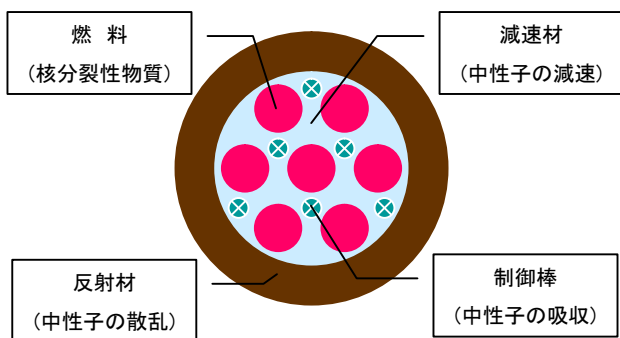


## 3-2 ウラン濃縮

### 1. はじめに

$^{235}\text{U}$ や $^{239}\text{Pu}$ 等の核分裂性物質の原子核に中性子が当たると核分裂を起こすことがある。このとき、原子核が割れて複数の分裂片や高速中性子が発生して飛散する。これらは、周囲の物質と次々に衝突して運動速度が低下し、この過程で非常に大きな熱量を生じる。1回の核分裂につき平均2.4個の中性子が飛び出す、このうちの少なくとも1個が次の核分裂に寄与すれば、核分裂を長時間持続することが可能になり、この状態を連鎖反応という。発電用原子炉は、核分裂の連鎖反応を利用して発電を行う装置である。第1図に原子炉の原理を示す。原子炉には核分裂性物質を含む燃料及び中性子の速度を低下させる減速材が配置されており、これらは連鎖反応を促進させる働きをする。これに対して、中性子を吸収して連鎖



第1図 原子炉の原理

反応を抑制する働きをする制御棒も配置されており、制御棒の挿入量を調節して炉内の中性子数を加減し、連鎖反応を安定維持できるようになっている。また、中性子を無駄なく安全に利用するため、原子炉の中心部は厚い鋼鉄製の反射材によって囲まれている。原子炉には、燃料として天然ウランを使用するものと濃縮ウランを使用するものがある。ウランは、核分裂しにくい（燃えにくい） $^{238}\text{U}$ と核分裂性の（燃えやすい） $^{235}\text{U}$ から構成され、天然ウランは $^{235}\text{U}$ の重量組成が約0.7%と非常に少ない。一方、濃縮ウランは、燃えやすい $^{235}\text{U}$ の比率を天然組成よりも高めたものであり、 $^{235}\text{U}$ の重量組成（濃縮ウランに関しては濃縮度という）が3～5%のものが一般的である。連鎖反応を効率よく維持するためには、一定量以上の核分裂性物質を集めて分布密度を高めるとともに、核分裂で飛び出した高速中性子を減速させて熱中性子にする必要がある。熱中性子は、周囲の物質の温度と平衡状態にあり、運動速度が低いため、 $^{235}\text{U}$ の原子核に取り込まれて核分裂を起こしやすい性質がある。天然ウランを使用する原子炉には、金属ウランを燃料とし、グラファイト（黒

鉛）を減速材として使用するもの、あるいは、ウラン酸化物を燃料とし、重水を減速材として使用するもの等がある。燃料が天然ウランであっても、大型の炉心に十分な量の核分裂性元素を保持し、中性子の減速効果を高める工夫をすることにより、発電用原子炉として使用することができる。天然ウランを燃料とする原子炉は、巨額資金と高度技術が要求されるウラン濃縮工程を必要とせず、大きなメリットを有するが、他方で減速材として高価な重水を大量に使用する炉では、そのメリットが相殺されてしまう。また、グラファイトを減速材に使用した原子炉は、実用化初期段階に大規模な火災事故を起こしたことがあり、評価を下げてしまった。一方、濃縮ウランを燃料とする原子炉においては、核分裂性の $^{235}\text{U}$ の分布密度を高めることが容易であり、コンパクトな炉心で高出力を得ることができるため、建設費の面で有利であるとともに、高燃焼度燃料を使用した運転期間の延長にも対応可能である。また、 $^{235}\text{U}$ の含有量の少ない天然ウランの原子炉では、燃料の燃焼に伴い早期に $^{235}\text{U}$ が消費されてしまうため、頻繁に燃料交換を実施して新燃料を追加する必要があり、連続運転中に燃料交換を行う装置も必要になる。さらには、大量に発生する使用済み燃料の処置も大きな問題となる。濃縮ウランを燃料とする原子炉では、このような問題が比較的小さく、建設及び運転のトータルでみれば、天然ウランを燃料とする炉よりも有利な点が多い。このような理由により、現在の発電用原子炉は、濃縮ウランを燃料とし、軽水を減速材とする軽水炉が主流になっている。しかし、各国の事情によっては、自前の安価な天然ウランが調達可能な場合があり、そのような国においては、天然ウランの原子炉のほうが有利となる。また、原子炉を構成する材料の性質には一長一短があり、ひとつの欠点によって排除されるものではなく、たとえば前述のグラファイトは、高温状態で空気にさらされると火災を起こすという欠点を有するが、熱容量が大きく耐熱性が高い性質に着目すれば、高温ガス炉等の安全な原子炉の開発に役立つ。

