

JNC TN7440 89-001  
~~PNC N7440 89-001~~

~~社内一般~~

本資料は / } 年 9 月 27 日付けで登録区分  
変更する。

人形峠環境技術センター  
環境保全技術開発部 管理課

## 低濃縮ウランの経済性に関する IAEA主催会議報告書（1988年）

1989年 5月

動力炉・核燃料開発事業団  
人形峠事業所



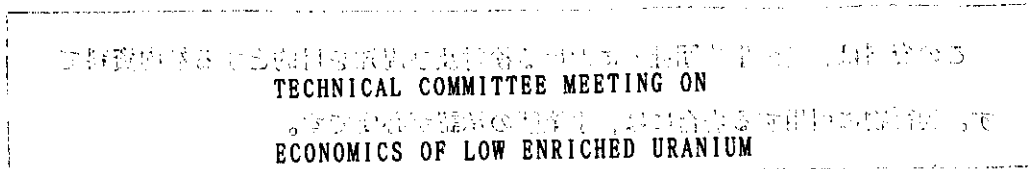
社内一般

JNC TN7440 89-001

~~JNC N7440 89-001~~

1989年 5 月

## 低濃縮ウランの経済性に関する IAEA主催会議報告書（1988年）



若林 修二 \*

### 要 旨

本報告書は1988年10月11日～13日にオーストリアのウィーンにて開催された低濃縮ウランの経済性に関するIAEA主催会議についての報告である。

会議の目的は低濃縮ウランを製造するまでの3つの主要段階、ウラン精鉱の製造（製錬）・UF<sub>6</sub>への転換・濃縮についての経済性に関するレビューである。これらの市場は現在、供給能力が需要をうわまっており、今後の需要動向が注目されている。関連する項目は、再処理回収ウランのリサイクル利用・プルトニウムのリサイクル利用・燃焼度の上昇・レーザー濃縮等である。

会議は15ヶ国からの参加があり、14件の論文発表及び数件のパネルディスカッションが行われた。

本報告書にまとめた内容の項目を以下に示す。

1. 会議概要（会議名、参加国、目的等）
2. 各国の発表概要
3. 発表論文要旨
4. 日本の発表（口頭発表内容、プログラム、計算結果出力例）
5. 論文和訳\*\*

---

\* 人形峠事業所 環境資源開発部 転換技術開発課

\*\* 翻訳：株式会社ペスコ

# 目 次

発行年次

発行年次

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. 会議概要                                                                                         | 1   |
| 2. 各国の発表概要                                                                                      | 18  |
| 3. 発表論文要旨                                                                                       | 17  |
| 4. 日本の発表                                                                                        | 343 |
| 5. 論文和訳                                                                                         | 62  |
| 5.1 Nuclear Energy: Recent Projections                                                          | 63  |
| 5.2 Spanish yellow cake production by bio-leaching                                              | 85  |
| 5.3 Uranium: The recalcitrant commodity                                                         | 105 |
| 5.4 How to recover U from low grade U vein deposits                                             | 123 |
| 5.5 Economics of use of Laguna Verde 2. initial core as<br>reloads of Laguna Verde 1.           | 141 |
| 5.6 A technical and economic comparison of the conversion of<br>natural and reprocessed uranium | 157 |
| 5.7 Economic aspects of PNC process                                                             | 187 |
| 5.8 Conversion of ore concentrates and reprocessed uranium<br>nitrate into $UF_6$               | 181 |
| 5.9 The economics of uranium recycling in the LWR fuel cycle                                    | 193 |
| 5.10 Prospects on french nuclear fuel management                                                | 211 |
| 5.11 Economics of low enriched uranium in China                                                 | 221 |
| 5.12 The role of centrifuge process                                                             | 229 |
| 5.13 Compared economic features of enrichment process                                           | 249 |
| 5.14 Low enriched U fuel in CANDU reactor                                                       | 259 |

発行年次

発行年次

発行年次

発行年次

## 1. 会議概要

### 1.1 会議名称

Technical Committee Meeting on Economics of Low-Enriched Uranium

### 1.2 開催期日

1988年10月11日～13日

### 1.3 開催場所

オーストリア、ウィーン

IAEA本部、Agency Board Room, Tower (C) 4th Floor

### 1.4 参加国

15ヶ国、1機関、34名

内訳を国別参加者数一覧表(表1-1)に示す。

### 1.5 会議の目的

会議の目的は低濃縮ウランを製造するまでの3つの主要段階、

- (1) ウラン精鉱の製造、製錬
- (2)  $U-F_6$  への転換
- (3)  $U-235$  が 5% 以下の濃縮

についての経済性に関するレビューである。

これらの市場は現在、供給能力が需要をうわまっており、今後の需給動向に興味をもたれている。

関連する項目は以下の4項目である。

- (1) 再処理回収ウランのリサイクルによるウラン需要の低減
- (2) プルトニウムをMOXとして軽水炉へリサイクルすることによるウラン、濃縮役務需要の低減
- (3) 燃焼度の上昇によるウラン消費量の低減。
- (4) レーザー濃縮によるウラン消費量の低減。

### 1.6 日程

発表日程、発表者名、機関、表題を表1-2に示す。

### 1.7 参加者

参加者名簿を表1-3に示す。

表 1 - 1 国別参加者数一覧表

| 地域  | 国         | 人数 | 会 社                                          |
|-----|-----------|----|----------------------------------------------|
| 欧州  | 英国        | 7  | RTZ, URENCO, BNFL, CEGB                      |
|     | 西独        | 2  | NUKEM, DWK                                   |
|     | オランダ      | 1  | URENCO                                       |
|     | 仏国        | 6  | URANIUM PECHINEY, CEA, COGEMA, EDF, COMURHEX |
|     | ベルギー      | 2  | エネルギー中央委, SYNATOM                            |
|     | スペイン      | 1  | ENUSSA                                       |
| 東欧  | ユーゴスラビア   | 2  |                                              |
| アジア | 中国        | 2  | 核工業総公司                                       |
|     | 韓国        | 1  | 韓国核燃料(株)                                     |
|     | 日本        | 2  | 動燃                                           |
| 北南米 | カナダ       | 1  | オンタリオ・ハイドロ社                                  |
|     | メキシコ      | 2  | 連邦電力委                                        |
|     | チリ        | 1  | 原子力委                                         |
| その他 | オーストラリア   | 1  |                                              |
|     | エジプト      | 1  | 核燃料公社                                        |
|     | IAEA      | 2  |                                              |
| 合計  | 15ヶ国, 1機関 | 34 |                                              |

表 1 - 2 発表日程表

| 月/日   | No | 発表者                     | 会社・機関         | 表 題                                                                                      |
|-------|----|-------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10/11 | 1  | J. L. Rojas             | IAEA          | Nuclear Energy: Recent Projections                                                       |
|       | 2  | J. M. Josa              | ENUSA         | Spanish yellow cake production by bioleaching                                            |
|       | 3  | A. P. Kidd              | RTZ           | Uranium: The recalcitrant commodity                                                      |
|       | 4  | J. M. Josa              | ENUSA         | How to recover U from low grade U vein deposits                                          |
|       | 5  | C. Villanueva           | CPE           | Economics of use of Laguna Verde 2. initial core as reloads of L.V.1.                    |
| 10/12 | 6  | C. D. Forsey            | BNFL          | A technical and economic comparison of the conversion of natural and reprocessed uranium |
|       | 7  | S. Wakabayashi          | PNC           | Economic aspects of PNC process                                                          |
|       | 8  | R. Faron                | Comurhex      | Conversion of ore concentrates and reprocessed uranium nitrate into UF <sub>6</sub>      |
|       | 9  | E. Leser                | DWK           | The economics of uranium recycling in the LWR fuel cycle                                 |
|       | 10 | M. Presta<br>H. Guiheux | EDF<br>COGEMA | Prospects on french nuclear fuel management                                              |
| 10/13 | 11 | L. Q. Sheng             | CNNC          | Economics of low enriched uranium in China                                               |
|       | 12 | R. B. Kehoe             | URENCO        | The role of centrifuge process                                                           |
|       | 13 | J. H. Coates            | CEA           | Compared economic features of enrichment process                                         |
|       | 14 | G. H. Archinoff         | Ontario H.    | Low enriched U fuel in CANDU reactor                                                     |

表 1 - 3 参加者名簿

Department of Nuclear Energy and  
Safety Division of Nuclear Fuel Cycle

Responsible Officer: J.L. Rojas  
Room: A-2514/Ext. 2771  
Secretary: L. Wemer  
Room: A-2509/Ext. 2767

| PARTICIPANTS AND<br>DESIGNATING MEMBER STATES<br>AND ORGANIZATIONS | ADDRESS                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <u>AUSTRALIA</u><br>Mr. G.R. Hogg                                  | Alternate Resident Representative<br>Permanent Mission of Australia<br>to the Atomic Energy Agency<br>Mattiellistrasse 2-4/III<br>A-1040 Wien |
| <u>BELGIUM</u><br>Mr. M.A. Decressin                               | Direction Generale de l'Energie<br>COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES<br>Rue de la Loi 200<br>B-1049 Bruxelles<br>Belgium                 |
| Mr. J. Pype                                                        | Synatom<br>Avenue Marnix No. 13<br>Bruxelles 1050<br>Belgium                                                                                  |
| <u>CANADA</u><br>Mr. G.H. Archinoff                                | Ontario Hydro<br>700 University Avenue, H11<br>Toronto<br>Ontario M5G 1X6<br>Canada                                                           |
| <u>CHILE</u><br>Mr. Nicolas Andalaft Jezam                         | Chilean Commission of Nuclear<br>Energy<br>Amunategui 95<br>Santiago de Chile 6990070<br>Chile                                                |

| PARTICIPANTS AND<br>DESIGNATING MEMBER STATES<br>AND ORGANIZATIONS | ADDRESS |
|--------------------------------------------------------------------|---------|
|--------------------------------------------------------------------|---------|

**CHINA**

|                   |                                                                                                                                           |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mr. Liu Qiaosheng | Nuclear Fuel Department, China<br>Senior Engineer<br>CHINA NATIONAL NUCLEAR CORPORATION<br>中国核工业总公司 (CNNC)<br>Sanlihe 1<br>Beijing, China |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Mr. Wu Deming

|                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nuclear Fuel Department, China<br>Senior Engineer<br>(CNNC)<br>Sanlihe 1<br>Beijing, China |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|

**EGYPT**

Mr. N. M. T. El-Hazek

|                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Head of Production Division<br>Nuclear Materials Corporation<br>1-Maadi Kattamiya Road<br>Maadi Post Office Box 530<br>Cairo, Egypt |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**FRANCE**

Mr. Robert Faron

|                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Uranium Pechiney<br>Tour Manhattan<br>Place de l'Iris 6<br>Courbevoie 92400<br>France |
|---------------------------------------------------------------------------------------|

Mr. Jean-Hubert Coates

|                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Commissariat a l'Energie Atomique<br>(C. E. A.)<br>Centre d'Etudes Nucleaires de<br>Saclay<br>Gif-Sur-Yvette Cedex 91191<br>France |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Mr. J. M. Guiheux

|                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------|
| COGEMA<br>Rue Paul Dautier No. 2<br>Velizy-Villacoublay 78143<br>France |
|-------------------------------------------------------------------------|

Mr. M. D'Orival

|                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------|
| COGEMA<br>Rue Paul Dautier No. 2<br>Velizy-Villacoublay 78143<br>France |
|-------------------------------------------------------------------------|

Mr. M. Presta

|                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|
| EDF-Fuel Department<br>Avenue de Messine 23 bis<br>75008 Paris, France |
|------------------------------------------------------------------------|

Mr. A. G. Gabriac

|                                                 |
|-------------------------------------------------|
| COMURHEX<br>P. O. Box 29<br>Pierrelatte, France |
|-------------------------------------------------|



PARTICIPANTS AND  
DESIGNATING MEMBER STATES  
AND ORGANIZATIONS

ADDRESS

FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY

Mr. H.W. Hassel

NUKEM GmbH  
Rodenbacher Chaussee 6  
D-6450 Hanau 11, Hessen  
Federal Republic of Germany

Mr. Ernesto Leyser

DWK  
Hamburger Allee 4  
D-3000 Hannover 1  
Federal Republic of Germany

JAPAN

若林修二

PNC

明珍宗孝

PNC

KOREA

Dr. In Soon Chang

Korea Advances Energy  
Research Institute  
P. O. Box 7  
Daeduk-Danji  
Korea

MEXICO

Mr. Carlos Villanueva Moreno

Comision Federal de Electricidad  
Tolstoi 29, 11o PISO  
Mexico 06598  
Mexico(Tel.203-0318)

Mr. Ruben Ortega

Comision Federal de Electricidad  
Tolstoi 29, 11o PISO  
Mexico 06598  
Mexico(Tel.203-0628)

NETHERLANDS

Mr. C. J. Joseph

Ultra-Centrifuge Nederland N.V.  
(UCN)  
P. O. Box 158  
7600 AD Almelo  
The Netherlands

SPAIN

Mr. J. M. Josa

ENUSA  
Avds.Valladolid 81  
Madrid  
Spain

PARTICIPANTS AND  
DESIGNATING MEMBER STATES  
AND ORGANIZATIONS

ADDRESS

U.K.

Ms. A.P. Kidd

Rio Tinto Zinc Corporation plc.  
6, St. James's Square  
London W112JD  
U.K.

Mr. R.B. Kehoe

Head of Commercial Department  
URENCO Ltd.  
Oxford Road  
Marlow, Bucks  
SL7 2NL, U.K.

Mr. C.D. Forsey

British Nuclear Fuels Plc.  
Springfields Works  
Salwick, Preston, Lancs  
U.K.

Mr. Bonser

British Nuclear Fuels plc  
Capenhurst Works  
Chester  
U.K.

Mr. G. Steer

CEGB  
Newgate St. 15  
London  
U.K.

Mr. M. Elliott

URENCO Ltd.  
Oxford Road No. 18  
Marlow, Bucks SL7 2NL  
U.K.

Mr. T.R. Moules

The Mearings 10G35  
Burgham, Reading RG33RP  
U.K.

YUGOSLAVIA

Mr. Marjan Ursic

Uranium Mine Zirovski VRH  
Goranja var  
Yugoslavia

Mr. Duran Pensa

Uranium Mine Zirovski VRH  
Goranja var  
Yugoslavia

IAEA

Mr. J.L. Rojas, Scientific Secretary  
Mr. A. Nechaev, Section Head NENF

## 2. 各国の発表概要

### (1) IAEA

#### ①全世界の原子力発電設備容量の予測

1987～2005年の発電炉の増加率は 2.9 %/年となり、2000年で 444 GWe、  
2005年で 503 GWeとなる。

#### ②2000年のウラン所要量予測

49,000～53,000 tUである。しかし、Nuexcoの最近の予測では、58,000 tU以上  
としている。(図2-1参照) 濃縮テイル濃度が重要な因子となる。

#### ③GWe当たりのウラン消費量 (tU/GWe)

1970年では 467であったが、1980年代の終わりには 160～170の範囲に低下し  
ている。将来的には 160前後となる。

### (2) 英国

#### ①再処理回収ウラン

- ・近い将来の再処理回収ウランの生産量は全世界で 5,000t/y より少ない。
- ・F<sub>2</sub>製造コストが、F<sub>2</sub>製造電解槽の最近の改善により約25%低減されたため、UO<sub>3</sub>から直接UF<sub>4</sub>を得る直接フッ化法は、UO<sub>3</sub> → UO<sub>2</sub> → UF<sub>4</sub> → UF<sub>6</sub>とする従来の二段フッ化法に比較して、1,500t/y 以下では優位である。(図2-2参照)
- ・ECHO(Expansion of Capacity for Hex from Oxide Reprocessing)は現在建設中で、1990年代の中頃運開予定。(前回のIAEA TCM "Advances in Uranium Refining and Conversion" 1986年 4月における報告では1990年代初期の運開計画であった。)  
設計容量は 1,000t/y であり、これに満たない需要である場合、F<sub>2</sub>製造の電解槽の数を必要台数だけ設置して建設費を低減して対応でき、300t/yの需要があればよい。1,000t/y以上の需要があれば、別にUO<sub>3</sub> → UF<sub>4</sub>の工程を増設して対応して3,000t/yの能力が出せる。
- ・被曝はNUの3倍となる。
- ・RUの転換コストはNUの3倍の \$18/KgUである。
- ・RU再濃縮費は、\$110/KgSWU + \$5/KgU である。
- ・100 万KWのLWRからでてくるRUは年間約 4 M\$ に相当する価値になる。
- ・これを利用すれば発電コストが¢0.06/KWh節約できる。

## ② プルトニウム

・ 100 万KWのLWRからは 200～ 250KgPu(f)/y でPuが回収される。これをNUで希釈すれば、5 t UのEUに相当するMOX燃料ができる。もし、MOXが約 850\$で製造できるなら、NUから作るより約\$500/KgU安い。燃料サイクルコストは約2.5M\$節約できるので、Puの価値は\$12/g-Pu(f)に相当する。

## ③ 濃縮のシェア

DOE 40%, Eurodif(仏) 43%, URENCO 10%

ソ連のTechsnab 7% (図2-3 参照)

## (3) フランス

### ① 高燃焼度化

FRAGEMAは新型燃料 AFA (Advanced Fuel Assembly) を開発した。900 MWe 炉のAFA への移行は1990年に完了する。1,300 MWe炉のAFA への移行は1988年に始める。60,000MWd/t という高い燃焼度の燃料(AFA-X1)が研究されており、いくつかの燃料棒が既にGravelines炉の炉心に装荷されている。

### ② プルトニウムの利用

EDFはいくかの仏の900 MWe PWRの取替燃料の1/3をMOXとする計画をもっている。COMMOXとFRAGEMAは1987年10月にEDFのSaint Laurent B1 炉に初めてMOX燃料を供給した。

### COMMOXの2つのMOX製造工場拡張計画

MELOX 100 t/y プラント、マルクール(COGEMA社のサイト)に建設

DEMOX 既存のDesselのBelgonucleaireプラント(35 t/y)の拡張

### ③ 再処理回収ウランの利用

1986年COGEMAとCOMURHEXがジョイントベンチャーUREPを作った。UREPは再処理回収ウランをUF<sub>6</sub>、U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>やUO<sub>2</sub>に転換し、貯蔵・輸送を行う。UNHからUF<sub>6</sub>への転換は、ピエールラットのCOMURHEX社の350t/yプラントで行い、UNHからU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>やUO<sub>2</sub>への転換はピエールラットにあるCOGEMA社のTU2プラント(600t/年)で行う。FRAGEMAは、EDFに対して、再処理回収ウランの4つの集合体を1987年に供給した。集合体はCruas炉に装荷され

ている。

#### ④ レーザー濃縮技術の開発

C E A はレーザー濃縮技術の開発を行っており、来世紀の初めには実用化されて、再処理回収ウラン中の U-236 の様な同位体を分離できるようになる。

#### ⑤ 転換工場での廃棄物発生量の低減

- ・  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  - UNH から ADU をつくるときにできる硝安を肥料として売却
- ・ 空ドラム - ワイヤブラシで洗浄後放射能をチェックしてクズ鉄として売却
- ・  $\text{MgF}_2$  - 金属 U 製造で発生する  $\text{MgF}_2$  は粉碎した後、硝酸で U を浸出する。ライナーとしてリサイクルする以外は売却する。
- ・  $\text{CaF}_2$  - U < 500ppm のものの 1987 年の総発生量は 1,700 t であったが、1988 年はこれを 1,000 t に低減する。これは  $\text{F}_2$  製造工程の改善による。 $\text{F}_2$  を発生する電解槽の陰極側から発生する水素ガスを冷却し HF を回収し、リサイクルする。

### (4) 西独

#### ① 再処理回収ウランの利用

- ・ 再処理回収ウランを再濃縮リサイクルする場合、天然ウランで行うよりも約 0.6 % 濃縮度を高くしなければならない。 $[^{235}\text{U}_R] = [^{235}\text{U}_N] + 0.25 [^{236}\text{U}_R]$   
( $[^{236}\text{U}_R]$  は濃縮後の濃度)
- ・ 再処理回収ウランを MOX のキャリアとして使う場合、その需要は発生量の 20 % しかない。

#### ② プルトニウムの利用

- ・ 1 kg の NEU 使用済燃料には 1 % の Pu (10 g) が含まれている。そのうちの 65 % (6.5 g) が fissile 。MOX の組成は 3.3%Pu(f)/NU である。6.5g の Pu-fiss. を含む 10 g の Pu と NU187g を混合して作った MOX 燃料 197g は 4%EU に相当する。NU で 4 % EU を 197 g 作るのに 1465 g の NU が必要である。ウラン消費量は、NU で作る場合の 17 % で MOX ができる。Pu リサイクルで 20 % の SWU を節約できる。

(5) カナダ（オンタリオ・ハイドロ社）

- ① 今後、CANDU 炉においてLEU(低濃縮ウラン) 0.9 %EUを利用する。燃焼度が2倍になり、U消費量と燃料コストは約25%減り、使用済燃料の発生量は半分となる。  
7年後にブルースBにLEUを装荷し始め17年後にはすべての炉をLEUにする。  
2000年頃から約50MC\$/年の率でコスト節約できるようになる。（図2-4参照）
- ② 将来はさらに1.6 %EUを利用すべくCANFLEX燃料を開発中である。43エレメント／バンドル、0.5 m長、直径が異なる2種類のピンを使用する。
- ③ 濃縮度上昇によるU節約と燃料サイクルコスト節約は濃縮度1.2 %で頭打ち。  
（図2-5参照）

(6) その他の国の発表

① スペイン（ENUSA）

ウラン精鉱の製造法に関して、在来法とバクテリアを利用したヒープリーチング法を組合せた方法について、プラント規模が230 tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/年で行った成果の報告がなされた。

② メキシコ（CFE）

建設が遅れているラグナ・ヴェルデ2号炉の初装荷用燃料を1号炉の取替用に利用するケーススタディの結果について報告がなされた。

③ 中国（CNNC）

軍需用拡散法濃縮工場を発電炉用の低濃縮ウラン製造用に転用している。

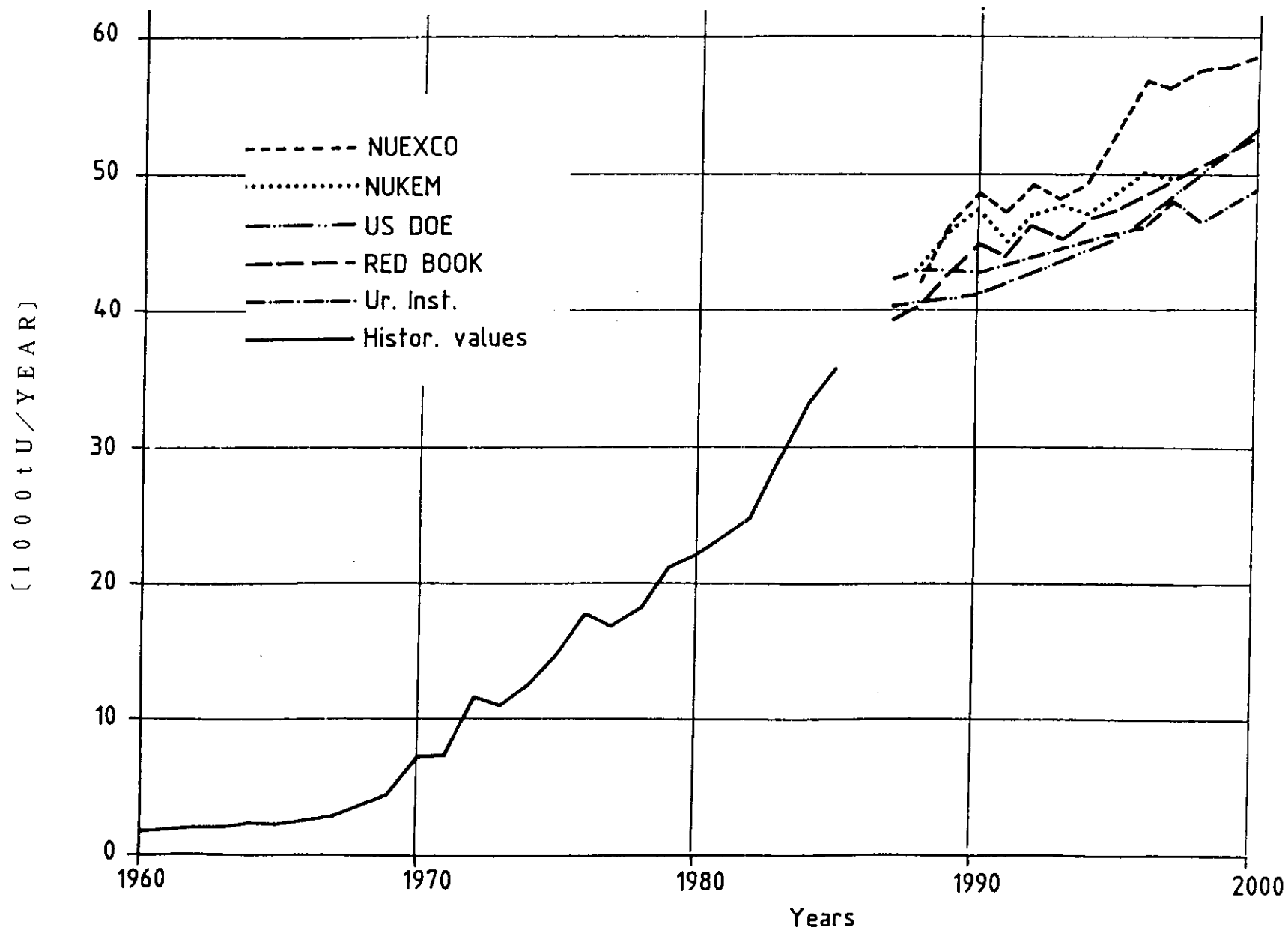
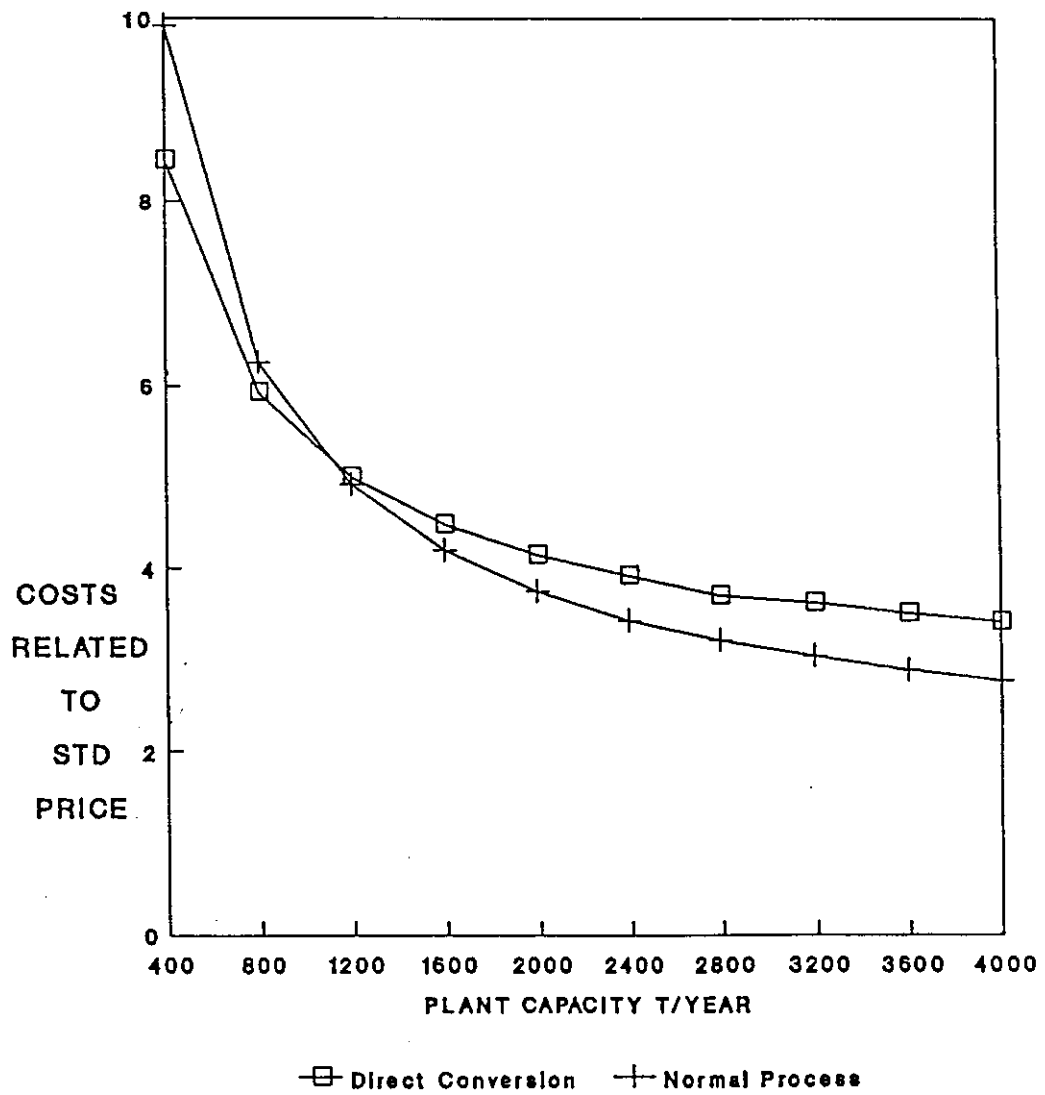


图 2 - 1 WOCA URANIUM REQUIREMENTS



RPB234

2 - 2 COSTS VERSUS THROUGHPUT



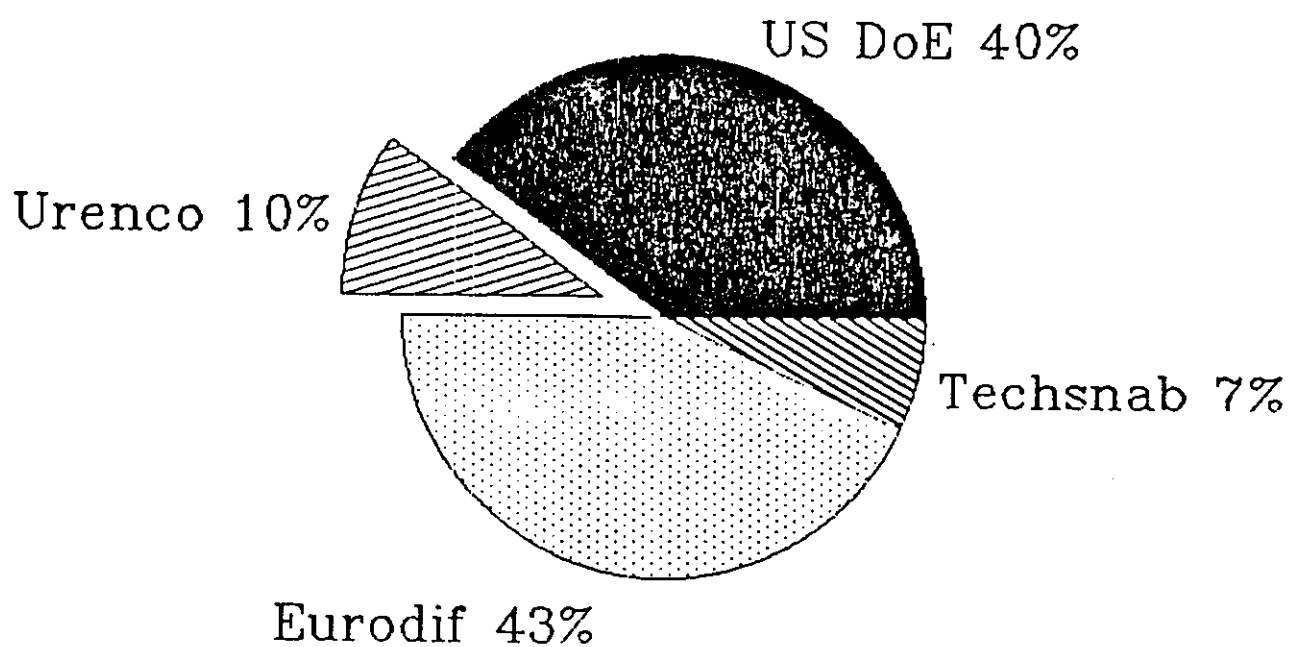


图 2 - 3      Enrichment Market Share  
(1987)

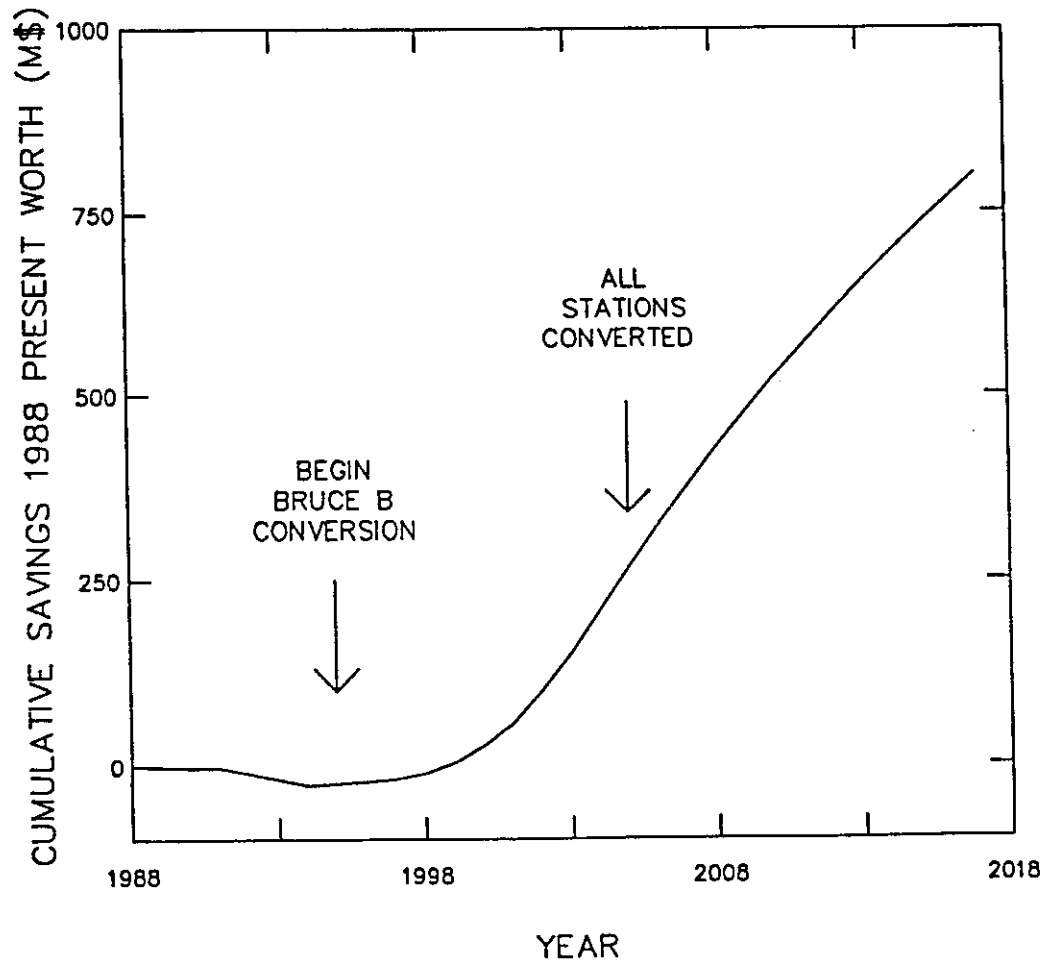
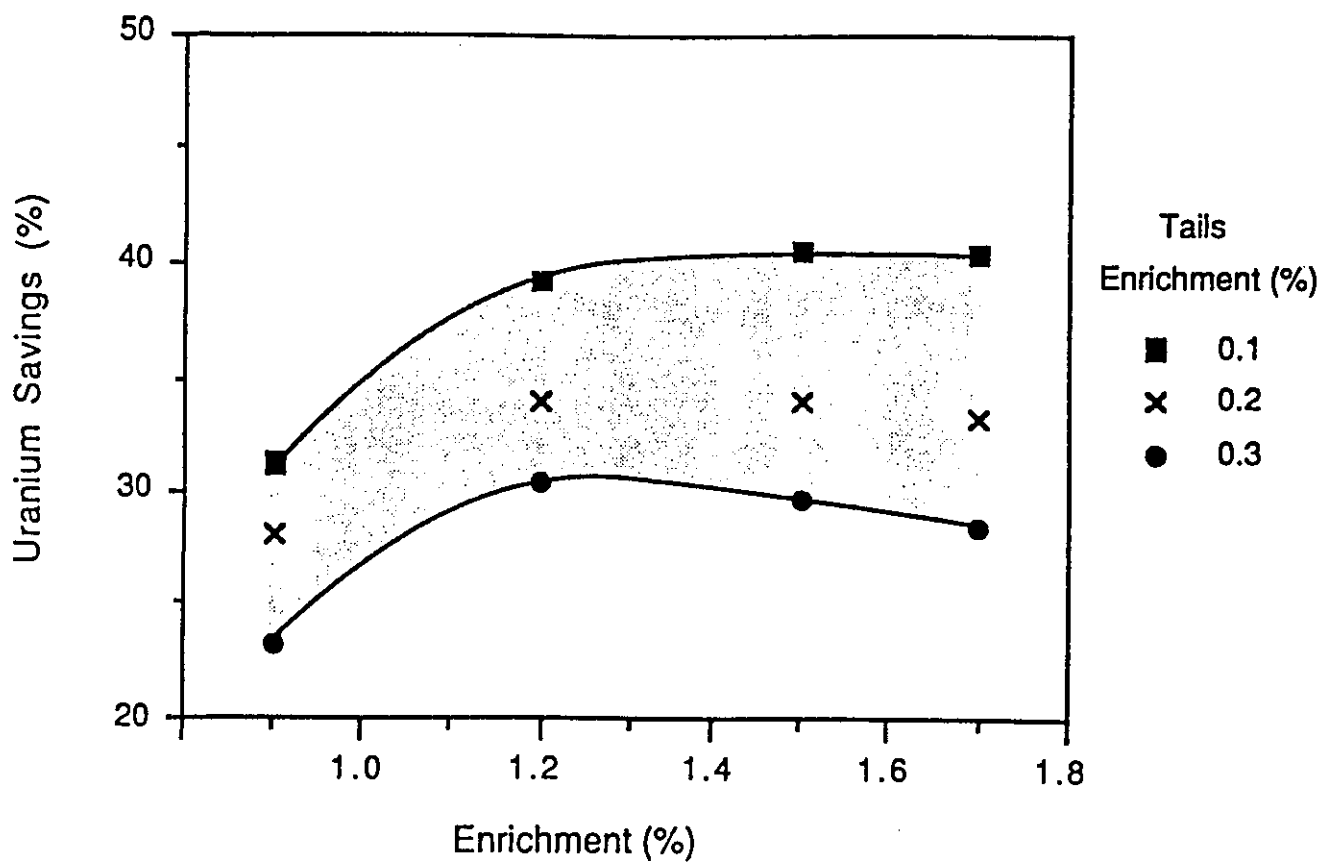


图 2 - 4 CUMULATIVE FINANCIAL SAVINGS  
ASSOCIATED WITH LEU  
(PRESENT WORTH IN 1988)



FROM AECL 9755

Fig 2 — 5 Annual Uranium Savings with LEU in CANDU

### 3. 発表論文要旨

発表された14件の論文について、表題、著者、所属、国籍、要旨を1件1頁程度にまとめたものを次頁以降に示す。

| No | 著 者                                                             | 所属・機関         | 表 題                                                                                      | 要旨頁       |
|----|-----------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1  | J. L. Rojas                                                     | IAEA          | Nuclear Energy: Recent Projections                                                       | 18        |
| 2  | J. M. Josa<br>J. R. Serrano                                     | ENUSA         | Spanish yellow cake production by bioleaching                                            | 19        |
| 3  | P. C. F. Crowson                                                | RTZ           | Uranium: The recalcitrant commodity                                                      | 20        |
| 4  | J. M. Josa<br>J. R. Serrano                                     | ENUSA         | How to recover U from low grade U vein deposits                                          | 21        |
| 5  | C. Villanueva Moreno<br>R. Ortega Carmona<br>L. Sanches Herrera | CFE           | Economics of use of Laguna Verde 2. initial core as reloads of Laguna Verde 1.           | 22        |
| 6  | C. D. Forsey<br>T. Williams                                     | BNFL          | A technical and economic comparison of the conversion of natural and reprocessed uranium | 23        |
| 7  | 安田 式郎<br>音村 圭一郎<br>若林 修二                                        | PNC           | Economic aspects of PNC process                                                          | 24        |
| 8  | R. Faron                                                        | Comurhex      | Conversion of ore concentrates and reprocessed uranium nitrate into $UF_6$               | 25<br>~26 |
| 9  | E. Leyser                                                       | DWK           | The economics of uranium recycling in the LWR fuel cycle                                 | 27        |
| 10 | M. Presta<br>H. Guiheux                                         | EDF<br>COGEMA | Prospects on french nuclear fuel management                                              | 28        |
| 11 | Liu Qiaosheng<br>Wu Deming                                      | CNNC          | Economics of low enriched uranium in China                                               | 29        |
| 12 | R. B. Kehoe                                                     | URENCO        | The role of centrifuge process                                                           | 30        |
| 13 | J. H. Coates                                                    | CEA           | Compared economic features of enrichment process                                         | 31        |
| 14 | G. H. Archinoff                                                 | Ontario H.    | Low enriched U fuel in CANDU reactor                                                     | 32        |

標題：NUCLEAR ENERGY: RECENT PROJECTIONS

T1-TC-665 14

著者：J. L. Rojas

所属：I A E A

国籍：——

要旨：1. 原子力発電設備容量の予測

O E C D加盟国, W O C A (O E C D以外の非共産国), C M E A加盟国  
(相互経済援助機構)の3つのグループに区分して予測を行う。

D O E, N u k e m, N u e x c o, ウラン協会, I A E Aの各データを比較検討した。

|                   | 1987～2005年の<br>発電炉の増加率 | 2000年     | 2005年     |
|-------------------|------------------------|-----------|-----------|
| O E C D           | 1.6%/年                 | 300 G W e | 321 G W e |
| W O C A 非 O E C D | 5.6 "                  | 24        | 45        |
| W O C A 全体        | 2.0 "                  | 334       | 366       |
| C P E (中央計画経済国)   | 6.7 "                  | 110       | 137       |
| 全世界               | 2.9 "                  | 444       | 503       |

2. ウランの所要量

2000年のウラン所要量予測は, 49,000～53,000tUである。しかし, N u e x c o  
の最近の予測では, 58,000 t U以上としている。濃縮テイル濃度が重要な因  
子となる。

3. G W e 当たりのウラン消費量 (t U / G W e)

この値は1970年では 467であったが, 1980年代の終わりには 160～ 170の  
範囲に低下している。将来的には 160前後となる。

4. ウランの生産

予測は非常に困難である。各予測を表及びグラフにまとめた。

標 題 : PRODUCTION DE CONCENTRADOS DE URANIO POR BIOLIXIVIACION DE MINERALES ESPANIOLES

著 者 : J.M. JOSA  
J.R. SERRANO

所 属 : E N U S A

国 籍 : スペイン

#### 要 旨 :

##### 鉍 石

F e 鉍山は約9000tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>の埋蔵量であり、露天採掘している。放射能選鉍により200ppm以下を捨石とし、鉍石を600ppmで区分している。粉碎を行い、粒度を100mm 以下にする。d<sub>80</sub> は65mmであり、そのウラン含有率は0.8 ～7%であり、1mm 以下(約 1割)は50～70%である。

##### 浸出系

浸出槽は幅24～28m で長さ約100mであり、長さ方向には10m 間隔で堰を設けている。砂- ポリエチレン板- 砂(10 ～20cm)-鉍石(約7m)で積み上げる。浸出場の規模は高品位用が53,000～260,000tで低品位用は61,000～622,000tである。散水系は3m×3mの網目条にスプリンクラーを配置している。浸出用に溶媒抽出廃液の40～95% をリサイクルしている。硫酸濃度は5gH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/l であり、使用量は約2Kg/t である。散水量は0.2 ～0.3m<sup>3</sup>/t であり散水時間は30分～1 時間、50l/時・m<sup>2</sup>である。散水日数は10日/ 月以下である。ウランの濃度は最初は 5～10gU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/l であるが、30 ～50mgU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/lになるまで浸出され、この期間が 1 年強である。浸出率は高品位鉍石で68%,低品位鉍石で53% である。

##### 溶媒抽出

アミン系の溶媒により、4gU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/l からウランを抽出し、1N-NaCl-0.1N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> で逆抽出し、25～30gU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/l を得る。貴液処理量27m<sup>3</sup>/ 日、溶媒の損失は140ml/m<sup>3</sup>である。

##### A D U 沈殿

32～35℃でアンモニアと空気を混合してpH5.5, 6.5 及び7.5 で行う。ADU のか焼温度は400 ℃。ADU の品位は87～92%U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, Cl:0.068%, SO<sub>4</sub>:3.3%

##### コスト

|             |                                           |       |     |    |     |
|-------------|-------------------------------------------|-------|-----|----|-----|
|             |                                           |       |     | 採掘 | 49人 |
| 1974年の初期投資額 | 129Mpta                                   | 人件費   | 35% | 生産 | 45  |
| 1983年の投資額   | 5.2MUS\$                                  | 試薬    | 21% | 保守 | 40  |
| 採掘費         | 10～15US\$/lbU <sub>3</sub> O <sub>8</sub> | 鉍石運搬  | 5%  | 分析 | 11  |
| 浸出費         | 51%                                       | 燃料    | 3%  | 採掘 | 13  |
| 処理費         | 27.5%                                     | 資材    | 6%  | 放管 | 4   |
| 一般管理費       | 21.5%                                     | 一般管理費 | 23% | 安全 | 14  |

標題 : Uranium: The recalcitrant commodity

著者 : P. C. F. Crowson

所属 : R. T. Z

国籍 : イギリス

要旨 : ここ数年、強い需要と備蓄の減少、利用能力の増大から、他の鉱物のドル価格はかなり上昇しているにもかかわらず、ウラン価格はスポット市場で下降傾向にある。ウランは他の鉱物と違うのか、あるいは特別な力が働いているのか、ウラン市場の経済的側面を再検討する。

ウランの需要増加率は、1970年代に14%を越していたが、1980年代では9.8%であった。他の鉱物商品に較べて非常に急激な増加であったが、供給はこれに対応した。1970年代初期には、鉱山の生産能力は既に需要量を越しており、1983年までの10年間で倍になっている。生産能力の上昇は、インフラストラクチャー、設備、労働力だけでなく、採鉱についても同様である。しかし、電力会社の自信過剰の需要予測に基づく生産能力の増加が速すぎたため、1980年代に鉱山は閉鎖あるいは減産を強いられた。赤本のデータでは、1980~86年の累積需要を22万tUとしているのに対して NUKEMでは24万tUとしており、実績データであっても違いがある。

#### 生産コスト

長期契約価格とスポット市場価格が存在し、後者は、限界コストを下回っている。天然ウラン、濃縮ウラン両方の形でのかなりの在庫が、鉱山、加工業者、電力会社に保有されている。鉱山は生産能力をかなり下回って操業しており、生産能力に余剰がある状況は1990年代まで継続すると言われている。

#### 在庫

ウラン協会の需要委の定期報告によれば、正常な在庫量は2年分であり、現在は過剰であるが、4~5年以内に正常値に近づく。米国の電力会社が目標としているゼロ在庫は品物が豊富にある時だけ許されるものである。

#### 生産能力の利用

鉱山の生産能力の把握は、困難である。現状では、効率的生産能力の限界に近いレベルで稼働している。南アの金鉱山でのウラン生産能力はウラン市場全体の10%を越えている。

#### 結論

ウランは強い価格に到達する。

標 題 : VALORIZACION DE YACIMIENTOS FILONIANOS DE BAJA LEY

著 者 : J. M. JOSA  
J. R. SERRANO

所 属 : E N U S A

国 籍 : スペイン

要 旨 : スペインのウラン埋蔵量は約40,000tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>であるが, 品位が約700ppmU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>と低い。

生産規模は 230tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/年である。

#### 鉍石の処理

200ppm以下を捨石とし, 鉍石を600ppmで 2つに区分している。

鉍石を粉碎し, 粒度により 3分割している。

| 粒度区分            | 処理方法         | 鉍石量 | ウラン量   |
|-----------------|--------------|-----|--------|
| ① 10 ~100mm の大粒 | 捨石           | 67% | 17.5 % |
| ② 1~10mmの細粒     | ヒープリーチング     | 22% | 17.5 % |
| ③ 1mm以下の微粉      | 在来型の酸浸出(CCD) | 11% | 65.0 % |

#### 投資とその回収

プロジェクトの総投資額は約5,700 百万ペセタ( 粉碎サイズ1mm)である。

ウラン価格が33ECU/lbU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>であれば高い収益率が期待できるが, 28ECU/lbU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>に

下がればIRR が10.2% に下がり, 投資の回収期間は12.7年に延びる。

#### 経済性に影響する因子

- ① 採掘量・スケールメリット
- ② 鉍石品位
- ③ 鉍脈の特徴
- ④ 鉍物学的特徴と処理条件
- ⑤ 鉍山の位置とインフラストラクチャー
- ⑥ 環境保全上の制約

#### IRR に影響する因子

- ① ウラン精鉍の販売価格
- ② 浸出工程の稼働率
- ③ 鉍石のウラン含有率の安定性
- ④ 開発・採掘費
- ⑤ 総投資額
- ⑥ 捨石比率



標 題 : Economics of the use of the Laguna Verde 2 initial core as reloads for Laguna Verde 1.

著 者 : C. Villanueva Moreno  
R. Ortega Carmona  
L. Sanchez Herrera

所 属 : Comision Federal de  
Electricidad (CFE)

国 籍 : メキシコ

要 旨 : CFE のラグナ・ヴェルデ原子力発電所は 2 基の BWR/5 から構成される。両炉のための燃料は 1979 年 5 月から 1980 年 5 月にかけて現地に到着した。1 号炉は 1988 年 9 月に燃料装荷の準備が整ったが、2 号炉は 1992 年以降の見込みである。

一方、BWR 用の燃料は、現在の GE6 設計より進んだ、GE9 設計が 1990 年代初めには利用可能になる。GE6 は燃焼度 28,000MWd/t で、濃縮度 2.73% のものを使い、GE9 は 38,000MWd/t で 3.28 % である。

CLV2 初装荷用燃料を CLV1 の取替用として使用し、CLV2 の初装荷用には進んだ設計の GE9 燃料を使う等のいくつかのケースについて、その発電コスト比較を行った。

計算は、FUEL-CASH-II のパソコン版で行った。

GE9 の長所は、使用済燃料の発生量が減ることと、濃縮ウランの所要量を低減できることである。燃料交換を隔年で行うことを検討する必要がある、許認可上も要検討である。

燃料コストは GE6 の平衡後で 5.003 mills/kWh となる。GE9 の燃料コストを GE6 と同じになるよう GE9 の成型加工費を逆算すると、GE6 の 1988 年の実契約加工費の 1.96 倍になる。GE9 の加工費を逆算値と実加工費との中間になるとして推算をすすめた。転換費は 7\$/KgU とした。

交換計画の異なる 3 つのケースについて検討したが、10.1 ~ 10.3 mills/kWh と大差はなかった。1979、1980 年から保管されてきた初装荷用燃料の現在価値が、元の価値より 2.4 倍も高くなっていることが大きく影響しており、これを除けば 4.7 ~ 5.0 mills/kWh となる。

メキシコでは、濃縮テイルウランの引取を計画的に行っており、そのコストも燃料コスト計算に含めている (1.4 \$/KgU)。48G シリンダーに充填し、メキシコ政府の施設まで輸送し貯蔵している。

標題：A Technical and Economic Comparison of the Conversion of Natural and Oxide Reactor Reprocessed Uranium

著者：C. D. Forsey  
T. Williams

所属：BNFL Springfields Works

国籍：英国

要旨：☞予想できる範囲では、再処理回収ウランの生産量は全世界で 5,000t/y より少ない。

☞直接フッ化法は、1,500t/y 以下で優位である。

☞F<sub>2</sub>製造コストは、F<sub>2</sub>製造電解槽の最近の改善により約25%低減された。

☞直接フッ化の反応炉は熱伝導（除熱）の制約から、UF<sub>4</sub>→UF<sub>6</sub>のフッ化に較べて生産性が落ちる。（3年前に 100 t の UO<sub>3</sub>で実験しデータを採取した。）

☞ECHO(Expansion of Capacity for Hex Oxide Reprocessing)は現在建設中で、1990年代の中頃運開予定。設計容量は 1,000t/y。これに満たない需要である場合、F<sub>2</sub>製造の電解槽の数を必要台数だけ設置して建設費を低減して対応でき、300t/yの需要があればよい。1,000t/y 以上の需要があれば、別にUO<sub>3</sub>→UF<sub>4</sub>の工程を増設して対応する。これで転換炉はBNFLのTHORP (Thermal Oxide processing Plant) と MagnoxからのRUを全量処理したとして、3,000t/yの能力が出せる。（同じ熱的制限下で）

☞被曝はNUの3倍となる。供給槽や反応槽等は鉄で 0.3m厚（あるいは相当の）遮蔽が必要。流動媒体の交換は遮蔽のかげから完全に遠隔操作で行う。ドラム缶（ポット）の荷卸、開梱、廃棄作業は完全に自動化する。封じ込めはより厳密になされる。

☞排ガス：すべてのプラントから出るガスは完全にスクラビングされる。

☞廃液：スクラバーからの廃液がほとんど。NUの10倍のRI含量。減衰させるために60日以上貯留するのが一番効果的である。この後の処理は従来のプラントと同じ。

☞固体廃棄物：ECHOからの廃棄物は、深層廃棄に先立って固定化の処理がなされる。

☞NUと異なり、RUは代替不可能なのでバッチ区分を厳密に行う必要がある。48インチ製品シリンダの8 t Uが単位となる。

☞シリンダの検査コスト：NUでは、シリンダは濃縮工場との間を年間4回往復する。通常の保守は5年毎の耐圧検査のみであった。洗浄、除染、内側検査、水圧検査と弁の交換である。検査コストはシリンダの価格の30%以上になる。

RUでは、U-232の娘核種がシリンダ内壁に沈積し、γ線を出す。より頻繁に洗缶が必要（たぶん毎回）。シリンダの洗浄そのもののコストも割高となる。洗浄残査の処理も割高となる。

☞RUの転換コストはNUの3倍であり、その分だけ(\$15/KgU) 価値が減ることになる。

標題：ECONOMIC ASPECTS OF PNC PROCESS

著者：安田 式郎  
音村 圭一郎  
若林修二

所属：PNC

国籍：日 本

要旨： ウラン転換の経済性を検討するために、日本国内にPNCプロセスを適用した商用転換工場を建設する場合について検討した。

初めに、以下の項目について概観した。

- ① PNCの転換技術開発の経緯
- ② 日本の転換についての政策
- ③ 日本の転換需給の現状と将来
- ④ 海外の転換工場と転換市場。

割引利益率法を用い、プロジェクトの収益性を、利益率（ROI）によって表現する。基準ケースとした5000 tU/y規模のプラントでは、その利益率は約10%である。この基準ケースについて、1つの因子を変化させて対応する利益率の変化を計算する感度分析をいくつかの因子について行う。高感度の因子は金利と転換価格であるがこれらは外的要因であり、変えることはできない。比較的感度が高い因子は建設費、操業費、生産量／規模の比率である。これらは改善の努力を払うべき項目である。低感度の因子はプラント規模、自己資本比率、借入金返済期間である。一定のROIのもとでの転換価格と規模の相関を求めた。

濃縮商業プラントに隣接して設置すると想定した小規模プラントについて、コスト削減の要素を検討した。転換プラントの操業費に対する割合でみると、UF<sub>6</sub>の輸送費削減で36%、一般管理費の削減で7.8%、テイルUF<sub>6</sub>の逆転換を行うことにより回収したHFにより23%、同じくシリンドラードラム缶の貯蔵費の削減で16%となる。

以上の合計は転換プラントの操業費に対する割合で、82%に相当する。

標題 : Conversion of ore concentrates and reprocessed uranyl nitrate into  $UF_6$

著者 : Robert Faron

所属 : COMURHEX

国籍 : フランス

要旨 : マルベジプラント (Y.C. ~  $UF_6$  ~ 金属U)

- ① 廃液組成: 廃液は“U回収設備”をまず通る。回収されたUは UNHの型となる。最終的には池に排出する。排出前に酸性度とU濃度を分析し中和する。  
 排液中のUロスは1.46Kg/t U (1980年代初期),  
 昨年(1987年)はこれを半減して0.73Kg/t Uとした。

|             |                |
|-------------|----------------|
| $NO_3^-$    | 80 g / $\ell$  |
| $NH_4^+$    | 10 g / $\ell$  |
| $F^-$       | 1.5 g / $\ell$ |
| $Cl^-$      | 0.2 g / $\ell$ |
| Y.C. 中の陽イオン |                |

- ② 池の組成: 池に硝酸を $N_2$ と $O_2$ に分解するバクテリアがいるので、硝酸塩濃度は安定している。

|         |                |
|---------|----------------|
| N total | 50 g / $\ell$  |
| U total | 0.2mg / $\ell$ |
| pH      | 8              |

- ③ 廃液発生量: 7.5 m<sup>3</sup>/tU +10%スラッジを  
 1987年には5 m<sup>3</sup>/tU +10%スラッジまで低減。  
 この間の変化は UNH→ ADUをつくる時に  
 できる硝安を肥料として売却するようになったことである。

硝安のスペック

|                                  |                  |
|----------------------------------|------------------|
| $NH_4NO_3$                       | 850g / $\ell$    |
| U (硝酸塩)                          | < 0.5mg / $\ell$ |
| activity < 2 $\mu$ Ci e / Kg 硝酸塩 |                  |

- ④ 排気: 夫々の工程がスタックを持っている。  
 “U回収設備”と“溶解設備”  
 のスタックのみをモニタしている。

| U回収設備                            | 溶解設備                     |
|----------------------------------|--------------------------|
| 13,000 m <sup>3</sup> / h        | 3,500 m <sup>3</sup> / h |
| $NO_x$ < 100ppm / m <sup>3</sup> | < 60ppm / m <sup>3</sup> |
| $NH_3$ < 0.21% / m <sup>3</sup>  | 1.8% / m <sup>3</sup>    |
| U < 0.05mg / m <sup>3</sup>      | < 0.1mg / m <sup>3</sup> |

- ⑤ 固体廃棄物: 空ドラム-ワイヤブラシで洗浄後放射能をチェックしてクズ鉄として売却する。

MgF<sub>2</sub> - 金属U製造で発生するMgF<sub>2</sub>は粉碎した後、硝酸でUを浸出する。ライナーとしてリサイクルする以外は売却する。

廃液：① F<sub>2</sub>工場のUを含まないもの } 1980年代初      1987年  
② NU系廃液 } 1.70 m<sup>3</sup>/t U → 0.94 m<sup>3</sup>/t U  
③ RU系廃液 }

|                 | 規制値                     | 分析値（毎日分析・平均値）             |                               |
|-----------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| F <sub>2</sub>  | < 5 mg / m <sup>3</sup> | < 1 mg / m <sup>3</sup>   | 1 ppm / m <sup>3</sup> を越すと警報 |
| α               | < 4 pCie                | } Total activity < 10pCie |                               |
| β               | < 10pCie                |                           |                               |
| Cl <sub>2</sub> | < 3 mg / m <sup>3</sup> | < 1 mg / m <sup>3</sup>   |                               |

1988年はもっと低減したい

標題 : The economics of uranium recycling in the LWR fuel cycle

著者 : Ernesto Leyser

所属 : Deutsche Gesellschaft für  
Wiederaufarbeitung von  
Kernbrennstoffen

国籍 : 西 独

#### 要旨 : RUの利用

燃焼度の増大に伴う取扱上の問題発生がある。(Puではない)

##### ①再濃縮

RUはNUよりも約 0.6%濃縮度を高くしなければならない。

$$[ {}^{235}\text{U}_R ] = [ {}^{235}\text{U}_N ] + 0.25 [ {}^{236}\text{U}_R ]$$

$[ {}^{236}\text{U}_R ]$  は濃縮後の濃度

##### ②濃縮ウランとの混合

高濃縮度の初装荷分からのRUの利用にしか魅力がない。

##### ③MOXのキャリア

1 kgの使用済燃料から 0.950KgのRUが回収されるがMOXのキャリアとしての用途は、RU発生量の20%しかない。

#### MOXの利用

1 kgのNEU使用済燃料には1%のPu(10g)が含まれている。

そのうちの65%(6.5g)がfissile。MOXは 3.3%Pu(f)/NU

6.5 gのPu-fissを含む10gのPuにNU187gを混ぜて作ったMOX燃料 197gは4%EUに相当し、NUで4%EU 197gを作るのにNUが1465gが必要である。

ウラン消費量は、NUで作る場合の17%でMOXができる。

Puリサイクルで20%のSWUが節約できる。

#### リサイクルの効果

1tのNUからの発電量が  $1.5 \times 10^7$  kWh (30~40%に相当)増加(燃焼度に逆比例)

1,300 MWe PWR, 効率33%, 燃焼度 1 GWd/t  $\Rightarrow$  7,920 kWh

平均的なSWU価格はUS\$ 110/KgSWU, NU価格は30\$/lbU

#### 主な図表

Fig-2 燃焼度-残留濃縮度(装荷時の濃縮度)と  ${}^{236}\text{U} / {}^{235}\text{U}$

Fig-3  ${}^{235}\text{U}$ 濃縮率- ${}^{236}\text{U}$ 濃縮率(URANITの実データに基づく)

Fig-4 初期濃縮別に燃焼度-再濃縮度

Fig-5 SWU-break even line

標題 : Prospects on French nuclear fuel management

著者 : M. Presta  
J. M. Guiheux

所属 : E D F  
C O G E M A

国籍 : フランス

要旨 : E U R O D I F は、1988～1990年の間に10億フラン(200億円)を、Tricastinの Georges BESSE の濃縮工場に設備投資する。この投資により、早く頻繁な操業変化に対応できるようになる。この間も運転は続ける。

Tricastin の4つの炉でE D Fが、電力を供給している。

F R A G E M A は新しい型の燃料 AFA (Advanced Fuel Assembly) を開発した。900 MWe 炉のAFA への移行は1990年に完了する。1,300 MWe炉のAFA への移行は1988に始める。60,000MWd/t という高い燃焼度の燃料(AFA-X1)が研究されており、いくつかの燃料棒が既にGravelines炉の炉心に装荷されている。

Pu : E D F はいくつかの仏の900 MWe PWRの取替燃料の1/3をMOXとする計画をもっている。C O M M O X と F R A G E M A は1987年10月にE D F の Saint Laurent B1 炉に初めてMOX燃料を供給した。

C O M M O X の2つのMOX製造工場拡張計画

- ① M E L O X 100 t/y プラント、マルクールのコゲマ社のサイトに建設
- ② D E M O X 既存のDesselのBelgonucleaireプラント(35 t/y)の拡張

RU : 1986年C O G E M A と C O M U R H E X がジョイントベンチャーU R E P をつくった。U R E P はRUを  $UF_6$ 、 $U_3O_8$  や  $UO_2$  に転換し、貯蔵・輸送を行う。UNHから  $UF_6$  への転換は、ピエールラットのC O M U R H E X 社の350 t/y プラントで行い、UNHから  $U_3O_8$  や  $UO_2$  への転換はピエールラットにあるC O G E M A 社のTU2 プラント(600tU/年)で行う。

F R A G E M A は、E D F に対して、RUの4つの集合体を1987年に供給した。集合体は Cruas 炉に装荷されている。

C E A (C O G E M A の親会社) はレーザー濃縮技術の開発を行っており、来世紀の初めには実用化されて、RU中のU-236の様な同位体を分離できるようになる。

標題 : Economics of low enriched uranium in China

著者 : Liu Qiaosheng  
Wu Deming

所属 : Department of Nuclear Fuel  
China National Nuclear  
Corporation

国籍 : 中 国

要旨 : 濃縮法としては①GD, ②GC, ③LIS, ④化学法, ⑤流体力学法がある。

現在, GDが世界の濃縮需要の95%をまかなっている。

GCは商業化に達しているが, USDOEはGCの開発を中止した。レーザー法の経済性, 濃縮度の優位さから, U資源を最大限に活用できる。しかし, LIS法を産業化するためには, いくつかの問題点がある。

中国は炉の建設に伴う, 核燃料の需要に対応して核燃料産業を興していく。主にGD法で, 安定して信頼できる濃縮役務供給を行っていく。一方で, 中国ではGCとLISの開発も活発に行っていく。

#### GCの長所

- ① 電力消費が少なく, GDの1/8~1/10である。
- ② 1段当たりの分離効率が高く, GDより段数が少なくすむ。
- ③ 操業の柔軟性が高い, ウラン保持量(ホールドアップ)が少ない。同じ型の遠心機を異なる台数並列に繋げて異なる段で異なるスループットを容易にできる。
- ④ 小規模での経済性が高く, 工場建設期間は短くてすみ, 段階的にモジュール単位で拡張して行ける。
- ⑤ SWU当たりのコストを大きく低減できる可能性あり。遠心機 of 材料と製造法の進歩による。

#### GCの短所

- ① 遠心機の製造に高度技術が必要。遠心機の価格が高く建設費がGDの1.4倍と高い。
- ② 遠心機の寿命に経済性が左右され, 通常8~10年である。操業と保守コストはたとえ故障発生率が1%以下であったとしてもGDよりも高い。

#### 中国でのGDのSWU単価低減

- ① カスケードの操作効率を97%以上に維持することを目標としている。
- ② GDではSWUコストの中で電力費が占める割合が50%を越す。雨期は乾期と比較して電力単価が約40%安く, この間で消費電力量に30%以上の差をもたせ, 通年での電力コストの低減を3~4%としている。
- ③ 通常GDのテイル濃度は0.25~0.32%, 近年, 経済的に最適化したテイル濃度の模索が行われている。



標題 : Enrichment & Fuel cycle developments

著者 : Dr. R.B.Kehoe

所属 : Urenco Limited

国籍 : 英 国

要旨 : 一般的な1kgU当たりの軽水炉燃料製造コスト

|        |                 |         |
|--------|-----------------|---------|
| ① Y.C. | 30 \$ / lb      | 645 \$  |
| ② 転換   | 6 \$ / Kg U     | 50 \$   |
| ③ 濃縮   | 110 \$ / Kg SWU | 518 \$  |
| ④ 加工   | 165 \$ / Kg U   | 165 \$  |
| 合計     |                 | 1378 \$ |

1kgU当たりの発電量は、燃焼度が40,000MWd/teU, 熱効率33%として、320,00KWh/KgU

1KWh当たりの燃料費は、0.5¢ (0.65円)

Y.C.の価格が1 \$ 下がれば、100万KW-LWR炉で年間のコスト削減は0.4M\$となる。

#### 回収ウランについて

RU転換費 : 18 \$ / Kg U

RU再濃縮費 : 110 \$ / Kg S W U + 5 \$ / Kg U

100 万KWのLWRからでてくるRUは年間約4 M \$ に相当する価値になる。これを利用すれば発電コストが0.06¢ / KWh 節約できる。

#### MOXについて

100 万KWのLWRからは200~250KgPu(f)/yでPuが回収される。

これをNUで希釈すれば、5 t UのEUに相当するMOX燃料ができる。

もし、MOXが約850 \$ で製造できるなら、NUから作るより約\$500/KgU安い。

燃料サイクルコストは約2.5M\$ 節約できるので、Puの価値は\$12/g-Pu (f)に相当する。

#### 濃縮のシェア

DOE 40%

Eurodif(仏) 43%

URENCO 10%

ソ連のTechsnab 7%

標題 : Compared economic features of enrichment processes

著者 : Jean-Hubert COATES

所属 : COMMISSARIAT A L'ENERGIE  
ATOMIQUE

国籍 : フランス

要旨 : 過去に行われた濃縮法の経済性の比較を行ういくつかの試みは困難な努力であった。

SWUコストの概念が基準として使われてきた。しかし、他の要素も重要である。濃縮法毎のSWUコストの内訳にはいくつかの要素がある。

(機械要素の複雑さ、運転員、電力消費、ウラン滞留量、人件費、割引率、エネルギー、物価上昇、等)

国によって、経済的背景も技術開発状況も異なることからくる困難がある。濃縮費を安くすることは疑いもなくすべての濃縮業者にとっての課題である。

しかし、競争力のある価格とするか、あるいはその価格を維持する方法はいくつかある。

ウラン濃縮事業の将来は開けている。濃縮事業者はその経済的制約の範囲内で、更に競争力の強いプロセスを開発しようとしている。しかし、最良の技術を選ぶことを除いて、競争力を得、維持していくためには種々の方法がある。

これらの方法論を越えて、大きく健全な濃縮市場に公正な価格が適用されることを望む意欲は将来まで活力を失わないだろう。

#### 化学交換法

まだ生産段階には達していない。

- ① 旭化成の方法 4 価ウランと 6 価ウランの樹脂による交換反応速度の違いを利用
- ② Chemex法 (フランスで開発された) 3 価ウランと 4 価ウランの液-液交換を利用

#### レーザー法

- ① AVLIS 米、仏、英、日本
- ② MLIS 西独、日本

標題：Low enriched Uranium fuel in CANDU reactors

著者：G. H. ARCHINOFF

所属：Ontario hydro 社

国籍：カナダ

要旨：⑧ オンタリオ・ハイドロ社の電力需要（ピーク需要）は、1930年から1975年まで年々7%の伸び率で増加してきたが、この増加は鈍化してきた。

CANDU炉におけるLEU（低濃縮ウラン）利用の目的

- ① U消費低減
- ② 燃料コスト削減
- ③ 使用済燃料発生量低減
- ④ 最小限の開発

⑧ 0.9 %EU利用で燃焼度は2倍になりU消費量が25%減り、燃料コストは約25%減り、使用済燃料の発生量が半分となる。

⑧ 7年後にブルースBにLEUを装荷し始め17年後にはすべての炉をLEUにする。2000年頃から約50MC\$/年の率でコスト節約できるようになる。

既存炉でのLEUの利用上の条件

- ① 燃料あるいは炉の設計変更なし
- ② 燃料の性能を確認するための大規模な燃料照射デモンストレーション
- ③ 燃料マネージメント（交換）の最適化
- ④ 安全性解析／許認可変更
- ⑤ 経済性評価
- ⑥ 操業への影響
- ⑦ PA

将来の炉でのLEUの利用

- ① 1.6 %EU, ② 炉設計を最適化し、以下の項目を最大とするために  
 ㊦ 燃焼度    ㊧ 建設費効率 (MWe/\$)    ㊨ 燃料費効率
- ③ LEUの燃料設計を最適化するために、CANFLEX燃料を開発中。  
 43エレメント／バンドル, 0.5 m長, 直径が異なる2種類のピンを使う  
 (バンドルの中央は太く, 外側に細いピンを配置する)

濃縮度上昇によるU節約と燃料サイクルコスト節約は1.2%で頭打ち。

#### 4. 日本の発表

ウラン転換の経済性を検討するために、日本国内にPNCプロセスを適用した商用転換工場を建設する場合について検討した結果を報告した。

- (1) 発表に用いたスライドを資料4-1「使用スライド一覧」に示した。
- (2) 使用したスライド図を含む口頭発表内容を資料4-2「口頭発表内容」に示した。
- (3) 解析に用いた利益率を計算するプログラムを資料4-3「プログラムリスト」に示した。
- (4) プログラムの計算結果の出力例を資料4-4「計算結果の出力例」に示した。

## 資料 4 - 1 使用スライド一覧

| スライド番号 | 内 容                                                     |
|--------|---------------------------------------------------------|
| 1.     | 表題・目次                                                   |
| 2.     | 製錬転換パイロットプラント全景                                         |
| 3.     | 製錬転換パイロットプラントゲート                                        |
| 4.     | 製錬転換パイロットプラント中操                                         |
| 5.     | フローシート                                                  |
| 6.     | F <sub>2</sub> ふっ化炉 (R - 6 0 1)                         |
| 7.     | コールドトラップ                                                |
| 8.     | UF <sub>4</sub> 電顕写真                                    |
| 9.     | 目次 I - b                                                |
| 10.    | 国内需要                                                    |
| 11.    | 六ヶ所需要・世界の需要                                             |
| 12.    | 目次 II - a                                               |
| 13.    | T a b l e - 1 (Result of sensitivity analyses)          |
| 14.    | Cash flow time diagram                                  |
| 15.    | Cash flow の定義                                           |
| 16.    | ROI の求め方 E q - (1)                                      |
| 17.    | 目次 II - b                                               |
| 18.    | F i g - 1 (Capacity vs. ROI)                            |
| 19.    | 感度の求め方                                                  |
| 20.    | F i g - 2 (Relative construction cost vs. ROI)          |
| 21.    | F i g - 3 (Relative construction cost vs. ROI)          |
| 22.    | T a b l e - 1 (Result of sensitivity analyses)          |
| 23.    | 目次 III                                                  |
| 24.    | F i g - 1 0 (Relative operation cost vs. ROI 2,000tU/y) |
| 25.    | Savings                                                 |
| 26.    | F i g - 1 0 R e v. (with cost savings)                  |
| 27.    | Conclusion                                              |

## 資料 4 - 2 口頭発表内容

### "ECONOMIC ASPECTS ON PNC PROCESS"

Thank you Mr.chairman .

