

■ シリーズ特集 ■

明日を支える資源 (52)

核燃料資源の現状と将来

Present and Future of Nuclear Raw Materials Resources

音 村 圭 一 郎*

Keiichiro Otomura

1. はじめに

核燃料によってエネルギーを取出す方法は、石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料のように化学的反応による燃焼によって発生した熱ではなく、原子核の分裂により、わずかの質量の減少が、膨大なエネルギーに変換されて発生する熱を利用することによる。従って核燃料によるエネルギーを利用するには、発生する放射線の遮蔽、放射性物質の閉じ込め等、通常の燃料にはない特殊の設備があるため設備全体が大規模になる。このため原子力の利用は、燃料に空気がいらぬ、また燃料そのものの重量が少なく燃料補給が頻繁に必要なという特徴を生かした原子力潜水艦や原子力航空母艦、砕氷船のような特殊な用途以外は、陸上での発電所に限られている。一方で原子力発電は、火力に比べて発電コストに占める燃料費の割合が低く、炭酸ガスを放出しない等の特徴を持っている。このことから我国の原子力発電所で稼働中のものは、平成6年3月末現在で47基、電気出力3854.1万kWに達した。さらに利用率は高く、平成4年度末の総発電設備容量で原子力発電の占める割合は18.7%であるのに対し、平成4年度の総発電電力量の割合は28.2%にもなる。

本稿では、核燃料資源の現状と将来ということで、原子力発電の原料であるウランを中心に、その資源と開発、需要と供給について述べてみる。また、現在は研究開発段階であり実用化されていないが、トリウム燃料についても少し触れてみる。

2. ウランの性状

2.1 ウランの物理的性質

ウランの原子番号は92でアクチニドに属し、ま

た量で天然で存在する最も重い元素である。

ウランには、原子番号即ち陽子の数が同じで、質量の違う同位体が多くあるが、自然界に存在するものは、 U^{238} 、 U^{235} 、 U^{234} の3つである。自然界に存在するウランは大概同じ同位体比をもっていて、それぞれ U^{238} : 99.274%、 U^{235} : 0.7205%、 U^{234} : 0.0056%である。このうち U^{235} は中性子と反応して核分裂するという性質を持っており、この U^{235} の性質を利用して核燃料に使われる。

また U^{238} 、 U^{235} 、 U^{234} は自ら α 線及び γ 線を放出して別の原子核になる崩壊という性質をもっている放射性核種である。 U^{238} は、 α 線を放出して Th^{234} になり、さらに次から次へ α 線又は β 線を放出して、最後には安定な Pb^{206} になる壊変系列を構成する。これらの核種は地層のなかでは十分に長い期間たつと、それぞれ同じ放射能を持つ永続平衡になる。 U^{238} の壊変系列をウラン系列と呼んでいる。これに属するものには同じウラン同位体である U^{234} のほか Ra^{226} 、 Rn^{222} 等、ウラン鉱山の開発段階で放射線防護上重要な核種が含まれている。

一方、 U^{235} は、アクチニウム系列という壊変系列で崩壊して、安定な Pb^{207} になる。

2.2 ウランの化学的性質

ウランは、+3価、+4価、+5価及び+6価の4つの原子価をもつ遷移元素である。このうち+3価及び+5価は不安定であり、通常は+4価及び+6価で存在していることが多い。溶液中では、イオンになっており、+6価は UO_2^{2+} のウラニルイオンで安定になっている。また錯イオンを形成し、錯イオン平衡定数から溶液中の SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 濃度に応じて、

註1) U^{238} はそのままでは核分裂しないが、中性子を吸収すると Pu^{239} という核分裂性物質に変わり核燃料になる。実際、原子炉のなかでも U^{238} の一部分が Pu^{239} に転換し核分裂している。これを効率よく行おうというのが高速増殖炉である。

