSA	O	N/A	0.05	L ***	444 ****	22.6
Hartebeestfontein	2	RSA	O	5,000 *	N/A	U	413	16.0
Palabora	2	RSA	O	6,000 *	0.00	P	206	100.0
Vaal Reefs	2	RSA	O	37,259 *	0.05	U	1,770	8.7
Western Areas	2	RSA	O	23,600 *	0.02	U	295	15.3
Kanyemba	1	Zimbabwe	S	1,814 *	0.70	U	N/A	17.0
Bernarardan	2	France	O	4,920	0.50	P/U	554	23.0
La Crouzille	2	France	O	1,600	0.24	P/U	1,085 ****	26.5
Mas Laveyre	2	France	S	1,823	0.24	P/U	1,180 ****	21.9
Vendee	3	France	O	6,500	0.17 **	P/U	201 ****	26.2
Nisa	1	Portugal	O	2,120	0.11	P	189	26.5
Urgeirica	2	Portugal	O	N/A	0.34	P/U/L ***	201	31.2
Saelices el Chico	2	Spain	O	7,620	0.07	P/U	944	18.845
Cierro Solo	?	Argentina	S	2,330 *	0.40	L	N/A	N/A
Sierra Pintada	1	Argentina	S	12,900	0.10	P	77	35.0
Gandarela	1	Brazil	O	2,000	0.02	-	N/A	N/A
Itataia	1	Brazil	O	121,000	0.47	P	300	30.8
Lagoa Real	1	Brazil	O	79,000	0.29	P/U	250	18.1
Pocos de Caldas	1	Brazil	O	23,000	0.12	P	501	30.8
Crossen Aue	3	Germany	O	88,494	0.47	U	3,192	40.3
Crossen Pohla	3	Germany	O	6,541	N/A	U	N/A	40.3
Seelingstadt Gera/Ronneburg	3	Germany	O	200,073	0.10	P/U	389	54.7
Seelingstadt Koningstein/Elbsandsteingebirge	3	Germany	S	23,855	0.72	U/L ***	N/A	54.7
Zirovskivrth	3	Slovenia	S	17,500	0.08	U	64 ****	48.7
Dolnirozinka Rozna	3	Czech	O	20,000	0.40	U	N/A	36.3
Hamr	3	Czech	S	N/A	0.18	U	295 ****	24.3
Pribram	3	Czech	O	39,614	0.50	U	183 ****	21.2
Straz	3	Czech	S	3,800	0.08	L	472 ****	11.8
Zadni Chodov	3	Czech	O	6,700	0.24	U	342	38.8
Pecs Mecsek	2	Hungary	S	2,154	0.13	U	636	31.8
Apuseni	?	Romania	S	19,000	N/A	U	N/A	45.4
Banatului	?	Romania	O	N/A	N/A	U	N/A	45.4

Table 2-1 世界のウラン鉱山(その5)

鉱山	状態	国	鉱床	埋蔵量 tU	品位 %U ₃ O ₈	採鉱法	生産能力 tU ₃ O ₈ /y	生産コスト \$/lbU ₃ O ₈
Eastern Carpathian	?	Romania	O	N/A	N/A	U	N/A	45.4
Bukhovo	3	Bulgaria	O	7,500	0.66	U/L ***	N/A	39.0
Elesnica	3	Bulgaria	S	10,000	N/A	P/U	N/A	39.0
Plovdiv	3	Bulgaria	S	15,000	0.08	L	N/A	39.0
Zholtye Vody	?	Ukraine	O	6,750	0.14	U	826	23.5
Central	2	Kazakhstan	S	50,000	0.04	L	1,180	13.5
Inkay	1	Kazakhstan	S	104,000 *	0.04	L	2,501	13.5
Moyunkum(KATKO) No.6	1	Kazakhstan	S	82,500 *	0.05	L	826	13.5
Shevchenko/Aktau	2	Kazakhstan	S	196,000 *	0.06	L	708	11.4
Stepnoye	3	Kazakhstan	O	64,000	0.05	P	1,180	35.4
Stepnoye	2	Kazakhstan	S	45,000 *	0.04	L	1,180	13.4
Tselinny/Stepnogorsk	2	Kazakhstan	O	57,900	0.10	U	2,949	11.0
Nurabad	2	Uzbekistan	S	27,000	0.51	L	944	11.8
Uchkuduk	2	Uzbekistan	S	60,600	0.04	L/P/U	1,239	15.9
Zafarabad	2	Uzbekistan	S	42,400	0.26	L	1,416	12.4
Zaravshan	3	Uzbekistan	S	40,600	N/A	U	236 ****	50.9
East	3	Kirgistan	N/A	N/A	N/A	U	N/A	94.1
Karasaiskoye	3	Kirgistan	N/A	N/A	N/A	P	N/A	54.9
West	3	Kirgistan	N/A	N/A	N/A	U	N/A	74.6
Aldan	?	Russia	O	175,000	0.17	-	N/A	N/A
Central Transbaykal	1	Russia	O	20,000	0.24	U/L ***	N/A	N/A
Chupa	?	Russia	N/A	N/A	N/A	-	N/A	N/A
Far East (Amur)	1	Russia	O	4,000	0.45	P	N/A	N/A
Lovozero Tundra	?	Russia	N/A	N/A	N/A	-	N/A	N/A
Onezshk	1	Russia	O	2,900	0.08	U	N/A	N/A
Priargunsk	2	Russia	O	119,200	0.47	P/U	4,129	13.0
Siyudyanka	?	Russia	N/A	N/A	N/A	-	N/A	N/A
Vihorevka	?	Russia	N/A	N/A	N/A	-	N/A	N/A
Vitimsk	1	Russia	S	65,000	0.08	L	N/A	N/A
Yeniseisk	?	Russia	N/A	7,600	0.25	-	N/A	N/A
Zauralsk	1	Russia	S	24,000	0.04	L	590	5.0
Benchi(本溪)	2	China	O	N/A	N/A	U	142	20.0
Chanziping	1	China	O	5,000	0.12	-	N/A	N/A
Chenxian	2	China	O	5,000	0.12	P/U	136	17.5

Table 2-1 世界のウラン鉱山(その6)

鉱山	状態	国	鉱床	埋蔵量 tU	品位 %U ₃ O ₈	採鉱法	生産能力 tU ₃ O ₈ /y	生産コスト \$/lbU ₃ O ₈
Lantian (藍田)	2	China	O	2,000 *	N/A	U	118	20.0
Lianshanguan (連山関)	1	China	U	3,500	0.59	-	N/A	N/A
Qinglong (青龍)	1	China	O	7,875	0.19	U	363	17.5
Tengchoung (騰冲)	2	China	S	6,000 *	N/A	L	22	12.5
Xiangshan (相川)/Fuzhou (撫州)	?	China	O	26,000	0.29	P/U	354	17.5
Xiazhuang (下庄)/Chongyi (崇義)	2	China	O	12,000	0.12	P/U	142	22.5
Yining (伊寧)	2	China	S	N/A	0.06	U/L	118	20.0
Dornod	3	Mongolia	N/A	28,265	0.21	P/U	227	30.8
Gurvanblag	1	Mongolia	O	10,270	0.22	-	N/A	N/A
Haraat	1	Mongolia	S	7,956	0.04	L	236	15.4
Mardaingol	1	Mongolia	N/A	1,104	0.14	-	N/A	N/A
Nars	1	Mongolia	S	50,000	N/A	-	N/A	N/A
Nemer	1	Mongolia	N/A	2,528	0.17	-	N/A	N/A
Ulaan	2	Mongolia	N/A	270	0.13	-	N/A	N/A
Bhatin	2	India	O	N/A	N/A	U	N/A	23.5
Domiasat	1	India	N/A	8,500 *	0.40	-	N/A	17.5
Jaduguda	2	India	O	47,600	0.07	U	236 ****	23.4
Narwapahar	1	India	O	N/A	N/A	U	N/A	23.5
Turamdih	1	India	O	2,690	0.04	U	N/A	25.0
Dera Ghazi Khan	2	Pakistan	N/A	N/A	N/A	P/U	59	N/A
Issa Khel	1	Pakistan	S	N/A	N/A	L	47	N/A
Binh Duong	1	Vietnam	O	N/A	N/A	P	N/A	N/A
Nong-Son	1	Vietnam	S	5,000	N/A	P	N/A	N/A

1: 探鉱中/計画中/審査中 U: 不整合関連型 * : 可採U量 **: 粗鉱品位 ***: 二次回収 ****: 実績値
 2: 操業中 S: 砂岩型
 3: 閉山/休山中/修復中 O: その他

3. ISL 採鉱法の課題

ISL 採鉱法は、従来法に比べ、周辺環境に対する影響が少なく、開発に要する期間が短くて起業費が安く、しかも操業コストが低廉であるなど、特に低品位の砂岩型ウラン鉱床の採鉱法として、非常に魅力的なものである。

しかし、ISL 採鉱法は、実収率の見積あるいは予測が難しいので、資源保護の立場からも、高品位ウラン鉱床の採掘には使われていない【Cox & Roushey, 1979】。今後、ISL 法鉱山の最適設計を行うためにも、ISL 採鉱法の実収率を合理的に予測し、評価する手法の開発が望まれる。

ISL 鉱山は、従来法に比べ、周辺環境に対する操業中の環境負担・環境汚染が少なく、ズリ処分場・廃滓ダムも必要としない。したがって、閉山後のリクレーションに要するコストも少ないものと考えられ勝ちである。しかし、リーチングによって溶けだした物質の拡散を防ぎ、地下水の水質と水位を操業前の状態に戻すための修復作業 (Remediation あるいは Restoration) を必要とする。そのためのコスト負担も問題であるが、地下水の汚染拡散を防ぎ、地下水の水質と水位を操業前の状態に戻すことに関して、いくつかの技術的課題も残している。

アメリカ合衆国の ISL 法ウラン鉱山は、連邦政府・州政府の厳しい環境規制の下、閉山後の修復作業を行うことが義務づけられている。一方、膨大な ISL 法適用可能鉱床を抱える南カザフスタンなどの中央アジアの ISL 法ウラン採掘では、いままで、本格的な修復作業が行われていない【McMurray, 1996】。また、これら中央アジアの ISL 法ウラン鉱山では、浸出液として、アメリカでは使用が認められない硫酸を使用しており、地下水汚染の問題はより深刻である【McMurray, 1995】。

以下では、ISL 法ウラン鉱山における閉山後の修復作業の実際を、アメリカ合衆国ワイオミング州のウラン鉱山について解説し、カザフスタンにおける今後の ISL 法採鉱の課題について考える。

3.1 ISL 採鉱法ウラン鉱山の修復作業

ウラン鉱床が存在する地質環境下の地下水はそもそも、自然状態でラジウムを高濃度に含んでいるという理由で、操業の終わった鉱床をそのままに放棄してよいものではない。地下水の状態を、操業以前の状態に戻すため、リーチングの終わった鉱床の洗浄が要求される。鉱床に残った炭酸塩類や残留ウランは比較的容易に洗浄することができるが、浸出液にアンモニウム浸出液を使用した場合、粘土鉱物がアンモニウム塩を吸着し、これをイオンの形で溶脱させることが難しい。一般に、アンモニウム塩はゆっくりと溶脱し、溶脱したアンモニウム塩濃度は低く有害とは見なされなくても、アンモニウム塩が分解して硝酸塩を作る危険性が存在する【Cox & Roushey, 1979】。

炭酸ソーダあるいは重炭酸ソーダを浸出液に使っている Highland 鉱山【Mining Magazine, 1991】・Christensen 鉱山【Rowson, 1996】で予定されている修復作業は次のようなものである。

Highland 鉱山では、貴液のウラン品位がカットオフ品位以下に低下すると、酸素ガス・炭酸ガスの注入を止める。その後、“Groundwater Sweep”と呼ばれる第1段階を行って、

地下水を汲み上げ、残留ウランをイオン交換によって除去する。次に第2段階では、地下水中の重金属や全溶解物 (TDS: Total Dissolved Solid) の濃度を下げるために、逆浸透 (Reverse Osmosis) を使用する。これら両段階の修復作業が終了した後、安定するまで水質の観測を続け、監督官庁の検査を受ける。検査に合格すると、坑井を閉塞し、ポンプ・配管設備などを撤去して、地表をならし、緑化を行う。予定では、採掘終了後、4-5年で修復作業が完了することになっている。Fig. 3-1 と Fig. 3-2 は、地下水修復作業の第1段階と第2段階の概略を示すものである。また、Fig. 3-3 はワイオミング州の ISL ウラン鉱山で実際に使われている灌漑設備で、汚染物質を回収した後の清水を使って穀物の栽培を行っている (処理水を灌漑などに使用することを“Land Application”と呼んでいる)。

地下水を汚染する原因物質としては、滲出液に含まれているナトリウム・重炭酸塩・酸素・塩素と、ウランとともに地層から溶けだした硫酸塩・種々の金属酸化物などがある。閉山後の地下水修復によって、これらの化学的物質が操業以前のベースラインレベルに戻ることが要求される。Cristensen 鉱山周辺地域の地下水は州政府によって飲料水に適した水質と分類されており、Highland 鉱山と同様、Christensen 鉱山でも、Groundwater Sweep と呼ばれる第1段階と逆浸透法を使った第2段階から成る修復プランが検討されている。

第1段階の Ground Sweep では、修復対象となっている地層に含まれる全孔隙体積に相当する地下水を汲み上げることになっている。この段階では、汲み上げた地下水を再び地下に戻さない。地下水中の汚染物質を直接除去するだけでなく、周辺から汚染されていない地下水が流れ込むので、TDS 濃度は減少する。予定されている汲上量は 68

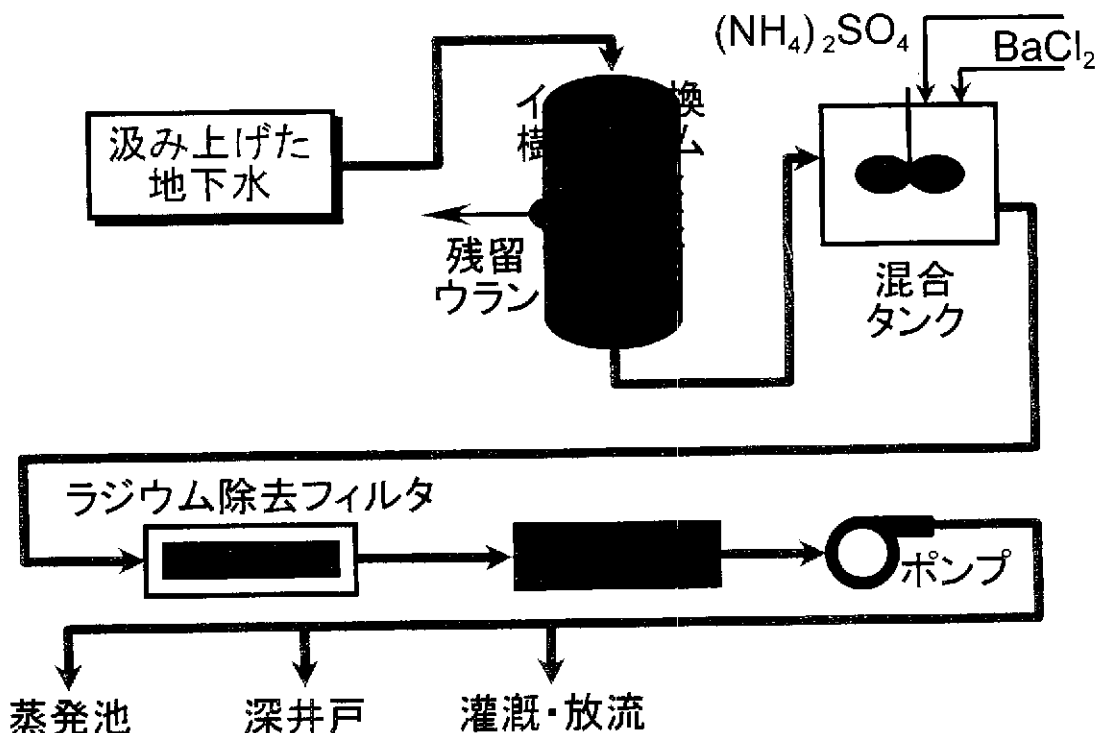


Fig. 3-1 地下水修復の第1段階である“Ground Sweep”のフローシート【Wyoming Mining, 1997】

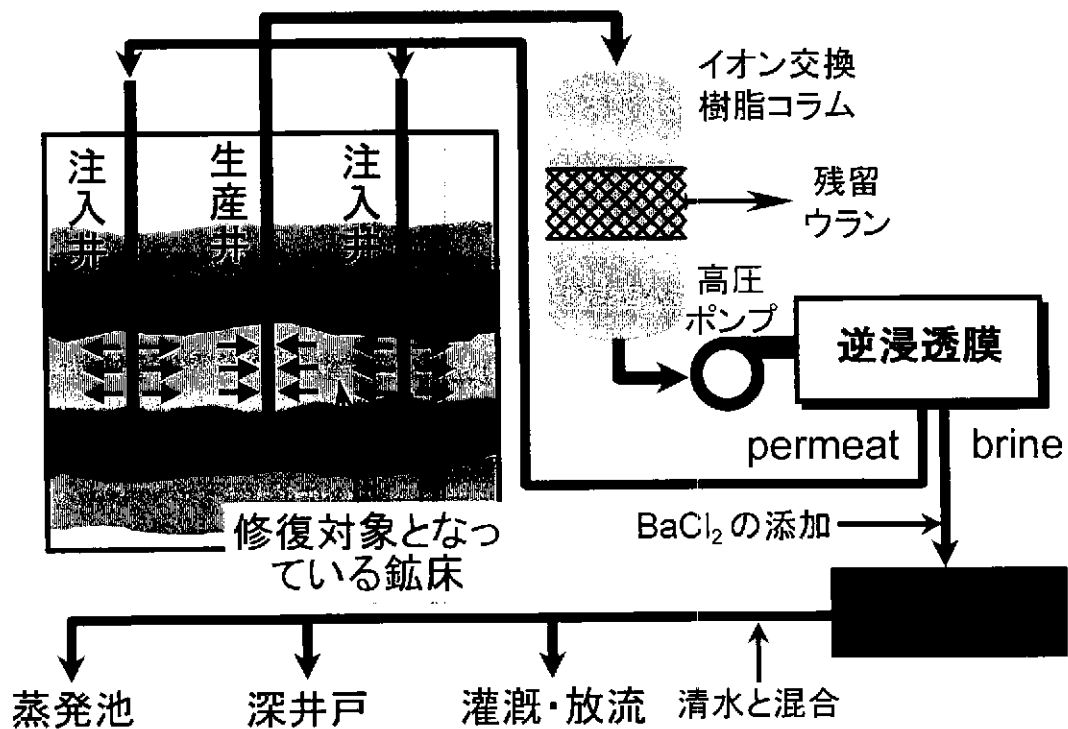


Fig. 3-2 地下水修復の第2段階である“Water Treatment with Reverse Osmosis”のフローシート【Wyoming Mining, 1997】



Fig. 3-3 ワイオミング州のISLウラン鉱山で実際に使用されている処理済み廃水を使った灌漑設備と農場【Wyoming Mining, 1997】

m³/h (300 gpm) であり、ウランおよびラジウム 226 を取り除いた後、汲み上げた地下水は、蒸発池または深井戸で処分する。

次の第2段階では、全孔隙体積の5倍に相当する水を循環させ、汲み上げた水に含まれている汚染物質を逆浸透法によって取り除く。pH 調整後、汲み上げた地下水をアセチルセルロース (Cellulose Acetate) を素材とする膜に、高圧で逆浸透させると、金属を含む TDS の 90-95 % を効果的に取り除くことができる。水質にもよるが、逆浸透膜を通過した清水 (Permeate) と通過できなかった高濃度の塩水 (Brine) の比率は、70:30 から 90:10 の範囲である。逆浸透法によって濾過された清水は、修復対象の砂岩層に再び注入されるが、第2段階における循環水量は、114 m³/h (500 gpm) と予定されている。またこのとき、還元剤として硫化水素あるいは硫酸ソーダを添加して、清水とともに地下に注入することを考えている。これは注入水中の酸素を取り除き、操業中は酸化環境にあった砂岩層を還元環境に戻すことが目的である。還元環境下では、ウランをはじめ、砒素・セレンウム・バナジウムなどの元素は非溶性である。しかし、酸化剤として酸素を注入した操業期間中に、これらが溶け出すので、操業の終わった修復時には、地下水を再び還元環境に戻して、これらの元素が溶け出さないようにする。短期間の内に、修復を完了するには、還元剤使用が有効と考えられている。第2段階の修復作業が完了した後も、1年間の間、月に1回、地下水のサンプリングを行って、水質の安定化を確認し、州政府と連邦政府所属の監督官庁の承認を待つ。

地下水の修復が完了したという監督官庁の承認を得た後、1年以内に、リクレーションを行う。回収プラント・蒸発池・深井戸・道路・パイプラインなどを処分し、整地して、植林・緑化を行う予定である。

3.2 カザフスタンにおける ISL 採鉱法の課題

第2章で述べたように旧ソビエト連邦に属していた中央アジアのカザフスタン・ウズベキスタンなどには、ISL 採鉱法に適した低品位の砂岩型鉱床が多数存在している。カザフスタンにおけるウラン生産の推移を ISL 鉱山についてまとめたものが、Table 3-1 である。Akin (1997) によると、カザフスタンは歴史的に見れば、年間 700-800 万ポンドの U₃O₈ を生産してきたが、ソビエト連邦崩壊/市場経済導入に伴う経済的混乱と従来型ウラン鉱山を閉山したことにより、年間ウラン生産量は 300 万 U₃O₈ ポンド以下に減少した。カザフスタン政府が 51 % の株を保有する KATEP —— 独立後の 1992 年に Kazakh State

Table 3-1 カザフスタンにおける ISL 法によるウラン生産【動燃資源情報, 1996】

鉱山名	鉱床区	生産量 (tU)					粗製錬所の能力 (tU/y)
		1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	
Stepnoye	Chu-Sarysu	N/A	800	700	700	845	1,000
Central	Chu-Sarysu	N/A	600	500	500	530	800
No. 6	Syr-Darya	N/A	400	400	300	390	800
Tselinny*	Kokchetav	N/A	600	800	800	475	2,000
カザフスタン全体		3,700	3,200	2,800	2,700	2,240	5,600

*Tselinny 鉱山は坑内掘鉱山

Atomic Power Engineering and Industry として設立され、1995 年に組織改革を行い National Joint-Stock Company of Atomic Energy and Industry と改称したが、略称の KATEP をそのまま使用【McMurray, 1995】—— が、西側ウラン生産会社 (Cameco/Uranerz グループ、Cogema 社など) と提携して、古い鉱山の再開・新鉱床の開発を目指している。中でも、Cameco/Uranerz グループとの Inkai/Mynkuduk プロジェクトと、Cogema との Muyunkum プロジェクトの新規鉱山開発には、いずれも高い生産性と強い経済競争力を持った ISL 法ウラン鉱山の誕生が期待されている。ウズベキスタンの Kyzylkum 砂漠には有望な砂岩型ウラン鉱床が存在しており、国有会社の Navoi がウズベキスタン内のウランを全て生産している。今後、ウズベキスタンの年間 U_3O_8 生産は 400–500 万ポンドと予想され、しかも、ウラン生産は全て ISL 採鉱法によって行われる。2000 年には、カザフスタン・ウズベキスタンにおける ISL 法ウラン生産は 1,200 万 U_3O_8 ポンドを越えるものと予想されている【Akin, 1997】。

Table 3-2 は、動燃事業団が行った ISL 法ウラン鉱山のカザフスタン現地調査結果をまとめたものである【武内, 1996】。現在操業中の ISL 法ウラン鉱山は 3 箇所あり、いずれも硫酸を浸出液に使用している。Stepnoye 鉱山は 1970 年に ISL 法のテストを行った。旧ソビエト連邦の中で最も早く ISL 法を本格的に採用し(1978 年)、調査時点では、20,000 tU あった埋蔵量の約 75 % が採取済みであった。鉱床を胚胎する砂岩層の透水係数は 3–15 m/day であって、水温は 18°C、注入井 800 本、生産井 400 本を使って操業を行っている。No.6 鉱山が所在する Syr Darya 地域の鉱床は、胚胎深度が 400–600 m と深い、平均品位が 0.065–0.07 %U と高く(局部的には 5 %U に達する)、水温が 42°C でウラン溶脱速度が大きく、ISL 法には有利であると考えられている。No.6 鉱山は、年間 100–120 本の坑井を掘削し、400–600 本の坑井が稼働している。調査報告を要約すると次のようなものとなる。

- (1) Chu-Sarysu 地域のウラン鉱床は、ウズベキスタン Kyzylkumsky 地域の鉱床に比べ、深度がやや浅く、平均品位が低い。これに対して、Syr Darya 地域の鉱床は、深度

Table 3-2 カザフスタンにおける ISL 法ウラン鉱山の生産データ【武内, 1996】

鉱山名 (鉱床名)	ISL 法 開始年	資源量* (tU)	品位 (%U)	深さ(m) 厚さ(m)	坑井間 隔**(m)	硫酸濃度 (g/liter)	注入量 (m ³ /h)	生産量 (m ³ /h)	貴液品位 (ppm)
Stepnoye (Uvanas)	1978 年	5,000	0.035– 0.04	90–120 5–15	60	6–30	1–1.5	2–4	N/A
Central (Kanzhugan)	1983 年	50,000	0.03	90–250 1–15	50	3–30	2–2.5	4–5	40–60
No.6 (N. Karamurum)	1979 年	22,000	0.065– 0.07	400–600 6	N/A	N/A	N/A	3–20	100

* 確認資源量 (RAR) 【動燃資源情報, 1996】より

** 生産井列と注水井列の間隔 — 生産井間の間隔は Stepnoye 鉱山では 20 m、Central 鉱山では 25 m。注入井間の間隔は Stepnoye 鉱山では 15 m、Central 鉱山では 11–15 m。

- が 450–600 m と深いものの、平均品位が 0.06–0.07 %U とやや高く、しかも砂岩層の透水性が良く、地下水温が高いので、ウランの滲出効率良好と見られる。
- (2) 鉱床の規模が大きく、探査が十分に行われていないので追加ウラン資源発見の可能性が高いと期待できる。しかし、地形が平坦で、鉱床胚胎層の露頭が無い限り、地表調査に多くを期待することができない。また、重力・弾性波・電磁気・放射能による物理探査によって、鉱床を胚胎する透水性砂岩層中の酸化帯–還元帯境界を発見することは難しい。試錘孔の物理検層・コアの地球化学的/鉱物学的調査によるウラン品位と層準の追跡が探査の基本とされている。
 - (3) 資材・生活物資などを長距離トラック輸送に頼る鉱山もあるが、生産コストにこれらの経費が含まれているか疑問である。また、内陸国であるため、海外に製品を輸出するには、ロシアの鉄道・港湾を利用せざるを得ず、輸送の安定性と輸送費の高騰が懸念される。
 - (4) 報告されている資源量はきわめて多いが、カットオフ品位が考慮されていない資源量と推定されている。米国における ISL 法操業の経験に基づいて、カットオフ品位を設定して厳密に再評価すると、資源量は発表されたものの 1/2–1/3 と言われている。ISL 法の採掘実収率が、60–120 % とカザフスタンの鉱山は説明したが、埋蔵量評価にカットオフ品位を考慮していないために、実収率として 100 % を越える数字が出て来たと考えられる。
 - (5) 社会主義時代の非効率なシステムが残っており、経済的な混乱が、生産体制にも悪影響を残している。ISL 法鉱山の諸設備の管理状態も良好とは言えず、設備稼働率は 50–60 % と推定される。しかし、今後、適切な生産体制を整えば、カナダ・オーストラリアに続く世界第3位のウラン生産国となる可能性を秘めている。

McMurray (1995) は、カザフスタンの Chu-Sarysu 地区にある ISL 法ウラン鉱山 Stepnoye を訪問して、操業の様子を次のように報告している。Uvanas 鉱床は、延長 37 km、幅 100–250 m、深さ 90–120 m、厚さ 5–7 m であって、 U_3O_8 品位は公表されていないが IAEA の推定によると 0.02–0.06 % U_3O_8 である。Stepnoye 鉱山の関係者は、Uvanas ロールフロントに沿って鉱床が連続であると説明したが、ワイオミング州の Powder River 盆地のウラン鉱床と同様、鉱化作用自身は連続であっても、カットオフ品位を越える鉱床部分は不連続であって、西側諸国が使っているカットオフ品位の考え方をあてはめると、埋蔵資源量は大幅に減少するものと予想している。坑井の配置はいわゆる線形配置であって、生産井の列と注入井の列を繰り返すパターンである。生産井列と注入井列の間隔は 25–60 m であり、注入井間・生産井間の間隔は 12–25 m であって、注入量は平均 11 gpm (2.5 m³/h)、貴液生産量は 18 gpm (2.7 m³/h) であった。坑井の掘削は、パイロットホールを掘削せず、最初から最終寸法の坑井 (直径 210 mm) を掘削するというもので、生産井には直径 160 mm のポリエチレンパイプをケーシングパイプに使用し、注入井には直径 90 mm のものを使用している。鉱化帯部分は、ケーシングパイプに、幅が 1.2–1.5 mm の縦のスロットを何本も刻んでスクリーンとしている。カザフスタンの他の ISL 鉱山と同様硫酸を浸出液に使用しているが、その濃度は 2–5 g/liter と推定され、300 km のトラック輸送によって搬入される。直径 4 インチの水中ポンプによって貴液を汲み上げ、

回収プラントの近くに設けられた、粘土層・ポリエチレンシート・砂礫層・アスファルトによって多層に内張された池まで、直径 500 mm のステンレスパイプを通じて流送される。しかし、ポンプの能力に限りがあるので、Uvanas 鉱床近くに新しい回収プラントを建設する計画を検討している。ISL 法の実収率について、Stepnoye 鉱山の関係者から数字を聞き出すことができなかったが、酸性浸出液を使った実収率は、アメリカの ISL 法ウラン鉱山と同様、65-85 %と推定できるとしている。

McMurray (1995) は、カザフスタンにおける KATEP の ISL 法と米国の ISL 法を比較して、基本的な技術には類似点が多く見られるものの、次のような相違点を指摘している。

- (1) カザフスタンでは浸出液に硫酸を使用している。これに対して、米国の ISL 法ウラン鉱山では炭酸塩浸出液を使用している。酸性浸出液の方がリーチングの効率が高いと予想されるものの、アメリカ国内では硫酸浸出液の使用が現在の環境規制の下では認められず、また、酸性浸出液を使った砂岩鉱床の修復が難しいことが ISL 試験採掘で確かめられている。
- (2) カザフスタンでは閉山後の砂岩鉱床修復が義務づけられていないので、修復が実施されていない。一方、米国の ISL 法鉱山は閉山後、修復を行って、ウラン採取の対象となった帯水層をベースラインの状態あるいは操業開始前の状態に戻す。修復に要するコストはポンド U_3O_8 当たり、\$1-\$2 と見積もられている。今後、カザフスタンでも地層修復が大きな問題となろう。
- (3) アメリカの ISL 法鉱山の方が、カザフスタンの ISL 法鉱山よりも稼行品位が高い。カザフスタンの Chu-Sarysu 地区では 0.02-0.06 % U_3O_8 、Syr-Darya 地区では、0.06-0.08 % であるのに対して、アメリカの ISL 法鉱山の U_3O_8 品位は、0.10-0.25 % の範囲にある。この理由の一部として、アメリカの鉱山がカットオフ品位を設定しているのに対して、KATEP のウラン鉱山では、カットオフ品位を設定せず、すべてを採取の対象としていることが関係している。カザフスタンで現在稼行中のウラン鉱床は、アメリカではとても経済的に稼行することができないと思われる。
- (4) カザフスタンの稼行深度の方がアメリカの ISL 法ウラン鉱床よりも深く、今後深くなる傾向にある。米国の稼行中鉱床は 150-270 m の深さにあるが、カザフスタンの Chu-Sarysu 地区が 95-270 m とアメリカの鉱山の稼行深度と変わらないのに対し、Syr-Darya 地区は 550-750 m と 2 倍以上深い。Chu-Sarysu 地区にある Stepnoye 鉱山でも採掘区域が西に移動するにつれて、稼行深度が深くなる傾向にあり、コスト高の問題に直面することになる。
- (5) カザフスタンの ISL 法ウラン鉱山の方がアメリカの鉱山に比べて、コストが安いと考えられがちであるが、厳密な比較を行うには、西側の会計規準にしたがう必要がある。これに関連して、労務コストが安いことがカザフスタンのウラン鉱山が持つ有利な条件であるという指摘もあるが、労務コストが低廉であることは労働者一人当たりの生産性とは無関係である。Stepnoye と同様、カナダ・サスカチュワン州の高品位ウラン鉱山も僻地にあるが、キャンプ地の建設コスト・管理コストがコストに当然含まれている。しかし、Stepnoye 鉱山では、これらのコストも含めて、資材・食料の運搬費など、どの範囲まで総コストにカウントされているか疑問である。

このように、McMurray は、アメリカの鉱山と比較して、カザフスタンの ISL 法ウラン鉱山が抱える問題点を指摘した一方で、カザフスタンのウラン鉱業が CIS 諸国の中で、最も将来性有望と述べている。その理由として、ISL 法に適したウラン資源量が多いこと、ISL 法に必要なインフラストラクチャが備わっていること、西側の三大ウラン生産者である Cameco・Uranerz・ERA に加えて NUKEM とも協力関係を築いていることをあげている。カザフスタンにおけるウラン鉱業民営化も含めて、今後、その動向が注目される。

動燃事業団と McMurray が行った調査報告から、カザフスタンにおける ISL 法ウラン採鉱技術が抱える問題点は、酸性浸出液を使用していることと、稼行深度が深いことの 2 点が主なものと考えられる。

稼行深度の問題は、深度が深くなることによる掘削・坑井仕上コストおよびポンプの設備投資・運転費増加という経済的問題と、300 m を越えると標準的なポリ塩化ビニールでは強度が不足し、PVC に替わる安価で強度の高いケーシング材料が見あたらないという技術的課題と考えることができる。McMurray (1996) によれば、深度が 150 m の時に比べ、300 m の時の坑井仕上コストは、(単位深さ当たりのコストが) 25 % 増となり、300 m から 600 m を比較した場合も、25 % 増となるとしている。また、ポンプの能力も、150 m から 300 m へと深くなると、50 % 増やす必要があり、大型のポンプを購入するための経費と運転経費がかさむことになる。

