

ウラン濃縮技術—遠心分離法—

Uranium Enrichment—Centrifuge Process—

玉 井 浄*

Kiyoshi Tamai

はじめに

遠心分離法ウラン濃縮技術の研究開発には既に30年余の歴史がある。その間回転胴材料や回転技術等の目覚ましい発展に支えられて、ヨーロッパと日本とは既に商業化の段階にはいっている。レーザー法等新技術の台頭の中で進められる今後の研究開発の方向を探ってみる。

1. 遠心分離法開発の歴史

1906年、B. B. Boltwoodは、それまでイオニウムと云う名称で知られていた元素の化学的性質が、トリウムと全く同じであることをつきとめた。これこそ人類が同位体の存在に気付いた初めての出来事であった。

同位体の分離に遠心分離機を利用しようとする考えは、早くも1919年にF. A. Lindemannによって提案されたが、その実証は1938年のJ. W. Beamsらによる塩素同位体の分離試験を待たなければならなかった。J. W. Beamsらは更にウラン同位体分離、即ちウラン濃縮の試験も行ない、1941年には少量の分離に成功した。

J. W. Beamsらの一連の試験によって遠心分離機がウラン同位体の分離に有効であることが明らかとなったが、これを実用目的で利用するためには、遠心分離機を長期間連続運転可能なようにすると云う困難な問題を解決しなければならなかった。

即ち、J. W. Beamsらが行なった試験は遠心分離法によるウラン濃縮の可能性を明確に示す点で先駆的なものであったが、考案された遠心分離機そのものはウラン濃縮を実用化する可能性を期待させるようなものではなかった。

第二次大戦中、アメリカのE. V. Murphryらは、マンハッタン計画の一環として遠心分離法の実用化研

究を行なったが、ガス拡散法の開発に先行されたため、目的を達成する前に中断してしまった。

第二次大戦後、ドイツのW. Grothらは本格的に遠心分離法の研究を開始し、1958年にアルゴン同位体分離やウラン濃縮について有望な試験結果と分離の理論を発表した。

一方、オーストリアのG. Zippeは、第二次大戦後もソ連に抑留されて遠心分離法の研究に従事していたが、その後「西側」に復帰してその模様を紹介すると共に、1960年にはその再現試験をアメリカで実施して結果を発表した。

G. Zippeの遠心分離機は、寸法も小さく分離能力も小さなものであったが、機械構造の点では多くのユニークな特徴を備えており、世界的な注目をあびた。

遠心分離法は1941年J. W. Beamsらによる原理試験の後、第二次世界大戦の激動に揺さぶられながらも、20年を経た1950年代の末になって、理論と装置の両面にブレークスルーが見られたわけである。

2. 遠心分離機の構造

遠心分離機は同位体混合物を質量の差によって分離するものであるから、ウランはガス状でなければならない。常温付近でガス状となるウラン化合物は六フッ化ウラン (UF_6) のみである。(図-1)

六フッ化ウランは通常の有機物や水とは反応するが、

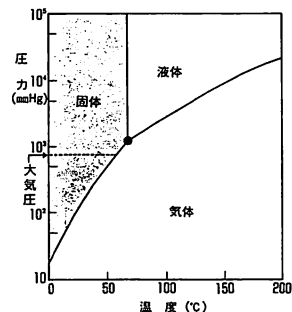


図-1 六フッ化ウランの状態図

*日本原燃産業㈱取締役

〒102 東京都千代田区平河町1-2-10

フッ素樹脂、アルミニウム、ステンレス鋼とは反応しない。

天然ウランの中で核分裂性を持つ同位体は、U-235のみで、これを非分裂性のU-238と分離するのが、ウラン濃縮である。両同位体の原子量差は、わずかに3しかないので、これらを効果的に分離するためには、遠心分離機そのものに種々の厳しい機能が要求される。

