

JAERI-Review

97-018



中国における使用済み核燃料再処理技術開発の経緯

1998年1月

館盛 勝一

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 ニッセイエプロ株式会社

中国における使用済み核燃料再処理技術開発の経緯

日本原子力研究所東海研究所燃料研究部

館盛 勝一

(1997年12月2日受理)

本報告書は、隣の核大国である中国における使用済み核燃料再処理技術の開発の経緯を纏めたものである。その内容は、初期における旧ソ連からの技術導入による沈澱法の検討、ピューレックス法への転換、パイロットプラントの建設、軍事用再処理工場の建設、運転、そして発電炉燃料の再処理技術開発などである。

ここでは、読者の理解に役立てようと、清華大学朱教授の記念講演等いくつかの参考資料も後に追加した。

**Historical Overview  
on the Development of the Reprocessing Technology in China**

**Shoichi TACHIMORI**

**Department of Chemistry and Fuel Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken**

**(Received December 2, 1997)**

**This review report describes a historical story of the development of the reprocessing technology in China, one of the Nuclear Biggests.**

**The main items included are, precipitation method introduced from former Soviet Union in the beginning ages, change to the Purex solvent extraction process, construction of Pilot Plant, construction and operation of a large scale Military Reprocessing Plant, and development of reprocessing technology for power reactor spent fuel.**

**Some reference materials, such as commemorating lecture by Prof. Zhu of Tsinghua Univ. etc., are appended in order to enhance the reader's comprehension.**

**Keywords : Spent Fuel Reprocessing, China, Precipitation, History, Solvent Extraction, Purex Process, Pilot Plant, Military Plant, Power Reactor Fuel, Soviet Union**

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 使用済み核燃料再処理技術開発の経緯 .....	2
2.1 序 論 .....	2
2.2 再処理工程の選択 .....	3
2.2.1 沈澱法による研究・開発の開始 .....	3
2.2.2 抽出法に関する先駆的研究 .....	4
2.2.3 沈澱法から抽出法への重大決定 .....	5
2.2.4 小規模ホット試験の並行実施 .....	6
2.2.5 パイロット規模のコールド試験 .....	7
2.3 パイロットプラントの建設と運転 .....	8
2.3.1 重要な段階 .....	8
2.3.2 全国的協力による建設促進 .....	9
2.3.3 波乱と曲折の中での成功 .....	10
2.3.4 パイロットプラントの目標実現 .....	10
2.4 軍用再処理工場の建設と発展 .....	11
2.4.1 建設過程 .....	11
2.4.2 建設の時代 .....	12
2.4.3 大慶（油田）を学び、“六好”企業を創造するキャンペーン .....	14
2.4.4 技術革新と改良 .....	15
2.5 動力炉燃料の再処理研究 .....	17
2.5.1 新しい情勢と新しい任務 .....	17
2.5.2 早期の準備 .....	18
参考資料1 ウラニル酢酸塩沈澱法による再処理工程の概要（ソ連版） .....	22
参考資料2 世界的な再処理関連の出来事（年代表示） .....	23
参考資料3 清華大学朱教授の講演（原文は後に添付） .....	24

## Contents

1. Foreword .....	1
2. Development of the Reprocessing Technology of the Nuclear Spent Fuel .....	2
2.1 Introduction .....	2
2.2 Choice of the Technology for Spent Fuel Reprocessing.....	3
2.2.1 Starting with Precipitation Method .....	3
2.2.2 Pioneering Researches on Solvent Extraction Method .....	4
2.2.3 An Important Decision to Change Precipitation into Extraction Method .....	5
2.2.4 Hot Test on a Small Scall .....	6
2.2.5 Engineering Cold Test on a Pilot-plant Scale .....	7
2.3 Construction and Operation of a pilot Plant .....	8
2.3.1 An Important Step .....	8
2.3.2 Making Concerted Efforts to Rush-build the Plant .....	9
2.3.3 A Tortuous Course .....	10
2.3.4 The Realized Purpose for Building the Plant .....	10
2.4 Construction and Development of the Reprocessing Plant for Military Use .....	11
2.4.1 Construction Process .....	11
2.4.2 In the Days of Rush-building .....	12
2.4.3 Learning from Daqing, Grasping Readjustment and Creating "Six Good" Enterprises .....	14
2.4.4 Going in for Technical Innovations and Reforming in a Big Way .....	15
2.5 Researches on the Fuel Reprocessing for Power Reactors .....	17
2.5.1 New Situation and New Task .....	17
2.5.2 Being Ready Beforehand .....	18
Reference 1 Conceptual Reprocessing Flowsheet Based on the Uranyl Acetate Precipitation (Developed in Former Soviet Union).....	22
Reference 2 A Chronical Description of the Epoch-making Events Relating to the Reprocessing World .....	23
Reference 3 Lecture by Prof. Zhu Yongjun Commemorating 30th Anniversary of the Foundation of Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University.....	24

## 1. はじめに

「外国における技術開発の歴史的経緯を調べることなどは、歴史家にまかせれば良い」という意見があるかもしれない。が、原子力開発がグローバルなスケールで進められている今日、我々が付き合っていく相手が、いかなる歴史的背景（科学文化）と経験を持っているのかを十分に理解していることは、極めて重要だと思う。例えば、相手国が外国技術の導入のみに依存しているならば、学術的・技術的に共同研究を行う価値は減じるであろう。

我が国での開発経緯はもちろんのこと、米国（マンハッタン計画）や、英国、フランス、ドイツ、スウェーデン等における原子力開発の歴史的経緯については、公開された資料によってある程度は知ることが出来る。ところが、旧ソ連や中国、インド、イスラエル等のそれは秘密（情報不足）の部分が多く、理解は極めて困難である。ソ連解体以来、ロシアの核開発情報が溢れるように出始めたため、間もなくソ連における開発の全貌は知ることが出来るであろう。他方中国は、アジアにおいて核燃料サイクルの技術開発を独力で行ってきた興味深い核大国であるが、その内容は以外と知られていない。

10年前（1987年）到北京で出版された『当代中国的核工業』（今日の中国における原子力工業という意味）という書物には、ほぼ原子力の全分野について中国における開発経緯が記されている。中国語に通じていない私は、多分、誰かが訳してくれるだろうと期待していたが、10年を経た今日でも翻訳本は見当たらない。

以上のような状況のもとで、中国語の読み方も知らない私だが、少なくとも、私の専門分野である核燃料再処理について記載された上記図書の第11章「照射燃料の再処理」（pp 216～243）の内容について、概要だけでもなんとか理解したいものと考えた。幸い、東海研究所に滞在中の中国からの研究者の支援も得て、一応の概略が理解できるようになった。そこで、私なりの解釈を加えつつ、本レビューを著すこととなった次第である。

また、読者が理解し易いように、いくつかの資料も挿入した。例えば、我々はリン酸トリブチルを用いる Purex 法再処理については十分な知識を持っている。一方、「沈殿法」については、ハンフォードで行われたリン酸ビスマス法以外、本稿で触れているソ連で開発された方法については（中国では極めて批判的に述べられているにも拘わらず、機密扱いである！）あまり知られていない。様々な文献を当たった結果、【酢酸アクチニルの Na 塩結晶の沈殿を利用する方法】であることが解ったのでフローシート概要を挿入した。また、Purex 抽出工程の技術開発において中心的役割を果たした清華大学の朱教授の講演原稿も翻訳文と原文を添付した。

## 2. 使用済み核燃料再処理技術開発の経緯

### 2.1 序 論

核燃料は、原子炉内において核分裂反応による“燃焼”の後、その物理的・化学的特性が変わる。ある程度まで燃やされる（通常は“燃焼率”で表示される）と、燃料中に含まれた核分裂性物質の量は顕著に減少し“貧弱”になる。一方、核分裂生成物の中の中性子を多く吸収する核種（中性子毒物と呼ばれる）は次第に増えていく。その結果、燃焼した燃料体は原子炉から取り出さなければならぬ。“冷却”即ちその放射線を減衰させ、再度の化学処理を経て、有用核物質は抽出される、この過程を“核燃料再処理”という。

再処理工場は、その工場特性によって一般的に、プルトニウム生産炉用燃料を処理する【軍事用再処理工場】と、動力炉の燃料を処理する【商用再処理工場】の二種類がある。

我が国\*における軍事用再処理工場の重要な任務は、高濃度のプルトニウム-239、そして、天然ウランを抽出することである。工場のプルトニウム製品は核兵器の製造に使用される。ウラン製品は同位体濃縮され、核燃料サイクルを構成する。将来、我が国は、動力炉燃料から抽出される工業用プルトニウムも核燃料製造工場に戻し、動力炉燃料に加工する計画である。このように再処理は、核燃料サイクル鎖の不可欠なステップである。

再処理工程は、一般的に3つの段階を含む。

(1) 冷却工程：原子炉から搬出された燃料は、まず一旦放置されねばならない。その間に、その中のウラン-237はネプツニウムに壊変させ、化学分離で除去し易くする。他の短寿命核分裂生成物は減衰させ、放射能レベルを激減させ、再処理を簡単化する。一般的には、Pu生産炉用燃料はほぼ100日間、動力炉用燃料は1年から3年間以上冷却される。

(2) 前処理工程：ウラン燃料棒の処理をする工程である。通常、Pu生産炉で用いたアルミ被覆製金属燃料の場合は化学法を使用する。アルカリで被覆管は溶解され、また燃料ミートは硝酸で溶解される。動力炉で用いた燃料棒の場合は、機械・化学法で処理する。すなわち、まず剪断機で切断し、硝酸で溶解する。

(3) 化学分離工程：世界各国は普遍的に湿式法を採用し、特に、リン酸トリブチル(TBP)を抽出溶媒として、硝酸を塩析剤とするPurex法を抽出工程に利用することが最も一般的となっている。

第一段階の冷却は、通常、原子炉施設あるいは再処理工場の貯蔵プール内で行われる。他の2つの工程は再処理工場で連続的に運転される。

再処理の二番目の特徴は、(1)使用済み燃料は強い放射能を持っているので、遠

\*以後、これは中国を指す。



隔作業が必要、また防護材料は強い放射線に耐える物を使わなければならない。(2) 臨界事故の可能性があるので、厳しい警戒が必要。(3) 回収される製品は極めて高い純度が要求され、不純物は100万分の1から10億分の1しか認められないこともある。(4) 主要な回収物質の価格は高いので、大きい回収率が求められる。

以上の理由から、再処理工場の建設と運転は投資が大きく、技術は複雑、安全性の要求は大きいのである。

我が国の再処理事業は、1956年から旧ソ連の援助を受けて、沈澱法で発足した。1959年に旧ソ連からの援助が絶えた後、旧ソ連から提供された設計仕様案は継続して検討された。1964年になって沈澱法は中止され、より先進的な抽出法が採用された。1968年9月、再処理パイロットプラントが建設された。1970年4月には、軍事用再処理工場の運転が始まった。その後、動力炉燃料と研究・試験炉用燃料の再処理に関する研究と開発が進められた。

我が国の再処理工場は、選定された工程技術、オンライン分析技術、化学試薬の消耗水準などにおいて、世界の先進的レベルに達する。だが、ある設備、計器、自動制御システムと点検方式などは、世界の先進レベルに比べてまだ一段格差がある。我が国の軍事用再処理工場の永年の運転経験、そして、動力炉燃料再処理についての予備的研究は、中国の原子力発電事業に良い基礎を築いた。

## 2.2 再処理工程の選択

### 2.2.1 沈澱法による研究・開発の開始

1956年、我が国の再処理事業が始まった。

1957年前後には、計画書の策定と、工場敷地の選定を進めた。

1958年1月30日、我が国の軍事用第一再処理工場を、甘肅省酒泉市内“酒泉原子力連合企業”内に建設することが決まった。それと同時に、原子力工業設計院や、中国科学院原子力研究所などに多くの再処理研究室が相継ぎ設置された。それ以前には、清華大学、北京大学に、放射化学工学と放射化学専門科が創設されていた。

1958年8月以来、旧ソ連から派遣された専門家たちが、我が国のこれらの研究所や大学に滞在した。核工業省設計院（北京核工程研究設計院という）は、少し前の1958年4月に、最初の設計に参加するため、14人のグループを旧ソ連へ派遣している。同年の年末には、旧ソ連の関係部門は設計仕様書を提案し、1959年の始めに、最初の設計案が中国へ送られた。