酸性浸出液を使ったときの汚染と修復の問題について、旧ソビエト時代、South Bukinai 鉱床の第 10 鉱体において、13 年間 (1977-1989)、現場試験が行われた【Fazlullin, et. al., 1996】。実験の対象となった鉱体は、Bukinai 鉱床群の代表的なものであり、1968 年から 1975 年までの 8 年間にわたって、硫酸浸出液を使った ISL 採鉱が行われた。鉱床の厚さは 15.5 m、胚胎深度は 150-160 m で、230 本の坑井が 20 × 20 m または 25 × 25 m のグリッドで掘削され、70,000 m² の領域で、鉱量 1,733,000 トン・ウラン量 500 トンの鉱床を稼行対象とした。消費した硫酸の総量は 65,000 トン (平均濃度 8.5 g/liter) で、鉱石 1 トン当たり約 40 kg の硫酸を使用した。

ウランの実収率は 84 % を記録したが、操業の終末期には、操業の対象となっていた領域外部にも、ISL 採鉱の影響が現れた。地下水中のウラン濃度は最大 26 ppm (平均 16 ppm) に、硫酸イオン濃度は 2.4 g/liter から最大 13 g/liter (平均 10.2 g/liter) に増加し、pH は 1.5-2.5 に低下した。その他、塩素イオン・硝酸イオン・カルシウム・水銀濃度が増加し、

Table 3-3 South Bukinai 鉱床の第 10 鉱体における地下水の水質モニター結果

時期 (状態)	測定結果		
	pH	Mineralization (g/l)	SO ₄ ²⁻ (g/l)
1969 年 (操業前)	7.5 (7.0-8.0)	2.4 (2.1-4.2)	1.14 (0.67-2.1)
1975/76 年 (操業末期)	2.0 (1.5-2.5)	18 (15-20)	10.2
1977 年 (閉山直後)	3.7 (1.8-7.2)	9.2 (3.1-15.0)	5.2 (2.4-7.2)
1980 年	4.7 (2.5-7.9)	8.8 (3.4-15.2)	4.8 (1.3-9.0)
1987 年 (注水前)	5.8 (2.6-7.8)	6.5 (2.3-14.4)	4.2 (1.1-7.8)
1989 年 (注水後)	6.9 (3.5-8.0)	4.0 (2.0-7.4)	2.1 (1.3-3.2)

操業以前には存在しなかったアルミニウム・鉄・カドミウム・鉛・セレン・亜鉛などの金属を検出するようになった。

操業停止後 10-11 年経過した 1987 年には、pH が 2.0 から 4.8 に回復するなど、自然修復が見られたが、操業前のレベルに戻るにはさらに 15-20 年を要すると予想された。そこで、1987 年 10 月から 1989 年 6 月までの 20 ヶ月にわたって、鉱化領域の外側にある 3 本の坑井から水を汲出し、同時にかけて使われた坑井に注入して(総量 693,290 m³)、水質変化を観測した。Table 3-3 がその結果である。pH は操業以前の値に戻らなかったけれども、Mineralization と硫酸イオン濃度は、ほぼ回復した。しかし、資金が限られていたために、観測井ネットワークに限りがあったと報告している。

旧ソビエト連邦では、鉱石中の炭酸塩含有量が少なく、酸性浸出液に適した条件を鉱床が備えていたことと、浸出液中の硫酸濃度上昇に伴って、貴液中の平均ウラン濃度が増加し、プロセス時間が短縮されるという理由で、硫酸浸出液が使われてきた【Skorovarov, *et. al.*, 1989】。ウラン実収率は、酸性浸出液を使った場合には、65-80 %、炭酸塩浸出液を使った場合には、55-75 %と見積もっている。低酸濃度: 2-5 g/liter の液を浸出に用いるが、酸が持っている攻撃的な性質故、鉱石 1 トン当たりの酸消費量は、初期の 5-6 kg から 10-15 kg まで増加する。岩石の酸容量・反応速度、ウランの回収効率、酸消費量、プロセスの経済性等を考慮して、実験室実験のデータを基に、最適酸濃度を選択する。

しかし、旧ソビエト連邦でも、酸消費の大きな岩石(炭酸塩を 1.5-2.5 %以上含む岩石)に、炭酸塩-重炭酸塩浸出液を使用したこともあった。重炭酸ナトリウム浸出液に代わって重炭酸アンモニウムを使用する場合もあるが、これは重炭酸ナトリウムが粘土鉱物の膨張を引き起こしやすいからであり、重炭酸アンモニウムは岩石の透水性を落とす可能性が少ない。しかし、重炭酸アンモニウムを使った場合には地下水組成の回復が難しいことに注意する必要がある。この点、重炭酸ナトリウムは、回復が容易で、回復コストは高くない。その他、炭酸塩浸出液を使うメリットとして、中性または弱アルカリ性下でリーチングが行えること、より安価な設備で十分であること、処理後の地下水の水質が適正であること、再循環液中の塩濃度が低いために吸着工程での生産率が高いことなどをあげており、旧ソビエト連邦でも炭酸塩系浸出液の効用が理解されていた。しかし、坑井周りの土壤汚染については、坑井稼働前に幅 4-5 m、深さ 40-50 cm ほど土壌を取り除いて保管し、終掘後、土壌を元に戻すことを対策としてあげるのみで、地下水の洗浄については、電気浸透法による汚染水の脱塩が有効であると言っているが、実際に行ったかどうかは、Skorovarov, *et. al.* (1989) の論文では明らかとなっていない。

また、カザフスタン【Fyodorov, 1996】でも、南カザフスタン(Chu-Sarysu および Syr-Darya 地区)の砂岩型鉱床とアメリカ・ワイオミング州の砂岩型鉱床を比較して、

- (1) 鉱床の特性・成因を比較すると、南カザフスタンの鉱床の方が、ワイオミングの鉱床よりも、ISL 法に適している(ウラン回収が容易)。
- (2) ワイオミングの鉱床の方がウラン品位は高く、南カザフスタンの鉱床品位は低い。しかし、南カザフスタンの方が鉱床は厚いので、単位面積当たりの鉱床価値/生産性(ウラン品位×層厚)はそれほど見劣りしない。

- (3) ワイオミングのウラン鉱石にはより多くの方解石が含まれている。方解石の含有量が、浸出液の選択を支配すると考えられているが、方解石含有量はあまり関係ないという意見もある。
- (4) 酸性浸出液の持つ環境へのダメージを考えると、アルカリ性浸出液の使用をカザフスタンでも検討すべき時期に来ている。ワイオミングの Crow Butte 鉱床と類似点の多い Akdala 鉱床において、非酸性浸出液を使った現位置試験を実施し、酸性浸出液を使った実験結果と比較すべきであるという提案を行っている。

カザフスタンにおける ISL ウラン採鉱には、以上のような課題が存在するが、今後、西側のウラン採鉱技術が導入され、西側ウラン鉱山会社との技術的協力関係・合弁事業化が進むことにより、また、市場経済移行の混乱が収まるにつれ、そして何よりもウラン市況が回復することにより、将来の発展性が期待されている。

参考文献

- Akin, H., 1997 : Contribution of in situ leach mining to “filling the gap” in uranium supply, Presented at the World Nuclear Fuel Market’s 24th Annual Meeting and International Conference on Nuclear Energy, June 1-3, 1997, Saskatoon (Canada)
- Cox, C. H. and Roushey, W. J., 1979 : Recovery of uranium by in situ solution mining, Mineral Industries Bulletin, Vol. 22, Number 1, pp.1-12
- Fazlullin, M.I., Novoseltsev, V.V., Farber, V.J., Solodov, L.N., and Nesterov Ju.V., 1996 : Restoration experience on uranium ore-bearing aquifers after in-situ leach via hydrogeochemical methods, Proc. of IAEA Technical Committee Meeting on In Situ Uranium Mining, September 9-12, 1996, Almaty (Kazakstan)
- Fyodorov, G., 1996 : A comparative geological-technological description of the uranium deposits in Wyoming and Southern Kazakstan, Proc. of IAEA Technical Committee Meeting on In Situ Uranium Mining, September 9-12, 1996, Almaty (Kazakstan)
- McMurray, J., 1995 : Kazakhstan’s alliances with western producers are key to its future, Focus, summer 1995, pp.3-13
- McMurray, J., 1996 : United States in situ leach industry — past, present and future, NAC International, September 1996, pp.1-14
- Mining Magazine, 1991 : Highland in-situ leach mine, Mining Magazine, pp.58-63
- Rowson, J., 1996 : The Christensen Mine ISL project summary, Proc. of IAEA Technical Committee Meeting on In Situ Uranium Mining, September 9-12, 1996, Almaty (Kazakstan), 1993
- Skorovarov, J.I., Sadykov, R.H., and Nosov, V.D., 1989 : ソ連におけるウランのインシチュ・リーチング, 旧ソ連のウラン資源(その2) — 動燃事業団社内資料(PNC PN7510 93-007), 1993
- Wyoming Uranium, 1997 : Wyoming Mining Association のホームページ (<http://www.tcd.net/~wma/uranium/uranium.html>) より

武内 寿久禰, 1996 : カザフスタンの砂岩型ウラン鉱床, 資源地質, Vol. 46, Number 4, pp.233-243

動燃資源情報, 1996 : カザフ・キルギスの ISL 鉱山に関する現地調査報告, 動燃資源情報(動燃事業団), 1996/01/26 号。

4. 1 SL適用ウラン鉱床

4. 1 ウラン鉱床とウランの鉱石鉱物

大陸地殻の主体をなす花崗岩類にはウランは平均3～4 ppm含まれており、ジルコンや磷灰石等の微量成分として閉じこめられている。この種のウランは花崗岩質岩石が形成された後の熱水期に鉱脈として濃縮し鉱床を形成することもあるが、一般には比較的容易に地表水、地下水、熱水に溶脱され、その後、堆積鉱床を形成することが多い(図4-1)。前者の例としてはナミビアのRossing鉱床やカナダのBancroft鉱床が属し、いずれも変成岩中に貫入した岩脈あるいはペグマタイト中にウランが濃縮している。

自然界には、ウランを含有する鉱物は多数知られているが(表4-1)、ウランを主成分とする鉱物は少なく、鉱石鉱物として扱えるものも僅かである。原子価としてはウラニウムは6種類もちうる元素であるが、重要なのは U^{4+} (ウラナス)と U^{6+} (ウラニル)である。酸化環境ではウランは6価となり、ウラニル基 $(UO_2)^{2+}$ をつくる。水酸化イオンの存在のもと

では $[UO_2(CO_3)_2 \cdot 2H_2O]^{2-}$ や $[UO_2(CO_3)]^{4-}$ として水によくとける。 U^{4+} イオンの酸化物、 $U^{4+}O_2$ (ウラン鉱, Uranite)は水に不溶性で、還元性条件下では安定な物質である。水溶性になったウランが沈殿するには主に3つの機構が考えられ、酸化環境でバナジン酸イオンやリン酸イオンと結合し、カルーノ石 $(K_2(UO_2)_2(U_2O_8) \cdot 3H_2O)$ や磷灰ウラン石 $(Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10H_2O)$ を形成する場合、還元環境のもとでセンウラン鉱 $(UO_2 \cdot UO_3)$ などができる場合、さらに粘土鉱物、沸石、腐植などによる吸着あるいは水酸化鉄により共沈する場合である。

つぎに、水溶液として溶けだしたウランが堆積層に濃集する機構としては、地下水の蒸発により沈殿し形成された鉱床も報告されているが、性質の異なる水溶液が混合したためにウラン鉱物が沈殿し鉱床を作ることが多い。なかでも、地下水型として分類される鉱床はウランを溶存する酸化性の地下水が、還元性の地下水に接触することによってウランが還元側に沈殿し、高品位のウラン鉱床を形成したものである。例えば、アメリカのPowder River盆地やカザフスタンでは、上下を不透水層で挟まれた砂

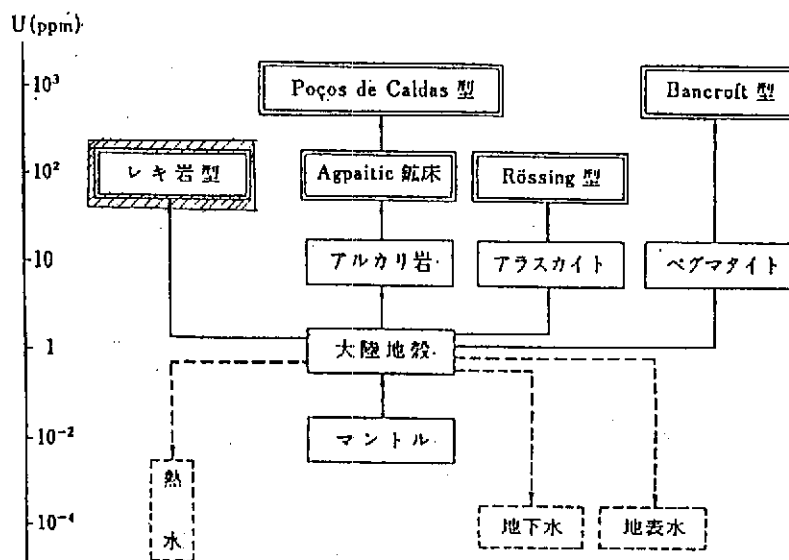


図4-1 水溶液になる以前のウランの濃縮課程
(二重わくは鉱床、波線部は水溶液)

表4・1 ウランの鉱石鉱物

鉱物名	化学組成	ウラン含有率 (U_3O_8 %)	トリウム含有率 (ThO_2 %)	結晶系	色	光沢	硬度	比重
(酸化鉱物)								
閃ウラン鉱 Uraninite	$UO_2 \cdot UO_3$	50~85		等軸	黒・褐黒	樹脂	5~6.8~	10+
瀝青ウラン鉱 Pitchblende	非晶質の変種	50~85		—	黒	樹脂	6~9	
クレブ石 Cleveite	稀土類の入った変種	50~80		等軸	黒	樹脂		
ブレッガー鉱 Broeggerite	Th, 稀土類の入った変種	50~80	~4	等軸	黒	樹脂	5~6.8~	10+
(含水酸化鉱物)								
ベッケル鉱 Becquerelite	$2UO_3 \cdot 3H_2O$	80		正方	黄・帯褐黄	金剛樹脂	2~3.5~	5.5
(複酸化鉱物)								
ブランネル石 Brannerite	$(U, Ca, Fe, Th, Y)_3 Ti_5 O_{16}$	~40	~41	単斜?	黒・褐	—	4~5.4.5~	5.5
デーヴィット鉱 Davidite	$(Fe, Ce, U)(Ti, Fe, V, Cr)_3(O, OH)_7$	7~10	~1	—	黒・暗褐	—	5~6.4.5±	
(珪酸塩鉱物)								
コッフィン石 Coffinite	$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$	70		正方	黒褐	金剛	5~6.5.1±	
(含水珪酸塩鉱物)								
ウラノフェン Uranophane	$CaO \cdot 2UO_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 6H_2O$	65	~2	単斜	黄・橙緑	真珠絹糸	2~3.3.5~	3.9
(含水磷酸塩鉱物)								
人形石* Ningyoite	$Ca_{1-x}U_{1-x}RE_{2x}(PO_4)_2 \cdot 1-2H_2O$	50		斜方	褐緑	—	—	—
燐灰ウラン鉱 Autunite	$Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10-12H_2O$	60		正方	黄・黄緑	真珠	2~2.5	3.1~3.2
燐銅ウラン鉱 Torbernite	$Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 8-12H_2O$	60		正方	青緑	真珠	2~2.5	3.5~3.7
(含水ヴァナジン) 酸塩鉱物)								
カルノー石 Carnotite	$K_2O \cdot 2UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot 3H_2O$	50~55		単斜(?)	黄	土状真珠絹糸	2~3	4±
チューヤムン石 Tyuyamunite	$CaO \cdot 2UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot 8H_2O$	48~55		正方	黄・帯緑黄	金剛真珠樹脂	2~3	3~4
(炭酸塩鉱物)								
シュレッキングエル 鉱 Schroekingerite	$3CaO \cdot Na_2O \cdot UO_3 \cdot CO_2 \cdot SO_3F \cdot 10H_2O$	30		正方	緑	—	2.5	2.5
(有機化合物)								
チューコライト Thucholite	Hydrocarbon と U, Th, 希土元素との混合物	2~3		—	黒・帯黒褐	—	3.5	1.7~2

* 武蔵正による

岩層中で、酸化性と還元性の地下水が接したためにできたロール型の鉱床が、数十kmにわたる酸化還元境界線に沿って断続的に分布している。またカナダのAthabascaでは、不整合に関連し、鉱脈状、塊状、あるいは角礫状の鉱床が形成されている（図4・2）。日本の第三系のウラン鉱床もこの型である。

4. 2 Roll Front型ウラン鉱床とISL

4. 2. 1 ISL（溶解探鉱法）

人間が地下に入って鉱石を採掘するには種々の制約を受け、危険をとまなっている。そこでインプレースリーチングは、鉱石と適当な溶媒とを地下で接触させ、目的とする金属成分を化学的に浸出させ、目的元素だけを直接回収する方法として考えだされたものである。

たとえば、地下に存在する鉱床に対して地表より2本の井戸を掘り、まず爆薬や水圧を利用して井戸と井戸の間にある鉱石を粉碎し、鉱床内に多数の亀裂をつくる。つぎに、一つの井戸から浸出液を注入し、液が鉱床内を流動する間に、有用金属を浸出させる。十分に金属成分を含んだ液を、もう一つの井戸から汲み上げ、金属を回収するものである。この一連の作業の中で、実操業に移るために解決しておかなければならない問題は、浸出液が容易に移動できるような多数の間隙あるいは亀裂をいかにして発生させるか、浸出液が対象区域外に溢水する事を防ぎ、いかにして浸出行程を効果的に行うかなどである。

このような発想はかなり古くから存在し、これまでに、ウランの低品位鉱石から経済的にウランの回収に成功している。また、通常の方法による鉱石の採掘を終了した鉱山に対して、取り残された鉱石や周辺の低品位鉱石からの金属回収にISLが適用された例がある。我が国でも土畑鉱山、小坂鉱山などでISLがおこなわれたことがあり、土畑鉱山では選鉱のずりを採掘後に充填し地表から散水し、抗底から銅に富んだ液を回収している。鉱山そのものは1976年に閉山されたが、その後もISLだけ残され、銅の回収が続けられている。しかし、その規模は小さい。

近年、地下の岩体に亀裂を作る技術は地熱開発の分野でも急速にすすんでおり、またバクテリアにより積極的に浸出効果を促進させるための研究も続けられている。しかしながら、これまでのところベースメタルにおいてISL探鉱法の開発は遅々として進んでおらず、従来の探鉱法にとって替わる兆候はみられない。

4. 2. 2 Roll front鉱床がISL探鉱法に適する理由。

ところが、このISLはRoll front型鉱床にはきわめて有効な探鉱法で、アメリカ合衆国やカザフスタンで実操業され、実績をあげている。すなわち、Roll front型鉱床は地下水の流動によって形成されたもので、すでに抽出液が流れるのに十分な間隙が存在し、しかも上下を不透水層で挟まれているので浸出液の上下の逸散が起らない。もともと酸化還元境界にウラン鉱物は沈殿したものであるもので、この条件を少し変えることによって溶出が可能となる。自然界で、地下水の酸化還元境界の存在は珍しい

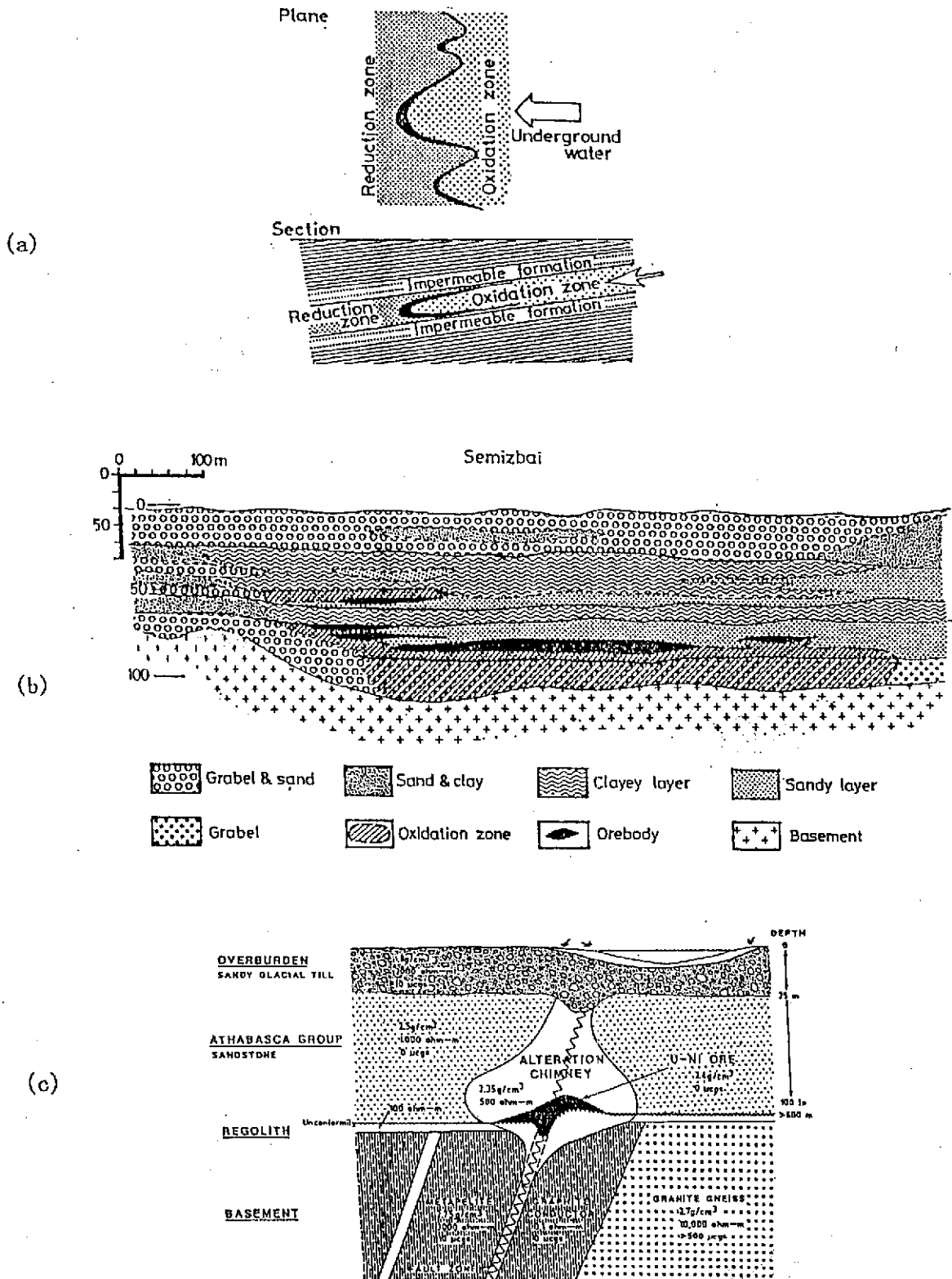


図4・2 地下水型ウラン鉱床

(a)Roll front型

(b)古河川の地下水流によってできた不規則な鉱床

(c)Athabascaの不整合関連鉱床

(出典：武内 1996, McMullan et al, 1987)

ものではない。

つぎに、実際に I S L 採鉱法により生産されているウランの量をみると、1990年では2,800tUであったが、1995年には4,300tUで、世界のウラン生産量の13%をしめるまでに増加してきている。生産国はカザフスタン、ウズベキスタン、アメリカで中国でも少量生産されている(図4・3)。この他、ロシア、モンゴル、オーストラリアでも I S L 採鉱法によるウラン鉱山の開発が計画されている。I S L 採鉱法が行われている代表的な地域とされ、これまでに多く生産実績のある

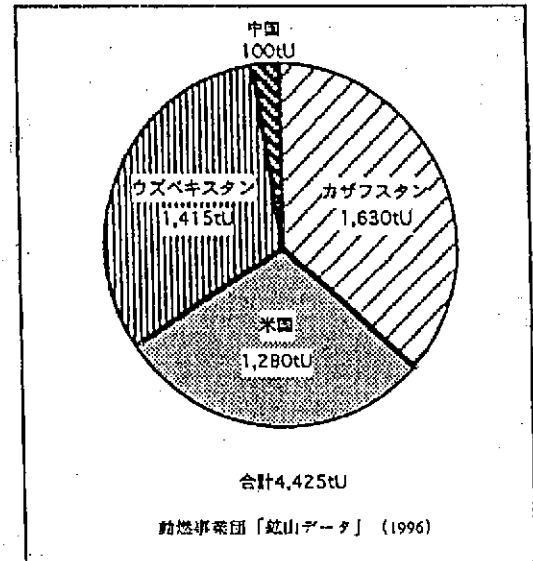


図4・3 1995年別インシチュ・リーチング生産

表4・2 ワイオミング州と南カザフスタンの鉱床の比較

No	Factors	Wyoming	Southern Kazakstan
Regional characteristics			
1	Geological structure	Intermontane basins	Edge part of platform
2	Kind of sediments	Lake-alluvial	Alluvial, shallow-marine
3	Edge of ore deposits	Paleogene	Cretaceous-Paleogene
4	Resources	250,000mtU3O8	1mln.tU
5	Extension of bed oxidation zones	Local zones in such basins	Regional zones
6	Distance from redox front to water supply area	10~100km	To 350km
7	Influence of tectonic movements under deposits formation	Weak	Absent
8	Age of ore	Start of ore formation 22~35m.y. -Oligocene	Start of ore formation in Oligocene, now-ore reworking
9	Bedding incline	1~5°	Parts of degree
10	Ore-control by channel facies	Clearly appeared	Clearly appeared in Cretaceous
11	Role of gas dissolved in water for redox-front formation	Important	Decisive
12	Ore source	Probably local	Regional
Deposits characteristics			
13	Form of ore bodies -plan -cross-section	-Relatively complex -Rolls and beds	-Relatively simple -Rolls
14	Internal construction of ore beds	Relatively complex	Simple due to cyclisity
15	Mineralisation	Coffinite, nasturan	Coffinite, nasturan
16	Uranium content	0.05~0.25%	0.03~0.08%
17	Ore thickness	2~3m	6~8m
18	Square productivity	4~5kg/m ²	4~5kg/m ²
19	Content: -organic carbon -pyrite -calcite	0.5% from <1% to 3% 1~2%	0.01~0.1% 0.1% 0.2%
20	Associated elements	Mo, Se, V, As	Sc, Re

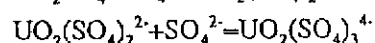
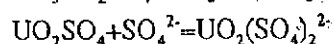
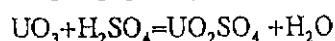
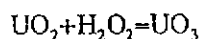
南カザフスタンとワイオミング州の鉱床を比較してみると表4.2のようになる。いずれも酸化還元境界にできたRoll front型の鉱床で、カザフスタンは沖積層あるいは浅海域の堆積物で延長350kmにもおよぶが、ワイオミング州では湖成堆積物で数十kmである。ワイオミング州の鉱床では厚さ2~3m、品位0.05~0.25%であるのに対し、カザフスタンの鉱床の厚さは6~8mと厚いが、品位は低く0.05~0.08%である。そのため面積あたりのウラン含有量にするとほぼ同じとなっている。

4. 2. 3 浸出液と鉱床

浸出液に何を使うかはISLにおける重要な課題である。一般には濃硫酸浸出液とアルカリ浸出液が用いられ、硫酸浸出ではウラン鉱物との反応が速やかで、ウランをよく溶解させるが、鉱石鉱物以外の不純物も多量に溶かすのが欠点である。一方、アルカリ浸出では選択的にウラン鉱物を溶解させるが、浸出反応が遅い。ウラン鉱物および共存鉱物と浸出液の反応をまとめると表4.3のようになっている。ワイオミングではアルカリ浸出液が採用され、カザフスタンでは硫酸浸出液が採用されているが、共存鉱物を見るとワイオミング鉱層には硫酸と反応しやすい、pyriteやcalciteが、カザフスタンの鉱床に比べ10倍程度多く含まれている。これが浸出液の違いを決めている要因と推察される。一方で、

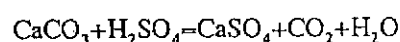
表4.3 硫酸浸出およびアルカリ浸出における化学反応

硫酸による浸出：

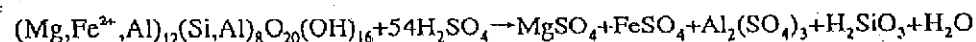


硫酸と反応する主な鉱物

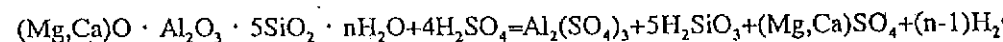
方解石：



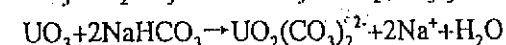
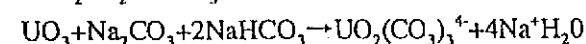
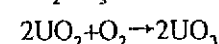
緑泥石：



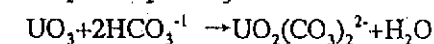
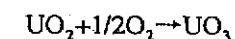
モンモリロン石：



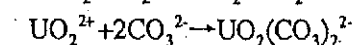
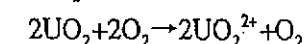
Na_2CO_3 と NaHCO_3 による浸出（クラウンポイント鉱山）：



Na_2CO_3 と CO_2 による浸出（クロービュート鉱山）：



CO_2 による浸出（スミスランチ鉱山）：



共存反応鉱物が少ないことは浸出液のより広範な拡散を意味しており、環境保全の点から注意が必要である。

4. 3 カザフスタンのウラン鉱床と I S L 採鉱法

カザフスタンには、Chu-Sarysu, Syr Darya地域に優秀なRoll front型ウラン鉱床が存在し、I S L採鉱法により回収が続けられている。これらの地質および開発の経緯については武内(1996)に詳しいので、著者の許可を得て、以下に転載する。

4. 3. 1 砂岩型鉱床 (Chu-Sarysu, Syr Darya 地域)

白亜紀後期～古第三紀の碎屑性堆積物中の砂岩層に胚胎する。鉱床は、粘土層に挟まれた透水性砂岩層中の酸化帯～還元帯の境界に沿ってロール・フロント形またはレンズ形をなして産する。これらの鉱床は卓状地堆積物の透水層中の酸化帯～還元帯境界に胚胎した砂岩型鉱床で、Palcochannel型とは異なり、鉱床の胚胎する酸化帯～還元帯の伸長は400km以上ときわめて大規模であり、現地ではSheet-Infiltration型（またはRegional oxidation型）と称されている。Re, Sc, Y, Se, REEを伴う。Chu-Sarysu沈降帯とSyr Darya沈降帯は白亜紀後期～第三紀始新世に形成され、第三紀漸新世～新第三紀にウラン鉱床が形成された。Karatau隆起帯により分断されているが、両地域の鉱床帯は一連のものと考えられる。鉱床形成時の地下水の流れは北西方向であったと推定されている。

Chu-Sarysu地区：厚さ50～70mの砂岩層が粘土層によって複数層に分けられている。平均品位は0.03～0.04%U、鉱床胚胎層準の深さは100～400mで西に深くなる。Re, Se, Sc, Y, REE（希土類元素）を伴う。平面的には西側に分布する上部白亜系中にZhalpak, Mynkuduk (127,000tU), Inkai (150,000tU), Sholak-Espe鉱床、東側に分布する第三系暁新統中にUvanas (20,000tU, 残存鉱量5,000tU), Moinkum (82,500tU), Kanzhugan (50,000tU) 鉱床などがある(図4-4, 図4-5)。Yazikov (1993a)によると、埋蔵量は500,000tU、そのうち確認埋蔵量は221,000tUである。この地域における新鉱床発見のポテンシャルは大きいと思われる。

Syr Darya地区：Syr Daryaの流域に分布し、Chu-Sarysu地域の鉱床と比べて、平均品位は0.06～0.07%と高いが、鉱床胚胎層準の深さは450～650mで南へ深くなる。Re, Se, Sc, Y, REEを伴う。Yazikov (1993a)によると、埋蔵量は143,000tU、そのうち確認埋蔵量は77,300tUである。上部白亜系中にIrkol' (2,000tU), Zhanaturmys (推定10,000tU), Aktam (推定10,000tU), North Karamurun (50,000tU), South Karamurun (70,000tU), North Kharasan (50,000tU), South Kyarasan (推定70,000tU), Zarechnoye (推定23,000tU), Asarchik, Zhautkan鉱床があり、第三系暁新統中にKyzylkol, Lunnoye, Chayan鉱床などがある。現在のところ、暁新統中には規模の大きな鉱床は発見されていない(図4-6, 図4-7)。この地域における新鉱床発見のポテンシャルは大きい。

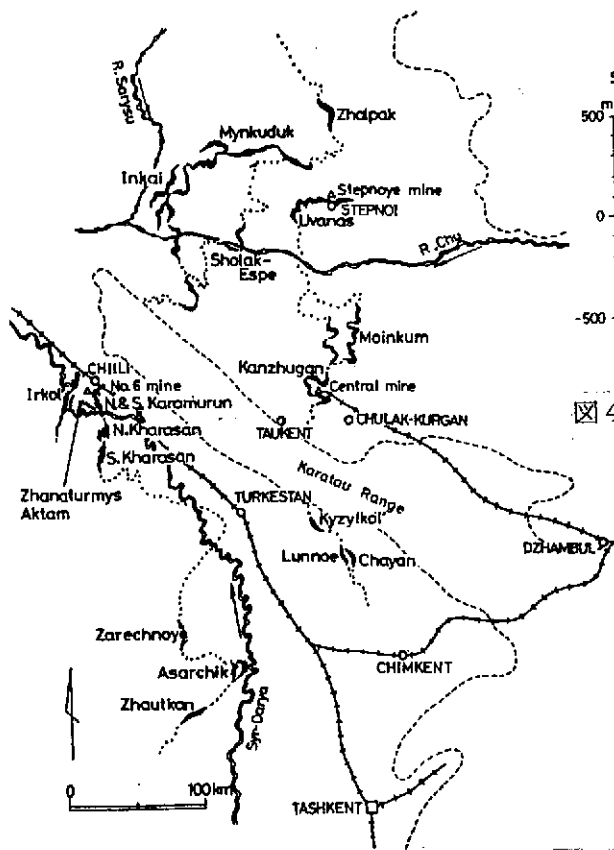


図4・4 Chu-Sarysyおよび Syr Darya地域のウラン鉱床分布
(Redrawn from KATEP, 1995)