2.1 遠心分離機が具備すべき機能

ウラン濃縮用遠心分離機が具備すべき機能又は機構は以下の通りである。

- ①六フッ化ウランを高速回転させる中空円筒状の回転胴
- ②回転胴を駆動する高速モータ
- ③高速回転胴の発熱を防止するため、回転胴外側を真空に保つシール機構
- ④高速回転胴を長期間安定に支える軸受
- ⑤高速回転胴の振動を抑制するダンピング機構
- ⑥回転胴の中に六フッ化ウランを連続的に供給、抜き出しをする機構
- ⑦回転胴から抜き出す（又は抜き出した）六フッ化ウランを昇圧する機構
- ⑧回転胴内の六フッ化ウランに向流（又は並流）を起こさせる機構

2.2 遠心分離機の一例

図-2は、G. Zippeがソ連で考案し米国で再現試験をして、1960年に発表した遠心分離機である¹⁾。以下にこの遠心分離機の特徴を記す。

- ・この遠心分離機はアルミニウム合金製の小形回転胴を円板状の直結モータで駆動し、回転胴上部を外から囲むようケーシング内部にネジ式分子ポンプを設けてシールとしている。
- ・回転胴の支持については、上部を弾性体ダンパを介した磁気軸受、下部を油ダンパを備えた細いニードル軸受によるものとして、軸受の摩擦損失を最少にすると共に、回転に伴う振動を吸収できるようにしている。
- ・六フッ化ウランの抜き出しは、回転胴上部の開ロ部から固定パイプを回転胴内部に挿入したいわゆるスクープによるものとして、濃縮ウラン用と減損ウラン用の2つがそれぞれ回転胴内上端と下端に設置されている。両スクープの先端を回転胴内壁近くの六フッ化ウラン高圧部まで伸ばして必要充分な圧力を持ったガスを抜

* フッ素には同位体が無いので、六フッ化ウランの場合にも分子量差は3である。

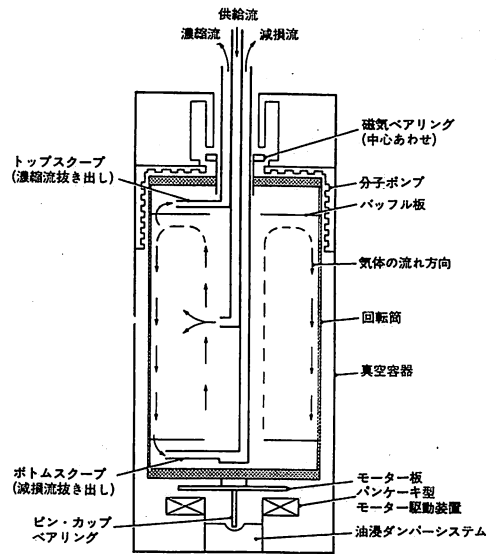


図-2 Zippe型遠心分離機¹⁾

出すことができるようにしている。

・回転胴内のガスに向流を発生させる手段としては、上下のスクープの形状寸法に差異をつけ、これによって循環向流を起こさせるようにしている。

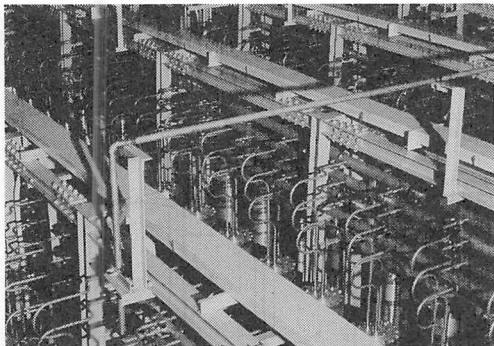
3. 世界の遠心分離法ウラン濃縮プラント

1960年代に入ると、原子力発電の大巾な伸びが期待されたことに伴ない、自国の燃料サイクルの自立を求める機運が高まり、世界の先進工業国で遠心分離法の開発が活発化した。

