

用語説明

1) 材料試験炉 (JMTR)

原子炉内において、燃料や材料に中性子を当てる試験を行うことのできる原子炉を材料試験炉と言い、原子力機構大洗研究開発センター内に JMTR があります。

2) JMTR の改修

JMTR の改修は、平成 19 年度から始まり、平成 23 年度の再稼働に向けて順調に進められています。JMTR の改修内容は、原子炉機器等の一部更新と照射設備の整備で、原子炉機器等の一部更新については、原子炉制御系統、制御棒駆動装置、一次冷却系統、二次冷却系統、ボイラー・冷凍機、電源設備、排水設備、炉室給排気系統を更新しています。原子炉施設の一部更新と照射設備の整備の概要を右図に示します。



原子炉施設の改修後、約20年間利用し、平成42年度(2030年度)頃まで運転を行います。

3) 太陽鉬工株式会社

同社(昭和24年設立)は、「地球環境の保護」を重要課題として認識し、人と地球に優しい製品と技術の確立を目指してきました。その一つの成果がモリブデン、バナジウムといった貴重な資源リサイクルシステムです。レアメタルの再利用技術を高めるとともに、安定供給を実現し、海外でも高い評価を得ています。なお、今回の Mo リサイクル手法の開発に関しては、同社の赤穂研究所(兵庫県赤穂市)と原子力機構が共同で行いました。(ホームページアドレス <http://www.taiyokoko.co.jp/>)

4) Mo の需要・供給・価格の動向等

モリブデンは、地殻中の平均存在量は13ppmで、鉬物としては輝水鉛鉬(Molybdenite、 MoS_2)、パウエル鉬(Powellite、 $\text{Ca}(\text{Mo}, \text{W})\text{O}_4$)、水鉛華(Ferrimolybdate、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{MoO}_3 + 8\text{H}_2\text{O}$)、藍水鉛鉬(Ilsemanite、 $\text{MoO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)、黄鉛鉬(Wulfenite、 PbMoO_4)等があるが、現在主に採掘されているのは、輝水鉛鉬である。輝水鉛鉬の品位は、モリブデン・プライマリー鉬山の鉬床で0.2～0.5%、銅パイプロ鉬山の鉬床で0.02～0.08%である。モリブデン鉬床は斑岩型、スカルン型、石英脈型、ペグマタイト型、堆積型等に分類されるが、大部分は斑岩型鉬床からの産出である。

2008年の世界のモリブデン供給量は、約161.8千tで前年比約5.9%の減となった。2009年にはさらに約8.5%減少して約148.1千tとなる模様である。なお、供給の寡占状況を表す世界の生産国上位5か国の集中度は、1999年の89.0%から2008年は72.1%と下落しており、寡占度は緩和される傾向にある。一方、需要も、供給面と同様に、2007年までは順調に増加してきたが、2008年は総需要量約158.8千tで前年比約7.0%減となった。2009年も、鉄鋼特殊鋼用途での日米欧のモリブデン需要量の回復は遅れ、総需要量は約13.2%も減少して約137.9千tとなる予想となっている。

モリブデンは、世界生産の8割以上(中国を除く)が銅生産の副産物として生産されるため、2008年以降顕在化しているとおり、モリブデンそのものの需給・市況ではなく銅の需給・市況により生産量が左右されることもあり、必ずしも安定した供給体制にあるとは言えない。また、処理過程で鉬石の焙焼を行うが、環境問題から焙焼設備の新設・増設が困難となってきたことによる焙焼能力の不足と偏在の問題は、2007、2008年の設備拡張により今のところ解消しているが、将来、需給の量がさらに伸びていく

場合、供給面でマイナスの影響を及ぼす1つの要素となる可能性がある。表に過去のモリブデンの供給障害事例を示す。銅鉱山でのストライキ・事故・銅減産等による減産、ステンレス鋼等の生産増に伴う需要増が認められる。近年では、他の鉱種と同様、政策動向も含めて、中国の影響が大きくなっている。

日本は、モリブデン全量を、モリブデン鉱、フェロモリブデン（FeMo：鉄とモリブデンの合金）、酸化物、水酸化物、金属製品等の形態で輸入している。なお、国内の大半の中間製品生産企業は、長期にわたり価格が低迷している間（1982年から2002年半ばまでの間）に国際競争力を喪失して操業を中止しており、現在国内で輸入モリブデン鉱を原料にしてフェロモリブデン等の中間製品の生産を行っているのは、太陽鉱工（株）、他1社のみとなった。

(2010.1 金属資源レポートより抜粋)

