

2-1 世界のウラン資源とわが国のウラン調達

1. はじめに

ウラン（元素記号はU）は、周期表の92番目に位置する安定同位体を持たない元素である。地球表面から16kmの深さまでの元素の存在比を重量百分率で示すクラーク数は $4 \times 10^{-4}\%$ （元素の存在順位では53位）であり、 $10^{-6} \sim 10^{-7}\%$ の白金族元素と比較してもはるかに多く存在する。ウランは、微量であれば自然界において普遍的に分布しており、堆積岩中に $2 \times 10^{-4}\%$ 、花崗岩中に $4 \times 10^{-4}\%$ 、また海水中にも $3.3 \times 10^{-7}\%$ 程度が含まれる。しかし、これらのウランは品位が低過ぎるため、直ちに有効利用することは困難であり、生産コストとの兼ね合いにより資源としての価値が決まる。一般的には、0.1%以上の品位のウラン鉱床が商業規模の処理対象となっているが、これよりも低い品位の鉱床のウランを採掘している鉱山も存在する。他方、カナダのマッカーサーリバー（McArthur River）鉱山のように、15%以上の品位のウラン鉱石を産出する鉱山もある。

ウラン資源を開発するには、より高い品位のウラン鉱床を確保すべく、その調査を行う必要がある（第1表参照）。まず文献調査や情報収集により、ウランが賦存している可能性のあるウラン徴候地や鉱床を探索し、調査地域を選定する。選定した地域について、人工衛星からの画像の解析、軽飛行機や自動車等による放射線量率調査、地化学探査、ラドン測定等を行って対象とする地域を狭める。次に、地質構造調査や詳細な放射線量率調査を実施し、その結果に従って地下構造の概要を把握するための試錐を行う。ここまでの調査を地質鉱床概査という。

地質鉱床概査に引き続き、地質鉱床の精査を行う。地質鉱床精査では、概査で発見したウラン徴候地の鉱床の概要や規模を把握するために、鉱床精密探鉱、物理探鉱、試錐探鉱、鉱物試験を行い、次の段階の企業化探鉱の実施の可否を決定する。

企業化探鉱では、開発する価値がある鉱床について、試錐探鉱、坑道探鉱、地下水調査、及び鉱石処理試験を通して、埋蔵鉱量、品位、賦存深度、形態、採掘条件等の鉱床の実態を把握し、得られた結果をフィージビリティスタディ（企業化調査）のデータとして用いる。

フィージビリティスタディでは、鉱量計算や探鉱成果の評価に基づき、場合によってはパイロットプラントにより採鉱・製錬試験を実施して、鉱山開発、創業計画の立案、及びディスカウントキャッシュフロー（DCF）法等による経済評価を行い開発の可否を決める。

以上の過程を経て取得したウラン鉱床に関する情報、すなわち鉱量、地表からの深さ、賦存状態、地層の硬軟等のデータをもとにウラン資源の開発を進めるが、技術

的な側面だけでなく、社会的観点、経済的観点、政治的観点等からも資源としての成立性を検討する必要がある。有望と認められた鉱床の開発が世界各地で行われている。

第1表 ウラン鉱山開発の進め方

調査段階	内容	方法
1	既知情報の調査 探査地域を選定するための調査	・地質図による検討 ・文献検索 ・情報調査 ・現地予察
2	地質鉱床概査 ウランが賦存する可能性の高い地質構造を発見するための調査	・放射線強度調査 ・地震探査 ・構造試錐 ・地化学探査 ・ラドン測定
3	地質鉱床精査 地質鉱床概査で発見した鉱床の規模や概要を把握するための調査	・鉱床精密調査 ・物理探鉱 ・試錐探鉱 ・鉱物試験
4	企業化探鉱 埋蔵鉱量、品位、賦存深度、形態、採掘条件等の鉱床の実態を把握するための調査	・試錐探鉱 ・坑道探鉱 ・地下水調査 ・鉱石処理試験
5	フィージビリティスタディ 鉱量計算、探鉱成果の評価、パイロットプラント規模の探鉱・製錬試験等を通して、鉱山開発、創業計画の立案、DCF分析などにより経済性評価を行い、商業規模開発の可否を決定	・鉱量計算 ・鉱山評価