旧ソ連の提案は沈澱法だったため、全工程は長く、工場も大型化し、特にステンレス鋼の使用量は～数万トンであった。さらに、回分式であったため極めて不便かつ廃液量も非常に多く、製品の回収率も低かった。だが、この時期、旧ソ連から送られてきた設計書類は、全体で8個あるサブ項目の施工図の20%が不足しており、ウランとプルトニウムの分離用工場の設計はまだ始まっていなかった。1960年8月22日、核工程設計院で作業していた旧ソ連の専門家達は、突然、全員撤収し、設計資料等の供給も停止された。その結果、設計院は“自力更正を徹底する”という方針を採択せざるを得なかった。旧ソ連原案に対する145項目の試験を原子力研究所に要請すると共に、原案の再検討も要請した。この間、原子力研究所の再処理研究室では、人員の増加や施設の改善を行った。同研究室では、劉允斌氏；放射化学専門家の統括で、沈澱プロセスの化学条件の検証や、プルトニウムの核分裂生成物からの分離、分析に関する基礎理論の研究を行った。1962年3月、この研究室の室員たちは、初めて、使用済み燃料から人工放射性元素のプルトニウムを分離回収し、研究の需要を満した。その期間、沈澱法研究に参加したのは、中国科学院長春応用科学研究所、北京化学研究所第二部、上海有機化学研究所と華東化工学院（上海市内）などである。

旧ソ連原案には、作業量が多い、技術的に困難な部分が多い、そして材料（ステンレス鋼）消耗量も多いなどの欠点があったため、劉允斌氏らはまず、小規模パイロットプラントを建設することを提案した。この提案はすぐに核工業省に認められた。1963年前半、パイロットプラントの設計案の検討が始まった。同年8月、沈澱法の技術的問題点を徹底的に解決するための技術検討会議が長春市で開催された。会議の間に、沈澱法は時代遅れであるとの認識が全体に広まった。しかし、数年にわたり沈澱法に従って開発を進めてきたことから、清華大学を除く全研究所は、沈澱法の設計を続ける事が決定された。なお、1963年年末、核工業省に“核燃料再処理攻関指導組”が設置された。

ところで、沈澱法に基づくパイロットプラントは設計のみとなり、実際には建設されなかったが、技術者達の研究や設計などの総合的教育訓練において有意義であり、その後の抽出法によるパイロットプラント建設のための有用な基礎を築いた。

### 2.2.2 抽出法に関する先駆的研究

1955年と1958年、国連はスイスのジュネーブにおいて原子力平和利用国際会議を開催した。この会議の論文集と、その直後米国で出版された《Reactor Handbook vol. II 核燃料再処理》（第2版）及び、各国の原子力機関により編纂された報告書類（米、英、仏など再処理文献を含む）が我が国に大量に導入

され、注目された。これらから、世界の再処理開発の流れは、1940年代の沈澱法から1950年代に浮上した溶媒抽出法に転じたことが推察出来た。

1959年1月末、原子力設計院は《抽出技術研究について》という報告書の中で“抽出法による核燃料のリサイクルは、放射化学施設の発展方向に適合している。”と指摘した。“我々は、大規模な抽出技術の研究が当面の緊急な課題と考えている。……放射化学分野で国際先端レベルに追いつくために、抽出法の研究とその工程の設計は極めて重要な意味がある”。それと同時期に、原子力研究所は小規模の抽出、イオン交換と乾式法による高温化学法などの分離工学の研究をした。

抽出法については、清華大学は先駆的に研究を進めていた。

50年代後半から同校の物理学系の放射化学工学研究室と人工放射性元素化学工学研究室（後には全て化学工学系に転入）の室員たちは、汪家鼎教授、滕藤助教授の指導で、抽出技術に関する幅広い実験をしていた。その後、核工業部の統括で協同組合に併合された。参加した室員たちは教師だけでなく、1960年から1965年の間に卒業した学生や研究生（修士課程、博士課程）などもいた。研究テーマは、リン酸トリブチル（TBP：ケロシンで希釈）一硝酸系における、ウラン、プルトニウム、いくつかの重要な核分裂生成物の抽出化学と工学的研究（バッチ式平衡分配比測定と逆抽出試験）；溶媒の選択、前処理と精製方法および抽出過程における放射線分解機構と耐放射線性の研究；小型抽出設備—パルスカラムとミキサーセトラの研究などである。この先駆的な研究は、我が国の再処理工学の転換を促した。

### 2.2.3 沈澱法から抽出法への重大決定

1964年は、中国再処理技術発展史において極めて重要な年である。

同年3月、国防工弁（国防工業弁公室、國務院所屬）の承認のもとで、核工業部は国内の有名な7名の化学、化学工学の専門家を招聘して、パイロットプラントの設計案の審査を要請した。

4月、核工業部会議で、パイロットプラントについては沈澱法による技術設計を維持することが決まった。それからその原案による準備が続いた。ただし、新技術（抽出法）を採用するかどうかについて検討するため、原子力研究所副所長の汪徳熙教授と核工程設計院総技師の葉徳灿の総括の下、原子力研究所、核工業部科研局と清華大学の関係者で結成された調査グループは、北京、上海、衡陽（湖南省）などにある科学研究所や工場の抽出設備の運転状況を調べた。

その結果得られた結論は、『我が国では、抽出法に関する技術課題を解決でき、抽出法は経済的に沈澱法よりも優れている』というものであった。そこで、調査グループは、大型再処理工場は抽出法に改めるように提案するとともに、

原子力研究所、清華大学と再処理工場の3部門が連合して研究、開発を行うよう提唱した。

この期間、設計院では総合研究グループを構成し、抽出技術、工程設計案を研究、塔型（パルスカラム）と槽型（ミキサーセトラ）の2種類の抽出装置を比較検討した。5月、総合グループは、パイロットプラントは原案（沈澱法）を続行するが、大型再処理工場は抽出法により建設すると提案した。5月20日、核工業部は、大型再処理工場は抽出法を採用し、沈澱法に関する研究は即刻停止すると決めた。

8月、パイロットプラント設計案を審査する会議が青島市で開催された。酒泉原子力連合企業総技師の姜聖階氏は、非常に大きな影響力を示した。会議中、沈澱法を否定する傾向は強まったが、パイロットプラントは沈澱法による設計を依然維持することが決まった。それと同時に、抽出法に関する研究を加速することも決定された。

1964年10月16日、我が国最初の原爆実験が成功した。11月10日、毛沢東主席は「設計革命化」という指令を伝えた。さらに、パイロットプラントの設計を抽出法に改める事も提案した。12月21日、核工業部は『沈澱法に基づくパイロットプラントは即時停止、抽出法による技術開発・研究を加速する』という指示を伝えた。これによって沈澱法は完全に放棄され、抽出法が圧倒的なものとなった。

#### 2.2.4 小規模ホット試験の並行実施

以上の背景のもとで、抽出法の研究をホット（強い放射線場）条件下で行うことが必要になった。1964年2月初め、清華大学と原子力研究所の数名の研究員は共同で、ホット実験室において、高照射燃料条件を模擬した一段の抽出攪拌実験を行った。一ヵ月間の空気パルス混合によって、二相抽出系では深刻な乳化現象は認められず、分離特性は良かった。この簡単な模擬試験から明るい展望が得られた。同年末に、抽出法による小型ホット試験の実施が正式に伝えられた。この試験の内容は新規でありかつ放射能も強く、技術は複雑、時間的余裕も全く無い事から、技術突撃隊が2組（各81人）組織された。第一突撃隊は、1965年1月から、清華大学朱永贍助教授、原子力研究所の林漳基、罗文宗技師の指導で、照射物質検査用の物理ホット試験室を、繁雑な配管を有する化学ホット実験室に改造した。4ヵ月余りの短期間で、半透明のエポキシ樹脂板によりミニミキサーセトラを製作し、最も重要なウランとプルトニウムの共除染、そしてU/Pu相互分離サイクルについて11回のホット試験を行った。試験の結果は、抽出法の優位性を立証した。

それから、5基のホットケープを含む我が国初のホット化学実験室が、原子力

研究所に建設された（図.1 参照）。第2突撃隊はその場所で、Pu ラインの抽出第2サイクルの実験を行った。彼らは、8回の小型ミキサーセトラ逆抽出試験、および第1と第2サイクルの結合試験を行って最適な工程条件を求めた。それ以外にも、原子力研究所の再処理研究室と分析研究室の100人ほどのグループは、燃料棒の被覆管の除去と溶解、Pu ライン最終工程の陰イオン交換による精製、シュウ酸塩沈澱とその仮焼、および大量試料の分析などの任務を遂行した。その後、この再処理研究室は、8回使用した溶媒の再利用を独自に試みた。

同時に、十分かつ確実な実験データと一定量のプルトニウム製品を得るため、北京近郊、南口付近にある清華大学原子力技術研究所で小型ホット試験が進められた。ホット化学実験室の建設予算は、周恩来首相が批准した専門予算であった。1964年のうちに設計は完成し、年末から工事が始まった。1年後、2基のホットケープ、2個のホットラボと per spex で作られた大型グローブボックス2基を含むホット化学実験棟が完成した。

1966年春、実験棟の試運転が行われ、4月下旬、コールド試験、6月、初のホット試験が成功した。その時点で“文化大革命”が始まった。実験を止めるかどうかは誰にも予想出来なかった。この重要な時期において、周恩来首相は、8月下旬、核工業部の部長刘杰氏と共に試験に関する命令の伝達・説明と動員のために現場に来た。その結果、大部分の人員は試験現場を離れる事もなく、9月末まで、14回のホット試験を完了した。一方、清華大学では、パイロットプラントの設計と同じ工程フロー全てが一気に検証され、ウランの処理能力は1日当たりほぼ4kgになっていた。

### 2.2.5 パイロット規模のコールド試験

小規模ホット試験と同時に、コールド試験（制御システムの検証のため）も進められていた。1964年末に、大連機器製作所内の空き工作室をコールド試験

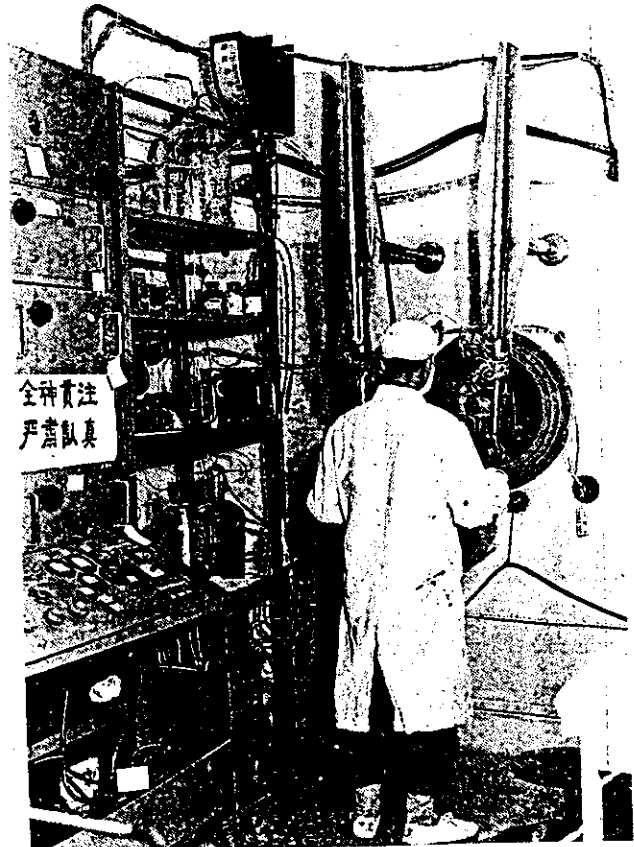


図.1  
原子力研究所のホット化学実験室

室に改造することが決まった。計画中のパイロットプラントと同じ規模の設備や機器などをその場所で組み立て、未照射ウラン燃料を利用して、将来のパイロットプラントにおけると同じ様々な条件で試運転がなされた。パイロットプラントの順調な建設にとって、この運転試験によって豊富な経験と知識を取得する事は非常に重要であった。

清華大学は抽出装置の研究に関する優れた技術を持っていたので、そこには、ホット化学実験室を建設すると同時に 30 kgウラン/日処理できるコールド試験室も建設した。1965年、第1抽出サイクルの3台のミキサーセトラ総合試運転が行われた。

この当時、北京原子炉工程研究所では、材料と塗装材の耐食性試験、長春応用化学研究所では、4価ウランによるPuの還元法、溶媒の乳化などの研究、上海有機化学研究所では、抽出溶媒、希釈剤の放射線分解と乳化に関する研究等が進められていた。核工程設計院は、各製作所と協力して、大型特注設備と計測機器を開発していた。

コールド及びホット試験から得られた豊富な成果は、抽出法の採用が正しかった事さらには適時であった事を立証した。大量の実験データは設計のベースとなると共に、初めて200 g以上の純二酸化プルトニウム製品を得ることにより、核兵器の研究を促した。

この間の活動・訓練を通じて、我が国における再処理研究、設計、教育及び工場運転の能力を有する技術チームが養成されていった。そのチームの中に、汪徳熙、曹本熹、姜聖階、汪家鼎、柯友之など中心的な専門家や学者、実務経験を持った中高年研究者がおり、さらに若い研究者や技師が大勢いた。この若者たちは、我が国の再処理事業の中堅となった。

## 2.3 パイロットプラントの建設と運転

### 2.3.1 重要な段階

我が国の再処理技術は、実験室でのピーカ試験→工作台小規模試験→パイロットプラントでの検証→工業化生産に従って着実に発展した。その中でも、パイロットプラントは不可欠のステップである。

