

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 6

[技術情報室]

軽ガス用遠心分離機フィージビリティスタディ

1993年8月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

製
し

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001



軽ガス用遠心分離機フィージビリティスタディ

甲斐常逸

要 旨

遠心法の応用研究として、C、N、O等の元素から成る軽ガス分離用遠心分離機のフィージビリティスタディを行った。まず、どのようなガスに分離のニーズがあるのか、及びどの程度の価格で販売されているのか、又はどの程度の価格が見込まれるのかを調査した。

次に、既存のガス遠心分離機は専らUF。同位体の分離用に開発されたため、軽ガスに対しては微量のプロセス量しかフィードできず、不適であることから、新たな遠心分離機について検討し、その概念を提示した。

さらに、この遠心分離機を使ったカスケードの性能計算を行い、所要の濃度と量を生産するのに必要な遠心分離機台数を求め、濃縮コストを概算した。

その結果、遠心分離機の製造コストを補填できない限り、遠心法は軽ガス分離に関し、他の既存の方法に比し、大巾に割高となることが分った。

目 次

1. 序	1
2. ウラン以外の同位体及び不活性ガスの分離ニーズ	1
3. 軽ガス用遠心分離機の検討	5
4. 経済性検討	13
参考文献	17
資料	18

1. 序

マンハッタン計画以来、ウラン濃縮用遠心分離機は長い開発の歴史があり、現在、大規模な商用プラントが運転されている。

しかし、C, N, O等の元素から成る軽ガスの同位体分離に遠心分離機が使用された例は全く報告されていない。

この理由は、既存の遠心分離機はUF₆が352gと重い質量を持つことを利用して、軸封、ガス給排気機構等をデザインしているため、軽ガスを分離しようとするれば、わずかなプロセス量しかフィードできず、ほとんど分離性能を発揮できないからである。

ここでは、まず分離のニーズのあるガスの種類、価格等を調査した。次に、新たな軽ガス用遠心分離機について検討し、その概念を提示した。さらに、この遠心分離機を使ったカスケードの性能計算を行い、所要の濃度と量を生産するのに必要な遠心分離機台数を求め、濃縮コストを概算した。

2. ウラン以外の同位体及び不活性ガスの分離ニーズ

以下の分野で同位体及び不活性ガスの分離のニーズがある。(1) (2) (3) (4) (5)

- | | | |
|------------|---|--|
| ① ライフサイエンス | : | ¹³ C, ¹⁵ N, ¹⁷ O, ¹⁸ O |
| ② 原子燃料 | : | ¹⁵ N |
| ③ 物性向上 | : | Fe, W, S, Mo, C |
| ④ 有用不活性ガス | : | Ne, Ar, Kr, Xe |
| ⑤ 廃棄物処理 | : | ⁸⁵ Kr |

(1) ライフサイエンス

①群は、安定同位体であり、標識化合物として医療や食品改良の研究のため使われている。これ等同位体は主として米国、ロスアラモス研究所でI C O N S計画として開発され、蒸留法により生産されてきた。ロスアラモス研究所が発表した1984年の安定同位体の生産、販売状況は以下のとおりである。(2)

S I の生産、販売状況 (1984年)

核種	*-1 出荷量	*-1 LANL内消費量	*-2 LANLと共同研究	*-1 販売量	*-2 販売金額
¹³ C	8,100.633	1,255.000	753.100	6,092.533	7,730万円
¹⁵ N	9,971.189	104.100	87.900	9,779.189	10,800万円
¹⁷ O	242.927	2.500	1.500	242.927	1,350万円
¹⁸ O	5,691.790	123.500	106.200	5,462.090	2,870万円

*-1 per gram isotope

*-2 1 US\$ 130円換算

この表によれば、最も販売量の多い¹⁵Nでも、年間販売量は約10kgであり(2) 年間売上高は、約1億円(～1万円/g)である。

また、最近の日本における安定同位体の売上高は以下のとおりであり、1987年の合計でも1.5億円程度である。

最近3年間の日本における売上高(主要7社の売上高合計)

金額：円

年次 化合物	1985年	1986年	1987年
² H-Labeled *	14,000,000	17,000,000	22,000,000
前年対比伸び率(%)		121	129
¹³ C-Labeled	51,000,000	52,000,000	61,000,000
前年対比伸び率(%)		102	117
¹⁵ N-Labeled	46,000,000	47,000,000	52,000,000
前年対比伸び率(%)		102	111
^{17, 18} O-Labeled	12,000,000	15,000,000	20,000,000
前年対比伸び率(%)		125	133
合計金額	123,000,000	131,000,000	155,000,000
前年対比伸び率(%)		106	118

* ²H-NMR溶媒除く

(2) 原子燃料

最近事業団内で次世代FBRとして、窒化物燃料の研究が進められている。ここで、 ^{14}N は放射化して ^{14}C になることが嫌われ、 ^{15}N の安価大量生産が望まれている。