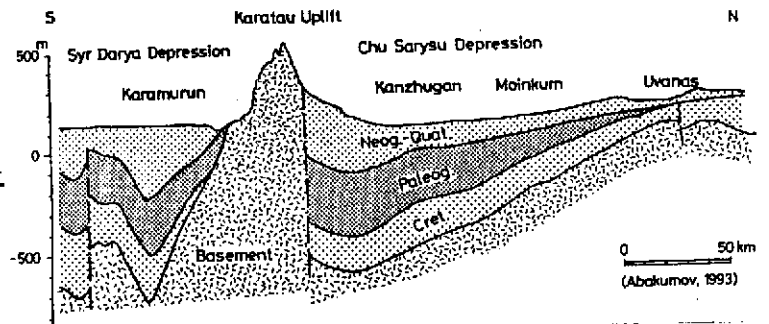


図4・5 Chu-Sarysyおよび Syr Darya地域の模式的断面図 (S-N)
(Redrawn from KATEP, 1995)

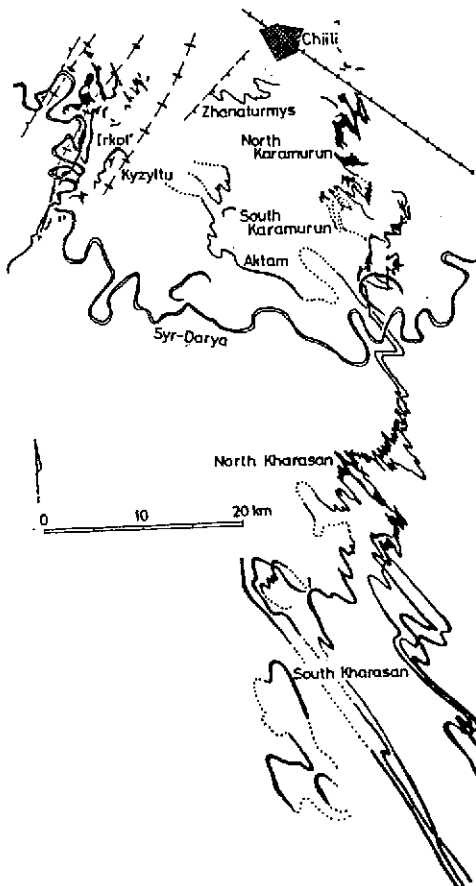


図4・6 Syr Darya地域のウラン鉱床分布
(Redrawn from KATEP, 1995)

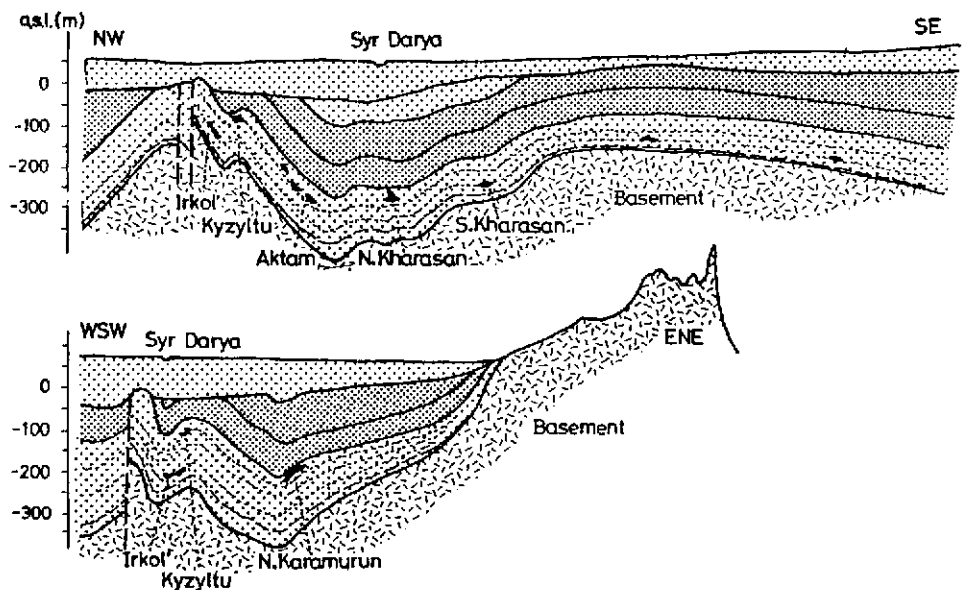


図4・7 Syr Darya地域の模式的断面図 (NW-SE and WSW-ENE)
(Redrawn from KATEP, 1995)

4. 3. 2 ISL 鉱山

Chu-Sarysu, Syr Darya地域のISL 鉱山の生産能力を表4・4に示す。

セントラル 鉱山： 鉱山町Taufentの人口は4,000人, Suzakの南30km, Karatau Uplift (山脈)の北麓にある。Taufentの北約40kmにある 鉱山施設は, 南北に伸びるKanzhugan 鉱床のほぼ中央に設置され, 貴液処理工場から約10km範囲内にある 鉱体についてISL法を行っている。この地域の探査は1974年から開始され, ISL法の創業は1983年から行われている。 鉱山の生産能力は800tU/年であるが, 実績は500tU/年前後である。

Kanzhugan 鉱床は, 深さ90~250mにある古第三紀砂質層(層厚10~40m)の下部層に胚胎し, 鉱体幅は100~500m, 鉱体の厚さは1~15mで変化に富んでおり, 平均品位は0.035~0.04%Uである。Re, Sc, REE, Seを伴うが, Vは少ない。生産計画におけるcut off品位は0.01%U (0.04%Um)としている。Kanzhugan 鉱床の北にはMoinkum 鉱床がある。平均品位は0.04~0.05%UとKanzhugan 鉱床よりやや高い(図4-4)。300,000tU弱と推定される埋蔵量の開発が検討されている。

ISL法の注入井列と生産井列との間隔は50m, 注入井間隔は11~15m, 生産井間隔は25m, 注入井列2列と生産井列1列をもって1ブロックとし, 28ブロックをもって1 鉱区としている。滲出液(硫酸濃度3~30g/l)の注入量は2~2.5m³/時, 貴液(平均品位40~60mgU/l)の生産

量は4~5m³/時, 実収率は平均90% (min.60%, max.120%)であるという。3~5年で1 鉱区の採掘を終了している。ISL法の準備のため, 年間約400本の試錐孔を掘削している。揚水にはエヤー・リフト・ポンプまたは4"水中ポンプ(能力100l/分, 水頭100m)を使用している。生産井から揚水された貴液は, 500mm径のステンレス・パイプにより貴液受け入れポンドへ流送される。受け入れポンドの容量は30,000m³, 粘土層, ポリエチレン・フィルム, アスファルトにより内張りされている。貴液の品位は40~60mgU/l, Ca, Mg, Al, Fe, Siなどを20g/l含有し, 30~40m³/年の懸濁物を含んでいる。貴液は能力140m³/時のポンプ3台により処理工場に送水されている。受け入れポンドと同様な規模の廃液ポンドには硫酸濃度1g/lの廃液が溜められ, 硫酸を添加して再び滲出液として使われている。処理工場で生産されたイエロー・ケーキの品位は40~50%U₃O₈で, コンテナに詰めてキルギスタンのカラ・バルタ(Kara Balta)精製錬所まで約500kmをトラック輸送されている。

ステップノエ 鉱山： ステップノエ(Stepnoye) 鉱山はChimkentの北約400km, Muyun Kum砂漠北部の砂漠とステップの中間地帯にあり, 夏期の気温は43℃, 冬期は-40℃にもなる厳しい気候の地である。ステップノイ(Stepnoi) 鉱山町は, かつてはUvanas, Zhalpak 鉱床探査のベース・キャンプであった所で, 現在の人口は約4,500人である。古第三紀砂質層中のUvanas 鉱床と白亜紀砂質層中のMynkuduk 鉱床の東部をISL法により稼行している。ISLのテストは1970年に開始され, 1978年に本格的操業が開始された旧ソ連邦では最初のISL法 鉱山である。処理工場は, 東西に30kmの長さに伸びる

表4・4 ISL 鉱山の生産能力(tU)

	Plan	Present	Production(1994)
Stepnoye	1,000	1,000	845
Central	800	700	530
No. 6	800	500	390
Total	2,600	2,200	1,765

Uvanas 鉱床のほぼ中央にある。生産能力は1,000U/年であるが、1994年の生産量は845tUであった。Mynkuduk 鉱床の南延長部に Inkai 鉱床（埋蔵量未詳、品位0.04~0.05%U）があり、約300,000tUの埋蔵量を有するMynkuduk-Inkai地区をKATEPとCAMECO/URANERZが共同開発する計画がある（図4-4）。

Uvanas 鉱床は幅100~350m、延長35kmの帯に、東では90m、西では120mの深さにあり、厚さ15~25mの砂質層中に5~15m厚の鉱体が形成されている。ウラン鉱石は閃ウラン鉱、コフィン石を含み、平均品位は0.03%U、0.5%の炭酸塩鉱物を伴う。20,000tUあった埋蔵量のうち75%が採掘済みである。鉱床を胚胎する透水性砂質層は中・細粒の岩石からなり、上下に不透水性粘土質層がある。砂質層の透水係数は3~15m/日である。地下水面の深さは60~70m。地下水の温度は18℃、塩濃度は2~3g/lである。

Mynkuduk 鉱床は、Uvanas 鉱床の西60kmにあり、層厚15~25mの白亜紀の砂質層中に鉱体が5~15mの厚さで、幅100~350m、延長100kmの帯状に胚胎している。Chu-Sarysu地域では最大の鉱床である。鉱床の深さは、東では250m、西では300mである。鉱床の産状はUvanas 鉱床と似ており、平均品位は0.032%Uである。砂質層は基底礫岩、粗粒岩石からなり、透水係数は10~20m/日である。地下水面の深さは75m、地下水の温度は18℃である。Mynkuduk 鉱床の特徴は、砂質層上盤の不透水性粘土層がなく、基底礫岩を介して上部の砂質層となり、この砂質層中にも鉱量の約14%にあたる鉱化が認められることである。鉱床東部の埋蔵量は40,000tU、本体は80,000tU以上になるものと推定されている。

Uvanas 鉱床では、井戸列間隔60m、注水井間隔15m、生産井間隔20mで、注水井総数800本、生産井総数400本により操業している。1孔当たりの注入量は1~1.5m³/時、貴液生産量は2~4m³/時である。滲出液の硫酸濃度は生産時は20~30g/l、生産晩期には6g/l、生産終了時は清水を注入している。処理工場の能力は40,000m³/日である。砂漠の中に隔絶された鉱山であるため、物資の輸送に経費がかかる。生産資材、生活物資には300km以上のトラック輸送が必要、イエロー・ケーキの出荷には、カラ・バルタの精製錬所へは720kmのトラック輸送、StepnogorskにあるTselinny Combineのステプノゴルスク精製錬所へは300kmのトラック輸送と1、600kmの鉄道輸送が必要である。

No.6 鉱山は、人口約60,000人のChiliの南にあり、タジキスタンのLeninabad Combineの6番目の鉱山として1977年に開山された。North Karamurun 鉱床をISL法により開発している。生産能力は800tU/年であるが、1994年の実績は390tUであった。イエロー・ケーキはズテプノゴルスク精製錬所とキルギスタンのカラ・バルタ精製錬所へ送られている。

North Karamurun 鉱床からの生産は1979年から行われており、これまでに7,000tUが生産された。貴液品位は最高100mgU/lである。鉱床の平均生産性は6kgU/m²であるが、南ほど高く、生産性の最高は90kgU/m²、貴液濃度の最高は200mgU/lに達する。

North Kharasan 鉱床は確認埋蔵量50,000tU、平均品位0.07%U、胚胎深度は400~

550mと深いですが、鉱体は比較的まとまっているので、ISL法が効率よく適用でき、高い生産性が期待できる。South Kharasan鉱床は大規模鉱床と推定できるが、未だ十分な探査が行われていない。

South Karamurun鉱床：探査は1993年に終了し、現在は50tU／年規模のテスト・プラント（平均貴液品位は200mgU／l）が稼動しているが、採鉱計画は遅れている。<\$10/kgUカテゴリーの可採埋蔵量は14,000tUと評価されている。

Irkol'鉱床は探査中で、推定埋蔵量は20,000tU、胚胎深度は450mである。パイロット・テストの際の貴液濃度は160mgU／lであった。地下水面が他の鉱床より高く、2層の鉱床胚胎基準層が認められている。南延長部はSyr Daryaを超えて南岸にも分布しているが、十分な探査は行われていない模様で、今後の発展が期待される。

Karamurun鉱床群とKharasan鉱床群の確認埋蔵量は130,000tU程度と考えられる。Syr Darya地域の鉱床は胚胎深度は400～600mと深いですが、平均品位が0.065～0.07%U（局部的には5%Uに達する）と高く、地下水温度が42℃と高いのでウランの溶脱速度が大きく、ISL法には有利である。ISL実収率は60～120%、平均93%と称している。1ブロックの坑井数は400～600本、年間100～120本の坑井が掘削されている。1孔当たりの貴液生産量は3～20m³（平均10m³／時）で、年間の貴液総生産量は4,000,000m³である。

3鉱山を通じて、ISL法実収率が60～120%と説明されている。これは、可採埋蔵量の評価が適切でないことを示している。示された埋蔵量は経済的cut-off品位を考慮していない地質埋蔵量と考えられるが、実収率が100%を超えることは埋蔵量評価が適切に行われていないことを示している。McRURRAY（1995）は、北米大陸の類似の砂岩型ウラン鉱床開発の経験から、カザフスタンにおいて低コストISL法により経済的に開発できる埋蔵量は385,000tUと推測している。この数値は報告されている砂岩型鉱床埋蔵量の約45%に相当する。

5 坑井の掘削と仕上げ

5.1 緒言

一般に坑井の掘削法は対象とする岩盤や地盤の地質、坑井の孔径や深度によって決定される（高橋晋一・伊藤武、1992）。また、坑井の仕上げ法は主としてその坑井が使用される目的によって異なってくる（片桐邦雄、1992）。表-5-1は、既存の I S L 鉱山のデータについてまとめられたものである。これを参考にすれば、今後新たにカザフスタン地域で採鉱を行うとすれば、その坑井は鉱体の最大深度が 700m を越えるとのことから、以下の条件を満足する必要があると考えられる。

- ① 坑井の深度は、最大で 1,000m 程度
- ② 生産井のケーシング径を 177.8mm (7 インチ) とすれば、掘削径（ビット径）は 8・1/2 インチ (215.9mm)

また、図-5-1 は生産井の断面模式図である。この図から I S L 特有の坑井仕上げとして、

- ③ 浸出液に硫酸を使用することから、耐酸性に優れたケーシングの使用
- ④ 坑底部における拡孔やウォータージェットによる削孔

が挙げられる。また表-5-1 の注入井や生産井の間隔から明らかなように、I S L の生産井は石油井、ガス井あるいは地熱井と比較して極めて高密度で掘削されることから、1 本当たりの坑井の掘削費用をなるべく安くすることがシステム全体の経済性を向上させる上で必要不可欠である。本章では今後カザフスタン地域で I S L 鉱山を開発する場合を想定し、上述の(1)～(4)の条件を満足するために既存の掘削機器や手法のうち、どの方法が使用できるかについて主として以下の観点から検討を行った。

- ① 掘削設備としての、スピンドル式とロータリー型の比較
- ② 掘削流体として、泥水と空気の比較
- ③ 掘削流体として空気を用いた場合、ダウンザホールの適用の可否
- ④ ポリ塩化ビニール、FRP ケーシング適用の可否

表-5-1 各ISL鉱山のデータ比較表

国名	カザフスタン			ウズベキスタン			米国	
鉱山名	Centr al	Step- noye	Numbe r 6	Uckku -duk	Zafar a-bad	Nurab ad	Crow Butte	Smith Ranch
確認埋蔵ウラン 量 (tU)	132,500	263,000	56,000	21,300	38,900	27,000	6,270	8,070
ウラン品位 (%U308)	0.035 ~ 0.04	0.032 ~ 0.05	0.065 ~ 0.07	0.1	0.18	0.2	0.25	0.14
深度 (m)	220 ~ 290	90 ~ 250	400 ~ 550	100	100 ~ 400	100 ~ 400	183 ~ 213	153 ~ 300
カットオフ品位 (%)	0.01			0.01	0.01	0.01	0.02	
生産容量 (tU)	800	1,000	800	500	1,500	1,000	385	770
1994年生産実績 (tU)	530	845	390	385	845	770	250	
生産開始	1982	1977	1977	1969	1968		1989	1997
浸出液	硫酸	硫酸	硫酸	水	硫酸	硫酸	アルカリ	アルカリ
浸出品位 (mg/l)	40 ~ 60	30 ~ 70	100 ~ 200	16 ~ 80	50	70	55	
浸出回収率 (%)	90		93	80	80	80	70	70
井戸のパターン	線形	線形	7ポイント	線形	線形	線形	5~7ヌ ホット	5~7ヌ ホット
注入井の間隔 (m)	40 ~ 60	15 ~ 20	40	10	20	15	21.3	25 ~ 30
生産井の間隔 (m)	50	15 ~ 20	80	15	25	25	21.3 ~ 42.6	25 ~ 30
列間隔 (m)	50	40 ~ 60		20	50	50		
注入井ケーシング 径 (mm)	110	110	110	110	110	110	114	127
生産井ケーシング 径 (mm)	220	160	110	220.2 45	220.2 45	220.2 45		
ポンプ設備	水中 ポンプ エア-リフ ト	水中 ポンプ	水中 ポンプ エア-リフ ト	エア-リフ ト	水中 ポンプ エア-リフ ト	水中 ポンプ エア-リフ ト		

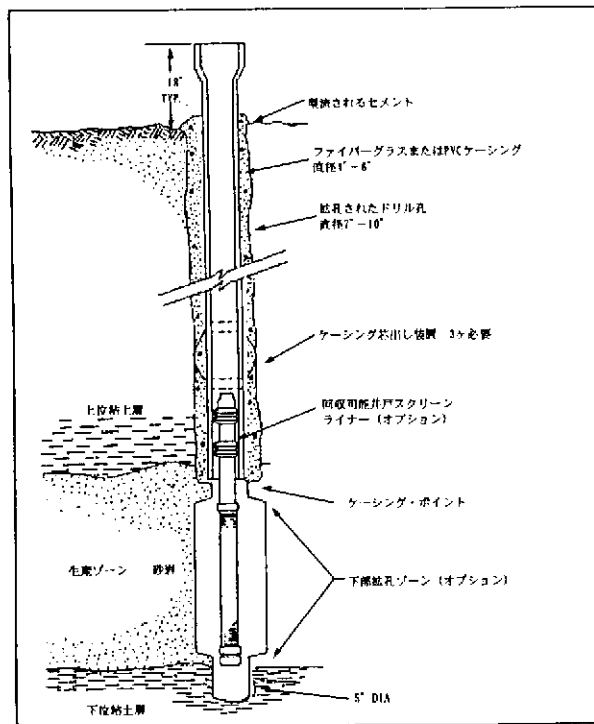


図-5-1 生産井の模式図

5. 2 坑井掘削の目的

一般に、地下に存在する有用な流体、例えば石油、天然ガス、蒸気、地下水等を採取する場合、坑井掘削の目的は主として直接探査と生産との二つである。ウラン鉱石を対象とした I S L の場合であっても目的は同様であり、掘削される坑井は概略次のように分類することができる（松尾・中村、1977 に加筆）。

- ①構造試錐井
- ②調査井
- ③注入井（浸出液を注入する井戸）
- ④生産井（ウランを溶解した浸出液を回収する井戸）
- ⑤モニター井（生産井に転用されることもある）

この分類のうち、ウランの I S L では目的によって、注入井と生産井とを併せて操業井と呼ぶ。これらの坑井を掘削する場合に、それぞれの目的に応じた掘削深度、孔径、調査項目はおおよそ以下のようになる。

構造試錐井は地下の地質構造、ウラン鉱体の賦存状況等の広く調査するために実施される。そのため、岩石試料片（コア）を可能な限り多く採取することが掘削の主目的となる。このコアを用いて地質柱状図が作成されるとともに、種々の測定装置を用いて、岩石薄片の顕微鏡観察、粉末 X 線回折、密度測定、帯磁率測定、弾性波測定等が実施される。また、坑井掘削時に実施される電気検層、温度検層、ガンマ検層等と併せて総合的な地域の評価を行う。

構造試錐井が広範囲な地域を対象として掘削されるのに対し、調査井は目的とするウラン鉱体の物理化学的な調査を主とした目的とする。掘削中は、ロータリー式で行う場合には 5~10m 掘進毎に掘屑（カッティングス）を採取し、必要に応じてコアを採取（スポットコアリング）して、地質の判定や地層対比を実施する。また、随時、電気検層、温度検層、圧力検層等の物理検層を行う。ウラン鉱体を対象とした場合、その透水性の測定もこの調査井を用いて実施し、これらの資料をまとめて生産井掘削の際の設計資料とする。

注入井の掘削はウランの鉱体に浸出液を注入する目的で、また生産井の掘削はウランを溶解した浸出液を回収する目的で行う。また、モニター井は化学分析のための採水を行ったり、抽出に伴う鉱体内の流体圧力の変動を観測する目的で掘削する。

以上のように、ここでは坑井の種類を便宜上 5 通りに分類したが、実際には明確な区別はつけにくい。特にモニター井は、操業の許可を得るために掘削されることがあり調査井との分類は困難である。またモニター井は、ユニットの領域の外側に掘削されるた場合、後の生産井に転用されることもある。

対象とするウラン鉱体の深度が 700m 前後であれば、上述のように分類したそれぞれの坑井毎の深度や孔径は以下のようにになると考えられる。まず、構造試錐井に関して、対象とするウラン鉱体が深度 700m 前後であれば、その下部に賦存する地層の透水性の把握や、鉱体が多層となっている場合、その調査等も含めて、掘削深度は 800m ~ 1,000m 程度となる。また、種々の検層等を実施することも考え、計器が降下可能なように最終孔径は 3 インチ（76.2mm）以上あることが必要である。また調査井は、

構造試錐井よりも掘削密度が高いが、深度・孔径は構造試錐井と同一である。次に注水井に関しては、その坑底は鉦体内にあることが望ましい。注水井の孔径は、注水の際にケーシング内で圧力損失が発生し、過大なポンプ動力が不必要であるように選択すれば良いが、現時点では注水量が不明であるため、この孔径を見積もることが困難である。表-5-1に示した既存の I S L 鉦山の例から言えば、100mm 程度が適当であると考えられる。生産井に関しては、図-5-1に示した模式図から明らかなように、坑底は鉦体下部の不透水層まで掘削される。これは、浸出液を回収する坑壁面積をできるだけ大きくするためである。また、生産井の孔径は、従来の例では 200mm 程度である。これは水中ポンプを坑内に設置するため、あるいはエアーリフトのために、小口径のパイプを坑底部まで降下させる必要があるためと考えられる。またモニター井に関しては、鉦体内の圧力を監視したり採水するという目的から、深度は 800m 程度、孔径は 100mm 程度であろう。以上をまとめると、各目的別の坑井の深度や孔径は表-5-2 のようになる。

表-5-2 坑井の深度と孔径

	深度 (m)	孔径 (mm)
構造試錐井	1,000	76.2 (3 インチ)
調査井	1,000	76.2 (3 インチ)
注入井	700	100
生産井	800	200
モニター井	800	100

これらの坑井のうち、最も掘削本数が多いのは操業井と呼ばれる注入井及び生産井である。したがって、孔径が 100~200mm であり、深度が 700~800m 程度の坑井を掘削する場合に、どのような掘削機や手法があるかを以下に順次整理することとする。

5. 3 掘削機

掘削機は大別して、スピンドル型とロータリー式の二つの形式に大別される。両者の原理的な差異は、掘管に対する動力（回転）の伝達機構の違いであり、スピンドル型は原動機からベベルギアを介して回転するスピンドルに掘管をチャックで締め付けて回転を与えるのに対し、ロータリー式では原動機からチェーン駆動により動力をターンテーブルに伝え、テーブルの回転を四角または六角のケリーに、さらにケリーに接続してある掘管に伝達するものである。また、もう一つの差異としてスピンドル型はピットの押しつけ力をハイドロリックシリンダーを用いて行うのに対し、ロータリー式では掘管の下に接続されているドリルカラーの自重の一部を押しつけ力として利用することである。スピンドル型は、鉦山関係の探鉦ボーリング用に開発された機械であることからその規格は米国の DCDMA 規格 (Diamond Core Drilling Manufacturing Association) に拠っているのに対し、ロータリー式は石油鉦業において発達してきたことから、その規格は A P I 規格 (American Petroleum Association) を基準としている。また、スピンドル型は一般に小口径で掘削能力が

100～1,200m 級のものが多く、最近では 1,500～2,000m 級のものもある。一方、ロータリー式は、装置の規模は一般にスピンドル型よりも大きく、500m 規模の浅掘用から 5,000m を超える大型のものがある。表-5-3 では、国内のメーカーによるスピンドル式掘削機の仕様についてまとめた。また、同じく表-5-4 では、1,000m～1,500m 級のロータリー式掘削機の仕様についてまとめた。これらの仕様から明らかなように、ウランの I S L における深度 700～800m はいずれの掘削機も使用が可能な範囲である。

スピンドル型掘削機とロータリー式掘削機の特徴を比較すると表-5-5 (棗庄典、1991 に加筆、池田修久・市原健一、1992) のようになる。なお、後述するダウンザホール・パーカションドリル機は機構的にはスピンドル型であり、キャタピラあるいはトラック上に搭載されているため機動性が良い。しかしながら、これも後述するように現在のダウンザホールは深度が 400m 程度までの実績しかなく、表-5-5 では比較の対象から省いてある。この表から明らかなように一般にスピンドル型掘削機は小型・軽量で安価であり、また調査の際のオールコアリングという目的にもかかっている。しかし、I S L の際には、生産井坑底部の拡孔等の坑井仕上げ作業もあり、作業性に優れたロータリー式が有利である。この場合には、掘削の方法や技術は石油井の場合とほぼ同様となる。

表-5-3 国内主要メーカーによる深掘り用掘削機
(図解ボーリング便覧より抜粋)

機種名	利根ボーリング			鉦研試錐		鉦研試錐	
	HLL	TXL	TEL	AD-1	EP-1W	DL-6	DH-6
掘削能力 (m)	1,500 ~ 2,000	1,000	500 ~ 800	1,500 ~ 2,000	600	1,000	500 ~ 800
櫓高さ (m)	27	27	18 ~ 27	27	18 ~ 27	27	18 ~ 27
掘削機総 重量(kg)	6,500	5,300	2,200	7,500	2,200	7,500	3,700
分解最大 重量(kg)	3,000	1,450	400	2,300	490	450	450
回転機構	スピント ル	スピント ル	スピント ル	スピント ル	スピント ル	スピント ル	スピント ル
直径 (mm)	160	105	93	150	108	90	105
動力 (PS)	70	70	40	80	36	50	50
泥水ポンプ 主	NAS-7H	NAS-6	NAS-6	MG-100	MG-100	BG-50	BG-50
副	NAS-5	NAS-5	NAS-4	MG-40	MG-40	BG-30	BG-30
動力 (PS)	100~ 30	70	70	100	100	50	50
主	32	32	28	50	50	30	30
副	1	1	1	1	1	1	1
冷却塔 (基)							

表-5-4 深度別ロータリー式主要掘削装置
(松尾圭二、1977より抜粋)

	1,000 m級	1,500m級	2,000m級
櫓の高さ (m)	34	38	40.5
ドローワークス形式	5・7/8" UT	6・1/2" UT	T-32
ロータリーマシン	20・1/2"	20・1/2"	20・1/2"
泥水ポンプ	7・1/4" x 14"	7・1/4" x 14"	7・1/2" x 16"
ドローワークス定格 (HP)	150	250	320
クラウンブロック	30" x 5 車	36" x 5 車	42" x 6 車
トラベリングブロッ ク	30" x 4 車	35" x 4 車	36" x 4 車
ワークライン径 (mm)	26	28	26
吊り上げ荷重 ton	150	150	175
スイベル	300 ton x 6"	300 ton x 6"	300 ton x 6"
ロータリーホース	65 mm x 10 m	65 mm x 10 m	75 mm x 10 m
ケリー	4・1/4" x 11 m	4・1/4" x 11 m	4・1/4" x 11 m

表-5-5 スピンドル型掘削機とロータリー式掘削機の比較

項目	スピンドル型	ロータリー式
1. 口径・深度	大口径・大深度に適さない	大口径・大深度に適する
1. 形状・重量	コンパクト	大型
2. 敷地	狭い。目安として 30m x 50m	広い。目安として 60m x 120m
3. 据付	現場合わせが多く、定型的には行われない	敷地が広いので定型的に行うことが可能
4. 運搬	据付に合わせて、搬入の順序を考えることが必要	敷地が広いので搬入・搬出が容易
3. 掘削コスト	一般に安価	一般に高価
4. 装置コスト	一般に安価	一般に高価
5. 掘削櫓	一本ずつ組み立てる櫓が多いので、ねじの締付等作業員の注意が必要	掘削機本体と一体であり規格化されており、また一旦組み上げると移動は比較的容易
6. コア採取	ワイヤーラインによるコア掘りが主体で特にオールコアリングに適する	ノンコア掘削が主体。スポットでコアを採取する
7. 坑壁と掘具のクリアランス	工法上、クリアランスを大きく取ることにはできない	大口径の場合には十分なクリアランスが確保できるため、循環中の圧損が小さい
8. ロッド揚降	ロッドは外径がストレートであるためホルダーによる保持が不確実である	ジョイント部が太く固定しやすい。揚降速度が早い
9. 坑内事故対策	使用できるフィッシングツールが限られる	種々のフィッシングツールの使用が可能
10. 追掘等	能力的に不可能な場合が多い	対応が可能である
11. 検層等	種々の検層に対応できる	小口径のため制約を受ける
12. 掘進率	掘進率が小さく、実掘削日数がかかる	掘進率が高く、全般に容量に余裕があるため作業性が良い
10. 新技術の適用	小型のため、適用が困難である場合が多い	MWD（掘削時情報検知）等の新技術の適用が可能

5. 4 掘削流体

現在掘削に使用されている循環流体は、大別すれば液体と気体の2種類である。さらに分類すると、液体には清水と泥水、気体には空気やミスト等がある。このうち、空気を用いるものはエアードリル方式と呼ばれ、ロータリー式とパーカッション式の二通りがある。ロータリー式エアードリル方式は、1940年代の後半から石油井に対して用いられたとされている。国内においても東北地方の地熱井や、霧島地域においてミストエアードリル方式が用いられた例がある（中村小四郎、1979）。一方、パーカッション式は、正確にはダウンザホール・パーカッションドリル方式（Down the hole percussion drill）と呼ばれ、1909年、Haslingsによって考案され、1952年、Andre Stenuickによって実用化された。これは、坑底にパーカッションハンマーを置いて、圧縮空気による圧力でハンマーに打撃力を与え、岩石を破碎穿孔するものである。なお、泥水を循環流体としたパーカッション式も原理的には可能であり、国内において研究開発が行われた例があるが実用化には至っていない。

エアードリル方式の利点は以下の通りである。

- ① 特にパーカッション式において、掘進速度が早く、坑井が垂直に掘削できる。
- ② ロータリー式泥水掘削法では、逸泥層があった場合に掘進不能となることがあるが、エアードリルではこれがない。
- ③ 岩石がリカッティングされないため、ビット寿命が長い。
- ④ 揚降管の回数が減少し、工期が短縮される。

一方、短所は以下の通りである。

- ① 出水や地層の崩壊に弱い。このような場合には、泥水掘りに切り替える。
- ② 大容量のコンプレッサが必要である。

表-5-6に穿孔径が200mm以上のダウンザホールドリル及びハンマーについてまとめた。これらの表のうち、インガーソルランド社製は、掘削機全体を含んだ仕様であり、アトラスコプコ及びアメリカミッションは、ハンマーのみについての仕様である。インガーソルランド社のダウンザホールドリルには、タイヤ型とキャタピラ型の2種類がありT-5はタイヤ型、DM-4等はキャタピラ型である。タイヤ型は移動が容易であり、時速40km以上の移動が可能であるが、移動の際にマストをたたむ必要がある。一方、キャタピラ型の移動速度は時速3km程度であるが、マストをたたむ必要がない。インガーソルランド製の削岩機は一分間の打撃数は1,000回程度である。

一般に、ダウンザホールの欠点として、深度300~400m以上の掘削が困難であることが挙げられる。これは、坑井深度が大きくなると穿孔能力に大きな影響を与える掘削屑の排除が困難さを増すためとされている。エアー掘りの場合、空気のアニュラス（環状部、坑壁とドリルパイプとの隙間）速度が、3,000ft/min（15m/sec）以上であれば3/8インチの大きさの掘削屑を上昇させ得るとされている。このアニュラス速度を得るのに必要な空気量は、孔径、ドリルパイプ外径、深度によって異なってくる。したがって、十分な空気量や空気圧を持つコンプレッサーを用いれば、原理的には深度が大きくなってもエアー掘りは可能である。実際に、松川における地熱井で、深度815m

～1,170m をエア掘りで掘進した例がある。この際の所用空気量は 84m³/min であり空気の送り出し圧力は 60kg/cm² であったとされている。表-5-6 より明らかのように、これらの空気量や圧力は標準的な仕様を大きく上回るものである。

これらのことから、ISLの操業井として700～800mの深度を目標とした場合、ダウンザホール・パーカッションドリル方式は適用可能ではあるが、エア・コンプレッサの制限から、経済的ではない可能性が大きい。なお、出水の少ない地層で崩壊の起きない堅固な岩盤であれば、300～400m程度までは、泥水を用いた掘削方式よりはダウンザホールによる方式を使用する方が有利であると思われる。

表-5-6 ダウンザホールドリル及びハンマー仕様例

モデル	単位	インガースランド					アトラス	アメリカ
		DM-4	T-5	DM-6	DM-7	DHD-130	コプコ	ミッション
重量	kg	27,300	38,560	63,000	64,400		86	426.4
押付力	kg	19,000	27,220	40,800	40,800		400～ 1200	2,313 ～ 3,447
トルク	m·kg	576	1,175	1,210	1,210			154.1 ～ 218.3
回転数	rpm	0～ 100	0～63	0～ 100	0～ 100		20～ 30	910～ 1,060
空気消費 量	m ³ /分	17.3	29.8	31.1	33.4	76.4	21.0	18.5～ 32.5
空気圧	kg/cm ²	17.5	4.2～ 10.5	8.75	7.7	8.75	18.3	
穿孔径	mm	137～ 229	229～ 251	184～ 273	317	762	304	254
ロッド サイズ	mm x m	102～ 178 x 7.6		217 x 7.6	218 x 9.7		114 x 3	任意

