

自主技術開発歴訪

ウラン濃縮遠心法

元日本原燃株式会社

元動力炉・核燃料開発事業団

山本 文雄

はじめに

東日本大震災の翌二〇一二年三月、青森県六ヶ所村の日本原燃ウラン濃縮工場で日本が自主開発した世界最高技術による新型遠心分離機が濃縮ウランの生産を開始した。この遠心分離機は、動力炉・核燃料開発事業団(現日本原子力研究開発機構)の技術を引きついで日本原燃が自ら開発し製造した。この事業形態は特異ではあるが、海外のウラン濃縮工場ではむしろ一般的である。

この世界最高技術を創出した日本のウラン濃縮遠心分離技術開発は、ドイツが第二次大戦中の一九四二年に初めてウラン濃縮に成功してから一七年後に開始され、しかも核兵器技術拡散を防止する観点で公開情報はほとんど得られない困難な状況で開発が進められた。この公開制限により、その開発史もとぎれとぎれとなっており、貴重な歴史情報の逸散も進んでいる。このような状況のなか、「エネルギーレビュー」誌において「自主技術開発歴訪・ウラン濃縮遠心法」を連載する機会を与えられ、二〇一九年七月号から二〇二〇年十一月号まで十六回にわたり遠心分離法の開始から現在までを連続した開発史としてまとめることができた。

この度、エネルギー問題に発言する会のホームページにこの開発史掲載のお話を頂いたので、エネルギーレビュー誌を転載することとした。なお、連載の記事内容を歴史のエピソードごとに集約して開発の推移把握に資することとし、さらに、文中に独立したコラムを設け、歴史の背景などの補足を行った。

山本 文雄



6フッ化ウラン

6フッ化ウランは、常温では一定の蒸気圧を有する固体で、ウラン濃縮遠心法は、これを加熱して気体を使用する。6フッ化ウランを更に加熱、圧力を高めると固体から液体になる。

自主技術開発歴訪 ウラン濃縮遠心法 目次

序章 ウラン濃縮の夜明け 1

はじめに／ガス拡散で夜が明けた日本のウラン濃縮／

遠心法開発 43 年間の幕開け／

ピンチヒッター小型機の健闘／

(コラム序 1 …ウラン濃縮 遠心分離法とガス拡散法)

第一章 マンハッタン計画と遠心法 4

第一節 遠心分離のはじまりとマンハッタン計画 4

物理学者の後世への遺産／マンハッタン計画の遠心法／

隔膜開発に手間取ったガス拡散法／

聞き入れられなかったコーエンの抗議

第二節 遠心法綴法管理のはじまり 6

世界大戦中のドイツの遠心法開発／戦後西独の遠心法／ブラジル

への遠心機売却問題／遠心法技術の情報管理協定交渉／

ブラジルのその後／

第三節 ソ連の戦争捕虜が創った新概念遠心機 8

第四節 アメリカでのソ連遠心機再現 12

アメリカ遠心機の開発始動／

(コラム 1・1 …天才物理学者が創案した遠心機性能評価式)

第二章 第二次世界大戦中の日本のウラン濃縮 14

第一節 夜明け前の日本のウラン濃縮技術開発 14

理研の二号研究／京大の F 研究／

終戦直後の原爆開発調査／

指令三号とサイクロトロン破壊／

(コラム 2・1 …朝永の墓碑)

第二節 空爆で焼失した日本で最初の遠心機 16

見つかった遠心機設計ノート／
先進的なモーター駆動磁気浮上型機／

モーターとタービンの互換性／

清水の検討状況示すノート／設計情報の集約化／

謎の残る連根断面の回転胴／

(コラム2-2:歴史的提案となったユーリの向流循環型遠心機)

第三章 日本の遠心法の黎明 20

中曽根康弘の建白書／遠心機の黎明を呼び込んだ奨学金／
理研1・2号遠心機の製作／開発主体原燃公社へ／

ジッペ遠心機の開発／くやしさが生んだ日本式遠心機／

ジッペ型東工大2号機の開発／

ウラン濃縮方針示した原子力委員会／ウラン濃縮3号機の製作

(コラム3-1:回転胴内の圧力分布)

第四章 ナショナルプロジェクト 25

第一節 目を変えた特定総合研究 25

原子力委、自主技術既発方針打出す／特定総合研究の指定／

3号機試験、未経験の課題続出／

専門委員会とオールジャパン体制／

大転換したシステム信頼性試験／

システム試験・激烈なメーカー間競争／

もう一つの柱、高性能機開発／国家プロジェクトの指定へ／
標準化遠心機の開発／

第2節 ナルプロジェクト 27

日本最初のカスケードC-1／C-2初めての連続濃縮達成／
寿命試験／飛躍的な遠心機性の向上／

チェック・アンド・レビュー／パイロットプラントの建設／
パイロットプラントの運転試験／国際貢献した保障措置／

第五章 実証から実用化へ 30

第一節 原型プラント 30

濃縮ウランが大幅に不足する／

専門部会原型プラントによる実証必要／

長計、技術移転方策を調整／

DP設計は商業プラント反映が前提／

大転換した遠心機品質保証体系／着実に進めた遠心機製造／

年間の無停止運転に挑戦／

原型プラント無停止運転を達成／

動燃濃縮整理縮小事業に指定／

第二節 日本最初の商業プラント六ヶ所濃縮工場 34

日本初の商業プラント始動／

ウラン濃縮工場の建設・運転／

第六章 世界最高峰技術への挑戦 36

第一節 ジャンボ機開発 36

息を吹き返した米国遠心機／少数で始めたジャンボ機開発／
小径遠心機開発への方向転換／電力との共同研究の開始

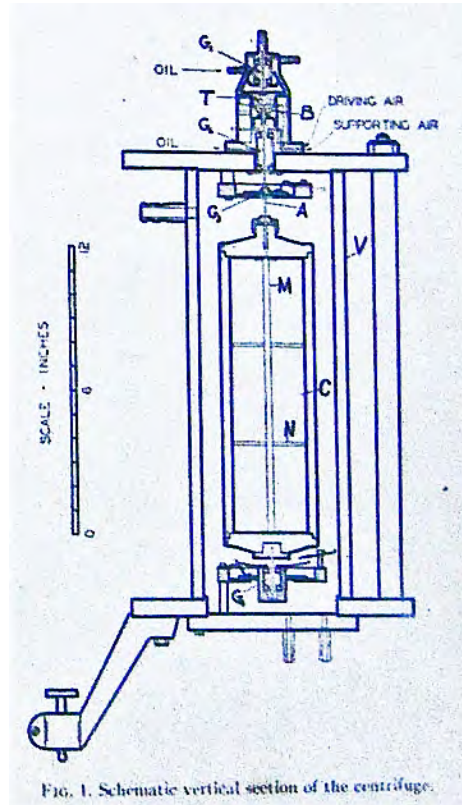
第二節 激流に乗りいれた複合材料胴機開発 38

実用規模カスケードでの実証試験／
影響を受けた九〇年代の社会環境の変化／
高度化機の早期導入計画／

第三節 世界最高峰技術の開発と導入 41

民間主導の開発方針と動燃の対応／先導機の開発／
高度化機と先導機／
新型機開発基本方針固まる／
ウランの濃縮技術開発センターが始動／新型機開発／
小規模から開始した商業プラント／

あとがき 44



バージニア大学の W.J.Beams は 1934 年世界で初めて遠心分離法で同位体の分離に成功した。図は、第二次大戦中の 1944 年に京都大学の清水栄が、ノートに貼り付けて読み込んだ 1939 年の Beams の論文*中に掲載されている遠心分離機の断面図である。

(* J.W.Beams,et al.,Physical Review , 56,266 (1939))

このころ、多くの著名な学者が遠心分離法による同位体分離を試みたが全て失敗している。大気圧中で高速回転させていたため、せっかく分離しても回転胴が空気との摩擦により高温となり、回転胴内が熱対流で混合してしまうためであるが、Beams は、回転胴を容器内に入れ真空中で高速回転させることでこの問題を解決した。

序章 ウラン濃縮の夜明け

はじめに

日本のウラン濃縮遠心分離法（遠心法）が初めてウラン濃縮試験に成功して実用化に向け走り出した一九六九年当時は、既にドイツなどヨーロッパの遠心法開発国はアメリカの要請で遠心法技術を非公開としていたため、技術先進国からの情報は入手できず、自ら技術開発を実施せざるを得ない状況にあった（第一章参照）。また、原子力委員会から原子力特定総合研究の指定を受けたウラン濃縮技術開発は、「技術先進国からの技術導入に頼ることなく、自主技術開発に取り組んで原子力産業の自主性を確保すること」を期待されたので、自主技術開発に取り組みやすい環境のもとで開発が進められた。

目標が達成された。さらに、その後もより高性能遠心機へのリプレースが実施されている。そのため開発初期から事業化までの歴史の編纂が望まれるが、核不拡散上の配慮から公開情報はとぎれとぎれで、連続した歴史とはなっていない。

そこで今回、公開情報を補充しつつ事業化までを連続した開発史として仕上げることに取り組んだ。機微技術の内容に踏み込むことはできないが、公開されている開発の背景や意義、さらに開発を支えた人たちのエピソードなども交えて紹介する。

ガス拡散法で夜が明けた

日本のウラン濃縮

全学共闘会議（全共闘）による東京大学の安田講堂占拠に引き続き、私が通っていた東京工業大学（東工大）も封鎖されたため修士課程の卒業研究審査は学外で行われ無事合格し、その内容を一九六九年三月三十一日の東海大学での原子力学会に発表した。発表会

場は、当日の朝、急ぎよ大きな会議室に変更になり、満員状態だった（写真序1）。自分の熱拡散塔による同位体の分離に関する口頭発表が終わり、質問・コメントを待ったが会場は静まり返り、場違いな感じを受けつつ降壇すると、カメラマンなど報道関係者が演台めがけて駆け込んできた。

次の発表は、理化学研究所（理研）によるウラン濃縮ガス拡散法に関する



写真序 筆者の原子力学会口頭発表。この直後にこの会場で理研による日本最初のウラン濃縮成功の発表があった。

るもので、試作した隔膜により日本ではじめてのウラン濃縮に成功したというものであった。朝日新聞が原子力学会の要旨集を見て当日の朝刊一面トップに「濃縮ウランの国産へ…独自の基礎実験に成功」というスクープ記事を掲載したため、報道関係者が理研の発表会場に押し寄せるといふ大騒ぎになった。

ガス拡散法は、隔膜の微細な穴を六フッ化ウランガスが通過する際に気体の通過速度が質量により異なることを利用してウランを濃縮するもので、隔膜の試作は住友電気工業が担当し種々の材料で試作をした。そのなかで主に実施したアルミナ粉末の焼結隔膜を用い理研でウラン濃縮試験を実施したところ、いきなり七〇・六％の高い分離効率を得られた。二年程度の開発でウラン濃縮に成功したのが信じられず確認試験を数回繰り返したとのことである。

理研の発表が終わると、報道関係者は、座長の垣花東工大教授の指示

に従わず直接発表者に様々な質問を投げかけ、後で議論を呼んだ「商業秘密で詳細内容は説明できない」などの回答もあったが、朝陽がガス拡散ウラン濃縮法を明るく照らし出した一幕であった。

遠心法開発 43 年間の幕開け

東工大の高島洋一教授は、遠心法ウラン濃縮を含む同位体の分離を大きな研究テーマとし、この後、日本の遠心法ウラン濃縮の開発に大きな影響を及ぼしている。私もこの研究室に所属し、熱拡散法に関する研究をしていたが、隣の部屋ではアルゴンなどを用いた遠心法による同位体分離試験が行われていた。

就職の時期になり、動燃の東海事業所の遠心法の実験室を見学させて頂いた。美しい松林の中にこぢんまりとしたE棟という試験施設があり、鉄のかたまりのような試験機が二台あった。日本で最初のウラン濃縮研究用遠心分離機（遠心機）の理研1号機と2号機だった。責任者の方から懇切丁寧に説明していただいたが、あまりにも研究が進んでいないように感じ、自分

でも何か大きな貢献ができるのではという気になって、その場で遠心法開発に飛び込むことを決めた。

動燃は、原子燃料公社（原燃公社）を吸収合併して一九六七年一〇月に発足したが、筆者は動燃が最初に採用した一期生に当たり、遠心法ウラン濃縮開発部門に配属された。以降、連続して四三年間遠心法ウラン濃縮技術開発と実用化に携わる幕開けであった。

ピンチヒッター 小型機の健闘

東海事業所で遠心法によるウラン濃縮試験に参加することとなった。

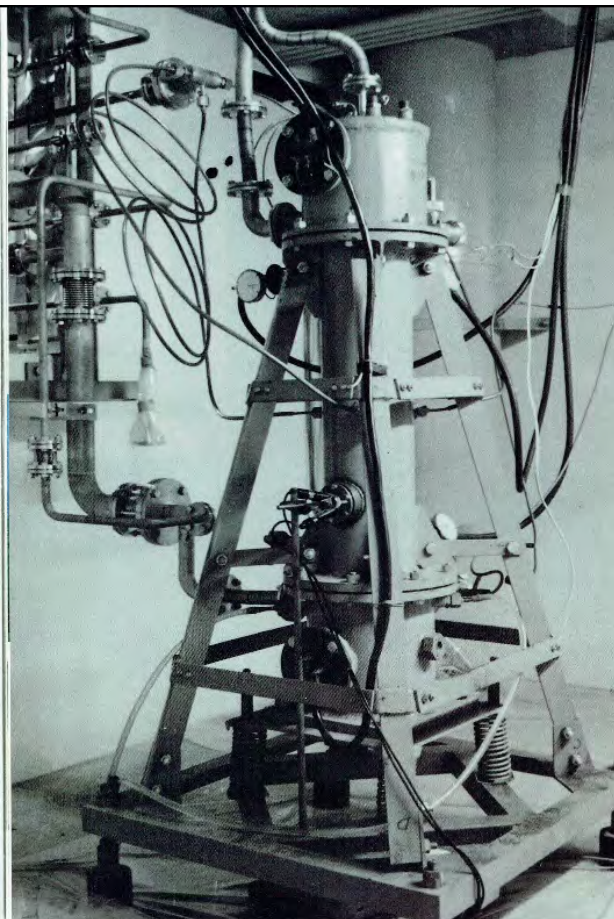
試験は、ウラン濃縮試験用に新築された建屋（F棟）で実施されたが、既に濃縮試験ができる環境は整っていた。遠心機は、東工大において試験をしていたもので、人の身長並みに小型だったので小型機と呼ばれた（写真序2）。試験の責任者は玉井浄副主任研究員で、現場の実質的指導者は、東工大高島研究室で研究生として遠心法の分離試験を実施していた東京芝浦電気（東芝）の齋藤健彌氏だった。

ウラン濃縮試験は、天然ウラン中に〇・七重量%しか存在しないウランを濃縮するもので、ウラン原子に六つのフッ素原子がついた六フッ化ウランの気体を用いるが、反応性が高く、常温では気体だが温度を下げると固体となり、温度・圧力を高めると液体となる不思議な物質で、取扱いには苦労させられた。

小型機はウラン濃縮試験用に作られていなかったため、六フッ化ウランに耐えられように内部をエポキシ樹脂でコーティングされた。日本の遠心

機として初めてウラン濃縮試験用に設計された3号機が、このF棟に据え付けられる予定だったが、東芝での製作の最終段階で手間取り、納入が遅れているうちに理研による濃縮試験成功の発表があった。

もともと東工大の試験は、原燃公社の委託で実施されており、そこで使用されていた小型機を急ぎよ活用する試験計画が就任直後の中村康治本部長の主導で進められ、ウラン濃縮試験が実施された。



写真序2:日本で最初にウラン濃縮に成功した小型機(動燃20年写真集より)

理研が日本で最初のウラン濃縮の成功を発表してから二か月後の一九六九年五月二十九日に実施したウラン濃縮試験でウラン²³⁵が一・〇一五倍に濃縮されたことが確認された。翌日、動燃は、日本で最初の遠心法ウラン濃縮に成功した旨報道発表し、ガス拡散法につぐ朗報(朝日新聞)など各紙とも大きく取り上げた。遠心法及びガス拡散法の何れも一回の濃縮の倍率は小さく、これを何回も繰り返して原子炉燃料のウラン²³⁵の濃度四%程度を生産するが、今回の小型機の濃縮倍率は、ガス拡散法の目標繰り返し数八六〇回(カスケードの必要段数)を七分の一以下に減少できるというもので、最初の分離試験としては大きな成果であった。

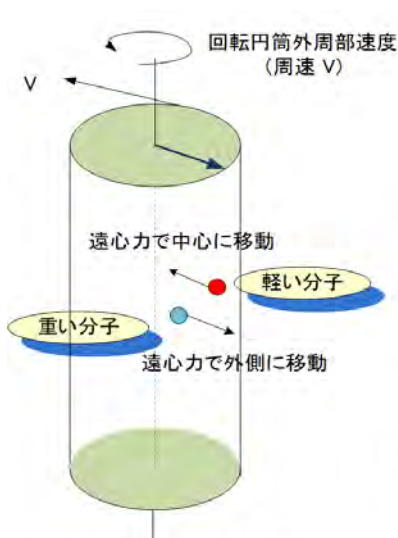
しかし、ウラン濃縮試験は簡単ではなかった。遠心機に六フッ化ウランを流通すると、六フッ化ウランが途中で固体になったり、回転胴の温度が上昇したりする想定外のことがあった。特に回転胴温度が上昇すると熱膨張で回転胴が伸びるので、回転胴の上部で回転軸受けが静止軸受けに接触して破損しないよう計算しながら調整する

などは大変神経をつかった。齋藤健爾氏は、東芝で六フッ化ウランを酸化ウランに転換する開発の経験があり、六フッ化ウランの取り扱い扱いに精通していた。また、東工大でアルゴンガスや六フッ化硫黄ガスでの試験を積み重ねていたため、二か月間程度でウラン濃縮の成功に自信を持ち、当然の結果が得られたと淡々とした受け止め方であった。

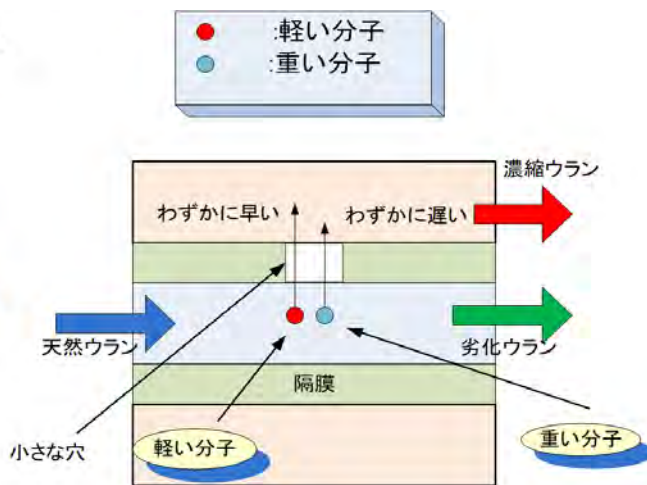
原子力委員会は、ガス拡散法及び遠心法のウラン濃縮成功を受け、原子力特定総合研究として本格的にウラン濃縮の国産化に向け開発に取り組む方針を打ち出し、ドイツなど海外に遅れて開発した日本のウラン濃縮技術開発が実用化に向けて走り出した。

コラム序-1：ウラン濃縮 遠心分離法とガス拡散法

- (a) 遠心分離法：遠心力により重い分子は回転円筒の外側に、軽い分子は内側に移動することで軽い分子が円筒中心部に濃縮される。これによるウラン濃縮の度合いは回転周速(V)に依存し、開発初期の周速 200m/秒で 1.02 , 300m/秒で 1.05 となる。
- (b) ガス拡散法：隔膜の小さな穴を通過する際、軽い分子は重い分子よりわずかに早く通過する。これによるウラン濃縮の度合いは、分子量の比に依存し最大 1.004 となる。



(a) 遠心分離法の原理



(b) ガス拡散法の原理

第一章 マンハッタン計画における遠心法

第一節 遠心法の始まりとマンハッタン計画

ウラン濃縮遠心法の歴史は、一九一九年に同位体分離の可能性が示され、一九三四年に米バージニア大学のジョッセ・ビームスによる初めての塩素同位体分離に遡る。その後、一九三八年にウランの核分裂反応が発見されると、ビームスなどはウランの同位体分離に興味を示したが分離試験までには至っていない。

イギリス在住のドイツ人ラルフ・パイエルスとオーストリア人オットー・フリッシュは、ヒットラーに先行されるのを恐れて原子爆弾（原爆）の研究を始め、一九四〇年に比較的少量のウランで原爆製造が可能であることを示した。イギリスではこれを検討するモード委員会が設立され、翌年七月にアメリカに原爆の製造可能性が伝えられた。翌八月には米科学研究開発局

（OSRD）が、ウラン濃縮工場に適應できる濃縮法の調査研究を開始した。主力の遠心法は、一二月にはコロンビア大学による短い回転胴の開発が完了して、スタンダードオイル開発（ST社）によるパイロットプラントの建設が開始された。