Being an engineer myself, I'm not good at English.

I hope you'll bear with my poor English.

#### Slide 1

The theme is "Economic aspects of PNC process", concerning to  $UF_6$  conversion.

Before I start the presentation, I would like to overlook the order.

First I'll review present state.

—— development of PNC process

—— demand for  $UF_6$

The main subject is "profitability of the conversion plant.

—— cash flow estimation

—— sensitivity analysis

Then I'll study on cost saving on domestic conversion.

### ECONOMIC ASPECTS OF PNC PROCESS —— $UF_6$ CONVERSION

#### I. REVIEW OF PRESENT STATE

I - a. DEVELOPMENT OF PNC PROCESS

I - b. DEMAND FOR  $UF_6$

#### II. PROFITABILITY

II - a. CASH FLOW ESTIMATION

II - b. SENSITIVITY

#### III. CONSIDERATION

SAVINGS ON DOMESTIC CONVERSION

#### IV. CONCLUSION

Slide 2: 製鍊転換パイロットプラント全景

PNC constructed Refining and Conversion Pilot Plant at Ningyo Toge Works.

This is a slide showing out look of the plant in winter.

Slide 3: 製鍊転換パイロットプラント, ゲート

Slide 4: 製鍊転換パイロットプラント, 中央操作室

Out look from gate and control room.

The plant came into operation in 1982.

Nominal capacity is 200 tU/y.

Slide 5: フローシート

PNC process is applied.

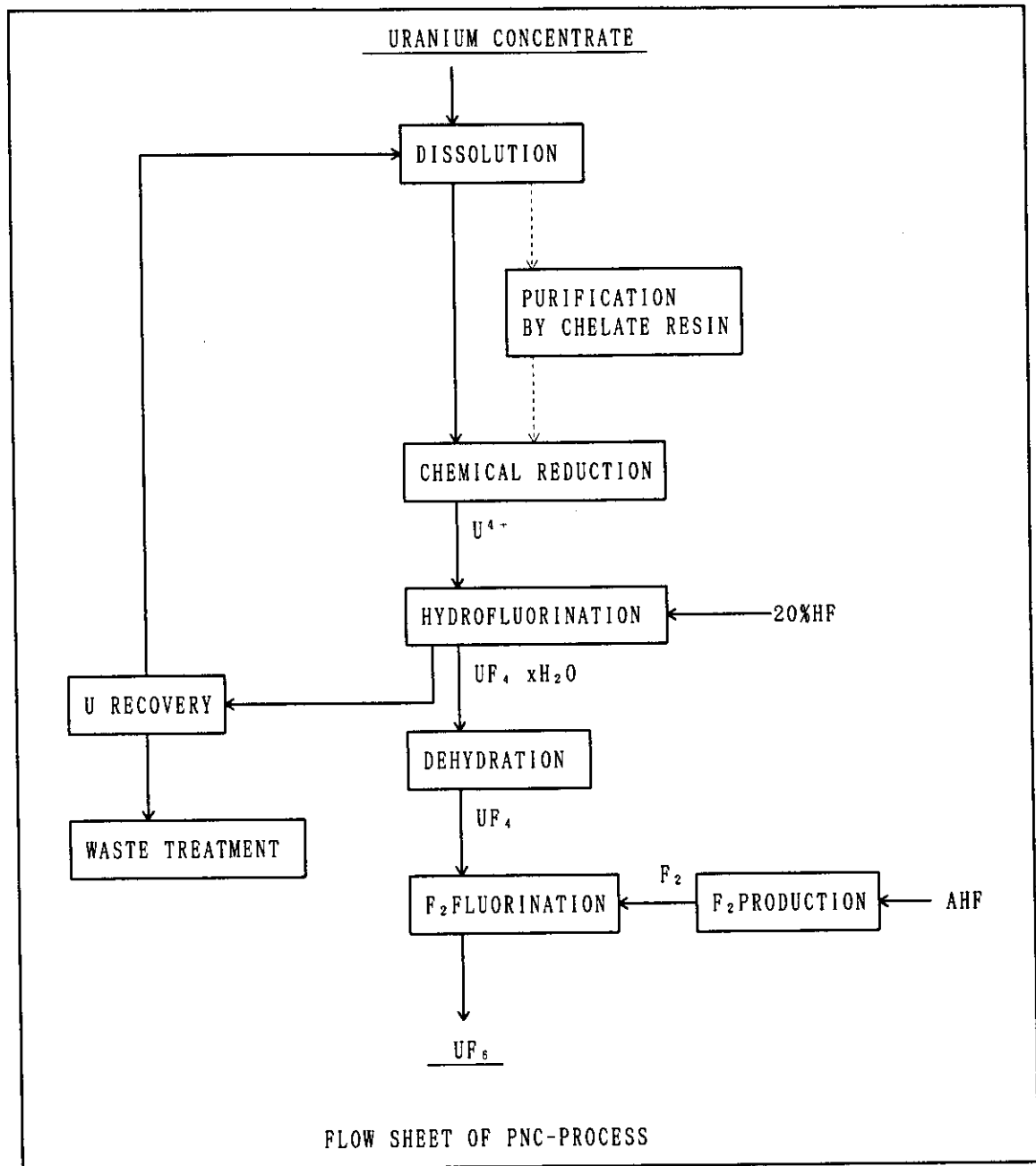
Y.C. is dissolved.

The solution is reduced.

Tetra-valent uranium solution is reacted with HF soln.

$UF_4$  is precipitated.

Dehydrated  $UF_4$  is reacted with fluorine gas.





Slide 6: F<sub>2</sub>フッ化炉

This is a F<sub>2</sub> fluorinator, Reactor type is fluidized bed.

It has two feed hoppers, UF<sub>4</sub> is fed through two slant lines.

Slide 7: コールドトラップ

These are cold traps.

Primary and secondary cold trap.

Gaseous UF<sub>6</sub> from fluorinator is cooled and solidified in them.

The product UF<sub>6</sub> has been fed to enrichment pilot plant and demonstration plant in the same site.

Slide 8: UF<sub>4</sub> SEM

For the past 6 years, we were engaged in obtaining data and improving the process.

Changing hydrofluorination condition we achieved to improve the powder character.

It has spherical shape and good fluidity.

So it causes no trouble in handling on latter stages.

Slide 9

ECONOMIC ASPECTS OF PNC PROCESS  
UF<sub>6</sub> CONVERSION

- I. REVIEW OF PRESENT STATE
  - I-a. DEVELOPMENT OF PNC PROCESS
  - ⇒ I-b. DEMAND FOR UF<sub>6</sub>
- II. PROFITABILITY
  - II-a. CASH FLOW ESTIMATION
  - II-b. SENSITIVITY
- III. CONSIDERATION  
SAVINGS ON DOMESTIC CONVERSION
- IV. CONCLUSION

Slide 10

There is no commercial conversion plant in Japan. So we entirely depend on the foreign converters. Reactors in operation demand about 4,000tU/y. Reactors including under construction demand about 5000tU/y. We have few other type reactors in Japan. They are not included.

DEMAND FOR UF<sub>6</sub> IN JAPAN

Aug. 1987  
(number of reactors), [ tU/ ( y · 75% ) ]

|       | reactors in<br>operation | include under<br>construction | include in<br>preparation | include<br>planning |
|-------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------|
| PWR   | (16) 1781                | (21) 2400                     | (23) 2734                 | (23) 2734           |
| BWR   | (18) 2262                | (21) 2720                     | (27) 3546                 | (31) 4906           |
| TOTAL | (34) 4043                | (42) 5120                     | (50) 6280                 | (54) 7640           |

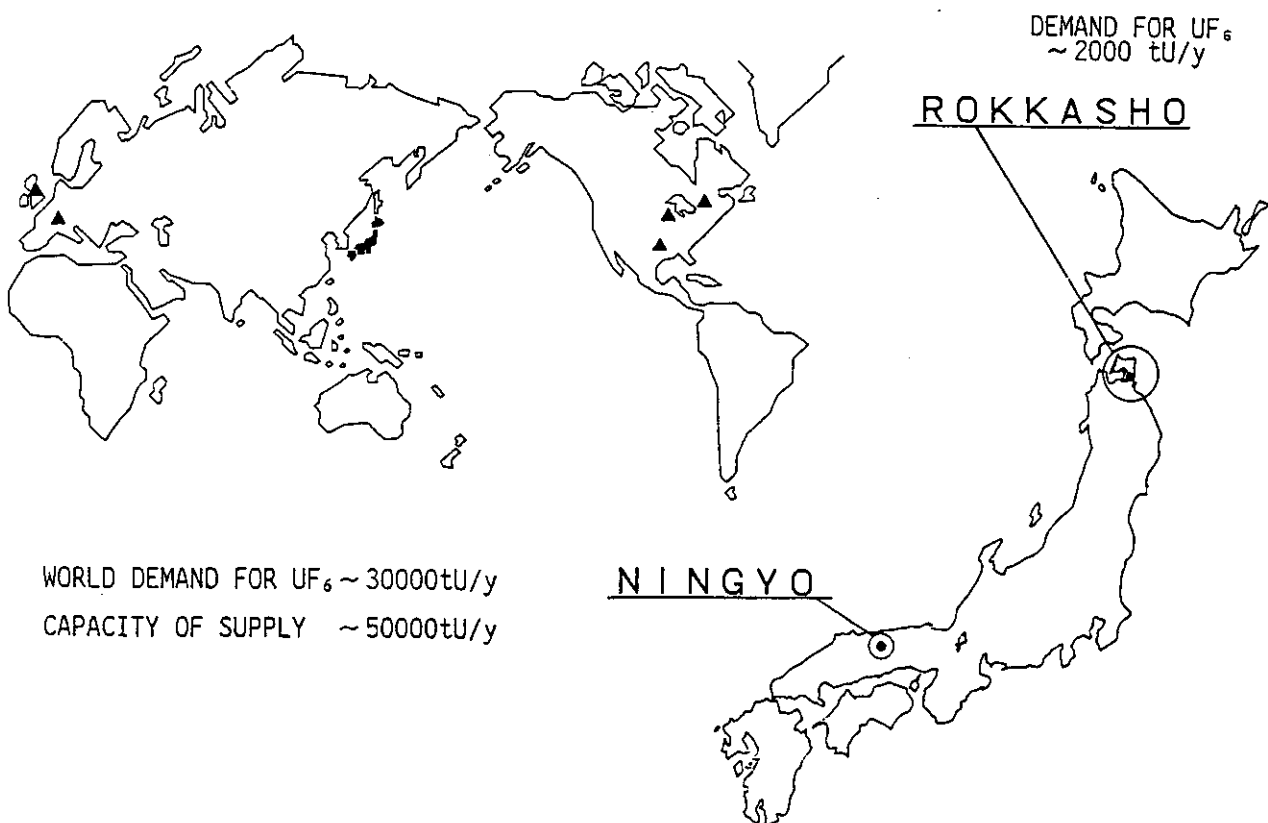
Slide 11

Meanwhile the enrichment commercial plant will start the operation in around 1991 at Rokkasho village.

Its demand for  $UF_6$  escalate every year till 10th year.

Full demand is around 2000tU/y.

There are 5 conversion plants. Each capacity is about 10,000tU/y, total capacity is about 50,000tU/y. But western world's demand for  $UF_6$  is only about 30,000tU/y. Market price is low such as 5 ~ 8 \$ /kgU.



Slide 12

In order to evaluate economic aspect of conversion, we make study on plant which is assumed to be constructed in Japan and applied PNC process.

ECONOMIC ASPECTS OF PNC PROCESS  
——— UF<sub>6</sub> CONVERSION

I. REVIEW OF PRESENT STATE

I-a. DEVELOPMENT OF PNC PROCESS

I-b. DEMAND FOR UF<sub>6</sub>

II. PROFITABILITY

⇒ II-a. CASH FLOW ESTIMATION

II-b. SENSITIVITY

III. CONSIDERATION

SAVINGS ON DOMESTIC CONVERSION

IV. CONCLUSION

Slide 13

Some conditions on cashflow estimation of base case are described in Table number1.

Generally speaking, lower limit of commercial conversion plant is 5,000tU/y.

Domestic demand in near future is also about 5,000tU/y.

Then the capacity of base case in this study is assumed to be 5,000tU/y.

Costs are estimated on the basis of the data obtained from the pilot plant.

But, costs such as general expenses are estimated by cost element ratio of general chemical plant.

Unit prices used in the estimation are present values.

Future escalation is not considered.

Table-1 Result of sensitivity analyses

| Parameter                            | Base case | Sensitivity<br>[ % - ROI / % - parameter ] |                        |
|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------------|------------------------|
|                                      |           | Equity basis                               | Total investment basis |
| 1) Capacity                          | 5000tU/y  | + 0.098                                    | + 0.048                |
| 2) Construction cost                 | 1.0       | - 0.20                                     | - 0.098                |
| 3) Operation cost                    | 1.0       | - 0.25                                     | - 0.11                 |
| 4) Ratio of production /capacity     | 1.0       | + 0.25                                     | + 0.10                 |
| 5) Conversion price                  | 10 \$/kgU | + 0.40                                     | + 0.18                 |
| 6) Ratio of equity/ total investment | 30 %      | - 0.12                                     | - 0.012                |
| 7) Interest                          | 6 %       | - 0.76                                     | + 0.18                 |
| 8) Payback period                    | 10 year   | + 0.042                                    | + 0.0065               |

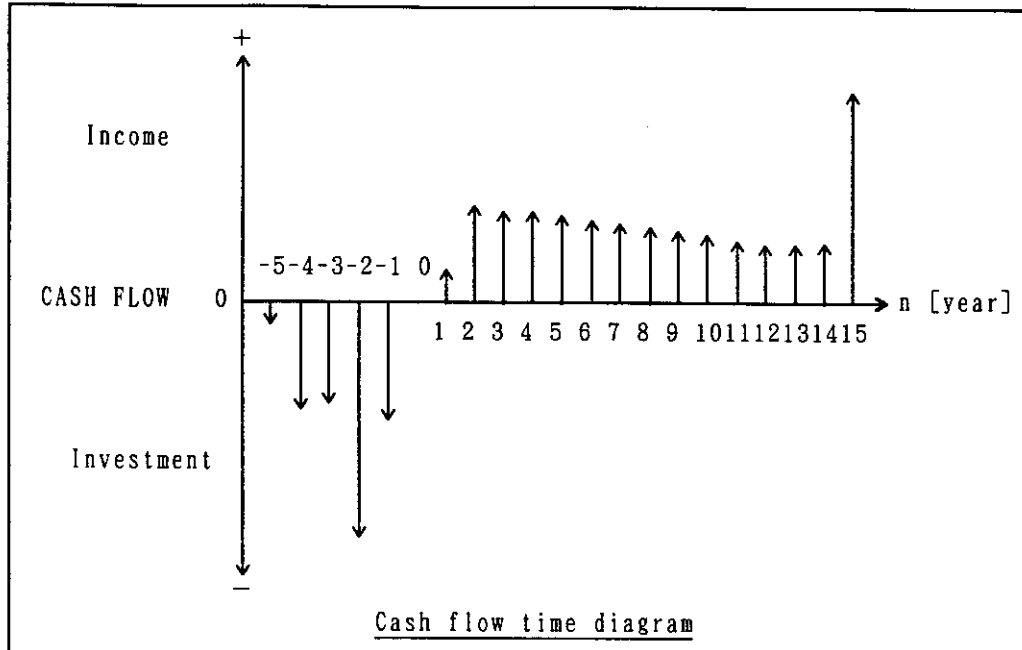
Slide 14

Total project life is 20 years.

Construction period is 5 years.

And operation period is 15 years.

Cash flow is calculated on a year to year basis throughout the project life.



Slide 15

Cash flows are defined in this table.

For example, cash in flow on equity capital basis is gross profit-tax-payback amount.

|               | EQUITY CAPITAL BASIS                      | TOTAL INVESTMENT BASIS   |
|---------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| CASH OUT FLOW | EQUITY CAPITAL                            | EQUITY CAPITAL<br>+ DEBT |
| CASH IN FLOW  | GROSS PROFIT<br>- TAX<br>- PAYBACK AMOUNT | GROSS PROFIT<br>- TAX    |

## Slide 16

Return on investment (ROI) is defined as the rate of return that makes the present worth of future generated cash in-flow over the life of the project equal to the present worth of investment.

For cash out-flow and in-flow of each year, ROI is the rate "i" with which Equation number one is satisfied.

$$\sum_{n=-5}^{-1} I_n (1+i)^{-n} + \sum_{n=1}^{15} F_n (1+i)^{-n} = 0 \quad \text{Eq. (1)}$$

$I_n$  : Cash out-flow, investment of year n ( negative value )

$F_n$  : Cash in-flow of year n ( positive value )

n : Year ( -5 ~ +15 )

i : ROI

## Slide 17

### ECONOMIC ASPECTS OF PNC PROCESS UF<sub>6</sub> CONVERSION

#### I. REVIEW OF PRESENT STATE

I-a. DEVELOPMENT OF PNC PROCESS

I-b. DEMAND FOR UF<sub>6</sub>

#### II. PROFITABILITY

II-a. CASH FLOW ESTIMATION

⇒ II-b. SENSITIVITY

#### III. CONSIDERATION

SAVINGS ON DOMESTIC CONVERSION

#### IV. CONCLUSION

Slide 18

- ① Sensitivity is determined by holding other parameters constant and varying the parameter under investigation.
- ② Figure number one shows relation curves between capacity and ROI.  
Capacity is on x-axis.  
ROI is on Y-axis.
- ③ solid line is equity capital basis curve.  
dotted line is total investment basis curve.
- ④ Besecase, 5,000tU/y, the ROI is about 10%.  
Larger plant, 10,000tU/y the ROI is about 17%.

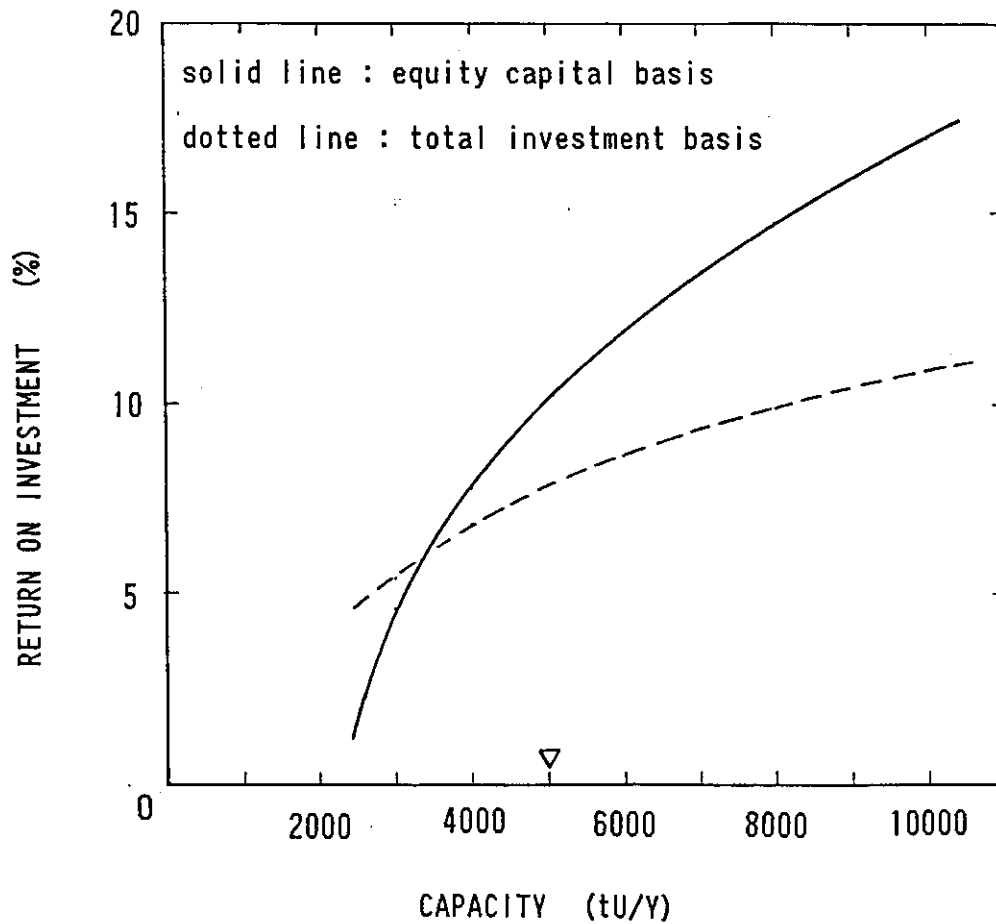


Fig. 1 Capacity vs. ROI

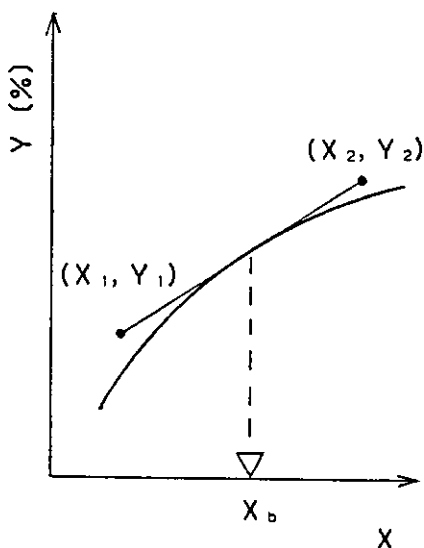


Slide 19

Sensitivity is defined as inclination of the curve on the condition of the base case.

Inverted triangle on x-axis points the condition of the basecase.

Using these equations, Sensitivity is standardized into dimensionless value.



$$X \text{ (\%)} \quad S = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$X \text{ (-)} \quad S = \frac{Y_2 - Y_1}{(X_2 - X_1) * 100}$$

$$X \text{ (tU/y)} \quad S = \frac{Y_2 - Y_1}{(X_2 - X_1) / X_0 * 100}$$

$$X \text{ (\$/kgU)}$$

$$X \text{ (year)}$$

S : SENSITIVITY

Slide 20

Fig. number 2 shows relation between relative construction cost vs. ROI.

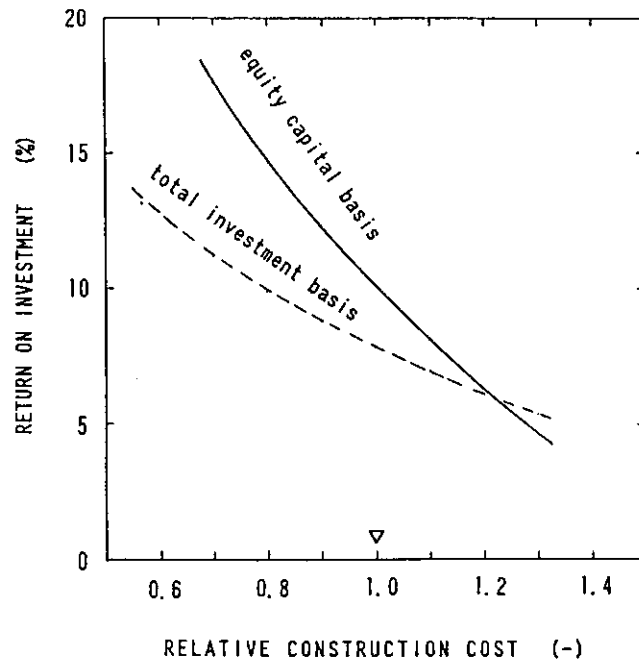


Fig.-2 Relative construction cost vs. ROI

Slide 21

Fig. number 3 shows relation between relative operation cost vs. ROI.

Other relation curves are described in delivered paper.

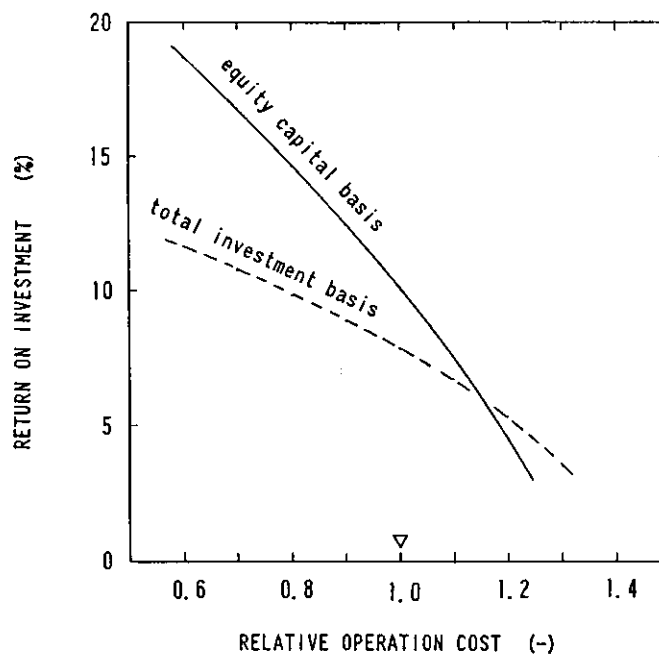


Fig.3 Relative operation cost vs. ROI

Slide 22

Results are summarized in Table number 1. High sensitive parameters are interest and conversion price. But we are not able to change them.

Relatively sensitive parameters are construction cost, operation cost and ratio of production over capacity. These are objects which we should make efforts to improve. Low sensitive parameters are plant capacity, ratio of equity over total investment and pay back period.

Table-1 Result of sensitivity analyses

| Parameter                            | Base case | Sensitivity<br>[ % - ROI / % - parameter ] |                        |
|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------------|------------------------|
|                                      |           | Equity basis                               | Total investment basis |
| 1) Capacity                          | 5000tU/y  | + 0.098                                    | + 0.048                |
| 2) Construction cost                 | 1.0       | - 0.20                                     | - 0.098                |
| 3) Operation cost                    | 1.0       | - 0.25                                     | - 0.11                 |
| 4) Ratio of production /capacity     | 1.0       | + 0.25                                     | + 0.10                 |
| 5) Conversion price                  | 10 \$/kgU | + 0.40                                     | + 0.18                 |
| 6) Ratio of equity/ total investment | 30 %      | - 0.12                                     | - 0.012                |
| 7) Interest                          | 6 %       | - 0.76                                     | + 0.18                 |
| 8) Payback period                    | 10 year   | + 0.042                                    | + 0.0065               |

ECONOMIC ASPECTS OF PNC PROCESS  
UF<sub>6</sub> CONVERSION

I. REVIEW OF PRESENT STATE

- I-a. DEVELOPMENT OF PNC PROCESS
- I-b. DEMAND FOR UF<sub>6</sub>

II. PROFITABILITY

- II-a. CASH FLOW ESTIMATION
- II-b. SENSITIVITY

⇒ III. CONSIDERATION  
SAVINGS ON DOMESTIC CONVERSION

IV. CONCLUSION

Slide 24

Fig. number 10 shows relation between operation cost and ROI in case of 2,000tU/y small plant.

To improve ROI over 10%, in this capacity operation cost should be cut down by half.

It is almost impossible to make such reduction. So we study other saving factors concerning to domestic conversion plant.

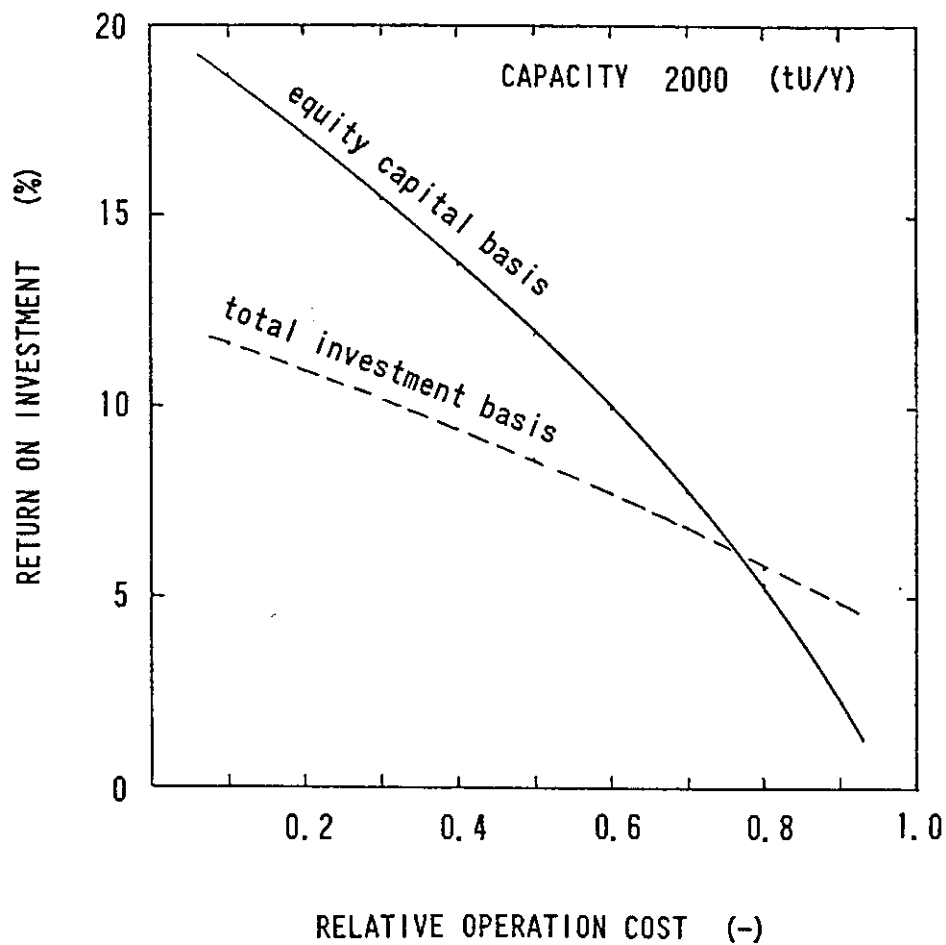


Fig. 10 Relative operation cost vs. ROI

Slide 25

If the conversion plant is sited adjacent to the enrichment plant,  $UF_6$  transportation cost can be cut down. The cost is equal to 36% of the operation cost. And the risk on  $UF_6$  transportation can be reduced.

If the conversion facility is assumed to be attached to the enrichment plant, the general expenses can be reduced. Half of the general expenses is equal to 8% of the operation cost.

Reconversion of tail  $UF_6$  to more stable oxide is examined. Recovered HF can be used in conversion plant. The HF cost is 22% of the operation cost of the plant.

In PNC-process, dilute HF solution can be used in  $UF_6$  precipitation step.

The  $UF_6$  in one 48Y-cylinder is reconverted into  $U_3O_8$  in 31 drums. Cost difference between the containers is equal to 16% of the operation cost.

Total of cost savings amounts to 82% of the operation cost.

| SAVINGS IN DOMESTIC CONVERSION                |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| <u>ADJACENT TO . . . .</u>                    |       |
| TRANSPORTATION OF $UF_6$                      | 3 6 % |
| <u>ATTACHED TO . . . .</u>                    |       |
| 1 / 2 OF GENERAL EXPENSES                     | 8 %   |
| <u>RECONVERSION OF TAIL <math>UF_6</math></u> |       |
| RECOVERED HF                                  | 2 2 % |
| CONTAINER<br>(4 8 Y - DRUMS)                  | 1 6 % |
| <hr/>                                         |       |
| TOTAL 8 2 %                                   |       |

Slide 26

It is sufficient amount to improve ROI over 17%.

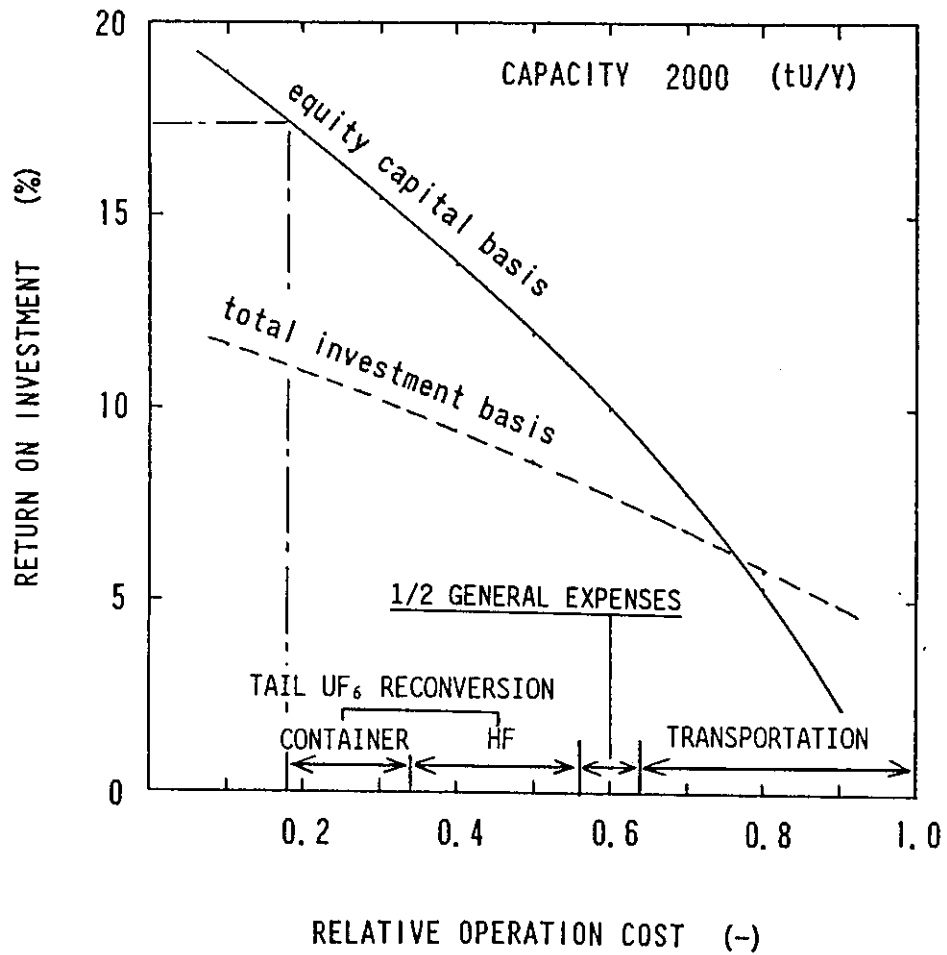


Fig. 10 Relative operation cost vs. ROI

CONCLUSION

1. SENSITIVITY ANALYSES ARE PERFORMED.
2. COST SAVINGS ON DOMESTIC CONVERSION ARE STUDIED.
3. IT IS DIFFICULT TO EXPECT HIGH PROFITABILITY ON SMALL DOMESTIC PLANT.
4. EXAMINATION SHOULD BE MADE INCLUDING COST SAVINGS AND IMPACT ON MARKET.

I thank you deeply for your kind attention to my presentation.



# 資料 4 - 3 「プログラムリスト」

```

1000 ! ***** Discounted Cash Flow Rate of Return *****
1010 ! *   URANIUM CONVERSION COMMERCIAL PLANT   HP9845B   *
1020 ! *   ECONOMIC EVALUATION                   1988 SEP REV.1   *
1030 ! *   "IRR1"                               Shuji WAKABAYASHI *
1040 ! *****
1050 GOSUB Init      ! INITIALIZE
1060 ! ----- CAPACITY, OPERATION -----
1070      Cap=5000      ! Capacity (tU/Y)
1080      Oy=15         ! Operating Period (Y)
1090      ! Fr(6)=.7     ! OPERATION RATE
1100      ! Fr(7)=.80
1110      ! Fr(8)=.9
1120      FOR I=6 TO 20
1130          Fr(I)=1
1140      NEXT I
1150 ! ----- CONVERSION PRICE -----
1160      Er=130        ! EXCHANGE RATE [¥/$]
1170      Prd=10        ! CONVERSION PRICE [$/kgU]
1180      Pry=Prd*Er    ! CONVERSION PRICE [1000¥/tU]
1190 ! ----- DEPRECIATION PERIOD -----
1200      Nde=15       ! EQUIPMENT
1210      Ndb=45       ! BUILDING (Y)
1220      Ndbe=18      ! EQUIPMENT BELONG TO BUILDING
1230 ! ----- RATE OF TAX -----
1240      Rc=.014      ! CAPITAL TAX [-]
1250      Re=.12       ! ENTERPRISE TAX [-]
1260      Ri=.3675     ! INCOME TAX [-]
1270      Rid=.26      ! INCOME TAX FOR DIVIDENT
1280      Rp=.147      ! LOCAL TAX
1290 ! ----- CAPITAL COST -----
1300      Kc=1
1310      Cptb=716000*(Cap/600)^.6*Kc      ! BUILDING
1320      Cpte=2868000*(Cap/600)^.6*Kc      ! EQUIPMENT
1330      Cptbe=497000*(Cap/600)^.6*Kc      ! EQUIPMENT B TO B.
1340      Cptd=(Cptb+Cptbe)*.027+Cpte*.039 ! DESIGN
1350      Cpt=Cptb+Cpte+Cptbe+Cptd         ! TOTAL
1360 ! ----- INVESTMENT -----
1370      It(1)=Cptd
1380      It(2)=Cptb
1390      It(3)=Cptbe
1400      It(4)=2/3*Cpte
1410      It(5)=1/3*Cpte
1415      It(6)=Cap*Pry*.25 ! WORKING CAPITAL 1/4 OF GROSS SALES
1420      FOR I=1 TO 5
1430          Ft(I)=-It(I)
1440      NEXT I
1450 ! ----- LOAN, PAYBACK -----
1460      Il=.7         ! Loan/Investment ratio
1470      In=.06        ! Interest OF LOAN
1480      Nl=10         ! Payback Period (Y)
1490      FOR I=1 TO 5
1500          Lo(I)=It(I)*Il
1510          Ca(I)=It(I)-Lo(I)
1520          Fi(I)=-Ca(I)
1530          Ic(I)=It(I)
1540          Ln(I)=(Ln(I-1)+Lo(I))*(1+In)
1550      NEXT I
1555      Iw(6)=It(6)
1556      Lo(6)=It(6)*Il
1557      Ca(6)=It(6)-Lo(6)
1558      Ln(5)=Ln(5)+Lo(6)
1560      Payb=Ln(5)*In/(1-(1+In)^(-Nl))
1570      FOR I=6 TO 5+Nl
1580          Pb(I)=Payb
1590      NEXT I
1600 ! -----
1610      Divid=Cpt*(1-Il)*.10
1620      Cpte=Cpte*1.039
1630      Cptb=Cptb*1.027

```

```

1640      Cptbe=Cptbe*1.027
1650      Vre(5)=Cpte
1660      Vrbe(5)=Cptbe
1670      Vrb(5)=Cptb
1680      Flag=0
1690      ! ++++++
1700      FOR N=6 TO 20
1710          Rv(N)=Pry*Fr(N)*Cap
1720          Kop=1
1730          Cop(1)=326.2*Cap*Fr(N)          ! RAW MATERIALS
1740          Cop(2)=3500*40*(Cap/600)^.2    ! DIRECT LABOR
1750          Cop(3)=Cpte*.03+Cptbe*.015     ! MAINTENANCE
1760          Cop(4)=Cpte*.005               ! OPERATING SUPPLIES
1770          Cop(5)=Cop(2)*.2               ! PLANT SUPERVISION
1780          Cop(6)=Rv(N)*.10               ! GENERAL EXPENSES
1790          Cop(7)=12600*(Cap/600)^.6      ! LAND RENT
1800          Cop(8)=86*Cap*Fr(N)+35000*(Cap/600)^.6 ! ELECTRICITY
1810          Cop(9)=16*Cap*Fr(N)+8000*(Cap/600)^.6 ! STEAM
1820          FOR I=1 TO 9
1830              Opc(N)=Opc(N)+Cop(I)
1840          NEXT I
1850          Opc(N)=Opc(N)*Kop
1870          Gp(N)=Rv(N)-Opc(N)
1880          ! ----- CAPITAL TAX -----
1890              Dee(N)=Cpte*(.10^((N-6)/Nde)-.10^((N-5)/Nde))
1900              Debe(N)=Cptbe*(.10^((N-6)/Ndbe)-.10^((N-5)/Ndbe))
1910              Deb(N)=Cptb*(.10^((N-6)/Ndb)-.10^((N-5)/Ndb))
1920              ! Dee(N)=Cpte*.9*.083
1930              ! IF N>17 THEN Dee(N)=0
1940              ! Debe(N)=Cptbe*.9*.055
1950              ! Deb(N)=Cptb*.9*.023
1960              De(N)=Dee(N)+Debe(N)+Deb(N)
1970              Vre(N)=Vre(N-1)-Dee(N)
1980              Vrbe(N)=Vrbe(N-1)-Debe(N)
1990              Vrb(N)=Vrb(N-1)-Deb(N)
2000              Tkx(N)=Rc*(Cptb+Vre(N)+Vrbe(N))
2010          ! ----- LOAN, PAYBACK -----
2020              IF (N>5+N1) AND (Lr(N-1)>0) THEN Pb(N)=Lr(N-1)*(1+In)
2030              IF Pb(N)>Payb THEN Pb(N)=Payb
2040              Li(N)=Lr(N-1)*In
2050              Lr(N)=Lr(N-1)*(1+In)-Pb(N)
2060          ! ----- ENTERPRISE TAX -----
2070              Acc(N-1)=Acc(N-2)+Bt(N-1)
2080              IF Acc(N-1)<=0 THEN Txe(N)=0
2090              IF Acc(N-1)<=0 THEN GOTO Etr
2100              IF Flag=0 THEN Flag=1
2110              IF Flag=1 THEN Flag=2
2120              IF Flag=1 THEN Txe(N)=Acc(N-1)*Re
2130              IF Flag=2 THEN Txe(N)=Bt(N-1)*Re
2140      Etr: ! ----- INCOME TAX -----
2150              Bt(N)=Gp(N)-De(N)-Tkx(N)-Txe(N)-Li(N)
2160              Txi(N)=Bt(N)*Ri
2170              IF Bt(N)<0 THEN Txi(N)=0
2180              Txp(N)=Txi(N)*Rp
2190              Div(N)=0
2200              Xxx=Bt(N)-Txi(N)-Txp(N)+Li(N)-Pb(N)
2210              IF Xxx>=Divid THEN GOSUB Divi
2220              IF Bt(N)<0 THEN Txi(N)=0
2230              IF Bt(N)<0 THEN Txp(N)=0
2240          ! -----
2250              Txt(N)=Txi(N)+Txp(N)+Txe(N)+Tkx(N) ! REF
2260              At(N)=Bt(N)-Txi(N)-Txp(N)
2270              Fi(N)=At(N)+De(N)+Li(N)-Pb(N)-Ca(N)
2280              Res(N)=Fi(N)-Div(N)
2290          ! -----
2300              Cash=Gp(N)-Tkx(N)-Pb(N)
2310              IF Cash>=0 THEN GOTO Next
2320              Iw(N)=-Cash
2330              It(N)=Iw(N)
2340              Lo(N)=Iw(N)*I1

```

```

2350 Ca(N)=It(N)-Lo(N)
2360 Li(N)=(Lr(N-1)+Lo(N))*In
2370 Lr(N)=(Lr(N-1)+Lo(N))*(1+In)-Pb(N)
2380 Bt(N)=Gp(N)-De(N)-Tkx(N)-Txe(N)-Li(N)
2390 Txi(N)=Bt(N)*Ri
2400 IF Bt(N)<0 THEN Txi(N)=0
2410 Txp(N)=Txi(N)*Rp
2420 Txt(N)=Tkx(N)+Txe(N)+Txi(N)+Txp(N)
2430 At(N)=Bt(N)-Txi(N)-Txp(N)
2440 Fi(N)=At(N)+De(N)+Li(N)-Pb(N)-Ca(N)
2450 Res(N)=Fi(N)-Div(N)
2460 Next: Ft(N)=Gp(N)-Txt(N)-It(N)
2470 IF N=20 THEN Fi(N)=Fi(N)+Vre(N)+Vrbe(N)+Vrb(N)+Iw(6)
2480 IF N=20 THEN Ft(N)=Ft(N)+Vre(N)+Vrbe(N)+Vrb(N)+Iw(6)
2490 NEXT N
2500 ! ++++++
2510 GOSUB Calctib
2520 GOSUB Calc
2530 GOSUB Print
2540 END
2550 Calctib: ! ***** ROI CALCULATION *****
2560 DEF FNI1t(X)=It(1)*(1+X)^5
2570 DEF FNI2t(X)=It(2)*(1+X)^4
2580 DEF FNI3t(X)=It(3)*(1+X)^3
2590 DEF FNI4t(X)=It(4)*(1+X)^2
2600 DEF FNI5t(X)=It(5)*(1+X)^1
2610 DEF FNT6(X)=Ft(6)/(1+X)^1
2620 DEF FNT7(X)=Ft(7)/(1+X)^2
2630 DEF FNT8(X)=Ft(8)/(1+X)^3
2640 DEF FNT9(X)=Ft(9)/(1+X)^4
2650 DEF FNT10(X)=Ft(10)/(1+X)^5
2660 DEF FNT11(X)=Ft(11)/(1+X)^6
2670 DEF FNT12(X)=Ft(12)/(1+X)^7
2680 DEF FNT13(X)=Ft(13)/(1+X)^8
2690 DEF FNT14(X)=Ft(14)/(1+X)^9
2700 DEF FNT15(X)=Ft(15)/(1+X)^10
2710 DEF FNT16(X)=Ft(16)/(1+X)^11
2720 DEF FNT17(X)=Ft(17)/(1+X)^12
2730 DEF FNT18(X)=Ft(18)/(1+X)^13
2740 DEF FNT19(X)=Ft(19)/(1+X)^14
2750 DEF FNT20(X)=Ft(20)/(1+X)^15
2760 DEF FNI1t(X)=FNI1t(X)+FNI2t(X)+FNI3t(X)+FNI4t(X)+FNI5t(X)
2770 DEF FNT(X)=FNT6(X)+FNT7(X)+FNT8(X)+FNT9(X)+FNT10(X)+FNT11(X)+FNT12(X)+FNT13(X)+FNT14(X)+FNT15(X)+FNT16(X)+FNT17(X)+FNT18(X)+FNT19(X)+FNT20(X)
2780 DEF FNMt(X)=FNT(X)-FNI1t(X)
2790 ! ///////////////////////////////////////////////////
2800 A=0
2810 B=4
2820 S=SGN(FNMt(A))
2830 IF S=0 THEN Pt2
2840 X(1+S)=A
2850 X(1-S)=B
2860 Pt1: X=(X(0)+X(2))/2
2870 F=SGN(FNMt(X))
2880 IF F=0 THEN Pt3
2890 X(1+F)=X
2900 IF ABS(X(0)-X(2))/(ABS(X(0))+ABS(X(2)))<.00001 THEN Pt3
2910 GOTO Pt1
2920 Pt2: X=A
2930 Pt3: Roitib=X
2940 RETURN
2950 Print: ! ***** PRINT OUT ROUTINE *****
2960 PRINT ""
2970 PRINT ""
2980 PRINT USING Image3;"CAPACITY";Cap;"[tU/Y]"
2990 PRINT USING Image3;"EXCHANGE RATE";Er;"[%/$]"
3000 PRINT USING Image3;"CONVERSION PRICE";Prd;"[$/kgU],[1000$/tU]"
3010 PRINT USING Image3;"CONVERSION PRICE";Pry;"[%/kgU],[1000$/tU]"
3020 PRINT USING Image4;"INTEREST";In*100;"[%]"
3030 PRINT USING Image4;"LOAN/INVESTMENT";I1*100;"[%]"

```

```

3040      PRINT USING Image3;"PAYBACK PERIOD";N1;"[YEAR]"
3050      PRINT USING Image3;"CONSTRUCTION COST";Cpt/1000;"[MILLION$]"
3060      PRINT USING Image3;"OPERATION COST";Opc(20)/Cap;"[1000$/tU]"
3070      PRINT ""
3080      PRINT ""
3090      PRINT "****RATE OF RETURN ON TOTAL INVESTMENT ";Roitib*100;"[%] **
**"
3100      PRINT ""
3110      PRINT ""
3120      PRINT "*** RATE OF RETURN ON INVESTMENT ";Roi*100;"[%] ****"
3130      PRINT ""
3140      PRINT ""
3150      PRINT USING Image2;" N";"      Ic";"      Iw";"      It";"      L
o";"      Ca";"      Lr";"      Pb";"      Li"
3160      Q=1000
3170      FOR N=1 TO 20
3180      PRINT USING Image1;N;Ic(N)/Q;Iw(N)/Q;It(N)/Q;Lo(N)/Q;Ca(N)/Q;Lr(N
)/Q;Pb(N)/Q;Li(N)/Q
3190      NEXT N
3200      PRINT ""
3210      PRINT ""
3220      PRINT USING Image2;" N";"tU/Y-UF6";"      Rv";"      Opc";"      G
p";"      At";"      Res";"      Fi";"      Ft"
3230      FOR N=1 TO 20
3240      PRINT USING Image1;N;Fr(N)*Cap;Rv(N)/Q;Opc(N)/Q;Gp(N)/Q;At(N)/Q;R
es(N)/Q;Fi(N)/Q;Ft(N)/Q
3250      NEXT N
3260      PRINT PAGE ! -----
3270      PRINT USING Image2;" N";"      Dee";"      Debe";"      Deb";"      D
e";"      Vre";"      Vrbe";"      Vrb"
3280      FOR N=1 TO 20
3290      PRINT USING Image1;N;Dee(N)/Q;Debe(N)/Q;Deb(N)/Q;De(N)/Q;Vre(N)/Q
;Vrbe(N)/Q;Vrb(N)/Q
3300      NEXT N
3310      PRINT ""
3320      PRINT ""
3330      PRINT USING Image2;" N";"      Bt";"      Acc";"      Div";"      Tx
e";"      Txi";"      Txp";"      Tkx";"      Txt"
3340      FOR N=1 TO 20
3350      PRINT USING Image1;N;Bt(N)/Q;Acc(N)/Q;Div(N)/Q;Txe(N)/Q;Txi(N)/Q;
Txp(N)/Q;Tkx(N)/Q;Txt(N)/Q
3360      NEXT N
3370      PRINT ""
3380      PRINT ""
3390      FOR I=1 TO 9
3400      PRINT USING "DXX,20A,DDDDDD.D";I,Cop$(I),Cop(I)/1000
3410      NEXT I
3411      PRINT "-----"
3415      PRINT USING "AAA,DDDDDD.D";"Opc",Opc(20)/1000
3420 Image1:  IMAGE DDX,8(DDDDDD.DX)
3430 Image2:  IMAGE AAX,8(8AX)
3440 Image3:  IMAGE 20AXXX,DDDDDD.DXXX,20A
3450 Image4:  IMAGE 20AXXX,DDD.DDDDDXXX,20A
3460 PRINT PAGE
3470 RETURN
3480 Init:  ! ***** INITIALIZE *****
3490      OPTION BASE 0
3500      FIXED 2
3501      Cop$(1)="RAW MATERIAL"
3502      Cop$(2)="DIRECT LABOR"
3503      Cop$(3)="MAINTENANCE "
3504      Cop$(4)="OPERATING SUPPLIES"
3505      Cop$(5)="PLANT SUPERVISION"
3506      Cop$(6)="GENERAL EXPENCES"
3507      Cop$(7)="LAND RENT   "
3508      Cop$(8)="ELECTRICITY  "
3509      Cop$(9)="STEAM       "
3510      DIM Fr(20)      ! PRODUCTION RATE [-]
3520      DIM Rv(20)      ! ANNUAL REVENUE
3530      DIM Opc(20)     ! OPERATION COST [1000$]

```

```

3540 DIM Gp(20) ! GROSS PROFIT
3550 DIM At(20) ! INCOME AFTER TAX
3560 DIM Res(20) ! RESERVE
3570 DIM Fi(20) ! CASH FLOW , At+De
3580 DIM Ft(20) ! CASH FLOW FOR TOTAL INVESTMENT
3590 ! -----
3600 DIM Dee(20) ! EQUIPMENT
3610 DIM Debe(20) ! EQUIPMENT A/ B/
3620 DIM Deb(20) ! BUILDING
3630 DIM De(20) ! TOTAL DEPRICIATION [1000#]
3640 DIM Vre(20) ! BOOK VALUE OF EQUIPMENT
3650 DIM Vrb(20) ! BOOK VALUE, OF BUILDING
3660 DIM Vrbe(20) ! BOOK VALUE OF EQUIPMENT B T B.
3670 ! -----
3680 DIM Bt(20) ! TAXABLE INCOME [1000#]
3690 DIM Acc(20) ! ACCUMULATION OF Bt(N-1) FOR ENTER PRISE TAX Txe
3700 DIM Div(20) ! DIVIDENT
3710 DIM Txe(20) ! ENTERPRISE TAX, ON Bt(N-1)
3720 DIM Txi(20) ! INCOME TAX
3730 DIM Txp(20) ! LOCAL TAX
3740 DIM Tkx(20) ! CAPITAL TAX
3750 DIM Txt(20) ! TOTAL TAX Tkx+Txe+Txi+Txp
3760 ! -----
3770 DIM Ic(20) ! INVESTMENT
3780 DIM Iw(20) ! WORKING CAPITAL
3790 DIM It(20) ! TOTAL INVESTMENT It(N)=Ic(N)+Iw(N)
3800 DIM Lo(20) ! Lo=It*I DEBT, LOAN
3810 DIM Ca(20) ! Ca=It-Lo
3820 DIM Lr(20) ! LOAN BALANCE
3830 DIM Pb(20) ! PAYBACK
3840 DIM Li(20) ! INTEREST
3850 RETURN ! *****
3860 Divi: !
3870 Txi(N)=(Bt(N)-Divid)*Ri+Divid*Rid
3880 Txp(N)=Txi(N)*Rp
3890 Div(N)=Divid
3900 RETURN
3910 Calc: ! ***** ROI CALUCULATION *****
3920 DEF FNI1(X)=Ca(1)*(1+X)^5
3930 DEF FNI2(X)=Ca(2)*(1+X)^4
3940 DEF FNI3(X)=Ca(3)*(1+X)^3
3950 DEF FNI4(X)=Ca(4)*(1+X)^2
3960 DEF FNI5(X)=Ca(5)*(1+X)^1
3970 DEF FNA6(X)=Fi(6)/(1+X)^1
3980 DEF FNA7(X)=Fi(7)/(1+X)^2
3990 DEF FNA8(X)=Fi(8)/(1+X)^3
4000 DEF FNA9(X)=Fi(9)/(1+X)^4
4010 DEF FNA10(X)=Fi(10)/(1+X)^5
4020 DEF FNA11(X)=Fi(11)/(1+X)^6
4030 DEF FNA12(X)=Fi(12)/(1+X)^7
4040 DEF FNA13(X)=Fi(13)/(1+X)^8
4050 DEF FNA14(X)=Fi(14)/(1+X)^9
4060 DEF FNA15(X)=Fi(15)/(1+X)^10
4070 DEF FNA16(X)=Fi(16)/(1+X)^11
4080 DEF FNA17(X)=Fi(17)/(1+X)^12
4090 DEF FNA18(X)=Fi(18)/(1+X)^13
4100 DEF FNA19(X)=Fi(19)/(1+X)^14
4110 DEF FNA20(X)=Fi(20)/(1+X)^15
4120 DEF FNI(X)=FNI1(X)+FNI2(X)+FNI3(X)+FNI4(X)+FNI5(X)
4130 DEF FNA(X)=FNA6(X)+FNA7(X)+FNA8(X)+FNA9(X)+FNA10(X)+FNA11(X)+FNA12(X)+FNA
13(X)+FNA14(X)+FNA15(X)+FNA16(X)+FNA17(X)+FNA18(X)+FNA19(X)+FNA20(X)
4140 DEF FNM(X)=FNA(X)-FNI(X)
4150 ! //////////////////////////////////
4160 A=0
4170 B=4
4180 S=SGN(FNM(A))
4190 IF S=0 THEN P2
4200 X(1+S)=A
4210 X(1-S)=B
4220 P1: X=(X(0)+X(2))/2

```

```

4230      F=SGN(FNM(X))
4240      IF F=0 THEN P3
4250      X(1+F)=X
4260      IF ABS(X(0)-X(2))/(ABS(X(0))+ABS(X(2)))<.00001 THEN P3
4270      GOTO P1
4280 P2:      X=A
4290 P3:      Roi=X
4300      RETURN
10000 ! Print:      !
10001 PRINT USING "DDXX,DDDDXX,DDD.DDXX,DDD.DD";Prd,Cap,Roi*100,Roiti*100
10002 RETURN

```

# 資料 4 - 4 「計算結果の出力例」

|                   |         |                       |
|-------------------|---------|-----------------------|
| CAPACITY          | 5000.0  | [tU/Y]                |
| EXCHANGE RATE     | 130.0   | [\$/¥]                |
| CONVERSION PRICE  | 10.0    | [\$/kgU], [1000\$/tU] |
| CONVERSION PRICE  | 1300.0  | [\$/kgU], [1000\$/tU] |
| INTEREST          | 6.0000  | [%]                   |
| LOAN/INVESTMENT   | 70.0000 | [%]                   |
| PAYBACK PERIOD    | 10.0    | [YEAR]                |
| CONSTRUCTION COST | 15079.3 | [MILLION¥]            |
| OPERATION COST    | 729.1   | [1000\$/tU]           |

\*\*\*RATE OF RETURN ON TOTAL INVESTMENT 7.88 [%] \*\*\*\*

\*\*\* RATE OF RETURN ON INVESTMENT 10.16 [%] \*\*\*\*

| N  | Ic     | Iw     | It     | Lo     | Ca     | Lr      | Pb     | Li    |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|-------|
| 1  | 516.0  | 0.0    | 516.0  | 361.2  | 154.8  | 382.9   | 0.0    | 0.0   |
| 2  | 2555.1 | 0.0    | 2555.1 | 1788.6 | 766.5  | 2301.7  | 0.0    | 0.0   |
| 3  | 1773.6 | 0.0    | 1773.6 | 1241.5 | 532.1  | 3755.8  | 0.0    | 0.0   |
| 4  | 6823.1 | 0.0    | 6823.1 | 4776.1 | 2046.9 | 9043.9  | 0.0    | 0.0   |
| 5  | 3411.5 | 0.0    | 3411.5 | 2388.1 | 1023.5 | 13255.4 | 0.0    | 0.0   |
| 6  | 0.0    | 1625.0 | 1625.0 | 1137.5 | 487.5  | 12249.7 | 1801.0 | 795.3 |
| 7  | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 11183.7 | 1801.0 | 735.0 |
| 8  | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 10053.8 | 1801.0 | 671.0 |
| 9  | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 8856.0  | 1801.0 | 603.2 |
| 10 | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 7586.4  | 1801.0 | 531.4 |
| 11 | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 6240.6  | 1801.0 | 455.2 |
| 12 | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 4814.0  | 1801.0 | 374.4 |
| 13 | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 3301.9  | 1801.0 | 288.8 |
| 14 | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 1699.0  | 1801.0 | 198.1 |
| 15 | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | -0.0    | 1801.0 | 101.9 |
| 16 | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | -0.0    | 0.0    | -0.0  |
| 17 | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | -0.0    | 0.0    | -0.0  |
| 18 | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | -0.0    | 0.0    | -0.0  |
| 19 | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | -0.0    | 0.0    | -0.0  |
| 20 | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | -0.0    | 0.0    | -0.0  |

| N  | tU/Y-UF6 | Rv     | Opc    | Gp     | At     | Res    | Fi      | Ft      |
|----|----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 1  | 0.0      | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | -154.8  | -516.0  |
| 2  | 0.0      | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | -766.5  | -2555.1 |
| 3  | 0.0      | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | -532.1  | -1773.6 |
| 4  | 0.0      | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | -2046.9 | -6823.1 |
| 5  | 0.0      | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | -1023.5 | -3411.5 |
| 6  | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 5.4    | 375.1  | 375.1   | 1038.6  |
| 7  | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 195.3  | 744.0  | 744.0   | 2545.0  |
| 8  | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 343.7  | 614.4  | 614.4   | 2415.4  |
| 9  | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 480.8  | 499.1  | 499.1   | 2300.1  |
| 10 | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 605.8  | 392.9  | 392.9   | 2193.9  |
| 11 | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 721.1  | 294.4  | 294.4   | 2095.4  |
| 12 | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 828.4  | 202.1  | 202.1   | 2003.1  |
| 13 | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 929.4  | 114.8  | 114.8   | 1915.8  |
| 14 | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 1025.4 | 31.2   | 31.2    | 1832.2  |
| 15 | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 1117.6 | -49.6  | -49.6   | 1751.4  |
| 16 | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 1262.9 | 1275.8 | 1728.2  | 1728.2  |
| 17 | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 1288.2 | 1243.5 | 1695.9  | 1695.9  |
| 18 | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 1316.3 | 1221.8 | 1674.1  | 1674.1  |
| 19 | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 1340.0 | 1202.1 | 1654.5  | 1654.5  |
| 20 | 5000.0   | 6500.0 | 3645.6 | 2854.4 | 1360.7 | 1185.1 | 5811.2  | 5811.2  |

| N  | Dee    | Debe  | Deb   | De     | Vre     | Vrbe   | Vrb    |
|----|--------|-------|-------|--------|---------|--------|--------|
| 1  | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0    |
| 2  | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0    |
| 3  | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0    |
| 4  | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0    |
| 5  | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.0    | 10633.7 | 1821.5 | 2624.1 |
| 6  | 1513.2 | 218.7 | 130.9 | 1862.8 | 9120.5  | 1602.7 | 2493.2 |
| 7  | 1297.9 | 192.5 | 124.4 | 1614.7 | 7822.6  | 1410.3 | 2368.8 |
| 8  | 1113.2 | 169.3 | 110.2 | 1400.7 | 6709.4  | 1240.9 | 2250.7 |
| 9  | 954.8  | 149.0 | 112.3 | 1216.1 | 5754.7  | 1091.9 | 2138.4 |
| 10 | 818.9  | 131.1 | 106.7 | 1056.7 | 4935.7  | 960.8  | 2031.7 |
| 11 | 702.4  | 115.4 | 101.3 | 919.1  | 4233.4  | 845.4  | 1930.4 |
| 12 | 602.4  | 101.5 | 96.3  | 800.2  | 3630.9  | 743.9  | 1834.1 |
| 13 | 516.7  | 89.3  | 91.5  | 697.5  | 3114.2  | 654.6  | 1742.6 |
| 14 | 443.2  | 78.6  | 86.9  | 608.7  | 2671.1  | 576.0  | 1655.7 |
| 15 | 380.1  | 69.2  | 82.6  | 531.9  | 2291.0  | 506.8  | 1573.1 |
| 16 | 326.0  | 60.9  | 78.5  | 465.3  | 1965.0  | 446.0  | 1494.6 |
| 17 | 279.6  | 53.6  | 74.6  | 407.7  | 1685.3  | 392.4  | 1420.1 |
| 18 | 239.8  | 47.1  | 70.8  | 357.8  | 1445.5  | 345.3  | 1349.2 |
| 19 | 205.7  | 41.5  | 67.3  | 314.5  | 1239.8  | 303.8  | 1281.9 |
| 20 | 176.4  | 36.5  | 63.9  | 276.9  | 1063.4  | 267.4  | 1218.0 |

| N  | Bt     | Acc     | Div   | Txe   | Txi   | Txp   | Tkx   | Txt    |
|----|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1  | 0.0    | 0.0     | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0    |
| 2  | 0.0    | 0.0     | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0    |
| 3  | 0.0    | 0.0     | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0    |
| 4  | 0.0    | 0.0     | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0    |
| 5  | 0.0    | 0.0     | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0    |
| 6  | 9.3    | 9.3     | 0.0   | 0.0   | 3.4   | .5    | 186.9 | 190.8  |
| 7  | 337.6  | 346.9   | 0.0   | 1.1   | 124.1 | 18.2  | 166.0 | 309.4  |
| 8  | 594.1  | 941.0   | 0.0   | 40.5  | 218.3 | 32.1  | 148.0 | 439.0  |
| 9  | 831.2  | 1772.2  | 0.0   | 71.3  | 305.5 | 44.9  | 132.6 | 554.2  |
| 10 | 1047.3 | 2819.5  | 0.0   | 99.7  | 384.9 | 56.6  | 119.3 | 660.5  |
| 11 | 1246.6 | 4066.0  | 0.0   | 125.7 | 458.1 | 67.3  | 107.8 | 759.0  |
| 12 | 1432.1 | 5498.1  | 0.0   | 149.6 | 526.3 | 77.4  | 98.0  | 851.2  |
| 13 | 1606.6 | 7104.8  | 0.0   | 171.9 | 590.4 | 86.8  | 89.5  | 938.6  |
| 14 | 1772.6 | 8877.3  | 0.0   | 192.8 | 651.4 | 95.8  | 82.2  | 1022.2 |
| 15 | 1931.9 | 10809.3 | 0.0   | 212.7 | 710.0 | 104.4 | 75.9  | 1103.0 |
| 16 | 2086.7 | 12896.0 | 452.4 | 231.8 | 718.2 | 105.6 | 70.5  | 1126.1 |
| 17 | 2130.4 | 15026.4 | 452.4 | 250.4 | 734.3 | 107.9 | 65.8  | 1158.5 |
| 18 | 2179.1 | 17205.5 | 452.4 | 255.6 | 752.2 | 110.6 | 61.8  | 1180.2 |
| 19 | 2220.1 | 19425.6 | 452.4 | 261.5 | 767.2 | 112.8 | 58.3  | 1199.9 |
| 20 | 2255.7 | 0.0     | 452.4 | 266.4 | 780.3 | 114.7 | 55.4  | 1216.8 |

|   |                    |        |
|---|--------------------|--------|
| 1 | RAW MATERIAL       | 1631.0 |
| 2 | DIRECT LABOR       | 213.9  |
| 3 | MAINTENANCE        | 346.3  |
| 4 | OPERATING SUPPLIES | 53.2   |
| 5 | PLANT SUPERVISION  | 42.8   |
| 6 | GENERAL EXPENCES   | 650.0  |
| 7 | LAND RENT          | 45.0   |
| 8 | ELECTRICITY        | 554.9  |
| 9 | STEAM              | 108.5  |

-----  
Opc 3645.6



## 5. 論文和訳

発表された14件の論文の和訳\*を次頁以降に示す。

| No | 著 者                                                             | 所属・機関         | 表 題                                                                                      | 頁   |
|----|-----------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1  | J. L. Rojas                                                     | IAEA          | Nuclear Energy: Recent Projections                                                       | 63  |
| 2  | J. M. Josa<br>J. R. Serrano                                     | ENUSA         | Spanish yellow cake production by bioleaching                                            | 85  |
| 3  | P. C. F. Crowson                                                | RTZ           | Uranium: The recalcitrant commodity                                                      | 105 |
| 4  | J. M. Josa<br>J. R. Serrano                                     | ENUSA         | How to recover U from low grade U vein deposits                                          | 123 |
| 5  | C. Villanueva Moreno<br>R. Ortega Carmona<br>L. Sanches Herrera | CFE           | Economics of use of Laguna Verde 2. initial core as reloads of Laguna Verde 1.           | 141 |
| 6  | C. D. Forsey<br>T. Williams                                     | BNFL          | A technical and economic comparison of the conversion of natural and reprocessed uranium | 157 |
| 7  | 安田 式郎<br>音村 圭一郎<br>若林 修二                                        | PNC           | Economic aspects of PNC process                                                          | 171 |
| 8  | R. Faron                                                        | Comurhex      | Conversion of ore concentrates and reprocessed uranyl nitrate into $UF_6$                | 181 |
| 9  | E. Leyser                                                       | DWK           | The economics of uranium recycling in the LWR fuel cycle                                 | 193 |
| 10 | M. Presta<br>H. Guiheux                                         | EDF<br>COGEMA | Prospects on french nuclear fuel management                                              | 211 |
| 11 | Liu Qiaosheng<br>Wu Deming                                      | CNNC          | Economics of low enriched uranium in China                                               | 221 |
| 12 | R. B. Kehoe                                                     | URENCO        | The role of centrifuge process                                                           | 229 |
| 13 | J. H. Coates                                                    | CEA           | Compared economic features of enrichment process                                         | 249 |
| 14 | G. H. Archinoff                                                 | Ontario H.    | Low enriched U fuel in CANDU reactor                                                     | 259 |

\* 翻訳：株式会社ペスコ

# 国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部 ウィーン 1988年10月11日-14日

---

T1-TC-665 14

## 原子力：最近の予測

J. L. ロハス IAEA

## 1. 原子力発電容量予測

ウラン市場を語るには現状およびさらには将来の原子力発電容量に関して話さなければならない。我々は過去10年の間にこの容量の予測が引き続いて減っていることに聞き慣れてきた。

2000年における非共産圏世界(WOCA)の容量は2500GWe(1970年代初めの計画)から350GWe(1988年の予測)以下に下がりつつある。

IAEAのように113のメンバー国、すなわち全世界特に原子力の全世界に近い国をカバーする国際的組織の体制内では、3つの地域に分けられる。全世界の原子力の予測を詳しく述べるにはさらに適している。

- OECD加盟国
- OECD以外の非共産圏世界
- CMEA(相互経済援助会議)加盟国

これら3つのグループを加えたものが全世界である。

1987年の終わりには世界に建設された原子力発電所の容量は298GWeで、その内240GWeはOECDグループ(1988年のBrown Book)、17GWeが第二グループにそして43GWeがCMEA加盟国に対応している。

これらの数値から始めて、原子力発電容量の予測値は下記の通りである。

### W O C A

EIA-DOE(エネルギー情報局-米エネルギー省)、NUKEM(ニューケム社)、NUEXCO(ニュークリア、エクスチェンジ社-ヌエクスコ)およびUI(ウラン協会)の4つの予測が使われ、その結果は表Ⅱに示されている。これらのデータはすべてのメンバー国からのデータで作られたIAEAの予測と比較された。

WOCAに対するNUEXCOの予測<sup>(2)</sup>は1987年末の正味247.6GWeに始まり2000年末には総発電設備容量は340.6GWeである。これは13年間に毎年2.5%づつの増加を表わしている。

地域別の設備容量を表Ⅰに示す。

表Ⅰ 地域別原子力発電設備容量

| 地 域       | 1 9 8 7 年 | 2 0 0 0 年 |
|-----------|-----------|-----------|
| 欧 州       | 106.0     | 138.5     |
| 極 東       | 37.1      | 69.0      |
| 米 国       | 88.5      | 106.1     |
| そ の 他 の 国 | 16.0      | 27.0      |
| 合 計       | 247.6     | 340.6     |

出典：NUEXCO

IAEAの予測<sup>(1)</sup>は、1987年から2005年までの全世界の原子力による発電量は平均年率3.8～4.6%で伸びるものと仮定している。これはCPE諸国(中央経済計画国)の原子力発電所建設の影響によるものである。これらの国は原子力発電所の建設に重要な計画を持っており、世界に与える影響は非常にポジティブである。

OECDのBrown Book<sup>(3)</sup>は、1987年から2005年に至るOECD諸国の原子力発電の増加は年間わずか2.3%であろうと推定している。

表Ⅱには異なる出典のデータを並記した。2000年における出典による差の最大値が35GWeでしかないので、大きな矛盾はないと見れよう。

OECD以外のWOCA諸国で何が起ころうとしているか考察することは非常に興味深いことである。これらの諸国は、合計15GWeになる原子炉25基を所有している。そして17基の原子炉、計9GWeが建設中である上にさらに12基の原子炉の建設が計画されている。表Ⅲにその詳細が国別に示されている。

表 II 非共産圏諸国の原子力発電容量予測

| 年    | DOE <sup>(1)</sup> | NUKEM <sup>(2)</sup> | UI <sup>(3)</sup> | NUEXCO <sup>(4)</sup> | Brown Book <sup>(5)</sup><br>(OECD) | IAEA <sup>(6)</sup><br>(全世界) |
|------|--------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 1986 | 239                | 225                  | 225               | -                     | 223                                 | -                            |
| 1987 | 254                | -                    | -                 | 248                   | 240                                 | 298                          |
| 1990 | 287                | 286                  | 290               | -                     | 264                                 | -                            |
| 1995 | -                  | 318                  | 332               | -                     | 281                                 | 385                          |
| 2000 | 336                | 353                  | 372               | 341                   | 300                                 | 444                          |
| 2005 | -                  | -                    | -                 | -                     | 321                                 | 503                          |

(1) Upper Reference Case. World Nuclear Fuel Cycle Requirements 1987.