New York 州立大学石田孝信教授の試設計では⁽³⁾ 製造規模 500~4500kg/y の場合濃縮コスト（減価償却15年，副生成物売却は見込まない）は、19~20 \$ / g である。

(3) 物性向上

ソ連のウラン濃縮の事情紹介として⁽⁴⁾ Fe, W, S, Mo等の分離需要があるとされているだけで、内容は不明である。一般に、これ等各種の同位体分離をすることにより、熱伝導度、電気抵抗等の物性の向上が見込まれるが、分離コストが高いため、用途はきわめて限られたものとなると思われる。

(4) 有用不活性ガス

Ne, Ar, Kr, Xe 等の不活性ガスは

- ① ランプ
- ② 医療用像映剤
- ③ 検出管用ガス

等に使用されている。

この中で特にXeは大気中に約 0.1ppm しかなく、高価なガス（2,000~3,000 円/ℓ）である。

(5) 廃棄物処理

PNC再処理工場では、最処理工程で発生するオフガス中にXeが含まれていて、1日（処理能力 0.7ton /日）当たり約 800 ℓ 発生する。Xeの利用を図るためには、Xe中に含まれる濃度約 8%の ^{85}Kr を 0.1ppb 以下に下げることが必要である。100ppm 程度迄は蒸留法により下げることができるが、それ以下に下げするためには、新技術が必要である。

（参考）

回収Xe中のKr濃度	10^{-4}	(100ppm)
Krの規制濃度	10^{-10}	(0.1ppb)
Krの周辺監視区域規制濃度	10^{-11}	(0.01ppb)

Xeが利用できた場合、単価は 約2000円/ℓであるから、

PNC再処理工場（処理能力 70ton/年）：

$$70 \text{ (ton /年)} \times 800 \text{ ℓ} / 0.7 \text{ ton} \times 0.2 \text{ (万円/ℓ)} = 1.6 \text{ 億円/年}$$

下北再処理工場（処理能力800ton/年）：

$$1.6 \times \frac{800}{70} = 18 \text{ 億円/年}$$

程度が見込まれる。

3. 軽ガス用遠心分離機の検討

(1) UF₆と軽ガスとの違い

UF₆と軽ガスの主たる違いは以下のとおりである。

① モル分子量

UF₆が 352 g/mol に対し、軽ガスは 10~50 g/mol 程度であり、音速、平衡圧力分布が大巾に異なる。従って、軽ガスの場合、回転胴内中心圧はかなり高くなる。(資料1参照)

② 蒸気圧

蒸気圧は、UF₆が室温で 0.1気圧程度に対し、軽ガスは一般に大気圧よりはるかに高い。従って、軽ガスの場合、回転胴内ガス圧を充分高めても固化、液化の心配がない。

③ 反応性

UF₆は温度が上昇した場合、金属、有機物と反応して、UF₄、UO₂F₂等の固体の反応物となり、接触式の軸受や軸封を傷め易く、またアンバランスの原因となり易い。これに対し、軽ガスは一般に反応し難い。ただし、有機物、フッ化物等は個々に調査する必要がある。

④ 需要量

UF₆の場合、多量かつ長期間にわたって原子炉の燃料となるものであり、10年の長寿命、多数台遠心機運転の高信頼性といった過酷な条件が科せられているが、軽ガスの場合需要量が少なくこの様な条件はかなり緩和される。

(2) 軽ガス用遠心分離機のご概念

上記の特徴を考慮して軽ガス用遠心分離機のご概念を図1に示す。以下要素別に説明する。

① 回転胴

高速回転用長胴回転胴とし、ガス給排気を図のごとく、軸及び端板から行うものとした。

② 上部軸受、ダンパー及びシール

ラジアル及びスラスト荷重を受ける。

オイルシールに信頼性があれば、動圧浮上型のオイル軸受及びオイルダンパーが望ましい。

オイルシールの信頼性が不十分であれば、グリス潤滑ボールベアリングとする。

③ 下部軸受、ダンパー及びシール

オイルシールに信頼性があれば、プレイン型のオイル軸受とオイルダンパーが望ましい。

オイルシールの信頼性が不十分であれば、グリス潤滑ボールベアリングとする。

④ 駆動機

一般のカゴ型モータとする。

⑤ 真空ケーシング

構成要素のすべてを真空機密に保持する。

パッキングには必要に応じ、金属パッキンを使用する。

上、下フランジは耐食性、熱伝導度を考慮してアルミとする。

回転体破壊に備え、必要な防護用部品を具備する。

⑥ 分離方式

内部還流型ツインタイプ向流方式とする。図1は左側がWタイプ、右側がPタイプを示す。

本方式は、還流の割合を外部から操作できるため、フィード流量を少なくして、分離係数を高め易い方式である。また、ツインの遠心機を全体で見れば、 $\alpha \approx \beta$ の近くに分離性能の最適値があり、理想カスケードを組み易い利点がある。(資料2参照)