### 2. ウラン濃縮の方法

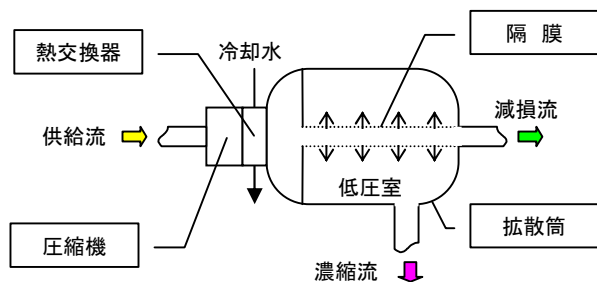
ウラン濃縮の様々な方法が研究され、また実用化されてきたが、以下に主要なウラン濃縮技術について簡単に紹介する。これらは、濃縮プロセスの特徴から統計的分離法と選択的分離法の二つに分けられる。統計的分離法では、分子を構成する同位体の種類によって僅かに異なる性質（質量、運動速度等）の差を利用して着目成分を少し多く含む部分を分けて取り出す。本方法は、一般的に1回の処理に伴う濃縮の度合いが小さいため、必要に

応じて処理を繰り返す必要がある。統計的分離法には、ガス拡散法、分離ノズル法、イオン交換法、遠心分離法等が含まれる。一方、選択的分離法は、特定の同位体に固有の性質に注目し、着目成分のみを一挙に選別するプロセスであり、レーザー分離法がその代表である。

ところで、ウラン濃縮の方法には数多くの種類があるが、それらの多くにおいて、取り扱われるウランの化学的形態は六フッ化ウラン ( $UF_6$ ) である。フッ素は自然界においては単一の安定同位体 (原子量約19) であるため、 $UF_6$  の分子量はウラン同位体の質量差をそのまま反映している。すなわち、 $^{235}U$  の  $UF_6$  と  $^{238}U$  の  $UF_6$  の分子量の差は必ず3であり、これ以外の値になることがない。したがって、ウランを  $UF_6$  の化学形態に転換して分子レベルの分別を行うことにより、ウラン原子の同位体分離が可能になる。また、 $UF_6$  は平衡蒸気圧が大気圧となる温度が56.5℃であり、大気圧よりも十分低い圧力であれば室温でも気体状態を維持することができ、工業技術の観点からみて取扱いが容易である。

## 2.1 ガス拡散法

分子量が僅かに異なる2成分の混合気体を多孔質の隔膜によって保持し、隔膜の反対側を低圧にすると、混合気体が隔膜中を拡散して進み、一部が低圧室に移動する。このとき、分子量の小さな(軽い)成分の方が分子量の大きな(重い)成分よりも隔膜を若干通過しやすいことが古くから知られている。容器内部において無数の気体分子が様々な速度で飛び交っており、他の分子に衝突しては進行方向を変え、次の衝突まで直進するという過程を繰り返している。分子が直進する距離の平均値を平均自由行程といい、隔膜の穴径は、平均自由行程と同程度かそれ以下に調整されている。同一温度条件下において、軽い分子は重い分子よりも平均速度が僅かに大きいため、隔膜の穴を若干早く通過することができる。この性質を利用してウラン濃縮を行うのがガス拡散法であり、実用化から半世紀以上が経過した最も歴史ある濃縮法である。ガス拡散法の原理を第2図に示す。この原理図ではパイプ状の隔膜が拡散筒の中心部に設置されており、ここに  $UF_6$  ガスを供給する。供給された流れはパイプ状の隔膜の内部を進み、一部が隔膜を通過して低圧室へ移動し、軽い成分 ( $^{235}U$ ) が僅かに多い濃縮流として取り出さ

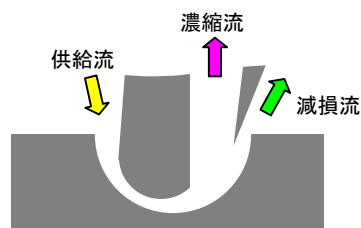


第2図 ガス拡散法の原理

れる。一方、パイプの出口からは軽い成分が僅かに減少した減損流が取り出される。濃縮流は上位段の拡散筒に送られ、更に軽い成分が濃縮される。減損流は下位段に送られて下位段の供給流に合流する。拡散筒を一度通過した流れは圧力が低下しているため、次の拡散筒に供給する際に圧縮機により圧力を高める必要がある。このとき、圧縮熱が発生するので熱交換器により冷却し、適正温度としなければならない。ガス拡散法では、1回の処理に伴う濃縮の度合いが非常に小さいため、1千基~数千基の拡散筒を設置(このような多数の拡散筒の集合をカスケードという)して運転する必要がある。圧縮機の運転及び冷却水の供給に莫大な電力を消費する。なお、1回の処理に伴う濃縮の度合いについては、「分離係数」と呼ばれる指標によって評価され、濃縮流の分離係数は1よりも少し大きい数値である。分離係数は、濃縮装置を通過する流れにおいて、濃縮流及び減損流の存在比が供給流の存在比の何倍になったかを、それぞれ示すものである。ここで存在比とは、着目成分(ウラン濃縮では  $^{235}U$ ) の原子分率(原子数比またはモル比)を着目成分以外 ( $^{238}U$ ) の原子分率で割った値であり、通常濃度比(着目成分の重量を全体の重量で割った値)とは異なる定義になっているので注意が必要である。ウラン濃縮用ガス拡散筒の分離係数は、 $^{235}UF_6$  分子及び  $^{238}UF_6$  分子の平均速度の比から導かれ、理論上1.00429である。ガス拡散法によってウラン濃縮を行う場合、たとえば原子分率が0.00711の  $^{235}U$  を含む天然ウランを、原子分率がそれぞれ0.03及び0.002の濃縮流と減損流に分離するためには、1,272回の処理が必要になる。