3.1 日本の状況

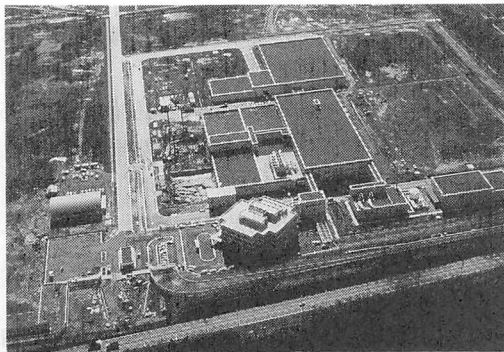
日本では理化学研究所で1959年に着手された遠心分離法の研究が、その後原子燃料公社を経て動力炉・核燃料開発事業団（動燃事業団）に引継がれ、数百台規模のカスケード試験の後1976年には、原子力委員会によって数千台規模のパイロットプラント建設計画が承認された。

その後、米国では民主党カーター政権が核不拡散のための極端な政策を前面に打出し、工業化実績のないわが国はウラン濃縮事業への参入の道を閉ざされかねない事態となった。この事態は1977年から2年半に亘るINFCE（国際核燃料サイクル評価）の検討作業を通じて、国際保障措置（国際原子力機関の査察等）によって核拡散が防ぎ得ると云う日・欧の主張が米国を納得させたこと、INFCEの検討作業後半の1979年に岡山県人形峠のパイロットプラント第一期分を運転開始にこぎつけて実績を示したこと、何とか危



動力炉・核燃料開発事業団提供

図-3 パイロットプラント (OP-1A) カスケード



日本原燃産業(株)提供

図-5 六ヶ所ウラン濃縮工場の現状



動力炉・核燃料開発事業団提供

図-4 原型プラント (DOP-2) のカスケード

機を乗り切ることが可能となった。

パイロットプラントはその後、第二期分および第三期分の増設を進めて、1982年には数千台の全面運転となった。その間、1980年頃には、ウラン濃縮を事業化する機運が高まり、1985年には動燃事業団が一部民間出資を得て、商業化前段階の原型プラントの建設に着

手した。

商業プラントについては、サイトを青森県六ヶ所村とすることについては1985年に地元と電力業界との合意が成立した。この間1985年3月には、ウラン濃縮の商業化を業とする日本原燃産業(株) (原燃産業) が電気事業者を中心として設立され、これによって六ヶ所村の1,500トンSWU/年プラントの計画が実現に向かって動き始めることとなった。

原燃産業はその後1988年に、600トンSWU/年分について原子炉等規制法にもとづく事業許可を受け、直ちに建家建設工事を開始した。このプラントは150トンSWU/年づつ4回に分けて工事を進め、1991年度に最初の150トンSWU/年分の操業を開始し、1994年度に全面操業とする計画となっている。600トンSWU/年分の完成に引き続いて原燃産業は残りの900トンSWU/年分を増設し、10年を掛けて1,500トンSWU/年とすることとしている。

商業プラントの建設と並行して、動燃事業団、原燃

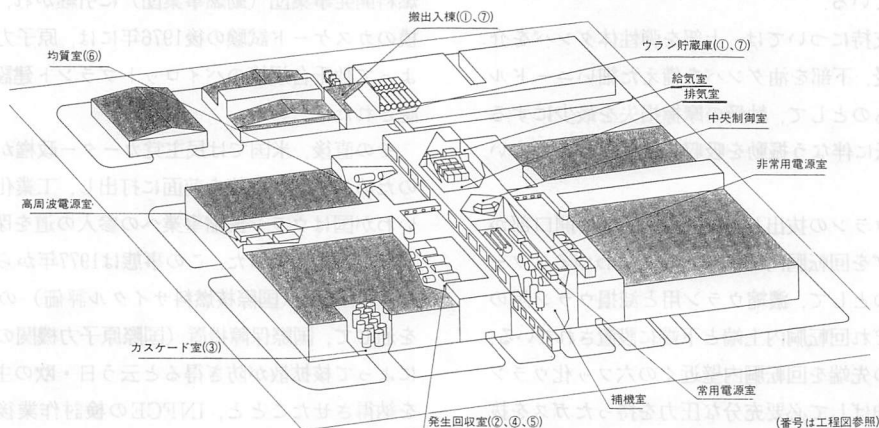


図-6 六ヶ所ウラン濃縮工場完成図

産業および電気事業者は遠心分離機メーカーの協力を得て、新素材回転胴を採用した高性能機の開発を進めている。今後パイロット規模の試験を経て、六ヶ所ウラン濃縮プラントに採用される予定である。