(2) NUKEM Market Report. September 1987.

(3) The Uranium Market 1986-2000. The Uranium Institute, London 1987.

(4) The NUEXCO Monthly Bulletin. July 1988.

(5) Electricity, Nuclear Power and Fuel Cycle in OECD Countries. NEA-OECD 1988.

(6) Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates up to 2005, IAEA July 1988,  
(low scenario)

表 III 1987年末のOECD以外の非共産圏の原子力発電炉

| 国 名    | 稼 働 中 |       | 建 設 中 |      | 計 画 |       |
|--------|-------|-------|-------|------|-----|-------|
|        | 基     | MWe   | 基     | MWe  | 基   | MWe   |
| アルゼンチン | 2     | 935   | 1     | 692  | 2   | 1384  |
| ブラジル   | 1     | 626   | 1     | 1245 | 1   | 1245  |
| エジプト   | —     | —     | —     | —    | 1   | 1000  |
| インド    | 6     | 1154  | 8     | 1760 | —   | —     |
| イラク    | —     | —     | —     | —    | 1   | 400   |
| イスラエル  | —     | —     | —     | —    | 1   | 900   |
| 韓 国    | 7     | 5380  | 2     | 1800 | 2   | 2000  |
| メキシコ   | —     | —     | 2     | 1308 | —   | —     |
| パキスタン  | 1     | 125   | —     | —    | 1   | 900   |
| 南アフリカ  | 2     | 1842  | 3     | 1980 | —   | —     |
| 台 湾    | 6     | 4884  | —     | —    | 2   | 1900  |
| トルコ    | —     | —     | —     | —    | 1   | n. a. |
|        | 25    | 14946 | 17    | 8785 | 12  | 9729  |

1987年10月ウィーンのIAEA本部で開催された“原子力発電の性能と安全性に関する会議”に提案されたCOMECON(東欧経済相互援助会議)事務局のG. Brtel 氏の論文によれば、1986年末における原子力発電設備容量は 36,890MWeあり、さらに合計約 70GWeの発電炉80基の建設が計画されている。

この大掛かりな計画も何らかの方法でIAEAで確認され、また、ごく最近のIAEAの刊行書(5)にも1987年末現在、79基の原子炉が稼働中で47基が建設中であるがその中の28基はソ連であると記されている。表IVはその詳細データである。

前述の70基の原子炉すべてが2000年までに運転されると考えると、その時点の原子力発電設備容量は120GWeになると思われる。本論文では CPE国(中央計画経済国)における2000年の合計原子力発電容量は95～130GWeの範囲になると推定している。

表 IV 中央計画経済国の1987年末における原子力発電炉

| 国 名      | 稼働中 |       | 建設中 |       | 計 画 |       |
|----------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
|          | 基   | MWe   | 基   | MWe   | 基   | MWe   |
| ブルガリア    | 5   | 2585  | 2   | 1906  | 1   | 1000  |
| 中 国      | —   | —     | 2   | 1188  | 1   | 930   |
| キューバ     | —   | —     | 2   | 816   | 2   | 880   |
| チェコスロバキア | 8   | 3207  | 8   | 5120  | —   | —     |
| 東 独      | 5   | 1694  | 6   | 3432  | —   | —     |
| ハンガリー    | 4   | 1645  | —   | —     | 2   | 2000  |
| ポーランド    | —   | —     | 2   | 880   | 8   | 8000  |
| ルーマニア    | —   | —     | 3   | 1980  | 2   | 1320  |
| ソ 連      | 56  | 33616 | 28  | 25098 | 32  | 32900 |
| ユーゴスラビア  | 1   | 632   | —   | —     | 1   | 1000  |
|          | 79  | 43379 | 53  | 40420 | 49  | 48030 |

#### 全 世 界

上に述べた結果として、全世界の原子力発電の予測を地域別に表わしたのが表Vである。この表では、OECD加盟国、WOCA国でOECD以外の非共産圏諸国、それにCPE 諸国の3つの異なった地域に分けられる。

2005年を含む予測では合計容量500GWeの内訳はOECD加盟国が321GWe、OECD非加盟国が45 GWe、すなわち366GWeが非共産圏の合計となる。



1987年～2005年の発電設備の増加は次の通りである。

|           |         |
|-----------|---------|
| OECD      | 1.6%/ 年 |
| WOCA非OECD | 5.6     |
| WOCA      | 2.0     |
| CPE       | 6.7     |
| <hr/>     |         |
| 全世界       | 2.9%/ 年 |

CPE諸国の発電設備の大増加は、OECD加盟国が登録した小さな増加に比べおおいに強調しなければならない。

表 V 地域別原子力発電予測 (GWe)

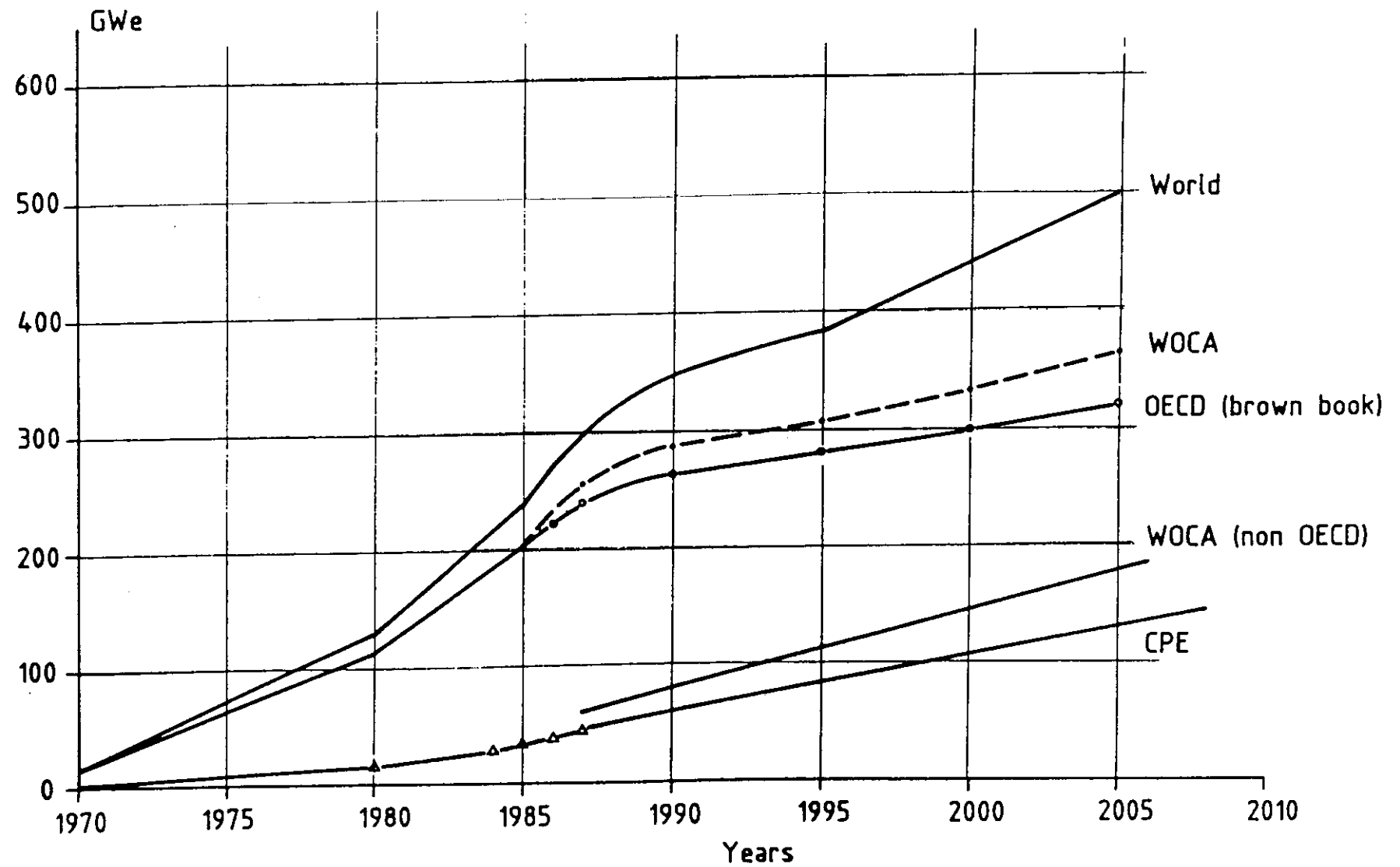
| 年    | <u>OECD</u> <sup>(1)</sup> | <u>WOCA 非OECD</u> <sup>(2)</sup> | <u>WOCA 合計</u> | <u>CPE</u> <sup>(3)</sup> | <u>全世界</u> <sup>(2)</sup> |
|------|----------------------------|----------------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|
| 1987 | 240                        | 17                               | 257            | 43                        | 298                       |
| 1990 | 264                        | 28                               | 286            | 60                        | 346                       |
| 1995 | 281                        | 30                               | 311            | 85                        | 396                       |
| 2000 | 300                        | 34                               | 334            | 110                       | 444                       |
| 2005 | 321                        | 45                               | 366            | 137                       | 503                       |

(1) Brown Book 1988

(2) Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates, IAEA 1988

(3) IAEA Secretariat's estimates

Fig. 1 PROJECTED NUCLEAR POWER



## 2. ウランの所要量

最新のウラン精鉱の所要量予測として、この章で扱ったものは、NUEXCO<sup>(2)</sup>, Brown Book<sup>(3)</sup>, Red Book<sup>(6)</sup>, Uranium Institute<sup>(2)</sup>, USDOE<sup>(4)</sup>と NUKEM<sup>(8)</sup>である。

全てのデータを比較するために表VIとグラフの形で図2に示した。

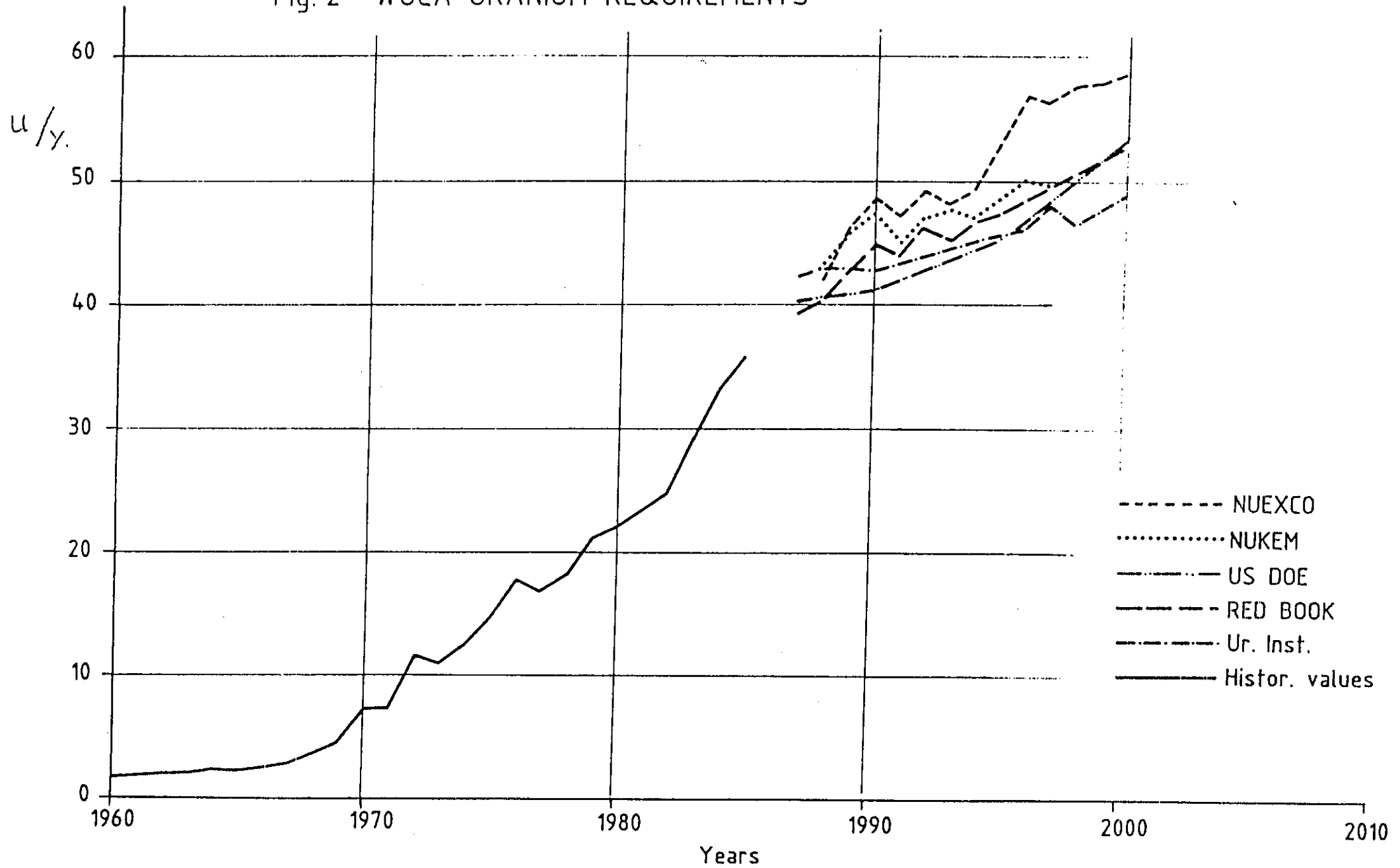
Brown Bookを除いて他の全てのデータは、WOCA諸国に適用され、また2000年の上限は53,000tUで下限は49,000tUであるからこれらはよく合っている。NUEXCOの極く最近の予測はこれらの値からはるかに離れ、同じ2000年には58,000tU以上の需要があると予測している。

これらの所要量の算出に当たっての最も重要な変数の一つである濃縮工程の廃棄濃度に対し多分最適の条件を用いたからであろう。私は次の火曜日にこれに関し討論する機会が与えられることを希望する。

表 VI 非共産圏諸国のウラン所要量 (MtU)

| Year | NUEXCO | Brown Book<br>OECD | Red Book | U. I. | US DOE | NUKEM |
|------|--------|--------------------|----------|-------|--------|-------|
| 1987 |        | 35.9               | 39.3     | 42.3  | 40.1   | —     |
| 1988 | 42.0   |                    | 40.1     | 42.9  | —      | 42.9  |
| 1989 | 46.2   |                    | 42.9     | 43.0  | —      | 46.0  |
| 1990 | 48.5   | 38.8               | 44.8     | 42.7  | 41.1   | 47.6  |
| 1991 | 47.1   |                    | 43.9     | 43.4  | —      | 45.0  |
| 1992 | 49.2   |                    | 46.1     | 43.9  | —      | 47.8  |
| 1993 | 48.2   |                    | 45.2     | 44.4  | —      | 47.8  |
| 1994 | 49.3   |                    | 46.9     | 45.1  | —      | 46.7  |
| 1995 | 52.6   | 39.9               | 47.2     | 45.4  | 45.2   | 48.4  |
| 1996 | 56.8   |                    |          | 46.1  |        | 50.0  |
| 1997 | 56.4   |                    |          | 47.9  |        | 47.6  |
| 1998 | 57.4   |                    |          | 46.3  |        | —     |
| 1999 | 57.6   |                    |          | 47.7  |        | —     |
| 2000 | 58.4   | 42.0               | 52.4     | 48.6  | 52.9   | —     |

Fig. 2 WOCA URANIUM REQUIREMENTS



### 3. ウランの所要量の予測

原子力発電炉の正味設備容量 1 GWe当たり必要なウランの比消費量(tU)は種々の要素の大きさに強く左右されるけれども、原子炉開発に必要な特性の1つである燃焼度とか年間の利用度などとともに他の特性となるウランの購入あるいは炉心外での燃料管理(最適の廃棄濃度)は統計上非常に大きな価値を持つものである。

この消費量を示す割合 tU/GWe の値は1970年以来今日までたびたび改定されてきた。この割合は400(tU/GWe)以上の値から初装荷の時期に応じて1980年代の終わりまで160 ~ 170 の範囲に下がりつつある: 表Ⅶ。

表Ⅶの中にNUEXCO、ウラン協会および米国エネルギー省の予測に対応して計算された割合の数値も含まれている。

異なる予測における実績値と推算値を図3に示した。これらの予測には、2つの興味深い傾向が現れていると強調することができる。

その1つは、過度に楽観的なのはNUEXCOで、比消費量が非常に多くかつ増加するもので、他方NUKEM や主としてウラン協会の予測は悲観的で比消費量の割合の数値が非常に低くかつ急速に減少するものである。

この割合の最もあり得そうな推定は統計学的観点からすれば、破線で示されているように 160tU/GWeの線を越えたところでふらつき、またこの特定の消費量に影響を与えるのであろう将来の炉心内外の要素に左右されている。

これらの数値を以てウランの予測所要量が算定され、その結果が表Ⅸに示されている。これらの計算値は図3に示されるS字型の相関関係を表す線に良く合致している。

表 VII                      t U / G W e 比率の実績値

|       | GWe | 10 <sup>3</sup> MtU | t/GWe |
|-------|-----|---------------------|-------|
| <hr/> |     |                     |       |
| 1970  | 15  | 7.0                 | 467   |
| 1972  | 34  | 11.4                | 335   |
| 1974  | 55  | 12.2                | 221   |
| 1976  | 75  | 17.8                | 237   |
| <hr/> |     |                     |       |
| 1978  | 95  | 18.0                | 190   |
| 1980  | 115 | 21.8                | 190   |
| 1981  | 133 | 23.2                | 174   |
| 1982  | 150 | 24.5                | 163   |
| <hr/> |     |                     |       |
| 1983  | 170 | 28.5                | 168   |
| 1984  | 187 | 33.4                | 179   |
| 1985  | 204 | 35.6                | 175   |
| 1986  | 225 | 39.0                | 173   |
| <hr/> |     |                     |       |
| 1987  |     |                     |       |
| 1988  |     |                     |       |

Table VIII. Variation of the ratio tU/GWe in WOCA

| Years | NUEXCO |                     |       | U.I. |                     |      | NUKEM |                     |      | USDOE |                     |      |
|-------|--------|---------------------|-------|------|---------------------|------|-------|---------------------|------|-------|---------------------|------|
|       | GWe    | 10 <sup>3</sup> MtU | t/GW  | GWe  | 10 <sup>3</sup> MtU | t/GW | GWe   | 10 <sup>3</sup> MtU | t/GW | GWe   | 10 <sup>3</sup> MtU | t/GW |
| 1988  | 260    | 42.0                | 161.5 |      |                     |      |       |                     |      |       |                     |      |
| 1989  |        |                     |       |      |                     |      | 281   | 46.0                | 164  |       |                     |      |
| 1990  | 283    | 48.5                | 171.4 | 290  | 42.7                | 147  | 286   | 47.6                | 166  | 287   | 41.1                | 143  |
| 1991  |        |                     |       |      |                     |      | 292   | 45.0                | 154  |       |                     |      |
| 1992  | 294    | 49.2                | 167.3 |      |                     |      | 297   | 47.4                | 160  |       |                     |      |
| 1993  |        |                     |       |      |                     |      | 304   | 47.8                | 157  |       |                     |      |
| 1994  | 306    | 49.3                | 161   |      |                     |      | 311   | 46.7                | 150  |       |                     |      |
| 1995  |        |                     |       | 332  | 45.4                | 137  | 318   | 48.4                | 152  |       | 45.2                |      |
| 1996  | 315    | 56.8                | 180   |      |                     |      | 323   | 500                 | 155  |       |                     |      |
| 1997  |        |                     |       |      |                     |      | 331   | 47.6                | 144  |       |                     |      |
| 1998  | 331    | 57.4                | 173   |      |                     |      | 338   |                     |      |       |                     |      |
| 1999  |        |                     |       |      |                     |      | 342   |                     |      |       |                     |      |
| 2000  | 341    | 58.4                | 171   | 372  | 48.6                | 130  | 347   |                     |      | 336   | 52.9                | 157  |



Fig. 3 EVOLUTION OF RATIO tU/GWe

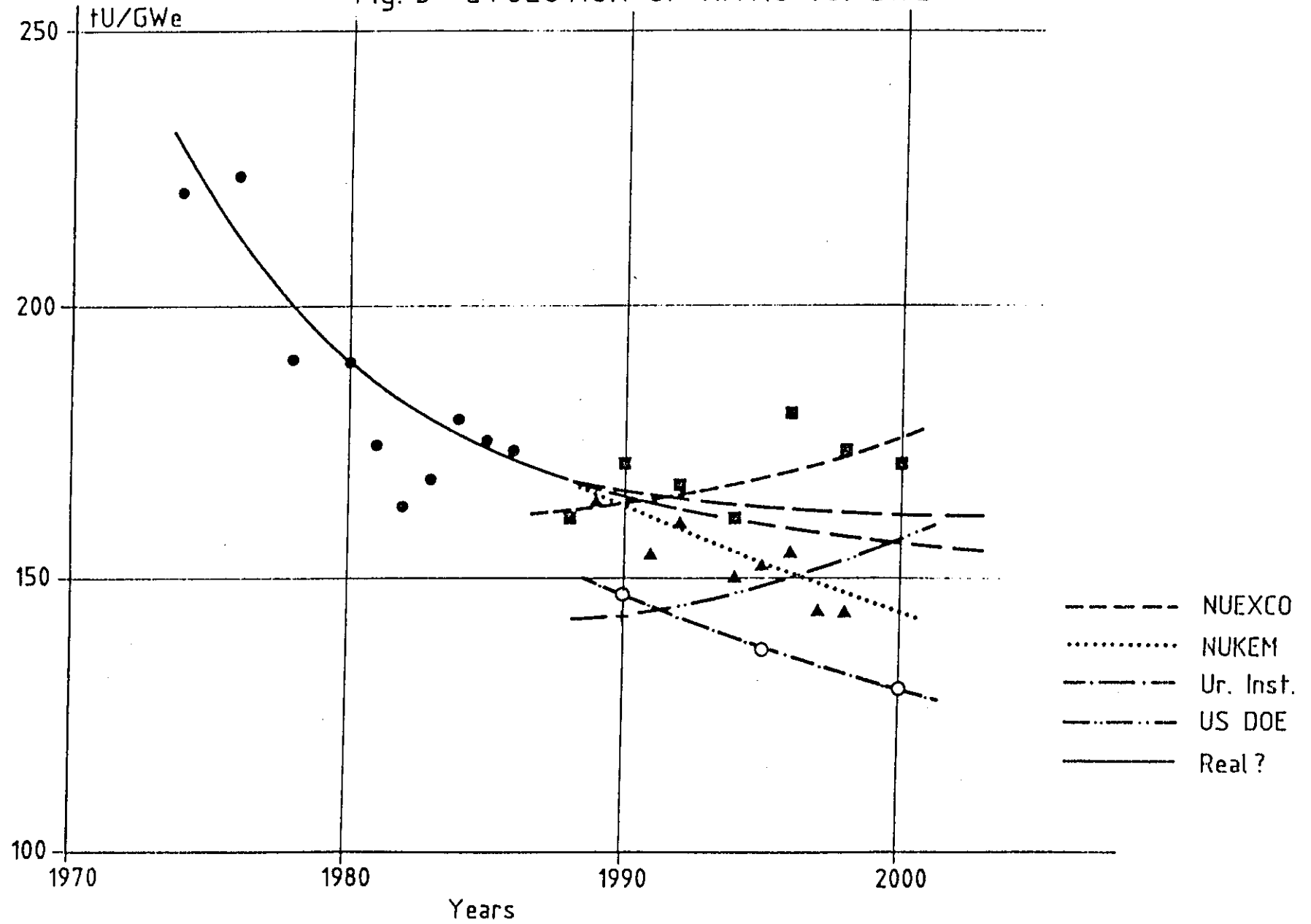


表 IX ウランの所要量予測

W O C A

| 年     | GWe | t/GWe | 10 <sup>3</sup> tU |
|-------|-----|-------|--------------------|
| <hr/> |     |       |                    |
| 1988  | 260 | 168   | 43.7               |
| 1989  | 275 | 167   | 45.9               |
| 1990  | 286 | 166   | 47.5               |
| <hr/> |     |       |                    |
| 1991  | 293 | 165   | 48.3               |
| 1992  | 297 | 165   | 49.0               |
| 1993  | 300 | 164   | 49.2               |
| 1994  | 304 | 164   | 49.9               |
| 1995  | 308 | 163   | 50.2               |
| <hr/> |     |       |                    |
| 1996  | 314 | 163   | 51.1               |
| 1997  | 318 | 162   | 51.5               |
| 1998  | 322 | 162   | 52.1               |
| 1999  | 328 | 162   | 52.1               |
| 2000  | 334 | 161   | 53.8               |
| <hr/> |     |       |                    |

#### 4. ウランの生産

ウランの生産予測をたてることは実に至難の業であって我々の意とするところではない。多分それは別の会議で行われる幾多の予測で補われるべきであろう。

OECD-IAEAのRed Book88<sup>(6)</sup> および NEA-OECDのBrown Book1988<sup>(3)</sup> はウラン生産能力に関して予測を行っている。NUEXCOと NUKEMは1988-2000年(NUEXCO)および1988-1997年(NUKEM)の間のウラン生産に関して大きな危険を冒して予測をたてた(NUKEM)<sup>(8)</sup>。ウラン協会は将来の能力とウラン生産に関するデータを付けて将来のウランの供給についての最も完全な予測を行った。

これらのすべてのデータは表Xに含まれ、図4に示されている。

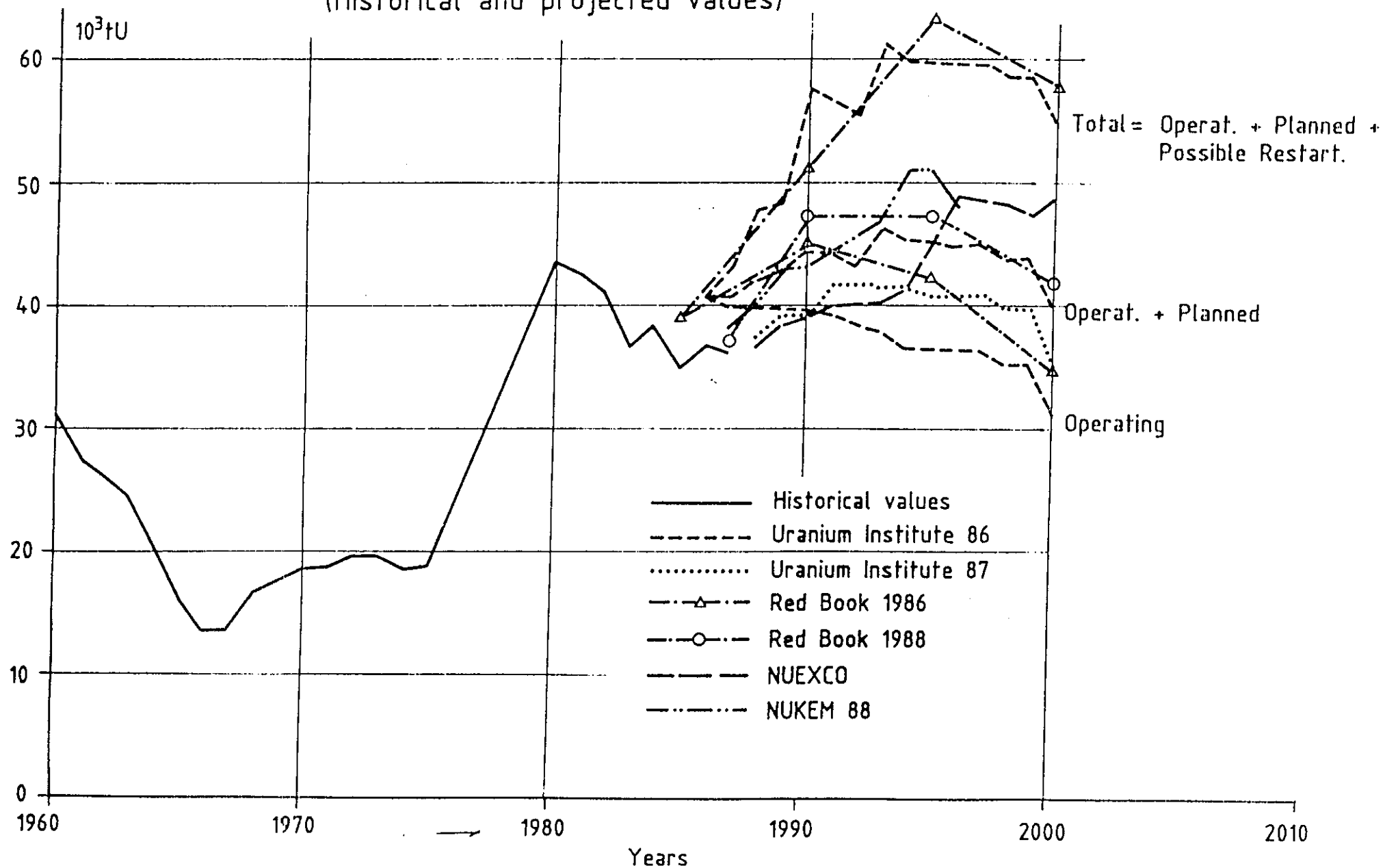
表 X 非共産圏のウラン生産量 (10<sup>3</sup> MtU)

| 年    | NUEXCO | Brown Book | Red Book | U. I. | NUKEM |
|------|--------|------------|----------|-------|-------|
| 1987 |        | 37.1       |          | 37.1  | —     |
| 1988 | 36.6   |            |          | 39.1  | 38.2  |
| 1989 | 38.5   |            |          | 39.2  | 39.8  |
| 1990 | 39.0   | 47.5 *     | 47.8 *   | 41.5  | 43.0  |
| 1991 | 40.1   |            |          | 41.9  | 43.5  |
| 1992 | 40.1   |            |          | 41.5  | 44.4  |
| 1993 | 40.2   |            |          | 41.5  | 45.4  |
| 1994 | 41.2   |            |          | 40.7  | 47.1  |
| 1995 | 45.1   | 47.3 *     | 47.4 *   | 40.7  | 50.8  |
| 1996 | 48.7   |            |          | 40.8  | 50.8  |
| 1997 | 48.4   |            |          | 40.8  | 48.2  |
| 1998 | 48.1   |            |          | 39.8  | —     |
| 1999 | 47.4   |            |          | 39.8  | —     |
| 2000 | 48.3   | 41.5 *     | 41.7 *   | 35.4  | —     |

\* 可能量

Fig. 4 URANIUM PRODUCTION  
(Historical and projected values)

- 82 -



## REFERENCES

- (1) Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the period up to 2005.  
IAEA, July 1988.
- (2) NUEXCO Bulletin. July 1988.
- (3) Electricity, Nuclear Power and Fuel Cycle in OECD countries.  
OECD, 1988
- (4) World Nuclear Fuel Requirements 1987. EIA, USDOE, 1987.
- (5) International Conference on Nuclear Performance and Safety.  
IAEA, Vienna, 1988.
- (6) Uranium Resources. Production and Demand. OECD-IAEA, 1988.
- (7) The Uranium Market, 1986-2000. The Uranium Institute, London 1986.
- (8) NUKEM Monthly Report. June 1988.



# 国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部 ウィーン 1988年10月11-14日

---

T1-TC-665 9a

## スペイン産鉱石のバイオ浸出法 によるウラン精鉱の製造

J. M. ホサ博士

J. R. セラノ

国営ウラン会社 (ENUSA)

(スペイン・マドリッド)



## 要 旨

スペインでのウラン生産の87%はサラマンカ産の変成頁岩のバイオ浸出プロセスによって行われている。鉱石の割れ目にれきせいウラン鉱および黄鉄鉱が豊富に見られるという本鉱脈の鉱物学的特徴はバクテリアによる黄鉄鉱への“アタック”およびそのあとに続くウラン鉱石の間接浸出により最良のコンビネーションを形成している。このシステムにおいて使用される唯一の酸は溶媒抽出の前にその溶液の調整に使用されるもののみである。浸出液を溶媒抽出した後の抽出廃液は60~95%が浸出にリサイクルされるが、これは微生物の発育に最適な水素イオン濃度 (PH 2 ~ 2.6) を保持するに十分な酸度を持っている。

## 1. 概 説

フェ鉱山は $U_3O_8$ 約9,000tの埋蔵量を有し、サラマンカ地方の西側にあるアゲダ河流域に位置する。1970年代の初頭、このアゲダ河にダムを建設する計画があり、そのダムの一部に $U_3O_8$ 約500tを含有する土地が埋没する可能性があった。このウランを回収するため、ダム建設に先立って、年間75tの $U_3O_8$ を採掘する計画（エレファント計画と称されている）が開始された。

1972年に国営ウラン会社（ENUSA）が設立され、この貴重な鉱物の処理のために作成されていた方法にそって本計画を推進する母体となった。この方法は濃度において約1 mg/t程度の酸ベース（20-30kg  $H_2SO_4$ ）の浸出法および溶媒抽出によるウラン回収を意図していた。本法は第1図に示されているとおりである。

計画生産量は本工場の据付が完了する前にすでに増大され、創業一年目にして112tの $U_3O_8$ を生産するに至った。1973年以来、計画および製造機器を本質的に変更することなく、段階的に生産量の増加を計ってきた。1987年における $U_3O_8$ の生産量は250t<sup>(1)</sup>であった。

前項に述べたことにやや矛盾するが、生産方式の段階的でかつ着実な変更が行われたことを明記せねばなるまい。これらの発展的改良は例えば次のようなものである：

- － 鉱物の“熟成”のための期間を設けたこと
- － 液体から固体へのプロセスの削減
- － 浸出プロセスでの酸成分新追加の廃止

実際に生産プロセスで使用される唯一の酸成分は、濃縮液の恒久的白濁を防止するために、溶媒抽出の前に使用されるもののみである。

現在のシステムは外観的には初期のものと同様に見えても全く異なるものである。現実には高濃度酸性液（10-20g  $H_2SO_4$ /L）による化学的浸出法から、低濃度酸性液（濃度2-4g/Lの廃液）あるいは水により希釈された酸度ゼロの溶液での化学的浸出法に変更されている。現状は全てバイオ浸出法に戻っている。この方式は初期段階には時間がかかるという批判により採用されなかったものである。しかしながら、この合理的な進展は生物学的現象の全ての可能性が発見されている訳ではない現在、決して概念上の変更を伴うものではない。最近、現状を再考し、浸出を助ける微生物の生体的要求を考量に入れた形の調査プログラムが作成された。

## 2. 鉱石

フェ鉱山の鉱脈およびその近郊は断層の多い頁岩複合帯に位置し、ポルトガルにも似たような地勢の所が存在する。古生代の沈殿形態は各々異なったグレードの変成作用を示し、頁岩の形成段階における鉱化作用の存在も層のレベルや具体的な岩石形成の法則とも関連は薄いものである。現実には大きな弛緩や浸透性を伴う地質構造上の空間に上記のごとき地勢があたかも破壊や断層の連続線上に起こる割れ目の詰物のような形で存在する。鉱石の表面変化そのものが、薄片組織の組成に有効な副産物を再蓄積させて、鉱化作用をにぶらせている。

一次の鉱物はSPHALERITEおよび“コフィニータ”（鉱物の名称で REFなし）であり、二次鉱物として、BLACK OXIDES、“コラシター”（REFなし）、ウラナイト、“トルベニータ”（REFなし）その他である。

ウランを含みぬ鉱物で最も重要なものが黄鉄鉱であり、また、少量ではあるが“マルカシータ”（REFなし）、“メルニコビータ”および黄銅鉱もあり、時折SPHALERITE、鉛系鉱物も存在する。

黄鉄鉱の生成プロセスは、まず、変成岩、その後石英、BLACK MICA（黒雲母）、CHLORITEを経て黄鉄鉱となり、そしてその後再度黄鉄鉱となり、鉛系鉱物、黄銅鉱、SPHALERITE、石灰石－白雲石となる。その後、新たに同種の鉱物の形成があり、最後にBLACK OXIDES、ウランの豊富な鉱物および鉄鉱石－BROWN IRONが現れる。

この鉱床に存在するとき硫化物とウラン鉱石との密接な結合はウランのバイオ溶解のためには有効である。つまり、黄鉄鉱はバクテリアの攻撃を受け、そこで作り出される代謝物質がウラン鉱物と反応し、間接的にバイオ浸出を行うことになる。

鉱石の組成は鉱床の位置によってまちまちである。まず、地表近くにある鉱石はBROWN IRONを豊富に含みまた、環境によってもその組成に影響が出るものである。

しかし、鉱脈を深場に求めると、それら鉱石は基本的に次のものを豊富に含んでいる。

THIOBACILLUS FERROOXIDANS(Tf) および THIOBACILLUS THIOOXIDANS(Tt)

研究の成果は異なった産地の黄鉄鉱浸出プロセスに適用され（図2）また、花崗岩の中にあるウランを含有する鉱物の浸出プロセスにも適用され、約6カ月間の洗浄により約90%程度のウランの溶解に成功している。(5)

頁岩に含有されるウランの自然浸出法は研究室でも研究され(6)、その結果は原産地の鉱脈での試料によって異なるものであった。図3に3種類の試料により得られた結果が示さ

れており、それらは36週間の浸出により約85%から95%の抽出がなされた。

大部分の試験的作業がウランに吸収された液体の鉄塩の酸化作用の研究に向けられた。

次のとき異なったタイプのバイオ反応体系が研究の対象とされた(7)

－フィルムタイプ

－攪拌タイプ

－静止床タイプ

－流動床タイプ

－ウランの浸出を行ったことのある鉱物槽

上記の最後のケースの場合、浸出プロセスから隔離したバクテリア群を利用し、 $0.8\text{ kg Fe}^2/\text{dxm}^2$ (8)の酸化能力が得られた。

アミンの残留した抽出廃液はバクテリアの作用に何ら影響を与えなかった。同時に、硫酸( $10\text{--}100\text{ gH}_2\text{SO}_4/\ell$ )を使用した静止式浸出プロセスについて数多くの研究が行われた。

このケースの場合、浸出の速度が最も速かったので、本システムは商業運転用に留保された。

#### 4. 商業運転

ウラン精鉱の生産は現在その大部分、つまり87%がサエリセス・エルチコ工場で行われている。残りの生産は品質にバラツキのある頁岩を使ってスペインの西南地域のラ・アバ市にある小規模工場で行われている。

本項では浸出プロセスに力点を置いて、主に生産活動について述べることとする。

##### 4. 1 採掘

オープンカット方式で高さ3 mのバンクでの採掘が行われている。近々高さ6 mのバンクでの採掘に変更されることになっている。

放射能測定器により200ppmで選鉱が行われ、粗悪石を取り除いている。鉱石は600ppmでの選鉱により2種類に分別される。つまり、上級のものは良質で下級のものは低品位石である。

1987年の終わりまで平均品位  $1.309\text{ kgU}_3\text{O}_8/\text{t}$ の良質鉱石 $1.5\text{ M/t}$ を採掘していた。低品位鉱石については、平均品位 $397\text{ gU}_3\text{O}_8/\text{t}$ の鉱石を $3.2\text{ M/t}$ 採掘した。

図4に良質鉱石、低品位鉱石および粗悪石毎々の年間生産量の評価が示されている。

低品位および良質の鉱石は粉碎機にかけられる。粗悪石は特別に用意されたクズ石置場

に運ばれ、流水にさらされ、ウラン分を含んだその流水はバイオ浸出作用により自然に溶解（ウランを）する。

#### 4. 2 クラッシング（粉碎）

ハンマークラッシャーに導入され、1 段のオープンサーキットタイプのもので粉碎される。粉碎後はベルトウエイヤーで計量され、ウラン量判定および調整のためのサンプリングが自動的に行われる。

その後鉱石はローディングホッパーを通してトラックに積み込まれ、作業場へ搬入される。

低品位鉱石と良質鉱石の置き場は完全に区別されている。

粉碎された素材の粒度は概ね 100mm ( $d_{80}=65\text{mm}$ ) で、およそ10%が1 mm以下である。

粉碎鉱石はウランが豊富(9)であり、上記の  $d_{80}$  のもののウラン分は 0.8%から7%である。一方、1 mm以下の粒度のものは50%から70%のウランを含んでいる。

#### 4. 3 浸出プロセス

##### 4.3.1 浸出作業所

傾斜を持たせてレベリングのみした土地の上に建設されている。

作業所の幅は概ね24-28m、長さ方向は土地のスペースによって異なってくるが通常約100 m程度である。長さ方向は約10m間隔で堰を設けて区分され、各堰が浸出プロセスにかけられる鉱石の実質上の区分枠となっている。

床上には砂が一層敷かれ、その上にポリエチレン板が置かれ、さらにもう一層 10-20cmの砂が保護用に敷かれ、その後鉱石が導入される。

各堰の取り入れ口には排水用パイプが作業場の幅の半分近くの所まできている。その後外部への出口が付いたピットが作業場にそって設置されている排水パイプへとつながっている。

排水口には液体用サンプリング器が設置されている。時折、この種作業場は以前作業場であった所の跡地に建設される場合もある。

作業場に積み上げられた鉱石の高さは最終的に約7 mに達する。鉱石は3層に積み上げられる。

トラックが作業所に入り、鉱石をへり近くに荷卸しし、その後ブルドーザーで鉱石を拡げて行く。

各層に積み上げた後鉱石を2 mの鋤状のもので深くすき返し、表面はローラー鋤ですき

返す。

作業場の規模は良質鉱石用に53,000から260,000t/un、低品位鉱石用に61,000から622,000t/un、が当てられている。

最後に作業場にそって設置されている散水システムが接続され、地表への揚水口に導かれ、 $3 \times 3$  mの網の目状に配置されたスプリンクラーに水が分配される。散水用液体および廃液はネオプレン製の地下貯槽に貯留される、この貯槽の容量は1000 $\text{m}^3$ から2000 $\text{m}^3$ 程度である。

#### 4.3.2 浸出工程

当初は作業場に持ち込まれた鉱石はすぐウラン生産にまわされていた。しかし、その後所謂“熟成”または、“感応”期間を設ける慣例が尊重され始め、このこと自体が生産効率を高めている意味あいをもっていると同時に、採掘上の諸問題の緩衝材的要素もあると思われる。この熟成期間は約1年間位で定着しつつある。

当初、散水用液体として高酸性溶液 ( $10\text{--}20\text{gH}_2\text{SO}_4/\ell$ ) が使用されていたが、現在では溶媒抽出の酸廃液 ( $5\text{ g H}_2\text{SO}_4/\ell$ ) の一部 (40~95%) を再循環して使用している。そのため酸度はかなり低いものになっている。また、最近水のみでの散水も実施された。しかし、いずれの場合も作業場からの排水はほとんど一定に2.5 および 2.6pHで流出されている。しかし“浸出”用に使用される硫酸の最大量は概ね  $2\text{ kgH}_2\text{SO}_4/\text{t}$  程度であり、この量はリサイクル抽出廃液からきている。散水の総量は当初  $1\text{ m}^3/\text{t}$ であったが、現在では約0.2 から  $0.3\text{ m}^3/\text{t}$ 程度となっている。

散水の技術も初期段階から現在まで変化してきている。昔は1日12時間から16時間散水されていた。つまり毎日作業場の操業が完了するまで散水がおこなわれた。その状態でのウランの流出量が  $30\text{--}50\text{mgU}_3\text{O}_8/\ell$  であった。現在では1日に30分から1時間の散水しか行われず、散水範囲も  $50\ell/\text{hxm}^2$  ずつである。不足を補うため散水点を多くしてあり、鉱石区分堰の貯蔵量に応じて10地点まで散水可能にしてある。その上、区分堰の位相によって散水の日数も調節され、1つの区分堰で1カ月に10日以上散水されることは稀である。つまり、散水量と溶解ウランの回収量を完璧にフォローした湿度保持技術が使われていると言える。各作業場はウラン流出量が  $30\text{--}50\text{mgU}_3\text{O}_8/\ell$  になるまで利用され続ける。利用期間は1年を少々越える程度である。

流出水のpHは概ね一定であり (2.5-2.6) ウランの濃度も初期段階には  $5\text{--}10\text{gU}_3\text{O}_8/\ell$  であるが時間を経るにつれて減少して行く。濃度の各々異なった液が溶媒抽出用タンクで混

ぜられ、それに水処理用イオン交換の溶離液が混合される。初期段階の浸出液のウラン濃度が高いことは参考文献(40)に引用されているウランの殺菌作用とは相反する現象である。

浸出プロセスの効率は相対的に低いものである。良質な鉱石は平均効率は68.1%であるが、特有の偏差である $S=11.8$ をベースにすると11カ所の作業所の平均効率もっと高く、75.7%であった。

低品位鉱石に関する同様の数値は毎々53.7%、66.4%( $S=15$ )であった。全体としての可溶性は62.7%であり、良質鉱石より産するウランのそれは67.6%で低品位鉱石のそれは32.4%であった。毎々異なった作業場間での効率の大きな差、およびその解決は我々の将来におけるチャレンジ要素であり、現在考え得る原因は次のようなものである：

- －硫化物の投入量が不足している。

現在、ラ・コルタ作業所にて量を調整したり種々試みられているが体系的に量を特定するにいたっていない。

- －鉱石に炭酸塩が多量に含まれている。

- －作業所での鉱石の配分（細かい鉱石と粗い鉱石）の不均一さ。

- －鉱石床がハロシート（苔の一種）によって目詰まりを起こし、透過性が落ちる。

いくつかの使用済作業場でこの現象が観察されている。

- －生物学的条件の不足（通気性、 $CO_2$ 、栄養素など）

つまり、作業場が生物学的条件を考慮して建設されていない。

現在、作業の各ステージが再検討されつつあり、生産効率の向上と均質化をめざしてバイオ浸出法の調査・研究が進められている段階である。

#### 4.3.3 ウランの回収

まずアミンを含む溶媒で  $4\text{ g } U_3O_8 / \ell$  を抽出し、 $NaCl\ 1\text{ N} - 0.1\ H_2SO_4$  を使って逆抽出する、逆抽出された液のウラン濃度は  $25 \sim 30\text{ g } U_3O_8 / \ell$  である。

$1\text{ g } U_3O_8 / \ell$  および  $5\text{ g } H_2SO_4 / \ell$  を含む液体を  $27\text{ m}^3 / \text{日}$  処理する。有機溶媒の損失率は  $140\text{ ml} / \text{m}^3$  である。

沈殿プロセスは  $32^\circ \sim 35^\circ\text{C}$  に調整した3基の反応槽でアンモニアと空気を使用して pH 5.5、6.5 および 7.5 の状態で進められる。

濃縮パルプは洗浄され、濾過され、その後多段式煅焼炉にて  $400^\circ\text{C}$  で焙焼される。

製品はウラン  $87 \sim 92\% U_3O_8$ 、塩化物も少なく  $Cl\ 0.068\%$ 、硫化物も  $SO_4 = 3.3\%$  程度と高い品質のものである。

## 5. 鉱山の水

鉄分（約25mg Fe<sup>2+</sup>/ℓ および15mg Fe<sup>3+</sup>/ℓ）の他には酸（pH 3 から 3.5）、硫化物（3～7 g SO<sub>4</sub>/ℓ）およびウラン（40-70mg U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/ℓ）を含んでいる。溶解している硫化物は黄鉄鉱のバクテリア浸出によるもので、酸と鉄分は酸化作用を源となりウラン鉱石を浸出している。地中において鉄分の濃度がさらに高いが雨により洗浄されて希釈されると、pHが上がり鉄分が沈殿して水および沈殿物を黄茶色に染める。

これらの水を回収し⑪、その本来のpHで固定床式樹脂塔設備にて処理する。投入された樹脂を硫酸で溶離し（110-120 g/ℓ）、1.5～4 g U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/ℓを含む溶離液は溶媒抽出にかけられる浸出工程からの液と混合される。このような形で、1987年には約 29t U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>を回収した。

イオン交換の廃水は石灰乳で中和され、沈殿物は沈殿池で除かれ、最後に塩化バリウムが加えられて排水のアクティビティを低減する。このプロセスでの石灰の消費は試薬の消費量増加につながっている。（図5）

## 6. 環境への影響

採掘に伴い固体廃棄物がでてくる：鉱山の廃棄物、用済の作業所、中和プロセスでできる沈殿物などがあり、例えば固められた上でまずは隔離保存し、土を回収したりする。⑫

廃水は少量であれば沈殿廃液で中和される、また溶媒抽出工程から出る酸性の強い廃水は5 g H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ℓ程度であり塩化物も含んでいる。この廃液は浸出用に60～95%がリサイクルされるが塩化物の蓄積を考慮して作業所の排水の中では 2.5Cl/ℓ以下に保持するように努められている。その他の余剰液は20%の石灰乳を加えて中和（pH 7）される。ラジウムは20 g BaCl<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>を加えて共沈させる。残留パルプは廃液（沈殿）池に送り込まれ、透明の液体は河川に放流する前に処理（検査）される。

## 7. 生産

ウラン精鉱の生産は図6に示されており、近年の平均生産量に増加が見られ約 11t U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/年にいたり“直線”を修正することができた。

すなわち：

$$P(\text{kg U}_3\text{O}_8/\text{年}) = 101.885.4 + 11.092.71 (\text{生活年ベース})$$

現時点ではその生産能力は溶媒抽出工程の能力により制限を受けている。



## 8. コスト

1974年03のプラントに対する初期投資額は 129百万ペセタであった。1983年には鉱山およびプラントへの投資額04は約 5.2百万US\$ となり、採掘費用は約10から15US\$ / U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 1ポンドとなっている（ただし鉱石質によって多少変動する。1983年は 143ペセタ / 1 US\$、1988年には 117ペセタ / 1 US\$）

技術費用の配分は次のとおり：

|       |        |
|-------|--------|
| －浸 出  | 51 %   |
| －処 理  | 27.5 % |
| －一般管理 | 21.5 % |

プラント全体および用水の費用を含めての内訳は：

|                |      |
|----------------|------|
| －人件費           | 35 % |
| －試 薬           | 21 % |
| －粉碎済鉱石の作業場への運搬 | 5 %  |
| －燃料および潤滑油      | 3 %  |
| －新規資材          | 6 %  |
| －一般管理          | 23 % |

試薬の消費量は図 4 に示されている。

人的資源については次の事を述べておきたい：

- －鉱山採掘グループは49名
- －生産、グループ45名 ..... の毎々の人員を抱えている。

鉱山内部全体では実働人員が約 193名いる。

上記 2 グループ以外に：

保守人員40名、分析業務人員11名、採掘関係13名、放射能対策員 4 名、安全、衛生、医療関係14名

## 9. 将来の開発

すでに述べられているごとく、我々はサエリセス・エルチコ工場の操業はもっと改善できると考えているので、次のような 2 つの側面を持つ計画を進めている。

- －鉱山の職員により実施される鉱山採掘技術の改善、そして、
- －マドリッドのコンプルテンセ大学との協力で実施される基礎的調査

これら計画に対して我々が抱いている基本的な不安は次のようなものである：

a) 鉱石関係

- 化学組成 ( $\text{FeS}_2$ 、U、 $\text{CO}_2$ 、その他)
- 組成物質間の関連およびその修正 (黄鉄鉱の追加)
- 鉱物組成
- バイオ浸出可能な鉱石のタイプおよび特性上の幅
- 鉱物の大きさ

b) 生物学関係

- “純粋”な微生物
- 自然交配および人工交配
- 活動・生態
- 生物学的要求 (環境、生態、栄養源)
- 有毒性

c) 界面系 (インターフェイス)

- 鉱石堆積のタイプ
- プラント配置およびエンジニアリング

d) 操業

- 無害化および投入薬剤
- 通気
- 養生期間
- 物質収支

最終的に目標として追い求めるものは：

- 最大効率
- “浸出”時間の短縮
- 最小限の操業中断
- 最良の生産コントロール

## 参 考 文 献

- (1) ゴンサレス・S., ホサ・J.M., セラノ・J.R.  
鉱物の静止式浸出法での15年間にわたる実績  
第8回国際鉱物、金属学会会議用資料  
1988年10月16日～22日 オビエド市（スペイン）
- (2) コルデロ・G., ガソス・P., メリノ・J.L., スワレス・J.  
ウラン系のスペイン産鉱物静止浸出法  
上記文献は“低品位ウランの処理”（1966年ウィーン会議DATA）の中の一部で1967年ウィーンにてIAEAが発刊したDATAの 172頁－ 192頁に当たる。
- (3) メリノ・J.L., サエンス・R.M.  
ラトーネス鉱山の水系に存在するバクテリアの分離と特色付けおよび黄鉄鉱に対する素性  
JEN 報告 273頁目、1973年マドリッドにて JEN社発行。
- (4) メリノ・J.L.  
黄鉄鉱のバクテリア、酸化作用によるウランの浸出式生産  
JEN 報告、17、78項 1978年マドリッドにて発行
- (5) カラスコ・H., ガソス・P., メリノ・J.L.  
PICHLENDE( ORE OF RADIUM AND URANIUM)と硫化物を含有する鉱物の水分によるウランの浸出に悪影響を与える要素。  
1967年4月にマドリッドで開催されたウラン鉱石の静止式浸出法の仏－露－西による第IV回会談用資料（R. 1. 67）
- (6) カラスコ・H., ガソス・P., メリノ・J.L.  
頁岩層よりの水によるウランの消失  
1967年4月にマドリッドで開催されたウラン鉱石の静止式浸出法の仏－露－西による第IV回会談用資料（R. 31. 66）
- (7) メリノ・J.L., ガソス・P.  
鉱物に良い影響を与えるバクテリア酸化作用  
上記文献は1980年9月22日－27日にウエルバで開催された鉱金属学会会合（第VI回国内大会および第IV回国際大会）用資料第2巻、第2項（P. 653－672）に含まれている。  
1980年マドリッドにてミナス博士が発刊

(8) メリノ・J. L.

ロドリゴ市の第2世代低品位ウラン鉱石における鉄分を含む塩によるバクテリア酸化作用

1981年8月より1982年1月発刊の“バランセ紙”、JEN報告第61.82 1982年マドリッドにて発行

(9) ホサ・J. M., セラノ・J. R.

低品位鉱脈の評価

低品位ウランの経済性に関する1988年10月11日-14日ウィーンで開催されたIAEA委員会会合用資料IAEA-TI-TC-665 9b.

(10) ブライエルリー・C. L.

バクテリア浸出法、微生物学における批評的検証 (CRC CRITICAL REVIEWS, 1987 年11月発行) の 207頁-262頁

上記文献は1986年オタワで発行された BIOMINET WORKSHOPの副読本CANMETSp86-7、第2巻に含まれている。

(11) ユントゥレナ・A., セラノ・J. R., ビジョリーア・A.

水に含まれる金属類除去による鉱山の水の汚染防止

オビエド(スペイン)で1988年10月16日-22日に開催された第8回国際鉱物および金属学会会議用資料

(12) ボルドノバ・M. L., ロベスロメロ・A. R.

放射能を含む鉱物採掘により起こる環境への影響のコントロール

オビエド(スペイン)で1988年10月16日-22日に開催された第8回国際鉱物および金属学会会議用資料

(13) ゴメス・ハエン・J. P., ホサ・J. M., メンブリジエラ・J. R., オテロ・J., セラノ・J. R.

スペイン、サラマンカ地方のウラン鉱床の採掘と処理

上記文献は1977年ロンドン I. M. Mで発行の“ウランの地質学、採掘および抽出処理”(M. J. ジョーンズ Ed. 著)に含まれている。

(14) ゴメス・ハエン・J. P., セラノ・J. R., ホサ・J. M.

静止式浸出法をベースにした鉱山開発の費用分析

上記文献は“ウラン鉱石処理事業の経済学”、1983年4月25日-26日にパリで開催さ

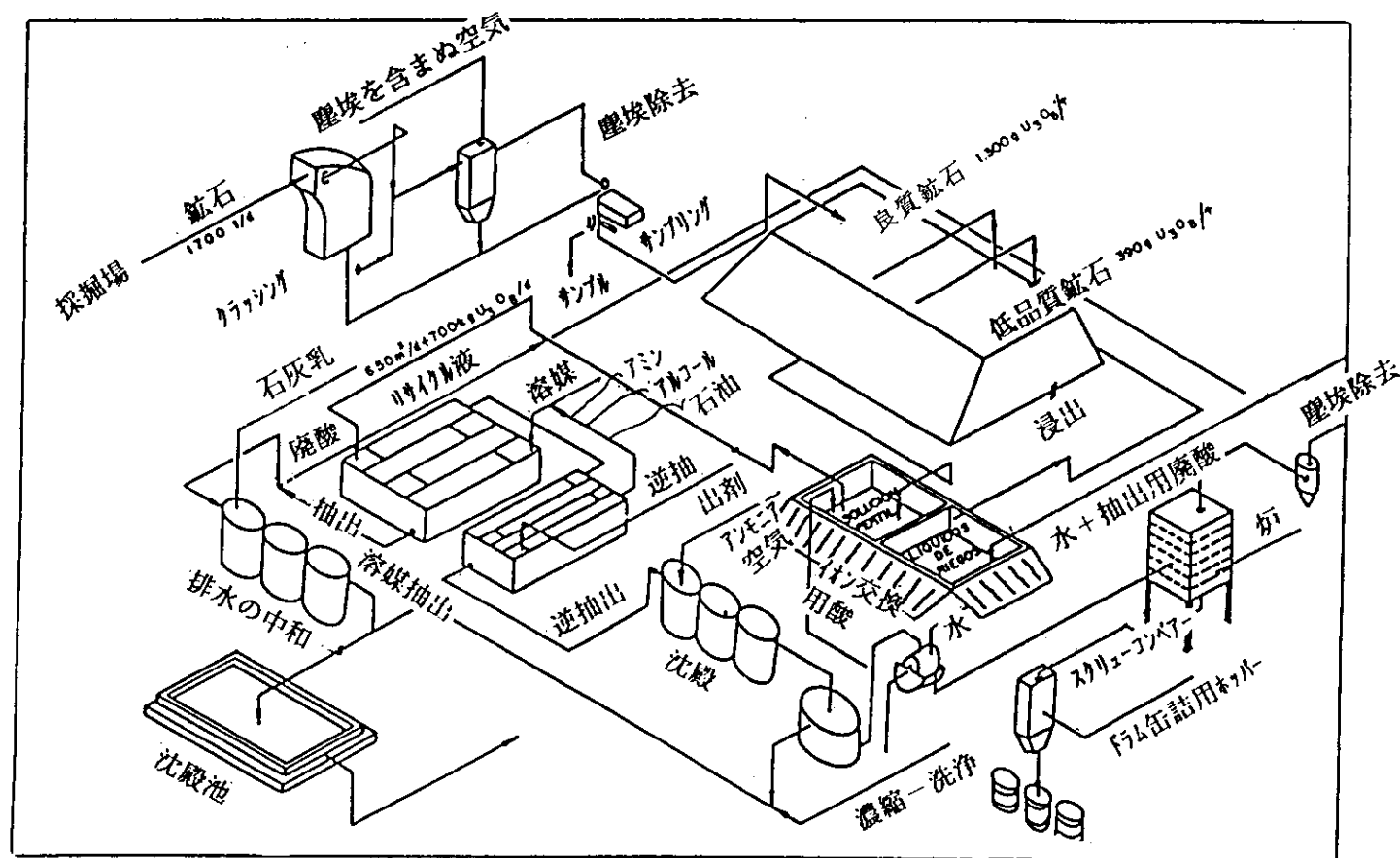
れた NEA/IAEAセミナー議事録（1983年パリにてOECDが発行）のP178- 194に含まれている。

#### REFERENCIAS

---

- (1) González, S., Josa, J.M., Serrano, J.R., Quince años de experiencia en lixiviación estática de minerales. Comunicación al VIII Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. 16/22 Octubre, 1988. Oviedo (España).
- (2) Cordero, G., Gasós, P., Merino, J.L., Suárez, J., Lixiviación estática de minerales españoles de uranio. En: Processing of Low-Grade Uranium Ores (Proc. Panel Vienna, 1966). I.A.E.A., Viena (1967) 172-192.
- (3) Merino, J.L., Saénz, R.M., Aislamiento y caracterización de bacterias en aguas de la mina de Ratones y su comportamiento con pirita. Informe JEN, 273. JEN, Madrid (1973).
- (4) Merino, J.L., Producción de medios lixiviantes del uranio por oxidación bacteriana de piritas. Informe JEN, R.17.78, Madrid (1978).
- (5) Carrasco, H., Gasós, P., Merino, J.L., Factores que afectan a la lixiviación del uranio con agua en minerales con pechblenda y sulfuros. Comunicación (R.1.67) al IV Coloquio Franco-Luso-Español de Lixiviación Estática de Minerales de Uranio, Madrid, abril 1967.
- (6) Carrasco, H., Gasós, P., Merino, J.L., Pérdidas de uranio con agua a partir de minerales de pizarras. Comunicación R.31.66 al IV Coloquio Franco-Luso-Español de Lixiviación estática de Minerales de Uranio, Madrid, abril 1967.
- (7) Merino, J.L., Gasós, P., La oxidación bacteriana en el beneficio de minerales. En: Jornada Minerometalúrgicas (VI Nacionales y IV Internacionales) Huelva 22-27 septiembre 1980. Sección segunda. Tomo II. As. Nac. Ing. Minas. Madrid (1980) 653-672.
- (8) Merino, J.L., Oxidación bacteriana de sales ferrosas en la Era 2 de Marginales de Ciudad Rodrigo. Balance del período agosto 1981 a enero 1982. Informe JEN, N.61.82, Madrid (1982).

- (9) Josa, J.M., Serrano, J.R., Valorización de yacimientos filonianos de ley baja. Comunicación IAEA-T1-TC-665,9b al Technical Committee Meeting on Economics of Low Enriched Uranium. IAEA. Viena 11-14 Oct. 1988.
- (10) Brierley, C.L., Bacterial leaching, CRC Critical Reviews in Microbiology --, (Nov 1987) 207-262. En: BIOMINET Workshop: Supplementary Readings. CANMET SP86-7-Vol 2 Ottawa (1986).
- (11) Entrena, A., Serrano, J.R., Villoria, A., Descontaminación de aguas de mina con recuperación de los metales contenidos en ellas. Comunicación al VIII Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. 16/22 Octubre, 1988, Oviedo (España).
- (12) Bordonoba, M.L., López Romero, A.R., Control del impacto ambiental producido por actividades mineras de naturaleza radiactiva. Comunicación al VIII Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. 16/22 Octubre, 1988. Oviedo (España).
- (13) Gómez-Jaén, J.P., Josa, J.M., Membrillera, J.R., Otero, J., Serrano, J.R., Mining and processing of uranium deposits in Salamanca, Spain. En: M.J. Jones Ed. Geology, mining and extractive processing of uranium. I.M.M. Londres (1977) 103-108.
- (14) Gómez-Jaén, J.P., Serrano, J.R., Josa, J.M., Analyse des coûts pour une exploitation en decouverte avec lixiviation statique. En: Economics of Uranium Ore Processing Operation. Proceeding of a Workshop NEA/IAEA. Paris 25-26 April 1983. OECD, Paris (1983) 178-194.



