

【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, UF₆, 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



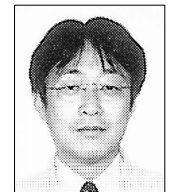
我妻 武志



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、これらの枢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¹⁾

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

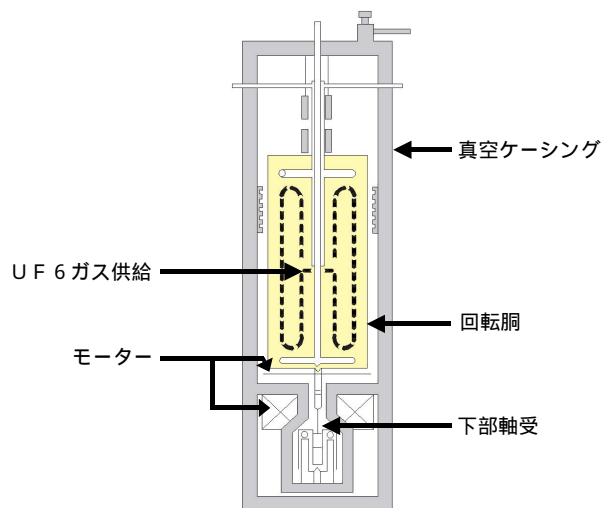


図1 遠心機モデル

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UF₆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²⁾

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

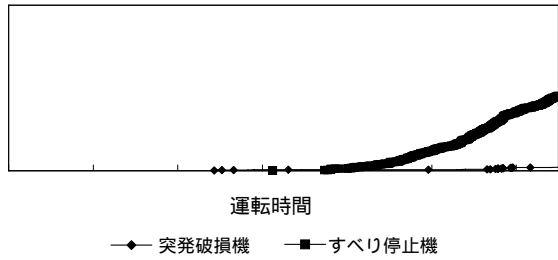


図2 DOP-2停止遠心機の発生状況

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

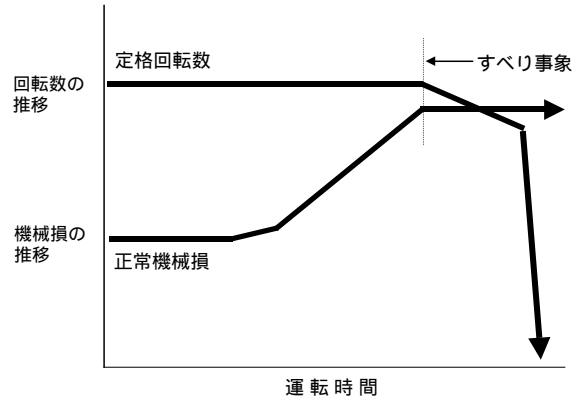


図3 機械損と回転数の関係概念図

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³⁾、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。

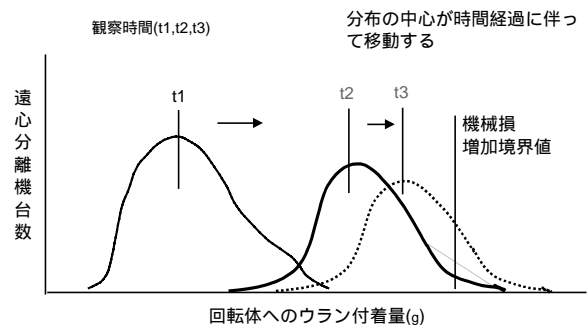


図4 線測定による遠心機回転体へのウラン付着量の変化概念図

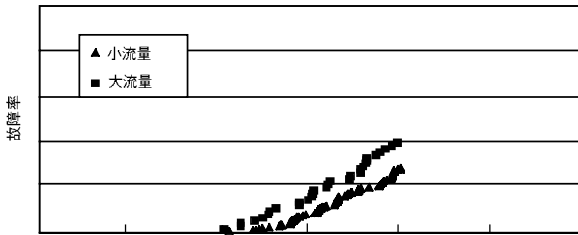


図5 積算負荷

(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UF₆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。

UF₆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。

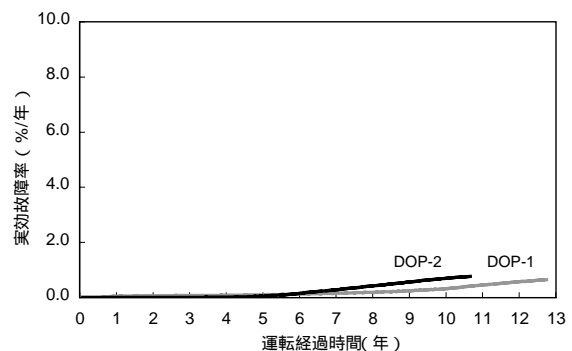


図6 ウラン濃縮原型プラント遠心分離機実効故障率推移

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

n : 遠心分離機総台数

Tk : 評価時点の運転時間

γ : 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⁴⁾

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。

UF₆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、UF₆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UF₆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UF₆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UF₆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⁵⁾。

