

内閣府委託事業

核医学治療を目的とした医療用ラジオアイソトープの
サプライチェーンについての調査

成果報告書

令和7年3月10日

株式会社千代田テクノル

本報告書は、内閣府の科学技術基礎調査等委託費による委託業務として、株式会社千代田テクノルが実施した令和 6 年度「核医学治療を目的とした医療用ラジオアイソトープのサプライチェーンについての調査」の成果を取りまとめたものです。

従って、本報告書の著作権は、内閣府に帰属しており、本報告書の全部又は一部の無断複製等の行為は、法律で認められたときを除き、著作権の侵害にあたるので、これらの利用行為を行うときは、内閣府の承認手続きが必要です。

<目次>

1. 委託業務の題目-----	1
2. 業務の目的-----	1
3. 業務計画-----	1
3.1. 業務の概要-----	1
3.2. 業務の細部計画-----	2
4. 調査報告-----	3
4.1. なぜ、Ra-226 なのか-----	3
4.2. なぜ、ウズベキスタンのウラン残渣なのか-----	3
4.3. ウズベキスタンウラン残渣サイトの選定とそこにおける Ra-226 含有量調査結果---	5
5. Ra-226 と Ac-225 の市場価格動向-----	18
5.1 Ac-225 の市場価格-----	18
5.2 Ra-226 の市場価格-----	19
6. Ra-226 に関するサプライチェーンにおける課題とリスク-----	21
6.1 資源採掘・精製プロセス-----	21
(1)技術面での課題とリスク-----	21
(2)法規制及び技術に対する権利(使用権等)に関する課題とリスク-----	23
6.2 物流とインフラ-----	26
(1)想定されるロジスティックス(インフラ拠点と物流の組み合わせ)-----	26
(2)想定されるロジスティックスに対する運用面、輸送技術面の課題とリスク-----	26
(3)想定されるロジスティックスに対する法規制上の課題とリスク-----	27
7. 本報告の要点整理と継続調査の必要性-----	29

【参考資料】

1. 中央アジアにおけるウランレガシーサイトの環境修復（2017 年 IAEA 発行）
2. 中央アジアにおけるウランレガシーサイトの環境修復 第 2 版（2021 年 IAEA 発行）
3. サンプル分析データ
 - 3-1. ウズベキスタンウラン残渣 3 サイトサンプリングレポート
 - 3-2. ウズベキスタンウラン残渣 3 サイト全サンプルデータ
 - 3-3. 代表固体サンプルの Ra-226 含有量分析時におけるスペクトルデータ
 - 3-4. 代表固体サンプル採取マップ
 - 3-5. 代表固体サンプル非放射性組成元素データ
4. 分析に使用した機材一覧

1. 委託業務の題目

核医学治療を目的とした医療用ラジオアイソトープのサプライチェーンについての調査

2. 業務の目的

原子力委員会では、令和4年5月に「医療用等ラジオアイソトープ製造・利用推進アクションプラン」（以下、「アクションプラン」という。）を決定した。アクションプランにおいては、核医学治療で用いられる重要ラジオアイソトープの一部として、現在世界中で研究開発が進められているアクチニウム-225、アスタチン-211における国内製造・安定供給に向けた取組の推進について明記されている。

今回、弊社はアスタチン-211（半減期 7.2 時間）に比べ半減期が 10 日と長く、製剤化されてから病院で使用するまでの輸送面及び院内での保管の面で優位性のあるアクチニウム-225（以降、Ac-225）に注目した。本業務は、日本国内での Ac-225 の製造・供給体制を確立するため、その原料となる Ra-226 の安定調達を目的としている。Ra-226 は天然ウラン鉱石に含まれているが、その含有量は非常に少ないため抽出が困難であり、希少資源となっており、一般的に入手は世界でも極めて困難な状況になっている。そのため、アクションプランにおいても Ac-225 の原料となる Ra-226 の確保が重要課題とされている。

今回は、後述のとおり、中央アジアのウラン鉱山の鉱石残渣に着目し、その中に含まれる Ra-226 の保管量や保管状態、分離・抽出の課題を明らかにすることで、将来的な供給確保の可能性を探るものである。

3. 業務計画

3.1. 業務の概要

Ra-226 は U-238 が崩壊を続けて生じるもので、ウラン鉱石の中に含有されることは既知であるため、採掘されたウラン鉱石からウランを抽出した残りの廃岩（ウラン生産前に不適となったウラン濃度の低い鉱石を含め、以下「残渣」という。）中に Ra-226 が含有される可能性がある。そのため、同残渣の試料を分析し、試料中の Ra-226 含有量を調べることにし、Ac-225 の原料としての希少資源である Ra-226 確保の観点から意義があると考えられる。

ウラン生産量では現在世界でカザフスタンが第一位であり、同国の旧ソビエト時代の残渣サイトの修復は同国自身が行うことになっている。そのため、分析対象となる残渣が大量に残されている適当な残渣サイトを本調査対象として選定する上で、先にカザフスタン政府に確認をした結果、Ra-226 があっても国策上輸出はしないという政府の方針を確認できたことから、同国を調査対象から外した。

次に、環境修復が完了したサイトについては、分析対象である残渣が存しない可能性があ

ることから、修復未了の残渣サイトを調べる過程で、【参考資料 - 1】として添付している、IAEA 及び欧州復興銀行の「中央アジアにおけるウランレガシーサイトの環境修復」（2017 年発行）の内容を調査した。なお、同文書において、環境修復に向けた取り組みとして次を目指していることが分かった。

- 人や環境へのリスクを許容可能、持続可能なレベルに低減させる。
- 影響を受けた地域の健康、社会経済状況、生活環境の改善に寄与する。
- 地域内の安定と安全保障の強化に寄与する。

具体的な残渣サイトに関しては、同文書の中で、タジキスタン・キルギス・ウズベキスタンで旧ソビエト時代に放置された各残渣サイトについて、修復優先順位が厳密な考察の上規定されていることが判明した。これら 3 개국ではその順位に沿い、修復工事が進んでいるが、特にウズベキスタンは豪州に次ぐウラン生産量世界第五位であり、同国では修復対象外の残渣サイトがあるとウズベキスタン核物理研究所（以下、「INP」という。）から情報を得た。

具体的には、INP の知見を基に修復対象外で Ra-226 を豊富に有する可能性のある残渣サイト 3 つ（クラスノゴルスク鉱山、ナボイ鉱山、ヤンギオバード鉱山）を選定するとともに、INP を共同研究者として現地調査を行うこととした。

3.2. 業務の細部計画

各サイトにおけるサンプリングは下記の通り実行した。

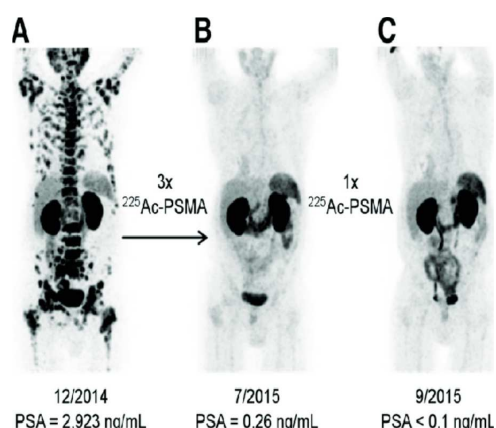
地区名	固体サンプル	液体サンプル
クラスノゴルスク地区	8 袋	5 本
ヤンギオバード地区	66 袋	8 本
ナボイ地区	109 袋	2 本

- ①廃坑となったウラン鉱山及びウラン鉱石残渣が投棄されている場所及び残渣容積の推定の調査のため、INP の他、ウズベキスタンにある 1 法人（国営金・ウラン生産会社ナボイ採掘冶金コンビナート社からウラン生産事業に特化し分離され独立した国営ナボイウラン社）と連携することとした。
- ②厳選した残渣の各サンプルを分析試料とするため、粉砕機・ボールミル（円筒状回転粉砕機）等を使用し、分析の際に障害となる不純物を除去することとした。
- ③Ra-226 含有量の主な分析は高純度ゲルマニウム半導体検出器を用いて行った。なお、Ra-226 の抽出方法は元素組成に応じて異なるため、さらに中性子放射化法にて元素組成を測定し、Ra-226 の分離・回収方法について検討を行った。

4. 調査報告

4.1. なぜ、Ra-226 なのか。

近年、がん治療において標的 α 線療法 (TAT: Targeted Alpha Therapy) の研究・開発が進んでいる。その中で、今回の調査においては特に放射性同位体 Ac-225 に注目した。Ac-225 で標識された薬剤のひとつが、転移性前立腺がんに対して非常に高い治療効果を示した報告がなされて (2016 年、ドイツ・ハイデルベルク大学: 下記写真) 以降、Ac-225 は世界的に注目されている。



Ac-225 は α 線を放出する核種であり、 α 粒子は短い飛程 (50–100 μm) と高い線エネルギー付与 (LET: Linear Energy Transfer) を持つ。この性質を利用し、がん細胞を選択的に破壊し、正常組織への影響を最小限に抑えることが可能となる。現在、主流となっている β 線治療 (Lu-177 など) に比べて、より強力な細胞破壊力を持つため、難治性がん (転移性前立腺がん、白血病、神経内分泌腫瘍など) への適用が期待される。なお、Ac-225 は天然には存在しないため、人工的に製造する必要がある。

令和 4 年 5 月に原子力委員会が策定した「医療用等ラジオアイソトープ製造・利用推進アクションプラン」を踏まえて、Ra-226 に陽子又は γ 線を照射する小型加速器、小型電子線形加速器、高速中性子を照射する高速実験炉等を使った製造法を含めいくつか製造方法が研究開発されており、そのため Ac-225 の原料となる Ra-226 の確保が必須と判断し、Ra-226 の探索及びサプライチェーンについて調査を実施した。

