

# サイクル 機構技報

*JNC Technical Review*  
No.10 別冊 2001. 3

特集 ウラン濃縮プラント13年の運転実績



「ウラン濃縮原型プラント13年の運転実績」特集号によせて .....	1
人形峠環境技術センター 施設管理部長 小池 進	
技術報告	
ウラン濃縮原型プラントの目的と運転実績 .....	3
杉杖 典岳 松原 達郎	
ウラン濃縮原型プラントにおける技術の実証 量産技術, 信頼性, 無停止運転技術 .....	11
門 一実 河原 喜幸 我妻 武志 白水 久夫 野村 光生 杉杖 典岳	
ウラン濃縮原型プラントにおける経済性の実証 .....	25
杉杖 典岳 宮川 洋	
ウラン濃縮原型プラントにおける技術の体系化(1) 運転技術 .....	31
我妻 武志 長濱 洋次 中塚 嘉明 横山 薫 杉杖 典岳	
ウラン濃縮原型プラントにおける技術の体系化(2) 支援技術 .....	43
門 一実 中島 伸一 山崎 斉	
ウラン濃縮原型プラントプロジェクト評価 .....	51
杉杖 典岳 宮川 洋	
結言 .....	59
人形峠環境技術センター 施設管理次長 米川 茂	



核燃料サイクル開発機構 人形峠環境技術センター

人形峠環境技術センターは、中国地方の最高峰“大山”や日本海を遠くに望むことができる、中国山地の標高700mに位置する。



ウラン濃縮原型プラント

ウラン濃縮原型プラントは、1988年から約13年に及ぶ連続運転を達成した。



DOP-1 遠心分離機



DOP-2 遠心分離機

# 遠心分離機開発の歴史

## 基礎研究期の遠心分離機

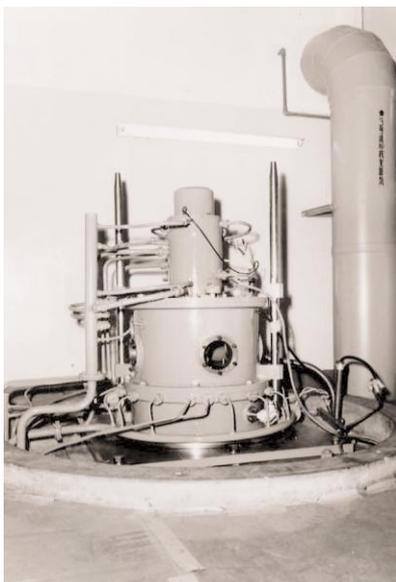


我が国初の遠心分離機  
1号遠心分離機械



2号遠心分離機械

1959年に始まる我が国のウラン濃縮技術開発の初期は試行錯誤の繰返しであった。

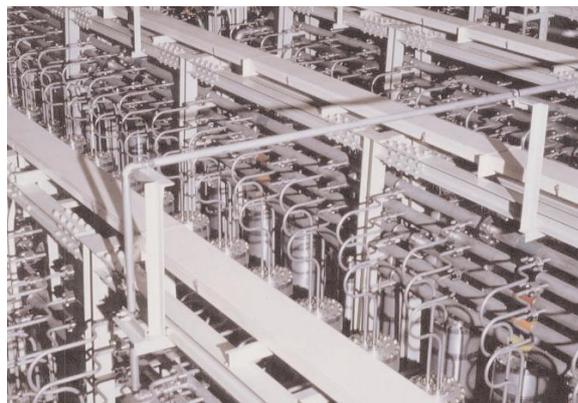


3号遠心分離機械



4号遠心分離機械

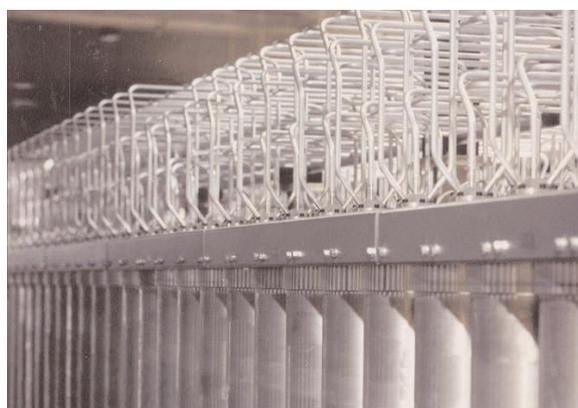
## パイロットプラントから原型プラントへ



ウラン濃縮パイロットプラント (OP-1A)



ウラン濃縮パイロットプラント (OP-1B)



ウラン濃縮パイロットプラント (OP-2)

DOP-1, DOP-2遠心分離機製造の経験はウラン濃縮の商業化に向けての遠心分離機の量産技術の確立にも貢献した。



ウラン濃縮原型プラント (DOP-1)



ウラン濃縮原型プラント (DOP-2)

1979年9月にOP-1 Aが運転を開始した。これにより、我が国はウラン濃縮技術の保有国として国際的な認知を受けることになった。

パイロットプラントの初期遠心分離機(OP-1A)の約3倍の性能を持つDOP-2遠心分離機

## 建設から製品の初出荷まで



着工前



1986年6月 建設が進む原型プラント



1986年4月頃 基礎工事本格化



1986年11月頃 大型機器の搬入が進む



1986年 工事が終了し、操業を待つ原型プラント



1988年4月25日 DOP-1操業開始セレモニー

1988年4月25日の操業開始式でテープカットを行う、伊藤科学技術庁長官、花房岡山副知事、林理事長（いずれも当時）。



中央操作室



原料発生槽



製品回収構と30Bシリンダ



1989年4月20日 製品ウランの初出荷



2001年2月2日11時11分 プラントの原料供給終了



## ウラン濃縮原型プラントの原料供給終了に当たり

1988年の運転開始から13年間の長い間、正月も休まず年中無休で運転を継続された関係者の皆さん、本当にご苦勞様でした。また、13年間にわたる連続運転の達成、おめでとうございます。

この連続運転は濃縮工場運転課、管理課、品質管理課、濃縮試験課及び保守課の皆さんの連携、努力の賜物です。

ウラン濃縮技術は六ヶ所の商業工場へ技術移転したサイクル機構の技術移転の第一号であり、これは非常にすばらしいことで、誇りに思います。

六ヶ所濃縮商業工場の立上げの際には、上の写真の中にも実際に行かれた方が多数おられますが、人形峠から指導する立場としての技術者を送り出し、かつ、日本原燃からは述べ60名余りの若い技術者を受け入れて研修を行うなど、全面的に協力をして、六ヶ所の商業工場の円滑な立上げに協力しました。

運転は終了しましたが、これからは、これまでの運転の成果をまとめることが大切です、今後の仕事は解体エンジニアリングの構築ということになりますが、これも非常に重要な仕事であり、きっちり行っていかなければならないと思っています。

最後に、13年間という長い連続運転を達成してこられた運転課の皆さんはもとより、DP運転を支えてきた各課の皆さん、本当にご苦勞様でした。また、これまでご指導、ご支援いただいた諸先輩、関係者各位には、心より感謝申し上げます。

人形峠環境技術センター 所長 石黒秀治

## 「ウラン濃縮原型プラント 13年の運転実績」特集号に よせて



人形峠環境技術センター  
施設管理部長 小池 進

ウラン濃縮原型プラントは、1988年に部分運転を開始し、当初計画していた約1,700tSWUの役務処理を1998年3月までに終了した。この間、第一運転単位(以下、DOP-1)は約10年、第二運転単位(以下、DOP-2)は約9年の連続運転を達成した。その後1998年7月から、濃縮役務延長契約として約3年の連続運転を行い、2001年2月には、すべての契約役務量の生産を終了し、約13年にわたり連続して運転を行ってきた遠心分離機を停止した。

原型プラントは、これに先立つパイロットプラント(1979年から1990年まで運転)での建設・運転により、その技術的基盤は確立されたものの、事業化を進めるに当たっては、プラント構成機器の大型化、単純化等による合理化、遠心分離機の量産技術、最適な建設・運転システムの確立、が課題とされ、事業化に先立ち、200tSWU/年規模のプラントを建設・運転することが適当である、との国の方針に基づき推進されたプロジェクトであった。また、この際民間のウラン濃縮事業主体へ円滑に技術移転するよう特段の配慮が必要とされた。

これらの目的に照らしてみると、原型プラントは当初の運転期間以上に連続運転を達成したことで、また、原型プラントの技術をベースにプラント規模を拡大し、遠心機の高性能化を進めることで、国際競争力ある経済性を有することを実証できた。更には、昭和60年に日本原燃(株)と交わした「ウラン濃縮施設の建設・運転等に関する技術協力基本協定」等に基づき、日本原燃(株)六ヶ所ウラン濃縮工場の建設、運転等に必要な技術情報を提供するとともに、約60名の日本原燃(株)の運転員の養成、延べ約50名の機構職員の出向派遣と人的にも技術移転も図ってきており、技術的及び経済的に事業化の見通しをつけ、合わせて技術移転を図るとした原型プラントの当初の目的は達成できたと評価できる。

一方、ウラン濃縮事業を取り巻くこの13年間を振り返ってみると、以下に述べるような大きな状況の変化が生まれている。

急激な円高の進行、バブル崩壊以降の経済活動の低迷、冷戦構造の崩壊による世界規模での経済、産業のグローバル化、事業の透明性や情報公開、規制緩和による電力自由化等々、我が国におけるウラン濃縮技術開発・事業化に、直接あるいは間接的に影響を及ぼす社会的構造の変化があった。

動力炉・核燃料開発事業団(以下、動燃事業団)から核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構)への改組を機に、ウラン濃縮技術開発は、サイクル機構の整理・縮小事業と位置付けられ、2001年9月までにウラン濃縮事業

を終了することとなった。

日本原燃(株)六ヶ所ウラン濃縮工場は順次に設備規模を拡大し、我が国初の商業ウラン濃縮プラントとして、約9年間の事業実績を積んできている。しかし、その一方で、2000年には一部のカスケードを計画停止している。

このように、ウラン濃縮技術開発におけるこの13年間の総括すると、「技術開発期から最終段階である事業化段階に向けた、プロジェクトの転換期」であったということができる。

そして、2000年11月に日本原燃は、機構の技術者も参加した「ウラン濃縮技術開発センター」を六ヶ所に設置し、機構が開発してきた濃縮技術を受け継ぐとともに、これまでの遠心分離機開発の成果、知見を集約して、新型遠心機の開発に取り組む一元的開発体制を整えた。

このような状況から、ここ数年、我が国のウラン濃縮事業は技術開発から事業化へという段階から、経済的合理性の追求によるウラン濃縮事業の定着化という新たな段階へ展開してきており、この着実な推進が求められている。本特集「ウラン濃縮原型プラント13年の運転実績」では、ここで示したウラン濃縮事業の新たな展開を視野に置き、我が国のウラン濃縮技術開発の変遷を降り返りながら、その中で、原型プラントが13年間の連続運転により果たした役割を技術と経済性という視点から総括する。また、併せて、急速にグローバル化が進む国際濃縮市場の中で、我が国のウラン濃縮産業の置かれた状況と今後の課題等についての検討を試みた。

国が中心となって進めてきたウラン濃縮技術開発成果は、今まさに、民間事業として定着させるために最も重要な最後の詰めを迎えている。このような状況にあって、本特集が、単に過去を振り返るための歴史書ではなく、我が国におけるウラン濃縮事業の確かな定着に向けてのマイルストーンとなることを願っている。

最後に、ウラン濃縮原型プラントの計画段階から今日まで、我々の業務に対し理解と暖かいご助言・ご支援をいただいた機構内外の多くの関係者の方に心から感謝を申し上げますとともに、これから我々が取り組む施設の解体、廃棄物の処理・処分の業務においても、これらがウラン濃縮事業を完結するための重要かつ不可欠な業務であることに鑑み、今後ともご指導、ご協力をお願い申し上げます。

## 【技術報告】



# ウラン濃縮原型プラントの目的と運転実績

杉杖 典岳 松原 達郎

人形峠環境技術センター 施設管理部

資料番号：10別冊 - 1

Objectives and Operation Record of a Uranium Enrichment Demonstration Plant

Noritake SUGITSUE Tatsuo MATSUBARA

Facility Management Division, Ningyo-toge Environmental Engineering Center

我が国におけるウラン濃縮の歴史を振り返るとともに、ウラン濃縮原型プラントに与えられた目的について、稼働率や設備利用率という技術面からの総合指標により運転実績を評価した。

この結果、当初計画である約10年間の運転実績として、ホット定格稼働率99.9%、設備利用率94.3%を達成しており、ウラン濃縮原型プラントで実現している技術が、10年を超える連続無停止操業という他のプラントでは類例のない、ウラン濃縮プラント特有の要求に十分答えられる技術であることを実証した。

*In this report, the history of uranium enrichment in Japan, and the role and the operation record of a uranium enrichment demonstration plant are described.*

*A uranium enrichment demonstration plant are examined using the rate of operation and plant factor as parameters. The examination shows that it is possible to achieve a rate of operation of 99.9% over ten years and a plant factor of 94.3%.*

*The examination leads to the conclusion that continuous operation of a uranium enrichment demonstration plant of more than a decade is possible if technology applied at a uranium enrichment demonstration plant is applied. However, this technology is peculiar to uranium enrichment plants.*

*Cases in which plants continue to operate for more than a decade are not known except for uranium enrichment plants.*

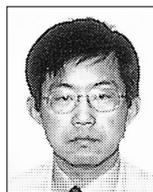
## キーワード

ウラン濃縮事業、ウラン濃縮原型プラント、遠心法、運転実績、稼働率、設備利用率、ユーティリティ、信頼性

*Uranium Enrichment Business, Uranium Enrichment, Demonstration Plant, Centrifuge Method, Operation Record, Rate of Operation, Plant Factor, Utilities, Reliability*



杉杖 典岳



松原 達郎

## 1. はじめに

本報告では、1959年に始まり、日本原燃（株）による商業工場の操業までに至った、我が国におけるウラン濃縮技術開発の歴史を振り返り、その中で、ウラン濃縮原型プラントがどのような位置付けにあったのかを明らかにするとともに、ウラン濃縮原型プラントに与えられた技術的、経済的目標を示す。併せて、ウラン濃縮原型プラントの設備概要、設計・建設・運転の各スケジュールと、13年間の運転から得られた実績を、諸特性や諸量に関する特長として評価する。

## 2. ウラン濃縮技術開発における原型プラントの位置付け

### 2.1 ウラン濃縮技術開発の歴史

我が国における遠心法によるウラン濃縮技術開発は、1959年の理化学研究所での第1号遠心分離機の試作から始まった。その後、1962年の「原子力開発利用基本計画」により、1964年に当時の原子燃料公社に引き継がれ、原子燃料公社から動燃事業団、さらにサイクル機構へと、組織の変更はあったものの今日まで約40年、全く独自の技術開発を一貫した開発体制の下で行ってきた。

この間の技術開発は試行錯誤の繰返しであったが、途中、1969年8月には原子力委員会より「国の特定総合研究」に指定されたことを受けて開発が本格化し、東海事業所での遠心機開発、システム試験、小規模カスケード試験等を経て、1979年には、人形峠事業所（現人形峠環境技術センター）に建設したウラン濃縮パイロットプラントが運転を開始した。これらの成果により、当時の米国カーター政権が提唱する核不拡散政策により作られたINFCE（国際核燃料サイクル評価）の場において、我が国は、ウラン濃縮技術の保有国としての認知を受けた。このことは、国内での事業化を目指す我が国にあっては極めて大きな意味を持つものであった。

### 2.2 ウラン濃縮技術開発における原型プラントの位置付け

ウラン濃縮パイロットプラントまでの開発成果を受け、1982年に出された「原子力開発利用長期計画」では、ウラン濃縮技術開発の在り方として、次のような方向が示された。

『濃縮ウランの国産化に当たっては、動燃事業団が技術開発を行ってきた遠心分離法によりこれを推進することとし、海外との契約分をも考慮して、その目標については、1980年代末までには商業プラントの運転を開始し、順次プラント能力の増大を図り、少なくとも、1995年頃に1,000tSWU/年、2000年頃に3,000tSWU/年程度の規模とすることが妥当である。この国産化の目標を達成するため、遠心分離法ウラン濃縮技術について信頼性・経済性の向上に努め、国際競争力を持ったウラン濃縮事業の確立を図ることとする。このため、以下の方針に沿って原型プラントを建設・運転するとともに、動燃事業団等において必要な技術開発を進めることとする。』

遠心分離機の量産技術の確立、プラント設備の合理化等により、濃縮プラントの信頼性・経済

性の向上を図るとの観点から、商業プラントに先立って原型プラントを早急に建設・運転することとし、民間の積極的な参画の下に、当面、動燃事業団がこれに当たる。

原型プラントの規模としては、200tSWU/年程度と考えられるが、この建設・運転への民間の参画を通じて、動燃事業団に蓄積されてきた遠心分離法ウラン濃縮技術の民間への移転を円滑に進めていくことにより、ウラン濃縮事業の確立に資する。一方、民間においては、原型プラントの建設・運転に参画しつつ、商業プラントの建設計画の具体化を進めることを期待する。

原型プラントは、その運転が安定化した段階において、ウラン濃縮事業の一部としての活用を図る。

この中で、ウラン濃縮原型プラントはウラン濃縮の事業化につなげる最終段階と位置付けられ、早急な建設・運転の必要性が示された。これを受け、動燃事業団では人形峠事業所への立地を決め、1984年に土地造成工事を開始し、1988年4月にDOP-1が、1989年5月には、DOP-2が運転を開始した。その後、1998年3月には当初計画していた約1,700tSWUの役務処理が終了した。続く1998年7月からは濃縮役務延長契約として約3年の連続運転を行い、2001年2月に、連続して運転を行ってきた遠心分離機を停止した。この間の主要なトピックスを表1に示す。

### 2.3 原型プラントに与えられた具体的目標

ウラン濃縮技術開発は、パイロットプラント段階で、個々の技術的基盤を確立するまでになっていた。これに続く原型プラントの役割は、これまでのような個々の要素技術の開発から、以下に示す。ウラン濃縮プラント及びウラン濃縮事業というシステムのエンジニアリングや運転・運営ノウハウの確立といったソフト的な技術蓄積にあった。

合理的なウラン濃縮プラントの設計・建設・運転を目指したプラントシステム技術の確立  
プラント機器としての性能を持った遠心分離機量産技術の確立

連続運転を通じての濃縮プラントの総合的性能の確認

連続運転を通じてのプラント信頼性の確立

連続運転を通じてのプラント経済性の確認

ウラン濃縮原型プラントに与えられた目標を一言でいえば、「商業プラントにつながる技術的確認を得る」ことであったといえることができる。

表1 我が国における遠心法ウラン濃縮技術開発の歴史

時期	事項
1959年	・理化学研究所において我が国初の遠心分離法基礎研究開。
1964年	・原子燃料公社が開発を担当。遠心分離法の基礎試験を開。
1969年	・5月 初のウラン濃縮の分離・濃縮試験に成功。 ・8月 原子力委員会が『濃縮技術開発』を国の特定総合研究に指定。これにより予算、人員大幅増加。 (1971年夏 ウレノコ社が発足)
1972年	・8月 『遠心分離法』をナショナルプロジェクトに指定。
1974年	・カスケード試験装置、C-1 (180台) が1974年に、C-2 (250台) が1975年に完成し、ウラン試験を開始。
1976年	・原子力委員会が『パイロットプラント』の建設決定。
1977年	・建設サイトが人形峠事業所に決定。土地造成工事開始。 (この頃カーター政権の提唱でINFCE開始)
1979年	・9月 OP1-A (遠心分離機 約1,000台) 運転開始。これにより、1980年2月のINFCEにおいて、我が国をウラン濃縮技術保有国として国際的に認知。
1980年	・10月 OP-1B (遠心分離機 約3,000台) 運転開始。
1982年	・3月 OP-2 (遠心分離機 約3,000台) 運転開始。 ・6月 原子力委員会が『原型プラント』の建設を決定
1983年	・11月 建設サイトが人形峠事業所に決定。
1984年	・11月 土地造成工事開始。
1985年	・11月 建屋建設工事開始。 ・日本原燃産業(株)と技術協力基本協定を締結し、技術支援を開始。
1988年	・4月 第一運転単位(DOP-1) 操業開始。
1989年	・5月 第二運転単位(DOP-2) 操業開始。(全面操業)
1990年	・3月 パイロットプラント運転終了。
1992年	・3月 日本原燃産業(株)六ヶ所ウラン濃縮工場操業開始。
1993年	・4月 実用規模カスケード試験装置(CFP) 試験運転開始。
1998年	・4月 DOP-1 10年達成。 ・7月 延長役務運転開始。
1999年	・5月 DOP-2 10年達成。 ・11月 DOP-2操業運転終了。(原料供給停止及び遠心分離機停止)
2001年	・2月 DOP-1操業運転終了。(原料供給停止及び遠心分離機停止)

### 3. ウラン濃縮原型プラントの概要

#### 3.1 プラントの概要

ウラン濃縮原型プラントは、単一機器であるガス遠心分離機を多数台配置したカスケード設備を中心としたプラントである。ウラン濃縮原型プラ

ント設備構成の概要を図1に示す。また、プラントを構成する主な設備の機能を以下に示す。

**原料発生系は、原料となる六フッ化ウラン(以下、UF<sub>6</sub>)を加熱することで、一定圧力のUF<sub>6</sub>ガスを供給する設備**

**カスケード系は、原料UF<sub>6</sub>ガス中のU235の存在比を遠心分離機により高める(濃縮)設備**

**高周波電源系は、商用電源を遠心分離機駆動用の高周波電源に変換する設備**

**製廃品捕集系及び回収系は、製品(濃縮)UF<sub>6</sub>ガス及び廃品(劣化)UF<sub>6</sub>ガスを捕集・回収する設備**

**均質系は、回収した製品UF<sub>6</sub>を液化することにより、製品シリンダ内の製品濃縮度を均一にする液化均質と、製品の品質を保証するために用いる液体サンプルを採取する設備**

**給排気系は、プラント内の放射線管理区域内の給排気を行う設備**

**ユーティリティ系は機器冷却水等のユーティリティを供給する設備**

これらの設備のうち、カスケード系、高周波電源系及び製廃品捕集系は、大規模ウラン濃縮プラント建設の特徴である、運転単位を一つのユニットとし設備規模を段階的に拡大していく技術を実証するために、2期に分けて建設を行った。このため、DOP-1、DOP-2でそれぞれ独立した設備となっている。

また、DOP-1とDOP-2とでは次の2点において

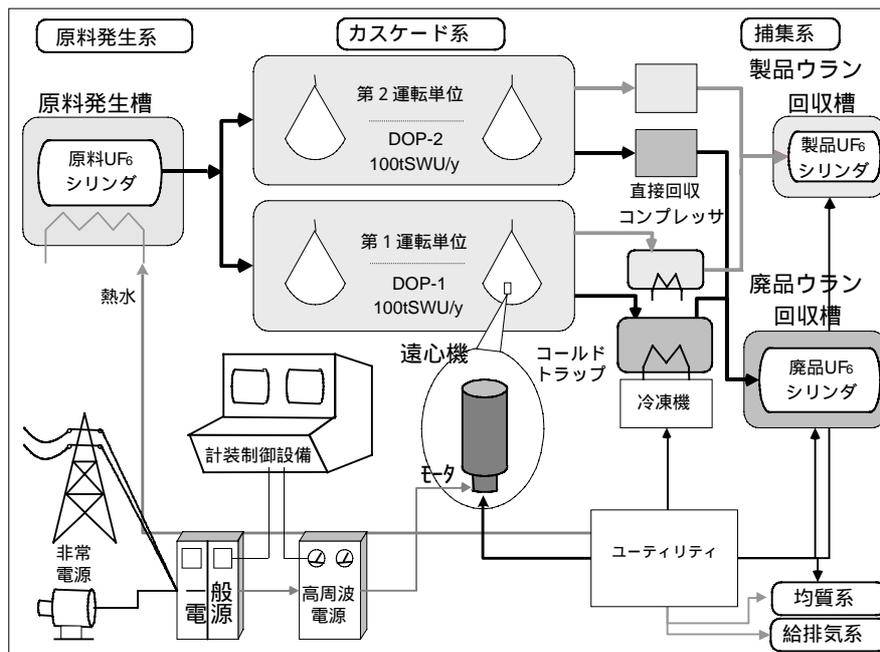


図1 ウラン濃縮原型プラント設備構成



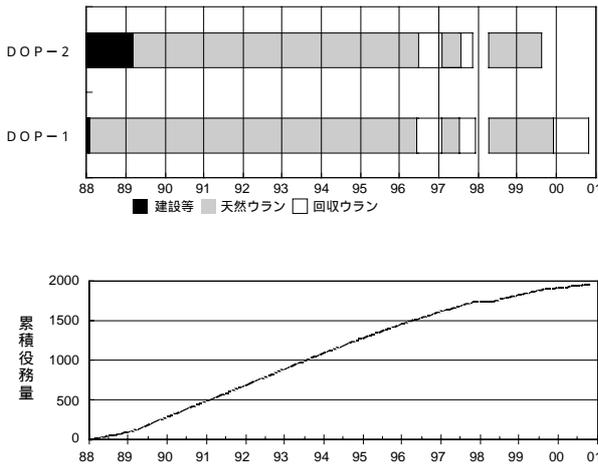


図3 運転実績

所再処理工場で生産し、人形峠環境技術センターの製錬転換施設で転換した回収ウランを原料として用いた役務生産運転を行った。その際、天然ウラン原料から回収ウラン原料に切替えるため、役務生産運転の計画生産停止を行っている。

また、これ以外では、基本計画から濃縮役務延長契約への切替時に計画生産停止を行った。また、1990年7月に発生した人形峠環境技術センターの停電により役務生産運転の一時停止を余儀なくされた。

#### 4. 運転実績

本章では、ウラン濃縮原型プラントの運転実績を諸量面から評価する。なお、本報告では基本的に、DOP-1操業開始時から1998年3月までの当初計画期間における運転実績を基に評価を行った<sup>1)</sup>。

##### 4.1 製品濃縮度の分布

ウラン濃縮原型プラントにおいて、操業開始時から2001年2月までの間に生産した製品の濃縮度(U235の含まれる割合)分布を図4に示す。また、設計時点の計画値と比較した結果を図4及び図5に示す。

この図から分かるように、設計時点では役務生産する製品濃縮度の範囲を、2%から5%の広い範囲に想定していた。このため低濃縮度の製品をDOP-1で、高濃縮度の製品をDOP-2で生産する計画とし、DOP-1、DOP-2がそれぞれ受け持つ範囲の製品を生産する時に最大の効率を得られるように、遠心分離機の設置台数や段構成等のカスケード形状を決めた。

これに対して、実績では、製品濃縮度の範囲が全体的に高濃縮度側に偏っており、4%から4.5%の濃縮度が全役務生産の7割を占めている。これ

は、ウラン濃縮原型プラントでの役務生産が、顧客である電力会社との契約に基づいて実施されたことから、顧客のニーズが設計時の想定濃縮度からずれたことによるものである。

##### 4.2 ホット定格稼働率及び設備利用率

ウラン濃縮プラントでは、役務生産運転を行っている状態をホット定格運転と呼ぶ。ここでは、ウラン濃縮原型プラントの稼働状況について、式(1)で定義されるホット定格稼働率( $Th$ )により評価した。

$$Th = \frac{\sum_{i=1}^n (ht)_i}{\sum_{i=1}^n (T)_i} \quad \dots\dots (1)$$

: 評価期間の時間

$ht$ : ホット定格時間

$n$ : カスケードの数

その結果、操業開始から当初計画期間である約10年間のホット定格稼働率は、前述した、当初計画期間に実施した2回の天然ウランから回収ウランへの切替のための計画停止を除いた評価では99.9%となっている。

この値は、設計時にFTA(Fault Tree Analysis)手法により構成部品の故障確率を系統的に累積した評価の結果である96.3%と比べ、3.6%の稼働率向上となっている。このように設計時点で想定したホット定格稼働率を実績が上回った主な要因は、プロセス機器故障によるDOP-1、DOP-2両運転単位の役務生産停止や長時間に及ぶ停電という、稼働率を低下させる深刻な事象が発生しなかったためである。また、この背景には迅速な保守、プラント停止回避のための適切な運転対応、絶えまない設備改善等の効果を上げることができる。