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

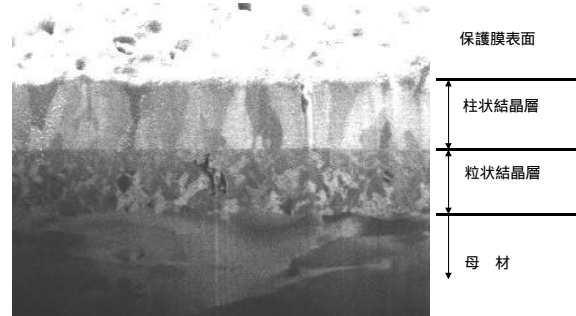


図7 FIBによる遠心分離機材料表面保護皮膜の断面観察

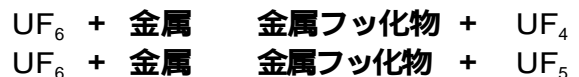
う2層構造を有している要因と考えられる。

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

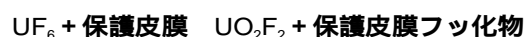
金属とUF₆の反応としては、次のようになる⁶⁾。



この反応式に見るように、金属とUF₆の反応生成物は、金属フッ化物とUF₄及びUF₅または、その仲間のU₂F₉などがある。UF₅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、UO₂F₂及びUF₄に分解する。



また、保護皮膜とUF₆は次のように反応する。



金属とUF₆の反応と保護皮膜とUF₆の反応を比較すると、保護皮膜では金属に比べUF₆との反応速度は極めてゆっくりしたものである⁷⁾。

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

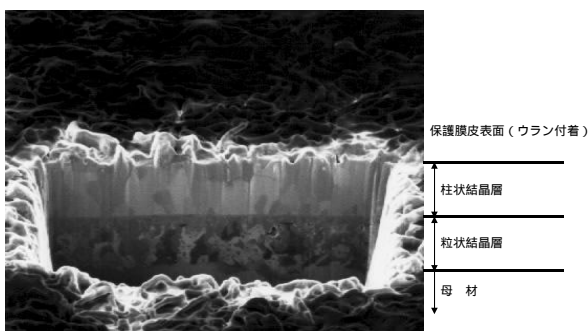


図8 FIBによるウラン化合物と表面保護皮膜の断面観察

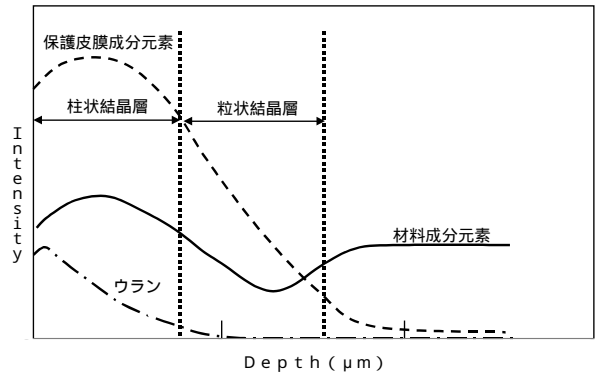


図9 FIBによる遠心分離機材料表面保護皮膜の断面観察

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_6 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⁸⁾。

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 は徐々に 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