3.2 ヨーロッパの状況

ヨーロッパでは、英国、ドイツ（当時の西独）、オランダ、フランス、イタリアがそれぞれ独自に遠心分離法の研究を進めていたが、パイロットプラント計画を具体化する段階に達した英、独および蘭の3国が1972年になって多国間合弁事業としてURENCO社を設立した。他の2国はその後研究開発を中止したので、URENCO社はヨーロッパで遠心分離法の事業並びに研究開発を統括する唯一の企業となった。

URENCO社は前記3国のパイロットプラントを所有する他、英国のCapenhurst、ドイツのGronau、およびオランダのAlmeloに実証プラントや商業プラントを持ち、それらの生産能力は合わせて2,300トンSWU/年程度となっている。

URENCO社は更に、米国の電気事業者等との合弁でルイジアナ州に1,500トンSWU/年規模のプラントを建設する計画を進めている。

3.3 米国の状況

米国では第二次大戦中に遠心分離法の研究開発を行なったが、この遠心分離機は遂に実用化されることが無く、ガス拡散法のプラントが実質的に濃縮ウランのすべてを供給して今日に至っている。

この間1970年代の中頃から、米国では超大型遠心分離機の開発を手掛け、現実にPortsmouthに商業プラントの一部を建設するところまで進めていたが、1985年になって計画を放棄した。これは世界的に濃縮ウラン需要が伸びなやんでいた上に米国のシェアが低下したため、既設のガス拡散プラントで充分に供給を続けることが可能と見られたことと、将来計画に関しては遠心分離法よりもむしろレーザー法に託すこととしたためであるとされている。

3.4 ソ連の状況

ソ連のウラン濃縮プラントは比較的最近までガス拡散法によるものであると信じられていたが、1989年になってそれが遠心分離法によるものであることをソ連自から公表した³⁾。ソ連は従来から年間3,000トンSWU程度を西ヨーロッパに供給していたが最近の外貨不足、核軍縮機運の中で一層「西側」市場開拓に積極的となっている。

表1 各国のウラン濃縮工場（稼働中）

国名	濃縮法	工場所在地	規模	引用
アメリカ	ガス拡張法	ボーツマス パデューカ	約7,900tSWU/年 約11,300tSWU/年	2)
ユーロディフ フランス （含め五ヶ国）	ガス拡張法	トリカスタン	約10,800tSWU/年	2)
ウレンコ イギリス オランダ ドイツ	遠心分離法	カーベンハースト アルメロ グロナウ	約1,000tSWU/年 約1,050tSWU/年 約250tSWU/年	2)
日本	遠心分離法	人形峠 六ヶ所	200tSWU/年 150tSWU/年	
ソ連	遠心分離法		?	3)

4. 遠心分離法ウラン濃縮プラントの特徴

遠心分離機は1台当たりの分離能力が小さいため、発電用原子炉に必要な濃縮度のウランを或る程度の量生産しようとする時、多数の遠心分離機を直列および並列に配置したいわゆるカスケードを組む必要がある⁴⁾。大量の濃縮ウランを生産する場合には、このようなカスケードを更に多数並列に設置して、一つのプラントを形成するのが普通である。

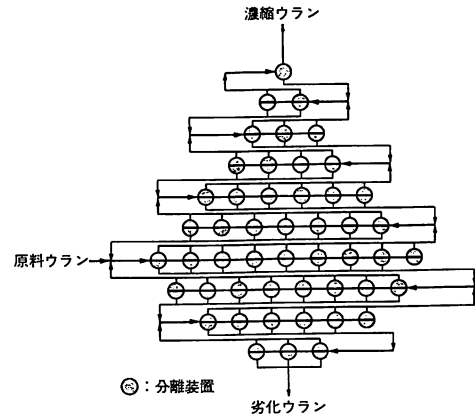


図-7 カスケードの概念⁴⁾

遠心分離法ウラン濃縮プラントが、このような特徴を持っているため、商業プラントは濃縮ウランの需要に合わせて逐次建設することが可能で、更にその間に優れた新技術（遠心分離機本体であれ、周辺設備であれ）が開発されれば、それを適時増設計画の中に取り込むことが可能である。