設備の稼働状況を評価する手法には、上記の“時間”に着目した評価と合わせて、設備の利用状況に着目した評価がある。ウラン濃縮プラントでは、役務処理量(分離仕事量)で設備の利用状況を表すことができ、設備利用率( $Ts$ )として式(2)で定義される。

$$Ts = \frac{\sum_{i=1}^n (Sr)_i}{\sum_{i=1}^n (Ss)_i} \quad \dots\dots (2)$$

$Ss$ : 設計役務処理能力

$Sr$ : 実役務処理量

$n$ : カスケードの数

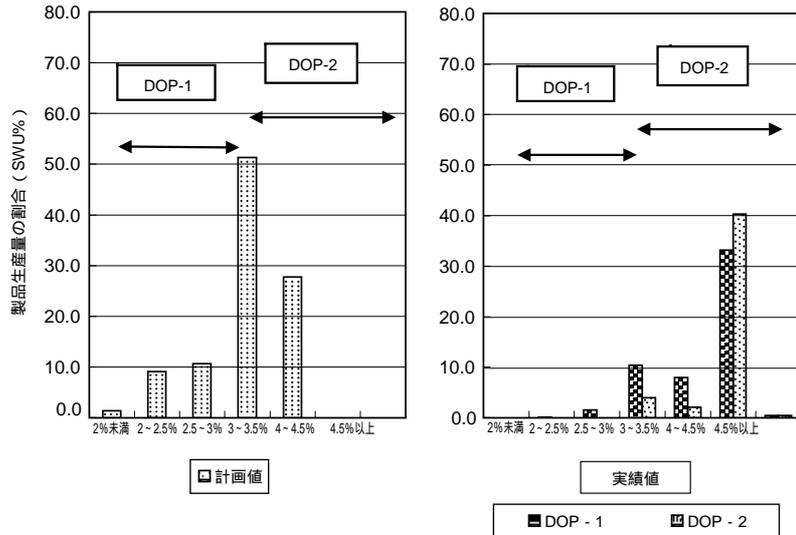


図4 濃度スペクトラム

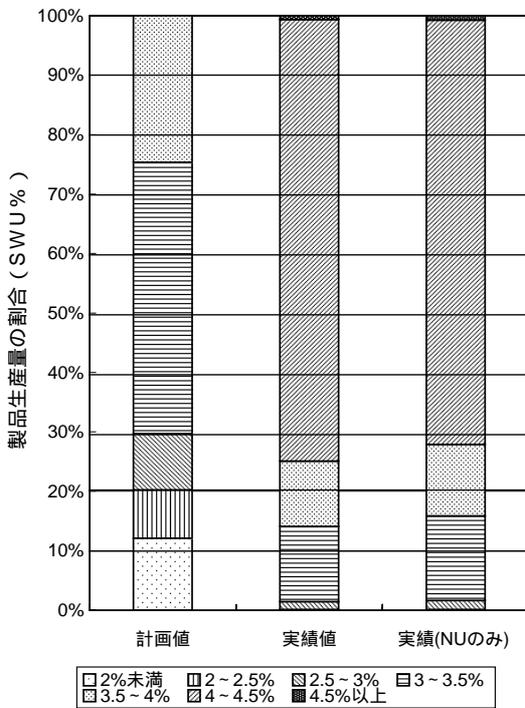


図5 製品濃度割合の計画と実績

この評価では、設計時点で想定した、遠心分離機停止と機器故障による生産性の低下の評価に基づく設備利用率92.9%に対し、実績値は、天然ウランから回収ウランへの切替のための計画停止を考慮した場合94.3%、これを考慮しない場合でも、93.4%という値となっている。

なお、ホット定格稼働率が99.9%なのに対し、設備利用率が94.3%となっているのは、期間中にカスケード設備を構成する遠心分離機の一部が停止したことによる役務処理能力の低下が主要因である。これ以外の要因としては、濃縮度スペクトラ

ムの高濃縮側へのシフトによるカスケード効率の低下が考えられる。

#### 4.3 ユーティリティ諸量使用量

次に、ウラン濃縮原型プラントにおける各種のユーティリティの使用量を示す。

ウラン濃縮原型プラントにおけるユーティリティには、電力、燃料(重油)、水、窒素、ケミカル類等がある。ウラン濃縮原型プラントの運転コストの中で、これらユーティリティ諸量全体が占める割合は約5%程度である。その内の80%を電力費が占め、残り20%の大部分が燃料費である。その他のユーティリティ類は無視できるほど小さい。ここでは、ユーティリティの中で相対的に使用量の大きい、電力と燃料について単位分離仕事量当たりの諸量使用量を評価した。なお、本評価においては、すべての運転期間を対象とした評価(評価期間Aとする)と、天然ウランから回収ウランへの切替のための計画停止期間を除外した評価(評価期間Bとする)を行った。

##### (1) 電力量

評価期間Aと評価期間Bについて、単位分離仕事量(kgSWU)当たりの電力使用量(kWh)を夏期、冬季、中間期の3区間に分けて評価した結果を設計値と共に図6に示す。

この図から分かるように、電力使用量はすべての運転期間の平均となる評価期間Aの評価では約123kWh/kgSWU、また評価期間Bの評価では約114kWh/kgSWUとなった。これに対して設計時の評価では150kWh/kgSWUと想定した。評価期間A、Bいずれの評価でも、設計値に比べて電力使用量は小さな値となっている。

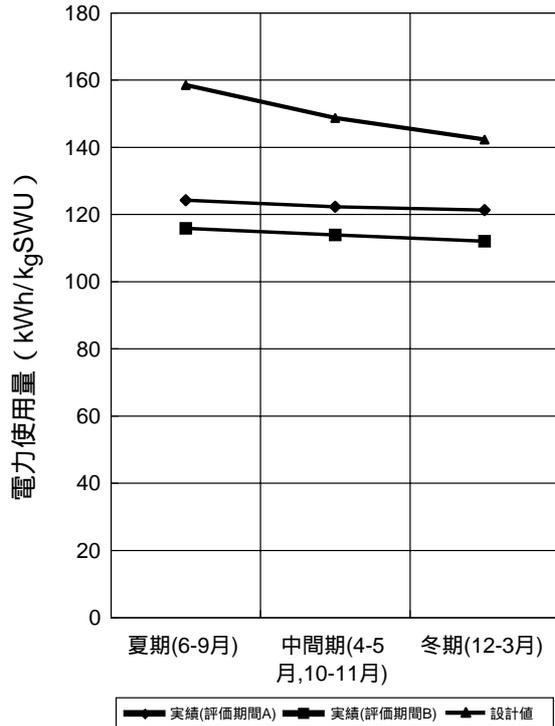


図6 電力使用量季節変動

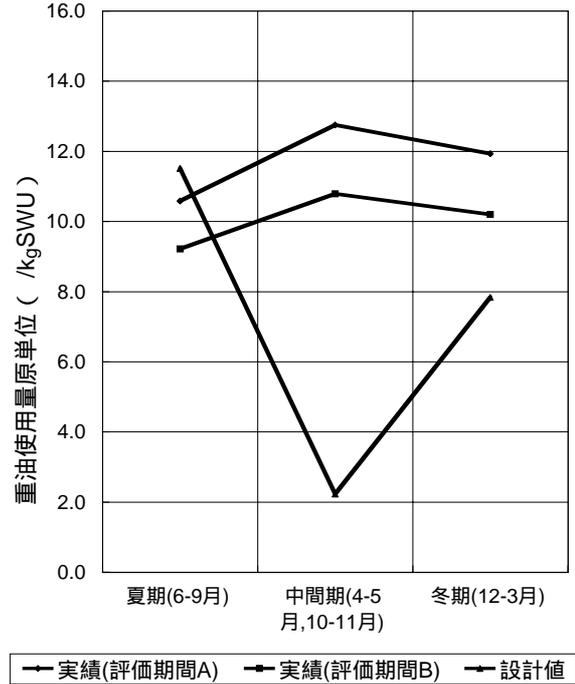


図8 重油使用量と季節変動

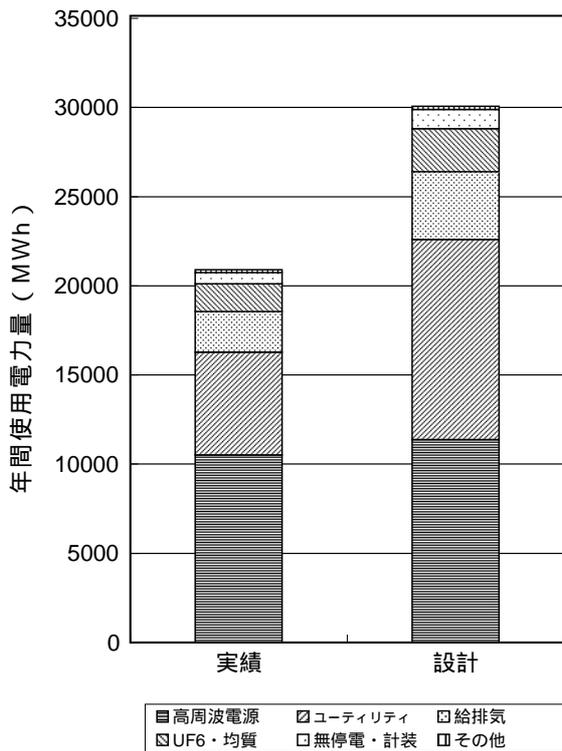


図7 電力使用の内訳

(評価期間Bでの実績値と設計値の比較)

この要因は、図7に示すように電力使用量の最も大きな割合を占めるユーティリティ設備で設計値の約5割、次に大きな割合を占める給排気設備で設計値の約6割に使用量が下がっていることに

よる。使用量の大幅な低下は、大型のポンプ、ブロー類の負荷率に対する設計時の余裕が大きかったことによる。

(2) 燃料(重油)

重油使用量について、同様な評価を行った結果を図8に示す。

重油使用量については、設計値7.2 / kgSWUに対し、評価期間Aでの評価では約12 / kgSWU、評価期間Bでの評価では約10 / kgSWUとなっており、いずれの評価でも設計値を上回っている。また、特徴的な傾向として、季節による変動が設計と大きく異なっており、特に中間期において設計値と実績値の差異が大きい。これは、中間期に特に大きくなる外気温の日間変動により、建屋の空調設備が暖房と冷房を繰り返し、暖房・冷房双方の負荷が空調設備に加わることによって、その動力源である重油の使用量が増加したためである。

5. おわりに

ウラン濃縮原型プラントは、ウラン濃縮の事業化につなげる最終段階と位置付けられ、事業化に向けての技術的、経済的見通しを得ることが役割であった。

本報告では、ウラン濃縮原型プラントに与えられた役割について、稼働率や設備利用率という技術面からの総合指標により評価した。

この結果、当初計画である約10年間の運転実績として、ホット定格稼働率99.9%、設備利用率94.3%を達成しており、ウラン濃縮原型プラントの技術は、10年を超える連続無停止操業という他のプラントでは類例のない、ウラン濃縮プラント

特有の要求に十分答えられる技術であることを実証した。

#### 参考文献

- 1) 松原達郎，根本憲伯 他：“ウラン濃縮原型プラントの生産実績と運転諸量評価”，原子力学会「1999春の大会」要旨集

【技術報告】



# ウラン濃縮原型プラントにおける技術の実証 量産技術, 信頼性, 無停止運転技術

門 一実 河原 喜幸\* 我妻 武志  
白水 久夫 野村 光生 杉杖 典岳

人形峠環境技術センター 施設管理部  
\*東海事業所 環境保全・研究開発センター 環境保全部

資料番号：10別冊 - 2

Evaluation of Key Technology at a Uranium Enrichment  
Demonstration Plant

-Mass Production, Centrifuge Reliability, Continuous  
Operation Technology-

Kazumi KADO Nobuyuki KAWAHARA\* Takeshi AGATUMA  
Hisao SIROMIZU Mitsuo NOMURA Noritake SUGITSUE

Facility Management Division Ningyo-toge Environmental  
Engineering Center

\*Waste Management Division, Waste Management and Fuel  
Cycle Research Center Tokai Works

ウラン濃縮プラントに求められる枢要技術として、遠心分離機量産技術、遠心分離機信頼性、無停止連続運転技術について評価した。

その結果、ウラン濃縮原型プラントに適用した技術により連続無停止運転が可能であることを、約13年間にわたる運転により実証した。また、遠心分離機の寿命についても、当初の目標を越えた生産運転が可能であることを、ウラン濃縮原型プラントの運転実績により確認した。

*The important technology (centrifuge mass production and reliability) and continuous operation used in uranium enrichment plants are evaluated.*

*The evaluations show that continuous operation is possible by operating for about thirteen years using the technology that was used in the uranium enrichment demonstration plant.*

*The results of production operating the uranium enrichment demonstration plant also confirmed that the centrifuge life exceed an original goal was possible.*

## キーワード

ウラン濃縮事業, ウラン濃縮原型プラント, 遠心法, 運転実績, 遠心分離機, 無停止運転, 量産技術, 表面分析, UF<sub>6</sub>, 反応

*Uranium Enrichment Business, Uranium Enrichment Demonstration Plant, Centrifuge Method, Operation Record, Gas Centrifuge, Continuous Operation, mass production, Surface Analysis Reaction, Uranium Hexafluoride*



門 一実



河原 喜幸



我妻 武志



白水 久夫



野村 光生



杉杖 典岳

## 1. はじめに

本報告では、ウラン濃縮原型プラントの計画時点で与えられた技術面の課題に着目し、これらの主要技術がウラン濃縮原型プラント13年間の運転を通じてどのように実証されたのかを検証する。

ウラン濃縮事業は、事業者がプラントを保有し、顧客に対して濃縮役務を提供する事業である。このような事業の形態から、ウラン濃縮事業は次のような特徴を有している。

プラント取得のための設備投資額が大きい。

設備投資に比べて稼働コストが小さい。また、稼働コスト中の変動費の比率が小さい。

提供する濃縮役務は付加価値が大きい。

このように、ウラン濃縮事業は、濃縮役務を提供するサービス業でありながら、初期の設備投資が大きい装置（設備）産業的特徴を強く持った事業であるといえる。

よって、ウラン濃縮事業の経済性を確保するためには、設備投資の低減と設備の利用効率（稼働率）の向上が重要なポイントとなる。本章では、そのための方策として、ウラン濃縮原型プラントに取り入れられた以下の点について紹介する。

ウラン濃縮原型プラントの建設・運転に当たっては、設備投資の低減を目的とした、遠心分離機量産技術と量産体制下での品質保証システムの確立が重要であった。ここでは、ウラン濃縮原型プラントに適用された、遠心分離機の設計から品質管理に至る総合的技術開発の在り方について示す。

プラント機器の稼働率という観点では、ウラン濃縮プラントの中心機器である遠心分離機の信頼性が最も重要な因子となる。そこで、ウラン濃縮原型プラントの運転実績から求められた遠心分離機の信頼性について評価し、併せて、遠心分離機の信頼性（寿命）に影響を与える要因分析結果を示す。

稼働率の向上の面からは、プラントの長期停止の要因と成りうる、設備の増設や設備の保守・点検について、役務生産運転を止めることなく、安全に実施するために必要な、無停止増設技術、無停止保守技術について示す。

## 2. 遠心分離機の開発<sup>1)</sup>

ウラン濃縮原型プラント用遠心分離機として、DOP-1、DOP-2の2種類の遠心分離機を開発した。遠心分離機モデルを図1に示す。

後発のカスケード設備に設置したDOP-2遠心分離機は、長胴化技術開発成果を反映し、遠心分離

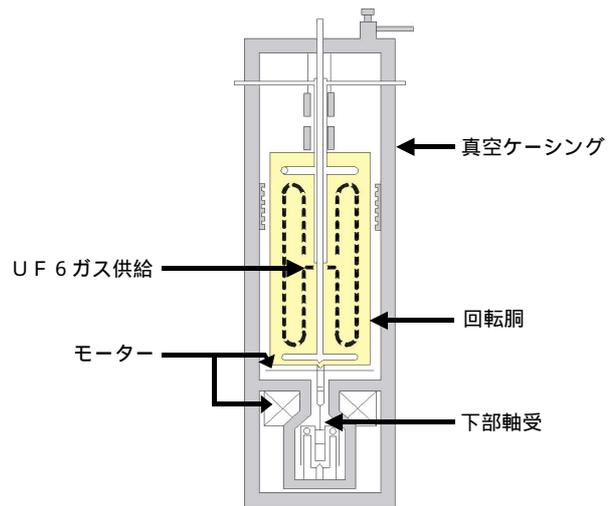


図1 遠心機モデル

機回転体の長さを長くすることで、役務処理能力をDOP-1遠心分離機に比べて約30%向上させている。さらに、DOP-2遠心分離機では、複数の遠心分離機を一つの外筒（チェンバ）に収納する構造とすることで、遠心分離機の高密度設置や環境温度変化の影響を緩和する等の工夫がされた遠心分離機となっている。

分離性能に加えて、プラント機器である遠心分離機には、長期間の性能安定性や信頼性も重要な要素として求められる。

このため、設計から製造に至る全工程を対象とした総合的技術開発を行い、ウラン濃縮原型プラントに採用する遠心分離機の仕様を確定した。

本章では、この総合的技術開発のポイントとなる、分離性能に関する開発、遠心分離機製造時の品質管理、量産遠心分離機の性能評価について紹介する。

### (1) 分離性能に関する開発

遠心分離機の分離性能は、基本的に、回転胴の長さ及び回転の周速によって決定されるが、その性能を最大限引き出すためには、回転胴内のUF<sub>6</sub>の流れを最適化する必要がある。この内部の流れは、回転胴内部形状や回転胴温度分布が重要な影響因子であることから、それらをパラメータとした試験を実施し、遠心分離機構造の最適化を図った。特に、回転胴温度分布については、分離性能に非常に敏感に影響するため、実験段階で確認された最適温度分布を、ウラン濃縮原型プラントの運転状態でも精度よく再現させる必要がある。そのため、年間をとおしてのウラン濃縮原型プラントの環境温度条件変化を考慮した条件下で、遠心分離機の伝熱に関する仕様、例えば、各部品の表

面処理、輻射率、接触面の粗さ、接触圧力、恒温水の通水条件等を詳細に決定した。また、遠心分離機は多数台製作することから、個々の遠心分離機のばらつきを、カスケード特性に影響しない範囲まで小さくするための製作公差等を厳格に定めた。

#### (2) 遠心分離機製造時の品質管理

ウラン濃縮原型プラントの要求性能を満足させるためには、製造したすべての遠心分離機が、ウラン濃縮原型プラントに据え付けられるまでの全工程、すなわち、部品製造から遠心分離機組立て、そして、組立て工場からウラン濃縮原型プラントへの輸送・据付けまでの間の品質管理を行う必要がある。しかし、その確認をすべての工程のすべての遠心分離機について行ったのでは、製造コストが非常に高くなるのが容易に想像される。

そこで、ウラン濃縮原型プラント用遠心分離機の製造では、関係する全メーカを対象に、品質保証体制、品質管理要領等の整備を図ったほか、出来上がった遠心分離機の性能を検査するのではなく、製造プロセスを管理する方法を採った。プロセス管理の適切さは立会いにより検査した。また、検査結果を随時評価し、検査項目、頻度の低減化を図った。

#### (3) 量産遠心分離機の性能評価

ウラン濃縮原型プラントが運転を開始する前段階で、品質管理要領書に従って製造された量産遠心分離機を用いて、先行的に性能評価試験を実施した。

これは、量産遠心分離機の性能を直接把握することによって、設計仕様、品質管理要領書の妥当性を評価するもので、試験によって得られた特性をウラン濃縮原型プラントの運転要領に反映することを目的として行った。

その結果、分離性能を含む各種の性能、特性が目標性能を満足していることを確認した。

#### (4) 遠心分離機量産技術の確立

このような総合的な技術開発の結果である、DOP-2遠心分離機の仕様は、ウラン濃縮原型プラントに続く商業プラントに引き継がれ、主要な量産設備は増強することなく商業プラント遠心分離機生産を可能とした。これは、ウラン濃縮原型プラントの遠心分離機製造を通じて確立した、量産体制下における品質管理システムが有効に機能した結果である。また、この品質管理システムの妥当性については、ウラン濃縮原型プラントの13年間の運転実績により証明されたものと評価できる。

### 3. 遠心分離機信頼性評価<sup>2)</sup>

遠心法によるウラン濃縮事業では、遠心分離機のコストパフォーマンスが、事業の経済性を大きく左右する。ここでいうコストパフォーマンスとは、直接的には、遠心分離機の取得コストに対する役務処理能力であるが、もう一つの重要な要素に、遠心分離機の時間領域での信頼性＝遠心分離機の寿命がある。

ウラン濃縮原型プラントは、計画段階において10年間の連続運転を一つの技術目標として設定している。また、この10年間の運転期間を対象とした生産解析では、停電等によるプラントの停止や遠心分離機故障等による生産効率の低下等を含めて、92.9%の設備利用率を想定している。この目標に対して、DOP-1が1998年4月、DOP-2が1999年5月にそれぞれ10年間の運転を達成し、1998年3月までの実績で、設備利用率約94%を達成しており、この点から所期の目標は達成したものと評価することができる。

ここで約6%の設備利用率の低下は、その大部分が、遠心分離機の故障によるカスケード設備の効率低下に起因するものである。

遠心分離機の寿命が、役務生産コストを大きく左右するウラン濃縮事業では、遠心分離機の寿命特性を把握しておくことは長期的な事業計画を考える上で最も重要な要素である。

そこで、本章ではウラン濃縮原型プラントにおける遠心分離機の運転実績を基に、現象論的に見た遠心分離機の故障要因の推定と、寿命特性に関する評価結果について紹介する。

#### 3.1 遠心分離機故障発生状況

ウラン濃縮原型プラントは、DOP-1、DOP-2ともに、1988年4月及び1989年5月からの運転初期に、遠心分離機材料の強度劣化等の問題に起因すると考えられる突発的な破損事象がわずかに見られたものの、発生確率は極めて低く、順調な運転を行ってきた。

その後、運転開始から約3年ほど経過した頃から、遠心分離機の挙動に、従前には見られなかった、「遠心分離機の回転数が徐々に低下し、一定の回転数まで低下すると運転を維持することができなくなり、最終的に停止に至る事象（以下、すべり事象）」が現れるようになった。

この遠心分離機のすべり事象も、突発的破損事象同様、その発生確率は十分に低い値で推移していた。

しかし、1993年2月に行った遠心分離機を駆動

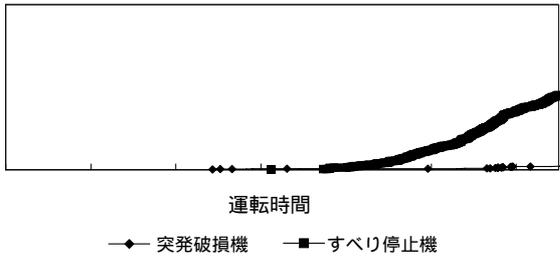


図2 DOP-2停止遠心機の発生状況

するための高周波電源装置の定期点検時に、DOP-2において、それまでに発生していたすべり事象よりも明らかに高い確率ですべり事象が発生した。図2「DOP-2停止遠心分離機の発生状況」に示すように、その後の故障遠心分離機の推移は、突発的破損事象とすべり事象とは明らかに異なる傾向を示している。突発的破損事象が偶発的故障領域で推移しているのに対して、すべり事象は、運転時間が経過するにしたがって、発生確率が増加する傾向を示している。なお、DOP-1遠心分離機でも基本的には同様の傾向が見られる。

3.2 すべり事象発生要因の調査

遠心分離機すべり事象は、何らかの理由により、遠心分離機の負荷が駆動用モータの出力を上回ったことにより発生しているものと考えられる。ここで、遠心分離機の負荷が駆動用のモータ出力を上回る原因としては、次のような要因が考えられる。

モータ出力の低下

風損の増加（回転体と周囲の気体との摩擦により発生する抵抗）

機械損の増加（遠心分離機回転体の負荷により軸受け等に発生する抵抗）

そこで、これらについて調査を行った結果、遠心分離機回転体の負荷である機械損の計測において、一部の遠心分離機に機械損の増加が見られた。また、その後の継続計測により、機械損は運転時間の経過に比例して増加すること、及び機械損が一定値に達すると回転数が低下することが判明した。この計測事実から推定される機械損と回転数の関係を図3に示す。この図から、遠心分離機のすべり事象は、回転体の機械損増加に起因して発生していることが分かった。これを受け、その後機械損の増加要因に関する調査を実施した。

(1) ウラン化合物の付着

機械損の増加要因として、まず考えられたのは、回転体へのウラン化合物の付着である。

この事象の確認方法としては、すべり事象が発

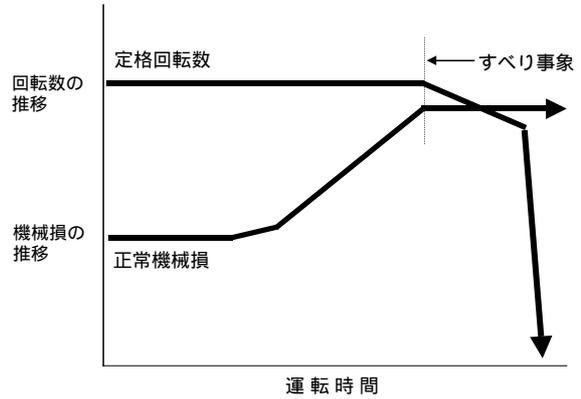


図3 機械損と回転数の関係概念図

生している遠心分離機を分解し、直接観察することが最も直接的で確実な方法である。しかしウラン濃縮原型プラントには、10年間の連続運転という重要な目標があったことから、プラントの停止を伴う直接観察は行わなかった。このため、半導体(Ge)検出器を用いて、遠心分離機外部から線を計測することにより<sup>3)</sup>、遠心分離機内部の局所領域に存在するウラン化合物を定量的に計測する手法を開発し、これを適用した。

その結果、遠心分離機回転体下部でのウラン化合物の存在が確認された。また、このウラン化合物の量と機械損の間には、図4に示すように、ウラン化合物の量が一定量(しきい値)を超えると機械損が増加するグループと、ウラン化合物の付着量は増加するものの、機械損は増加しないグループに別れるという傾向が存在することが分かった。この結果からは、ウラン化合物付着の進行と機械損の増加が、単純な比例関係にはなく、付着したウラン化合物の剥離を含め、何らかの要因でウラン化合物の付着が不均一に進行した場合のみ、機械損の増加につながることを示しているものと推定される。

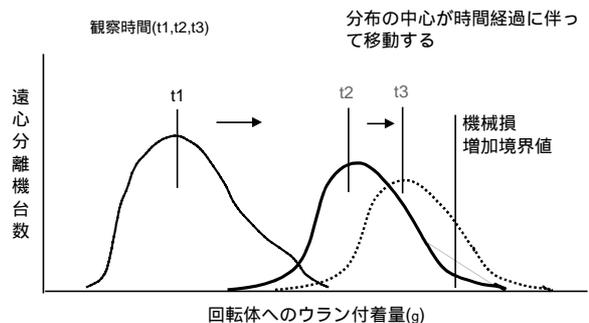


図4 線測定による遠心機回転体へのウラン付着量の変化概念図

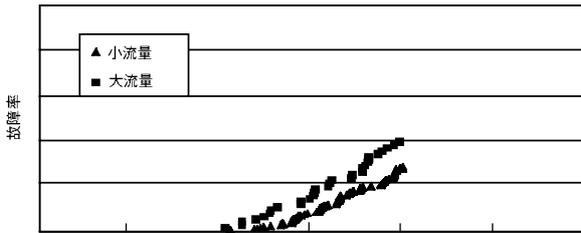


図5 積算負荷

## (2) ウラン化合物付着要因

また、ウラン化合物付着現象と遠心分離機の運転条件との関係について評価した結果、図5に示すように、故障率と遠心分離機の積算負荷（遠心分離機内を流れたUF<sub>6</sub>ガスの量とその時の圧力の積の積算値）との間に、比較的強い相関があることが分かった。

### 3.3 すべり事象の発生過程

一連の調査結果から、遠心分離機が定格運転を維持できなくなり、最終的に停止に至る“すべり事象”の現象論的側面からの発生メカニズムは以下のように推定される。

UF<sub>6</sub>ガスを遠心分離機に供給すると、運転条件に依存して一定の確率で回転体内部、特に回転体下部にウラン化合物の付着が発生する。

ウラン化合物の付着は、すべての遠心分離機で発生している事象であると考えられるが、この付着量が一定値に達すると、アンバランスが増加する遠心分離機とバランスが崩れない遠心分離機に別れる。