並行してビームスの概念の長い回転胴の高性能遠心機の製造がウエスチングハウス（WH社）により進められた。一九四一年九月には原爆製造計画・マンハッタン計画が始動し、調査研究は継続された。その後、WH社の回転試験失敗により遠心法はマンハッタン計画から外されたとされているが、ビームスらにより戦後作成された八年後に機密解除された資料などを見直すと、外された状況はそれほど単純なものではなかった。

物理学者の後世への遺産

パイエルスらは、原爆製造にはウラン同位体分離が必須と考え、遠心法による同位体分離に関心を持っていたイギリスのノーベル物理学者ポール・ディラックに相談した。ディラックはこれに応え、一九四一年に同位体分離に関する極めて独創的な二つの内容を含む資料を作成しパイエルスに送った。一つは、新たに考案した濃度だけに依存する価値関数を用いて同位体の分離仕事量を算定してSWUという単位で示す方法である。もう一つは遠心機の理論上の最大分離仕事量を価値関数を用いて導き出したもので、これらは現在でも重要な評価式として利用されている。パイエルスと助手のクラウス・フックスは、これらを取りまとめ

ディラックはこれに応え、一九四一年に同位体分離に関する極めて独創的な二つの内容を含む資料を作成しパイエルスに送った。一つは、新たに考案した濃度だけに依存する価値関数を用いて同位体の分離仕事量を算定してSWUという単位で示す方法である。もう一つは遠心機の理論上の最大分離仕事量を価値関数を用いて導き出したもので、これらは現在でも重要な評価式として利用されている。パイエルスと助手のクラウス・フックスは、これらを取りまとめ

モード委員会に提出し、委員会はこちらをマンハッタン計画に提供した。アメリカの物理化学者カール・コーエンはこれを実用的に使いこなし発展させて、後に「ウラン濃縮プラントのための同位体分離理論」という名著（図1.1）を取りまとめている。

コーエンは重水素の発見でノーベル化学賞を受賞したハロルド・ユリー（コロンビア大学教授）のもとで遠心法の研究を行っていたが、マンハッ

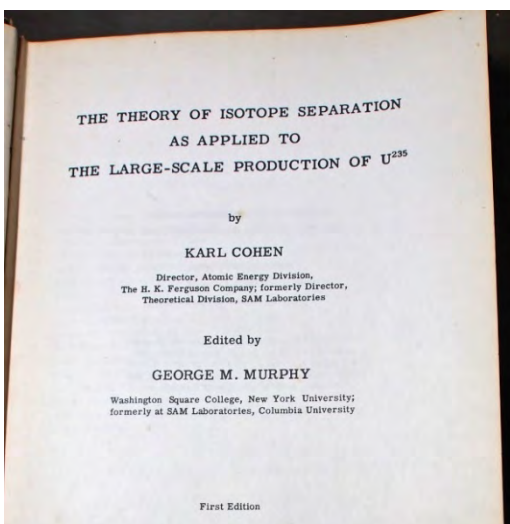


図 1.1 住宅街の小さな古本屋で見つけたコーエン名著の貴重な初版本(1951年版)

タン計画が開始され、ユーリーをリーダーとするコロンビア大学グループが結成されると、その有力メンバーとして優れたエンジニアリング能力を発揮した。なお、フックスはマンハッタン計画に貢献しソ連のスパイとしても働いて、後にイギリスで服役している。

マンハッタン計画の遠心法

遠心法は、一九四二年一月に①ウラン濃縮性能試験をバージニア大学②遠心機の量産技術をWH社③パイロットプラントの建設・運転をST社が担当する体制を整えた。ビームスは、二月には水素と二酸化炭素の混合ガスをを用いてウラン試験条件の設定試験を開始したが良い結果は得られなかった。コーエンは、拡散法工場の設計のため、水素と二酸化炭素を用いて世界で初めて隔膜による分離に成功し、その結果をディラックの価値関数を用い評価し、遠心法と同等の規模で工場建設が可能との結果を得たため拡散法の可能性が浮上した。

ユーリーは、回転胴の流動条件の一つである向流型遠心機を考案してい

るが、ビームスは並流型遠心機で試験を行っていたので、分離性能及び遠心機構造上も有利な向流型に切り替えるよう指示し、五月に試験を実施することとなった。(写真1.1)この頃ユーリーらは、プロジェクトの技術的とりまとめ役のジェームス・コナントから原爆製造計画の作成を求められ、遠心法に重点をおきつつ、拡散法、電磁分離法も並行して開発を行い、一九四四年七月には数発の原爆の製造を可能とする計画案を提示した。このため五月後半に実施する向流型遠心機試験結果が注目されることとなり、並流型とほぼ同じ条件で試験が実施されたが、回転周速が異なっていたので、ここでもコーエンは価値関数と遠心機の最大分離仕事量を計算して比較評価し、向流型が優れているとの結果を得たものの、分離効率は三六%だったため、関係者を失望させた。

しかし、この試験にはユーリーが考案した製品の一部を回転胴に戻す還流が採り入れられていなかったため、ユーリーはこれから実施する還流式向流型試験では高い分離性能が得られプラントも簡素になると主張したが

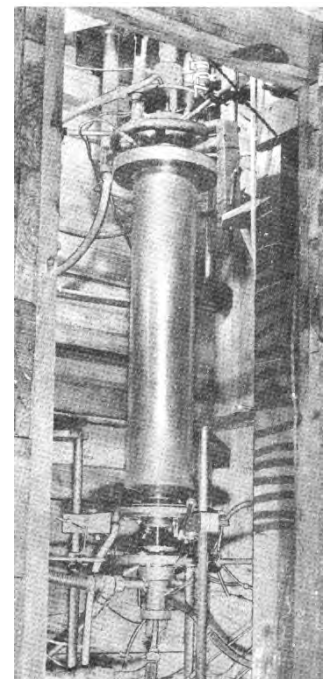


写真 1.1 マンハッタン計画でビームスが最初に試験した小型遠心機(TID-5230)

こととり、パイロットプラントも遠心機を二四台から一台に削減された。

受け入れられず、パイロットプラント計画は一時停止となった。さらに、コナントからOSRD議長に「まだ、どの濃縮法が優れているかを言える状況ではないが、遠心法は明らかに一番劣る」と伝えられた。

マンハッタン計画の責任者として着任してまもないレスリー・グロブスは、濃縮法を比較評価し、資金を集中投入して開発を加速するとして、①拡散法はフルスケールのプラントを建設する②電磁分離法は、将来フルスケールに拡張できるような小規模プラントを建設する、との計画を一月一〇日に決定した。九月からの還流式向流型遠心機による濃縮試験で、ユーリーの主張通り七五〜八五%の高い分離効率が得られたが、これらは考慮されることなく、細々と開発を進める

その後、

WH社は、コロンビア大学による短い回転胴の遠心機を製作し、回転試験も順調でST社が実施するパイロットプラントに供給された。バージニア大学による長い回転胴は、共振現象を引き起こす危険速度を二回超えるもので、現在でも極めて困難な技術である。一九四三年一二月の回転試験で回転胴の一次共振点は無事通過し、二次共振点近くで振動が大きくなったが、軸に取りつけた振動緩衝装置の状態を変えつつ回転数を上げていくと、突然振動が小さくなり回転が安定して二次共振点を通じた。定格の八〇%の回転数で一時間維持していたところ振動に変化が出たので降速を開始したが、二次の共振点で振動が大きくなり静止体と接触して、回転胴は上下に二つに割け、軸は曲がっていた。

ST社は、一台の遠心機でパイロットプラント試験を実施し、七〇〜八〇%の分離効率を得て、連続ウラン流通試験も順調に進んだが、六九日目に回転胴からケーシング内に六フッ化ウランが漏れ出し停止した。分解調査の結果、回転胴下部のナットの不具合と解明した。グローブスはこの遠心機停止の四日前に遠心法開発を完全に終了する結論を出しており、一九四四年一月三十一日をもって遠心法の開発は終結した。

隔膜開発に手間取った

ガス拡散法

拡散法はフルスケールプラントの建設を進めたが、肝心の隔膜の開発は難航し、一九四四年春にやっと隔膜の製造が開始された。また、電磁分離法も深刻な運転上の問題を抱えていたので、ユーリーは、海軍研究所の液体熱拡散法に期待し、急ぎよオークリッジで開発を進め一九四四年後半にはその製品を電磁分離法に供給するまでに至った。一九四五年三月に拡散工場で最初の濃縮ウランが生産されたが、五月八日ドイツが降伏して、原爆

はヨーロッパでは使用されなかった。その後、大部分が電磁分離法で濃縮されたウランが広島で、長崎ではプルトニウムが使用された。

聞き入れられなかった

コーエンの抗議

遠心法がマンハッタン計画から外された際、コーエンは、遠心法と銃式核爆弾により拡散法より一年早く原爆は完成するとグローブスに再考を迫ったが、受け入れられなかった。

マンハッタン計画で水素爆弾の開発を行ったエドワード・テラーは、原爆を一年早く完成させるには、拡散法に代えてコロンビア大学の遠心機を使うのが最も早く経済的で、さらに、コーエンの銃式原爆が完成していたら、数百万人のユダヤ人の命が助かったはずだ、と述べている。

コーエンは、拡散工場の見通しがつき遠心法の開発が終結すると、コロンビア大学を去った。なお、アメリカの遠心法は、戦後、ここでの開発とは異なる進展を見せ、後に日本の開発に影響を与えることとなる。

第二節 遠心法情報管理の始まり

第二次世界大戦中、遠心法でウラン濃縮に成功したドイツのウィルヘルム・グロートは、終戦後米英仏の共同占領統治下で、ブラジルに遠心機を輸出しようとして、アメリカに情報管理の必要性を認識させることとなり、結果として当時の遠心法開発国は機微技術管理を導入することとなった。

以下に、情報管理導入の経緯とその背景要因であるドイツの技術進展状況を世界大戦に遡って歴訪する。日本の最初の遠心機はグロートの図面から製作しており、そのルーツ探訪ともなった。

世界大戦中のドイツの

遠心法開発

核分裂反応発見の翌年一九三九年、ハンブルグ大学の物理化学者ポール・ハーテックと助手のグロートは、核爆弾が実現可能との書簡を軍に送っていたが、その後すぐに世界大戦が始まってドイツの原爆製造計画がスタートした。

ハーテックは重水の製造及びウラン濃縮などで重要な役割を果たし、グロートは一九四二年に遠心法でウラン濃縮に成功した。また、ハーテックにより二対の並列遠心機試験が実施され、さらに一〇対の遠心機製作を開始したが、終戦で完成しなかった。終戦を目前にして米英仏は、原爆製造技術にかかわったドイツ科学者の確保と製造技術の把握を目的としたアルソスと称した作戦を開始した。責任者は高い科学的知見が必要とされることから、電子スピンを発見したオランダ人でアメリカに移住したサミュエル・ゴーズミットが当たった。

一九四五年四月アルソスは、ドイツ遠心法拠点の最後の移転先をハンブルク南一二〇キロメートルの町近くを探し出し、空中戦と爆撃の後、戦車隊が出動し、ゴーズミットは開発員の尋問と開発装置の検分を行った。開発の責任者は、かつて学生時代のルームメイトのグロートで、お互い懐かしく、敵味方の関係を忘れない気持ちだった。

たという。遠心機試験装置は小規模で、天然ウランより少しだけ濃縮されたウランを生産していた。

ドイツは、グラフアイトで囲まれた重水中に煉瓦形状の天然ウランブロックを吊り下げて臨界にする原子炉を開発していた。希少な重水の使用量削減のため、少し濃縮したウランブロックの原料を供給することがここで役割だった。ウラン²³⁵の高濃縮はできないと考えていたが、それにしてもこの程度の遠心機では一〇〇年かかるかとゴーズミットは酷評している。

戦後西独における遠心法

戦後まもなくしてグロートらはボン大学で開発を開始し、ZG3などのコード名の遠心機を開発した(表1)。回転軸からガスの供給・抜出するのはマンハッタン計画で頓挫したピームスの遠心機と同じだが、軸受けの数が大幅に削減され、シールも少なく簡素な構造となっている。このため、グロートが発表した情報を当時の米原子力委員会(AEC)が編集・作成した会議資料では、消費動力はガス拡散

表1.1：西独の遠心機性能履歴(1960/4/11米国AECがGrothデータ調査・作成)

型式	時期* (年)	回転胴				分離性能 (kgsu/yr)	動力 (kwhr) kgsu/yrあたり	建設費 (\$) \$あたり
		長さ(ℓ)	半径(r)	比(ℓ/2r)	周速			
		(cm)	(cm)	(-)	(m/s)			
UZ1	1942	40	6.0	3.33	302	0.502	12,050	4,200
UZ3B	1952	63.5	6.7	4.74	302	0.935	8,380	2,860
ZG3	1957	66.5	9.25	3.60	302	0.97	6,300	2,460
ZG5	1959	113.0	9.25	6.11	302	1.64	3,710	1,460
ZG6		240.0	20.0	6.0	302	3.5	1,750	685
					340	5.32	1,150	450
ZG7	1960	316.0	22.5	7.03	302	4.77	1,283	500
					340	7.25	845	330
米国ガス拡散							9,000	574

*:Groth(グロート)原文にこの項なくAEC付加と想定。UZ1:Groth論文に合わせ修正

法の七分の一に、コストも低減することが示されている(表1.1)。回転胴内は熱対流で循環流を起こして分離する型式で、熱の与え方で最適な循環流量を設定できる。そのため、供給・拔出量とは独立して最適化を図れる

ことがピームス型と異なり、小型でも、ピームスの遠心機より進化している。
**ブラジルへの
遠心機売却問題**

一九五四年六月七日、在ブラジリアメリカ大使館から国務省に「ブラジルが、秘密裏にウラン濃縮遠心法の技術習得のため西ドイツのボン大学に技術者三名を派遣した」とのトップシークレットの連絡が入った。同月二三日には、占領下の西ドイツ高等弁務官コナントからアメリカ国務長官宛て「西ドイツの企業から同位体分離研究用としてブラジルに三台の遠心機の輸出許可申請が提出された。占領下規則では、二四時間でウラン²³⁵が一ガッダを超えて生産できる機器の製作は禁止されているが、今回の遠心機は一マイクロワ程度ではないかとの意見もある」との連絡が入った。因みに、コナントはマンハッタン計画において遠心法の早期終結で主要な役割を果たした科学者である。

翌月、ブラジル海軍大将アルベルトが、グロートとともにコナントを訪ね、産業用原子炉燃料の製作が目的であ

り原爆は作らないので共同占領軍保障委員会(MSB)の了解を得たいと協力を求めてきた。AECは規制を超えるので輸出禁止との意見であったが、同年一〇月にはパリ協定が締結され、一年後に西ドイツの主権が回復する見通しだったため、西ドイツ政府に任せてはという腰の定まらない議論もあったが、最終的には、MSBとして輸出は許可しないとの結論が示された。

ブラジルはマンハッタン計画にウラン鉱石を供給していたことから、早期に独自の原子力計画を作成しており、アルベルトはその牽引役を果たしていた。またこの時の軍事政権大統領は原爆の製造も計画しており、西ドイツの遠心機輸出問題の最中に自殺し、次の大統領はアメリカのアトムス・フオア・ピースの良き理解者で、アルベルトも失脚してこの問題も落ち着いたかに見えた。しかし、西ドイツは四年後の一九五八年ブラジルへZG3遠心機三台を輸出し、ボン大学グロート研究室でブラジル人に運転訓練をしたことが一九六〇年の情報管理の議論の最中に公となった。

この件に関するハーター米国務長官の問い合わせに対し、西ドイツ政府は、売却した遠心機はウランを濃縮できるようなものではなく、今後は行政システムとして非NATO国には輸出できないと苦しい回答がなされた。なお、ここに引用した主な情報は、NPOのアメリカ国家安全保障アーカイブ（NSA）が、膨大な機密資料を開示請求して入手し分析したものに基いている。

遠心法技術の

情報管理協定交渉

グロートのブラジルへの遠心機輸出とその技術進展状況は、アメリカに核拡散の恐れを気付かせ、さらに、比較的低コストで原爆を製造できる国は二〇か国に上るというユニオンカーバイドの調査情報は危機感を増大させた。一九六〇年六月ハーター国務長官とAECマクコーン委員長は、西ドイツのほか遠心法を開発しているオランダ・イギリスにも協力を求め遠心法技術の情報管理を実施することと決定した。翌七月には国務省のサリバン専門官が各国を回って調整を行

った。イギリスは既に機密管理を実施しており、オランダは機密管理の準備を始めていて関連企業も了解する見込みであった。西ドイツ政府も了解するとしていたが、欧州原子力共同体（ユーラトム）の情報管理と整合が取れるかを心配していた。これらの情報を受けアメリカは三国に情報管理の基準案を提示した。

このような状況のなか、グロートがアメリカ国務省を訪問し、情報管理は技術進歩の妨げになるとの意見を述べたため、西ドイツ政府の真意が問われたが、在西ドイツ米国大使館からは反対しているのは技術者のみで西ドイツ政府は情報管理を正式に決定しているとの連絡が入った。西ドイツは一九六〇年一月一三日に遠心法技術の情報管理と貿易管理を実施することを正式に決定し、同日プレスへの説明を行った。その概要は、アメリカの提案があり遠心機の機密保持を決定した。違反は刑罰の対象となり、特許の機密保持はユーラトムの条例違反とはならないというものであった。この処置は西ドイツ国内法の制改定であり、アメリカとは紳士協定といわ

れるもので、正式協定は存在しない。オランダは手続きが遅れ、翌年初頭に正式決定した。（図 1.2）

ブラジルのその後

紆余曲折の後、ブラジルの原子力技術は、一九八九年にIAEAの保障措置プログラムに全てが含まれることとなった。ウラン濃縮遠心法に関しては、第七番目のカスケードが二〇一八年に運開している。

第三節 ソ連の戦争捕虜が創った新概念遠心機

ナチスドイツの降伏を目前にして一九四五年四月にベルリンが陥落した。シーメンズの工場長で物理学者でもあるマックス・ステインベックは、捕虜としてソ連に連行された。また、オーストリア人科学者ゲルノット・ジッペは、ウィーン大学のラジウム研究所で博士号を取得してまもなく徴兵され、リーダーと飛行機の研究をしていてソ連軍に拘束された。その後、この二人はソ連のウラン濃縮の課題を

Mr. Opfersmann of the German Embassy received a cable this afternoon outlining the main points of the press conference in Bonn on the ultra-centrifuge process. They were as follows:

1. Germany will adhere to its undertakings under the Brussels Agreement.
2. The action was taken as a result of American suggestions.
3. State secrecy is being imposed.
4. Action was also taken since knowledge of this development might make it easier for other countries to make weapons.
5. This action was not contrary to Germany's undertakings under the Euratom Treaty, since the Treaty permits classification of patents for defense purposes. Classification is not proposed against other members of the Community. The telegram then referred to Article 25 of the Euratom Treaty.
6. It is not yet clear from the experiments made thus far whether the process will be economic.