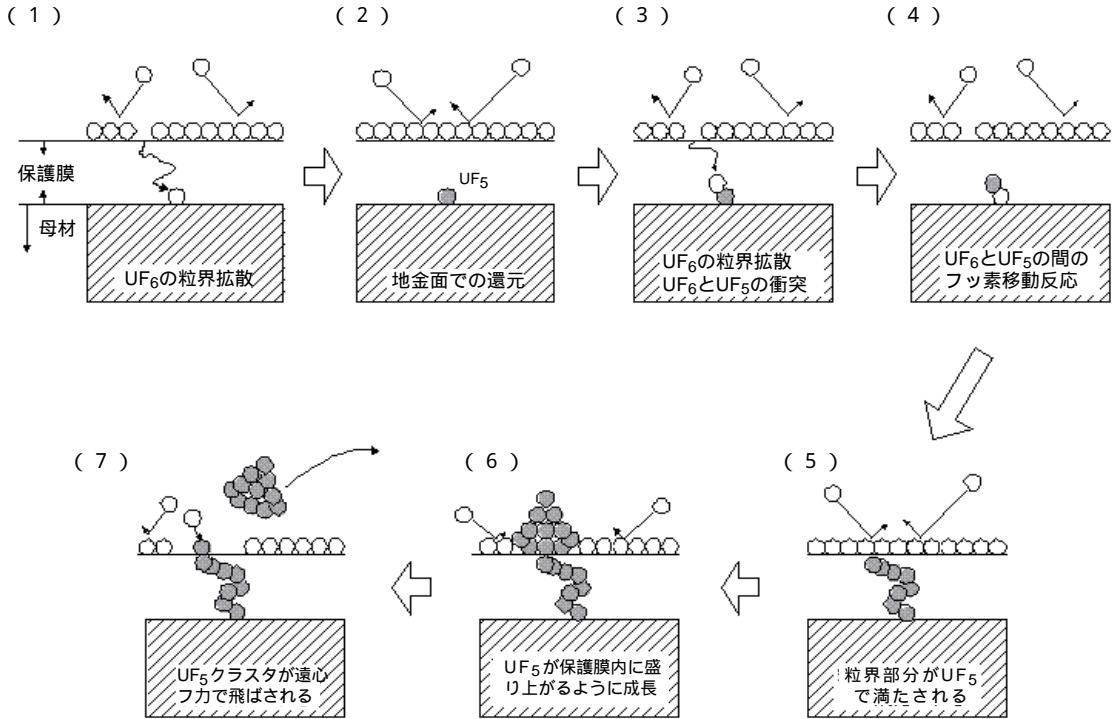


図10 遠心分離機材料表面保護皮膜へのウラン付着メカニズム

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、UF₆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⁹⁾

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ため、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UF₆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

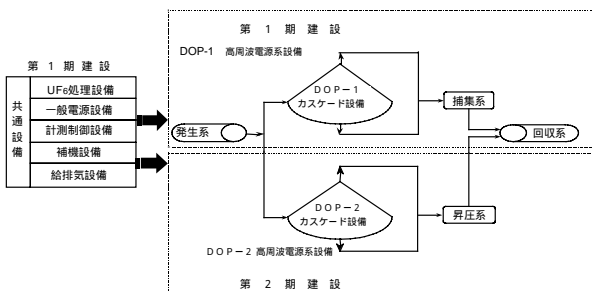


図11 ウラン濃縮原型プラント建設概要



図12 ウラン濃縮原型プラントの操業運転状態

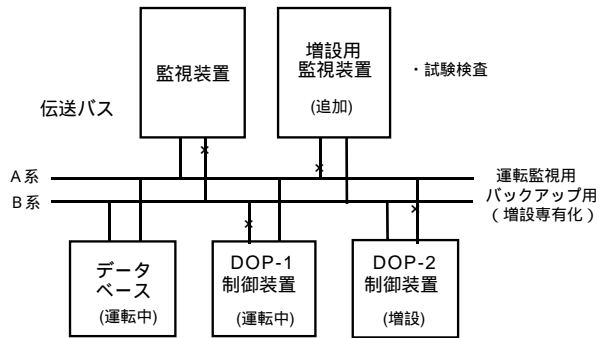


図13 計装制御設備の無停止増設の概念

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

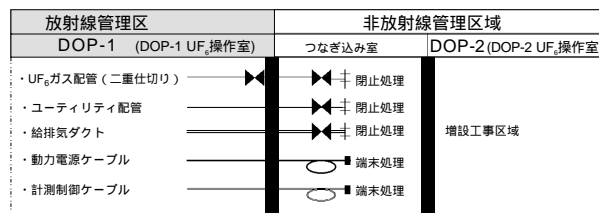


図15 つなぎ込み室

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-1UF₆操作室とDOP-2UF₆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-1UF₆操作室内のバルブにより、つなぎ込み室の配管にはUF₆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¹⁰⁾

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

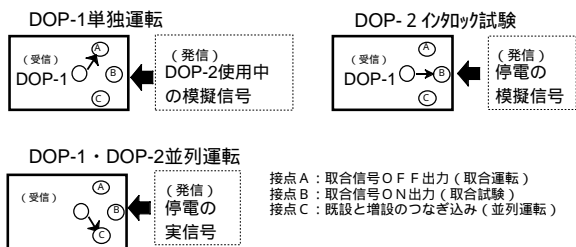


図14 三位置スイッチの機能

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 ₆ 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。