* 動力炉・核燃料開発事業団 人形峠事業所
環境資源開発部環境資源開発課長
〒708-06 岡山県苫田郡上斎原村1550

複数の配位子が結合し、全体として錯陰イオンとなっていることが多い。このためウラン溶液のイオン交換では陰イオン交換樹脂が多く用いられる。

ウラニルイオンはアルカリと反応し重ウラン酸塩を形成する。ウランの化合物としてはこのほか、酸化物、フッ化物、炭化物、窒化物がよく研究されている。酸化物では UO_2 、 UO_3 やこれらの中間の組成をもった U_3O_8 が存在する。フッ化物では UF_4 と UF_6 が有名である。 UF_6 は64°C、1134mmHgで三重点をもち、1気圧、56.5°Cで昇華するという性質を持っているため、ガス状のウラン化合物が必要な同位体分離に利用される。

金属ウランは UF_4 をマグネシウムで還元して作られる。金属ウランは融点1405°C、密度19で熱伝導度の大きい物質であるが、熱膨張係数が大きく、662°Cで相転移がおり化学的にも不安定なため核燃料としては不適當である。

現在、多数の原子力発電所では UO_2 粉末を焼結した燃料を用いているが、これは熱伝導度、密度とも低い、化学的に安定であり融点が高く、熱膨張率も小さいという利点があることによっている。

3. ウラン資源

3.1 ウラン鉱床

ウランは地球上至るところに存在しており、地殻中の火成岩には平均して4 ppm程度含まれている。花崗岩のような酸性の火成岩には、25 ppmも含まれているものもある。また海水中にも3 ppbと地殻中より少ないが、総量として40億トンもあり、海水からウランを採取する技術開発も盛んに行われた。しかし陸上で採掘されるウランに比べてコストが10倍程度かかると考えられており、近年の研究は下火になっている。

経済的に開発可能なウラン鉱床となるためには、一般に、最低0.1%程度の品位にまでウランが濃集する必要がある。濃集する過程は様々であるが次のようなものが考えられる。1つは、地殻内部に溶けているマグマが次第に冷えて固まり鉱物結晶を作る過程で濃集するもので、岩漿性鉱床と呼ばれている。また、ウラン含有量の多い花崗岩類、凝灰岩及び岩漿性鉱床中のウランが地質環境の変化に伴う風化・変質作用で、細粒の形状で濃集・堆積したものや、地下水中に溶出され、その近傍の堆積層中などに沈殿、吸着、置換等の作用で濃集・固定されたものがあり、いずれも堆積性鉱床と呼ばれている。近年になってカナダ、オースト

ラリアであいついで発見された不整合関連型鉱床というものは、16~18億年前の世界的規模の造山運動期に、大きな浸食により生じた地層の不整合の近傍に特徴的に見られる鉱床で、高品位の大規模なものであり、最近の開発対象鉱床として重要視されている。

3.2 ウラン鉱物

ウランは化学的に反応性に富み、さまざまな元素との化合物として鉱物を形成している。鉱物としては約200種類が確認されているが、実際に経済的に採掘されている鉱物を構成する主要なウラン鉱物は閃ウラン鉱、瀝青ウラン鉱(ピッチブレンド)、コフィン石及びプランネル石である。閃ウラン鉱は UO_2 、瀝青ウラン鉱は UO_{2+x} の化学式をもつ黒色の鉱物であり、コフィン石は $U(SiO_4)_{1-x}(OH)_x$ で示される硅酸塩の黒色鉱物である。プランネル石は、(U, Ca, Fe, Th, Y) Ti_2O_6 のガラス状鉱物である。これらの鉱物中のウランの原子価はいずれも+4であるが、これは+4価のウランは溶解しにくいという性質に基づいている。