図 1.2 西ドイツ政府が遠心法情報管理を開始する旨プレスレクし、その内容を在ドイツ米大使館が国務省に電信した。（1960.10.13 公開制限なし）

一挙に解決する革新的な遠心機を創り上げ、後に、ソ連のみならず、世界のウラン濃縮事業に大きな影響を与えた。ソ連から帰還したジッペがアメリカでソ連の遠心機を再現し、報告書を作成しているが、当時の開発プロセスについて当事者たちは、多くを語っていない。一方、ジッペからの情報によるアメリカ中央情報局（CIA）資料が、作成から二三年後に詳細な情報が

公開された。その後のロシア、アメリカ、ドイツからの報告も参考に、開発手法としても示唆に富んだ新概念遠心機の開発経緯とその波紋を紹介する。

ドイツ科学者たちの ウラン濃縮研究所

ベルリンで私設研究所を設立し活動していたドイツの発明王マンフレート・フォン・アルデンヌは、ベルリン陥落に備え、ノーベル賞物理学者でシーメンスの研究所長のグスタフ・ヘルツ、フンボルト大学の物理化学研究所長のアドルフ・ティーセンらと、ソ連から原子力研究開発の協力要請があった場合は、共同歩調をとるという協定を結んだ。しかし、ベルリン陥落から二日後、共産社会に共感していたティーセンに案内されたソ連軍が、アルデンヌの研究所に現れ、協定を結んだ科学者たちを連行した。翌五月末、彼らはソ連で研究するためモスクワに送られたが、二年程度で帰還できると考えており、戦勝パレード後、奥様方はポリシヨイバレエ鑑賞に招待されるなど観光気分であった。アルデン

ヌは、三か所の研究所の候補地から気候の良い黒海沿岸を選定した。

しかし、八月、広島・長崎への原爆投下の話が伝わると、ソ連の最高指導者ヨシフ・スターリンは狼狽し、これまでの平穩な雰囲気は一変して原爆製造に向け即座の行動を要求した。

スターリンの側近で原爆製造の責任者であったラベリンチ・ベリア内務人民委員部(NKVD)長官は、アルデンヌを呼び、原爆製造技術の開発を要請した。アルデンヌは、原爆製造に直接かかわると故国に帰れなくなるを考え、自分は大変難しいウラン濃縮技術を開発するので、原爆製造はソ連で実施されたいと提案して了承された。アルデンヌらは、家族ともども、黒海沿岸の保養地スフミに向かい、ウラン濃縮の研究を開始した。

ステイーンベックと

ジッペの参画

ステイーンベックは、ポーランドの集合施設に政治囚扱いで労働させられ厳しい状況にあった。ベータトロンの発明などの経歴をソ連当局に提出したが、その技術内容が理解されず、

自らの論文名を示して、その存在が認められた。

有能な物理学者として活用されることとなったが、胃潰瘍が原因で極度の栄養失調だったため、一九四五年九月に電磁分離法によるウラン濃縮を研究していたアルジモビッチが迎えに来て、モスクワで治療を受けた。

一月には回復してスフミの研究所に合流し、アルジモビッチの電磁分離法のほか、ノズル分離法など新たな研究を開始した。遠心法は、誰も実施していないのでステイーンベックの担当となった。

それから約半年後の一九四六年六月にステイーンベック・グループが結成された。アルデンヌがベリアから渡されたドイツ科学者の捕虜名簿の中から原子力の専門家としてジッペが選ばれ、電気技術者ルドルフ・シッフエルも参加した。この頃、ステイーンベックの家族もスフミに転居した。

ビームス遠心機の徹底分析

ステイーンベックは、一年かけてアメリカのビームス遠心機の公開情報を徹底分析してその問題を洗い出

し、一九四六年末にジッペとともに、革新的な遠心機の開発方針を取りまとめた。ビームスの遠心機は、回転胴を上下の軸受で強固に把持して振動を抑え込む方式で、軸受け部の動力損失が大きい。そのためモーターも大きく重くなっていた。このモーターで回転体を吊り下げて回転させていたので、全体的に頭でっかちで振動制御が難しかった。

これに対しステイーンベックらは、緩やかに上下の軸受けで回転胴を支持して、回転体に少しアンバランスがあっても、軸がしなり回りやすい位置で回転させる方式を考案した。これを実現するため、回転胴を支える下部の軸を針のように細くし先端を丸くして静止している受け皿で支え、上部軸も細くしなやかなものとした。

モーターは回転胴の下部に取り付け、これにより上部が軽くなり、上部軸を細くでき軸受も小さくすることができた。動力損失もモーター出力も小さくなって、回転胴下部への取り付けも容易となった。これにより重心の低い回転胴が実現し、コマのように自分の回りやすい位置で安定して回転

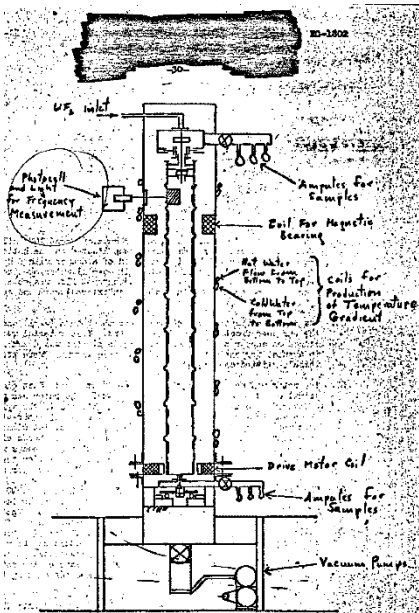


図 1.3 スティーンベックのスーパークリティカル機(3m 回転胴) ソ連から帰還したジッペへの CIA 尋問調査書 から引用した。この調査書は、1957/5/22 に配布され、ジッペ生存中の 1979/10/8 開示制限解除されている。

できる構造として仕上がった。一九四六年末には、厚板ゴムの回転体にモーターを取り付け、回転数を変えて回転試験を実施した。

長さ一〇呎回転胴機の提案

スティーンベックは、引き続き回転胴内の分離流動解析を実施した。回転胴内を熱対流で循環させて、回転胴の上下でウラン同位体を分離する方法で、濃縮度を高めることを目標としていた。マンハッタン計画では、流れを外部ポンプで循環させて分離効率を飛躍的に向上させたが、スティーンベックは、解析により、熱の与え方を工夫することで外部ポンプ無しで内部循環させる流動機構とした。

また、回転胴内のガスは、遠心力で回転胴の外側に押し付けられるため、周速二〇〇呎/秒でも、回転胴の中心部の圧力は外壁部の二〇分の一に低下するため、回転胴の回転軸を通して中心部からガスを抜くと、次の遠心機に供給するために高価な圧縮機が必要となる。そこで、回転胴の長さをできるだけ長くして濃縮度を高め、カスケードでの濃縮の繰り返し数を低減して圧縮機の数減らすこととした。分離流動解析から、最大の分離効率を得られるのが一〇呎なので、これを目標とすることをソ連に提案し了承された。

マンハッタン計画では、危険速度を二回超えるスーパークリティカル機で苦労して失敗した。一〇呎機は、危険速度を三〇回程度超える必要があるが、スティーンベックは回転胴を多数の短

円筒に切断し、これらを軸方向に曲がりやすいベローで接続して、低い回転数で危険速度を超える回転胴を発明した。図 1.3 はこの考え方に基づき開発に成功した三呎回転胴機で、CIA 資料から引用した。

ロータダイナミクスと濃縮試験

一九四七年初頭、スティーンベックはアルジモビッチの電磁分離法の支援でモスクワに向かった。残されたジッペは、この案を実現できるよう最善を尽くし、直径五八ガ呎、長さ九〇ガ呎の危険速度を超えるベロー付き回転胴で三〇〇呎/秒を達成した。翌一九四八年三月一日にスティーンベックがモスクワから帰り、四月一日までに濃縮試験に成功しないと遠心法開発は終わると告げた。

ジッペは自分なりに製作していた簡易型の遠心機で濃縮試験を実施し、三月二一日に、一・〇八倍の濃縮度を得て危機を乗り越えた。ただ、CIA 資料によると、この一年間、解析と照合しながら濃縮試験が実施されており、予定通りの開発だったと

も言える。

濃縮試験は長さ三〇〜四〇ガ呎、直径は最外径が六〇ガ呎、周速二〇〇呎/秒で実施された。最初の六月は、濃縮できたりできなかったりと安定した結果が得られなかった。ソ連は、本当に濃縮ができるかを疑っていたが、スティーンベックは、突然基本的な間違いを発見し、回転胴の温度分布の与え方を変え、全ての試験で予想した結果がでるようになった。

スーパークリティカル機

スティーンベックは、一〇呎回転胴機に向け、九つの危険速度を有する回転胴長さ三呎のスーパークリティカル機から取り組んだ。この回転胴を一個に輪切りにし、これらを軸方向に曲がりやすい九個のベローで接続して低い回転数で共振点を超える構造とした(図 1.3)

このような時に、スティーンベックは、アルジモビッチから、ガス拡散法が、ウラン濃縮度九〇%を達成できない問題に直面していることを聞いた。早速、ベリアにガス拡散法プラントの

上段に遠心法のカスケードをつなぎ九〇%の濃縮ウランを生産する方法を提案するとともに、家族を故国に帰すことも要求した。この提案はしばらく取り上げられなかったが、再度の提案で受け入れられ、一九五〇年に契約書が取り交わされた。これによると、四〜六段の回転胴の遠心機を一九五二年までに開発し、濃縮工場の濃縮度を五〇%から九〇%までに高める見通しを得ること、その後六か月はソ連に留まること、特許はソ連に帰属し、得られた情報は秘密扱いとすること、月額九〇〇〇ルーブルが支払われること、などであった。ステイーンベックの家族は直ぐに帰還し、ジッペも、同様の契約書に署名した。グループは、一九五二年までに周速二二〇〜二四〇 $\frac{1}{\text{分}}$ ／秒で回転実績千時間以上、分離効率五〇%と大きな成果を挙げた。

ソ連技術者から驚きの提案

ガス拡散工場のあるレニングラードでは、ソ連人による建設グループが設置された。ジッペが試験機器の移送を済ませレニングラードに着くと、三 $\frac{1}{2}$ の遠心機六台が一つの大きな容器

内に設置されていた。これを見て、そのうちの一台が破損すると全遠心機に波及してこの仕事が終わるのではと感じた。このような時に、同僚のソ連人技術者から、回転胴の上部から静止したピトー管を回転胴内の圧力の高い部分に挿入して、高い圧力の製品廃品を直接抜き出す提案があった。このピトー管は、ガスをすくい出すのでスクープと言われたが、これが回転胴に接触しないよう、従来上軸が接合されている回転胴上円盤(端板)部に開口部が必要となった。ここから回転胴内の六フツ化ウランが回転胴外に漏れ出さないよう非接触の分子ポンプシールを取り付け、取り付けられなくなった上部軸に代え、非接触磁気軸受けとすることが提案された。

ジッペは、これこそが最も早く成功する道と確信し、この遠心機の確立に全力を投入して、回転周速を従来の二四〇 $\frac{1}{\text{分}}$ ／秒から三五〇 $\frac{1}{\text{分}}$ ／秒とした危険速度以下で回すサブクリティカル機を開発した。遠心機の性能は周速の四乗と回転胴長さに比例することから、周速を高くしたことで三 $\frac{1}{2}$ の回転胴に匹敵する性能が期待でき、回転

胴の中心は真空状態となるが、スクープで圧力の高いガスを抜き出すので問題とはならなくなった。

プロジェクト移管と帰還

レニングラードの工場責任者は、開発と量産は別ものという強い思いがあり、故国に帰還するステイーンベックらの工場内の情報アクセスを制限し監視した。ステイーンベックは、遠心法プラントの品質に重大な影響を及ぼすので改善を申し入れたが受け入れられなかった。一九五三年五月になって、まず、必要な技術者や科学者を投入して量産遠心機の連続試験を実現した。また、各部品が果たす役割の基礎となる理論と実証方法を示す教科書を作成し、実際の分子ポンプの計算で効率を高める実例なども示した。これにより、講義及び教科書とも高い評価が定着して技術の移転が進んだ。

一九五四年四月にエフゲーニ・カ



写真 1.2：ソ連の小型遠心機。ステイーンベック、ジッペの技術が引き継がれている。(2014AECC 資料)

メノフをリーダーとする商業化開発チームが設立された。彼らは、開発の初期から時々スファミを訪れ情報を持ち帰りモスクワで開発をレビューしていた。ステイーンベックらは、一九五四年九月までに徐々にこのプロジェクトからはずれ、短い回転胴機の成功に立ち会って後キエフに移送された。ここで半導体の研究に従事して、一九五六年七月二六日、一年ぶりにステイーンベックは家族のいる東ドイツに、ジッペはオーストリアに帰還した。ソ連では、一九五八年一月に二四三五台のパイロットプラントが全面運開し、以降もサブクリティカル機で高性能化を図り、世界最大の濃縮工場を運営している(写真1.2)。

第四節 アメリカでのソ連遠心機再現

ドイツ留学中のアメリカ人物理学
者で海軍の情報機関員オスワルド・フ
ランク・シュツペは、帰国間もないジ
ツペと面談した。その報告内容に米原
子力委員会（AEC）が興味を持ち、
シュツペは、ジツペを偽名と偽のパス
ポートでアメリカに伴い、AEC、ピ
ームスの後任のクールサウ及びC I
A職員が尋問し一一九頁に上る報告
書を作成した。アメリカから帰国後、
ジツペは一九五八年六月にシェッフ
エルとともにフランクフルトのデグ
ザ社と契約し、特許権を移譲し、遠心
法の研究開発を開始した。その後、A
ECは、ジツペにバージニア大学でソ
連遠心機の再現を要請し、ジツペは一
九五八年八月から再現試験を開始し
た。この研究は公開で行われ、一九六
〇年六月までの二年弱でソ連での遠
心機を再現して分離効率三〇%を得
た。この時期は、西ドイツと遠心法の
情報管理の議論の最中であつたが、大
きな議論もなく四編の公開論文を作
成した。

一九六〇年四月AECは情報管理



写真 1.3: ユレンコ遠心機カスケード。ソ連から帰還したジツペが参画して開発された。2005 URENCO Annual Report and Account より

を進めることを決定し、公開開発も終
了したため、ジツペはデグザ社に帰社
し、その後ヨーロッパ三国によるユレ
ンコ社の遠心機開発に参画した。ユレ
ンコは、小径・長胴・高周速スパー
クリティカル機を開発し、ウラン濃縮
事業で世界を席卷している（写真 1.3）。

アメリカ遠心機の開発始動

コーエンは、AECからジツペ遠心
の評価を依頼され、そのシンプルさに
感激して、実用規模の開発計画の策定

を提言した。

AECは、

一九六〇年
四月にビー
ムス型の開
発に加え、新
たにジツペ
型遠心機の



写真 1.4: ポーツマスのリードカスケードの大型遠心機
2012年11月ユーゼック公表

カスケード試験などを含め三年間で
六〇〇万ドルの開発計画を決定した。開
発は、ガス拡散工場を運営するユニオ
ンカーバインド・ニュークリア社（UC
NC）に委託した。UCNCは、五か
月で基本設計と遠心機製作に必要な
基礎試験を完結し、引き続き濃縮試験
を実施した。さらに、直径三インチ
（七・六四センチ）回転胴機（三イン
チ機）のカスケード設計を行ったが、五
インチ機は性能が倍となるので、これ
によるカスケードに変更した。しかし、
五インチ機は、定格付近で予期せぬ振
動が発生して三インチ機に戻して建
設を進めた。また、三インチ機も振動
問題が発生したため、まず、二八台中
振動特性の良い一二台でカスケード
試験を実施し、引き続き一九六一年一
二月の二〇台試験でカスケード効率

六五%を八〇%に改善し

た。若い技術者ワタースは、回転試験
の振動モードを詳細に分類して複数
の共振点の存在を見出し、バージニア
大学の振動の専門教授の指導けて、翌
年の一月には三インチ機の振動問題
を解決した。UCNCは、材料開発の
進展に伴う高周速化と合わせて、回転
胴直径が二四インチ（六一センチ）、長さ
十数メートルの大型遠心機の開発を進めた
（写真 1.4）。

日本は一四年後にこの開発を知り、
独自にジャンボ機の開発を実施した。
この成果を小径高性能機に反映して、
青森県の六ヶ所ウラン濃縮工場に最
新鋭機として導入している。

アメリカは、高性能化開発を進めたが、
二〇一四年連邦破産法の適用を申請
して再建を図っている。

コラム 1-1 天才物理学者が創案した遠心機性能評価式

イギリス人でノーベル物理学者ポール・ディラックは、分離装置が実施する仕事量を評価する価値関数を 1941 年に創出し、これを用いて遠心分離機が実施できる最大の分離仕事量を計算する以下の評価式を考え出し、現在でもウラン濃縮事業などで活用されている。遠心機が発揮する性能は $kgSWU/年$ で示され、実際に発揮した遠心機性能は、最大分離能力に対する効率(%)として評価される。

$$\delta U_{max} \propto V^4 \times L$$

ここで δU_{max} :遠心機の最大分離能力、 V :回転胴外周部の回転周速、 L :回転胴の長さ
即ち、遠心機の理論上の最大分離能力は、回転周速の 4 乗と回転胴長さに比例する。

(1) 性能向上手段 1：回転周速を最大とする

- 限界周速は以下で示される。

$$\text{限界周速} = \sqrt{\text{材料強度} / \text{材料密度}}$$

- 即ち軽くて強い材料を開発する。以下に材料と到達できる周速を示す。

材料	引張強度(Mpa)	密度(kg/m ³)	限界周速(m/sec)
アルミニウム合金	440	2.8×10^3	400
チタン合金	890	4.6×10^3	440
高張力鋼	1,950	7.8×10^3	500
炭素繊維強化プラスチック(*)	3,500以上	1.8×10^3	(1,400以上)

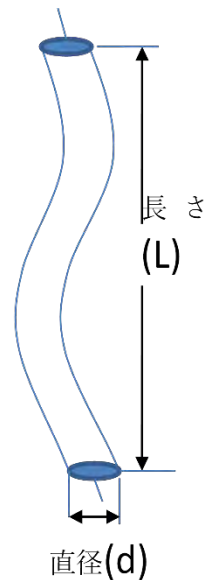
(*) 構造設計により限界周速が異なってくる。

- 原理的に周速の 4 乗で性能が向上するので、材料の開発の優先度は高くなる。

(2) 性能向上手段 2：回転胴を長くする

回転胴を長くすると、左図のように共振周波数（共振点）で右図のように回転胴が曲がる現象が現れる。

- 回転胴を更に長くすると、共振点をいくつも超える必要があり、高回転数で共振周波数を超える際に軸受けにかかる力が軸受けの限界を超えて軸受けが破損する恐れがある。この対応として共振周波数を超えやすい回転胴設計と制振技術を開発する。



(3) ディラックはどのようにして評価式を考えついたのか。

ラルフ・パイエルスらがウラン濃縮開発についてディラックに相談した経緯は(第 2 章第 1 節)を参照されたい。ディラックは、1930 年代に質量分析法を発展させて、同位体分離に旋風を巻き起こしていたケンブリッジ大学のフランシス・アストンに触発され、静止遠心分離法による同位体の研究を開始した。ボルテックスチューブともいわれる曲がった静止配管中にガスを流し、ガス中に遠心力を発生させて分離する方法で、結局成果を出せなかった。しかし、この時の経験が活き、パイエルスの依頼を受け価値関数と遠心機の最大分離能力の評価式を考え、パイエルスに送っている。

パイエルスはこれを標準的論文に編集してイギリスの原爆検討委員会に送付し、委員会はマンハッタン計画グループに提示した。アメリカのコーエンはこれを使いこなし、後にウラン濃縮関係者の教科書になった著書に取りまとめている。この著書が無かったら世に出なかった可能性がある。

第二章 日本における第二次世界大戦中のウラン濃縮技術開発

第一節 夜明け前の日本のウラン濃縮技術開発

大戦中日本では、理研の仁科芳雄博士が熱拡散法（「二号研究」）で、京大物理学科の荒勝文策教授（当時）が遠心法（「F研究」）でウラン濃縮研究を

主導したが、空襲で試験装置、資料などが焼失した。新人研究員として二号研究に参画した理研元副理事長中根良平の手記、毎日新聞編集委員（当時）の会川晴之および京大名誉教授政池明の希少な情報を収集して作成された著書などを参照して、日本のウラン濃縮研究の起源を歴訪した。

戦後、占領下の西ドイツでグローテがウラン濃縮研究を再開した（第二章参照）のに対し、連合国軍最高司令官総司令部（GHQ）による理研などのサイクロトロン破壊に象徴される

日本の原子力研究禁止が、日本の遠心法の自主技術開発に与えた影響を紹介する。

理研の二号研究

陸軍航空技術研究所の安田武雄中将は、マンハッタン計画に先立つ一九四一年春に理研に原爆製造研究を委託した。当初は基礎研究を実施していたが、太平洋戦争勃発を機に、当時、最も優れた濃縮法とされた熱拡散法を選択し、濃縮試験に必要な六フッ化ウラン（UF₆）の製造研究および熱拡散塔の設計を開始した。一九四三年三月に仁科は、安田に以下の趣旨の報告書を提出している。「ウランを爆薬・蒸気タービンとして使用するには、最少

三〜五キログラムの水に一〇％濃縮ウラン一キログラムを混合する必要がある。これにより発生するエネルギーは火薬一万キロに相当する」。この報告書は終戦時に焼却されたが、写しが一九九九年に発見された。軽水炉の臨界または暴走条件を思わせるようなこの内容を、当時の新聞は「仁科博士原爆の原理誤解」などと報道した。中根は、この件に關し、仁科はエネルギー源としての利用を念頭に置いていた、と述べている。ともあれ、安田は東条首相に報告し、「二号研究」が始まった。

UF₆ は、反応が激しい金属ウランに代え、炭化ウランをフッ化する方法で一九四四年二月に製造に成功している。また、長さ五メートルの熱拡散塔とともに試験棟が完成したので、アルゴンで予備試験後、七月からウラン濃縮試験を開始し、翌一九四五年三月までに

濃縮試験を六回実施した。当時、酸化ウランのサンプルにサイクロトロンで中性子を照射して発生したベータ線を計測する方法で濃縮度を計測していたが、試験は失敗続きで最後の第六回のみが分析可能であった。既に空襲が始まっており四月一二日の大空襲で理研も爆撃を受け、濃縮試験建屋は無事だったが、飛び火が屋根裏に残っていたと思われる、夜中に試験装置とも焼失した。第六回目のサンプルは三組採取されたので、中根は、すぐ分析する一組を分析室のある一号館に、他の二組を用心のため防空壕に保管した。しかし、一号館は無事だったが、防空壕はサンプルとともに焼失したため、残った一サンプルを急ぎ分析したが、濃縮は認められなかった。

この間、二号研究に属していた朝永振一郎は、熱拡散塔の試験が難航して

いるのを見て、解析などでお手伝いし
ましようかと申し出たところ、仁科か
ら「お前は勝手に研究をやっておれ」
と一喝され、その後ノーベル賞につな
がる研究を続けた。この話を聞いた中
根は、仁科が研究者を戦死させないた
めにもこの研究を実施していること
を悟ったという。