5.5 ビット

掘削作業において使用されるビット類は、次のように分類される(中村小四郎、1979、湯原浩三監修、1981)。

① ドリリングビット

a. ブレードビット

b. コーンビット (トリコーン、ツーコーンビット)

c. ダイヤモンドビット (PDCビット)

② コアリングビット

③ 傾斜掘ビット

④ ホールオープナー

⑤ リーマー

掘削の際に主として使用されるのはドリリングビットであり、以下では①のドリリングビットについて説明する。ドリリングビットのうち、ブレードビットはビット

ヘッドにブレードを溶接したものであるが、現在では坑口付近の軟質地層に使用される以外は殆ど使用されない。コーンビットには、トリコーンビット（3個のコーンを組み合わせたもの）とツーコーンビット（2個のコーンを組み合わせたもの）があるが、後者は殆ど使用されない。泥水掘りに使用されるトリコーンビットは、現在最も一般的に使用されているビットで殆どの地層に対して適合する。使用されるサイズ（掘削径）は、26インチ(660.4mm)、17・1/2インチ(444.5mm)、12・1/4インチ(311.2mm)及び8・1/2インチ(215.9mm)のものが標準的に使用される。国産のビットの場合、掘削の対象とする地層の硬さに応じて、3S（軟岩用）、3MS、3MH（中硬岩用）及び3H（硬岩用）の種類がある。これらのビットの種類に関しては経験的に、

- ① 瞬間掘削率は3Sが最も大きく、続いて3M、3Hの順になる。
 - ② 硬層に対しては、ビットの種類による掘進率の差は小さい。
 - ③ ビットの種類とトルクとの関係は硬層ほど差があり、3Sは特に大きい。
- とされている。

一方、大深度用のロータリー式エアドリルに使用されるトリコーンビットでは、泥水掘りと異なり、送入空気量の80%が3個のノズルから噴出し、残りの20%の空気量でベアリング部が冷却される構造となっている。また、最近開発されたビットとしてブランキングジェットノズルのトリコーンビットがある。これは3個ある空気の噴出口のうち1個をメクラ（ブランク）とするものである。これにより、従来型では対称的な流れによりビットの中央部に掘屑の滞留部があったが、ブランキングジェットノズルでは滞留が起きないため、掘屑が再破碎されず、掘削速度が大きくなるとされている。また、比較的浅い深度例えば石灰山等で稼働しているロータリー式エアドリルでは、マルチプルステージ（多段式）ビットが用いられている。これは、例えばパイロットビットを直径65mmとし、その後ろに直径80mm、95mm、105mmの3段のリーマビットを組み合わせるものであり、この場合、掘削径は105mmとなる。

パーカッション式エアドリルに関しては、ボタンチップを埋め込んだボタンビットあるいは、ブレードを十字に配置したフルヘッドビット等が使用される。

また、PDC（Polycrystalline Diamond Compact）ビットは、ダイヤモンドの粉末とハードメタルとを700℃で焼結したチップを埋め込んだビットであり、トリコーンビットと異なって可動部分がない。性能試験によれば、掘進率はトリコーンビットに劣らず、適正な荷重で使用すれば、トリコーンビットと比較して寿命が格段に長いことが示されている。このPDCビットの欠点としてチップが脆いため、硬岩の掘削が困難であることが挙げられる。この欠点を補うため、チップを補強するための研究開発も進められている。

5.6 ケーシング

ISLでは、酸あるいはアルカリの浸出液を用いるため、ケーシングに耐酸性あるいは耐アルカリ性に優れた材料が要求される。従来、この目的のためにポリ塩化ビニールあるいはFRP（ファイバーガラスで強化されたプラスチック）のケーシングが

使用されている。既存の米国の I S L 鉱山（操業井の最大深度は 300m 程度）で用いられている、一般的なポリ塩化ビニールの接合（ジョイント）部の強度は以下の値である。

破壊限界		
ネジだけの接合（接着剤なし）	3,000 ポンド	(=1.36ton)
ネジと、接着剤で部分接着	6,000 ポンド	(=2.72ton)
ネジと、接着剤で完全接着	12,000 ポンド	(=5.44ton)

ポリ塩化ビニールの比重は 1.2~1.6 であることから、内径 200mm、肉厚 10mm のケーシングを考えた場合、その重量は 0.0092ton/m（比重を 1.4 とした）程度である。したがって、300m 程度の坑井であればその総重量は 2.77ton となり、上記の破壊限界のうち、ネジと接着剤で部分接着した場合の破壊限界とほぼ同一の値である。実際のケーシング設置時にはケーシングと坑壁とが接触し、ケーシング降管時には上向きの、揚管時には下向きの摩擦力が発生するため、特に揚管時には総重量以上の荷重が発生する。この摩擦力を考慮しても、接合部がネジと接着剤で完全接着されていれば、その荷重は破壊限界には達しないであろう。なお、既存の I S L 鉱山を例としたコスト計算例では、深度 250ft (76m) までは、安価なポリ塩化ビニールケーシング、深度 251~499ft (77~152m) では高価なポリ塩化ビニールケーシング、深度 500ft (153m) 以上では FRP ケーシングを使用するとして計算されており、通常は深度が 150m を越えた坑井では FRP ケーシングが使用されると思われる。

まず、操業井の深度が 700m 程度の坑井を考えた場合、ポリ塩化ビニールケーシングの総重量は、上記と同じ仮定のもとで 6.44ton となり、これを使用することはできない。

次に FRP ケーシングが 700m の坑井に対して適用可能か否かを検討する。表-5-7 に代表的な FRP 繊維の特性を示す。

表-5-7 代表的な FRP 繊維の特性
(複合材料、堂山昌男・山本良一編、1984)

繊維	(単位)	アルミナ (Al ₂ O ₃)	シリコン カーバイド	炭素	ガラス
引張強さ	kg/mm ²	260	250	280	180
弾性率	t/mm ²	25	18	23	7.4
繊維径	μm	9	10	7	10
表面処理		処理せず	処理せず	処理	処理せず
FRP		A FRP	S FRP	C FRP	G FRP
密度	g/cm ³	2.4	2.3	1.5	2.0
引張強さ	kg/mm ²	170	110	150	120
弾性率	t/mm ²	13	10	13	4.5
曲げ強さ	kg/mm ²	180	160	170	120
圧縮強さ	kg/mm ²	150	160	110	46
層間せん断	kg/mm ²	10	10	8~13	10

表-5-7では繊維としてアルミナを用いたFRPの名称がAFRPであることを示している。従来のISLの操業井に対してポリ塩化ビニールではなくFRPケーシングを用いることの利点として、強度が大きいこと、補修が容易であること、接着剤を用いずネジ止めが可能であることが挙げられている。したがってFRPケーシングが700mの坑井に対して適用可能か否かは、ネジ部に発生するせん断応力と表-5-7で示した層間せん断との大小とが判断基準となるであろう。ポリ塩化ビニールと同様、表-5-7のSFRPを対象として単位長さ当たりの重量を計算すると、0.015ton/mとなり、700mの坑井における総重量は、10.6tonとなる。有効ネジ部の長さを10cmとすれば、せん断応力の値は高々0.15kg/mm²である。このことから、揚降管の際のケーシングと坑壁との間の摩擦力を考慮しても、FRPケーシングは十分に使用可能であると考えられる。

5.7 坑井仕上げ

掘削における坑井仕上げとは、生産ゾーン（ISLでは鉋体部分）を裸坑のまま残すか、あるいは孔明管を挿入するかを指す。鉋体が堅固であれば、裸坑（さらには拡孔）のまま残すことも可能であるが、鉋体が崩れてくると坑井が埋まり、生産が減少するか、場合によっては停止することもある。図-5-1では生産井の模式図を示したが、この模式図では生産ゾーンが拡孔されている例について示してある。しかしながら、鉋体内を裸坑のまま残すことは、モニター井を除いて現在殆ど行われていないとのことである。ISLの生産井における坑井仕上げとしては、次の4通りが考えられる。

- ① 裸坑部を拡孔する方法
- ② 全坑にわたってケーシングを行い、鉋体ゾーンの一部をケーシング内部から拡孔する方法
- ③ 全坑にわたってケーシングを行い、鉋体ゾーンに対して孔を空ける（パーフォレーション）方法
- ④ 地表で予め孔を空けたケーシングを坑井内に降ろし、鉋体ゾーン内に設置する方法。

上記の①で裸坑部を拡孔する目的は、掘削中に生産ゾーンの鉋体に付着した泥水等を取り除き、新鮮な鉋体を露出するために行われる。また坑壁の表面積が大きければ浸出液の流入量も多いと考えられ、この意味からも拡孔は有効である。③のパーフォレーションを実施する場合、拡孔は不要である。拡孔に用いられる器具は、半月型をした鋼鉄の刃が水圧によって坑内で開くものが用いられる。

②のケーシングを拡孔する場合においても使用する器具は①と同様である。但し、ケーシングを拡孔する場合には掘屑が塩化ビニールの場合にはりんごの皮状、FRPの場合には小片となり、これらの掘屑が泥水ポンプ内に詰まらないように留意する必要がある。

③のパーフォレーションの場合には、鉋体ゾーンも含めて全坑にわたってケーシ

グをセメントで打設する。その後、目的とする区間のみに対して孔を空ける。そのための装置として機械的式とウォータージェット式とがあるが、後者が優れているとされている。このウォータージェット方式は、米国鉦山局によって開発されており 150 馬力、最大吐出圧 700kg/cm^2 の高圧ポンプを使用し、約 10 秒間でケーシングの対向する方向に 2カ所の孔を同時に空けることができる。ウォータージェットのノズル径として、0.026 インチ (0.66mm)、または 0.046 インチ (1.17mm) を選択すると、ケーシングに対してそれぞれ 0.06 インチ (1.52mm)、0.096 インチ (2.44mm) の孔が空く。この方法の利点として、鉦体ゾーンの下側に多数の孔を空け、鉦体ゾーン全体からの流量を平均下することが可能であることが挙げられる。また、複数の鉦体ゾーンがあった場合の坑井仕上げにも適している。このウォータージェットは、生産性の悪い坑井の刺激に用いることも可能であり、米国鉦山局の行った実験では、生産量 2GPM であった坑井が 12GPM まで増大した例もある。

④の方法ではケーシングを坑内に設置する前に、地表で円形あるいは楕円形等の孔を目的の深さとする位置に空ける。この方法は上記のウォータージェットを用いた方法と比較して安価ではあるが以下の欠点がある。すなわち、ケーシング降下後にセメンティング作業を行う必要上、この孔を閉塞させないために、セメントバスケットをケーシング外側に付けて降管する必要がある。このセメントバスケットと坑壁との間には隙間がないことが望ましいため、ケーシング全体が抑留される可能性が大きい

5. 8 参考文献

- 池田修久、市原健一：スピンドル型掘削機械、器具の特性と取扱い方法、(財)新エネルギー財団、地熱井掘削保安・技術研修会テキスト、平成4年2月
- 高橋晋一、伊藤武：掘削計画とケーシングプログラム、(財)新エネルギー財団、地熱井掘削保安・技術研修会テキスト、平成4年2月
- 片桐邦雄：仕上計画、(財)新エネルギー財団、地熱井掘削保安・技術研修会テキスト、平成4年2月
- 棗庄典：スピンドル掘削の保安、(財)新エネルギー財団、地熱井掘削保安・技術研修会テキスト、平成3年2月
- 堂山昌男、山本良一：複合材料、材料テクノロジー17巻、東京大学出版会、1984年10月
- 中村小四郎：試錐[V](各種掘削法その他)、試錐研究会、熊本大学工学部、1979年6月
- 岩松一雄：地熱資源ボーリング、築地書館、1991年6月
- 松尾圭二、中村昭一：地熱井はどのように掘削されるか、シリーズ1~5、地熱エネルギー、2巻1号、1977年~3巻3号、1978年
- 湯原浩三監修：地熱開発総合ハンドブック、フジ・テクノシステム、1981

6. 浸出と精製

ウランは、その鉱石が酸やアルカリにより浸出され、溶媒抽出法やイオン交換法などの化学的方法により精製される。図1は、ウラン製錬系統を示す。

浸出はウラン製錬の基本をなすものであり、その結果に応じて後続操作を選択・適用する。本稿では、Uraniniteから出発し、イエローケーキを生成させる工程までを記述する。

6. 1 浸出

ウラン鉱物は標本的に産出するものまで含めると非常に種類が多いが、主な鉱石鉱物は、Uraninite (センウラン鉱) である。Uraniniteの化学式として UO_2 と記述してある成書もあるが、実際には UO_2 と UO_3 の固溶体であり、厳密な化学式は、 $(U^{4+}, U^{6+})O_{2-x}$ である。これは、オリジナル鉱物である UO_2 (Ulrichite) が一部酸化されたものと考えられている。成書では、 UO_2 と UO_3 の成分比が1:1のものから UO_3 がほとんど含有してないものまで存在するとしている (W. E. Ford)。Pitchblend, Nivenite, Cleveiteとよばれるウラン鉱物も UO_2 と UO_3 の固溶の程度あるいはそれに固溶する元素に応じて比重や硬さが異なるので鉱物名が異なるが基本的には、Uraniniteと同じ化学式で表せる。Uraniniteは、硬度5.5、比重9.0-9.7とさほど硬い鉱物ではないが重い鉱物といえよう。微量含有元素としては、Pb, Th, Zr, La-Y系元素およびN, He, Arなどであり、これらの元素を最大2.6%含有したものがしられている。

上記のようにUraniniteは、難溶性の4価のほか易溶性の6価のウランを含むが本稿では、Uraniniteの浸出を簡略化して論ずるため、Uraniniteを UO_2 として記述する。

Uraniniteは、工業的には硫酸および炭酸ナトリウム-炭酸水素ナトリウム混合溶液 (アルカリ) 浸出が用いられているが、いずれの場合も鉱物を酸化することが必要である。両者は鉱床タイプにより使い分けられるが、その理由は主として随伴鉱物の浸出性に関与している。アルカリ浸出では、浸出液中にウランとバナジウム以外の成分はほとんど含まれていないが、硫酸浸出液は多成分系となる。その一例を表1に示す。また、硫酸浸出とアルカリ浸出では、浸出以降の工程が異なってくる。両者の相違を図2に示す。インシチュ・リーチングにおけるウランの浸出性の適否を判断する基礎試験として、攪拌浸出試験とカラム浸出試験がある (Hazen Research, Inc.) (G. Hukin)。

6. 1. 1 UraniniteのEh-pHダイアグラム

以下に25°C、全圧1気圧、全ウラン関与種活量が 10^{-6} におけるウラニウム化合物の安定性を示す。図3. 4はGarrelsらの著書から引用した、ウランの開放系 (P_{CO_2}) および閉鎖系 (Σ_{CO_2}) における安定性を示したものである。図は炭酸系の6価ウラン錯イオンの安定領域が広いことを示し、炭酸イオンを含有した水溶液がウラニウムの良溶媒となることを示唆している。一方4価ウラン化合物であるUraninite, UO_2 の安定領域は非常に狭く、特に P_{CO_2} の大きい領域では消滅している。このように6価のウランは溶けやすく4価のウランは溶けにくいという特性を有する。図5は、K, V, CO_2 の活量を固定した多成分U-O₂-H₂O-K-V-CO₂系のEh-pHダイアグラムを示す。VとKが増加するとCa

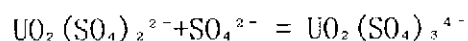
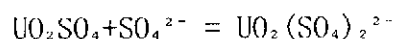
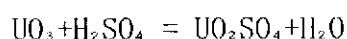
uraniniteの安定領域が広がり、CO₂が増加するとその安定領域が縮小することを示している。すなわち、VとKが共存する水溶液系ではウランは溶けにくいことを示唆している。

なお、ウランの水溶液中における熱力学的諸量は、Latimerの著書に詳しい。

6. 1. 2 酸浸出

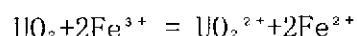
硫酸でのウラン浸出には、希硫酸を用いる一般的方法と濃硫酸（4-6N）を用いる硫酸混和法とがある。希硫酸を用いた場合の硫酸使用量は、20-55kg/1 t 鉱石である。このほか、浸出時間は4-24時間、浸出温度は室温-60℃、パルプ濃度は50-60%、および粒度は28Mesh(0.6mm)程度である。鉱石粒度は一般的にアルカリ浸出より大きくてよい(D. J. King&P. M. Blythe)。硫酸の濃度と量が増大したり、浸出温度が高くなったりすると、浸出時間は短縮できるが、ウラン鉱物以外の鉱物の分解が促進されるほか、浸出機器の腐食の進行が速まったり、浸出廃液の中和処理にコストがかかることとなる。

硫酸によるUraniniteの浸出反応は以下の様に示される。

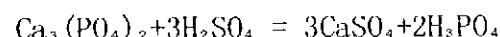


上式に示されるように、硫酸浸出には酸化剤が必要であるが、世界の主要ウラン製錬所の約50%が塩素酸ナトリウム、約40%が二酸化マンガ、その他は空気や酸素を使用している(D. W. Boydell)。このほか、Fe³⁺はほとんどのウラン鉱石に存在し、ウラン酸化に寄与している(R. J. Ring)。

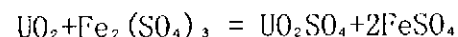
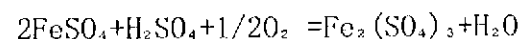
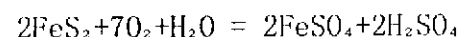
Fe³⁺によるUraniniteの酸化は次式で示される。



また、Uraniniteと共存するアルカリ土類鉱物は、次式にしたがい硫酸に溶解されるので酸消費を促進することとなる。



ただし、次の化学反応式で示されるように硫化鉄や硫酸塩鉱物がUraniniteと共存する(鉱脈型、不整合関連鉱脈型および還元帯の礫岩型鉱床)と、硫酸が生成され、硫酸添加を必要としない場合がある。

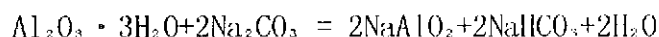
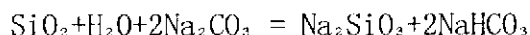
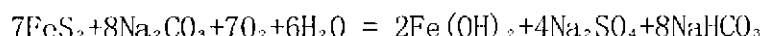


6. 1. 3 アルカリ浸出

既述のように、酸を消費するアルカリ土類金属鉱物などが多い場合、炭酸鉛イオンの形成によるアルカリ浸出を行う。実際の浸出には、Na₂CO₃-NaHCO₃混合溶液を用いる。鉱

石粒度は、既述のように酸浸出の場合より細粒の-100~-200Mesh程度である。炭酸ナトリウムと炭酸水素ナトリウムの濃度はそれぞれ、30-50g/l, 10-20g/lが一般的である。浸出温度は、パチユカ槽では80-95℃、オートクレーブでは110-140℃程度である。パルプ濃度は、50%程度である。浸出時間は鉱石により5-30時間とバラツキがあるが、一般的に硫酸浸出よりも長時間となっている。

酸浸出における酸消費を促進するアルカリ金属鉱物と同様、炭酸錯イオン形成によるウラン浸出の場合も、炭酸ナトリウム消費を促進する鉱物がある。それは、硫化鉱物や珪酸塩鉱物などであり、その主な消費反応式を以下に示す。

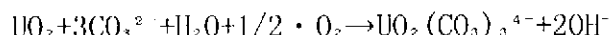


これらの消費を勘案して、一般的には炭酸ナトリウムとしての使用量は、7-35kg/1t 鉱石となっている (R. C. Merrit)。

図6は、増子が与えたU-CO₃-H₂O系電位-pH図である。実験条件は、水溶液中のウランイオン活量が10⁻³Mで全炭酸塩の活量の和が1Mである(増子)。

この図からUO₂を酸化浸出するには、酸性側でUO₂²⁺にするか、アルカリ側でUO₂(CO₃)₂²⁻あるいはUO₂(CO₃)₃⁴⁻などの錯イオンにすればよいことがわかる。ただし、炭酸塩が存在しないとアルカリ側はUO₂・H₂Oなる固相がUO₂と接しているので浸出できないこととなる。

また、浸出がNa₂CO₃のみの添加によると次式のようにOH⁻が蓄積する。



このため、UO₂はUO₃・H₂Oとして析出するおそれがあるので、NaHCO₃を添加したNa₂CO₃-NaHCO₃の混合溶液を用いる。

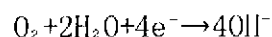
6. 1. 4 浸出速度

図7は、ウランの酸およびアルカリ浸出における溶媒濃度と酸素圧の影響を示す (E. Peters & J. Halpen)。

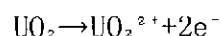
図に示すようにUO₂の浸出速度は、炭酸塩濃度の小さい間はその濃度に比例するが、ある濃度以上になると酸素の供給が律速となることがわかる。

図中の破線および上側の尺度で示すように、酸浸出の場合も同様であり浸出メカニズムの共通性が伺われる。

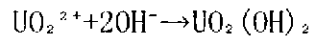
浸出メカニズムとして、Habashiは電気化学的反応を考えている (F. Habashi)。浸出液中のUO₂表面は、カソード部分とアノード部分から形成されている。カソード部分ではアノード部分からの電子の供給を受けて次式に示される酸素の還元が生じている。



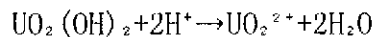
アノード部分ではUO₂の酸化が進んでいる。



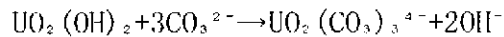
アノード部分で生成した電子は、カソード部分に流れ、UO₂²⁺はカソードで生成したOH⁻と反応し、水酸化物を形成する。



この $UO_2(OH)_2$ を酸浸出の場合は H^+ が



アルカリ浸出の場合は CO_3^{2-} が



のように溶かし出す。

また図7では、 P_{O_2} に対して、それが増加すればウランの浸出も増加すること（圧力が2倍になるとアルカリの場合約2倍、酸の場合約1.3倍）を示唆している。したがって、インシチュ・リーチングのように地下深部で浸出を行う場合、地上における大気圧下の浸出条件より、はるかにウラン浸出条件が良いといえよう。

温度や酸素供給法の影響を示す例としてBeverlyの報告がある。常圧下、82°CでUraninite浸出の場合、70hrで90%の浸出率であったが、120°Cの加圧下では、6hrで97%の浸出率を得ることができ、加圧パチュウカ方式の浸出により、105°Cで短時間で目的を達している（R. G. Beverly）。

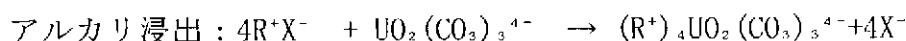
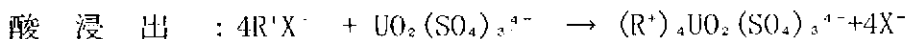
また、高温含ウラン水溶液に関する研究も進んでおり、高温の電位—pH図も発表されている（B. W. Edenborough & R. G. Robins）。

6. 2 精製

ウランの製錬工程は図に示したが、浸出液中の U_3O_8 としての濃度が2.5g/l以下の場合にはイオン交換法が用いられ、それ以上の場合には溶媒抽出法が用いられる（I. C. Edwards & D. C. Smith）。

6. 2. 1 イオン交換法

用いられる陰イオン交換樹脂は、Amberlite IRA-400, Deacidite FF, Dowex-1 などが一般的であり、次のような交換反応を進める。



R^+ は交換樹脂の固定イオン、 X^- は NO_3^- または Cl^- を示す。吸着ウランは水洗後、硝酸塩または塩化物溶液で溶離し、この溶離液にアンモニア、カセイソーダまたは酸を加えてウラン酸化合物として沈殿させる。ウラン回収率は約98%で、80-82% U_3O_8 の、いわゆるイエローケーキを得る。装置としては、向流多段方式が主流となっている。

6. 2. 1. 1 固定床方式

固定床方式は、固定カラムにイオン交換樹脂を充填し、浸出液を通過させた後、ウランを十分に吸着したカラムに溶離液を通してウランを溶離する。この繰り返しにより、ウランの濃縮・精製を行う。通液する浸出液に200-400mg/lのウランが含まれていると、第1段のカラムのイオン交換樹脂には、交換樹脂1 l当たり50-60mgのウランが吸着され、2つのカラムを通じて排出される浸出液に残るウランは、5ppm以下と少なくなる。通液濃度は、一般に5-10SV（SV：1時間当たりの通液量/イオン交換樹脂量）である。溶離液には、12-20g/lのウランが含まれており、溶離後のイオン交換樹脂中には1 l当

たり1-3gのウランが残留する。

6. 2. 1. 2 R I P法

R I Pとは、Resin in Pulpの略でパルプの中にイオン交換樹脂を浸けることを意味する。R I P法では、貴液中に8-15%程度のスライム粒子が含有されていても貴液処理が可能である。これは、貴液の前処理としての固液分離操作が簡単ですむことになるので操業コストの節減につながる。ただし、貴液中のスライム粒子量が多くなるとイオン交換樹脂の比重(1.1-1.14)に貴液の比重が近づきイオン交換樹脂の沈降速度が低下するため操作時間が長くなるなど処理能力が低下する。R I P法の初期に開発されたバスケット方式と呼ばれる装置はウランの輸送効率が悪くかつ交換樹脂の破損も著しいため現在は使用されていない。図はR I P法の一つである混合篩い分け(Screen-Mix)方式を示す。図8に示すように、タンク内にパルプが連続的に流入し混合され、連続的にタンク外に排出される。

6. 2. 1. 3 H i g g i n s 法

CHEM-SEPS装置は、ヒギンス塔として知られている (IAEA)。図9に示すように、ループ状のカラム内をイオン交換樹脂が水圧で移動し、一周の中に、ウランの吸着・洗浄・溶離を行う。したがって、用いられるイオン交換樹脂は、耐磨耗性や耐破損性に優れたものが必要である。米国ユタ州の銅鉱山のダンプリーチング浸出液中の約10 ppmのU₃O₈の回収に用いられている。

6. 2. 1. 4 H i m s l e y 法

H i m s l e y 法は、吸着カラム、樹脂計量器および溶離-洗浄カラムからなっている。図10に示すように、吸着カラムでは上部からイオン交換樹脂、下部からは、ウラン浸出液が供給される。浸出液は連続的に供給され、イオン交換樹脂がカラム下部から取り出される際も、浸出液の供給は停止しない。本装置は、カナダ、K e r r A d d i s o n ウラン製錬所にはじめて設置された。15°Cの浸出温度、3カラム並列で、各カラム毎に約50m³/hの処理量である。供給される浸出液中の固体濃度は、20-100ppm程度である。

6. 2. 1. 5 N I M法

N I M法は、図11に示すように多くのトレイによって内部を区画したカラムからなる。ウラン浸出液はカラム下部から上部へと、イオン交換樹脂はカラム上部から下部へと流れる向流である。トレイは多くの円孔を有しているが、再下段のトレイだけは、円孔上に特殊なキャップを有しており、イオン交換樹脂が必要以外の場合に下部へ流下することを防止している。本装置の実証プラント(カラム直径2.5m、イオン交換樹脂充填量14.8m³)では、浸出液供給量1450l/min、ウラン回収率99%、溶離液中のウラン濃度5g/lをほぼ達成している。

6. 2. 1. 6 Porter法

Porter法は、図12に示すように、直列に繋がったタンクよりなっており、うらん浸出液とイオン交換樹脂の流れは向流である。イオン交換樹脂は、回分操作で定期的に各タンクの底部からエアリフトによって取り出され、次のタンクに上部中央から供給される。オーストラリアのRossing製錬所では、本装置を使用している。このとき供給されるウラン浸出液には、20-1000ppmのスライムが含有されている。

6. 2. 2 溶媒抽出

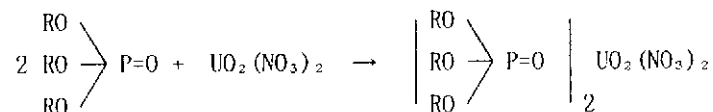
普通の金属塩は強電解質であり、水中で解離して水和イオンとなり水との親和性が高いので、有機溶媒中にそのまま吸収させることは困難である。そこで水和している金属イオンと有機溶媒との親和性を増す工夫が必要になる。そのため、

- a : 金属キレート化合物を形成する。
- b : 他の錯イオンを形成する。
- c : 液体イオン交換剤を使用する。

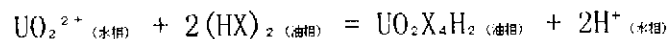
などの手段がとられる。

ウランの場合は、bとcの手段をとっている。

bの方法として、弱い錯イオン（イオン対）を形成してウランを抽出する例は、TBPなどの中性有機リン化合物による硝酸溶液からの抽出がある。R=C₄H₉として次のイオン対を形成する。



cの液体イオン交換剤を用いる方法では、高分子の酸性有機リン化合物や、高分子アミンなどを有機溶媒に溶かして溶媒抽出を行う。酸性有機リン化合物は陽イオン交換膜として働き、なかでもD2EHPAと略称されるリン酸ジアルキルがよく使われる。D2EHPAをケロシンで希釈したウラン抽出は次式で示される。



このとき、次式に示す平衡論的關係が成立している。

$$\log \text{DM} = \log \text{KM} + 2 \log [\text{HX}] + 2\text{pH}$$

ここに、

$$\text{UO}_2^{2+} = \text{M}^{n+}$$

$$\text{分配係数 DM} = \text{KM} [\text{HX}]^2 / [\text{H}^+]^2$$

$$\text{平衡定数 KM} = [\text{MX}_4\text{H}_2] [\text{H}^+]^2 / [\text{M}^{n+}] [\text{HX}]^2 = \text{DM} [\text{H}^+]^2 / [\text{HX}]^2$$

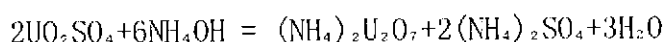
装置としては、ほとんどの製錬所でミキサーセトラーを使用している。ミキサーとセトラーが一体となった長方形のミキサーセトラーのいくつかを並べて、密閉型としたものが多く用いられている。ミキサーセトラーの設計や段効率の計算については文献が多い（化学工学便覧）（J. H. Perry）。

ミキサーセトラー操業で最も大きな問題となるのは、セトラーでの液と有機溶媒相の中間に生じる第3相や定常的な気泡の発生である。これらは、液相中に含まれるフミン

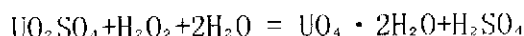
質、遊離珪酸および菌類の繁殖などが原因と考えられている。このような現象は、実験室規模の連続操業では生じないか、生じても問題とならぬほどの軽微なものである。しかし、商業規模の操業においては上記の現象は生ずることがあり、生産効率の低下をもたらす。この対策には、鉍石を焼いて炭質物などの有機物を酸化してしまうことや浸出液に消泡剤を添加することなどが行われている。

6. 2. 3 化学沈殿

ウランの化学沈殿は通常二段で行われる。第一段の沈殿にはCaOあるいはCa(OH)₂を用いpHを3.5-4.0として、不純物であるFe, Al, Thを除去する。この場合の沈殿物は少量のウランを含有するので浸出工程へ送られる。ついで第二段では、NH₃を用いて主として重ウラン酸アンモニウム (ADU: Ammonium Di-uranate: (NH₄)₂U₂O₇) からなる沈殿物を生成する。NH₃は一般的にはアンモニアガスを用いる。

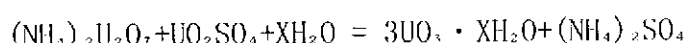
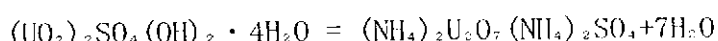
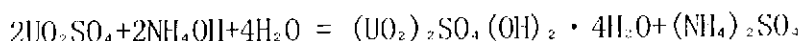


このほか、過酸化水素によるウラン沈殿は、まずpHを3.5付近に調節して過酸化水素を加える。この反応では、酸が生成してpHが低くなるので最適pHを保つため連続的にNH₃を添加する。



この方法でのウラン沈殿は他の方法よりも高くつくがU₃O₈の純度は高く98%以上である。MoおよびV含有量の低いイエローケーキを作るには良い方法であり、かつ、沈殿や濾過性についてもアンモニア沈殿物より良い。

ウラン沈殿物の化学種は主として上記のADUであるが、沈殿条件により他の化学種が沈殿する。



したがって実際の沈殿物は、いくつかのウラン化合物の混合物から成る。このうち、含水ウラン化合物(UO₃ · xH₂O)は、一般にゼラチン状で濾過特性が悪い。一方、塩基性ウラニル沈殿物は、濾過性がよい。

アルカリ浸出液中のウランは、UO₂(CO₃)₂⁴⁻として存在し、水酸化ナトリウムの添加によって重ウラン酸ナトリウムあるいはポリウラン酸ナトリウムとして沈殿する。沈殿物中のNa含有量は多いが、硫酸アンモニウムでの洗浄や、沈殿物を溶解後、アンモニアによって沈殿させることによって、Na量を減少させることができる。

6. 2. 4 ウラン精鉍 (イエローケーキ)

ウラン沈殿物は、通常400-500℃で脱水・乾燥され、金属ウラン製造のためのウラン精鉍であるイエローケーキとなる。乾燥温度が600℃以上になると、UF₄製造の際に、フッ素系と反応しにくいウラン化合物となってしまう。乾燥機としては、多段乾燥機その他、ドラム型乾燥機や輻射熱乾燥機などが用いられる。表2にイエローケーキの化学分析例を示す。Uとして65-75%含有されている。

ウランはイエローケーキとして売買され、イエローケーキに含まれるウランは、 U_3O_8 として、11b当たりの価格で表示される。

6. 3 米国のインシチュ・リーチングにおける浸出と精製

米国におけるウランのインシチュ・リーチングからイエローケーキを得る実際のプロセスフローを図13に示す。また、その商業プラントの仕様を表3に示す (Colorado school of mines)。各社とも炭酸塩浸出を行い、イオン交換樹脂による精製を行っている。酸化剤である H_2O_2 は1g/l以下、炭酸塩全濃度は5g/l以下となっている。