2. 世界の主要なウラン資源

2.1 ウラン資源の分類

第2表に示すように、原子炉の燃料となるウランの供給源は、大きく二つに分類される。一つは一次供給源と呼ばれ、自然界に存在する天然ウランに由来する。一次供給源はさらに、在来型資源と非在来型資源に区分できる。在来型資源は、ウラン鉱山からの生産物や金鉱山からの副産物であり、非在来型資源は、品位が非常に低いウラン資源や、ウランが副産物として回収可能ではあるがウランが占める経済的重要性の低い資源を指し、海成リン酸塩鉱床の副産物や、広義には海水中のウランを含む。また、二次供給源とは、ウラン鉱山で直接生産したのではなく、民事用及び軍事用として備蓄や在庫のある天然ウランまたは濃縮ウラン、使用済燃料の再処理で回収したウランとプルトニウム、余剰の軍用プルトニウムから生産した核燃料、及び劣化ウランの再濃縮によって生産したウランを指す。

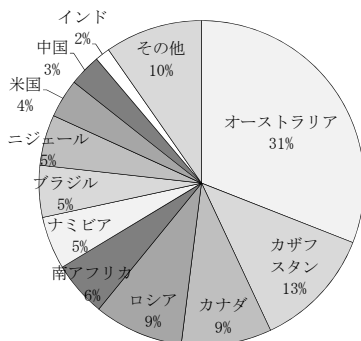
現在、一次供給源としてのウランの生産量は、世界のウラン必要量を大きく下回っている。2008年において、世界ウラン生産量合計が43,880tUであるに対し、核燃料として必要とされたウラン量は59,065tUであり、不足分は二次供給源によって賄われている。

第2表 供給源から見た核燃料の分類

供給源名称	供給源の定義	資源の区分	種類
一次供給源	自然界に存在する天然ウラン	在来型資源	<ul style="list-style-type: none"> ウラン鉱山の生産物 金属鉱山の共産物 金鉱山の副産物
		非在来型資源	<ul style="list-style-type: none"> 海成リン酸塩鉱床のウラン 火成炭酸塩岩中のウラン 黒色頁岩中のウラン 海水中のウラン
二次供給源	ウラン鉱山で直接生産したものではなく、民事と軍事の両方を出所とする天然ウランまたは濃縮ウランの備蓄や在庫、使用済燃料の再処理で生産した核燃料や、余剰の軍用プルトニウムから生産した核燃料、及び劣化ウランの再濃縮によって生産したウラン	ウラン系	<ul style="list-style-type: none"> 民事と軍事の両方を出所とする天然ウランまたは濃縮ウランの備蓄や在庫 使用済燃料の再処理で回収したウラン 劣化ウランの再濃縮によって生産したウラン
		プルトニウム系	<ul style="list-style-type: none"> 使用済燃料の再処理で回収したプルトニウム 余剰の軍用プルトニウムから生産した核燃料

2.2 世界のウラン分布

前述したように、ウランは自然界に広く分布するため、ウラン成分が濃集してできたウラン鉱床も世界各地に散在している。わが国で採掘の対象となったのは、岡山県と鳥取県の県境に位置する人形峠鉱山と土岐市の東濃鉱山の二ヶ所の鉱床であった。しかし両鉱山とも採算がとれる採掘可能なウラン埋蔵量を有していなかったため、商業的な開発は行われなかった。このように、たとえウラン鉱床が発見されても、稼働して採算がとれなければ資源としての価値は低い。ウラン鉱山が保有する資源量とは、ある価格区分における回収可能なウラン量のことであり、ウラン資源の場合、しばしば、40米ドル/kgU未満、80米ドル/kgU未満、130米ドル/kgU未満、及び260米ドル/kgU未満の四つにコスト区分されている。仮にウランの回収費用を130米ドル/kgU未満に設定すると、世界のウラン既知資源分布は第1図のようになる。同図は、主要ウラン生産国あるいは原子力発電容量を増加させる大規模計画を有している11カ国を対象として作成されたもので、これら11カ国で世界のウラン既知資源の約90%を占め、残る10%は、その他の世界22カ国に分布している。



出典 OECD-NEA編, Uranium 2009: Resources, Production and Demand
(130米ドル/kgU未満の既知資源, 2009年1月1日現在)