図(1) サエリセス・エルチコのウラン精鉱生産プラントのフローシート

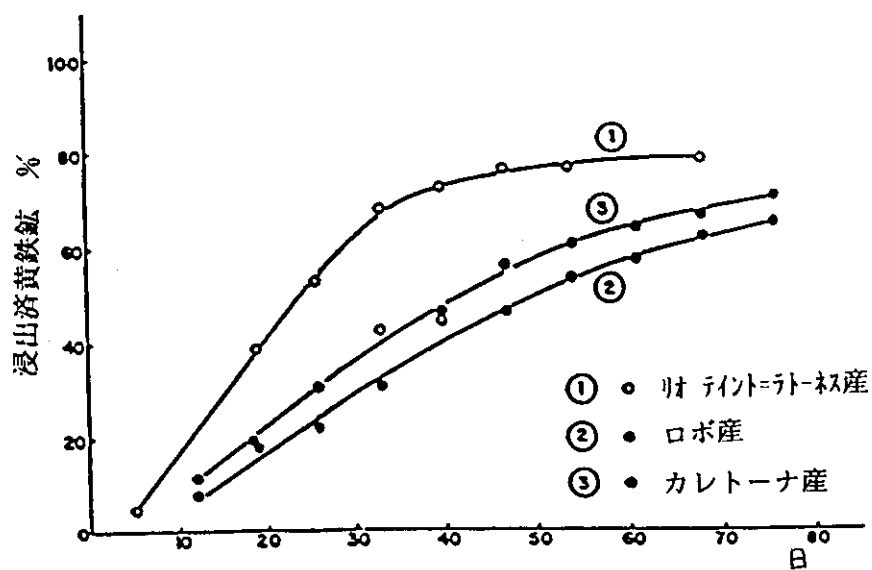


図2 種類別黄鉄鉱のバクテリア浸出

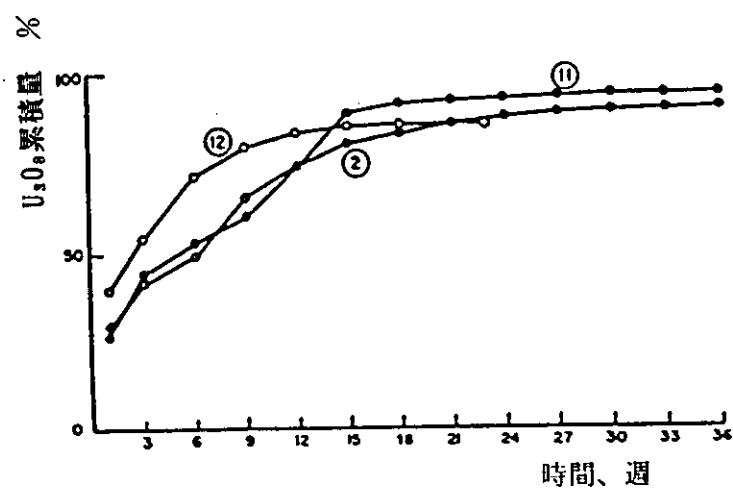


図3 ウラン含有頁岩のバイオ浸出

(ラボでの試験)



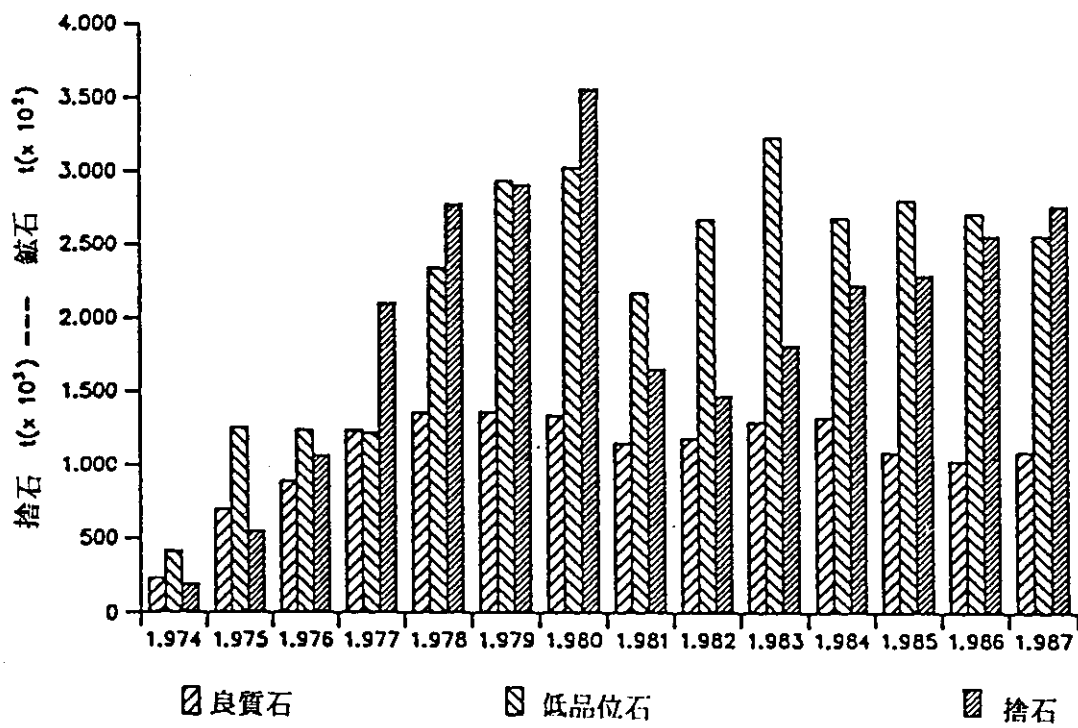


図 4 鋁石の年間生産量

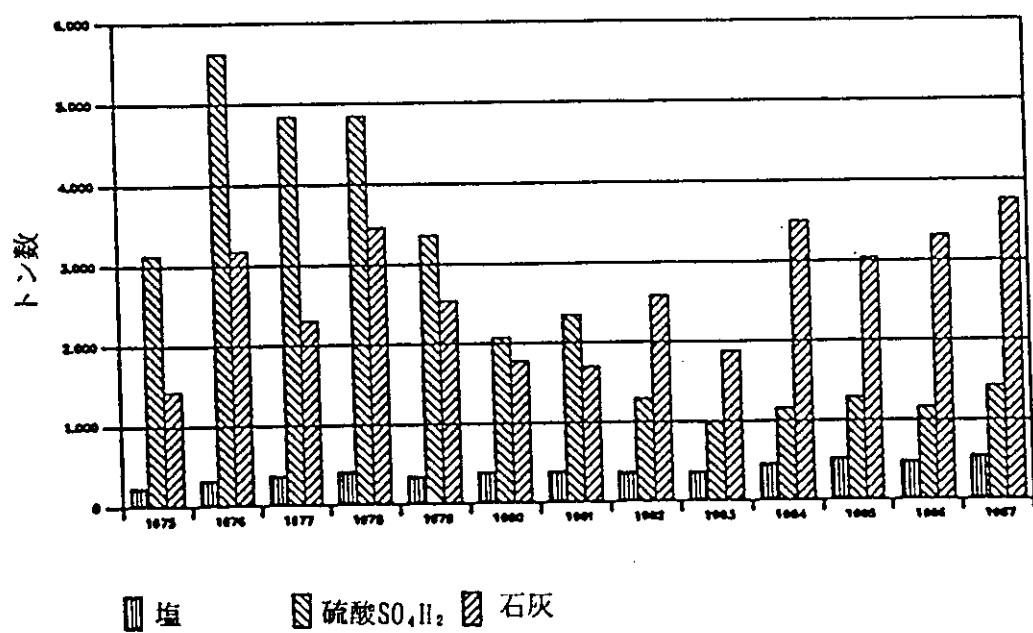


図 5 試薬の消費量

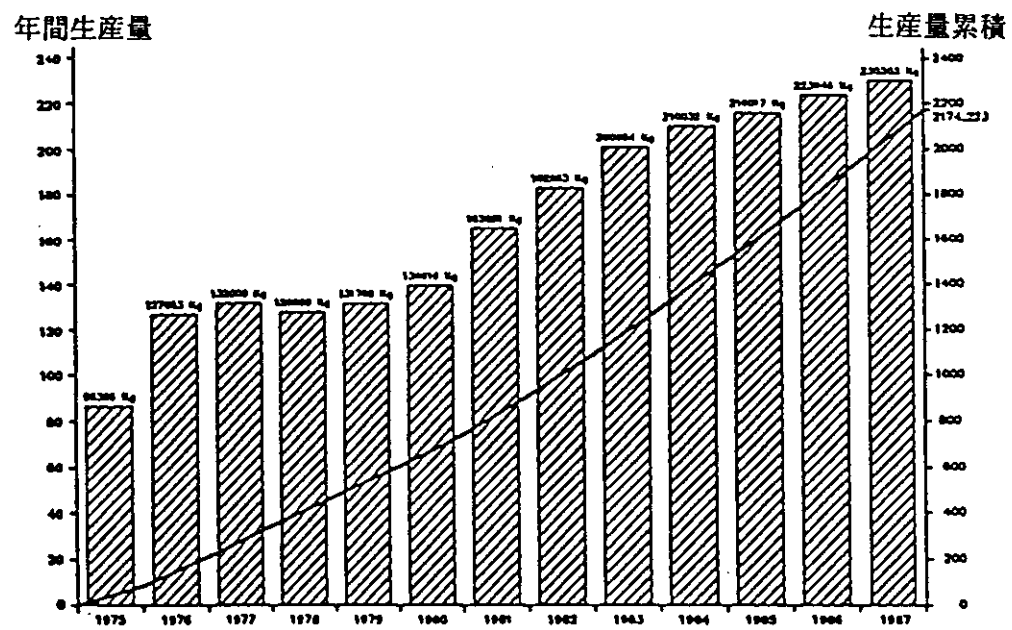


図 6 ウラン ( $U_3O_8$ ) の生産量

# 国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部 ウィーン 1988年10月11日-14日

---

T1-TC-665

## ウラン：手に負えない商品

PCF クロウソン (Crowson)

R T Z

イギリス

去年は実質的にすべての鉱産物商品が、強い需要、在庫減少と生産設備利用率の上昇を背景に著しいドル価格の上昇を見せた。ウランもそれと同じ経済的影響を経験したが、ウランのスポット市場の諸条件の尺度は揺れ動きかつその後の下落さえも示している。このことは、ウランは結局は本当に商品と言えないものなのか、あるいは特別の要因が作用していたことを意味するのであろうか？このような状況においてウラン市場の経済的特徴のいくつかを再吟味することはタイムリーと思われる。

原子力産業の基盤として、原子力発電容量の成長について絶えずいら立たされる期待、商業上の契約に対する政治的干渉とそして明らかに低下している公衆の支持（public acceptance）はウランの仕事に関係している人々にはよく知られている。いくつかの成功した事例はあっても、あまり良く公表はされていない。原発におけるウランの需要は1970年代には平均年率がちょうど14%を超える伸び率を示し、1980年代には年率で約9.5%であった。これらはほとんどすべての鉱産商品より非常に速い増加率である。供給は需要の成長にすばやく応じた。1970年代初期に鉱山の生産力はすでに需要を大きく上回っていた。さらに1983年までの10年間に倍増した。こうした増加はインフラストラクチャー、設備およびあらゆるタイプの労働者を確保するために多額の投資を行ったばかりでなく、それに先立って探査活動を活発に行なったという事情によるものであった。生産能力があまりに急増したために鉱山が1980年代に閉山や減産に追い込まれたということは、電力業界が将来の需要に関して自信過剰な予測を行ったことを反映している。とはいっても、1990年代初期までの今後の成長は、すでに存在している原発プロジェクトによって保証されている。

需要の伸びに対する自信過剰気味の予測が余剰生産力をつくるというこのパターンは1980年代においては事実上すべての鉱産商品にとっても共通のテーマである。ウランと鉱産物全般との間の他の比較がなされるが、それは将来に向かって、もっと光明を投ずるものであろう。今後起こりそうな傾向をよりよく理解することは、ウラン協会（Uranium Institute）の主要な任務の一つである。しかしながら我々は、多くの重要な変動要因（特に需要側について）に関して、一般に認められる歴史的なデータベースが不足しているという思わぬ困難に直面するのである。過去の生産実績、実際に取引された平均価格、それに仲介業者のスポット市場における建値についての数字は入手されている。ウラン業界もまた、資源や埋蔵量については、石油業界ほどの理解はないとしても、石油業界よりもさ

らに悩みの多い関心をもっているのである。業界ではまた広い範囲にわたる予測を行っている。このような予測はしっかりした歴史的な見通しなしに適切に評価がなされ得るか、という点でいくつかの推測がなされるであろう。ここにウラン協会の存在がありこれらのギャップを埋めるのである。最新版のOECD/NEAの赤本<sup>(1)</sup>（1988年3月）はなんとかまとめているが、過去における原発の需要量の実績データは1980年からの累積値であるにもかかわらず、例えばニューケムのような他の解説者たちの数字とかなり違っている。赤本では1980年から1986年までの電力会社の累積需要量は220,000トンUとしているが、ニューケムはこれに対して240,000トンUに近い見積もりをしている。

### 生産のコスト

一つの重大な不足点があるとすれば、ウランの生産コストの見積もりに関するものである。独立したウラン鉱山会社はほとんど残っていないので、会社の年次報告書や類似の情報源からのデータの収集が複雑になっている。この分野の仕事は、上記の如く、コンサルタントにとって広く門戸が開かれており、数人がその役割を果たしている。

生産コストは価格決定における主要な因子になるので重要である。鉱山業界における生産コストの累積値は生産物の供給カーブと類似している。第1図はウランのイエローケーキ生産のための典型的なコストカーブの形を示している。

第1図では鉱山はコストの低いものから高いものへの順に並べられており、それぞれの生産量の累計がカーブとして示されている（単位を除いているのは、資料提供者への適切な配慮のためである。）。このカーブは生産の現金コストを示すのみであって、償却、探鉱費、鉱山および尾鉱用地の復元の積立基金創設、資本の償還、税金あるいは利益などを引き去る前のものである。大量の在庫があり余剰生産能力のあるような市場では、価格は短期間に低下して、生産の限界コストを下回ることがある。これは、市場で受け入れられるのに必要なギリギリの数量を供給するコストが上記カーブよりかなり下にあるからである。もっと長期的には、カーブで示された限界コストと同等の価格であっても、現存する鉱山は運営できず閉山してしまい、業界の再生を保証するためには不十分であろう。理論的には、長期的に供給できる限界コストは、投下資本に対する税引後利益を追加的に含め

たものであり、需要を満たすのに十分な生産を維持するためにちょうど妥当なものである。

不運にも、ほとんどの鉱産物商品の寿命は、短期のものの継続であって、その中で時々生産能力が需要を超えるという程度である。ウランも今のところ例外ではない。

鉱山業界の生産コストカーブの形やレベルは需要や価格とは全く無関係ではない。特に後者は、コストに対して重要なはね返りがある。高価格のつづく間は締まりのない経営や水増し雇用も許されるが、価格が低下するとコスト節減を強いられる。この状況は鉱山業界全体を通じて1980年代には特に顕著であった。鉱山業界にとって現存する多くのそしてさまざまな障壁は、コストの高い鉱山は必ずしも常に閉山されるとは限らず、供給と需要をバランスさせることによって価格を支えているということである。

鉱業界のコストカーブの形は、複雑にかつ時とともにしばしば予言し難い変化をする。新しい鉱山がスタートし、古い鉱山の閉止、為替レートの変動、投入コストの変化、現存する鉱体の品位や可鉱性の変化などがあり、そして技術革新や生産性の向上が着実に導入されている。

第2図は銅生産の現金コストが1971年以来の期間を通じて、平均価格に比していかに変動したかを示している。そのデータはウランについて入手できるものよりはさらに包括的で信頼できるものである。第1図の形に似た各年のコストカーブにおける3つの点は、それぞれコストの3つの線をつくっている。3つの点はそれぞれ、各年のコストカーブ上で50%、75%および90%に当たる。各年のカーブの中で90%レベル以上に当たるトップの部分はいくらか常軌を逸したものである。LME（ロンドン金物取引所）の銅の平均価格がいかに周期的に動いたかを注意されたい。1981年と1986年との間で過剰生産能力が続いたことが、銅価格をカーブのかなり下へ押しやったのである。そして多くの鉱山が損失を受けた。

同じような図をウランについて画くことができるであろうか？コストについての出版されたデータの不足を全く別に差し置いても、価格の定義に関する問題がある。第3図は、3種類の価格とともに1974年以来のコストの動向を比較しようとする試みを示している。コストの評価はさまざまな個人的な情報源から集成された。

NUEXCOのExchange Valueはしばしばスポット市場の価格とみなされているが、そのレベルで少量が取引されるかあるいは値決めされるかであり、相場の時価についてはかなり不明瞭である。それとは逆に、ユーラトムや米国のエネルギー省の発表する平均価格は、一般の市場の条件を表わしてはいないという議論もなされている。しかし過去におけるコストと価格の関係という視点に立てば、コストと比較するためには、銅のLME 価格のように実際にウランが取引された価格の平均値を出すことが必要である。第4図はそのような平均価格を、第3図にあったコストと共に示している。

#### ウランについての2つの現金コストカーブ

“矛盾、矛盾、もっとも巧妙な矛盾”

(W.S.ギルバート、ペンザンスの海賊)

第4図は、第2図にある銅の状況と比較することができる。鉱業界の限界コストが何年間か続いたのを除けば、平均価格はかなり下落している。1980年代における銅産業の経験から、この状態は持続できないと強く示唆される。コストは確実に下げられるだろうが、価格も恐らくこれに應ずることになるだろう。しかしながら我々はここで、若々しいウラン産業の複雑さの1つに到達するのである。それはわずか数十年しかたっていないが、銅のばあいには数千年にわたって生産されてきた。1970年代より前からのウラン鉱山で現在も生き残っている山の多くは、それ以後の世代の鉱山に比べて異なったコスト構造をもっている。1970年代の鉱山開発においても、将来の生産の全コストと見込まれるものよりはるかに高い価格に誘発された1つの高まりがあった。その後鉱山はさらなる価格低下に直面せざるを得なくなったので、比較的低いコストであるとか、または有利な契約、固定した顧客を持っているとか、重要な共生産物ないし副産物の価値、または国営企業であるというような特別、有利な鉱山だけが、操業を進めてきたのである。

1970年代初期に実現されたのに近いような急速な市場の増大への要求が減退した結果、長期販売契約によって、かなり多量の供給可能性が数年先まで拘束されてしまったのであ



る。これらの契約の価格は市場全般において重要な役割を演じているが、通常それら価格はスポット取引や新規に条件を交渉した契約によって得られた価格をかなり上回っている。これは銅産業においてあまねく共通の価格であるのとは対照的である。

ウラン産業の供給カーブは2つのカーブに分けることができる。一つは長期契約によって引き渡される数量のそれであり、もう一つは残りの未契約分の数量のものである。このことはほぼ第5図に示されており、各々の稼働鉱山の生産規模は契約済の数量と未契約数量との2つに分けられている。ウラン業界全般の典型的なカーブが第1図にあるが、これは第5図の2つのカーブを水平的に足すことによって得られる。

操業中の生産能力のほとんど3分の2は1986年ないし1987年になされた長期契約で引渡しが決まっている。契約のできた生産者の方が未契約の生産者よりも平均コストはいくぶん高くなっている。たとえば、それらの生産者は業界全体の生産量の4分の3以上を占めているが、ポンド当たり20ドルまたはそれ以上の現金コストを背負っているのである。短期的には、業界の供給カーブは、生産物があっても契約できていない鉱山の現金コストのカーブと近似している。業界の潜在生産能力は、全業界を通じての在庫の減少とも重なってまだ契約余地のある電力会社の需要に応じるのがやっとなのである。

したがってウラン業界全体のなかでは、未契約の生産者とまだ買い余地のある電力会社との間の比較的小さな市場が存在している。この小市場（Sub-market）で通用する価格は短期契約条件で、すべての他の条件は均等であって、未契約生産者の現金コストカーブと充当されていない需要のカーブとの交差によって決定される。やがて、既存の長期契約が古くなるにつれて契約済生産能力の割合が縮小し、新規の長期契約がないこともあって未契約生産能力が増大するであろう。結局、未契約生産者の供給カーブが、全業界のカーブへと移り変わって行き、そのものになるのであろう。他の鉱産物商品をもみても、2つもの短期供給カーブがあるという贅沢ではある、一方重荷を負っているものはほとんどなく、これはウラン業界の過去の契約のあり方に起因するものである。

2つのカーブの存在は①「スポット価格が何年間も引き続いて平均契約価格を下回り」  
②「さらに重要なことには業界の限界コストをはるかに下回った。」という矛盾を説明す

るのに役立っている。後者の取引条件は、ウラン市場全体に受入れられるのに必要な限界数量を供給するためのコスト本来の背景において用いられている。それはしばしば、未契約生産と充当されない需要とを均衡させるために必要とされる数量のコストという、ずっと狭い意味で用いられてきたと思われる。そのようなコストが業界全体としては確かに限界内のものかも知れないということは、簡単なテストでわかる。もしも長期契約をもってすべての電力会社が契約を破棄するようなことがあるならば（すすめられるような行動ではないが）彼らの全需要量は未契約市場へと移るであろう。同時に、以前契約のあった生産者は契約破棄により販売しなければならなくなった数量が追加されることになる。そこで未契約数量の供給と需要のカーブは、全業界を包括することになるだろう。限界生産コストは西側世界全体における供給者のやっと収支が償う限界のコストになるであろう。そのコストは未契約会社だけの限界コストよりは高いのである。

実際において価格は、いくつかはあったとしても、業界の限界コストとは正確に一致することは稀である。しかしながら銅の価格とコストに関する第2図は、市場がそのような暗黙の均衡に向かって進んだりその周囲を動き回ったりする明らかな傾向のあることを示している。銅業界においては価格とコストの関係にかかわらず1987年まで低価格が続いたが、それは恒常的な余剰生産能力と多量に認められた在庫によるものである。両面の特徴がウラン市場に存在している。天然ウランと濃縮ウラン両方の形でかなり大量の在庫が、鉱山、加工業者および電力会社に保有されている。また鉱山業界は明らかに、生産能力をかなり下回って今日でも稼働しており、余剰生産能力は1990年代までずっと継続するものと報ぜられている。それでも万が一生産が不十分ということになれば、新しい採鉱プロジェクトが推進されることになる。それらのいくつかは、資本の回収を含む全コストが意識的に計算から除外されることがあれば、潜在的に低い操業コストをもつことになる。卵がまだ生まれないうちに鶏の数をかぞえるという消費者の典型的な例においては、「ひよこ」にかえすことだけをすれば、これらの採鉱プロジェクトは将来の価格についての期待に影響をあたえるものである。

## 在庫

1987年における卑金属（ベースメタル）の価格の回復は在庫が減少し始めてからかなり後にやってきた。第6図は1979年以來のアルミと銅についての在庫対消費の比率の四半期毎の挙動を示している。その比率は1987年に価格が急上昇を始める直前に非常に低くなったのである。これは、価格と在庫との間に密接な逆の関係が存在した経済活動における過去のサイクルとは対照的なものである。この時期において価格の反応が遅れた理由は本報告ではふれない。

ウラン産業における在庫とは一体何であろうか？ そのデータは貧弱であるが、第7図は在庫の傾向の概略を示している。西側世界における余剰在庫の指数が、ニューエキシコの交換価値に対応して図示されている。指数の計算に当たっては、年初における在庫量は、その年の発電所の使用量との比で表わされている。次の年の発電所使用量の2年分に等しい在庫量のレベルを100とする。2年分という在庫の業界全体の平均が、ウラン協会の需給委員会の定期報告<sup>(2)</sup>において電力会社によって出された見解に基づいて“正常”とみなされている。

第7図は、上記の定義によれば在庫は余剰のままであるが、4年あるいは5年以内には、他のことは当然同じように残っているが、定義された“正常さ”へと向かう明白な傾向のあることをも同じく示している。銅産業から類推をすると、在庫量のレベルが低過ぎるとみなされるまでには、恐らくさらに数年かかることであろう。ここでは鉱山、加工業者、電力、あるいは仲介業者に所有される在庫の間にも、また天然ウランと濃縮ウランとの在庫の間にも区分はされていない。特に米国におけるいくつかの電力会社は現在ゼロ在庫を妥当な目標とみなしているが、他国の他の会社はもっと大きい在庫をもちたがっているかもしれない。過去数年の経験では、各地に在庫が分布していることはそのレベルに応じて市場に強力な影響を及ぼしうるということを示している。ゼロ在庫ということは多分、卑金属の消費者の適時配送（Just-in-time）在庫に等しいものであろうが、それは品物が豊富にある時に許されるだけのことである。それがもはや容易に実現できないとなった時には品のない奪い合いになって、一夜にして市場が緊迫するということになりがちである。

## 生産能力の利用

在庫の急激な低落と卑金属価格の反応との間のおくれについての一つの理由は、生産能力が大きく生産量を上回っているという確信が広く行きわたっていたことである。すべての統計は生産能力の利用レベルの低さと、価格上昇時には急速に再開できたであろう待機中の鉱山の予備軍について指摘した。結局、生産能力は需要と均衡するように試みられたが、明らかに達成できないことがわかった。有効な利用率は名目上の率よりもずっと高いものであったので、予備軍の存在も幻想と消えた。ある程度までは、同じことが多分ウランにとっても真実であろう。

鉱山の生産能力の利用度の指数（1974年を 100とする）は第 8 図においてニューエスキコの交換価値と比較されている。この指数の基礎になる生産能力は1974年と1983年の間に2倍以上に増加し、それ以後14%減少した。コストが高かったり鉱量の尽きた鉱山は閉止されたが、閉山による生産能力は拡張や新規プロジェクトによって部分的に置き換えられている。鉱山の生産能力の測定は、鉱石品位、稼働日数、処理量の割合などが変化するため、せいぜいよく見ても不正確になる。価格の軟化とそれに逆行する為替レートの動きに直面して、いくつかの鉱山は公称能力以下で操業しているであろう。それでも彼らは、その設備を修復したり、止むを得ず怠ってきたのかも知れない剝土作業や先行開発を実行して、それらの公称能力を回復するために多大の費用をつかう必要があるかもしれない。さらにまた、業界の一部の生産能力は、ウランが副産物であってその抽出があと廻しになるばあいには、純粹に生産者の自由意志に任せられる。たとえば、南アフリカの金鉱山の公称生産能力はこのカテゴリーに入るものであるが、ウラン業界全体の10%を優に超すものである。あらゆる実用的な目的のために、業界は恐らく、入手できるデータから想像できるものよりは、業界の効率的生産能力の限界にずっと近いレベルで稼働しているのであろう。ウラン業界の生産能力利用率は第 8 図が示すよりももっと大きく上昇したのであろう。

## 結論

“消えてしまえ、呪わしいしみよ！

早く消えてしまえというのに！”

〔W. シェークスピア、マクベス、第5幕、第1場〕＊

ウラン市場へのさまざまな参加者は、この論文に示されたデータの精確度と適切さの両方に対して明らかに多様な結論を引き出すことになるであろう。基礎的なデータについて重大な相違の存在する余地がありうるということは、業界にとっては、世間に広く容認される統計的なベースを準備するために、一層大きな努力を捧げることがきわめて必要だということを強調している。市場勢力がやがてはより強い価格に到達するという含蓄あるメッセージを忘れ去っている人々にとっては、過去2～3年の卑金属の経験が戒告的な話を提供してくれる。ウラン市場が最後に曲がりかどにくる時には、明らかに卑金属市場に昨年の回復を迎えた時と同様に、最初の驚きと不信が生じるであろう。今や上記の分析は、市場の転回は来つつあり、厳密に経済的な理由の組合せによるものであることを強く暗示している。

## References

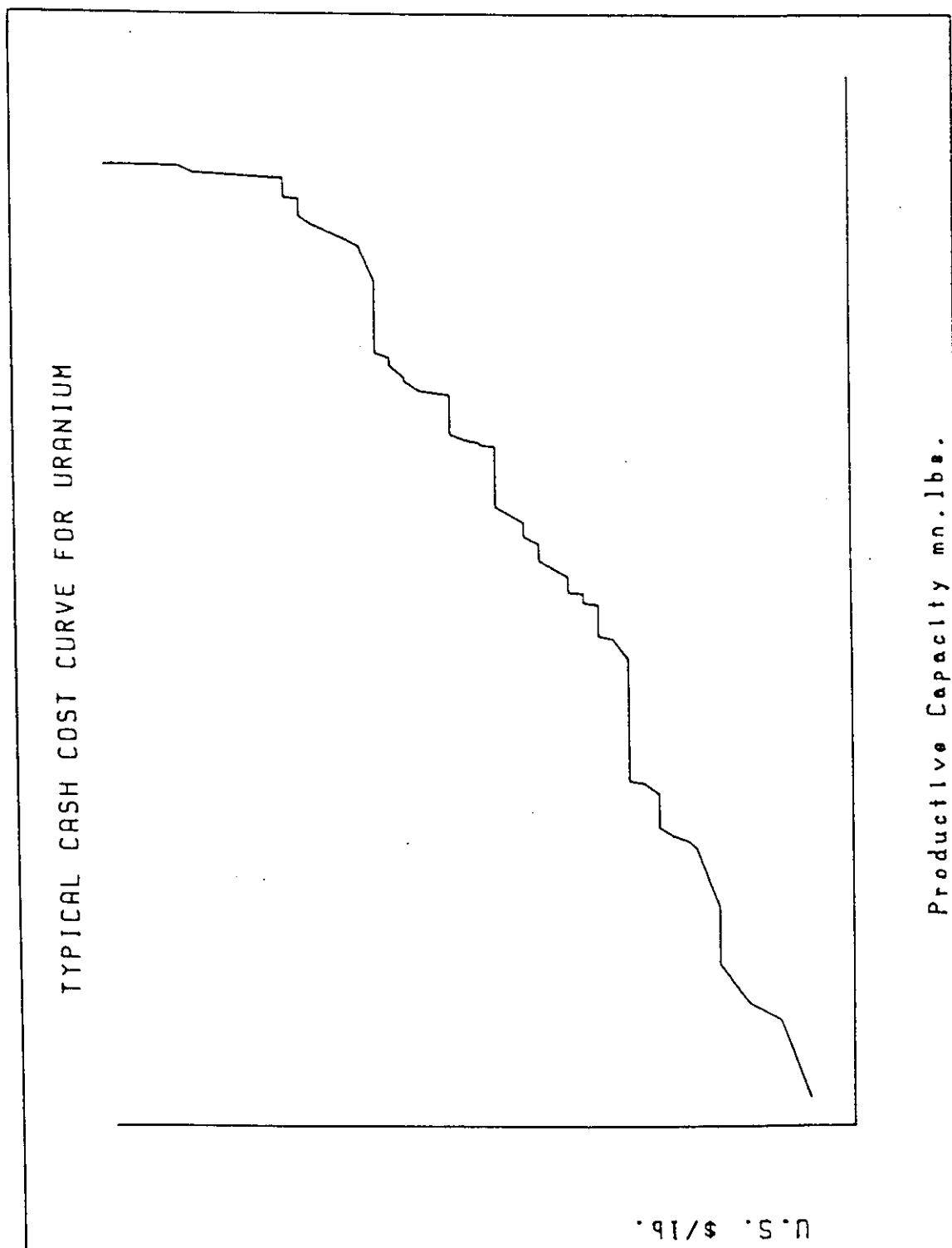
1. OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY/INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.

Uranium: Resources, Production and Demand. OECD, Paris, March 1968

2. URANIUM INSTITUTE. The Uranium Market: 1986-2000.

Uranium Institute, London, December 1986.

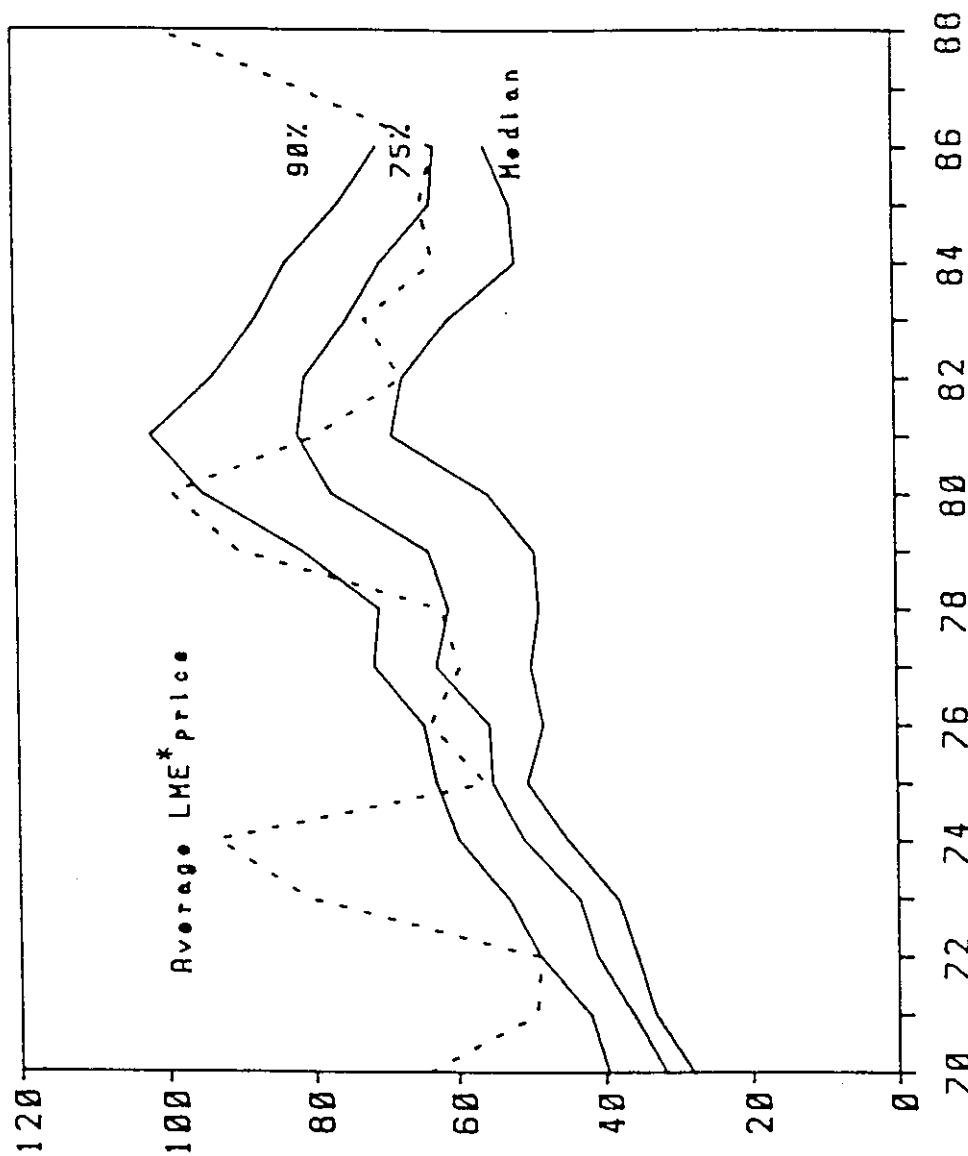
\* 訳注 福田恒存訳 新潮文庫より引用



第1図. ウランについての典型的な現金コストカーブ

出典：Nuclear Assurance Corporation の1988年版のUSA System からのデータ  
 によった。

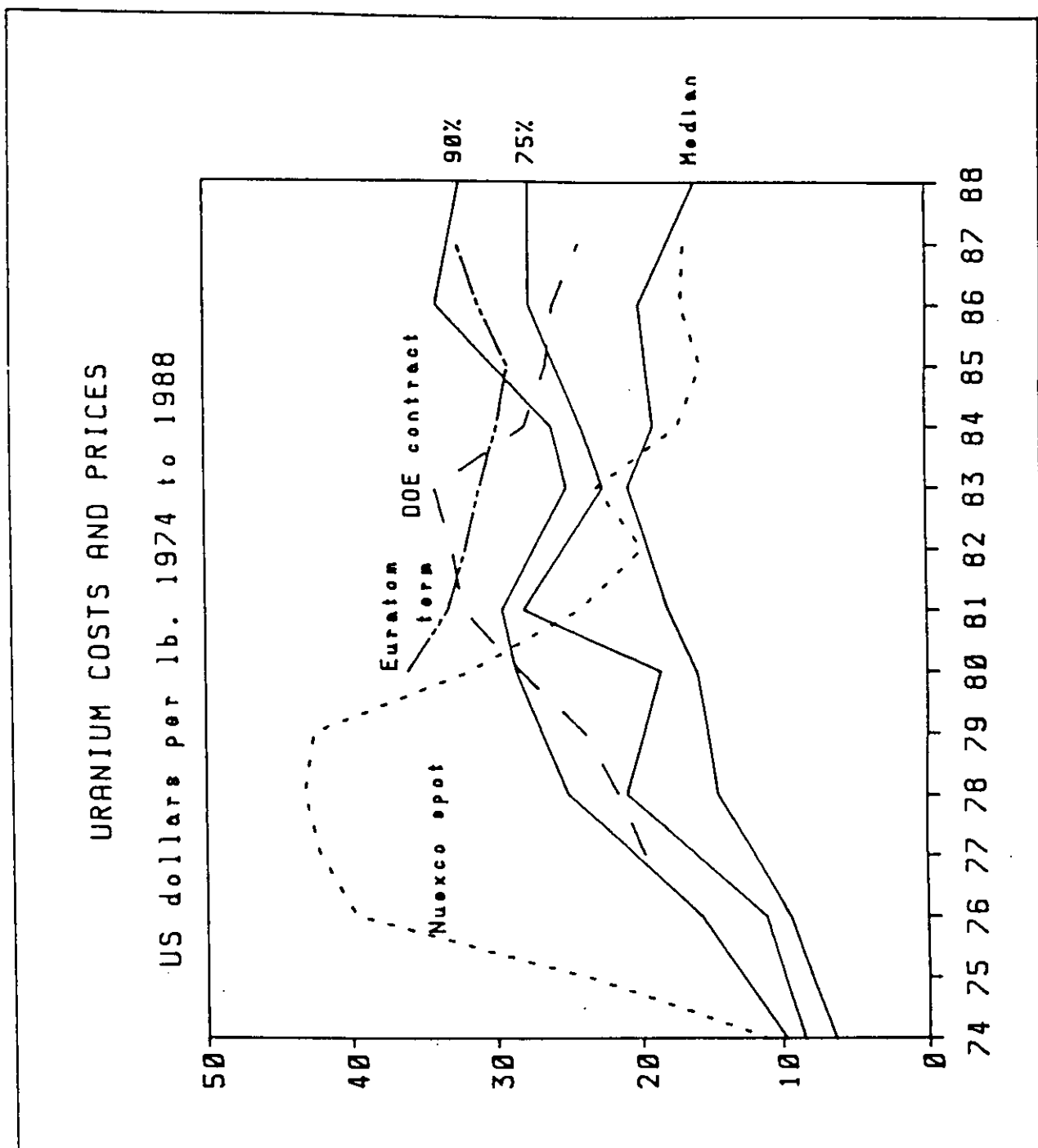
# COPPER COSTS AND PRICES US cents per lb. 1970 to 1988



第2図. 銅のコストと価格の関係

出典：RTZ 鉱山情報システム

\* 訳注 ロンドン金物取引所



第3図. ウランのコストと価格の関係

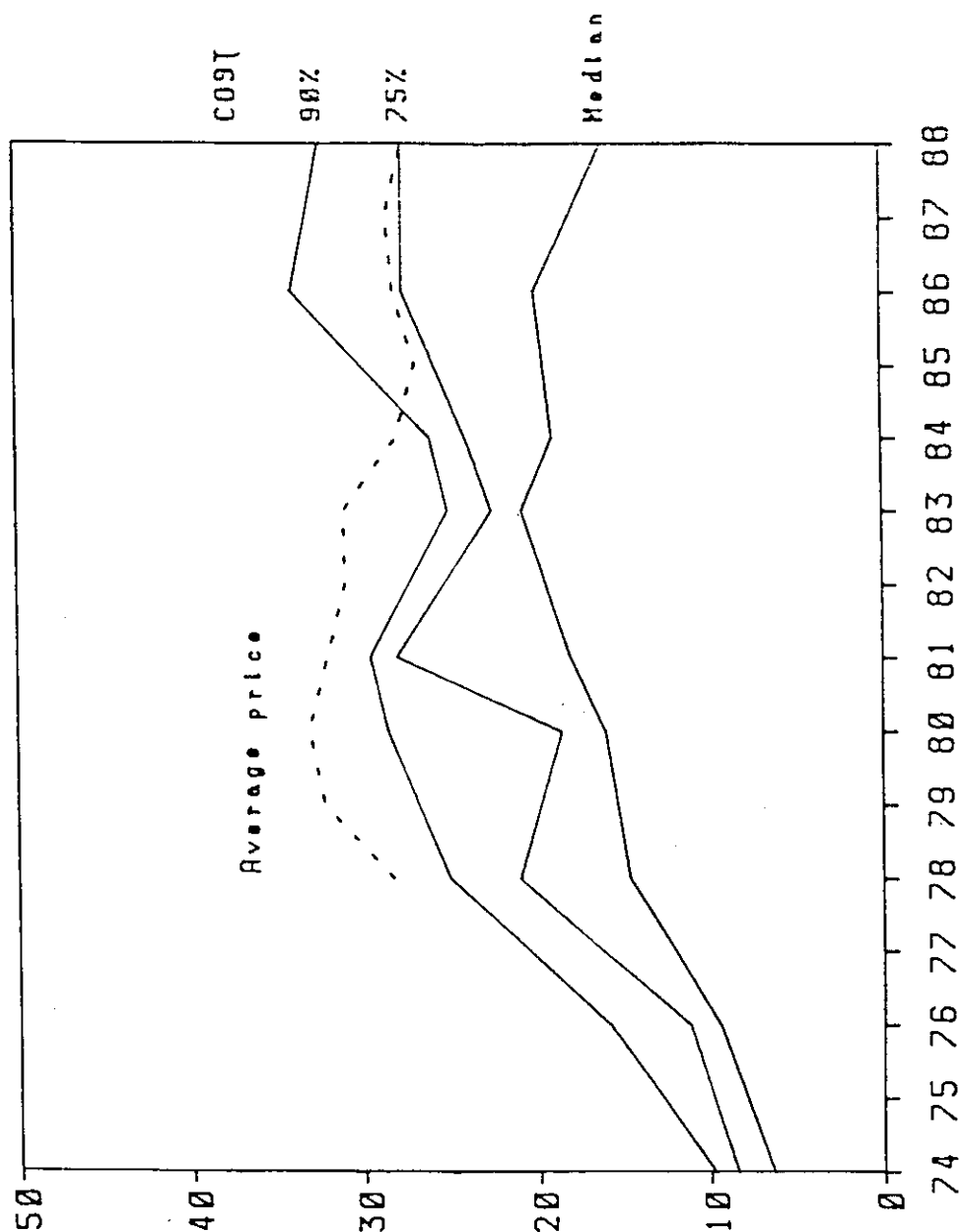
出典：コストについてはRTZおよびNuclear Assurance Corporation.

価格については米国エネルギー省、ユーラトム供給機関およびニューエクスコ



# URANIUM COSTS AND PRICES

US dollars per lb. 1974 to 1988



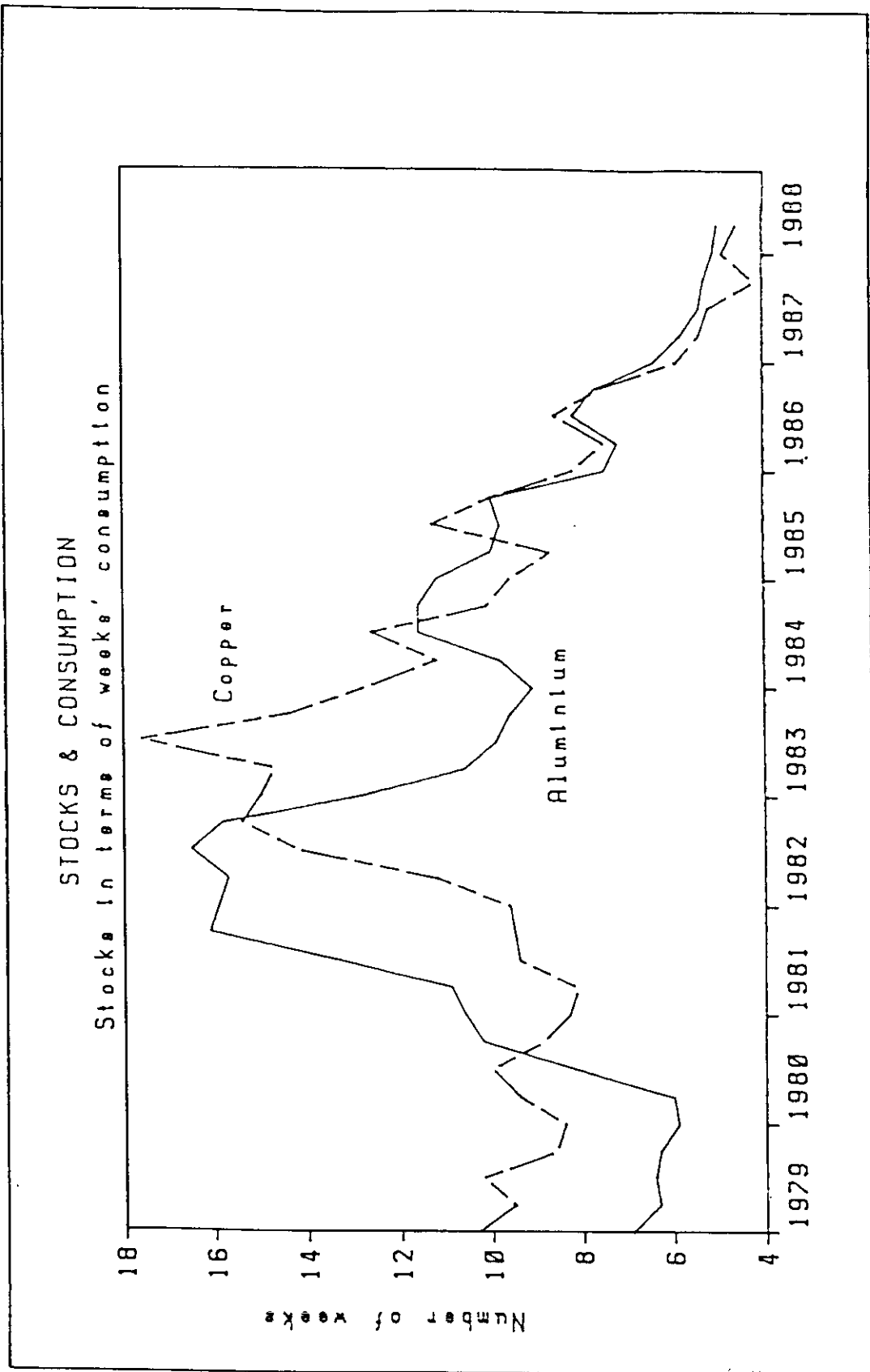
第4図. ウランのコストと平均価格の関係

出典：第3図と同じ。平均価格とは3つの建値の加重平均値である：ニューエキスコのExchange Valueはアメリカの年間需要の20%に、そしてヨーロッパの需要の10%に対して適用し、DOE 平均値はアメリカの残りの需要に、そしてユーラトムの平均値は西側世界のすべての他の供給に対して適用した。これ以上の洗練された方法があったとしてもおそらく大きく違った図式にはならないであろう。



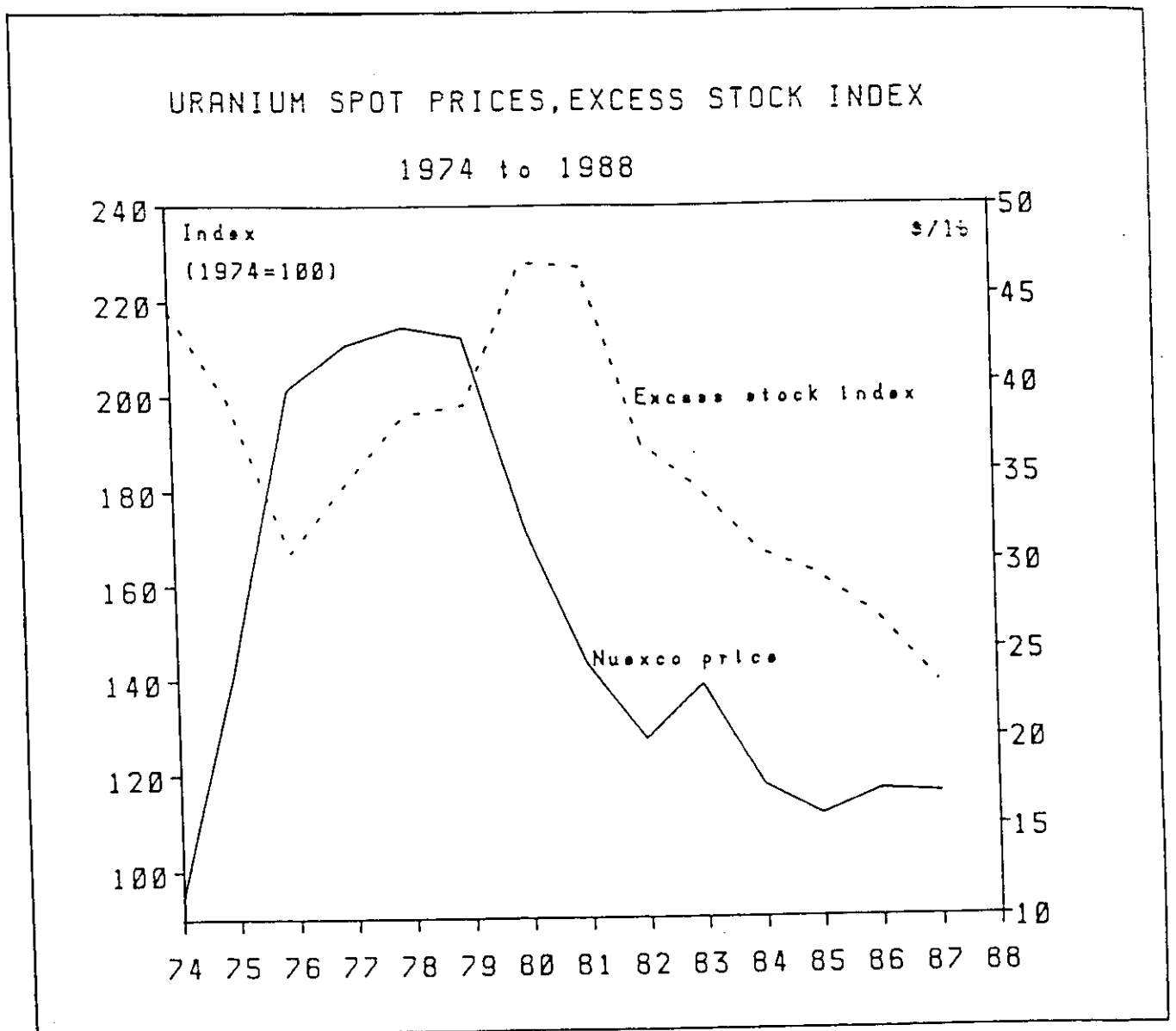
第5図. 既契約および未契約数量に対するウラン供給（現金コスト）カーブ

出典：Nuclear Assurance Corporation の世界の $U_3O_8$ 生産者の一覧（1986年10月  
および1987年6月版）およびウラン供給力の評価システム（1987年5月版）。



第6図．アルミニウムと銅に関する在庫と消費の比率

出典：世界金属統計局、国際アルミニウム地金協会および商品調査集団。

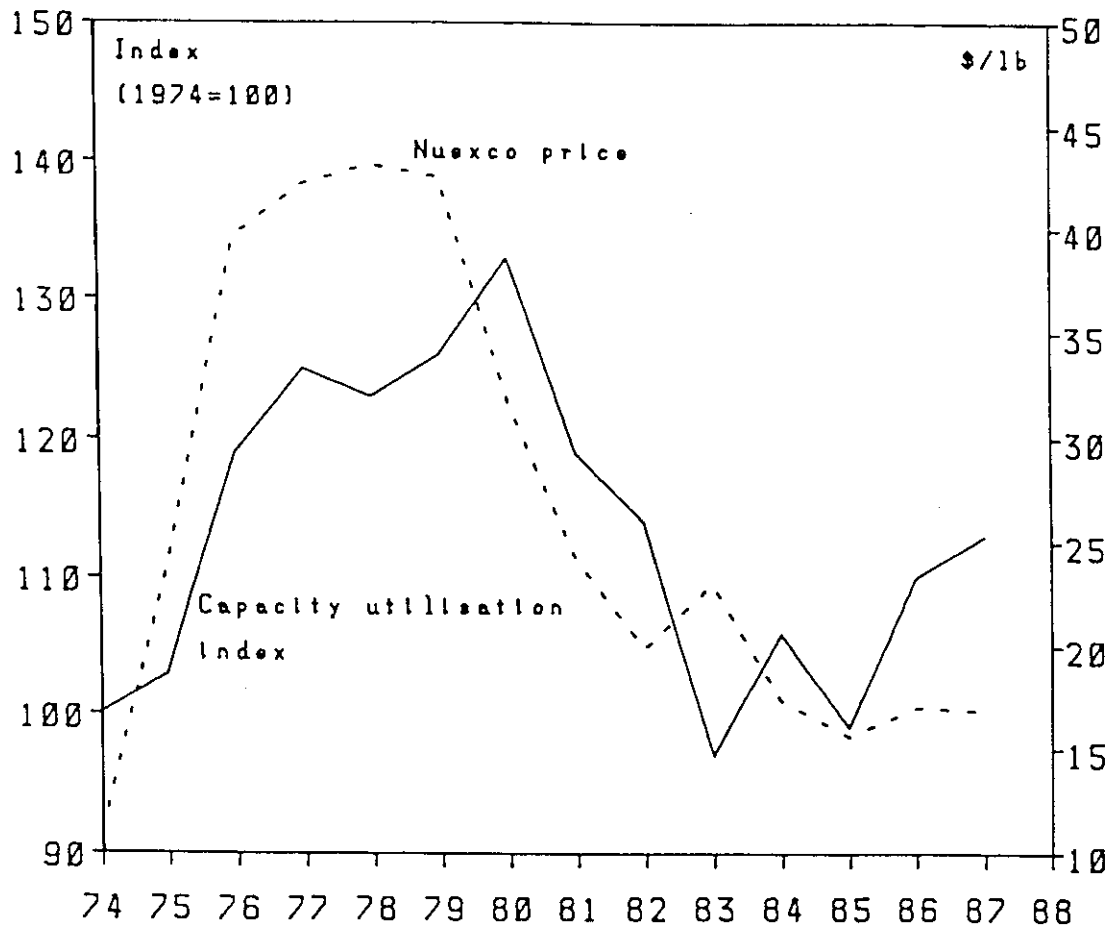


第7図. ウランのスポット価格と余剰在庫

出典：OECD/IAEA の赤本<sup>(1)</sup> の鉱山生産量のデータに基づいた RTZの見積り、およびニューエキスコとニューケムの需要見積り (Nuexco Monthly Report 168, 1982 年 8 月および Nukem Market Report 2 / 85、9 / 85 および 2 / 88)。最初の在庫量は Nuexco Monthly Report 168) から引用。最近数年間におけるわずかなりサイクルの量と軍事用および調査に使用した分の統計漏れとについては大まかな酌量を行っている (Nukem Market Report 2 / 85、P.3)。ニューエキスコの Exchange Value はスポット価格の代わりに使われている。

# URANIUM SPOT PRICES, CAPACITY UTILISATION

1974 to 1988



第8図. ウランのスポット価格と生産能力利用度

出典：ニューエクスコのExchange Valueをスポット価格として用いた。生産能力利用度はOECD/IAEA 赤本<sup>(1)</sup>の鉱山生産量の見積りから引用した。Nuclear Assurance社の継続的な世界のU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>生産者紹介とRTZの見積りを生産能力について引用した。

# 国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部 ウィーン 1988年10月11日－14日

---

T1-TC-665 9b

## 低品位ウラン鉱石の鉱脈に対する評価

J. M. ホサ博士

J. R. セラノ（スペイン）

国営ウラニウム会社(ENUSA)

（スペイン・マドリッド）

## 要 旨

サエリセス・エルチコのフェ・鉱山の鉱脈はオープンカット方式で採掘が行われ、静止式浸出法 (STATIC LEACHING) で効率が低い時 (60-70%) でも最高230tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>を生産してきた。

本鉱脈の埋蔵量は約9,000tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>であるが近郊に同じタイプの複数の鉱脈が存在し、合計20,000tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>の埋蔵量に達している。

静止式浸出法による生産効率よりも優れた効率で約1,000tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>を生産するプラントが存在すれば、ウランの量はそのメリットを正当化できるかも知れない。しかし、全く低品位で600-800gU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/t位の含有量のものであれば経済的フィージビリティに対してはあまり有利な面は期待できない。

ENUSA は近年フェ・鉱山の鉱脈の評価に関して、多くの研究を行った。ENUSAは鉱化途上の岩 (やわらかく、バラバラの状態) と堅くて密な岩の間に存在する差異による“前選鉱” (PRECONCENTRATION) の方法を利用できることを発見した。

100mm 以下に粉碎し、1-2 mmで区分した場合、大部分のウランは細い粒子の方に片寄ってしまい、攪拌式浸出法のプラントに供給され、大粒でウランの少ない鉱石は静止式浸出法で浸出される。

両方式を共用した場合の効率と経済性は市場の状況によっては競争力のあるものとなる。

## 1. 概 説

スペインにおけるウラン鉱石の埋蔵量は約 40,000tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>に相当する。この開発はスペインの原子力発電所用燃料の需要に対して大きく貢献するであろう。しかしながら、その低品位性に問題があり（約700ppmU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>）、ウラン市場での現在の価格レベルでは経済性の高い開発は望めない。

ENUSA は現在この種の鉱石(1)からウラン精鉱を生産している。

生産の規模は年間230tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>であり、静止式浸出法を採用している。1,000tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/年程度の量の生産では静止式浸出法には近づきたい。なぜならば、敷地も広いものが必要であり（1－2年の据置期間もある）、効率は非常に低い。

このような理由で“前選鉱”材料を使つての従来タイプのプラントの実現を考慮するに至っている。（2－3）

本資料では経済的に実現可能となるよう次のアプローチを行う。

まず手短に鉱脈の地質学的特徴を紹介する。

○投資および処理に係るコストを考察する。

○ある工程のコストを不要もしくは低減させ得る変数を探求する。

○鉱石の区分による“前選鉱”の効果および本方式適用の予想スケジュールを紹介する。

## 2. サラマンカ地方の鉱脈

スペインにおける埋蔵ウランの74%がサラマンカ地方に存在する。

約9,000tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>がロドリゴ市に近いサエリセス・エルチコにあるフェ鉱山に埋蔵されている。

フェ鉱脈はイベリア変成頁岩群の特徴的タイプの鉱脈である（スペインのサラマンカとポルトガルのニサ）。

この種の鉱脈では、沈殿作用は各々異った規模の変成作用を示し、頁岩の形成段階における鉱化作用の存在も層のレベルや具体的な岩石形成の法則とも関連は薄いものである。現実には大きな弛緩や浸透性を伴う地質構造上の空間に上記のごとき地勢があたかも破壊や断層の連続線上に起こる割れ目の詰物のような形で存在する。（4－5）

鉱石の表面変化そのものが薄片組織の組成に有効な副産物を再蓄積させて鉱化作用を鈍化させている。



初期の鉱物はSPHALERITEおよびCOFINITA（ルビーに近い由）であり、第2期鉱物としてBLACK OXIDES、CORACITAS、ウラナイト、TORBENITA、その他である。

ウランを含め鉱化物で最も重要なものが黄鉄鉱であり、また少量ではあるがMARCASIT A（黄鉄鉱に近い）、MELNICOVITAおよび黄銅鉱などもあり、時々SPHALERITEやLEAD OREも存在する。

黄鉄鉱の組成プロセスは：

まず、変成岩、そしてその後石英、BLACK MICA（黒雲母）CHLORITE、そして黄鉄鉱、そしてその後再度黄鉄鉱となり、LEAD ORE、黄銅鉱、SPHALERITE、石灰岩－白雲石となる。その後、新たに同種の鉱物の形成があり、最後にBLACK OXIDES、ウランの豊富な鉱物群および鉄鉱石－BROWN IRONが現れる。

採掘はオープンカット方式で行われる。つまりこの鉱脈はかなり地表に近いところを走っている。(6)

採掘限界を200ppmとし、鉱石は2種類に分別される：

低品位石は200-600ppm $U_3O_8$ であり、良質石は600ppm $U_3O_8$ 以上である。

鉱石はインパクトクラッシャーで粉碎され、静止式浸出作業所へ運ばれる。採掘中に鉱石が急に良質のものから粗悪なものになるということが明らかになってきた。その上、細粒のものはウランが大変豊富であるが、大粒の鉱石はウラン含有量が極端に少ないということも解った。

### 3. ウラン回収の経済性

ある鉱脈の経済的フィージビリティは次の要素に（7－8）負うものである：

- a) 採掘量：つまりスケールの経済的メリットを享受するということである。
- b) 品質：つまり品質が高ければ高いほど生産に対する投資額は結果的に少なく済むことになる。

その上、生産コストは鉱石の品質に負うところが大きいし、製品コストは鉱石に起因するコストを最終製品のコストで割って算出する。つまり、鉱石の品質に左右されるものである。

- c) 鉱脈の特徴および採掘技術との関係
- d) 鉱物学的特徴および処理に際しての条件
- e) 鉱脈の所在地および既在のインフラ

f) 環境保全による制約

鉍石処理の手順 (DIAGRAM) は一般的なものであり、多少のバリエーションはあるが通常の酸による浸出法で行われる。

資本と操業コストの構成はテーブル I (7) に示されている。

経済性を向上させるために考えられる方法は次のとおり：

- i) 処理プロセスを1つまたはそれ以上減らすこと、例えば静止式浸出法を使用する。
- ii) 処理プロセスの技術あるいは機器の改造　そして
- iii) 大粒の粗悪鉍を取除くことによって、プラントに搬入される鉍石の質を高める。

この最後の側面は鉍石と粗悪岩をハッキリ区別できることが前提となる。(9)

鉍脈では鉍石の質が急激に変化する。すなわち：

- －放射能が豊富な鉍石
- －堅い鉍石およびもろい鉍石

初めのケースは放射性が高いこと(10)、2番目のケースは鉍石サイズによるクラス分け(3)を有利に利用することができる。

他の“前選鉍”の可能性としては、重量別選鉍、強力なダンプマグネットによる選鉍および媒体を使った浮選などが考えられる。

これらの方法が適用可能かどうかは“鉍石の品質と回収性のカーブ”(グラフの)あるいは“粗悪鉍の廃棄とそれに伴うウランのロスをどのように読み取るかに負っている。

選鉍を前提とした生産は良い結果を期待することができる(売上とコスト)、つまり“備蓄”の経済的活用である。(11-12)

#### 4. フェ鉍石の“前選鉍”

フェ鉍石のウランは粉碎することによって、まず細粒鉍石を増やし、(ウラン含有率の低い粗粒分を分別することにより) 20および30kg U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/t程度まで約10倍ウラン含有率を増やすことが可能である。しかし、各サイズの鉍石に対するウラン損失総量の差異は大きく30%から100%の変動率を示している。

変動の原因として考えられるのは：

- －サンプル鉍石の採取場所(鉍脈の中での位置)
- －鉍石が属している鉍脈のタイプ
- －鉍石の元来の質

－粉砕技術

－クラス分けの方法

水を使つての泥ぬきおよび分級の方が乾式での分級よりも粒がそろい、鉍石のふるい残量当たりのウランの損失量は少なくなっていることが解っている。

鉍石の元来の質の影響を見るためにサンプルを次の品質別に3グループに分離した。

$$\begin{aligned} &< 300\text{ppmU}_3\text{O}_8 \\ &300-599\text{ppmU}_3\text{O}_8 \\ &600-1,190\text{ppmU}_3\text{O}_8 \\ &\geq 1,200\text{ppmU}_3\text{O}_8 \end{aligned}$$

判明した結果は図1、2、3およびテーブルⅡに示されている。

これらの中で次のことが解る：

- a)各クラスの平均的鉍石サイズ分布は全て均一である。(図1)
- b)各サイズ(図2)およびクラス別のウラン(%)の分布(ふるい残)はサイズが大きい程大きい。

良質の材料ほどウラン(%)の相対的損失量に比して粗悪品を多く廃棄する。

- c)ふるい残石における総合的品質(テーブルⅡ)は元来の粗悪鉍に比して低い。しかし投入鉍石の質(FEEDING GRADE)が高くなると、全体的品質は評価できる値となってくる。

- d)細粒鉍石の品質は大変高くなる。

ほとんど粗悪石に近い材料から(206ppmU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)概ね1,100ppmU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>の品質のウランが50%も回収可能である。

- e)ふるいに残った大粒石におけるウランの損失はウランの部分的回収により減少する。

その方法は：

－静止式浸出法あるいは：

－40-10mmあるいは25-10mm片石の放射線測定による分離などである。

- f)大粒粗悪石よりのウラン回収作業に伴う高い不安定性は鉍石の鉍脈における所在あるいは鉍脈またはその割れ目の特徴に関連があるのではないかとと思われる。

この点については、将来さらに研究を行う必要がある。

## 5. 従来法への“前選鉱”の適用

ふるい分けおよびクラス分けによる鉱質の良化を活用して950tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/年の生産を可能とする利益の高い計画がたてられた。

本計画のフローシートは図4に示されているとおりである。

鉱石は  $d_{100} = 100\text{mm}$  のサイズに2段階で粉碎され、泥ぬき機をとって湿式ふるいにかけられる。ここで10～100mmの大粒は取り除かれ、粗悪石として送りだされる。平均1～10mmの細粒が静止式浸出プラントに回され、微粒( $d_{100} = 1\text{mm}$ )は従来型酸浸出プラント(CCD)に送られて溶解液による浸出が行われる。

材料とウランの予想配分は次のとおり：

|               | 配 分 %        |      |
|---------------|--------------|------|
|               | 材料(MATERIAL) | ウラン  |
| 従来型プラントへの鉱石   | 11           | 65.0 |
| 静止式浸出プラントへの鉱石 | 22           | 17.5 |
| ふるい残鉱石        | 67           | 17.5 |

粗悪石と鉱石のウラン含有率はほぼ4.2及び7.7t/tの間に入っている。総回収量は約20Mt/年程度である。

鉱石1トン当たりの酸の消費料は鉱石のクラス分けによってほとんど影響は受けていない。他の条件(酸化物、鉄分など)は、鉱石の鉱脈(13)における所在に関連して影響を受けている。

プロジェクトの総投資額は鉱石の元サイズ(3)、図5に負っている。

元サイズ1mmに対し、プラントのコストは約5,700百万ペセタ程度である。もしウランの価格が33ECU/ポンドU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>であれば高い収益率が期待できるが、28ECU/ポンドU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>に下がればIRR(内部利益率)が10.8%に下がり、投資額の回収期間は12.7年に延びることになる。

IRR(内部利益率)の変動に影響が出る“因子”は次のものであるとの研究結果が出されている。

- －濃縮ウランの販売価格
- －攪拌式浸出プロセスの稼働率
- －ウラン含有率の最も高い鉱脈の品質の不安定さ

－開発・採掘費用

－総投資額および

－鉱脈における粗悪石との鉱石の比率

## 参 考 文 献

- (1) ゴンサレス・S. ホサ, J. M. セラノ・J. R.  
鉱石の静止式浸出法での15年間にわたる実績  
第8回 国際鉱物・金属学会会議用資料  
1988年16日～22日オビユド（スペイン）
- (2) セラノ・J. R., アルティエダ・J. I.  
スペインの原子力発電所用濃縮ウランの供給（ケルカスプロジェクト）  
第8回 国際鉱物・金属学会会議用資料
- (3) アルティエダ・J. I., エンテウレナ・A.  
濃縮ウラン生産プラントの改良  
第8回 国際鉱物・金属学会会議用資料
- (4) マルティン・M., コマ・F., ランス・I.  
サラマンカ地方のサユリセス・エルチコのウラン鉱脈“フェ鉱山”の地質学的、鉱物学  
学および金属学的分析への貢献  
Bo 1. 鉱物地質学99(1) (1988) P109-119
- (5) アリーバス・A.  
沈殿岩群におけるウラン鉱脈の起原について：サラマンカ地方（スペイン）のフェ鉱  
山の場合。  
上記は1986年ウィーンにてIAEAが発行した“鉱脈性埋蔵ウラン”の中のP193-214に含  
まれている。
- (6) セラノ・J. R., メンブリジェラ・J. R., クリアド・M., ゴメスージアエン・J. P.  
アルティエダ・J. I., グランデ・L.  
サエリセス・エルチコのウラン頁岩群に存在する鉱山  
上記は“ウランの評価と採掘技術”、（1979年ブエノスアイレス）P253-274に含まれ  
ている。1980年IAEAがウィーンで発行
- (7) 第3回経済評価会議  
“ウラン抽出技術”（NEA-IAEA）、（1983年パリにてOECDが発行）のP129-141に含まれ  
ている。
- (8) シモンセン・H. A.  
“ウラン生産の技術経済学”

上記はウラン鉱石処理の経済学（1983年パリのNEA-IAEAセミナー議事録）1983年OECD  
がパリで発行したもののP23-58に含まれている。

- (9) テイラー・D.M., カメロン・J.

“小規模鉱脈：大きな未来？”

鉱脈のタイプおよび溝牙類動物よりも若い世代の岩石の中の類似ウラン埋蔵鉱脈（1979リスボン技術委員会議事録）、1982年ウィーンにてIAEA発行のP11-21に含まれている。

- (10) 放射性鉱物の分類

ヌエコブル（232）、1987年発行のP26-32に含まれている。

- (11) ホサ・J.M., モラル・A.

“電卓によるコスト感覚養成講座”

上記はウラン処理の経済学（1983年パリでのNEA-IAEAセミナー議事録）、1983年パリにてOECDが発行のP78-93に含まれている。

- (12) ルーマー・W.T.

“金属処理コスト積算用ハンドブック”

MINTEK別冊No.9 MINTEKランドバーク（1987）

- (13) ガソス・P., メリノ・J.L

ウラン鉱の浸出における鉄質溶解液の使用(1)（1983）のP127-138に含まれている。

## R E F E R E N C I A S

- ( 1 ) GONZALEZ, S., JOSA, J.M., SERRANO, J.R., Quince años de experiencia en lixiviación estática de minerales. Comunicación al VIII Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. 16/22 octubre, 1988. Oviedo (España).
- ( 2 ) SERRANO, J.R., ARTIEDA, J.I., Aprovisionamiento de concentrados de uranio para las centrales nucleares en España, Proyecto Quercus. Comunicación al mismo Congreso que (1).
- ( 3 ) ARTIEDA, J.I., ENTRENA, A., Optimización de una planta para producción de concentrados de uranio. Comunicación al mismo Congreso que (1).
- ( 4 ) MARTIN, M., COMA, F., RANZ, I., Contribución al análisis geológico, mineralógico y metalogénico del yacimiento de uranio "Mina Fe", Saelices el Chico (Salamanca). Bol. Geológico Minero 99 (1) (1988) 102-119.
- ( 5 ) ARRIBAS, A., Sobre el origen de los yacimientos filonianos de uranio en rocas metasedimentarias : el caso de Mina Fe, Salamanca (España). En : Vein Type Uranium Deposits. IAEA Viena (1986) 193-214.
- ( 6 ) SERRANO, J.R., MEMBRILLERA, J.R., CRIADO, M., GOMEZ-JAEN, J.P., ARTIEDA, J.I., GRANDE, L., La minería en las pizarras uraníferas de Saelices el Chico. En : Uranium Evaluation and Mining Techniques (Proc. Symp. Buenos Aires, 1979) IAEA. Viena (1980) 253-274.
- ( 7 ) III, Economic Assesment, En : Uranium Extraction Technology (NEA-IAEA), OECD, París, (1983), 129-141.
- ( 8 ) SIMONSEN, H.A., The engineering economics of uranium processing. En : Economics of Uranium Ore Processing Operations (Proc. of a Workshop NEA-IAEA, París, 1.983), OECD, París (1983) 23-58.
- ( 9 ) TAYLOR, D.M., CAMERON, J., Small veins : A big future? En : Vein-Type and Similar Uranium Deposits in Rocks Younger Than Proterozoic (Proc. TCM, Lisboa 1979) IAEA, Viena (1982) 11-21.
- (10) Radiometric ore sorting. ~~Nuovo~~ Bull (232) (1987) 26-32.
- (11) JOSA, J.M., MORAL, A., Cost and sensitivity excercises with a pocket calculator. En : Economics



of Uranium Ore Processing Operations (Proc. of a Workshop WEA-IAEA, Paris 1983) OECD, Paris (1983) 78-93.

- (12) RUHMER, W.T., Handbook on the estimation of metallurgical process costs. Mintek Special publication No.9. Mintek, Randburg (1987).
- (13) GASOS, P., MERINO, J.L., The use of ferric solutions in the leaching of uranium ores. Uranium (1) (1983) 127-138.