京大のF研究

海軍は、早い段階から原爆に興味を
示し、京大出身の海軍中佐を通じ荒勝
に原爆製造研究について相談した。荒
勝は「理論的に可能だが、実現にはウ
ラン濃縮など難しい課題があり、この
大戦中には間に合わない」と回答する
と、次の戦争に間に合えばよいとこの
とだったので、原爆の研究として基礎
研究を進めることで若い研究者の戦
死を回避できれば良いと考えF研究
を開始した。一九四四年一〇月に、海
軍と大学との最初の会議が大阪で開
催され、大学から荒勝、湯川秀樹、名
古屋帝大の坂田昌一など二一名、海軍

技術研究所の三井再男大佐ほか四名
が参加した。大学からウランの特性や
遠心機などについて説明があった。熱
拡散法は実施に時間を要するほか、荒
勝が当初から興味があった遠心法が
選択された。

二〇一五年に荒勝グループの清水
栄のノート三冊が五十棲泰人京大名
誉教授により発見された。清水は、ピ
ームス(第二章参照)の資料を丹念に
フォローし、遠心機の設計図面を作成
した。一九四四年一〇月頃から東京計
器製作所に依頼して製作を開始した
が、一九四五年春の空襲で資料ともど
も焼失した。

終戦直後の原爆開発調査

終戦後、日本の原爆開発の状況調査
が、カール・コンプトンのグループお
よびドイツのアルソス(第一章参照)
に参加したロバート・ファーマン大佐
らのグループにより行われた。ファ
ーマンは九月三〇日に陸軍責任者に以
下の調査報告書を提出している。仁科

および荒勝との尋問から、その高い見
識に驚くとともに日本の核爆弾開発
は基礎的研究の範囲であったとして
いる。着目していた湯川とは土産の交
換をする和やかな尋問の傍ら、その留
守中に家宅搜索して、湯川は中間子の
研究に没頭して原爆製造に必要な中
性子拡散解析は実施していなかった、
と結論付けている。調査期間が短かつ
たこともあるが、政池から見ても突っ
込みが浅い調査となった。コンプトン
は、理研の調査後、ファーマンと会談
を行い、九月二〇日に、理研に関する
以下の調査報告書をGHQに提出し
ている。

仁科は、国際的に活躍した優れた原
子核物理学者であったことも考慮し
て、ウラン分離以外の科学研究は次の
条件付きで許可すべきである。

- ① 連合軍のしかるべき機関が常に研
究の目的とその対象を把握すること。
- ② 研究機関がいかなる場合でも連合
軍の査察を受け入れるべきこと。
- ③ 多量のウランやその他の不安定核

の質量分離は行わないこと。

コンプトン報告のこの「条件」は、
二日後のGHQ指令三号に反映され
て発令された。

指令三号と

サイクロトロン破壊

指令三号は、サイクロトロンによる
研究を制限しないと考え、仁科はこれ
らの使用許可をGHQに申請し一旦
許可された。GHQは念のためワシ
ントンの統合参謀本部に確認すると、使
用許可が出されてから二週間後に以
下の指令(WX7907)が送付された(図
2.1)。①原子力研究に関与した関係者
を拘束すること②原子力研究に関す
る全ての施設を押収すること③原子
力とそれに関連するいかなる研究も
許可しない。

GHQが再度確認すると、前記指令
の履行に加え、理研、京大、大阪大の
サイクロトロンを破壊せよ、との指示
があった。この指令は、最高機密とさ
れたため、日本には理由も告げられず

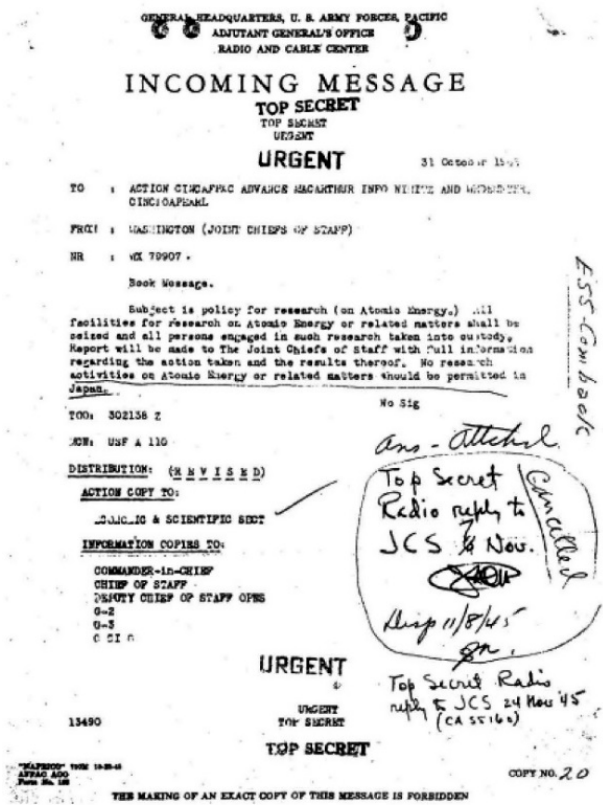


図 2.1 : GHQ 指令 WX79907。福井崇時 2009 より。

- ① 研究者の釈放(この時拘束者はいなかった)
 - ② 研究者の研究室への通常の立ち入りを許可する
 - ③ 研究活動の禁止は継続。
- 十一月二四日、一斉にサイクロトロン
の破壊が開始された。これに対し、ア
メリカ国内でも猛烈な非難が起こっ
た。さらに、機密扱いのこれら指令と
公開の指令三号とに大きな不整合が
生じたので、マンハッタン計画指導者
グループから次の非公開指令(WX
88780)がGHQに送付された。
- しかし、この指令も公開の指令三号
との不整合は修正されていないため、
アメリカは日本に課せられた原子力
規制の緩和を計画した。このことにつ
いて、大阪大の田中信吾は以下の歴史
解釈を示している。
- アメリカのトルーマン政権は、原子
力の恩恵は人類全体に行き渡るべき
で、そのためには国際管理体制の早急
な構築が必要と考えていた。そのため、
日本における公開と機密の指令の不

整合の修正および一九四六年四月に
同じ敗戦国ドイツで定められた「軍事
的性質でない基礎研究を認める法律」
との不整合も修正する必要があった。
そこでトルーマンは、国際管理の一環
として日本の原子力規制の緩和を新
たに設立した一一か国からなる極東
委員会に諮ったが、むしろ規制を強化
すべきとの案が出され、結局
WX88780 による管理がサンフランシ
スコ平和条約発効まで続くこととな
った。このため、日本の遠心法開発は
平和条約発効後、グロートが最初にウ
ラン濃縮に成功してから一七年後に、
開発を継続したグロートの遠心機を
模倣することから始まることとなっ
た。

第二節 空爆で焼失した日本で最初の遠心機

見つかった遠心機設計ノート
核分裂 (Fission) の頭文字を取っ
て F 研究と言われていた京大の遠心
法研究の実質的取り組みは一九四四

年九月からであった。終戦の前年であ
り、若手研究者を戦死させたくないと
考えていた荒勝も「時すでにおそし」
と言うほどで、荒勝研究室では荒勝、



木村毅一、清水栄の三名で研究を実施する状況に至っていた。

このため、清水は遠心機設計製作で大きな役割を担うこととなり、遠心法開発を始めまもなく、遠心機の製作を東京計器に依頼し、翌年の一九四五年七月一九日完成予定で設計製作が進められたが、春の空襲で焼失した。

しかし、清水家には三点の遠心機図面が保存されており、二〇一五年には、五十棲泰人名誉教授により清水栄の遠心機に関するノート三冊が発見された。このたび、政池明京大名誉教授のご尽力で、清水栄の子息清水勝兵庫県立大学名誉教授及び五十棲名誉教授の了解を得て、遠心機図面三点と設計ノート三冊の写しを拝見することができたので、政池の著書を参照しつつ図面などを分析して、日本最初のウラン濃縮遠心機の開発状況を探求した。

図面は、東京計器により作成されたもの及び荒勝研究室にて方眼紙に手書きで作成された二点で、東京計器及

び手書きの図面のうち一点は、遠心機全体図で、回転胴を磁石で吊り上げて浮上させモーターで回転させる構造となっている。手書きの他の一点は、遠心機全体ではなく、圧縮空気をノズルから噴出させて回転体を回すタービン駆動部を主とした遠心機上部の図面である。東京計器の図面の表紙には、完成が一九四五年七月一九日と記され、係員の押印はあるが、主任、課長の押印はなく、図面番号も記載されていないことから、まだ検討段階のものと考えられる。

手書き図面のいずれにも右下に

2004との記載があった。一九四四年を皇紀で表示したもので、この年に図面を作成したものと考えられる。タービン部分の図面の年号の後には、16/XIと記載されており十一月一六日を示しているように見える。

手書きのモーター駆動図の左上には Ultracentrifuge (U) March 1945 の記載が、また、タービン部の図面の右上に March 1945 の記載がある。荒勝と木村が東京計器を訪問して協力を依頼したのが一月二一日との記録があるので、三点の図面とも一九四四年の年末までの二〜三か月間に作成されたものと想定される。清水は、アメリカのビームス（第一章参照）の遠心機を丹念にフォローして東京計器に製作を依頼しているが、東京計器及び手書きの図面のモーター駆動、磁気浮上型遠心機は、

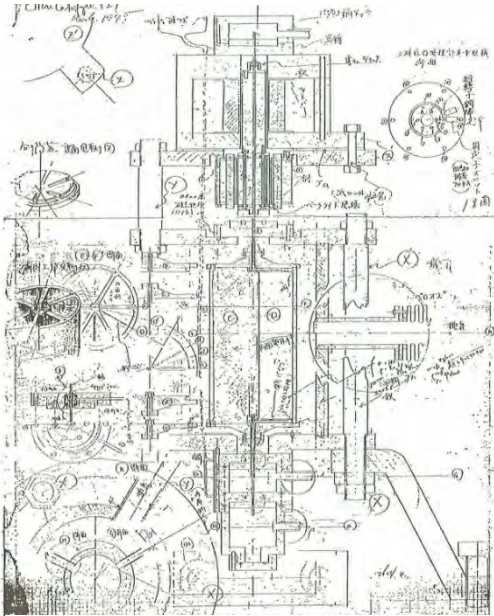


図 2.2: 荒勝研究室の遠心機図面。モーター駆動磁気浮上方式。(清水家所蔵)

ビームスの遠心機イメージとは異なる先進的なものであった。

先進的なモーター駆動 磁気浮上型機

モーター駆動遠心機図面から、回転胴は直径一〇センチ、長さ二〇センチと小型で、政池の情報から回転胴は超超ジュラルミン製である。モーターは、東京計器図では回転胴の下部、手書き図では回転胴の上部に配置されている。

モーターで駆動するこの構造は、蒸気タービンで回転体を駆動するビームスの遠心機イメージとは、大きく異なっていた。さらに、電磁石で回転体を吊上げる構造は、ビームス遠心機に対し先進的であった。ただ、東京計器図面の回転側に磁石で吸い上げられるために必要な磁性体らしきものがなく、回転胴は浮き上がらないと思われるが、手書きの図面では、上部軸に磁性体が巻き付けてあり、回転胴は浮上するように修正されている。(図 2.2 参照)

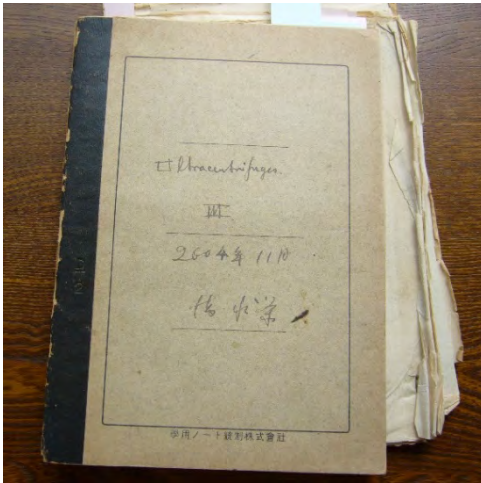


写真 2.2：清水ノートⅢ。(五十棲泰人京大名
誉教授所蔵)

モーターとタービンの

互換設計

手書きのタービン部品を主とする遠心機上部図面は、モーター駆動遠心機の上部と入れ替えるとタービン駆動遠心機となる互換設計となっている。圧縮空気をノズルから噴出してタービンを回転させ、連結した軸で回転胴を回すもので、圧縮空気の圧力、タービンを駆動させる空気の流量などの運転条件も図中に示されている。さらに、タービンブレード（羽）の加工方法及び部品ごとで異なる製作個数と思われる数値が記載されている。ま

た、タービンの回転部分は圧縮空気ですく構造となっており、回転体は、空気で浮上して回転する構造になっている。

清水の検討状況示すノート

ノート三冊のうち二冊は、清水がビームスなどの論文を読んで知識を吸収している状況が示されており、表紙には皇紀で一九四四年一〇月を示す記載があった。他の一冊は、清水の設計検討の状況が記載されているが、どのような遠心機を設計すべきかの思考の変遷も見て取れて興味ある内容となっている。こちらのノートの表紙にも一九四四年一月を示す記載がある。

これらノートの中に、ビームスによる一九三九年の電気駆動・磁気浮上遠心機に関する論文の写しが貼り付けてあった。円板を用いたモーターの要素試験状況が図面とともに掲載されており、清水はこの論文を参考

にモーター駆動磁気浮上遠心機的设计を行ったと考えられる。

三冊目のノートには、タービンの設計に関する詳細な計算内容が記載されており、その検討結果がほぼそのまま手書きのタービン部分の図面に反映されている。また、ビームスの論文の中で重要と思われる部分は、論文の内容を筆記したり、論文に赤線を引いたりしており、これら重要と思われる項目の多くが図面に反映されている。

(写真 2.2)

設計情報の集約化

短期間に膨大な情報を集めて開始された遠心機開発だが、開発が進むにしたがって集めた情報の中にさらに開発に反映すべき新たな項目を見出すとともに、新規性が高い情報などが荒勝研究室に集約し始めている。既に述べた東京計器の磁気浮上の問題や、手書き図面の回転胴の円筒部分の肉厚が東京計器図面に比べ薄くなったいるなど、回転体の強度計算の進展が

図面に反映されている。肉厚の変更は、関連する他の部分の構造変更、強度の見直しなどを伴う総合的な設計見直し力が要求されるものであった。

タービンの設計は、超音速流体計算から実施して加工指示を出すに至っている。回転胴材料については、超超ジュラルミンを製作している住友金属に協力を依頼し、材料の特性や課題などを把握している。当時、超超ジュラルミンは、応力腐食割れ耐力の向上開発が盛んに実施され、その最新の知見が、回転胴内面の銅メッキ仕様に反映されていると考えられる。

このように、荒勝グループに遠心法特有の設計情報が集中・蓄積し始めており、タービン図面では加工工具の種類、加工方向の角度など身近な町工場に製作を依頼するような製作指示が記載されている。また、部品ごとで製作個数が異なっていることから、自らこれら部品を組み立てて要素試験を実施することを想定させる内容であった。

謎の残る蓮根状断面の回転胴

清水らの設計による回転胴は、軸方向に六枚の仕切り板で区切られており、蓮根の断面を思わせるものとなっている。ビームスの報告書に同様な回転胴の記載があり、液体四塩化炭素を注入し、その蒸気により塩素の同位体を分離する特異な用途で使用されている。同じ構造を六フッ化ウランガスで使用する場合に適用することが妥当かについては分からなかった。

なお、同位体分離流動面では、ビームスに倣って並流方式（第一章参照）を採用している。

荒勝研究室においては、情報の集約化に伴い、自ら情報を生み出す段階に入りつつあったと言えるが、終戦とともに京大のF研究開発は途切れることとなった。このたびF研究に関する貴重な情報に接することができ、日本で最初のウラン濃縮遠心機開発状況を知ることができた。

コラム 2-2 歴史的提案となったユーリーの向流循環型遠心機

核分裂反応の発見 2019 年は、ドイツ人のオットー・ハーンと亡命ユダヤ人の娘としてウィーンで生まれたリーゼ・マイトナーが核分裂を発見して 80 年になる。（吉田正 原子力学会誌 61No12(2-19)）

ヒットラーの台頭に伴い、マイトナーはスウェーデンに逃れるが、ハーンとの研究に関する連絡を取り合い核分裂を発見、その論文は、1939 年 1 月に受理された。マイトナーは、この間、コペンハーゲンのボーア研究所の甥のオットー・フリッシュにも頻繁に相談している。フリッシュは、パイエルスと原爆の製作可能性を示した物理学者でもある。（第 1 章）

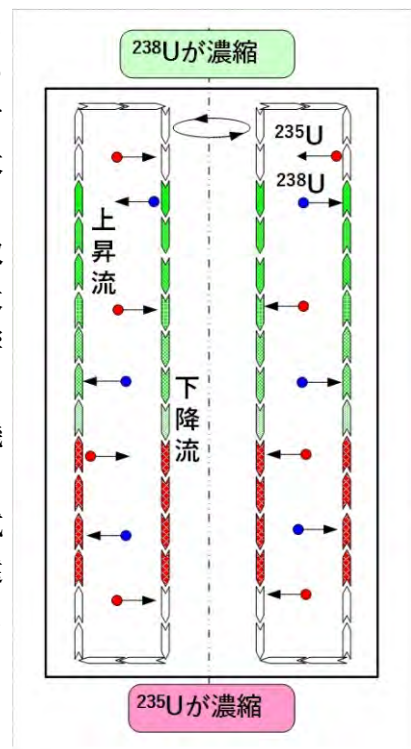
ユーリーの向流循環型遠心機の提案 1939 年 1 月ワシントンで理論物理学学会が開催された際、ボーアは U^{235} が核分裂性同位体であるとの予見を公表した。

ハロルド・ユリーは重水の発見でノーベルを受賞した化学者で、かつて理論物理の勉強のためボーア研究所に留学していた。このこともあり、ボーアのこの提示を受け、核分裂試験には U^{235} の分離が必要と考え、コロンビア大学で遠心法によるウラン濃縮の研究を開始し、1939 年 1 月及び 5 月に向流循環型遠心分離機の提案を行っている。

向流循環型遠心機 右図の高速回転する回転胴の例では、遠心力で外周部に移動した U^{238} は円筒外周部の上昇流に乗り円筒上部に集められ、 U^{235} は中心部に移動し下降流に乗って円筒下部に集められる。流れが U^{235} 、 U^{238} を運ぶベルトコンベアの役割を果たすので、これが長いほど、即ち回転胴長さが長いほど、円筒上下で大きな分離係数を得ることができる。

ディラックの最大分離能力に影響を与えた ディラックが当初取り組んだ静止型遠心分離法では現れない回転胴長さの効果が最大分離能力の評価式に組み入れられており、ユーリーの論文が影響を与えたとされている。（ジェレミー・バーンシュタイン(2010)）

マンハッタン計画におけるビームスの試験 世界で最初に遠心機で同位体分離を成功させたビームスは、マンハッタン計画では、当時の開発責任者のユーリーに指示されてから向流型遠心機の試験を開始した。この切り替えの遅れが、マンハッタン計画から遠心法が外された要因の一つとなっている。外された後に実施した向流型でのウラン濃縮試験では大変良い試験結果が得られたが、マンハッタン計画復帰はかなわなかった。



第三章 日本の遠心法の黎明

戦後、一人の政治家が日本の原子力開発の扉を押し開けた。元外交官の金子熊夫が二〇〇二年に開催した国際会議の講演録などを参照し、その概要を示す。さらに、東工大にて原子力研究体制が速やかに整えられ、最初の遠心法ウラン濃縮成功につながった遠心法の黎明期を金川昭の講演録などを参照して歴訪する。

中曽根康弘の建白書

GHQによる理研などのサイクロトロン破壊に危機感を持った中曽根康弘は、衆議院議員になると「平和条約において、原子力平和利用及び民間航空機の製造・保有を禁止しないこと」等の建白書をマッカーサーに提出した。また、一九五〇年、ダレス米國務長官顧問（当時）が平和条約の事前交渉で来日した際に面会し、中曽根の主

張のとおり進んでいるとの確信を得ている。

一九五二年四月二十八日、平和条約が発効し、非公開のGHQ指令も解除されて原子力研究開発の実施が可能となった（第二章参照）。

一九五三年に渡米した中曽根は財界人から、アメリカの原子力界では原子力産業会議が設立され、民間が中心になりつつあると聞き、その時は日本も遅れてはならないと思った。帰国の途中、サンフランシスコ領事館にカリフォルニア大学の嵯峨根遼吉教授を招き、これからの日本で原子力を推進するに際し何を注意したら良いかを聞いた。嵯峨根は、理研のサイクロトロン建設に参加した物理学者で「まず法律と予算をつくって正式に国策の基礎を確実にする必要がある。策もなく民間で適当に始めると、優秀な人材

が集まらず日本の原子力はだめになる」との見解を述べた。これに同感した中曽根は、帰国すると予算案作成に取り組み、表に出すと反対されるので、仲間の数名の国会議員に相談して二億三五〇〇万円の原子力調査費などの予算案を作成した。予算委員会議事でもあったので、予算の修正時に突如修正案を提出した。大騒ぎになり、中