パイロットプラントの工程設計案は、1964年年末に抽出法工程に改めたが、その目的は変わらず、(1) プロセス部門を検証し、実際条件で設備、材料、計器等を試験する。(2) 早期に二酸化プルトニウム製品を得る。(3) 運転および管理要員を訓練する。(4) その他の再処理プロセスの検証、であった。

パイロットプラントの主要な特徴は、次の8項目である。生産能力は400 kg

ウラン/日の処理、年間 250 日運転、Purex 法抽出工程を用いる、主要工程は、燃料棒被覆管の除去・溶解、U/Pu 共除染—分配サイクル（第 1 抽出サイクルという）、第 2 抽出サイクル、Pu 末端陰イオン交換、シュウ酸塩沈澱と焙焼。沈澱、焙焼の共用の実験ボックスを除き、甲、乙 2 つの同じ生産ラインを並列的に設置する。溶解工程と第 1 抽出サイクルは強い放射能を持つため、厚いコンクリート遮蔽室内に置いて遠隔作業となる。Pu の精製部分は倉庫のような大型ホット作業室内に設置する。鉛ガラス窓や、ペリスコープを利用して操作する。

この提案には 2 つの特徴がある。(1) 工程の重点となっている主要な目標は、第 1 次工程（燃料棒解体・溶解）と第 1 抽出サイクル部分の検証、分離されたウラン溶液は濃縮した後、暫時保管する、回収は 1 段遅延するわけである。それによって主要なデータの取得や Pu の回収が出来るだけでなく、投資も節約できる。(2) 区域内の既存施設を十分に利用して、工事期間を短縮し、費用も節約する事である。

### 2.3.2 全国的協力による建設促進

1964 年 11 月、設計院は謝仲然及び柯友之総技師の指導で、抽出法に基づく最初の設計を提案した。この提案は即座に認められた。翌年 2 月 17 日、再処理工場を建設する場所は甘肅省酒泉市内酒泉原子力連合企業内に認定された。

党中央、国務院、および核工業部の指導層は、再処理工場の迅速な建設を極めて重視した。1965 年 2 月 15 日、党中央（原子力）専門委員会は、“再処理工場の建設を加速せよ”という報告書を認め、関係する企業や工場などに設備、計器、材料を提供させ、工事を保証した。また、全国の各研究所や工場に対し、囲碁や将棋の碁石として上下協調することを指示し、建設には常時“ゴー（緑色）信号”を点燈してその工事を促進した。

周秩総技師に総括される指揮部は“材料確保、建設加速、日程短縮、初回での成功”を指示した。その後、石祝三技師が総括する支分指揮部が設立され、全面的に物資と人員の調達が始まった。

設計要員たちは強い責任感に駆られ四月初めより北京を離れ、“空に鳥は無し、大地に水も草も無し、風が吹くと石が走る”と描かれた酒泉の荒野に来た。工事現場に移り住んで 3 ヶ月余で、全工事の施工図を完成した。8 月、核工業部は北京で工事設計審査を改訂した。1965 年末迄に改訂を終了し、工事が全面的に始まった。指揮部は工事の迅速化を図りつつ、“品質第一”“安全第一”を十分に喚起した。1966 年の年末迄に工事用建物は基本的に完成した（図.2）。

### 2.3.3 波乱と曲折の中での成功

パイロットプラントの建設の最終階段には“文化大革命”の波乱が現場に来ていた。この重要な時期、国務院と中央軍事委員会は、『この工場の安全運転は、我が国の国防建設における重要事項であるので、全職員は工場の安定生産と絶対安全に責任を持って』との電報を伝えた。また、前後4回調査隊を派遣して、両派（“保守派”と“主急派”）の協力を促した。1967年末、周恩来首相は、核工業部に所属する職員代表と軍事管制職員と面会した折、各派の職員は無条件に団結し、科学研究と生産任務を完成せよ、と要請した。

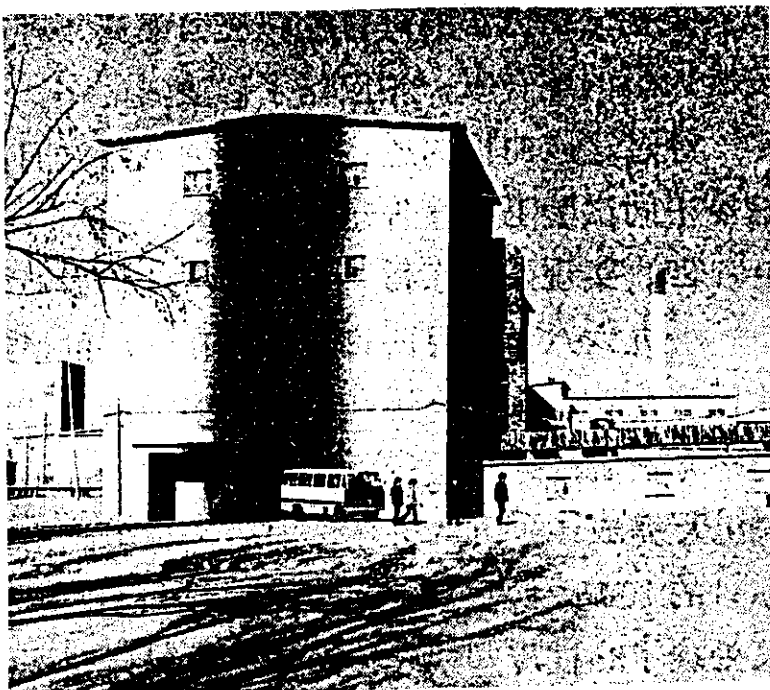


図.2 パイロットプラントの外観

“文化大革命”の動乱の間も、まだ多数の幹部と職員は現場に勤務していた。総技師姜聖階氏と副総技師 如宴氏はずっと現場に滞在していた。工場の安全のために職員の40数人は現場に移住し工場を守っていた。この残留職員達は工事を続け、品質検査、試運転、技術訓練などを行っていた。そして、通水試験、酸試験、ウラン試験によって生じた問題に対応し、設計を修正した。その結果、1968年8月試運転は成功し、パイロットプラントの完成が宣言された。

### 2.3.4 パイロットプラントの目標実現

1968年9月4日、まずパイロットプラントの“甲”生産ラインに照射済みウラン燃料が投入され、合格製品が得られた。10数日後、“乙”ラインも運転された。1年間の連続運転を経て、高生産量、優良品質、安全の記録を達成、1969年の生産計画を計画より130日間早く完了した。運転状況が良いため、100日間の点検も削除された。1969年12月24日から翌年1月17日まで、冷却期間の短い実燃料棒35本を再処理して、多くの経験を取得した。予定した目標は全て基本的に達成できた。

これらの運転状況から、このプラントの設計と工事は基本的に成功であると判断された。プルトニウムを除く主要な工程指標 (index) は全て達成できた。



溶解槽とミキサーセトラ抽出設備の容量にはまだ余裕があったので、予想以上の処理量で運転できそうであった。試運転期間中に工程、分析、設備、機器、材料、安全、および始動/停止など諸方面の経験を取得した。また改良された事柄もある、例えば、イオン交換済みの廃液を燃料溶解溶液としてリサイクルすること、イオン交換用洗浄剤の液量の低減化、強放射性廃液濃縮用の中央循環円筒式蒸発缶の改良等である。その他、試運転期間中に様々な問題も明らかになった。例えば、職場内の換気量が不足、溶液のろ過器が詰まり易い、排気浄化システムが時々故障、コンクリートに埋込んだ蒸気パイプや下水道管などの壁内材料の不適合、設備の（予）備品が乏しい等。これらの問題は、大型工場を設計する時にはすべて解決された。

パイロットプラントの試運転によって、副総技師方之時氏が総括した管理、技術、運転要員を含むチームが育成された。並列生産ラインを設置したので、工程チームも2つ組織された。全員が持ち場で研修の機会を持つ事ができた。そして、大型軍用再処理工場のための人材が育成された。さらに、パイロットプラントは大型再処理工場より1年半ほど早めに生産を始めたので、時機を逸する事無く軍用プルトニウムを抽出し、1968年の水爆実験に提供された。

その後、我が国の軍用再処理工場の建設、生産開始によってこのパイロットプラントの使命は終わった。1970年中頃、甲ラインは廃液からの核分裂生成物 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{147}\text{Pm}$ の抽出生産ラインに改造され、また $^{237}\text{Np}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ の抽出の研究とそれらの少量生産を行い、国内科学技術の需給を満たした。しかし、運転停止直後、汚染を徹底的に除去しなかったため、残留放射能は依然高く、この生産ラインの改造や再利用は（現在でも）難しい。

## 2.4 軍用再処理工場の建設と発展

### 2.4.1 建設過程

1960年代初めの国際及び国内の政治的背景から、強い防衛実力を持つための第2期再処理事業、すなわち“大型再処理工場”建設の要請が逼迫し、大型工場はパイロットプラントと同時に建設された。

1964年5月、核工業部は大型再処理工場も抽出法を採用することを決めた。まもなく、様々な工事の設計が始まった。

1965年7月、核工業部は、大型工場を酒泉市内酒泉原子力連合企業内に設置することを認めた。同年9月、核工業部原子力化学総技師、設計院副院長の曹本喜氏をリーダーに、総設計師柯友之氏と清華大汪家鼎教授らが重大な設計方針を決定するために工事現場を訪問した。10月、設計に関する書類が編成され、

11月、この設計提案書は採択され、“品質精緻、条件簡素化”、“自力開発”、“3結合（科学研究、設計、工事と生産、すなわち4結合）”の方針を打ち出した。これにより設計案に関する重要な課題は基本的に決定した。12月下旬、設計院は、ウラン／プルトニウム分離処理工場の最初の設計案を完成し、設計案を検討するための先行要員を工事現場に派遣した。

1966年1月、設計原案の検査と修正が終了し、3月から工事の製図作業を始めた。そして、7月末から10月末までウラン／プルトニウム分離処理工場とウラン回収工場の工事施工図が相継ぎ完成した。工事は、1966年4月26日に始まり、“文化大革命”の混乱により1年程遅れて1970年の始めに終了した。1970年4月18日夕方、最初の照射済みウラン燃料棒を装荷、6日後には製品が得られ、大成功であった。