第1図 ウラン既知資源の分布状態

第1図のウラン既知資源のうちオーストラリアの対世界割合が31%で最も高く、次いでカザフスタンが13%、カナダとロシアがそれぞれ9%で上位資源国である。一方、今後、大幅な需要拡大が予想される中国やインドのウラン既知資源の対世界割合は2~3%程度である。

2.3 世界のウラン鉱床

第1図に示したとおり、ウランは世界各地で産出されるが、地域によって鉱床のタイプが異なる。IAEAは、ウラン鉱床を13種類に分類している。例えば、オーストラリアの代表的な鉱床として、赤鉄鉱質角礫岩複合型鉱床(Olympic Dam鉱床)や不整合関連型鉱床(Ranger鉱床等)がある。赤鉄鉱・角礫岩複合型鉱床は、原生代に形成された花崗岩体中の大規模な赤鉄鉱質火山性角礫岩体中にウランが貴金属や希土類元素を伴って存在するもので、Olympic Dam鉱床が唯一、経済的にウランを産出している。また、不整合型関連鉱床とは、前期から中期原生代の堆積盆に形成された非変成赤色砂岩層と前期原生代の変成堆積岩との不整合付近に、高品位で大規模なウランを産出することを特徴とする鉱床である。Ranger鉱床の場合、不整合面より下部の変成堆積岩基盤岩中に層序や構造に規制されて産しており、基盤型鉱床と呼ばれる。このタイプは、規模は大きいが高品位がやや低いことを特徴とする。

カザフスタンの代表的なタイプとして、Inkay鉱床やMynkuduk鉱床等にみられるロールフロント型の砂岩型鉱床がある。同タイプの鉱床は、河川成砂岩層中に舌状に発達する酸化変質帯の先端部分に形成され、鉱体の断面は還元帯側に膨らむ三日月状の形状を示す。母岩は透水性のよい砂岩であるため、採鉱にはインシチュリーチング法(2-2節のウラン採鉱の項参照)が適用される。このほかカザフスタンの鉱床として、有機性のリン酸塩からなるリン灰土型鉱床であるMelovoe鉱床等がある。

カナダにみられる鉱床として不整合関連型鉱床がある。不整合関連型鉱床は、特徴の違いによってさらに分類されており、今後の開発が計画されているSissons鉱床やKiggavik鉱床は先に述べた基盤型の鉱床である。一方、現在稼働中のMcAthur River鉱床やRabbit Lake鉱床等は不整合接触型に属する。なお不整合接触型とは、不整合面直下から下部にかけて変成堆積岩中の構造に規制されて産する鉱床である。

ロシアのウランの大部分は、Streltsovskoe鉱床、Antei鉱床、Oktyabrskoe鉱床等の酸性火山岩・カルデラ関連型鉱床から産出される。酸性火山岩・カルデラ関連型とは、苦鉄質からケイ長質の火山岩及び挟在する砕屑性堆積物によって埋められた火山カルデラ内及び傍傍に産する鉱床を指す。鉱化作用を支配するのは主に構造規制であり、これが複数の層準の火山岩または体積ユニットに存在し、破碎された花崗岩や変成岩の基盤へと延長している。

ほかに採掘が行われているロシアのウラン鉱床として、Dalmatovskoe鉱床、及びKhokhlovskoe鉱床がある。これらは砂岩型鉱床であるが、さらに分類すると基底チャンネル型に属する。基底チャンネル型とは、古河川系河底の基底部を埋める透水性のよい堆積物中に植物片を伴って産する鉱床を指す。わが国の人形峠鉱山や東濃鉱山の鉱床も基底チャンネル型である。

以上、世界の大規模なウラン鉱床と鉱床のタイプについて述べたが、他にもさまざまな鉱床タイプがある。例えば、鉱脈型鉱床はピッチブレンド(閃ウラン鉱)を産出することで有名であり、この鉱床はウラン鉱物が地殻の断裂を充填することにより産する。そのほか、石英中礫岩型鉱床(Vaal Reef鉱床、南アフリカ)、貫入岩型鉱床(SJ、SK、SH鉱床、ナミビア)、交代岩型鉱床(Michurinskoye Central鉱床、ウクライナ)、表成型鉱床(Yeelirrie鉱床、オーストラリア)、ブレッチャパイプ型鉱床(Arizona Strip鉱床、米国)、その他、変成岩型鉱床(Forstau鉱床、オーストリア)、石灰岩型鉱床(Todilto石灰岩のウラン鉱化作用、米国)、ウラン石炭型鉱床(Serres堆積盆地、ギリシア)、ウランに富む岩石(ペグマタイトGreenbushes、オーストラリア)、黒色頁岩(ミョウバン頁岩、スウェーデン及びエストニア)、チャタヌーガ頁岩(米国等)等が分類上の鉱床のタイプである。世界の主なウラン鉱床の位置を第2図にまとめる。また第3図には、2009年時点において、生産コストが130米ドル/kgU未満の鉱床の可採ウランの割合を示す。なお、同条件における可採ウランの総量は539万4千tUである。この内、最も高い割合の鉱床タ