4.2. なぜ、ウズベキスタンのウラン残渣なのか。

世界におけるウラン生産量は令和 5 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2024) によると、下記円グラフの通りとなっている。弊社は 2021～22 年、カザフスタンにおける露天堀、坑内堀 (添付 1. ウラン産出方法参照) から発生したウランの残渣処分池を対象に準国営ウラン生産企業カザトムプロム社と共に調査したことがあるが、仮に Ra-226 が見つけれられたとしてもカザフスタンの国策により国外に Ra-226 は出さない方針が下さ

れ、分離・抽出の検討を含めたカザフスタンでの残渣資源調査の継続を断念した経緯がある。

IAEA 発行の白書（【参考資料】として添付）

1. 中央アジアにおけるウランレガシーサイトの環境修復（2017 年発行）
2. 中央アジアにおけるウランレガシーサイトの環境修復 第 2 版（2021 年発行）

によると、過去のウラン採掘、加工、廃棄に伴う環境及び公衆衛生リスクに対処することを目的としたウラン採掘場の環境修復計画では、ウズベキスタン、キルギス及びタジキスタンの 3 か国（計 7 か所）を優先対象としている。

国	修復優先サイト
キルギス	ミンクーシャ／シェカフタル／マイルー・スー
タジキスタン	イスティクロール／デグメイ
ウズベキスタン	ヤンギオバード／チャルケサル

これら計画の状況は以下の通りである。

キルギスに関してはミンクーシャ及びシェカフタルの修復工事は既に 2022 年に完了。マイルー・スーの修復工事は 2023 年に開始されたという記事が報じられている。【参考文献・資料及び URL(1),(2)参照】

タジキスタンに関してはイスティクロール低品位ウラン鉱石工場と鉱滓堆積場の埋め立て作業をロシアの支援も受けて 2023 年に完了。【参考文献・資料及び URL(3)参照】

以上の通り、キルギス及びタジキスタンでは修復工事が進められているため、本調査で調査できる余地は無いと判断した。

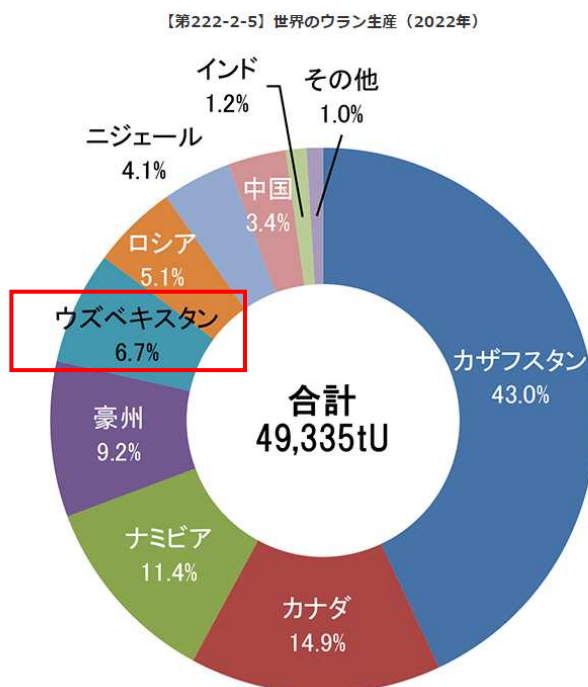
ウズベキスタンに関しては、ヤンギオバード及びチャルケサル地区で修復工事は完了までに約 2 年を要するが 2023 年第 1 四半期に開始されている。【参考文献・資料及び URL(4)参照】

なお、ヤンギオバード地区においては全ての場所ではなく、修復対象外の場所もあり、その修復対象外のウズベキスタンのヤンギオバード地区を調査対象とした。

旧ソビエト時代においては、ウズベキスタンの旧ウラン鉱山での坑内掘及び露天掘によるウラン採掘は、1940 年代に始まり、1990 年代まで続き、この国はかつて主要なウラン生産国であった。旧ウラン鉱山での採掘残渣は、廃坑後ウランレガシーとして放置されてきた。

現在もウズベキスタンにおけるウランの生産事業は国営ナボイウラン社により継続され、生産量で同国は世界第五位(2022 年時点)のポジションにあるため、同社は世界的にウラン鉱石等の取扱い実績があると言える。ナボイの残渣については同社が所有管理しているため、ナボイの残渣サイトの適切な管理が期待できると考えた。

以上を踏まえて、弊社は、原子力分野及び放射性同位元素製造関連の事業で関係の深い INP を共同研究者とし、同国に存在する環境修復対象外のサイトに廃棄された残渣に注目した。



4.3. ウズベキスタンウラン残渣サイトの選定とそこにおける Ra-226 含有量調査結果

ウズベキスタンにおけるウラン生産は現在、インシチュリーチング法（in situ leaching、原位置浸出法。ウラン鉱床に向けて井戸を掘削し、浸出液（硫酸溶液等）を注入してウランを液中に溶解させた上で、溶液を吸い上げて回収する方法。）による生産のため、廃岩等の残渣は発生していない。しかし、過去 1958 年～1994 年に露天掘及び坑内掘により採掘を行っていたサイト（23 サイト）では廃岩等の残渣が発生していると弊社は国営ウラン生産会社ナボイウラン社及び INP から聴取している。

しかしながら、2023 年 9 月 13 日付 World Nuclear News「ウズベキスタンの旧ウラン施設の浄化作業開始」【参考文献・資料及び URL(5)】によると、欧州復興開発銀行が管理する中央アジア環境修復勘定からの補助金により、ほとんどの旧ウラン採掘現場では鉱山の開口部を閉鎖し、ウラン鉱石処理に使用されていた廃施設を解体し環境修復させている。

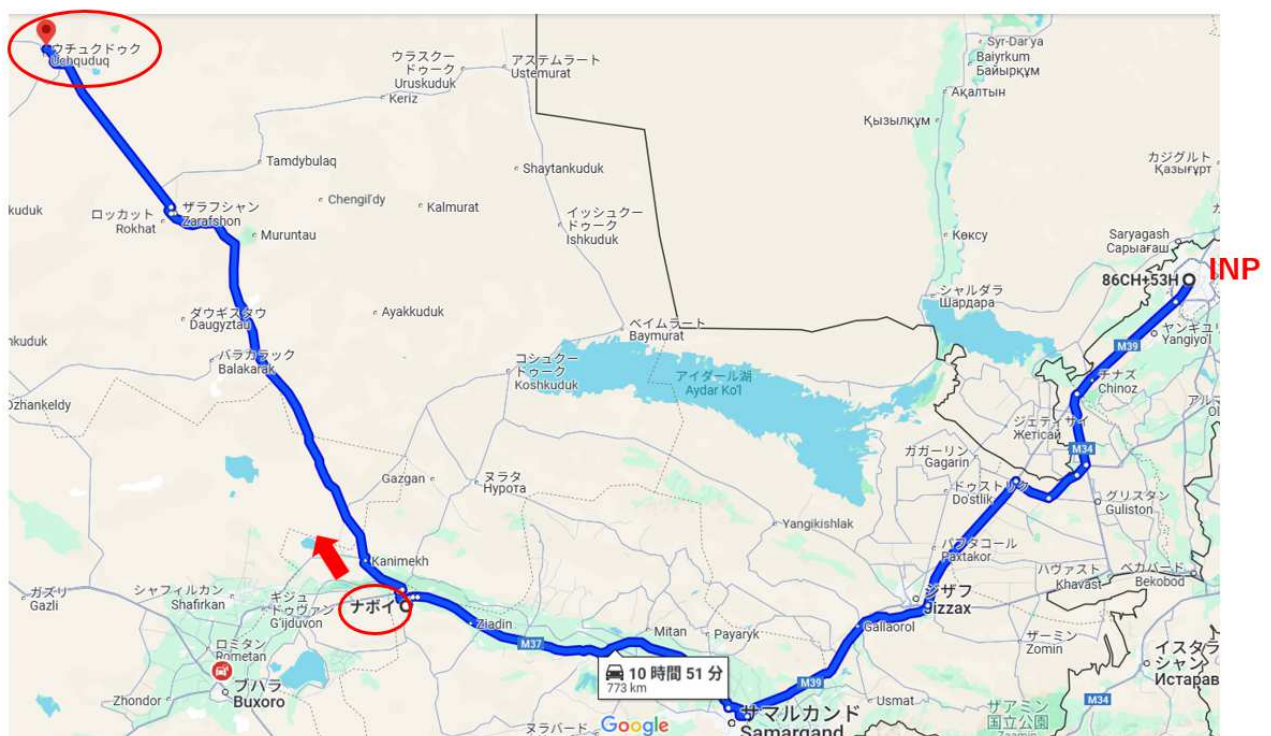
なお、クラスノゴルスク地区及びヤングオバード地区の一部については、これら修復対象外である。また、国営ナボイウラン社が所有するウチュクドゥク地域についても、現在も操業している地域のため、以前に採掘していた廃岩等の残渣は環境修復すべきサイトから外されている。

以上のことより、今回の調査対象として特定した①クラスノゴルスク地区／②ヤンギオバード地区（一部）／③ナボイ地区の 3 サイトは、環境修復作業の対象外となったことから、Ra-226 を含む廃岩等の残渣が残されている可能性が高いと判断し、同国における残渣サイトとして選定した。

ウラン残渣3サイト（ナボイ・クラスノゴルスク・ヤンギオバード）



ナボイの現場はさらに約400km北に位置するウチュクドゥク町にあり広大な敷地面積を有する。



①クラスノゴルスク地区

ソビエト連邦時代、鉱山都市として発展し、主にウラン鉱山の商業開発を行ってきた場所である。今回のサンプリングは残渣が投棄されている場所（下記写真）を中心に行い、固体サンプル8箇所及び液体サンプル5箇所の Ra-226 含有量を測定した。（測定方法は添付2．Ra-226 含有量定量化分析参照。）