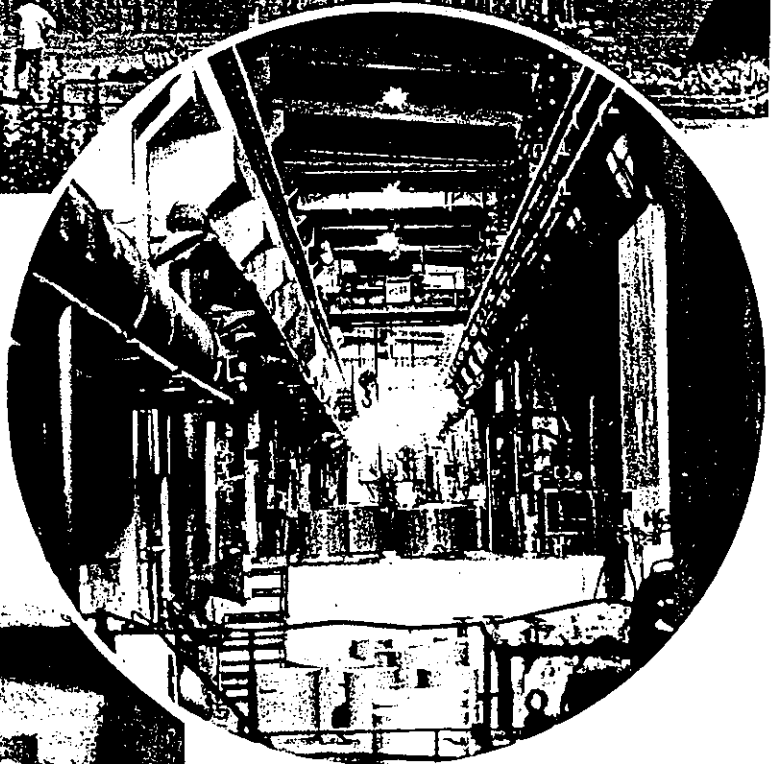
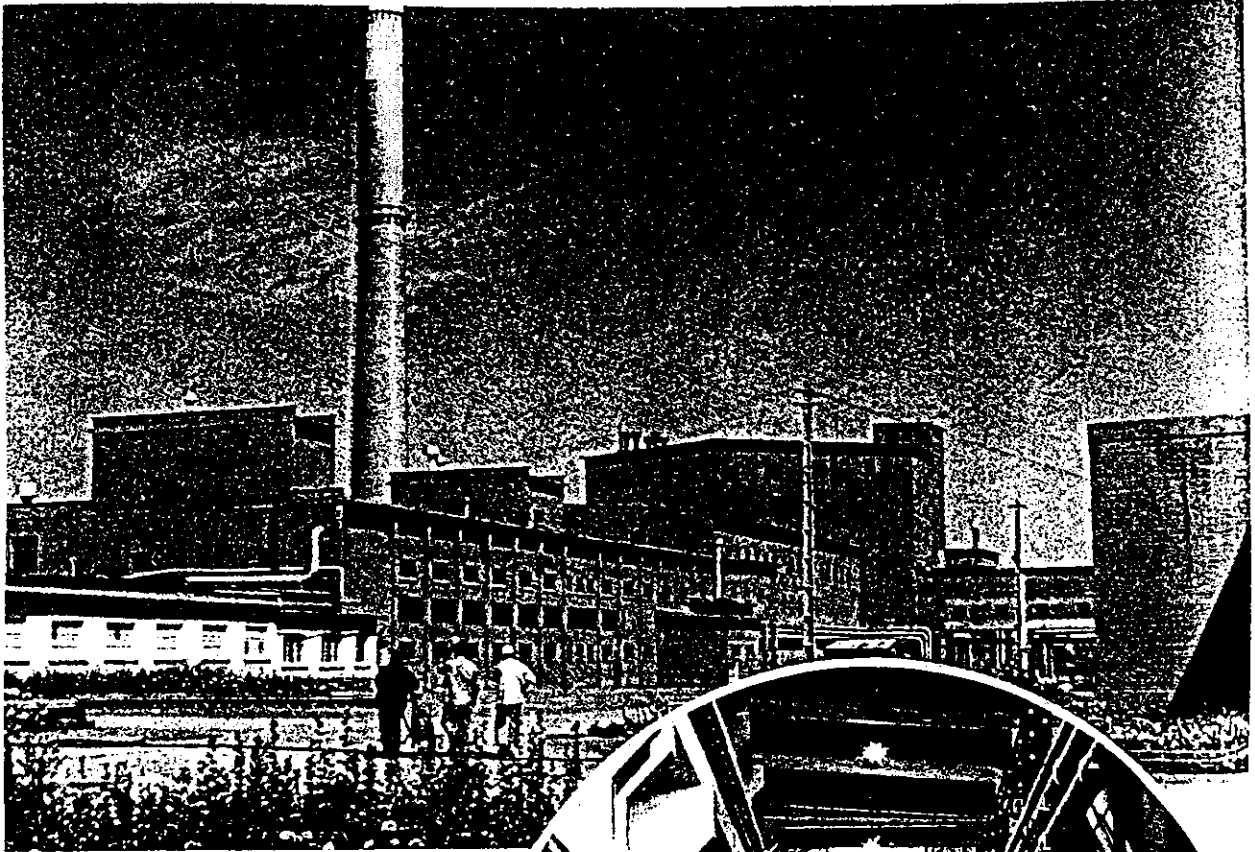
パイロットプラントと大型再処理工場において、溶媒抽出法を継続して採用した結果、我が国の再処理技術が、1960年代の国際的先進レベルに達しただけではなく、巨大な経済利益も生んだ。即ち、沈澱法に比べ、1) ステンレス鋼の使用量は4分の3に減少、2) 工事量及び主要な建家面積／長さは原案の各々27%と20%になり、建設期間も顕著に短縮された。3) 節約された工事費は約3.6億元、4) 運転コストは半減した。この工事は1978年全国科学大会において、『優秀科学技術成果金賞』を得た。

## 2.4.2 建設の時代

建設時期には、設計、施工と生産の3方面の人々は同じ目標のために団結して努力した。設計院の人々は、賑う都市を離れ、生活の苦しい作業現場に来了。ある女性は、出産して3ヶ月の赤ちゃんを他人に養ってもらった。毎年春に北京を離れ、屋外作業が出来なくなる晩秋迄、北京へ戻らない人も多かった。北京へ出張する機会があった人は、家で家族と団らんする期間は3日以内であった。故郷に大地震が起きたある人は、両親や妻と子の安全を心配しつつ、そのまま仕事を続けた。“文化大革命”による様々な迫害を受けていた者も、涙を流しながら一生懸命働いた。

“文化大革命”による混乱のために建設日程が延期された事は、共産党中央に重大な配慮を促した。1976年の年始、周恩来総理は工事の遅延回復を必死に行うよう指示した。同年4月、周秩総括下の工程指揮部（本部）は5段階で工程を推進した。全労働者は夜を日に接いで働いた。ある労働者は、奥さんが病気で入院し、4人の子供の面倒をみる人もいない中、グループリーダーの勧めにもかかわらず現場で9日間働き続けた。

記録によれば、この工場とパイロットプラントの建設は、国务院の7つの省や委員会、6大学、27科学設計院、23工場などの恩恵を受けて完成したも



酒泉の大型軍事用再処理工場  
その外観と内部

のである。関連する工場等における開発、加工設備や計器等は、33,380台(件)に達した。その中の大部分は特注品であった。

### 2.4.3 大慶(油田)を学び、“六好”企業を創造するキャンペーン

軍用再処理工場の最初の運転期間中、“文化大革命”の混乱や設計の欠陥によって、工場の長期安定運転は困難であった。ウランの回収率は低下し、運転中でなくても放射線の分布異常が生じた事もあった。姜聖階・総技師は、全員に自信を持つよう激励した。1972年の年始に、“大慶を学ぼう”(大慶油田は当時の中国工業企業の模範だった)というキャンペーンをこの工場で実施する事が決まった。大慶を模倣し、工場を全面的に整頓することが決まった。まず、正常生産を保証する基本的ルールを作った。すなわち、現場責任制、交替班制、巡回検査制、安全品質責任制、区域衛生制など5つの制度である。それから、施設点検整備制度、経済採算制度、勤務評定制、そして現場作業マニュアルを確立した。これを“八制一法”と呼んだ。さらに、労働者から選ばれた数人を生産管理に参加させた。

その結果、工場の様子が変わった。生産秩序は際立って良い方向に向かった。基本的に持ち場を離れる事や雑談等がなくなった。さらに、“ナンバーワン職場キャンペーン”により施設を検査、整頓し、設備の完成度を徐々に引き上げた。1978年と1979年、

“大慶油田工場と並べる模範企業”を命名された。

1980年以来、工場では全面品質管理(TQC)を推進した。各職場ではTQC管理組を設立し、普遍的に管理図を採用した。そして、製品の品質を保証し、合格率は100%に達した。ウラン製品の水分含有量は設計仕様値より大幅に減少した。二酸化プルトニウム製品は“優良製品”になった。

1982年から、工場の全面整頓を再開した。1年後、生産秩序は向上し、工場の



図.3 大型軍用再処理工場制御室

状態は改善された(図.3)。全職場の設備、測器等 3,985 台全部がファイルに記録され、機械の完成度は 99.35%に達した。水道、ガス等からの漏れを除くため、16 万個のバルブを有する約 11 万メートルのパイプラインを検査し、漏れ率は 1 万分の 3 以下になった。工場内部は、床から壁、機械からパイプライン迄、塵がない、水漏れがない、油の汚れが無い清浄な工場になった。80 年代以来、経済利益を確保するため、“軍事用製品の供給を保証しながら、余剰の生産能力を民需品の生産に転換する”の方針が実施された。工場は、科研を強化、民需品を開発し、国が指定した計画を全面的に完了し、主要な技術、経済指標は更に最高値に達した。1983 年 5 月、核工業部の検査を合格した。

工場ではさらに、“六好企業”：6つの条件を満足した優れた企業、すなわち 3 者(国、企業、労働者個人)の利益に沿う事、製品の品質、経済利益、職場規律、文化的生産(乱暴な振る舞いが無い)、そして政治工作等に優れた企業、の基準に沿って幹部、労働者チームを育てた。中、青年労働者の一部に対し授業、技術研修を行った。また、近代的・先進的管理方法を推進した。その結果、1984 年 10 月、“六好企業”と命名された。

#### 2.4.4 技術革新と改良

工場変革の一環として、顧玉明、曲国鎮総技師の指導の下、技術革新および潜在力の発掘・改良が行われ、工場の総合的技術水準は引き上げられた。数年間で多数の革新と創造が遂行され、その効果は際立った。主要な成果を述べると、最大の改良成果は主抽出工程のサイクル数を 3 から 2 に減らした事である。

元の設計では、ウランとプルトニウムの精製は各々 3 回の抽出サイクルを経る。特に、プルトニウムの第 3 抽出サイクルは TBP からアミン溶媒に切り換えられていた。その場合の問題点は、プルトニウムの損失が大きく、しかもアミン用希釈剤は揮発性が大きいので、抽出剤の濃度制御が難しいという事である。小規模実験を繰り返した後、第 2 サイクル(TBP)の工程条件を改良調整し(最適工程条件を見つけ)、アミンを用いた第 3 サイクルを削除した。最終工程では、両方の沈澱反応器が改良された。以上の結果、工程性能の改善のみならず大きな経済利益が得られた。すなわち、各種の設備、計器、バルブなど 80 件が省略、定員 10 人の現場 2 つが削除、U/Pu 漏洩損失箇所を削除、溶媒が TBP のみに単一化できたことにより費用は節減され、安全も保証された。それと同時に、ウラン生産ラインでも第 3 サイクルが削除された。燃料棒の冷却期間を適当に延長して放射能レベルを低減化したので、仕様条件は満たされた。従って、3ヶ所の金属漏洩損失箇所も同様に削除された結果、試薬費用の大幅節約と、放出廃液量の低減化が実現できた。撤去された設備、計器などは、Np-237 同位体の抽出分離に再利用された。

オンライン分析法は、再処理工場の生産ラインを監視する新技術である。従来の試料採取-分析法と比べ、非破壊、連続測定が可能、労力とコストが節約、遠隔操作が可能等の長所がある。化学分析専門家である陳国珍の指導で、再処理工場分析研究室のオンライングループは、ほぼ1年間で5つの方法を開発し、13ヶの管理分析点を設け、15の分析項目を確立するという業績を挙げた。その後、他の問題をも解決した。例えば、ある実験室が、国内で生産されていないAm-241 同位体を急遽必要とした時、オンライン分析グループの研究員達は数十回の実験で、含有率百万分の1未満の溶液からAm-241 を抽出した。数年に亘る懸命な努力により、オンライン分析は12種類の方法、分析点49個、分析項目69個が可能になった。さらに工程制御と分析に必要な人員は減少した。このようにして、分析は全面的にオンライン化された。

抽出工程において使用する有機溶媒は、繰り返し使用すると品質が低下し、残留放射能も増える。そのまま使えば抽出効率は低下する。元の設計では、使用した溶媒の16分の1ほどを毎日廃棄し、同等量の新溶媒を補給しなければならなかった。この方法は溶媒の消費量が大きく、生じた有機廃液の処理も困難であった。この問題に対し、定常的な廃棄、補給をやめ、クローズドサイクル方式に改良した。しかし、揮発などによる消耗部分は定期的に補給しなければならない。一方、設計院と蘭州市（甘粛省）内、西北近代物理研究所の協力により、廃有機溶媒は真空迅速蒸留法により再生することが可能となった。回収されたTBPとケロシンの品質は良好であった。

再処理工程から発生する大量の放射性酸性廃液の処理について、国外で通常採用されていた方法：連続蒸発-ホルムアルデヒドによる脱硝後、アルカリによる中和処理、は、操作が複雑なばかりでなく、低効率、非効果的、試薬の消費量が大きく、しかも汚染事故が時々発生し、廃液の排出基準を達成出来ない事もあった。幅広い調査により、“蒸留濃縮法”で硝酸を回収する事が決まった。10ヶ月程の短い期間で硝酸回収設備が完成した。その結果、毎年約5%濃度の硝酸300トンが回収され、濃度37%のホルムアルデヒド100トンと45%のNaOH200トンが節約出来、約15万円の資金が節約できた。

潜在能力を掘り起こす事で、運転容量は原設計能力を40%~50%も超過した。また、運転の周期を短縮し、電力や熱エネルギーの消費も大幅に削減したので、経済利益は充分満足できるものとなった。設計に無かった副産品も開発された。例えば、主工程フローからのNp-237同位体の回収、パイロットプラントからのPu-238同位体の分離、が行われた。その他の改良事項には、“活性炭深冷吸着クロマト分離法”による溶解槽廃ガスからのKr-85同位体回収、第2サイクル抽残液の濃縮リサイクル方式、第1サイクルのウラン含有液を蒸発濃縮した際の凝縮液を、そのサイクルの逆抽出液として用いる事、溶解槽廃ガス中の窒素酸

化物から硝酸を生成回収する事、微弱放射性廃液の蒸発処理から生じた凝縮液を、無イオン水の代りに用いる事、および有機溶媒のクローズドリサイクル方式等がある。これらの『改良』の結果、廃棄物量は減少したのみならず、溶剤が大量に節約され、UとPuの回収率も増大した。再処理のコストは、運転当初の費用の41%程に減少すると推定された。