アンバランスが増加し、一定のしきい値を超えると機械損の増加が観測される。機械損がいったん増加した遠心分離機は、その後正常に戻ることはない。この点から、機械損の増加現象は不可逆現象である。

機械損の増加現象は、比較的ゆっくりとした現象で、しきい値を超えてからすべり事象が発生するまでの時間は、約2年程度と推定される。

### 3.4 遠心分離機の寿命予測

遠心分離機故障の主な要因は、すべり事象と突発的破損事象である。ここでは、この2つの事象のモデルの考え方と、これに基づくウラン濃縮原型プラント遠心分離機寿命予測結果について示す。

#### (1) すべり事象

すべり事象の発生過程は、次のように整理することができる。（ から へは時間経過を表す）

積算負荷に比例したウラン化合物の付着  
付着したウラン化合物の一部が剥離などにより、アンバランスへ移行（確率過程）  
アンバランスの増加  
機械損の増加  
遠心分離機すべり事象（すべり開始しきい値を超えた時点）  
遠心分離機停止事象

ここで、の“付着したウラン化合物の一部がアンバランスへ移行する過程”は、その発生が不確定な要素を含むことから、確率過程として扱う必要がある。そのほかの過程については、すべて不可逆事象であり、時間の関数として定義することができる。このことから、過程の発生確率を統計的に定義することで、個々の遠心分離機の寿命を推定することができる。

#### (2) 突発的破損事象

突発的破損事象は、実績データの評価からランダムに発生することが分かっている。このため、評価期間中、一定の故障率を設定することで、故障発生台数を推定することができる。

この二つの考え方に基づいて行った遠心分離機故障予測結果は、当初計画の10年間のウラン濃縮原型プラントの運転実績と良い一致を見た。また、図2に示した遠心分離機故障の発生パターンも再現できた。

この手法を用いた予測から、遠心分離機故障が特定の段で集中的に発生しない限り、役務処理能力は低下するものの、当初計画を越えた生産運転が可能であるとの見通しを得た。

ウラン濃縮原型プラントの実績では、式(1)で定義される実効故障率（ ）は、図6に示したように、当初計画期間までの評価では、DOP-1が約0.3%/年、DOP-2が約0.5%/年であった。また、運転終了までの評価では、DOP-1が約0.6%/年、DOP-2が約0.7%/年であった。

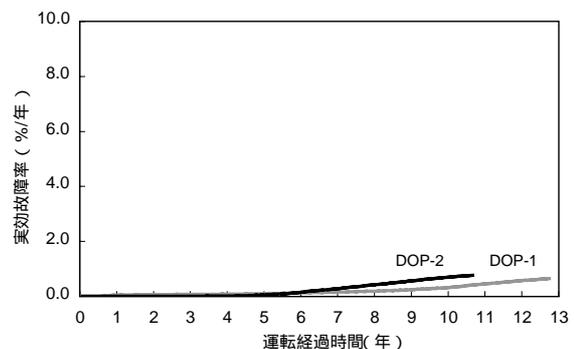


図6 ウラン濃縮原型プラント遠心分離機実効故障率推移

$$\lambda = \frac{(\gamma \cdot Tk) - \sum_{i=1}^{\gamma} t_i}{n \cdot Tk} / Tn \quad \dots\dots(1)$$

$n$  : 遠心分離機総台数

$Tk$  : 評価時点の運転時間

$\gamma$  : 故障遠心分離機台数

$t$  : 故障遠心分離機運転時間

$Tn$  : 運転年数

#### 4. 遠心分離機寿命要因評価<sup>4)</sup>

本章では、すべり事象の原因と考えられる、遠心分離機内部へのウラン化合物付着発生メカニズムについて検討した。

UF<sub>6</sub>ガスは、常温で昇華する昇華性結晶で非常に反応性に富む物質である。このため、ウラン濃縮原型プラント遠心分離機に用いている金属材料は、UF<sub>6</sub>の化学的性質を考慮し、金属材料に表面処理を施し、保護皮膜を形成させることにより耐UF<sub>6</sub>性を向上させている。しかし、現象論からの考察では、これらの処置を施しているにもかかわらず、何らかのメカニズムにより、金属材料表面保護皮膜とUF<sub>6</sub>との反応が発生している可能性が推定される。そこで、具体的な検討過程として、まず金属材料表面保護皮膜の構造を明らかにし、ついで、金属材料表面保護皮膜とUF<sub>6</sub>との反応及び反応生成物付着メカニズムについて検討した。

##### 4.1 遠心分離機材料表面保護皮膜構造

金属材料表面保護皮膜の構造を明らかにする方法として、FIB (Focused Ion Beam) 表面分析装置を用いて遠心分離機材料保護皮膜の内部構造分析を実施した。FIBは、ガリウム (Ga) のイオンをビーム状に収束させて分析材料に照射することで、分析材料表面をエッチングし、このエッチングされた分析試料の断面を二次電子像として観測する装置である<sup>5)</sup>。

サイクル機構が保有するDOP-2遠心分離機材を用いた分析結果では、図7に示すように保護皮膜は2層構造になっていることが確認された。表面に柱状結晶層が形成され、その内部に粒状結晶層が存在する。また、柱状結晶層には縦方向に粒界面が確認された。

遠心分離機表面保護皮膜は、保護皮膜構成元素の衝突、物理的相互作用、化学吸着・溶解、過飽和により保護皮膜の核が生成され、この核の成長によって保護皮膜が形成される。このような生成過程を取ることが、柱状結晶層と粒状結晶層とい

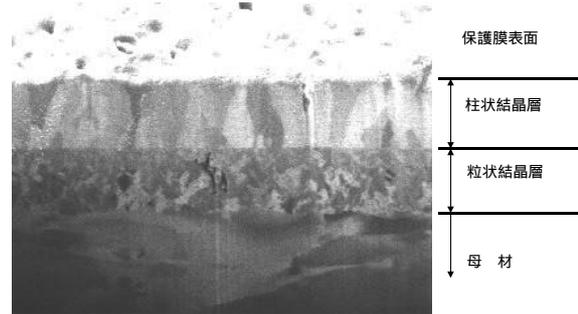


図7 FIBによる遠心分離機材料表面保護皮膜の断面観察

う2層構造を有している要因と考えられる。

次に、XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy)、AES (Auger Electron Spectroscopy) 等の表面分析装置を用いて、保護皮膜表面から深さ方向の構成成分の電子状態、表面形態、表面から深さ方向の元素推移及び表面組成分析を実施し、保護皮膜表面から内部の構造を解析した。

その結果、保護皮膜表面は膜主成分化合物のみによって構成されているが、保護皮膜深部では他の化合物や母材元素の存在も確認された。

##### 4.2 遠心分離機材料表面保護皮膜へのウラン付着

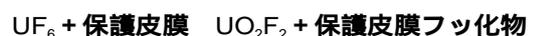
金属とUF<sub>6</sub>の反応としては、次のようになる<sup>6)</sup>。



この反応式に見るように、金属とUF<sub>6</sub>の反応生成物は、金属フッ化物とUF<sub>4</sub>及びUF<sub>5</sub>または、その仲間のU<sub>2</sub>F<sub>9</sub>などがある。UF<sub>5</sub>は、不活性雰囲気中では白色であるが、下式のように水分と敏感に反応し、淡黄色から緑色に変化し、UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>及びUF<sub>4</sub>に分解する。



また、保護皮膜とUF<sub>6</sub>は次のように反応する。



金属とUF<sub>6</sub>の反応と保護皮膜とUF<sub>6</sub>の反応を比較すると、保護皮膜では金属に比べUF<sub>6</sub>との反応速度は極めてゆっくりしたものである<sup>7)</sup>。

保護皮膜の健全性について評価するため、ウラ

ン濃縮原型プラントの遠心分離機とは構造的に多少異なるが、パイロットプラントに導入されている遠心分離機から採取した試料を用いて、材料表面保護皮膜に付着しているウラン化合物分析及び保護皮膜構造の変化についての分析を行った結果を以下に紹介する。

#### (1) 保護皮膜表面付着物の分析

XPS及びXRD(X-Ray Diffraction)等を用いて、保護皮膜表面に付着していたウラン化合物の電子状態を分析した。その結果、 $UO_2F_2$ 及び $UF_4$ が検出された。しかし、この保護皮膜表面に付着していたウラン化合物は、サンプル採取時に白色から黄緑色へ色の変化を起こした。このことから、保護皮膜表面に付着していたウラン化合物は、化合物が生成された時点では中間フッ化物である $UF_5$ であったと考えられる。

#### (2) 表面保護皮膜健全性分析1(断面観察)

次に保護皮膜の健全性評価のため、FIBを用いた保護皮膜内部構造分析及び、XPSを用いた表面から深さ方向の元素推移分析を実施した。

図8にFIBによる内部構造分析結果を示す。図中、材料表面に黒く見える部分はウラン化合物である。表面保護皮膜はその下部に、柱状結晶層及び粒状結晶層という2層構造を保った状態で存在している。

#### (3) 表面保護皮膜健全性分析2(プロファイル)

さらに、XPSによる表面から深さ方向の元素推移分析結果を図9に示す。保護皮膜成分元素と材料成分元素の推移は、 $UF_6$ に触れていない材料とほぼ同じ推移を示しているが、付着物の基本元素であるウランが、材料表面だけでなく保護皮膜内部に拡散していることが確認された。

### 4.3 ウラン付着のメカニズム

上述した分析のほか、材料表面保護皮膜の暴露試験、ウラン濃縮原型プラントにおける運転デー

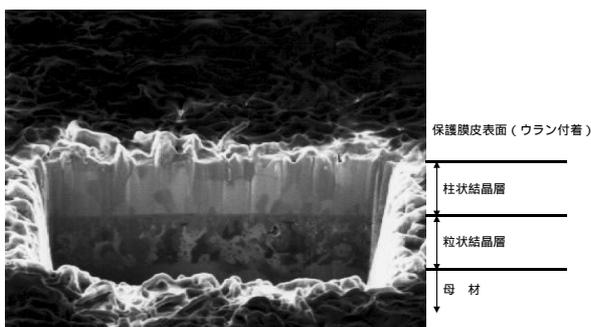


図8 FIBによるウラン化合物と表面保護皮膜の断面観察

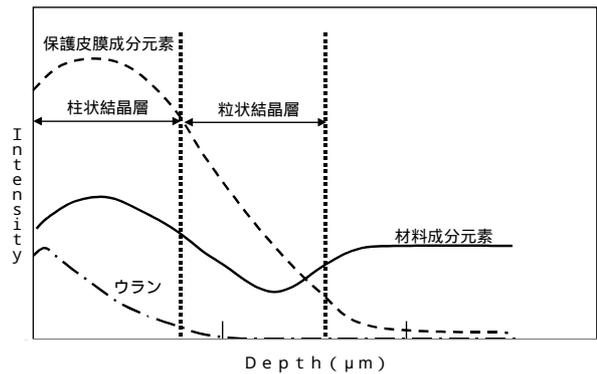


図9 FIBによる遠心分離機材料表面保護皮膜の断面観察

タ、分子法レーザ濃縮に関連した試験の知見等から、表面保護皮膜表面への $UF_5$ 付着メカニズムとして、図10に示す“ $UF_6$ 拡散・還元反応モデル”を推定した<sup>8)</sup>。

ファンデルワース力等で保護皮膜表面に付着した $UF_6$ は、保護皮膜表面の柱状結晶層粒界面を拡散し、内部の母材金属と接触し $UF_5$ に還元される。さらに拡散してきた $UF_6$ と $UF_5$ が接触することでフッ素の交換反応が起こる。この交換反応により $UF_6$ は次々に $UF_5$ に還元され、粒界面は $UF_5$ で満たされ保護皮膜表面上に到達し、表面保護皮膜上にクラスタを形成する。このクラスタがある程度の大きさになると、遠心力により、クラスタが剥離し、遠心場の最も大きな位置に移動する。クラスタが剥離した後は、また同様な交換反応が起こり、やがて次のクラスタを生成する。このように、クラスタの生成、剥離の繰返しによって、遠心分離機内の付着物量が徐々に増加する。

ただし、ウラン濃縮原型プラント遠心分離機内のウラン付着物推定結果や13年にも及び連続運転実績等から、このような付着メカニズムは実際のプラント環境下では非常に緩やかに進行するものと考えられる。

### 4.4 遠心分離機寿命への影響

分析結果及び、前節での現象面の知見から、ウラン化合物の生成が遠心分離機の寿命に与える影響について次に示す。

まず、分析等の知見から、 $UF_6$ 拡散・還元反応により生成された $UF_5$ のクラスタが、一定の大きさに成長すると、遠心力によって剥離し、外周方向に飛ばされ堆積する。この反応の繰返しにより、遠心分離機内部、特に外周部に $UF_5$ が徐々に付着していく。

また、ウラン化合物の付着は、次式(2)のよう

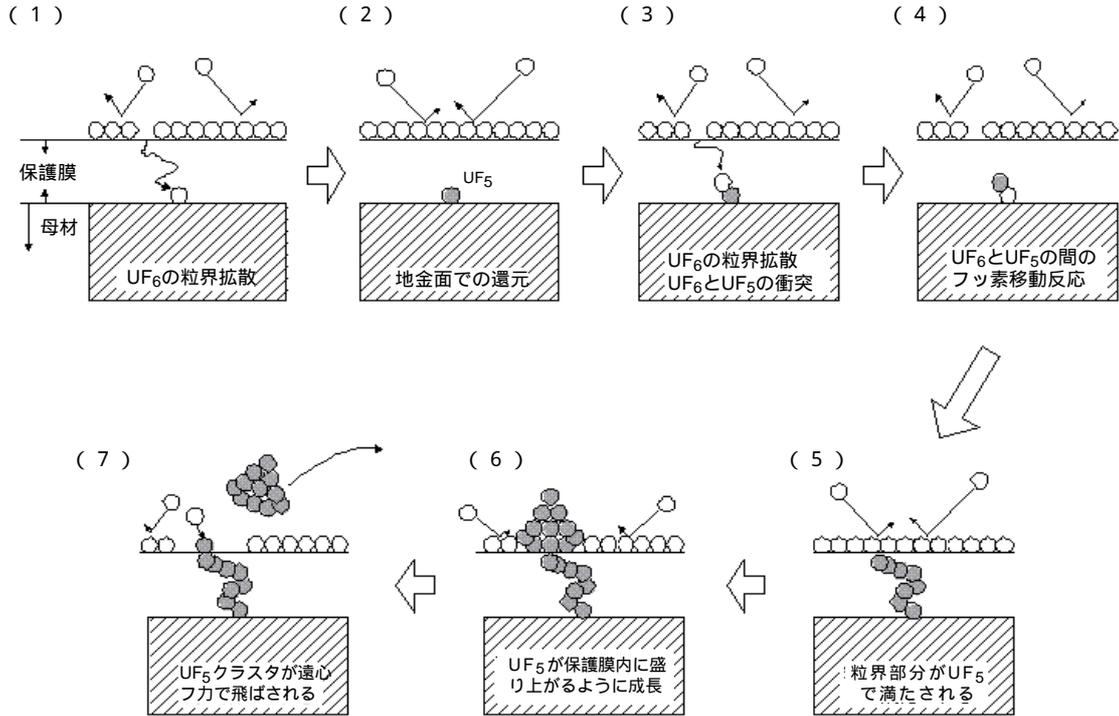


図10 遠心分離機材料表面保護皮膜へのウラン付着メカニズム

に、運転時間と積算負荷の関数として現すことができる。

$$\text{ウラン化合物付着量} = F(\text{ホット運転時間} \cdot \text{積算負荷}) \dots\dots(2)$$

この二つのことから、UF<sub>6</sub>ガスを流すことにより遠心分離機内部では、ウラン化合物が生成されるものと考えられる。

もう一つ、分かっている事実として、線による局所でのウラン化合物定量計測結果に見られるように、ウラン化合物の付着量と機械損 = アンバランス量とは、単純な比例関係にはないことである。このことから、ウラン化合物の付着進行状況に、剥離の発生を含めアンバランスを生じさせるような不均一な付着進行と、アンバランスを生じさせない均等な付着進行とが存在することが推測される。

5. 連続無停止技術

5.1 無停止増設技術<sup>9)</sup>

本節では、ウラン濃縮原型プラントにおける無停止プラント増設技術の概要と実績について紹介する。

遠心法によるウラン濃縮プラントは、前述したように装置産業的特徴を強く持っている。このこ

とから、ウラン濃縮事業の経済性を向上させるためには、プラントの建設段階で次のような点について考慮する必要がある。

濃縮役務生産コストは、プラントの主要設備である遠心分離機のコストパフォーマンスに依存するところが大きい。よって、設計段階で選択可能な最もコストパフォーマンスの高い遠心分離機を採用することが望ましい。このためには、カスケード設備の規模を比較的小さく設定し、カスケード設備単位で遠心分離機を選択できるようにする必要がある。

初期の設備投資が大きいと、資金繰りの観点から、事業収入を得ながら次の設備投資を行うことが望ましい。このためには、操業運転と建設を並行して行う必要がある。

スケールメリットや操作性を考えると、カスケード設備以外の設備は極力大規模な設備とし、かつ共通化する必要がある。

このような技術的・経済的要求に答えるために、ウラン濃縮原型プラントでは、建設初期に、共通設備であるカスケード設備以外の設備をすべて建設し、カスケード設備のみ2段階に分けて建設する方法を採り、この方法の技術実証を図る計画とした。このような方法で建設を行った場合、役務生産運転とカスケード設備の建設が並行して行われることになる。さらに、後発のカスケード

設備の建設が終了した段階でプラントにつながまなければならないが、この時、先行するカスケード設備の操業を停止したのでは、経済性の追求という初期の目的を達成できなくなる。

そこで、ウラン濃縮原型プラントの建設に当たっては、このようなプラント建設手法を可能にする手法として、操業運転中である先行カスケード設備に影響を及ぼすことなく、後発カスケード設備を順次増設することができる『無停止プラント増設技術』を取り入れている。

(1) 無停止増設技術の概要

図11に示すように、ウラン濃縮原型プラントの建設は、DOP-1カスケード設備と、共通設備であるUF<sub>6</sub>処理設備の一部（原料発生系、製品・廃品回収系）、一般電源設備、計装制御設備、補機設備、給排気設備等を第1期として建設し、その後、約1年遅れて、DOP-2のカスケード設備、製品・廃品昇圧設備の建設を第2期として行った。

DOP-1は1988年4月から操業運転を開始しており、DOP-2操業開始の1989年5月までは、DOP-1の運転とDOP-2の建設を並行して行った。

この間、1988年10月頃から、DOP-1の操業運転を継続しながらDOP-2を共通設備につなぎ込み、DOP-2カスケード設備の試験・検査を行う、いわゆる無停止プラント増設を行っている。

この無停止プラント増設を行うに当たっては、設計段階で、様々な技術が検討され、実際のプラントに適用されている。以下に、ウラン濃縮原型プラントにおいて、無停止プラント増設を可能にしている主要技術について述べる。

1) 計装制御設備の無停止増設（伝送ライン二重化の活用）

計装制御設備には、最終的に、DOP-1、DOP-2を一つのプラントとして監視・制御できることが求められる。また、これと合わせて、DOP-1単独操業運転、DOP-1操業運転とDOP-2試験運転の共存

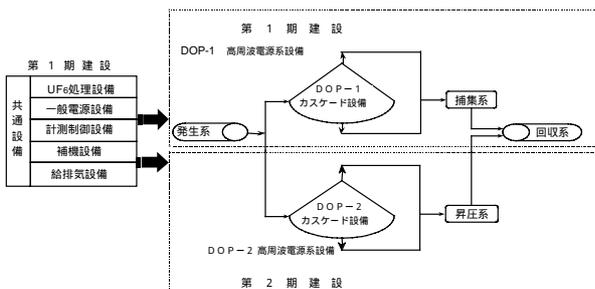


図11 ウラン濃縮原型プラント建設概要



図12 ウラン濃縮原型プラントの操業運転状態

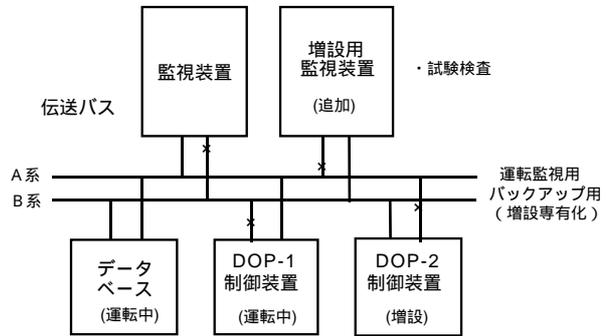


図13 計装制御設備の無停止増設の概念

という過渡的狀態にも対応できなければならない。そこで、図12に示したように、デジタル計装制御装置を適用し、二重化されたデータ伝送ラインを有効に利用することで、これらを実現している。

具体的には、図13に示すように、DOP-1単独操業運転状態から、まず、DOP-2試験運転のための監視・制御装置の増設を実施した。この時、二重化された伝送ラインを活用し、運転監視伝送ラインでDOP-1を運転しつつ、バックアップ伝送ラインを使ってDOP-2の試験検査を行った。

その後、DOP-2の試験検査が終了した時点で、すべての制御装置、監視装置を二重化伝送ラインに接続することで、本来の監視制御ラインとバックアップラインという機能分担に復帰させる。さらに、それまでDOP-1、DOP-2で機能分担されていた制御装置、監視装置の情報を相互にローディングし、計装制御装置として一体化させた。

2) インタロックの無停止試験（三位置スイッチシステムの採用）

ウラン濃縮プラントに限らず、プラントに異常が発生した場合の設備保護や異常の拡大を防止する自動シーケンス（インターロック）が、設計どおりに作動するかを確認することは試験段階の重要な確認項目である。

このようなインターロックの試験は、通常プラントの建設・試運転段階で一括して実施される。ところが、ウラン濃縮原型プラントのように、プラントの一部の設備を段階的に増設していく場合、増設のつどインターロック試験を行うことが必要になる。この時、異常に対するインターロックの作動範囲がカスケード設備内で完結している

場合は問題ないが、ウラン濃縮原型プラントでは、設備保護の観点から共通設備にまで作動範囲が及び設計となっており、既に操業運転を行っている先行カスケード設備の操業に影響を及ぼすことになる。

そこで、これに対応するため、図14に示した、

- ・DOP-1単独運転
- ・DOP-2インタロック試験
- ・DOP-1, DOP-2並列運転（全面操業）

という3つのポジションを持つ、「三位置スイッチシステム」を新規に考案し採用した。この三位置スイッチシステムには3つの接点があり、その使い方は以下のようにになっている。

#### 接点 a (DOP-1単独運転)

DOP-1, DOP-2が正常な状態で始めて操作が可能となる機器は、DOP-1単独運転状態では、DOP-2正常運転が確認できないため機器の操作ができない。そこで、DOP-1単独運転時はこの接点にDOP-2の正常信号を模擬的に与えることで、DOP-1の単独運転を行う。

#### 接点 b (DOP-2インタロック試験)

DOP-2試験時には、DOP-2のインタロックの作動確認のために、外部から異常信号を模擬的に印加するが、これを先行して操業運転を行っているDOP-1と一緒に実施したのでは、DOP-1の操業を停止してしまうことになる。このため、DOP-2単体での試験が可能となる接点を設けた。

#### 接点 c (DOP-1, DOP-2並列運転)

DOP-2単体でのインタロック試験が終了し、DOP-1, DOP-2ともに操業運転に移行した後は、この接点に切替えることで、相互にインタロックが動作する。これにより、ウラン濃縮原型プラント全体が一つのプラントとして動作する。

### 3) プロセスの無停止増設(つなぎ込み室の採用)

DOP-1, DOP-2を一つのプラントとするためには、プロセス配管や、計装制御設備の信号配線、電源配線等をつなぐ必要がある。

特にプロセス配管のつなぎ込みについては、ウ

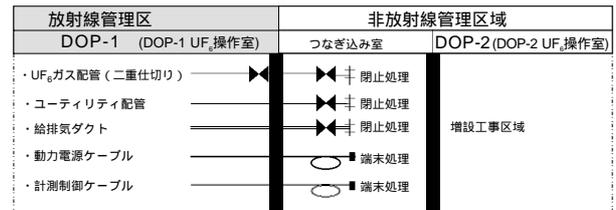


図15 つなぎ込み室

ラン濃縮プラントが真空プロセスであることや、内部を流れる流体が放射性物質であるという点から、安全で確実な方法が要求される。その一方で、実用化の観点からは、より安価で、短期間に実施可能な方法であることも求められている。

そこで、安全で効率的なつなぎ込みを実現する手法として、図15に示したつなぎ込み室を採用している。つなぎ込み室を使った接続の特徴とその手順を以下に示す。

つなぎ込み室とは、DOP-1UF<sub>6</sub>操作室とDOP-2UF<sub>6</sub>操作室の間に設置する部屋で、先行して建設されたDOP-1建設時に、DOP-2との接続部となる配管を施工している。ただし、DOP-1UF<sub>6</sub>操作室内のバルブにより、つなぎ込み室の配管にはUF<sub>6</sub>ガスは流れてこない構造となっており、結果的に、つなぎ込み室は、DOP-2との接続が終了するまで放射線管理区域外として扱うことができる。

DOP-2単独での設備確認を行った後、つなぎ込み室において真空の確認等の必要な措置を行い、DOP-1, DOP-2のプロセス配管を接続する。よってこの間の作業は放射線管理区域外での作業となり作業の効率化を図ることができる。計装制御設備の信号配線、電源配線等についても同様に行われた。

#### (2) 無停止増設技術の評価

無停止増設を実現するための主要な技術は、ウラン濃縮原型プラントにおいて始めて採用された技術である。この点から、ウラン濃縮原型プラントにより、これらの技術の有効性と実用性が実証されたことは、ウラン濃縮原型プラントに続く商業プラントにとって重要な成果であった。

また、このような技術領域では、技術の適用におけるノウハウの集約が重要であり、この点からも、ウラン濃縮原型プラントでの経験は重要な成果と位置付けられる。

## 5.2 無停止保守点検技術<sup>10)</sup>

ウラン濃縮原型プラントの保守点検方法の特徴は、役務生産運転を継続しながらプラントを停止

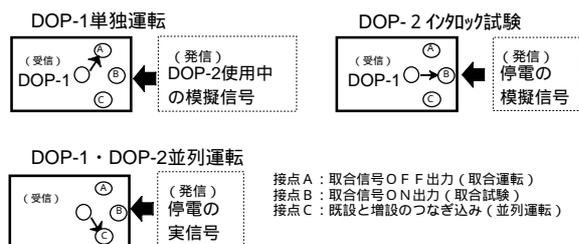


図14 三位置スイッチの機能

しないで各設備を順次点検することである。

原子力産業に限らず、一般の産業界には多種多様な構造のプラントがあり、程度の差はあるものの、ほとんどのプラントでは、定期的にプラントを停止した保守・点検を実施している。これは、プラントやプラントを構成する機器の安全性、健全性を確認し、プラントを長期間安定して使用するために不可欠な作業である。

ところが、ウラン濃縮プラントの場合、前述した濃縮事業の特徴や遠心分離機の特性から、極力プラントを停止させることなく連続して役務生産運転を行う必要があった。

このような要求から、カスケード設備を構成する遠心分離機は、事業期間中停止することなく連続運転することを前提として設計している。また、一つのカスケード設備は、多数台の遠心分離機から構成されているが、仮に幾台かの遠心分離機が停止するようなことがあっても、カスケード設備としてはその機能を維持できるような設計としている。すなわち、カスケード設備を構成する遠心分離機は、メンテナンスを行わない消耗品として設計されており、このことがカスケード設備の連続無停止運転を可能にしている。

一方で、カスケード設備以外の周辺設備は、基本的に、一般プラントでも使われている機器や装置から構成されており、機器の健全性を維持するためには、定期的な点検をすることが不可欠である。また、ウラン濃縮原型プラントに適用される各種の法律上からも、定期点検が義務づけられている。

ここでは、連続的に操業するプラントを対象とした、周辺設備の保守点検技術について示す。

#### (1) 保守点検の概要

ウラン濃縮原型プラントの保守点検には、適用法令等に基づく「法定点検」と、機器や装置の故障を未然に防止するため事業者自らが行う「自主点検」とがある。

法定点検にかかわる関係法令等には、電気事業法、労働安全衛生法、高圧ガス保安法、消防法、原子炉等規制法等があり、毎年21件の法定点検を実施している。また自主点検は設備の重要度、故障時のプラントへの影響度、及びウラン濃縮パイロットプラント施設での保守経験から選定した14件について実施している。詳細な内容については、表1 法定点検設備、表2 加工施設保安規定による点検設備及び表3 自主点検設備に示す。