## 2.2 分離ノズル法

$UF_6$  の高速な流れを急激に曲げると強い遠心力が作用し、カーブの内側の流れに軽い成分である  $^{235}UF_6$  が僅かに濃縮される。この原理は、考案者に因んでBecker法とも呼ばれる。第3図に分離ノズル法の原理を示す。この図は流路の断面積の変化が分かるように考慮されており、供給流は次第に絞り込まれ、最も狭いところを通過した後、次第に広がって出口に続いている。このようなノズルを通過する流れは高速度に加速され、流体速度をさらに高めるため、 $UF_6$  ガスは音速の値が大きい水素ガスに

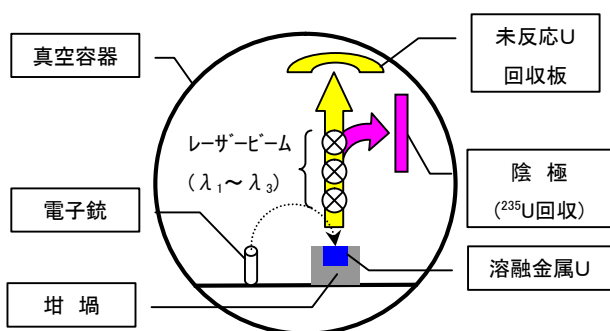


第3図 分離ノズル法の原理

よって希釈されている。また、半円状のカーブの曲率半径は0.1mm程度と小さく、ガスがここを通過する際に流路が急激に曲げられる。出口にはナイフエッジが配置されており、軽い成分の $^{235}\text{U}$ や水素ガスが濃縮された流れがカーブの内側に切り分けられる。分離ノズル法では分離係数1.015が得られている。ブラジルにおいて旧西ドイツの技術協力により分離ノズル法の小規模な濃縮施設が建設されたが、目詰まり等の不具合が原因で現在は閉鎖されている模様である。なお、現在ブラジルは、遠心分離機によるウラン濃縮事業を行っている。

### 2.3 レーザー分離法

本方法は、ウラン原子の光の吸収スペクトルに同位体によって僅かな差（これを同位体シフトという）があることを利用した分離法である。原子や分子に光を照射すると、原子核の周囲に存在する電子の一部が離脱してイオン化したり、分子の一部が壊れて化学反応を起こし、別の物質に変わったりすることがある。光の波長を精密に調整して連続的に変化させ、さまざまな波長の光の下で同位体の種類毎にこれらの反応を詳しく調べると、ある特定の波長の光において、前述の反応の起こり易さが同位体の種類毎に異なる場合がある。この性質を利用して同位体分離を行うことができる。以下に金属ウラン蒸気にレーザーを照射して $^{235}\text{U}$ を選択的にイオン化して回収する方法（原子レーザー濃縮法）について述べる。原

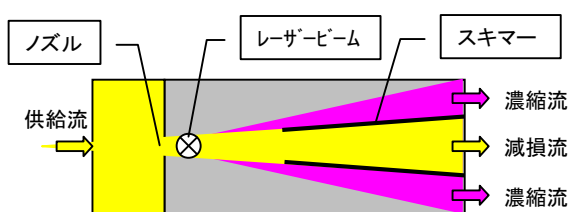


第4図 原子レーザー濃縮法の原理

子レーザー濃縮法は、数多くのウラン濃縮法の中で最も効率的で経済性に優れた方法に成り得ると考えられ、先進各国で盛んに研究開発が実施された。原子レーザー濃縮法の原理を第4図に示す。この濃縮法では原料として金属ウランを使用し、電場で円弧状に曲げた電子ビームを当てて加熱溶解し、ウラン蒸気を発生させる。ウラン蒸気に2～3種類の波長（図では $\lambda_1 \sim \lambda_3$ の3種類）のレーザービームを照射し、段階的にエネルギー準位を励起して $^{235}\text{U}$ のみを選択的にイオン化する。波長を精密に制御したレーザービームを、真空容器のガラス窓を介して原理図紙面の垂直方向に入射し、真空容器の外部両側に設置した向かい合わせの鏡で反射させて蒸気中を何度も往復させる。イオン化した $^{235}\text{U}$ （正に帯電）は陰極に引き

寄せられて凝固し回収される。回収されるウランの濃縮度は、1回の処理でほぼ100%となり、これは、ほかの濃縮方法にない大きなメリットと言える。しかし、原子レーザー濃縮法は、本格的な技術開発が開始されて四半世紀以上の時が経過するも、実用的規模のウラン濃縮工場の運転に至っていない。この原因としては、安定した十分な出力と長寿命を兼ね備えるレーザー発振器の製造が容易でないこと、 $2,800^\circ\text{C}$ 以上の高温になる腐食性の液体金属ウランを収納する坩堝（るつぼ）に適した材質の選定が困難であること、ウラン蒸気の一部が拡散して容器やガラス窓の表面に触れて容易に蒸着してしまい、透明性が失われて損失が大きくなること等が挙げられる。また、SILEX法と呼ばれる競合技術が実用間近であることから、先行き不透明となっている。