曽根は原爆をつくる気かなどの非難もあったが、めげずに審議を続け、予算の成立期限が迫り原子力関係を含む一九五四年度予算が成立した。

一九五三年の国連総会でのアイゼンハワー米大統領のアトムズ・フォーピースの演説を機に、第一回原子力平和利用国際会議（ジュネーブ会議）が一九五五年に開催され、民主党（中曽根）、右派社会党（松前重義）自由党、左派社会党の超党派議員四名が参加

した。原子力技術情報が大量に公開され、平和利用の急速な進展の契機となったが、同じ敗戦国のドイツや他の国に比べ日本は大きく遅れていた。

会議後、四名でフランス、ドイツ、イギリス、アメリカの原子力施設を見て回った。ホテルに着くと日本でどのような法律をつくるかを毎晩一二時過ぎまで議論し、羽田に着く頃には大体の法案要綱を作りあげた。

帰国後、中曽根を会長とする超党派の原子力合同委員会を設立し法案をつくりあげた。松前と相談し原子力委員長は、正力松太郎読売新聞社主にお願ひした。原子力基本法案には、学術会議の提案を受け、自主、民主、公開の原子力三原則を書込み、その前段に「原子力利用は平和の目的に限り」と「平和」の文言を入れ込んだ。超党派の議員立法なので一会議で成立し、日

本の原子力の予算及び体制が一気に前進した。

遠心法の黎明

を呼び込んだ奨学金

日本原子力研究所などの研究体制整備も進み、東工大においては、大義年教授が先頭にたつて大学院と付属研究所を一体とらえた改革を進め、学部を持たない大学院原子力コースの新設に合わせて原子力研究施設を一九五六年四月に開設した。

金川昭は、エネルギーを創りだすには化学工学が必要と考え、東工大の大山化学工学科教授のもとで卒業研究を行った。大山は流体や粉体の混合、分離などが専門で理研にも研究室を有していたので、金川の卒業研究は、理研の大山研究室で行われた。理研には原子力関係の図書が多く、これを読みあさり原子力に興味をもった。大山からも大学院の原子力コースに「つき合え」と声をかけられ、大学院修士課程の原子力専攻に移った。

当時は少ない原子力の学生を応援するため日本原子力産業会議（原産会議）が奨学金を出しており金川も受給していたが、どこよりも早く海外の原子力関係の情報が得られるのが魅力だった。金川は、第二回ジュネーブ会議が終わると早速原産会議に行き論文を読み、気にかかったドイツのグロートなど遠心法関係三件の論文をコピーし、持ち帰って大山に見せた。コピーと言っても当時は写真機で撮り自分で焼き付けたもので判読に大変苦労するしろものだった。一週間ほどして大山から「おれ、遠心機をぶん回すからな、お前つきあえよ」と言われ、日本のウラン濃縮遠心法が始まった。

金川は修士課程を終了すると、大山研究室の助手として遠心法の研究を行い、日本で最初の遠心法研究で学位を得ている。名大教授、原子力安全委員などの期間を通じ遠心法開発をサポートした。

理研に就職した高島洋一はエゼクターで大量にペニシリンを製造し、理

研に利益をもたらして仁科賞を受賞した。この実績が認められ、若くして東工大化学工学部門助教として赴任したが、年少であることで居心地が悪く、原子力研究施設が設立されると、大山研究室の助教授に異動した。

高島は一九五九年一月、原子力の廃ガス処理研究でハーバード大学に留学することとなった。出発に際し、大山から遠心法によるウラン濃縮研究を開始する話を聞かされ、大学で手に負えるテーマではないのでおやめなさいと進言したが、この時すでに大山は一九五九年度の原子力平和利用研究委託費（平和委託費）を申請して研究計画を進めていた。

理研1、2号遠心機の製作

一九五八年九月に三井系の日本原子力事業（NAIG）が設立された。各社とも原子力の専門家を招いて講演をお願いするなどして、どんなに原子力技術を吸収していった時期で、NAIGも大山に核燃料と再処理につ

いて講演をお願いした。講演後、大山から毎分二万回転の回転機が作れるかとの質問があった。NAIGの吉村国士技師長は石川島芝浦タービン（芝浦タービン）で毎分二万六千回転のタービン過給機を開発中だったので可能と回答したところ、早速大山からグロート遠心機の写真が送られてきて遠心機製造の依頼があった。吉村は、この写真を芝浦タービンの社長に持参して製作を依頼した。この写真は、金川が原産会議で撮った図面であるが、拡大鏡で見ても詳細は分からず、これを見ただけでは回るとも思えないしろものだったが、引き受ける決心をし、NAIGが営業窓口となり、芝浦タービンが製作を担当した。

芝浦タービンは、石川島造船所と芝浦製作所が共同出資し設立され、土光敏夫も社長を務めたが、すでに石川島重工社長に転出していて、遠心機製造は、土光の薫陶を受けた永井太郎タービン課長が担当した。永井らは、第二回ジュネーブ会議のグロートの遠心



写真 3.1：理研 2 号機。前列左から永井太郎設計課長、その右高島洋一助教授、後列橋本修密金属研究員（高島洋一「核燃料サイクル」より。

機図面を入手した。この遠心機は、グロートがブラジルに輸出して議論となった ZG3 だが（第一章参照）、詳細な設計・製造情報は得られなかった。で、永井らは検討を重ね、モーターを最上部に設置し、細いステンレスパイプで回転胴を吊り下げ、毎分二万回転で回転させる遠心機を製作した。なお、回転胴は、ZG3 と同じく中心軸からガスを供給・抜き出す方式で、直径もほぼ同じであるが、長さは二倍弱となっている。完成までにはシール部などで苦労したが、製作依頼を受けてから約八か月の一九五九年一二月に驚異的速さで理研に納入された。

原子力研究において、進取の気運が高まっている時期とはいえず、少ない情報の中で遠心機開発を担う

との吉村の決断により、グロートがウラン濃縮を成功させてから一七年後に日本のウラン濃縮技術開発をスタートさせた歴史的できごとでもあった。この後、吉村は、東芝の遠心機開発をけん引した。

なお、この遠心機は、理研が発注しているの、理研 1 号機と称されている。引き続き一九六〇年度の平和委託費で芝浦タービンにて理研 2 号機が製作された。回転胴は、ZG3 に対し直径が約一・五倍、長さは二倍強と大型となっている。シールの摩耗などの対応を行い、一九六〇年度末に理研に納入された。（写真 3.1）

開発主体理研から原燃公社へ

一九六一年、大山義年はアメリカ留学中の高島洋一助教授に帰還を要請した。ハーバード大学での研究に脂が乗っていた高島は、あまり気が進まない中、大山が自分を必要とする状況にあると考え、同年三月帰国して理研の遠心法開発に加わった。

まず、短期間に多くの部品からなる本格的遠心機が試作されていることに変驚いたが、実際の運転は大変苦勞し、短期間のアルゴンガスなどの代替ガス分離試験ができるようになるまで三年を要した。この時点で、理研では他の研究と兼務がほとんどで、研究継続が困難となったため、高島は、原燃公社に研究の引き受けを依頼した。

この依頼に先立つ一九六一年改定の長計で、「ウラン濃縮」は、供給の多様化を目的として供給の一部を国産化する目標が示され、遠心法は、研究開発及び将来のウラン濃縮事業を原燃公社に受け持たせる、との方針が示

されていた。

しかし、国産金属ウラン燃料の製造を精力的に進めていた原燃公社の今井美材副理事長は、この遠心法の移管に反対であった。一方、遠心法で六フッ化ウランを流通する試験は交替勤務が必要で、現実に理研では実施困難であることから、今井は高島の説得を受け入れた。まず、研究開発担当者にアメリカのマサチューセッツ工科大学留学から帰任した玉井浄副主任研究員を指名し、玉井は、新たなテーマに取り組みるとして喜んでこれを受け入れた。さらに、日本原子力事業 N A I G に対して人的協力を要請し、三井金属から五名が原燃公社に移籍した。田中正之助は開発責任者とし、堤健一は理学博士の専門を活かして六フッ化ウランの特性把握などを担当し、橋本修は機械技術の専門家として開発を担った。

一九六三年に原燃公社東海事業所の松林の中に新設された E 棟に理研 1、2 号機が移設され、開発が引き継

がれた。モーターなどのトラブルがあったものの、回転試験は比較的順調で、アルゴンなどの代替ガスの分離係数は、公表されているグローと同等の結果が得られた。

ジッペ型遠心機の開発

金川は、ソ連での遠心機をアメリカで再現したジッペの研究(第一章参照)を早くからフォローしており、ジッペ型遠心機の開発を提案していたとされる。高島が帰国した翌年の一九六二年四月、大山はグロー型遠心機の開発がはかばかしくないので、東芝にジッペ型遠心機についても回転試験を試してみたいとして協力を依頼した。平和利用委託費の性格から、大学直接ではなく、東芝が予算を申請・受託して製作を開始した。

東芝の設計者は、米原子力委員会AECがコーエンにジッペ遠心機の評価を依頼した際に作成されたと考えられることから、部品ごとに要点がまとめられている一九五九年報告書(第

一章参照)を熟読した。大山の要請が回転特性の把握が主だったこともあり、同位体分離に関する機能は除き、回転体に絞って設計・製作が進められた。上下軸受けがグロー遠心機と異なっており、設計の段階から試行錯誤が続いた。下軸受けの耐久性やモーターなどは特に苦勞の連続だった。

この遠心機は一九六三年三月に東工大1号機として東工大に納入され、軸受に関する課題などに苦勞しながら回転試験が実施された。同位体分離試験に必要なガスの供給・抜出機能が無いので、金川らは、回転胴の外周部とガスの回転摩擦損失に関する緻密な実験を実施し、汎用性の高い実験式として取りまとめ、遠心機の設定及び様々な運転条件の設定に活用されている。

大山は、一九六二年に東工大学長に就任して原子力委員会の専門委員会活動に専念し、高島が研究指導を引き継いだ。また、理研1、2号機を製作した石川島芝浦タービンは一九六一

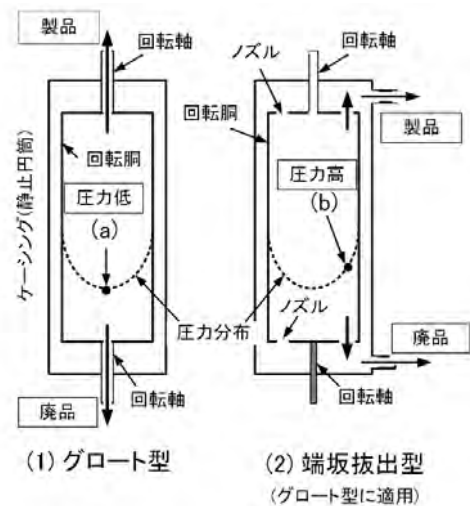


図 3.1: ガス抽出法の比較; (1)グロー型は圧力の低い中心軸(a)部から抜き出しで (2)端板拔出型は、圧力の高い(b)のノズルから抜き出す。

年東芝に併合されている。くやしさが生んだ

日本式遠心機

高島は、一九六四年九月の第三回ジュネーブ会議で金川の理論解析及び理研1、2号機の試験結果を口頭発表した。質問も無く、グローから手厳しいコメントがあった。ヨーロッパでは一九六〇年以降アメリカの要請で遠心法の情報管理が導入され発表が禁じられているため(第一章参照)、開発研究面で著しい進展があるにもかかわらず発表していないというもの

であった。すなわち、日本の研究は発表が許されるほど遅れていることを示唆したもので、高島にとっては無念な結果であった。

高島は、帰国後このコメントに奮起してグロー型の弱点である、圧力の低い回転胴の中心部から製品廃品ガスを抜き出す方法に代えて、回転胴の上下の円盤部(端板)の圧力の高い外周部に小さな孔(ノズル)を設け六フッ化ウランガスを噴き出させる構造を考案した(端板拔出法)。これにより回転速度が高くなると中心部が真空状態となり、ガスの抽出ができなくなるというグロー型遠心機の致命的弱点を回避することができた(図 3.1)。

ジッペ型東工大2号機の開発

ジッペ型東工大2号機の製作・試験は、開発主体である原燃公社から東工

大で委託研究として実施され、一九六六年に東芝にて製作が開始された。回転胴は、ジッペ遠心機よりわずかに大きく、ジッペ型特有の振動を克服し、一九六七年五月に完成した。ガスの抜出は、ジッペ型のスクープに代え端板抜出法とした。質量数の大きな六フッ化ウランが回転胴周りに充満すると、回転胴外周部に縄をなうような渦が発生して動力損失が急増し、回転も不安定になることが東工大1号機試験で把握されていたので、東工大2号機では回転胴周りに質量数の小さいヘリウムガスを注入する構造とした。東工大納入後、後に日本で最初の遠心法ウラン濃縮試験を実施することとなるNAIGの齋藤健彌が研究員として東工大に派遣され、アルゴンガスや六フッ化硫黄ガスによる同位体分離試験が行われた。

この遠心機は、高速回転中に静止しているスクープを挿入しないため、ウラン濃縮試験条件の設定が容易となるメリットを有し、後に短期間でウラン濃縮に成功した要因でもあった。しかし、端板から抜き出した製品・廃品ガスは希薄で次の遠心機に輸送するには圧縮機が必要で、ヘリウムガスも分離除去する必要があるため、プラント規模の開発では大きな課題を残すこととなった。

ウラン濃縮方針示した

原子力委員会

原子力委員会は、一九六七年改定の長計を受け二年後に核燃料懇談会で日本の核燃料の確保に関する具体的方策を取りまとめた。

ウラン濃縮に関しては、世界的に濃縮ウランがひっ迫するとみられる一九七五年頃に技術の可能性と経済性を把握できるよう、遠心法及びガス拡散法の研究を行ってウラン濃縮方式を定める方針を示した。合わせて、後の原子力特定総合研究計画の骨格となる開発工程を示している。

ウラン濃縮用3号機の製作

3号機は、本格的なウラン濃縮試験用遠心機として一九六八年春に動燃から東芝に発注された。製作段階の回転試験は順調であったが、その後いくつかのトラブルが発生し、一九六九年一月に回転胴が破損した。後にウラン濃縮の担当となる中村康治は、アルミニウム合金の専門家として破損原因調査に参加し、熱処理時の残留歪み、その後の製作過程で解放され、回転時にアンバランスとなつて振動が増大して破損したと推定している。3号機は、回転胴を再製作して同年八月に動燃東海事業所に納入された。

この間の理研及び動燃のウラン濃縮成功を受け、ウラン濃縮技術開発は原子力特定総合研究に指定された(序章参照)。遠心法は、この研究のトップバッターとして、3号機による本格的なウラン濃縮試験に取り組み、困難な事態に遭遇しながらも貴重な経験をすることとなる。

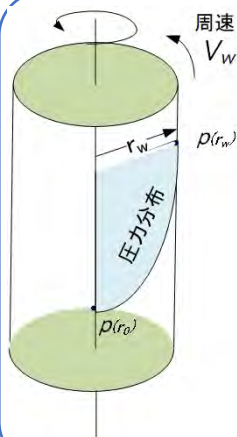
コラム 3-1 回転胴内の圧力分布

回転胴内は強い遠心力で半径方向に大きな圧力分布が形成される。

$$\frac{p(r_w)}{p(r_0)} = C \times \exp(MV_w) \quad (1)$$

ここで $p(r_w)$ は回転胴壁の圧力、 $p(r_0)$ は、回転胴中心圧力、 V_w は周速
 C は温度に依存する定数、 M はガスの分子量 (左図参照)

M は六フッ化ウランで352、回転胴周速も高く、(1)は非常に大きな値となる。
 200m/秒: 18, 400m/秒: 1×10^5 , 500m/秒, 1000m/秒: 2×10^{31} (常温状態)
 内壁圧を高くすると六フッ化ウランは個体となるため、回転胴壁は大気圧以下で中心部は超高真空となる。このため中心部からの抜き出しが困難となる。



第四章 劇的技術進展をもたらしたナショナルプロジェクト

第一節 潮目を変えた特定総合研究

原子力委

自主技術開発方針打ち出す

原子力委員会は一九六七年、長計で以下の重要方針を打ち出した。

戦後、日本の原子力関係実用技術は、先進国に著しく立ち遅れ、このまま進むとわが国の原子力開発利用の自主性を損なうおそれがある。そこで、重要で緊急性が高く、国として重点的、組織的に進める必要がある研究課題を「原子力特定総合研究」（特定総合研究）に、さらに取り組みを進めた「原子力特別研究開発計画（国のプロジェクト）」に指定して、明確な体制のもとで自主研究開発を進めることとする。

特定総合研究の指定

原子力委員会は一九六九年八月、ガス拡散法及び遠心法の研究開発を特定総合研究に指定した。ガス拡散法は、隔膜を理研が、六フッ化ウラン循環ル

ープなどの研究を原研が、遠心法は動燃が担当して三年間の研究成果を評価した後、以降の研究開発計画を決めるといふ競争の原理が導入された。

この時 原子力委員会が示した計画は、既に試験中及び製作中の3号機・4号機の試験結果を反映してプロトタイプ遠心機を製作し、ウラン濃縮試験（濃縮試験）を終わらせる。さらに、このプロトタイプ遠心機一〇台程度でシステム信頼性試験装置（システム試験装置）を製作し試験して、次の開発ステップであるカスケード試験装置の設計に反映するというのが柱となっていた。もう一つの柱は、次の段階の遠心機を開発するもので、回転胴材料や軸受けなどの要素試験を実施し、これらを反映してより高性能な遠心機（高性能機）を開発するというステップを踏んだ計画であった。

3号機試験、未経験の課題続出

製造の最終段階の試験で破損し、納入が遅れていた本格的ウラン濃縮試験用3号機は一九六九年八月に東海事業所に納入された（写真4.1）。グロート型だが、ガスの排出は高島の考案した端板排出法で、回転胴の周りにヘリウムガスを流す構造となっている。回転胴は理研2号機と同じ大きさの大型の遠心機で、大型化による性能向上を指向した。（第三章参照）

3号機試験は、六フッ化ウランの流通試験開始により様々な問題が起こ

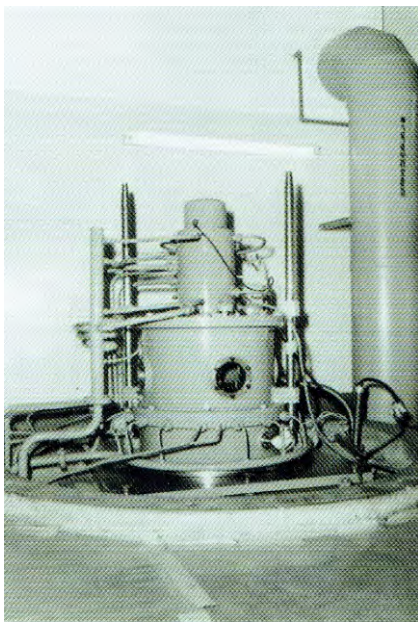


写真 4.1:3号機上部(日本原子力研究開発機構提供)

った。未経験のこれら課題を順次解決し、時間を要する温度分を形成して実施する濃縮試験が可能となったが、期待した濃縮結果は得られなかった。3号機の三年目は運転時間を稼ぐ試験を実施したが、当初計画のプロトタイプ遠心機への反映はできずに三年間が終わった。

専門委員会と

オールジャパン体制

ウラン濃縮開発部門を総括管理することとなった中村康治核燃料部長は、だれが必要と考えていたメーカー体制の改革手段として、原子力関係五グループによる専門委員会を立ち上げる

こととし、「回転胴材料」「軸受・軸封」「UF₆（六フッ化ウラン）取扱・計測制御」「分離理論」の専門委員会（委員会）を

設立した。この委員会での検討結果を受け、要素試験の委託研究を実施して開発を進めたが、開発の進展が遅いことから、委員会活動の範囲を広げて遠心機概念設計検討に踏み込んだ。委員会参加各社に、遠心機概念の提案を求め、設計結果を評価して最終的に八社からの二六提案を東芝、日立製作所、三菱重工業、川崎重工業の四案に絞り込んだ。

大転換した

システム信頼性試験

中村は、3・4号機の試験結果が思わしくないことから、当初の計画を大転換して、システム試験装置で四社案の遠心機試験を実施することとした。各社自由な発想で設計した遠心機を各社二〜三台製作して、システム試験用遠心機（システム機）単機の回転試験、濃縮試験を実施後、複数台の遠心機を並列してウラン濃縮試験を実施する。その結果を評価し、課題を抽出してカスケード設計に反映することとした。

この結果、当初計画との乖離が大き

くなったが、関係者の了解を得てこの新たな計画を開始した。

システム試験…

激烈なメーカー間競争

各社、回転体としての考え方も異なっていたため、回転胴材料も多様で軸受け構造も大きく異なっていた。このため、一九七二年度末の据付段階から不透明なビニールシートで試験装置を覆うなどして他社に遠心機構造を見られないようにして組立、回転試験などが行われた。

原子力委員会による特定総合研究の中間評価（中間評価）が一九七二年八月までに実施される見通しだったので、それまでに実績を示す必要があり、システム機の試験を急いだ。各社で試験結果は異なったが、全体としては、短期間に中間評価への実績を示すことができた。