⑦ ガス給排気

フィードガスはフィード室から遠心機のポンピング力により、下部軸及び回転胴と下バッフル板間を通り、回転胴内に給気される。

プロダクト及びウエストガスは上、下の端板又はバッフル板間及び上、下軸を通り上、下端のプロダクト及びウエスト室から、外部のポンプにより排気される。

これ等とは別に分子ポンプの一次側から、立上げのため及び回転胴の外側を高真空に維持するため高真空ポンプで排気する。

⑧ 温度分布

上部のモーターの発熱を利用し、回転胴を適切な温度分布に保つ。

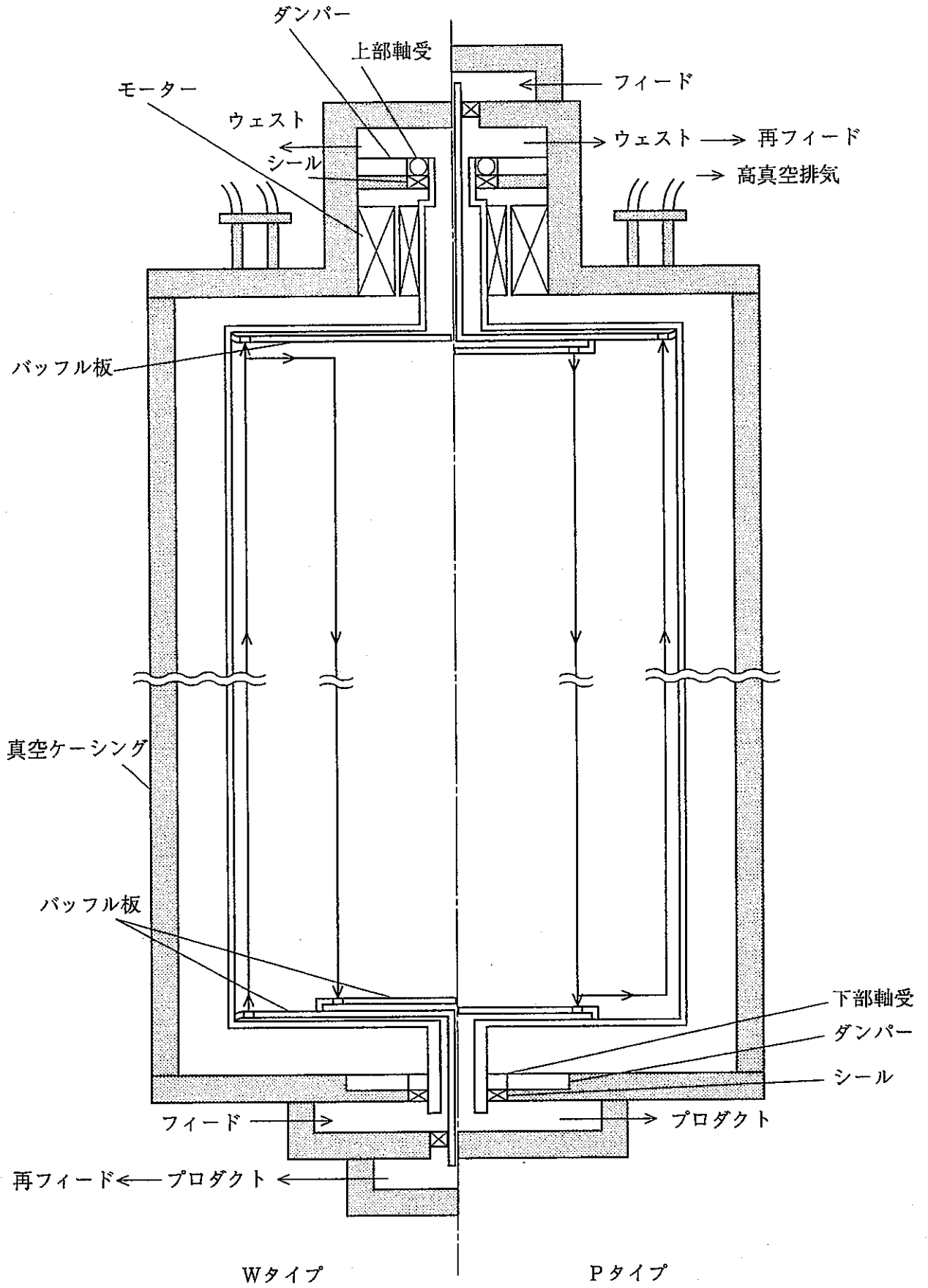


図1 軽ガス用遠心分離機概念図

(3) 遠心分離機単機の分離性能

以下にCohen⁽⁶⁾の1次元簡略モデル計算式を利用して計算する。

① 分離パラメータ

分離性能計算上重要なパラメータである ΔA の計算結果を表1に示す。

ΔA は次の式で定義される。

$$\Delta A = \frac{\Delta M (r_s \omega)^2}{2RT} \tag{1}$$

ここで、

ΔM : 被分離ガス間の質量差

$r_s \omega$: 回転胴の周速

$R = 8.31441 \times 10^7 \text{ erg} / \text{K}^\circ \text{ mol}$

T : 被分離ガスの温度 (k)