SILEX法は、ノズルから $\text{UF}_6$ とArの混合ガスを噴出させ、断熱膨張により冷却された流れに特定の波長のレーザーを照射して $^{235}\text{UF}_6$ とArの活性なクラスター（弱い結合力で結ばれた複数分子から成る集団）を選択的に生成する。クラスターは、生成直後に自発的に分解し、この際に分子の飛び散る方向が大きく変わる。SILEX法はこの現象を応用した分離方法と推定されている。第5図にSILEX法の原理を示す。照射部下流の中心部に未反応の $^{238}\text{UF}_6$ が多く、スキマーの外側に $^{235}\text{UF}_6$ が飛散して移行するものと考えられる。SILEX法については、厳しい情報管理が徹底されているため、具体的情報に乏しい。



第5図 SILEX法の原理(推定)

### 2.4 遠心分離法

重い成分と軽い成分から成る混合ガスを円筒に注入して高速回転させると、円筒半径位置の内側（中心軸に近い方）に軽い成分が、外周側（円筒の内壁付近）に重い成分が集まりやすい。この性質を利用してウラン濃縮を行うことができる。ウラン濃縮用の遠心分離機では $\text{UF}_6$ ガスを使用し、核分裂性物質として着目される $^{235}\text{UF}_6$ が軽い成分であり、 $^{238}\text{UF}_6$ が重い成分に相当する。第6図に遠心分離機（概略構造）を示す。遠心分離機の研究は、戦後間もない頃に開始され、何種類かの構造が考案されているが、図示したものは代表的なZippe型の遠心分離機である。回転胴は、下部の回転抵抗の小さい特殊な軸受と上部のマグネットを利用した磁気軸受に支えられて超高速回転しており、注入された $\text{UF}_6$ ガスに非常に強力な遠心力が作用する。回転胴の直径が遠心分離機により様々で

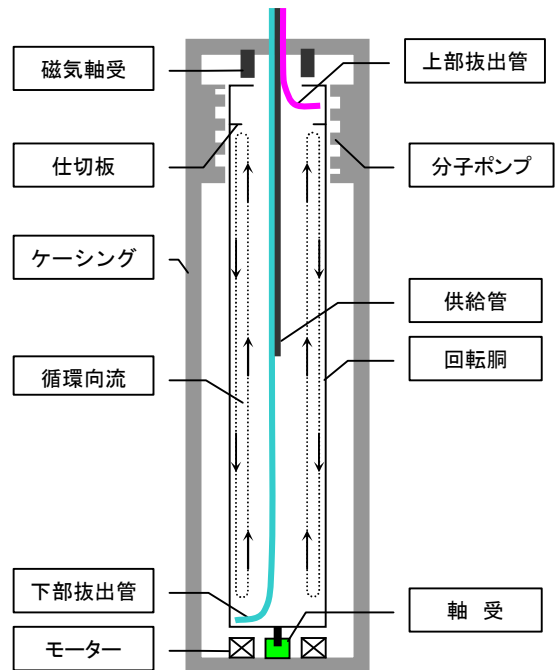


あるので回転数のみによる回転速度の比較は適当でない。回転速度の指標としては、「周辺速度」(円筒の接線方向の速度)が使用され、周辺速度が高いほど分離性能が向上するが、回転胴に要求される強度が厳しくなる。回転胴の材質としては、高強度かつ低密度のものが適しており、ジュラルミン等のアルミニウム合金、マルエージ鋼等の特殊鋼、樹脂と炭素繊維等の複合材料が使用できる可能性があり、達成可能な周辺速度は、それぞれ約400m/s、約500m/s、700m/s以上と見込まれる。遠心力の作用により、UF<sub>6</sub>ガスの密度は、回転胴半径の外周側で最大となり、内側に寄るほど急激に低下する。外周側の密度を1として基準化すると、前述の3種類の周辺速度では、外周に近い半径90%位置において、それぞれ概ね1/10、1/100、1/1,000となる。やや内側に寄った半径80%位置においては、それぞれ概ね1/100、1/1,000、1/1,000,000となる。このことから、UF<sub>6</sub>ガスの大半が回転胴の内壁付近に押し付けられて張り付いており、周辺速度が高まるにつれてその傾向が顕著になることが分かる。なお、回転胴の上部には、内部に供給管や抽出管を挿入するための開口部があるが、この部分の圧力が非常に低くなっているため、ガスが漏出する懸念は殆どない。仮にガスがごく僅か漏出しても、分子ポンプによってシールされているので問題となることはない。分子ポンプは、内側にスパイラル溝を有する一種の高真空排気装置である。回転性能の観点からみて、回転胴内部に高密度のガスを保有することは何ら問題ないが、回転胴の外側にガスが回り込むと不安定振動が誘発されるので、分子ポンプ等の高真空排気装置を使用して回転胴の外側を高真空に維持する必要がある。

前述の密度分布の計算は、UF<sub>6</sub>の分子量を352として行っているが、これは<sup>238</sup>UF<sub>6</sub>の分子量である。同様な密度分布計算を軽い成分である<sup>235</sup>UF<sub>6</sub>(分子量349)について実施して比較すると、軽い成分の密度分布は重い成分のそれよりも若干緩やかな勾配となり、回転胴の内側において軽い成分の比率が僅かに高くなっている。外周側における<sup>235</sup>UF<sub>6</sub>の<sup>238</sup>UF<sub>6</sub>に対する存在比を基準とし、やや内側の半径位置における局所的分離係数を計算すると、前述の3種類の周辺速度では、外周に近い半径90%位置において、それぞれ概ね1.02、1.03、1.06と周辺速度が高まるに連れて局所的分離係数が大きくなる。やや内側に寄った半径80%位置においては、それぞれ概ね1.04、1.06、1.11と更に大きい値となる。しかしながら、回転胴の内側ではガスの密度が極端に小さくなっているため、その局所的分離係数がいくら大きくてもあまり意味がない。また、内側から非常に希薄なガスを抽出することは、技術的に殆ど不可能である。このため、実際の遠心分離機の実分離係数としては、外周側に近い半径位置の実分離係数が重要と考えられるが、それでもガス拡散法等他の分離方法と比較すると大きな値となっており、濃縮ウランを得る