文 献

- 4th edition by W. E. Ford: Dana's Textbook of Mineralogy, p745-746, (1953)
John Wiley and Sons, London
- Hazen Research Inc., :In-situ recovery of uranium from Peterson property samples, 35(1980)
- G. Hukin: Mining Congress Journal, October(1975)
- Robert M. Garrels and Charles L. Christ: Solutions, Minerals and Equilibria p253-256(1965), Harper and Row, New York
- Wendell M. Latimer: Oxidation Potentials, p300-304(1952), Prentice-Hall, Inc., New York
- D. J. King and P. M. Blythe: CIM Bulletin, May(1979), 135-140
- D. W. Boydell: IAEA, Paris, (1979), 29-49
- R. J. Ring: 7th Australian Conference on Chemical Engineering, (1979), 22-24
- F. Habashi : Principles of Extractive Metallurgy, Vol. 2, (1970), Gordon and Breach
- E. Peters and J. Halpern: Trans. Can. Inst. Min. Met., 56(1953), 355
- 増子 昇 : 電気化学, 27(1959), 365
- R. G. Beverly et al: J. Metals, 9(1959), 746; 2nd International Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol. 3, (1958), 326
- B. W. Edenborough and R. G. Robins: Electrochimica Acta, 14(1969), 1285
- I. C. Edwards and D. C. Smith: CIMM Bull., 55(1962), 733
- R. C. Merrit: Uranium resource/technology seminar, (1979), 208-243
- IAEA: Signification of mineralogy in the development of flowsheet for processing uranium ores, 230-241(1980)
- 化学工学便覧 : 化学工学協会、改訂三版、丸善株式会社、1450(1975)
- J. H. Perry: Chemical engineers handbook, McGraw-Hill, 17-21(1963)
- Colorado School of Mines: Mineral Industries Bulletin, No. 1, Vol. 22, January(1979)

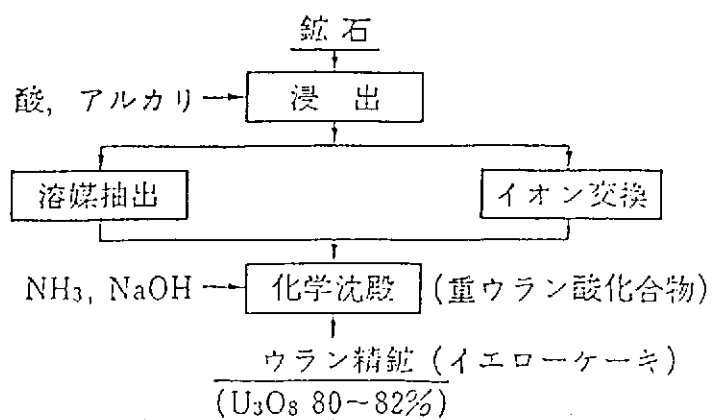


図 1 ウラン製錬系統図

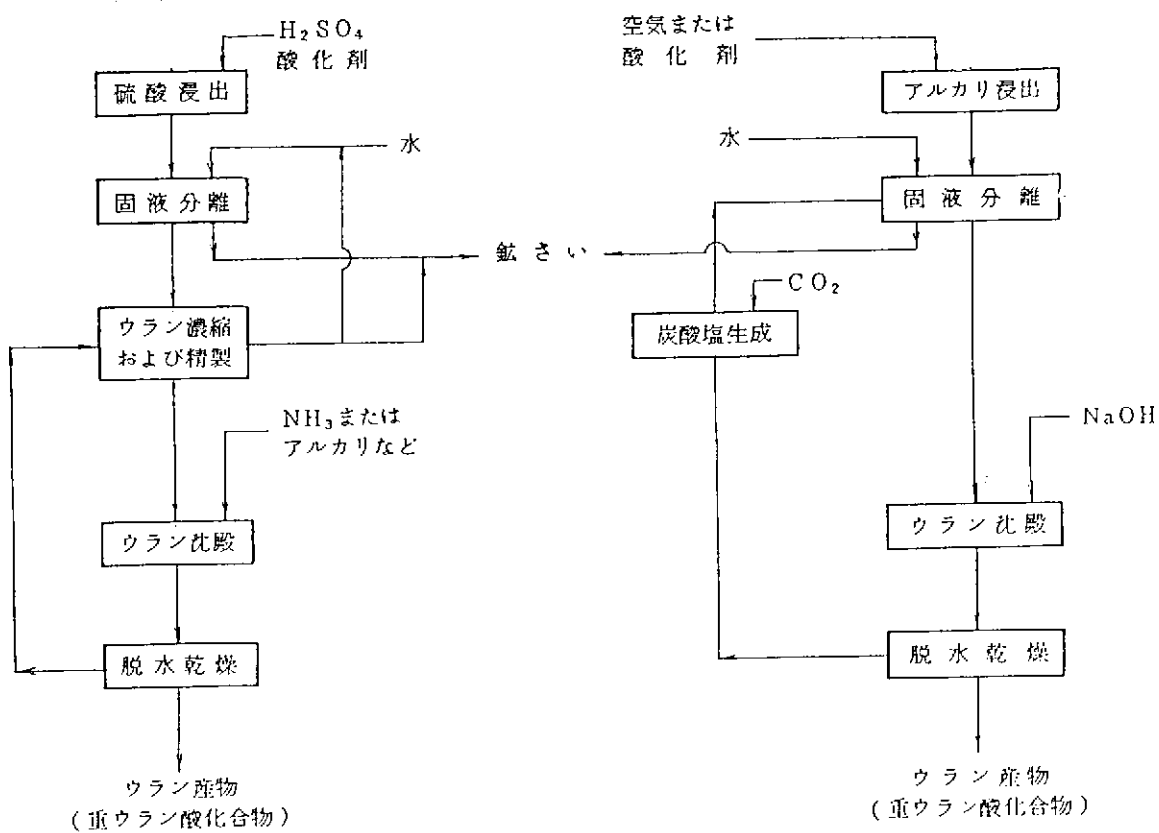


図 2 硫酸およびアルカリ浸出によるウラン製錬

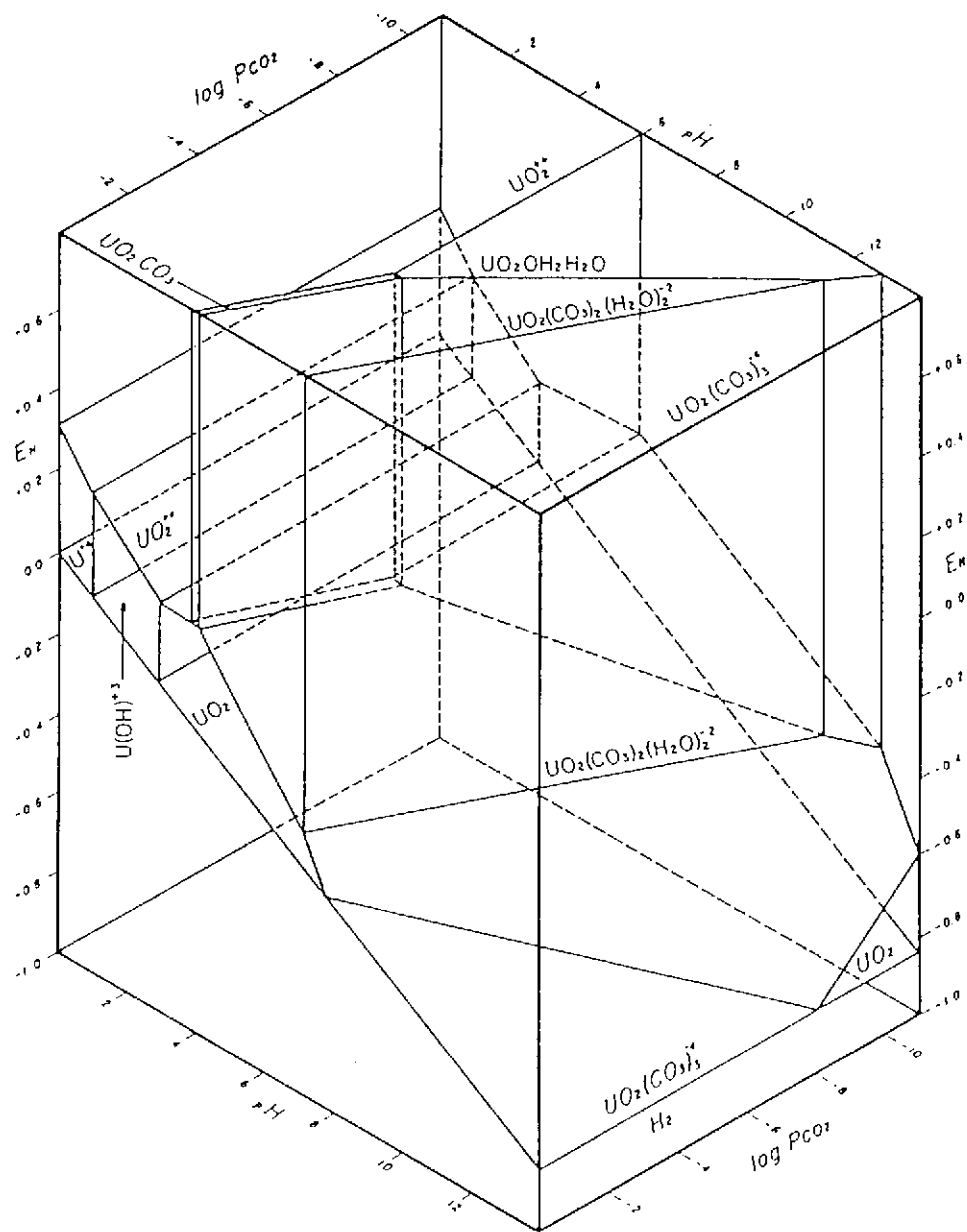


FIG. 3 Stability relations among some uranium compounds in water at 25 °C and 1 atmosphere total pressure as a function of pH, Eh, and P_{CO_2} . Boundaries of solids at activity of total dissolved uranium-bearing species of 10^{-4} . [Courtesy R. Garrels, P. Hostetler, A. Weeks, C. Christ.]

図 3 Uraninite の Eh-PH ダイアグラム (1)

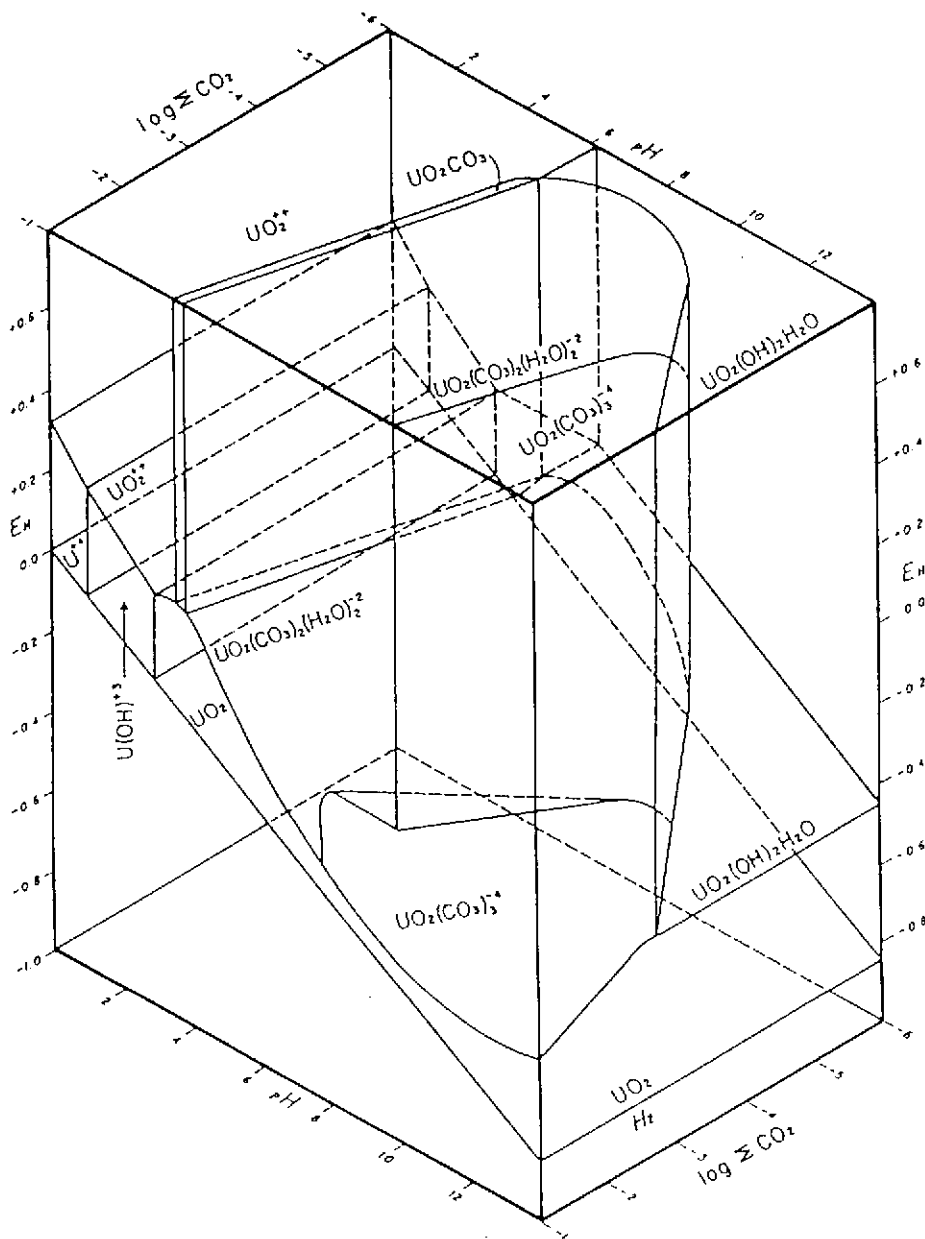


FIG. 4 Stability relations among some uranium compounds in water at 25 °C and 1 atmosphere total pressure as a function of pH, Eh, and total dissolved carbonate species. Boundaries of solids at activity of total dissolved uranium-bearing species of 10^{-4} . [Courtesy R. Garrels, P. Hostetler, A. Weeks, and C. Christ.]

図 4 Uraninite の Eh-PH ダイアグラム(2)

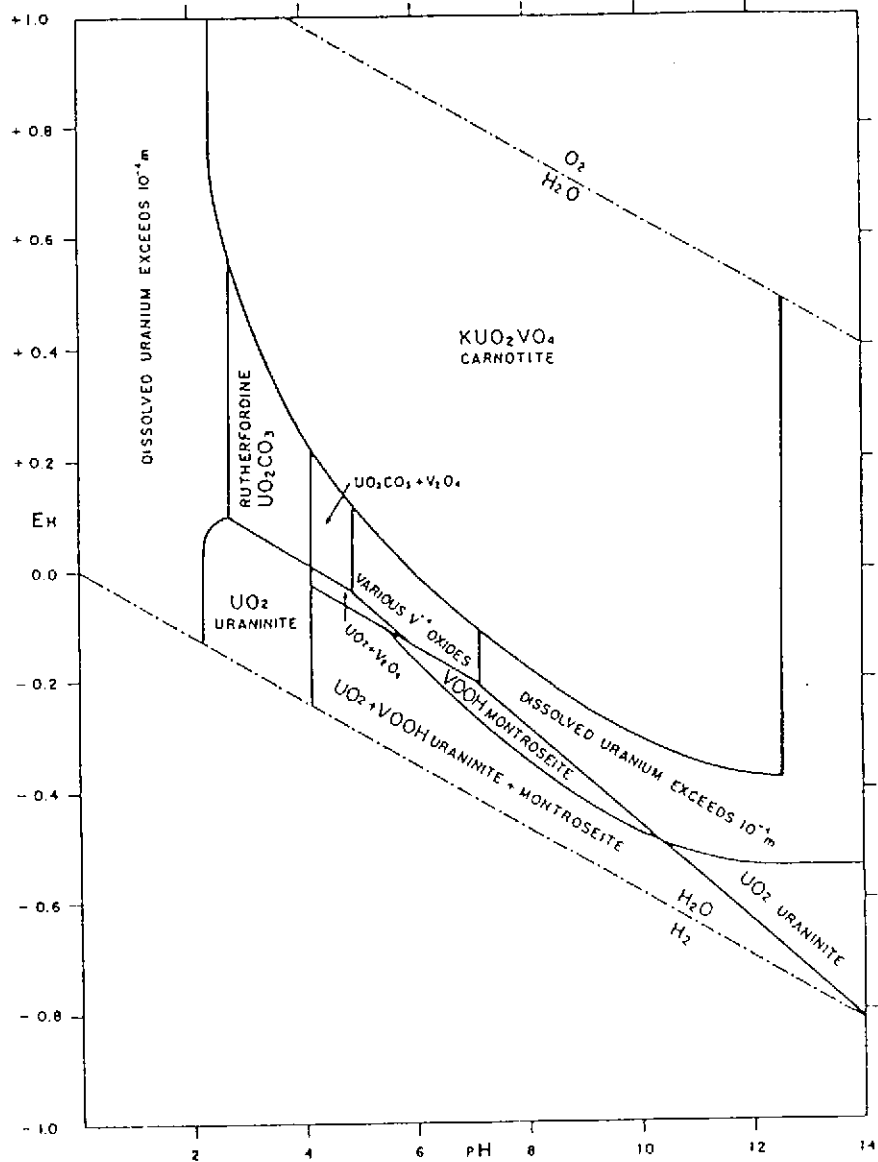


FIG. 5 Stability relations among some uranium and vanadium compounds in water at 25 °C and 1 atmosphere total pressure. Total dissolved vanadium species = 10⁻²; total dissolved carbonate species = 10⁻¹; total dissolved potassium species = 10⁻³. [Courtesy R. Garrels, P. Hostetler, A. Weeks, and C. Christ.]

図 5 多成分系のEh-PHダイアグラム

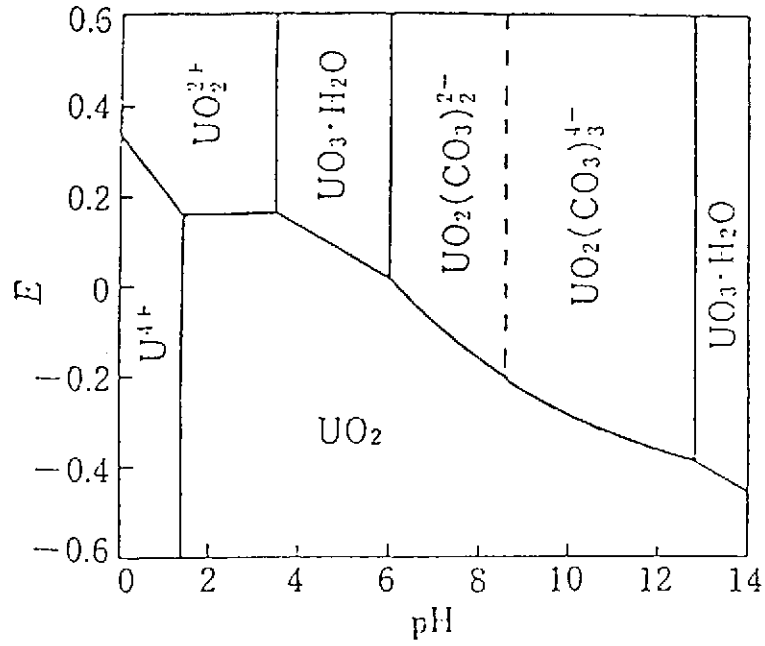


図 6 U-CO₃-H₂O系電位-PH図
(ウランイオン活量 0.01, 全炭酸塩濃度 1)

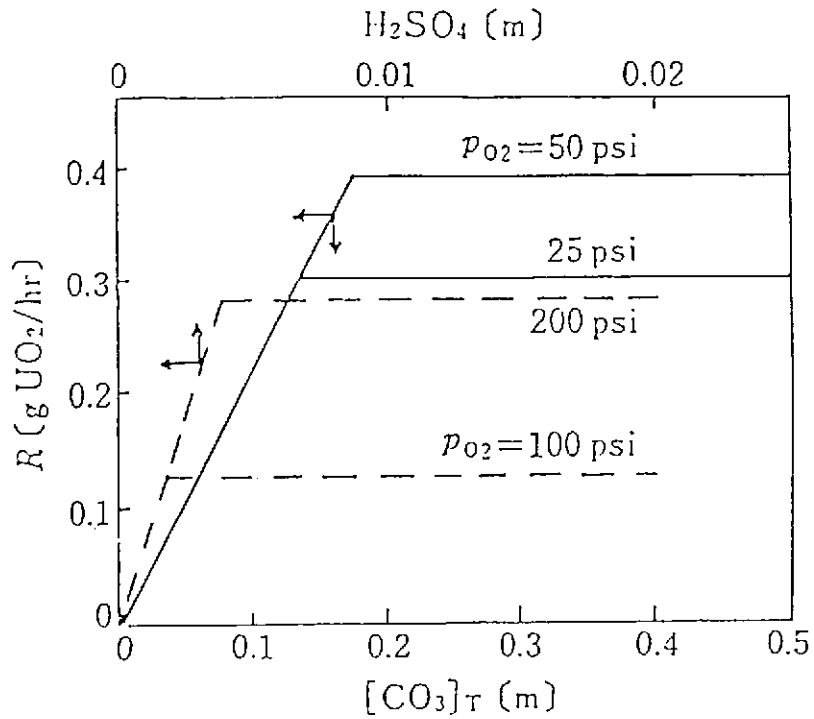


図 7 ウラン鉱の酸、アルカリ浸出に
おける溶媒濃度と酸素圧の影響

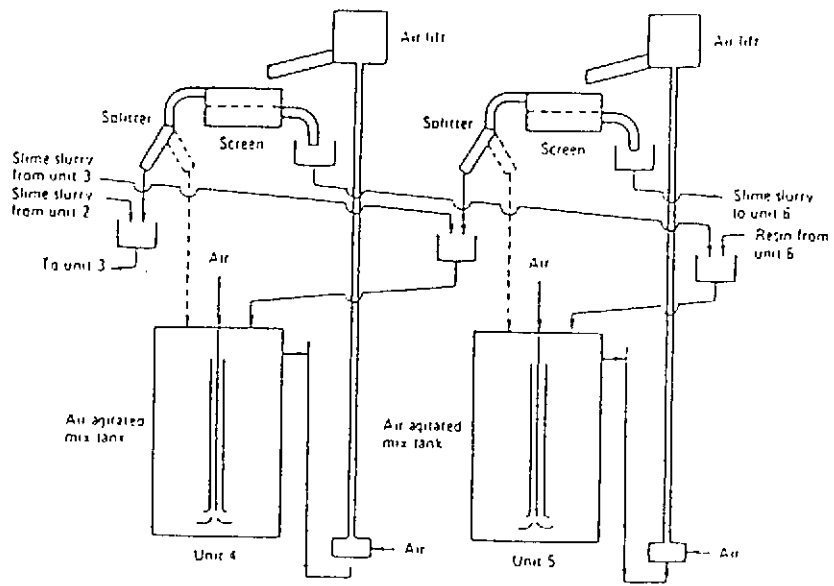


图 8 Screen-mix-RIP法

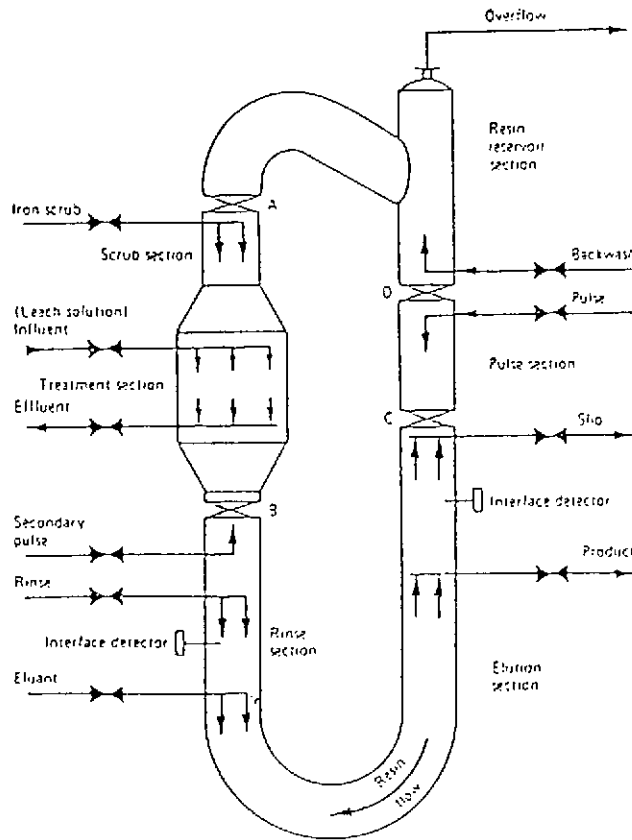


图 9 CHEM-SEPS装置

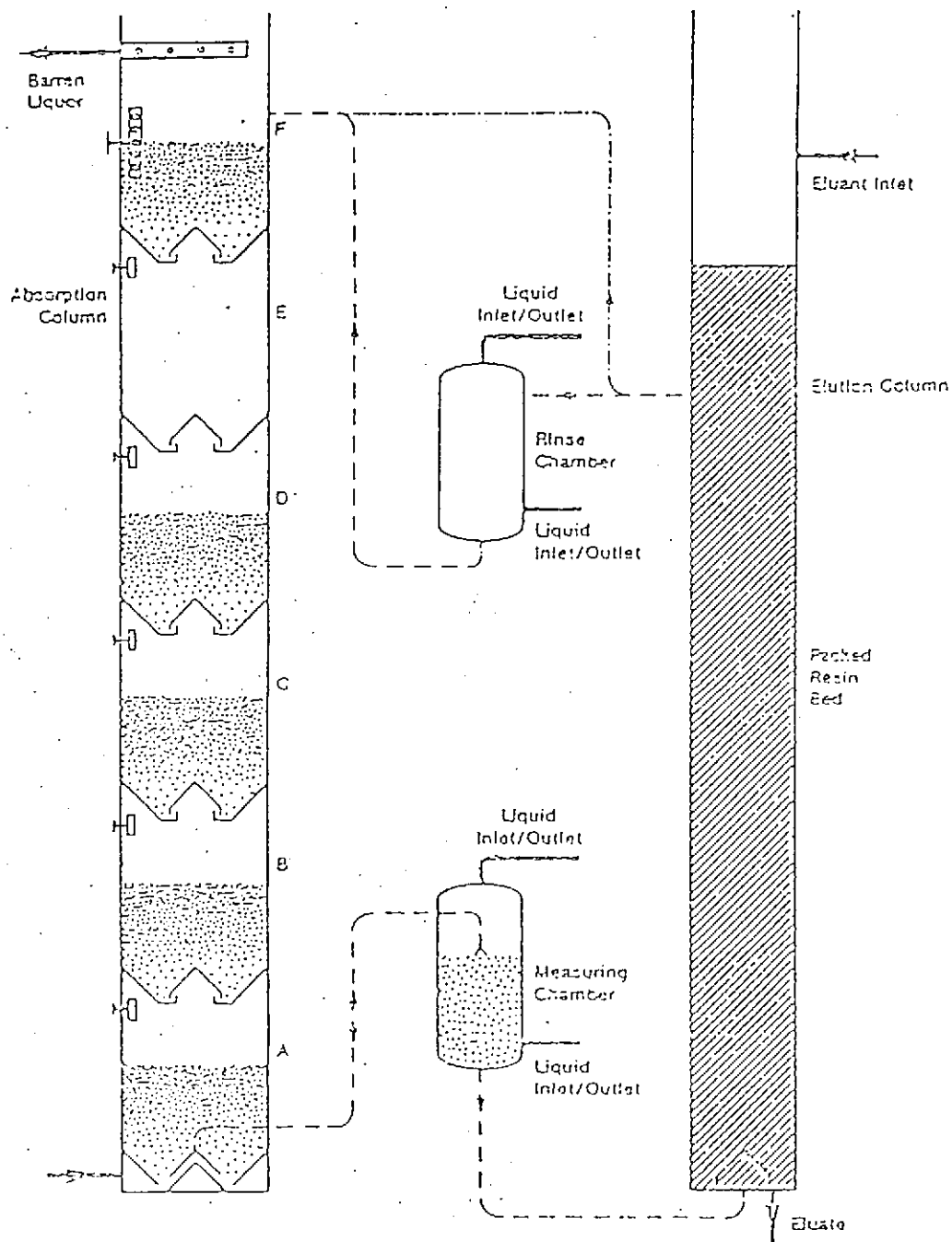


图10 Himsley C I X装置

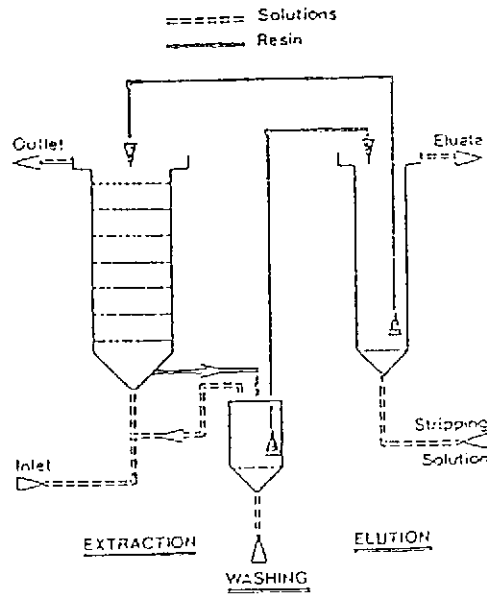


图 11 NIM CIX装置

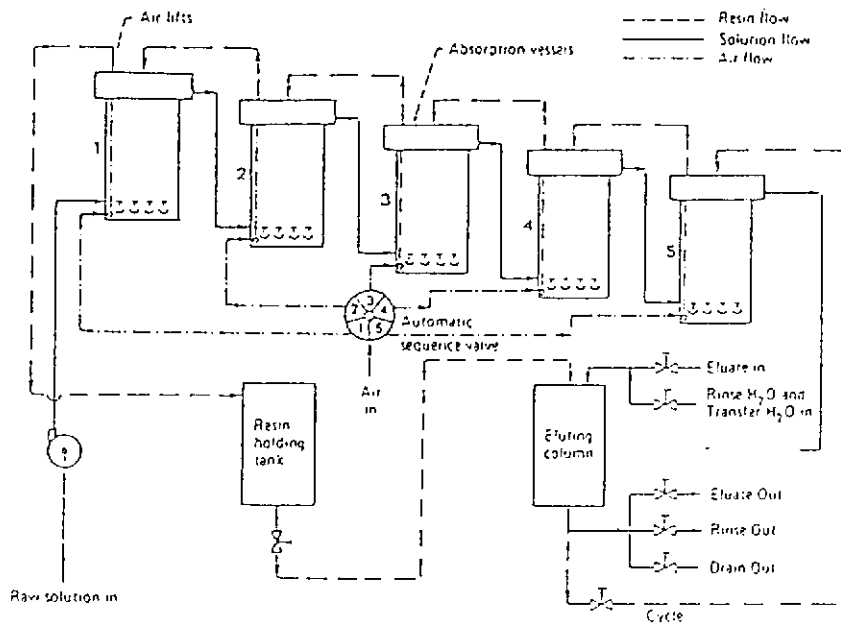


图 12 Porter CIX装置

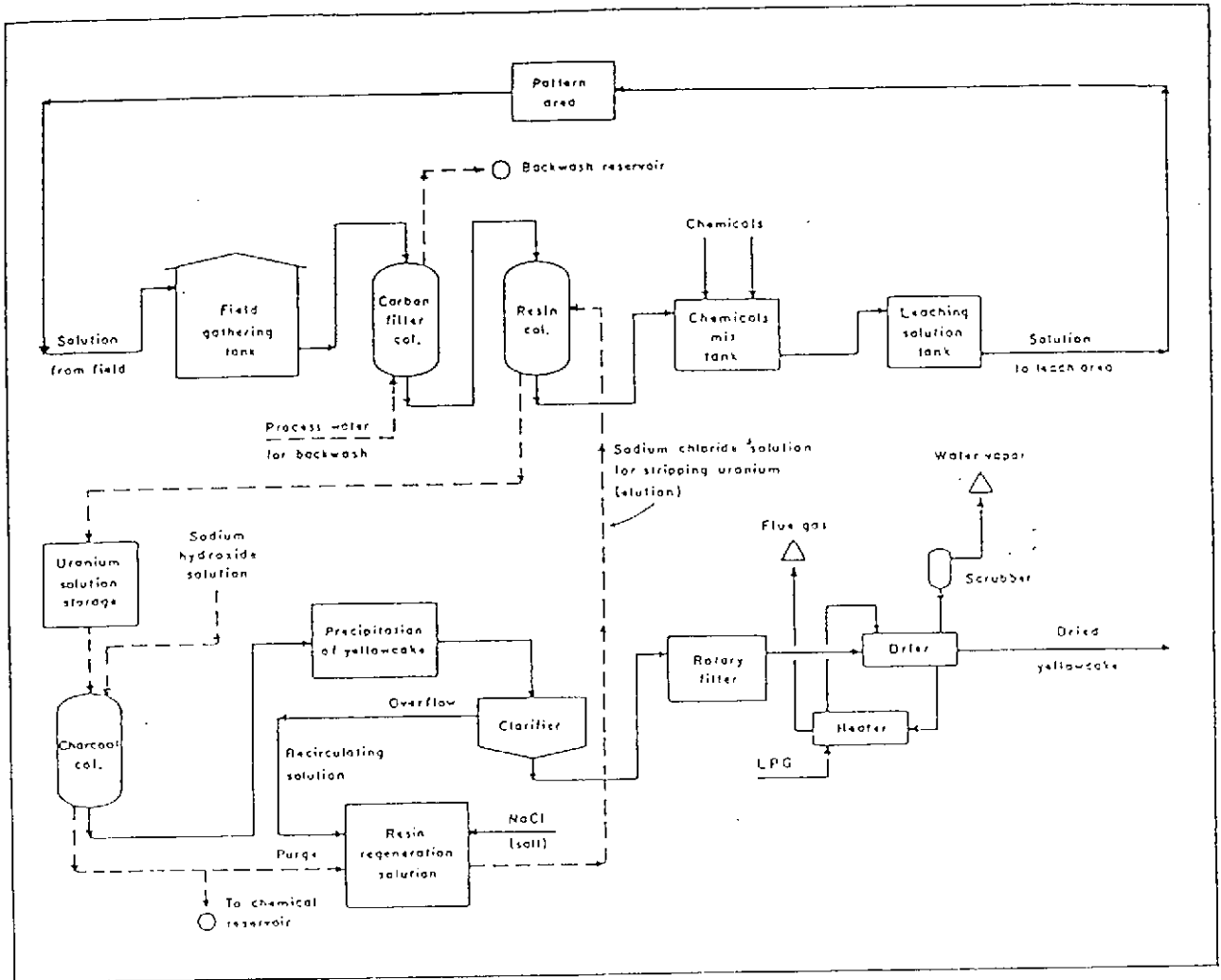


Figure 13 Uranium extraction flow sheet, Clay West, Texas.