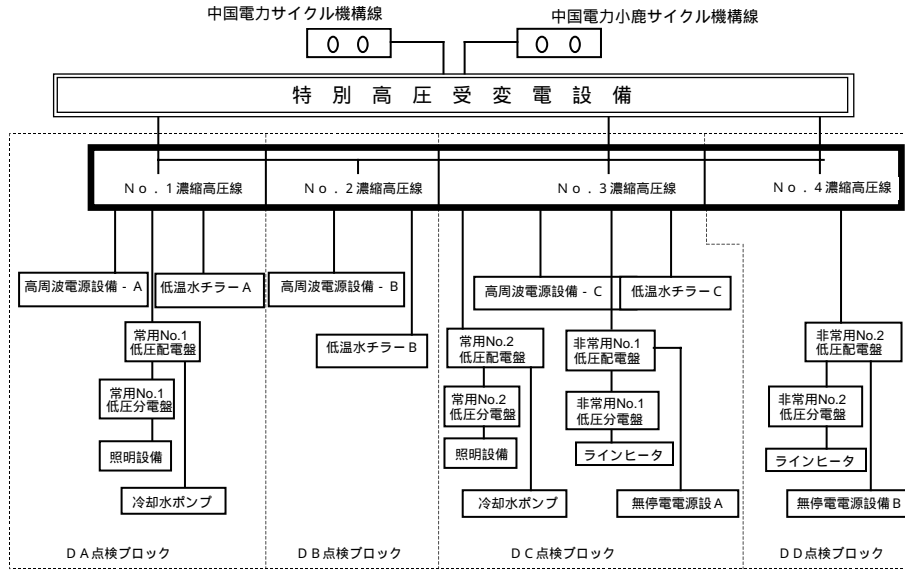


図16 一般電源設備電源系統概念図

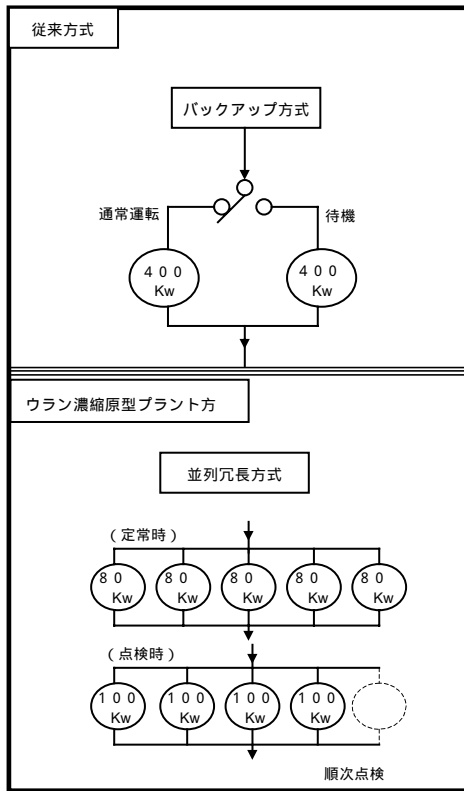


図17 プラント無停止での設備点検

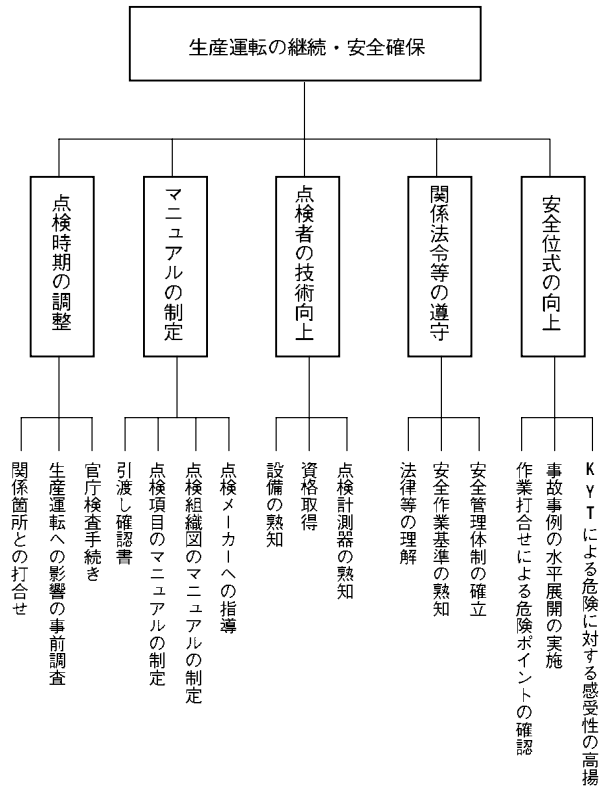


図18 点検実施上の安全ポイント

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 UF₆”, 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 UF₆ and Solid UF₆”, 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