もうひとつの柱・高性能機開発

高性能機開発は、特定総合研究の重要な柱で、回転胴材料の開発及び軸受け、軸封の開発成果を反映して高性能機を製作して分離性能試験を行う、と

いうステップを踏んだ計画で開発を進めた。

まず、システム機を担当した四社に、技術提案書の提出を求め、二社に絞り込んで高性能機を製作した。

中間評価には、次のステップの技術可能性として高性能機の実績を示すことが求められたため、これも試験を急ぎ、六フッ化ウラン中での高周速回転及び濃縮性能の実績をもって、次のステップの技術可能性を中間評価に反映した。

国家プロジェクトの指定へ

一九七二年八月、原子力委員会は、以下の特定総合研究に関する中間報告内容を決定した。

目標としてきた一九八五年までに国際競争力のあるウラン濃縮工場を稼働させることは、今後の開発努力によって可能と考えられるまでに至っている。一方、この目標達成には、相当の資金と人材を集中的に投入する必要があるため、遠心法によるウラン濃縮技術の研究開発の本格的展開を図ることとし、パイロットプラントの建設、運転までの開発を原子力特別研

究開発計画（国のプロジェクト）として強力に推進する。

なお、遠心法によるパイロットプラント建設着手に当たっては、チェック・アンド・レビューを行ってから決定するとした。

一方、ガス拡散法は、国際共同濃縮事業が実施された場合に、わが国の参加を意義あるものとするために基礎的研究を継続することとなった。その後、ガス拡散法は、基礎研究を進め一九七五年に研究を終了した。

標準化遠心機の開発

なお、次年度からは、国のプロジェクト（ナショナルプロジェクト）として計画されているカスケード試験を推し進めるためには、これに反映する遠心機開発の成果を示していく必要性が高まった。しかし、各社の競争意識の高まりとともに技術が発散する傾向にあり、カスケード計画に支障をきたす恐れが出てきた。そこで、動燃技術者により、ここまでの技術を統合した標準化機概念設計が実施された。メーカー各社の遠心機の特徴及び課題などを検討し、新たな要素も組み

込んで、小型でシンプル、かつ回しやす
い遠心機を指向した設計が出来上
がった。

この標準化機概念設計を、システム
機を開発した四社に提示し、各社の詳
細設計書をもとに設計会議を行って
標準化機が製作された。標準化機とい
えども、各社の技術特徴、得意、不得
意があり、採用技術に幅がでたものの
標準化を目指した遠心機が出来上
った。ナショナルプロジェクト指定に
より、一九七三年度からのカスケード
試験装置に導入する遠心機の候補と
して、その成果が着目され、回転試験
及び濃縮試験の結果は年末の政府予
算獲得にも影響を与えることが見込
まれた。これに対応して二社が九月に
目標の回転試験を終了し、一二月には
高性能機並みの性能を出した。

原子力委員会は一九七二年一〇月
二七日、最終報告を取りまとめ、標準
化機を遠心機の開発の中心に据えて
進めるとの方針を示した。これを受け
標準化機の経験を反映した改良設計
機がカスケード試験装置に導入され、
さらに高性能化を図りながらナショ

第二節 ナショナルプロジェクト

ナルプロジェクトの柱として開発が
進められた。

一九七三年度から始まった遠心法
のナショナルプロジェクトは、遠心機
一八〇台によるC-1カスケード装
置(C-1)の建設から始まり、約六
年後の一九七九年九月には、遠心機一
〇〇〇台からなるパイロットプラン
トOP-1Aの運転を開始するなど、
急ピッチで開発が進められた。この間、
遠心機の性能向上は目覚ましく、カス
ケードなど未経験の技術も大きな進
展を遂げ、日本の遠心法実用化への基
盤が固まった。

日本最初のカスケードC-1

特定総合研究期間中にカスケード
概念設計などが実施され、一九七三年
度からC-1の建設が開始された。一
年後の一九七四年三月末には、新たに
建設したカスケード試験棟内に、標準
化機を反映した遠心機一八〇台から
なるC-1カスケードが完成した。
カスケードは各段を配管で連結し

て濃縮していくが、C-1は、全ての
配管の合流点で濃度の混合損失がな
い理想カスケード設計となっている。

遠心機は標準化仕様とはいえ、まだ各
社の特徴が残っており、各社ごとの四
ブロックを連結したものとされた。六
月からブロックごとの濃縮試験、次い
でブロックを順次連結した試験を行
い、最後にカスケード試験を実施した。
これらの試験で一台一台運転してい
ては見過ごされるような現象が現れ
て、試験の重要性が認識された。また、
定格回転中に配管破断でカスケード
の真空が破れた場合を模擬して、種々
の条件で空気漏れ込み試験が実施さ
れ、カスケード内の現象が把握されて
真空破壊対策法が確立した。C-1は、
この試験をもって終了した。

C-2初めての連続濃縮達成

遠心機二四七台からなるC-2カ
スケードは、C-1完成から一年後の
一九七五年三月から遠心機の据え付
けを開始した。この間に遠心機の標準

化も進み、回転胴は金属材料に統一さ
れ、構造はより簡素となった。分離性
能もC-1の約三倍に向上した。また、
標準化の進捗に伴い一社が撤退し、遠
心機メーカーは三社となった。

カスケードはC-1と異なるステ
ップカスケード方式を採用した。各段
同じ遠心機台数のひとつかたまりを階
段状に積み上げていくもので、ガス拡
散法で採用されている。

一九七六年一月から半カスケード
試験及び全カスケード試験が行われ、
一・五%濃縮ウランを連続的に生産し



写真 4.2 C-2 カスケード。日本で最初に連続ウラン濃縮試験を実施した。日本原子力研究開発機構提供

た。四月には、C-1と同様軽ガス漏れ込み試験を行って、C-2に関する試験を終了した。

ここまでの試験で、配管系の単純さ、カスケード効率などから、遠心法には理想カスケード方式が適していることが明確となった。

寿命試験

遠心機の分離性能などのほか、寿命が重要な要素であることから、C-2と並行して寿命試験装置の製作を開始した。最初の寿命試験装置LT-1は、一九七四年一〇月から製作を開始し、新たに建設された寿命試験棟に据え付けられ、翌年九月から試験に入った。LT-1は、軸受試験機、回転胴試験機に加えてその時の代表遠心機から構成されており、その後も遠心機の進展に合わせて遠心機を追加して試験を継続した。

飛躍的な遠心機性能の向上

カスケード試験と並行して遠心機性能面では、回転胴の共振点を超えて安定に回転するスーパークリティカル技術が確立して長胴化が実現した

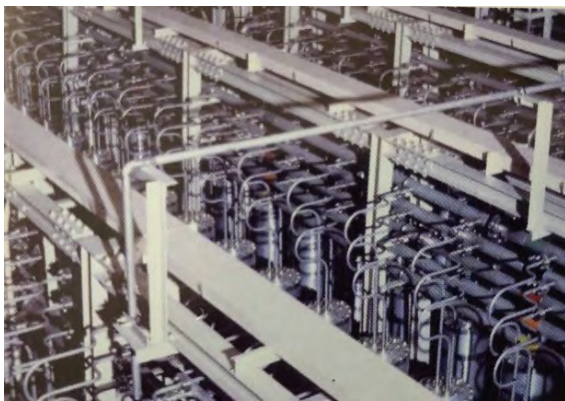


写真 4.3：パイロットプラント OP-1A カスケード
(日本原子力研究開発機構提供)

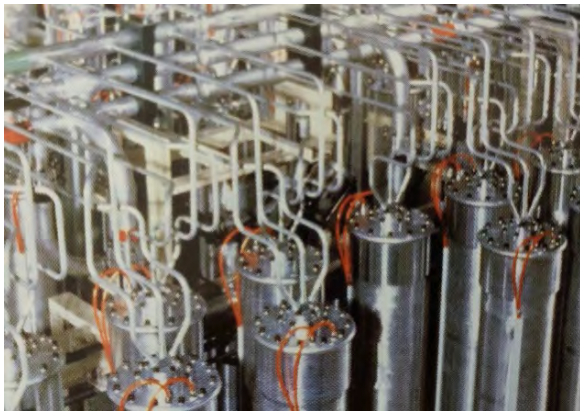


写真 4.4：パイロットプラント OP-1B カスケード
(日本原子力研究開発機構提供)

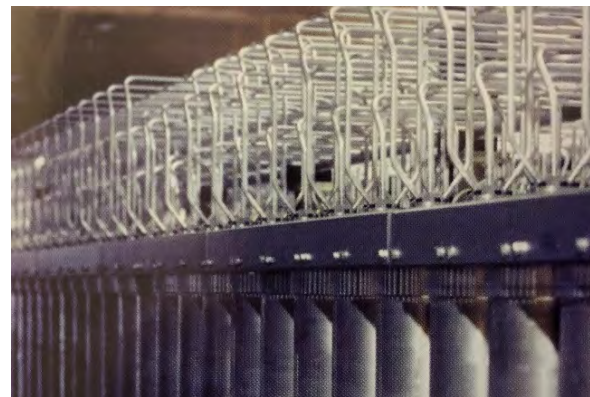


写真 4.5：パイロットプラント OP-2 カスケード
(日本原子力研究開発機構提供)

(第二章参照)。さらに、回転胴内のガスの流動制御法も進化して濃縮性能は飛躍的に向上した。回転性能の信頼性も向上して、パイロットプラント計画を後押しした。

チェック・アンド・レビュー

原子力委員会は、「ウラン濃縮技術評価検討幹事会」(評価幹事会)を設け、一九七六年一二月パイロットプラント建設の妥当性について以下の評価を行った。

高性能機は、ヨーロッパの水準に匹敵し、パイロットプラント用遠心機と

して十分使用でき、地震時の安全性なども確認されている。また、遠心機七〇〇〇台程度を前期、後期に分けて建設するパイロットプラント計画はおおむね妥当である。さらに、量産技術、品質保証技術などが進展しており、将来、濃縮コストが低減して国際競争力を有することが期待できる。以上から一九七九年からパイロットプラントの建設に着手することは妥当と判断する。

これを受け、動燃は、サイトを岡山県人形峠鉱業所構内に決定し、一九七七年に敷地造成を開始した。

パイロットプラントの建設

パイロットプラントは、前後期二期に分けて建設することとしたが、未経験のプロジェクトであることから前期OP-1の遠心機四〇〇〇台のうち一〇〇〇台からなるOP-1Aを先行して一九七八年八月に建設を開始した。この建設開始に先立つ一九七七年一〇月に核不拡散問題に関する国際核燃料サイクル評価(INFC)が開始された。アメリカは、わが国のように単独でこれからウラン濃縮を行うことに厳しい対応をすると予想



写真 4.6：パイロットプラント
(日本原子力研究開発機構提供)

されたので、早急にウラン濃縮技術保有国の地位を確保すべくOP-1Aの建設を急ぎ、計画を約一か月短縮して一九七九年九月に運転を開始し、三か月後には三・二%濃縮ウランの製造及び回収を成功させた。(写真 4.3)

なお、INFCEのウラン濃縮作業部会の日本の担当委員主査の高島洋一東工大教授は、国際共同ウラン濃縮工場を立ち上げていたフランス及びユレンコの日本への対応が厳しく、むしろアメリカは、日本が事業化の資格があるとの趣旨の取りまとめに協力した。また、この間の日本の開発努力

が、この結論に効果があったと述べている。

パイロットプラント前期の後半OP-1B三〇〇〇台は、OP-1Aの一年後に運転を開始した。遠心機の性能向上のスピードは速く、OP-1B遠心機の性能はOP-1Aの一・五倍となっている。(写真 4.4)一年半後の一九八二年三月に後期OP-2三〇〇〇台が完成してパイロットプラントは全面運転を開始した。OP-2の遠心機は、さらにOP-1Aの二倍に高性能化された。(写真 4.5)

パイロットプラント運転試験

パイロットプラントの運転を通じ、技術的に難しい安全かつ短時間でカスケードを立ち上げる方法や停電時の操作などが確立した。これらの技術は、遠心機の試験だけでは得られないC-1及びC-2の貴重な経験が反映されている。

実用ウラン濃縮工場においては、一年以上の無停止連続運転が指向されており、これを実現する重要要素である、短時間停電では生産を継続する技術及び運転時の余裕度の把握など、



写真 4.7：パイロットプラント全面運転開始式。
林寛子科学技術庁長官(右)(日本原子力研究開発機構提供)

次のステップであるウラン濃縮原型プラント及び商業プラントの運転法に関する基本技術やノウハウが蓄積された。OP-1の試験成果を踏まえ、OP-2の建設と並行してウラン濃縮国産化の検討が実施され、原子力委員会から原型プラントの早期着手が望ましいとの方向性が示された。

一方、パイロットプラントは、新型転換炉ふげんの燃料として製品を供給するなど、一九九〇年三月までの約一三年間、様々な試験研究を実施した。ウラン濃縮パイロットプラントを写真 4.6 に、全面運転開始式の様子を写真 4.7 に示す。

国際貢献した保障措置技術

ウラン濃縮工場の事業化に当たって、核不拡散の観点から十分な保障措置をとることがINFCEの結論であった。しかし、この時期ユレンコ及びアメリカが遠心法濃縮施設を運転していたものの、国際原子力機関(IAEA)は、遠心法施設に対する有効な保障措置を確立できていなかった。そこで一九八〇年一月、日本、アメリカ、ユレンコ、オーストラリア、ユライトム、IAEAの六者によるヘキサパーティートセーフガードプロジェクト(HSP)が発足し、日本はパイロットプラントを活用して効果的な保障措置技術を開発し実証するなどして貢献した。これにより、パイロットプラントにおけるIAEAの査察は、ユレンコ同様、機微な技術を含む工程への立ち入りを行わない方式で実施されることとなった。

また、査察時に運転を継続しながらプラント内のウラン量を正確に計測する技術も開発され、実用プラントに反映されている。

第五章 実証から実用化へ

第一節 原型プラント

濃縮ウランが大幅に不足する

ナショナルプロジェクトは順調に進展し、パイロットプラント後期のOP-2の建設が始まる一九八〇年頃は、原子力発電規模も拡大したが、濃縮ウランは、全て海外に依存していた。しかし、二〇〇〇年頃には一〇〇万キロワットの原子力発電所の取り換え燃料約四〇基分に相当する五〇〇〇トSWU（分離作業単位）／年以上が不足する見通しであった。当時の田中角栄首相が資源戦略の一環として仏国と合意したユーロディフからの濃縮ウラン供給が一九八〇年から開始されたが、米国による濃縮ウランの寡占状態は続いており、国産ウラン濃縮工場を早期に稼働させる必要性は高まって

いた。そこで原子力委員会はOP-2建設が始まると、ウラン濃縮国産化専門部会（専門部会）を設立して国産化の進め方を検討した。

専門部会…

原型プラントによる実証必要

一九八一年八月専門部会は以下を取りまとめた。濃縮ウランの需給バランスから、ウラン濃縮の国産化の目標を一九八五年初めに商業プラントの運転を開始し、同年代末には一〇〇トSWU／年、二〇〇〇年頃までに三〇〇〇トSWU／年の規模とする。開発状況は性能面、信頼性面で、遠心法技術は確立されつつあり、今後、国際競争力のある技術とするため、遠心

機量産技術や機器の大型化などの開発が残されている。

また、商業プラントに先立って、遠心機の量産技術を開発し、原型プラント（DP）の建設・運転を行うことが必要である。DPは、パイロットプラントと商業プラントの中間に位置づけられるもので、建設・運転は動燃が実施し、商業プラントを実施する民間が協力するとの方向性も示した。

長計、技術移転方策を調整

専門部会と並行して実施されていた長計改定の中で技術移転方策などの検討、調整が継続され、具体的移転の方法として、民間がDPの建設・運転に参画し、運転が安定した段階で、商業プラントの一部としてDPの活用を図る案が示された。また、DPの規模は、二〇〇トSWU／年が適当と

された。

電気事業者（電力）は、専門部会の検討が開始されると、電力が主体となって商業プラントを建設するとの基本方針を決定した。長計改定後、動燃と電力は、「ウラン濃縮原型プラント協力会議」を設けて民間の協力、動燃からの技術移転方策などを協議した。DP建設費を六七〇億円と見込み、建設費の二五％を昔入金、残る七五％を官民折半により資金拠出すること、一年間の連続運転による役務収入によって運転費用を賄い建設借入金を返済するという計画が合意された。

動燃はこれを受け一九八三年一月にDPのサイトを岡山県人形峠事業所内に決定した。翌年、東芝、日立、三菱重工の遠心機メーカー三社は、商業プラントを視野に合弁でウラン濃縮機器（UEM）を設立した。電力は、

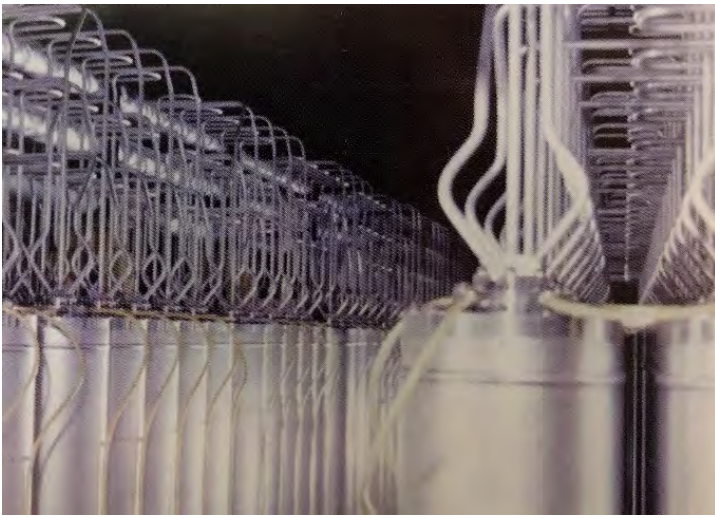


写真 5.1：原型プラン DOP-1 遠心機
(日本原子力研究開発機構提供) 1



写真 5.2：原型プラン DOP-2 遠心機
(日本原子力研究開発機構提供) 2

遠心分離機開発経緯(金属胴機)

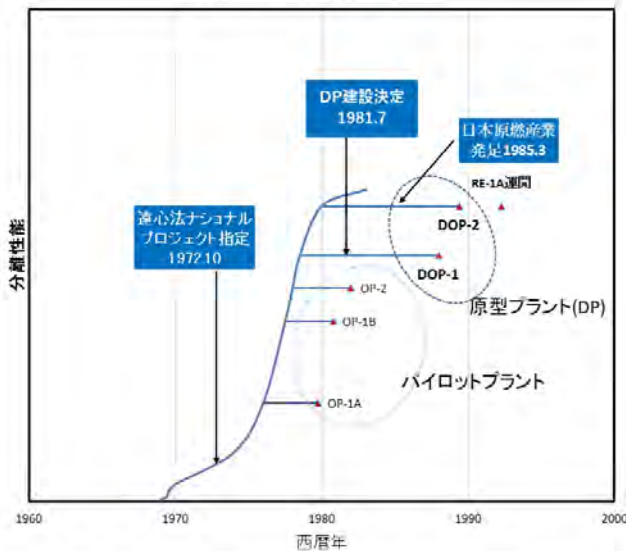


図 5.1：遠心機性能向上の推移
(日本原子力研究開発機構提供)

一九八五年三月にウラン濃縮事業会社、日本原燃産業(原燃)を発足し、翌月には青森県六ヶ所村にサイトを決定するなど急ピッチで商業化に向けた準備が進んだ。

DP設計は

商業プラントに反映が前提
長計で規模が決まると、動燃はサイト調査と並行して詳細設計を開始した。

DPは、独立して運転を実施できる一〇〇トSWU/年の「運転単位」二単位で構成するプラントとして設計を行った。約八〇万キロワットの原子力発電所二基分の取り換え燃料を生産できる規模である。また、第一運転単位(DOP-1)を運転しながら第二運転単位(DOP-2)を建設する工程設計とし、これが繰り返し実施される商業

プラントに反映することとした。カスケード設備は、遠心機特性を反映した解析を実施している動燃が設計を担当した。また、六フッ化ウランを取り扱う大型の機器は、技術確立までに長期間を要するため、DPで確実に技術を確立することとし、可能な限り大型化、低コスト化を指向した。このために必要な性能試験などは東海

事業所で実施した。遠心機は当初、OP-2遠心機を想定していたが、回転胴材料開発が進展して高周速化され、OP-2に対し二〇%性能が向上した(写真5.1)。さらに長胴化開発が進み、DOP-2ではOP-2の四五%高性能化された遠心機の導入が可能となった。(図5.1)
人形峠事業所にサイトが決まり、サイトに関連する設計見直しを調整設

計として実施した。サイト調査の間に、東海事業所で進めていた斬新なアイディアによる集合機の開発が進みDOP-2に採用した。(写真5.2)

大転換した

遠心機品質保証体系

パイロットプラントまでの遠心機製造は、動燃が提示した標準化仕様をもとに、三社メーカーがそれまでの研究開発成果を反映して遠心機を製作してきた。三社競争状態も影響し、パイロットプラントにおいても遠心機製造要領及び品質管理要領は門外不出で、動燃もその内容を見ることができなかつた。