ここでは 330° K とする。

表1 分離パラメータ ΔA

$r_s \omega \backslash \Delta M$	1	2	3
500 (m/s)	0.0456	0.0912	0.1367
600 (m/s)	0.0656	0.1313	0.1969
700 (m/s)	0.0893	0.1787	0.2680
800 (m/s)	0.1167	0.2334	0.3501

② 分離係数

Cohenの1次元簡略モデル計算式により分離係数 α は次の式で表わされる。

$$\alpha = \frac{(1 + \Psi) \exp\left\{2 \varepsilon_0 Z_p \frac{2m}{1+m^2} (1 + \Psi)\right\}}{1 + \Psi \exp\left\{2 \varepsilon_0 Z_p \frac{2m}{1+m^2} (1 + \Psi)\right\}} \tag{2}$$

内部流の流型として、 $r_1 = 5 \text{ cm}$ $r_2 = r_s = 10 \text{ cm}$ の位置のシンフローのみを仮定れば、

$$\varepsilon_0 = \frac{B}{2\sqrt{2} r_2 \sqrt{\ln r_2 / r_1}}$$

$$\Psi = \frac{1}{B} \frac{P}{L}$$

$$B = \Delta A \left\{ 1 - (r_1 / r_2)^2 \right\}$$

ここで、

m : 循環パラメータ (= 2 とおく)

Z_0 : 回転胴長さ 300 cm

P : プロダクト流量

L : 内部循環流量

$P/L = 0.1$ とおく。

この計算結果を表 2 に示す。

表 2 分離係数 α

$r_s \omega \backslash \Delta M$	1	2	3
500 (m/s)	1.31	1.65	1.99
600 (m/s)	1.46	1.95	2.45
700 (m/s)	1.63	2.31	3.00
800 (m/s)	1.84	2.73	3.62

ここで α は、濃縮域の分離係数であり、ツイントタイプの P 型のヘッド分離係数である。W 型の分離係数も計算は可能であるか、そのテイル分離係数を β とおけば、ほぼ $\alpha = \beta$ となるのでここでは計算を省略する。

③ 製品流量

前記循環パラメータ m はシンフローモデルの場合、

$$m = \frac{L}{2\pi r_s D p} \sqrt{2 \ln r_2 / r_1} \tag{3}$$

で表される。ここで D は拡散係数で、 p は圧力である。

拡散係数は気体運動論により理論的に求まっており、

$$D = 0.0026280 \frac{\sqrt{T^3/M}}{p \sigma^2} \quad (4)$$

で表わされる。 σ はポテンシャルパラメータで実験により求まる。

この式より $D p$ は温度一定の時一定で、軽ガスの場合、温度を 330°K とすると、ほぼ $0.25 \text{気圧} \cdot \text{cm}^2 / \text{sec}$ である。

この時

$$L = 26 \text{気圧} \cdot \text{cc} / \text{sec}$$

また、

$$\begin{aligned} P &= L / 10 \\ &= 2.6 \text{気圧} \cdot \text{cc} / \text{sec} \\ &= 82000 \text{気圧} \cdot \ell / \text{year} \end{aligned}$$

④ 遠心機 1 台当りの分離性能

参考のため分離パワーを計算する。

今、プロダクト流量 P と分離係数 α から計算される分離パワーは

$$\begin{aligned} \delta U &= P \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \ln \alpha \\ &= 0.385 \quad [\text{気圧} \cdot \text{cc} / \text{sec}] \quad (5) \end{aligned}$$

ただし、 $r_s \omega = 700 \text{m} / \text{sec}$, $\Delta M = 1 \text{g} / \text{mol}$, $P = 2.6 \text{気圧} \cdot \text{cc} / \text{sec}$ とした。

最大分離パワーは

$$\begin{aligned} \delta U_{max} &= p D \Delta A^2 \frac{\pi}{2} Z \\ &= 0.921 \quad [\text{気圧} \cdot \text{cc} / \text{sec}] \quad (6) \end{aligned}$$