それ以外にも、工場は研究所の協力で多くの研究を展開した。例えば、1977年4月、原子力研究所の重水炉から取り出した低濃縮ウラン燃料を処理し、Pu-240含有量の多い二酸化プルトニウムを抽出した。また、ミキサーセトラをパルスカラムに変更した。

## 2.5 動力炉燃料の再処理研究

### 2.5.1 新しい情勢と新しい任務

現在、我が国の原子力潜水艦の動力炉や高中性子束材料試験炉、あるいは他の研究炉などから使用済燃料が取り出されている。しかも、90年代初めからは原子力発電所からの使用済燃料も発生する事が予想され、20世紀末迄に一定量の使用済燃料が蓄積することになる。

これらの核燃料は $^{235}\text{U}$ の濃縮度によって2種類に分類される。第1は、原子力潜水艦用動力炉と原子力発電所用軽水炉、および研究炉に提供される燃料であり、 $^{235}\text{U}$ 同位体濃縮度が5%以下であることから“低濃縮ウラン燃料”と呼ばれる。第2は材料試験炉用燃料で、 $^{235}\text{U}$ 濃縮度が90%以上の“高濃縮ウラン燃料”である。Pu生産炉用の天然ウラン燃料と比べ、自己連鎖反応の臨界条件を伴うので、再処理プロセスに大きな影響を与える。即ち、低濃縮ウラン燃料の場合には次の3つの大きな課題がある。(1)前処理工程、燃料棒の被覆は溶解しにくいジルコニウム合金なので、処理しにくい廃液の発生を避け、機械法と化学法、すなわち剪断-溶解法を採用する。これは、天然ウラン燃料処理の場合の単一化学溶解法と大きな違いがある。(2)放射能がより強い。発電炉燃料は高燃焼度のため、炉から取り出す時の放射能は極めて強くなる。溶媒の放射線損傷がないように冷却時間を延長し、また、溶媒との接触時間が短いパルスカラムを主要な溶媒抽出装置として採用する。(3)プルトニウムの濃度も高い(10倍以上)ので、臨界安全を確保するために、装置の形状寸法、可溶性中性子毒物、固定中性子毒物、および核分裂性物質の質量と濃度などを制御しなければならない。その他、強い放射能があるため、ウランとプルトニウムの分離および、プルトニウム化学工程自身も難しくなる。

高濃縮ウラン燃料に対する非常に重要な留意点は臨界安全性である。これは

処理の初期段階から注意しなければならない。外側の被覆材はアルミニウム合金であり、燃料ミートはウラン-アルミ合金であるので、溶液中のウラン濃度は、Al イオン飽和濃度に制限され低くなっている。そのため一般的に、希釈された TBP による抽出法が採用されている。それ以外では、通常プルトニウムを回収しないので、工程フローは簡単である。

### 2.5.2 早期の準備

我が国の再処理研究者達は、70年代初期から前章に述べた新型燃料の再処理課題の研究を始めた。70年代末期まで、再処理総合試験化学工学研究所及びこのような種類の核燃料を再処理できるパイロットプラントの企画と工程の原案の設計が行われた。

10 数年間、科学・技術者達は非常に努力した。“恨苦奮闘”の伝統を発揚し、少ない政府予算の中で数 100 の研究項目を決定した。この中の多くは世界の先進的な再処理新技術を目指していた。産・学・研協同を通して豊かな成果を達成し、以後の展開に必要な技術を整えた。

低濃縮ウラン燃料の再処理では、2つの機械を製造することが必要であった。それは、燃料棒の剪断機とパルスカラムである。1970年代、外国の参考資料の入手が困難な中で、核設計院の人々は自力で剪断機の開発を始めた。原理確認試験に成功し、剪断力が250トンの横臥式剪断機を完成した(図.4)。この機械を用いて、鋼とジルコニウム合金被覆管とセラミック材料から作った模擬燃料棒の剪断試験を行った。その後、より先進的な剪断機を考え、処理能力 400 kg U/日の堅置き式剪断機を設計した。

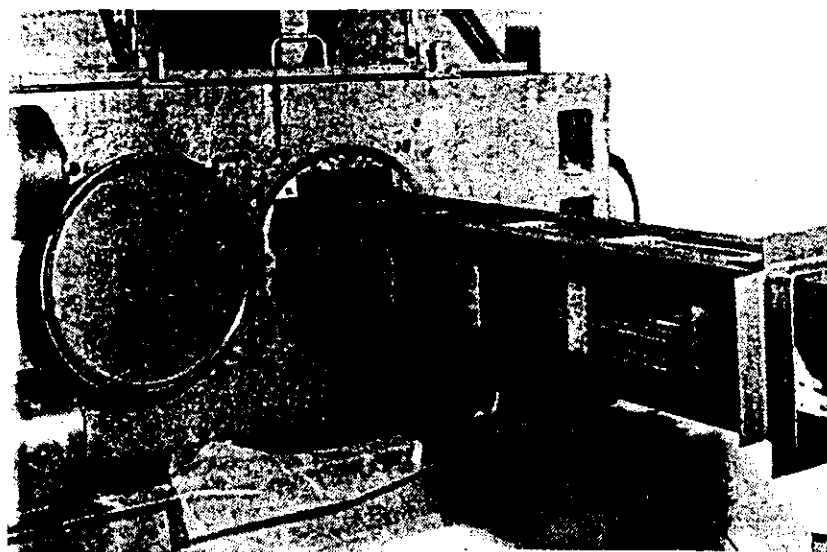


図.4 北京核工程研究設計院の第1号横臥式剪断機



パルスカラム開発の主役は、清華大学と核工業部設計院である(図.5)。1978年から、ウラン-硝酸溶液の流体力学的特性把握およびカラム性能の改良、除染装置内における汚染物の蓄積とその除去方法、円環型パルスカラム、およびパルスカラムのスケールアップ因子などの研究を行った。大連(遼寧省)において、パルスカラム単体および第1抽出サイクル(3本連結)と自動制御の試運転を行った。接触時間の短い一段および多段の遠心抽出器も探求した。

発電炉燃料の再処理主要工程に関しては、実験室で合成した模擬燃料溶液を用いて、一連の試験管から成る模擬向流多段抽出試験を行った。その結果、より良い工程条件が得られた。

再処理工程における固体廃棄物量を減らし、運転費用を節約するために、化学プロセスは“塩フリー工程”を基本に展開した。原子力研究所における電解還元法によるウラン/プルトニウム分離の研究、電解-酸化還元法によるプルトニウム原子価の調整研究、HAN-還元法によるプルトニウムの分離研究そして硝酸プルトニウム溶液の連続沈澱-仮焼等の研究プロジェクトは、かなり高いレベルに到達した。

それ以外に、燃料棒の浸出溶解、溶液のろ過、光化学過程の応用、硝酸ウラン溶液の脱硝技術、ノルマルアルカン希釈剤の選択、マクロポラス樹脂による使用済み溶媒の精製技術、Np抽出のための化学プロセス、そして廃液からの核分裂生成物、Np、超プルトニウム元素等の系統的抽出分離の研究等において良い成果をあげた。

世界各国で行われている軽水炉  $UO_2$  燃料の再処理に関する研究課題は、すべて我が国でも展開されている。

しかし、燃料溶解液中の不溶性残渣の特性研究や、パルスカラムによるプルトニウムの精密抽出、あるいはウラン-プルトニウム混合処理など数少ない研

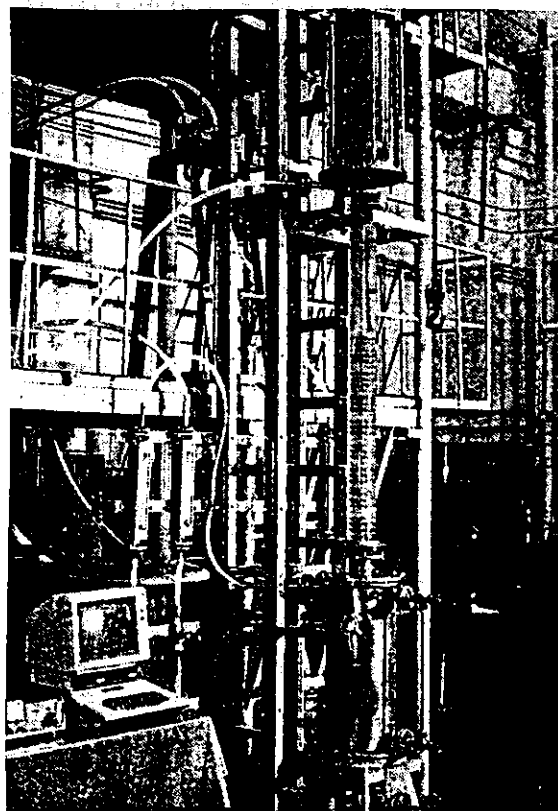


図.5  
清華大学のパルスカラム実験装置

究課題は、国内の実験条件不足や国力に適合しないという理由から、まだ行われていない。

工程の研究と設計に関しては、蒸気噴射法と空気搬送法による溶液搬送試験が成功し、再処理工場に設置されている大部分のポンプとバルブを撤廃することが可能となり、液体漏洩の可能性は大幅に減少、点検整備の作業量も少なくなった。その他、工場の点検方式、再処理の数値シミュレーションとコンピュータによる制御過程の最適化などの研究テーマが順調に進展した。

高濃縮ウラン燃料の再処理に関しては、原子力研究所、清華大学は、核工業部設計院の支援を受け、1976年から1979年まで再処理工程（燃料棒の溶解、試験管による向流多段抽出実験を含む）の実験的研究が行われた。その後、大連（遼寧省）でパイロットプラント規模のコールド・ウラン燃料棒の連続溶解試験（1 kg U/日相当）が行われた。

その他、我が国ではトリウム核燃料の再処理工程あるいは沸化物揮発法による軽水炉用燃料の再処理技術を研究したこともある。核工業部（省）は、低・高濃縮ウラン燃料再処理に関する研究成果と軍事用再処理工場での運転経験を交流するため、1974年と1977年、秦皇島市（河北省）と青島市（山東省）で専門家会議を開催し、論文44編を含む予稿集を出版した。その後、再処理に関する論文や作業報告書類は中国化学会・放射化学分科会と中国核学会・放射化学分科会などの年会で発表されるようになった。

以上の先行的研究・技術開発は、我が国における多目的の再処理パイロットプラント及び商用再処理工場の建設において良い基礎となる。

我が国の再処理事業は、約20年の建設期間を経て第1段の規模に達した。再処理に関する科学研究、設計、建設・工事、安全設備、生産運転と管理など広い方面で豊富な経験が集積された。特に、一定の水準に達する技術者チームが育った。この有利な条件を十分に利用し、一生懸命に努力すれば、我が国の発電炉用燃料再処理工場は早期に完成出来るであろう。そして、国内の原子力発電や原子力熱（暖房など）及び核動力の要請に答えるための再処理の需給を満たすであろう。

## 註

中国の商用再処理施設に関しては、処理容量 300kg/日のパイロットプラントを、ウラン濃縮工場がある蘭州核燃料サイクル施設に建設中である。これは、フランスが協力しており、2000年代の初期に運転開始の予定である。さらに、400～800トン/年の商用再処理施設を2010年代に完成させる計画もある。