4. ウランの探鉱及び採鉱

4.1 ウラン探鉱

ウランの探鉱は他の非鉄金属と同様、まず、地質学的に有望な地域を絞り込むことから始まる。ウランが他の非鉄金属と違う点は放射能を持っていることである。放射能測定機を飛行機に積み込んで異常値を示す場所を特定するエアボーンから始まり、測定機を自動車に積み込んだカーボンへと、次第に地域を特定して、ウラン鉱床の露頭を発見する方法が一般にとられる。放射能異常が見つければ、地質図を基に付近に直径数の孔を掘る試錐を行い、試錐した孔に直接検出器を入れて放射能異常を検知する。また取り出した岩芯に測定機器を当てて放射能を調べたり、サンプルを分析してウランの品位や鉱床の厚さを調べる。こうした方法により、ウラン鉱床が見つければ詳細な地質図をもとに試錐の間隔を狭くしていき、ウラン鉱床の形、ウラン品位から埋蔵鉱量を計算する。有望な鉱床につき当たれば、坑道を掘りさらに正確な鉱床の形状を確認することも行われる。

世界的にウラン探鉱が進んだことから、近年、新たなウラン鉱化露頭が発見されることが少なくなり、次第に鉱床も深くくなって来ている。このため、磁気、電気抵抗、重力等を利用した物理探査手法を用い、これと地質学的見地から試錐場所を決めて、ウラン鉱床を

探す方法に切り替わりつつある。

試験や探鉱坑道の掘削で得られた鉱石は、ウラン分析や次章で述べる製錬方法の検討のための試験に供され、ウランの溶けやすさや不純物の多少が調べられる。これらの見地や探鉱法の検討結果をもとに、ウランの可採鉱量、平均品位を総合し、ウラン鉱山開発のための経済性評価が行われる。

4.2 ウラン探鉱

ウラン鉱石の採掘での技術的な面はほとんど他の非鉄鉱山と変わりはない。ただ、ウランは放射能を持っていることと、ウランが崩壊してできる放射線のラドンガスが発生することから、一般の鉱山にない放射線障害の防止対策が必要である。放射線障害にはγ線による直接の外部被曝と、ウラン粉塵及びラドンガスが体内に入って被曝する内部被曝がある。ウラン粉塵の吸入防止には、散水や防塵マスクの着用が行われ、またラドンガス対策として通気による希釈や坑外への排出が行われている。近年%オーダの品位の高いウラン鉱床が発見されており、この鉱床での坑内探鉱による放射線障害防止の対策として、遠隔操縦による探鉱法が検討されている。

なお、一般の探鉱法以外にウランが水に溶けやすいという性質を利用して、鉱石を採掘しないで、地層中にある状態で浸出液を注入し、ウランを溶出して回収するインプレイスリーチング（インシチュリーチングともいう）法や、鉱石を野積みにして、その上に希硫酸等の浸出液を散布し、ウランを浸出した溶液を集めて回収するヒープリーチングという方法がある。いずれも比較的低位品位の鉱石を低コストで処理できる利点がある。

5. ウランの製錬

5.1 粗製錬

現在世界で稼働中のウラン鉱山は50以上あるが、そのほとんどは山元で製錬して、「イエローケーキ」と呼ばれているウラン精鉱を生産している。ウラン鉱石の品位は通常0.1%以上数%までであり、それ以外の大部分は不要な脈石であるため、製錬で分離しウラン含有量70%以上のウラン精鉱にする必要がある。

製錬の方法は、鉱石を酸又はアルカリで浸出してウランを溶解させる湿式法が用いられている。浸出の前に反応を効率よく行うため鉱石を破碎、粉碎する。浸出には硫酸か炭酸ソーダが用いられる。一般に鉱石中に炭酸カルシウムが5～6%以上含まれていると硫酸

消費量が多いため、炭酸ソーダによるアルカリ浸出が有利と言われている。浸出によって、ウランを含む溶液と残った鉱石のかすである鉱滓とを分ける固液分離が行われる。

ウランを含む溶液には、不純物が多く含まれ、またウラン濃度も低いため、イオン交換又は溶媒抽出等の操作による精製が行われる。溶液中でのウランは硫酸若しくは炭酸と錯体の陰イオンを形成しているため、陰イオンを吸着する樹脂又は溶媒と接触させ、ウランイオンのみを吸着して、陽イオンを形成する鉄その他の不純物と分離することができる。