これまでの遠心機は、性能向上のため材料特性や製造技術の限界を追求してきたが、これによる長期信頼性の低下も顕在化したため、この対策も考慮したより高度な限界設計を実施してきた。しかし、さらなる高周速化により製造条件によっては六フツ化ウラン中の信頼性などが大きく低下し

た。このため、製造条件をパラメータとした部品の六フツ化ウラン雰囲気中(ホット)試験などを実施して長期信頼性を確保する必要性が高まった。そこで、動燃とメーカーが協力、分担して仕様の根拠を明確にする設計を実施してDP遠心機の仕様を決定した。この根拠の明確化に当たって、動燃はホット試験及び実機による濃縮試験さらには高度な分析などを実施した。メーカーは製造設備の特性把握、ホット以外の試験などを分担した。このため、長期信頼性などの機能が製造段階で十分発揮できているかを確認する必要も高まり、動燃が、製造要領書及び品質管理要領書を最終確認した。これにより、長期信頼性などの機能と製造技術が一体となった体系が構築された。

DOP-1遠心機は三社それぞれの工場で製造されUEMが納入する形態となったが、DOP-2遠心機は、UEMが仙台市近郊に新設した工場で製造され、三社競争の枠組みが外

れたこともあり、比較的円滑にこの新しい体系に移行できた。

このように、従来と異なる製造時の体制は、動燃から提示したひな型をもとに作成されたUEMの品質保証計画書に体系化されている。この品質保証計画書は、不適合管理をはじめ後の国際標準を先取りしたものとして出来上がっているが、特に、これまでの不適合の大部分が工程や製造要領の変更時に発生していることから、変更管理を導入している。

下請けについても、同様の品質保証計画書を作成し、UEMが承認することとした。下請け企業が製作する部品に問題が発生すると遠心機性能に重大な影響を与えることから、動燃はUEMに対するのと同様に全ての下請け企業の品質保証計画書の確認を行った。

これにより、DP遠心機製造にかかわる全ての当事者が含まれる品質保証体系ができ上がり、信頼性ある遠心機製造の基盤が整った。

この体系は、動燃から原燃へ一体で移転することを念頭に置いたものであるが、原燃はプラントの性能保証をメーカーに求めるターンキー方式を採用すると思われるため、品質保証体系の実質的な移転先は、動燃が実施する部分含めUEMとなるとしてDPの設計・建設が進められた。

着実に進めた遠心機製造

各部品の製造要領が仕様を満たすと確認されたものから順次製造を開始した。全部品についてこれを確認する作業は多大な労力を要した。この段階でも厳しい品質管理体制に納得できない技術者がいて作業が停滞したほか、品質保証の理解が深まらない企業もあったので、ホット試験の現場見学などを行って解決した。

部品ごとに製造した初期品については、全数検査、ものによって抜き取りで破壊検査など実施し、必要なものは、ホット試験で信頼性を確認した。最終的には、組みあがった遠心機の回

転試験及びホット試験、集合機の濃縮試験までを実施して本格的な連続生産に入った。

10年間の無停止運転に挑戦

原型プラント（DP）は、一九八八年四月にDOP-1、次いで約一年後にDOP-2が操業を開始した。

連続運転を前提としたウラン濃縮役務契約収入で運転費を賄い、建設費の借入金を返済することは大きなプレッシャーであったが、運転を止めない技術や効率的な製品の生産方策構築へのモチベーションともなり、開発設計、建設の経験者が一〇年間止めない運転に挑戦した。

運転体制は、中央操作室での交代勤務のほか通常は日勤作業の六フツ化ウラン処理設備の取扱い業務も交代勤務体制に組み入れ、全ての運転グループ員が計装・電源など監視・操作に加え、UF6取扱い設備にも精通する体制を構築した。さらに、運転シミュ

レーターによる定期的訓練も勤務体制に組み込んだ。

このシミュレーターは、中央操作室を模擬したもので、原燃からの総勢一六五名の研修生の導入教育のほか、経験者が異常時における対処法の訓練



写真 5.3：動燃人形峠事業所(当時)①原型プラン、②濃縮工学施設(前ウラン濃縮パイロットプラント)③精錬転換プラント(日本原子力研究開発機構提供)

を実施することにより、自信をもって

日常の運転操作に当たることができた。また、運転操作を改善するプログラム変更を運転経験者がシミュレーターで事前に確認することで実用性の高いものに仕上げ、さらに改良操作の事前の訓練としても効力を発揮し、変更管理としても機能した。

遠心機は無停止となるが、その他の機器は通常の点検、毎年二〇件を超える法定点検及び故障など、機器を止めて確実に点検・修理を実施することが無停止運転の実現に向け重要となる。DP設計では、機器停止時のプラント状態変動を最小にする配慮がなされているが、補修時の機器停止頻度は多く、プラント停止の起因となるリスクは大きい。このため、設備の熟知に心がけ、例えば、発雷を予測して停電確率の高い時期・時間帯を避けるなど、プラントを止めない体系を構築した。運転及び保修とも一〇年間緊張の連続であったが、無停止

運転を実現した。

設計時に想定しなかった事象への対応など膨大なノウハウが蓄積され、これを整理して商業プラントで活用できるよう体系化に取り組んだ。また、運転方法の改良も継続して実施され、プラント操作の自動化に反映し、運転当初からの重点計画である「運転管理システム」に総合化された。

プラント操作の改良例としては、プラント全体の知見を反映して製品濃縮度を安定して制御する創意性の高い手法を実用化して、科学技術庁長官賞創意工夫功績賞を受賞したものの他に、プラント運転の効率化や品質の向上に寄与したものが多い。

原型プラント無停止運転達成

一九九八年三月、DOP-1は約一〇年、DOP-2は約九年の連続運転を実施して計画の一万七〇〇〇トS WU（分離作業単位）の生産を完了した。この間、再処理からの回収ウランの再濃縮を実施し、定格回転を維持し

ながら天然ウランとの切り替えのため、六フッ化ウランの供給を一時停止した以外無停止で操業を継続し、ホット定格稼働率九九・九%を達成した。

動燃濃縮整理縮小事業に指定

動燃では、一九九五年のもんじゅナトリウム漏えい事故、さらに再処理アスファルト固化施設の火災爆発事故が発生し、動燃改革が必要とされたため、動燃改革検討委員会が設置された。検討結果の一つとして事業の肥大化の弊害が指摘された。ウラン濃縮研究開発は、民間の事業化が実現していることから整理縮小事業に指定され、DOPは三年間運転を延長し、DOP-2は一九九九年一月、DOP-1は二〇〇一年二月に濃縮役務生産を終了した。全運転期間の遠心機故障率はDOP-1が〇・六%/年、DOP-2が〇・七%/年と高い信頼性を示した。この間に設備能力の九三・四%の濃縮役務処理を実施した。

第二節 日本最初の商業プラント六ヶ所濃縮工場

日本初の商業プラントが始動

原燃のウラン濃縮工場（RE）の運転単位は、DPの一・五倍の一五〇トSWU/年で、DPが運転を開始した一九八八年に着工し、四年後の一九九二年四月に最初の運転単位RE-1Aの生産を開始した。その後、運転単位を順次増設し、第一期のRE-1六〇トSWU/年、次いで第二期RE-12の前半四五〇トSWU/年の合計一〇五〇トSWU/年の規模まで拡張した。なお、RE-2後半の四五〇トSWU/年は、主に原燃とウラン濃縮機器（UEM）が開発していた高度化機を導入することで計画された。REが生産開始してまもなくの一九九二年七月、再処理事業会社日本原燃サービスと日本原燃産業が合併し日本原燃が発足した。

ウラン濃縮工場の建設・操業

原燃による六ヶ所ウラン濃縮工場の遠心機は、DOP-2と同仕様で、UEMの仙台工場、DOP-2と同じ製造方法、品質管理で製作された。運転単位が一・五倍となっているので、年間遠心機製造量も一・五倍となるが、一部を補強して従来設備能力に対応した。プラント主要機器類はDOP-2を踏襲し、これら設備の設計、建設エンジニアリングはUEMが担った。写真5.4にプラント全体を図5.2にプラント概念を示す。

RE-1Aの建設の最終試験として、無停止運転の重要要素である、停電により減速状態に入った遠心機を再起動する「停電再起動試験」を実施したが、遠心機を駆動する高周波電源に異常が発生し、遠心機が停止し再起動に失敗した。

停電が長引くと、遠心機は完全に停

止し、これを再度起動して定常の生産状態に持ち込むまでに長時間を要するため、生産効率が低下する。一方、六ヶ所村ほか日本のほとんどの地域での停電時間の実績は短時間で、この間の遠心機の回転数低下もわずかなため、遠心法プラントでは、停電時に



写真 5.4：日本原燃六ヶ所ウラン濃縮工場(日本原燃提供)

においてもUF6の供給を継続し、復電すると遠心機の回転数を定格まで引き上げ生産を再開する設計としている。この一連の作業が停電再起動であるが、今回の停電再起動試験では、駆動高周波電源が故障し遠心機は停止に至っている。その後も同様な現象が起きたが、対策を施し生産を開始した。

しかし、DOP-2遠心機とほぼ同じ生産ラインで製作されたRE-1Aの遠心機がDPに比べ早期に停止する現象が現れた。当初、運転初期の停電再起動に失敗したことが原因との検討も行われたが、明確な相関は見いだせなかった。

原燃、UEM、動燃で故障の時系列統計分析、試験片の表面分析など多大な労力を傾注して原因調査が実施された。最終的には、RE-1A運転停止後に三一台の遠心機の分解調査が実施された。分解遠心機の詳細観察、原燃内のホット施設内で高度な分析や詳細な製造工程調査、主要因の再現

性試験などによる原因究明が行われた。

原燃は二〇〇二年に、遠心機下部部品の製造工程における洗浄工程の変更起因して、ウラン化合物が回転胴下部に偏在して付着し、これによりアンバランスが発生して遠心機が早期に停止したとの原因調査結果をまとめ公表している。

洗浄工程は、RE-Aに引き続き製造されたRE-1Bの製造中に、最初に変更されたのは異なる工程で変更が行われた。この際UEMは、品質保証計画書に従い変更による品質への影響のレビューを実施し問題が無いことを確認している。当時は、この変更による遠心機停止原因を除去するプラスの効果までは認識できていなかったが、後の停止原因調査で、この変更により、最初の洗浄工程の変更による負の影響が除去されたことが判明した。このため、以降に製作されたRE-1D遠心機は、DOP-2を凌ぐ低い故障率を達成している。原燃

は二〇〇八年二月に、RE-2Cを計画停止し、約一六年間にわたる金属胴遠心機プラントの操業を完了した。

リプレース

原燃は二〇〇〇年に開発を開始した高性能の新型遠心機をRE-2Aの一部をリプレースし、二〇〇一年に三七・五t SWU/年のカスケードの慣らし運転を開始した。複合材料を用いたこの新型遠心機のルーツは、米国が一九七四年に発表した遠心機開発計

画を契機として開始されたジャンボ機開発に遡る。

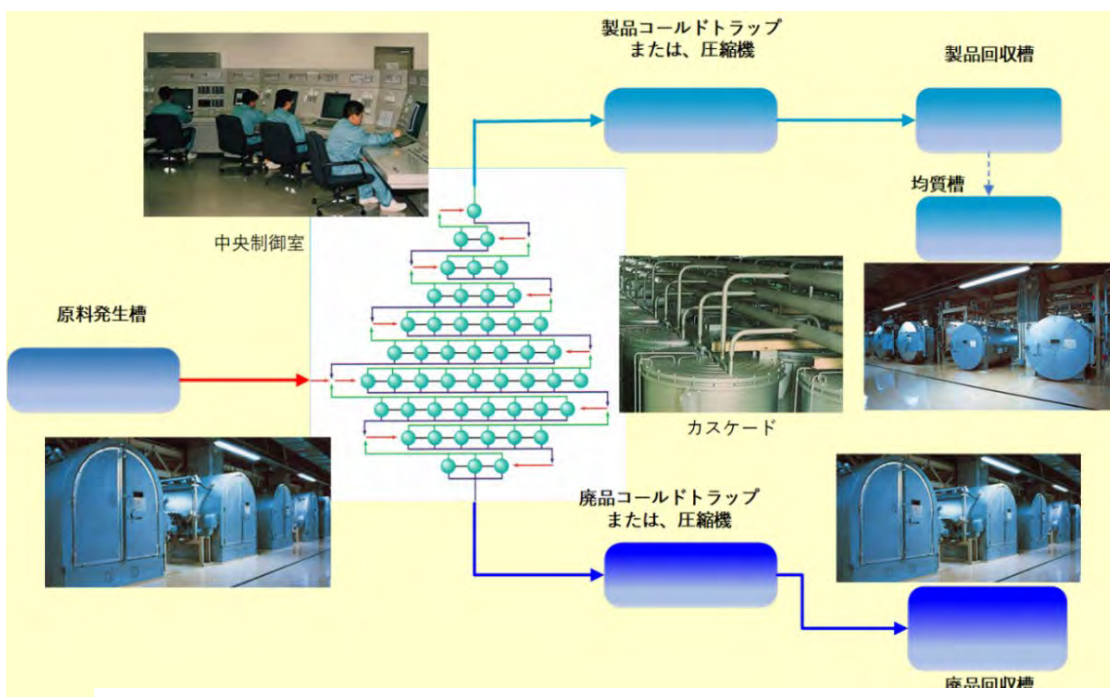


図 5.2：ウラン濃縮プラント概念図(写真：日本原燃提供)

第六章 世界最高峰技術への挑戦

第一節 ジャンボ機の開発

息を吹き返した米国遠心機

一九七四年四月、米国原子力委員会（AEC）は、民間濃縮工場と電力会社とが共同で一九七〇年代後半までに遠心法の実証工場を建設し、一九八〇年代中ごろまでに競争力のある濃縮工場に拡張する計画を公表した。この時、フランスはガス拡散工場の建設を開始し、ヨーロッパ三国によるユレシコは、遠心法の実証工場の建設を開始してアメリカによるウラン濃縮の寡占状態から脱却しようとして努力していた。日本では、ナショナルプロジェクトが開始され、最初のカスケード試験装置C-1が完成した時期である。米国の遠心機は、マンハッタン計画で終焉したと考えていた日本の濃縮関



写真 6.1：アメリカジャンボ遠心機の実証試験装置(CPDF) 1982年 DOE 資料

係者は大変驚いた。しかも当時、想定もしていなかった大型の遠心機らしいということであった。後のアメリカの情報開示により判明したことであるが、この遠心機は、ソ連の遠心機をアメリカで再現したジッペの小型遠心機の流れを汲むもので、その後も開発を続け、回転胴材料開発の進展に合わせ大型化し、直径が約六〇センチ、長

さが約一二メートルの回転胴を高速で回転させるもので、既にパイロットプラントの運転を開始していた（写真6.1）。

当時、日本ではこのような情報は入手できず、いろいろ検討したが、実際のところは分からなかった。ウラン濃縮の国際競争が始まったこの時期に、アメリカが投じた一石の波紋は大きく、日本においては、開始したばかりのナショナルプロジェクトの開発方針の妥当性を評価する観点もあって、動燃は大型の遠心機、ジャンボ機に着手した。

少数で始めたジャンボ機開発

この時期は、開発に投入できる人的資源には限界があり、動燃濃縮内の各専門分野一名、メーカーの専門研究者も合計で二、三名が参加する少人数グループで開発が始まった。開発目標

とする遠心機性能は、当時の日本の最新鋭機の数十倍と想定されるアメリカの遠心機性能なみとしたが、これを実現する遠心機は、高周速・長胴となるため、回転胴は大型で高周速に耐える複合材料製とする必要があった。ナショナルプロジェクトのカスケード試験装置C-1カスケードの遠心機の回転胴材料は複合材料が主であったが、回転胴材料として安定性が不足したため、次のC-2カスケードからは、金属胴が採用され、以降、これを高度化して実用遠心機に至っている。

このため、ジャンボ機開発では、複合材料設計、構造設計、長胴スーパークリティカル技術（第一章参照）、超高速流体解析など基礎的で、これまでほとんど取り組まれてこなかった未知の分野に取り組む必要があった。しかも、予算は限られていたので、遠心機

製造以外の大部分は動燃内で実施した。構造設計の例では、当時有限要素法と言われる数値解析が航空機などで適用されていたものの、現在、世界的に有名な汎用ソフトNASTRANは日本に導入されたばかりで、しかも、複合材回転胴の構造解析に必須な計算ルーチンは未開発で組み込まれていなかった。そこで、複合材回転胴に特化した有限要素法解析ソフトを製作して回転胴構造設計を実施した。このソフトは現在でも有効に活用されている。振動解析は、日本国内でも利用され出した新たな解析手法を適用し、実用化して使いこなした。複合材料の構造設計には、材料の物性値（強度などの特性値）が必要となるが、物性値自身が構造によって変化するため、当時の学界の第一人者にも参加いただき、実用的に物性を求める体系を構築したことは、このプロジェクトを推進できた大きな要因となった。また、回転胴製造技術は、構造設計と一体で開発する必要があることから、特

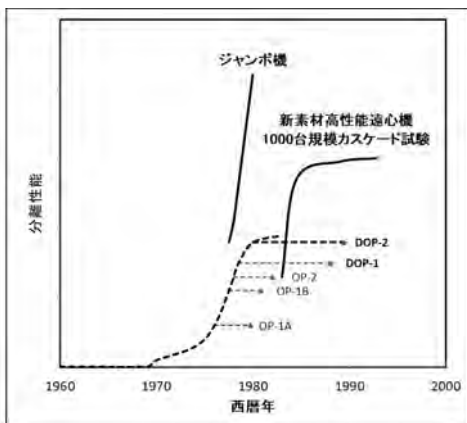


図 6.1: 遠心機性能の推移とジャンボ機性能

定総合研究に参加した住友電工及び石川島播磨重工が参加した。回転胴以外の軸受け、モーターなどの主要部品もこれまでの設計法や製作法では対応できず、ほとんどは基礎試験から実施した。設計法及び要素技術開発と並行し、回転胴長さを順次長くして遠心機を製作し、ウラン濃縮試験を実施した。開発開始から五年の一九八〇年には、このうち運転開始する原型プラントDOP-2遠心機の二倍を越す濃縮性能を得て、開発目標達成が見通せる状況に至った(図 6.1)。しかし、試験機が大型になるにつれ製作に時間

も費用もかかり、試験条件の変更などにも長時間を要し、要員不足も顕著となって目標達成に長期間を要する見通しとなった。そこで、これまでの技術を活用し、原型プラント並みの小径遠心機を高周速で回転させ高性能化した遠心機の経済性評価を実施したところ、小型の複合材料胴遠心機が大幅に有利との評価結果が得られ、開発方針を転換した。

小径遠心機開発への方向転換

一九八〇年、ジャンボ機の技術成果を活かした小径、高周速化遠心機の開発が始まった。

遠心機性能は、原理的に回転周速の四乗と回転胴長さに比例するので、周速は性能向上の最大の要素となる。ここで、周速は回転胴の半径と回転数の積なので、同じ周速であれば、半径が小さいほど回転胴材料も半径に比例して減少し、据え付け面積も低減するなど多くのメリットを有している。これが、開発方向をジャンボ機から小径

機に変更することで経済性の向上が見込める大きな要因である。しかし、同じ周速を得るためには回転数を高くする必要があるので、回転胴の共振点を多く超すなど、振動制御は困難となるが、回転胴構成要素の形状などを工夫し、この問題を解決した。

一九八五年三月に、ウラン濃縮を実施する日本原燃産業(原燃)が発足し、商業プラントにおける金属胴機の後継遠心機に関しても検討が行われた。アメリカは原子レーザー法の研究開発を進め、三〇〇〇機が据え付けられていたポーツマス遠心法濃縮工場の建設を中止し、原子レーザー法を経済性で有利と判断し次期濃縮法として選択した。原燃発足から三か月後のことであるが、原燃は金属胴機の後継を、堅実な技術として複合材小径機の開発に期待した。

電力との共同研究の開始

一九八六年、動燃、電気事業者及び原燃による複合材料小径機、新素材高

性能遠心機（新素材胴機）の五年間の共同研究が始まった。

原型プラントにおいては、動燃から遠心機メーカーへ直接技術内容の移転を行ったが（第五章参照）、この共同研究は、金属胴機の後継機としてウラン濃縮工場の経済性の向上を目的としていることから、当初から電気事業者及び原燃を直接的技術移転先として開発が進められた。具体的には、原燃が技術ホルダーとしてメーカーなどの協力を得て濃縮工場を建設・運営すること、電気事業者は、技術内容を把握して経営に反映することを目標とした。このため、動燃、電気事業者及び原燃の副理事長、副社長クラスの委員会、さらには部長、課長の各クラスの階層による委員会で計画の確認、開発結果の評価などを実施した。また、原燃が採用したプロパーを動燃が受け入れ開発現場で研修を行った。