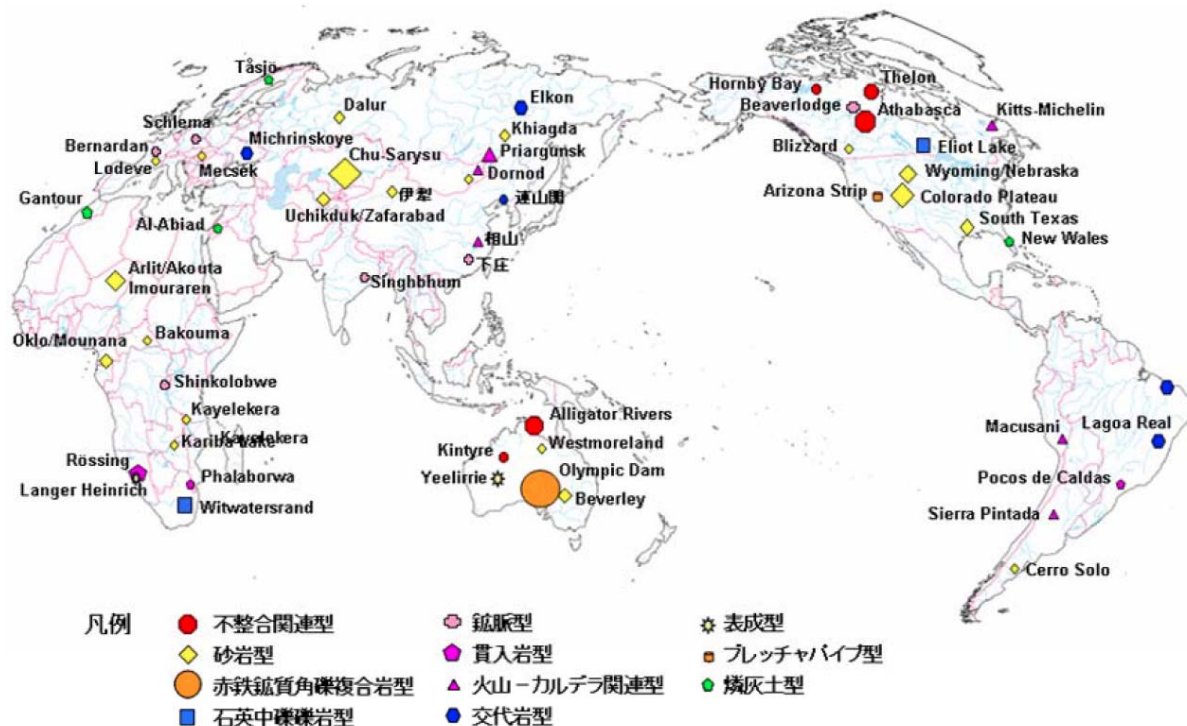
イプは、米国、カザフスタン、ニジェール等に分布する砂岩型であり、オーストラリアに存在する赤鉄鉱質角礫複合岩型やカナダやオーストラリアにみられる不整合関連型がこれに続く。これらの三タイプの鉱床の可採ウラン割合の合計は、全体の61%を占める。

3. ウランの生産

第1図で示すように、世界で最も多くウラン既知資源を保有するのはオーストラリアであり、2009年における既知資源量は、生産コストを130米ドル/kgU未満とした場合、167万3千tUである。次いでカザフスタン、カナダ、ロシア、南アフリカが資源としてのウランを保有しており、世界のウラン需要の増加に伴いその開発が進められている。