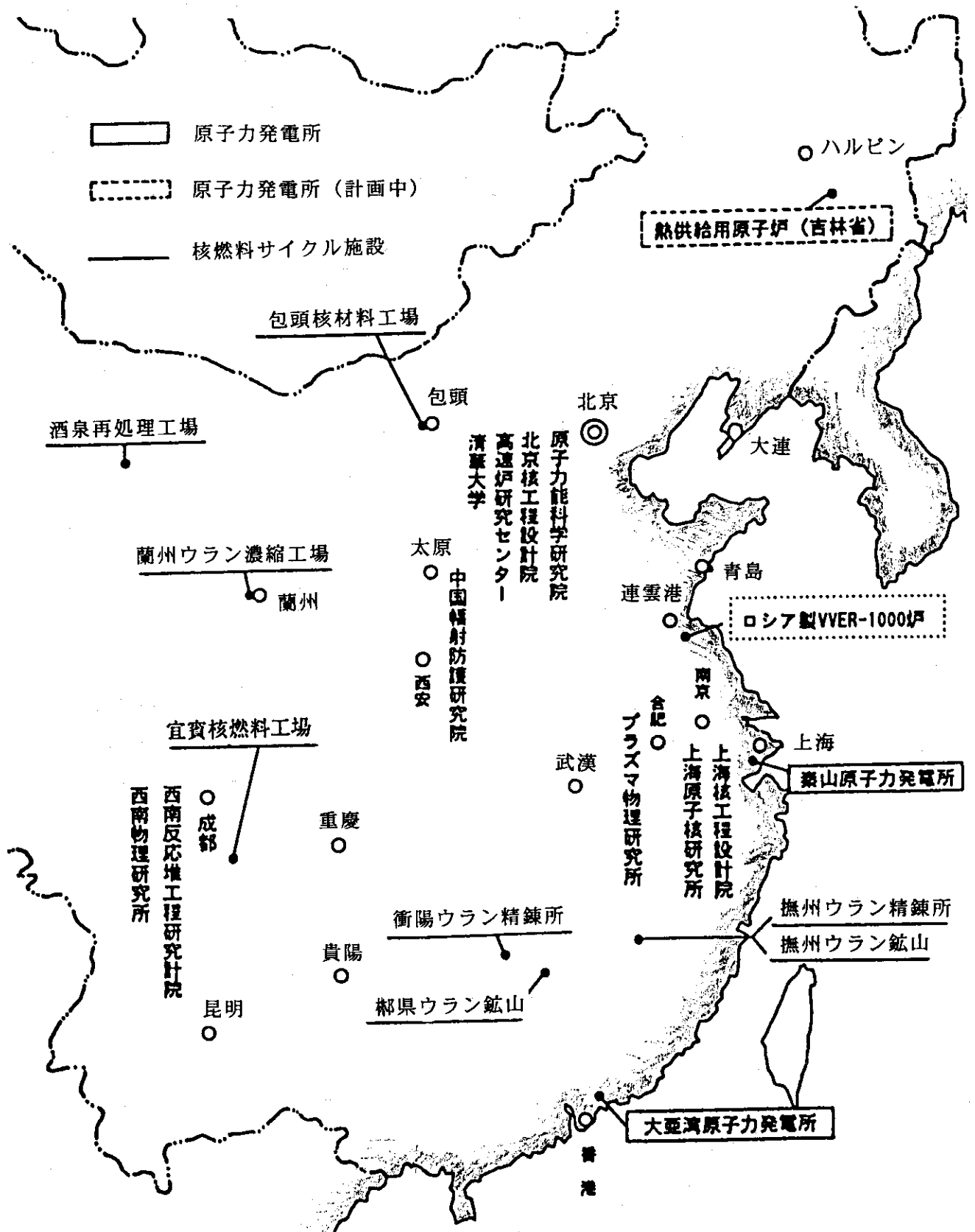
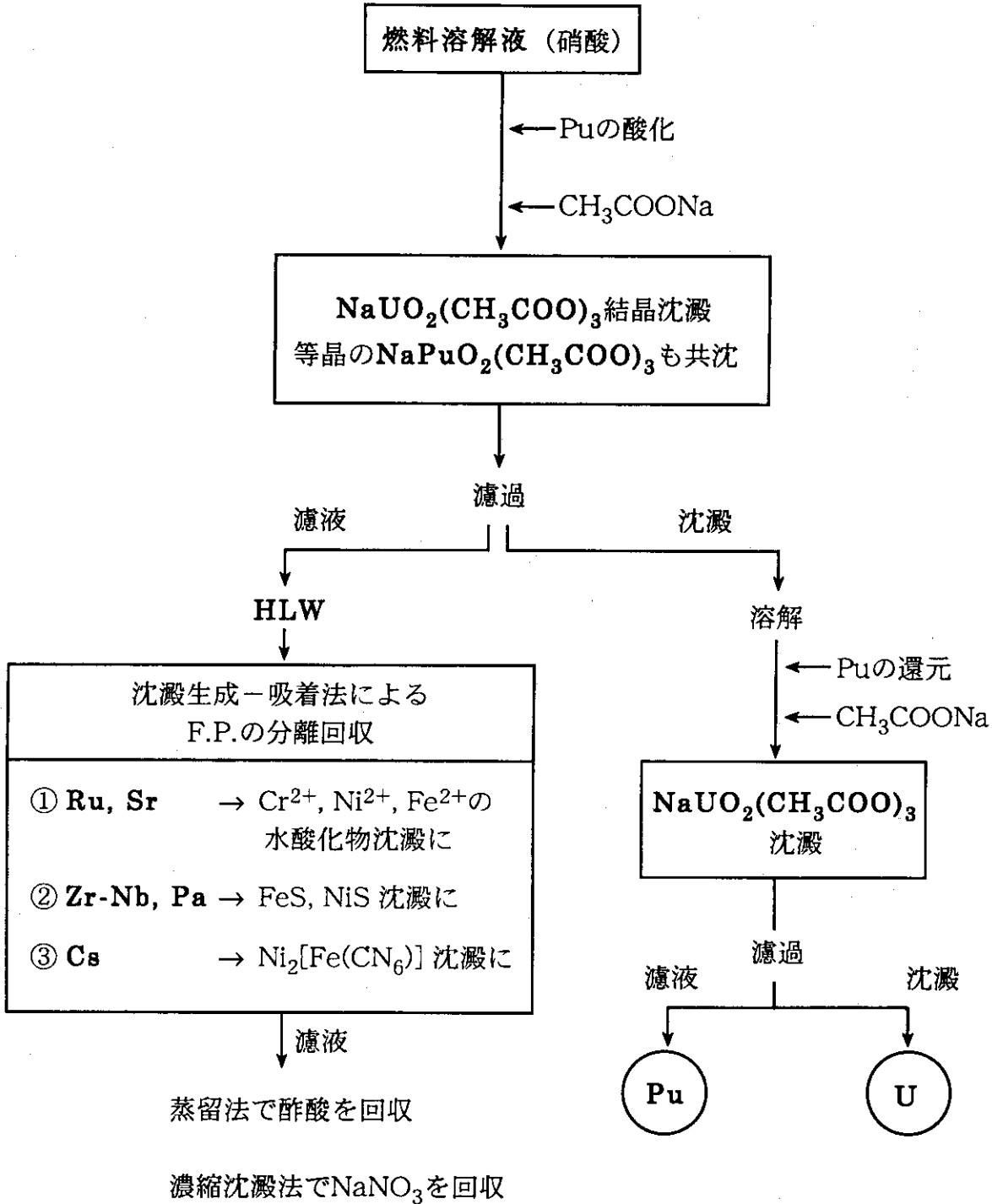


図.6 中国の原子力関連施設

参考資料 - 1 ウラニル酢酸塩沈澱法による再処理工程の概要 (ソ連版)



参考資料 - 2 世界的な再処理関連の出来事 (年代表示)

	<日本関係>	<中国、その他>	<欧・米間系>
1940年	日本軍部、理研、阪大 ウラン原爆計画		マンハッタン計画開始
1945年		広島、長崎原爆 GHQによるR&Dの禁止	*ソ連原爆実験
1950年		*英国原爆実験 *ソ連水爆実験	Hanford : Redox 施設 英 : Windscale : Butex 施設  Sav. Riv. Plant (Purex法)
1955年		第1回Geneve会議	
1956年	(日本原研) 設立	中国再処理計画発足	Hanford : PUREX Plant ソ : トムスク-7工場 [沈殿法→1983年Purexに]
		AEC : 再処理シンポジウム (ブリュッセル) 中国科学者 ソ連へ	
1958年	(再処理試験場計画)	第2回Geneve会議	仏 : UP-1 (Purex)
1959年	(工学用ホットケープ計画) 我国最初のPu分離	ソ連技術者訪中、滞在 (沈殿法で設計)	ソ : チャリヤピンスク (BB工場) [沈殿法 ~1987年まで]
1960年		ソ連技術者 突然撤収	
1962年		中国最初のPu回収 (沈殿法)	英 : ドーンレイPlant
	(原研)		
1964年	再処理施設建設開始	*中国原爆実験 再処理法をPurexに転換	英 : Windscale Purex Plant 印 : Trombay Plant
1965年	再処理施設が完成		ソ : Krasnoyarsk-26工場 (Purex法)
1966年		*仏、原爆実験 文化大革命始まる 中国軍用工場の建設始まる	仏 : UP-2 (Purex) Eurochemic Plant
1967年			
1968年	Pu 200 g 回収 (原研)	パイロット施設 (100 t/y) 完成	
		*中国水爆実験	
1970年		軍用再処理工場完成 (甘肅省 酒泉)	
1971年	PNC 東海工場建設開始		独 : WAK稼働
1974年	PNC 東海工場完成	*インド原爆実験	
1975年			
1976年			ソ : チャリアピンスク RT-1工場(400t/y) [Purex法]

参考資料 - 3 清華大学朱教授の講演（原文は後に添付）

これは、1994年10月に清華大学（1911年創立）の核能技術研究所創立30周年記念において、朱永贍教授が行った講演の内容である。同教授にお願いして入手した原稿は中国語で書かれているので、原研に滞在中の趙宇亮（Zhao yuliang）氏に依頼し、英文に翻訳してもらったものである。

***Review of the Study of Nuclear Fuel Reprocessing  
by Solvent Extraction***

In commemoration of the 30th anniversary of the founding of  
Institute of Nuclear Energy Technology , Tsinghua University.

***Zhu yongjun***

On the occasion of celebrating the 30th anniversary of the founding of Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, it is instructive and historic significance to look back the achievements obtained in our institute in the 1960's.

In the middle of the 1950's, the Engineering Physics Department was established in Tsinghua University. It included the groups (task force, T.F.) of Radiochemical Engineering and Artificial Radioactive Material Technological Process. The task of this department was to foster the specialists for chemical treatment of the irradiated nuclear fuel. In 1960, Radiochemical Engineering group was moved to the newly founded Department of Chemical Engineering and further divided into two groups, one was the Natural Radioactive Material Technological Process (so called 110-T.F.), and the other was the Artificial Radioactive Material Technological Process (so called 120-T.F.). Prof. Wang Jiading was the vice-dean (the dean was prof. Zhang zigao), I was assigned to be the group leader of the Artificial Radioactive Material Technological Process (120-T.F.). The reprocessing techniques of nuclear fuel, not only at that time but also at present, is still one of the very active and important reasearch fields in the world, because it includes the key techniques of producing plutonium which is the nuclear fissionable material. The international dispute between the United States and North Korea is just due to the reason that the United States does not allow North Korea to master this techniques. At that moment (means in 1960), only Tsinghua University had opened this kind of T.Fs in China. We deeply realized that it was difficult to foster the excellent specialists only by the

textbooks, both the education and the research had to be connected with the need of country construction and to aim at the advanced knowledges as well as techniques. So, we begun to study the tributyl phosphate (TBP) solvent extraction method which was newly developing at that time.

The solvent extraction was a chemical separation method developed from the 1950's. It is an utilization of such a property that the different substances have different distributoion behaviors in a two-liquid-phase system, the aqueous and organic solvents which are not mutually soluble in each other. Under a certain condition, these two kinds of solvents are, at first, well mixed, and then separated from each other by the centrifugal or/and gravitational forces. The advantage of this method is the very large separation factor. Furthermore, due to the treating materials are two kinds of solutions, it is easy to realize an automatic continuous operation at the highly efficient facilities in chemical industry. Therefore this method is especially suited to the separation of high level radioactive materials. From the published information, the United States and Britain have used the solvent extraction method to be as the main process for dealing with the reprocessing of nuclear fuel. In China the solvent extraction approach was tried to utilize in some fields, such as the separation of the rare earth elements, purification of natural uranium at the late 1950's.

In order to perform the investigation of plutonium, we ordered a small amount of plutonium for the experimental use to Britain in 1958, but it was refused. Later, we got about one gram of plutonium from the Soviet Union (the time of firstly producing plutonium in China was 1961). In the late of 1958, the Engineering Physics Building was completed and put into use, it has the radiochemsity lab. in the third floor, the chemical engineering lab. and the 801 uranium-separation test-workshop in the first floor. This provided the necessary experiment conditions for the reprocessing study. Our guiding ideology was to give full play to the merits of Tsinghua University, i.e. the professional knowledge and skill of engineering; the combination of science and engineering. So we did the studies, not only on the technological process but also on the radiochemistry and calculations; not only on conditions of technological process but also on designing equipments of chemical industry (the equipments for solvent extraction process); not only on the cold and tracer experiments but also on the hot experiments (true materials of nuclear fuel). At that time, there were no professional researchers who were doing this kind of experiments at our laboratory. Except of teachers (teachers mean professors, associate professors and assistants), the most of works were carried out by the thesis experiments of undergraduate and graduate students in the period from the late of 1959 through the begining of 1966. In total more than 200 students took part in those studies.

After then, there were still more than 10 graduate students who engaged those studies and some low-grade undergraduate students who did their "professional labour". Usually more than 100 persons were working together, the offices and the laboratories were full of people at that days, our colleagues and students were always full of enthusiasm.