このようにして、精製し濃度を上げたウラン溶液は、アンモニア、苛性ソーダ等のアルカリを加えることにより、重ウラン酸塩（イエローケーキ）として沈殿し、濾過乾燥することによって文字通り黄色の粉体として、ドラム缶に詰めて出荷される。

以上採掘した鉱石からウラン精鉱を作るまでの工程を粗製錬という。

5.2 精製錬

原子力開発の初期には、天然ウランを金属にして燃料にするコールドーホール型のガス炉が主流であった。従って当初、ウラン精鉱からそのまま金属ウランのインゴットを作っており、これを精製錬と称していた。現在は、ウラン精鉱を一旦ガス化しやすい六フッ化ウランという化合物に変えて、核分裂性の U^{235} の含有量を天然の0.7%から3～4%に同位体濃縮し、さらにそれを酸化ウランに再転換しペレット状に焼結したものを燃料にする軽水炉が主流になっている。この段階においても不純物を取除く工程があるが、もはや精製錬という言葉を使わずに、転換と呼んでいる。

6. 日本のウラン資源の探鉱及び開発

日本における組織的なウランの国内探鉱は、平和利用のための原子力予算が計上された昭和29年から、通産省地質調査所によって開始された。その結果、昭和30年11月に岡山県と鳥取県との県境にある人形峠において、最初の本格的なウラン鉱床の露頭が発見された。その後、探鉱活動は昭和31年8月に設立された原子燃料公社と共に、日本各地でおこなわれた。昭和42年に原子燃料公社は動燃事業団に改組し、この業務を引き継いで昭和63年まで続けられた。

これまでに発見されたウラン鉱床の主なもの、人形峠鉱床のほか岐阜県の東濃鉱床がある。その資源量は合わせて6,500t足らずであり、しかも品位が低く、

表 世界のウラン資源

千tU

存在の確度 回収コスト	既知資源		未発見の資源	
	確認資源	推定追加資源Ⅰ	推定追加資源Ⅱ	期待資源
\$ 80/kgU以下	1,424	670	13,000	
\$ 80～\$ 130/kgU	659	296		
\$ 130～\$ 260/kgU	(報告なし)			

(チリ, 中国, インド, カザフスタン, モンゴル, ルーマニア, ロシア, ウクライナ, ウズベキスタンを除く)

出典: OECD/NEA-IAEA RedBook1993

鉱床が散在しているため、採鉱や製錬の試験のため一部分が利用されたにとどまった。

動燃事業団は昭和40年代後半から、採鉱の主力を海外に移し現在カナダ、オーストラリアを始め世界各国で調査探鉱を行っている。

7. 世界のウラン資源

ウランは地殻中さらに海水中にもまんべんなく存在し、それらを資源量に含めると膨大な量になる。資源量と言う場合には、存在の確度及び経済性に従って分類される。存在の確度は探鉱の進捗度により異なっ

くる。

経済協力開発機構 (OECD) の中の原子力機関 (NEA) と国際原子力機関 (IAEA) は2年ごとに共同で世界中のウラン資源と需要供給をまとめた「ウラン 資源・生産・需要」(通称レッドブック) を発行し、その中で、ウラン資源の分類を行っている。この区分に従って、1993年1月1日現在の世界のウラン資源量を示すと表のようなになる。また、各国別の確認ウラン資源を図-1に示す。図からもわかるとおりオーストラリア、カナダ、米国、南アフリカが主要な資源国である。