なお、サンプリング箇所等は【参考資料3-1】ウズベキスタンウラン残渣3サイト サンプリング状況のクラスノゴルスク地区を参照。

その結果、2箇所では含有量が高いものは見受けられた（4,000Bq/kg 超, 23,000Bq/kg 超）が、その他（6箇所）は数百 Bq/kg 程度と含有量が低いものであった。他の2地区（ヤンギオバード、ナボイ）と比較して Ra-226 含有量が少ないため、同地区においては追加調査には相応しくないと判断している。（クラスノゴルスク地区におけるサンプリングに含まれる Ra-226 含有量は【参考資料3-2】ウズベキスタンウラン残渣3サイト サンプル測定結果参照。）

固体サンプルRa-226推定含有量

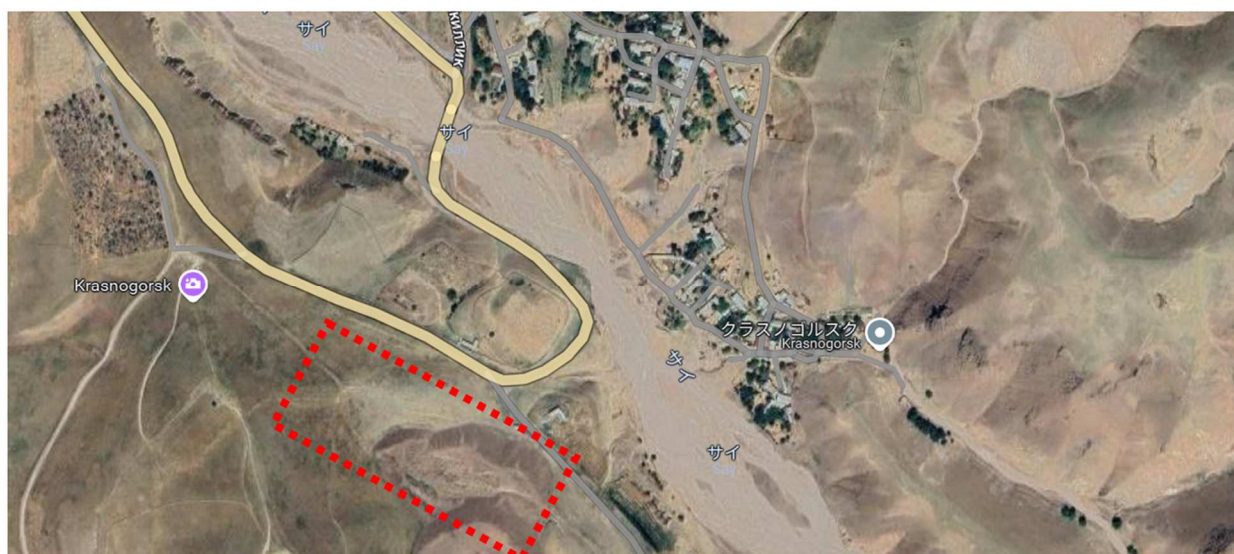
Table 1. KRASNOGORSK. 1st sampling

#	Sample Field Label	Sample ID	Dose Rate, μSv/h	A ± DA, Bq/kg		
1	packet-1	K-S-001	0.29	4,242	±	209
2	packet-2	K-S-002	0.79	23,432	±	1,142
3	packet-3	K-S-003	0.19	654	±	34
4	packet-4	K-S-004	0.19	204	±	13
5	packet-5	K-S-005	0.18	88	±	7
6	packet-6	K-S-006	0.19	72	±	6
7	packet-7	K-S-007	0.17	90	±	7
8	packet-8	K-S-008	0.18	117	±	8

クラスノゴルスク地区

推定廃岩等総量 約45万ton

サンプル採掘エリア



液体サンプル測定結果

クラスノゴルスク地区における幾つかの湧き水場所から5箇所のサンプル（5ℓ×5本）を採取し測定した。その結果、液体サンプルに含まれる Ra-226 の含有量は固体サンプルに比べて0.1%にも満たない程度の量しか検出されなかった。



サンプル 番号	Ra-226 の放射能 ベクレル/kg
1	< 0.07
2	0.21 ± 0.04
3	0.14 ± 0.03
4	< 0.07
5	< 0.07



上記表の通り、液体中における Ra-226 含有量は、固体サンプルに比べて非常に低い。

②ヤンギオバード地区

ソビエト連邦時代、ウラン鉱山の中心地としてウラン鉱石の採掘が行われ、その過程で残渣が発生した。これらの残渣は、適切に管理されない場合、放射性物質や重金属による環境汚染のリスクを伴うため、ウズベキスタン政府は国際原子力機関（IAEA）や欧州復興開発銀行（EBRD）と協力し、ウラン鉱山の廃棄物管理と環境修復（ウラン残渣の安定化・封じ込め・周辺環境のモニタリング）が行われたが、今回投棄された場所は修復対象外として残されていた。

ここでのサンプリングも、クラスノゴルスク地区同様、残渣が投棄されている場所（下記写真）を中心に行い、固体サンプル 66 箇所及び液体サンプル 8 箇所の Ra-226 含有量を測定した。（サンプリング箇所等は【参考資料 3-1】ウズベキスタンウラン残渣 3 サイトサンプリング状況のヤンギオバード地区を参照。）

同地区はクラスノゴルスク地区と比較して広大な処分場であり、多くの廃岩があつて、INP がサンプリングした中には Ra-226 含有量が他の 2 地区（クラスノゴルスク、ナボイ）と比較して非常に高いもの（500,000Bq/kg 超、150,000Bq/kg 超）が各々 1 箇所、比較的高いもの（10,000Bq/kg～80,000Bq/kg）が 16 箇所で採取された一方で、含有量が数百 Bq/kg と低いサンプルもあった。（ヤンギオバード地区におけるサンプリングに含まれる Ra-226 推定量は【参考資料 3-2】ウズベキスタン ウラン残渣 3 サイト サンプル測定結果参照。）

固体サンプルRa-226推定含有量

Table 2. YANGIOBOD. 1st sampling

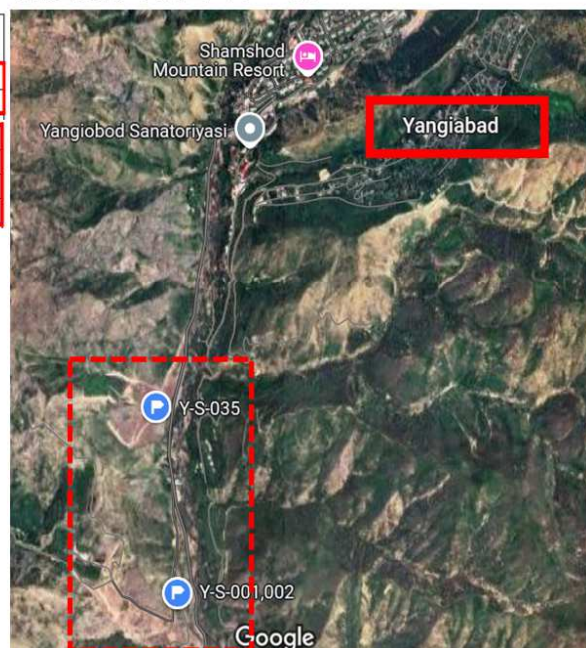
#	Sample Field Label	Sample ID	Dose Rate, $\mu\text{Sv/h}$	A $\pm$ DA, Bq/kg		
1	S-1-1	Y-S-009	23.50	525,535	$\pm$	21,240
2	S-1-2	Y-S-010	3.81	136,578	$\pm$	6,248
15	packet-3-1	Y-S-042	0.23	1,784	$\pm$	76
16	packet-3-2	Y-S-043	0.51	13,387	$\pm$	549
17	packet-3-3	Y-S-044	0.23	1,407	$\pm$	56
18	packet-3-5	Y-S-046	4.18	150,910	$\pm$	5,628



ヤンギオバード地区

推定廃岩等総量 約280万ton

サンプル採掘エリア





旧ソ連時代、坑内掘りによって廃棄処分となったオフバランス鉱石を集めて放棄された場所であるが、どここの鉱山から持ち込まれたものかの記録はない。膨大な数の廃岩は様々な場所（鉱山）から持ち込まれているため、ホットスポットとなるサンプルが稀に出てくるが、ほとんどの廃岩は放射線量が低く、Ra-226含有量も線量に比例して少ない。



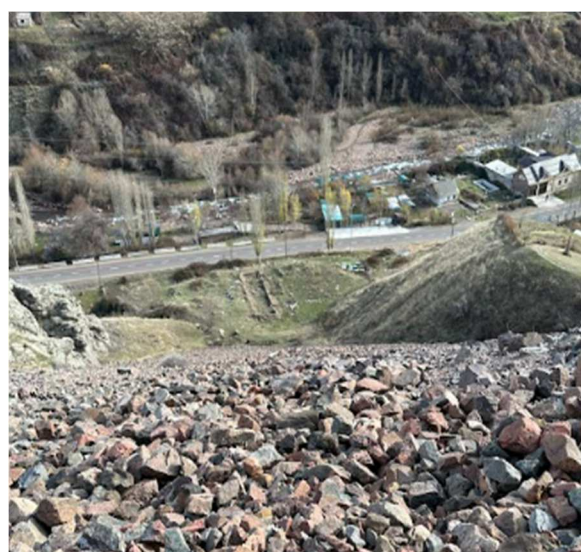
核種分析において“*No nuclides found*”と表示される廃岩も多かった。

どの場所においてどのサンプルの含有量が高かったのかを把握する必要があり、弊社は現地に赴き調査を行った。実際に現場で確認したところでは、サンプリング時に測定した放射線量が高い廃岩は存在しなかった。前出の放射線量の高い（＝Ra-226含有量が多い）サンプルは INP がサンプリング時に入念に調べて見つけたもので、その量はわずか 0.1kg 程度と少量であったことから、その場所に投棄されていた廃岩のサンプルだけが高濃度だったと推測された。