Until 1964, we have performed a lot of experiments and hence obtained many achievements. For instance, on the chemistry and technological process, the extraction chemistry for uranium, plutonium and their main fission products like zirconium, niobium, ruthenium, strontium, cesium, and the rare earth elements in nitric acid system; the systematic measurements of distribution coefficient for uranium, plutonium and their main fission products in nitric acid system; the radiation stability and radiation chemistry of tributyl phosphate and kerosene; uranium-plutonium co-decontamination and partitioning-cycle process; uranium purification-cycle process; the method for the performance test of the extractant; the establishment of the chemical and the radiochemical analysis methods; the complexometric titration of plutonium; absorption spectrum and oxidation-reduction kinetics of  $\text{Pu}^{3+}$  and  $\text{Pu}^{4+}$ , and so forth. On the design of equipments, we developed the air-pulsed mixer settler; sieve-plate pulsed column; investigated its fluid hydrodynamics and made several experimental rigs. In order to have a place for hot chemistry experiments, we tried to build a hot chemistry laboratory in **No.200 Lab.** (これは現在の核能技術研究所の前身である). For this purpose, we began to design the hot lab. by ourselves in 1960. We were doing it with the learning. The hot cell, hood, globe box and all transport pipe systems were designed and built by ourselves. There were several plans which were proposed, discussed, and reconsidered for several times. The area of the hot chemistry lab. was also expanded from the original 400 m<sup>2</sup> to actual 2500 m<sup>2</sup>. The drawings of the designed plans were full of several cabinets. Until 1964, even though we had already mastered the techniques of the full procedure of separating plutonium from uranium-fuel by tributyl phosphate solvent extraction method, we had no hot lab. to further perform the hot experiments. So, the completed hot chemistry lab. was an important thing for our works. Noted that among aforementioned works, the design of chemistry, technological process and hot lab. was carried out by the colleagues of Artificial Radioactive Material Technological Process Group, the design of chemical engineering equipments for the solvent extraction was completed by the staff of Chemical Engineering Group. In the Autumn of 1963, we knew that the utilization of the precipitation method in the reprocessing of nuclear fuel was under study by the researchers of **No.2 Industry Ministry** (これは以前の Nuclear Industry Ministry of China、現在は China National Nuclear Cooperation, CNNC). It was provided by the Soviet Union. Using this method to separate uranium, plutonium and



their fission products, one needs to separate the solid and solution phases for many times by the batchwise discontinuous operation. In the case of high level radioactive materials, the separation way is the decantation which can not completely remove the mother liquor from its precipitate. Moreover, washing the precipitate produces a large amount of waste liquid which has to be re-treated again. The disadvantages of this method include the low separation efficiency, low recovery, need of huge-scale facilities; difficulty in automatic operation; and difficult overhaul. I was told that workers had to drive the tank into the workshop of factory to do the repair if somewhere of the facilities didn't work. When the leaders of the Nuclear Industry Ministry knew that we had mastered the techniques of the solvent extraction method, they decided to give up the precipitation method and use our solvent extraction process to construct reprocessing plants in China.

In the Autumn of 1964, we got about 2.3 million chinese yuan from the Prime minister Zhou enlai to construct a hot chemistry lab. We had to develop the full technological process for hot experiments of solvent extraction and to do the scale up experiments of air-pulsed mixer settler at **No.200 Lab**. At the same time, some of our staff went to **Nuclear Energy Research Institute** (it is also called **No.401 Institute** これは現在の China Institute of Atomic Energy である) to use the hot cells there to do the "hot" confirmation of the key results of the solvent extraction method. I was assigned to be the head of the group and in charge of doing the "hot" confirmation. We expected that the method developed by our staff could be applied to the practice of the industry department.

In No 401 Institute, we did further studies together with researchers of the No 10 and No15 divisions of the **No.401 Institute**. During about six months, we completed the "hot" confirmation for three important processes of the solvent extraction method. The "emulsification" experiment was firstly carried out in the physics hot cell located at the hall of heavy water reactor. The results indicated that two phases of the extraction system were well separated from each other after mixing them with the high level radioactive solution of spent fuel for a long time. After then, using extraction method, a series of results of recovery and decontamination factor for the fission products in the uranium-plutonium separation cycle were obtained. In 1965, a series of results of recovery and purification efficiency for plutonium-purification cycles were obtained at the newly built chemistry hot cell in the **No.401 Institute**. Each of the steps of solvent extraction process were verified for many times using the high level radioactive spent fuel, and the results showed a good agreement with that obtained in Tsinghua University by using the tracer materials. All the results indicated the good performance of the technological

process of the solvent extraction method. But in the **No.401 Institute**, the hot cell was not specifically designed for experiments of the solvent extraction, namely the equipments for the full technological process of the solvent extraction could not be completely installed here. Therefore, we moved back to the Tsinghua University again and to construct the full technological process of the solvent extraction in the new hot cell so called the 710 "hot" lab. of the **No.200 Lab.**

To fulfil above heavy mission, a new research group of the Engineering Chemistry Research Division was born. Prof. Wang Jiading was the director, Bao Shiquan (in charge of equipment and facilities with a code name of 710) and I (in charge of hot experiments with a code name of 712) were the vice-directors.

Much thanks to a wealth of experience accumulated during the past several years, we finished the design for building a 700 m<sup>2</sup> lab. and begun the construction within a very short time. In order to satisfy the demands of performing the full technological process of the solvent extraction method, the proposed plan of "a large hot cell, a large back space" was employed. This allowed that a lot of apparatuses like, evaporators, solution tank, transfer pump of high level radioactive liquid etc. could be installed in the back space, which made the functions of our hot cell be much more than those of usual one. It was suited to experiments of the full technological process of the solvent extraction. In this hot cell, most of the equipments and apparatuses needed to be specially designed and manufactured. For instance, the hot cell itself, thermal cell, stainless shell constructon, radiation shield, window, glove box, stainless hood, high and low level radioactive waste liquid tank, transfer system of irradiated fuel elements, transfer system for solid waste, transfer cart and channels, etc. all of them were designed by ourselves. After finishing the design and sending the drawings to the factory, we immediately started to prepare the hot experiements of the full technological process for treating about 4kg metal uranium. This work had also begun from the design of apparatuses, such as, solution tank, several categories of evaporators, different size of mixer settlers (three for extraction and one for the recycle of solvent) etc. Furthermore, we were aslo doing the analytical works to establish the analysis method for each steps of the hot experiments of the full technological process. During the days for constructing the hot cell and performing the hot experiments of full technological process of solvent extraction, a number of researchers from the No 2 Design Institute of the **No.2 Industry Ministry** and from the 404 Factory came here and took part in the works together with our staffs. It fully embodied the spirit of cooperation. Until now, we still have a closed relationship. Only spending about more than one year, the 710 hot lab. was completed. In the beginning of the 1966, we began to install the apparatuses in this chemistry hot cell. In April, the

first test operation was successfully carried out using the cold uranium sample. In May, 4kg irradiated uranium metal contained about 1/1000 plutonium were treated using this newly built separation system. The separation of uranium and plutonium was done in the first cycle. Then plutonium was purified and concentrated by the second cycle. Finally a further purification and concentration of the plutonium solution were performed by the anion exchange column. The plutonium solution needed to be further treated by the following procedures, precipitation by oxalic acid, filtration and ignition, to obtain the plutonium dioxide. Uranium was separated from plutonium at the first cycle, it was also purified by the second uranium-cycle and then stored for the other use. The organic solvent of the extraction process was reused after washing by alkali and acid solutions, respectively, in the mixer settler. The high level radioactive solution contained the most of fission products was stored after the treatment of the evaporation and concentration. Several tens of sampling points were set in all the technological process of the solvent extraction to monitor the separating status of each step. More than 100 items were sampled and analyzed during the separating procedure. 4 flow-lines of analyses were used to measure the activities from uranium and plutonium, respectively.

All the experiments were very successful. During the daytime and night of more than 10 days, many researchers respectively coming from different universities, factories and design institutes worked together, it was just the unity and cooperations to make us achieve the successes. Just at that moment, the "Great Culture Revolution" (文化大革命のこと) began. Both Tsinghua University and the **No.200 Lab.** were fallen into disorder state. Fortunately, due to the leaders of the **No.2 Industry Ministry**, of some institutes and of factories gave us strong backing to the studies, especially due to the support of Prime minister Zhou enlai, we got the time to continue the experiments. (In that time, schools, universities, institutes, factories, shops, departments..... all of China stopped working in order to do the movement of the "Great Culture Revolution". Doing the scientific study, meant not to join the revolution movement, was a kind of the crime. That is a reason why the author said they had to get the allowance from Prime minister Zhou to continue their studies - - - - -notation by translator).

In July, August and September, we did another 13 times of the hot experiments for producing plutonium from the irradiated metal uranium, obtained a great amount of experimental data, accumulated a wealth of experience. The  $\text{PuO}_2$ ; equiv. to 62g of metallic Pu, was produced in the 14 times experiments. This plutonium hence became a very important sample for later investigations. At the **No.200 Lab.** another solvent extraction facility for treating the cold 50kg U fuel per day was completed and put into operation successfully in the first half of 1966.

Our research achievements were then used in the reprocessing plant to treat the uranium fuel from production reactors. A *pilot plant* with the reprocessing capacity of about 400kg uranium per day began operation in September of 1968, it was very successful and examination confirmed that the quality of products was up to specification. In the same year, the plant began to provide the plutonium product for making the thermal nuclear weapons (H-bomb). A *Reprocessing Plant for military use* was also completed at the beginning of 1970, the first hot uranium sample was processed in April. When the Nuclear Non-Proliferation Treaty was signed by the United States and the Soviet Union in 1970, we have already had the Uranium bomb, Plutonium bomb and Hydrogen bomb. After the *pilot plant*, the solvent extraction was also employed at the large-scale *Reprocessing Plant*. This method not only improved our reprocessing techniques to the international level of the late of the 1960's, but also produced huge financial benefits. As compared to the original design by using precipitation method, the consumed amount of stainless steel decreased by three forth; the total area and length of main workshops (plant buildings) were only 27% and 20%, respectively; the construction period was eventually shortened; the saved investment was about 360 million chinese yuan; the operation cost was a half. (These data were from the book of "Modern Nuclear Industry in China", p230-233, Society Science Press, Beijing, 1987). In 1970, the new *Reprocessing Plant* was constructed and put into operation in the "Three-line" area (これは軍事戦略用語であり、内陸部の敵の攻撃を受け難い地区を意味する) by using the technological process of solvent extraction. In the meeting for the commemoration of the 20th anniversary of establishing reprocessing technological process in Tsinghua University (so called the 712 project), the late very famous nuclear industry professor Jiang Shen Jai (he had served successively as the general engineer of the 404 Factory, the Vice-minister of Nuclear Industry Ministry, the chairman of National Science and Technology Committee, the director of National Nuclear Security Bureau, Member of Chinese Academy of Sciences) said, " I got a very deep impression on the reprocessing techniques when I visited the reprocessing plant in France in 1974. I found that in many aspects their process was not more advanced than ours, for example, the technological process, facilities, and parameters." He further said, "Nuclear Industry Ministry received two National Prizes, one is nuclear bomb techniques and the other is nuclear missile, both are the national special prizes. These two prizes belong to the physicists, chemists and engineering chemists have nothing, only play as unknown heros..... Actually, no nuclear fuel - - no nuclear bomb ; no chemists - - no nuclear fuel. But unfortunately this fact seems to be not understood. The techniques for making nuclear bomb is not difficult, Israel knows, Libya knows, too, and many other countries know it.

But they can not make the nuclear bombs, why? the reason is very simple, they have no nuclear fuel because they have no nuclear chemists and nuclear engineering chemists." - -  
- (quoted from "New Tsing Hua" , Vol 934, Nov. 4 ,1986), our achievements was fully affirmed by Prof. Jiang and was awarded the prize of National Science Council.

During above works, we also fostered a number of the specialists and researchers for the reprocessing field. From 1959 to 1966, the engineering radiochemistry students of 7 fisical years graduated from our Lab. They have been active in institutes, production factories, design departments, education and administrative positions. About 150 workers from the 404 Factory and about 70 researchers from the No. 2 Design Institute came here and worked together with us. They obtained the significant training and useful experience which were beneficial for their later works.

We could say that in the construction of reprocessing process, Tsinghua University made a great contribution. If there were no our works during 1959 through 1964, it would be impossible to complete such a large-scale reprocessing plant lately within only two years. In fact, it is very sure that we have an ability to develop the nuclear techniques through self-reliance even though we gave up the Soviet's frameworks. The success of the Pilot and large-scale Reprocessing plants indicate that our research is a solid job and can stand the test of practice. It was a very few case in the world that an university lab. carried out such an important research project. In the United States, the Soviet Union, France, Japan, Britain and Germany etc. countries, this kind of the research projects were undertaken by national institutes which have huge scale facilities and sufficient funds. The universities did only some fundamental experiments and studies. In 1958, a researcher of our lab. went to the same research group of an university of the Soviet Union, he saw that they only did somethings like radioactive tracer experiments in the university lab. Some foreign specialists, like the famous Germany scientist Dr G. Koch of Karlsruhe Research Institute, gave a highly appraisal to our works. He said, "you have already mastered all the techniques of the reprocessing process, and known how to develop it".

Thirty years were over, it likes mist and smoke wafting in front of eyes. All has become the past. Fortunately, this works have been recorded in the history of the nuclear and military industry of new China. Due to the adjustment of departments and T.Fs. by the Education Ministry in 1952, the power of chemistry and engineering chemistry division of Tsinghua University was much weakened, its research level once became very low in China. But since we established the new areas in the nuclear field, we obtained such great achievements which we should take pride in. Of cause, these achievements

were dependent on the correct supports from the leaders of our University and Department. Prof. Jiang Nanxiang, He Dongchang and Ten ten, they not only concerned the general principle but also took part in the reseach work by themselves. The cooperations from many departments were the base of obtaining aforementioned achievements.