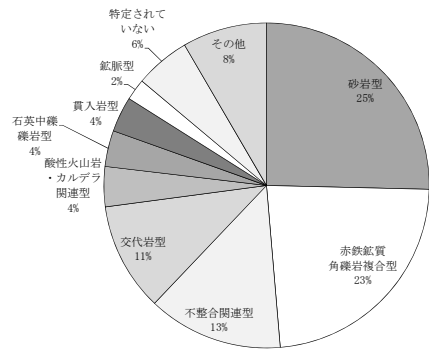
第4図に各国のウラン生産量の推移を示す。2000年における世界の総ウラン生産量は35,186tUであったのに対し、2011年には53,495tUと約1.5倍増加している。ウラン生産国の内、特にカザフスタンがウランの増産を図っている。2000年には1,740tUであった同国の生産量は、これまで世界一の生産量を誇ってきたカナダ(10,173tU)を2009年に抜き、以降、世界第1位のウラン生産国となった。将来的には、さらなる生産量の増大を計画している。

世界最大のウラン既知資源国であるオーストラリアのウラン生産量は、2000年から2011年までの平均で約7,700tUであり世界第3位である。2010年より減産に転じており、2011年の生産量は5,983tUであった。



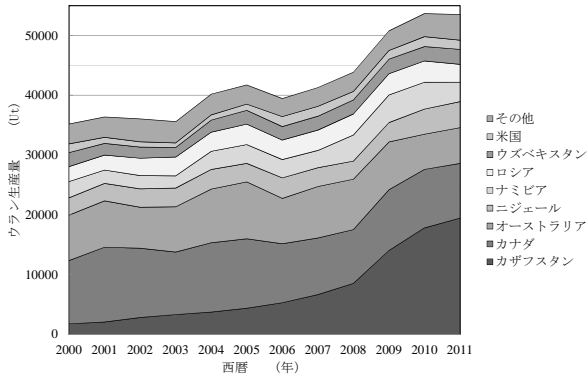
資料提供 石油天然ガス・金属鉱物資源機構：ウラン探査チーム

第2図 世界の主なウラン鉱床位置図



出典 OECD-NEA編, Uranium 2009:Resources, Production and Demand (US\$130未満, 既知資源, 2009年現在)

第3図 鉱床タイプで分類した可採ウランの割合

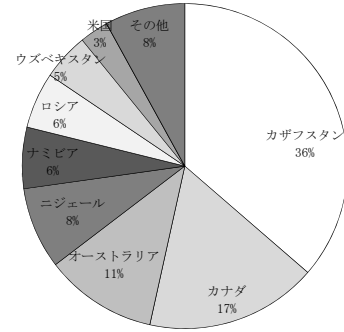


出典 WNA編 Uranium production figures,2000-2010 及び World Uranium Mining

第4図 各国のウラン生産量の推移

第5図は2011年における各国のウラン生産比率を示す。カザフスタンが世界のウラン生産割合の1/3を、また上位の8カ国で世界のウラン生産割合の90%以上を賅っている。

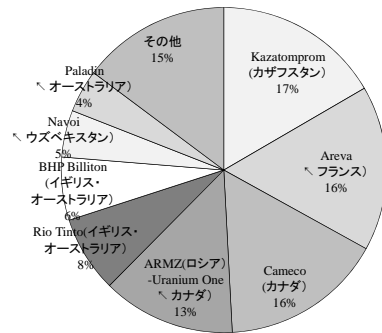
第6図に、一次供給源としてウランを生産している各国の企業の、2011年における生産比率を示す。2011年に世界で生産されたウラン(53,495tU)の内、その85%が8社の企業によって生産されている。8社のうち、生産量第2位のフランスAREVA社は、自国での開発は行っておらず、カナダ、カザフスタン、ナミビア、ニジェール、南アフリカ等の他国において生産を進めている。同様に、イギリスも自国におけるウランの一次生産は行っていない。このように、主たる用途が原子力に限定されており、比較的豊富に存在するウラン資源については、石油のように国有化する動きはほとんど見られず、前記の8社以外にも、我が国を含め国籍が異なる多くの企業が参加することにより、国際的な開発がなされている。第3表に日本企業が関与している海外のウラン資源開発状況をまとめる。この他にも海外企業と共にオーストラリア、カナダ、ナミビア、米国等において事業化調査を行っている。



出典 WNA編 Uranium production figures,2000-2010 及び World Uranium Mining

第5図 各国のウラン生産比率

前述したようなウラン資源の開発活動により、2010年3月現在において我が国は、オーストラリア、カナダ等との長期契約、短期契約、及び/又は製品購入契約分として約342,287t、また第3表に示す各国からの開発輸入分として約76,023t、合計約418,310tのU₃O₈の購入契約を締結している。