実際、今回調査に同行していただいた INP 核物理研究室の元室長モハメッド氏からのヒアリングでは、残渣が投棄されている場所の近くで採掘したものか、遠くの場所から持ち込まれたものかの履歴情報は残されていないとのことである。また、同国の環境

省が管理管轄をしているが、管理人はおらず、現地の管理状況はほぼ放置に近いことが判った。

山間部に位置するヤンギオバード地区は、残渣の前処理（粉碎・微粉化等）や後処理（Ra-226 分離・抽出等）をそこで行うには、電力や Ra-226 の搬出に必要な交通といったインフラ整備に乏しく、サプライチェーンのためにはこれら設備の整備、また国内の別の場所での工場立地を行うという場合、前処理や後処理を行う場所の新規確保、同地区の廃岩を山間部から移送するための輸送インフラ整備、許認可取得が必要となる。



液体サンプル測定結果

ヤンギオバード地区における液体サンプルもクラスノゴルスク地区同様、いくつかの湧き水から8箇所（10ℓ×8本）を採取し、Ra-226含有量を測定したが 固体サンプルの含有量と比べて極めて少ない量の Ra-226 しか検出されなかった。



③ナボイ地区（ウチュクドゥク町）

ウチュクドゥク町はナボイ州に位置し、キジルクム砂漠の中にある。この地域は、ソビエト連邦時代からウラン鉱山の開発と生産が露天掘、坑内掘で進められた。同地区では現在インシチュリーチング法のみにより、ウズベキスタンでは唯一国営ナボイウラン社によりウランの採掘が継続して行われているが、同法からは廃岩残渣は一切発生しない。従い同地区で管理されている残渣は、露天掘、坑内掘による旧鉱山で採掘した時の残渣である。

ウランの採掘・製錬過程では、放射性物質を含む残渣が発生する。これらの残渣は適切に管理・処理されない場合、環境汚染や健康被害の原因となる可能性があるが、このサイトは国営ナボイウラン社が国際的な安全基準や環境保護規制に従った廃棄物管理をしている。なお、ウラン採掘後の製錬過程で発生する残渣は操業開始時期から工場内で別途保管貯蔵されており、採掘廃岩とは別の残渣物であるため今回の調査対象ではない。

同地区は他のサイト（クラスノゴルスク地区、ヤンギオバード地区）と比較して、サンプリング対象の残渣量が豊富に存在していること、安定した Ra-226 含有量が算出されていたこと、また国営ナボイウラン社が残渣を所有し、管理保管を行っていることから、INP を通じて同社へ現場視察を申し入れ、状況確認を行った。

固体サンプルRa-226推定含有量

Table 5. NAVOIY. 1st sampling

#	Sample Field Label	Sample ID	Dose Rate, μSv/h	A ± DA, Bq/kg
1	S-17-1	N-S-084	1.02	23,923 ± 1,166
2	S-17-2	N-S-085	1.53	33,725 ± 1,643
3	S-17-3	N-S-086	1.03	23,314 ± 1,039
4	S-17-4	N-S-087	1.73	41,402 ± 1,895
5	S-17-5	N-S-088	0.60	13,076 ± 601
6	S-17-6	N-S-089	0.76	16,729 ± 816
7	S-17-7	N-S-090	0.53	12,802 ± 588
8	S-17-8	N-S-091	0.37	5,057 ± 234
9	S-17-9	N-S-092	0.45	7,916 ± 388
10	S-17-10	N-S-093	0.33	4,250 ± 197
11	S-17-11	N-S-094	0.20	3,500 ± 164
12	S-17-12	N-S-095	0.39	6,484 ± 300
13	S-17-13	N-S-096	0.25	3,430 ± 160
14	S-17-14	N-S-097	0.28	3,733 ± 174

例えば3,700Bq/kg見込まれる場合
 $226\text{Ra } 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 1\text{Ci} = 1\text{g}$ であることから、

単純計算で1万吨(10,000,000kg) 中に226Raが1Ci=1g
 含まれることになる。

ナボイ地区(ウチュクドゥク町)

サンプル採掘エリア



ナボイ地区 (国営ナボイウラン社・ナボイウラン鉱山廃岩処分場)



左からアセット氏(現地通訳)、国営ナボイウラン社
 取締役生産本部長イクラモフ氏、弊社アイソトープ
 メディカル事業本部 三村副本部長、INP サディ
 コフ所長、弊社 穂苅アドバイザー

国営ナボイウラン社のイクラモフ取締役生産本部長も、Ra-226 資源に強い関心を示しており、INP を
 通じて今後の協力を得られることが確認出来た。



ナボイ地区（ウチュクドゥク町）は国際空港がある首都タシケントから約 770km 離れているが、高速道路の利用や一部鉄道の利用も可能と考えられ、輸送インフラ面においてもヤンギオバード地区に比し相対的に明らかな優位性があると判断される。



20,000Bq/kg～40,000Bq/kgと比較的高いサンプル場所

サーモ社の携帯型スペクトルメーターの分析において“Ra-226 NRM8”と表示されている。一番右の数値（ここでは8）は核種同定の信頼度を表す。（1～10の範囲で数値が高いほど信頼度がある。）

対象物はウラン含有量が基準値以下の鉱石ではなく、含有量が高いが破碎処理が必要なため放置された岩石。大きいものでは2m以上もある。

ナボイウラン社からの説明では、破碎処理が必要な当該岩石は同地区には約20万トンあるとのことである。また、約250万トンにのぼる残渣が存在するという。

3箇所の残渣の放射線量を測定したところ、バックグラウンド（ $0.3\sim 0.5\mu\text{Sv/h}$ ）に比べて高く、 $1.41\mu\text{Sv/h}\sim 11.3\mu\text{Sv/h}$ を示していた。

液体サンプル測定結果

ナボイ地区における液体サンプルは残渣投棄場所から2箇所（ $5\ell\times 2$ 本）を採取し、Ra-226含有量を測定した。結果は他2サイト同様、固体サンプルの含有量と比べて極めて少ない量のRa-226しか検出されなかったことから液体サンプルからRa-226抽出は困難であると判断された。



固体サンプルにおける詳細分析

今回の調査において採取した 183 箇所の固体サンプル（クラスノゴルスク 8 箇所、ヤンギオバード 66 箇所、ナボイ 109 箇所）のうち、Ra-226 含有量が高いものを中心に 14 箇所（クラスノゴルスク該当無し、ヤンギオバード 3 箇所、ナボイ 11 箇所）を選び、Ra-226 を抽出する際に障害となる Ra-228 の含有量を調査した。（下記表の通り：なお、分析時のスペクトルデータは参考資料 3-1 及び 3-2 を参照）

代表固体サンプルにおけるRa-226含有量とRa-228含有量

NO	ID	サイト	Ra-226 (Bq/kg) $A \pm \Delta A$	Ra-228 (Bq/kg) $A \pm \Delta A$
1	Y-S-001	ヤンギオバード	509,596 $\pm$ 7,574	< 1219
2	Y-S-002	ヤンギオバード	106,682 $\pm$ 2,242	< 225
3	Y-S-035	ヤンギオバード	114,797 $\pm$ 2,413	< 236
4	N-S-001	ナボイ	23,130 $\pm$ 488	< 106
5	N-S-002	ナボイ	38,219 $\pm$ 805	< 136
6	N-S-003	ナボイ	25,068 $\pm$ 528	< 109
7	N-S-004	ナボイ	45,348 $\pm$ 954	< 148
8	N-S-005	ナボイ	11,775 $\pm$ 249	< 75
9	N-S-006	ナボイ	16,316 $\pm$ 344	< 89
10	N-S-067	ナボイ	4,600 $\pm$ 99	30 $\pm$ 6
11	N-S-072	ナボイ	4,266 $\pm$ 92	73 $\pm$ 8
12	N-S-098	ナボイ	8,079 $\pm$ 172	80 $\pm$ 9
13	N-S-099	ナボイ	4,545 $\pm$ 97	36 $\pm$ 6
14	N-S-100	ナボイ	4,922 $\pm$ 220	< 124

<分析手順>

- ①試料を粉末にし、十分に混合した後、一部を計量容器（V = 280 cm³）に入れ、容器が完全に満たされるようにする。
- ②ポリマーの接着剤で容器を密閉する。
- ③密封された容器は、Ra-226 とその崩壊生成物の放射平衡に達するまで 1 ヶ月間保管され、高分解能ガンマスペクトロメーターで放射性核種の放射能を測定した。
 - ・ Ra-226 の放射能の計算には娘核種である Pb-214 (295keV) と Bi-214 (609keV) の γ 線^{※1}を使用
 - ・ Ra-228 の放射能の計算には娘核種である Ac-228 (911 keV) の γ 線^{※2}を使用

※1: Ra-226 は崩壊する際に 186keV の γ 線を放出するが、U-235 は崩壊する際に 185keV の γ 線を放出するため区別が付きにくい。そのため、Ra-226 の核種放射能分析はその娘核種である Pb-214 (295keV) と Bi-214 (609keV) を測定することで算出する。

※2: Ra-228 は主に β 崩壊し、直接 γ 線を放出しないため、娘核種である Ac-228 (911 keV) の γ 線で核種放射能分析を行う。

5. Ra-226 と Ac-225 の市場価格動向

5.1 Ac-225 の市場価格

- 1) 公益社団法人日本アイソトープ協会が 2022 年 1 月に提供したデータに拠れば、以下とされている。それ以降、更新されていないため、現在公表されている Ac-225（形状：Dried nitrate solid 乾燥硝酸塩固体）の価格は唯一このデータとなる。【参考文献・資料及び URL(6)参照】