#### (2) 無停止保守点検のための設備設計

ウラン濃縮原型プラントは、設計段階から無停

表1 法定点検設備

点検設備	法律	点検設備	法律
1. 非常用発電機	電機事業法	8. クレーン設備	労働安全衛生法
2. 一般電源設備		9. 一般消火設備	消防法
3. 絶縁防護具性能検査		10. ハロン消火設備	
4. 第1種圧力容器	ボイラー及び圧力容器安全規則	11. フォークリフト	労働安全衛生法
5. 第2種圧力容器		12. 精密重量計	電機管理規定
6. 液化窒素製造設備	高圧ガス取締法	13. 核物質防護設備	核物質防護基準
7. 吸収式冷凍機			

止保守点検の実施を前提としており、具体的な対応として、以下の3点を設備の重要度あるいは設備の形態等に合わせ取り入れた。

#### 電源系統の二重化

#### 同一負荷の電源系統の分散化 機器の冗長化

電源系統の二重化と同一負荷の電源系統の分散化の概念を図16に示す。この図で、常用系の低圧配電盤及び非常用低圧配電盤をNO.1とNO.2の2つの電源系統に分けることで、電源系統の二重化を図っている。さらに、同一機能の負荷、図中の例では冷却水ポンプ等については、この2系統に負荷の分散を行っている。ほかの設備についても同様に電源系統への負荷分散を行っている。

これにより、操業運転に必要な最小限の電源系統を確保し、運転を継続した状態で、電源系統をDA DB DC DDと、各ブロック単位で順次切り換えながら、電源系統やそれにつながる機器の点検を行う方式としている。

次に、機器の冗長化による対応の概念を図17に示す。機器の冗長化は、主に高周波電源設備及び無停電電源設備に採用している。

この図に示すように、従来の方式による冗長化は、基本的に、1:nの待機冗長の考え方に沿って行われていた。例えば、同一仕様の設備を2台併設し、通常は1台を運転し残りは予備機として待機し、点検時あるいは故障時に切替えて使用する方式である。このような待機冗長の考え方は、信頼性が高いことから、プラントの稼働率を重視する産業においては、基本的な技術として採用されている。しかしながら、待機冗長方式はコストがかかる上に、近年、個々の機器の信頼性の向上等もあり、稼働中の機器の突発的故障により、待機側の機器が完全な停止状態から起動する際の、故障確率を問題視するようになってきている。

このような背景もあり、ウラン濃縮原型プラントでは、待機冗長ではなく設備容量による冗長化を取り入れた。

これは、同一機能の機器の1台当たりの容量を

表2 加工施設保全規定による施設定期自主検査

設備名称		検査項目	設備名称	検査項目
1. 給排気設備		(1) 外観検査 (2) 機能検査 (3) 予備機切替試験	6. カスケード設備	(1) 流量及び圧力異常によるインターロック検査 (2) 圧力計の校正
2. 管理廃水処理設備		(1) 外観検査 (2) 漏洩検査 (3) 予備機切替試験	7. 均質設備	コールドトラップ (1) 弁の動作試験 (2) 圧力計の校正
3. 非常用通報連絡設備		(1) 機能検査		シリンダ槽 (1) 重量異常によるインターロック検査 (2) 温度及び圧力異常によるインターロック検査 (3) 重量計校正 (4) 温度計、圧力計の校正
4. 無停電電源設備		(1) 外観検査 (2) 機能検査 (3) 絶縁抵抗測定		
5. UF <sub>6</sub> 処理設備	製品コールドトラップ	(1) 弁の作動試験 (2) 圧力計の校正	8. 局所排気設備	(1) 工程用モニタ異常によるインターロック検査 (2) 工程用モニタの校正
	製品回収槽	(1) 弁の作動試験 (2) 圧力計の校正 (3) 重量計の校正	9. 非常用発電機設備	(1) 外観検査 (2) 機能検査 (3) 絶縁抵抗測定
			10. 放射線管理設備	(1) 排気用モニタの校正 (2) エリア用モニタの校正

表3 自主点検設備

設備名称	検査項目	設備名称	検査項目
1. 高周波電源設備	(1) 外観検査 (2) インターロック検査	9. 水系ポンプ	(1) 分解点検 (2) 絶縁抵抗測定 (3) 試運転確認
2. 中央監視設備	(1) 機能検査		
3. 計空コンプレッサ	(1) 分解点検 (2) 機能検査	10. ターボ冷凍機	(1) 分解点検 (2) 絶縁抵抗測定 (3) 機能検査
4. 冷凍機ユニット	(1) 分解点検 (2) 機能検査	11. 地震計測装置	(1) 外観検査 (2) 機能検査
5. ITV設備機	(1) 分解点検 (2) 機能検査	12. 圧力計原器の校正	(1) 外観検査 (2) 校正点検
6. シリンダー運搬台車	(1) 機能検査 (2) インターロック検査	13. 計測器の校正	(1) 外観検査 (2) 校正点検 (3) 機能検査
7. 受水・排水設備	(1) 清掃点検 (2) 動作確認検査		
8. クーリングタワー	(1) 電動機点検 (2) バランス調整試験	14. COD自動測定装置	(1) 外観検査 (2) 校正点検 (3) 機能検査

小さくし、複数台の機器を設置する方式で、通常時には定格容量の80%程度の負荷で運転を行い、点検あるいは機器の故障により複数台ある機器の内1台が停止した場合でも、残りの機器が100%の容量で運転することでプラントへの影響を回避する方式である。

この方式では、待機冗長と比べ、設備費が約40%程度低減でき、さらに、個々の設備を小型化できるため、点検が容易になること、待機状態からの起動する際の故障率増加の問題を回避できること、さらには通常運転時80%程度の負荷で運転を行うため、機器への負荷が軽減され故障率が低下する等の利点がある。

### (3) 保守技術の信頼性向上

次に、操業運転中に実施する保守点検の信頼性向上技術について示す。

無停止保守点検技術では、上述した、設計段階での設備の改善と合わせて、保守点検を安全に行うためのソフト面の整備が重要となる。一般プラントでの災害事例を見ると、重大な災害の多くは、保守点検中に発生していることが分かる。保守点検は総じて危険が伴うものであるが、ウラン濃縮原型プラントでは、年間、法定点検21件、自主点検14件の合わせて35件の点検を行っている。しかも、一般のプラントと異なり、操業運転を継続する中で保守点検を実施している。

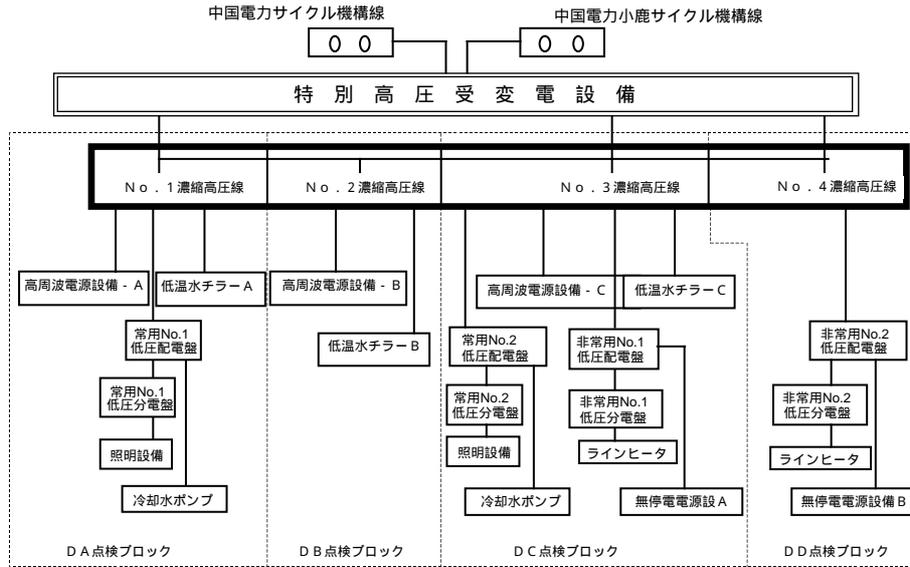


図16 一般電源設備電源系統概念図

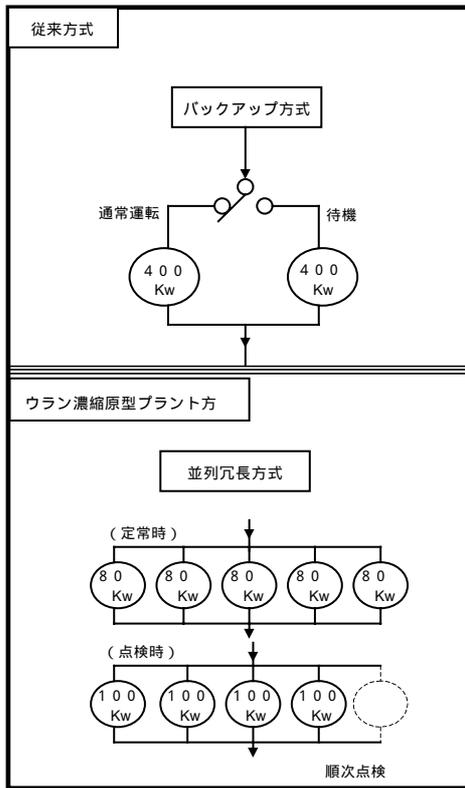


図17 プラント無停止での設備点検

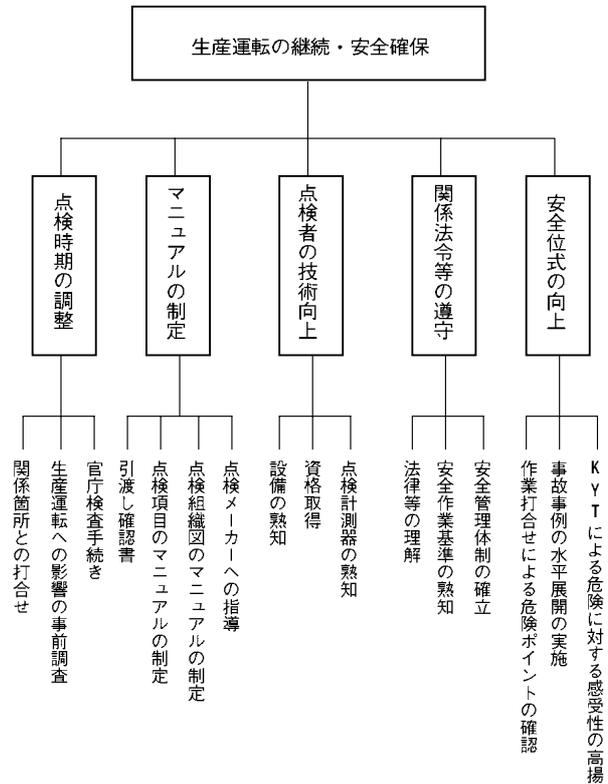


図18 点検実施上の安全ポイント

そこで、このような厳しい条件の中で、安全で効率的な保守点検が実施できるよう、図18に示す5項目の対応を行っている。

(4) 無停止保守技術の評価

ウラン濃縮原型プラントにおける約13年間の保守点検実績により、操業運転中に保守点検が実施できることを技術的に実証できた。

また、大型プラントにおける保守点検の妥当性は、長期間の運転結果を待たなければ結論が得られない場合が多い。この点から、約13年間という長期連続運転の中で蓄積された保守点検に関する一連の技術は、ウラン濃縮プラントに続く商業プラント等における、合理的保守点検方法を確立する上で、有用かつ重要な情報となる。

## 6. おわりに

本報告では、ウラン濃縮プラントに求められる以下の枢要技術について評価した。

遠心分離機量産技術

無停止連続運転技術

遠心分離機信頼性

その結果、ウラン濃縮原型プラントに適用した技術により連続無停止運転が可能であることを、約13年間にわたる運転により実証した。また、遠心分離機の寿命についても、寿命を決定する要因を明らかにするとともに、一貫した品質管理体制の下で、設計から製造、据付けに至るプロセスを管理することで、当初の目標を越えた生産運転が可能であることを、ウラン濃縮原型プラントの運転実績により確認した。

## 参考文献

- 1) 長谷川一宏, 河原喜幸 他: “ウラン濃縮原型プラント用遠心分離機の開発”, 原子力学会「1999春の大会」要旨集
- 2) 門 一実, 杉杖典岳 他: “ウラン濃縮原型プラントにおける遠心機信頼性評価”, 原子力学会「1999春の大会」要旨集
- 3) 杉杖典岳: 特許 “線測定による構造物内部の放射性物質定量方法” 出願番号10-240123, 公開番号12-065935
- 4) 野村光生, 塚根健一 他: “ウラン濃縮原型プラントにおける遠心機寿命要因評価”, 原子力学会「1999春の大会」要旨集
- 5) 斎藤安俊: “金属の高温酸化”, 内田老鶴圃(1986).
- 6) L.M.Vincent, et al.: “La Carrosion par L UF<sub>6</sub>”, Industries Atomiques 1/2, 67(1963).
- 7) Elwin Coester, et al.: “Method for forming an anticorrosive oxide layer on steels”
- 8) 矢戸弓雄: “Uranium Isotope Exchange between Gaseous UF<sub>6</sub> and Solid UF<sub>6</sub>”, Journal of Nuclear Science and Technology (1996).
- 9) 白水久夫, 藤原 敏 他: “ウラン濃縮原型プラントにおける無停止プラント増設技術”, 原子力学会「1999春の大会」要旨集
- 10) 我妻武志, 藤木傳蔵 他: “ウラン濃縮原型プラントにおける無停止運転での保守保全技術”, 原子力学会「1999春の大会」要旨集

## 【技術報告】



# ウラン濃縮原型プラントにおける経済性の実証

杉杖 典岳 宮川 洋\*

人形峠環境技術センター 施設管理部  
\*原子力システム株式会社

資料番号：10別冊 - 3

Evaluation of Economical at a Uranium Enrichment Demonstration Plant

Noritake SUGITSUE Hiroshi MIYAGAWA\*

Facility Management Division, Ningyo-toge Environmental Engineering Center

\*Nuclear Energy System Inc.

本報告では、ウラン濃縮原型プラントに適用している技術の経済性について評価した。その結果、原型プラントは商業プラントにつながる確かな経済的見通しを得るといふ、ウラン濃縮原型プラントに与えられた所期の目的を十分に果たしたものと評価できる。

これと併せて、約13年にわたるウラン濃縮原型プラントの運営を通して行った経済性解析により、ウラン濃縮事業の経済的特徴を明らかにした。

これらの知見から、ウラン濃縮事業では、遠心分離機の性能と価格、信頼性が事業全体の経済性を決める重要な要素になっており、開発費とのバランスを考慮しつつ、遠心分離機の継続的な開発とプラントへの導入の必要性を指摘した。

*In this report, the economy of technical achievement apply in the uranium enrichment demonstration plant is evaluated. From the evaluation, it can be concluded that the expected purpose was achieved because there was a definite economic prospect to commercial plant.*

*The benefit analysis of thirteen years operation of the uranium enrichment demonstration plant also provides a financial aspect of the uranium enrichment business.*

*Therefore, the performance, price and reliability of the centrifuge is an important factor in the uranium enrichment business. And the continuous development of a centrifuge while considering balance with the development cost is necessary for the business in the future.*

## キーワード

ウラン濃縮事業、ウラン濃縮原型プラント、遠心法、運転実績、技術の経済性、経済性解析、コスト解析

*Uranium Enrichment Business, Uranium Enrichment Demonstration Plant, Centrifuge Method, Operation Record, Economy of Technical Achievement, Economical Analysis, Cost Analysis*



杉杖 典岳



宮川 洋

## 1. はじめに

1982年に出された「原子力開発利用長期計画」では、ウラン濃縮原型プラントの建設・運転目的について次のように述べられている。

「ウラン濃縮事業の国産化を進めるため、遠心分離法ウラン濃縮技術について信頼性・経済性の向上に努め、国際競争力を持ったウラン濃縮事業の確立を図る。その中でウラン濃縮原型プラントの役割は、ウラン濃縮原型プラントを商業プラ

トに先立って建設することにより、遠心分離機量産技術を確立し、プラント設備の合理化を進め、濃縮プラントの信頼性・経済性の向上を図る。」

また、ウラン濃縮原型プラントに続く商業プラントのプラント能力についても触れており、「1995年頃に1,000tSWU/年、2000年頃に3,000tSWU/年」という数字が示されている。

このように、「原子力開発利用長期計画」では、ウラン濃縮原型プラントそのものに明示的な経済性の目標が設定されていたわけではないが、ここで示された、2000年頃に、3,000tSWU/年規模の商業プラントを実現するためには、少なくともウラン濃縮原型プラントの建設・運転を通じて、技術的見通しを得ることはもちろん、経済性についても、3,000tSWU/年程度の規模において、日本のウラン濃縮技術が国際競争力を持ち得る技術であるか否かの見極めが重要であり、これがウラン濃縮原型プラントに与えられた経済性面の課題であったと考えることができる。

本報告では、ウラン濃縮原型プラントの運転から得られたコストデータを使って、ウラン濃縮原型プラントに適用されている技術が、国際競争力を持ち得る技術か否かを経済性の視点で評価した結果を紹介する。

## 2. ウラン濃縮原型プラントに適用している技術の経済性<sup>1)</sup>

本章では、ウラン濃縮原型プラントに適用している技術の経済性評価を目的として、ウラン濃縮原型プラントのコスト実績から、まずウラン濃縮原型プラントのコスト構造及びウラン濃縮事業の経済的特徴を明らかにした。

次に、ウラン濃縮事業の構造的特徴を解析し、事業規模拡大のための係数設定と濃縮事業のモデ

ル化を行った。このモデルとコスト実績データを使って、プラント規模及び運転年数をパラメータとした検討を行った。

併せて、ウラン濃縮事業の構造的特徴と経済的特徴を基に、役務生産コスト低減の方策について検討を行った。

### 2.1 ウラン濃縮事業のコスト構造と経済的特徴

ウラン濃縮事業の経済的特徴を評価するためには、まずウラン濃縮事業の構造と、それに係るコスト構成を明らかにする必要がある。そこで、ウラン濃縮原型プラントを独立した事業と捉え、表1に示した決算科目に従って収集したデータから、年度単位で決算処理を行い、この決算結果をに実績生産コストを詳細に分析し、ウラン濃縮事業の構造的特徴を明らかにした。

図1及び図2にウラン濃縮原型プラントの当初計画10年間の決算データから求めた生産コスト構成比率とその年度推移を示す。また、それぞれのコスト項目がどのような費用項目で構成されているかを以下に示す。

#### 運転費中の直接経費

- ・ 労務費 = 職員人件費
- ・ 動力費 = 電力・重油料金
- ・ 修繕費 = 定期検査費・修繕費
- ・ 委託費 = 運転・研究委託費等
- ・ 諸税 = 固定資産税

#### 間接経費

- ・ 間接経費 = 事業所の管理部門経費
- ・ 一般管理費 = 本社部門の管理経費
- 減価償却費
- ・ 遠心分離機 = ウラン濃縮機械装置の内、遠心分離機本体のみ

表1 原型プラント決算科目

目	節	目	節		
01	人件費	6 節	11	保険料	4 節
02	厚生費	3 節	12	諸税	9 節
03	雑給	2 節	13	広報費	2 節
06	動力費	2 節	14	採用・研修費	2 節
07	修繕費	2 節	15	補償費	2 節
08	委託費	10節	16	原料費	3 節
09	消耗品費	9 節	17	諸費	10節
10	賃借料	4 節			

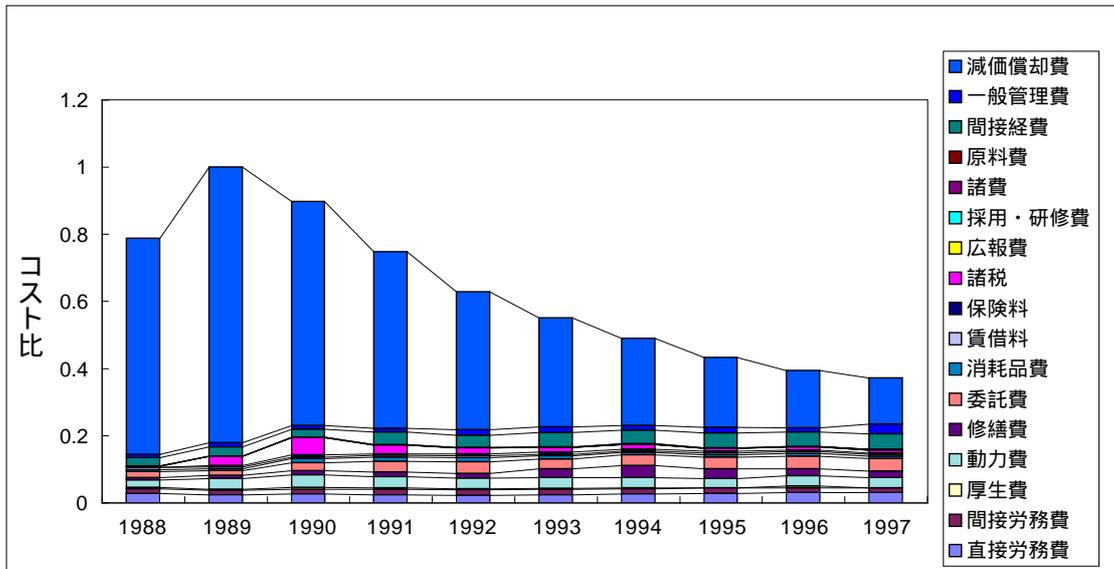


図2 生産コスト年度推移

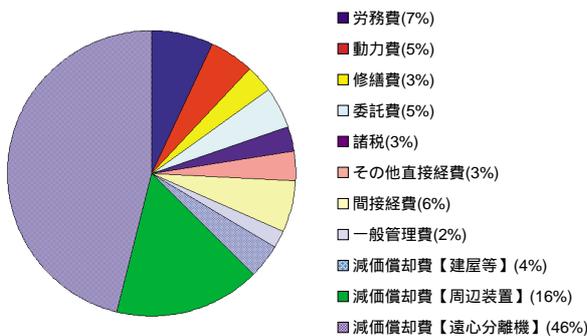


図1 原型プラントコスト構成

表2 主要産業コスト構成

	ウラン濃縮 原型プラント	電気業	ガス業	鉄道業	倉庫・ 港湾運送業
材料費	0.0	23.3	66.6	13.3	0.0
労務費	6.3	8.0	6.7	37.5	9.9
経費	93.7	68.8	27.3	49.2	90.0

- ・ 周辺装置 = 遠心分離機本体を除くUF<sub>6</sub>処理系等の装置
- ・ 建屋等 = ウラン濃縮機械装置以外の固定資産

本報告では借入金金利等の資金調達コストや、立地自治体によって課税の有無及び税率が異なる核燃料税等の諸税等は経営環境に影響されることから、評価の対象とせず、純粋な生産コストに着目した評価を行っている。

これらのコスト構成要素等の分析結果から、経済面から見たウラン濃縮事業には以下のような特徴がある。

ウラン濃縮原型プラントのコスト実績では、コストの大部分が減価償却費であり、全体の約

2 / 3 を占めている。減価償却費中で最も大きいものは、遠心分離機で、本体が46%、周辺装置が16%、計62%を占める。このことは、ウラン濃縮事業が、役務を提供するサービス業でありながら典型的な装置（設備）産業のコスト的特徴を備えていることを示している。参考として、表2に代表的な産業におけるコスト構成を示す<sup>2)</sup>。一般に装置産業の事業では、初期の設備投資額の大きさが事業期間内のコストに大きく影響することから、ウラン濃縮事業においても減価償却費が役務生産コストに及ぼす影響は非常に大きい。

ウラン濃縮原型プラントコスト実績で変動費とされるコストは、動力費のみである。また、コスト全体に占める割合は5%であり、変動費比率は非常に少ない。したがって、ウラン濃縮事業ではプラントの稼働状態の如何にかかわらず、ほぼ一定額の固定的運転費が発生することを示している。

このことは、プラントの稼働率が向上しても運転費はほとんど変わらないことを意味しており、稼働率向上による役務生産量の増加分がそのまま収入となり、単位濃縮役務量当たりの役務生産コスト低減に大きく寄与するというウラン濃縮事業の重要な特徴となっている。

図3に示したように、減価償却費を除く運転費は、当初計画10年間の運転期間中安定して推移している。ウラン濃縮原型プラントコスト実績の特色として、修繕費及び動力費以外の運転費は、人件費とそれに付随するコストのみから構成されていることが挙げられる。これは、ウラン濃縮事業が、濃縮役務を提供するサービス業であること

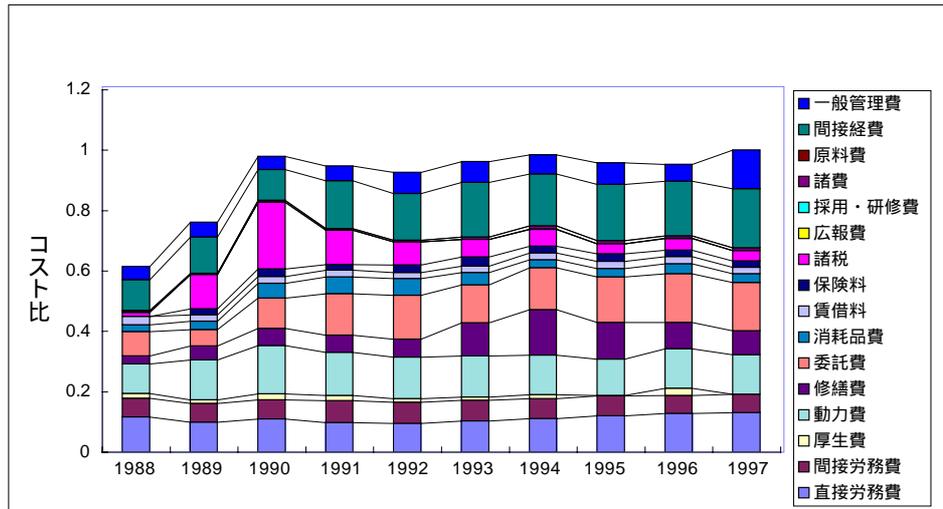


図3 運転費年度推移 (減価償却費をのぞく)

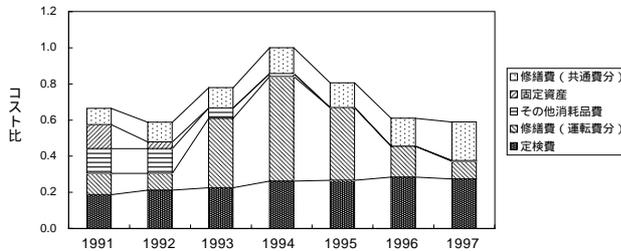


図4 保守・修繕費年度推移

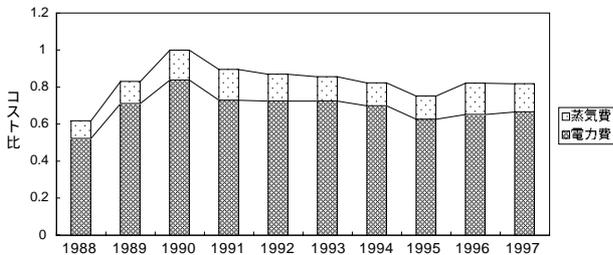


図5 動力費年度推移

を反映したものである。このため運転コストは事業を運営する人員規模で決まってしまう。

図4に示したように、修繕費については、年度により若干の変動はあるものの、全体としては安定している。一般に保守・修繕経費は機械装置投資額に対する一定のパーセンテージで表現されることが多い。その割合は業種によって異なるが、一般的に、プラントを所有して事業を行うような産業では、3～4%程度が一般的値とされている。ウラン濃縮原型プラントの修繕費は、保守対象機器の設備投資額の3%以内に収まっており、一般的な数値の範囲内であるといえる。また、修

繕費は経年劣化により次第に増加する傾向を示すが、ウラン濃縮原型プラント当初計画10年間の期間においては、コスト削減努力もあり、年度による変動はあるもの、明らかな増加傾向は見られない。このことは、ウラン濃縮原型プラントの主要な機器が少なくとも10年以上は使用可能であることを示している。

図5に示したように、動力費は、主に電力及び重油料金から構成される。これらの調達コストは、ウラン濃縮原型プラント運転期間中安定して推移しているが、本質的には、海外から輸入される原料重油の価格に影響されるコストである。原料重油の海外市場価格と為替レート変動は、円建の原料重油の価格に影響を及ぼし、結果として、電力及び重油料金の変化をもたらす。ただし、ウラン濃縮原型プラントのコスト構造の中で、動力費の占める割合は、約5%程度である。