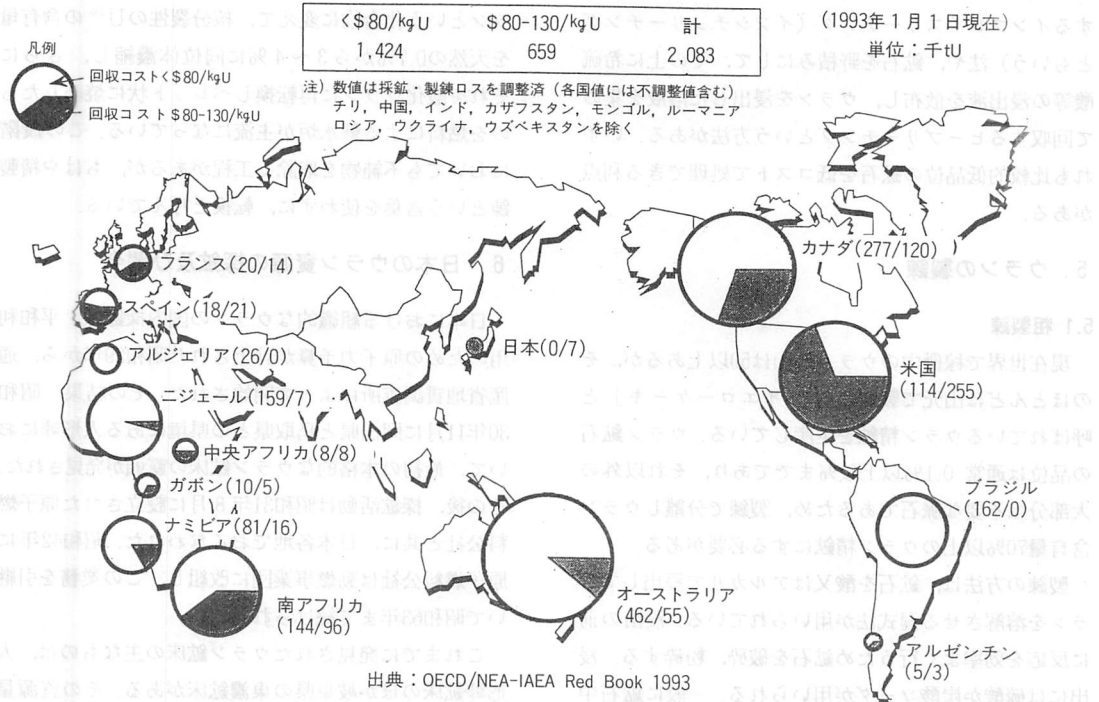


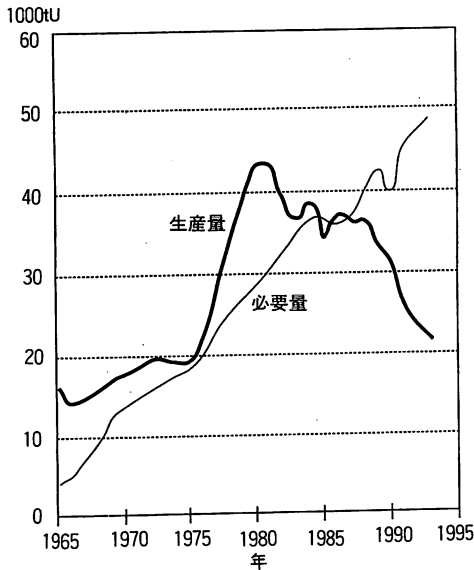
図-1 世界の確認ウラン資源

8. ウランの需給と価格

8.1 ウランの需給

1993年初頭で世界中に424基の原子力発電所が運転中であり、発電容量は330GWeになる。これに伴う世界のウラン必要量は1992年の実績から推測すると約57,000tになる。

これに対して、1992年のウラン生産量は約36,000tで必要量に対して63%にしか達していない。量にして約21,000tの不足になっており、在庫の取り崩しによって賄われている。1965年から最近までの世界のウランの生産量と必要量の推移は図-2のとおりである。