開発技術者と委員会メンバーは、お互い言語が異なるかのごとくコミュニケーションに苦労したが、難題な技術課題への対応を行うにつれ連帯感が生じ、技術面だけでは進まないこの共同研究を遂行できた要因ともなった。また、各年度の共同研究報告書の内容は具体的で、キングファイル数十冊にまとめられ、共同研究者に配布された。遠心機の技術としては、構造、振動、分離流動に関する目標をほぼ達成した。しかし、複合材料は樹脂を使用しているため、力を加えると徐々に変形するクリープ特性を有しており、これにより一〇年以上の信頼性が問題となった。特に未知な領域の現象であることから、解析、材料試験、要素試験、実機試験、長時間試験などを実施して、これを解決した。共同研究は、研究期間を一年間延長して、当初計画になかった実用工場に据え付ける集合機を製作し、総合的な信頼性を確認して、これらの成果を人形峠事業所で実施するカスケード試験に反映した。

第二節 激流に乗り上げた複合材料胴開発

実用規模カスケードでの

実証試験

一九八九年、原子力委員会は、新素材高性能遠心機（新素材胴機）の共同研究成果を踏まえ、一〇〇〇台規模の実用規模カスケード試験装置による実用化の実証を行うこと、この試験装置を動燃人形峠事業所の既設のパイロットプラントの遠心機を入れ替えて設置することを決定した。金属胴機は、七〇〇〇台のパイロットプラント、二〇〇〇台のSWU（分離作業単位）/年の原型プラントの過程を経て商業化されたが、実用規模カスケード試験装置は、これまでの開発経験とカスケード解析などの設計法の進展により、一〇〇〇台程度の試験で商業化が可能との見通しを得るに至った。また、原型プラントでの製造技術の体系化も進んで、この規模の製造経験で商業

プラント時の量産体制が確立できる見通しであった。遠心機は、発注者が原燃産業（原燃）でウラン濃縮機器（UEM）が受注して製作した。このため、品質管理は原燃が行うこととなるが、自ら実施した経験がないことから、開発の最終段階の三〇台からなる集合機の製造要領及び品質管理要領がそのまま適用できる部品は原燃が管理し、それ以外の部品は動燃が協力した。回転胴は、新素材胴機の共同研究開始まもなく、住友電工と石川島播磨重工が設立した回転胴製造会社、日本複合材料（NCM）が製作した。NCMは、通商産業省の補助事業で回転胴の量産技術を確立し、UEMは量産製造設備を仙台工場内に整備して、最終組み立てなどを実施した。

一九九三年四月動燃人形峠事業所でカスケード試験が開始された（写真6.2）。回転胴が複合材であることから、

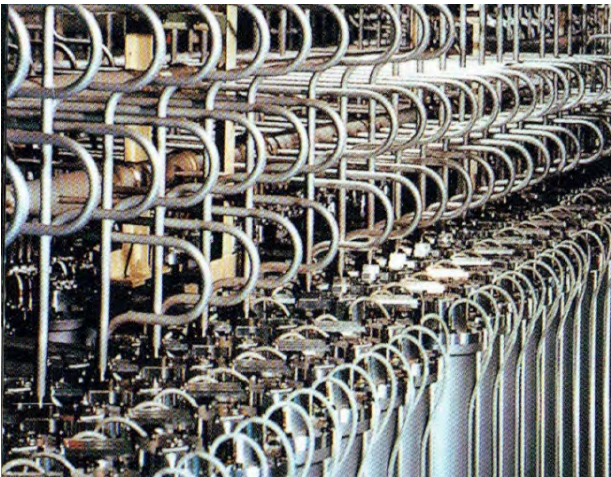


写真 6.2: 実用規模カスケード試験装置、日本原子力研究開発機構提供)

遠心機を定格回転数まで昇速する遠心機起動試験は、金属胴機のそれと全く異なり、遠心機の長期信頼性にも影響を与えるため、解析ソフトと起動時データを突き合わせながら実施し、商業プラントで安全に起動できる要件を確立した。

実用規模カスケード試験装置は理想カスケード(第四章参照)ではあるが、遠心機が最大の性能を発揮できるカスケード構造として上、高周速化により六フッ化ウランの流動条件

が厳しくなっているため、カスケード解析による予測と実データを慎重に照合しながら、六フッ化ウランを定格流量状態に持ちこむカスケード起動試験を行った。

この実用規模カスケード試験は、信頼性評価のためには二年以上の累積ホット運転時間の実績が必要との原燃の要請により、当初の試験期間を一年延長して一九九六年度末まで試験を行い、この間一台の故障停止もなく高い信頼性を確認して商業プラント導入の技術的見通しを得た。

影響を受けた九〇年代の 社会環境変化

原型プラント建設が決まった一九八一年における二〇〇〇年の国内濃縮ウラン需要予測は、一〇〇万キログラム原子炉一〇〇基分に相当する一万二〇〇〇トSWU/年であったが、実用規模カスケード試験装置建設中の一九九二年の原子力委員会ウラン濃縮懇

談会(92ウラン懇)時の需要予測は六〇〇〇トSWU/年と半減した。

一九七三年に起きた第一次石油危機において、日本は脱石油の方策として原子力開発を推進し、遠心法においてはナショナルプロジェクトが始まった一九七九年の第二次石油危機時には、学習効果もあり省エネルギー化が進み、一〇年間でGDPが約一・七倍増加したにもかかわらずエネルギー需要量は変わっていない。

パイロットプラント建設が進んでいた一九七九年にアメリカのスリーマイル島原子力発電所(原発)で炉心溶融事故が発生した。この事故は直ぐには日本の遠心法開発には影響を与えず、原型プラントはこれまでの延長線での需要予測を見込んで開発を進めている。その後、原型プラント工事中の一九八六年の当時旧ソ連のチェルノブイリ原発事故の影響は大きく、原発の立地決定が困難となり、濃縮ウラン需要も低迷した。

ウラン濃縮をめぐる国際環境の変

化も日本の開発に影響を与えた。アメリカは、ガス拡散工場の改良工事を一

九八一年に完了し寡占状態にあったため、役務価格も当初の三六ドル/キログラムSWUから一九八二年には一三九ドル/キログラムSWUまで上昇した。(図6.2)その後フランスのユーロディフ、ユレニコが濃縮工場を稼働し、ユレニコは順次増設を継続していた。このため、アメリカにおいても経済性の向上が課題となり、対応策としてポーツマスに遠心法工場の建設を開始したが、一九八五年に開発を原子レーザー法に切り替えた(第一章参照)。

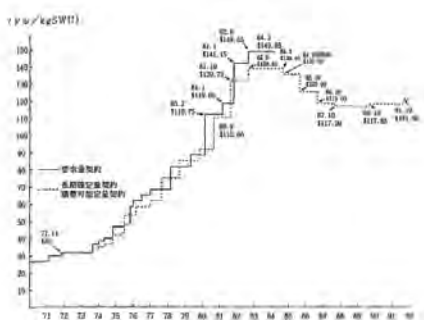


図 6.2: 1992 年当時までの国際役務価格の推移(1992 年度原子力白書より)

日本国内では、原研で実施していた原子レーザー法と連携して電力とメーカーによる研究組合がスタートし、分子レーザー法及び化学法も今後の濃縮事業の経済性向上の手段として検討が行われた。

為替変動の影響も大きく影響した。一九七一年、ニクソン米大統領によるドル・金交換停止に始まり、日本も一九七三年、変動相場制に移行した。遠心法はナショナルプロジェクトが開始された年である。原燃が発足した一九八五年の主要五か国中央銀行、財務大臣による為替相場に協調介入するというプラザ合意により、一ドル二四〇円が三か月後には二〇〇円を、一九九五年には一〇〇円を割り込んだ。このため、原型プラント決定時の一九八一年の米国役務価格は、円ベースで約三万円／キロSWUであったが、一年後の一九九二年にはドルベースの役務価格はほぼ同じで約一・五万円／キロSWUと約半額となり、国内濃縮事業へのコスト低減圧力が強まった。

なお、事業化期待の大きかった米国原子レーザー法は、新規発足したユーゼックがエネルギー省(DOE)から事業化計画を引き継いだ。コスト高を理由に一九九九年、今後遠心法とサイレックス法を開発して事業化する」と発表された。サイレックス法は六フッ化ウランガスにレーザーを照射して分離する方法とされ、後に日立・GEが商業化の独占実施権を保有したが、二〇一六年に商業化プロジェクトからの撤退を発表した。

高度化機の早期導入計画

92 ウラン懇は、原燃に対し民間主導の観点から、主体的に自らの研究開発能力を高めることを求めた。

これを機に、原燃は、UEMが検討を行っていた遠心機をベースに、新素材胴機に対して回転胴構造を簡素化し、回転胴半径を大きくして高周速化し、さらに回転胴も長くして性能を一・五〜二倍とした高度化機の開発に着手した。一九九三年度からは、五年

間の計画で電力、原燃及び動燃の共同研究が開始された。遠心機的设计はUEMが実施し、動燃はウラン濃縮試験で協力した。この高度化機の構造を実現するための要素試験に時間を要するものがあつたが、共同研究期間を延長して課題解決に取り組んだ。

原燃は当初、新素材胴機を六ヶ所濃縮工場の第二期に導入する計画としていたが、その後、第二期の最初の四五〇トSWU/年には、これまでの金属胴機を導入する。新素材胴機は第二期の後半の四五〇トSWU/年に導入し、以降は、既存プラントの遠心機をリプレースして高度化機を導入する計画とした。一方、RE-1Aにおける、遠心機の早期停止の状況が明確となり、濃縮生産能力の低減が早まる見通しとなった。この経営上の課題を回避するため、原燃は、高度化機の開発を大幅に前倒して早期にプラントに導入する加速計画を打ち出した。この計画は、一〇年間の動燃・電力・原燃の共同研究により実用化が可能

となつている新素材胴機のプラント導入をスキップする計画でもあつた。ジャンボ機から小径化して経済性向上を図った新素材胴機と大径化を指向する高度化機の考えの違いなどが議論されたが、経済性の評価を含め原燃の主体性を尊重する観点もあつて加速計画は採用された。

しかし、開発期間は延伸方向にあり、さらに遠心機下部部品の耐食性の問題が新たに発生した。動燃を改組した核燃料サイクル開発機構人形峠事業所の高度分析装置を駆使して原因究明に取り組んだが、課題の難しさがより鮮明となり、解決に長期間を要する見込みとなった。

原燃は一九九八年にUEMと原燃マシナリーを設立し、開発の主体性を強化を図った。原燃マシナリーは、既に金属胴機及び新素材胴機の製造設備を廃棄しており、高度化機の開発がこれ以上滞ると、導入する遠心機がないという経営上の重大危機に直面するおそれがあつた。

第三節 世界最高峰技術開発に挑戦

民間主導の開発方針と

動燃の対応

一九八九年、原子力委員会は動燃人形峠事業所における一〇〇〇台規模の実用規模カスケード試験の実施を決めると同時に、一九九一年度以降の研究開発は「民間が主導し、動燃は基礎的・基礎的及び先導的研究開発（基礎的研究開発）を行う」との方針を示した。しかし、一九九〇年度の基礎的研究開発は、少額の調査費が認可されたのみであったので、動燃内関係箇所による検討会が設置され、次年度予算要求に間に合うよう短期間で詰めた検討が実施された。

まず、基礎的研究開発は、民間にとって魅力的と思われる世界最高峰の遠心機を提案することを目標とした。当時、ユレンコは、供給過剰のウラン濃縮市場にあって、遠心機の高性能化により事業規模の拡大を目指して第

四世代機を商業化し、さらに高度な第六世代機の開発を行っていた。そこで、推定した第六世代機の性能を凌ぎ、稼働中の金属胴機の四〜五倍の先導的高性能機（先導機）の研究開発を行うこととした。回転胴の周速、直径など幅広くパラメータサーベイを行い、直径は従来の小径胴を踏襲して、高速化、長胴化により目標性能を達成することとした。この方針は、実用規模カスケード試験用遠心機の製造設備及び製造技術を活用して研究開発を促進できるメリットを有していた。これらの検討結果を予算申請し、認可されて一九九二年度から約一〇年間の基礎的研究開発が開始された。

先導機の開発

最新の複合材料を用いた世界最高峰技術への挑戦が始まった。回転胴構造設計は、これまでの新素材高性能機

時代に比べ精度もあがり限界設計が可能となったため、シンプルで、回転胴の共振点をいくつも超える構造を考案して設計に反映した。高周速に耐える軸受けも実現でき、長い回転胴内の分離流動も比較的容易に最適条件を設定できる構造とした。開発五年目の一九九五年には目標が見通せる濃縮試験結果を得て先導機の実現可能性を示すことができた。

この頃、ユレンコは遠心機に関する新たな情報を発信した。ユレンコは、回転胴の径を変えずに長胴化、高周速化して第五及び第六世代機を開発しており、特に開発の重点を置いた第六世代機のTC 21は基本構造・性能とも先導機と類似していると想定された。

TC 21はその後設計上の問題があったが改良され、日本に先行して二〇〇

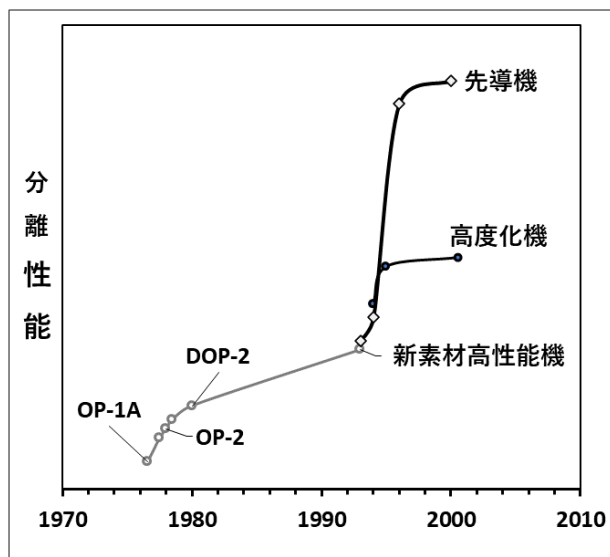


図 6.3: 高度化機及び先導機開発時性能の推移(日本原子力研究開発機構提供)

五年頃に部分的に商業プラントに導入されている。

高度化機と先導機

高度化機及び先導機とも同じ時期に本格的に研究開発を開始したが(図 6.3)、本来競合する関係ではなかった。しかし、早期プラント導入を目指す高度化機は、下部材料の開発などで時間を要することとなり原燃・電力はその開発を断念して、原燃内に開発組織を置いて事業主体自ら先導機技術

を基盤とした開発を実施することとした。

新型機開発基本方針固まる

二〇〇〇年八月、サイクル機構から筆者ほか一名が先行して原燃に出向し、十一月一日に発足する開発組織立ち上げ準備作業を開始した。稼働中の金属胴機プラントを停止するまでに新型機のプラント導入を可能とするよう、開発期間を一〇年とする基本計画とした。詳細検討により遠心機開発には五年が必要とされたので、カスケード試験及びプラントの許認可・建設を五年間で実施できるかを検討し、特に不確定要素の多い許認可への綿密な対応により基本計画の実現を目指すこととした。

遠心機は、製造技術の限界を追求して目標性能や長期信頼性などを実現しているため、開発と製造は一体的なものであった。そこで、原燃が自ら遠心機組み立て及び一部部品加工を行うとともに、中小の専門メーカーの参

加を得ながら原燃が責任をもって製作することで、長期信頼性などの性能を実現する体制を指向することとした。これらは原燃の基本方針として決定された。また、これから開発する遠心機は新型遠心分離機（新型機）とすることも決まった。

ウラン濃縮技術開発センターが始動

が始動

二〇〇〇年十一月一日、六ヶ所事業所内に原燃、メーカー、サイクル機構の技術者が結集して、ウラン濃縮技術開発センターが発足し、ウラン濃縮工場に隣接する研究開発棟を基点として開発を開始した。（写真6.3）

開発は電気事業者と原燃の共同研究としてスタートし、二〇〇二年度からはカスケード試験の実施までを含む国の補助事業が始動した。

開発工程は、一年後に概念仕様、三年後に基本仕様、五年後に最終仕様をとりまとめ、六年目にカスケー



写真 6.3：研究開発棟。日本原燃提供

ド試験装置の建設、翌年からカスケード試験装置の建設、その翌年からカスケード試験を実施するものとした。このマイルストーンごとの自己評価に合わせて、共同研究者である電力による技術評価が実施され

た。これによる負荷は大きくなるが、円滑な事業化判断のためには、重要な手順であり、技術経営（MOT）においても開発成果の価値を高める有効な手段とされている。

補助事業は、経産省の核燃料サイクル技術検討小委員会が開発の評価を実施したが、核不拡散上の機微情報管理の観点から、委員会の下に非公開のウラン濃縮技術評価ワーキンググループが設置され、機微情報を含む開発成果の評価が実施された。

新型機開発

長期信頼性に関しては開発の最初から重点的に取り組んだ。高度な分析装置を導入し、六フッ化ウランとの反応メカニズムを追求して信頼性評価に反映した。学会の第一人者の協力を得て材料特性試験方法の開発から取り組み、複合材料回転胴の長期信頼性見通しを得た。回転体を破損させて実施する大規模な安全性試験は、六ヶ所の試験施設内で実施された。耐震性に

関しては、外部から隔離されている民間の大型加振施設を借用し、原燃技術者が加振しながらの回転試験を実施して日本ならではの高耐震性遠心機を実現した。時間のかかる分離流動性能試験の把握は、解析を活用することにより試験期間の短縮が図られた。安定した回転特性を得るためのバランスングは、開発の初期から商業プラント導入を想定した技術開発が実施された。

最終仕様取り纏め段階でカスケード試験計画が検討された。当初の一年間での試験装置建設は研究費が突出して大きくなるため、建設を二年間で実施する案が検討されたが、経産省の担当企画官は、関係各所を説得して一年間で建設する予算を獲得した。これを受けカスケード試験装置の建設・試験を実施して、商業プラントのカスケード設計法を確立し、遠心機量産技術も進展させた。



写真 6.4：日本原燃のウラン濃縮機器製造施設図(日本原燃提供)

小規模から開始した

商業プラント

原燃は、カスケード試験計画が決まると、一運転単位の四分の一の規模で新型機プラントの事業化を開始する計画を電力などに提示し、了解を得て、商業化の準備が始まった。

六ヶ所村の製造施設は、既存施設を大幅に増設し二〇一〇年四月に遠心機製造を開始した(写真―6.4)。



写真 6.5：新型遠心分離機カスケード(日本原燃提供)

プラントはRE-2Aをリプレースすることとし、二〇一〇年三月に着工したが、二〇一一年三月東日本大震災が発生した。仙台地区で工場が流され廃業せざるを得ない協力会社があったが、技術を移転し他の協力会社で部品の製作を継続した。六ヶ所工場では最初のカスケードの据え付けを終了していたが、東北地方の電力共有状態が正常に戻るまで時間を要し、開発開始時に設定した計画より約一年遅

れて一二年三月に三七・五t SWU(分離作業単位)／年の生産を開始し、一三年五月には次の三七・五t SWU／年の稼働を開始した(写真 6.5・6.6)。その後、順調に生産運転を継続したが、一七年九月、新規制基準に適合させるための安全性向上工事等のため、二〇一七年九月から自主的に生産運転を一時停止している。(二〇二〇年一〇月時点)



写真 6.6：日本原燃のウラン濃縮工場の中央制御室(日本原燃提供)

あとがき

ウラン濃縮技術開発は、機微技術を取り扱うため、公開情報が限られ、公開されても歴史情報としてはとぎれとぎれで連続したものとはなっていない。このため、ウラン濃縮技術開発及びウラン濃縮事業の歴史面からの評価が困難であるほか、開発に参加した方々にとっても自らの歴史であり、人生の軌跡でもある記憶が薄れるなどの課題があった。そこで、今回、公開情報を再収集するとともに、不連続な歴史情報を可能な限り探索して、遠心法による同位体分離の始まりから、日本原燃株式会社のウラン濃縮工場の現状までを連続した情報としてまとめ上げることができた。

この自主技術開発歴訪ウラン濃縮遠心法は、柳澤務元核燃料サイクル機構理事の並々ならぬご尽力でエネルギーレビュー誌への連載を開始でき、無事終了することができた。また、エネルギーレビュー誌として少し毛色の異なる記事にもかかわらず連載を許可いただいた長田高社長はじめエネルギーレビュー誌のスタッフの皆様にお世話になった。元動燃の上司である玉井浄氏、この連載の冒頭でもご紹介した日本で最初に遠心法ウラン濃縮を成功させた齋藤健彌氏にはこの連載のはじめから相談に乗っていただき、貴重な歴史情報もいただいた。この連載においては共著も念頭に置き、日本原子力研究開発機構の山口大美氏、柏崎博氏、堀江靖氏、杉杖典岳氏、日本原燃の鈴木靖俊氏、佐々木等氏には技術情報の取りあつかいなども相談に乗っていただいた。このほか多くの方に多面的なご支援に支えられて一年四カ月にあたる連載を終えることができた。また、この度、エネルギー問題に発言する会のホームページへの掲載のお話を頂き、これを機に各記事を統合することができた。

今回は、既に公開になっている情報をもとにとりまとめを行ったが、海外の情報開示が進んでいる部分もあり、関係者とも相談しながらより広く、または深く歴史書を充実することに組み組みたいと考えている。

(二〇二一年六月五日)