## 2.2 ウラン濃縮原型プラント技術の経済性

ここでは前節で分析した、ウラン濃縮原型プラントコスト実績データから検討した、ウラン濃縮事業のコスト構成の特徴を基に、役務生産コストへの影響が大きいプラント規模と運転期間をパラメータとして、これらが、役務生産コストとどのような関係にあるのかを明らかにした。

検討範囲については、ウラン濃縮原型プラントの設備能力である200tSWU/年、運転期間10年に対して、プラント規模を500tSWU/年～3,000tSWU/年、運転期間を最大15年程度とした。ここで、プラント規模の最大値を、3,000tSWU/年としたのは、1982年の原子力開発利用長期計画において、2000年頃に期待されていた商業プラント

表3 スケールアップファクタ

コスト項目	DP実績 コスト比率 (%)	プラント規模		運転期間 比率
		生産量(t-SWU)比 3000 /	スケール ファクタ	
動力費	4.92	15	1.000	1.0
労務費	7.05	15	0.445	1.0
委託費	4.69	15	0.445	1.0
その他直接経費	3.27	15	0.445	1.0
間接経費	5.80	15	0.445	1.0
一般管理費	2.12	15	0.445	1.0
減価償却(遠心機)	46.18	15	0.700	1.0
減価償却(周辺装置)	16.45	15	0.700	1.0
減価償却(建屋等)	3.71	15	0.700	1.0
修繕費	2.97	15	0.700	1.0
諸税	2.83	15	0.700	1.0
計	100.00			

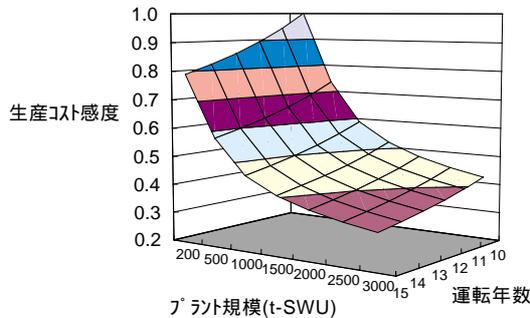


図6 プラント規模と運転期間をパラメータにした濃縮役務価格

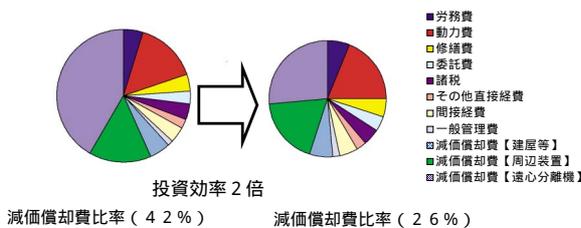


図7 役務コスト低減の方策

の規模を用いた。運転期間の最大値15年については、ウラン濃縮原型プラントの技術実証での評価結果を基に設定した。また、ここでの評価は以下のとおりである。

プラント規模拡大時のスケールアップファクタ及びプラント稼働率は固定値とした。

設備投資に対するスケールアップファクタは、化学プラントにおける一般的な値である0.7乗則を用いた。

人員数については、ウラン濃縮原型プラントの作業分析に基づき3,000tSWU/年規模のプラントを300名の運転員で操業するとの仮定を基に、ウラン濃縮原型プラントの運転人員90名との比から0.445乗則を設定した。

動力費については、プラント規模に依存することから、スケールアップファクタを1とした。

稼働率については、ウラン濃縮原型プラントの実績値を用いた。

以上のスケールアップファクタについてまとめ

た結果を表3に示す。また、この考え方を基にして、設備規模と運転期間をパラメータとした評価結果を図6に示す。検討結果は、ウラン濃縮原型プラントでの役務生産コストを1としてこれに対する比率で表した。

プラント規模を500tSWU/年とした評価では、10年運転で、ウラン濃縮原型プラントコストの0.74倍、15年運転で、0.58倍となる。プラント規模を3,000tSWU/年にした場合、10年運転で、0.42倍、15年運転で、0.33倍という結果が得られた。

このサーベイ結果は、ウラン濃縮原型プラントに実現されている技術を用いて、プラント規模を3,000tSWU/年プラントに拡大することにより、濃縮役務生産コストは、200tSWU/年規模のウラン濃縮原型プラントでの役務生産コストの、約0.4~0.3倍になることを示している。ただし、この評価はあくまでも役務生産コストの評価であり、実際の事業では、事業形態によっては、ここでの評価で考慮していない資金調達コストや利益等の考慮が必要であることから、直接的な比較はできないが、この値は国際市場での濃縮役務価格とほぼ同等な値となっている。

次に、この評価結果の特徴について分析した結果を示す。

全体の傾向として、プラント規模と運転期間の延長により役務生産コストは低下する。ウラン濃縮事業は設備投資が大きな事業であることから、事業規模の拡大により生産コストの低減を図ることができる。この点から3,000tSWU/年を超えてプラント規模を拡大することにより、役務生産コストは更に低下する。また、運転期間延長もコスト低減に寄与するが、パラメータとして採用するためには遠心分離機の寿命に対する技術的確認を得ることが必要である。

コストの構造的な特色として、減価償却費割合に着目した評価では、3,000tSWU/年規模のプラントのウラン濃縮機械装置減価償却費の割合は、10年運転時66%、15年運転時56%であった。この割合は200tSWU/年規模のウラン濃縮原型プラントと大差がない。このことからウラン濃縮事業では、プラント規模の拡大や運転期間を延長した場合でも、装置産業的構造が変わらず、この特色が、事業規模拡大が濃縮役務生産コスト低減に大きく寄与するという、ウラン濃縮事業の特性を形成している。

### 2.3 役務生産コスト低減の方策

これまでに述べてきたようなウラン濃縮事業の特徴から、役務生産コストを低減するためには、プラント規模の拡大と、役務生産コストの6割程度を占める減価償却費の低減が最も効果的であることが分かる。中でも、減価償却の大部分を占める遠心分離機導入コストの削減は、役務生産コストの削減のための最重要課題である。

例えば、図7の3,000tSWU/年プラント15年運転のケースを例にとり考えると、遠心分離機の性能を変えずに取得価格が1/2になるか、逆に、取得価格はそのままで性能が2倍になった場合、遠心分離機の役務生産コストにおける減価償却比率が42%から26%に半減し、役務生産コスト総額は、0.33倍から0.26倍に低下する。

### 2.4 経済性の評価

以上のことから、ウラン濃縮原型プラントに実現している技術の経済性は、次のように評価することができる。

ウラン濃縮原型プラントでの役務生産コストは国際価格と比較して割高となっている。この背景には、ウラン濃縮原型プラント計画時点と比較した時の、近年のウラン濃縮国際市場における濃縮役務価格の低下及び為替市場における円高の進行等の、ウラン濃縮市場を取り巻く外部の経済環境に大きな変化が生じたことを挙げることができる。

例えば、ウラン濃縮原型プラントが計画された1984年と現在を比較すると、濃縮役務市場価格は、135ドル/Kg-SWU<sup>3)</sup>から115ドル/Kg-SWU<sup>4)</sup>と、約20ドル/Kg-SWU、率にして約15%の低下となっている。また、為替レートは、230円/ドル台から110円/ドル台へと大幅な円高に移行している<sup>5)</sup>。その結果、円建ての濃縮役務市場価格は、30,000円/Kg-SWU台から10,000円/Kg-SWU台へと半額から1/3以下に低下している。

ウラン濃縮産業は、装置産業的特色を色濃く持っており、役務生産コストと事業規模（役務処理能力）とは密接に関係している。

このため、ウラン濃縮原型プラントに実現している技術の商業段階における経済性を評価する場合、商業規模の役務処理能力での役務生産コスト

を評価する必要がある。

ウラン濃縮原型プラントに実現している技術を用いて、3,000tSWU/年規模のプラントにより事業を行った場合の役務生産コストは、ウラン濃縮原型プラントの役務生産コストに比べ約0.4～0.3倍程度と推定できる。これは、現状の国際市場における役務処理価格とほぼ同等な値である。

ウラン濃縮原型プラントの運転実績を基にした一連の経済性評価は、役務生産コストに着目した評価であり、資本調達コストや利益等、ウラン濃縮事業の採算性を考えるために必要不可欠な要素を考慮していない。この点から、この評価結果をもってウラン濃縮原型プラントに適用している技術が、現時点において経済的に国際競争力を持っていると評価することはできないが、ウラン濃縮原型プラントの実績により、商業プラントにつながる確かな経済の見通しを得るといふ所期の目的は達成することができたと評価できる。

### 3. おわりに

本報告では、ウラン濃縮原型プラントに適用している技術の経済性について評価した。その結果商業プラントにつながる経済の見通しを得るといふ、ウラン濃縮原型プラントに与えられた所期の目的は果たしたものと評価できる。

これと併せて、約13年にわたるウラン濃縮原型プラントの運営を通して行った経済解析により、ウラン濃縮事業の経済的特徴を明らかにした。

これらの知見から、ウラン濃縮事業では、遠心分離機の性能と価格、信頼性が事業全体の経済性を決める重要な要素になっており、開発費とのバランスを考慮しつつ、遠心分離機の継続的な開発とプラントへの導入の必要性を指摘した。

#### 参考文献

- 1) 杉杖典岳、根本憲伯 他：“ウラン濃縮原型プラントの経済性”，原子力学会「1999春の大会」要旨集
- 2) 日本銀行調査統計局：“主要企業経営分析 平成5年度”日本銀行(1994)。
- 3) 日本原子力産業会議：“原子力ポケットブック1998/99年版”，p.176(1999)。
- 4) Energy Resources International：“原子燃料サイクル供給・価格レポート”，Nuclear Fuel 6, June(1994)。
- 5) 日本銀行金融経済統計資料：“外国為替相場(1)インターバンク相場(東京市場)(米ドル)”(2001)。

【技術報告】



# ウラン濃縮原型プラントにおける技術の 体系化(1) 運転技術

我妻 武志 長濱 洋次 中塚 嘉明  
横山 薫\* 杉杖 典岳  
人形峠環境技術センター 施設管理部

資料番号：10別冊 - 4

Systemization of Technology on the Uranium Enrichment  
Demonstration Plant (Operation Technology)

Takeshi AGATSUMA Youji NAGAHAMA Yoshiaki NAKATSUKA  
Kaoru YOKOYAMA\* Noritake SUGITSUE

Facility Management Division, Ningyo-toge Environmental  
Engineering Center

\*Nuclear Energy System Inc.

ウラン濃縮原型プラントの運転を通じて体系化を図った、代表的な運転技術についてまとめた。  
13年間という長期間にわたる、ウラン濃縮原型プラントの無停止連続運転は、これらの技術によ  
り直接的、間接的に支えられ初めて達成できた。  
また、これらの技術の多くは、ウラン濃縮原型プラントの運営という日々の業務の中で、試行錯  
誤を繰り返し生まれた。この点から、いずれの技術も実務の中で洗練され、極めて実用性が高いもの  
となっている。

*The operation technology was systemized by operating a uranium enrichment demonstration plant.  
This report describes typical operation technology.*

*The uranium enrichment demonstration plant achieved continuous operation for about thirteen years  
as a result that it was held up by these technologies.*

*These technologies were established mostly by a process of trial and error during the routine operation  
of a uranium enrichment demonstration plant. Since all of the technologies were refined during the  
operation of the plant, the practical system was completed.*

## キーワード

ウラン濃縮事業, ウラン濃縮原型プラント, 遠心法, 運転実績, 運転支援システム, 監視, 制御, 異  
常診断, 信頼性, 遠心式コンプレッサ

*Uranium Enrichment Business, Uranium Enrichment Demonstration Plant, Centrifuge Method,  
Operation Record, Management System, Operation, control, Fault Diagnosis, Reliability, Centrifugal  
Compressors*



我妻 武志



長濱 洋次



中塚 嘉明



横山 薫



杉杖 典岳

## 1. はじめに

ウラン濃縮原型プラントは、ウラン濃縮の事業化につなげる最終段階と位置付けられ、事業化に向けての技術的、経済的見通しを得ることが役割であった。

このため、計画・設計段階で事業化に向けて実証すべき枢要技術の設定や経済性の目標が設定された。

しかし、事業化に向けての確かな見通しを得るためには、これら計画・設計時に設定した目標の実証だけでは十分とはいえない。

それは、ウラン濃縮原型プラントがウラン濃縮を「事業」という形で行う国内で初めてのプラントであり、事業化を目指すためには、

計画・設計段階では、想定できない事象への対応

大型プラントの運転ノウハウの集約（人材の育成とノウハウのシステム化）

事業としてのウラン濃縮に必要な業務の定型化と体系化

商業プラントを意識した、より合理的かつ革新的技術の導入と実証

等の操業することで明らかになることについて、ウラン濃縮原型プラントの運転を通じて体系化する必要があった。本報告では、ウラン濃縮原型プラントの運転の中で行った運転技術の体系化の代表的な事例として、以下の5点について紹介する。

- ・運転管理の体系化
- ・運転監視技術の確立
- ・予防保全技術の確立
- ・プロセス機器の長寿命化
- ・制御・監視の高度化

## 2. 運転管理の体系化

ウラン濃縮原型プラントは、技術の実証と併せて、国内の電力会社10社との間で、濃縮役務契約に基づく濃縮役務生産を行っている。このため、顧客に対して、製品の品質と納期を確実に保証するための運転管理手法の確立が求められた。また、運転管理技術は、商業プラントでも必要不可欠な業務であり、この観点からも、原型プラント段階で運転管理手法を確立しておく必要があった。

しかし、これらの業務はウラン濃縮原型プラントに先行する、ウラン濃縮パイロットプラントでは経験したことがない業務が大多数であったため、ウラン濃縮原型プラントの初期の約3年にわたる運転から得られた知識を集約することによ

り、初めて運転管理手法を確立することができた。また、これらの手法は、随時コンピュータシステムとして整備してきており、最終的には、ウラン濃縮原型プラントの運転管理業務全般をサポートすることができる、「濃縮プラント管理システムMEISTER（ドイツ語で匠の意味）」として、体系的に整備した<sup>1)</sup>。

MEISTERの整備により、ウラン濃縮原型プラントにおける運転管理業務全般の大幅な省力化と業務の高度化を実現した。また、ここに至る経験とMEISTERの運用実績により、商業プラントにおける“運転管理”の在り方についても見通しを得ることができた。

以下に、MEISTERの概要と運転管理に必要な主要業務の概要について示す。

### 2.1 MEISTERの概要

濃縮プラント運転管理システムMEISTERは、ウラン濃縮原型プラントを運営することにより発生する、多種多様な情報を一元管理できるデータベースを中核としたシステムで、ウラン濃縮プラントの運転管理に必要なPDCA(計画, 実施, 評価, 改善)の業務サイクルを構成する、以下の主要な業務をサポートしている。

- 契約情報管理業務
- 生産計画策定業務
- 生産工程管理業務
- 製品品質保証業務
- 核物質管理業務
- 技術情報管理業務
- 技術情報評価業務
- 財務・コスト管理業務

#### (1) MEISTERの全体構成

MEISTERは機能的に独立した8サブシステムで構成されている。図1に、システム全体の概要図を示す。

各サブシステムは、機能的には各々独立しているが、各サブシステムで扱う一次情報は可能な限り一元化し、共通データベースにより管理している。また、各サブシステムにおいて加工・解析された二次情報についても、他のサブシステムと関連がある情報については、二次情報データベースを生成し共通化して管理している。

このように、運転管理の各業務とのインターフェースを独立させ、内部での情報管理を一元化する構造としているのは次のような理由による。

1) 運転管理業務は、一旦定型化された後も、業務経験の蓄積、業務環境変化等への対応や、合理

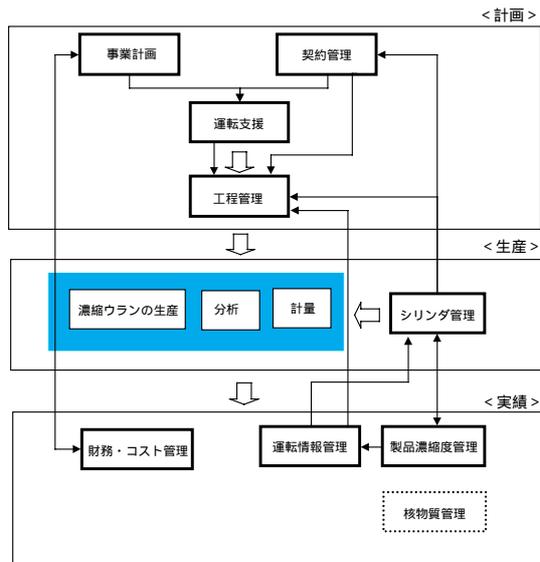


図1 濃縮プラント管理システムの概要

化・省力化を目指した業務改善を日々行っている。このため、運転管理業務をサポートするコンピュータシステムも、これらの変化に速やかに対応することが必要であり、これができない場合システムの陳腐化を招いてしまう。このような、業務の変化に速やかに対応するためには、システムの変更を最小限に止める必要があるほか、部分的改良により、ほかの機能に影響を及ぼさないようにすることが重要である。このためには、業務ごとに極力細分化し、更に独立性を持たせたシステム構成とすることが望ましい。

2) 情報という観点から見た場合、同一の内容の情報システム内に複数存在することは、情報間に齟齬をきたす原因となることから、この種のシステムでは同一情報は極力一元化することが理想である。情報の加工や解析、あるいは短時間での更新を伴わない一次情報については、一元管理が容易にできるが、各サブシステムで随時加工した情報を共通で使用している情報では、情報更新のタイミングのズレによる情報の齟齬が発生しやすい。このような状況の発生を防ぐためには、システムで扱う情報を可能な限り一元化し、共通データベース化することが望ましい。

## (2) サブシステム（業務システム）の概要

ここでは、MEISTERを構成する、各サブシステムの機能概要について説明する。

### 1) 事業計画サブシステム

事業計画サブシステムは、主に、ウラン濃縮原型プラントの運転実績である、財務・コスト情報や、生産実績、生産実績から予測される今後の生産見通し等を基にして、ウラン濃縮原型プラント

の長期的経営状況を把握する。具体的な機能には、

- ・長期の財務状態シミュレーション
- ・設備投資のシミュレーションと最適化
- ・生産計画のシミュレーションと最適化等がある。

### 2) 契約管理サブシステム

契約管理サブシステムは、ウラン濃縮原型プラントで実施する、濃縮役務生産の履行により発生する契約関連の各種書類の管理を主に行う。具体的な機能には、以下の5点等がある。

- ・契約内容のデータベース
- ・契約内容総括表の作成
- ・契約関連書類管理
- ・契約関連書類の発行
- ・契約履行状況の管理

### 3) 運転支援サブシステム

運転支援サブシステムは、契約管理サブシステムからの情報を受けて、ウラン濃縮プラントの中心プロセスである、カスケード設備における役務生産の計画や役務生産条件の決定を支援する。具体的な機能には、以下の4点等がある。

- ・カスケード設備特性データベースの自動生成
- ・カスケード設備の特性評価
- ・カスケード設備の特性のイメージ化
- ・カスケード設備運転条件の決定

### 4) 工程管理サブシステム

工程管理サブシステムは、運転支援サブシステムで策定したカスケード設備の生産条件を受け、ウラン濃縮原型プラント全体の生産工程計画を自動生成し、さらに、計画工程と実績工程を比較することで工程の履行状態を管理する。具体的な機能には、以下の3点等がある。

- ・作業工程計画の自動生成
- ・作業工程計画の修正
- ・作業実績工程の管理

### 5) 製品濃縮度管理サブシステム

製品濃縮度管理サブシステムは、役務生産段階の製品品質保証として、カスケード設備での製品の濃縮度と重量の保証を行う。具体的な機能には、以下の2点等がある。

- ・製品製造管理
- ・製品濃縮度管理

### 6) シリンダ管理サブシステム

シリンダ管理サブシステムは、原料・製品・廃品シリンダの移動記録及びシリンダの内容物の量と品質に関する情報を管理する。具体的な機能には、以下の4点等がある。

図2 シリンダ管理システム画面例

- ・シリンダ情報のデータベース
- ・シリンダ移動履歴管理
- ・シリンダ内容物分析データデータベース
- ・品質証明書の発行

シリンダ情報入力画面を図2に示す。

#### 7) 運転情報管理サブシステム

運転情報管理サブシステムは、プラントの運転状態を表すプラント挙動データと、作業や異常事象に対する対応の実績を収集し、データベース化することで、プラント挙動の解析用の情報を提供する。具体的な機能には、以下の4点等がある。

- ・プラント挙動データベース
- ・作業実績データベース
- ・異常対応実績データベース
- ・プラント状況解析

#### 8) 財務・コスト管理サブシステム

財務・コスト管理サブシステムは、ウラン濃縮原型プラントで発生する費用データを収集・管理し、年単位で決算処理を行うウラン濃縮事業用会計システムで、具体的な機能には、以下の4点等がある。

- ・費用データデータベース
- ・財務決算処理
- ・財務諸表の作成
- ・財務シミュレーション

#### 9) 工場管理サブシステム

工場管理サブシステムは、工場の管理者への情報提供を意図したシステムで、他の8サブシステムで管理されている情報や、解析された情報を、工場運営情報として整理提供する。具体的な機能には、以下の4点等がある。

- ・契約情報
- ・財務諸表・コストデータ
- ・生産レポート

## ・技術レポート

### 2.2 運転管理の評価

濃縮プラント運転管理システムMEISTERの開発は、ウラン濃縮原型プラント運転前から、その機能やシステム構成に関する基本調査を行っており、ウラン濃縮原型プラント操業開始後は、運転管理業務の定型化と並行してシステムの開発が行われた。

このため、MEISTER開発の視点から見ると、ソフトウェア開発の重要なポイントである、情報の流れや情報間の関連、及び処理手順等が極めて明確に示される結果となり、MEISTERが実用的なシステムとして機能している重要な要因となっている。

一方、運転管理業務の定型化という視点から見ると、業務の進め方を決める段階からMEISTERの使用を前提とすることができ、業務の効率化・省力化のための要求を直接MEISTERに期待することができた。

このように、ウラン濃縮プラントにおける運転業務の定型化と、MEISTERの開発を同時並行的に展開したことにより、ウラン濃縮原型プラントにおけるプラント運転業務の体系化を実現した。

MEISTERに集約された濃縮プラント運転業務のノウハウは、ウラン濃縮原型プラントに続く商業プラントにも、その大部分を適用することが可能である。

### 3. 運転監視<sup>2)</sup>

ウラン濃縮原型プラントは、1988年のDOP-1操業開始時から2001年2月の運転終了まで、3交替体制で24時間の運転監視を行っている。これを時間で表すと、112,560時間に達する。

運転監視業務は、常時はプラントとのインタフェースである中央操作室で行われるが、この中央操作室には、ウラン濃縮原型プラントのあらゆる情報が集約されている。

その結果、運転監視業務を通じて蓄積された、ウラン濃縮プラント固有の運転知識やノウハウは膨大な量になっている。

本章では、運転監視業務を通じて蓄積された知識の一例として、圧力計の異常事象(ドリフト事象)の検知手法について示す<sup>3)</sup>。

#### 3.1 圧力計ドリフト事象の検知の重要性

ウラン濃縮原型プラントは、UF<sub>6</sub>の希薄流体が連続的に流れるプロセスであり、プロセスを安定

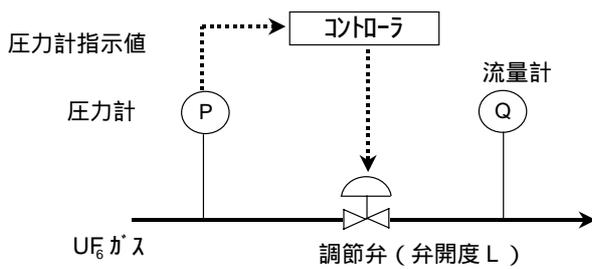


図3 圧力計と調節弁の関係

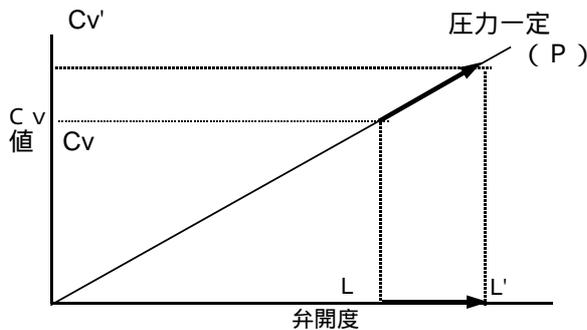


図4 調節弁の弁開度とCv値の関係(1)

な状態に保つために、プロセスの要所々々の圧力や流量を目的の値に保つためのフィードバック制御を行っている。フィードバック制御のループは一般的に、圧力あるいは流量検出器（以下、センサ）と調節弁及びコントローラで構成されている。

ウラン濃縮原型プラントに用いられている圧力センサは、シールドダイヤフラム式圧力計といい、その構造上、ダイヤフラムの塑性変形等に起因して、突然、あるいは徐々に圧力指示値が実際の圧力からずれる現象（以下、ドリフト）が発生することがある。このような事象を放置しておく、プラントが定常状態を維持できなくなる等の事象に発展する。しかも、この事象は表示される圧力指示値が変化しないため、通常の監視では異常事象として認識することが困難であり、従前の常識として、早期の発見は困難とされていた。これに対して、運転監視から得られた経験的知識を基に、調節弁固有の特性値(Cv値)に着目した異常事象の早期発見手法を確立した。

### 3.2 圧力計と調節弁の関係

図3に示したように、圧力計(P)により計測された調節弁の上流圧力は、コントローラにより目標圧力と比較され、上流圧力が目標圧力になるように調節弁の弁開度調整が行われる。この時、圧力計にドリフトが発生すると、コントローラはドリフト分圧( $P$ )を実際の圧力変化として認識し、目標圧力との偏差として調節弁の開度調整を

行ってしまう。この結果  $P$ 分の圧力が実際に上昇し、圧力計指示値は目標圧力を示すことになる。

このように、通常の圧力計指示値の監視ではドリフト現象を発見する事は困難であり、仮に指示値の異常と推定できた場合でも、その原因を圧力計のドリフトと特定するためには、圧力計の校正作業を実施する必要がある。

### 3.3 調節弁の弁開度とCv値の関係

Cv値は、式(1)で定義される弁を流れる流体の圧力と流量の関係を表す特性値で、弁の構造や寸法によって一義的に決まる弁固有の値である。

$$Cv = \frac{A \times Q}{P} \quad \dots\dots(1)$$

A : 定数

Q : ガス質量流量

P : 圧力指示値

圧力計が正常な場合、弁開度(L)とCv値の間には、図4に示す関係が成り立っており、圧力(P)が設定値 $P_1$ から  $P$ だけ変化すると、圧力を一定にするために調節弁開度がLからL'に変化する。この時Cv値は、式(1)に従って変化し、CvからCv'に変化する。この時、LとCv値の間には、一次比例の関係が保たれている。

一方、圧力計に+  $P$ のドリフトが発生した場合、図5に示したように、圧力計ドリフト分+  $P$ の変化は、弁開度の変化及び流量(Q)の変化として現れるため、式(1)に従って、圧力計正常時の“圧力-Cv”特性からずれた値を示す。

この関係から、式(2)よりCv値を求め、さらに式(2)で求めたCv値を式(3)に代入することで、流量から本来の圧力の値( $p$ )を求めることができる。

$$Cv = Cv_{max} \times R \frac{L-100}{100} \quad \dots\dots(2)$$

$Cv_{max}$  : 弁開度100%時のCv値

R : レンジアピリティ

L : 弁開度

$$P' = \frac{A \times Q}{Cv} \quad \dots\dots(3)$$

この圧力算出値 $p'$ と、中央操作室の監視画面に表示される圧力計指示値とを比較することによ

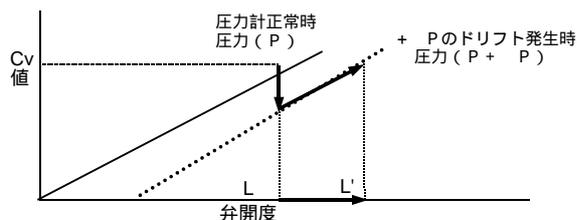


図5 調節弁の弁開度とCv値の関係(2)