Ac-225	
製品コード	225Ac-SJ9-1s
製品名	Actinium-225 nitrate solid
製造元メーカー	NIDC
形状内容	Dried nitrate solid
価格（税抜）	2022年1月ご案内参考価格 17MBq: 713,400円 18.5 MBq: 729,800円 37MBq: 934,800円
納期	お問合せください
液量指定	固体
Calibration dateについて	Calibration dateは製造日の翌日設定です。詳しくはお問合せください。
その他スペック	製造元カタログをご参照ください。 https://www.isotopes.gov/catalog 本製品の使用前にRI廃棄物の管理について こちら までお問合せください。

問い合わせ先

公益社団法人日本アイソトープ協会
医薬品・試薬課
TEL : 03-5395-8033

- 2) 現在、国内では Ac-225 製剤による PSMA（前立腺特異的膜抗原）治療は未承認だが、日本核医学会が承認（2024/11/6）した「アクチニウム-225 標識 PSMA-617 注射液を用いる核医学治療の治験適正使用マニュアル」【参考文献・資料及び URL(7)】の記載では前立腺がんの Ac-225 製剤需要予測として、以下とされている。

表 付録 D-1 アクチニウム-225 (^{225}Ac) 標識 PSMA-617 注射液とアクチニウム-225 (^{225}Ac) 標識 PSMA-R2 注射液の最大投与量及び投与間隔の比較

製剤	1 投与当たりの 予定最大投与量	予定最大 投与回数	予定 投与 間隔	対象患者数
アクチニウム-225 (^{225}Ac) 標識 PSMA-617 注射液	10 MBq	6 回	8 週間	転移性去勢抵抗性 前立腺がん 約 20,000[人/年]
アクチニウム-225 (^{225}Ac) 標識 PSMA-R2 注射液	20 MBq	6 回	6 週間	前立腺がん 約 100,000[人/年]

- ・ Ac-225 標識 PSMA-617 注射液では、転移性去勢抵抗性前立腺がん (mCRPC) 患者に対して 1 回の最大投与量 10MBq、8 週間の間隔で最大 6 回 (10MBq/回×6 回=60MBq)
 - ・ 標識 PSMA-R2 注射液では、前立腺がん患者に対して、1 回の最大投与量 20MBq、6 週間の間隔で最大 6 回 (20MBq/回×6 回=120MBq)
- 以上の投与が想定されている。

国立研究開発法人国立がん研究センター発表の「がん統計」1. 統計情報のまとめ【参考文献・資料及び URL(8)】によれば、国内における 2020 年の前立腺がんの罹患数は 87,756 人となっている。

転移性去勢抵抗性前立腺がん (mCRPC) に進行する割合の具体的なデータは不明だが、 α 線の特性を活かした治療は前立腺がん以外のがんにも応用が期待されている。例えば、2021 年 9 月 23 日の QST のプレスリリース (<https://www.qst.go.jp/site/press/20210923.htm>) では、既存の治療が効かない悪性中皮腫に対する新たな治療法として α 線標的アイソトープ治療薬の開発が発表されている。このことから、前立腺がんを含む腫瘍に対して、 α 線を利用した治療の潜在的な需要は高いと考えられる。

5.2 Ra-226 の市場価格

1) Ra-226 (欧州)

Ra-226 は Ac-225 の製造原料として使用されるため、需要と供給のバランスが価格に大きく影響する。したがって市場での具体的な価格情報は限られてしまう。

弊社がコンタクトを取っている欧州の企業(匿名)によると、2024 年 7 月時点での概算では、固体の塩化ラジウム (針やチューブの形状だけでなく、他の形状の可能性もあり) で、Ra-226 の価格は 1g あたり 500 万～1,000 万ユーロ (1€=160 円換算で約 8 億～16 億円)

と提示されている。ただし、この価格は形状や純度などの仕様によって変動するとのことである。同社によれば、Ac-225 の市場価格は 37MBq あたり 10,000 ユーロ（約 160 万円）以上とされており、Ra-226 1g を使用した Ac-225 生産プラントの年間生産量が 370～740GBq と仮定すると、年間売上は 1 億～2 億ユーロ（約 160 億～320 億円）に達する計算になる。

これらを踏まえると、Ra-226 1g の価格（約 8 億～16 億円）は、製造原材料コストの一部としては決して高くないとの見解を前記の欧州企業より得ているが、2025 年 2 月時点の情報では、原料である Ra-226 の精製・生産には高額なコストがかかり、購入希望者も少ないため、単価が高くなると考えられていた。しかし、現在の購入者の関心を踏まえると、明確な化学仕様と保証された履歴を持つ Ra-226 の参考価格は、1g あたり 200 万～400 万ユーロ（1€＝160 円換算で約 3.2 億円～6.4 億円）になる見込みとのことである。日本の需要量にも関心が寄せられている。

なお、これ以上の詳細な議論や商談を進めるには秘密保持契約（NDA）が必要となるため、議論は保留となっている。

2) Ra-226（米国）

米国エネルギー省国立同位体開発センターに対し、2025 年 2 月 25 日、Ra-226 を 1g～10g の範囲で供給可能か、またその価格について弊社から問い合わせをした。その結果、以下のような返信があり、連絡待ちの状態である。

「このたびはお問い合わせいただきありがとうございます。残念ながら、現在の在庫では追加の割り当てが許可されておらず、お見積りのリクエストは保留状態となっています。米国エネルギー省アイソトーププログラムでは、お客様のニーズに対応するため、Ra-226 の在庫拡充に取り組んでいます。リクエストは記録しており、追加情報が得られ次第、ご連絡いたします。」

以上、現時点において、調べた限りでは Ra-226 を製造又は所有している企業や組織は他に存在しないことから、Ra-226 について、これ以上の価格情報を得ることは難しい状況である。明確に調達の意思を示せる場合に限り、欧州企業との商業的な協議は可能であると考えられる。

6. Ra-226 に関するサプライチェーンにおける課題とリスク

6.1 資源採掘・精製プロセス

(1)技術面での課題とリスク

今回のサンプルから Ra-226 を抽出する方法としてはラジウムが含まれる形態によって以下 3 つのグループに分類され、それぞれ適した抽出方法が選択される。

1. 酸に完全に溶けるタイプ → 方法①を使用
2. 部分的に溶けるタイプ → 方法②を使用
3. ほぼ溶けないタイプ → 方法③を使用

方法①（酸可溶性ラジウム）

1. 酸処理

サンプルを濃塩酸又は硝酸（4～5M）で処理し、ラジウムとバリウムを溶液中に溶かす。

2. 不純物除去

水を加えて鉛を沈殿・除去する。その後、水酸化ナトリウムで中和し、鉄やマグネシウム、カルシウム、その他金属類を沈殿させる。

3. バリウム・ラジウムの沈殿

硫酸を加えてバリウムとラジウムを粗硫酸塩として沈殿させる。

4. バリウムとの分離

イオン交換クロマトグラフィーや分別結晶法（※）により、バリウムからラジウムを分離させる。

※分別結晶法とは、溶液中に複数の成分が含まれている場合、それぞれの溶解度の違いを利用して、個々の成分を分離・精製する方法

方法②（部分可溶性ラジウム）

1. 強硫酸処理

サンプルに強硫酸を加え、不溶性ラジウムも溶解させる。

2. 再沈殿

水を加えて、バリウムとラジウムを再び沈殿させる。

3. 精製

方法①と同様の手順で、バリウムからラジウムを分離する。

方法③（不溶性ラジウム）

1. アルカリ処理

濃アルカリ溶液を加え、ほとんどの金属を溶解させる。

2. 不純物除去

水を加えて、金属を水酸化物として沈殿させる。

3.バリウム・ラジウムの沈殿

硫酸を加えて、粗硫酸塩として沈殿させる。

4.精製

方法①と同様の手順で、バリウムからラジウムを分離する。

<まとめ>

ウラン残渣から Ra-226 を抽出する際には、まず Ra-226 含有量を測定し、十分な含有量があるかを判断する。次に、ラジウムの形態を確認し、最適な抽出方法を選択する。最終的に、イオン交換クロマトグラフィーや分別結晶法によってラジウムを分離する。

以上、ウズベキスタンでは現在、実験室レベルでの技術は確立されているものの、商業規模での抽出・精製を実施するには、設備投資や技術移転が不可欠である。そのため、ウズベキスタンのウラン鉱山残渣に存する Ra-226 を、日本における Ra-226 確保策の一つに位置付ける場合には、日本側もウズベキスタンに資金提供や技術協力を行い、共同研究開発の枠組みを構築することが求められる。これにより、安定した生産体制の確立や国際市場への供給力強化が可能となり、双方にとって持続的な利益をもたらすことが期待される。

(2)法規制及び技術に対する権利(使用権等)に関する課題とリスク

1) ウズベキスタンの法規制による課題・リスク等

独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の「ウズベキスタン鉱業データ集 (2022) 【参考文献・資料及び URL(9)】」によると、以下の通り、まとめられている。

世界の鉱業の趨勢 2022



ウズベキスタン

主要データ

国名(英名)	ウズベキスタン共和国 (Republic of Uzbekistan)
面積 (km ²)	447,400
海岸線延長 (km)	0
人口(百万人)	31.1
人口密度(人/km ²)	69.5
GDP (bUS\$)	69.24
一人当りGDP (US\$)	2,225.98
主要鉱産物：鉱石	銅、金、ウラン、タングステン
主要鉱産物：地金	銅、亜鉛、金、モリブデン、テルル、セレン
鉱業管轄官庁	国家地質鉱物資源委員会(内閣管轄) (Goscomgeology)
鉱業関連政府機関	国家鉱量委員会(内閣管轄)、対外経済関係・投資・貿易省、経済省
ロイヤルティ	なし
鉱業法	地下資源法(1994年9月23日制定、No. 2018-XII (1995年1月1日施行)、2021年10月12日最終改正施行)、 貴金属・宝石法 (No. ZRU-710 2021年8月23日制定、2021年11月25日施行)
外資法	投資・投資活動法(2019年12月25日制定、No. ZRU-598(2020年1月27日施行) 2023年1月1日最終改正施行)
環境規制法(環境影響調査制度、環境・排出基準の有無等)	環境保護法 (1992年12月9日制定、No.754-XII (1993年1月29日)、2021年10月12日最終改正施行) 廃棄物法(2002年4月5日制定、No.362-II (2002年5月10日)、2021年4月21日最終改正施行) (環境影響評価制度あり)
鉱業公社・国有企業	Navoiyuran社