出典 WNA編 World Uranium Mining

第6図 企業別ウラン生産比率

4. ウランの需給

4.1 ウランの需要量

国別の年間ウラン必要量について、主要16ヶ国の1996年と2006年の実績、及び2012年の予測データを第7図にまとめる。世界の年間必要量は、1996年に60,488tU、2006年に66,529tU、また2012年の予想量は67,990tUである。1996年からの16年間で、約7,500tUも年間必要量が增大しているが、前述したようにウランの一次生産量はこの需要を下回っているため、不足分は二次供給源で補っている。ここで特に大幅に伸びているのは中国で、16年間に6,250tUも年間使用量が増えている。同国には、現在、運転中の原子炉が11基、建設中の原子炉が21基あることに鑑みると、今後さらに大量のウランが必要になる。ウラン既知資源量の少ない中国は、ウラン調達のためカザフスタン、オーストラリア、カナダ等において鉱山開発やパートナーシップの強化に努めている。中国以外では、

第3表 我が国のウラン資源開発状況

対象国	地域	開始年度	参加企業	実施内容	段階
オーストラリア	Kintyre 鉱区	2008/07	三菱デベロップメント社 (三菱商事の子会社)	カナダのCameco社と合弁事業体を組織し、RioTinto社から西オーストラリア州におけるKintyre Uranium Projectを買収。出資比率は、三菱デベロップメント30%、Cameco70%。	開発中
	Lake Maitoland 鉱区	2009/06	日豪ウラン資源開発 (関西電力、九州電力、四国電力、伊藤忠商事)	カナダのMega Uraniumがオーストラリアで進めているウラン鉱山開発プロジェクトの事業化調査に参画。主たるプロジェクトに参画することになった場合、日豪ウラン資源開発は、ウラン権益の30%を取得予定。なお、日豪ウラン資源開発の出資比率は関西電力50%、九州電力25%、四国電力15%伊藤忠商事10%。	事業化調査
カナダ	Midwest 鉱山	1991	OUCD(Canada) (海外ウラン資源開発の子会社)	フランスのAreva社、カナダのDenison Mines社、及びOUCD(Canada)による共同開発で、現在、許可待ち中。出資比率は、AREVA69.16%、Denison Mines25.1%、OUCD 5.67%。	開発中
	McClellan Lake 鉱山	1993	OUCD(Canada) (海外ウラン資源開発の子会社)	フランスのAreva社、カナダのDenison Mines社、及びOUCD(Canada)による共同開発で、1997年7月より生産開始。出資比率は、Areva70%、Denison Mines 22.5%、OUCD7.5%。	生産中
	Cigar Lake 鉱山	1997	出光興産 東京電力	カナダのCameco社、フランスのAreva社、出光興産、及び東京電力による共同開発。出資比率は、Cameco50.025%、Areva37.1%、出光興産7.875%、東京電力5%。Cigar Lake鉱床は世界屈指の高品位鉱床であり、2007年末からの生産が予定されていたが、諸事情により、2013年中頃から運開予定。	開発中
	West MacArthur 鉱区	2010/02	MC Resources Canada (三菱商事の子会社)	カナダのCanalaska社とのオプション契約に基づき、West MacArthur ウラン資源探鉱プロジェクトの50%の権益を取得。以降、Canalaska Uranium50%、MC Resources Canada50%の合弁事業体を通じて探鉱活動を継続。	探査中
カザフスタン	West Myunkduk 鉱区	2006/01	住友商事 関西電力	2010年から1000 t U/yの商業生産を目標としてカザフスタンの国営原子力会社であるKazatomprom (KAP)とともにAPPAK LLPを設立。出資比率は、住友商事25%、関西電力10%、KAP65%で全量を日本が引き取る。	生産中
	Kharasan-1 鉱区	2007	Energy Asia (東京電力、中部電力、東北電力、九州電力、丸紅、東芝、KAP)	2014年から3000 t U/yの商業生産を目標としてEnergy Asia がKyzylkum LLPに出資し、プロジェクト権益を間接保有。出資比率は、Energy Asia 40%、Uranium One 20%、KAP30%でKharasan-2鉱区の生産量との合計2000 t Uを日本が引き取る。	生産中
	Kharasan-2 鉱区	2007	Energy Asia	2010年から2000 t U/yの商業生産を目標としてEnergy Asia がBaiken-U LLPに出資し、プロジェクト権益を間接保有。出資比率は、Energy Asia 95%、KAP5%でKharasan-1 鉱区の生産量との合計2000 t Uを日本が引き取る。	生産中
ニジェール	Akouta 鉱山	1974	OURD (海外ウラン資源開発)	フランスのAreva NC社、ニジェールのSOPaMin社、スペインのEnusa社、及びOURD社の合弁でCOMINAK社を設立し、1978年より生産を行っている。各社の出資比率は、Areva NC34%、SOPaMin31%、Enusa10%、OURD25%。	生産中