表 過去のモリブデン供給障害事例

時期	事例	障害状況
1967.7～12 (6か月間)	米国：産銅大手 Climax のスト	供給減少
1987	米国：Amex 及び Cyprus の減産	国際価格が高騰、世界の Mo 生産量の約 10% 減（推計）
1994～1995	世界：ステンレス鋼生産急増による供給不足	国際価格が約 5 倍に高騰 入手困難
1996	北米：Climax 鉱山の休止、Henderson 鉱山等の減産	世界の Mo 生産量の約 20% 減
2002	世界的な銅パイロ鉱山の減産	国際価格が約 2.5 倍に高騰
2003.10～2004.4	中国：遼寧省 鉱山事故による生産休止	国際価格が約 2.5 倍に高騰
2004.7～2005.1	鉄鋼向け需要の増大に加え、焙焼能力不足による精鉱供給の遅れにより原料が不足（特に中国）	国際価格が約 2 倍に高騰 (2002 年までの約 10 倍まで高騰)
2006.1～2007.5	中国：輸出抑制政策の強化懸念 南米：銅パイロ鉱山の減産による供給不足傾向	国際価格が約 1.5 倍に高騰 (緩やかに値を戻した)

(出典：日本メタル経済研究所報告書等)

5) 核医学診断

生体機能を反映した画像を PET ガンマカメラなどによって、 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ など生体の機能及び代謝を反映する γ 線放出核種で標識された放射性医薬品を用いた診断方法です。

^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ などの放射線を放出する放射性医薬品を用いて、生体の機能を画像化し、診断を行う検査法です。この検査では、患者の体内に投与された放射性医薬品から発せられる放射線をとらえるために、PET カメラやガンマカメラが用いられています。

6) 放射性医薬品（診断薬）

放射性同位元素 (RI) で標識した化合物を使用した診断は、患者にほとんど負担を与えることなく高度な情報を与える検査として認められ、全国の中核病院の放射線科あるいは核医学科で日常的に実施されています。放射性医薬品（診断薬）に用いられる RI はすべて γ 線放出核種で、 γ 線の放出は、診断に必要な時間だけでよいとため、使用される代表的な RI としては、半減期が一般に数時間から 4 日以下と短い、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ や ^{123}I が使用されています。

7) 核分裂法

主な ^{99}Mo の製造方法としては、核分裂法と放射化法があります。核分裂法はウラン-235 を原料にして、原子炉内で核分裂を起こさせ、その結果、生成された多くの核分裂生成物 (FP) 中から ^{99}Mo を抽出する方法です。現在、世界の主流は核分裂法です。

8) 放射化法

放射化法は天然モリブデン中に存在する ^{98}Mo （存在比約 24%）を原料として、原子炉内で中性子による照射を行い、生成された ^{99}Mo を利用する方法です。核分裂法に比べ ^{99}Mo の比放射能量は低いが、安価で放

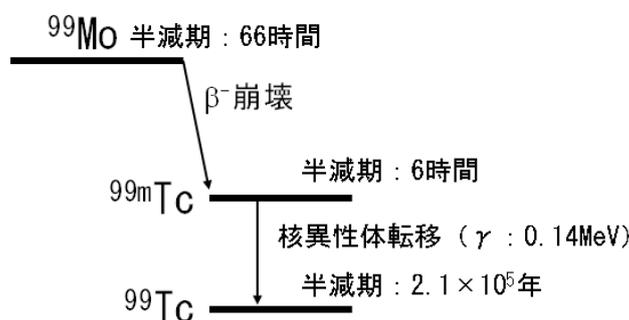
放射性廃棄物の発生が少ない等のメリットがあります。

9) 核分裂生成物

核分裂の結果として生じる大きな2つの破片を核分裂片と呼ばれます。それぞれが原子核となって新しい2つの原子ができます。分裂のしかたは、さまざまですが、真半分に割れることは少なく、大きさの割合で3：2ぐらいになることが多い。元素の種類としてはニッケル（原子番号28）からジスプロシウム（66）まで約40種、質量数でいえば66から166までほぼ100種類のものでできます。これらを総称して核分裂生成物（FP）と言います。なお、ウラン-235からの ^{99}Mo の生成率（核分裂収率）は約7%です。

10) ^{99}Mo （モリブデン-99）

モリブデン（Mo）は、原子番号42の元素。銀白色の硬い金属。 ^{99}Mo は β^- 崩壊することにより、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ となるため、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の親核種です。現在、医療用のほとんどは原子炉を利用して製造されています。



11) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ （テクネチウム-99m）

地球上では非常にまれな原子番号43の元素で、ウラン238の自発核分裂によりウラン鉱などの中で生じますが、生成量は非常に少ないものです。元素記号はTc。白金に似た外観を持つ銀白色の放射性の金属です。テクネチウムは、安定同位体を持たない元素であり、全ての同位体が放射性同位体です。 β 線を放出せず γ 線のみを放つ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の特性を活かし、各種リガンド（特定の受容体に特異的に結合する物質等）と標識して骨・腎臓・肺・甲状腺・肝臓・脾臓などの臓器を描出するシンチグラフィ（放射性同位元素を利用した画像検査）に用いられています。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ で標識された放射性医薬品を投与した場合の体内動態などは充分解明されている上、検査目的に応じた多種の注射剤が供給されています。テクネチウムは、人工放射性元素ですが、核医学という医療の一分野を支える重要な元素であり、一般市民の生活に大きく寄与するものです。

12) ^{98}Mo （モリブデン-98）

^{98}Mo はモリブデンの同位体の中にあつて ^{92}Mo 、 ^{94}Mo 等と同様、放射線を出さない安定同位体であります。その存在比は同位体の中でも一番多く、その天然存在比は24%です。 MoO_3 粉末の価格は、粉末純度などに影響するが、約50円/gです。一方、約98%の ^{98}Mo を濃縮した MoO_3 粉末は5万円/gと非常に高価となります。

13) 三酸化モリブデン (MoO_3)

モリブデンは一般に採掘したモリブデン鉱石の浮遊選鉱を行い、硫化モリブデン精鉱とします。さらにこの精鉱を焙焼し、脱硫して、三酸化モリブデン (MoO_3 : 天然存在比約24%、 ^{98}Mo)として出荷されます。現在、大量に輸入されている三酸化モリブデンは、主に鉄鋼添加用途であるため、 MoO_3 純度は95%程度である。その他、触媒や電子部品用の三酸化モリブデンは、更に化学精製することにより高純度化したものが使用されています。この三酸化モリブデン粉末を焼き固め、ペレットとした上でJMTRにおいて中性子

による照射を行い、⁹⁹Mo を製造します。

14) GTRI (地球的規模脅威削減イニシアティブ) Global Threat Reduction Initiative

2004年5月、エイブラハム米エネルギー長官が米国や旧ソ連より各国に対して研究炉用の燃料として提供された高濃縮ウランがテロリストの手に渡ることを防ぐため、米露起源の高濃縮ウラン燃料等の米露への返還を中心に、国際社会の脅威となり得る核物質及び放射性物質を削減するための包括的な構想として、地球的規模脅威削減イニシアティブ (GTRI) を提唱しました。2004年9月18日～19日に米露両政府共催によりウィーンで開催されたパートナー会合において、米国より、本件イニシアティブの目的として以下が挙げられました。

- (1) 全ての露起源未使用高濃縮ウランの来年までの返還、及び全ての露起源使用済み燃料の2010年までの返還。
- (2) 全ての米起源の研究炉使用済み燃料の10年以内の返還作業の加速化(12月に米エネルギー省は、返還期限を2009年から2019年に延長する旨発表。)
- (3) 全ての国における民生用研究炉用燃料の高濃縮型から低濃縮型への転換。
- (4) 既存の脅威削減対象に含まれない核・放射性物質及び関連機材の特定。

なお、GTRI の提唱により、これまでの RERTR(研究炉燃料低濃縮化計画)に係る活動及び米国による使用済み燃料受入れは GTRI の下で推進されることになりました。

(参考:外務省 HP <http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/atom/gtri.html>)

15) RERTR (研究炉燃料低濃縮化計画)

1977年の米国の核不拡散強化政策発表後、濃縮ウランを米国から全面的に供給されているわが国としては、その安定確保と国の核不拡散政策に従うとの立場から、研究炉・試験炉燃料のウラン濃縮度低減化に取り組むこととし、1978年より原子炉ごとに検討を開始しました。RERTR とは、Reduced Enrichment for Research and Test Reactors の頭文字を取った略称で、研究炉燃料低濃縮化計画を指します。

高濃縮ウランを使用している研究炉・試験炉の燃料要素の設計を大幅に変更せず、すなわち研究炉の性能を変えず、低濃縮ウラン (ウラン-235 の濃縮度 20%未満) に切り換えるには、燃料芯材中のウラン含有量の高密度化に懸っています。このため、従来の U-Al 合金燃料 (最高ウラン密度 0.75g/cm³) に代わって、アルミナイド (UAl_x、最高ウラン密度 2.3g/cm³) およびシリサイド (U₃Si₂、最高ウラン密度 4.8g/cm³) をアルミニウム中に均一分散させた燃料の開発が進められました。その結果、日本原子力研究所 (現日本原子力研究開発機構) の研究炉・試験炉 (JRR-2, -3, -4 および JMTR) は、これらの燃料を使用し、従来の炉心とほぼ同等の性能を持つ炉心へ変更することができました。

しかし、シリサイド燃料の再処理が困難なことが明らかになり、燃料サイクルを完結するために、再処理が可能な U-Mo 合金分散型燃料の製造技術開発が必要となってきました。