より詳細な調査報告書「平成 20 年度戦略的資源確保事業〔投資環境調査〕（33）ウズベキスタン共和国の投資環境調査」【参考文献・資料及び URL(10)】には、地下資源法に基づく鉱業権のほか、鉱業税に関する記述がある。

鉱業税には 利益税、財産税、水資源利用税、地下資源利用税、付加価値税などが含まれるため、これらを正確に把握する必要がある。なお、Ra-226 も資源とみなされるため、同様の法規制が適用されると考えられる。

したがって、具体的に資源の分離等をナボイ地区で行うケースを想定した場合、

- ・資源所有者である国営ナボイウラン社と協議し、日本側関係者と同社間で進め方を仮合意する。
- ・管轄当局である「ウズベキスタン共和国国家地質鉱物資源委員会」に正式に協議を申し入れ、基本合意を得る。
- ・合併事業とする場合は、事業出資者が共同で協議に臨む。

これらの手続きを適切に進めることで、事業の円滑な実施が可能となり得る。

2)権利(使用権等)

①技術に対する権利の課題・リスク等

技術の有効性を検証する作業は、事前に選定し取得済みのサンプルを使用し、INP のラボ内で実施することになる。

許認可の必要性については、検証実験の内容によって異なるため、INP と関係者が整理した上で、INP が管轄省庁に確認するのが適切と考える。

②使用権（事業として取り組む場合）における権利の課題・リスク等

ウズベキスタン政府が国営ナボイウラン社を通じて保有する Ra-226 は、国家資源として位置付けられる。そのため、Ra-226 の分離・抽出を事業化する際は、国家地質・鉱物資源委員会が主幹組織として関与することが想定される。なお、原料となる残渣が大量であることから、原料輸入は現実的でなく、抽出・精製はウズベキスタン現地で行うことを前提としている。

本事業は、一般的な非鉄・金属資源の探鉱・生産とは異なり、高度な放射性物質の分離・抽出技術の研究・開発及び検証が必要となる。なお、弊社がヒアリングしたところでは、ロシアにはこの技術があるが、ウズベキスタン国内には商業技術が存在しない。そのため、日本企業による一連の技術開発と協力が求められる。

Ra-226 の賦存量を推定し、十分な資源量があると判断された場合、世界的に希少な物質であるため、第三国の企業や政府が権益を獲得しに動くことが予想されることから、事業推進のため、以下に掲げるような日本とウズベキスタンの間の協定等が必要と考える。

1. 分離・抽出技術等に関する必要な技術移転、人材育成と投資
2. 権益のシェアと適切な供給量の確保

さらに、ウズベキスタン側が Ac-225 の生産に関する協力を求めた場合、これを視野に入れた合意内容の拡大を検討することも、権益確保の観点から重要となると考える。

③Ra-226 分離・抽出プラントの設計・運営に関する考慮事項

事業として取り組む場合の Ra-226 分離・抽出プラントの設計・運営に関しては以下の点を考慮する必要があると考える。なお、Ra-226 を分離、抽出した後の廃棄物についての処理に関しては、事業化に関する政府との協議の中でウズベキスタンの法規制に沿った指示に従うことになる。

1. 立地の選定

資源 (Ra-226) の潜在量のほか、電力等インフラが整っている適切な立地を選ぶことが求められる。

2. 設計要件

プラントの設計は、ウズベキスタンが求める化学的・放射線学的な安全基準及び環境基準を満たす必要がある。

3. 操業体制の確立

運営組織を明確にし、操業体制を整備する。

4. 操業原単位※計算と経済計算

プラント設計の段階で、事業の出資関係者が操業時の原単位計算（運転に必要な資源やコストの計算）を行う必要がある。また、事業の経済性を評価するための経済計算も不可欠である。

これらを踏まえ、国営ナボイウラン社が事業主体となり、日本企業の参画も視野に入れた「実施可能性調査 (FS)」を実施することになると考える。

物流要件について

日本へ Ra-226 を輸送する際、以下の物流要件も考慮する必要がある。詳細な考察については、「6.2 物流とインフラ」の記述を参照。

- 輸送ルートと手段

日本までの最適な輸送経路と輸送手段の検討。

- 物流コスト

輸送費や関税などかかる費用を加味する。

※操業原単位とは、1963 年 3 月発行の鉱物学雑誌第 6 巻第 1・2 号に掲載された「講演 選鉱 技術の進歩について」【参考文献・資料及び URL(11)】に準じ、Ra-226 分離プ

ラントの運営に要するコストや工数として、以下の要素を考慮して算出することが考えられる。

- ・ Ra-226 の含有量（品位）
- ・ 廃岩の処理能力（トン/日）
- ・ 必要な人員数（人/プラント）
- ・ 所要電力（kWh/トン）
- ・ 必要な水量（m³/トン）
- ・ 消費する化学薬品の量（g/トン）
- ・ 一般管理費用・放射線管理費用 など

これらの要素は一定量の製品を生産するために必要なコストや工数の総量を示すものであり、処理能力が変われば、その他の要素も変動する。

そのため、実施可能性調査（FS）は、関係者及び管轄当局と慎重に協議しながら進める必要がある。

6.2 物流とインフラ

(1)想定されるロジスティックス（インフラ拠点と物流の組み合わせ）

ナボイ地区のウチュクドゥクに Ra-226 分離工場を設置した場合、同地区から首都タシケントまでの輸送は、長年運行されている国営ウズベキスタン鉄道を利用することが想定される。タシケント終着駅からタシケント空港までは陸上輸送となる見込みだが、INP で生産される放射性同位元素も同様に陸上輸送されているため、大きな問題は生じないと考えられる。

ウズベキスタン鉄道（Uzbek Railways）は、ロシア鉄道の中央アジア鉄道局管内の路線を基に、1994 年 11 月に創設された。2007 年時点での営業距離は約 3,645km、職員数は 5 万 4,700 人以上にのぼり、国内貨物輸送の約 90%を担っている。また、国際鉄道連合（UIC）と鉄道国際協力機構（OSJD）の一員であり、欧州委員会による CIS 諸国への技術支援プログラム（TACIS）の支援を受けている。【参考文献・資料及び URL(12)参照】

(2)想定されるロジスティックスに対する運用面、輸送技術面の課題とリスク

Ra-226 は大量の貨物として輸送する物質ではないため、コンテナを使った海上輸送の活用は現在想定していない。さらにロシアは欧米の経済制裁を受けているため、サンクトペテルブルク港からの船舶輸送は利用できないため、ロシア経由の海上輸送という選択肢は現実的ではなく相当難しいと予想される。従って少量の航空輸送が唯一の輸送手段と考える。

仮にサンクトペテルブルク港から欧州港に寄港する船舶の利用が可能になりことになったとしても、核分裂性物質（ウラン燃料・濃縮ウランなど）や放射性物質の取扱いに関して、日本の船舶会社は、スエズ運河や紅海周辺でのリスクもあり、日欧間のコンテナ船で、欧州の港で積み替えて日本に輸送するサービスは引き受けていない。日本海事新聞【参考文献・資料及び URL(13)】によれば、スエズ運河や紅海周辺ではイエメンの親イラン武装組織フーシ派による船舶攻撃が頻発していることや、海賊による略奪等のリスクが高いため、スエズ運河を通過するルートは現在まだ再開されていない。

(3)想定されるロジスティックスに対する法規制上の課題とリスク

1) 国際原子力機関（IAEA）「放射性物質安全輸送規則」

Ra-226 は国内外で共通の概念として放射性同位元素に分類され、各国の輸送に関する法規は、国際原子力機関（IAEA）が定めた「放射性物質安全輸送規則」に基づいて策定されている。

この規則は、放射性物質の輸送に伴う人や財産、環境への放射線影響を許容できるレベルに抑え、安全基準を国際的に統一することを目的として制定されたものである。適用範囲は、陸上・海上・航空すべての輸送経路に及び、具体的には以下の内容を含む。