◀◀◀◀ TABLE I ▶▶▶▶

DISTRIBUTION OF CAPITAL AND OPERATING COSTS IN URANIUM ORE PROCESSING

| OPERATION                          | Capital Costs |             | Operating Cost |             |
|------------------------------------|---------------|-------------|----------------|-------------|
|                                    | Minimum (%)   | Maximum (%) | Minimum (%)    | Maximum (%) |
| Comminution                        | 20            | 40          | 15             | 25          |
| Leaching                           | 5             | 25          | 10             | 25          |
| Liquid/Solid separation            | 15            | 35          | 10             | 20          |
| Concentration & purification       | 8             | 20          | 7              | 25          |
| Precipitation, calcining & packing | 4             | 10          | 8              | 15          |
| Tailing disposal                   | 3             | 10          | 3              | 40          |
| Laboratory and Services            | 4             | 10          | 6              | 10          |

TABLE II. WET-SCREENING RESULTS OF FE'S MINERAL SAMPLES

| PARAMETER                                                | SCREEN'S OPENING, mm |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
|----------------------------------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                                                          | 100                  | 63    | 40    | 25    | 16    | 10    | 6,35  | 3,36  | 1,65  | 0,833 | <0,833 |
| LOW GRADE CLASS (<300 ppm) $\bar{x}$ = 206 ppm U308      |                      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| WASTES, % W                                              | 8,9                  | 20,0  | 33,5  | 47,1  | 59,9  | 69,9  | 75,5  | 82,7  | 88,0  | 90,8  | 9,2    |
| U. LOSSES, %                                             | 3,0                  | 6,5   | 12,2  | 18,9  | 24,9  | 29,9  | 33,6  | 40,0  | 46,2  | 51,1  | 48,9   |
| V.C. of U.L. %                                           | 81,0                 | 69,0  | 60,0  | 49,0  | 44,0  | 40,0  | 36,0  | 32,0  | 28,0  | 25,0  | -      |
| ACCM W. GRADE ppm                                        | 70,0                 | 67,0  | 75,0  | 82,0  | 86,0  | 88,0  | 92,0  | 99,0  | 108,0 | 116,0 | 206,0  |
| ACCM F. GRADE ppm                                        | 206,0                | 219,0 | 240,0 | 272,0 | 316,0 | 385,0 | 478,0 | 557,0 | 713,0 | 922,0 | 1099   |
| MARGINAL CLASS (300-599 ppm) $\bar{x}$ = 482 ppm U308    |                      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| WASTES, % W                                              | 8,4                  | 19,0  | 32,6  | 47,0  | 59,8  | 69,9  | 75,6  | 83,1  | 88,6  | 91,2  | 8,8    |
| U. LOSSES, %                                             | 1,7                  | 4,7   | 8,4   | 12,4  | 17,5  | 21,9  | 24,9  | 30,7  | 37,5  | 43,7  | 56,3   |
| V.C. of U.L. %                                           | 101,0                | 85,0  | 68,0  | 61,0  | 53,0  | 48,0  | 44,0  | 39,0  | 34,0  | 29,0  | -      |
| ACCM W. GRADE ppm                                        | 100,0                | 119,0 | 125,0 | 127,0 | 141,0 | 151,0 | 158,0 | 178,0 | 204,0 | 231,0 | 482,0  |
| ACCM F. GRADE ppm                                        | 482,0                | 517,0 | 567,0 | 654,0 | 796,0 | 990,0 | 1251  | 1486  | 1975  | 2642  | 3073   |
| NORMAL ORE CLASS (600-1190 ppm) $\bar{x}$ = 870 ppm U308 |                      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| WASTES, % W                                              | 8,5                  | 18,4  | 31,1  | 45,1  | 57,4  | 67,1  | 74,3  | 81,6  | 87,4  | 90,1  | 9,9    |
| U. LOSSES, % W                                           | 1,3                  | 2,6   | 4,3   | 8,2   | 12,9  | 18,3  | 21,9  | 28,6  | 37,1  | 43,7  | 56,3   |
| V.C. of U.L. %                                           | 115,0                | 74,0  | 51,0  | 63,0  | 62,0  | 53,0  | 49,0  | 45,0  | 38,0  | 32,0  | -      |
| ACCM W. GRADE ppm                                        | 130,0                | 124,0 | 121,0 | 159,0 | 195,0 | 238,0 | 257,0 | 304,0 | 369,0 | 422,0 | 870,0  |
| ACCM F. GRADE ppm                                        | 870,0                | 939,0 | 1038  | 1208  | 1454  | 1780  | 2157  | 2641  | 3373  | 4335  | 4946   |
| RICH CLASS ( $\geq$ 1200 ppm) $\bar{x}$ = 2102 ppm U308  |                      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| WASTES, % W                                              | 9,2                  | 19,0  | 32,6  | 47,1  | 59,4  | 69,5  | 75,2  | 82,8  | 88,3  | 90,8  | 9,2    |
| U. LOSSES, % W                                           | 0,6                  | 1,6   | 4,6   | 7,6   | 10,5  | 14,4  | 17,9  | 25,0  | 34,3  | 41,0  | 59,0   |
| V.C. of U.L. %                                           | 85,0                 | 112,0 | 136,0 | 95,0  | 73,0  | 54,0  | 59,0  | 46,0  | 38,0  | 33,0  | -      |
| ACCM W. GRADE ppm                                        | 128,0                | 172,0 | 297,0 | 341,0 | 372,0 | 435,0 | 500,0 | 636,0 | 818,0 | 940,0 | 2102   |
| ACCM F. GRADE ppm                                        | 2102                 | 2302  | 2554  | 2976  | 3671  | 4636  | 5894  | 6954  | 9168  | 11783 | 13562  |

V.C. = Variation coefficient of the uranium loss for a single sample  
 ACCM = Accumulative W = Waste F = Fines

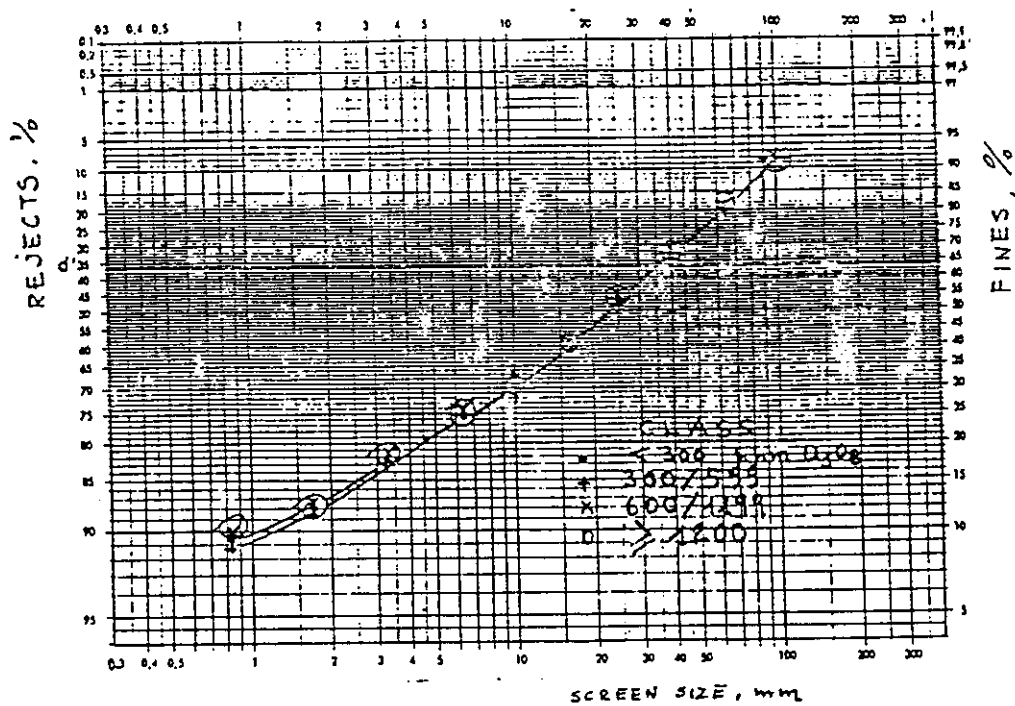


FIGURE 1. SIZE DISTRIBUTIONS (RRPS)

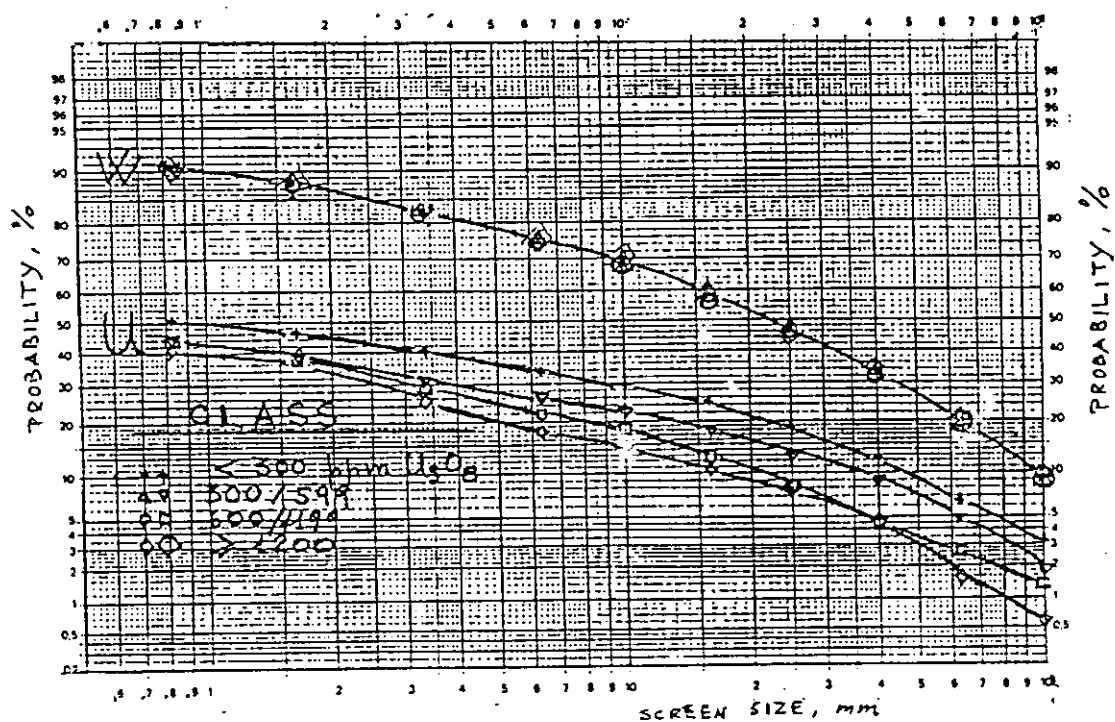


FIGURE 2. SIZE AND URANIUM DISTRIBUTIONS

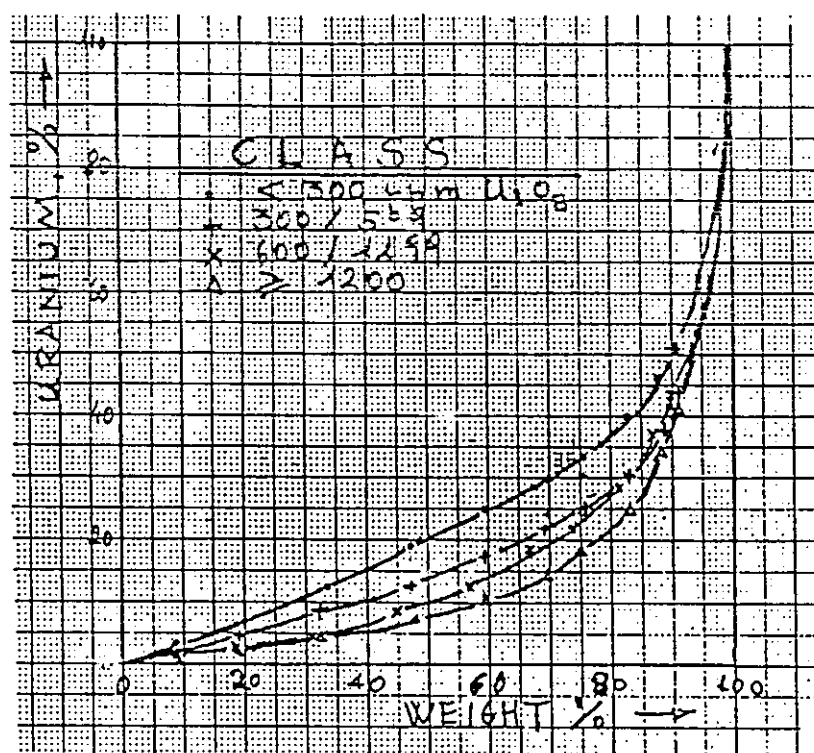


FIGURE 3. SELECTIVITY CURVES

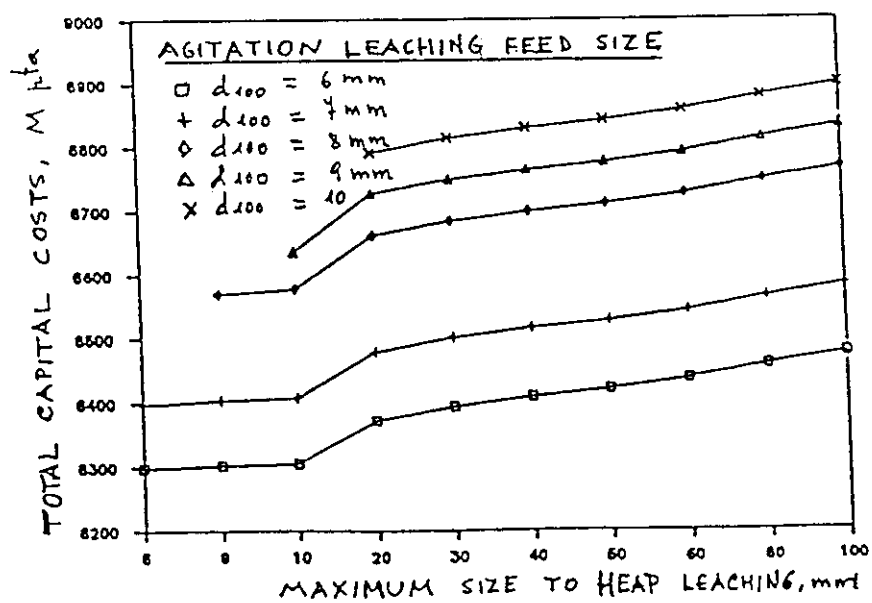


FIGURE 5. TOTAL (MINE & MILL) INVESTMENT

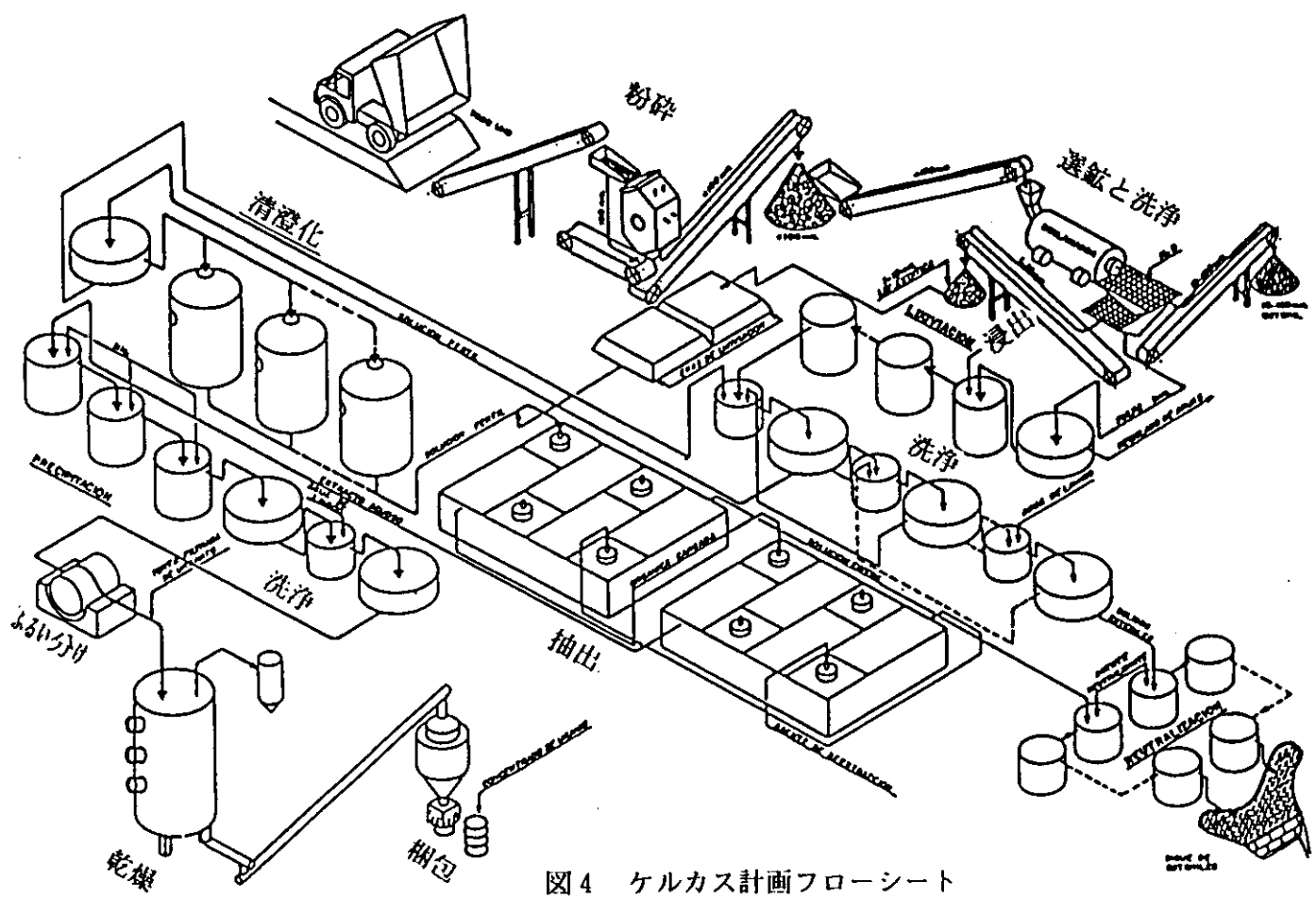


図4 ケルカス計画フローシート  
(FLOW DIAGRAM)

国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部ウィーン 1988年10月11日～14日

---

T1-TC-665 4

ラグナ・ヴェルデ 2 号炉の初装荷用燃料を  
ラグナ・ヴェルデ 1 号炉の再装荷用燃料  
として使う場合の経済性

C. ビラヌエバ・モレノ

R. オルテガ・カルモナ

L. サンチェス・ヘレラ

電 力 庁

メ キ シ コ



## 1. 序 文

ラグナ・ヴェルデ原子力発電所 (CLV) の 2 つの原子炉の初装荷燃料は電力庁 (CFE) によって、1 号炉には 3900 万ドル、2 号炉には 4900 万ドルを費して入手された。両方の炉に対し 888 体の燃料集合体と 3 体の予備が 1979 年 5 月から 1980 年 5 月にかけて現地に到着した。

1988 年 9 月にラグナ・ヴェルデ 1 号炉 (CLV1) は燃料装荷の準備が整ったが、ラグナ・ヴェルデ 2 号炉 (CLV2) の方は 1992 年以前には期待できなかった。

このように大きく遅れたために、CLV2 の燃料を CLV1 の取り替え燃料として使おうという強い意見が現れた。なぜなら、2 号炉の最初の燃料を装荷する頃には CFE はもっと進んだ設計の燃料を使うことができ、より少ない濃縮ウラン燃料で熱的限界に対する余裕を著しく減らすことなく高い燃焼度が得られるからである。

したがって、CFE は CLV2 の燃料の CLV1 での利用を解析するための炉心内外での燃料管理の研究を行った。そして、安全、運転および経済の観点からそれが可能であるとの結論を得た。

この論文では、この研究の結果の一部を提案計画の経済面の概要を主として詳述する。

## 2. 原子炉の所要燃料

### 2.1 初期炉心

それぞれの CLV 原子炉はゼネラル・エレクトリック社 (GE) から 1972 年に締結した契約に基づき CFE に供給された正味 654 MWe の BWR/5 であって、表 1 に示される特性の初期炉心を有している。

これは、初期炉心で 413 日間フル稼働できる設計であって、しかも最初のサイクルは平均稼働率を 45% として少なくとも 30 ヶ月が期待されるものである。そしてこの 30 ヶ月のなかには起動試験の 12 ヶ月と第 1 回の燃料交換および保守点検のための 2 ヶ月が含まれている。

表1 ラグナ・ヴェルデ原子炉の初期炉心

| 燃料集合体の数 | 平均濃縮度<br>(ウラン235重量%) | 合計質量<br>(kg U) | 取出燃焼度<br>(MWd/t) |
|---------|----------------------|----------------|------------------|
| 68      | 0.711                | 12 434         | 3 616            |
| 96      | 1.750                | 17 517         | 13 948           |
| 280     | 2.191                | 51 010         | 23 111           |
| -----   |                      |                |                  |
| 444     | 1.868                | 80 961         | 18 134           |

## 2.2 再装荷

炉が商業運転に達した時に、CFEはそれぞれの炉がベースロードとして正味 4010GWhを発電することを目論んでおり、稼働率は70%、毎年9月に終わる雨期の直後に2ヵ月の停止が含まれている。

CLV は最大のシステムであるから、多量の水力で置き換えられる年の最後の3ヵ月にこれらの炉の停止が予定されている。

メキシコでは国内の電力網に供給されるエネルギーの19%は水力発電所で発電されているが、貯水池は雨期の終わりにはほとんど満水になるのが常であるが、乾期の終わりにあたる4月あるいは5月には利用できる水はほとんどない。それぞれのCLV原子炉の熱出力は1931MWtである。GE6設計の取り替え燃料集合体はウランを約186kg含んでおり、約28,000MWd/tの燃焼度に達することができる。

年間70%の稼働率で炉心の増加燃焼度は各サイクルで5974MWd/tの程度である。このエネルギーに合わせるためには2.73%の濃縮ウランの取り替え燃料集合体96体を平衡サイクル取り替え燃料として毎年装荷しなければならない。

## 2.3 多重サイクル計画

各サイクルの必要エネルギーに合致させ、また数サイクル内に平衡取り替えに達するようにするための多重サイクルの一覧表を表2に示す。

表 2 ラグナ・ヴェルデ原子炉の多重サイクル取り替えのスケジュール

| 取替回数 | 集合体数 | 平均濃縮度<br>(ウラン235重量%) | 合計質量<br>(kg U) |
|------|------|----------------------|----------------|
| 1    | 124  | 2.841                | 23,093         |
| 2    | 100  | 2.731                | 18,624         |
| 3    | 88   | 2.717                | 16,380         |
| 4    | 88   | 2.717                | 16,380         |
| 5    | 108  | 2.739                | 20,102         |
| 6    | 88   | 2.717                | 16,380         |
| 7    | 96   | 2.727                | 17,869         |
| 8    | 96   | 2.727                | 17,869         |
| 9    | 96   | 2.727                | 17,869         |
| 10   | 96   | 2.727                | 17,869         |

### 3. 供給契約

#### 3.1 ウラン

メキシコのU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>の確認資源量は大体14,600トンであるが、OECD/NEAの区分に従えば reasonably assured typeはその中の10,600トンのみである。

これ等の資源量は CLVの寿命、すなわち30年間の天然ウランの需要を30%越す程充分な量である。しかしながら、CLVは少なくとも最初の取り替え用としてスポット市場から購入しようとしている。

#### 3.2 六フッ化ウランへの転換

1974年4月に CFEはフランスのコミュレックス社と CLV用の最初の8回の取り替え分の転換役務を受ける契約に調印した。

しかしながら、CLV 1の始動が遅れたので、CFEとコムレックス社は受け渡し予定の変更について話し合い、CLV 1は既に燃料を装荷しており、その燃料交換をどのようにするかについて結論に達した。

### 3.3 濃 縮

CLV の燃料交換分に対する濃縮役務は1984年 9 月に調印された電力会社役務契約のもとに米国エネルギー省によって行われるであろう。この調印は1974年にメキシコ政府と米国政府および国際原子力機関の間で調印された三者協定に従ってためされたものである。CFE は電力会社役務契約の条項のもとに廃棄減損ウランを計画的に回収するであろう。

### 3.4 成型加工

GEは1972年 8 月に調印した CFEとの契約に基づき、CLVの初装荷燃料を供給した。この契約にはまたそれぞれの炉のGE 6 設計の取り替え用燃料集合体 592体の成型加工が含まれているが、それは普通に製造されたものである。

さらにその契約は国立原子力調査研究所 (ININ) で作られる 8 体の試作燃料集合体を CLV 炉で照射試験を行う機会を与えるものである。もしその試作燃料がGEの設計と仕様に基づいて作られるなら、GEはこれ等の燃料をも保証することになっている。このためにININとGEは技術供与協定の話し合いを行っている。

### 3.5 燃料コスト

表 3 GE 6 設計の燃料集合体によるラグナ・ヴェルデ原子炉の平衡取り替えのコスト

| <u>段 階</u>             | <u>供 給 元</u> | <u>数 量</u>                            | <u>割引コスト</u><br>(100万ドル) | <u>先行期間</u><br>(年) |
|------------------------|--------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------|
| 天 然 ウ ラ ン              | ————         | 127.095tU <sub>3</sub> O <sub>8</sub> | 4.811                    | -1.417             |
| UF <sub>6</sub> への 転 換 | コミュニックス      | 107.244tU (UF <sub>6</sub> )          | 0.839                    | -1.167             |
| 濃 縮                    | 米エネルギー省      | 53.377tSW                             | 6.815                    | -0.917             |
| 廃 棄 U の 受 渡            | 米エネルギー省      | 89.107tU (UF <sub>6</sub> )           | 0.136                    | -0.917             |
| 成 型 加 工                | G. E.        | 17.869tU (UO <sub>2</sub> )           | 2.863                    | -0.417             |
| 照射済燃料の貯蔵               | CFE          | 17.869tHM                             | 2.342                    | +10.000            |
| — — — —                |              |                                       |                          |                    |
| 合 計                    |              |                                       | 17.806                   |                    |
| 割引エネルギー :              |              |                                       | 3.559TWh                 |                    |
| 単 価 :                  |              |                                       | 5.003mills/kWh           |                    |

GE6設計の燃料による年間の平衡取り替えには、表3に示される廃棄ウラン235は0.3%として計算された原料と燃料サイクルの役務の提供が必要である。

この燃料の平衡取り替えに対する燃料サイクルのコストは年間10%の割引率として、発電量1kWh当たり1988年の米ドルで5.0ミルである。

燃料サイクルの各段階のコストは、1988年実施中の我々の契約によるものである。

天然ウランについては、1988年8月にニューケム(Nukem)によって発表された燃料サイクルのスポット市場価格である。

テイルウランの回収に関しては、CFEは14トン容量の48G型容器(シリンダー)の購入費、米国の濃縮工場からメキシコまでの輸送費および政府施設での貯蔵費を算定した。

最後に、使用済み燃料の長期貯蔵に対してCFEは1984年3月RGN発行SYNATOMで計算された重金属1kg当たり340米ドルを適用した。

見積額には燃料を再処理した後の放射性廃棄物の最終処分の費用も含まれている。この処分は将来の不特定の時に行われるものであり、もちろんその額の中には再処理コストそのものは含まれていない。

照射済燃料の長期貯蔵はCLV内の適当な場所で行われる。そこは原子炉のプールが一杯になった時から受け入れを始めることになっている。そしてそれぞれ1242体の燃料集合体を入れる容量を持っているが、何時でも全炉心を炉から取り出して収められる場所を残すために798体分は減るが、各炉の最初から8回分の取り替えで取り出された集合体を収めて貯蔵するには十分な容量である。

#### 4. CLV2の初装荷燃料の炉心外での利用

1983年にCFEは米国のコンサルタント会社と共にCLV2の初装荷用燃料の最良の利用法を決定するための可能性調査を行った。そしてその調査の結果に従ってその年の12月に、それを成型加工済燃料集合体として売却しようと試みた。しかしながら、限られた客先は皆興味を示さないことが判った。建設中のBWR/4やBWR/5の所有者の多くは、既に彼等の初装荷用燃料の購入に関し炉の供給者と正式の合意がなされていた。

燃料集合体製造用の六フッ化ウランの形の濃縮ウランなら買ってもよいという提案はCFEにとって魅力が無かった、というのは我々は既に数百万ドルにもおよぶ損害を被っているからである。

1987年に欧州の製造業者から提案された他の試み、すなわちCLV2の初装荷用燃料を現

設計のCLV 1の取り替え用燃料あるいは新しい設計のCLV 2の新初装荷燃料と交換する可能性をCFEと共に調査するという試みは両方共成功しなかった。

我々が現在契約している安い成型加工費ではとても話にはならないことは明白であった。

## 5. CLV2の初装荷炉心の炉内利用

### 5.1 研究の範囲

1986年の間に CFEとGEはCLV 2の初装荷燃料をCLV 1の取り替え用燃料として使うという5つの概念計画を開発した。

これ等の中、3つはCLV 1の初装荷燃料が最初のサイクルの終わりにCLV 2の燃料で置き換えられ第2サイクル中に照射される。そして第3、第4および第5サイクルに対しては、さらに両方の炉の照射済み燃料の利用法について、異なった選択があり、新しい燃料の挿入により補足される。

他の2つの概念計画は第1サイクルの終わりに、CLV 2の初装荷燃料の一部のみが炉に装荷され、残りの燃料は新しいウランを混ぜて以下のサイクルに利用するというものである。

CFE は代替計画の経済性を評価する研究を行った。そしてCLV 2の全初装荷燃料をCLV 1の第2サイクルに利用する計画をさらに検討することにした。

この計画では、CLV 1の初装荷炉心がその設計燃焼度に達せず1 kWh の発電当たりの燃料サイクルコストが高くなるにもかかわらずこの決定がなされた。

しかしながら、新しい燃料に対する支出時期は遅くなるであろうから、このことは予算がきつくまた外貨不足のCFEにとっては高い優先順位をもつものである。

また、この計画はGE 6設計の燃料が直ぐに使い尽くされるであろうし、CLV 2の初装荷燃料に新しい設計を採用すること、および同様に各炉の取り替え用の592体の契約済の燃料集合体に新設計を採用することに、未だ扉が開かれているという都合の良い条件に合っている。

### 5.2 新燃料設計

1990年代の始めにはGE 9設計が利用可能になろう。そして、ころは同じエネルギーを発生されるのに濃縮ウランの所要量を節約することができるから、この燃料をラグナヴェルデの再装荷用として使うことが望ましい。またもし新燃料の成型加工費が正当であるとす

れば、我々の燃料サイクルコストを下げられる可能性がある。

GE9 設計の目的燃焼度は約38,000MWd/tである。それでウラン 235濃縮度約3.28%の燃料集合体72体の平衡取替サイクルは年間稼働率70%で5,974MWd/tの増加燃焼度を必要とする。

平衡取替燃料の数が96体から72体と少なくなるので、CLVの使用済み燃料プールに余裕ができ、炉からの11回の取替分の燃料のほとんど全部を収容することができる。従って、追加しなければならないプール建設資金支出を少なくとも2年はおくらせることができる。

もしCLV 2の初装荷用燃料全体がCLV 1の第2サイクルで照射されると上記の利点は無くなる。何となれば、最悪の場合、燃料プールの容量が798体ではなく354体に減ってしまうからである。他方、取替率が0.2162から0.1622に減ると、異なった燃焼度のバッチ数が増加するので、過渡サイクルの間の熱余裕を減らさずに目標燃焼度を達成させるための取替の方式を見出すことはますます難しくなる。

したがって、CFEが更に検討すべき点は、毎年保守点検のために炉を停止するが、燃料交換は1年おきにする方法である。

この方法では、24ヵ月照射のサイクルで平均稼働率70%の時、炉心の増加燃焼度を11,948MWd/tに合致させるためには、GE9 取替燃料の数量は濃縮度 3.5%のウラン235で144 集合体、すなわち2倍になる。

### 5.3 公正な成型加工費

表4は、GE9 設計の標準平衡取替燃料の概略のコストを示す。

ここで、総べての単価は成型加工段階を除き表3と同じである。

表 4 GE 9 設計の燃料要素によるラグナ・ヴェルデ原子炉の  
標準平衡取替燃料の概略コスト

| 段 階                     | 供 給 元   | 概略数量                                  | 割引コスト<br>(100万ドル) | 先行期間<br>(年) |
|-------------------------|---------|---------------------------------------|-------------------|-------------|
| 天 然 ウ ラ ン               | —————   | 116.805tU <sub>3</sub> O <sub>8</sub> | 4.421             | -1.417      |
| UF <sub>6</sub> へ の 転 換 | コムレックス  | 98.562tU(UF <sub>6</sub> )            | 0.771             | -1.167      |
| 濃 縮                     | 米エネルギー省 | 53.474tSW                             | 6.828             | -0.917      |
| 廃 棄 U の 受 渡             | 米エネルギー省 | 84.969tU(UF <sub>6</sub> )            | 0.130             | -0.917      |
| 成 型 加 工                 | G.E.    | 13.392tU(UO <sub>2</sub> )            | 4.205             | -0.417      |
| 使用済燃料の貯蔵                | CFE     | 13.392tHM                             | 1.451             | +12.000     |
| — — — — —               |         |                                       |                   |             |
| 合 計                     |         |                                       | 17.806            |             |
| 割引エネルギー：                |         |                                       | 3.559TWh          |             |
| 単 価：                    |         |                                       | 5.003mills/kWh    |             |

この場合、GE 6 に対するのと同じに GE 9 に対する燃料サイクルコストがなるような数値を使った。それは実際、CFE が推定した成型加工費であるが、1988 年の実契約価格より 96 % も高くなっている。

我々の計画は、両方の原子炉に 592 体の再装荷燃料を済み価格と推定価格の中間の金額で供給するよう GE と交渉することである。

このようにして所要濃縮ウランを節約して得た利益は CFE と GE との間で平等に分けるのが望ましい。

また、GE 9 設計による CLV 2 の初装荷燃料の取り替え燃料の供給に関し CFE は GE に同額を要求したい。

#### 5.4 CLV 2 の初装荷燃料に GE 6 または GE 9 設計の燃料集合体を併せて CLV 1 で利用する 燃料交換計画。

表 5 はこれまで GE と CFE とで更に詳細に検討した結果である CLV 1 に対する燃料交換の予備的予定表を示す。



表 5 ラグナ・ヴェルデ 2 号炉の初装荷用燃料と GE 6 設計の燃料集合体を併せ

1 号炉の取替用燃料に利用する燃料交換の予備的計画。

| 燃料交換番号 | 新 GE 6 燃料<br>集合体の数 | 平均濃縮度<br>(ウラン235wt%) | 合計質量<br>(kgU) |
|--------|--------------------|----------------------|---------------|
| 1      | NONE               | —                    | —             |
| 2      | NONE               | —                    | —             |
| 3      | 148                | 2.65                 | 26,956        |
| 4      | 108                | 2.65                 | 19,670        |
| 5      | 104                | 1.72                 | 18,942        |
| 6      | 96                 | 2.73                 | 17,869        |
| 7      | 96                 | 2.73                 | 17,869        |
| 8      | 96                 | 2.73                 | 17,869        |
| 9      | 96                 | 2.73                 | 17,869        |

この場合、CLV 2 の初装荷用燃料のウラン235 の濃縮度 2.191%の燃料集合体 280体と 1.750 %のものの96体がCLV 1 に最初の取替用燃料として装荷されるが、CLV 1 の中には初装荷燃料の天然ウラン集合体68体のみが残されている。

第 2 回の取替では、すでに初装荷燃料としてCLV 1 で照射されたウラン 235濃縮度 2.191 %の集合体188体と 1.750%のものの34体が炉の中に再装荷されるが、そこにはCLV 2 の初装荷燃料から取り出された同じ型の集合体が同数残っている。このようにして第 3 回の照射サイクルは新しいGE 6 型取替用燃料集合体無しで行われる。

最後に、第 3 回取替は残された両方の炉の初装荷燃料の濃縮レベルであるウラン 235 2.191%の燃料集合体184体で仕上げられる。この時の 184体は前のサイクルから残された同じ初期濃縮度の 112体の燃料と共に再装荷されたことの無い燃料である。これまでのところ、たった 1 サイクルの照射しか受けなかったこれら 296体は、我々の契約の範囲として供給される GE6設計による最初の取替用集合体となる濃縮度2.65%の新しい燃料148 体で補われて第 3 回目の取替が行われるであろう。

取替燃料は数サイクルで平衡に達するであろう。

もし第3回目の取替に際して、CFEがGEと我々の間の契約範囲内で供給されるべき新しい燃料集合体にGE9設計を適用させようとするならば、取替の計画は表6に示されるようになる。

表6 ラグナ・ヴェルデ2号炉の初装荷用燃料にGE9設計の燃料集合体を併せて1号炉の取替燃料とする燃料交換概略計画

| 取替番号 | 新GE9燃料<br>集合体の数 | 平均燃料<br>(ウラン235wt%) | 合計質量<br>(kgU) |
|------|-----------------|---------------------|---------------|
| 1    | NONE            | —                   | —             |
| 2    | NONE            | —                   | —             |
| 3    | 124             | 3.00                | 23,064        |
| 4    | 112             | 3.10                | 20,832        |
| 5    | 100             | 3.20                | 18,600        |
| 6    | 88              | 3.30                | 16,368        |
| 7    | 80              | 3.30                | 14,880        |
| 8    | 72              | 3.28                | 13,392        |
| 9    | 72              | 3.28                | 13,392        |

#### 5.6 GE9設計の燃料集合体を使用した場合のCLV 2号炉の初装荷燃料と取替計画

CLV 2の初装荷燃料をCLV 1の取替用として使うということは、2号炉の初装荷が近づいた時にはその燃料を手当せねばならないことを意味している。

その場合、CFEは新しい燃料設計を使うであろうし、またこの研究のために我々はそれはGE9であろうと推測する。表7はもしその設計が使われた場合のCLV 2の初装荷燃料と取替の予備的計画を示している。

CLV 1で未だ照射されたことのないGE6設計の天然ウラン燃料集合体68体はCLV 2の新しい初装荷炉心に使われるであろう。

表 7 GE 9 設計の燃料集合体を使ったラグナ・ヴェルデ 2 号炉の  
初装荷と取替の予備的計画

| 取替番号 | 集合体数 | 平均濃縮度<br>(ウラン235wt%) | 合計質量<br>(kgU) |
|------|------|----------------------|---------------|
| 初期炉心 | 280  | 2.19                 | 52,080        |
| 初期炉心 | 96   | 1.76                 | 17,856        |
| 1    | 96   | 3.41                 | 17,856        |
| 2    | 76   | 3.28                 | 14,136        |
| 3    | 68   | 3.26                 | 12,648        |
| 4    | 68   | 3.26                 | 12,648        |
| 5    | 84   | 3.29                 | 15,624        |
| 6    | 72   | 3.28                 | 13,392        |

#### 5.7 許認可の論点

GEと CFEによって行われたCLV 2の初装荷炉心をCLV 1の取替用に利用する可能性に関する解析の結果は、表 5 の計画に従って、もし取替が同じ設計、すなわちGE 6 の燃料集合体、すなわち目標燃焼度が 28,000MWd/tであり、反応度と熱裕度は合致する。しかしながら、取替が毎年のサイクルでGE 9 設計の燃料、すなわち目標燃焼度が約 38,000MWd/tのもので行われると、過渡サイクルで熱余裕が下がる。したがって、原子力委員会(CNSNS)の許可が得られるような(燃料交換)計画が立案できるよう、他の異なる計画について一層詳細な解析を行う必要がある。

これらの選択の中の 1 つは取替の分率(あるいは割合)を増やして、2 年毎に燃料の取替るものであろう。

## 6. 経済解析

### 6.1 参考事例(A0)

表2に示す CLVの燃料交換計画は我々の経済解析(A0)の参考事例である。この目的のための仮定は下記の通りである：

CLV 1の燃料装荷は1989年1月1日に始まる。最初の燃料交換は30ヵ月後に始まり、その後の燃料交換は毎年行われる。

CLV2の初装荷は1993年1月1日に始まり、CLV1と同一の交換計画による燃料交換が行われる。

解析に使用された単価を表8に示す： GE6設計の成型加工費は1988年の我々の契約時のものを使用する。GE6設計の成型加工費は該契約の単価（GE6単価）とCFEの推算値の平均を適用する。

燃料サイクル費のコストはFUEL CASH-IIコードのパソコン版で計算された。FORTRAN IV版はTechnical Report Series NO.175“Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants. A. Guidebook”の付録Cに記載されている。

経済解析における燃料サイクルの単価は kWh当たり1988年の米国通貨で10.1ミルで、これはCLV 1が8.5ミル、CLV 2で13.4ミルに区分できる。

これらは、平衡サイクルでの単価kWh 当たり、5.0 ミルに比べると高い。その理由は、1979年と1980年以来現地に保管された初装荷用燃料の現在価値は元の価値より少なくとも2.4倍高いからである。

表 8 ラグナ・ヴェルデ原子炉の燃料サイクルの単価

| 段 階                     | 単 価 (1988年米ドル)                          | 先行期間 (年) |
|-------------------------|-----------------------------------------|----------|
| 天 然 ウ ラ ン               | 33.07 / kgU <sub>3</sub> O <sub>8</sub> | -1.417   |
| UU <sub>6</sub> へ の 転 換 | 7 / kgU(UF <sub>6</sub> )               | -1.167   |
| 濃 縮                     | 117 / kg SW                             | -0.917   |
| 廃棄ウランの受渡                | 1.4 / kgU(UF <sub>6</sub> )             | -0.917   |
| 成 型 加 工                 |                                         |          |
| GE 6 :                  | 154 / kgU(UO <sub>2</sub> )             | -0.417   |
| GE 9 :                  | 228 / kgU(UO <sub>2</sub> )             | -0.417   |
| 照射済燃料貯蔵                 |                                         |          |
| GE 6 :                  | 340 / kgHM                              | +10.000  |
| GE 9 :                  |                                         | +12.000  |

## 6.2 代替事例 1 (A1)

我々の解析の代替案 1 (A1) で、CLV11 の燃料の装荷は(A0)と同じ日に始まる。しかし、燃料交換は表 5 の計画にしたがって行われる。CLV 2 の初装荷の日もまた(A0)と同じ日であるが、初装荷と燃料交換は表 7 に示される通りに行われる。

CLV 1 の単価はKWh当たり117ミルに上昇した。その理由はCLV 2 の初装荷燃料の現在の価格はCLV 1 のコストに付けられ、そして燃料集合体が設計値の燃焼度に達しないからである。

一方、このケースではCLV 2 の単価はkWh 当たり 7.1ミルで、平衡サイクルに対しては 4.7 ミルである。CLV 2 の単価をA0と比べると、明らかに、新しい初装荷燃料を待ちGE 9 設計の燃料を交換用とする二番目の炉はそのGE 6 設計の燃料を使用するまでさらに 4 年間保存して置くことに比べれば、安く運転できると見られる。しかしながら、CLV 1 の単価が高いために CLVの平均は10.2ミルに上昇するが僅かにA0の場合より 1 %高いだけである。

### 6.3 代替事例2 (A2)

代替事例2 (A2) においては、CLV 1の燃料交換は表6に示される通りに行われる。しかしながら、CLV 2に対する交換計画はA1と同じである。

CLV 2の単価は A1の場合と変わらない、そしてCLV 1に対して僅かに1%増えるので、CLV 全体で1 KWh当たり平均10.3ミルになる。

## 7. 結 論

技術解析の結果から、CFEはCLV 2の初装荷用燃料はCLV 1の取替燃料として使うことができる結論した。

経済解析の結果から、CFEはGE9設計をCLV 2の初装荷燃料に適用することができ、同様にもしGE9設計の成型加工費が適正であれば、燃料サイクル単価が高くなるという著しい不利も無しに両方の炉の取替用に適用することができる。

しかしながら、技術解析はGE9設計を適用した場合、24ヵ月サイクルの利用を研究することは価値があることを示している。何となれば、CLV 1の過渡サイクルにおいて、熱限界に対して熱的余裕が改善されると思われるからである。

また、平衡取替用の144体の燃料集合体の濃縮度の水準が高くなることによって経済的不利益が増すかどうかを調べるための経済解析が行われるべきである。この場合、72体の燃料集合体による平衡取替に比べて我々の推定価格が低くなることが示されるかも知れない。



国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部 ウィーン 1988年10月11～14日

---

T1-TC-665

天然および再処理回収ウランの転換の  
技術的・経済的比較

C. D. フォールシー (Forsey)

T. ウィリアムズ (Williams)

英 国 核 燃 料 公 社

スプリングフィールド工場



## ○序 論

再処理回収ウランの六弗化ウラン (UF<sub>6</sub>) への転換は、天然ウランと比べて化学的組成および同位体組成が異なっているために専門家が要求される。得られる再処理回収ウランはまた比較的小量であり、このことは、10,000トン／年規模での生産量に適合した処理法はずっと少ない生産量の場合には経済的でないという点において、プラント操業の方法に大きく影響している。

再処理回収ウランと天然ウランとの差異は他の場所でも広く報告されている。六弗化ウランの転換においても重要な相異点は：

- － 燃料サイクルから生じる再処理回収ウランが少量であることからくる低い生産量の場合、単位原価は上昇する。
- － 余分のウラン同位元素、超ウラン同位元素や核分裂物質から生じるより大きな単位の放射性核種成分。
- － 未処理の廃水や廃棄物の流れにおける、より多い放射能は、その結果として 追加処理と高価な処分の進め方が必要になる。
- － 工場の少ないインベントリと小さいキャンペーン (campaign)。これによって、再処理回収ウランの同位体組成の変化の結果として残存生成物の価値を最大限にし、これによって、1%以上のU235濃縮度のウランも処理ができる。
- － シリンダーの保守

英国核燃料公社は再処理事業及び15,000トン以上の再処理済みのマグノックス炉のウランをリサイクルした経験を用いて、再処理回収ウランの六弗化ウラン転換工場を1990年代の要求に適應できるように設計した。広く在来型とされる転換工場が、マグノックス炉からの物質の取扱いにも使用されるのに対して、ひと桁大きい燃焼度のウランを処理するのはさらに専門化した仕事である。

## ○工場の規模

再処理回収ウランの転換工場は必然的により小型のものになり、したがって天然ウランを扱う工場よりも操業費が高くなる。全世界の再処理工場の生産量は、予見できる程度の近い将来においては、5000トン／年よりはかなり少ないであろう。転換工場の処理量が

500 ～1000トン／年程度と小さくても競争力があるかどうか電力会社にとって興味のある点である。これは天然ウランの転換における通常の工場規模よりは小さい規模である。

転換工場に関して、再処理回収ウラン発生量が少ないという点に関して、操業規模におけるこの本質的な変化は、BNFLに在来型工場のフローシートの見直しを促進することになった。従来は、高価なフッ素ガスを使うよりは弗化水素酸による弗化の量を最大にする方法で、操業コストを最小にしてきた。

精製された天然ウラン酸化物を六弗化ウランに転換するスプリングフィールド工場での方法は、以下の化学工程である：

- － 酸化物の水和
- － ロータリーキルン内で酸化物を還元させる。
- － 二酸化ウラン ( $UO_2$ )を別のロータリーキルンでHF弗化して四弗化ラン ( $UF_4$ )をつくる。
- － 流動床においてフッ素ガスによって六弗化ウランへの酸化を行う。

このようなシステムには、大きな資本投下といくつかの操業チームを組合せることが要求される。最小の経済規模は約5000トン／年である。

1960年代の開発の期間に、六弗化ウランを生産する方法を確立するために、BNFLの前身である英国原子力庁 (United Kingdom Atomic Energy Authority)は、単一の段階 (Stage) で流動床を用いて酸化ウランとフッ素ガスを反応させて  $UF_6$  にする方法を研究した。その工程の技術的な可能性は確立されたが、経済性については多段階工程 (Multi-stage process) と比較して不利であった。それは本質的にはより多くのフッ素を生成するに要するコストによるものであった。

第1図は、ウラン酸化物の段階からの六弗化転換について、再処理回収ウランに関係のある生産規模の範囲にわたって、在来的な間接ルートと直接ルートによるものとの比較した単価を示している。生産規模が約1500トン／年よりも少ない時は直接ルートは間接ルートに比べて明らかに有利であることが見られる。少ない生産規模の場合にはフッ素の生成コストは、総コストの中では資本償却や他の操業経費に比べて相対的に重要でなくなってくる。フッ素生成というのは単位操業であって、単価は生産量とはほとんど無関係になっているが、逆に他のコストの項目は生産量が低下すると上昇する傾向がある。

第2図はこの効果をもっと詳細に示している。酸化ウランから  $UF_6$  への工程の原価内訳

の比較を、直接転換による 600トン／年規模の場合と普通の方法による6000トン／年の場合について行った。

上に述べた全体像は常に間違いないものであったが、とくに少量の生産物に対する直接法のコストの有利性は、フッ素技術の発展によって近年増加したものである。フッ素製造電解槽の設計や操業法の改善が継続的になされたので、フッ素の原価が約25%減少した。第2図では、この改良が六弗化ウラン製造に与えた影響が特に直接法で大きいことを示している。

この経済分析の結論として、スプリングフィールドにおける再処理回収ウラン酸化物の転換工場の参考設計として、直接転換法の採用を促進することとなった。工場の概念を進展させる作業の一部として、スプリングフィールドの生産工場で直接転換法のフルスケールの試運転を実施したことは、思慮深いことと考えられた。この試運転はおよそ3年前に実施されたもので、その中には通常の脱硝工程から生成された  $UO_2$  約 100トン を六弗化施設の主生産ラインに供給することも含んでいた。熱伝達の限界のために、勿論生産の速度は低下したが、試運転は成功裡に完結され、新工場建設の設計にとって貴重な実証データが得られた。

上述及び他の作業の結果として、BNFLは現在、直接転換法に基づいた再処理回収ウラン六弗化工場用のプラント設計をもっている。この工場はエコーECHO (Expansion of Capacity for Hex from Oxide reprocessing) と命名され、1990年代中頃には生産に入り、1000トン／年までの設計容量をもつことになるだろう。もしも市場の需要が少なくこの生産量を維持することができないならば、フッ素生成能力を必要に応じて段階的に設置することで、著しい経費節約を行うことができる。この方法によってBNFLは、もし約 300トン／年の注文がとれるならば、この工場を運営することができるであろう。1000トン／年を超える転換能力が要する時は、酸化ウランを  $UF_4$  にする工程を別に設置することで対応できる。同じ熱力学的限界で設計することによって、生産能力を3000トン／年まで上げることができるであろう。例えば、英国の第一世代の原子力計画から生じたマグノックス燃料の再処理回収ウランの多量の貯蔵物に加えて、BNFLのソーブ THORP (酸化物燃料の再処理工場) から出る転換の必要な全ての生成物を処理できるであろう。

## ○その他の放射性核種の影響

一般に報告されているように、再処理回収ウランからのガンマ線量率は天然ウランのそれよりはずっと大きいと言える。線量率は、関連する放射性核種の崩壊とビルドアップのために経時変化する。六弗化転換において、ガンマ線放出核種のほとんどが転換工程に残るので、新たに製造された回収六弗化ウランの線量率は大きく減少される。

ガンマ線を放出する放射性核種はほとんど工場に残留し、操業や保修期間中に線量率が増加するもとになっている。第一表は、現在スプリングフィールドのBNFLのECHOプラントにおける主要項目について、遮蔽がない場合の線量率の増加を示している。これらの線量率増加は三重の影響がある。

- (1) 工場における多数の主要部分、例えば供給槽や反応炉の周囲にはしっかりした遮蔽が必要である。供給される原料の組成によって、必要とされる遮蔽は0.3mの厚さの鋼材またはそれに相当するものである。これが、プラントシステムの設計と建設に主たる影響を与えている。
- (2) 作業時間の制限、すなわち補修作業期間中における作業員の被曝の最大許容時間を制限するためには、作業員の線量が十分に管理できるような新規の方法やシステムを採用することが必要である。反応炉の中の流動床の交換のような、たまにしか行わないが要求度の高い作業は、遮蔽の背後から完全な遠隔操作でしなければならない。そのような制約はまた、予定外の保修作業の発生を最小限にするように、工場のシステムにより大きい余裕度が必要とされる。
- (3) 作業員が放射線源から離れているためには遠隔操作技術がいっそう必要になる。ECHO施設では例えば、ドラム缶の蓋をあけ、からにして片付けることの完全にオートマチックなシステムを備えている。小さな工場では普通そのような自動化はとてもできることではない！

それに加えてウランのアルファ線の放射能の強度がいっそう高いので、より高度な封じ込め基準が必要になっている。

これらの事が皆、再処理回収ウランの六弗化工場の建設費総額に大きな影響を与えている。使用された設計の前提条件によればそれらは建設費を大きく増加させるであろう。

## ○廃棄物

現行の許認可や政治的環境は、新しい工場の導入に伴う放射性同位元素排出については、わずかな増加でさえも初めから不可能にしている。すなわち排出物を低減せよという圧力は強いのである。

再処理回収ウランは天然ウランに比べて放射性核種の濃度含有率が高い。これらの核種の大部分は処理のあとに残留するので、工場からの廃棄物に大きな影響が生じる可能性は無視できない。したがって、廃棄物中の放射性同位元素の含有量を許認可当局が受諾できるレベルまで減らすことを確実にするためには、かなりの努力が必要である。

気体廃棄物は再処理回収ウランの存在にはほとんど影響されない。本来すべての工場において排出ガスを完全に洗浄することが必要である。

液体廃棄物は、元来スクラバ系から出るものであるが、10倍にも及ぶ率で増加した放射性同位元素の濃度を含有することになるであろう。これらを処理する最も有効な方法の一つは、放射性同位元素を崩壊させるために減衰タンクで60日間に及ぶ貯蔵を行うことである。さらに最小限度の処理を行えば、廃液は在来型の六弗化転換工場からのものと同等のものになる。

工場の操業による固体廃棄物はもっと特殊な取扱いが必要である。ECHO工場で採用された方法と天然ウランの転換工場のそれとを比較して、主な相違点を第2表にまとめた。最も注目すべき特徴は、廃棄物のより大きい放射能のために、残査回収量が減少することである。固体の残査はより高い放射性同位元素という重荷を負うこととなり、それに伴って中間レベル廃棄物の処分の経費が増大する。

## ○同位元素の濃度の変化

再処理回収ウランでは、処理バッチが異なると、燃料や処理履歴の違いによって、それらの間に同位体組成（濃縮度）の違いがみられる。電力会社は、燃料物質をリサイクルする時に、こうした固有の数値をできるだけ保持したいと望むことが予測される。

再処理回収 UF<sub>6</sub>の転換契約は処理されるウランの代替物がない（non-fungibility）。在来型工場（天然ウラン転換工場）の場合、製品は同一であって、フィードされたバッチの個々について物理的に同定することはできない。これに反して、再処理回収ウランの転換においては、供給原料の同位体組成の連続的变化が、生産物質においても反映されるであろう。

濃縮の費用を最小にするように転換製品UF<sub>6</sub>の残存価値を最大にするには、現在のウラン 235の濃度の大きな変化を避けるために、供給物質のきびしいバッチ管理が要求されるであろう。その結果、製品中の残存分離作業は最大になるであろう。ECHO工場においては直接供給方式の採用が工場のプロセス内在庫を最小限に抑え、その結果（混合によるSWUの損失は）8 tU容量の48インチ製品用シリンダーによる混合がほとんどを占めるであろう。この方法によって分離作業の損失は最小限に抑えられるであろう。

原料が天然の濃縮度よりもわずかに上のレベルのものを処理することが必要になると、許認可申請対象の工場全体に臨界（excursion）が起こり得ないことを保証することが要求される。このことは、工場の容器の直径やそれらの配置について影響を与え、処理能力や建設費にも影響を及ぼすことになる。

#### ○輸送用シリンダーの状況

伝統的にUF<sub>6</sub>転換業者が生産物を輸送するために必要なシリンダー（容器）を所有し、かつ保守を行って来た。この中には転換工場と濃縮工場との間の反復輸送に使われる48インチ・シリンダーが含まれている。1本のシリンダーは年間に4回の往復輸送ができ、重要なことは、定期的な保守としては唯一5年毎の圧力検査が要求されるだけである。その検査の作業には洗浄と除染、内部検査、水圧テスト及びバルブの再点検が含まれる、この費用の総額はシリンダーの価格の30%以上になることがある。

再処理回収ウランの輸送に用いられるシリンダーはもつと厳しい基準が適用される：

- シリンダーを空にした時に内壁に沈着したウラン 232の娘核種からのガンマ線量率が増大するので、もっと頻繁に、おそらく一往復毎の洗浄が必要になるであろう。
- シリンダーの洗浄経費自体は、存在する放射性同位元素が多量に付着しているのでもっと高価である。

同じ理由によって洗浄の残査の取扱いのもっと高価なものになるであろう。

#### ○経済性比較

第3図は、6000トン／年規模の天然UF<sub>6</sub>製造工場を600トン／年規模の再処理回収ウラン転換工場とを比べた原価の構成の比較を示している。

天然ウラン転換工場の原価は、ウラン精鉱（ウラン酸化物）からUF<sub>6</sub>までの全工程にお

よぶものであり、再処理回収ウラン用工場については、供給原料を精製された酸化ウランと仮定している。

構成要素をもっと詳細に比較すると：

- － 資本の償却に関する構成要素は、処理の段階がより少ないので通常の転換工場に比べると減少しており、遮蔽や遠隔操作が要求されるので増加するという両面がある。全体として、天然ウランと再処理回収ウランとの間の原価上昇は3（倍）という係数になる。
- － 労務、資材およびサービスの原価の上昇は比較的少いが、これは工場の作業工程を単純にしたことと、被曝線量を減らすために自動化や遠隔操作を組合せたからである。
- － 接近することがより難しい場所には、もっと高度の機械を確保する必要があるので、保守費が高くなる。
- － 単位当たりのフッ素原価は直接転換法では必要量が3倍にもなっているので、上っている。
- － 廃棄物処理と残渣処分の費用は非常に鋭く上昇している。即ち取扱い方法の重大な変化が、はるかに高価な処分法と共に必要とされている。英国では、在来工場からの固体廃棄物の処分はカンブリヤ郡のドリッグ（Drigg）へ運ぶことになっており、さらにスキップ（\* 使用済み燃料の運搬用容器）に封入し、最終貯蔵保管場所として浅い 内張りされた運搬溝（トレンチ）に入れられる。ECHO工場からの廃棄物は、固定化処理が必要で、その後で深層処分される。
- － 容器の保守はもっと厄介になって、おそらく毎回使用した後で、一連の除染作業が要求されるであろう。

再処理回収ウランの転換は、天然ウランの場合の3倍も高価である。実際にこの金額は、再処理回収ウランが \$15/Kg だけ価値が減少することになる。そしてこの価値減少も現在の再処理契約価格に比べると穏当なものである。このように、上記のコストの影響は、燃料のリサイクルから得られる重要な経済的利益に大きな影響を与えることはないであろう。

## ○結 論

再処理回収酸化ウランの転換の技術的な方法が確立されたが、それは原料に関連した特別の要求を考慮に入れたものである。その方法は  $UO_3$  の直接弗化であり、強化した遮蔽と封じ込めの導入を含んでいる。BNFLによって建設さるべき工場、ECHOは、年間わずか300-

400 トンの確実な取引があれば承認されるであろう。これは直接弗化法によって可能となり、年産5000トン以下では経済的でない天然ウランの転換工場とは対照的である。

より高い操業原価と、非常に高い廃棄物処分原価と併せて、単位当たりの建設費増加は、再処理回収酸化ウランの転換価格を天然ウランの転換価格の約3倍に引き上げるであろう。

リサイクルしたウランの転換の原価が上昇しても、酸化物を再処理したウランの生産物 (arismgs) の潜在的な価値よりもはるかに低いのである。再処理回収ウランの転換を始めることは、1990年代における原子炉の燃料原価を引下げることに貢献することになるだろう。

### 第 1 表

#### ECOH工場の主要項目からのガンマ線量率

| 項 目               | 線 量 率         |
|-------------------|---------------|
|                   | [ $\mu$ Sv/h] |
| 9 個の供給ドラムを乗せるパレット | 30            |
| 原料貯蔵用ホッパー         | 60            |
| 反応炉容器             | 600           |
| 流動媒体              | 400           |



第 2 表

主要固体廃棄物の処理手順の相異

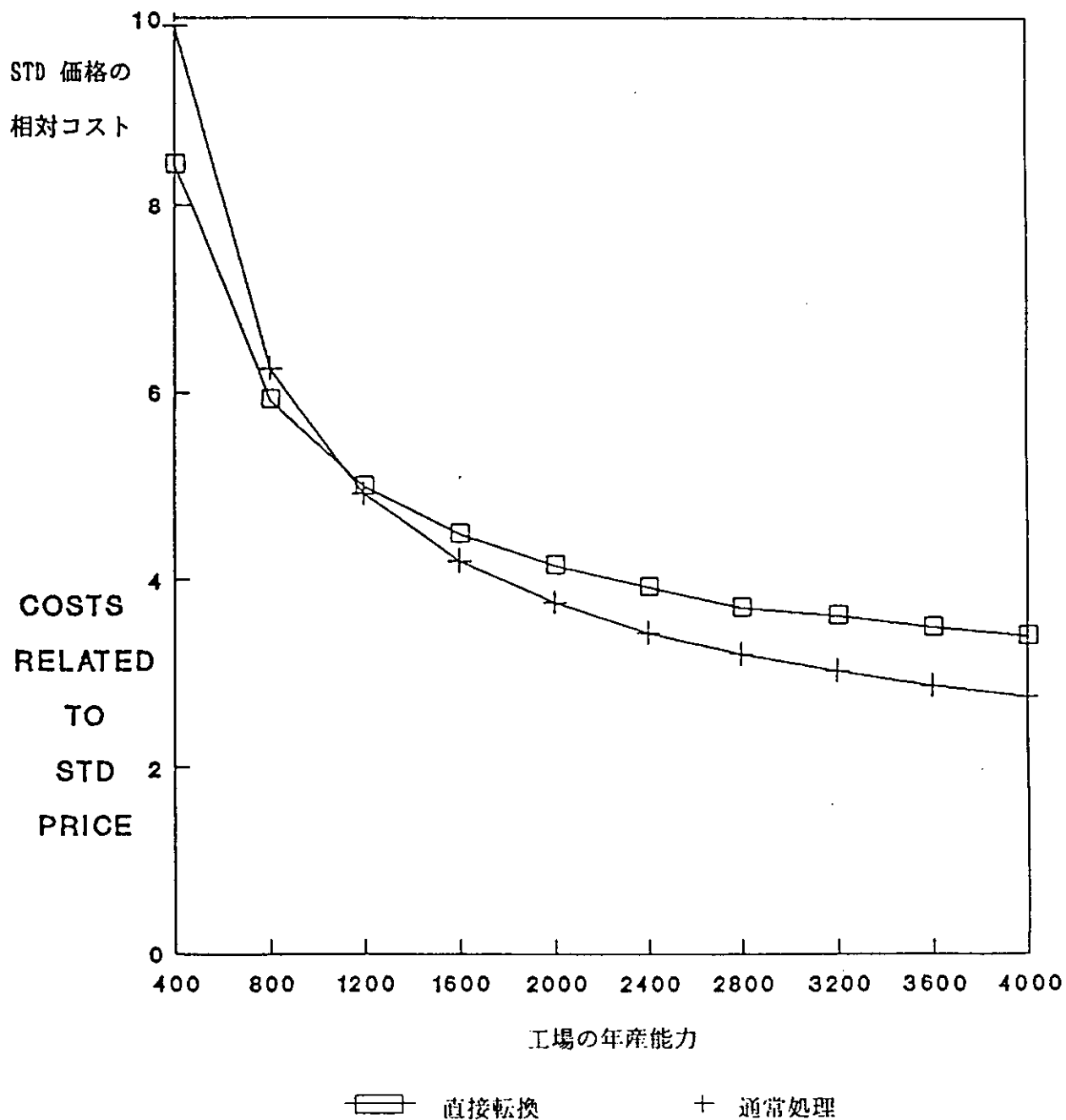
| <u>固体廃棄物</u>     | <u>処理手順</u>                        |                                   |
|------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
|                  | 天然ウラン工場                            | E C H O                           |
| 1. シリンダー洗浄の残査    | 主生産ライン <sup>(1)</sup><br>の残査工場での回収 | 中レベル廃棄物 <sup>(2)</sup><br>として処分   |
| 2. フィルターと廃流動媒体   | 主生産ライン <sup>(1)</sup><br>の残査工場での回収 | 中レベル廃棄物 <sup>(2)</sup><br>として処分   |
| 3. ウラン除去スクラバの沈殿物 | 主生産ライン<br>の残査工場での回収                | 改良した濃縮 <sup>(3)</sup><br>残査工場での回収 |

注

- (1) 主生産ラインの回収プラントは天然ウラン系の残査 2 5 0 トン／年の能力を有する。
- (2) ILW = 中レベル廃棄物： 深層処分に先立つて放射性核種を固定する前処理が必要である。
- (3) 濃縮ウラン系の残査の回収プラントはウラン 235 の線量 (Sv U235) をなくし、50 トン／年の能力をもっている。