図 13 Clay West 鉱山のウラン抽出フローシート

表 1 硫酸浸出液の分析値

成分	代表例 ³⁷⁾	人形	ランスタッド
UO ₂ ⁺⁺	0.2~1.0	0.98	0.8
Fe ³⁺	3.5	2.15	9.8
Fe ²⁺	0.5		
Al ₂ O ₃	2.6	1.30	18.0
Mn	4.5	0.18	
CaO	0.6	0.40	1.1
MgO	3.0	0.11	4.8
PO ₄ ³⁻	0.2	0.55	4.9
As ₂ O ₃	0.2		0.16
SO ₄ ⁻	33.0	38.8	
SiO ₂	1.0	1.1	

表 2 イエローケーキの分析値

	ブライドケミカル	カーマギー	中 国
U	75	65	74 (単位:%)
V ₂ O ₅	0.10	0.116	0.05
PO ₄	0.10	0.698	0.38
F	0.01	0.098	
Mo	0.10	0.098	0.24
SO ₄	3.00	6.82	1.20
Fe	0.15	0.975	0.37
As	0.05	0.65	0.001
CO ₂	0.20	1.30	
Ca	0.05	0.65	0.13
Na	0.50	0.	1.29
B	0.005	0.098	
K	0.20	0	0.04
Ti	0.01	0	
Zr	0.01	0.325	0.28
SiO ₂	0.50	1.41	0.34
Mg	0.02	0.65	0.29
Th	0	1.30	
Ra			4.6 × 10 ⁻⁵ Ci/g
H ₂ O	2.00	7.50	3.01

イエローケーキ中のラジウム含有量

生産国	ラジウム含有量 (PCi/g)
ニジェール	35.6
カナダ	2.36
アフリカ	3.66
南アフリカ	0.21

分析および解析: 勲然, 人形峠, 福島院

表 3 Texasに於けるプラントの仕様(炭酸塩方式-1975)

Table 3. - Plant characteristics Texas - Carbonate Process - 1975

	Westinghouse	Mobil	ARCO	DALCO
Leach system	Carbonate multiple recirculation	Carbonate multiple recirculation	Carbonate multiple recirculation	Carbonate multiple recirculation
Filtration	Metal screen	Sand filter	Carbon column	Carbon column
Concentration	Resin bead IX	Resin bead IX	Resin bead IX	Resin bead IX
IX system adsorption	USBM Expanded bed	Fixed bed	Fixed bed	Fixed bed
Elution	Counter current Column NH ₄ Cl	Fixed bed (NH ₄) ₂ CO ₃	Fixed bed NaCl	Fixed bed NaCl
Leach reagents	NH ₃ CO ₂ H ₂ O ₂	NH ₃ CO ₂ Oxidant	NH ₄ HCO ₃ O ₂	NH ₄ HCO ₃ O ₂
Precipitation	HCl + NH ₃	NH ₃ , CO ₂ Recovery steam	NaOH	NaOH
Product	Slurry	Slurry	Solid	Slurry

Source: Hunkin 1976.

7. 環境に関すること

ウラン鉱山でウランを生産する方法として、露天掘や坑内掘による在来型の採鉱法のほかに、ウラン鉱床生成のメカニズムの逆プロセスを利用し、 U^{4+} を U^{6+} に酸化・溶解させてウランを回収する ISL 採鉱法がある。

ISL 採鉱法は、砂岩型ウラン鉱床の原位置に浸出液を注入し、ウランを溶解して貴液としてウランを回収する方法である。直接、浸出・溶解された液からウランを回収するため、在来型採鉱法と比較してウラン鉱石を採掘、運搬、破碎、磨鉱の各工程が省略される。

したがって、ISL 採鉱法は在来型採鉱法に比べ、生産工程がシンプルで放射線被ばくを受けにくく、鉱さいおよび捨石の発生もなく、一般的に環境負荷は軽減される。ただし、地下水の水質と水位の回復に留意しなければならない。

7.1 はじめに

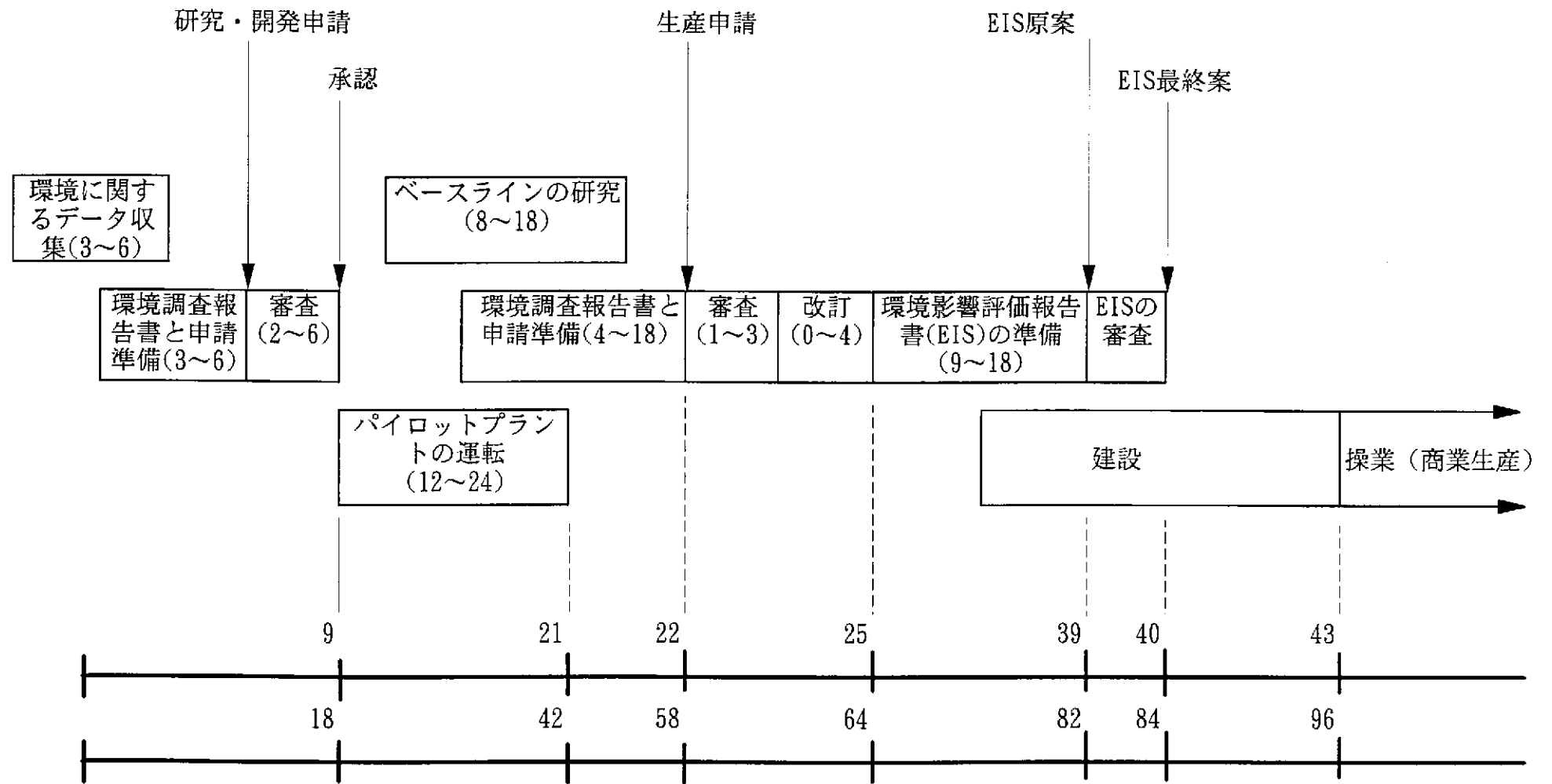
ISL 採鉱法は、在来型採鉱法で確立された処理方法を使って、簡略した工程でウランを生産する方法である。したがって、環境問題としては在来型採鉱法と同様、放射線による被曝とウラン生産で発生する廃棄物による環境への負荷の増大である。

特に ISL 採鉱法で、最も環境保全に留意しなければならないことは、地下水の汚染の可能性および地下水レベルの低下等である。

鉱山開発に当たっては、環境保全の立場から自然環境はもちろん、社会・経済環境影響調査が必要で、広範囲な環境に関するデータの収集に基づく環境影響評価 (EIS) が実施されなければならない。下記に主要な環境影響評価項目を示す。

これらの環境影響評価に要する期間は、米国では最短でも3年半から約7年間必要である。商業規模のウラン生産を始めるまでの典型的なタイムスケジュールを図7-1に示す。(1982年ウランのインシチュマイニングハンドブックより引用)

- a. パイロットプラント運転によるベースラインの測定
- b. 水理・水質に関する評価
- c. 大気の状態に関する調査
- d. 植物群および動物群にかかる生態学的調査
- e. 社会・経済影響調査 (地域経済およびウラン市場)
- f. 考古学に関する調査
- g. 土地の再生利用と閉山処理



() 中の数字は所要期間(ヶ月)を示す。

図7-1 環境影響評価報告書と所要期間(米国の例)

7.2 環境への負荷

ISL法によって、ウランを生産する工程で発生する環境への負荷は、次のようなものがある。

(1) 原位置でのウラン浸出工程

注入井から浸出液をウラン鉱体賦存ゾーンに注入するため、ウラン鉱体賦存ゾーンの地下水、地層に影響を及ぼす。影響要因として以下のものがある。

- ・ 浸出液の成分
- ・ 浸出されたウラン
- ・ ウラン以外の浸出された地層に含まれる成分

(2) 浸出貴液の回収工程

生産井から汲み上げられた浸出貴液（ウランを溶かし込んだ液）は、閉鎖系以外では、ラドンガスを放出する。

浸出貴液をイオン交換へ送り込む前に不純物を取り除くため、沈殿地を設ける場合があるが、その池でラドンが放出される。

(3) イオン交換によるウラン回収工程

貴液からイオン交換樹脂によるウラン吸着工程、および樹脂に吸着したウランの溶離工程でラドンガスが発生する。

(4) 浸出液の再生工程

貴液からウランを回収した液には、混入した地下水および地層中の浸出された成分を含む。ウラン回収後の貴液は、浸出液として再生させるため、好ましくない成分を除去し、試薬（酸化剤）量を調合してリサイクルされる。この工程でラドンガスと不純物（放射性廃棄物）が発生する。

(5) 粗イエローケーキ製造工程

溶離液に還元剤を添加してウランを沈殿させ、固液分離により濃縮し、スラリー状の粗イエローケーキを製造する。この工程でラドンガスが発生する。更にイエローケーキにするためろ過後、乾燥させて出荷している場合、乾燥工程で放射性粉塵が発生する。

(6) 帯水層の復元工程

貴液のウラン品位が低下した井戸設備は、浸出液の注入を止め、生産井から残留浸出液や汚染された地下水等を汲み上げ（図 7-2）、イオン交換によってウランを回収する。ウランを回収した後の廃水は、廃水処理される。処理後の清水の一部は、帯水層の洗浄および地下水位の復元（図 7-4）に使用

される。この工程では、廃水処理の澱物（放射性廃棄物）が発生する。

上記の帯水層の復元工程に地下水等汲み上げ後、還元剤を添加した清水を注入する工程（図 7-3）を付加した方法も取られている。

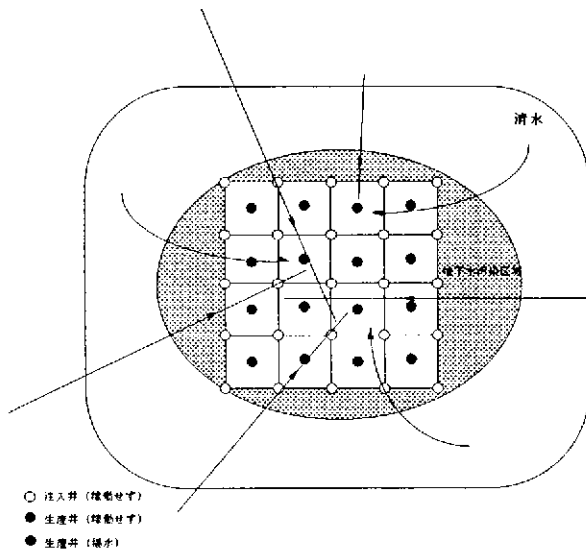


図 7-2 地下水の汲み上げ

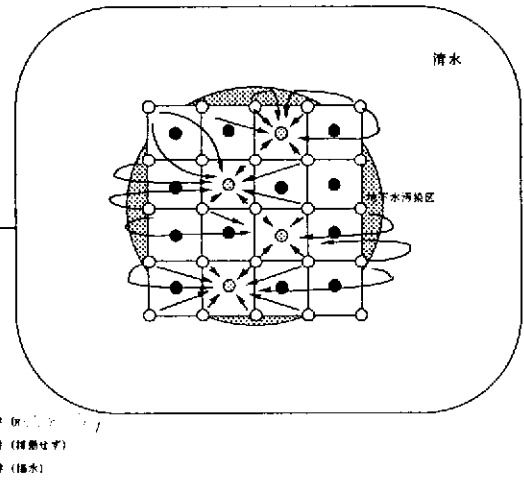


図 7-3 還元剤の注入

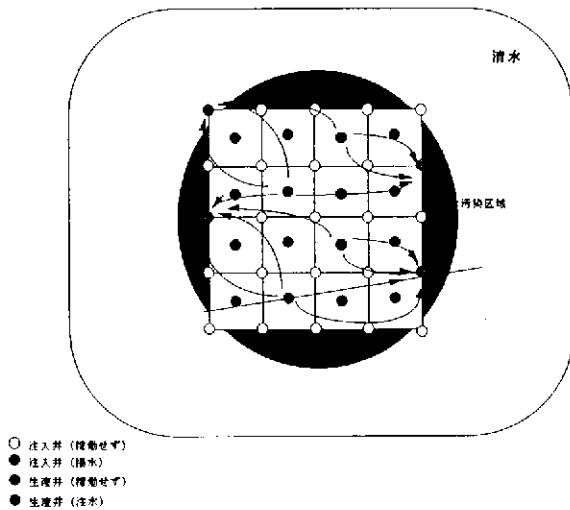


図 7-4 洗浄水の注入

7.3 放射線被ばく対策

7.3.1 放射線被ばく

ウラン U^{238} は核壊変し Pb^{206} に変わるが、その核壊変の際、 α 線（ヘリウム原子核）、 β 線（高エネルギー電子線）とこれに伴う γ 線（超微波長電磁波）を放射する。

これらの放射される α 線、 β 線、 γ 線の照射による人体への影響は、外部被ばくと内部被ばくに分けられる。

ウラン鉱山で実際に影響の大きいのは内部被曝で、これはラドンとこれに伴う娘核種および放射性鉱石粉塵を人が吸い込んだ時、これらにより体内で照射される α 線によって起こる。

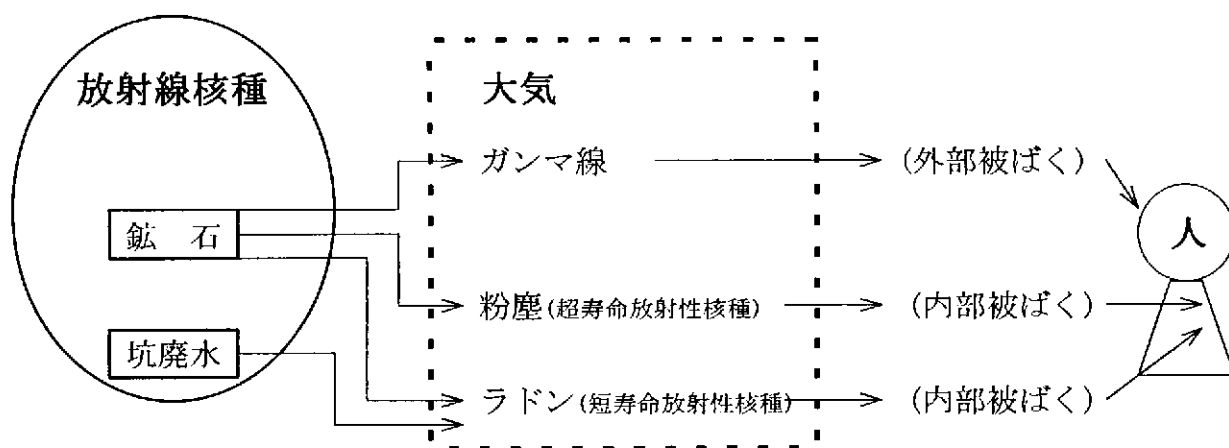


図 7-5 ウラン鉱山での放射線被ばく

(1) 外部被ばく

外部被ばくは、鉱石中のウラン娘核種が放出する β 線と γ 線の照射に由来する。 γ 線が主に問題となるが、 β 線による眼への影響も十分注意する必要がある。

(2) 内部被ばく

①ラドンおよびその短寿命娘核種の吸入による内部被ばく

内部被ばくの1つの線源は、鉱石または坑廃水から遊離した ^{226}Ra （ラジウム）から生成する ^{222}Rn （ラドン）とその娘核種（ ^{218}Po 、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 、 ^{214}Po 、 ^{210}Pb ）である。

ラドンは不活性な気体なので、吸入しても排出され肺には残らないが、その娘核種はエアロゾルと結びついて吸入され肺胞の中に付着し、主に α 線で被ばくする。下表にラドン娘核種の半減期と放射線の強さを示す。

表 7-1 ラドン娘核種の半減期と放射線の強さ

ラドン娘核種	半減期	放射線の強さ (MeV)		
		α線	β線	γ線
222Rn	3.82 日	5.48	—	0.51
218Po (RaA)	3.05 分	6.00	—	—
214Pb (RaB)	26.8 分	—	0.65	0.29
214Bi (RaC)	19.7 分	—	1.5	1.8
214Po (RaC')	1.6×10 ⁻⁴ 秒	7.68	—	—
210Pb (RaD)	22 年	—	0.02	0.05

②長寿命のα放射体による内部被ばく

内部被曝のもう一つの線源は、鉱石等の粉塵に含まれる長寿命のα放射体である。吸入摂取された長寿命のα放射体を含む鉱石等の粉塵が器官内壁に沈着し、放射体が核変して放射能を出し、沈着した組織に影響を与える。

国際放射線防護委員会 (ICRP: International Commission on Radiological Protection) による勧告が、放射線障害の防止の観点から外部被ばくと内部被ばくについて同時に放射線被ばくを受ける場合は、下記の式がカナダの原子力管理委員会 (AECB) で提案されている。各放射線被ばくの年間許容限度に対する割合の和が1以下であることが、年間の実効線量当量を満足することになる。

$$\frac{\gamma \text{線 (mSv)}}{2.0} + \frac{\text{ラドン娘核種 (WLM)}}{4.7} + \frac{\text{トロン娘核種 (WLM)}}{14.1} + \frac{\text{鉱石粉塵}}{\text{ALI (20mSv)}} \leq 1$$

WLM: 月間のポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度

ALI: 年間許容摂取量

ISL 採鉱法によるウラン生産では、鉱石品位が低いことおよび鉱石を直接取扱わないため、ほとんどがラドンおよびその短寿命娘核種の吸入による内部被ばくである。貴液及び廃水の処理工程で取扱う液に溶け込んだラドンの吸入によって放射線を被ばくする可能性がある。

また、粗製錬工程の最終製品であるイエローケーキの乾燥場で粉塵状放射性物質による長寿命のα放射体による内部被ばくの可能性がある。

ISL 採鉱法は、在来型採鉱法に比べて放射線被曝の可能性はかなり低い。

7.3.2 放射線被ばく対策

ISL 法によるウラン生産で発生する放射性物質に対して、放射線発生箇所毎の対策について述べる。

(1) ラドン等の気体状放射性物質

ラドンは廃水処理池（沈殿池、蒸発池）、ウラン回収施設、パイプラインから大気中に放出される可能性がある。

①廃水処理池（沈殿池、蒸発池）

沈殿池および蒸発池に浸出貴液、ウラン回収後の浸出液、帯水層復元時の浸出液を直接、池に放水すると、ウランを溶かし込んだ浸出液からラドンが放出する。

この対策としてウランを溶かし込んだ浸出液を池に入れる前に、真空ポンプでラドンをタンクに回収し、浸出液のラドン量を減らす方法がある。タンクに集められたラドンガスは圧縮され、注入用浸出液に溶解させる。

②ウラン回収施設

イオン交換設備によるウランの吸着・溶離では、貴液からラドンを放出する。

この対策として、浸出液に溶けたラドンが圧力低下により外気に漏れ出ることを最小限に抑えるため、イオン交換容器を閉鎖系とし、圧力をかける方法が取られている。しかし、樹脂の移動や溶離のために、イオン交換コラムが開かれる時、ラドンが外気に漏れ出る。この場合、施設内に換気設備を設置することにより施設外に放出する。この排気のラドン濃度は、大気排出基準値以下にする必要がある。

③注入井・生産井のパイプライン

注入井・生産井のパイプラインには、ラドンを含んだ液が循環されている。

過度の蒸気圧を逃がすため、パイプラインに安全弁を設置する場合があります、その弁からラドンが放出される。この場合、放出されたラドンが局地的に集中しないように安全弁を配置する。

(2) ウラン等の粉塵状放射性物質

イエローケーキを乾燥させる工程を持つ工場では、放射性粉塵が飛散する可能性がある。

乾燥場からウラン粉塵が飛散することを防ぐため、イエローケーキの乾燥場では熱源を分離した真空乾燥機を使用する方法が取られている。これによりウラン粉塵は外気中に飛散しないようにできる。乾燥場内で発生す

るイエローケーキの粉塵は、バグフィルターと換気を水中に通して除去される。乾燥場の気圧を計測し、異常時の警報装置を設置する。

(3) ウラン・ラジウム等を含む溶液

ウラン・ラジウム等を含む溶液は廃水処理池（沈殿池、蒸発池）、井戸設備、パイプラインから周辺に漏れ出る可能性がある。

①廃水処理池（沈殿池、蒸発池）

廃水処理池に溜置かれたウラン・ラジウム等を含む溶液が漏れる可能性がある。

この対策として、これらの池は掘り込み式である。漏出防止のため、これらの池は堰堤で囲まれ、2重のライナーで覆う構造である。溶液の漏れを検知するため、底の2重のライナー間に適切な厚さ（例えば18cm以上）の砂を敷いて、穴開き配管を設置している。

②井戸設備

井戸設備で浸出液及び貴液が、周辺地層に漏れる可能性がある。

この対策として、注入井・生産井の孔内にケーシングパイプを入れ、ケーシングパイプの廻りをセメンティングする。注入井・生産井からの液の漏出を検知するため、モニター井を周辺に設置する。

③注入井・生産井のパイプライン

注入井・生産井のパイプラインから浸出液および貴液が漏れる可能性がある。

漏出を防止するため、パイプ内の圧力を測定し、浸出液および貴液の漏れや破裂時の圧力異常時に作動する警報装置を設置している。

7.4 浸出液再生時および帯水層復元時の廃水処理方法

生産井より回収される浸出貴液は、地下水の混入により注入液より常に多く汲み出される。この余剰水を処理して浸出液として再生する時、および帯水層を復元する時の廃水処理方法には以下の4種類がある。図7-6にクラウンポイント鉱山の帯水層復元時の廃水処理フローを示す。(出典:Hydro Resources社のニューメキシコ州のCrownpoint Uranium Solution Mining ProjectでのFinal Environmental Impact Statement 1997.2)

(1) 蒸発池での処理

浸出液再生時及び帯水層復元時の廃水処理として広く一般的に用いられている処理方法である。ただし、蒸発池での処理には広い面積を必要とする。

また、逆浸透法により生成された塩水から更に水分を取り除くにも使用される。残されたスラッジ状の塩化物は、特定の認可を受けた場所に処分される。

(2) 沈殿池での処理

蒸発による処理容量では処理できない廃水は、沈殿池で塩化バリウム(BaCl)を添加して、ラジウムを除去する。水質が排水基準を満たした上澄水は、灌漑用として散水または放流される。

ラジウムを含有する沈殿池の殿物は、特定の認可を受けた場所に処分される。

(3) 逆浸透による処理

逆浸透による処理は、廃水を高圧下で低浸透率膜を通して、汚染水と清水を分離する処理法である。脱イオン化した清水は浸透膜を通過できるが、汚染物質を溶かし込んだイオン化した水は通過することができない。この処理法は、多量の廃水処理ができない。膜を通過できない廃水は、更に塩水濃縮装置で水分を除去し、濃縮して得られた塩水は、特定の認可を受けた場所に処分される。

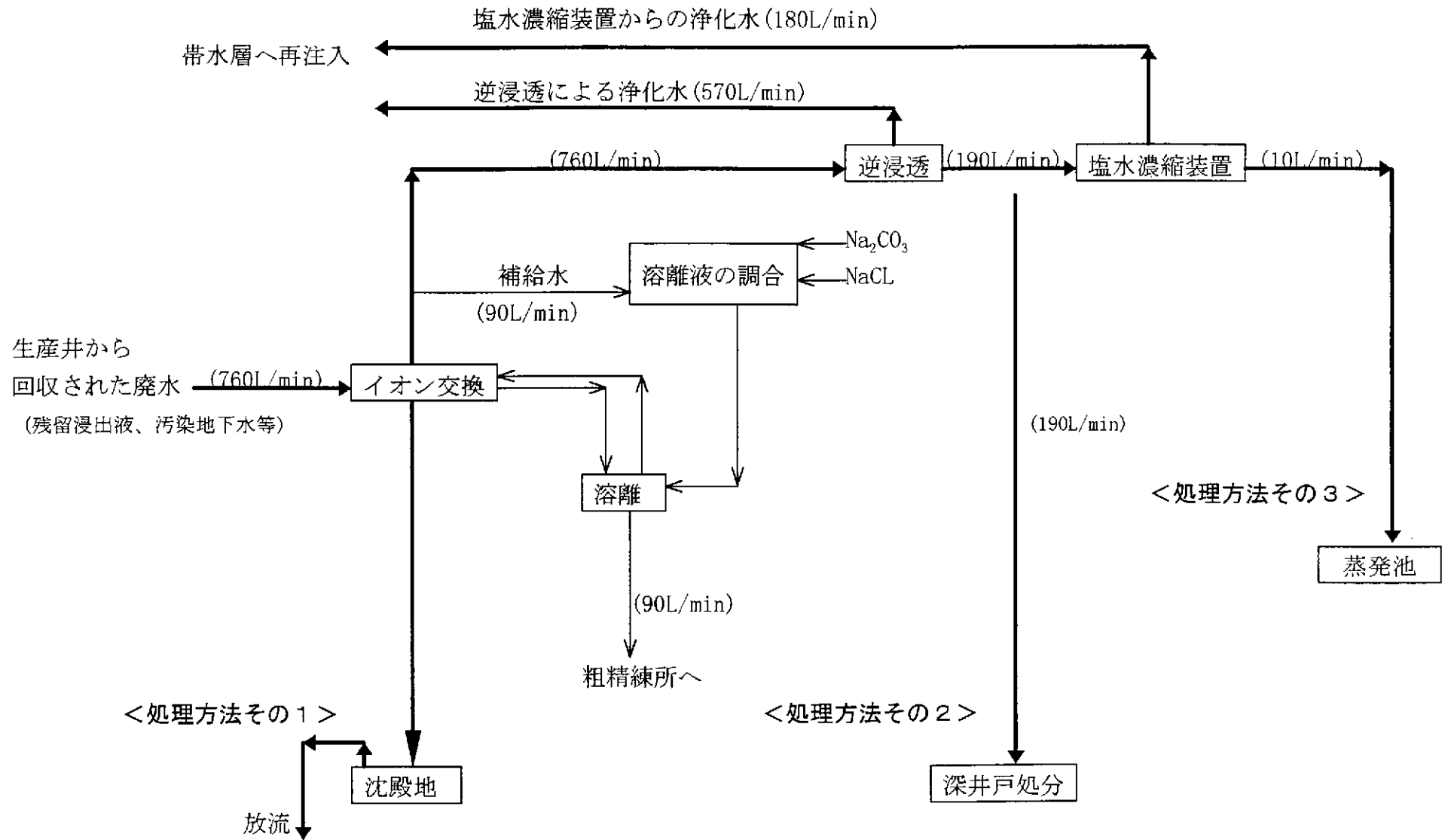


図 7-6 帯水層復元の廃水処理フロー (クラウンポイント鉱山の例)

(4) 深井戸処理

深井戸処理は、通常 5,000ft を超える深度の井戸を開削して、廃水処理で発生した賸物等をその深井戸に注入して、処分する方法である。深井戸処分ができる地層は、閉鎖系の帯水層であり、米国では全溶解物濃度 (Total Dissolved Solid) が 10,000 mg/L 以上の水質の悪い地下水を有する地層という制限がある。廃水池の賸物および逆浸透法でのスラッジ状の塩化物等が、深井戸で処分されている。(図 7-7 参照)

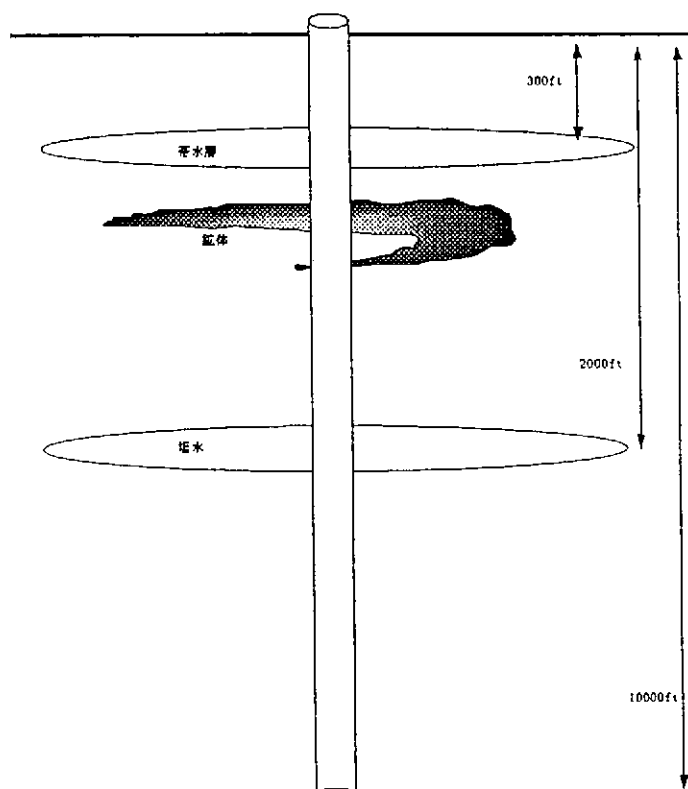


図 7-7 深井戸処理

7.5 計測管理

(1) モニター井

モニター井は、採掘対象鉱体ゾーンの水質データを計測するため、設置される。モニター井の設置目的は、操業許可を申請する際に必要なバックグラウンドとなる水質データを取得ためである。このデータは、帯水層復元時の水質目標値とされる。また、操業中にウラン鉱体賦存ゾーンから浸出液が漏出し、土壤汚染及び水質汚染を引き起こしていないかを監視するために水質をモニタリングする。

モニター井は、注入井と生産井と同一レベルに設けられる生産ゾーンモニター井とウラン鉱体賦存ゾーンの上下レベルに設けられる上位・下位ゾーンモニター井からなる。(図7-8、図7-9参照)

生産ゾーンモニター井は、地下水流の上流側では間隔を粗に、下流側では密に設定される。例えば、スミスランチ鉱山では、生産ゾーンモニター井は鉱床から500フィート、孔間隔は100フィートから500フィート(鉱体に流れ込む水の流れにより、上流の孔間隔は500フィート、下流の孔間隔は100フィート)である。

上位・下位ゾーンモニター井の配置密度は、4エーカー(約16,000 m²)に1本と規制している例もある。

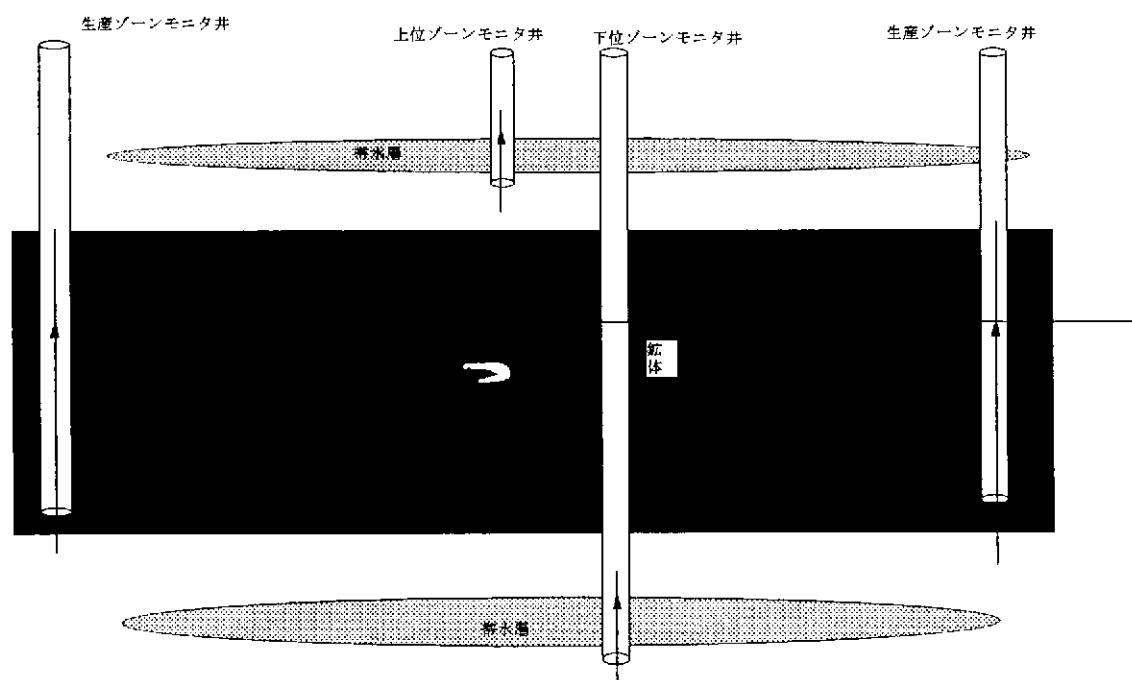


図7-8 モニター井の配置例(断面図)