のに必要な処理回数が大幅に節減され、数回～十数回の処理で軽水炉燃料の濃縮ウランが生産できる。また、遠心分離機の消費電力が小さいため、ガス拡散法の濃縮工場に比較して電力費が1/10以下で済むという大きなメリットを有する。

ところで、内側から希薄なガスを抽出することの困難さに関しては、Zippelは、回転胴の内部に循環向流を形成することで、この問題を解決した。互いにすれ違う流れにおいて、軽い成分は内側の流れに移行し易く、重い成分は外側の流れに移行し易い。このため、図示した遠心分離機においては、上部抽出管から軽い成分が濃縮された流れが抽出され、下部抽出管からは、重い成分に富む流れが抽出される。このように循環向流は、半径方向の局所的分離係数の分布を上下方向の分布に転換するため、



第6図 遠心分離機(概略構造)

抽出位置を上下に選ぶことになり、内側から希薄なガスを抽出する必要がなくなる。また、循環向流は半径方向の局所的分離係数の分布を増幅する働きを有し、実際に得られる遠心分離機の実分離係数を、前述の計算値(外周側に近い半径位置に注目)よりも大きい値にすることができる。循環向流を作り出す方法としては、抽出管が回転ガスの抵抗となり、外周側に張り付いたガスの一部を内側に移動させる作用と、回転速度の低下した内側のガスを仕切板が再加速して外周側に送り込む作用を利用する方法、回転胴の上下に温度差を付ける方法、回転胴の高さ方向に沿って連続的な温度勾配を付ける方法及びこれらの方法のいくつかを組み合わせる方法等がある。ちなみに、強い遠心力場において、ある場所のガスを暖めると、熱対流によって、加速度が働いている方向とは反対

方向に向かう流れが生じ、同時に温度の低い隣接領域からガスが流れ込む。

遠心分離機やガス拡散筒等の分離を行う機器及びそれらがいくつか集まったグループを分離ユニットといい、分離ユニットの能力は、分離作業量という概念によって評価される。分離作業量は、分離ユニットの単位時間における処理量に濃縮流の分離係数及び減損流の分離係数（減損流については逆数を使用）を考慮した値であり、処理量が大きいくほど、それぞれの分離係数が大きいくほど大きな分離作業量となる。分離作業量の単位は、kgSWUまたはtSWUと表記され、質量の次元を持つ。このため、処理量そのものと誤解されやすいが、前述のとおり分離係数も反映された値である。遠心分離機の開発にあたっては、循環向流等を形成することによって回転胴内部の流れを最適化し、最大限の分離作業量を得る努力がなされている。遠心分離機の理論上の性能は、回転胴の長さ に比例し、周辺速度の増加倍率の4乗に比例すると言われているが、実際には、周辺速度が高くなるほどガスが外周側に集中して流れの分布が理想的な状態からかけ離れてしまうため、分離効率が急速に悪化する。このため、周辺速度700m/s付近においては、周辺速度の増加倍率の2乗程度に留まる。実用的な規模の濃縮工場において、初期に設置された遠心分離機の能力は5kgSWU/y程度（英国）であったが、近年の遠心分離機は年々長く速くなり、初期の10～20倍超の能力に向上している。我が国においても、世界的にみてもトップクラスの性能を有する遠心分離機が実用化されている。

### 3. 我国のウラン濃縮事業

#### 3.1 遠心分離機の開発

我国のウラン濃縮用の遠心分離機は、1970年代に当時の動力炉・核燃料開発事業団において実用段階の研究開発が本格化し、1980年代には人形峠（岡山と鳥取の県境）において200tSWU/yの規模を有するパイロットプラントが運転されて遠心分離機の性能、製造技術、運転技術、信頼性等が実証された。また、パイロットプラントの運転と並行して新素材高性能機の試験運転も成功裏に実施された。これらの開発成果は民間会社である日本原燃株



第7図 六ヶ所ウラン濃縮工場（日本原燃株）

（旧原燃産業株）に引き継がれ、青森県六ヶ所村において我国初の商業規模のウラン濃縮工場が建設され、1992年に運転が開始された。当初、150tSWU/yで開始された設備容量は、1998年に1,050tSWU/yまで拡張され、累計で約1,700tUF<sub>6</sub>の濃縮ウランを生産し出荷した。六ヶ所ウラン濃縮工場の全景を第7図に示す。設置された遠心分離機は概ね10年間の連続運転の後、2010年までに計画的に順次停止された。引き続き新素材の新型機への取替えが始まっており、初期導入分の37.5tSWU/yについて2012年3月から生産運転が開始されている。第8図に六ヶ所濃縮工場に設置された遠心分離機（新型機）を示す。なお、