- ・輸送容器の設計・製作・保守
- ・輸送物の準備・発送・取扱い・運送・保管・受取り

本規則に従い、放射性物質の安全な輸送が確保されている。【参考文献・資料及び URL(14)参照】

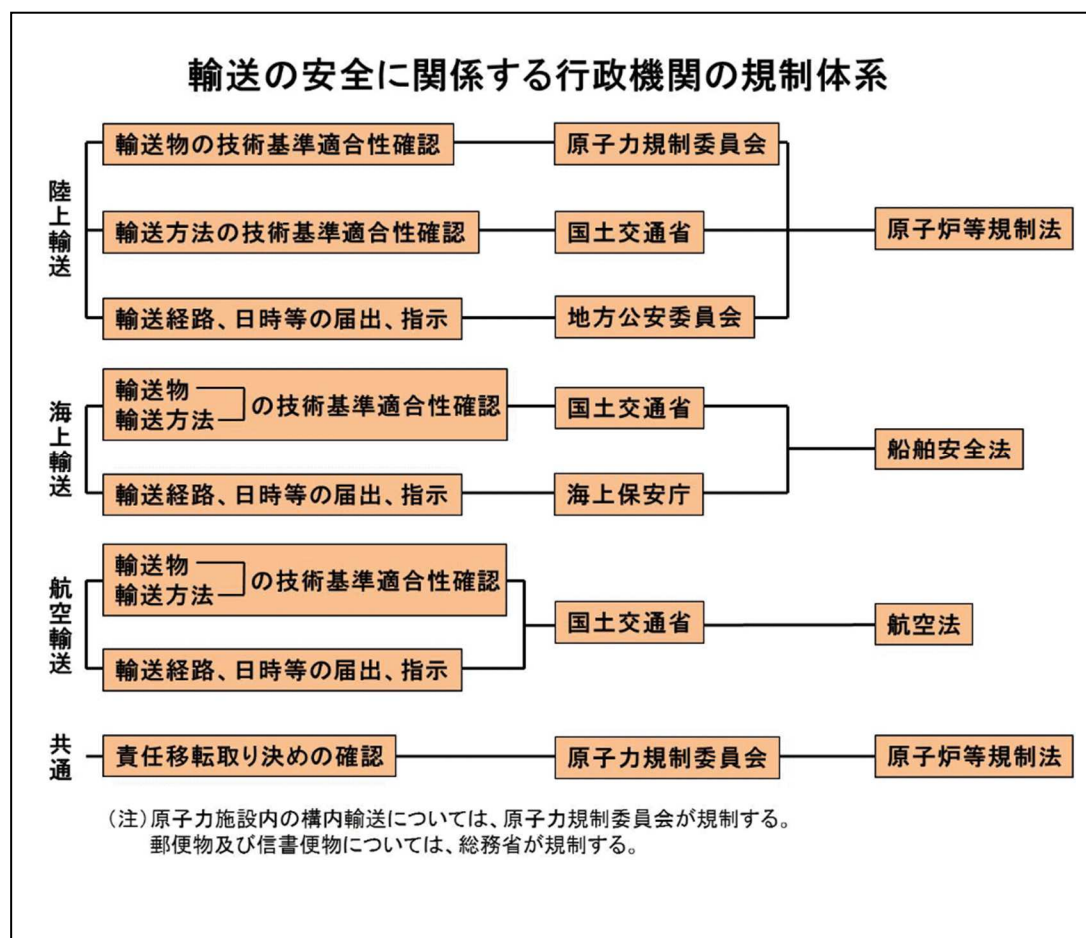
2)国内の規制概要

原子力規制委員会では以下の通り国内の規制の概要を公表している。【参考文献・資料及び URL(15)参照】

放射性物質（核燃料物質など）は国内輸送だけでなく国際輸送も行われるため、国際原子力機関（IAEA）は「放射性物質安全輸送規則」を策定し、加盟国に採用を勧告している。

日本では、この IAEA の規則を国内法に取り入れ、輸送に関する規制を実施している。核燃料物質などの輸送には陸上・海上・航空の 3 種類があり、また規制の対象も輸送物、輸送方法、経路、日時など多岐にわたるため、以下の図に示すとおり関係行政機関が規制を分担している。

そのうち、原子力規制委員会は陸上輸送における輸送物が技術基準に適合しているかを確認する。また、国土交通省が定める海外輸送及び陸上輸送の規則を、輸入者は遵守する必要がある。



(出典：原子力規制委員会 運搬に関する安全規制 概要)

・ウズベキスタンからの Ra-226 輸送について

ウズベキスタンから Ra-226 を輸送する際は、その化学形態、放射能量、輸送物の形態に応じて、国土交通省が定める諸規則（航空輸送：航空法・航空法施行規則及び陸上輸送：放射線障害防止法、放射性同位元素等車両運搬規則、放射線障害防止法施行規則）に従い手配を行う。日本への輸入及び国内輸送については、公益社団法人日本アイソトープ協会が策定した「アイソトープ輸送ガイド」【参考文献・資料及び URL(16)】に基づき、同協会の支援・指示を受けながら手続きを進めることになる。日本はこれまでも各種の放射性同位元素の輸入実績があるため、大きな問題は生じないとする。

現地（ウズベキスタン）での対応としては、出荷元の分離・抽出事業組織が、ウズベキスタンの放射性同位元素輸送・輸出法規を遵守し、国営ウズベキスタン航空及び輸送管轄当局と協議しながら手続きを進めることになる。

INP は自ら生産した放射性同位元素を国内外へ輸送してきた実績があるため、輸出や航空輸送の手続きに関しては大きな課題はないと考えられる。

・日本とウズベキスタンを結ぶ直行便について

日本とウズベキスタンの間には現在、ウズベキスタン航空の直行便が週 1 便運航（成田発：金曜、タシケント発：木曜）されている。なお、機種はボーイング 787-8 型機が使用されており、成田からの所要時間は 9 時間 5 分、タシケントからの所要時間は 7 時間 35 分である。ウズベキスタン文化観光局によると、2025 年 4 月 1 日より成田発が毎週火・金曜日、タシケント発が毎週月・木曜日と週 2 便に増便されることから、現時点で特段問題ないとする。【参考文献・資料及び URL(17)参照】

7. 本報告の要点整理と継続調査の必要性

1) 追加調査の必要性

今回の調査で、ヤンギオバードは投棄履歴が残っていないが、ナボイ地区（ウチュクドゥク町）は投棄履歴が残っていることが分かった。本調査結果ではナボイ地区の残渣中の Ra-226 含有量が相対的に高く、引き続き Ra-226 確保の観点からウズベキスタンの残渣サイトを調査する場合、ナボイ地区が有望なサイトであると言える。しかしながら、ウズベキスタン（主にナボイ地区）からの Ra-226 確保を具現化していくためには、以下の追加調査が必要と考えられる。

- ①ウラン残渣の Ra-226 含有量濃度及び分布の詳細評価：局所的な変動を把握し、処理・活用可能性を精査する。
- ②ウラン残渣から Ra-226 の分離・抽出に関して、ラボレベルでの実験を行い、方法論を再評価する。

2) 資源（Ra-226）確保のための関係強化

日本・ウズベキスタン両国の国益に資するべく、今後の調査や資源活用を見据えた詳細な評価と対策を検討すべきである。

- ①現地管理者（ウズベキスタン核物理研究所及び国営ナボイウラン社）との今後の取組に関する協議・検討、長期的な管理体制の維持・改善に向けた協力関係の構築。

3) 輸送インフラの詳細調査

輸送インフラの今後の活用に向けた具体的な課題を明確化する。

- ①輸送コストと物流ルート最適化
- ②規制・許認可の確認

4) 今後のアクション

- ①追加調査計画の策定（ラボレベルでの分離・抽出、次年度のサンプリング・分析スケジュール）
- ②現地関係者との協議（政府機関・管理組織・輸送業者との連携強化）
- ③事業化可能性の検討

参考文献・資料一覧

番号	参考文献・資料及び URL
(1)	キルギス・ミンクーシャ及びシェカフタルの修復工事が完了（世界ウラン協会 World Nuclear News 2022 年 3 月 28 日） https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Remediation-of-two-Kyrgyz-uranium-legacy-sites-com
(2)	キルギス・メイルー・スーの修復工事開始予定（世界ウラン協会 World Nuclear News 2023 年 5 月 19 日） https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Remediation-of-Kyrgyz-uranium-legacy-site-to-start
(3)	タジキスタン・イスティクロール近郊タボシャール低品位ウラン鉱石工場と鉱滓堆積場の埋め立て作業完了（世界ウラン協会 World Nuclear News 2023 年 10 月 4 日） https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Clean-up-of-Tajik-uranium-legacy-site-completed-ah
(4)	ウズベキスタンのウラン遺産で修復作業を開始（欧州復興開発銀行 News 2022 年 9 月 1 日） https://www.ebrd.com/news/2022/remediation-works-to-commence-at-uranium-legacy-sites-in-uzbekistan.html
(5)	ウズベキスタン・レガシー・ウラン遺跡の清掃作業を開始（世界ウラン協会 World Nuclear News 2023 年 9 月 13 日） https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Clean-up-work-begins-at-Uzbek-legacy-uranium-sites
(6)	公益社団法人日本アイソトープ協会の 2022 年 1 月 Ac-225 の価格 JRAM（注文サイト） に掲載のない製品 J-RAM
(7)	日本核医学会承認（2024/11/6）「アクチニウム-225 標識 PSMA-617 注射液を用いる核医学治療の治験適正使用マニュアル」 https://jsnm.org/wp_jsnm/wp-content/uploads/2024/11/225Ac-PSMA-617%E6%B2%BB%E9%A8%93%E9%81%A9%E6%AD%A3%E4%BD%BF%E7%94%A8%E3%83%9E%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%82%A2%E3%83%AB_241111.pdf
(8)	国立研究開発法人国立がん研究センター発表の「がん統計」1. 統計情報のまとめ（2020 年） https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/summary.html
(9)	独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）「ウズベキスタン鉱業データ集（2022）」 https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2023/02/trend2022_uz_data.pdf
(10)	JOGMEC「平成 20 年度戦略的資源確保事業〔投資環境調査〕（33）ウズベキスタン共和国の投資環境調査」 https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/old_uploads/reports/resources-report/2009-05/MRv39n1-06.pdf

(11)	操業原単位・第6巻第1・2号鉱物学雑誌 1963年3月「講演選鉱 技術の進歩について」 https://www.jstage.jst.go.jp/article/gkk1952/6/1-2/6_1-2_1/_pdf
(12)	ウズベキスタン鉄道 (Uzbek Railways) https://en.wikipedia.org/wiki/Uzbek_Railways
(13)	日本海事新聞 https://www.jmd.co.jp/
(14)	QST・SIRABE 「放射性物質安全輸送規則」 https://sirabe.nirs.qst.go.jp/sirabe/%E6%94%BE%E5%B0%84%E6%80%A7%E7%89%A9%E8%B3%AA%E5%AE%89%E5%85%A8%E8%BC%B8%E9%80%81%E8%A6%8F%E5%89%87
(15)	原子力規制委員会 「運搬に関する安全規制 概要」 https://www.nra.go.jp/activity/regulation/nuclearfuel/yusou/yusou0.html
(16)	国土交通省が定める諸規則（公益社団法人日本アイソトープ協会 アイソトープ輸送ガイド） https://www.jrias.or.jp/yusou/pdf/yusoguido_201404.pdf
(17)	ウズベキスタン文化観光局 https://visituzbekistan.jp/archives/2354/