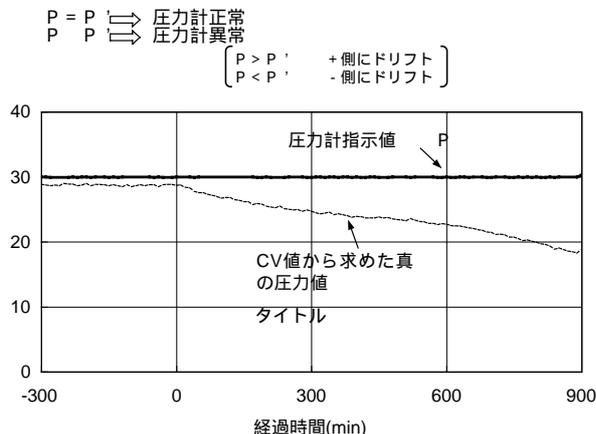


図6 ドリフト検知の事例

り、ドリフト現象が発生しているか否かの判定とドリフト量を把握することができる。

### 3.4 プラントへの適用

この手法をウラン濃縮原型プラントに適用するには、まず、異常診断の対象となる制御ループの弁開度とCv値の関係を求める必要がある。この弁開度とCv値の関係式は、当初、弁制作メーカーの試験データを用いたが、このデータは濃縮プラントを流れるUF<sub>6</sub>ガスではなく、特性の類似したSF<sub>6</sub>を使用して求められた値であることからウラン濃縮原型プラントに適用する上では、精度面で問題があった。

そこで、ウラン濃縮原型プラントの運転実績データのうち、

圧力計正常時の運転開始初期のデータ

圧力計校正実施後の運転データ

から、弁開度とCv値の関係式を求めた。

この近似式を使って推定した圧力と、圧力計指示値とを比較した例を図6に示す。図から、 $p$ と $p'$ を連続監視することによって、徐々に変化するドリフト現象を容易に検知することができる。

また、ドリフト量は実際に圧力校正した結果とほぼ一致していることから、圧力計指示値から図に示したドリフト分を補正することで、圧力計を校正した場合と同じ効果が得られる。

ただし、実際の運用では、ウラン濃縮原型プラントの圧力計の多くは、コントロール用のセンサとしての機能の他に、インターロック用のセンサとしても機能していることから、このようなドリフト現象が確認された場合には直ちに校正等を行っている。

本手法は、圧力計のドリフト事象の検知のほか、流量調節弁の詰まり事象を検知することも可能である。詰まり事象も圧力計のドリフト同様調節弁の開度変化として現れるが、この時の弁開度とCv値の関係は、図2では正常時の弁開度を基準としたCv値の低下として現れる。

### 3.5 運転監視の評価

ここで一例として紹介した圧力計のドリフト事象の、検知手法に代表される経験的知識の集約から生まれた運転監視手法は、実際にプラント運転に携わっている技術者の発想から生まれた技術である。このため、これらの技術は実用性が高く、また、ウラン濃縮原型プラントの安定運転に不可欠な技術である。

## 4. 予防保全<sup>4)</sup>

ウラン濃縮プラントでは、設備稼働率の向上が事業の経済性を大きく左右する。このため設備利用率に影響を与える要因については、設計段階や運転段階で、様々な技術を導入し、設備利用率の低下防止措置を講じてきた。

本章では、プラントの稼働に影響するような機器の故障に着目し、これを未然防止することを目的とした、予防保全技術について紹介する。

### 4.1 予防保全の背景

予防保全技術は、稼働率の低下につながるような機器故障を未然に防ぐほか、適切な保守・保全間隔を設定して、保守費の低減を図ることを目的とした技術である。

ウラン濃縮原型プラントでは、運転開始当初から予防保全技術の開発を行っており、その成果を予防保全システムとして体系化した。

### 4.2 予防保全システムの概要

図7に予防保全システムの概要を示す。また、以下に、予防保全システムとして独自に開発した、オフライン設備診断及び、オンライン状態監視システムの概要について示す。

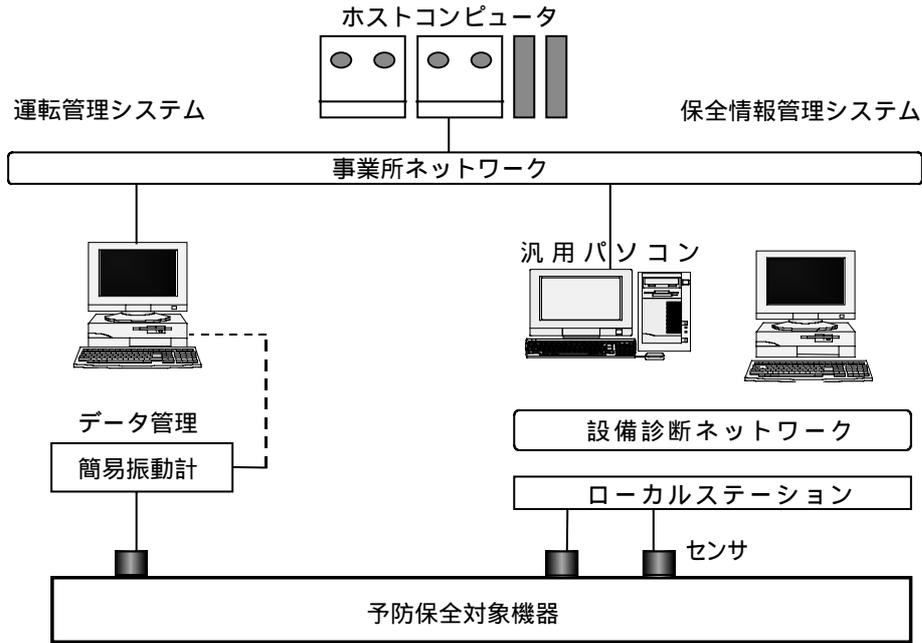


図7 予防保全システム概要図

表1 予防保全対象機器

設備名称	機器種別	機器名称	台数
ユーティリティ設備	水系ポンプ類	冷却水ポンプ	4
		低温水ポンプ	3
		恒温水ポンプ	3
		熱水ポンプ	2
	冷凍機類	恒温水チラー	3
		低温水チラー	3
	圧縮機類	計装空気コンプレッサ	2
	その他	クーリングタワー	4
UF <sub>6</sub> 処理設備	真空ポンプ類	一般バージロータリーポンプ	2
		カスケード排気ロータリーポンプ	2
	冷凍機類	製品冷凍機ユニット	3
		廃品冷凍機ユニット	3
	昇圧機類	一般バージ冷凍機ユニット	1
		製品プレコンプレッサ	5
		廃品プレコンプレッサ	14
	その他	製品メインコンプレッサ	2
廃品メインコンプレッサ		2	
	室温	-	

オフライン設備診断システム

オフライン設備診断システムは、温度、振動、圧力等のオフラインで計測されたデータを汎用パソコンで処理し、その結果を基に、計測データの傾向の変化等を監視し、正常・異常の判断を行うシステムである。このシステムで最も重要な点は、正常・異常の判断に用いる“計測対象物理量”の選択と“しきい値”の設定である。このしきい値の設定に当たっては、対象器機の特長解析結果や実データの統計解析結果等を基に設定した。

オンライン状態監視システム

オンライン状態監視システムは、ウラン濃縮原型プラントの機器の中で、機器の故障がプラント全体に影響する、メインコンプレッサ及びプレコンプレッサを対象としたシステムである。

監視対象の機器には、振動検出用のセンサが付けられており、このセンサの情報を、オンラインでリアルタイム処理し、振動スペクトルを表示するとともに、振動の傾向管理や寿命予測等の2次的解析と評価を行っている。また、これらの解析結果はデータベース化され、MTTF(Mean Time To Failure=故障までの平均時間)等の信頼性解析に利用している。

4.3 開発経緯と予防保全システムの実際

次に予防保全技術の開発経緯とシステムの実際について示す。

対象機器の選定

予防保全の対象機器の選定に当たっては、以下の2点を考慮し、表1に示す機器を予防保全の対象機器として選定した。

- ・ウラン濃縮原型プラントの設計情報に基づく、プラント運転に対する影響度
  - ・先行パイロットプラントでの運転実績
- 予防保全データの選定・測定

予防保全の対象機器について、その構造等を調査し、故障予知に必要な測定箇所及び測定方法を

表2 採取データの種別

機 器 名 称	振動	圧力	流量	温度	電流
冷却水ポンプ			-		
低温水ポンプ			-		
恒温水ポンプ			-		
熱水ポンプ	-			-	-
恒温水チラー					
低温水チラー	-				
計装空気コンプレッサ			-		
クーリングタワー	-	-	-	-	
一般バージロータリーポンプ		-			
カスケード排気ロータリーポンプ		-			
製品冷凍機ユニット					
廃品冷凍機ユニット					
一般バージ冷凍機ユニット		-			
製品プレコンプレッサ		-	-		-
廃品プレコンプレッサ		-	-		-
製品メインコンプレッサ		-			
廃品メインコンプレッサ		-			
室温	-	-	-		-

検討した。

その結果、機器の性能劣化と摩耗故障を予知するための保全情報として、予防保全対象機器の軸受部の振動計測（速度・加速度・変位）・軸受温度・吐出温度・ケーシング温度等を選定した。

併せて、機器の運転状態を把握する必要性から、圧力・流量等のプラントデータも収集した。これらのまとめを表2に示す。

#### 予防保全データの解析

予防保全システムで最も重要な点は、何を計測し、どの範囲を正常と判断するのかということにある。この計測対象物理量の選択としきい値の設定を適切に行うためには、FTAやFMEA等に代表される信頼性解析手法を用いた事前評価と、実績に基づく経験的知識の適用が有効である。ウラン濃縮原型プラントでもこのような評価を行い、具体的解析項目として、以下を設定した。

- ・傾向変化
- ・特異点の有無
- ・傾向変化のしきい値

#### 予防保全文書情報管理

予防保全システムを考える場合、一般的には、対象機器の温度や振動等の計測から得られる数値データのみを対象とする場合が多い。より精度の高い予防保全システムを確立するためには、数値に表すことが困難な、人間の五感による点検結果や、過去の保守・保全履歴等を残すことも重要である。

そこで、本システムでは、これらの文書情報を管理できるシステムも機能の一部として備えている。

#### 4.4 予防保全の評価

予防保全技術の体系化により、主要な機器について、故障兆候の検知に必要な計測対象物理量と計測箇所、及びしきい値を設定することができた。また、予防保全システムに蓄えられた情報を統計解析することにより、定期点検の間隔と項目を定めた点検標準を作成した。

これら予防保全技術の確立によりウラン濃縮プラントの主要な器機の信頼性向上や保守費の低減を実現するとともに、商業プラントに対しても有用な情報を提供した。

#### 5. プロセス機器の長寿命化<sup>5)</sup>

ウラン濃縮原型プラントは、原料UF<sub>6</sub>の発生から濃縮、劣化ウランの回収までの装置を直列に配置した連続プロセスである。

このため、プロセスのどこかで異常が発生すると、プラント全体を停止しなければならなくなる。そのため、プロセスを構成する主要な機器には冗長性を持たせており、プロセス機器に故障が発生した場合でも、操業運転を継続しつつ、故障した機器の交換あるいは保守を行い、連続無停止運転が継続できる設計としている。

ウラン濃縮原型プラントの運転が始まり、プラントの特性が把握されていく中で、連続プロセスを構成する機器のうち、DOP-2回収系に設置されている遠心式コンプレッサ、中でも廃品回収系の遠心式コンプレッサの寿命が、ほかの機器と比較して際立って短いことが分かった。

本章は、この遠心式コンプレッサの長寿命化対策について紹介する。

##### 5.1 遠心式コンプレッサの概要と運転状況

図8に示すように、DOP-2では、カスケード設備で分離された濃縮ウランと劣化ウランを、連続的にシリンダに回収する直接回収方式を採用している。この方式は、10程度に冷却したシリンダに、コンプレッサを用いて、直接UF<sub>6</sub>ガスを回収するシステムで、コンプレッサには、遠心式コンプレッサと往復式コンプレッサの2種類の装置を2段に設置して用いている。

このうち、遠心式コンプレッサは、高速で回転する円筒(以下、回転体)内にUF<sub>6</sub>ガスを流通させ、遠心力により圧力を高める構造となっている。

DOP-2では、製品回収系、廃品回収系共にこの直接回収方式を採用しているが、製品回収系と廃品回収系では、UF<sub>6</sub>ガスの流量に差があることや、遠心式コンプレッサの設置台数の関係から、1台

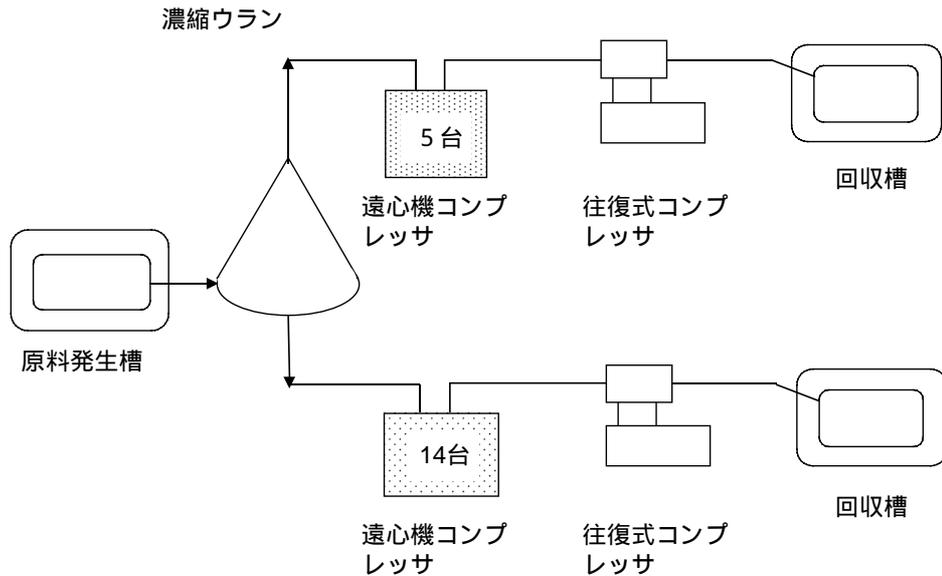


図8 原型プラント第2運転単位概略工程

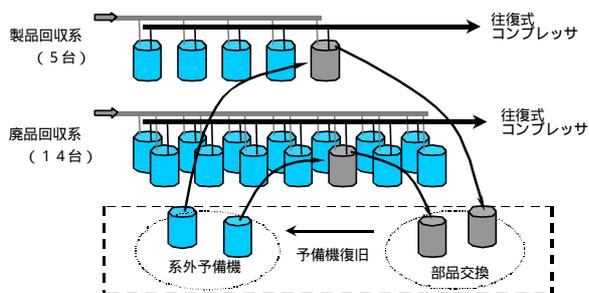


図9 遠心式コンプレッサの保守作業要領

当たりのUF<sub>6</sub>ガス流量は、製品回収系に比べ、廃品回収系では約2.5倍多くなっている。

## 5.2 遠心式コンプレッサの冗長性と保守

DOP-2回収系の遠心式コンプレッサは、製品回収系に5台、廃品回収系に14台が設置されている。

この台数は、製品回収系、廃品回収系共に最も大きな流量が流れる運転条件下で、遠心式コンプレッサが1台停止した場合を想定し、この場合でも、回収能力の維持が可能となるよう、系内冗長を踏まえた設計から決めている。

この系内予備機以外に、系外にも予備機を持っており、遠心式コンプレッサが停止した場合系外予備機と入替えを行う。系から取り外した遠心式コンプレッサは、部品交換等の保守作業を行い系外予備機として待機する。この保守サイクルを図9に示す。

この保守サイクルが成り立っている間はプラン

トの運転に直接影響を与えることはないが、遠心式コンプレッサの停止が連続した場合や、保守作業が長期間に及んだ場合には、プラントの連続操業に影響が及ぶことになる。

そこで、遠心式コンプレッサの突発的な停止等の不確定要素を極力排除し、常に冗長状態を維持するための対策として、遠心式コンプレッサの長寿命化と予防保全的計画保守を行った。

## 5.3 長寿命化に向けての技術改良

廃品回収系遠心式コンプレッサの寿命が相対的に短い要因は、現象論的には、発熱量の大きさが影響していることが運転データの解析から分かった。この知見を基に、遠心式コンプレッサの発熱機構について調査を行うとともに、実際の温度を計測した。

その結果、製品回収系遠心式コンプレッサと比較して廃品回収系遠心式コンプレッサの回転体温度には明確な差があることが分かった。また、回転体温度と、遠心式コンプレッサの寿命を表す指標であるMTBF(Mean Time Between Failure=平均故障間隔)の間に明らかな相関関係が見られた。

このような傾向が見られたことから、停止したコンプレッサの分解調査を行った結果、回転体の温度が高い部位にウラン化合物が附着し、回転体にアンバランスが生じていることが確認された。

これらの事実から、廃品回収系遠心式コンプレッサの寿命が相対的に短い原因として、回転体内部の発熱により生成されるウラン化合物により、回転体にアンバランスが生じる速度が、製品回収

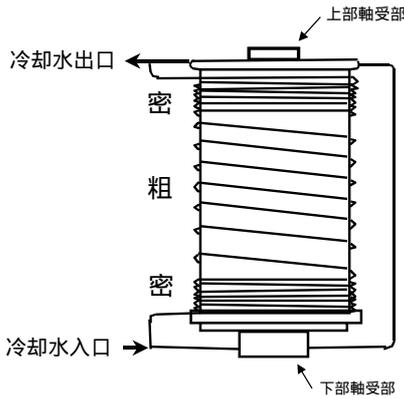


図10 除熱対策状況

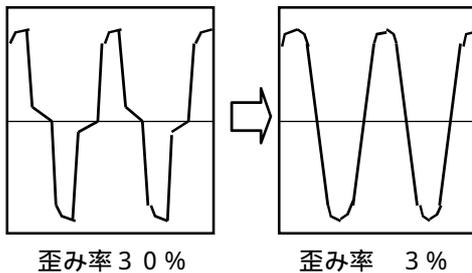


図11 発熱抑制対策の状況

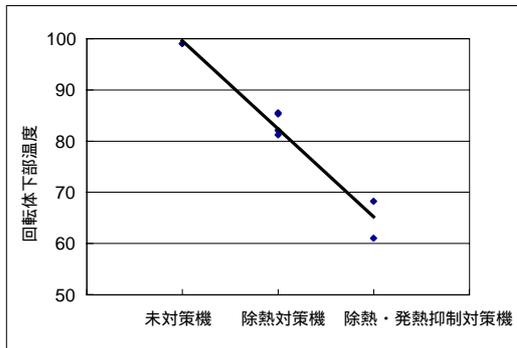


図12 回転体下部温度低下率

系と比較して大きいと推定された。そこで、ウラン化合物生成の原因となる回転体内部の発熱の低減や除熱を行うことで、廃品回収系遠心式コンプレッサの寿命の改善を図った。

(1) 発熱対策 1 (除熱)

発熱に対する具体的対策の一つとして、回転体の除熱を行った。対策の実施に当たっては、ウラン濃縮原型プラントの連続無停止運転に影響を与えないことを前提とし、新たな冷却水設備の追加等を行わず、既設の冷却設備の余剰能力を活用し、遠心式コンプレッサを停止させることなく除熱する対策を行った。具体的には、以下の2つの対策を行った。

遠心式コンプレッサは、従前から上部及び下

部軸受に冷却水を通水し、間接的に除熱する設計となっている。この冷却水温度を遠心式コンプレッサの性能に影響を与えない範囲の最低温度に設定した。

分解の所見から、ウラン化合物の付着量が多い部位を中心に、遠心式コンプレッサケーシング外側面に冷却コイルを取付けた。図10に示すように、冷却コイルは、回転体上下部を密に中央部を粗に巻き付けている。

(2) 発熱対策 2 (発熱抑制)

遠心式コンプレッサの発熱要因は、主に遠心式コンプレッサ内部を流れるUF<sub>6</sub>ガスとの摩擦熱、軸受けの摩擦熱、モータからの発熱である。

この中で、UF<sub>6</sub>ガスとの摩擦熱や軸受けとの摩擦熱を下げるための対策は、遠心式コンプレッサの構造の変更やプラントの運転条件の変更を伴うことから、連続無停止運転を前提としたウラン濃縮原型プラントでは、対策の実施が難しい。

そこで、駆動用モータ部からの発熱抑制に絞って対策を実施した。

具体的には、駆動電源の出力電圧波形の歪率を約30% (矩形波) から約3% (正弦波) に改善した電源に切替え、駆動損に含まれるモータ2次損失を低下させることで、モータからの発熱を抑える対策を実施した。対策状況を図11に示す。

5.4 プロセス機器の長寿命化の評価

これらの対策の結果、図12に示したように、回転体温度は除熱対策で約14℃、発熱抑制対策で約19℃の温度低下効果が得られた。

この結果、廃品回収系遠心式コンプレッサの温度は製品回収系コンプレッサ温度と同等なレベルまで低下した。

温度低下対策により、廃品系遠心式コンプレッサは2001年2月の運転終了まで順調に運転を継続することができた。

この一連の対策により、ウラン濃縮原型プラントの連続プロセスの中で、際立って寿命が短かった廃品系遠心式コンプレッサの信頼性が、ほかのプロセス機器と同等のレベルまで向上した。これにより、ウラン濃縮原型プラントの信頼性向上と併せて、合理的システムである直接回収方式の実用性を高めた。

6. 制御・監視の高度化

ウラン濃縮原型プラントにおける運転技術の体系化の中では、遠心法ウラン濃縮プラント固有の特性に着目した、より高度で独創的なプラント制

御・監視理論の研究と、この理論に基づくシステム開発を行っている。

これらの研究・開発成果は、次世代ウラン濃縮プラントの概念としてまとめた。また、一部のシステムについては、ウラン濃縮原型プラントにおいてその実用性の検証を行っている。この代表的なシステムには、

- ・製品濃縮度予測制御システム
- ・数理統計手法に基づく異常診断システムがある<sup>6)～9)</sup>。

## 7. おわりに

本報告では、ウラン濃縮原型プラントの運転を通じて体系化を図った、代表的な運転技術について紹介した。

約13年間という長期間にわたるウラン濃縮原型プラントの無停止連続運転は、これらの技術により直接的、間接的に支えられ初めて達成できた。

また、これらの技術の多くは、ウラン濃縮原型プラントの運営という日々の業務の中で、試行錯

誤を繰返し生まれた。この点から、何れの技術も実務の中から生まれた実用性が高いものである。

## 参考文献

- 1) 大久保典岳, 松原達郎: “濃縮プラント管理システム「MEISTER」の開発”, 動燃技報, No.70 (1989).
- 2) 長浜洋次, 川辺一夫 他: “ウラン濃縮原型プラントにおける連続運転操作技術”, 原子力学会「1999春の大会」要旨集
- 3) 川辺一夫: 特許“配管系に組み込まれた圧力計のドリフト検知方法”, 出願番号10-159868
- 4) 我妻武志, 藤木傳蔵 他: “ウラン濃縮原型プラントにおける無停止運転での保守保全技術”, 原子力学会「1999春の大会」要旨集
- 5) 中塚嘉明, 藤原 敏 他: “ウラン濃縮原型プラントにおけるウラン処理機器の改良技術”, 原子力学会「1999春の大会」要旨集
- 6) 杉杖典岳, 宮川 洋 他: “ウラン濃縮原型プラントにおける製品濃縮度制御方法の開発”, サイクル機構技法, No.3, p.25 (1999).
- 7) 杉杖典岳, 横山 薫: “数理統計手法を用いた異常診断手法の開発”, サイクル機構技法, No.3, p.53 (1999).
- 8) 杉杖典岳, 横山 薫: “数理統計手法を用いたプラント異常診断手法の開発(自己回帰モデルによる変化の検出)”, 計測自動制御学会「中国支部学術講演会」論文集, p.78 (1995).
- 9) 横山 薫, 杉杖典岳: “数理統計手法を用いたプラント異常診断手法の開発(多変量の相関性に着目した異常診断)”, 計測自動制御学会「中国支部学術講演会」論文集, p.80 (1995).

【技術報告】



## ウラン濃縮原型プラントにおける技術の 体系化(2) 支援技術

門 一実 中島 伸一 山崎 斉

人形峠環境技術センター 施設管理部

資料番号：10別冊 - 5

Systemization of Technology on the Uranium Enrichment  
Demonstration Plants (Support Technology)

Kazumi KADO Shinichi NAKASHIMA Hitoshi YAMAZAKI

Facility Management Division, Ningyo-toge Environmental  
Engineering Center

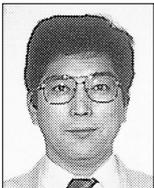
ウラン濃縮原型プラントの運転のなかで行った代表的な支援技術についてまとめた。  
13年間という長期間にわたる、ウラン濃縮原型プラントの無停止連続運転や、この間に実施した約  
2,000tSWUの役務生産を達成できた背景には、これら支援技術の確立と確実な業務への反映がある。  
また、これらの支援技術の経験の多くはウラン濃縮原型プラントに続く、日本原燃(株)六ヶ所  
濃縮工場に技術移転されている。

*The support technology systemized by operating a uranium enrichment demonstration plant.  
This report describes typical support technology.  
The uranium enrichment demonstration plant was able to achieve continuous operation of about  
thirteen years and enrichment service of about 2000t SWU due to these technologies.  
In addition, these support technologies have been transferred to Japan Nuclear Fuel Ltd.'s Rokkasho  
uranium enrichment plant.*

### キーワード

ウラン濃縮事業, ウラン濃縮原型プラント, 遠心法, 運転実績, 分析, 品質保証, 保障措置, 核物質  
管理, 教育, 訓練

*Uranium Enrichment Business, Uranium Enrichment Demonstration Plant, Centrifuge Method,  
Operation Record, Analysis, Quality Assurance, Safeguards, Nuclear Material Control, Education,  
Training*



門 一実



中島 伸一



山崎 斉

### 1. はじめに

ウラン濃縮原型プラントは、ウラン濃縮の事業化につなげる最終段階と位置付けられ、事業化に向けての技術的、経済的見通しを得ることが役割であった。

このため、計画・設計段階で事業化に向けて実証すべき枢要技術の設定や経済性の目標が設定され、建設・運転を通して、これらの目標を実証してきた。

また、約13年にわたるウラン濃縮原型プラント運転の中では、プラントを運転し濃縮事業を行

うために必要な、様々な業務が行われ体系化されている。本報告では、これらの業務の中から支援業務と位置付けられる、以下の3点について紹介する。

製品品質保証技術  
 保障措置技術  
 教育システム

## 2. 製品品質保証技術<sup>1)</sup>

ウラン濃縮原型プラントにおける分析業務は、製品品質分析と工程管理分析に大別できる。

製品品質分析は、顧客である電力会社との濃縮役務契約に基づいて生産された製品濃縮ウランについて、表1に示した米国エネルギー省（以下、DOE<sup>2)</sup>）の規格に沿った、ウラン含有率（純度）・濃縮度・不純物等について分析している。

製品品質分析は、品質保証が目的であることから信頼性が要求される。このため、使用する機器、機器の校正方法、標準試料、分析操作及び分析データの評価方法等に至るところまで、きめ細かく規定されている。中でも不純物分析等の湿式分析操作については、分析結果の信頼性を維持するために、試料間のバラツキの評価や検量線の作成、標準試料を添加しての化学収率の検定を同時に行う分析方法を採用している。

また、分析データについては、ISO等の規格<sup>3)</sup>に準拠した品質保証システムを確立し、これを適用している。

一方、工程管理分析は、カスケードで生産される製品濃縮度の確認等に代表される、ウラン濃縮原型プラントの運転と直結した分析で、精密分析である製品品質分析と比較すると、正確さよりも迅速な分析が優先される。仮に分析データにある程度の偏りがあっても、偏りの程度が明らかで、一定のスペックを満足していれば実用上は特に問題とはならない。ただし、これらは製品品質分析と比較した場合の相対的な特徴であり、工程管理分析といえども、分析結果に対する精度・正確さを保証するための厳しい管理体制の整備が求められている。

ウラン濃縮原型プラントにおける代表的な工程管理分析には、四重極型質量分析装置（以下、Qマス）を用いた濃縮度分析がある。この分析は、オンライン・リアルタイムでウラン同位体比を測定するもので、カスケード設備での濃縮度管理の基礎データとして使用される。