であるから、分離効率 η は

$$\eta = \delta U / \delta U_{max} = 42\%$$

となる。

(4) カスケードの性能計算

さらに、Cohen のカスケード理論を適用して前記遠心分離機を使用したカスケードの性能計算を行う。

① カスケードの必要段数

理想カスケードを組んだ時、カスケードの全段数 n_T は、原料と製品のモル比をそれぞれ R_F , R_P とすると、

$$\frac{R_P}{R_F} = \alpha^{n_T} \tag{7}$$

で表される。ここで α は遠心機のヘッド分離係数で、デイル分離係数に等しい。

この式を使い次の2ケースについて計算した。

(i) 1%濃度の原料から90%濃度に濃縮するのに必要な段数

$r_s \omega$ \ / \ ΔM	1	2	3
500 (m/s)	25	14	10
600 (m/s)	18	10	8
700 (m/s)	14	8	6
800 (m/s)	11	7	5

(ii) 1%濃度の原料から99%濃度に濃縮するのに必要な段数

$r_s \omega$ \ / \ ΔM	1	2	3
500 (m/s)	34	18	13
600 (m/s)	24	14	10
700 (m/s)	19	11	8
800 (m/s)	15	9	7

② カスケードの全遠心機台数

理想カスケードを組んだ時、カスケード全段を流れるフィード流量の合計 L^T は次の式で表される。

$$L^T = P \frac{\alpha + 1}{\alpha - 1} \left\{ (2N_P - 1)n_T + \frac{\alpha - (\alpha + 1)N_0}{\alpha - 1} \cdot \frac{N_P - N_0}{N_0(1 - N_0)} \right\} \tag{8}$$

ここで、

- P : カスケードのプロダクト流量
- α : 遠心機一段のヘッド分離倍数 (=テイル分離係数)
- N_p : プロダクト濃度
- N_0 : フィード濃度
- n_T : 全段数

$P = 1$ とおけば L^T はトップ段の遠心機を 1 台にした場合の全遠心機台数となる。

以下(4)項に対応した 2 ケースについてカスケードの全遠心機台数を求めた。

- (i) 1%濃度の原料から 90%濃度に濃縮するのに必要な台数
[トップ段 1 台, 回収域なし (フィード段のみ)]

$r_s \omega$ \ ΔM	1	2	3
500 (m/s)	2930 台	961 台	562 台
600 (m/s)	1392 台	589 台	372 台
700 (m/s)	1002 台	411 台	250 台
800 (m/s)	689 台	314 台	223 台

- (ii) 1%濃度の原料から 99%濃度に濃縮するのに必要な台数
[トップ段 1 台, 回収域なし (フィード段のみ)]

$r_s \omega$ \ ΔM	1	2	3
500 (m/s)	3664 台	1080 台	631 台
600 (m/s)	1781 台	664 台	416 台
700 (m/s)	1130 台	462 台	309 台
800 (m/s)	772 台	351 台	250 台

4. 経済性検討

遠心分離機は量産によるコスト低減効果が大きいため、需要量が多い同位体分離の方がコスト競争力が強くなる。

第2章で調査した中で、需要量が特に多い ^{15}N について、先ず検討し、全体の評価を行う。

(1) ^{15}N の分離

^{15}N は、天然のNの中に0.37%含まれており、残りは ^{14}N である。

この分離を2次の2段階で行うこととする。

第1段階 : N_2 ガスを原料として99%迄濃縮する。

第2段階 : 濃縮された N_2 ガスを NO ガスとして99%濃縮する。

① 第1段階

原料 N_2 ガスは以下の組成となっている。

$$\text{N}_2 \text{ (}^{14}\text{N, }^{14}\text{N)} = 0.9963 \times 0.9963 = 0.99261$$

$$\text{N}_2 \text{ (}^{14}\text{N, }^{15}\text{N)} = 0.9963 \times 0.0037 \times 2 = 0.00737$$

$$\text{N}_2 \text{ (}^{15}\text{N, }^{15}\text{N)} = 0.0037 \times 0.0037 = 0.00001$$

ここで、 $\text{N}_2 \text{ (}^{15}\text{N, }^{15}\text{N)}$ は無視できるので、0.7%濃度の $\text{N}_2 \text{ (}^{14}\text{N, }^{15}\text{N)}$ を99%濃度迄濃縮する計算を行う。

原料は安価であるから、回収域はフィード段のみとする。

使用遠心機は第3章の周速 700m /s 機とすれば、 $\Delta M=1$ であるから、表2より

$$\alpha=1.63$$

遠心機の分離パワー δU は(5)式より、

$$\delta U=0.117P \quad (9)$$

カスケードのフィード濃度 N_F 、プロダクト濃度 N_P は、それぞれ

$$N_F = 0.007, \quad N_P = 0.99 \quad (10)$$

カスケードのテイル濃度 N_W は、回収域かフィード段のみであるから、

モル比の関係式

$$R_W = R_F / \alpha \quad (11)$$

を用いて計算すれば、

$$N_W = 0.004276$$

となる。

カスケードの分離パワー δU_T は価値関数 $V(N)$ 及びカスケードカット θ_T を用いて次の式で表される。

$$\delta U_T = \frac{P}{\theta_T} \{ \theta_T V(N_p) + (1 - \theta_T) V(N_w) - F(N_f) \} \quad (12)$$