(ブルガリア、中国、CSFR、キューバ、チェコスロバキア、チェコ、東ドイツ、ハンガリー、カザフスタン、モンゴル、ルーマニア、ロシア、スロベニア、タジキスタン、ウクライナ、ソ連邦、ウズベキスタン、ユーゴスラビアを除く)

出典：OECD/NEA Uranium 1993 (Red Book)

図-2 ウラン生産量と必要量の推移

8.2 ウランの市場

原子力発電計画の下方修正の結果、ウラン在庫が大幅に増加したこと、東西の緊張緩和により東欧、旧ソ連、中国からのウランが市場に流れたこと、同じく緊張緩和により核軍縮による軍事用核物質が民生利用される可能性が生まれたことにより、ここ数年ウラン価格の下落が続いている。

現在、価格の低迷により生産を手びかえたり閉山したウラン鉱山が多いが、ウランの需要の方は確実に増加する見通しであるため、ウラン鉱山を新規に開発す

るにあたって開発準備をタイムリーにおこなわなければ、鉱床の発見から生産に至るまでのリードタイムが10年以上必要であることから、一時的に供給不足をもたらし急激に価格が上昇することになる。

9. トリウム資源

9.1 トリウムの性質

トリウムは原子番号90のウランと同じアクチニドに属する元素である。質量数223~235の13の同位体が知られているが、このうち天然のものは質量数227, 228, 230, 231, 232, 234の6つがある。

230と234は U^{238} の壊変したものであり、227と231は U^{235} の壊変したものである。従って、地殻中のこれらのトリウム同位体は、親核種のウランの量によって存在量が決まるが、いずれも半減期が親核種に比べて短いため、存在量は多くない。

残る232と228がトリウム独自の壊変系列を形成しトリウム系列と呼ばれている。232は228の親核種に当り、半減期は232の方が228の100億倍であるため、両核種が放射平衡にあるとすると、228は232の100億分の1しかないことになる。

結局、トリウムの天然同位体の比率はウランのように一定ではないが、トリウム鉱物としてある程度の品位で存在すれば、重量からみるとほとんど Th^{232} ということになる。

9.2 核燃料としてのトリウム

Th^{232} はそのままでは核分裂しない。しかし、 Th^{232} に中性子を当てると核分裂性の U^{233} に変わるので Th^{232} をウラン燃料とまぜて、炉の中に入れると新たな燃料として利用することができる。 U^{233} は U^{235} に比べて、1分裂当りの発生中性子数が多く、臨界量が少ない等の核的性質がすぐれている反面、炉の中での核反応が複雑であり、エネルギーの強い γ 線を放出する娘核種をもつ U^{233} が生成するなど核的、放射線遮蔽上の問題も多い。

トリウムを燃料とする炉は、高温ガス炉又はカナダで開発されたCANDU炉が考えられている。しかし現状は、トリウム資源を国内に大量にもつインドで、CANDU炉にトリウム燃料を装荷した試験が唯一行われた程度で、今のところ実用化のめどは立っていない。