また、臨界管理、廃水管理等のための分析も工程管理分析に求められる重要な役割である。

表1 DOEのUF<sub>6</sub>規格

分析項目	基準値	単位
UF <sub>6</sub> 純度	99.5	Wt%
ハロゲン化合物	0.1	mol%
熱中性子吸収物ホウ素当量換算	8	μg/g U
不揮発性フッ化物	300	μg/g U
Al		
Cl		
Cu		
Fe		
Pb		
Mg		
Mn		
Ni		
Ag		
Sn		
Zn		
Ba		
Li		
Na		
K		
Ca		
Bi		
Sr		
Th		
Zr		
Sb	1	
Br	5	
Cl	100	
P	50	
Si	100	
Nb	1	
Ru	1	
Ta	1	
Tl	1	
Cr	(1500)	
Mo	(200)	
W	(200)	
V	(200)	
U234	—	
U235	—	
U236	—	
U238	—	
Uラン同位体		Wt%
B	—	
Co	—	
In	—	
Be	—	
Eu	—	
Gd	—	
Sm	—	
Dy	—	
その他の不純物		μg/g U

本章では、ウラン濃縮原型プラントで行っている分析業務の中から、製品品質分析を中心とした品質保証の取組について以下に紹介する。

### 2.1 分析手法の管理<sup>3)</sup>

ウラン濃縮原型プラントで生産された濃縮ウランは、表1に示すウラン含有率、濃縮度、不純物等の項目について分析を行っている。

#### (1) ウラン含有率分析

ウラン含有率は、UF<sub>6</sub>を熱加水分解により八酸化三ウラン（以下、U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>）に変換し、ウランとそれ以外の物質の重量から求められる。したがって、分析試料の管理と天秤の測定精度が直接分析値に影響を与えることから、システム誤差の低減対策として、分析試料の厳密な管理、天秤の校正を行っている。また、ランダム誤差対策としては、繰返し測定を行い、総合的信頼性を高めている。

#### (2) 濃縮度分析

濃縮度分析は、濃縮役務契約書に定める契約濃縮度を保証するためのものである。このためには、分析誤差が契約上で許される誤差範囲よりも十分小さい必要がある。このため、正確度 ±

0.02wt% (3) という厳しい自主管理基準値を設定し、この値を維持できるよう、日常の管理を行っている。

測定には、単収束磁場偏向型質量分析計（以下、ガスマス）を使用し、1 試料当たり10回の繰返し測定を行い、その結果を統計処理し分析値を求めた。また、測定機器の校正についてはDOE及びIRMM等の公的機関で認定を受けたUF<sub>6</sub>標準ガスを標準試料として使用している。

### (3) 不純物分析

不純物分析は、イオン交換分離法、溶媒抽出法等の前処理によりウランと目的元素とを分離した後、高周波誘導結合型プラズマ発光分光分析装置（以下、ICP - AES）及び吸光光度計を用いて定量している。

本分析においても、米国環境保全庁（EPA）及び通商産業大臣の認定を受けた金属標準液を用いて機器の校正、検量線の作成を行い、信頼性を確保している。

不純物分析の品質管理では、サンプリング及び使用するガラス器具等からのクロスコンタミの防止が重要となる。このため、分析試料のサンプリングは均質設備において行われ、約 2 t の製品をシリンダ内で密封状態のまま加熱することによりウランを液化し、熱対流による均質化を行った後、約500 g 程度を専用のシリンダを介して、分析用のダイフロン製チューブに抜き取る。

使用するガラス器具等のクロスコンタミについては、酸洗浄 超音波洗浄 ブラッシング 純水洗浄の 4 段階の洗浄により防止している。

以上のように、分析値の信頼性を維持するために、分析手法だけでなく、サンプリング方法や使用する器具の管理等を含めた品質管理を行っている。

## 2.2 分析手法の改善

ここでは、製品品質分析である不純物分析手法の改善について示す。

不純物分析の分析対象元素は、不揮発性フッ化物や揮発性フッ化物等、42元素が対象となる。

ウラン濃縮原型プラントの運転開始当初の不純物分析手法は、原子吸光光度法、吸光光度法等を用いた単元素・単分析法を採用しており、分析対象元素ごとに異なった前処理操作が必要であった。このため、1 試料当たりの分析所要時間が長く、コスト的な観点からも効率が悪かった。

また、一部の元素については機器の測定感度が低い等の理由から、必要な分析試料量が多く廃棄物発生量の増加等の問題があった。

そこで、従前の分析手法で問題となっていた点を改善し、前処理が簡便で分析時間が短い分析手法の検討を行った。その結果、分析手法の改善に当たっては、以下の特徴を有するICP-AESを選定した。

多元素同時定量が可能である。

高感度測定が可能で測定精度が高い。

高分解能で妨害元素（主にウラン）の影響が少ない。

ICP-AESの運用に当たっては、高周波出力、トーチ高さ、キャリアガス流量等のパラメータについて、元素ごとに測定条件を設定し、得られた測定条件を基に、測定対象元素ごとの測定波長及び妨害元素の影響を確認しつつ、最適条件を決定した。

このような事前検討結果に基づき、測定時の最適条件を設定することができ、実際の分析では測定波長のみを任意に変換することで、一つの試料から多元素同時定量を行うことが可能となった。

前処理としては、ウランを分離することは無論、処理過程において分離効率を低下させるフッ素の除去が必要となる。

前処理方法として一般的に用いられる、イオン交換分離法、溶媒抽出法及び沈殿分離法について、分析対象元素の特性を生かした分離法の適用性を確認するとともに、操作性、分離効率、廃棄物発生量等を総合的に評価し、イオン交換分離法を選定した。

イオン交換分離法は溶媒抽出法に比べ、多少分離時間が長くなるが、操作が簡便で一回の操作で多元素を分離ができるという特徴を有している。分離時の酸濃度、流速及び液量を確認する程度で、ほとんどの元素について 8 割以上の回収率を得ることができた。

ICP-AESを採用したことにより、従来、原子吸光光度法等により定量していたNa等のアルカリ金属をはじめとする28元素の同時定量が可能となったほか、表 2 に示すように、定量下限値、分析精度も向上した。

また、分析時間及び試料量は従来 1 / 3 程度に、廃棄物発生量は 1 / 3 程度に低減でき、表 3 に示した当初の目的を満足できる分析手法の改善が図られた。

## 2.3 その他の分析手法の開発

### (1) 製品品質分析

1996年から実施された回収ウラン実用化試験に対応する必要性から、回収ウラン特有の不純物である、U<sub>232</sub>・核分裂生成物（以下、FP）、超ウラ

表2 定量下限値と分析精度の比較

元素名	改善前		改善後	
	定量下限値 (mg/ml)	分析精度 (C.V.%)	定量下限値 (mg/ml)	分析精度 (C.V.%)
B i	2.5	16	0.1	3
T h	1.0	15	0.1	4
B a	2.5	10	0.1	2
C a	2.5	12	0.5	3
N a	2.5	13	0.5	2

C.V.% = 変動係数

表3 分析時間, 試料及び廃棄物発生量の比較

項目	改善前	改善後
分析時間	350時間/件	210時間/件
試料量	150gU/件	50gU/件
廃棄物発生量	3.50/件	1.50/件

ン元素(以下, TRU)の分析手法の開発を行った。

回収ウラン中のFP・TRU等の不純物は、その含有率が極めて微量であるため、分析感度の高い放射能分析法により定量する方法を採用した。分析においては、信頼性を保証するための対策として、分析試料とあらかじめトレーサを添加した標準試料とを同時に並行分析することで、その都度分析操作の回収率を補正する方法を採った。

(2) 工程管理分析

カスケード設備での製品濃縮度管理を円滑かつ効率的に行うため、Qマス装置に、自己診断型自動測定シーケンスを導入し、夜間・休日等の無人運転時の測定値の信頼性向上を図った。また、系統内のHF濃度測定法の開発を行い、臨界管理上重要なH/U235について核的制限値の確認を行った。

さらに、フッ化ナトリウム(NaF)等のウラン吸着剤について、核燃料物質の計量管理及び臨界管理等を適正に行うため、放射能分析法を用いて濃縮度測定を行う方法を開発した。

2.4 分析保証システム

試料を分析した結果が、濃縮役務契約書により定められているスペックを満足しているか否かは、一連の分析工程が適正に行われたことが保証されて初めて判定することができる。

このことを保証するためのシステムが図1に示す分析保証システムである。このシステムは、校正等により定められた精度が保証されている分析機器により分析された値を、図2に示すX-R管理図により管理し、異常が認められた場合は、図1の分析保証システムのフロー全体を調査し、分析結果の妥当性を総合的に保障するという考え方で構築されている。ウラン濃縮原型プラントでは、

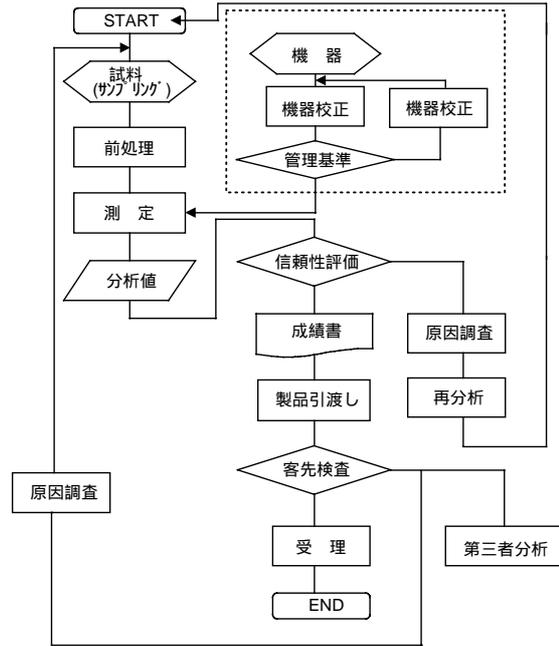


図1 分析保証システム

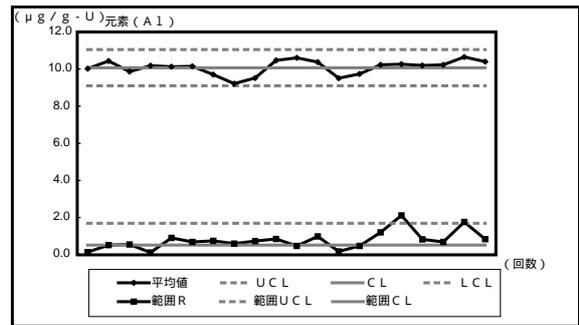


図2 X-R管理図

この分析保証システムをすべての分析に適用している。

2.5 品質保証技術の評価

ウラン濃縮原型プラント約13年間の運転の中で生産されたすべての製品について、前述したすべての分析を行っている。この実績と、この間の経験を集約した分析技術の体系は、サイクル機構内外で高い評価を得ている。

3. 保障措置技術<sup>4)</sup>

ウラン濃縮施設は核兵器転用の可能性の高い施設であることから、保障措置上重要な位置を占めている。一方、核不拡散条約(NPT)発足当時、世界中の遠心法ウラン濃縮施設は、機微情報の拡散防止の観点から、IAEAの査察に対して査察活動場所を限定し、遠心分離機が設置された場所(以下、カスケード設備)への立ち入りを拒否していた。このため、カスケード設備の改造行為等の未

申告活動を監視・防止できないことが問題視されていた。

この状態を解消させるため、1980年から2年間にわたり、遠心法ウラン濃縮に関する6団体〔日本、米国、オーストラリア、トロイカ（英、独、蘭）、IAEA、ユーラトム〕による協議（以下、HSP）が行われ、遠心法ウラン濃縮施設に適用できる査察手法が考えられた<sup>5)</sup>。

ウラン濃縮原型プラントに対する保障措置は、HSPの結論に基づき、将来の大型濃縮施設に適用できる保障措置システムの確立を念頭に置いて、1988年のDP運転開始から導入された。

本章では、ここに至る簡単な経緯と、ウラン濃縮原型プラントに適用されている保障措置システムの概要について紹介する。

### 3.1 HSPの結論

HSPは遠心法ウラン濃縮施設の保障措置システムとして、以下の2項目を目的とした検認が必要であるとの結論を出した。

申告値どおりに核物質が移動し、また在庫が存在することの検認

施設が申告した最高濃縮度（ウラン濃縮原型プラントの場合は5%）の範囲内で核物質を生産していることの検認

これらの具体的な査察検認手法として、前者については従来型の核物質の在庫及び移動の検認手法を適用し、後者については新たに以下に示す手法が考案された。

### 3.2 新査察検認手法

#### (1) 頻度限定無通告査察（以下、LFUA）

査察官が無通告でカスケード設備に立ち入り、目視検認により、配管組替え等の改造の有無を検認する査察手法で、査察官をHSP参加国出身者に限定することにより機微情報の拡散防止を図る。

#### (2) 配管濃縮度モニタによる最高濃縮度の検認<sup>6)</sup>

配管濃縮度モニタは、カスケード設備から製品濃縮ウランを抜き出す配管内を流れるUF<sub>6</sub>の濃縮度を計測するもので、計測原理を図3に示す。配管内部を流れるUF<sub>6</sub>からはウラン同位体に対応した固有のエネルギーを持つ線が放射されており、この線を半導体（Ge）検出器により計測し、線エネルギーを解析することにより濃縮度を求めるものである。

測定装置は図4に示すとおり、Ge検出器、マルチチャンネル波高解析装置、データ処理用パソコンにより構成されている。

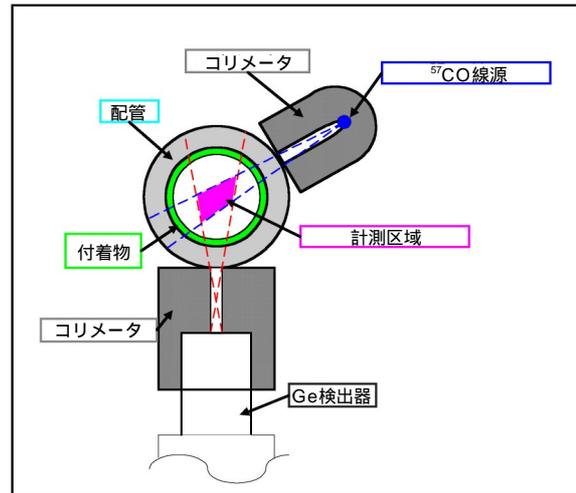


図3 配管濃縮度モニタの計測原理

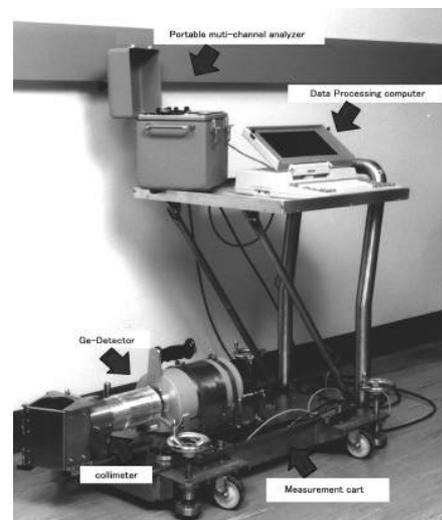


図4 配管濃縮度モニタ構成図

### 3.3 ウラン濃縮原型プラントにおける保障措置システムの特徴

ウラン濃縮原型プラントにおける保障措置システムは、HSPの結論に基づき、LFUA及び配管濃縮度モニタによる最高濃縮度の検認手法を導入するとともに新たに、費用対効果の優れた以下に示す新手法を取り入れて設計された。

#### (1) 「ウランバランス法」によるMUF評価

核物質の隠匿、盗取等による転用の有無を検認する方法として、核物質の実在庫調査により得られる実在庫量と帳簿在庫量の在庫差（以下、MUF）を評価する。

MUFは核分裂性物質質量で評価されるため、ウラン取扱施設の場合、ウランの同位体の中のU<sup>235</sup>量を個々の測定対象物ごとに測定し、U<sup>235</sup>量の物質収支を取り、MUF評価を実施することが一般的である。このため、U<sup>235</sup>量の把握に当

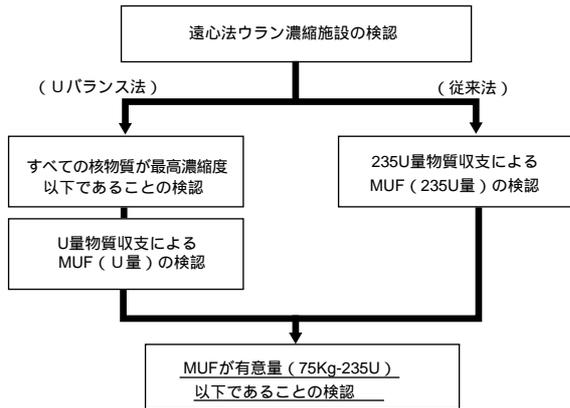


図5 Uバランス法と従来法

表4 DP査察実績

実施年	1988	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	2000	平均
通常査察	10	10	11	10	10	10	11	12	10	10	10	11	11	10.5
LFUA	5	5	6	6	7	6	6	6	7	5	5	6	6	5.8
PIT	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0
その他	8	1	5	4	5	1	1	2	4	3	5	9	6	4.2

その他：配管モニタ，DAサンプリング等による最高濃度の検認 単位：回

たっては精度の高い測定が要求される。

また、大量に核物質を取扱う大型施設の場合、劣化ウラン中に含まれるU235量測定精度によりMUFが大きく変動する可能性がある。

これらの問題点を改善する方法として「ウランバランス法」を考案した。これは、施設で使用される核物質がすべて申告された最高濃縮度以下であることを、非破壊検査（以下、NDA）等の方法により検認しておくことを前提とし、MUFの評価は、ウラン全体のバランスから求める。こうして求めたウラン全体のMUFに申告した最高濃縮度を乗ずることにより、U235量を求める手法である。

「ウランバランス法」はU235量の把握を測定対象物ごとに実施する必要がないことから、設備・運転の効率化が図れるという利点を有する。従来のMUF評価手法と「ウランバランス法」による手法との比較図を図5に示す。

(2) 「操作中の实在庫調査」による实在庫調査

ウラン濃縮施設では、1年に1回の頻度で核燃料物質の实在庫調査（以下、PIT）を実施することが必要がある。

ウラン濃縮原型プラント以前の施設では、施設の運転を停止してPITを実施し、すべての核物質を計量し在庫量を確定していた。

しかし、ウラン濃縮原型プラントは「連続無停止運転」の実証を目的としていたことから、運転を停止せずに实在庫調査を実施する方法の確立が

求められていた。

このため、ウラン濃縮原型プラントでは、ウランの発生から回収までの一連のプロセス機器を評価時点で一斉に切替え、それぞれの機器に存在するウラン量を評価する「操作中のPIT」手法を適用した。

「操作中のPIT」では、PITに際してIAEA及び国による検認（以下、PIV）が必要であり、具体的には以下の検認を受けている。

事前検認(Pre - PIV)

一斉切替後に使用する供給原料UF<sub>6</sub>の重量等を検認する。

PIV

一斉切替状況を検認する。

事後検認(Post - PIV)

一斉切替後、回収したUF<sub>6</sub>及びPIV時に検認できないUF<sub>6</sub>を検認する。

3.4 保障措置実績

ウラン濃縮原型プラントで実施された査察実績を表4に示す。ウラン濃縮原型プラントでは以下の4種類の査察が行われた。

通常査察：平均10回/年

月ごとの核物質の移動，生産を検認する。

LFUA：平均6回/年

頻度限定無通告査察

PIV：平均1回/年

核物質の实在庫検認

配管濃縮度モニタによる最高濃縮度検認

平均3.5回/年

3.5 査察の有効性評価

ここでは、HSPの結論に基づいて導入されたウラン濃縮原型プラントの保障措置システムが、遠心法ウラン濃縮施設における、核兵器への核物質の転用活動の監視及び防止手法として、十分な適応性を有しているか評価した。

(1) 評価の前提条件

転用活動に対する査察の有効性を評価するため、ウラン濃縮原型プラントにおける核兵器への核物質の転用シナリオを以下のように設定した。

シナリオ1：カスケード改造

配管を組替える等の改造をカスケード設備に施して、高濃縮ウランを生産する。

シナリオ2：繰返し濃縮

カスケードを改造せずに、一定量の濃縮ウランが生産できたところで、この濃縮ウランを原料ウランとして再度供給する。これを繰り

返すことで高濃縮ウランを生産する。

#### (2) 転用期間のシミュレーション

上記のシナリオに対し、ウラン濃縮原型プラントのプラント規模及び遠心分離機的能力から、核兵器に転用可能な高濃縮ウラン25kgU235が生産可能かをシミュレーションにより求めた。

その結果、両シナリオとも、ウラン濃縮原型プラントを使って高濃縮ウランの生産が理論的には可能であるとの結果が得られた。

#### (3) 有効性評価

ウラン濃縮原型プラントで実施された転用活動に対する査察手法の中で、LFUAは上記のシナリオ1に対し、また配管濃縮度モニタはシナリオ2を防止するための手段として導入された。

それぞれの実施実績は、表4に示すとおり、LFUAが平均6回/年、配管濃縮度モニタによる検認が平均3.5回/年であるが、LFUAは未通告査察であること、また、配管濃縮度モニタによる検認の機会、すべての査察実施時(平均21回/年)に与えられていることから、これらの手法により、ウラン濃縮原型プラントにおける転用活動抑止効果は十分であったことが評価できる。

### 3.6 保障措置技術の評価

HSPにより開発された遠心法ウラン濃縮施設に対する保障措置手法は、ウラン濃縮原型プラントに最初に導入された。現在では、HSPに参加したすべての国の商業濃縮プラントにおいても適用されており、核不拡散を担う査察手法として評価されている。

国内においても、日本原燃(株)六ヶ所商業プラントの操業に際して、ウラン濃縮原型プラントに適用した保障措置手法を基本としたシステムが導入された。

この点から、ウラン濃縮原型プラントにおいて保障措置技術の実用性と信頼性が実証されたことは、遠心法ウラン濃縮施設の核拡散防止に大きく貢献している。

## 4. 教育システム

ウラン濃縮原型プラントが約13年間の連続無停止運転を達成できた背景については、設計段階での様々な工夫や、運転段階での改善、新技術の導入等と併せて、プラント運転や保守、支援業務に携わった組織と要員の資質が寄与している。

本章では、この組織と要員の資質の向上に重要な役割を果たした、教育システムについて紹介する。

### 4.1 運転教育の必要性

ウラン濃縮原型プラントが運転を開始した、1988年当時の運転体制は、職員3名、業務協力員2名、日本原燃(株)の研修生1名の計6名を1班とした、三交替勤務体制であった。この時の職員の多くは、先行するパイロットプラントの運転経験とウラン濃縮原型プラントの建設業務経験を有していた。この経験から、運転開始前には運転マニュアルを自ら作成することができる程度の技術レベルにあった。

一方、2名の業務協力員については、2年程度の従事要員が入れ替わっており、随時、運転教育を行う必要があった。また、日本原燃(株)の研修生についても、ウラン濃縮プラントの運転経験が少ないことから、運転教育が必要であった。

### 4.2 原型プラントの運転教育

ウラン濃縮原型プラントの運転教育は、OJT教育を中心として、これに運転教育用シミュレータを使った教育を加えて体系化している。

#### (1) OJT教育

OJT教育は、ウラン濃縮原型プラントの概要や関連法規・基準等の説明と、定常運転時の基本的な操作方法の指導を中心として実施した。

OJTの実施は、教育を受ける側の運転技術の向上と併せて、指導員である運転主任者の知識の再確認という副次的な効果をもたらした。

#### (2) 運転教育用シミュレータによる教育訓練

運転教育用シミュレータによる教育は、OJTでは経験することが難しい停電等の異常事態への対処訓練を中心として実施した。

また、運転教育用シミュレータは実際のウラン濃縮原型プラントの中央操作室を模擬して作られていることから、定常的な運転業務の多くを疑似体験できる。このような特性を生かして、運転教育用シミュレータによる運転教育は、新人コースと既従事者コースに分け、次のようなカリキュラムにより行った。

新人コース1：初心者を対象にした2週間教育

- ・ プラントの構成、用語と実物との対応
- ・ 機器単位での基本運転操作の習得
- ・ 計測器の取扱方法の習得

新人コース2：新人コース1終了後に半年間の運転業務に従事した者を対象にした2週間教育

- ・ 設備単位での基礎運転操作の習得
- ・ 異常時の対処操作の習得

既従事者コース：運転班単位で2日間教育(5カ月に1回)



図6 運転教育用シミュレータによる教育

- ・ 異常時における役割別対処操作の習得
- ・ 運転監視設備の保守点検技術の習得

図6に運転教育用シミュレータによる教育の様子を示す。

#### 4.3 運転教育の効果

プラントが安定して運転されている状態の時運転員が行う操作は、定常的に行う極一部の操作に限られる。このような状態が長期間継続すると、頻度の少ない操作やプラントに異常が発生した場合の対処に対して、運転員は不安を持つようになる。運転教育用シミュレータを使用した定期的な運転教育は、このような運転員の精神的負担を軽減する上で、極めて有効な手段であった。

また、ウラン濃縮原型プラントでは、運転実績から得られた機器やプラントの特性解析結果を基に、運転操作方法の改善を随時行っている。

このような改善活動の中で、プラントの運転マニュアルの見直しは、ウラン濃縮原型プラントの設備に直接影響を及ぼすことから、安全で確実な方法であることが十分に確認されなければ実施することはできない。そこで、運転教育用シミュレータを使って、操作の安全性と確実性を確認し、

併せて、新しいマニュアルについて十分な事前教育訓練を行った後、実際にプラントに適用している。

教育・訓練は、基本的に運転班単位で実施しており、これにより、グループ員の運転技術レベルを運転主任者が把握できるほか、班員の役割分担が明確になり、実際の運転業務での作業指示がより適切にできるという効果が得られた。

運転員を中心とした教育訓練が、ウラン濃縮原型プラントの連続無停止運転達成に大きな役割を果たしたといえる。

#### 5. おわりに

本報告では、ウラン濃縮原型プラントの運転の中で行った代表的な支援技術について紹介した。

約13年間という長期間にわたる、ウラン濃縮原型プラントの無停止連続運転や、この間に実施した約2,000tSWUの役務生産を達成できた背景には、これら支援技術の確立と確実な業務への反映がある。

また、これらの支援技術の多くは、ウラン濃縮原型プラントに続く日本原燃(株)六ヶ所濃縮工場に技術移転されている。

#### 参考文献

- 1) 山崎 育, 塚根健一 他: “ウラン濃縮原型プラントの製品品質保証システムの確立”, 原子力学会「1999春の大会」要旨集
- 2) ANNUAL BOOK of ASTM STANDARDS, Vol.12.01, Nuclear Energy, ASTM, C761-95, C787-90JIS Z8402
- 3) JIS Z8402 分析・試験の許容差通則, 日本規格協会 JISZ9041 測定値の処理方法, 日本規格協会 ISO9001(1994). ISO9003(1994).
- 4) 中島伸一, 山本文雄 他: “ウラン濃縮原型プラントにおける保障措置手法の実証”, 原子力学会「1999春の大会」要旨集
- 5) 諸根正年 他: “工場別の考慮を含む遠心法濃縮工場に適應されるLFUAモデルの査察活動”, HSP(1983).
- 6) 秋葉光徳 他: “Development of the Enrichment Monitor on UF<sub>6</sub> Pipelines”, JASPAS support program for Agency safeguards, Task No.6 (A-315)(1995).

【技術報告】



## ウラン濃縮原型プラントプロジェクト評価

杉杖 典岳 宮川 洋\*

人形峠環境技術センター 施設管理部  
\*原子力システム株式会社

資料番号：10別冊 - 6

Evaluation of the Uranium Enrichment Demonstration Plant Project

Noritake SUGITSUE Hiroshi MIYAGAWA\*

Facility Management Division, Ningyo-toge Environmental Engineering Center

\*Nuclear Energy System Inc.