第1図

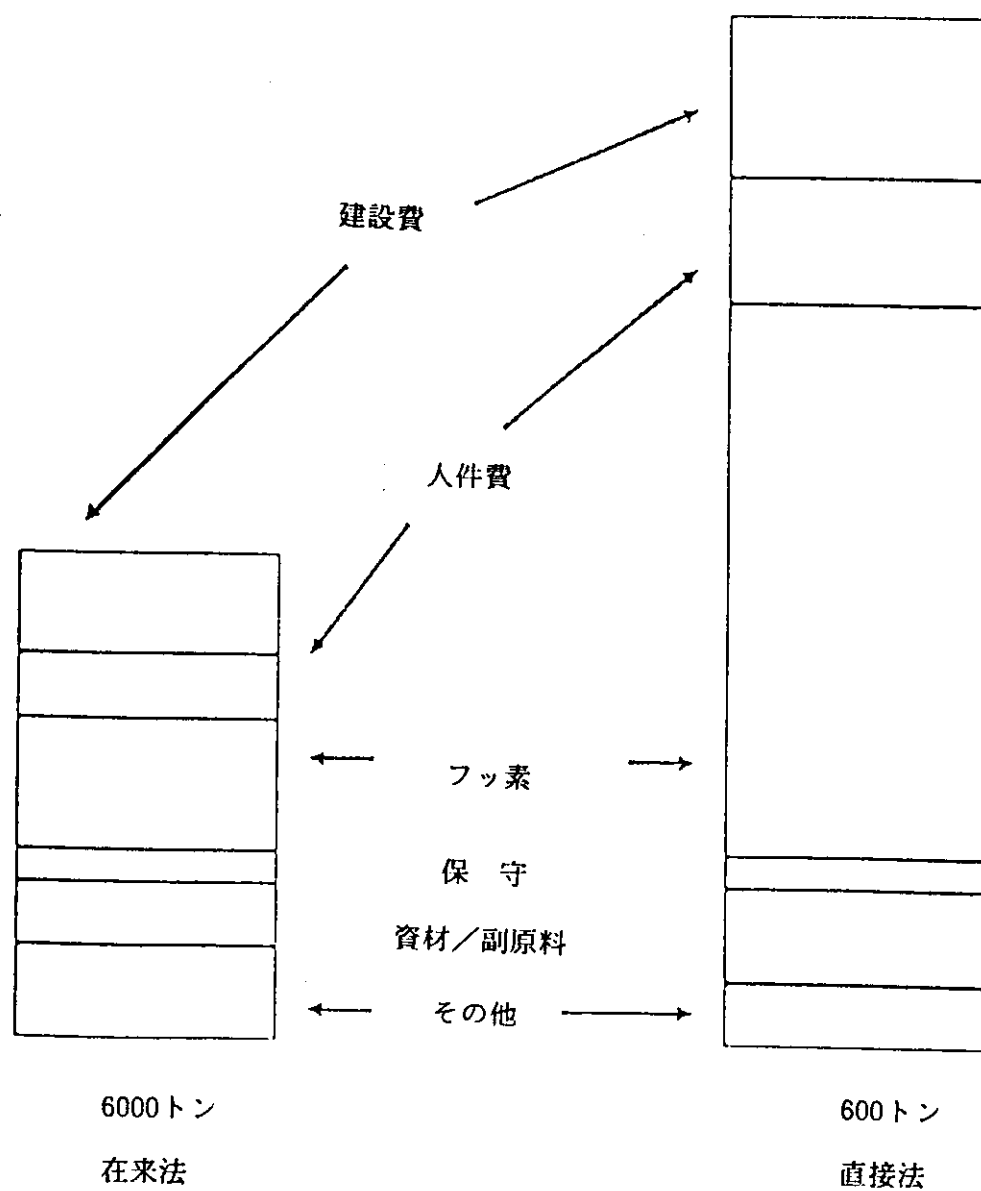
生産量とコスト



RPB234

第2図

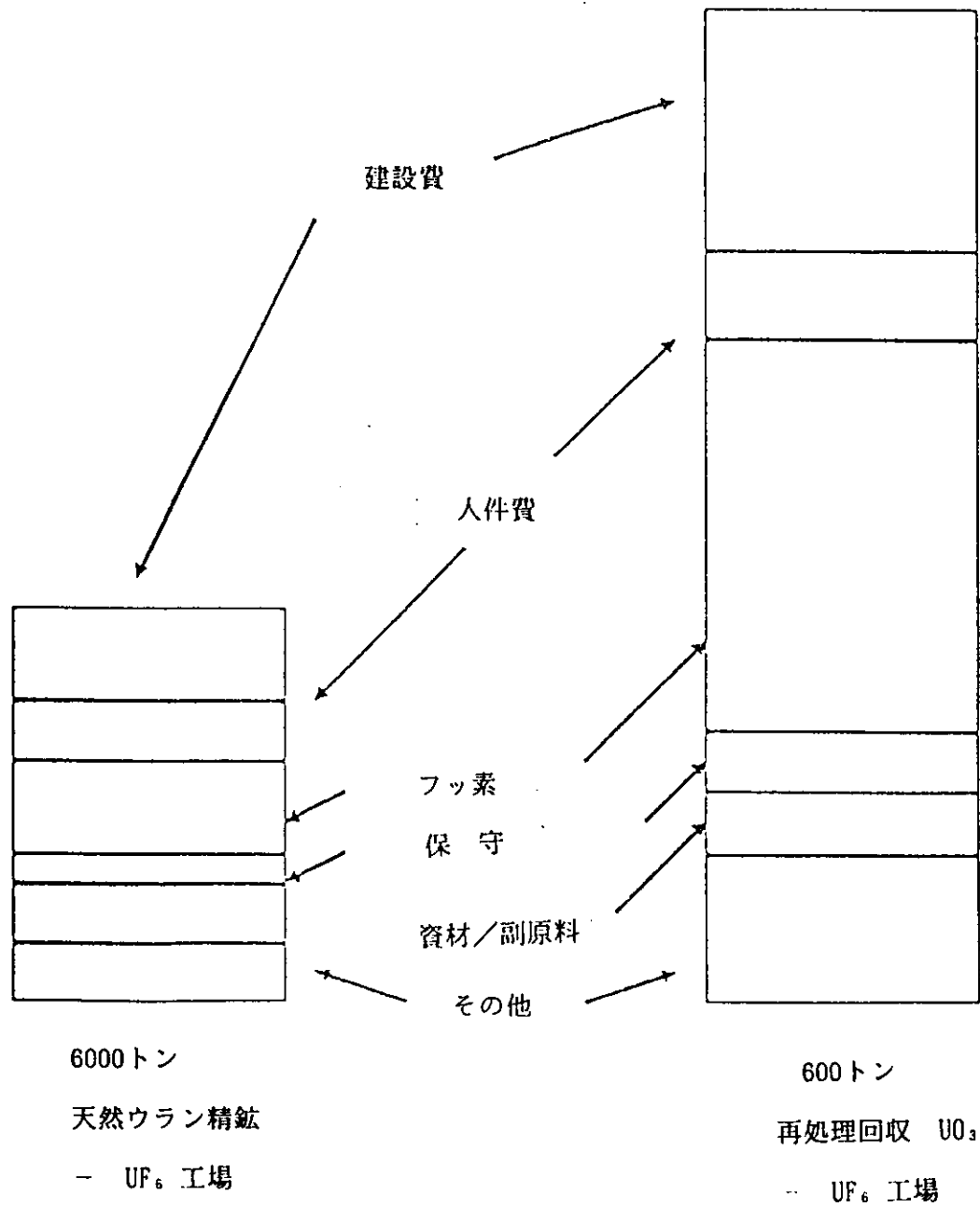
酸化ウランからUF<sub>6</sub> へのコスト比較



RPB235

第3図

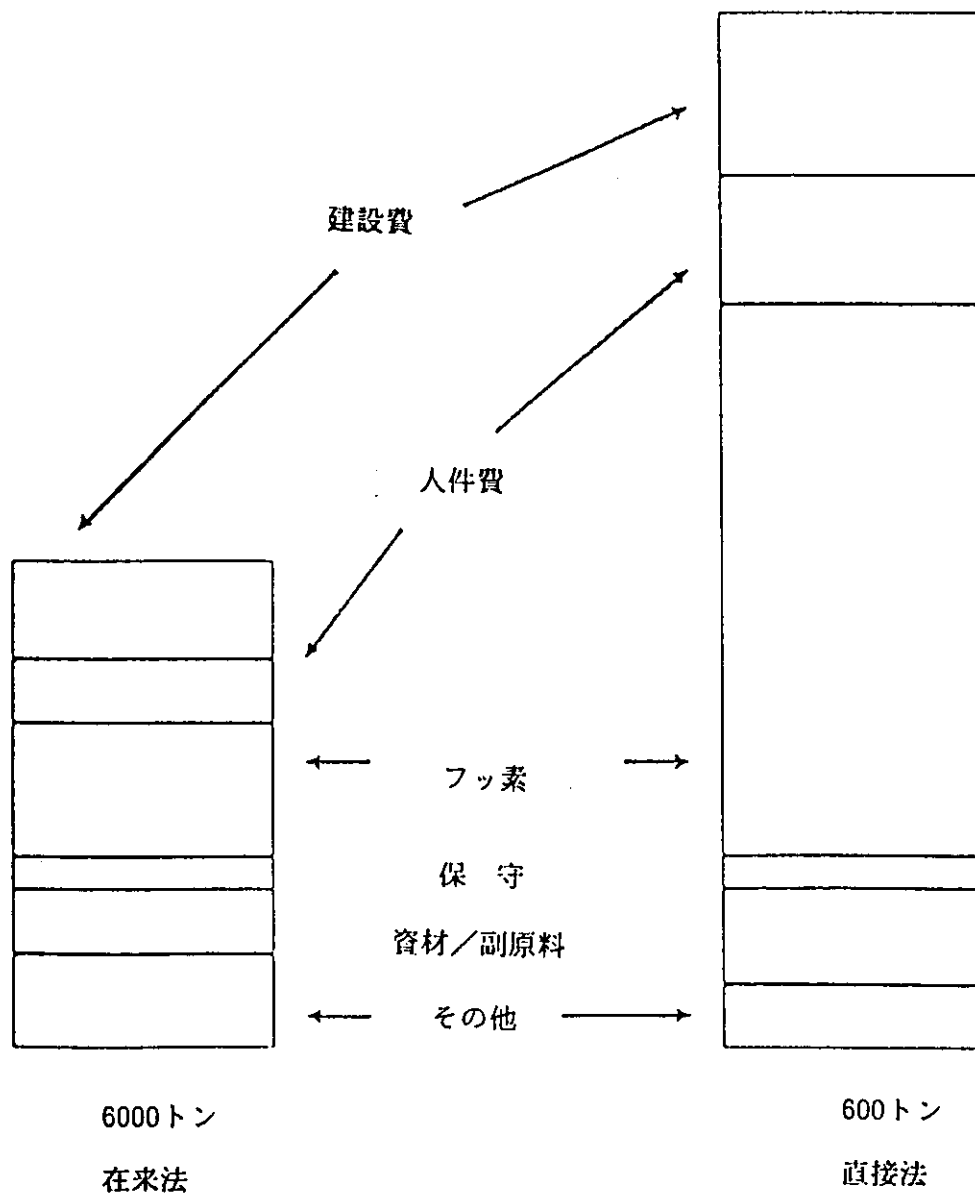
再処理回収UF<sub>6</sub>コスト比較



RPB236

第2図

酸化ウランからUF<sub>6</sub> へのコスト比較



RPB235

# 国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部ウィーン1988年10月11日－14日

---

T1-TC-665 12

## P N C プロセスの経済性

安田 式郎

音村圭一郎

若林 修二

動力炉・核燃料開発事業団

人形峠事業所

環境資源開発部 製錬課

## 要 旨

ウラン転換の経済性を検討するために、日本国内にPNCプロセスを適用した商用転換工場を建設する場合について検討する。

割引利益率法を用い、プロジェクトの収益性を、利益率（ROI）によって表現する。基準ケースとした5000 tU/y規模のプラントでは、その利益率は約10%である。この基準ケースについて、1つの因子を変化させて対応する利益率の変化を計算する感度分析をいくつかの因子について行う。

濃縮商業プラントに隣接して設置すると想定した小規模プラントについて、コスト節減の要素を検討した。

## 1. 序論

### (1) PNCの転換技術開発の経緯

動力炉・核燃料開発事業団は製錬転換パイロットプラントを人形峠事業所に建設し、その操業を昭和57年に開始した。動燃が独自に開発したPNCプロセスを適用したプラントであり、設計容量は200 tU/yである。輸入したウラン精鉱と人形峠鉱山からのウラン浸出液を原料とし、UF<sub>6</sub>に転換するプラントである。転換した製品UF<sub>6</sub>は同事業所内に隣接するウラン濃縮パイロットプラントやウラン濃縮原型プラント等へ供給してきた。これまでの6年間、パイロット規模でのPNCプロセスの操業データを採取するとともに、プロセス改良のための研究開発を続けてきた。

### (2) 日本の転換についての政策

原子力委員会が昭和62年6月に改訂した原子力開発利用長期計画によれば、「国内におけるウラン濃縮に必要なUF<sub>6</sub>への転換については、我が国におけるウラン濃縮事業の進展に応じて、基本的には国内において事業化を図ることができるよう、所要の検討を進めるものとする。」としている。

### (3) 日本の転換需給の現状と将来

国内に商用転換工場を持たない日本は、必要なUF<sub>6</sub>転換については海外の転換事業者に全て依存している。現在建設中の炉も含めたUF<sub>6</sub>の需要は年間約5000 tU/yである。

六ヶ所村に建設される濃縮商用工場は1991年頃の操業開始を計画している。そのUF<sub>6</sub>の需要は約200 tU/yから年々段階的に増加し、操業開始後10年でフル操業となり約2000 tU/yとなる計画である。

### (4) 海外の転換工場と転換市場

西側には5つの転換工場があり、皆約10000 tU/y規模のプラントであり、合計約50000 tU/yの供給能力がある。しかし、世界のUF<sub>6</sub>需要は約30000 tU/yしかなく、転換市場価格は5.35-8.40 \$/kgU (NUKEM, 4/88)と低迷している。



## 2. コスト推算

一般的に転換工場の採算限界と言われている5000 t U/yのプラントを基準ケースとした。

コストについては、製錬転換パイロットプラントで得たコストデータを基礎にして計算した。建設費は0.6乗則を用いて推算する。直接労務費の所要人員は0.2乗則で推算する。パイロットプラントからは得にくい、一般管理費のようなコストデータは一般的な化学プラントのコスト構成比率を用いて推算する。推算に用いる単価は現在の価格とし、今後のエスカレーションについては見込まない。

保守費はプロセス設備の3%と建屋付帯設備の1.5%とした。資材費はプロセス設備の0.5%とした。敷地は借地と仮定した。工場管理費は直接労務費の20%とした。一般管理費は販売高の10%とした。

## 3. キャッシュフローモデル

検討期間を20年とし、建設期間5年、操業期間15年とした。基準ケースの計算条件を表-1に示した。

キャッシュアウトフローは投資である。キャッシュインフローの定義は自己資本基準では粗利益から税と借入金返済額を差し引いた額、総資本基準では粗利益から税を差し引いた額である。キャッシュインフローの計算は販売高、操業費、借入金返済、運転資金、減価償却、税等を考慮して行う。キャッシュフローをプロジェクト検討期間を通じて年々計算する。

利益率（ROI）はプロジェクトの検討期間で将来発生するキャッシュインフローの現在価値と投資ーキャッシュアウトフローの現在価値を等しくする利益率と定義される。

各年のキャッシュインフローと投資について（1）式を満足する“i”がROIである。

$$\sum_{n=-5}^{-1} I_n (1+i)^{-n} + \sum_{n=1}^{15} F_n (1+i)^{-n} = 0 \quad (1)$$

$I_n$  : n年目の投資額、キャッシュアウトフロー（負の値）

$F_n$  : n年目のキャッシュインフロー（正の値）

n : 年（-5～+15）

i : ROI

#### 4. 感度分析の結果

感度分析は他の因子を固定して、調べる因子を変化させて行う。結果の曲線を図-1～図-7に示した。感度は各図の横軸に示した基準ケースの条件（▽記号で示す）での曲線の傾きである。

感度分析の結果を表-1にまとめた。高感度の因子は金利と転換価格であるがこれらは外的要因であり、変えることはできない。比較的感度が高い因子は建設費、操業費、生産量／規模の比率である。これらは改善の努力を払うべき項目である。低感度の因子はプラント規模、自己資本比率、借入金返済期間である。

一定のROIのもとでの転換価格と規模の相関を図-9に示す。

#### 5. 考察

2000 t U/yと小規模プラントの操業費と利益率の相関を図-10に示す。利益率を10%以上に改善するためには、操業費を半分に削減しなければならないが、ほとんど不可能である。そこで国内転換工場に関するコスト節減項目について検討する。

もし商用工場に隣接して転換プラントを建設すれば、UF<sub>6</sub>の輸送が削減できる。UF<sub>6</sub>の輸送コストは操業費の36%に相当する。さらに、UF<sub>6</sub>の輸送距離が最短となり輸送途上での危険性（モン・ルイ号の様な）を低減できる。

濃縮工場の付帯設備として転換設備を建設した場合は、一般管理費を合理化できる。これを半分に削減できれば操業費を7.8%低減できる。

濃縮プラントでは、フィードしたUF<sub>6</sub>の約5/6が濃縮テイルとなるが、現在のところその利用方策はなく貯蔵している。この貯蔵コストの低減と安全性の向上のため、テイルUF<sub>6</sub>をより安定な化学形態である酸化物に逆転換を行うことが検討されている。逆転換することによって発生するHFを転換で利用することができる。HFのコストは操業費の23%に相当する。PNCプロセスでは希HFをふっ化沈殿工程で用いることができる。（全てがAHFでなければならないプロセスに比較してリサイクルが容易である。）

貯蔵容器コストは貯蔵コストの1つの要素である。48Yシリンダ1本分のUF<sub>6</sub>を逆転換するとオープンドラム31本のU<sub>2</sub>O<sub>8</sub>となる。その容器コストの差は転換の操業費の16%に相当する。

以上のコスト節減項目の合計だけでも操業費の 82% となる。利益率が 17% を越す程である。

## REFERENCES

1. Marvin P. Barnes : "Computer-Assisted Mineral Appraisal and Feasibility", Society of Mining Engineers, pp.128 (1980)
2. 小松 昭英, 堀 義明 : "経済投資とプロセスの経済性評価", 化学工学, 50, pp.779 (1986)
3. 化学工学協会編 : "プロセス設計シリーズ 6, 経済評価とプラントコスト", 丸善, pp.127- , (1975)
4. Y.HASHIMOTO, I.IWATA, T.NAGASAKI, "Research and development of  $UF_6$  conversion in Japan now and subjects in future", IAEA-TECDOC-420, pp.81-101.

表－1 感度分析結果

| 因 子         | 基準値             | 感 度<br>〔 %-ROI / %-因子 〕 |             |
|-------------|-----------------|-------------------------|-------------|
|             |                 | 自己資本基準                  | 総資本基準       |
| 1)プラント規模    | 5 0 0 0 t U / 年 | + 0 . 0 1 1             | + 0 . 0 6 5 |
| 2)建設費       | －               | － 0 . 2 5               | － 0 . 1 1   |
| 3)操業費       | －               | － 0 . 2 0               | － 0 . 0 8 8 |
| 4)生産量／規模の比率 | 1 . 0 [－]       | + 0 . 2 9               | + 0 . 1 2   |
| 5)転換価格      | 1 0 \$ / k g U  | + 0 . 4 2               | + 0 . 1 8   |
| 6)自己資本率     | 3 0 %           | － 0 . 1 2               | － 0 . 0 0 9 |
| 7)借入金金利     | 6 %             | － 0 . 9 1               | + 0 . 1 5   |
| 8)借入期間      | 1 0 年           | + 0 . 0 4 4             | + 0 . 0 0 6 |

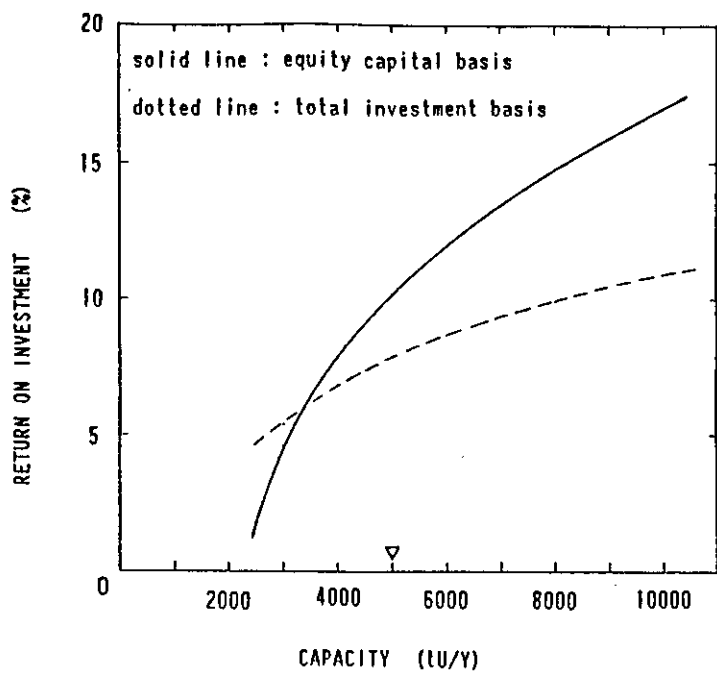


Fig. 1 Capacity vs. ROI

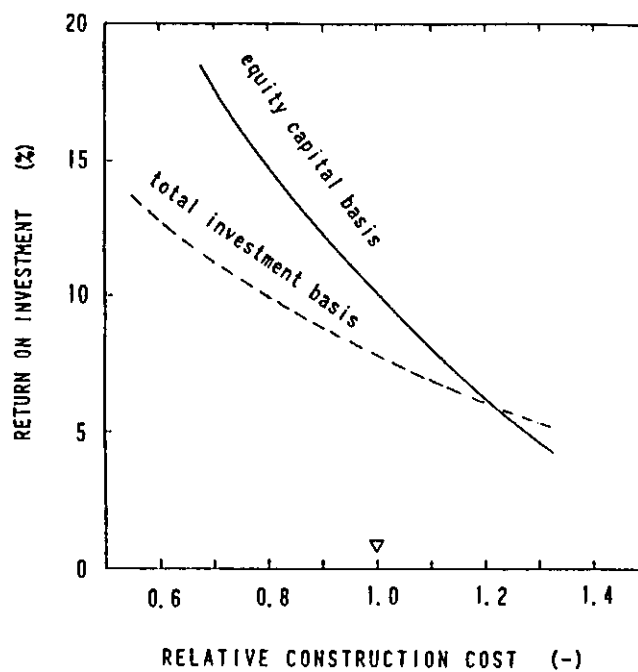


Fig.-2 Relative construction cost vs. ROI

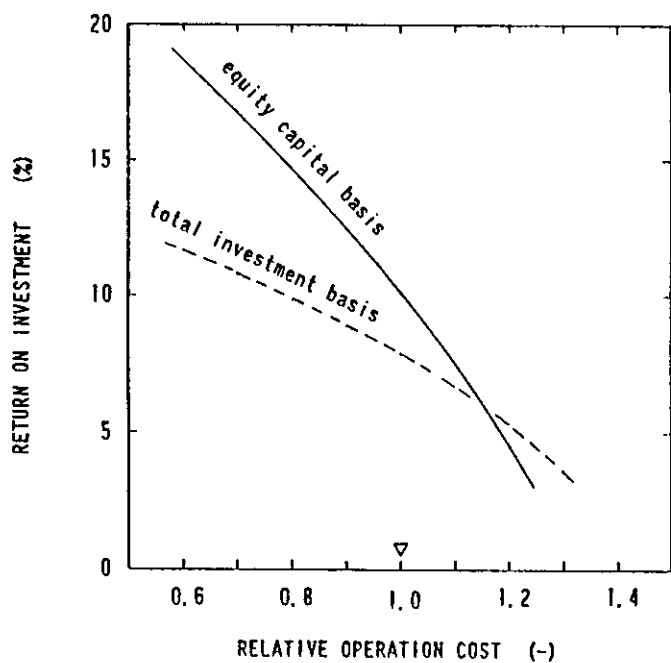


Fig. 3 Relative operation cost vs. ROI

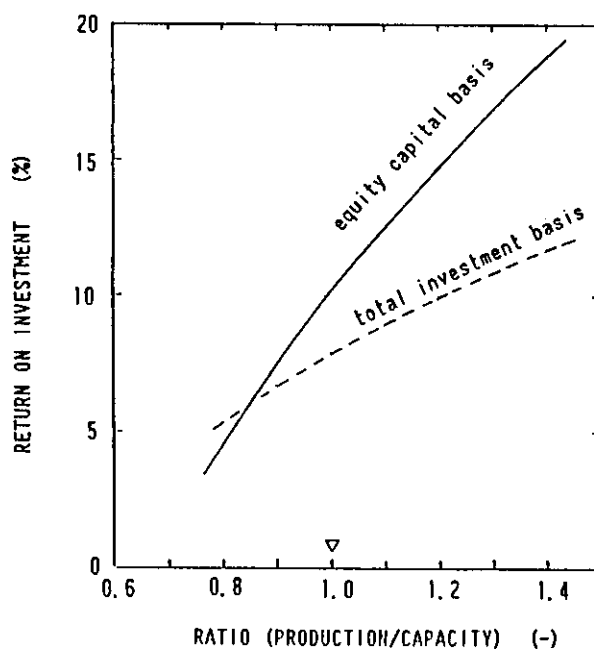


Fig. 4 Ratio (production/capacity) vs. ROI

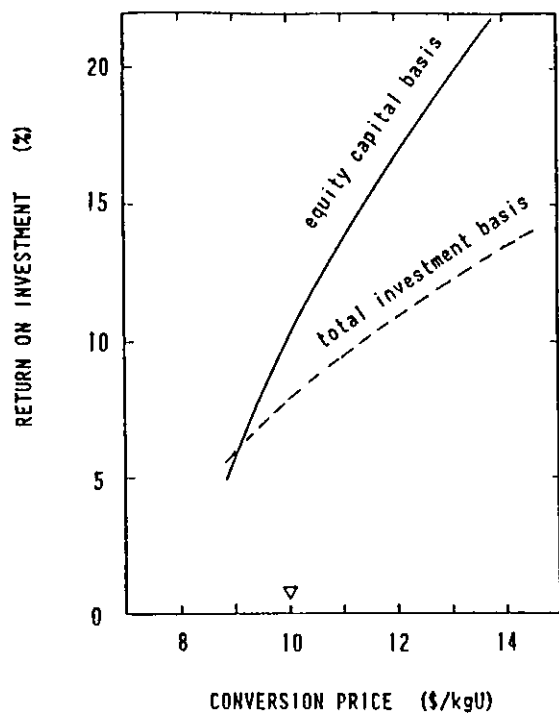


Fig. 5 Conversion price vs. ROI

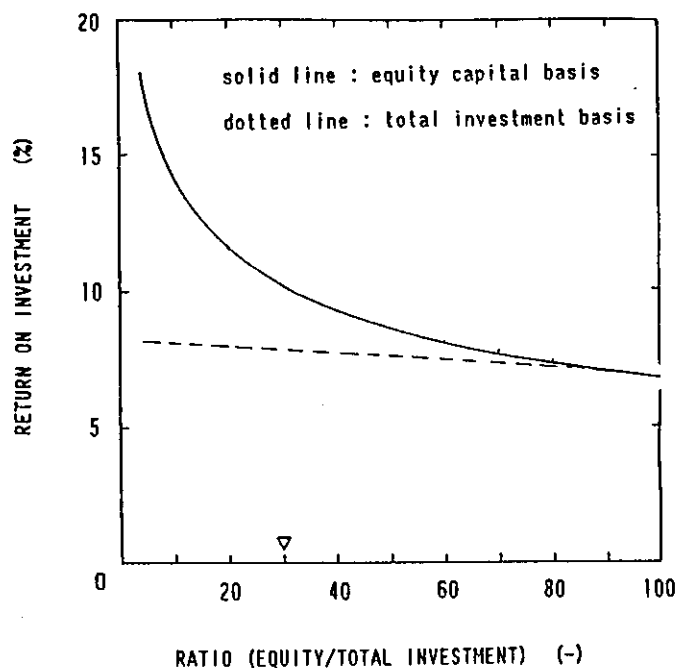


Fig. 6 Ratio (equity/total investment) vs. ROI

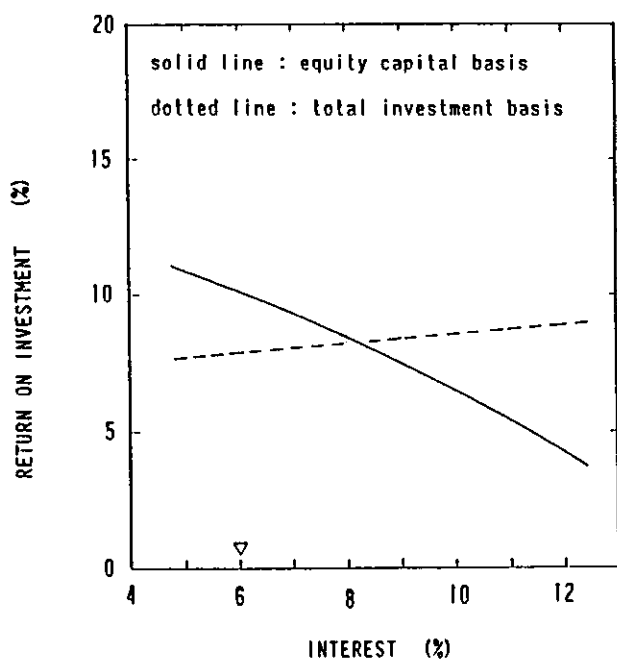


Fig. 7 Interest vs. ROI

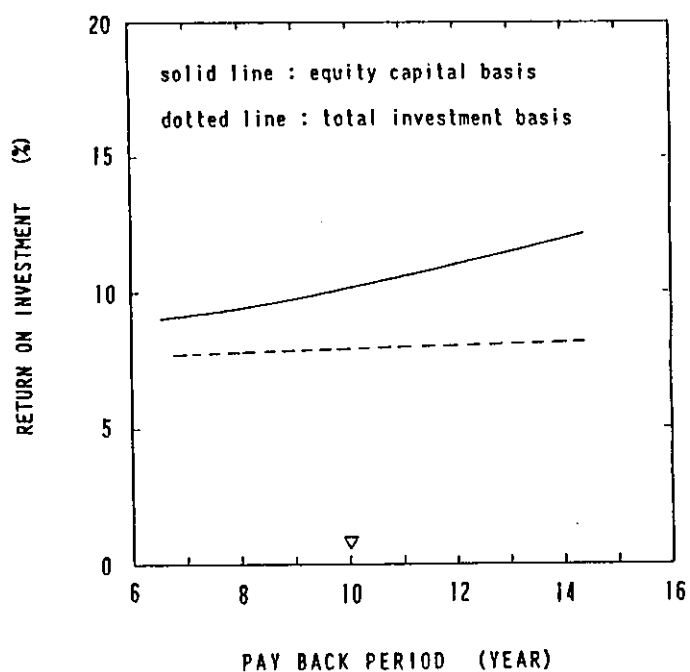


Fig. -8 Pay back period vs. ROI

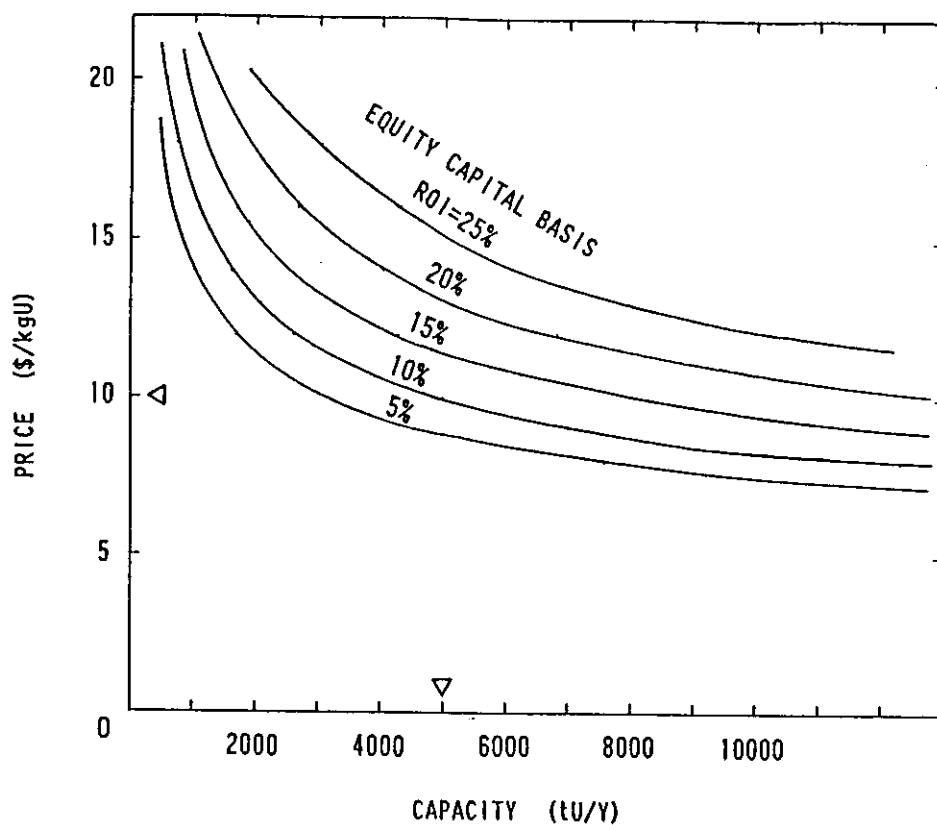


Fig. 9 Price vs. capacity

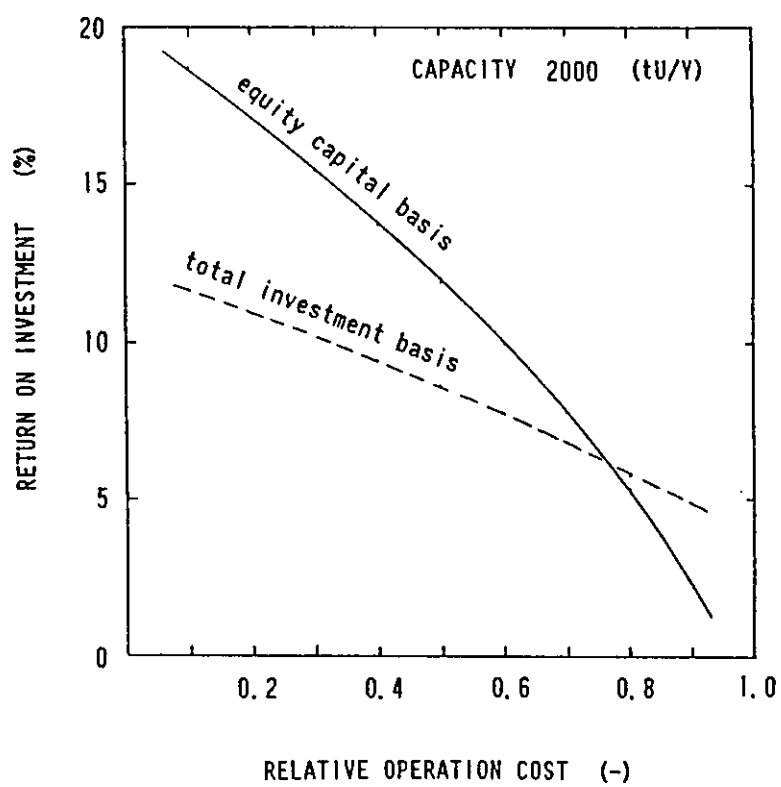


Fig. 10 Relative operation cost vs. ROI

国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部ウィーン1988年10月11日－14日

---

T1-TC-665 10

ウラン精鉱および再処理された硝酸ウラニル  
から六フッ化ウランへの転換

ロバート・ファロン

COMURHEX

フランス



## 要 約

フランスでは、ベシネー・グループが51%、コジマが49%の株を所有するコムレックス (COMURHEX) が1960年代の始めにウラン精鉱の六フッ化ウランへの転換を始めた。

コムレックスの業務開始以来天然六フッ化ウランで10万トン U以上、また別の工場ピエールラット (Pierrelette) で、軽水炉の照射済燃料から再処理されたウランのおよそ2000トンU が転換された。また同じ時期にフランスの黒鉛減速ガス冷却炉用の大量の金属ウランも製造された。

コムレックスの製造能力は現在では天然六フッ化ウランで年間14,000トン Uにまで上昇している。

西側における5つの転換施設の中4つは同じ方式、即ち原料を液相／液相の交換によって精製することを基本とした湿式を使用しており、他の1つは最終段階で六フッ化ウランの蒸留で精製を行う乾式法を使用している。将来はこの方式はAVLIS (SILVA) に供給する金属ウラン製造工程には不利をきたすものと思われる。

第一に、我々は従来の湿式法の主な工程での、固体、液体および気体の廃棄物の低減化について考察する。

第二に、コムレックスは再処理物質を六フッ化ウランにリサイクルする唯一の大きな容量を持つので、我々はこの工程と異なる他の工程を検討し、なおかつ廃棄物処理を概観する。

転換の主要目的の一つはウラン精鉱を原子炉級にすることである。そしてすべての転換工程は膨大な量の廃棄物を発生する。廃棄物の量を減らすことおよびそれらを効果的に安全にかつ経済的に取り扱うことは転換業者の責務である。

コムレックスは創業以来10万t以上の六フッ化ウランを天然ウラン精鉱から生産してきた。

同じ時期にコムレックスはフランスの黒鉛減速炉のために2500tの金属ウランを生産した。

10年の間コムレックスはフランスの再処理工場からの硝酸ウラニルから大略 2,000t の再処理回収ウランを生産した。

歴史的な理由からコムレックスは南フランスにある2つの工場を所有している。即ちナルボンヌ (Narbonne) に近いコムレックス・マルベシ (Comurhex Malvesi) とローヌ峡谷にあるコムレックス・ピエルラット (Comurhex Pierrelatte) である。

1987年以降コムレックスの生産能力は年間ウランで14,000t に上昇した。

## 処 理 工 程

### 1/ 天然の精鉱を六フッ化ウランに転換する従来の湿式転換法

コムレックスで使用されている基本処理工程は「湿式処理」である。

従来の「湿式処理」の主な工程は：

- 1.1/ “不純物を含む”硝酸ウラニルを得るために精鉱を硝酸で溶解する。
- 1.2/ TBP を使った液体イオン交換による抽出 → “純粋な”硝酸ウラニル。
- 1.3/ アンモニアを使った硝酸ウラニルからの沈殿 → 重ウラン酸アンモニウム (ADU) 。
- 1.4/ ADU の乾燥とか焼 → 三酸化ウラン ( $UO_3$ ) 。
- 1.5/ アンモニアを用いた  $UO_3$  の還元 → 二酸化ウラン ( $UO_2$ )

四フッ化ウラン ( $UF_4$ )を得るためにフッ化水素酸を使った二酸化ウランのフッ化水素処理。

- 1.6/ 六フッ化ウランを得るためのフッ素による四フッ化ウランのフッ化。

## 2/ 再処理硝酸ウラニルの六フッ化ウランへの転換。

この転換の主な工程は：

- 2.1/ 重ウラン酸アンモニウム (ADU)を得るためのアンモニアによる硝酸ウラニル (UNH)からの沈殿。
- 2.2/ 重ウラン酸アンモニウム (ADU)のろ過。
- 2.3/ アンモニアを使つての重ウラン酸アンモニウム (ADU)の二酸化ウラン ( $\text{UO}_2$ )への焼と還元。
- 2.4/ フッ化水素を使つての二酸化ウラン ( $\text{UO}_2$ )から四フッ化ウラン ( $\text{UF}_4$ )へのフッ化水素処理。
- 2.5/ 四フッ化ウラン ( $\text{UF}_4$ )のフッ素による六フッ化ウラン ( $\text{UF}_6$ )へのフッ化。

## 3/ 金属ウランプロセス

- 3.1/ マグネシウム粉末と四フッ化ウランの混合。
- 3.2/ リサイクルしたフッ化マグネシウム ( $\text{MgF}_2$ )を反応容器にライニングする。
- 3.3/ マグネシウムと四フッ化ウランの間に反応が起こって金属ウランとフッ化マグネシウム ( $\text{U}+\text{MgF}_2$ )を生じるように反応容器を600℃に加熱する。
- 3.4/ 反応容器から $\text{U}+\text{MgF}_2$ を取り出す。
- 3.5/  $\text{MgF}_2$ に下記の処理を施す。
  - 3.5.1/  $\text{MgF}_2$ を粉碎にする。
  - 3.5.2/ 硝酸で浸出して $\text{MgF}_2$ からウランを回収する。
  - 3.5.3/  $\text{MgF}_2$ を乾燥させスクリーンにかけ、
    - 一部をライナー用にリサイクルし
    - 一部は売却する。
- 3.6/ ウランのインゴットは下記の通り処理する。
  - 3.6.1/  $\text{MgF}_2$ の一部を除くため頭部を機械切削する。
  - 3.6.2/ 穴開けによりサンプリングする。
  - 3.6.3/ インゴットにサンドブラストをかける。

## 処理工程によって発生する液体、固体および気体廃棄物

転換は二つの異なった工場で行われ、また流出液は別々に排出されるので、夫々の場合について検討する。

### 1/ Malvesi工場 : 精鉱から $UF_4$ と金属ウランへ

#### 1.1/ 液体廃棄物

精鉱から  $UF_4$ へおよび金属ウランへの転換で発生する主な液体廃棄物は液相／液相の交換から出るものである。工程中の他の液体廃棄物は局部的に処理され、また主流に合流する前にウランが硝酸ウラニルの形で回収される「ウラン回収設備」と呼ばれる設備を通して液相／液相の交換設備に戻される。

Malvesi 工場については液体廃棄物の最終排出は池になされる。ポンプで池に流される前に液体廃棄物はタンクに溜められ、そこで分析されてから中和される。

精鉱に含まれたすべての不純物は液相／液相交換によって硝酸塩の形で抽出される。

これらの硝酸塩の平均的分析値は：

|                 |   |           |
|-----------------|---|-----------|
| $NO_3^-$        | — | 80 g / ℓ  |
| $NH_4^+$        | — | 10 g / ℓ  |
| F <sup>-</sup>  | — | 1.5 g / ℓ |
| Cl <sup>-</sup> | — | 200mg / ℓ |

それに精鉱に含まれていたすべての陽イオンである。

「ウラン回収設備」から来る他のすべての流れは一緒に同じタンクに入れられる。酸度とウラン含有量の分析が終わるとポンプで池に流される前に中和される。

1980年代の初にはこの液体廃棄物に含まれて失われたウランは1.46kg/tUであったが、1987年にはその値は半分になった……… 0.73kg/tU.

池の硝酸塩濃度は自然の生物処理によって安定している、即ち池中にはバクテリアがいて硝酸塩を $N_2$ と $O_2$ に分解するからである。

その値は大体：

|    |    |           |
|----|----|-----------|
| N  | 全体 | 50 g / ℓ  |
| U  | 全体 | 0.2mg / ℓ |
| pH |    | 8         |

同期間中、液体廃棄物の流量は7.5 m<sup>3</sup>/tUと10%のスラッジだったのが、現在では5 m<sup>3</sup>/tUと10%のスラッジが池に流送されている。

この違いは主として処理法の変化によったものである。

我々は現在アンモニアによる UNH<sub>3</sub>の沈殿でできる硝酸アンモニウム NO<sub>3</sub>NH<sub>4</sub>を濃縮している。NO<sub>3</sub>NH<sub>4</sub>を分析した後、肥料として売却する。

|                                 |                  |
|---------------------------------|------------------|
| NO <sub>3</sub> NH <sub>4</sub> | 850 g / ℓ        |
| U (硝酸塩)                         | < 0.5mg / ℓ      |
| 放 射 能                           | < 2 μCi / kg 硝酸塩 |

年間生産量は約5000トン（1987年）である。

## 1.2/ 気体廃棄物

処理の各段階に対応する夫々の施設毎に独自のストックを有している。

それゆえ、我々は「ウラン回収設備」と「溶解設備」からの排気についてのみ検討する。

前者に対する排ガス発生量は13,000m<sup>3</sup>/hである。

ガスの分析値の平均は下記の通りである。

|                 |   |                          |
|-----------------|---|--------------------------|
| NO <sub>x</sub> | < | 100 ppm / m <sup>3</sup> |
| NH <sub>3</sub> | < | 0.21% / m <sup>3</sup>   |
| U               | < | 0.05mg / m <sup>3</sup>  |

溶解設備の排ガス発生量は3500m<sup>3</sup>/h である。

ガスの分析値は：

|                 |   |                         |
|-----------------|---|-------------------------|
| NO <sub>x</sub> | < | 60 ppm / m <sup>3</sup> |
| NH <sub>3</sub> |   | 1.8mg / m <sup>3</sup>  |
| U               | < | 0.1mg / m <sup>3</sup>  |

### 1.3/ 固体廃棄物

発生源はたった二つである。

#### 1.3.1/ ウラン鉱山からのドラム缶

これらは水を使ってワイヤーブラシで洗われ、ウラン分は「ウラン回収設備」でリサイクルされる。ドラム缶はつぶされ、放射能をチェックした後、鉄工業に売却される。

#### 1.3.2/ 金属ウラン施設からのフッ化マグネシウム ( $\text{MgF}_2$ )

ウランを回収するために硝酸に溶かした後、 $\text{MgF}_2$ は乾燥され、ふるいにかけられる。これは冶金工業に売却される。

## 2/ Pirrelatte工場 :

### 2.1/ 液体廃棄物

発生源には三つある。

#### 2.1.1/ ウランの無いフッ素工場

#### 2.1.2/ $\text{UF}_6$ 施設からの天然ウラン

#### 2.1.3/ 再処理 $\text{UF}_6$ 施設からの再処理されたウラン

上記の三つを合計した液体の量は1980年の初には $1.70\text{m}^3/\text{tU}$ であったが現在では $0.94\text{m}^3/\text{tU}$ に下がった。

10,000tU-N.U. と300tU-R.U. に対する液体廃棄物の化学的および放射化学的組成は次表の通りである。

## 液体廃棄物の年間評価

### 1/ 放射化学的組成

天然ウラン (NAT. U)      10000t／年

再処理ウラン (RU)              300t／年

|                       | NAT. U  | RU    |
|-----------------------|---------|-------|
| kg U/ 年               | 3.1     | + 0.1 |
| ウラン放射能                | 2.26    | mCi   |
| $\alpha$ 放射           | 0.00007 | mCi   |
| $\beta$ , $\gamma$ 放射 | 0.0015  | mCi   |
| 総放射能                  | 2.26157 | mCi   |

天然ウラン放射能      :    0.675Ci／tU

再処理ウラン放射能    :    2.376Ci／tU

$\alpha$  放射能                :    7mCi／tU (流入)

(ウランを除く)        90%純化して流出

$\beta$ ,  $\gamma$  放射能            :    30mCi／tU (流入)

50%純化して流出

## 2/ 化学組成

天然ウラン (NAT) 10000t/年  
 再処理ウラン (RU) 300t/年  
 流 量 9400m<sup>3</sup>/年

|                               |       |        |
|-------------------------------|-------|--------|
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 10.62 | g / ℓ  |
| K <sup>+</sup>                | 12.21 | g / ℓ  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0.022 | g / ℓ  |
| Ca <sup>++</sup>              | 0.1   | g / ℓ  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 9.75  | g / ℓ  |
| Cl <sup>-</sup>               | 0.43  | g / ℓ  |
| F <sup>-</sup>                | 0.016 | g / ℓ  |
| Cd-Ni-Zn-Cr                   | 0.5   | mg / ℓ |
| Cu                            | 7.2   | mg / ℓ |
| Fe                            | 27    | mg / ℓ |
| W max.                        | 20    | mg / ℓ |
| U                             | 0.2   | mg / ℓ |
| 塩 分                           | 31    | mg / ℓ |
| M. E. S.                      | 0.150 | g / ℓ  |
| U kg/年                        | 3.2   | kg     |



## 2.2/ 気体廃棄物

次の二つの排気塔がある。

2.2.1/ フッ化工場のものと、天然六フッ化工場のもの。

2.2.2/ 再処理ウランの工場のもの。

両方の排気塔に対する規制は同じである。

$F_2$  < 5 mg/m<sup>3</sup>

放射能 < 4 pCi

$\beta$  放射能 < 10 pCi

$Cl_2$  < 3 mg/m<sup>3</sup>

分析は毎日行われその平均値は

$F_2$  < 1 mg/m<sup>3</sup>

合計放射能は < 10 pCi

$Cl_2$  < 1 mg/m<sup>3</sup>

我々はまた、オンラインの検知器をフッ素工場と  $UF_6$  工場に設置して、フッ素の量が 1 ppm/m<sup>3</sup> を越すとアラームが鳴るようにしている。

## 2.3/ 固体廃棄物

固体廃棄物は二種類に区別しなければならない。

2.3.1/ ウランを含まない (<500ppm) と考えられる固体廃棄物。

これらのものは固体廃棄物の主要なものである。

2.3.1.1/ フッ素処理施設とその付属施設からのもの：

### フッ素施設から

最終の水素ガスは水酸化カリウム (KOH) 溶液で洗浄され、そこでフッ化水素酸が中和される。

### 付属施設から

—電解質の中和

—主施設、配管、弁、セル等の洗浄。

これらの総ての流体は水酸化カルシウムで処理され、フッ化カルシウム ( $\text{CaF}_2$ ) は沈殿するので遠心分離器で分離される。

#### 2.3.1.2/ 六フッ化ウラン施設とその付属施設からのもの：

六フッ化ウラン施設からのもの

最終ガスは水酸化カリウム ( $\text{KOH}$  400g/ℓ) によって洗浄される。

$\text{KOH}$  の濃度が100 g / ℓ に達するとその溶液は処理される。

最初に重ウラン酸カリウムが沈殿するので次いでフィルターにかけられる。フッ化水素酸を含んだ溶液は水酸化カルシウムで処理され、沈殿したフッ化カルシウム ( $\text{CaF}_2$ ) はフィルターで分離される。 $\text{KOH}$  の溶液は濃度400 g / ℓ に再調整されてスクラバにリサイクルされる。

これら二つのフッ化カルシウムはドラム缶に詰められ放射能が0.2mラド以下であることが確かめられると管理された廃棄場に保管される。

1987年に於ける総量は1700トンであったが1988年には1700トンから1000トンに減らせることが期待される。この結果はフッ素処理法の変更後に達せられるものである。

フッ素を発生させる電解槽で使う液体HFを回収リサイクルするために、水素ガスが非常に低い温度のコールド・トラップを通る。

最終ガスは痕跡程度のフッ化水素を中和するために、液体水酸化カリウムの真空ポンプを通り、その後蒸気ヒーターで燃される。

#### 2.3.2/ 500ppm以上のウランを含む固体廃棄物

これらの固体廃棄物はまた短寿命や中低レベルの放射能をもつ元素を含んだフッ化カルシウムである。この場合、ドラム缶は A. N. D. R. A. (Agence Nationale pour les Dechets Radio Actifs) と呼ばれるフランスの国家機関の監督の下に“ラアーグ”にある国の廃棄場に保管される。

—1986年の発生量は30t

—1987年は6 tに下がり

—1988年には更に減少するであろう。

## 結 論

コムレックスは廃棄物の量を減少させることと、廃棄すべき物の質の向上のために非常に努力してきた。この分野での投資額は依然増大している。私はわずかに一例を挙げただけである。我々の次の大きな投資は水素の処理と同様な方法でフッ素ガスからフッ化水素酸を除去するためのフッ素ガス処理の問題である。

国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部 ウィーン 1988年10月11～14日

---

T1-TC-665 3

軽水炉の燃料サイクルにおける

ウランのリサイクルの経済

エルネスト レイザー

ドイツ核燃料再処理会社

ハンブルグ街 4

3000 ハノーバー 1

ドイツ連邦共和国

## 要 約

軽水炉の燃料サイクルにおけるウランのリサイクルを正しく評価することは、数多くのパラメーターと境界条件に左右されるので非常に複雑である。

しかしながら、再処理されたウラン（REPU）をリサイクルすることは、新たに濃縮された天然ウランのみを使う燃料供給方式に比べると天然ウランと分離作業を大きく節約することが出来るようになる。

商業的および財政的影響は利用者にはいかんともしがたい要因によって左右される部分もあり、利害関係をもつ人々によって彼らの特定の条件もとで評価されるべきである。

この理由によって、この報告書ではそれ以上の検討は行わない。

再処理回収ウランをリサイクルするには幾つかの方法がある。最も重要な方法は再濃縮を経ることであり、第二は混合酸化物燃料「MOX, (U-Pu)O<sub>2</sub>燃料」において担体とする方法、第三の可能性は濃縮した天然ウランと混ぜて使用することである。

再濃縮の場合は、節約は再処理回収ウランの品質、主に残留濃縮度とウラン 236の含有量とに左右される。ウラン 236は中性子毒であるから特に重要である。そのため再処理回収ウランは反応度の等しい天然ウランの場合より少し高く濃縮する必要がある。

1300MWe の PWRの発電所を基本にして、ウランとプルトニウムのリサイクルを通して可能な節約を評価した。1 トンの天然ウランによる発電量が燃焼度の関数として、また同じくリサイクルによる相対的生産性の向上が計算された。その結果は約30から40%の範囲であることを示している。

このことは、関連産業にリサイクルによって、従来の燃料サイクルに比べて kWh当りの燃料サイクル費を安く出来るという条件を保証し易くするであろう。

## 1. 序 論

約20年にわたり、数ヶ国において照射済みの軽水炉の燃料の再処理はピューレックス法で実施されてきた。しかしながら、再処理による製品すなわちウランとプルトニウムの量は運転中の軽水炉に装荷されている燃料の量に比べると少なかった。回収されたウランは濃縮しようとしている天然ウランの中に送られ薄められ、吸収された。プルトニウムは高速増殖炉（仏、英）と軽水炉（西独）の両方のために混合酸化物燃料（MOX）として使われた。

一方、リサイクルのウランに対する他の方式を求める開発が起こった。プルトニウムに関しては、FBRの計画が減ったので、軽水炉にリサイクルする（熱中性子利用のリサイクル）事の重要性が増してきた。このために増大するプルトニウムの量は熱中性子利用のリサイクルに使えるようになった。プルトニウムはウラン 235の代わりになり、また高価な分離作業を節約するのでリサイクルの経済にとって非常に価値のあるものである。

燃焼度が増大しつつあるので、再処理で回収されるウランとプルトニウムの同位体組成は大きく変わりつつある。プルトニウムの場合は取り扱い法には何等の新しい問題は起こらないが、ウランの場合はその取り扱い施設は将来起こるであろう放射線の問題に対応せざるを得ないであろう。

現在生産されている再処理回収ウランの量は、再処理能力が増大したので、天然ウランをあまりにも強く汚染するため天然ウランリサイクルには最早供給できない程の量である。

こういう理由でリサイクルの概念が適用されつつあり、そしてその経済性の影響を評価する必要がある。

リサイクルは天然ウランと分離作業を大きく節約できるようにする。しかしながら、商業的および財政的影響は数々の変数と境界条件に左右され、従って燃料サイクルの技術的、物理的特性には関係ない変動に支配されるものである。

それぞれの利用者または国は、それが属している範囲内で一般に行われている条件（運転中の原発の全容量、利用できる燃料サイクル施設とそれぞれの能力、エネルギー供給に関する政策的選定等）に従ってリサイクルの経済的影響を評価しなければならないであろう。

節約の可能な範囲の概観と同じくリサイクルの財政的影響の評価基準を次に示す。

本論文に参照したケースは標準型1300MWeのPWR発電所のものである。

他の型の軽水炉にはこの数字を応用すればよい。

## 2. 軽水炉の燃料サイクルにおけるウランのリサイクル方式

第1図は軽水炉の燃料サイクルの説明図解である。

原子炉と再処理工場は、その間を循環する物質と共にサイクルの極をなしている。簡略にするために、原子炉が必要とする燃料の大部分を占める新しい天然ウランの流入は省略化した。

しかしながら、この計画が自己支持回路（これは“永久機関”であろう）を表すものではないことは明白である。物質は失われ新しく供給されるものと置き換えられる。これらの損失は：

- 炉内の核物質の燃焼（増殖炉のみは消費した以上の核物質を発生する。）
- 濃縮の供給量／生産量比による大きな減少。
- それぞれの段階において一般的に発生するロス。

しかしながら、後者のロスは全く小さく（大きさの度合いで2%）、ここでは省略した。

ウランのリサイクルには基本的に3つの道がある。すなわち：

- 再濃縮
- 濃縮ウランとの混合
- MOX 燃料の担体

それぞれの国または利用者が独自の必要性に従って決めなければならないリサイクルの戦略は、上記の内の1つあるいはこれらの組み合わせを選ぶことによって構成することが出来よう。

現在は品質が悪いこととかあるいは他の考察（すなわち、経済的なバッチ・サイズとな

るまで再処理回収ウランを蓄積する方式)などの理由で使われない再処理回収ウランに対しては、遅延リサイクルの考えが導入された。この場合、硝酸ウラニル (UNH)は安定な固体の形 (例えば $U_3O_8$ ) に転換され、レーザー濃縮とか高速増殖炉での使用など適当な使用法が見出されるかあるいは適当な量の再処理回収ウランが蓄積されるようになるまで貯蔵される。

## 2.1 再濃縮によるリサイクル

この方法は、生産された再処理回収ウランを総べて使える可能性があるので最も重要な道である。しかしながら、これは原料中の同位元素の変動に対して最も鋭敏なリサイクルの方式である。

困難をもたらす不純物あるいは同位元素は基本的には2つの型がある。

- ー 放射能 (すなわち、ウラン 232、アクチニド、核分裂生成物) によって取り扱いが難しくなるもの。
- ー 中性子毒として振舞い燃料の反応度を下げるもの (ボロンおよび他の中性子吸収元素、ウラン 236、わずかながらウラン 234)

第1の場合、国際的に決められた仕様があって、これに適合する再処理回収ウランのみが使用出来ることになっている。仕様の数値は、現在出来ているかあるいは今後10年の間に出来ると思われる物質も使えるように作られている。しかしながら、再処理回収ウラン中にこれらの不純物が存在することは、燃料サイクルにとってその燃料が不利となる原因になろう。

第2の型の不純物は違った種類の影響を与えるものである。ボロンおよび同様な元素の場合は“ボロン当量”と呼ばれる仕様中の数値がその原料の使用を保証するようになっている。

再処理回収ウラン燃料が天然ウラン燃料と同じ反応度を持つようにするために、少し高



く濃縮することによって補償しなければならないのは主にウラン 236による。

再処理回収ウランを再濃縮する場合のもう一つの重要な基準は残留ウラン 235の含有量である。

第2図は4つの異なった初期濃縮度（実曲線）に対する燃焼度の関数としての残留濃縮度を示している。破線による曲線は、同じ濃縮度、燃焼度に対するウラン 236とウラン 235の比を示している。再処理回収ウランは燃焼度が高くなると、2つの不利が重なる、すなわちウラン 235の含有量は少なくなり、中性子を吸収するウラン 236の含有量が多くなる。

この結果、所定の性能を持たせるために再濃縮された再処理回収ウランは同等の性能を持つように設計された天然ウランより高く濃縮しなければならない。

第2図では、初期濃縮度に対する余分の濃縮の程度を燃焼度の関数として考慮した。このためにはウラン 236がウラン 235と共にどのように濃縮されるかを知る必要がある。

第3図は、ウラン 235とウラン 236の濃縮係数の関係を示しているが、これは実績データに基づき推算したものである。（URANITからの情報に負う）

再処理回収ウランを天然ウランと比べて所定の燃焼度に達するようにするために必要な余分の濃度の程度は下記の式で近似値が与えられる。

$$〔再処理ウラン 235〕 = 〔天然ウラン 235〕 + 0.25 \times [ 236Urep ]$$

括弧内はそれぞれの同位体の濃度をパーセントで表したものである。〔 236Urep〕は濃縮後の再処理回収ウラン中のウラン 236の濃度を意味する。

所定の燃焼度に達した照射後の天然ウランから同じ性能の燃料を得るために必要な余分の濃縮度を評価して、この濃縮度を燃焼度の関数としてプロットすると第4図に示す如く大まかに言って直線の関係が得られる。それぞれの天然ウラン燃料の濃縮度に対して適当な範囲の燃焼度が選ばれている。（例えば、初期濃縮度3.05%のウラン 235燃料は誰も50

GWD/tまで燃やそうとはしない。)

結果は、再処理回収ウランは天然ウランより0.6%高く濃縮しなければならないが、それは燃料として同じ性能を得るがためのものであった。

このことの経済的影響はリサイクルの経済に関する検討の中で述べられる。

## 2.2 濃縮ウランとの混合法

これは今までのところ実際上のリサイクルとして実行されてきた形である。しかしながら、再処理容量の増大と共に天然ウランがますます汚染されることを意味するので（そして、これは不利になる）魅力がなくなってきた。

更に（燃焼度をあげることによって再処理回収ウランの）残留濃縮度の減少に伴って、この方法で処理される再処理ウランの量が減少する。ウラン 235を十分に含んだ初装荷炉心の再処理回収ウランの場合は魅力的であるかも知れない。全体から見て、混合法は再処理回収ウランの道としては取るに足りないものとなろう。

## 2.3 MOX燃料の担体としてのリサイクル

同位元素組成の貧しい再処理回収ウランにとって、MOXの担体に使うリサイクルは魅力的である。しかしながら、出来た再処理回収ウランの約20%以下のものしかこの方法には使えないことを強調しなければならない。

再処理回収ウランをMOXの担体として使うことは天然ウランの節約になる。しかしながら、MOXによる真の経済的利益は、プルトニウムの利用によって分離作業が節約出来ることである。

## 3. リサイクルの経済評価

序論で既に述べたように、リサイクルの経済を評価することは、それが多くの変数と境

界条件に左右されるので複雑である。リサイクルは必然的に再処理に結び付いている。いずれにせよ、経済的利益は市場の状況、為替など不定要因によって大きく左右される。しかしながら、もっと一般的な特性としての利益、例えば環境的な有利性とかウラン資源の拡大などがある。

経済的にリサイクルに影響を与える要因には2種類ある。

- － 技術的および物理的要因：これらは、リサイクルを通じてどの位の分離作業と天然ウランを節約することができるか、または同様に一定の量の天然ウランでどの位の電力を発生出来るかを決定する。これらの要因が依存する物理的工程が良く知られているので非常に正確に決定し管理することが出来る。
- － 経済的“市場”の要因
  - 天然ウランの市場価格
  - 役務の価格（再処理、転換、濃縮、燃料製造）
  - 為替

これらは限られた範囲で影響を与えることの出来る要因である。役務に対する価格は再処理回収ウランと MOX燃料の取り扱い施設の現在および将来の容量と能力によって決められる。

天然ウラン燃料の場合と比べ今日では非常に高い役務料ももっと大量取り扱いが可能になった場合には多分大幅に下がると思われる。

もし電力会社が照射済み燃料を再処理してリサイクルしようという判然した意思を確定するならばこれは達せられるであろう。このことはほとんどの欧州諸国と日本では既に事実となっている。

天然ウランの市場価格は世界的な原子力発電の開発とウラン鉱石が入手出来るかどうか依存している。その価格がある範囲になるまで鉱山の開発が進むということは予言されるけれども、不確定な要素が非常に多く残る。

為替に関しては、多くの価格が米ドルを基準としているので重要である。

この報告書の範囲内では、技術的および物理的経済要因のみが検討される。そして商業的影響は興味を持つ人達によって財政的境界条件と彼等自身の事例に適用する変数を使って評価される。

### 3.1 分離作業の節約

リサイクルの最も重要な利益の1つは分離作業コストの節約である。分離作業単位 (SWU) の平均市場価格は約110米ドルである。

分離作業はウランとプルトニウムのリサイクルを通して、両方で節約出来る。

#### 3.1.1 ウランの再濃縮

2.1でウラン 236の存在が再処理回収ウランを等価の天然ウランより高い濃度を必要とすることが示された。

第5図は、燃焼度の関数として濃縮ウラン1 Kg当たり必要とする分離作業単位 (SWU) をプロットしたものである。

廃棄濃度は天然ウランに対しては0.2%、そして再処理回収ウランに対しては0.3%である。天然ウランは水平の線で表されている。これに対応する再処理回収ウランは大体のところ直線の関係にあることが分かる。再処理回収ウランの線がそれに対応する天然ウランの線を横切る点が分離作業単位に関係する分岐点を示す。それは等価の燃料を作る場合と同じ量の分離作業を必要とする再処理回収ウランを得るためには所定の初期濃縮度の天然ウランをどの位の燃焼度で炉から出さねばならないかを大体において示す点である。燃料が少ない燃焼度で炉から取り出されて再処理されたウランは天然ウランの場合より少ない分離作業単位で済む。

この「分離作業単位の分岐点」は所定の濃縮度の燃料に対し、かなり正当な燃焼度に近い所を指しているのです、このことは非常に興味深く注目すべきである。

かくして我々はウラン 235を3.05%に濃縮した燃料に対しては 34GWd/tの燃焼度を見出す。3.35%の燃料に対するこの分岐点は大体 38GWd/tに当たり、3.5%で約 40GWd/t更に4%の燃料では約 47GWd/tである。

もう1つの興味ある事は、これらの交差点は皆およそ直線に並んでいることである。これは「分離作業単位分岐線」と考えられる。

### 3.1.2 プルトニウムのリサイクル

混合酸化物燃料ではプルトニウムがウラン 235に置き換えられる。これは濃縮が不要であることを意味している。

概算として、1 kgの濃縮した天然ウランから得られる照射後の燃料は再処理によって65%の核分裂性物質 (Pu fiss) を含んだプルトニウム1%がもたらされる。すなわち、1 kgの天然ウランの再処理で 6.5 g のPu fissを含むプルトニウムの合計 (Pu tot) 10 g が産み出される。

MOX 燃料は担体物質として天然ウランが使用されると仮定すれば、3.3%のPu fiss含有率となることが推定出来る。

これらの仮定のもとに、6.5 g のPu-fiss で 197 g の MOX燃料を作ることが出来る。

分離作業単位の節約は：

| 等価天然ウランの濃縮度<br>(廃棄濃度 0.2%) | 197gの燃料を作るに要する<br>分離作業単位 (節約) |
|----------------------------|-------------------------------|
| -----                      | -----                         |
| 3.05 % ウラン 235             | 0.87                          |
| 3.35 %                     | 1.00                          |
| 3.50 %                     | 1.07                          |
| 4.00 %                     | 1.29                          |

全体として概算すると、MOX燃料でプルトニウムをリサイクルすると粗くみて20%の必要分離作業を節約出来る。

### 3.2 天然ウランの節約

現在の天然ウランの価格水準（イエローケーキ中の1ポンドのウランに対して約30ドル）では、天然ウランの節約は分離作業の節約に比べ少ない。しかしながら、将来は資源の拡大に貢献するようになるかも知れない。もし、天然ウランの価格が非常に上がると、それに連れて節約の財政に対する影響は増大するであろう。

MOX 燃料 197g は再装荷燃料 1 Kg 当たりでリサイクルされる。もし等価の天然ウラン燃料がウラン 235 で 4 % に濃縮されると、濃縮ウラン 1 Kg 当たり 7.436Kg の天然ウランの供給が必要となる。

(訳注：天然ウランを原料として 4 % 濃縮ウランを 197g つくるのには天然ウランが 1.465Kg 必要である。)

かくして、 $(1.465 - 0.187^*)$  Kg = 1.278Kg が 7.436Kg から節約される。これは約 17% に相当する。再濃縮の場合、節約できる程度は初期濃縮度と燃焼度とに非常に左右される。

(\* 訳注：6.5g Pu fiss を含む 10g の Pu に天然ウラン 187g を混合してつくった MOX 燃料が 4 % 濃縮ウランに相当する。)

照射済燃料 1 kg を再処理することにより再処理回収ウランおよそ 0.950kg が得られるこ

とを考えれば、これによってどの位の量の再濃縮した再処理回収ウランを作ることが出来るか推定出来る。

等価の天然ウラン燃料を同量生産するのに要するであろう天然ウランの量がこの物質の節約量を表す。

第6図は、4つの初期濃縮度に対する燃焼度を関数と考えて表した場合の天然ウランの節約量を示している。これらの節約が燃焼度が上がるに連れて大きく低下することは別に驚くべきことではない。

### 3.3 リサイクルによる追加発電量

これまで、可能性のある天然ウランと分離作業単位の節約についての概念を考察してきた。このことそれ自身はあまり大切ではないけれども、燃料の1kg当たりの価格を下げる事が出来る。電力会社にとっては、所定の量の天然ウランを買って発電する場合、使い捨て方式よりもリサイクルした方がどの位余分に発電出来るだろうかということは非常に興味深い問題である。炉心に供給される電力のkWh当たりの燃料費の合計はリサイクルの所定の方式が商業的にやり甲斐のあるものであるかないかに関する決定要因となろう。

効率33%の標準型 1300MWeの PWRを考えた場合、我々は1GWd/tの燃焼度は7,920KWhの発電および売電に相当することを見出している。

この評価は、今日では PWRに対しては通常の濃縮度である。天然ウラン燃料に対する濃縮度がウラン 235で 3.5%と 4.0%のものに対して行われたものである。供給物質天然ウラン1トンによる発電量が計算され、燃焼度の関数としてプロットされた。そして、これに対応する再処理生成物をリサイクルすることによって発生された電力量が計算された。このために、再処理回収ウランは全量再濃縮され、プルトニウムは MOX燃料として担体天然ウランと共にリサイクルされるべきであると考えられた。

第6図と第7図がこれらをプロットしたものである。

再濃縮された再処理回収ウランで発電された電力量はウラン 236による損失を補うため

により高い濃縮度を必要とするから燃焼するに伴い減少する。その結果、再濃縮された再処理回収ウランの有効な量も燃焼が進むに連れて減少する。

このようにして発電された追加電力量はおよそのところ  $1.5 \times 10$  KWhと一定であることは興味深いことである。

このことは、リサイクルによって燃料の生産性を約30から40%の範囲で燃焼度に反比例して増大させることが出来ることを意味している。

#### 4. 結 論

リサイクルによって燃料の生産性が30～40%の範囲で増大することは非常に印象的である。

繰り返しのリサイクルはこれを数パーセント増加させるであろう、しかし濃縮する間にリサイクルされたウランが大量に減るので、最早大きく関与しない。

再濃縮された再処理ウラン燃料から回収されるウランは、リサイクルには使えない程のウラン 236とウラン 233を含んでいる。

しかしながら、再処理回収ウランが膨大な量出来るようになる第2世代、つまり燃料を炉心外に10年、炉心内に4年置くようになる頃にはレーザー濃縮が実用になるはずである。

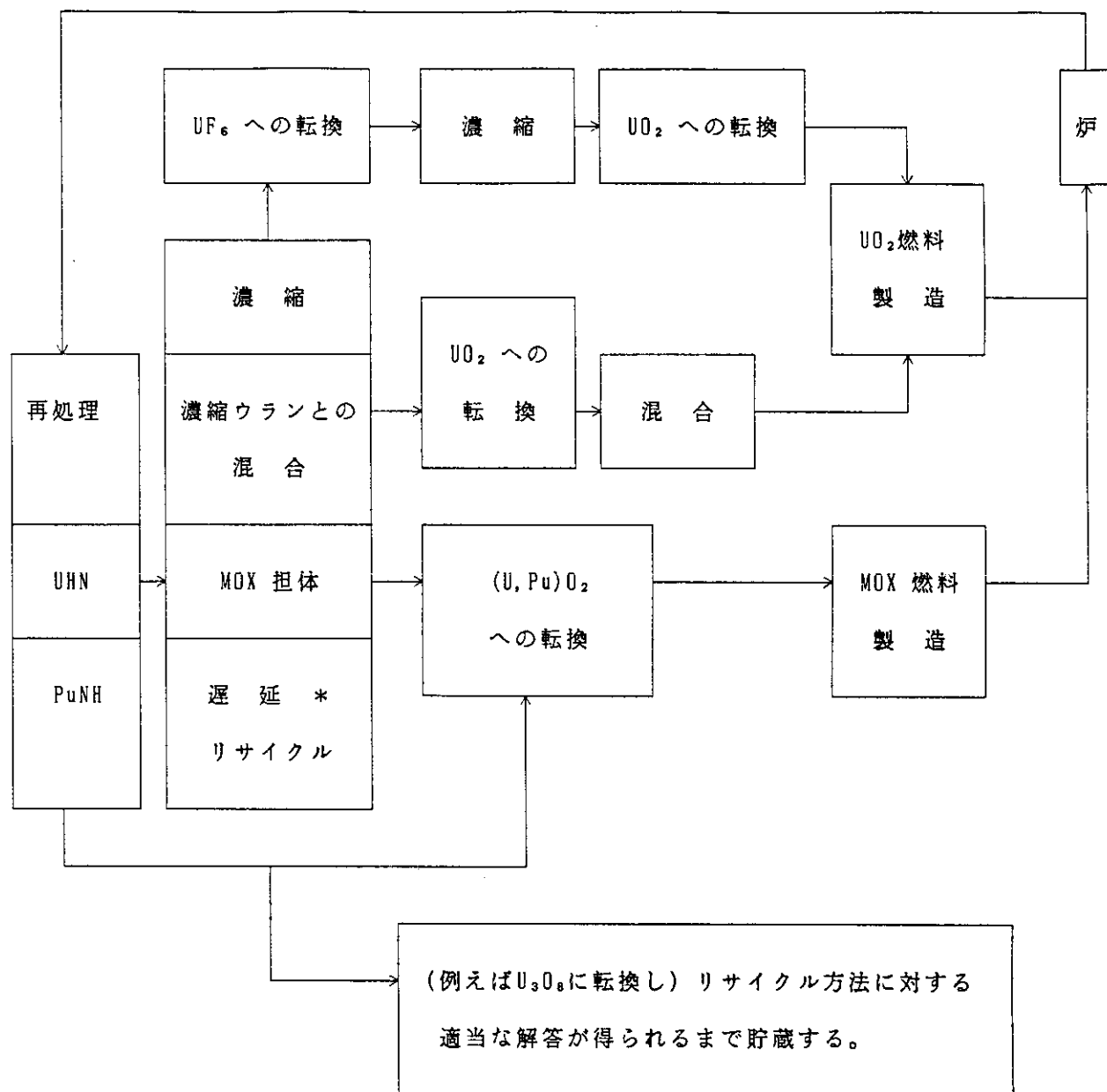
これは選ばれた同位元素（例えばウラン 235）のみを濃縮するので、再濃縮を利用する全天然ウランのリサイクルは経済的に興味のあるものになるだろう。再処理回収ウランの廃棄濃度 0.3%はまたレーザー濃縮に対して強い刺激を与えるものである。

しかしながら、リサイクルが直ちに商業的に興味のあるものになるかどうか、すなわち、発電量 1 kWh 当たりの全燃料費が使い捨てサイクルより低いかどうかは使用者にとってはどうにもならない幾つかの問題を含む多くの要因に左右される。