9.3 トリウム鉱床

トリウムは、地殻中での平均含有量は12ppmであり、ウランの6倍程度となる。

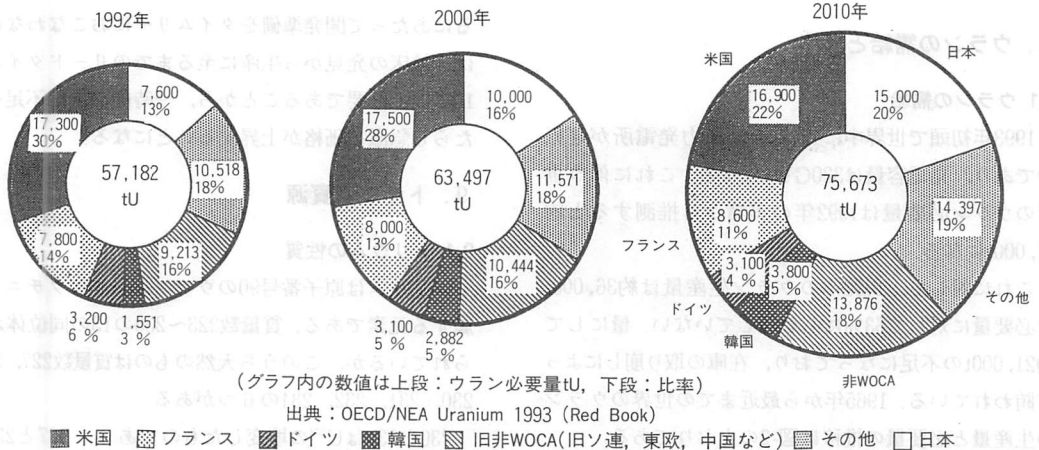


図-3 世界のウラン必要量

トリウム鉱床としては、風化によって遊離したモナズ石が沖積層堆積物中に濃集した漂鉱鉱床が有名で、これが資源量で圧倒的に大きな比率を占めている。このほか、火成岩の活動に伴う鉱床がある。

トリウムが核燃料として実用化されていないため探鉱は積極的ではなく、埋蔵量の調査はウランと比べて組織的に行われていない。インド、トルコ、ノルウェー、ブラジルなどが主要な資源国である。

9.4 トリウム鉱物

トリウムはしばしば希土類、ジルコニウム、カルシウム又はウランを伴ったケイ酸塩、酸化物、ニオブ酸塩-タンタル酸塩中に含まれる。

トリウムが主成分である鉱物は方トリウム石 (ThO_2)、トール石 (ThSiO_4)、モナズ石 ($(\text{Ce}, \text{Y}, \text{La}, \text{Th})(\text{PO}_4)_3$)、チェラライト ($(\text{Th}, \text{Ca}, \text{Ce})(\text{PO}_4)_2\text{SiO}_4$) 等があり、このうちトリウム資源として最も重要なのはモナズ石である。

10. 核燃料資源の将来

温暖化や酸性雨による地球規模の環境破壊が問題になっている現在、経済の発展に伴い、特に人口の多い中国、インドを始め、旧ソ連や発展途上国でのエネルギー消費の増大に対応していくためには今後とも原子力発電の役割は重要となる。

今年6月に原子力委員会から出された原子力利用長期計画によれば、ウラン資源の需要に影響を与えるプルトニウムの高速増殖炉での本格的利用は、我が国においては2030年以降になるとの見通しを述べている。

このため当面は原子力発電所の増加に伴いウラン資源の需要は確実に増大する。図-3に2010年までの世界

のウラン必要量を示したが、今後適切な探鉱活動を行わなければ、需給のバランスが崩れるという事態に直面するであろう。また低コストの資源は次第になくなっていくので、長期的には価格の上昇は避けることはできない。

トリウム資源については、資源量の多い国が国策的に利用技術の開発を推進するにしても、技術的にみてトリウム炉の実用化はまだ先のことと思われる。

11. おわりに

自国のエネルギーをいかに長期的、安定的に確保するかは、国の重要な課題である。しかし一方でエネルギーの消費量増大に伴い、環境破壊や将来のエネルギー資源の枯渇が問題になっており、この面からの対策が必要である。

本稿は核燃料資源の現状と将来という題で、エネルギー源の一つである原子力の燃料として、ウランを中心に、資源と関連技術、需給見通し等について述べた。エネルギー資源に関係する読者諸氏に少しでもお役に立てば幸いである。

参考文献

- 1) 原子力白書 平成5年版 原子力委員会編
- 2) 原子力年鑑'93 日本原子力産業会議
- 3) 「ウラン 資源・生産・需要」(1993) OECD/NEA-IAEA
- 4) 原子力の基礎講座5 核燃料と原子炉材料 日本原子力文化振興財団
- 5) 三神 尚; 核燃料サイクルのシステム (1980) 共立出版株式会社