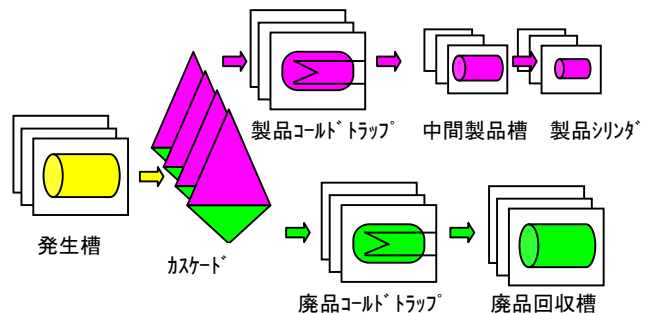
第8図 遠心分離機（新型機）

新型機については、製造も日本原燃が実施している。六ヶ所濃縮工場は、最終的な規模として1,500tSWU/yを予定しており、これは100万kW級の発電用軽水炉約12基分の年間取替燃料に充当可能な分離作業量である。

#### 3.2 六ヶ所濃縮工場の概要

##### (1) 主要工程

六ヶ所ウラン濃縮工場の主要工程を第9図に示す。原料となる天然ウランのUF<sub>6</sub>は、鋼鉄製のシリンダに充填された状態で海外から輸入される。原料シリンダを発生槽に入れ、温水により加温して固体UF<sub>6</sub>から直接気化させ、圧力を調節してカスケードに送る。カスケードは、数10台～数100台の遠心分離機を接続して効率よく無駄なくウラン濃縮を行うための分離ユニットであり、所定の濃縮度及び量の製品を得るため、要所流量を調整して使用



第9図 ウラン濃縮工場主要工程



原料量、生産時間及び廃品濃度を最適化できるように考慮されている。カスケードで分離された濃縮流と減損流は、それぞれ製品コールドトラップと廃品コールドトラップに捕集される。コールドトラップは、ステンレス製の容器の内部にフィンの付いた冷却管を設置したものであり、冷凍機から送られた冷媒が循環している。気体のUF<sub>6</sub>は、コールドトラップ内部に霜状に付着し、内部の圧力が低下するので、ポンプを使用することなくUF<sub>6</sub>ガスを移動させることができる。コールドトラップが満量に達すると、捕集された濃縮ウランのUF<sub>6</sub>は、中間製品槽に送られる。この時、コールドトラップは加熱され、中間製品槽内の中間製品シリンダは低温の空気により冷却される。発生回収室の様子(写真は発生槽)を第10図に示す。取り出された中間製品シリンダは、後処理工程に搬送され、濃縮度調整、液化均質処理、サンプル分析等を行った後、製品シリンダに小分けされ、貯蔵される。第11図



第10図 発生回収室



第11図 均質室



第12図 中央制御室

に均質室の様子(写真は均質槽(奥)と製品回収槽(手前))を示す。一方、廃品についても同様な操作により、最終的にシリンダに回収され、貯蔵される。なお、廃品シリンダは、空になった原料シリンダを使い回して有効活用している。工程維持のためには、シリンダ取扱い作業、バルブ操作等の現場作業が不可欠であるが、これらの操作を確実にを行うため、中央制御室(第12図に示す)と連携をとりながら作業を実施している。また、中央制御室では、工場設備の運転状況を24時間体制で集中監視しており、必要な訓練を受けた運転員が対応している。

## (2) 安全上の考慮

ウラン濃縮工場においては、当然の事ながら濃縮ウランを取り扱うので、臨界事故(原子炉以外の場所における偶発的な連鎖反応)を防止する対策が講じられている。主工程においては大量のUF<sub>6</sub>を取り扱う必要があるため、容器の大きさを制限する方法は適当でない。その代わりに、濃縮度制限と減速材の抑制を組合せた管理方法が採用されている。まず、カスケードの運転に際しては、濃縮度制限値(5w%)を超える運転条件となる圧力・流量の範囲に対してインターロックが設定されており、万一誤操作等によってこの運転領域に入り込む可能性が生じた場合には、自動的に濃縮流と減損流を混合する運転モードに移行し、濃縮度が制限値を超えないようにしている。その

うえで、UF<sub>6</sub>を収納する容器に、減速材となり得る水分が混入しないように管理している。そのため、工程の随所で圧力と温度を適宜測定し、その温度におけるUF<sub>6</sub>の平衡蒸気圧と比較して不純ガスの含有量を評価し、必要に応じて不純ガスを排気してUF<sub>6</sub>の純度を高める。なお、不純ガスのうちフッ化水素が最も中性子減速効果が大きいので、不純ガスの全量をフッ化水素と仮定した最も厳しい条件で臨界安全性評価がなされている。なお、水分を管理することが困難な使用済み吸着剤の廃棄処理やシリンダ洗浄等の湿式工程においては、取扱うウランの量を制限する管理方法等が採用されている。

UF<sub>6</sub>は、容器から漏洩すると空気中の水分と反応して猛毒のフッ化水素を生じるので、常に閉じ込めておく必要がある。そのため、工程の大部分が大気圧よりも低く維持されており、室内への漏出リスクを低減化している。内部の圧力が大気圧を超える液化均質工程等については、シリンダを耐圧気密槽に収納して閉じ込めバリアを多重化するとともに、槽内空気中のフッ化水素の有無を常時監視している。UF<sub>6</sub>配管の着脱操作や機器類の分解を行う部屋においては、室内を負圧に維持するとともに排気中の放射能濃度やフッ化水素濃度を常時監視している。