ここで、

$$V(N) = (2N - 1) \ln \left(\frac{N}{1 - N} \right) \quad (13)$$

$$\theta_T = \frac{N_f - N_w}{N_p - N_w} \quad (14)$$

上記値を代入すれば、

$$\theta_T = 0.002763 \quad (15)$$

$$\delta U_T = 186.6P \quad (16)$$

トップ段を1台とした理想カスケードを組んだ時のカスケード全体の遠心機台数は、

$$\frac{\delta U_T}{\delta U} = 1595(\text{台}) \quad (17)$$

② 第2段階

第1段階で得られたプロダクトの N_2 ガスを天然の酸素で酸化して、NOガスとして、第2段階の原料とする。

原料NOガスは以下の組成となっている。

$$^{15}\text{NO} = 0.99 \times 0.5 \approx 0.5$$

$$^{14}\text{NO} = 0.99 \times 0.5 + 0.01 \approx 0.5$$

酸素同位体の影響は無視できる。(資料3参照)

この原料を ^{15}NO を99%濃度迄濃縮するカスケード計算を行う。原料は高価であるから回収域を考える。ここでは回収域の段数を濃縮域の段数と等しいものとする。遠心分離機、は第1段階で使用したものと同一とする。

この時、カスケードのフィード濃度 N_f 、プロダクト濃度 N_p は、テイル濃度 N_w はそれぞれ

$$N_f = 0.5, \quad N_p = 0.99, \quad N_w = 0.01 \quad (18)$$

カスケードカット θ_T は(14)式により

$$\theta_T = 0.5 \quad (19)$$

分離パワー δU_T は(12)式より

$$\delta U_T = 9.01P \quad (20)$$

トップ段を1台とした理想カスケードを組んだ時のカスケード全体の遠心機台数は、

$$\frac{\delta U_T}{\delta U} = 77(\text{台}) \quad (21)$$

となる。

第2段階のカスケードのフィードは、第1段階のカスケードのプロダクトを使うので、 $N_2 \rightarrow NO$ の転換により2倍の流量となる。しかし、第2段階のカスケードのフィード流量は第2段階のカスケードのプロダクト流量の2倍必要であるから、最終製品の生産量を遠心機1台分とした時、両方のカスケードの全必要遠心機台数は

$$77 + 1595 = 1672(\text{台}) \quad (22)$$

となる。

なお、この様な2段階を踏まない検討例として、「NF₃ガスによるN同位体の分離」について資料4に示す。

(2) ¹⁵Nの分離コスト

年産600kgの生産設備を考える。

ここで、600kgは100万KW級のFBRの初装荷燃料分である。

3. (3) ②より遠心機1台の製品量は

$$82,000 \text{気圧} \cdot \text{l/year}$$

であるから、

$$\frac{82,000}{22.4} \cdot \frac{273}{330} \times 15 = 45 \text{kg/year}$$

に相当する。

稼働率を90%として、トップ段の遠心機台数は、

$$\frac{600}{45 \times 0.9} \approx 15$$

従って、必要全遠心機台数は、(22)式を使って、

$$1.672 \times 15 = 25,000(\text{台})$$

となる。

遠心機のコスト及び建家、ガス系、コーティリティ等の建設費に対し、年間その1割を償却するとする。また、原料費及び運転費を見込めば、

$$\text{単価} \sim 2 \text{万円/g}$$

に相当する。

この値は、第2章に述べた文献(3)の化学法による 500kg/y プラントのほぼ同一条件による濃縮コスト計算結果

$$\sim 20 \$ / g \quad \approx 2,200 \text{円} / g$$

と比べると桁違いに高く、また、現在少量販売 (10kg/y) している。

米国の例

$$\sim 1 \text{万円} / g$$

よりもかなり高い。

(3) 経済性評価

前項で述べたごとく、大規模な¹⁵Nの生産に関して、経済性がきわめて悪い。また、ライフサイエンスに必要な程度の小規模軽ガス同位体分離を遠心法で行う場合、コストの大半を占める遠心分離機が量産できずその価格が上昇するため、経済性はさらに悪化する。

ウラン同位体の場合に成立する経済性が軽ガスに対して成立しない最大の理由は、式(6)で表わされるとおり、遠心分離機の性能が ΔM の2乗に比例するからである。すなわち、 $\Delta M = 1$ の軽ガスは、同一周速、同一ディメンジョンの遠心分離機を用いても、UF₆ ($\Delta M = 3$)の場合に比し1/9に性能が落ちてしまう。