商業プラントに於いては、遠心分離機は数千台、数万台の規模の台数となるので、故障機を修理して再使用することは現実的でない。一時米国で建設を開始した遠心分離機を除き、日本およびヨーロッパの遠心分離法ウラン濃縮プラントは、すべてこのようなメンテナンスフリーの思想で設計されている。

この場合、故障機が増えて来れば、当然濃縮ウランの生産量が低下するので、10年程度で新しい遠心分離機と交換することとしている。交換の際に、改良遠心分離機が開発されていれば、これを採用しプラントの経済性を向上することが可能である。

5. 今後の研究開発の展望

遠心分離機の研究開発には色々な側面があるが、ここでは性能と経済性に焦点を当てて今後を展望してみる。

5.1 遠心分離機の性能

遠心分離機の性能は、分離の質（程度）と量の双方を勘案した「分離仕事量（又は分離パワー）」を尺度として評価される。

遠心分離機の分離仕事量（ δU ）は回転胴の周速（ V …回転円筒上の1点が旋回運動をする速さ）と回転胴長さ（ Z ）の関数である。

$$\delta U \propto V^2 Z^3 \quad \dots\dots(1)$$

理想条件の下では、 $p=4$ 、 $q=1$ で、周速の影響が極めて大きい、周速が早くなると p は2程度まで下がってしまう³⁾。

一方、回転円筒が遠心力の場で耐える最大周速（ V_{max} ）は、円筒材料の引張り強さ（ σ ）と密度（ ρ ）に依存する。

$$V_{max} \propto \sqrt{\sigma/\rho} \quad \dots\dots(2)$$

表2は、代表的な高周速材料の特性と最大周速を示したものである。ここで、ガラス繊維/樹脂等の複合材料は当然繊維の方向によって強度が大きく異なるので、この表から一義的に遠心分離機の回転周速を決めることはできない。

表2 各種材料の最大周速¹⁾

材 料	引張強さ (kg/cm ²)	密度 (g/cm ³)	最大周速 概 略 値 (m/s)
Cr-Ni 鋼 (1935)	13000	8.0	400
アルミニウム合金	5200	2.8	425
チタニウム	9200	4.6	440
マレージング鋼	22500	8.0	525
ガラス繊維/樹脂	7000	1.9	600
炭素繊維/樹脂	8500	1.8	685

5.2 遠心分離機の経済性

自動車やオートバイのような量産機械製品は、一般に製品の価格がその重量にほぼ比例するものである。

遠心分離機の製作費（ C ）についても、同一技術水準にある機種（同一周速の機種）については、自動車等と同様の関係が成り立つものと考えられる。

$$C \propto D^2 Z^3 \quad \dots\dots(3)$$

ここで D は遠心分離機の直径、 Z は高さである。前記量産機械製作費の考え方に従うと、

$$u \approx 2$$

$$v \approx 0.5$$

と設定することができるであろう。

回転胴周速の異なる機種との比較の場合でも、遠心分離機の構成部材と機構に大きな差異がなければ、この式は成り立つものと考えて支つかえないであろう。

式(1)と式(3)とから、単位分離仕事量当たりの年間遠心分離機費用（償却費）は、

$$\frac{\text{遠心分離機の年間費用}}{\text{分離仕事量}} \approx \frac{D^2 Z^{0.5}}{V^4 ZL}$$

$$\approx \frac{D^2}{V^4 Z^{0.5} L} \quad \dots\dots(4)$$

ここで L は遠心分離機の耐用年数（寿命）である。

式(4)は非常に大雑把な近似式であるが、遠心分離機の経済性を向上するためには回転胴の周速を上げることが有効であることを示している。直径に関しても式(4)は大きな効果のあることを示唆しているが、実際には遠心分離機部品の組立精度等の点から、高周速・小径化には必ずから限度があるものである。