一方、事態を調査し、リサイクルによって kWh当たりの発電に安い燃料が使えると言う商業的に刺激のあるやり方で、発電所の容量と燃料製造方法を楽観することに産業界まで



もとり込まれている。このことは、再処理工場の計画、建造物、試運転と協力して理論的に進めるべきものである。



\* これは同位元素の組成の乏しいもの例えば、ウラン 235 が少なくウラン 236 の多いものにされるであろう。

第 1 図 軽水炉の燃料サイクル

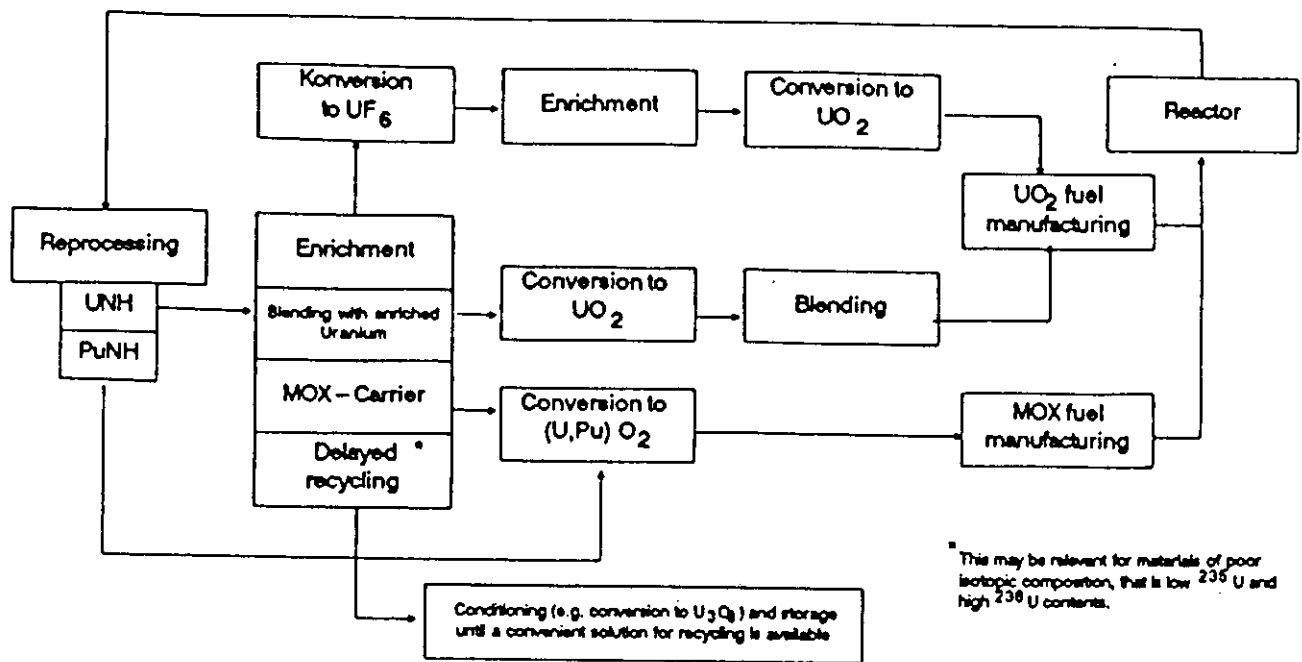


Figure 1: The LWR fuel cycle

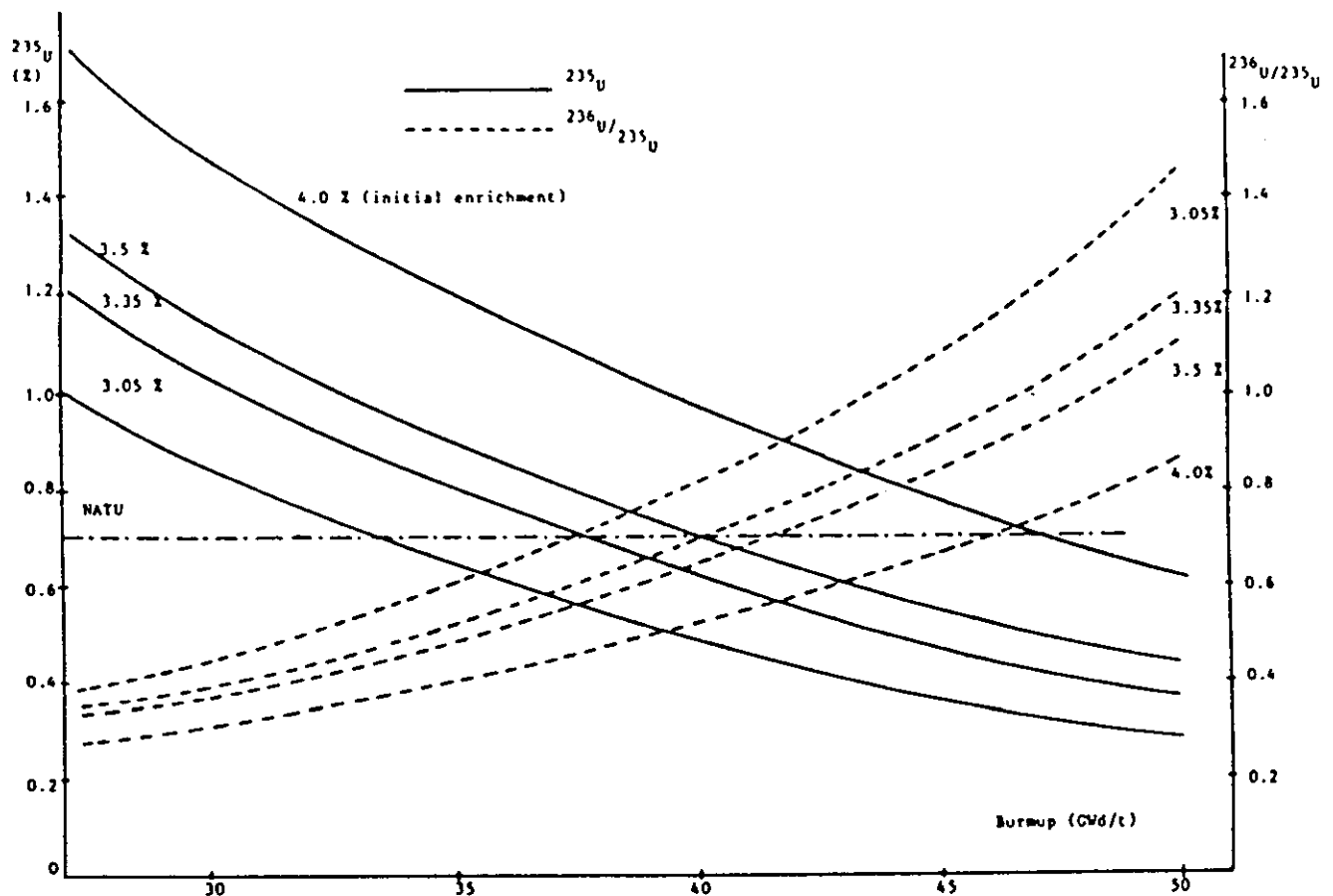


Figure 2: remaining <sup>235</sup>U concentration and <sup>236</sup>U/<sup>235</sup>U ratio as a function of burnup, for 4 different initial fuel enrichments

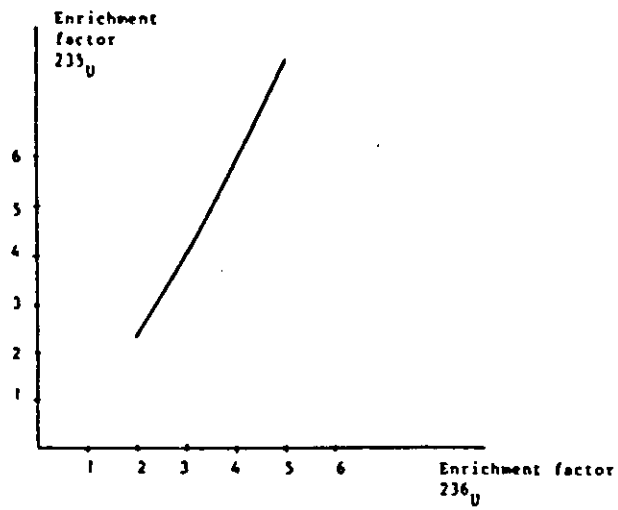


Figure 3: relation between enrichment of  $^{235}\text{U}$  and  $^{236}\text{U}$

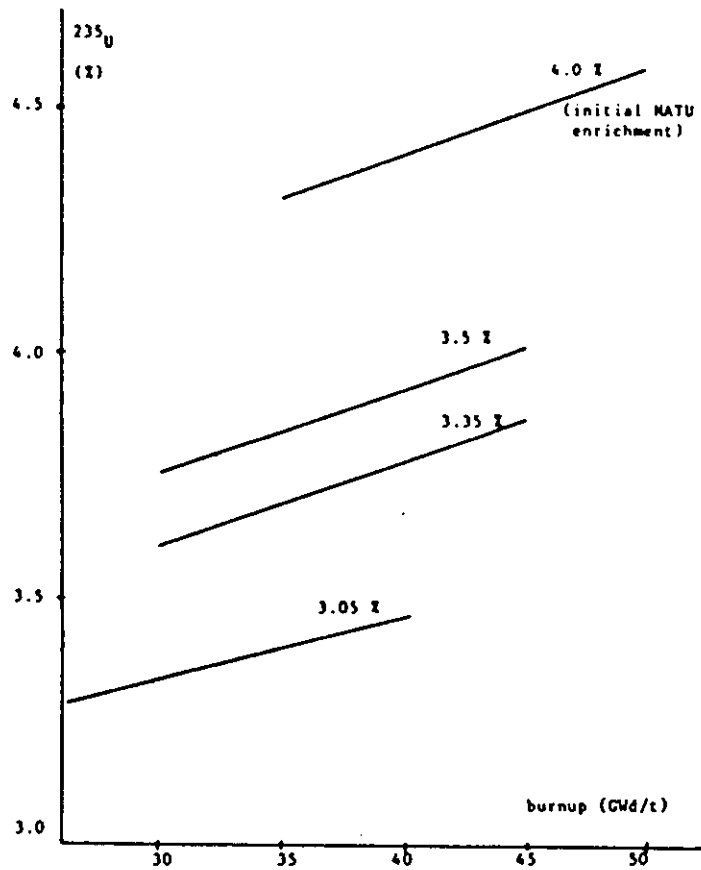


Figure 4: equivalent enrichment of REPU obtained from reprocessing of NATU fuel with a given initial enrichment, as a function of burnup

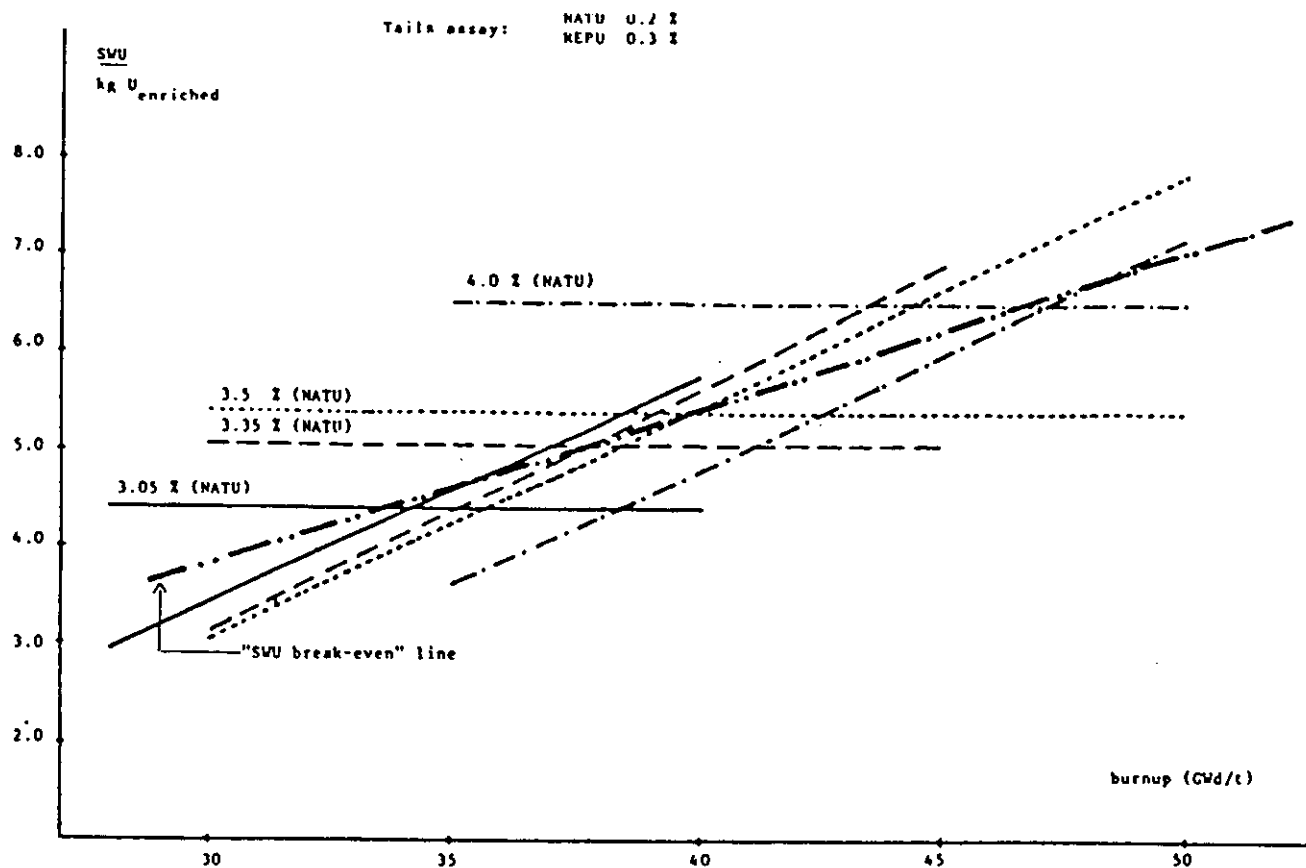


Figure 5: separative work per kg of enriched uranium for natural uranium, and for equivalent REPU obtained through reprocessing of irradiated NATU of a given initial enrichment

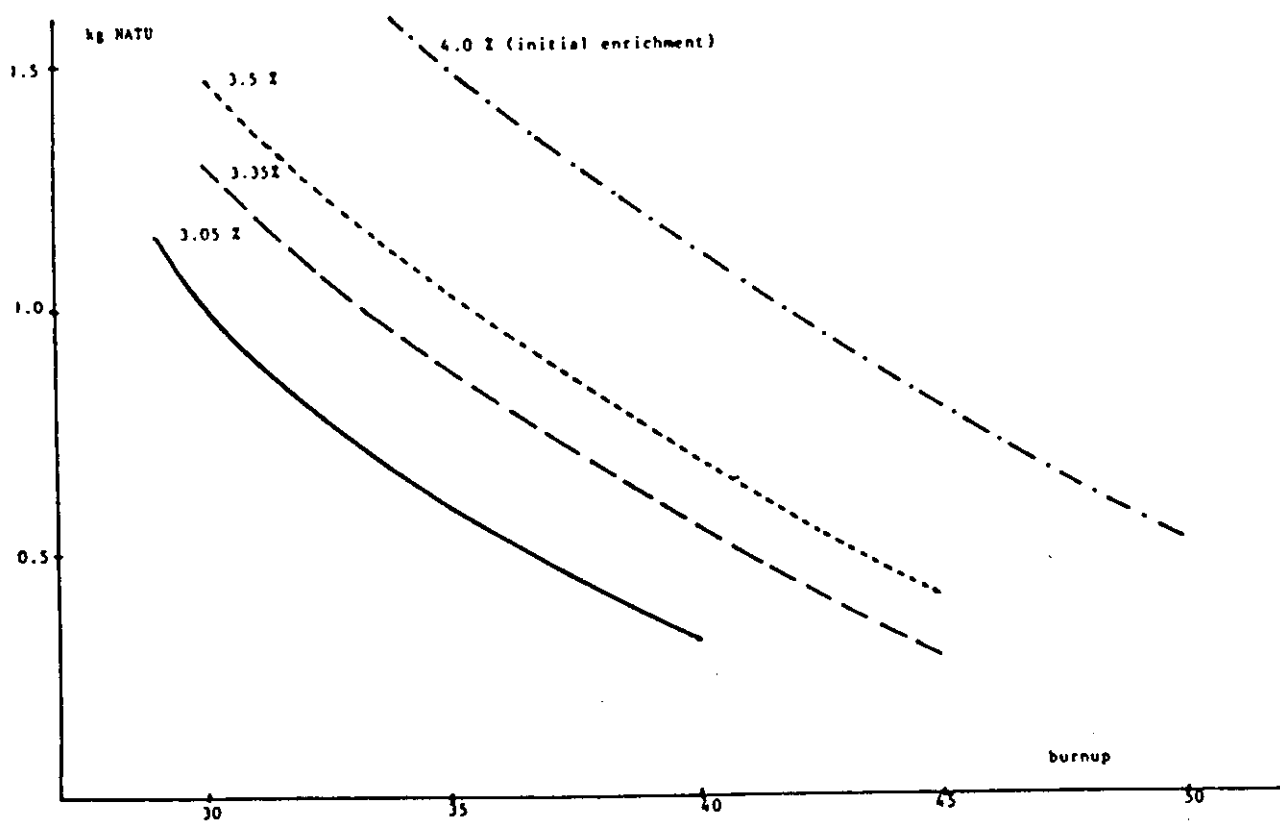


Figure 6: natural uranium savings when recycling REPU obtained from reprocessing irradiated NATU fuel of given initial enrichment and burnup

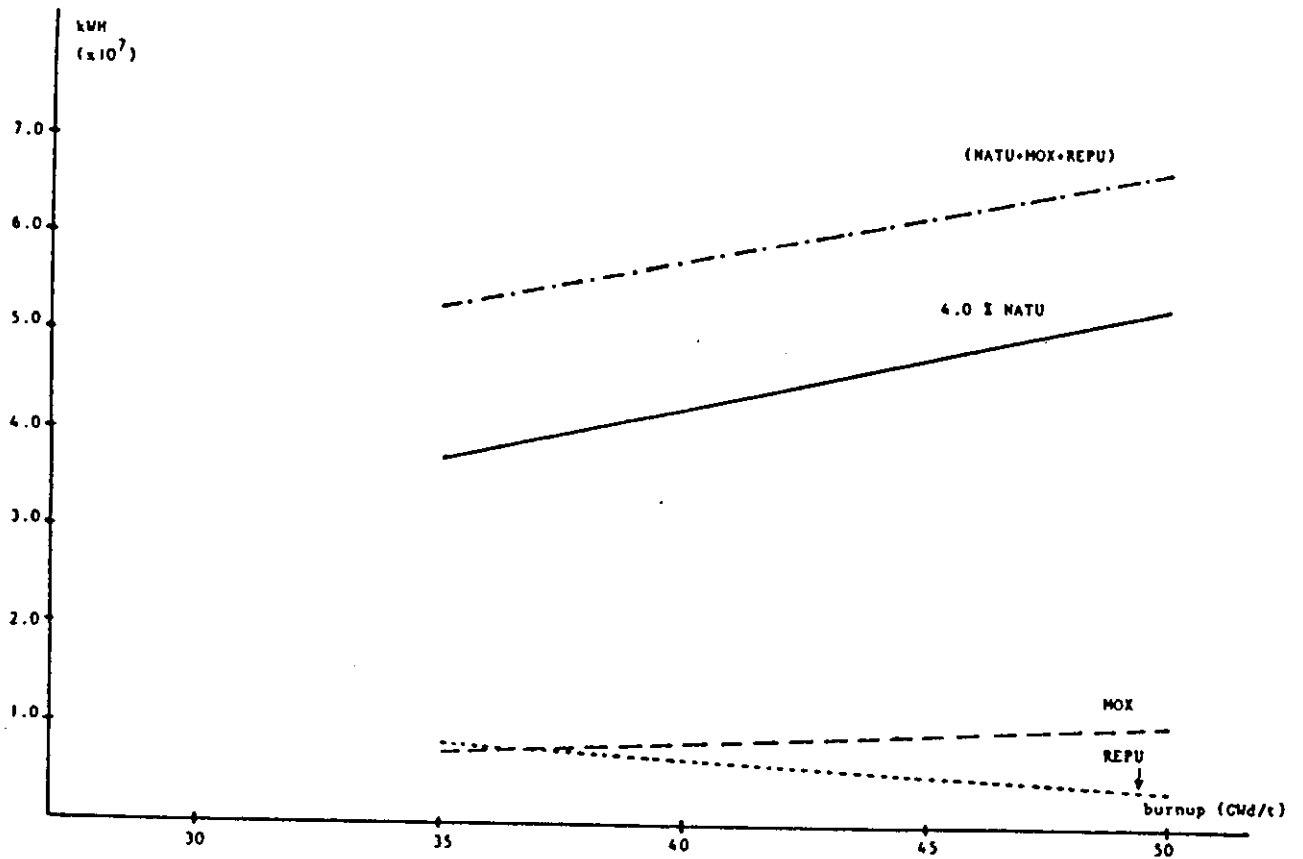


Figure 7: electricity production from 1 t of NATU enriched to 4% (—), and from recycling the REPU by reenrichment (---) and the plutonium in MOX fuel (---). The upper line (-----) gives the sum.

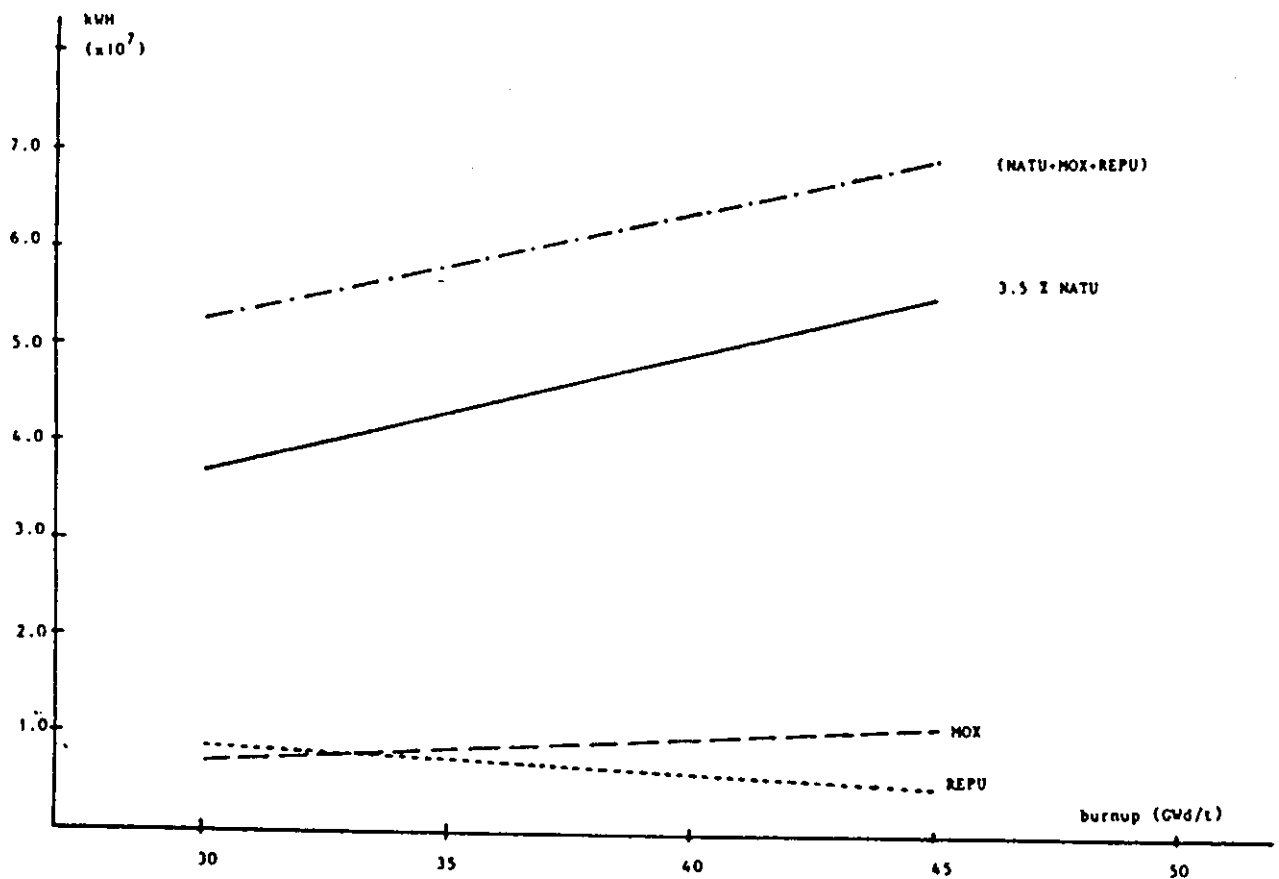


Figure 8: electricity production from 1 t of NATU enriched to 3.5% (—), and from recycling the REPU by reenrichment (---) and the plutonium in MOX fuel (---). The upper line (-----) gives the sum.

国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部ウィーン 1988年10月11日～14日

---

フランスの核燃料管理の展望

M. プレスタ (フランス電力庁)

J. M. ギョー (フランス核燃料公社)

#### 4. フランス核燃料サイクル事業の改善

EDF（フランス電力庁）の炉心燃料取り替えの新方策と燃料リサイクルの方針とは、COGEMAおよび他の燃料サイクル会社によって行われるべき、燃料サイクル役務の要求を生み出した。

新しい燃料サイクル役務の要求は、各社が以前に計画したものとは違っているので、濃縮度や加工の管理において新しく柔軟性が高められ或いは創り出されて来た。

EURODIF（ユーロディフフランス濃縮会社）は EDFから、サービスの質を保ちながら生産計画の立案と、柔軟性の立場から新しい炉心燃料取り替え方策にとり組む課題を与えられた。新しい管理の特色は、顧客による短期通知による製造に適合するように開発されている。この点について1988年から1990年まで10億フランが、トリカスタンのジョルジュ・ベス濃縮施設の生産設備に投資されるであろう。この投資は操業の柔軟性を目的とする仕事に使われるものであって、それによって発電の運営に急速で頻繁な改変が可能になる。この期間において施設は完全操業が行われ、顧客への納入は常に満足されるであろう。トリカスタン地域にある4つの発電炉で EDFはユーロディフへの電力を供給している。関係機関の緊密な協力によってユーロディフの生産計画は需要のピーク以外の時期に集中して行われる。

フラジェマ (FRAGEM) もまた特に燃焼度上昇の目標による、EDFの新しい燃料取り替え方策に関係があると思われる。

今までにフラジェマは90万KWと 130万KW 発電炉用に、工業規模で、新しい燃料のタイプの AFA（改良型燃料集合体）を生産しているが、それには取外しの出来る頭部および底部のノズルならびにインコネルばね付のジルカロイの格子がついている。

90万KW炉について AFA燃料への移行を完成するのは1990年と予定されており、130万KW炉についてのこの移行は1988年に始まった。

将来（1990年）以降に向けて、約60,000MWd/t もの非常に高い燃焼度に達するような新しい燃料の構想 (AFA-X1) の研究と実験が行われている。

数本の燃料棒は既にグラブリース発電炉の炉心に装荷されている。

## 5. 再処理回収物質のリサイクルの開発

プルトニウム：

再処理事業（ラ・アーク工場）の稼働によってプルトニウムが生成されるが、それは混合酸化物(MOX)燃料の形で軽水炉に装荷される。

EDF の現在のプログラムはこれらのプルトニウムを、いくつかのフランスの90万KW加圧水型炉に MOX燃料を導入することで、取り替え燃料の 1/3の割合で使おうと計画している。

コモックス (COMMOX) とフラジェマは既に EDFのサンローラン B1 発電炉に MOX集合体を納入しているが、この炉は EDFとしては最初に1987年に MOX燃料が装荷されたのである。

コモックスは製造能力の拡張を準備している。

次の2つのプロジェクトが進められている：

- ー メロックス (MELOX)、コジェマのマルクルの用地内に年産 100トン工場の建設。
- ー デモックス (DEMOX)、デッセルにあるベルゴニュクリアの工場の年産量35トンを拡大する。

再処理回収ウラン：

再処理回収ウランをリサイクルすることは、核燃料サイクルを完結することによってその経済性を改善することに熱心な電力会社にとっては実行可能な選択である。

コジェマとフランスの核燃料サイクル会社は既に、再処理回収ウランのリサイクルに関連した役務を提供している。

1986年にコジェマとコミュレックス (COMURHEX-フランスの転換会社) は合併会社ユレップ (UREP)を設立し、再処理回収ウランを六弗化ウラン ( $UF_6$ )または $U_3O_8$ または  $UO_2$ のどれかに転換する分野において、貯蔵と輸送の役務を提供することに貢献した。

硝酸ウラニル (UNH)の  $UF_6$ への転換は、ピエルラットでコミュレックスが事業化した年産 350トン工場で行われており、一方硝酸ウラニルから $U_3O_8$ または  $UO_2$ への転換は、同じくピエルラットにある年産 600トンのコジェマのTU2 工場によって遂行されている。

コジェマとユーロディフの合同システムは、再処理回収ウランをやがては特別な操業期間 (キャンペーン) で取扱うことになるだろう。

次の世紀の初めには、レーザー濃縮法が工業的に実施されるようになれば、重要でない (マイナーの) 同位元素によって生じる不都合は避けられることになるだろう。コジェマの親



会社に当るCEA（フランス原子力庁）はこの分野での研究開発を担当している。

フラジェマは既に再処理回収ウランを含む集合体を製造している。同社は EDFに対して再処理回収ウランの集合体を1987年に納入している。その集合体はクリュア（Cruas）発電炉の炉心に装荷されている。

## 6. 結論

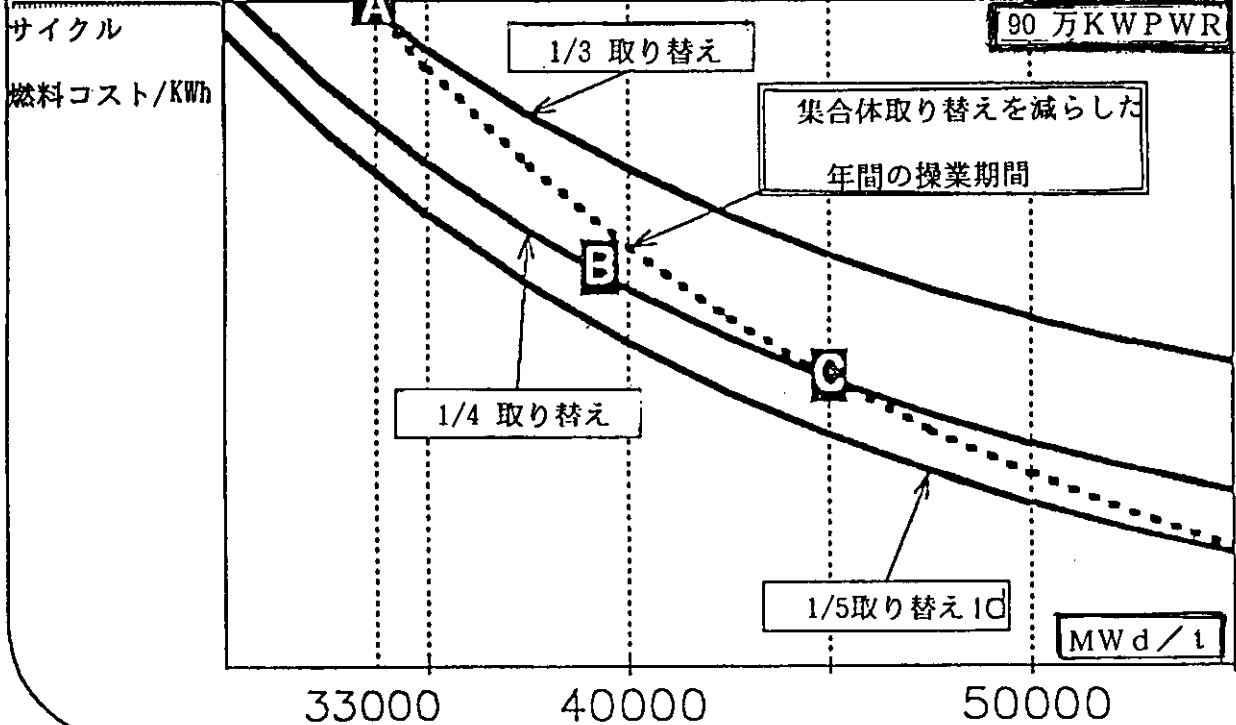
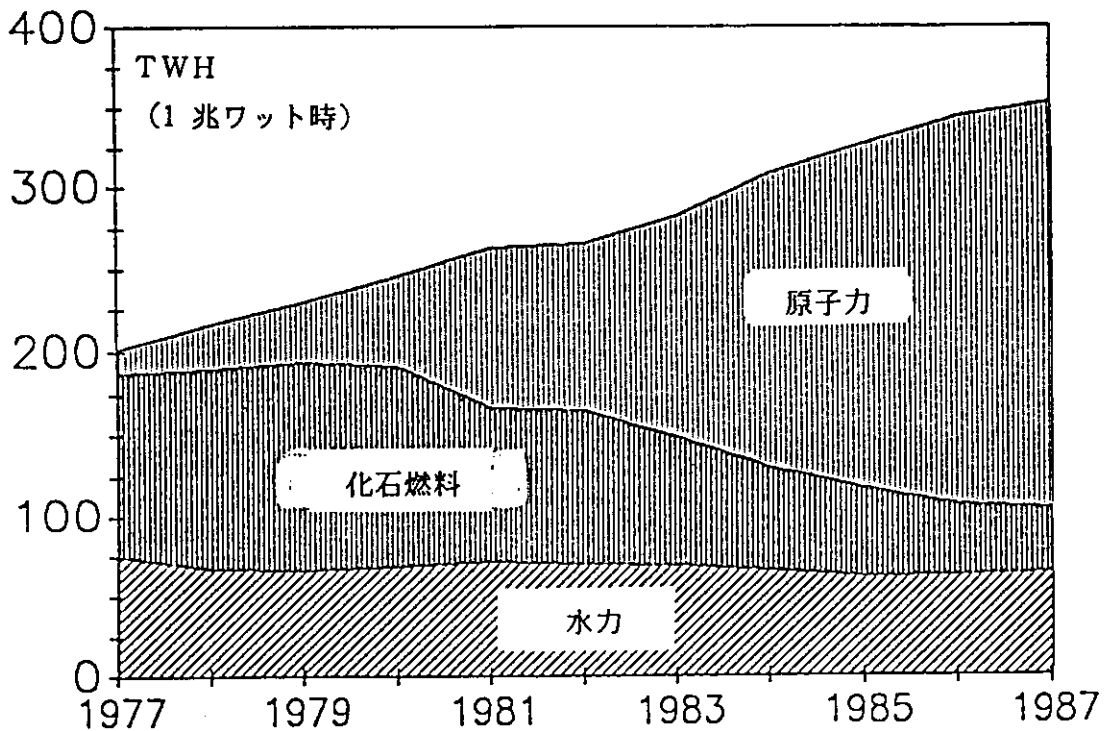
EDF によって開発されたフランスの原子力プログラムは、信頼ができてかつ自国産のエネルギー供給という基本的な必要性に由来している。今や、そのゴールは明らかに達成している。

電力システムについての他よりもっと正確な管理によって、EDFが燃料取り替えと言う観念について適用できる解決を見出すに至ったことに、我々は気がついたのである。

その戦略を電力需要という事態に対しても適用することは可能である。

コジェマならびにフランスの核燃料サイクル産業が、過去において変化する顧客の要求に適應することを立証した能力は、彼らにこれから先の何年間に対しても自信をもって立ち向わせるのである。

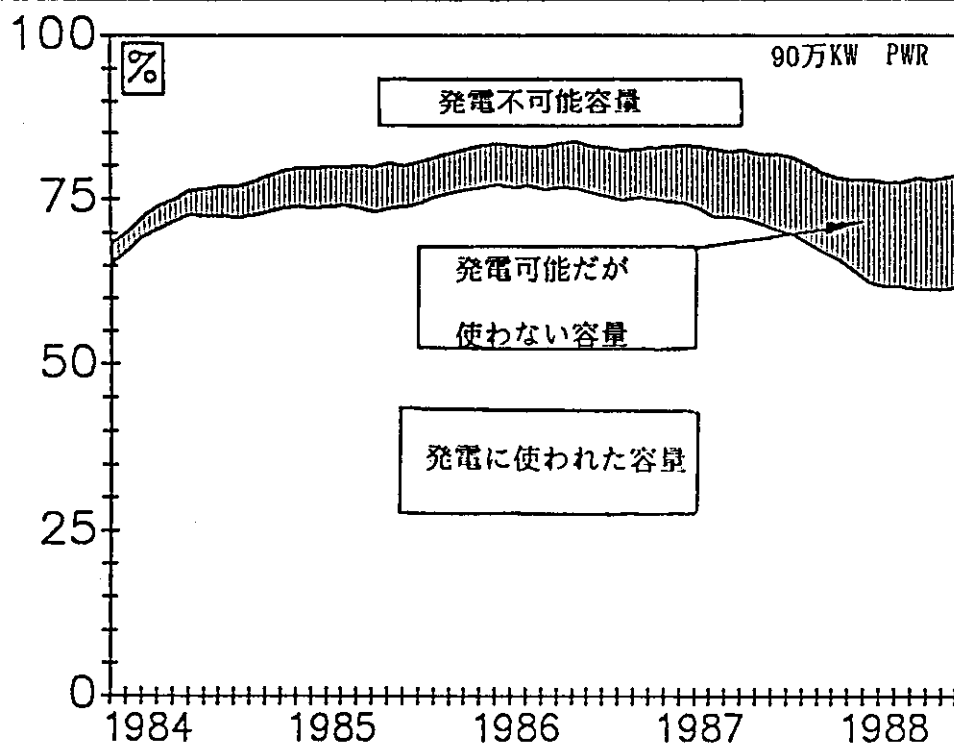
さらに柔軟で洗練されたサービスまで行うことが原子力発電の競争力を強化するであろう。



EDF  
燃料部

EDFの90万KW発電所の  
(発電容量)調整の増加

IAEA  
1988年10月  
第3図



国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部ウィーン 1988年10月11日～14日

---

T1-TC-665 8

中国における低濃縮ウランの経済性

刘乔生 (LIU QIAOSHENG)

武德明 (WU DEMING )

中国核工業総公司

P. O. Box 2102-10, 北京, 中国

## 要 約

ウラン濃縮産業のさまざまなプロセスの現状と発展の傾向に関する簡単な概括を行った。またガス拡散法（GD）とガス遠心分離法（GC）との両者のプロセスの長所と短所について記述し、主要経済指標間の比較および推定を行った。その指標の内訳は単位当たりの建設費（capital cost）、同じく電力消費、分離能力の単位当たりのコストの構成、機器の寿命および工場の建設期間などである。

工業的なウラン同位体の分離方法をいかにして選択するかについての見解を述べた。

最後に、中国におけるガス拡散法の分離作業単位当たりのコストを低減する方法についても論じた。

## 1. 序 言

ウラン濃縮技術として、すでに工業規模に達しているかあるいは非常に将来性のあるものは、ガス拡散法(GD)、ガス遠心分離法(GC)、レーザー同位体分離法(LIS)、化学法および空気力学法等である。

拡散法は、ウラン濃縮業界の歴史においては現在に到るまで主導的地位を占めてきた。現在でも全世界の濃縮ウランの需要の95%以上\*は依然として拡散法に依存している。

現在、遠心法は工業的にも経済的にも成熟期に達した。米国エネルギー省は、遠心法の開発プロジェクトの中止を決めたが、他の数カ国では今なお遠心法の開発を続けている。

レーザー法がさらに注目されるようになった理由は、その経済性とより高い分離係数において期待される有利性である。これによってガス拡散工場において生じた劣化(stripped)ウランがさらに分離されるので、ウラン資源をフルにかつ合理的に使うことが可能になる。しかし工業的利用の域に達するためには、レーザー濃縮法についての一連の問題点を解決しなければならない。拡散法は当分の間、ウラン濃縮の最も重要な工業的方法として存続するであろう。

中国は発展途上の国であって経済はそれほど豊かではない。原子力発電の開発に伴う核燃料に対する需要の増大に対応するためには、核燃料産業を原子力発電と同時に発展させなければならない。拡散法は、比較的長期における原子力発電の発展に必要な、安定かつ信頼できるウラン濃縮役務を主として行うという点で、信頼される方法である。さらに、進歩した遠心法とレーザー法も実際に中国で開発されるであろう。

〔\* 訳注：URENCOは本会議の報告の中で10%のシェアをもつと発表している。〕

## 2. 拡散法と遠心法の比較

拡散法と遠心法との評価については、我々にとって関心がありかつ役に立つ多くの意見が出されている。これらの中から、著者たちは、両方の技術を評価するあいだに、込み入った要因が含まれていることを認識するのである。その要因とは現存するウラン濃縮事業

の基盤、原子力発電用の濃縮ウランの需要の緊急度、エネルギー資源の状況および国家の工業的ならびに技術的レベル等である。したがって決定は、それぞれの国の慣行に応じて賛否両論を吟味し、広範囲にわたり考慮して行う必要がある。

## 2.1. 遠心法の長所

遠心法の長所は主として以下の通りである：

### － 低い電力消費（電力原単位）

遠心法における電力消費は拡散法のそれの約  $1/8$  から  $1/10$  である。このように遠心法の工場の所要電力は比較的少ないのである。その結果、工場に適合した発電所の建設に関する重圧は軽減される。このことは特に電力資源の不足している国にとっては有利である。同時に単位分離作業当りの原価における電力コストが占める割合は大きく減少している。（第1表参照）

### － 高い段分離係数（High Stage Separation Factor）

このようにカスケードにおける段の全数は、同じ濃縮度に達するための拡散法のそれよりは少ない。

### － 操業期間中の柔軟性と少ないカスケード

同じ型の遠心機を異なる数、並列に結合することによって、異なる段において異なる処理量とすることが容易に実現される。そしてカスケードのホールドアップが少ないことは濃縮途中のウランが工場内（設備内）に滞留する量が少ないことを意味している。

### － 小規模の経済性

したがって資金調達は一層容易であり、工場建設期間もより短くなる。これに加えて、工場を段階的に拡張させるためにモジュラー形で建設することができる。

### － 分離作業単位当りのコストを低減するための大きな可能性

個別の機器の分離能力は材料と製造能力の開発によって向上するので、それに応じて分離作業単位当りのコストは低減するであろう。

## 2.2. 遠心法の短所

遠心法は上述の通り明らかな長所をもってはいるが。ウラン濃縮産業界の現実の経過は、

拡散法よりは成長が遅かったことがわかる。これは、拡散法と比較した場合、2つの避けられない不利益性が存在しているからである：

－製造技術はより困難でありかつより精密である。

このような理由で遠心機の価格はより高く工場建設の初期投資額もより大きくなる。単位資本費は拡散法の約1.4倍である。

－経済性は遠心機の寿命により敏感である。

遠心機の寿命は通常約8年から10年である。したがって経済性は遠心機の寿命に対していっそう敏感である。操業費用および保守費用は自然故障率が仮に1%以下であっても拡散法よりは高い。

したがって、遠心法の分離作業単位当りのコストを低減する主要な方法は次の通りである：

すなわち遠心機の製造コストを下げ、もっと性能の良い遠心機を開発し、寿命を延ばすことによって、資本費と運転維持費を低減することである。

### 2.3. 拡散法の有利性

遠心法の有利性として上に述べたことは、まさしく拡散法の主たる不利益性に当ることを認識しなければならない。特に電力消費に関しては、電力コストが増加している情勢下では明らかに拡散法の今後の発展を制限するものである。これに反して、拡散法は未だに活性を保っており、速く捨てられるということはなかったし、比較的長期間にわたって濃縮ウランの供給にもっと貢献するであろうということに留意しなければならない。なぜならば、それは次のような無視できない有利性による。：

－拡散法は長期間操業してきたので、信頼性がありかつ成熟しており、特に運転経験という財産が蓄積されている。

－操業は安全で信頼性がある。カスケードの効率はや遠心法よりは高い。

－比較的大きな範囲にわたる、製品の豊富さと生産量の変動があっても分離作業単位当り



のコストに小さな変動を与えるだけである。1つのカスケードは、市場のさまざまな要求に適合して、種々の数量で二三のタイプの製品をつくることができる。

第1表. 分離作業単位当りのコストの構成

| 項 目      | 単 位 | 拡散法   | 遠心法   |
|----------|-----|-------|-------|
| 資本費      | %   | 30-32 | 78-80 |
| 電力費      | %   | 55-60 | 8-10  |
| 操業および保守費 | %   | 9-10  | 10-12 |

#### 2.4. 濃縮技術選択の基準

上記の分析によれば、拡散法と遠心法の両者はその固有の有利性と不利益性をもっていることがわかる。いずれの技術も一定の条件の下では比較的良い経済的利益を得ることができるし、いずれの国もそれぞれの情勢にしたがって自国のウラン濃縮政策を決定するであろう。考慮されなければならない基準は次の通りである：

- 自国のウラン濃縮産業の現況
- 濃縮ウランの需要の緊急度とその安定性
- 電力とその価格の予想
- 資金調達
- 自国の工業的および技術的基盤
- その他

### 3. 中国における拡散法の分離作業単位当りのコストを低減する方法

中国におけるガス拡散工場は多年にわたって安全に操業されている。原子力の発展と共にウラン濃縮役務に対する需要は増大している。拡散法が依然として濃縮ウラン製造法の主要な方法であるだろうと期待されている。原子力発電のコストを減らすべく安い濃縮ウランを供給するためには、拡散法の分離作業単位当りのコストを低減する何らかの有効な手順が採用されることが必要である。例えば、柔軟性のある操業方式の採用、電力消費の減少およびカスケード効率の向上などの多くの局面において、多年にわたって間断のない努力がなされてきた。

その結果、現実的でかつ明瞭な効果が達成された。

#### 3.1. カスケード効率の向上

カスケードの操業効率を97%以上に保つという条件下では、製品の豊富さや生産量についてのさまざまな要求に従って、可能性を引出したり電力消費を減らしたりするための有効なカスケードの配列が求められる。特に負荷を減らした条件下のカスケード配列については、カスケードの運転効率は負荷がフルにある場合のそれよりも低くはないということは確かである。そしてそれゆえに、不均衡な生産の経済性を最適条件に到達させるのである。

#### 3.2. 柔軟性のある操業方式

3.2.1. さまざまな負荷についての操業計画は、降水量の高いかあるいは低い季節における種々の電力価格に応じて採用される。

拡散法の分離作業単位のコストにおける電力コストのパーセンテージが50%以上であるので、分離作業単位のコストを下げるためには電力コストが下げられなければならない。拡散法に必要な電力は一部は水力発電からくる。水力発電の量とコストは季節に大きく影響される。拡散法の電力負荷は大きくその安定度は高いという特性を考慮する。電力供給部 (Department of Power Supply) は電力価格を季節によって変える政策を実施しており、豊水期と渇水期の電力価格差は約40%である。これに対応して、拡散法の電力コストを下

げるために柔軟性のある操業方式が採用されている。年間全体にわたる平均した生産はもはや行われなくて、異なった季節には異なった操業計画が用いられる。機器の負荷は、豊水期には電力料金が安くなるので、できる限り高く増大される。これに反して渇水期には電力料金が高くなり、機器の処理量を減少するかあるいは、一部の機器グループが停止されて、それより多い機器グループは負荷を下げて電力消費を削減するために、保守用に配置される。豊水期と渇水期の電力消費の差は約30%であり、年間全体の電力コストは約3%から4%削減される。

### 3.2.2. 廃棄濃度の最適化

一般に拡散法の廃棄濃度は0.25%から0.32%の範囲でコントロールされる。最近では、季節によって負荷が異なることを考慮すると共に生産割り当ての調整にも応じて、もっと経済的な廃棄濃度が追求されている。経済分析の結果、電力原単位を削減しかつ計画上の電力消費限度基準を越えないことが確実な条件の下で、廃棄濃度は一定の範囲内で最適化される。

### 3.3. 技術的改善の続行

拡散法工場が操業に入ってから以来、主系統および補助系統の技術的改善が断続的に進められた。その結果、拡散法の主要経済指数は漸次改善されており、経済的な利益は年々向上している。採用された主要な対策は次の通りである：

- －拡散法の機器のモーターとベアリングは流量が増加するように改善された。
- －分離隔膜の性能は、個別の段の分離能力を増加するように改良された。
- －コンプレッサーは効率を高めその結果として段分離係数を上げるように改良された。
- －コンプレッサーのベアリングの故障率を低減するために、ベアリングの稼働条件を改良するか、あるいはより良い性能のベアリングが使用され、それによって機器のトラブルによる停止が減少して、拡散用機器の運転期間を延長することになった。
- －カスケードの負荷に適応するような補助システムについて、柔軟な経済的操業方式が採用された。

以上

国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部ウィーン 1988年10月11日－14日

---

T1-TC-665

濃縮と燃料サイクルの開発

Dr. R. B. キーホー

URENCO

英国

## 濃 縮 と 燃 料 サ イ ク ル の 開 発

### 内 訳

1. 核燃料サイクル
2. 濃縮
3. 遠心分離工場
4. 燃料サイクルの経済性
5. ウラン燃料の再処理
6. リサイクルしたウランの濃縮
7. 混合酸化物燃料(MOX燃料)
8. 結論

## 1. 核燃料サイクル

2000年までの世界の原子力発電計画は今後6年位までに建設が始まるか否かはっきりしない発電所の計画による不確かさを別にすればかなり明確である。例えば、経済協力開発機構(OECD)の赤本はよく知られた世論を紹介しており、他方多くの民間の組織やURENCOを含む公共機関は彼等自身なりの判断を夫々示しているが、それらは皆同じようなものである。

第1図は、2000年までに建設される原子力発電所の容量の予測を示す。

現在の容量、約270GWは世紀が変われば340GWに増えるの見越されるが、これは25%以上の増加に当たる。原子炉への装荷燃料の総量から必要となるウラン総量と分離作業量の全量を見積もることができる。(第2図および第3図)

核燃料サイクル産業界は核燃料サイクルを完成させることに努力し、国際化を確立できた：第4図は西側世界の核燃料サイクルの分野で、ウランの生産、転換、濃縮および成型加工に関係している主な国々を示している。もちろん、合理化案と国家主義とが国際間の可能な組み合わせの数を制限する。それにもかかわらず商業上の競争が競争的国際市場を保証し、また電力会社の燃料計画担当者に対して幅広い選択権を与える。

## 2. 濃縮

濃縮役務はフランスのユーロディフ(Eurodif)、西ドイツ、イギリスおよびオランダのウレンコ(Urenco)、ソ連のテクスナブエクスポート(Technobexport)およびアメリカのエネルギー省(DOE)によって供給される。

1972年頃まで、濃縮ウランの供給は事実上米国エネルギー省の独占であった。しかし数カ国においては濃縮する能力が有り、米国の独占を打破しようとする工業的また商業的意図があった。原子力投資の予測水準が米国における3つの拡散工場の主なカスケードの改善と計画の格上げ、ユーロディフ工場の建設、ソ連の西側市場への参入に道を開いた。これらはすべてガス拡散法を使用している。一方、英独和グループのウレンコはガス遠心法

の先駆者として組織された。かくして、西側で利用できる総量は大体40,000teSW／年に達したが、この量は後退した原子力発電計画の約70%を越すものである。

この過剰設備容量が激しい競争を導いた。ウレンコはその進歩的なモジュール式工場の拡張を契約で決められた出荷に注意深くあわせながら工場の100%利用を維持するという幸運な立場にあった。かくてウレンコはその強力な目標を保ち今や全世界の約10%の市場占有率を有している（第5図）。ウレンコは最近主要電力会社との契約締結を続けることになった。

### 3. 遠心分離工場

遠心分離機は本来出力の低い機器である。その分離力は年1kgのオーダーである。従って我々はトンの単位で原子炉に必要な所要濃度（2-4.5%）のものを作るために数百から数千個の遠心分離機をカスケード配列に接続する。このことは、増加量の単位とは、カスケードまたは多分100teSW／年の能力を持つ幾つかのカスケードによる運転単位を意味している。

これは幾つかの利点を持っている。

- ー この運転単位の設備増設をより早くしたり遅くしたりすることにより、工場の生産能力を必要な出荷計画に合わせることができる。
- ー 遠心分離機の設計に最新技術改善を、それが実証されるや否や取り入れることができる。

さらに有利な点は、遠心分離機が消費する電力は少なく1kgの分離作業当たり50kWhオーダーであるから、遠心分離工場を造ることによる電力料金の上昇に神経質になり過ぎることはないということである。

ウレンコの工場は、オランダのアルメロ(Almelo)、英国のカーペンハースト(Capenhurst)

t)および西独のグロナウ(Gronau)にある。第6図に示すようにウレンコの全分離作業能力は1987年末において 2,150teSWであった。現在は、約2,300teSW/年である。

主な濃縮法の関連性を広く概観することは意味深いことである。

第1世代の濃縮法 ; ガス拡散

第2世代の濃縮法 ; ガス遠心分離(改良型は第3世代へ)

第3世代の濃縮法 ; 原子法レーザー(AVLIS), 分子法レーザー(MLIS)

現状では他の濃縮業者は第1世代のガス拡散法に依存している。もちろん彼等はそのままでいる訳ではない; 圧縮機の改善や、凝縮機-蒸発機を負荷追従型にする等の改良が可能である。彼等は数年前に第2世代の遠心法に対する作業を放棄し、これを飛び越して第3世代法としてのレーザーによる同位元素分離の工業的利用が可能かどうか探し求めている。ウレンコの提携者もまた ALVISとMLIS開発計画を持っている。これはもちろん他でやっている進歩を判断する役に立ち、またやがてこの種の方法が経済的に有利になったときにウレンコもこれを適用することができるようになるであろう。しかしながら、改良に成功した遠心分離機の進歩的開発、性能保証および生産などの実績はウレンコの技術を小型で安全かつ実証された段階の続きとして“第2世代”から“第3世代”に移行させつつある。

遠心分離機の増大する出力は、そのみではないが、主として工場のコストに影響を与える。また工場の所定の大きさに必要な分離機の数明らかに減らす一方、建物の大きさ、工程の数および一般のサービス用機器の必要数を最小にする。コストは1990年代を通じて下がり続けることが期待される。事実、1990年代中頃およびそれ以降に予定されている設備建設に対してもっと改良された遠心分離機概念にすでに巨額の資金が毎年使われている。ウレンコの見解は「ウランの濃縮に対するガス遠心分離の成功とさらに続く可能性は、20世紀の終わりまでにレーザー法などの如き他の方法が商業的に競争力を持つようになるというのは困難である」というものである。遠心分離法は今やいちじるしくエネルギー効率が高く、他の新しい方法でこれに挑戦することはますます難しいことがわかってこよう。



#### 4. 燃料サイクルの経済

天然ウランから核燃料製造までの典型的な原価構成を第7図に示す。典型的な軽水炉の燃料要素の価格として、1 kg当たり1400米ドルが算出されている。原子炉全体の燃焼度を40,000MWD/teU、熱効率を30%とすると、これはウラン1 kg当たり320,000kWhの発電を意味するが、その場合の燃料の単価は1 kWh当たり0.5セントまたは1ペニヒあるいは0.3英ペンスである。

燃料計画担当者にできる節約の限界は発電コストに占める割合は小さく思えるかも知れないが、全体の金額としては大きい。イエローケーキの価格を1米ドル下げるとは100万kWの軽水炉の年間の燃料費を約40万米ドル安くしたことを意味し、相当な節約である。

#### 5. ウラン燃料の再処理

異なった国々の電力会社は使用済燃料の廃棄方法を可能な幾つかの異なったものから選んだ。ある者は決定を長期間保留して短期間貯蔵し、他の者は長期間貯蔵後、取り出し可能な政策を適用し、さらに他の者は違った理由から再処理を選んだ。再処理を選んだ者たちは将来の利用が可能な再処理回収ウランとプルトニウムをすでに入手したかあるいは間もなく入手する。

再処理事業はすでにフランス、イギリス、西ドイツおよび日本で運転されている。また、1990年代には運転できる新しい工場の拡張が相当行われる予定である。軽水炉燃料からのリサイクル・ウランの年度別発生量を第8図に示す。再処理回収ウランと回収プルトニウムが燃料サイクルの中で非常に満足な再利用が可能なことは現今ではすでに確立されている。イギリスのマグノックス炉からのリサイクル・ウランはすでにイギリスの改良型ガス炉(AGR)のために大量に濃縮された。

## 6. リサイクル・ウランの濃縮

新しいウランと比較したリサイクル・ウラン（再処理回収ウラン）の転換、濃縮および成型加工のコストに関しては、最近何回か論議された。ウレンコはリサイクル・ウランの濃縮量に対する能力を試験と試運転とによって確認した。

ウラン 232とウラン 234同位体がウラン中に存在するうえに核分裂生成物と超ウラン元素の痕跡がさらに放射能をもつのでその後の処理の間何らかの特別の対策が必要である。ウラン 236もまた存在するが、これは中性子を吸収するのでこのウランから作られた燃料はこれを補償するためにわずかに濃縮度を高めてやる必要がある。このウラン 235の追加すべき濃縮度は大体ウラン 236の濃度の0.15~ 0.25倍である。ある組成の再処理回収ウランから燃料を作る場合のコストは第9図に図示されている。

中性子の損失を補ったリサイクル・ウランで作られた燃料は、新しいウランで作られた燃料と同じ燃焼度に達する。従って的確に言えば同じ価値になる。かくして両者の全体の価値が等しいものとして、我々はリサイクル・ウランの価値をその“初期”の段階、すなわち再処理工場からの精製された酸化物か硝酸塩の形の段階で推論することができる。第10図はこの値を示し、また、この価値が天然ウランの価格とその回収ウランの濃縮度のどのような関数関係で変化するかを示している。

100 万kWの軽水炉から年間に出されるウラン燃料は全体で約 400万ドルの価値がある：それを年間の再装荷に使うと、この合計額を節約することになり、そしてこのことから1 kWh当たり0.06セントが発電コストの節約となる。

かくて、このウランの使用は明らかな第一歩であるように思える。もし、このウランが使用されず、約 400万ドルもかかる濃縮を伴う新しいウランを購入するとすれば、ウランがすでに購入されていない限り、これは新たな支出となる。またこれは、電力会社の所有となるが、電力会社が持つかも知れない政策的必要量、すなわち戦略的在庫あるいは止むを得ず在庫とする量を越す余剰ウランとなる。ある電力会社はこのような余剰在庫を持っている。従ってそれを単に少なからざる彼等の財産としてリサイクル・ウランとしては使

わないで保有して置くという道を見出すかも知れない。この状況は明らかにコスト高になる、このことは、電力会社が彼らのウラン購入戦略をリサイクル物質（再処理回収ウランとプルトニウム）をより早く利用する方向に変えることを考慮させるであろう。

## 7. MOX燃料

私の持論はもちろんリサイクル・ウランの再使用に集中してきたが、同様な節約はプルトニウムのリサイクルについても可能である。100万kWの軽水炉は年間200~250kgの核分裂性プルトニウムを発生する。このプルトニウムを天然ウランに加えて、重金属で約5トンの燃料集合体に使うことができる。もしMOX燃料が約1600マルクつまり850ドルで成型加工できるとすれば、これは重金属1kg当たり約500ドルの通常の濃縮燃料要素より安価である。燃料サイクル・コストの節約は大体250万ドルであるが、これは偶然にも核分裂性プルトニウム1g当たりの価値12ドルとしてのプルトニウムの価値に等しい。プルトニウムの商業炉への利用には越さねばならない政策的および許認可に関する障害があるかも知れないが、燃料サイクルの中でそれを使うという確かな計画があり、また必ずその時が来るであろう。プルトニウム富加燃料の製造量予測を図11に示す。

## 8. 結 論

リサイクル・ウランおよびプルトニウムを使用することで可能になる節約は大きく、また電力会社に対し、例えば燃料サイクルにおける他の段階に関する小さな価格低減などでやれる多くのより伝統的節約より遙かに貴重なものであることは確かである。

産業界は今やリサイクル・ウランとプルトニウムの再利用に自信を持って一步を踏み出している。ウレンコはリサイクル・ウランを再濃縮する準備ができています。そして新しいウランからリサイクル・ウランをしっかりと分離することで全体の燃料費を低く保っている。我々の目標は電力会社と共に技術の進歩として着実な経済的改善を見ることである。

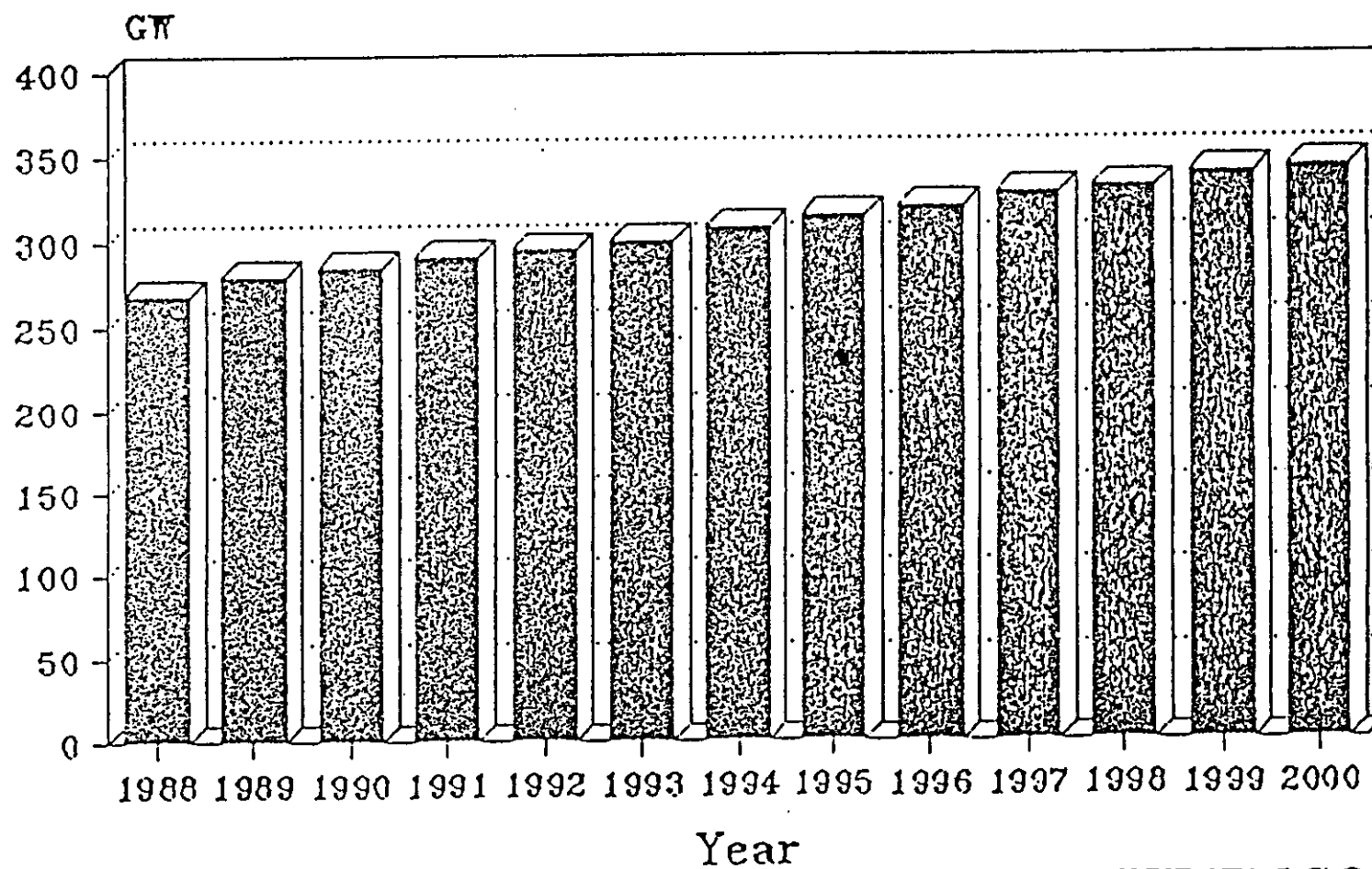
このことは、また遠心分離技術が第3世代技術を産むであろう。また2000年に向かい、またそれを越えてレーザー技術と競合するであろう。

#### 文 献

1. "Uranium Resources, Production and Demand", joint report by OECD and IAEA, March 1988.
2. "Overview of Enriching Recycled Uranium", JAB Gresley, Urenco Limited Uranium Institute, Sept. 1988.