日本は地震国であるので、六ヶ所濃縮工場の建物及び設備・機器は、国が定めた指針に従い、立地地点で想定される最大の地震力に対して十分耐えられるように設計・建設されている。遠心分離機については、破損時の衝撃が閉じ込め性能の低下に繋がらないように、ケーシングの強度が特に考慮されている。もともと遠心分離機は、通常運転時においても偶発的に破損することが想定されているため、確認試験により十分なケーシング強度を有することが実証されている。なお、財産保護の観点から、我国の遠心分離機は、発生頻度の高い通常規模の地震程度では容易に破損しないように構造上の考慮がなされている。

六ヶ所ウラン濃縮工場においては、保障措置の査察に使用される測定器に付属のアイストープを除けば、強い放射線を伴う物質を取り扱うことがない。工場内の作業で潜在的被ばくリスクが高まるのは、空の原料シリンダに接近する場合であるが、通常の作業時間内で被ばく線量が管理基準値に達することはない。したがって、遮蔽のための設備は特に必要ない。なお、空の原料シリンダの内面には、ウランが崩壊して生成した娘核種が微量残存しており、また、高密度のウランによる自己遮蔽効果がないため、シリンダ表面の線量が比較的高くなっている。

## (3) 保障措置

保障措置とは、核分裂性物質が本来の使用目的から外れて核爆発装置等に転用されることのないように、その使用状況を国際条約に基づいて確認する活動であり、日

本国政府が主体となって国際機関（IAEA）も参加して実施されている。我が国が国際社会の中で原子力の平和利用を着実に進めていくためには、保障措置活動に対する誠実な対応が大前提となる。六ヶ所ウラン濃縮工場においては、遠心分離法によるウラン濃縮施設の特徴（短期間のうちに有意量の濃縮ウランを製造可能、遠心分離機に関する機微な技術情報を確実に管理する必要性等）に応じた査察手法が開発され適用されている。

（i）頻度限定無通告査察：

査察官が抜き打ち的に濃縮施設を訪れてカスケード室に立ち入り、配管の組み換えや秘密の回収設備の追加設置等が行われていないことを確認する。確認作業は、施設の操業開始に先立って事業者から申告され査察当局が確認した技術情報に基づいて実施される。この技術情報は、封印コンテナに保管されており、査察官が工場外に持ち出すことはできない。また、カスケード室に立ち入ることができる査察官の国籍は、予め指定された遠心分離法の技術を既に保有している国に限られる。

（ii）実在庫検認：

定期的に現場の貯蔵量を計量して帳簿と比較する。受け入れ量と外部への払い出し量を確認する。年に1度、工程内の保有量を回収して計量する。

査察活動においては、必要に応じてサンプルの採取、非破壊検査法による配管やシリンダの内部に存在するウランの濃縮度測定等が実施されている。

（4）機微情報の管理

遠心分離機に関する技術情報のうち機微なものについては、国際約束に基づいて厳重に管理することが求められている。基本的な分離理論等については、出版物により既に公表されているが、実際に遠心分離機を製作しようとすると、詳細な設計情報、特殊な材料や部品の入手、加工方法、表面処理、長尺弾性回転胴のバランス等に関するノウハウが不可欠となり、これらについては外部に拡散することのないように、特に注意が払われている。また、我が国の遠心分離機に関する単機分離性能、回転胴等の寸法、周辺速度、流動特性、運転流量、操作圧力、温度等の情報も一般公開されていない。見学ツアー、パンフレット、技術資料等の配布においても、遠心分離機の全体像や配管の接続状況が判明しないように考慮されている。

3.3 我が国のウラン濃縮事業の今後の課題

ウラン濃縮事業は、世界中の主要国において数多く実施され、あるいは計画されており、当面は供給過剰状態が続くため、濃縮役務費（kgSWUあたりの単価）の面で厳しい競争に直面している。世界のウラン濃縮の主流は遠心分離法に移っており、我が国の遠心分離機は、性能の面ではトップクラスに属するものと考えられるが、厳しい競争に勝ち残るためには、一層のコスト削減及び信頼性向上に努力していく必要がある。特に、遠心分離機の部

品に関する材質、構造の改良、製作工程の合理化等を引き続き推進していくことが重要である。

4. 世界の濃縮工場

4.1 ガス拡散法による濃縮事業の発展と衰退

世界における原子力発電が本格的に始まる以前の1940年代に、ガス拡散法による濃縮施設が既に運転開始していた。当時の需要の殆どが軍事目的のものであった。その後、ガス拡散法の設備容量は世界各地で増大し続け、1980年代にピークを迎え、その合計は約40,000tSWU/yに達した。米国は、国内3箇所のサイトに合計27,300tSWU/yの世界最大容量を保有していた。フランスは2箇所のサイトに合計11,200tSWU/yの容量を、英国が400tSWU/yの容量でこれに続いていた。フランスのガス拡散濃縮工場を第13図に示す。（画面右側の川沿いに4基の発電用原子炉



第13図 フランスのガス拡散濃縮工場

が見える。これらは大電力を消費する濃縮工場の付属施設である。）当時のソ連もガス拡散法による濃縮施設（推定7,000～10,000tSWU/y）の運転経験があったものと考えられるが、1983年の時点で遠心分離法への切り替えがかなり進んでおり、その容量は3,000tSWU/yであった。ガス拡散法の容量がピークを過ぎると、入れ替わりに遠心分離法の容量が急速に増大し始めた。現在、米国においては、ガス拡散法のサイトは1箇所（8,000tSWU/y）のみが運転されているが、間もなく遠心分離法の施設が運転開始になれば停止される予定になっている。フランスにおいてもガス拡散法濃縮施設の操業が既に停止され、遠心分離法への転換が急ピッチで進んでいる。