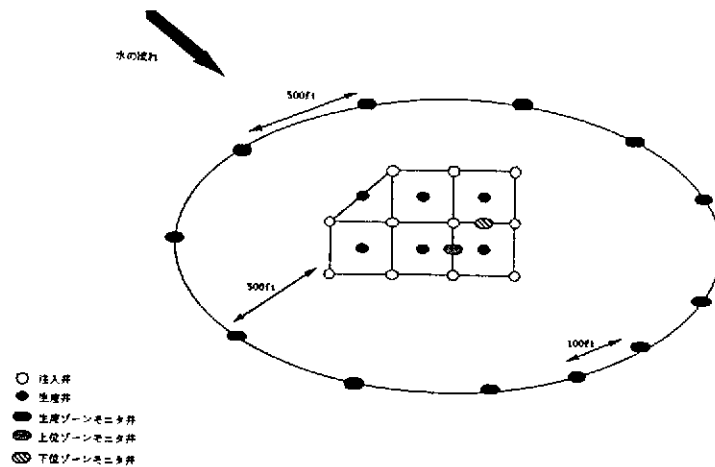


図 7-9 モニター井の配置例(平面図)

(2) モニター井の計測項目

スミスランチ鉱山では、操業中、モニタリングは月に 2 回実施し、次のような項目を計測する。

(a) 地下水位

(b) 水質 (SO_4^{2-} , Cl^- , U, TDS (Total Dissolved Solids))

操業前に比べて、10%以上の水質悪化があれば地下水の修復工事 (Ground water Sweep) を実施する。

(3) 帯水層復元時の計測

復元の基準は、parameter-by-parameter ベースで帯水層復元の水質第 1 目標は、すべての成分を操業以前(自然バックグラウンド)の状態に戻すことである。それが不可能な場合は、クラウンポイント鉱山では飲料水の水質基準まで水質を改善しなければならない。クラウンポイント鉱山での帯水層復元時に計測される水質の成分を下記に示す。

①主要成分

アンモニア、重炭酸塩、カルシウム、マグネシウム、カリウム、ナトリウム、炭酸塩、塩化物、フッ化物、硫酸塩、亜硝酸塩の 11 成分

②微量成分

砒素、バリウム、ホウ素、カドミウム、クロム、銅、鉄、鉛、マンガン、水銀、モリブデン、ニッケル、セレン、銀、ウラン、バナジウム、亜鉛、ラジウム-226 の 18 成分

③物性

TDS、アルカリ度、伝導度、pH の 4 物性

操業時に注入される浸出液には、上記の微量成分は含まれていない。浸出液は、調合後リサイクルされており、上記の主要成分中の炭酸塩、硫酸塩は増えることが考えられる。したがって、帯水層復元時の計測では、操業時に持ち込まれた浸出液の成分に起因する重要である。

7.6. 閉山処理

(1) 井戸設備の撤収と跡地処理

閉山処理として、井戸設備の撤収とともに跡地の原状回復を実施しなければならない。

井戸に設置されていたポンプと孔内配管を取り除き、井戸地点の表土を剥がし、地表下1 mまでケーシングパイプを切断・撤去する。井戸設備のパイプラインを撤去し、注入井・生産井およびモニター井の全ての孔は、セメントで井戸を埋め戻し、孔口は表土で覆われる。

(2) 操業中使用した資機材の処分

施設解体時に発生する資機材は放射能汚染程度に応じて、以下のいずれかで処分する。

使用限定不要となるまで十分に除染できた資機材および装置は、他に転用、転売およびスクラップ処分する。

使用限定程度の除染しかできない場合は、限定した場所へ転用、転売および通常のスクラップ処分する。

除染ができない場合は、特定の認可を受けた場所に処分する。

(3) プラントの解体と跡地処理

プラント建屋の基礎や、転売価値のない撤去した装置は通常の廃棄物として処分される。その他発生するスクラップの処分は、放射能汚染程度に応じ資機材処分と同様である。プラント施設解体後は、建設時に剥がした表土で覆土する。

(4) 蒸発池、沈殿池の跡地処理

放射能除汚染できない池に残留した殿物やライナー等は、特定の認可を受けた場所に処分する。

池に溜まった沈殿物とライナーを除去した後は、堰堤の土で池の跡地を埋め戻す。土地の形状を原状回復し、覆土・植生する。

7.7. 閉山処理費の資金保証

ISL 鉱山開発時に、井戸設備、ウラン回収設備の撤去を含む地下水復元、放射性廃棄物処分の計画を作成し、それにかかる費用の見積もり及び適切な資金保証をしなければならない。鉱山開発提案者は、保証契約、現金、預金保証、クレジット等の形で閉山処理費の資金保証を行う。

閉山計画およびその費用の見積もりに当っては、第三者機関の承認が必要である。また、閉山計画およびその費用の見積もりは、操業の拡大、操業変更、インフレ等を考慮して政府監督機関によって毎年再検討され、調整が図られる。

8. ISL 採鉱法のコスト試算

8.1 はじめに

ISL 採鉱法のコスト試算については、米国鉱山局(U. S. Bureau of Mines)の「Cost and Sensitivities Analysis for Uranium in Site Leach Mining」(1981 年)に記されている。1996 年に動力炉核燃料開発事業団が、本資料に基づいた積算基準を作成した。

この積算基準は米国鉱山局の資料の単価および原単位を、最近の米国 ISL 鉱山の生産コスト・データ (NAC International 社編 : USA System 1995 年) の操業中鉱山である Crow Butte、計画中鉱山である Smith Ranch の生産コストに合うように修正し、ISL コスト試算プログラムを作成している。

このプログラムに基づき、コスト試算に必要なデータとコスト試算項目について考え方を整理する。また、ISL 採鉱法による生産コストに影響を与える要因を明らかにするため、米国と CIS 諸国のウラン鉱床について感度分析を行う。そして、ISL 採鉱法のコストの特徴を在来型採鉱法と比較するため、コストカテゴリーおよびディスカウント・キッシュフロー分析による経済性評価を実施する。

8.2 コスト試算に必要なデータ (入力データ)

コスト計算プログラムの入力データは、鉱床に関するデータ、井戸設備の設計条件データ、操業条件データに大別される。分類別の入力データの各項目が、コスト試算に及ぼす影響を下記に概説する。

(1) 鉱床のデータ

① 鉱体の深度

鉱体が賦存する地表面からの深度で、井戸の掘削費およびケーシング費に大きく影響する。

② 鉱体の厚さ

鉱体の厚さは、井戸設備の稼動期間 (寿命) に影響する。鉱体が厚いと、同一生産井から長期間ウランを回収できる。

③ 鉱石品位

鉱石品位は、井戸設備の稼動期間 (寿命) に影響する。品位が高いと、同一生産井から長期間ウランを回収できる。

④ 鉱石の密度

鉱石の密度は、井戸設備の稼動期間 (寿命) に影響する。密度が高いと、同一生産井から長期間ウランを回収できる。

⑤ 埋蔵ウラン量

鉱体の厚さ、鉱石の品位と密度のデータに加えて、鉱体の広がり面積からウラン埋蔵量が求められる。

(2) 井戸設備の設計条件データ

①井戸の配列

井戸の配列としては、5点四角配列(five spot square)、7点六角配列(seven spot hexagon)、線形配列(line drive)の3つのパターンに大別できる。5点四角配列が一般的であり、本試算でも四角配列としている。

井戸の配列によって1パターンの浸出面積および配管延長が変化する。1パターンの浸出面積は、注入/生産井の間隔の2乗に四角配列は2.0、六角配列は2.6、線形は0.5を乗じて求められる。

②注入/生産井の間隔

注入/生産井の間隔によって浸出面積が変わる。すなわち、間隔を広くとれば、浸出面積当たりの注入井および生産井の数は少なくなり、井戸設備の設置費を節減することができる。

③注入/生産井の数の比

注入/生産性の数の比は、同じ井戸の配列でも左右前後にパターンが拡大されると変化する。広がりとともに四角配列では1:1、六角配列では2:1、線形では1:0.5に近づく。パターンの数と左右前後のパターンの広がり方によって、注入/生産井の数の比は変わり、井戸設備費の中で大きなウェイトを占める井戸の掘削本数に影響する。

④全体に占めるモニター井の比率

モニター井の数は、鉱体の幅によって変化し、鉱体の幅が狭いと急激に増える。本試算では1.6ha当たり1本としている。

⑤生産井の流量

生産井の流量は鉱体の浸透率、浸出液の水圧(水頭)、注入/生産井の間隔、井戸の配列によって変化する。生産井の流量は、ウラン生産量に直結している。

⑥浸出回収率

浸出回収率は、浸出液の種類およびウラン鉱石の性状等によって左右される。浸出回収率は、井戸設備の稼働期間(寿命)に影響する。

(3) 操業条件データ

①年間生産量

年間生産量は、井戸設備および粗製錬所の規模に影響する。年間生産量は、埋蔵ウラン量と操業期間から決められる。

②年間操業日数

年間操業日数は、生産設備容量に影響する。ISL採鉱法は装置産業であるので、本試算では365日フル操業とする。

③貴液品位

貴液品位は、浸出液の種類およびウラン鉱石の性状等によって左右される。貴液品位は、生産井の流量とともにウラン生産量に直結している。

④浸出液の種類

浸出液の種類は、アルカリと硫酸に大別される。浸出液の選定にあたっては、ウラン鉱石の性状等を考慮して、浸出回収率が高くかつ貴液品位も高くなるような浸出液を選択する。浸出液の種類は井戸設備の稼働期間（寿命）、およびウラン生産量に直結している。

前述の考え方に立って、米国と CIS 諸国の標準的な ISL 鉱山におけるコスト試算に必要なデータを表 8-1 に示すように設定する。米国の標準ケースとして 1996 年から操業を開始した Smith Ranch 鉱山、CIS 諸国の標準ケースとして入手できた資料で標準と考えられるデータを設定する。この時、CIS 諸国のウラン鉱体深度については、後で実施する感度分析の標準ケースとなるため、米国の生産コストとあまり乖離しないように 300 m とした。

表 8-1 米国と CIS 諸国の標準的な ISL 鉱山のデータ

	米国の標準ケース (Smith Ranch 鉱山)	CIS 諸国の標準ケース (ガフスタンの想定鉱山)
< 鉱床データ >		
埋蔵ウラン量 (tU)	15,661	50,000
平均品位 (%U ₃ O ₈)	0.10	0.06
鉱体の深度 (m)	221	300
鉱体の厚さ (m)	4	10
鉱石の密度 (t/m ³)	1.89	1.60
< 井戸設備の設計条件データ >		
井戸の配列	四角配列	
注入／生産井の間隔 (m)	21	21
注入／生産井の数の比	1.7	2
全体に占めるモーター井の比率	浸出面積 1.6ha 当たり 1 本	
生産井の流量 (m ³ /時)	8.6	6
浸出回収率 (%)	70	80
< 操業条件データ >		
年間生産量 (tU/年)	769	800
年間操業日数 (日/年)	365	
貴液品位 (mgU ₃ O ₈ /L)	60	60
浸出液の種類	アルカリ	硫酸

8.3 コスト試算項目

前章で述べたコスト試算に必要なデータ（入力データ）で ISL 試算プログラムを使ってコスト試算する項目および考え方を述べる。ウラン生産に必要な生産コストは、起業費と操業費に分けられる。

まず井戸設備、粗製錬所および廃水／後処理設備の規模を求め、起業費を算出する。操業費は設備規模や浸出液の種類に応じて労務単価、電力単価、物品単価より薬品費、動力費、労務費を試算し、井戸設備の設置替えおよび廃水処理費を含んだ費用として操業費を計上している。

8.3.1 起業費

主な起業費は、粗製錬設備費、廃水／後処理設備費、最初の井戸設備の開発費である。下記に起業費の試算項目とコスト試算に及ぼす影響を概説する。

(1) 許認可手続き費

許認可手続き費は、準備期間に伴って変動する。「8. 環境に関すること」で述べられているように操業開始までの準備期間は、最短でも3年半から約7年間必要である。

試算では、米国 1,000 千 US \$、CIS 諸国 600 千 US \$ とした。

(2) パイロット・プラント建設／運転費

パイロット・プラントの運転は、浸出面積が約 4,000m² で、取扱い流量が約 23m³ /時で約1年間実施する。この運転を通して操業条件を決定するために必要な試験・研究および環境影響データ収集を行う。

この費用には、パイロットプラント粗製錬費、井戸設備費、薬品費、動力費、労務費等のパイロットプラント建設／運転に必要な費用を含む。

(3) 最初の井戸設備の開発費

井戸設備の費用は、井戸の掘削、井戸のケーシング、孔内設備（ポンプ、配管）、地表設備（配管、電気）等の設備費および据付け工事費からなり、生産終了時の井戸の閉塞費も含む。最初の井戸設備の開発費は、起業費に計上する。

(4) 製錬設備費

製錬設備費は、イオン交換コラム方式と井戸設備で取扱う最大流量によって決まる。イオン交換コラム方式には、下降流、上昇流固定床、上昇流連続処理（USBM方式、Porter方式）の4つがある。

試算では、米国と CIS 諸国とも上昇流連続処理（USBM方式）とした。

(5) 粗製錬所建屋の建設費

建設費にはプレハブ構造の建屋、暖房・換気・空調設備、コンクリートプラント、

試験室、事務所、倉庫、修理工場が含まれる。この建設費は、粗製錬所の規模、イオン交換コラム方式、立地条件によって決まる。

(6) 粗製錬設備据付け費

粗製錬設備据付け費は、粗製錬所の設備の据付け工事のほか電気設備、配管設備、土地造成と道路建設を含む。

(7) 廃水／後処理設備費

廃水／後処理設備としては、石灰添加装置、逆浸透よる廃水処理設備があり、廃水処分方法として蒸発池と深井戸がある。それらの設備費は、井戸設備で取扱う流量によって決まる。

試算では、米国の廃水処分方法は深井戸方式、CIS 諸国の廃水処分方法は廃水処分方法は蒸発池方式とした。

(8) 技術管理費

技術管理費は、ISL 鉱山の設計と建設に関する管理費である。その費用は、井戸設備で取扱う流量によって決まり、 227m^3 /時未満の流量では上記起業費の計の12%、 227m^3 /時以上の流量では上記起業費の計の8%を米国とCIS諸国とも計上する。

(9) 予備費

予備費は、鉱山開発費の見積もりの精度によって変わるが、試算では上記起業費の計から技術管理費を除いた額の10%を米国とCIS諸国とも予備費として計上する。

(10) 操業時の追加投資

操業時の追加投資は、追加仕様への投資と機械の更新がある。ISL 採鉱では最初の井戸設備の開発費以外、井戸設備に対する追加投資はない。その後の井戸設備の開発費は井戸設備の設備替え費として、また操業時に実施される後処理費は、操業費に計上する。粗製錬所の設備は、耐久年数が操業期間に匹敵するので、ほとんど追加投資はないとしている。

ここでの操業時の追加投資は、移動式機械設備の耐用年数を8年として、その更新費のみを米国とCIS諸国とも計上する。

8.3.2 操業費

主な操業費は、薬品費、動力費、井戸設備の設置替え費、労務費である。下記に操業費の試算項目とコスト試算に及ぼす影響を概説する。

(1) 井戸設備の設置替え費

井戸設備の設置替え費は、ボーリング掘削とケーシング費、孔内設備費、地表設備費の3つの項目からなる。

試算では、米国と CIS 諸国とも同一原単価とし、積算の考え方も同じとした。

(2) 労務費

労務者は時給労務者と月給労務者からなり、時給労務者の数は粗製錬の規模に比例して増加し、月給労務者数は段階的に増加する。試算では、米国労務者の単価は 38 千\$/年と 30 千\$/年、CIS 諸国労務者の単価は 15 千\$/年と 10 千\$/年とし、労務者の数は CIS 諸国ほうが米国より多い歩掛りにしている。

(3) 薬品費

薬品費は浸出剤、酸化剤、その他の薬品（沈降剤、溶離剤）、イオン交換樹脂の購入費で、それらの購入単価と使用量の積で求められる。浸出液の種類、イオン交換方式、現場条件によって薬品費は変わる。

試算では、米国の浸出剤はアルカリで、CIS 諸国は硫酸とした。

(4) 動力費

動力費は、変動設備と固定設備の動力費からなる。変動設備の動力費は生産井とモニター井のポンプの電力費で、井戸の深さおよび後処理期間を含めたポンプの運転時間によって変わる。固定設備の動力費は、製錬設備、逆浸透法の廃水処理設備、蒸発池および深井戸廃水処分設備の電力費で、設備容量によって変わる。

試算では、所要電力量を上記の考え方で求め、電力単価を米国と CIS 諸国では 0.05\$/Kwh と 0.02\$/Kwh として動力費を算出する。

(5) 維持費と保険料

維持費と保険料は、米国と CIS 諸国とも固定起業費の 4.6% とする。

(6) 廃水処理費

廃水処理量は、深井戸方式が井戸設備の取扱い流量の 20%、蒸発池方式が井戸設備の取扱い流量の 10% である。米国と CIS 諸国とも蒸発池方式として、廃水処理原価を 227m³/時当たり 0.5\$ として廃水処理費を求める。

(7) 一般管理費

一般管理費は取引、借料、旅費等の間接費である。上記までの操業費の計の 10% を、米国と CIS 諸国とも一般管理費として計上する。

8.4 コストの感度分析

1996年に動燃が作成した ISL コスト試算プログラムを使用して、ISL 採鉱法を適用できる主要なウラン鉱床が賦存している米国と CIS 諸国のウラン鉱床について、予想されるデータの変動幅で生産コストの感度分析を実施する。

表 8-2 コスト試算入力データの変動幅

コスト試算入力データ	米国の ISL 鉱山			CIS 諸国の ISL 鉱山		
	標準ケース	最大値	最小値	標準ケース	最大値	最小値
埋蔵ウラン量 (tU)	15,661	17,033	3,488	50,000	150,000	5,000
平均品位 (%U ₃ O ₈)	0.10	0.232	0.075	0.06	0.10	0.04
深度 (m)	221	334	131	300	1,000	100
厚さ (m)	4	4	1.53	10	20	3
密度 (t/m ³)	1.89	2.2	1.89	1.6	1.7	1.5
浸出回収率 (%)	70	80	70	80	90	60
注入/生産井の間隔 (m)	21	23	16	21	21	20
注入/生産井の数の比	1.7	2	1.29	2	2	2
貴液品位 (mgU ₃ O ₈ /L)	60	60	55	60	100	40
生産井の流量 (m ³ /hr)	8.6	11	5.7	6	12	4
年間生産量 (tU/年)	769	1,152	174	800	1,200	500

標準ケースとして、米国では Smith Ranch 鉱山、CIS 諸国ではカザフスタンの想定鉱山について試算し、生産コストはそれぞれ 11.89\$/1bU₃O₈ と 13.13\$/1bU₃O₈ が得られた。図 8-1 に ISL 採鉱法の実産コストの内訳をレーダー図に示す。

感度分析結果表の変動率と影響度は、下記のように定義する。

$$\text{変動率} = (\text{予想変動値} / \text{標準ケースの値}) \times 100$$

$$\text{影響度} = \frac{|1 - (\text{予想変動値の生産コスト} / \text{標準ケースの生産コスト})|}{|1 - \text{変動率}|} \times 100$$

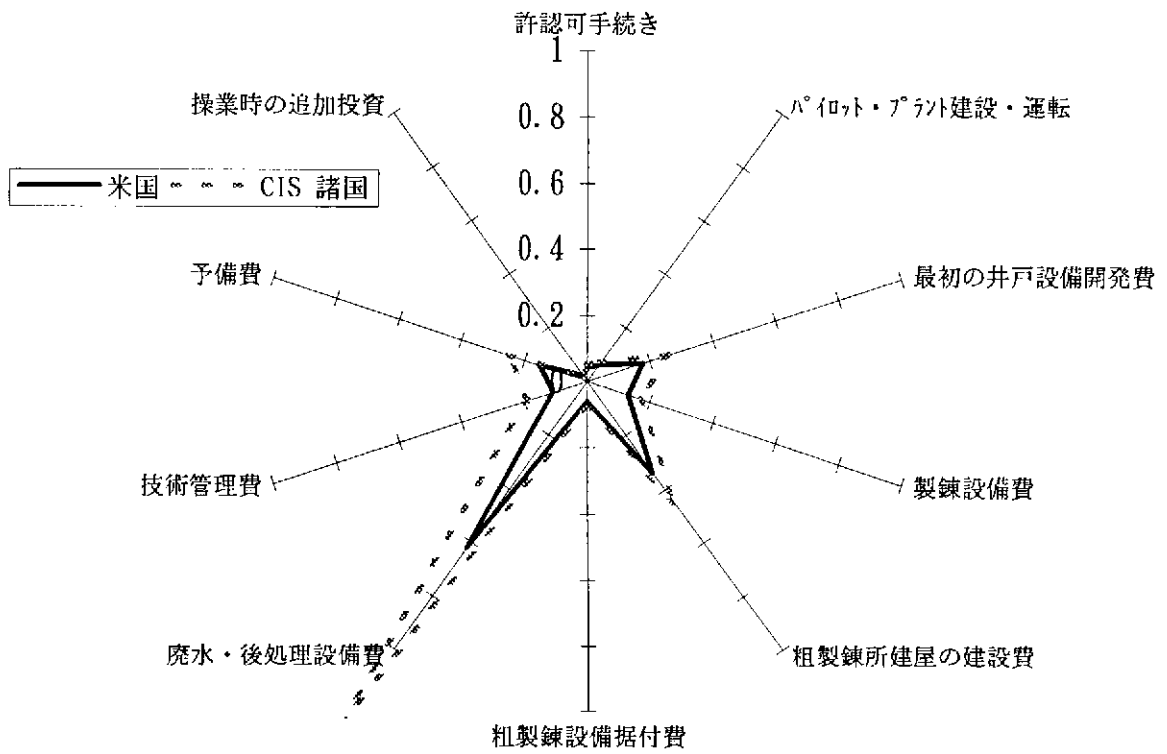
8.4.1 生産コストの感度分析結果

表 8-3 に、米国と CIS 諸国の標準ケースに対して、生産コストの感度分析結果を示す。

表 8-4 と表 8-5 に入力データの変動幅（各変動要因）に対する米国と CIS 諸国の ISL 鉱山の生産コストの原単位への影響が入力データ値と正比例の関係は「+」、反比例の関係は「-」で表示する。影響度については「+」と「-」の数が多いほど影響度は強い。

また、下段には各変動要因が起業費と操業費に及ぼす特記すべき事項についてまとめる。

起業費原価の内訳 (\$/1bU308)



操業費原価の内訳 (\$/1bU308)

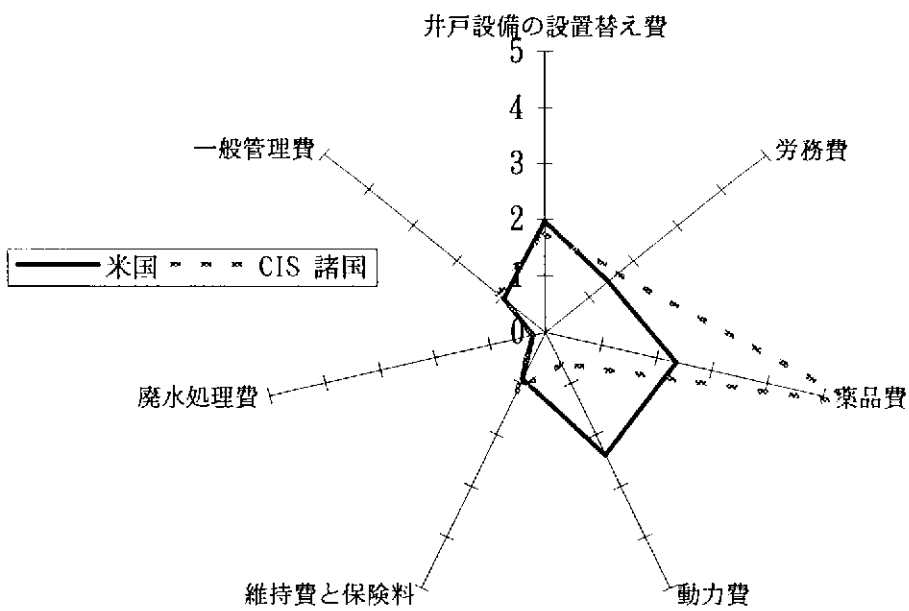


図8-1 米国とCIS諸国のISL鉱山の生産コスト内訳 (標準ケース)

表8-3 米国とCISのISL鉍山の生産コスト感度分析結果表

米国ISL鉍山（標準ケースはSmith Ranch鉍山）

影響要因	単位	変動範囲			生産コストの計算結果		
		標準ケース	最大値	最小値	標準ケース	最大ケース	最小ケース
埋蔵ウラン量 (変動率) (影響度)	tU	15,661	17,033 109%	3,488 22%	11.89	11.78 99% 11%	17.01 143% 55%
平均品位 (変動率) (影響度)	%U ₃ O ₈	0.1	0.232 232%	0.075 75%	11.89	10.65 90% 8%	12.65 106% 26%
深度 (変動率) (影響度)	m	221	334 151%	131 59%	11.89	13.00 109% 18%	10.37 87% 31%
厚さ (変動率) (影響度)	m	4	4 -	1.53 38%	11.89	11.89 - -	15.61 131% 51%
密度 (変動率) (影響度)	t/m ³	1.89	2.2 116%	1.89 -	11.89	11.58 97% 16%	11.89 - -
浸出回収率 (変動率) (影響度)	%	70	80 114%	70 -	11.89	11.43 96% 27%	11.89 - -
注入／生産井の間隔 (変動率) (影響度)	m	21	23 110%	16 76%	11.89	11.55 97% 30%	13.40 113% 53%
注入／生産井の数の比 (変動率) (影響度)		1.7	2 118%	1.29 76%	11.89	12.07 102% 9%	11.65 98% 8%
貴液品位 (変動率) (影響度)	mgU ₃ O ₈ /L	60	60 -	55 92%	11.89	11.89 - -	12.40 104% 51%
生産井の流量 (変動率) (影響度)	m ³ /hr	8.6	11 128%	5.7 66%	11.89	11.73 99% 5%	12.28 103% 10%
年間生産量 (変動率) (影響度)	tU/年	769	1152 150%	174 23%	11.89	12.04 101% 3%	14.15 119% 25%

CISのISL鉍山（標準ケースはカザフスタンの想定鉍山）

	変動範囲			生産コストの計算結果		
	標準ケース	最大値	最小値	標準ケース	最大ケース	最小ケース
	50,000	150,000 300%	5,000 10%	13.13	12.77 97% 1%	17.96 137% 41%
	0.06	0.10 167%	0.04 67%	13.13	12.31 94% 9%	14.18 108% 24%
	300	1,000 333%	100 33%	13.13	19.87 151% 22%	11.44 87% 19%
	10	20 200%	3 30%	13.13	12.11 92% 8%	18.08 138% 54%
	1.6	1.7 106%	1.5 94%	13.13	13.01 99% 15%	13.27 101% 17%
	80	90 113%	60 75%	13.13	12.84 98% 18%	14.01 107% 27%
	21	21 100%	20 95%	13.13	13.13 - -	13.33 102% 32%
	2	2 -	2 -	13.13	13.13 - -	13.13 - -
	60	100 167%	40 67%	13.13	11.49 88% 19%	15.16 115% 46%
	6	12 200%	4 67%	13.13	12.86 98% 2%	13.41 102% 6%
	800	1,200 150%	500 63%	13.13	13.12 100% 0%	13.35 102% 4%

表8-3 米国とCISのISL鉍山の生産コスト感度分析結果表

米国ISL鉍山（標準ケースはSmith Ranch鉍山）

影響要因	単位	変動範囲			生産コストの計算結果		
		標準ケース	最大値	最小値	標準ケース	最大ケース	最小ケース
埋蔵ウラン量 (変動率) (影響度)	tU	15,661	17,033 109%	3,488 22%	11.89	11.78 99%	17.01 143%
平均品位 (変動率) (影響度)	%U ₃ O ₈	0.1	0.232 232%	0.075 75%	11.89	10.65 90%	12.65 106%
深度 (変動率) (影響度)	m	221	334 151%	131 59%	11.89	13.00 109%	10.37 87%
厚さ (変動率) (影響度)	m	4	4 -	1.53 38%	11.89	11.89 -	15.61 131%
密度 (変動率) (影響度)	t/m ³	1.89	2.2 116%	1.89 -	11.89	11.58 97%	11.89 -
浸出回収率 (変動率) (影響度)	%	70	80 114%	70 -	11.89	11.43 96%	11.89 -
注入/生産井の間隔 (変動率) (影響度)	m	21	23 110%	16 76%	11.89	11.55 97%	13.40 113%
注入/生産井の数の比 (変動率) (影響度)		1.7	2 118%	1.29 76%	11.89	12.07 102%	11.65 98%
貴液品位 (変動率) (影響度)	mgU ₃ O ₈ /L	60	60 -	55 92%	11.89	11.89 -	12.40 104%
生産井の流量 (変動率) (影響度)	m ³ /hr	8.6	11 128%	5.7 66%	11.89	11.73 99%	12.28 103%
年間生産量 (変動率) (影響度)	tU/年	769	1152 150%	174 23%	11.89	12.04 101%	14.15 119%

CISのISL鉍山（標準ケースはカザフスタンの想定鉍山）

	変動範囲			生産コストの計算結果		
	標準ケース	最大値	最小値	標準ケース	最大ケース	最小ケース
	50,000	150,000 300%	5,000 10%	13.13	12.77 97%	17.96 137%
	0.06	0.10 167%	0.04 67%	13.13	12.31 94%	14.18 108%
	300	1,000 333%	100 33%	13.13	19.87 151%	11.44 87%
	10	20 200%	3 30%	13.13	12.11 92%	18.08 138%
	1.6	1.7 106%	1.5 94%	13.13	13.01 99%	13.27 101%
	80	90 113%	60 75%	13.13	12.84 98%	14.01 107%
	21	21 100%	20 95%	13.13	13.13 -	13.33 102%
	2	2 -	2 -	13.13	13.13 -	13.13 -
	60	100 167%	40 67%	13.13	11.49 88%	15.16 115%
	6	12 200%	4 67%	13.13	12.86 98%	13.41 102%
	800	1,200 150%	500 63%	13.13	13.12 100%	13.35 102%

表8-5 各変動要因に対するCISのISL鉱山の原単位との関係

	埋蔵ウラン量 (tU)	平均品位 (%U ₃ O ₈)	深度 (m)	厚さ (m)	密度 (t/m ³)	浸出回収率 (%)	注入/生産井の間隔(m)	注入/生産井の比	浸出品位 (mgU ₃ O ₈)	生産井の流量 (m ³ /hr)	年間生産量 (tU/年)
<起業費の原価> 許認可手続き	-	N	N	N	N	N	N		N	N	N
パイロット・プラント建設・運転	-	+	+	+	N	N	N		-	-	N
最初の井戸設備開発費	-	N	++	N	N	-	N		-	-	+
製錬設備費	-	N	N	N	N	-	N		-	N	+
粗製錬所建屋の建設費	--	N	N	N	N	-	N		-	N	++
粗製錬設備据付費	-	N	N	N	N	-	N		-	N	+
廃水・後処理設備費	----	N	N	N	N	--	N		--	N	+++
技術管理費	-	N	+	N	N	-	N		-	-	+
予備費	-	N	+	N	N	--	N		-	-	+
操業時の追加投資	N	N	N	N	N	N	N		N	N	-
<操業費の原価>											
井戸設備の設置替え費	++	----	+++	----	-	--	--		+	+	-
労務費	N	N	N	N	N	N	N		--	N	-
薬品費	N	N	N	N	N	N	N		N	N	N
動力費	N	N	+	N	N	N	N		-	-	-
維持費と保険料	N	+	+	+	N	+	+		--	-	-
廃水処理費	N	N	N	N	N	N	N		-	N	N
一般管理費	+	-	+	--	--	-	-		-	-	

	起業費	操業費
埋蔵ウラン量	廃水・後処理設備費の原価は20,000tU以下で急激に下がり、20,000tU以上では緩やかである。	井戸設備の設置替え費の原価は20,000tU以下での上昇率が高く、20,000tU以上では上昇率が緩やかである。
平均品位	パイロット・プラント建設・運転費の原価がわずかに上昇する。	井戸設備の設置替え費の原価が品位上昇とともに大幅に減少する。
深度	最初の井戸設備開発費の原価が増える。	井戸設備の設置替え費の原価は大幅に上昇する。深度は300m以深では原価の上昇率がさらに急激である。
厚さ	正の相関であるが、ほとんど影響しない。	井戸設備の設置替え費の原価は厚さ7mまで急激に減少する。厚さ7m以上では減少率は緩やかである。
密度	影響なし。	負の相関であるが、影響はほとんどない。
浸出回収率	廃水・後処理設備費は、回収率が高くなると、少しずつ下がる。	井戸設備の設置替え費の原価は、回収率が高くなると下がる。
注入/生産井の間隔	変動幅が少ないので、影響なし。	井戸設備の設置替え費の原価は、間隔が少し広がるだけでも急激に下がる。
注入/生産井の比		
浸出品位	廃水・後処理費の原価は、品位が高くなると、減少する。	労務費、維持費、動力費の原価は、品位が高くなると減少する。井戸設備の設置替え費は、正の相関である。
生産井の流量	負の相関であるが、あまり影響しない。	負の相関であるが、あまり影響度は少ない。
年間生産量	廃水・後処理費の原価が年間生産量とともに上昇する。粗製錬所の建屋の原価も少し上昇する。	負の相関であるが、あまり影響度は少ない。

(1) 米国の ISL 鉱山

標準ケースとして Smith Ranch 鉱山の生産コストが 11.89\$/1bU₃O₈ に対して、コスト影響要因を変動させた結果は 10.65\$/1bU₃O₈~17.01\$/1bU₃O₈ であった。最小の生産コストは平均品位が高い場合で、最大の生産コストは埋蔵ウラン量が少ない場合である。