$\Delta M = 2$ である¹⁸Oの分離はやや経済性が回復するが、この場合でも市場規模が小さく、UF₆用遠心分離機開発の例から見て、第3章で示した軽ガス用遠心分離機についても最低数10億円の開発費は必要であるから、フィージビリティが成立するとは考えられない。

今後の方針として、ウラン用遠心分離機において、分子ポンプ、スクープ等を変更する程度で、資料1に示す質量の重いガスを分離することを検討していくことを提案する。ニーズについては2章で述べた③群の物性向上、④群の有用不活性ガス、⑤群の廃棄物処理等をより詳細に調査すべきである。また、人形峠事業所の既設のDP, CFPPを利用し、遠心機製造コストを省くことも検討すべきである。

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”
Manson Benedict, Thomas H. Pigford, Hanas Walfgong Levi
清瀬量平訳 日刊工業新聞社 (1984)
- (2) “安定同位体とNMR計測に関する調査 報告書”
化学技術庁 ライフサイエンス推進委員会 (1988)
- (3) “The Nitrox System For Producing Highly Enriched Nitrogen-15 At
Production Rates Higher Than 100Kilograms Per Year ”
Prepared for PNC, Takanobu Ishida (1993)
- (4) “Development and Industrial application of gas Centrifuges for the
enrichment of Uranium in the USSR”
Atomnaya Energiya Vol67, No 4 E. I. Abbakumov et al. (1989)
- (5) “有用元素有効利用技術開発（キロに精製試験）計画”
私信 (1991)
- (6) “The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-Scale
Production of U^{235} ”
K. Cohen McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC. (1951)
- (7) “Molecular Theory of Gases and Liquids”
J. O. Hirschfelder et. al. John Wiley & Sons (1960)
- (8) “ガス遠心分離機によるウラン濃縮の設計解析研究” 学位論文
名古屋大学 甲斐 常逸 (1978)
- (9) “物定定数推策法” 佐藤 一雄 丸善 (1954)
- (10) “物性定数” 手塚 潔 日刊工業新聞社 (1956)

資 料

資料1. ガスの回転胴からの抜き出し特性について

回転胴内のガス圧力はほぼ平衡圧力分布しており、次の式で表される。

$$p_s = p_0 \exp\left\{\frac{M(r_s \omega)^2}{2RT}\right\}$$

ここで

- p_0 : 中心圧
- p_s : 回転胴壁圧

$T=330^\circ\text{K}$ として、周速 $r_s \omega$ 及び質量 M をパラメータとして
 p_s / p_0 の値を計算して表にすると表資1-1のごとくとなる。

表 資1-1 回転胴壁圧の中心圧に対する比

$r_s \omega \backslash M$	50	75	100	125	150
500 (m/s)	1.0	3.0	10.0	30.0	90.0
600 (m/s)	2.7	14.0	71.0	3,600	19,000
700 (m/s)	8.7	81.0	7,600	70,000	660,000
800 (m/s)	34.0	6,300	120,000	2,200,000	40,000,000

流動条件として、抜き出し条件を1 Torr 以上とする。また、回転胴内の循環流の条件から壁圧を2~1000 Torr の範囲とする。

中心軸から抜き出す場合この条件を満足する範囲は表中太線で囲った範囲となる。UF₆用のスクープ抜き出し圧の場合、中心圧は 10^{-3} Torr 程度以下が要求される。壁圧2 Torr 以上でこの条件を満足する範囲は図中編掛けの部分となる。

すなわち、例として700m/sの場合でいえば、 $M=75\text{g}$ 以下のガスに対しては、中心軸抜き出しタイプの遠心機が適用可であり、 $M=100\text{g}$ 以上では、UF₆用の遠心機が適用可である。ボーダーラインに近いところではより詳細な検討及び実験が必要である。

資料2.