4.2 遠心分離法のシェア拡大

遠心分離法による濃縮事業を本格的に開始したのは、英国、ドイツ及びオランダの3カ国が共同設立したURENCO社である。URENCO社の欧州における設備容量は、設置する遠心分離機の性能向上（機種によって40～100kgSWU/y（推定値））に伴って増大し、2000年が

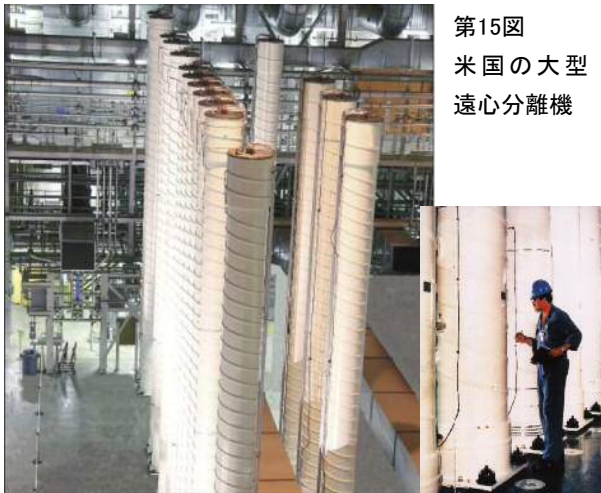




第14図 URENCO社の遠心分離機

4,800tSWU/y、2007年が約10,000tSWU/y、そして2012年には14,000tSWU/y以上に達している。第14図にURENCO社の遠心分離機を示す。

かつて米国においては、ガス拡散法に代わる濃縮技術として遠心分離法と原子レーザー法の研究開発が並行して実施され、経済性等が比較検討された結果、一度は原子レーザー法の推進が決定されたことがあったが、計画が思うように進展せず、今は遠心分離法に転向している。米国の遠心分離法による濃縮工場は、2010年に運転開始し、2012年には3,800tSWU/yとする計画であったが、数年の遅れが発生している。米国の遠心分離機は、高さ10数m



第15図  
米国の大型  
遠心分離機

にも達する大型機（分離性能350kgSWU/y）であり、我国や欧州の遠心分離機とは大きく異なるため、実用化の成否及び経済性が注目されている。また、米国においては、URENCO社とフランス企業のAreva社による濃縮事業がそれぞれ推進されている。URENCO社は2010年に200tSWU/yの初期容量でスタートし、2012年までに400tSWU/yになっている。Areva社は2013年に500tSWU/yの初期容量で開始し、2017年に3,000tSWU/yとする計画である。なお、Areva社もURENCO社の遠心分離機の技術を導入している。このほか、米国はSILEX法を採用した3,500~6,000tSWU/y規模の濃縮工場を計画しており、間もなく一部運転開始とされているが、詳細については不明である。Areva社は、南フランスにある老朽化した拡散法の濃縮設備を遠心分離機により置き換える計画を進めており、2007年に建設が開始され、現計画の最終的なプラント規模は7,500tSWU/yであり、2016年の完成が見込まれている。

ロシアは、早い時期からガス拡散法から遠心分離法への切替えを推進しており、1992年にはすべての設備容量が遠心分離法によるものとなった。2012年の時点でロシアは国内4個所のサイトに合計23,000tSWU/y以上の容量を保有している。ロシアの遠心分離機は、第16図に示すように短い回転



第16図 ロシアの遠心分離機



第17図 ロシアのUF<sub>6</sub>取扱設備

胴を採用して共振点通過時の振動問題を回避するサブクリティカル型であり、単機の分離性能が低いので、遠心分離機を大量生産して積重ねて設置する必要がある。しかし、ロシアは遠心分離機の改良及び旧式遠心分離機の更新を着々と進めており、現在開発中の第9世代機は、先進諸国の遠心分離機と同様な、長い回転胴を共振点を越えた回転速度で運転するスーパークリティカル型になると言われている。

中国は、旧ソ連の協力で1964年からガス拡散法による軍事用の濃縮ウランを生産していた。また、中国独自の濃縮工場が他の場所に建設されて運転されたが、現在は閉鎖されている。現在、中国は国内2箇所にロシア製の第6世代の遠心分離機を設置した濃縮工場を保有しており、その合計容量は1,000tSWU/yである。

2012年時点で遠心分離法による世界の設備容量は、約45,000tSWU/yに達しているものと考えられ、遠心分離法以外の方法による容量は、ごく僅かに過ぎない。

#### 参考文献

- 1) 原子力化学工学 第V分冊「同位体分離の化学工学」、第VII分冊「ウラン濃縮の化学工学」  
清瀬量平 日刊工業新聞社
- 2) 日本原燃ホームページ <http://www.jnfl.co.jp/>
- 3) Google Earth
- 4) URENCO Annual Report 2000, 2004
- 5) Nuclear Engineering International, January 2008
- 6) USDOEパンフレット1982
- 7) Angarsk Electrolysis Chemical Complex brochure  
(発行年不明)
- 8) AREVA press June 07. 2012

日本原燃株式会社 濃縮事業部 森上良雄  
(2013年1月25日)