# 原子力発電容量

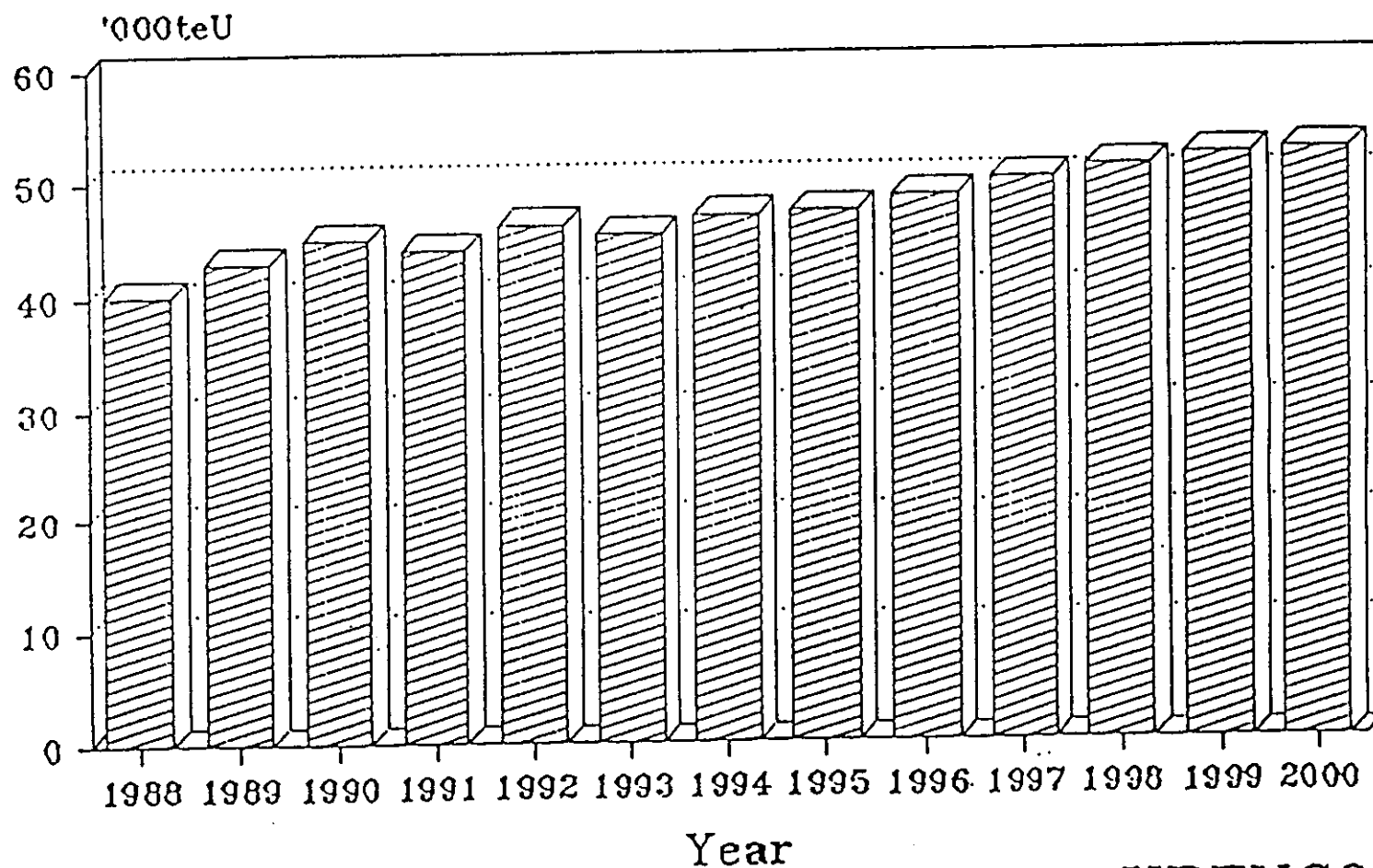
1988年-2000年



URENCO

# ウランの所要量

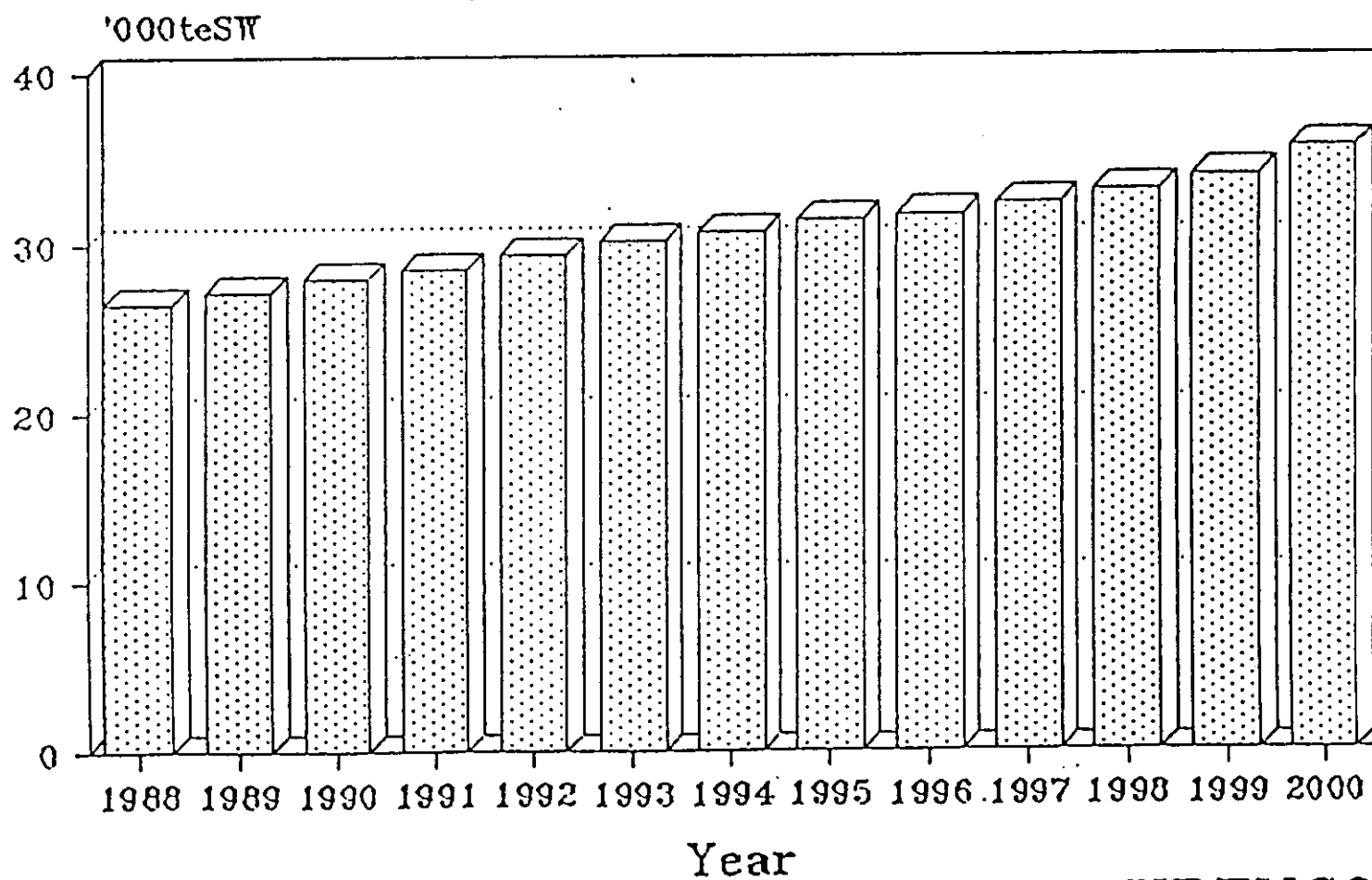
1988年-2000年



URENCO

# 濃縮の所要量

1988年-2000年

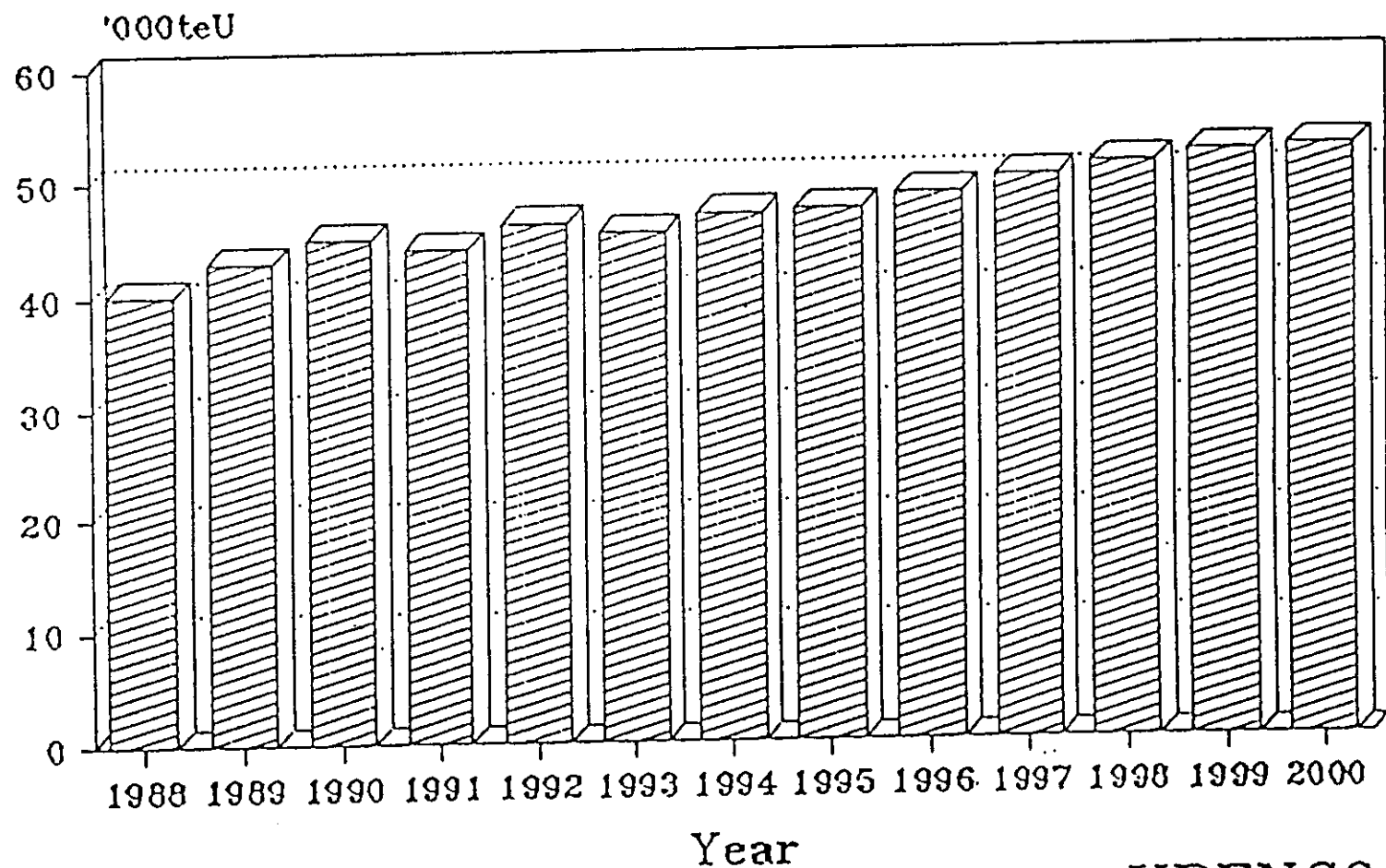


at 0.25wt% tails assay

URENCO

# ウランの所要量

1988年-2000年

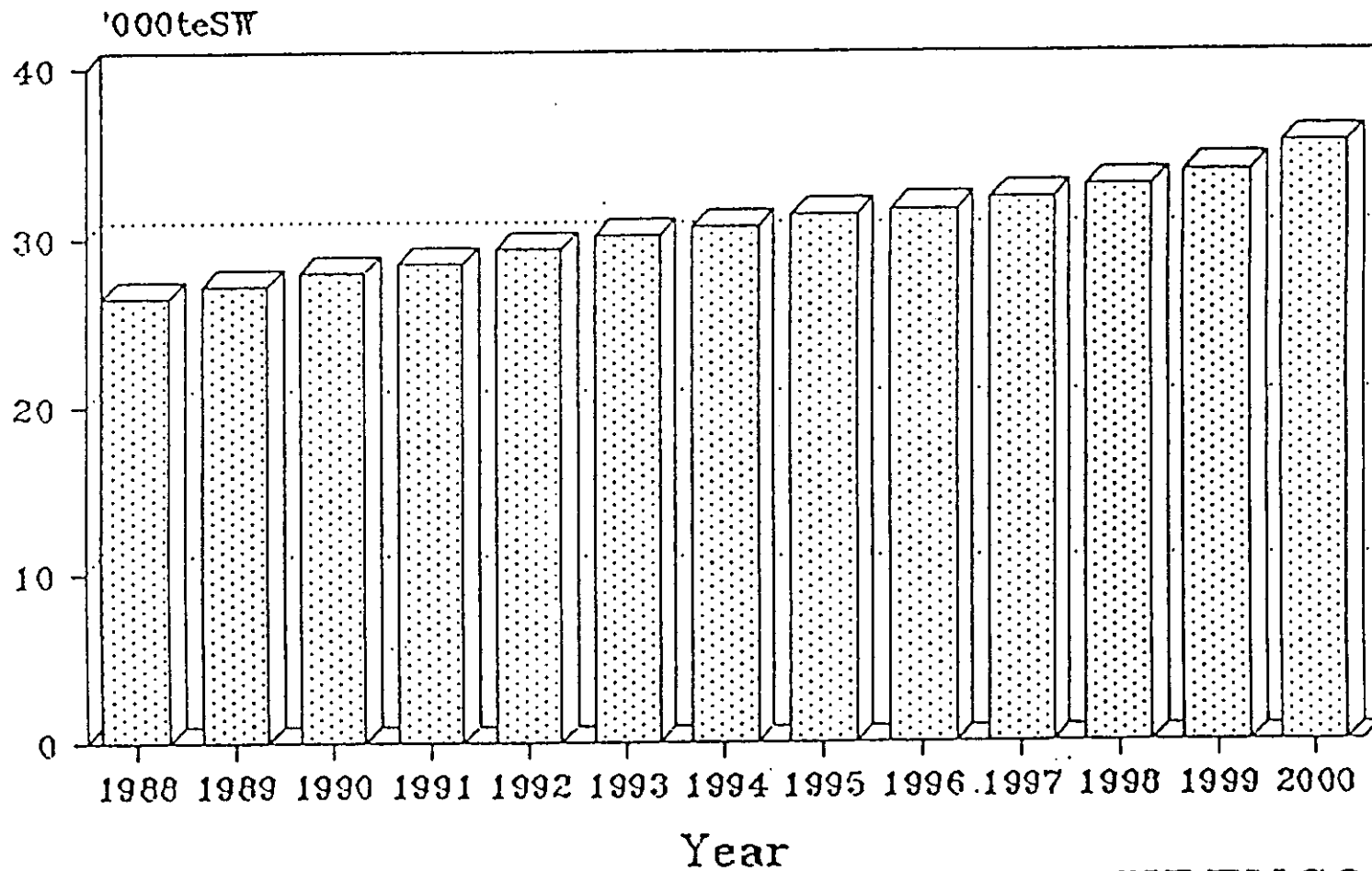


URENCO



# 濃縮の所要量

1988年-2000年



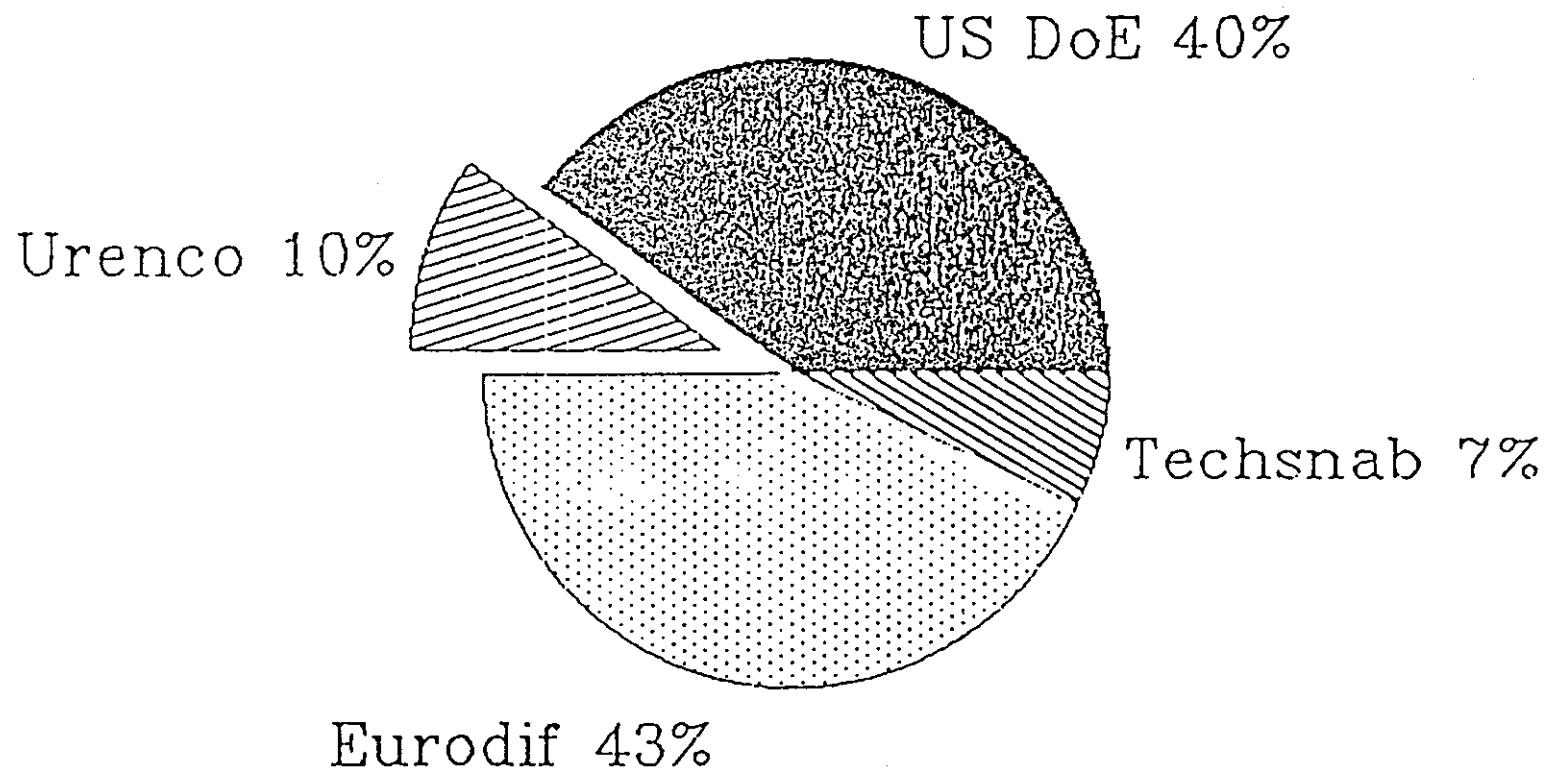
at 0.25wt% tails assay

URENCO

# Countries in the Nuclear Fuel Cycle

| ウラン製造<br>(>500teUpa) | 転換<br>(>500teUpa) | 濃縮            | 加工<br>(>300teUpa) |
|----------------------|-------------------|---------------|-------------------|
| Australia            | Canada            | France        | Belgium           |
| Canada               |                   |               | Canada            |
| France               | France            | ( Germany     | France            |
| Gabon                |                   | ( Netherlands | Germany           |
| Namibia              |                   | ( UK          | Italy             |
| Niger                | UK                |               | Japan             |
| South Africa         |                   | Soviet Union  | Sweden            |
| USA                  | USA               | USA           | UK                |
|                      |                   |               | USA               |
|                      |                   |               | URENCO            |

濃縮の市場占有率（1987年）



URENCO

1 9 8 7 年 末 の ウ レ ン コ の 濃 縮 能 力

( t e S W )

| Urenco NL | Urenco (UK) | Urenco D | Total    |
|-----------|-------------|----------|----------|
| Almelo    | Capenhurst  | Gronau   | Capacity |

---

1100

750

300

2150

---

URENCO

# 軽水炉の完成燃料の

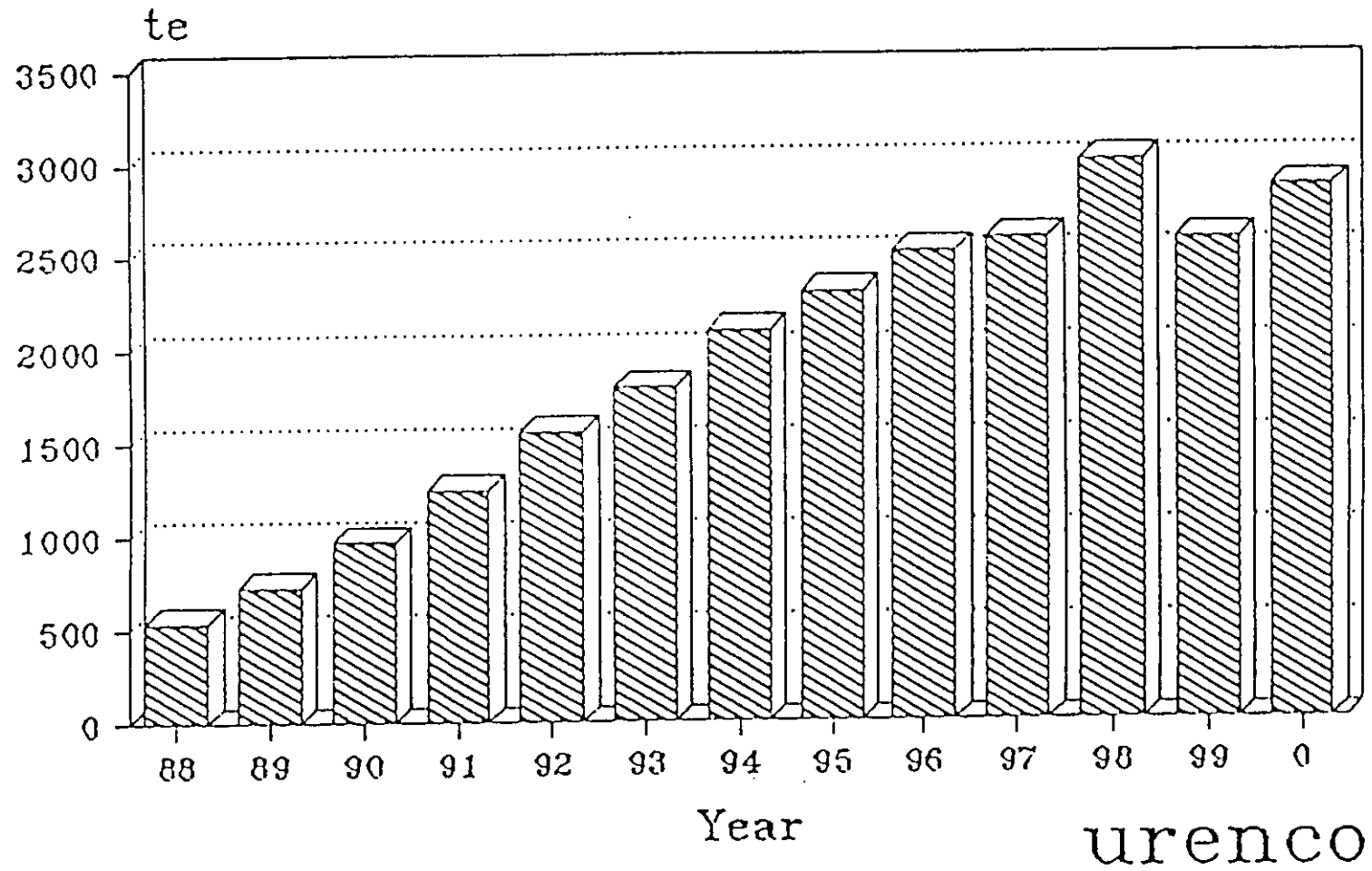
## ウランキログラム当たりのコスト

| イエローケーキ   | 転換        | 濃縮          | 加工          | 全コスト |
|-----------|-----------|-------------|-------------|------|
| (\$30/lb) | (\$6/kgU) | (\$110/SWU) | (\$165/kgU) | (\$) |
| 645       | 50        | 518         | 165         | 1378 |

URENCO

再処理工場から生ずる

年度別ウランの量



# リサイクルした軽水炉の完成燃料の

## ウランキログラム当たりのコスト

| 供給U235<br>濃縮度<br>(0.5wt<br>%U236) | U236<br>補償 | 転換<br>(US\$18<br>/kgU) | 濃縮<br>(US\$110/SWU<br>+\$5/kgU<br>surcharge) | 加工<br>(US\$195/<br>kgU) | 全コスト |
|-----------------------------------|------------|------------------------|----------------------------------------------|-------------------------|------|
| 0.8%                              | 0.15       | 132                    | 564                                          | 195                     | 891  |
|                                   | 0.25       | 139                    | 604                                          | 195                     | 938  |
| 1.0%                              | 0.15       | 94                     | 145                                          | 195                     | 734  |
|                                   | 0.25       | 98                     | 172                                          | 195                     | 765  |
| 1.2%                              | 0.15       | 72                     | 359                                          | 195                     | 626  |
|                                   | 0.25       | 75                     | 380                                          | 195                     | 650  |

URENCO

# フィード原料の組成と補正係数による

## リサイクル・ウランのコスト

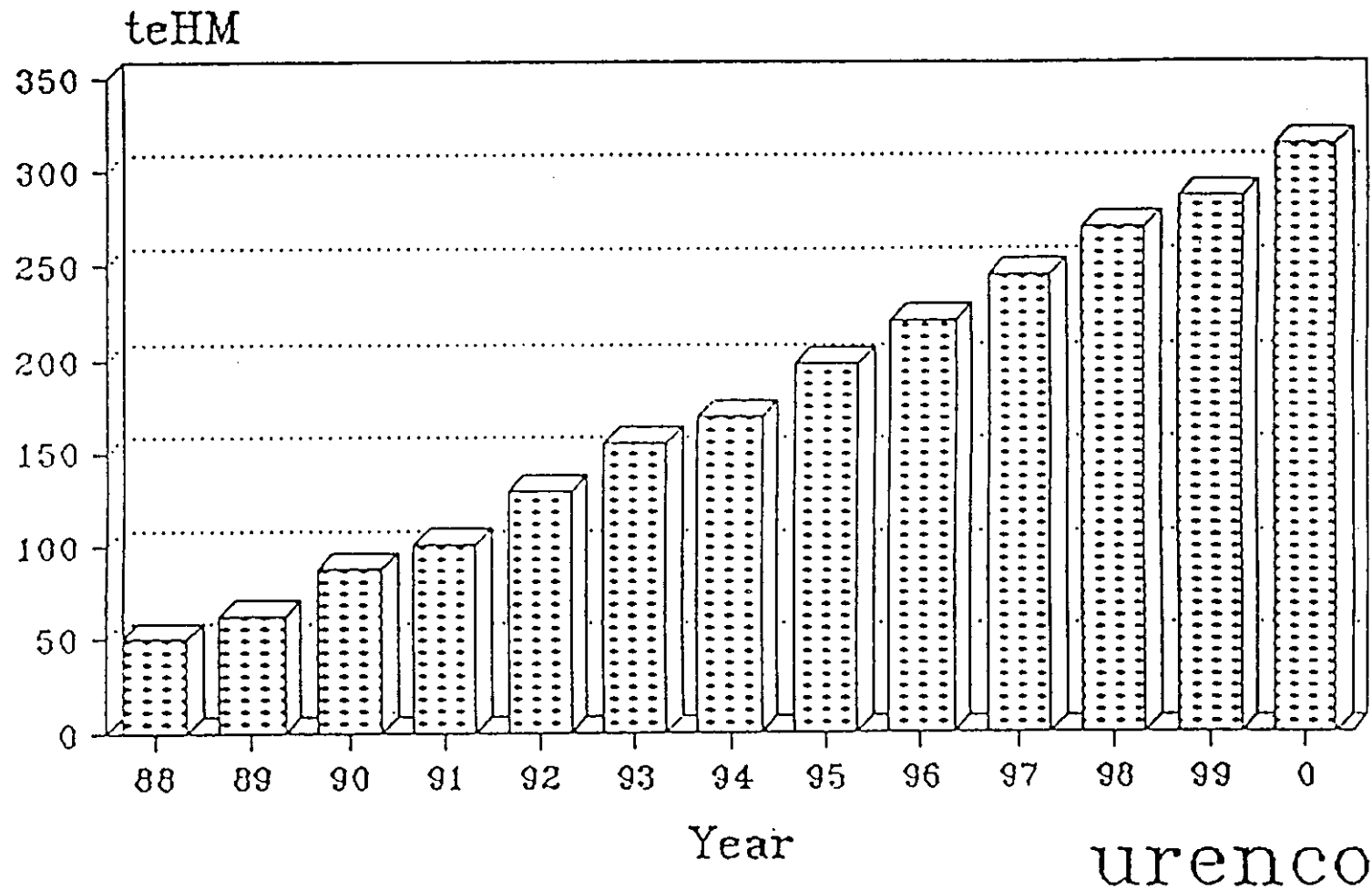
| 転換工場からフィードされた<br>ウランの組成 | 生成物中のウラン 236<br>の補正係数 | リサイクルしたウランの価値(US\$/kgU)<br>—ウラン精鉱のコストが30US\$/lbの場合— |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|
|                         |                       |                                                     |
| 0.8% U235               | 0.15                  | 66                                                  |
|                         | 0.25                  | 57                                                  |
| 1.0% U235               | 0.15                  | 123                                                 |
|                         | 0.25                  | 113                                                 |
| 1.2% U235               | 0.15                  | 188                                                 |
|                         | 0.25                  | 175                                                 |

URENCO



# MOX燃料の予想生産量

1988年-2000年



# 国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部ウィーン 1988年10月11日－14日

---

T1-TC-665 5

## 濃縮法の経済的特徴の比較

ジャン・フベール・コート

(Jean Hubert COATES)

フランス原子力庁同位元素分離部部長代理

## 概 要

過去において行われた数々の試みによれば、濃縮法の経済的特徴を比較することは難しい試みである。分離作業価格の概念を判断基準として使うことができるが、その他の側面もまた重要である。

濃縮コストのみを扱うことは、各種の濃縮法についての分離作業のコスト解析の際に現れる数々の項目を制限することになる。これらの項目の中では、処理法固有の特徴（即ち、コンポーネントの精巧さ、運転要員、エネルギー消費量、ウランの滞留量等）と経済的特性またはもっと一般的特性としての仮定（人件費、収益率、エネルギー、インフレ等）との間に明瞭な区別を設けることができる。

本報告はこれら幾つかの観点について概観し、比較する場合に遭遇する困難さ、例えば比較する方法が同じ開発段階にあることは稀であるし、その方法が置かれている一般経済的基盤も国によってことなる。その上、単なる教科書的な実習を行うかわりに実際のプラント計画に対応して比較する場合に違いが現れる。そして計画の後援者（スポンサー）のチームの能力を定量することはできないが最も重要である。

この短い論文の結論は非常に用心深い表現で表すことができる。濃縮費を安くすることは疑いもなく全ての濃縮業者が心掛けている刺激的課題である。しかし競争力のある価格とするかあるいは維持するための方法は色々ある。種々の試みを越えて公正な価格を見出そうという願いは大きくて、健全な濃縮の市場に適用されると簡潔に表現できよう。

## 序 文

過去の試みは濃縮法の経済的側面を比較することが非常に困難であることを示した。その主な理由は自主評価の基となるべき技術的詳細データが、政治的および商業的観点から秘密にされたことである。それで照合することも確かめることもできない外部からの報告書に頼るか、あるいは対応する研究がなされた場合にはその結果に頼るしかない。同じく所定の工程に精通しているからといって、その工程の全ての工学的説明は経済的には等価であると断定することは難しい。何となれば、そこに含まれる技法がかなり異なるからである。私の知るところでは、これはガス拡散法の膜、ガス遠心分離機および化学交換法の接触機の場合に当てはまる。技術データを経済的数字に変換する場合には、コンポーネントの大量の生産、大きさおよび効果等の新しい局面が導入されたときに別の困難さが現れる。

最後の問題は、濃縮役務を実際に行ったときの分離作業費である。濃縮法を比較する場合、比較の基準の指針としてしばしば使われるのが分離作業費である。事実これは重要な問題の一つである。しかしながら、もし濃縮役務の商業化に関する要求事項が全てが含まれると考えるならそれは不十分である。さらにこれに幅広く関連して、工場建設の先行期間、モジュール化の難易、運転の柔軟性および負荷率に対する経済の鋭敏さのような他の面も重要である。また分離作業の概念そのものは、レーザー分離のように選択性の高い方法について話す場合には全く当を得たものではない。

これ等の全てから見て、この論文はその範囲と結論の両方について控え目である。この論文は次の3つの部分に分かれてる。

—— 分離作業費の内訳      —— 分離法の主な特徴      —— 比較項目

### 分離作業費の内訳

まず第一に分離作業費の基準について詳述し、その内訳にでてくる項目を再検討する。分離作業は所定の方法と所定の大きさの濃縮工場によって行われる。

通常、支出は工場の建設に関するもの（即ち固定費）および運転に関するもの（即ち多少変動的な費用）に区別する。固定費とは工場の建設、初装荷、運転開始等に対応するもので、一方変動費用とはエネルギー費や運転員および保安要員に対応するものである。

しかしながら、分離作業費の項目に関して、それが処理法に対して特定のものであるか否か、またそれがもっと一般的な性質のものであるかどうかに従って、もっと興味深い区分ができる。例えば、分離作業費を恐らくもっと簡潔に（もっと近似的に）表すものは何であるかを考えると、

$$C\Delta = i\Delta + w\Delta + om\Delta + hu\Delta$$

ここで、

$C\Delta$  = 分離作業単位 (SWU)

$i\Delta$  = 固定費

$w\Delta$  = エネルギー費

$om\Delta$  = 運転費および保守費

$hu\Delta$  = ホールドアップ費

各項は二つの要素を掛け合わせたものである。一つは処理法そのものを性格付けるもので、他は濃縮工場の経済の一般的背景を性格付けるものである。

例えば、

$$i\Delta = I\Delta \times \tau$$

$$w\Delta = W\Delta \times Cw$$

$$om\Delta = OM\Delta \times Cm$$

$$hu\Delta = HU\Delta \times Cu$$

で

$I\Delta$  = 特定の投資、即ち年間に設置される分離作業単位 (SWU) 価格で、これは処理に使うコンポーネントの型と精巧さに大きく左右される

$W\Delta$  = 特定のエネルギー消費量即ち1分離作業単位に必要な電力量 kWhである

$OM\Delta$  = 特定の運転および保守の費用で、運転要員と処理工程それ自身に大きく頼るものの

$HU\Delta$  = 物質（ウラン）のホールドアップ量

これ等の全ての要因は主に処理工程それ自身に左右され、一方他の要素は工場の経済的環境を反映する。

$r$  = 投資家に選ばれた償却率

$C_w$  = 工場に供給されるエネルギー費

$C_m$  = 人件費に反映する

$C_u$  = ウランの賃貸費

明らかに分離作業費に関する各々の要因（ $W\Delta$ と $C_w$ など）の感度は同じである。このことは、エネルギー消費を低くすることが、安いエネルギーを入手することと同程度に重要であることを意味する。別の言い方をすれば、エネルギーの高い国では逆にエネルギーの消費を低くすることがさらに重要である。

### 濃 縮 法

それでは、既に運転されているか、あるいは将来使用されるかも知れない主な濃縮法の話に入り、その特徴を見直すことにする。

ガス拡散法は商業的濃縮の目的で使われた最も古い方法である。そして現在では西側の濃縮能力の90%に当たるものを米国とフランスで行っている。その原理は軽い同位元素の六フッ化ウランの分子を微孔を有する膜を通して選択的に拡散させることから生じる方法である。膜を通しての圧力損失は大量のエネルギーを必要とする圧縮機によって補償される。その他の運転費は小さい。経済的理由で、大きさによる利益を得て特定の資本額を減らすために、一体構造の大きな工場にする傾向がある。

最近では、ガス拡散法ではなく、英国、オランダおよび西独のウレンコによってガス遠心分離法が濃縮ウランの生産に応用された。そしてそれはまた日本でも開発中である。このやり方は、高速回転胴の周辺に重い同位元素の六フッ化ウランを選択的に蓄積させるものである。分離効果は機械の軸に沿った熱勾配によって高めることができる。この機械の配置には大きな場所が必要であるが非常に低圧下で運転され、摩擦が小さいのでエネルギー

ーは少ししか必要としない。遠心分離機は個々の出力が小さいので（年間の分離作業単位で数10の範囲）非常に沢山の分離機から成るシリーズとして生産しなければならない。その機械はモジュールカスケード型に組み合わされている。

化学交換法はまだ生産の段階には達していない。よく知られている二つは、日本で開発された旭化成法とフランスで開発されたケメックス（Chemex）法である。前者は四価ウランと六価ウランの樹脂による交換であるが、後者は三価ウランと四価ウランの間の液-液の交換である。これ等の処理法はモジュール方式で従来からの技術である。また化学反応が可逆的であるためにエネルギーを少ししか必要としない。

進歩した濃縮法は分離装置が目的とする同位元素の種類にのみ影響をおよぼすような統計的な方法とは原理的に異なっている。天然ウラン中のウラン 235の比率は僅か  $7 \times 10^{-3}$  であるから、全体の効率からして 140の利得が期待される。それ故に一体構造ではあるがエネルギー消費の少ない小型の工場（例えばレーザー）の設置が望まれる。2つの主なレーザー分離法は米国・フランス・英国および日本で研究されている AVLIS（原子蒸気レーザー同位元素分離）と、現在西独と日本で研究されている MLIS（分子レーザー同位元素分離）である。

## 比 較 項 目

これまでの章では経済に関しては、概要を説明した各種の方法の特徴を定量する試みは一切意識的に省いてきた。前に述べた詳細かつ適切な情報を利用できるという問題は別に、その他の重要な事項は比較する前に十分注意しなければならない。

第一の注意事項は、処理法の調査は開発または応用の全く違った段階で行われるので、本質的特徴は同じ位の徹底さと正確さで得られる知識とは掛け離れていることがある。勿論充分には完成していない処理法にはより大きな不確かさがともなう。

第二の注意事項は、一般的経済の背景が国によって大きく異なることである。例えば、電気料金は国によって2倍も違っている。

最後の注意事項は、一般的経済の仮定は処理法によって異なり、“中立的”ではないことである。例えば安い電気料金はガス拡散法の経済に大きく影響するが、遠心分離法には実際的には何の影響も与えない。逆に投資に関する収益率は遠心分離法の経済には無効であろう。

これ等の注意事項の全ては、濃縮法を比較する場合、如何に用心深くなければならぬかを示す傾向にある。主な特徴のみが第1表に示すごとく定性的に表現されるか、あるいは第1図および第2図に見られるように概観的表示による分離作業費の内訳で表現される。

第1図は個々の処理法の分離作業費に関する主な経済項目の感度図である。第2図は処理法に対する各経済項目の感受性を比較して示したものである。全ての場合、比較は主な三つの濃縮法に限定した。即ちガス拡散・遠心分離およびレーザー光イオン化法を何らの絶対値をとまわずに比較した。後者はともかく、濃縮工程の分離作業費に関しては次の幅広い技術の繋がりを導きだす濃縮行為に適用する価格と同様にその見積りが発表された。その一方のものは、ガス拡散法・遠心分離法および化学交換法であって、SWU 当たり100ドルの範囲のもので、他方はその半分、即ち分離作業費を SWU当たり50ドルにできると思われる特に選ばれた、あるいは特に進んだ処理法である。

不完全かつ疑問が多いと思われるこれ等の価格構成と価格は、実際のまたは潜在的濃縮業者が将来を見越す場合、その頭の中に浮かんでくる。これ等の濃縮業者の多くは強い競争力を保つか、または新たに獲得する目的で新しいまたは進んだ処理法で働き続ける。

全ての処理法を調べたすえ、化学交換法が保留された。米国エネルギー省は AVLISにその努力の焦点を合わせ、同様の選択がフランス原子力庁でもなされた。ウレンコは少なくとも今世紀の終わりまでは彼らの遠心分離法に自信を持っている。日本では遠心分離法・化学樹脂交換法・AVLISおよびMLISがなお競争を続けており、1991年頃にはその方向付けがなされるはずである。

事実これらの濃縮業者はこの論文の皮相的な内容を通して行うような教科書的な実習を行う代わりに、実際の工場計画に対応せざるを得なくなろう。疑いもなく、それを定量す



るのは難しいけれども、人間要因（ヒューマンファクター）即ち研究・開発および新処理法の開発に携わるチームの能力が最も重要なものとなるであろう。

## 結 論

商業的ウラン濃縮の将来は、非常に開けていると思われる。全ての濃縮業者はその特定の経済的背景の範囲内でさらに競争力のある処理法を抑え最適化することを目指している。安い濃縮費が得られるようにすることは、疑いもなく刺激のある挑戦である。しかしながら、最も良い技術を選ぶための競争力を保ち、あるいは得るためには種々の道がある。将来の為替レートの如き不明や障害となることは未解決である。

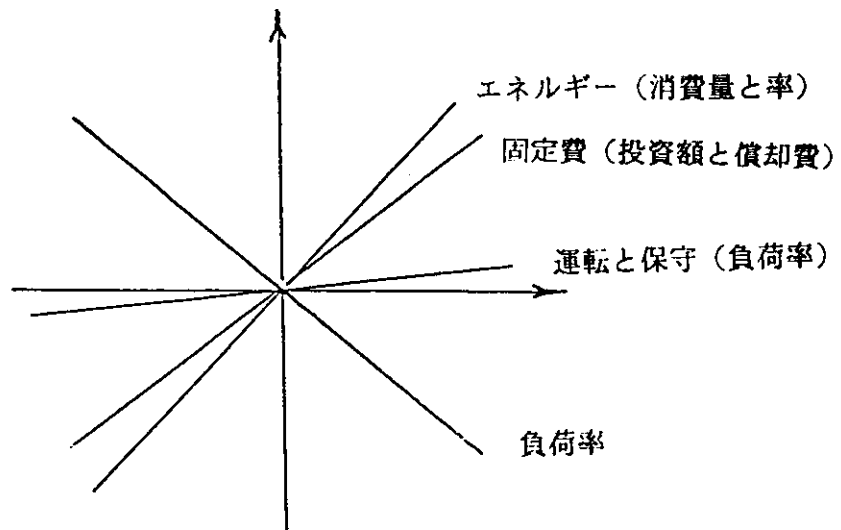
最後に、濃縮法の経済的特徴の比較の範囲を越えて、今後現れるかも知れない方法を選ぶようになるかも知れないが、信頼できる処理法を追求しながら、大きくかつ健全な濃縮市場を現出させようという意欲は遠い将来まで活力を失わないであろうと簡潔に表明できよう。

第1表 主な濃縮法の特性比較

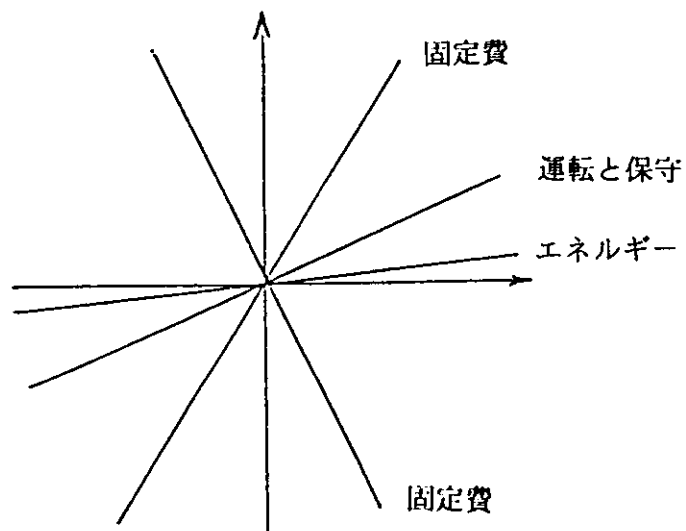
|        | ガス拡散            | 遠心分離            | レーザー  |
|--------|-----------------|-----------------|-------|
| 適 用 中  | ○               | ○               | ×     |
| 投 資 額  | 高               | 高               | 低     |
| 運 転 費  | 高               | 低               | 低     |
| モジュール化 | ×               | ○               | ○     |
| 燃料サイクル | UF <sub>6</sub> | UF <sub>6</sub> | 金属ウラン |

第1図 主な経済項目に対する分離作業の感受性

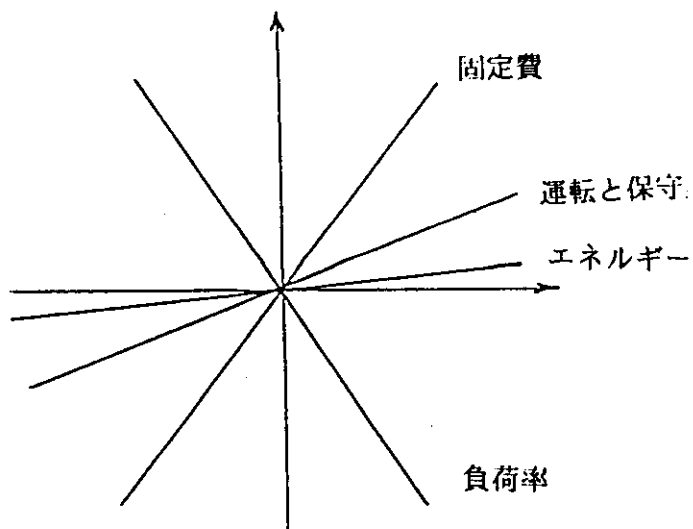
ガス拡散



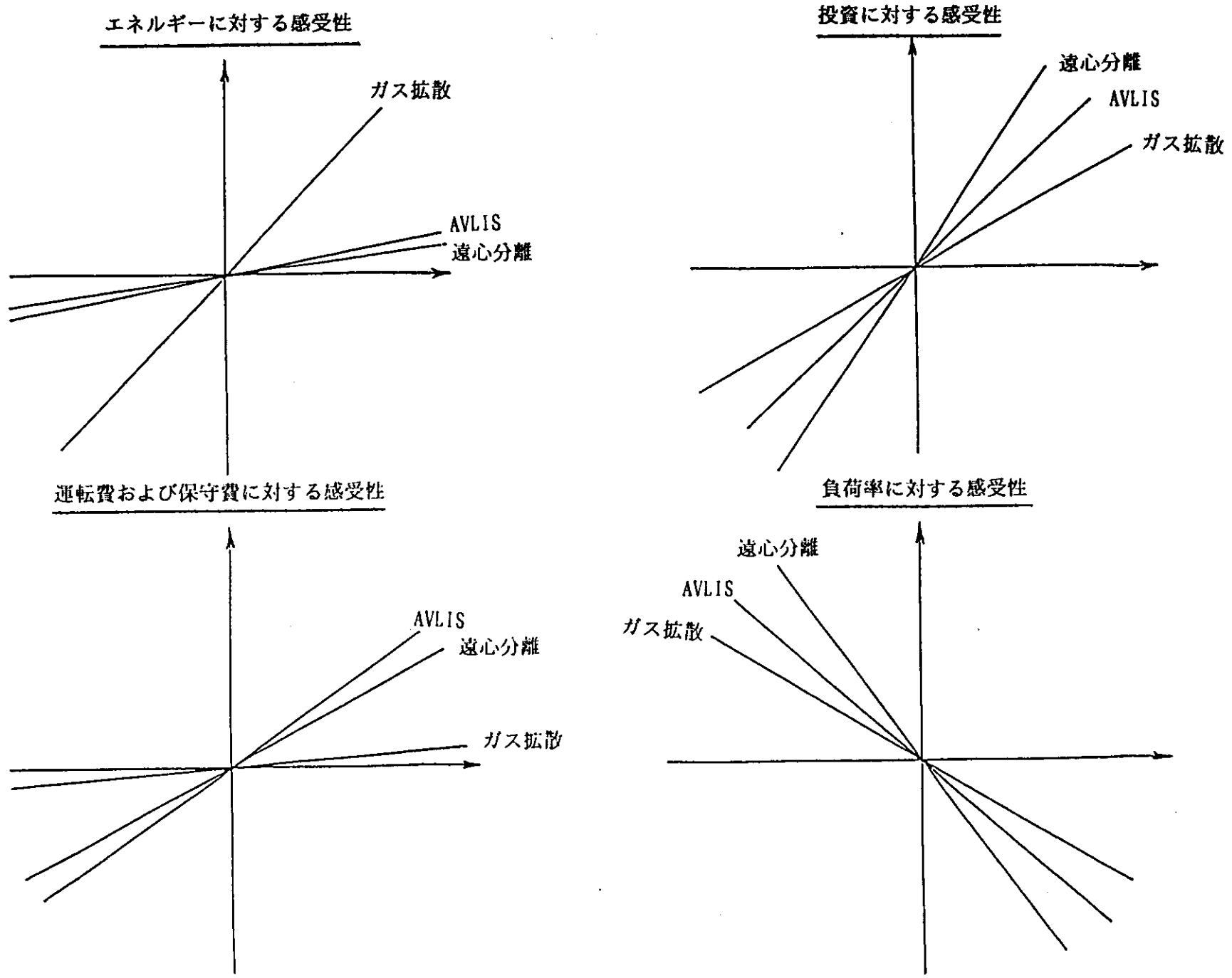
遠心分離



AVLIS



第2図 主な経済項目の感受性 対 濃縮法の感受性



# 国 際 原 子 力 機 関

低濃縮ウランの経済性に関する技術委員会

IAEA本部 ウィーン 1988年10月11～14日

---

T1-TC-665

## キャンドウ炉における低濃縮ウラン燃料

G. H. アーチノフ (Archinoff)

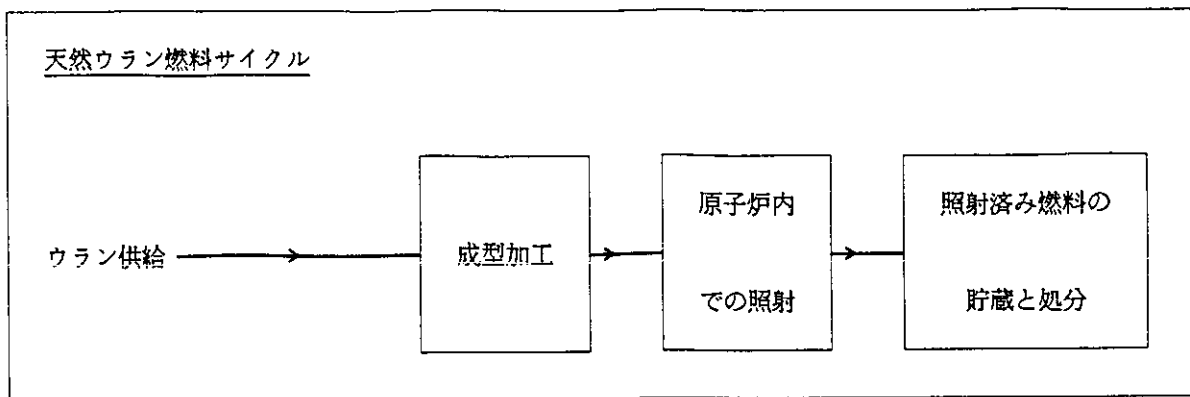
オンタリオハイドロ電力会社

カナダ

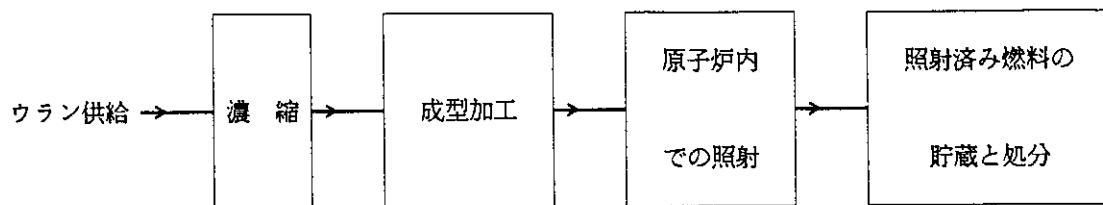
## 概 要

- ・ キャンドゥ炉の燃料サイクル
- ・ なぜ代替燃料を考えなければならぬか？
- ・ 代替燃料
- ・ 低濃縮ウラン
- ・ 低濃縮ウラン（LEU）の利点
- ・ 実施計画

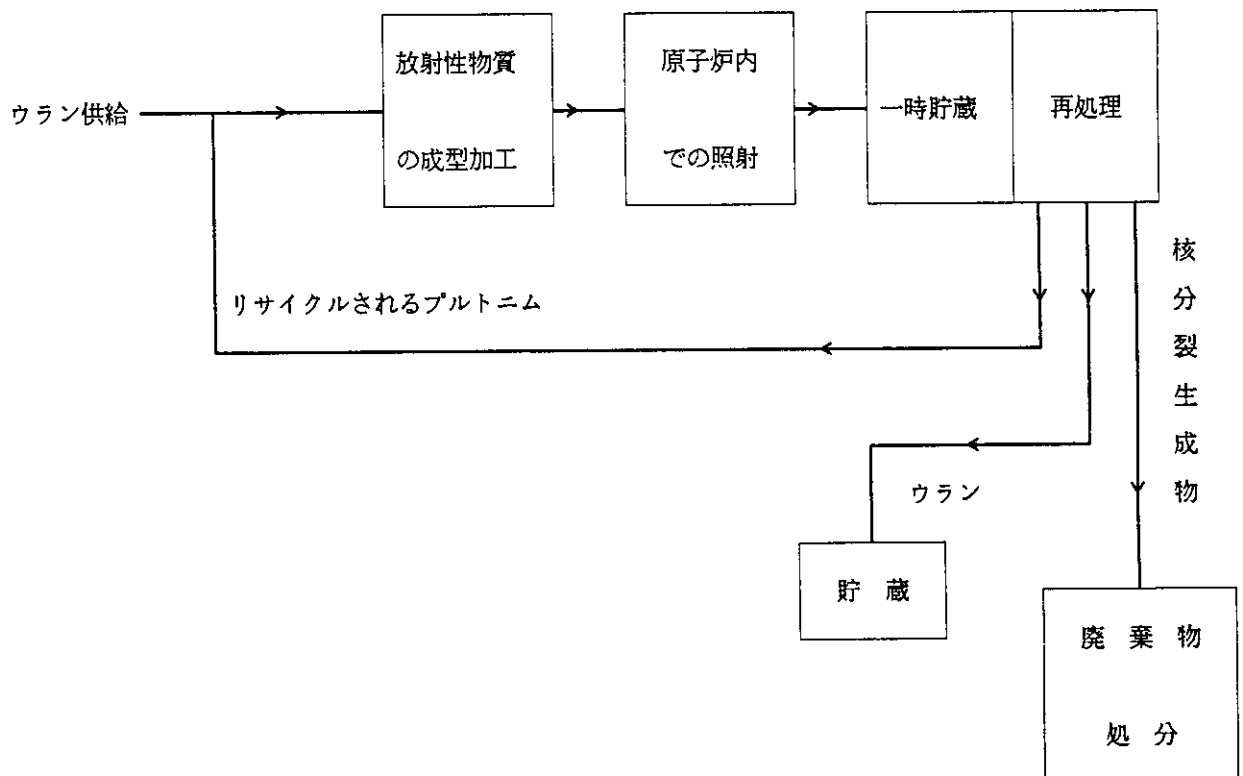
天然ウラン、低濃縮ウランおよびプルトニウムの燃料サイクルの模式図

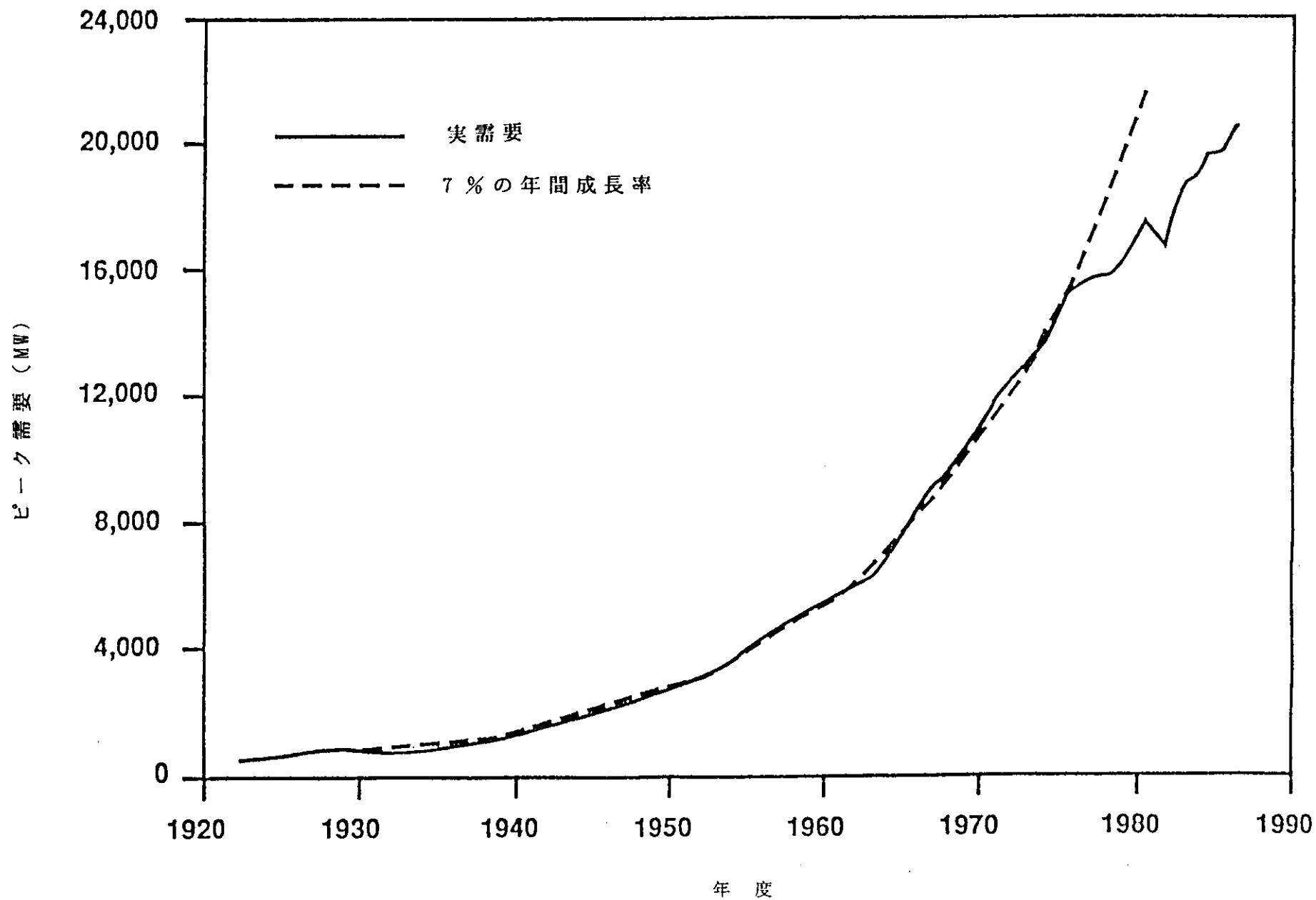


低濃縮ウラン燃料サイクル



プルトニウム燃料サイクル





オンタリオ州における電力需要の伸び

## なぜ代替燃料を考えるか？

- ・ 1970年代中期までの急速な負荷成長
- ・ 長期のウラン供給
- ・ 上昇するウラン価格
- ・ キャンドゥ炉の実効性
- ・ キャンドゥ炉の柔軟性

---

## 代替燃料

- ・ 低濃縮ウラン (LEU)
- ・ プルトニウム燃料サイクル
  - ー 天然ウランと
  - ー 劣化ウランと
  - ー リサイクルした軽水炉ウラン (CANFURL) と
  - ー リサイクルした軽水炉ウラン／プルトニウム (TANDEM) と
- ・ トリウム燃料サイクル
  - ー 高濃度ウラン／中濃度ウランと
  - ー プルトニウムと
  - ー 独自の燃料 (SSET)



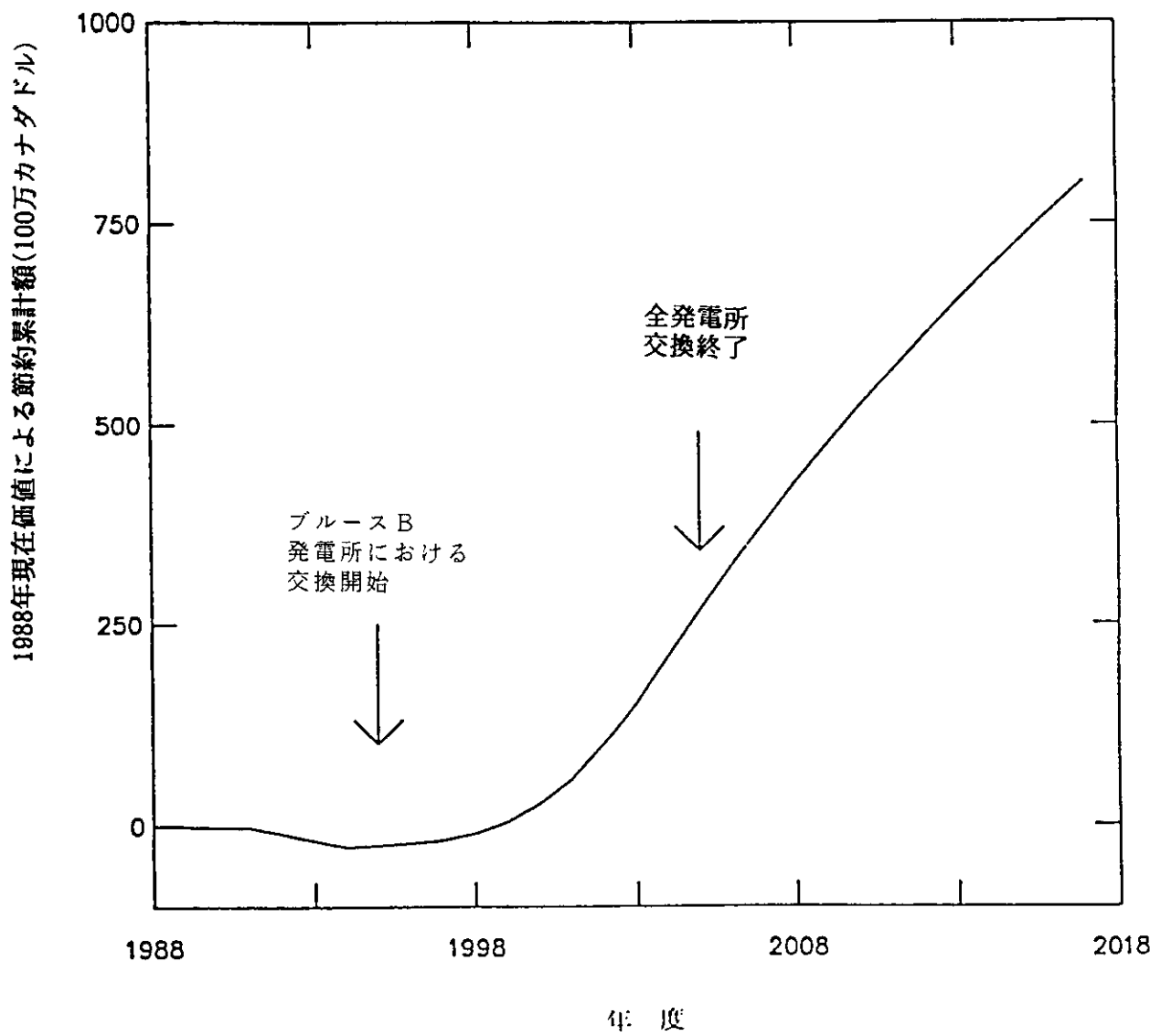
## 低濃縮ウラン

- ・ 現存の原子炉における 0.9 %  $U^{235}$
- ・ 将来の原子炉はより高い濃縮度燃料用に設計され得る。
- ・ 有利性
  - － ウラン消費の減少
  - － 燃料供給のコストの低減
  - － 使用済み燃料の発生量の減少
  - － 要開発点は最小限度

---

## 現存する原子炉における低濃縮ウラン

- ・ 0.9%の濃縮度
- ・ 燃焼度の倍増
- ・ 原料ウランの必要量は約25%減少した
- ・ 燃料コストは約25%減少
- ・ 使用済み燃料集合体の発生量が50%減少



低濃縮ウラン使用に伴う財政上の  
節約の累計 (1988年現在価値)

## 現存原子炉における低濃縮ウランの使用実施

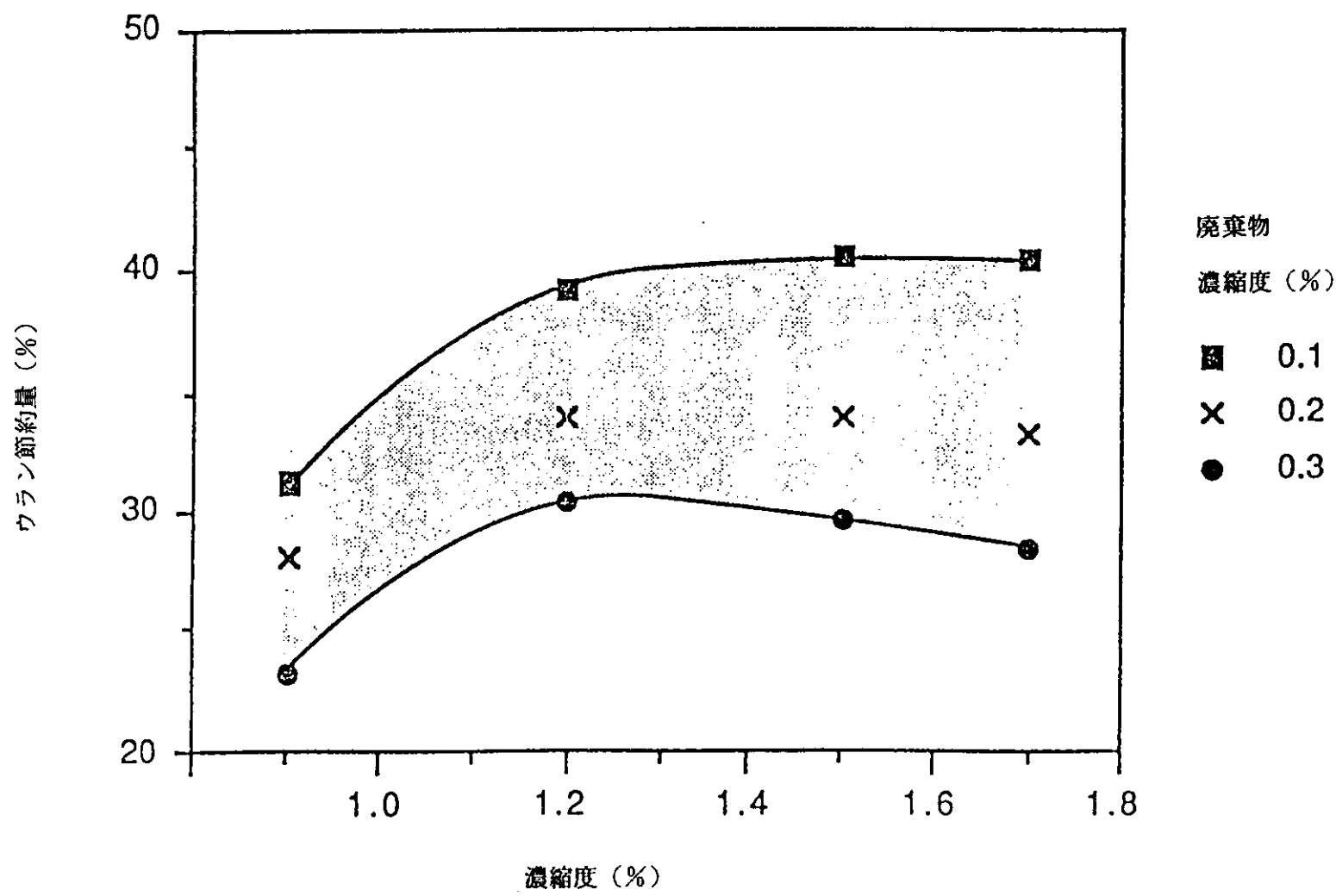
- ・ 燃料または原子炉に設計変更無し
- ・ 燃料の性能確認のための大規模なデモンストレーション照射
- ・ 燃料管理の最適化
- ・ 安全性解析と許認可
- ・ 経済評価
- ・ 操業上の影響
- ・ 公衆の支持

---

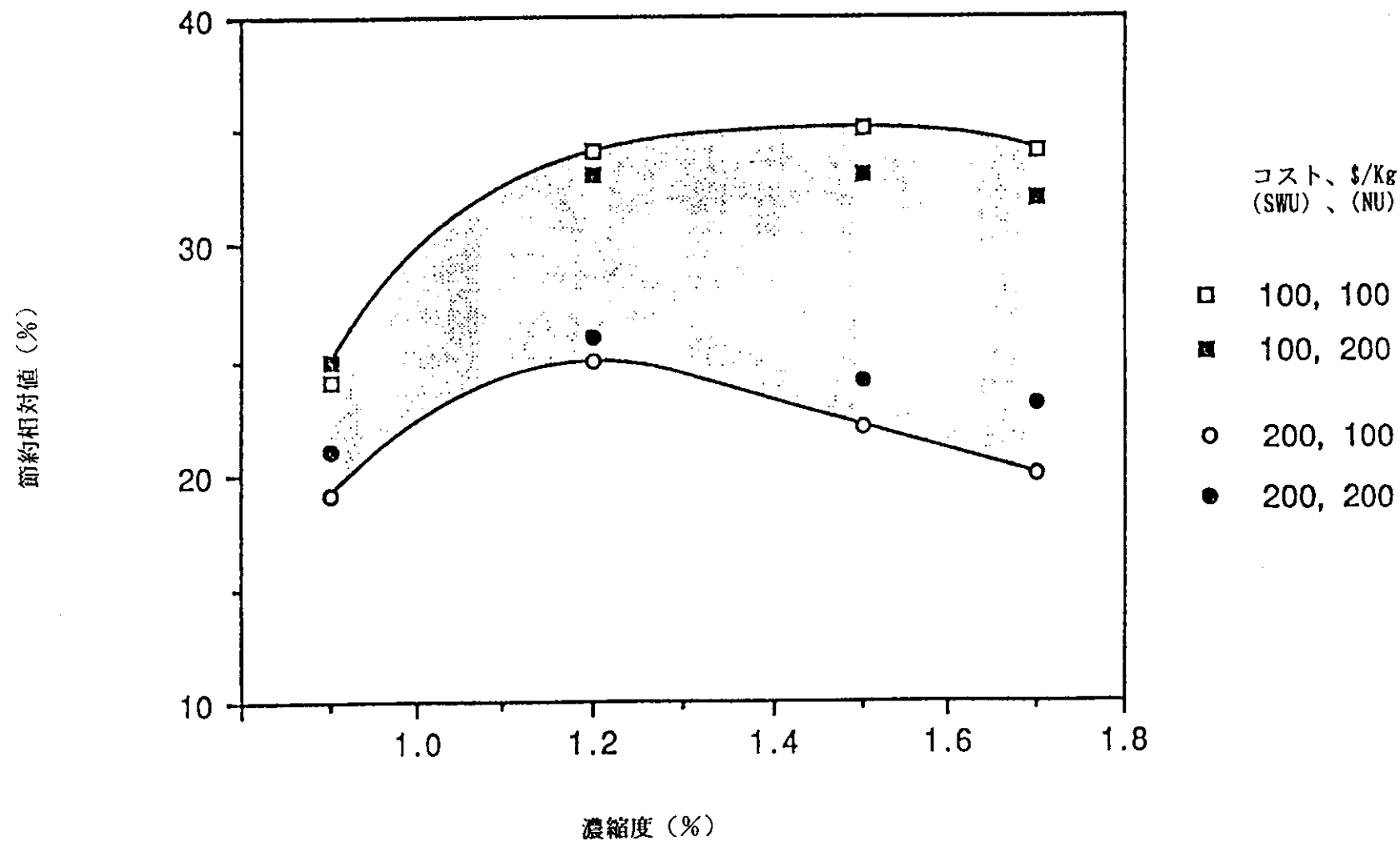
## 将来の原子炉における低濃縮ウランの使用実施

- ・ 1.6% U-235 までの濃縮度
- ・ 原子炉設計の最適化で下記の最高効率化：
  - － 燃料の燃焼度
  - － 資本費の効率 (MWe/\$)
  - － 燃料費の効率
- ・ 低濃縮ウラン用の燃料設計の最適化

キャンドゥ炉における低濃縮ウラン  
使用による年間ウラン節約量



キャンドゥ炉における低濃縮ウラン使用による  
燃料サイクルコストの節約相対値



FROM AECL 9755

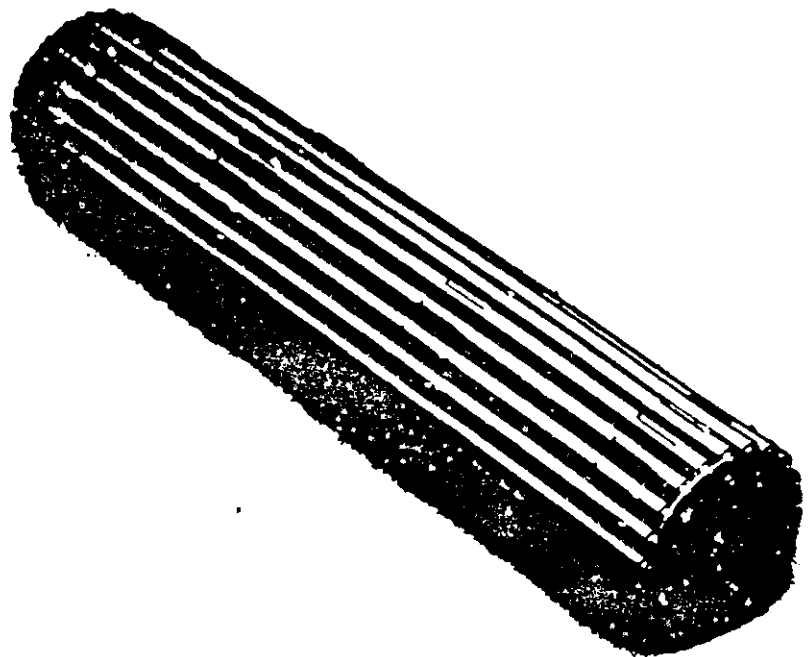
## CANFLEX 燃料

- ・カナダ原子力会社の開発計画
- ・キャンドゥ炉燃料設計の最適化
  - － 限界熱流束(CHF)を最大にする
  - － 圧力降下を最低にする
  - － 一定の燃料バンドルの出力に対する燃料ピン使用密度(レーティング)の減少
  - － 高燃焼度における欠陥防止策の改善
- ・現存炉または将来炉の設計における使用の柔軟性
- ・天然または濃縮ウランと共に使用可能

---

## CANFLEX 燃料

- ・43燃料棒
- ・長さ 0.5メートル
- ・2通りの燃料棒の直径



キャンフレックス燃料集合体

## 濃縮ウランとCANFLEX

- ・濃縮度はU-235 1.6 %まで
- ・より高い燃焼度
- ・下記を最小にするための炉設計の最適化：
  - － MWe 当りの建設コスト
  - － 燃料コスト
  - － ウラン消費量
  - － 使用済み燃料の発生量

---

## 結 論

- ・U-235 0.9%までの濃縮度は大きな設計変更なしに現存炉で実行可能である。
- ・利点は次の通り：
  - － 燃料コストの25%低減
  - － ウラン必要量の25%減少
  - － 使用済み燃料の発生量の50%減少
- ・オンタリオハイドロ社にとって最初の30年間の節約額は80億ドル（現在価値で8億ドル）である。
- ・キャンフレックス燃料はもっと高い濃縮度でよいので、濃縮ウランを使う原子炉設計の最適化ができる。