調査日：2012年6月

韓国やロシアのウラン必要量が大きく増加している。また、小規模ながらインドのウラン需要も急増している。現在、インドには運転可能な原子炉が20基、建設中の原子炉が7基、また計画段階の原子炉が56基あることから、将来的には大量のウランを消費するようになる。インドは、世界のトリウム量の20%以上を保有しているもののウランの既知資源量は少ないため、トリウムサイクルが確立されるまでは大口のウラン輸入国となる可能性が大きい。

4.2 ウランの価格

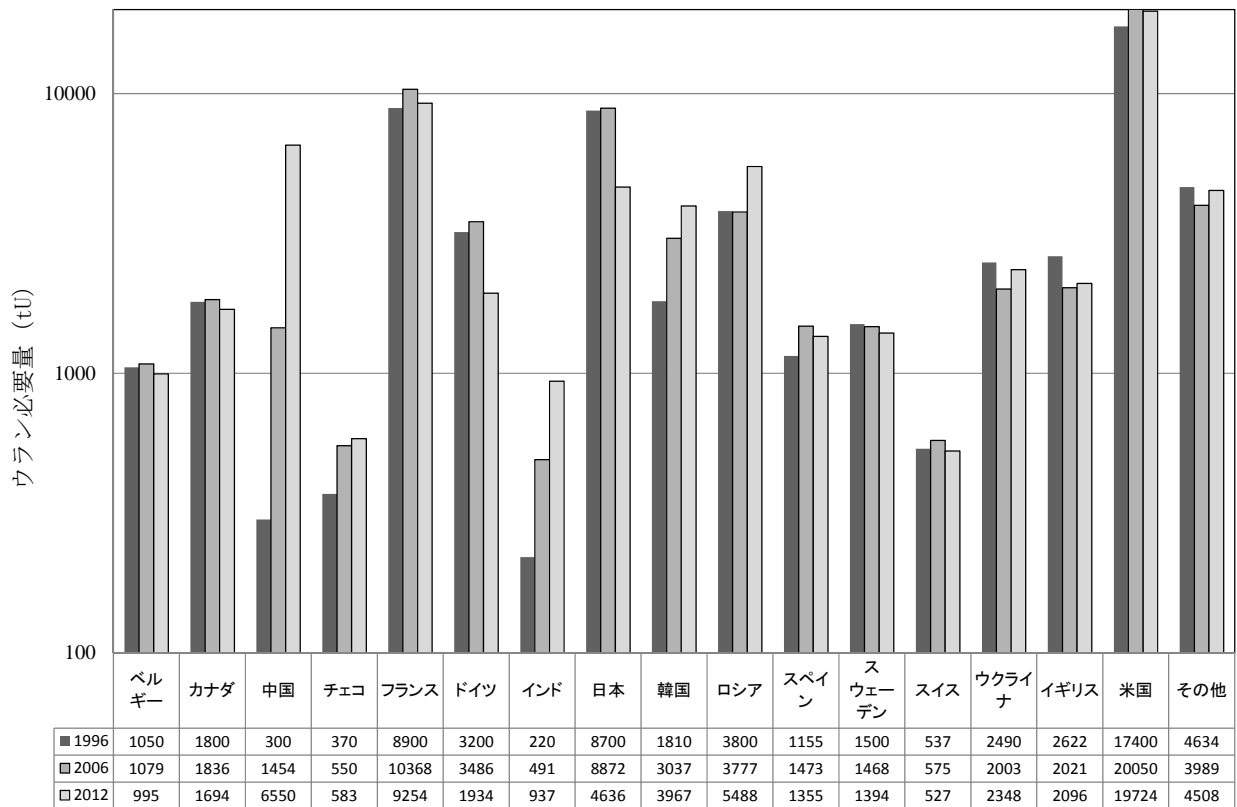
ウランの価格は、1973年の石油危機のときに約40米ドル/lbU₃O₈まで高騰した。しかし1979年に発生したスリーマイル島原子力発電所の事故の影響で、1980年のスポット価格は32米ドル/lbU₃O₈台になり、その後さらに下落した。以降2004年頃まで、20米ドル/lbU₃O₈以下の安値で推移したためウラン市場は活況をなくし、経済的に採算性が見込める地域を除いて、ウラン資源に対する積極的な投資活動は行われなくなった。しかし近年、特にアジア地域におけるウランの需要が高まり、二次供給ウランまでも大量に消費するようになったため、二次供給ウランの在庫にも限界が見えてきている。このようなウラン需給構造の脆弱性に加え、MacArthur River 鉱山（2003年4月）やCigar Lake 鉱山（2006年4月及び10月）における出