添付 1. ウラン産出方法

1. 露天掘

- (1) 露天掘は、ストリップ採掘とも呼ばれ、表面の採掘物を除去することである。地表の土壌や不採算の岩石を除去して下にある鉱石を採取する。鉱石の品位は通常 0.5% 未満である。このタイプの採掘は、ウラン鉱石が地表近く（通常 400 フィート未満）にある場合にのみ可能である。廃石又は表土（鉱石本体から取り除かれた物質）は、通常、露天掘の近くに保管される。
- (2) 廃棄岩の山（尾鉱山）は巨大なものになることがある。大気にさらされると環境に有害となる。修復には多大な費用と時間を要し、地下水の修復には多大な費用を要する可能性がある。
- (3) 鉱山労働者の健康は、粉塵やラドンへの曝露によって損なわれる可能性がある。近隣のコミュニティは、粉塵、騒音、その他の問題（排水池の決壊）により、健康への悪影響を受ける可能性がある。

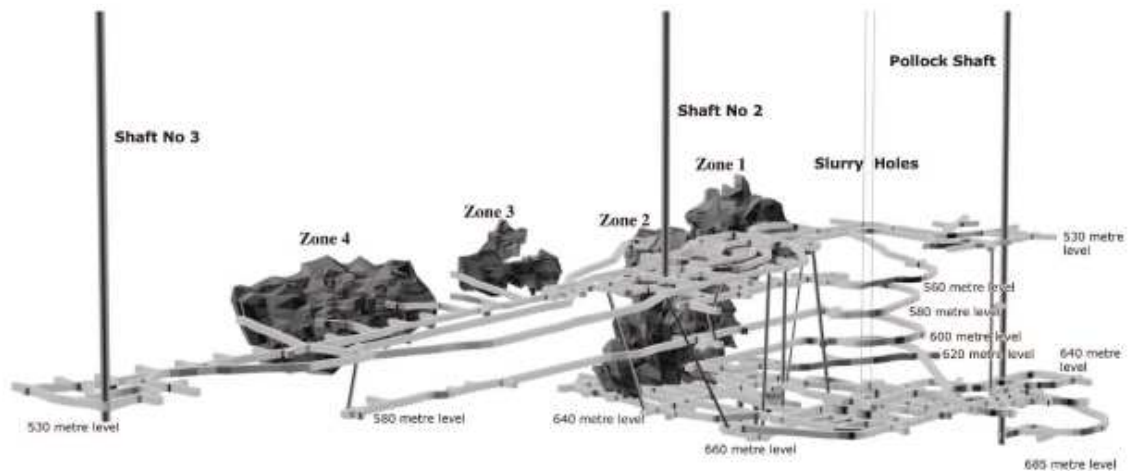
（カナダ サスカチュワン州ラビットレイク露天掘跡）



2. 坑内掘

- (1) 坑内地下採掘は、露天掘では採掘できないほど深い場所にある高濃度のウランを採掘するために使用される。鉱石を掘削し、爆破して破片を作り、それを地表まで運び、ウラン精鉱生産製錬所に運ばれる。
- (2) 廃棄岩石が少なくなり、採掘技術と安全監視の進歩により、以前の採掘に関連した放射線や健康の問題の多くは起こりにくくなる。但し、採掘コストが高く、地元の帯水層に重大な影響を及ぼす可能性があり、修復には多額の費用を要する可能性がある。なお、古い地下鉱山では、換気が不十分であったことから、ほこり、ラドン、ディーゼル煙が、鉱山労働者の健康に深刻な脅威となっていた。

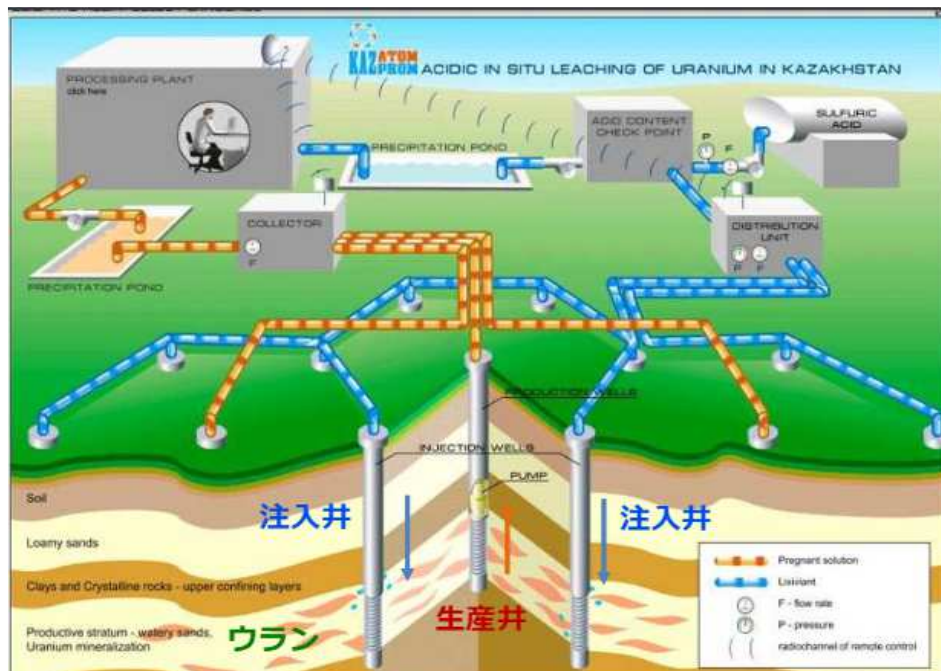
(カナダ マッカーサーリバー ウラン鉱山坑内採掘概略図)



3. 原位置浸出 (ISL：インシチュリーチング法)

- (1) 原位置浸出は、現在最も多くのウランを生産する方法になっている。カザフスタン・ウズベキスタンでは硫酸をパイプに硫酸を砂岩ウラン鉱床に注入して、その後 U^{235} を含む液を別のパイプで吸い上げて、地上のウラン精鉱 (U_3O_8) 生産プラントで U_3O_8 を生産している。
- (2) 本方法では、鉱石を使わず、天然ウランイオンを含浸溶液に選択的に注入することで、砂岩層浸透型ウラン鉱床を開発する方法である。従って、ウラン含有鉱石は、従来の方法（露天掘、坑内掘）とは異なり、地下に残る。

(カザフスタン カザトムプロム社 ISL 法)



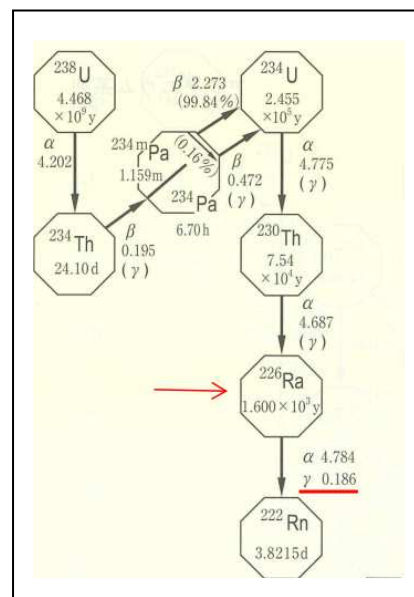
添付 2. Ra-226 含有量定量化分析

1. 固体サンプル分析

分析装置は Ge 半導体検出器（キャンベラ社）【参考資料 4. NO.1 参照】

- (1) Ra-226 には独自の 186 keV γ 線があり、この γ 線による γ 活性の測定によって、その含有量を判定することができる。しかし、U-235 には 185.6 keV γ 線があり、Ra-226 の γ 線と完全に重なっているため、これらの γ 線は分離することができない。また、U-235 の含有量は Ra-226 よりもはるかに高いため、サンプル中のラジウムを判定することはできない。
- (2) 従って、ラジウムの判定は主にその娘核種の γ 線によって行われる。Ra-226 が崩壊すると Rn-222 が形成され、次に Rn-222 は崩壊中に放射性核種の Bi-214 と Pb-214 を形成し、その γ 線に沿って Ra-226 が測定される。

(ウラン系列壊変)



- (3) 固体サンプルは均質な状態になるまで粉碎後、プラスチック容器に密閉し、Ra-226 とその娘核種 Rn-222 及び Rn-222 の娘核種 Bi-214 と Pb-214 の間の放射平衡が形成されるまで 3 週間放置する。
- (4) 測定が行われる検出器は、Ra-226 の放射能(標準サンプル)の容積測定(volumetric measure)を利用して、効率が校正される。較正中、Bi-214 と Pb-214 の γ 線 (242、295、352、609、及び 1760 keV) を Ra-226 として設定し、それらをソフトウェアに入

力する。次に、 γ スペクトルを測定すると、プログラムはこれらの γ 線を Ra-226 として受け入れ、自動的にカウントして、Bq/kg 単位の Ra-226 として結果を導出される。

- (5)この方法は、分析中にサンプルと Ra-226 が失われることがないため、より正確であるが、分析の誤差は、測定の誤差によってのみ決まる。なお、この方法の短所は、3 週間待つ必要があることである。

2. 液体サンプル分析

分析装置は Ge 半導体検出器（キャンベラ社）及び低バックグラウンド α/β カウンター（DOZA SPC 社）【参考資料 4. NO.1, NO.3 参照】

- (1) 液体サンプルは水分を蒸発させた後の固体沈殿物を固体サンプル同様、Ge 半導体検出器で Ra-226 含有量を測定する。
- (2)液体サンプルは固体サンプルに比べて極めて Ra-226 含有量が少ないため、低バックグラウンド α/β カウンターでも測定する。