5.3 今後の研究開発

前項に記したように、遠心分離機の経済性向上に実効のある方策は、回転胴の高周速化と長胴化とである。

①高周速化を実現するためには、回転胴に堅くて強い材料を採用する必要がある。金属材料は等方性であるため、表2から概略の最大周速が予想できる。複合材料に関しては、どんな繊維を選ぶか、繊維の巻付角度をどう選ぶか等の成形にかかわる設計によって最大周速は大きく異なる。回転円筒には遠心力以外の応力も働くので、次に記す回転胴長さとの関係で設計を定め、高周速を実現することが必要である。

②回転胴の長胴化に伴って、胴の振動対策がむづかしくなる。そのため、軸受および振動抑制技術の向上によってこの問題を克服することが必要である。

③遠心分離機の分離仕事量が回転胴周速の2乗程度に比例することは5.1に記した通りであるが、回転胴内の六フッ化ウランの循環流の流型を改善して、この2乗則を少しでも4乗則に近づけることも今後の研究課題である。

おわりに

遠心分離法は国の内外を問わず既に実用化の段階にあるが、回転胴材料や回転技術には向上の余地が充分にある。遠心分離法ウラン濃縮プラントは逐次増設と云う特徴を持っているため、技術向上の成果は何時でも採用することが可能である。今後の研究開発の成果が大いに期待される所である。

参 考 文 献

- 1) W. マーシャル編, 内藤奎爾監訳; 燃料サイクル (上) (1987) 筑摩書房
- 2) 原子力ポケットブック (1991年版) 日本原子力産業会議
- 3) A. Chernov; "Uranium Enrichment in the USSR" Annual Symposium of the Uranium Institute, (1989)
- 4) 安成弘他編; 原子力ハンドブック (1989) オーム社
- 5) M. Benedict et al著, 清瀬量平訳; 原子力化学工学 (昭60) 日刊工業新聞社

他団体ニュース

鉱物資源データベース研究会 会員募集 (1991) のお知らせ

資源問題を考えるとき、日頃から情報を収集、整理しておくことが如何に大切かはしばしば痛感することあります。そこで、社団法人資源・素材学会 資源経済部門委員会では近年コンピュータが手軽に使えるようになったのを背景に使いやすい鉱物資源データベースを作製いたしました。収録いたしましたデータは、生産量、用途、価格、リサイクル、備蓄、埋蔵量、需給予測などの項目に分け合計約60,000件を収めました。このデータベースはいわば何10年間に渡る鉱物資源統計年鑑に相当するものです。

このような鉱物資源データベースが完成いたしましたのを契機に、資源経済部門委員会では多くの方々へのデータベースをご利用頂くために昨年より鉱物資源データベース研究会を発足させました。おかげさまで多数の方々にご入会いただき、鉱物資源データベースKSDBを活用頂いております。つきましては、この度、1991年版を12月末刊行予定で準備を進めておりますので、ご案内申し上げます。会員の方々には下記の価格で鉱物資源データベースKSDB1991を配布の予定です。

- 鉱物資源データベース1991 1セット 154,500円
(1990年版と交換あるいは、2セット以上購入希望の場合は交換費用;あるいは2セット以後の価格は50,000円です。)

※このデータベースを使用するためには NEC PC-9801シリーズのパソコンと Lotus 1-2-3 (日本語フロントプロセッサATOK 6) が必要です。

- 尚、このデータベースは今後も随時データを追加更新する予定であります。
- このデータベースのテストを希望される方には見本をお貸しします。下記にご連絡下さい。

[申し込み先]

〒104 東京都中央区新川2丁目10-6 カヤマビル 資源総合システム 資源経済部門委員会事務局
TEL 03-3551-6345 FAX 03-3553-8954

[払い込み先]

- ・ 太陽神戸三井銀行 新川支店 普通預金 267-5060954 資源経済部門委員会事務局
- ・ 郵便振替 東京3-169966 資源経済部門委員会事務局