ウラン濃縮原型プラントというプロジェクトの実績を通して、ウラン濃縮事業の特長について組織体制からの評価を行った。

その結果、ウラン濃縮技術開発あるいは事業では、R&Dサイクルの特殊性から、事業化段階においても、研究・エンジニアリング・運用の三位一体の組織の維持が必要であるとの知見を得た。

2000年11月には、青森県六ヶ所村に日本原燃(株)がウラン濃縮技術開発センターを設置し、事業者自らが技術開発に携わる体制が整えられ、我が国のウラン濃縮事業の確実な定着に向けここでの成果が期待される。

*In this report, the organization system of the uranium enrichment business is evaluated, based on the operation of the uranium enrichment demonstration plant.*

*As a result, in uranium enrichment technology development or business, it was acknowledged that maintenance of the organization which has the Trinity of a research / engineering / operation was necessary in an industrialization stage by exceptional R&D cycle.*

*Japan Nuclear Fuel Ltd. (JNFL) set up the Rokkashomura Aomori Uranium Enrichment Research and Development Center in November 2000. As a result, the system that company directly engaged in engineering development was prepared. And results obtained in this place is expected toward certain establishment of the uranium enrichment business of Japan.*

### キーワード

ウラン濃縮事業, ウラン濃縮原型プラント, 組織体制, 研究・エンジニアリング・運用

*Uranium Enrichment Business, Uranium Enrichment Demonstration Plant, Organization system, Research / Engineering / Operation*



杉杖 典岳



宮川 洋

### 1. はじめに

ウラン濃縮原型プラントのような長期にわたるプロジェクトでは、プロジェクトから生み出された成果と併せて、その成果を生み出した組織的背景を分析しておくことが重要である。これにより、直接的には、ウラン濃縮原型プラントプロジェクトにより生み出された成果や、それを生み出した組織等の資源の有効活用を図ることができる。また、間接的には、大型プロジェクトに付きまとうリスク回避のための帰納的知識の集約を行うことが期待できる。

そこで、本報告では、ウラン濃縮原型プラントを一つのプロジェクトとして捕らえ、プロジェクトの特徴を組織論（実施体制）の側面から評価した結果を紹介する。

## 2. プロジェクト評価の概要<sup>1)</sup>

ウラン濃縮原型プラントを対象として実施したプロジェクトの評価（以下、プロジェクト評価）は、「終了したプロジェクトの事後評価」である。

評価開始に当たって、まず、このような評価に対する確立された手法の有無を調査した。その結果、プロジェクト開始前のフィージビリティの評価手法については多くの事例が存在したものの、ここで意図する終了したプロジェクトの事後評価手法については、国内外を通じて適用可能な手法についての報告事例は見当たらなかった。そこで、今回実施したプロジェクト評価では、評価手法そのものの検討から行った。

### 2.1 プロジェクト評価手法

プロジェクト評価では、ウラン濃縮原型プラントプロジェクトが所期の目的を達成したことを前提とし、目的を達成できた組織的背景の分析を行った。

具体的には、まず、ウラン濃縮原型プラントのほかに、国の実施したプロジェクトを中心に6種類のプロジェクトを選び、このプロジェクトを対象として、プロジェクトの特長とプロジェクトを推進してきた組織体制を調査、分析した。次に、この調査結果を基にプロジェクトの特長と組織体制の関係について、各プロジェクトが達成した成果や問題点を踏まえた検討を行った。

この一連の評価を通して、プロジェクトとしてのウラン濃縮原型プラントの相対的な特長を把握するとともに目標達成の背景を分析した。

### 2.2 評価対象プロジェクト

ウラン濃縮原型プラントプロジェクトとの相対評価の対象としたプロジェクトを以下に示す。

#### 極限作業ロボット<sup>2)~4)</sup>

（原子力、海洋、防災ロボット開発と基盤技術整備）

#### 第5世代計算機（前期・中期・後期）<sup>5)~10)</sup>

（非ノイマン型並列処理と知識ベースを用いた推論処理を基本メカニズムとしたハード・ソフトシステムの開発）

#### 超高压発生システム<sup>11)~12)</sup>

（超高压発生システムと、超高压システムの利

用技術の研究開発）

#### 超電導・極低温基盤技術開発<sup>13)~15)</sup>

（高性能超電導線材、極低温構造材料、極低温冷凍冷却システムの開発）

#### STOL機飛鳥<sup>16)~19)</sup>

【STOL（Short Take-Off and Landing）機の開発】

ウラン濃縮技術開発プラント（前期・中期・後期）

## 3. プロジェクト評価の方法

### 3.1 プロジェクトの特長

プロジェクト評価の最初のステップでは、評価対象プロジェクトの特長を抽出するために、プロジェクトカテゴリーとプロジェクトインテグレーションという2つの考え方をを用いて分類した。

#### (1) プロジェクトカテゴリーによる分類

プロジェクトカテゴリーとは、以下に述べる項目により定義されるもので、この尺度により分類した。

- 1) プロジェクトに与えられた開発目標の大きさ  
大規模エンジニアリング  
機器システム
  - 2) プロジェクトに与えられた開発目標とプロジェクト開始時の技術的ギャップの大きさ  
開発期間  
開発投資額
  - 3) プロジェクトに与えられた開発目標を達成するために必要な技術開発要素の広がり  
技術の広がり大きさ
  - 4) プロジェクトの最終成果として求められるものの段階（以下、守備範囲）  
商用段階  
実証段階  
試作段階  
試作準備段階  
基礎研究段階
  - 5) プロジェクトに与えられた開発目標を達成するための道筋を見通すことができるか（以下、Well defineness）  
低い：（開発目標が概念的・抽象的で、目標達成の客観的評価が容易でない）  
中間  
高い：（開発目標が具体的定量的に定義でき、目標の達成度も明瞭に評価可能である）
- (2) プロジェクトインテグレーションによる分類  
プロジェクトインテグレーションとは、プロジェクトを進める過程を「多様な技術から最適な技

術を選択し、目標に向けてインテグレートする過程」と考え、このプロジェクトの目標達成に必要なインテグレートのレベルを尺度として分類した。

#### 1) 目標のレベル

試作レベル：（プロジェクト守備範囲の試作フェーズに対応し、単一の技術目標に向けてのインテグレートが主体で、異なる技術のインテグレーションを必要としない）

本物レベル：（プロジェクト守備範囲の実証・商用フェーズに対応し、性格の異なる複数の技術のインテグレートが必要）

#### 2) インテグレーションのレベル

構成要素の分散度

開発目標の分散度

開発目標のWell Defineness度

### 3.2 プロジェクト組織体制の分析

プロジェクト組織体制の調査では、プロジェクトに参画したすべての組織と其中で中核的な役割を果たした組織に分類し、組織の特長を以下のように分類した。

#### (1) 中核組織の構造

ブロードミッションの国立研究開発機関

科学技術分野に関する基礎研究や応用研究を広く、かつ継続的に行う国立の研究開発機関（日本原子力研究所等）

特定ミッションの公的研究開発機関

研究開発のターゲットが特定されている研究機関で、研究開発資金が国から拠出されている研究機関（核燃料サイクル開発機構等）

共同研究組織

複数の研究開発機関が協力して作る研究組織で、ミッションはある程度特定されている〔新世代コンピュータ技術開発機構（ICOT）等〕。

#### (2) 実施組織の全体構造

プライムコントラクター構造

中核組織が、ひとつの非中核組織を選定し、プライムコントラクター契約を結ぶ。プライムコントラクターは、サブコントラクターを従えて開発を行う。契約履行責任はプライムコントラクター契約が負う。

複数コントラクター構造

プロジェクトを複数の部分に分割し、それぞれ個別の非中核組織と契約を結ぶ。契約履行責任は、個々のコントラクターが負う。

コンペ構造

中核組織が開発仕様を示し、複数の非中核組織

に開発を委託する。中核組織はそれぞれの結果を評価して、採用するものを決定する。

以上3種が主な構造であるが、そのほかに、中核組織が非中核組織の協力をあまり受けない中核組織単独構造、幾つもの核となる開発テーマがあり、テーマごとに開発担当が異なるマルチコア構造、確固としたリーダーのいない複数の組織が、リーダーのいないチームのようにまとまってプロジェクトを推進するトロイカ構造等のケースも存在する。

#### (3) 組織の研究開発における役割分担

##### 1) 中核組織の機能的役割

エンジニアリング機能

実際にモノを作る機能。設計機能も含める。

研究機能

実際のモノ作りではなく、モノを作るため、あるいはモノの完成度を高くするための研究を行う機能。コンセプト提案や概念設計も含む。

運用機能

完成したシステムを運用して、機能を確かめる機能

##### 2) 技術選択における役割

目標に向けて技術をインテグレーションしていく段階で、複数の候補の中から特定の技術を選択するという意思決定の機能と権限に着目した分類

概念としての技術方式の選択

技術方式の選定に中核組織がどのように関係したかという点に着目

・独自に選択

・チーム内協議

・外部と協議

・選択権なし

具体的な技術の選択

具体的な技術の選定に中核組織がどのように関係したかという点に着目

・独自に選択

・チーム内協議

・外部に依存

### 3.3 プロジェクトの特徴と組織体制の関係

プロジェクトの特徴と組織体制との関係評価（以下、マッチング分析）では、プロジェクトの分析結果と、それに対応するプロジェクト組織体制の分析結果から、プロジェクトタイプの違いによる対応組織の違いを、プロジェクト成果と比較して評価した。

表1 プロジェクトカテゴリー分析結果

	開発目標 分類	プロジェクトの守備範囲				構成要素		技術的ギャップ		開発目標 Well-Defineness
		基礎	試作準備	試作	実証	分散度	分散度	開発期間	開発投資 (相対値)	
極限作業ロボット	機器システム					中	小	8年間	100	中間
第五世代コンピュータ	機器システム					小	大	11年	540	低い
		前期					小	3年	80	
		中期					中	4年	220	
		後期					大	4年	240	
超高压発生システム	機器システム					小	大	5年間	6	高い
超電導・超低温基盤	機器システム					n/a (小)	小	5年間	19	高い
STOL機飛鳥	機器システム					中	小	12年間	380	高い
濃縮プラント	大規模エンジニアリングシステム					大	小	20年	2,425	高い
	特定研究	機器システム						4年間	245	
	パイロット	大規模エンジニア						8年間	1,280	
	原型	リングシステム						9年間	900	

4. プロジェクト評価結果

本章では、評価対処のプロジェクト間の相対的關係に着目し、ウラン濃縮原型プラントプロジェクトの特徴について評価した結果を示す。

4.1 プロジェクトの特徴

(1) プロジェクトカテゴリーによる分類

プロジェクトカテゴリーにより各プロジェクトを分類した結果を表1に示す。またウラン濃縮原型プラントに着目した時の特徴的な分析結果を以下に示す。

開発目標と守備範囲の特徴

図1に示したとおり、開発目標が大規模エンジニアリングであるという点で、ウラン濃縮原型プラントプロジェクトは、ほかのプロジェクトと際立った違いがある。

技術ギャップの特徴

図2に示したとおり、ウラン濃縮プロジェクトは技術ギャップの大きなプロジェクトであったことが分かる。

Well Definenessと技術ギャップ

図3に示すとおり、ウラン濃縮原型プラントプロジェクトは技術的ギャップは大きい、目標を達成するための道筋は明確に見通すことができていた。

(2) プロジェクトインテグレーションによる分類

プロジェクトインテグレーションによる分類結果を表2に示す。またウラン濃縮原型プラントに着目した時の特徴的な分析結果を以下に示す。

インテグレーションの規模

ウラン濃縮原型プラントプロジェクトは、開発

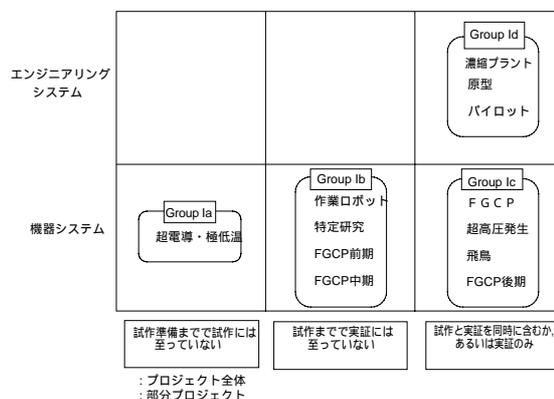


図1 開発目標とプロジェクトの守備範囲

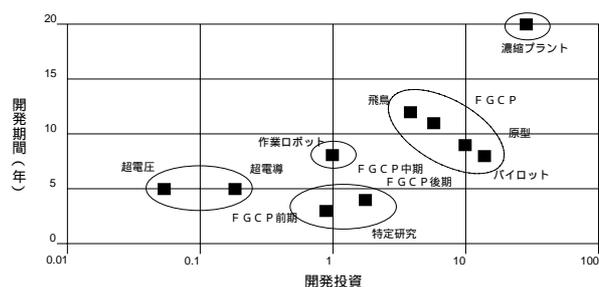


図2 技術ギャップ分析結果

目的が大規模エンジニアリング(プラント)であったことを反映して、性格の異なる複数の技術を実用レベルまでインテグレートすることが求められていた。

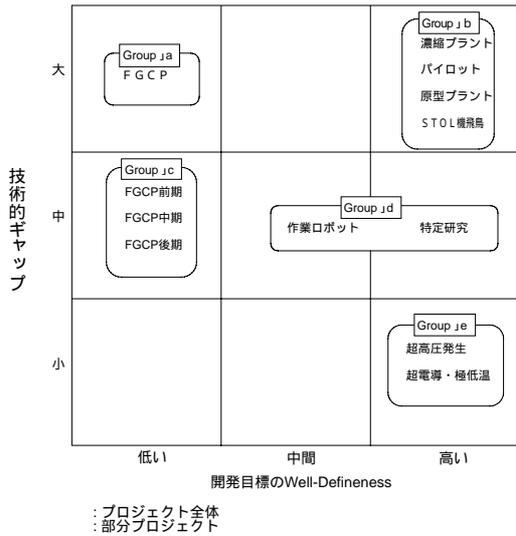


図3 開発目標のWell-definenessと技術ギャップ

表2 インテグレーション分類結果

	試作or本物	インテグレーションの質	インテグレーション関連項目			
			構成要素分散度	開発目標分類*	開発目標のWell-Defineness	
極限作業ロボット	試作	無機的	中	機器システム	中間	
第五世代コンピュータ	実証	有機的	小	機器システム	低い	
	前期	試作	無機的	小	機器システム	低い
	中期	試作	無機的	小	機器システム	低い
	後期	実証	有機的	小	機器システム	低い
超高压発生システム	実証	有機的	小	機器システム	高い	
超電導・極低温基盤	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
STOL機飛鳥	実証	有機的	中	機器システム	高い	
濃縮プラント	実証	有機的	大	プラント	高い	
	特定研究	試作	無機的	大	機器システム	高い
	パイロット	実証	有機的	大	プラント	高い
	原型	実証	有機的	大	プラント	高い

4.2 プロジェクト組織体制の分析

各プロジェクトのプロジェクト実施組織体制調査結果を表3に示す。

この結果から、プロジェクトの守備範囲が実証フェーズにあるプロジェクトには何れも中核組織が存在していた。

またこれらの組織は、技術選択における中核組織の果たした役割により、3つのグループに分けることができる。

(1) 特定ミッション研究エンジニアリング型

第五世代コンピュータと濃縮プロジェクト等に見られる組織体制で中核組織自らが技術力を持っており、この技術力を背景として、研究機能とエンジニアリング機能に組織的に対応した。外部資源活用の際の技術指導能力と技術選択権限の発揮が特徴。

(2) ブロードミッション研究センター型

無機材質研究所と航空宇宙技術研究所

中核組織の主な役割は研究機能にある。このため、中核組織の研究機能は高い反面モノ作りに必

要な機能と権限は弱い。

(3) マルチコア型

極限作業ロボット、超伝導・超低温等に見られる組織体制で中核組織を持たないプロジェクト

4. ウラン濃縮原型プラントプロジェクトの特徴

プロジェクトの特徴及びプロジェクト組織体制の分析から、プロジェクトとしてのウラン濃縮原型プラントの相対的特徴についてまとめた結果を以下に示す。

プロジェクトの分析結果から、ウラン濃縮原型プラントプロジェクトの最も際立った特徴は、開発目標が大規模エンジニアリング(プラント)であった。

基礎開発からプラントまでがプロジェクトの守備範囲になっており、この間の技術ギャップが非常に大きい。

ウラン濃縮プロジェクトを遂行する過程は「膨大な資源を集約・調整して目的とするシステムをインテグレートする過程」と考えられる。

プロジェクト組織体制面では、プロジェクトを推進する中核組織であったサイクル機構が、研究・エンジニアリング・運用という3機能を並列的に持った特異な組織であった点にある。

サイクル機構の果たした役割が、プロジェクトの進展とともに研究からエンジニアリングへ、そして、エンジニアリングからプラント運用へと変化した。

5. ウラン濃縮原型プラントプロジェクトが所期目標を達成した背景の分析

ウラン濃縮原型プラントプロジェクトの特徴は、プロジェクトの目標が大規模エンジニアリング(プラント)であり、これを達成するために膨大な資源を集約、調整してシステムをインテグレートすることになった。また、このプロジェクトを推進してきたサイクル機構は「強力な技術力を背景として調整機能を果たすことができる中核組織」として機能してきた。

ここでは、ウラン濃縮原型プラントプロジェクトが所期目標を達成した背景として、サイクル機構が「技術力を背景として調整機能を果たすことができる中核組織」となり得た要因について分析した結果を示す。

5.1 中核組織としての機能を果たした要因

サイクル機構が、技術力を背景として調整機能を果たすことができる中核組織として機能した要

表3 組織・体制分析結果

	中核組織	組織体制の 全体構造	中核組織の役割 1 (機能的Identity)	中核組織の役割 2	
				技術の選択 1	技術の選択 2
極限作業ロボット	なし	マルチコア (トータルシステムの インテグレーション はトロイカ)	研究と エンジニアリング	チーム内協議	チーム内協議
第五世代コンピュータ	共同研究組織 (ICOT)	複数 コントラクター	研究と エンジニアリング	独自に選択	独自に選択
前期					
中期					
後期					
超高压発生システム	ブロード ミッション (無機材質研究所)	複数 コントラクター (トロイカに近い)	研究と エンジニアリング	外部と協議	外部と協議
超電導・超低温基盤	なし	マルチコア	(研究)	(選択権なし)	(独自)
STOL 機飛鳥	ブロード ミッション (航空技研)	プライム コントラクター	研究 (一部運用)	独自に選択	外部依存
濃縮プラント	特定ミッション (動燃)	プロジェクト進行 とともに変化	プロジェクト進行 とともに変化	独自に選択	独自に選択
特定研究		コンベ	研究と エンジニアリング		
パイロット		複数 コントラクター	3 機能均等混在		
原型		複数 コントラクター	運用機能偏重		

因の中で、最も重要な点は、プロジェクト進展の過程で、研究、エンジニアリング、運用という、プロジェクトの推進に求められる、3つの要素をバランスよく持つことができた点にある。

一般に一つの組織がある程度定着すると、その組織の役割を変化させるのは困難であるが、サイクル機構はプロジェクトの各段階で求められる機能へ組織の役割を変化させてきた。その結果として、研究、エンジニアリング、運用機能のバランスが確立された。

しかも、この変化はプロジェクトに携わる人員が大きく変わることにしに行われており、研究からエンジニアリングへ、エンジニアリングから運用へというように、プロジェクトの進展に伴って、内部人員が自らの役割を変化させている。

このような人的資源のダイナミクスにより、研究・エンジニアリング・運用の“三位一体”のコンパクトな組織が成立した。

## 5.2 人的ダイナミクスが生じた要因

研究・エンジニアリング・運用の“三位一体”のコンパクトな組織が成立した背景としては、以下の2点が考えられる。

### ミッションの特殊性

プロジェクトの最終目標が、ウラン濃縮原型プラントの運用を通じての技術や経済性の実証であ

ったという、ミッションの特殊性。

### R&Dサイクルの特殊性

ウラン濃縮事業の経済性を維持するためには、運用実績を踏まえた、新たな技術開発の継続が必要である。しかし、ウラン濃縮技術は、核不拡散上や技術の先端性、技術の特殊性等により、一般市場から技術を調達することが難しく、結果として、自前のR&Dサイクルの中で技術を調達せざるを得ない。このため、事業化段階にあっても、研究、エンジニアリング、運用という3つの要素が必要であるという、ウラン濃縮技術開発のR&Dサイクルの特殊性。

## 6. おわりに

本報告では、ウラン濃縮原型プラントというプロジェクトの実績をとおして、ウラン濃縮事業の特徴について組織体制からの評価を行った。

その結果、ウラン濃縮技術開発あるいは事業では、R&Dサイクルの特殊性から事業化段階においても、研究・エンジニアリング・運用の三位一体の組織の維持が必要であるとの知見を得た。

2000年11月には、青森県六ヶ所村に日本原燃(株)がウラン濃縮技術開発センターを設置し、事業者自らが技術開発に携わる体制が整えられた。我が国のウラン濃縮事業の確実な定着に向けここでの成果が期待される。

## 参考文献

- 1) 杉杖典岳, 根本憲伯 他: “ウラン濃縮原型プラントプロジェクトの評価”, 原子力学会「1999春の大会」要旨集
- 2) 通商産業省工業技術院: “試験研究所 研究計画”, (財)日本産業技術振興協会
- 3) “極限作業ロボット研究開発成果発表会 予稿集”(1988).
- 4) 産業技術審議会: “極限作業ロボットの研究開発に関する評価報告書”(1992).
- 5) 電子計算機基礎技術開発推進委員会: “第五世代コンピュータプロジェクトの評価及び今後の課題と展開のあり方中間報告”(1992).
- 6) 電子計算機基礎技術開発推進委員会: 学術的・技術的評価ワーキング・グループ “第五世代コンピュータプロジェクト最終評価報告書”(1993).
- 7) 通商産業省工業技術院: “試験研究所 研究計画”, (財)日本産業技術振興協会
- 8) 財団法人新世代コンピュータ技術開発機構(ICOT): “ICOTジャーナル”, No.34 (1993).
- 9) ICOT: 第五世代コンピュータ国際会議基調論文 (1984,1988,1992).
- 10) ICOT: 第五世代コンピュータ国際会議会議録 (1984,1988,1992).
- 11) 科学技術庁: “大型超高圧発生システムに関する研究報告書”(1986).
- 12) 科学技術庁: 科学技術振興調整費試験研究実施計画
- 13) 科学技術庁: “超電導・極低温基盤技術の開発に関する研究(第一期)”(1985).
- 14) 科学技術庁: “超電導・極低温基盤技術の開発に関する研究(第二期)”(1987).
- 15) 科学技術庁: 科学技術振興調整費試験研究実施計画
- 16) 科学技術庁: “STOL輸送システムに関する総合研究”(1975).
- 17) 航空・電子等技術審議会: “「ファンジェットSTOL機の研究開発の実施計画の検討等について」(諮問第1号)に対する最終報告”(1991).
- 18) 川崎重工業株式会社, 三菱重工業株式会社, 石川島播磨重工業株式会社各社の社史
- 19) 中野不二男: “大いなる飛翔”, 講談社 (1987).

## 結 言



人形峠環境技術センター  
施設管理部次長 米川 茂

ウラン濃縮原型プラントは所期の目的を達成し、2001年2月に遠心分離機の運転を停止した。これにより、役務生産の後処理や成果の取りまとめ等の一部の業務を残して、ウラン濃縮原型プラントは、ウラン濃縮技術開発の役割を終えた。

ウラン濃縮原型プラントの運転終了は、期せずして、ウラン濃縮事業の構図の世界的大転換期と時期を同じくしている。

従前のウラン濃縮事業体制は、USEC（米国）、Eurodif（フランス）、Urenco（イギリス、ドイツ、オランダ）及びTenex（ロシア）の4大事業者が、民生用ウラン濃縮役務を独占供給する状況が長く続いていた。このことは、寡占の弊害はあるものの、ユーザにとっては濃縮役務の安定供給の保証になっていた。

しかし、ここ数年、ウラン濃縮事業を取り巻く世界情勢は急激な変化を見ている。例えば、

- ・ USECによるAVLIS（原子レーザ法によるウラン濃縮）の計画中止
- ・ 米国における老朽化したガス拡散工場（パディューカ、ポーツマス）の閉鎖問題
- ・ LES（ルイジアナ エナジー サービス）によるクライボーン濃縮工場計画の中止
- ・ ロシアによる遠心分離機プラントの公開
- ・ USECとDOEによる新型遠心分離機の共同開発の発表
- ・ COGEMAの新工場建設計画
- ・ 解体核高濃縮ウランの民生転用

等々、極めて重要な問題が立続けに発表されてきており、21世紀初頭には、ウラン濃縮供給者の図式が現状とは大幅に変っている可能性も考えられる。

また、このような国際的な濃縮事業の環境変化を技術的な視点で見ると、ガス拡散法による既存工場の老朽化が進む中で、次世代ウラン濃縮技術と目されていたレーザ法の実用化の遅れにより、少なくとも、ここ当面は遠心法が国際的にもウラン濃縮技術の主流になるものと考えられる。

一方、国内に目を転じると、冒頭でも触れているように、現状の最大の課題は国内濃縮事業の経済的合理性の確保であり、このためにサイクル機構に蓄積されている遠心分離機開発及びプラントエンジニアリング技術や、メーカーに蓄積されている製造技術を有効活用することが重要と考える。

2000年11月には、青森県六ヶ所村に日本原燃（株）がウラン濃縮技術開発セ

ンターを設置し、事業者自らが技術開発に携わる体制が整えられた。これに併せて、サイクル機構ではこれまでの技術開発成果を取りまとめるとともに、技術移転、施設の利用、人的協力等の技術開発への支援をより一層進めることになった。

大きく変化する国内外のウラン濃縮事業の変革の中で、過去40年にも及ぶサイクル機構のウラン濃縮技術開発の技術的・人的資産が、上述した国内課題の解決や、遠心分離法に収束しつつある国際的なウラン濃縮事業の展開の中で有効に活用されることを関係者一同願っている。

---

**サイクル機構技報** 2001. 3 No.10別冊  
JNC Technical Review

特集 ウラン濃縮原型プラント13年の運転実績

平成13年3月発行

本誌及びバックナンバーは、PDF形式のファイルをホームページに掲載しています。

本誌の全部又は一部を複写・複製・転載する場合は、編集発行元へお問い合わせください。

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

© 2001 JAPAN NUCLEAR CYCLE DEVELOPMENT INSTITUTE

編集発行 核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
〒319-1184  
茨城県那珂郡東海村村松4-49  
T E L : 029(282)1122(代)  
F A X : 029(282)7980  
E-Mail : gihoh@jnc.go.jp  
U R L : <http://www.jnc.go.jp/>

製 作 株式会社 菜根出版  
〒102-0093  
東京都千代田区平河町1-8-13  
T E L : 03(3261)8887(代)  
F A X : 03(3261)8879

---

## 核燃料サイクル開発機構

本社	茨城県那珂郡東海村村松 4 - 49	〒319-1184	TEL (029) 282 - 1122
敦賀本部	福井県敦賀市木崎 65 - 20	〒914-8585	TEL (0770) 23 - 3021
新型転換炉 ふげん発電所	福井県敦賀市明神町 3	〒914-8510	TEL (0770) 26 - 1221
高速増殖炉 もんじゅ建設所	福井県敦賀市白木 2 - 1	〒919-1279	TEL (0770) 39 - 1031
東海事業所	茨城県那珂郡東海村村松 4 - 33	〒319-1194	TEL (029) 282 - 1111
大洗工学センター	茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002	〒311-1393	TEL (029) 267 - 4141
人形峠環境技術センター	岡山県苫田郡上斎原村 1550	〒708-0698	TEL (0868) 44 - 2211
東濃地科学センター	岐阜県土岐市泉町定林寺 959 - 31	〒509-5102	TEL (0572) 53 - 0211
東京事務所	東京都千代田区丸の内1 - 1 - 2 NKKビル10階	〒100-8245	TEL (03) 5220 - 3311
鯉沼インフォメーションルーム	東京都千代田区有楽町1 - 1 - 2 日比谷三井ビル1階	〒100-0006	TEL (03) 3597 - 9497
福井事務所	福井県福井市大手3 - 4 - 1 福井放送会館5階	〒910-0005	TEL (0776) 25 - 3040
六ヶ所事務所	青森県上北郡六ヶ所村大字尾鮫字沖付	〒039-3212	TEL (0175) 71 - 2716
水戸連絡事務所	茨城県水戸市笠原町978-25 茨城県開発公社ビル4階	〒310-0852	TEL (029) 301 - 1020
<b>海外事務所</b>			
WASHINGTON	JNC Washington Office Suite715, 2600 Virginia Avenue, N. W., Washington D.C. 20037-1905 U.S.A.		TEL 202-338-3770 FAX 202-338-3771
PARIS	JNC Paris Office 4-8, Rue Sainte - Anne, 75001 Paris France		TEL 1-4260-3101 FAX 1-4260-2413
VANCOUVER	PNC Exploration(Canada)Co. Ltd. 2401-650, West Georgia Street, Box 11571 Vancouver Center, Vancouver, B. C. V6B 4N8 Canada		TEL 604-681-6151 FAX 604-682-3452