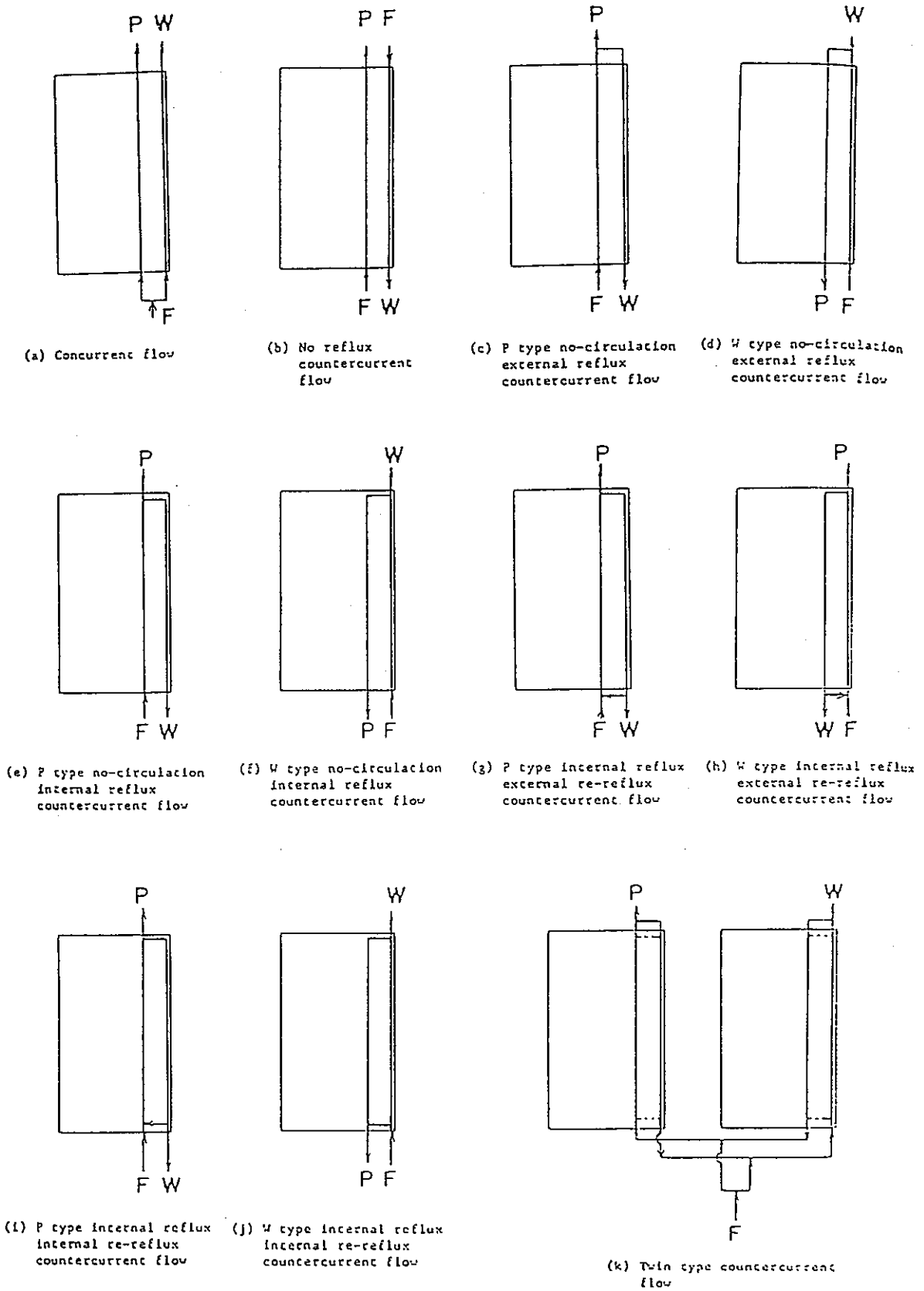


Fig. 3.1.2 Models of various types of flow⁽¹⁾

資料3.

NOガスにおける酸素同位体の影響

自然界の酸素同位体は次の組成を持つ。

^{16}O	99.759 %
^{17}O	0.037 %
^{18}O	0.204 %

従って、4. (1) ②に述べた第2段階カスケードの原料中に $^{14}\text{N}^{18}\text{O}$ が約 0.1%存在する。

$^{14}\text{N}^{18}\text{O}$ は重いため、かなりの部分がプロダクト流に混入するが、全てがプロダクト流に混入したとしても、たかだか 0.1%であり、99%の製品濃度に与える影響は無視できる。

資料4.

NF₃ ガスによるN同位体の分離

NF₃ ガスを用いれば、Fは¹⁹F以外に安定同位体がなく、又、Nは1個だけであるので、1段階のカスケードで、希望の濃度の¹⁵N同位体を得られる。

しかし、以下に述べるように拡散係数が小さいと思われること及び原料費が高価になることのため、ここでは採用しなかった。

① 拡散係数

実験データがないため、以下の藤田の式⁽⁹⁾により計算した。

$$D_{12} = \frac{0.00067 T^{1.85}}{\left\{ \left(\frac{T_c}{P_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{T_c}{P_c} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}} \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}}$$

NF₃の物性値⁽¹⁰⁾

P_c (臨界圧) : 44.7 atm

T_c (臨界温度) : 234 ° K

T (温度) : 330 ° K

この時、

$$D_{12} = 0.108 \text{ cm}^2 / \text{sec}$$

これは、O₂等の D₁₂ = 0.25 cm²/sec 1/2 以下である。

② 原料流量

以下の容量のNF₃ 製造設備が必要である。

$$F = \frac{P}{\theta_T} = \frac{P}{0.002763} = 362 P$$

トップ段を1台とした場合、

$$P = 82,000 \text{ 気圧} \cdot \ell = \frac{82000}{22.4} \times 71 \text{ g} = 260 \text{ kg} / \text{年}$$

すなわち、

$$F = 94 \text{ トン} / \text{年}$$