影響度が大きい要因は、埋蔵ウラン量、注入/生産井の間隔、鉱体の厚さの順である。

(2) CIS 諸国の ISL 鉱山

標準ケースとしてカザフスタンの想定鉱山の生産コストが 13.13\$/1bU₃O₈ に対して、コスト影響要因を変動させた結果は 11.49\$/1bU₃O₈~19.87\$/1bU₃O₈ であった。最小の生産コストは貴液品位が高い場合で、最大の生産コストは鉱体の深度深い場合である。

影響度が大きい要因は、鉱体の厚さ、貴液品位、埋蔵ウラン量の順である。

8.4.2 起業費の感度分析結果

表 8-6 に、米国と CIS 諸国の標準ケースに対して、起業費原価の感度分析結果を示す。米国と CIS 諸国の標準ケースの起業費原価は、それぞれ 1.67\$/1bU₃O₈ と 0.65\$/1bU₃O₈ である。

(1) 米国の ISL 鉱山

米国の標準ケースの起業費原価が、1.67\$/1bU₃O₈ に対してコスト影響要因を変動させた結果は 0.69\$/1bU₃O₈~7.40\$/1bU₃O₈ であった。最小の起業費原価は年間生産量が少ない場合で、最大の起業費原価は埋蔵ウランが少ない場合である。

影響度が大きい要因は、埋蔵ウラン量、浸出回収率、貴液品位、年間生産量の順である。

(2) CIS 諸国の ISL 鉱山

CIS 諸国の標準ケースの起業費原価が、0.65\$/1bU₃O₈ に対してコスト影響要因を変動させた結果は 0.23\$/1bU₃O₈~6.36\$/1bU₃O₈ であった。最小の起業費原価は埋蔵ウラン量が多い場合で、最大の起業費原価は埋蔵ウラン量が少ない場合である。

影響度が大きい要因は、埋蔵ウラン量、浸出回収率、貴液品位、年間生産量である。

8.4.3 操業費の感度分析結果

表 8-7 に、米国と CIS 諸国の標準ケースに対して、操業費原価の感度分析結果を示す。米国と CIS 諸国の標準ケースの操業費原価は、それぞれ 10.23\$/1bU₃O₈ と 12.48\$/1bU₃O₈ である。

(1) 米国の ISL 鉱山

米国の標準ケースの操業費原価が、10.23\$/1bU₃O₈ に対してコスト影響要因を変動させた結果は 8.80\$/1bU₃O₈~13.97\$/1bU₃O₈ であった。最小の操業費原価は鉱体の深度が浅い場合で、最大の操業費原価は鉱体の厚さが薄い場合である。

影響度が大きい要因は、注入/生産井の間隔、鉱体の厚さ、貴液品位、年間生産量、鉱体の深度の順である。

(2) CIS 諸国の ISL 鉱山

CIS 諸国の標準ケースの操業費原価が、12.48\$/1bU₃O₈ に対してコスト影響要因を変動させた結果は 10.85\$/1bU₃O₈~18.92\$/1bU₃O₈ であった。最小の操業費原価は鉱体の深度が浅い場合で、最大の操業費原価は鉱体の深度が深い場合である。

影響度が大きい要因は、鉱体の厚さ、貴液品位、注入/生産井の間隔の順である。

生産コスト、起業費、操業費の感度分析結果を表 8-8 にまとめる。

表 8-8 感度分析結果のまとめ

		米国		CIS 諸国	
		最小ケース	最大ケース	最小ケース	最大ケース
生産コスト	標準ケース	11.89		13.13	
	感度分析	10.65	17.01	11.49	18.08
		平均品位が高い場合	ウラン埋蔵量が少ない場合	貴液品位が高い場合	鉱床の厚さが薄い場合
起業費	標準ケース	1.67		0.65	
	感度分析	0.69	7.40	0.23	6.36
		年間生産量が少ない場合	ウラン埋蔵量が少ない場合	埋蔵ウラン量が多い場合	埋蔵ウラン量が少ない場合
操業費	標準ケース	10.23		12.48	
	感度分析	8.80	13.97	10.85	18.92
		鉱体の深度が浅い場合	鉱体の厚さが薄い場合	鉱体の深度が浅い場合	鉱体の深度が深い場合

表8-6 米国とCISのISL鉍山の起業費感度分析結果表

米国ISL鉍山（標準ケースはSmith Ranch鉍山）

影響要因	単位	変動範囲			生産コストの計算結果		
		標準ケース	最大値	最小値	標準ケース	最大ケース	最小ケース
埋蔵ウラン量 (変動率) (影響度)	tU	15,661	17,033 109%	3,488 22%	1.67	1.53 92%	7.40 443%
平均品位 (変動率) (影響度)	%U ₃ O ₈	0.1	0.232 232%	0.075 75%	1.67	1.72 103%	1.66 99%
深度 (変動率) (影響度)	m	221	334 151%	131 59%	1.67	1.72 103%	1.57 94%
厚さ (変動率) (影響度)	m	4	4 -	1.53 38%	1.67	1.67 -	1.64 98%
密度 (変動率) (影響度)	t/m ³	1.89	2.2 116%	1.89 -	1.67	1.67 100%	1.67 -
浸出回収率 (変動率) (影響度)	%	70	80 114%	70 -	1.67	1.46 87%	1.67 -
注入／生産井の間隔 (変動率) (影響度)	m	21	21 -	16 76%	1.67	1.68 101%	1.64 98%
注入／生産井の数の比 (変動率) (影響度)		1.7	2 118%	1.29 76%	1.67	1.68 101%	1.65 99%
貴液品位 (変動率) (影響度)	mgU ₃ O ₈ /L	60	60 -	55 92%	1.67	1.67 -	1.79 107%
生産井の流量 (変動率) (影響度)	m ³ /hr	8.6	11 128%	5.7 66%	1.67	1.61 96%	1.78 107%
年間生産量 (変動率) (影響度)	tU/年	769	1152 150%	174 23%	1.67	2.29 137%	0.69 41%

CISのISL鉍山（標準ケースはカザフスタンの想定鉍山）

	変動範囲			生産コストの計算結果		
	標準ケース	最大値	最小値	標準ケース	最大ケース	最小ケース
	50,000	150,000 300%	5,000 10%	0.65	0.23 35%	6.36 978%
	0.06	0.10 167%	0.04 67%	0.65	0.67 103%	0.65 100%
	300	1,000 333%	100 33%	0.65	0.96 148%	0.59 91%
	10	20 200%	3 30%	0.65	0.67 103%	0.64 98%
	1.6	1.7 106%	1.5 94%	0.65	0.66 102%	0.65 100%
	80	90 113%	60 75%	0.65	0.59 91%	0.86 132%
	21	21 100%	20 95%	0.65	0.65 -	0.65 100%
	2	2 -	2 -	0.65	0.65 -	0.65 -
	60	100 167%	40 67%	0.65	0.43 66%	0.92 142%
	6	12 200%	4 67%	0.65	0.59 91%	0.72 111%
	800	1,200 150%	500 63%	0.65	0.91 140%	0.46 71%

表8-7 米国とCISのISL鉍山の操業費感度分析結果表

米国ISL鉍山（標準ケースはSmith Ranch鉍山）

影響要因	単位	変動範囲			生産コストの計算結果		
		標準ケース	最大値	最小値	標準ケース	最大ケース	最小ケース
埋蔵ウラン量 (変動率) (影響度)	tU	15,661	17,033 109%	3,488 22%	10.23	10.24 100%	9.61 94%
平均品位 (変動率) (影響度)	%U ₃ O ₈	0.1	0.232 232%	0.075 75%	10.23	8.94 87%	11.00 108%
深度 (変動率) (影響度)	m	221	334 151%	131 59%	10.23	11.27 110%	8.80 86%
厚さ (変動率) (影響度)	m	4	4 -	1.53 38%	10.23	10.23 -	13.97 137%
密度 (変動率) (影響度)	t/m ³	1.89	2.2 116%	1.89 -	10.23	9.90 97%	10.23 -
浸出回収率 (変動率) (影響度)	%	70	80 114%	70 -	10.23	9.96 97%	10.23 -
注入／生産井の間隔 (変動率) (影響度)	m	21	23 110%	16 76%	10.23	9.88 97%	11.75 115%
注入／生産井の数の比 (変動率) (影響度)		1.7	2 118%	1.29 76%	10.23	10.39 102%	10.00 98%
貴液品位 (変動率) (影響度)	mgU ₃ O ₈ /L	60	60 -	55 92%	10.23	10.23 -	10.62 104%
生産井の流量 (変動率) (影響度)	m ³ /hr	8.6	11 128%	5.7 66%	10.23	10.11 99%	10.50 103%
年間生産量 (変動率) (影響度)	tU/年	769	1152 150%	174 23%	10.23	9.74 95%	13.46 132%

CISのISL鉍山（標準ケースはカザフスタンの想定鉍山）

	変動範囲			生産コストの計算結果		
	標準ケース	最大値	最小値	標準ケース	最大ケース	最小ケース
	50,000	150,000 300%	5,000 10%	12.48	12.54 100%	11.61 93%
	0.06	0.10 167%	0.04 67%	12.48	11.64 93%	13.53 108%
	300	1,000 333%	100 33%	12.48	18.92 152%	10.85 87%
	10	20 200%	3 30%	12.48	11.44 92%	17.44 140%
	1.6	1.7 106%	1.5 94%	12.48	12.35 99%	12.62 101%
	80	90 113%	60 75%	12.48	12.25 98%	13.15 105%
	21	21 100%	20 95%	12.48	12.48 -	12.68 102%
	2	2 -	2 -	12.48	12.48 -	12.48 -
	60	100 167%	40 67%	12.48	11.06 89%	14.24 114%
	6	12 200%	4 67%	12.48	12.26 98%	12.69 102%
	800	1,200 150%	500 63%	12.48	12.21 98%	12.88 103%

8.5 DCF 分析によるウラン採鉱法の考察

ディスカウント・キャッシュフロー (DCF) 分析は、プロジェクトの経済評価法として広く使用されている。投資金額の時間的価値を現在価値という考え方に立って、鉱山の所有権の価値評価、プロジェクトの収益性評価、最適操業規模の検討、プロジェクトのリスク評価に利用されている手法である。

ISL 採鉱法と在来型採鉱法を比較するに当たって、DCF 分析で利益率 (ROR) 15% になるウラン価格を求め、ウラン鉱山開発プロジェクトの経済性を比べる。在来型採鉱法については、1995 年の動燃技報 No. 95 「カナダ・アサバスカ地域のウラン鉱山—開発モデルと将来の生産体制—」で坑内掘と露天掘モデルに対してコスト計算を行う。図 8-2 に在来型採鉱法の生産コストの内訳をレーダー図に示す。

収支計算条件は自己資金比率を 30%、借入金の金利を 6.0% とする。税金の計算は在来型採鉱法がカナダ、ISL 採鉱法が米国は米国の税制、CIS 諸国はカザフスタンの税制に従って計算する。表 8-9 に計算モデルの設定条件と表 8-10 に生産コストと ROR15% のウラン価格を示す。

表 8-9 計算モデルの設定条件

	在来型採鉱法		ISL 採鉱法	
	坑内掘	露天掘	米国	CIS 諸国
埋蔵ウラン量 (tU)	30,000		15,700	50,000
鉱石の品位 (%U ₃ O ₈)	4.0	2.0	0.10	0.06
鉱体の深度 (m)	500	120	220	300
採鉱実収率 (%)	85		70	80
製錬実収率 (%)	96		95	
年間生産量	2,448		770	800
操業年数	10	10	14	50

図 8-3 と図 8-4 に在来型採鉱法である坑内掘モデルと露天掘モデルのキャッシュフロー図を示す。図 8-5 と図 8-6 に ISL 採鉱法の米国標準ケースと CIS 諸国標準ケースのキャッシュフロー図を示す。

ISL 採鉱法によるウラン生産は、在来型採鉱法に比べて、生産工程が簡略されることによる設備投資額が少ない。生産コストが同一水準であれば、DCF 分析では、起業費が少ない方が経済性評価は有利になる。表 8-10 に示すように ISL 採鉱法が在来型採鉱法より、2.1~9.6\$/1bU₃O₈ 安いウラン価格で ROR15% を確保することができる。

ISL 採鉱法によるウラン生産は地下に賦存する鉱石を起砕・運搬し、鉱石の破碎・磨鉱を必要としないため、生産設備は在来型採鉱法に比べて簡略化され初期の設備投資額は少ない。また、井戸設備の開発は生産とともに井戸設備を順次設置替えしていくため、鉱山開発初期において全ての井戸設備を開発しておく必要はない。したがっ

て、経済的観点から利点を整理すると以下のようなことが言える。

- ・生産に必要なエネルギーが少ない。
- ・開発から生産までの期間が短い。
- ・初期投資額が少ない。
- ・投資リスクが少ない。

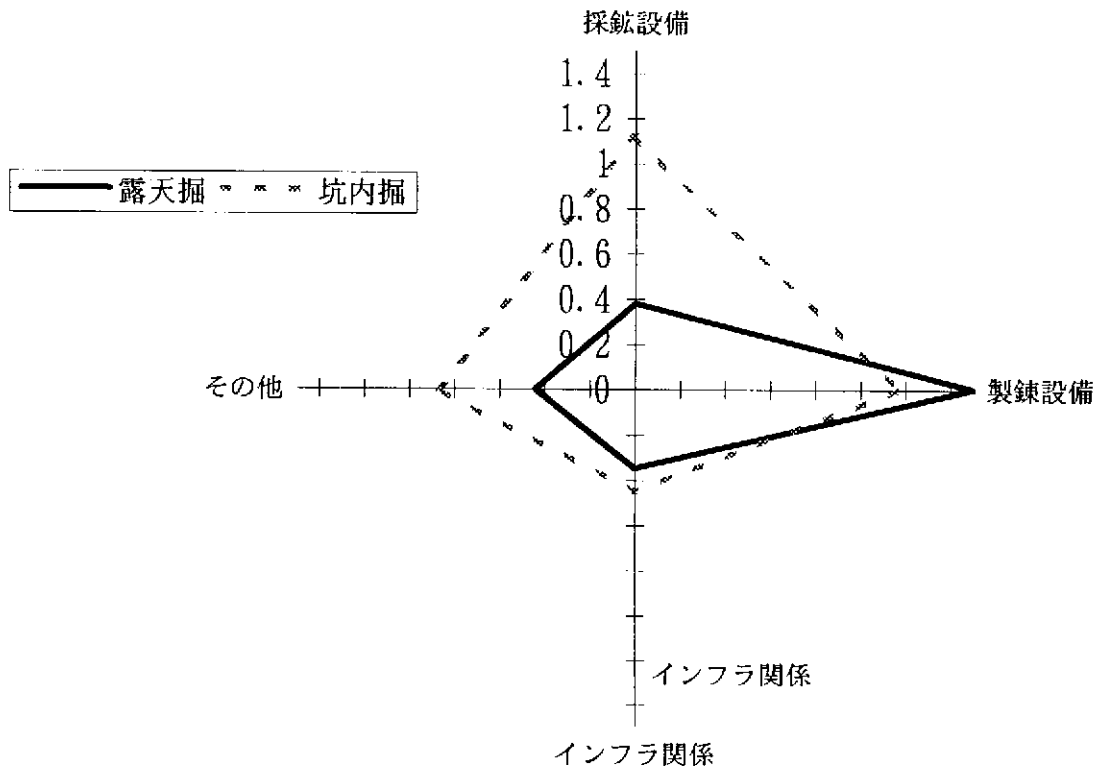
ISL 採鉱法によるウラン生産規模は在来型採鉱法に比べて小さいが、現在のようなウラン需給環境においては、ISL 採鉱法を適用できるウラン鉱山開発が盛んになるだろう。

表 8-10 生産コストと ROR15%のウラン価格

	在来型採鉱法		ISL 採鉱法	
	坑内掘	露天掘	米国	CIS 諸国
起業費原価 (\$/1bU ₃ O ₈)	3.61	2.66	1.71	2.48
操業費原価 (\$/1bU ₃ O ₈)	11.34	8.95	10.18	10.65
生産コスト (\$/1bU ₃ O ₈)	14.95	11.61	11.89	13.13
ROR15%				
ウラン価格 (\$/1bU ₃ O ₈)	26.0	19.8	16.4	17.7
初期投資額 (USM\$)	266	206	44.5	62.6
年間売上額 (USM\$)	165	126	31.7	36.6
年間操業費 (USM\$)	72	57	20.5	26.0
年間粗利益 (USM\$)	93	69	11.3	10.6

在来型採鉱法の初期投資額には探鉱費 36,000 千\$(1.2\$/kgU)を含む。

起業費原価の内訳(\$/lbU3O8)



操業費原価の内訳(\$/lbU3O8)

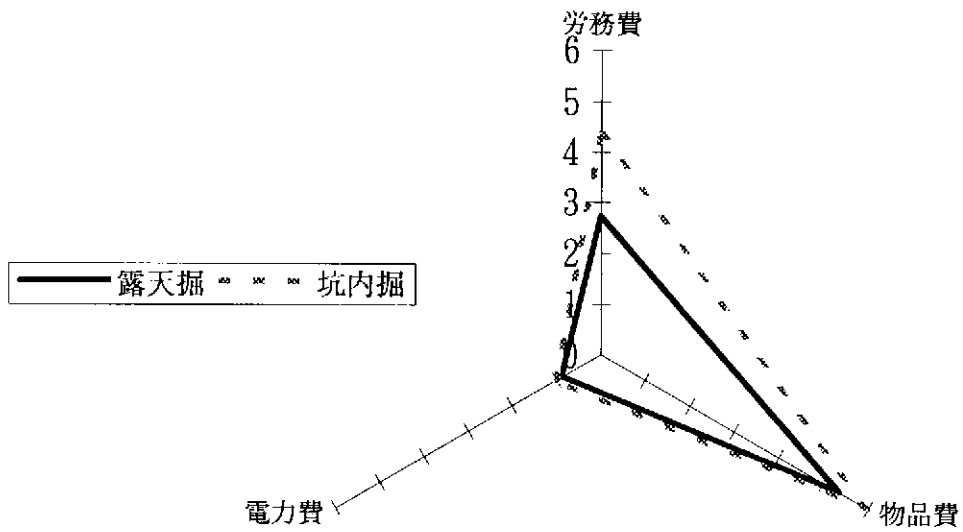


図8-2 露天掘と坑内掘の生産コスト内訳 (カナダ)

図 8-3 在来型採鉱法（坑内掘モデル）のキャッシュフロー図

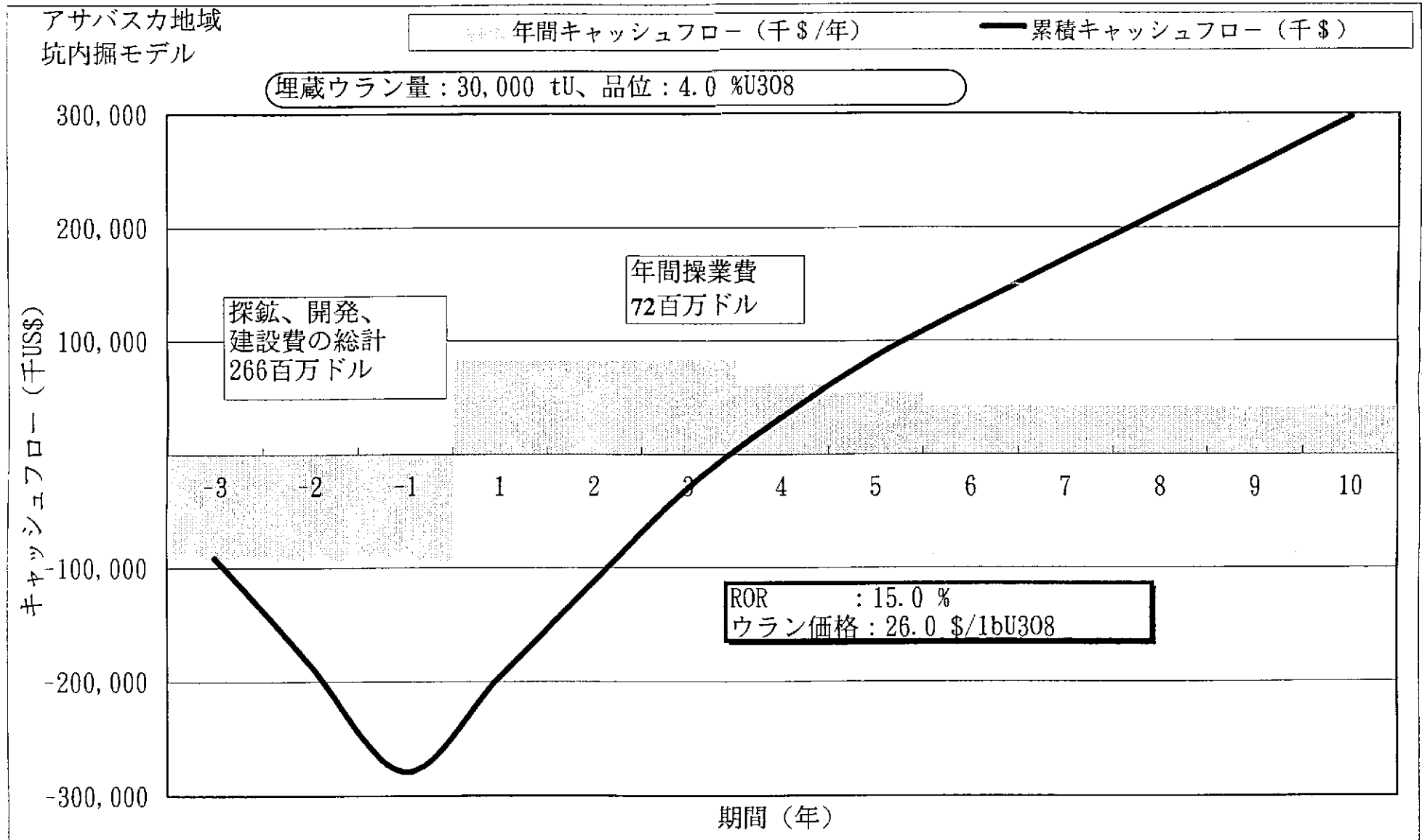


図 8-4 在来型採鉱法（露天掘モデル）のキャッシュフロー図

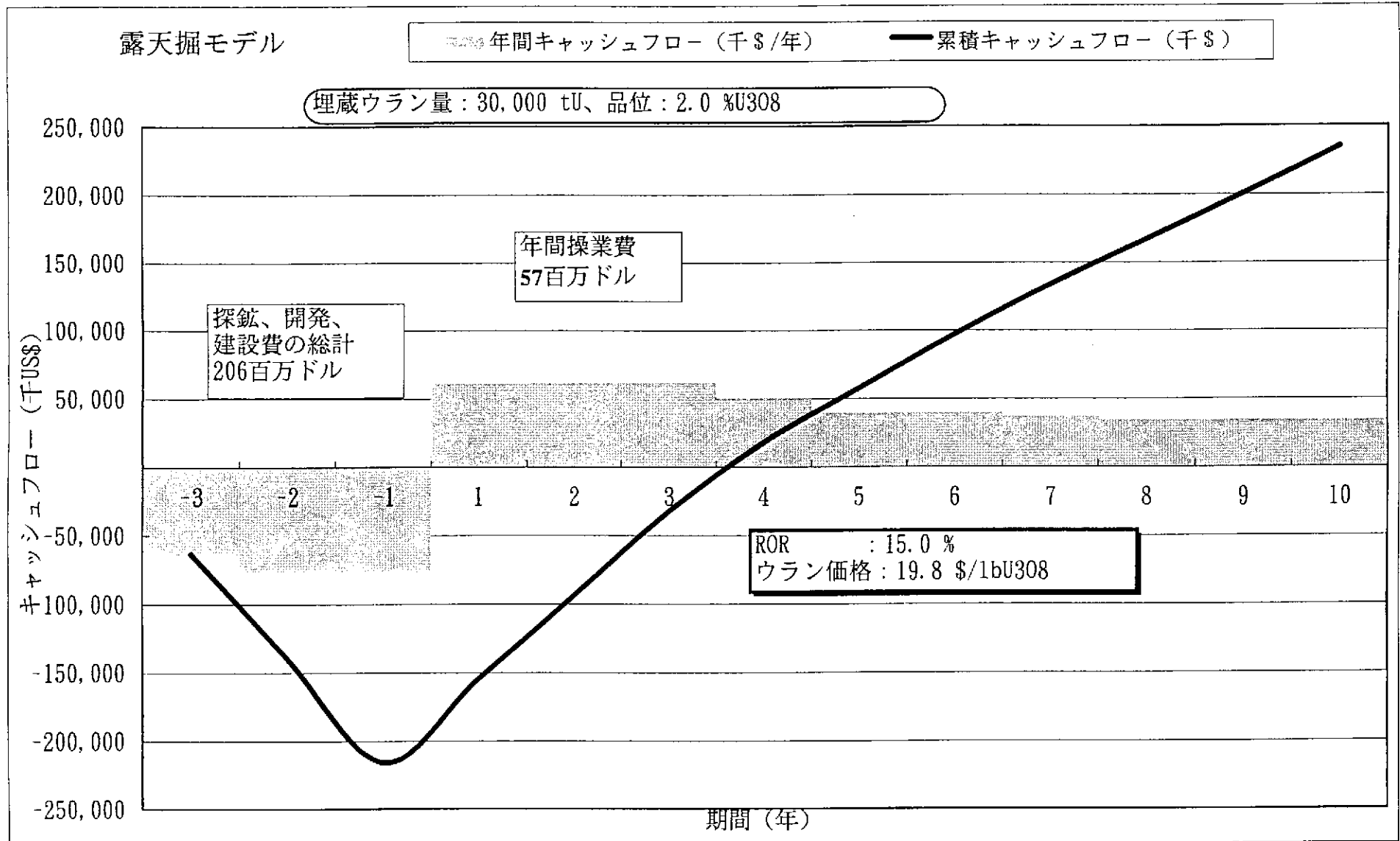


図 8-5 ISL 採鉱法（米国標準ケース）のキャッシュフロー図

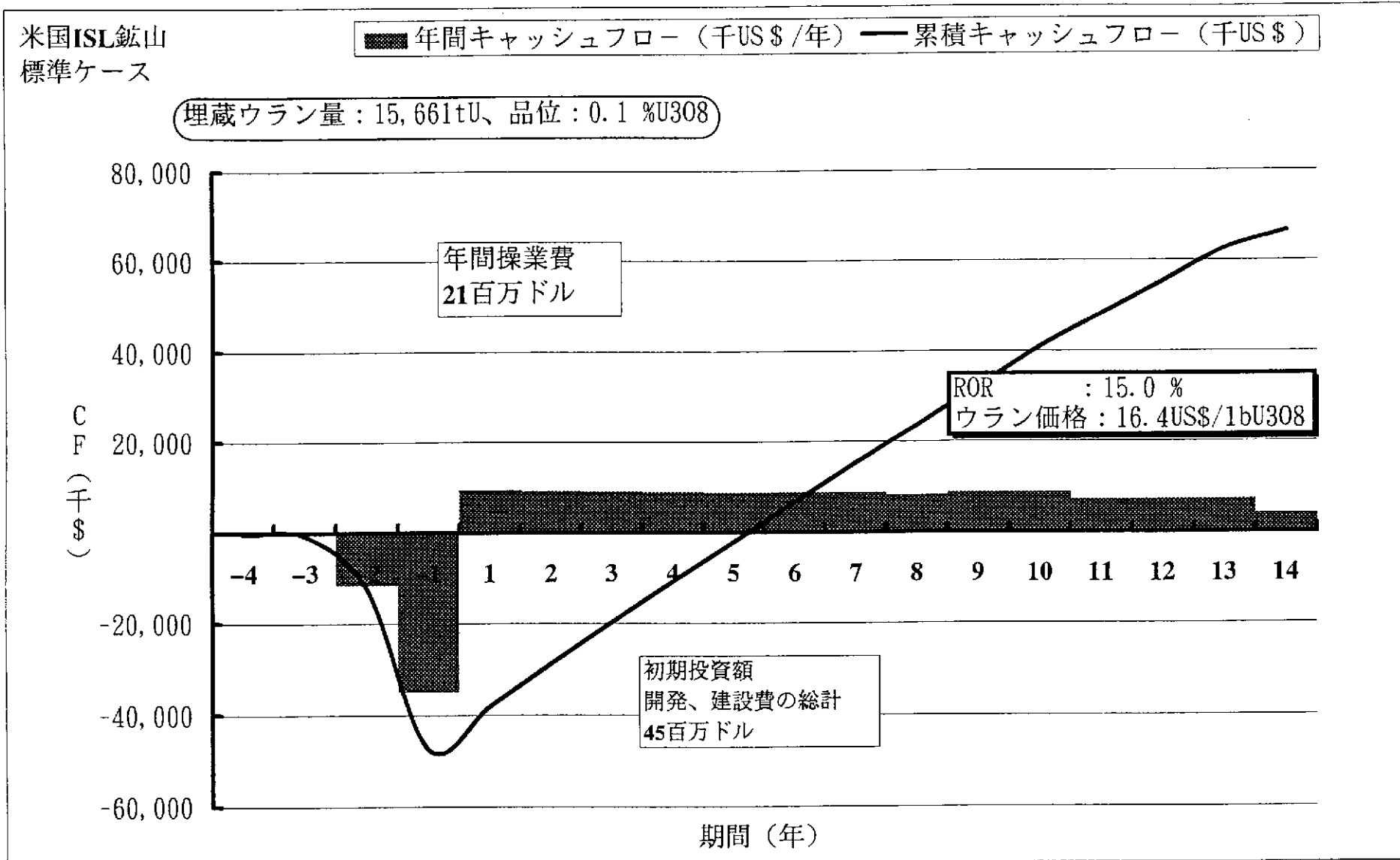
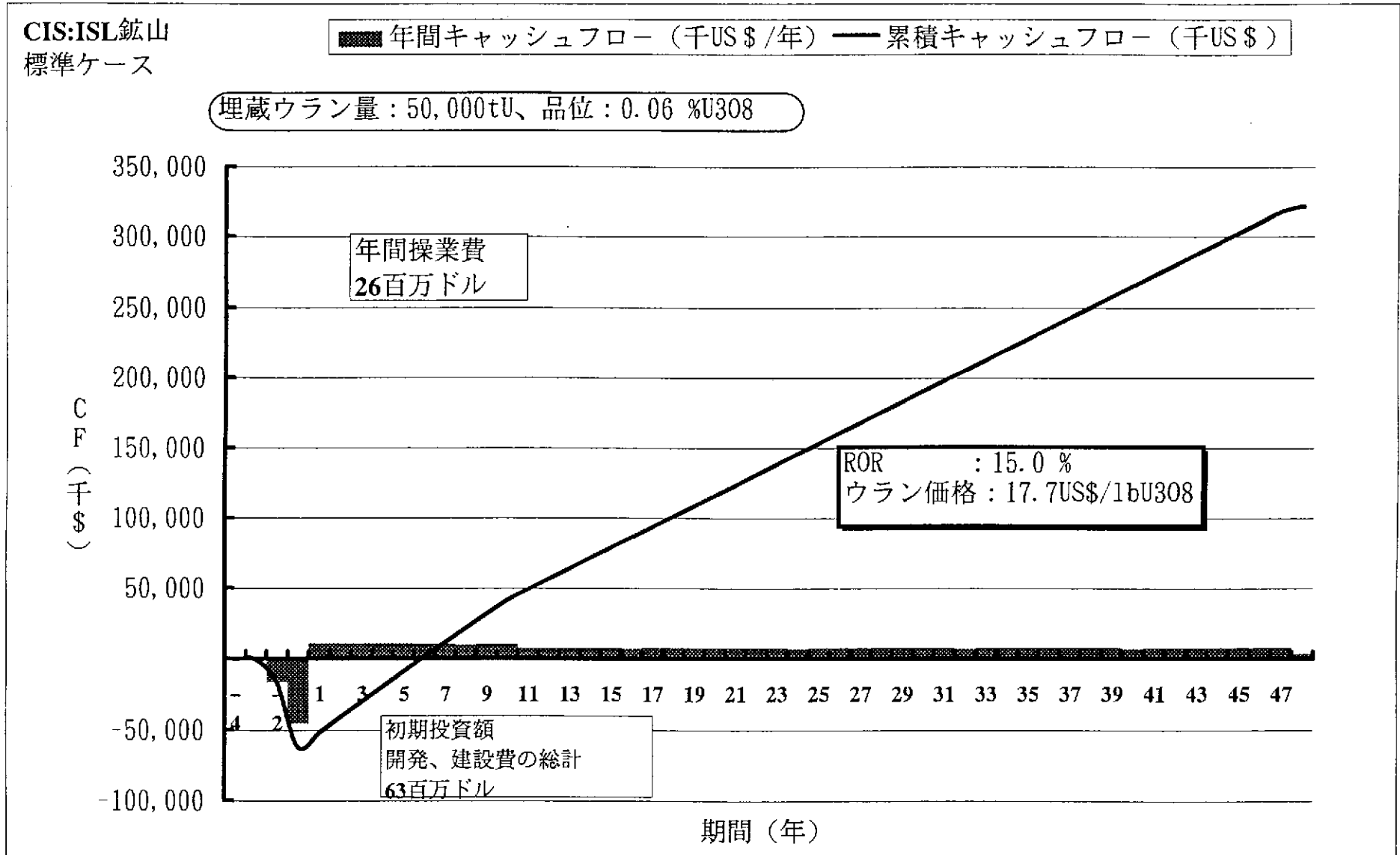


図 8-6 ISL 採鉱法 (CIS 諸国標準ケース) のキャッシュフロー図



9. あとがき

インシチュ・リーチング採鉱によるウラン鉱床の探査・開発にあたって問題となる事項について調査・検討した。その結果、インシチュ・リーチング採鉱技術は新しい採鉱技術として急速に信頼性を高めており、近い将来、ウラン供給の主体となる可能性が潜むものであると評価された。本報告中克服すべき障害を指摘したが、それらの多くは、具体的な開発対象が設定されて初めて検討、解決できるものである。次の段階として、まず、わが国により、探査・開発可能な鉱床を選定し、これらの問題の解決にあたることが望まれる。

世界には430基の原子炉が稼動しており、現在その燃料となるウランの供給状況は過剰となっている。しかし、この供給過剰現象は1980年前後にできた多量の在庫に帰因する見かけ上のものであり、長く現状を維持することはできない。また需要面では温暖化防止京都会議でとりきめられたCO₂放出量の削減達成のために、積極的に原子力が開発されることも考えられ、供給面では現在進行している供給地域、供給会社の寡占化、開発にともなう先住人とのトラブルなどの不安要素が存在する。わが国独立のウラン資源開発、供給の多様化を図ることは急務といえよう。