水事故等の要因が重なり、ウランのスポット価格は投機資金の流入により、2007年6月に約136米ドル/lbU₃O₈まで急上昇した。異常な高値は短期間で沈静化した。2012年には50~55米ドル/lbU₃O₈の高価格で推移している（第8図参照）。一般的に大部分のウランは長期契約により取引されるが、前述のように投機の対象となり得るので留意する必要がある。

2011年に生産されたウラン（53,495tU）の平均生産価格はおよそ26米ドル/lbU₃O₈であり、この価格に利益を付加すれば採算がとれる。しかし現実には年間60,000tU以上を必要としており、60,000tU/年における平均生産価格は約30米ドル/lbU₃O₈となる。すなわち、増産すれば生産価格が上昇すること、二次供給源のウランが著しく減少していること、また将来的にウラン需要が増大する見通しであることを考えると、今後、ウラン価格は高値を維持する可能性が大きい。

4.3 今後の展開

BP社の世界エネルギー統計レビューによると、2011年における化石燃料の可採年数は、石油が46.2年、天然ガスが58.6年、及び石炭が118年と算出されている。一方、ウランの可採年数は、Uranium2009のデータを用いコスト区分を260米ドル/kgU未満として計算すると93年にな

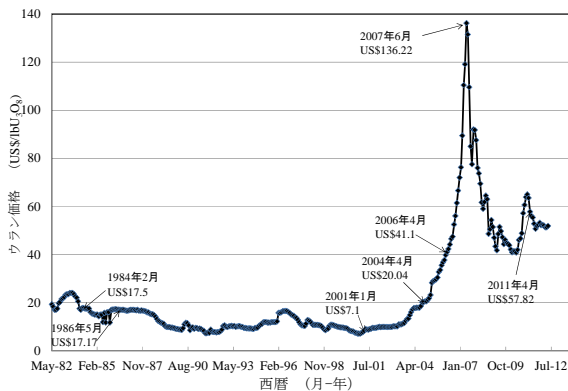


出典 OECD-NEA編, Uranium 1997:Resources,Production and Demand, WNA編 World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements

第7図 各国におけるウラン必要量の推移

る。いずれのエネルギー資源を用いるにしろ、ほぼ100年の間にこれらの資源は枯渇する。したがって、温室効果ガスの削減も踏まえ、効果的かつ合理的にエネルギー資源を消費していく必要がある。ウランの場合、燃焼後に再処理して回収したウランやプルトニウムをプルサーマルに利用することにより、ウラン資源を1.3倍ほど延命でき、また将来、高速増殖炉を活用すれば、ウランの可採年数は数千年となる。よってウランを貴重なエネルギー源としてこれからも有効利用していくべきである。そ

のためには、より安全な原子力発電システムを整え、エネルギー安全保障、環境保全、経済効率性、安全性、及びマクロ経済への影響の観点から、原子力、火力、水力、地熱・新エネルギー等の電源とコジェネレーション等の省エネルギーとの最適な組み合わせを考えていく必要がある。



参考: Index Mundi.com

第8図 ウランスポット価格の推移

参考文献

- 1) OECD-NEA編、Uranium2009
- 2) WNA編、<http://www.world-nuclear.org/>

日本原子力研究開発機構 天本一平

(2012年12月20日)