We write this memory here after 30 years past.

It is actuated by the motives to encourage our young generations.

The historic facts have told us that we have high aspirations and abilities to master and develope the advanced science and technology through self-reliance. Today, under the new situation of the open and reformation of China, we have to broaden our horizons, to keep a close watch on the new developing trends, to work hard for solving the new problems in the nuclear fuel recycle field, to give significant contributions to the enterprise of nuclear energy of China and of the world.

**October, 1994**

## 溶剂萃取法核燃料后处理研究的回顾

(纪念清华大学核研院院庆三十周年)

朱永贍

在纪念核研院院庆三十周年之际，回顾一下60年代我院在核燃料后处理方面取得的成果是很有意义的。

50年代中期，清华大学成立工程物理系，1957年设放射化工专业，随后不久分设人工放射性物质工艺学专门化，这个专门化的任务是培养辐照核燃料化学后处理的专门人才。1960年放射化工专业归入新成立的工程化学系，分为天然放射性物质工艺学(110专业)和人工放射性物质工艺学(120专业)两个专业。汪家鼎先生任工程化学系副系主任(主任是张子高先生)，我任人工放射性物质工艺学教研组(120教研组)主任。核燃料后处理技术不仅在当时，而且直到现在都是国际上高度敏感的高科技领域，因为它是提取核裂变材料铀的关键技术，当前美朝核争端就是美国不允许朝鲜掌握此技术。当时在全国高校中只在清华设立了这个专门化，在成立这个专门化的时候，我们深切感觉到单凭几本教科书是办不好的，必须结合国家国防建设的需要，开展科学研究，才能在促进国家核科技发展的同时，培养出高水平的人才，我们把科研的目标对准了当时公开不久的先进的磷酸三丁酯(TBP)溶剂萃取法。

溶剂萃取是50年代才发展起来的化工分离方法，它利用不同物质在水溶液和另一不互溶的有机溶液之间的不同分配行为，在选择好的条件下，先使两相混合，然后在重力或离心力作用下分相，达到物质分离目的。这种方法可达到很高的分离因子，处理对象是两个液相，容易在高效化工设备内实现连续的自动化操作，特别适合于高放射性物质的分离。从公开发表的资料看，美、英等国已采用溶剂萃取法作为核燃料后处理的主要方法。50年代后期，我国也有某些行业，如稀土分离、天然铀提纯等开始试用溶剂萃取法。

为了开展铀的研究，我们于1958年向国外订购实验用的少量铀，英国拒绝供货，却从苏联订到了1克，得到了最关键的实验材料(我国于61年才第一次提出很少量的铀)。58年下半年工程物理馆建成交付使用，三楼有放射化学实验室，一楼有化工实验室和801提铀试验车间，使我们开展研究具备了物质条件。我们的指导思想是要发挥清华大学工科为主、理工结合的特点，既做化学研究也做工艺条件研究和计算，不仅做工艺研究，还做化工设备(主要是溶剂萃取设备)研究；不仅要冷实验和示踪量实验，还要做真实燃料的“热”实验，直做到能进行工厂设计为止。当时没有专职的科研人员，从事上述研究工作的，除了教师外，主要是从59年下半年起直到66年上半年各届毕业班学生的“真刀真枪”毕业设计和毕业论文，总计在200人以上。61年以后还

有十几位研究生紧密结合研究任务做研究论文。此外还有低年级同学的“专业劳动”。当时研究和设计场所是非常热闹的，经常有几十、上百人在工作。到1964年已经做了大量研究，取得的成果，在化学和工艺方面有铀、钚、硝酸及重要裂变产物锆、铌、钨、镱、铯、稀土等的萃取化学，铀、钚、硝酸及重要裂变产物的分配系数系统测量，磷酸三丁酯及煤油的辐射稳定性和辐射化学，铀钚共去污-分离循环，铀净化循环，钚净化循环的串级工艺实验和工艺条件的优化计算，萃取剂的性能检测方法和再生方法，全套化学分析和放射化学分析方法的建立等，还做了可称量钚的微量络合滴定，三四价钚的吸收光谱及氧化还原动力学。在装备方面研究了空气脉冲式混合澄清槽和脉冲筛板萃取柱的流体力学和传质性能，建立了多个实验台架，研究了它们的放大规律。为了有地方做“热”实验，我们力争在200号(即现核研院)建造一座“热”化学实验室。为此，从60年起自己动手搞设计，师生一起边学边干，设计热室、温室、手套箱、工艺管道系统等。清华土建设计院配合做土建设计，前后搞了好多个方案，面积由400平方米到2500平方米，图纸装满了几个大柜子。到1964年，我们已经基本掌握了磷酸三丁酯萃取法处理铀燃料提取钚的全过程，所差的就是“热”实验了。上述工作中，化学、工艺和“热”实验室设计是在人工放射性物质工艺学教研组内完成的，萃取设备研究是在化工教研组内完成的。

63年秋，在一次二机部(即核工业部)召开的会上，了解到他们正在根据苏联提供的资料研究另一种核燃料后处理方法——沉淀法，这种方法用产生沉淀来使铀、钚和裂变产物分开，过程中要反复进行间歇式的固相和液相的分离。在强放射性条件下不好采用过滤操作，用的是沉降倾析，沉淀和母液分离很不完全，洗涤沉淀时产生大量废水。此法分离效果差，收率低，设备庞大，无法实现自动操作，检修困难，听知情的同志谈修理时要开着坦克车进去。这种采用落后方法的工厂即使建成也是个很大的包袱。当时的工厂设计工作已很难进行下去。二机部的领导和专家了解了我们的工作，到1964年决定采用我们的研究成果，甩掉沉淀法采用萃取法的工艺路线来建造我国的核燃料后处理厂。

1964年秋，我们拿到了第一笔国家拨给的科研经费二百三十多万元，是从周恩来总理的专款中拨付的，用于在200号建造“热”实验室进行萃取法的全流程热试验和混合澄清槽的扩大冷试验。并要我们立即派人去原子能研究所(以下简称401所，现为原子能科学研究院)利用他们已有的热室对关键环节进行“热”验证，清华大学很快派出了以我为首的教师十余人。我们希望对自己研究出来的工艺流程进行初步“热”验证，使它能很快为工业部门采用，为国家做贡献，根据校系领导的指示，我们毫无保留地把已经掌握的全部知识包括实验结果、实验技术、计算方法、分析方法、核心设备(如空气脉冲混合澄清槽及其配套的脉冲发生器、加料器等等)都带到401所。在401所组成了突击队，由我担任队长和401所十室、十五室的同志一起，在大半年的时



间内完成了三个关键环节的“热”验证。先在重水反应堆大厅的物理“热”室内完成了“乳化”实验，证明此萃取体系在长期与高放射性的真实核燃料溶液混合接触后仍能顺利分相。随后，用热料液验证了第一循环的裂变产物去污率和铀钚分离及回收率。65年上半年在401所新建的化学“热”室内在验证第一循环的同时重点验证了钚净化循环的净化率和收率。每个“热”验证实验都重复多次，结果与清华大学的示踪量实验结果相符，表明了萃取流程的良好性能。由于401所的“热”室不是为萃取实验设计的，无法完成全流程的“热”实验，此艰巨任务就落在建在200号的710“热”实验室身上。

为了完成这项重要的研究任务，清华大学专门成立了工程化学研究室，由汪家鼎任主任，我(负责热实验工作，代号712)和鲍世铨(负责710热实验室建造)任副主任。

由于有过去几年设计“热”实验室的经验积累，我们很快做出了一个700平方米的设计，在200号投入施工。为了满足做全流程实验的要求，大胆采用了“大热室、大后区”的方案，很多工艺设备如级间蒸发器、贮液罐、高放输液计量泵等都可放在大后区，使得我们的热室功能大大超过一般的化学热室，适合做萃取工艺流程实验。热实验室的大小设备很多须专门设计加工，如热室、温室的不锈钢壳、防护屏、窥视窗、手套箱、不锈钢通风柜，强放和中放废液贮罐，燃料元件运输铅罐，固体废物运输铅罐，运输小车及通道等等，在过去工作的基础上很快出齐图纸，付诸加工。稍后又开始为每批投料约4公斤金属铀元件的全流程热实验作准备，设计实验流程，溶解器，各种蒸发器，不同尺寸的混合澄清槽(三个萃取循环和一个溶剂再生循环)等等，并投交加工。还为热实验的分析方法做了全面的准备。

在建造“热”实验室和以后进行全流程“热”实验时，二机部第二设计院和404厂派来大批技术人员和技术工人参加工作，充分体现了大协作的精神，我们和这两个单位此后一直保持着亲密友好的关系。

只用了短短一年多的时间，701热实验室建造完工，66年初712热实验开始设备安装调试，4月份成功地进行了冷铀试验，5月底投入第一批4公斤辐照过的热铀金属元件，含量为铀量千分之一左右的钚，在第一循环中与裂变产物和铀分开，在第二循环中进一步净化和浓缩，然后通过尾端净化浓缩的阴离子交换柱得到墨绿色的钚溶液，再经草酸沉淀、过滤、灼烧得到核纯级的二氧化钚。铀在第一循环中与钚和裂变产物分离，再经2个铀净化循环后储存。用过的萃取剂有机溶液用混合澄清槽进行碱洗酸洗后复用。含有绝大部分裂变产物的高放废液蒸发浓缩后贮存。流程中设置了好几十个取样点，进行成百个项目的取样分析，还设置了4个流线分析点，分别监测关键部位的钚、铀和 $\gamma$ 放射性。整个热试验过程中，来自学校、工厂和设计院的实验人员、实验室运行人员和后勤人员紧密配合，经过十来天的日夜奋战，取得了第一次热实验的胜利。

正在这个时候，“文化大革命”开始了，学校和200号陷入了巨大的混乱中。我们坚信我们的实验工作是国家的急需，在二机部领导和有关设计院和工厂的支持下，尤其是在8月份取得周恩来总理关于实验要继续做完的明确指示，教师、技术人员和工人师傅团结一致，在7、8、9三个月内又做了13次热实验，超过额定计划完成了流程验证和研究任务，取得了大量的数据和经验，14次热实验共取得核纯级二氧化铀折合金属铀62克，为国家提供了试验样品。在200号建成的冷铀萃取台架实验室(处理量50公斤铀/天)也在66年上半年运行成功。

我们的研究成果被用于我国生产堆核燃料萃取法后处理厂的设计和运行中，生产能力为400公斤铀/天的中间试验工厂，68年9月投入热铀元件，一次投产成功，获得合格产品，68年当年就为新的热核武器试验提供了铀装料，夺回了失去的时间。军用后处理厂在70年初建成，4月份投入首批热铀元件，6天后获得合格产品。1970年美苏为了垄断核武器，提出签订核不扩散条约的时候，我国已是铀弹、钚弹、氢弹都有的核武器品种齐全的核大国。

中间试验工厂和大厂相继采用溶剂萃取法，不仅将我国后处理工艺提高到60年代后期的国际水平，而且带来巨大的经济效益。据估算，与原设计的沉淀法工厂比较，不锈钢用量减少四分之三，工程量大大减少，主厂房建筑总面积和长度分别为原设计的27%和20%，建设周期显著缩短，节约工程投资3.6亿元，运行费节省一半(上述数据引自《当代中国的核工业》，230—233页，中国社会科学出版社，1987，北京)。70年代在三线又用此流程建造了第二座后处理厂。我国已故著名核化工专家姜圣阶(曾任404厂总工程师，核工业部副部长，部科技委主任，国家核安全局局长，中科院学部委员)于清华核研院举行的溶剂萃取法核燃料后处理(712)任务完成二十周年纪念会上说：

“我在1974年到法国马尔库尔后处理厂参观，看完以后很有感触，他们比不上我们先进，无论在工艺上，设备上，参数上都不如我们。现在核工业部能拿出去跟外国比一比的只有后处理”，又说“现在核工业部请了两个奖，一个是原子弹技术突破和武器化，一个是氢弹技术突破和武器化，都是国家特等奖，但这两个奖都是物理的，化学化工方面根本没有份，只好做无名英雄了。……没有核燃料你原子弹就做不出来，原子弹技术现在以色列有，甚至利比亚也有，很多国家都有，但它做不出来，为什么，没有燃料。要燃料就必须有化学化工”(引自《新清华》1986年11月4日出版的934期第三版)，充分肯定了我们的工作成绩。本成果获得1978年全国科学大会奖。

在完成科研任务的过程中，还培养了一代后处理科研、设计、生产、教学方面的技术干部，从59到66年一共培养了7届放射化工专业的学生，毕业后他们分布在科研、设计、生产、教学和行政领导部门，成为各条战线的骨干。在热实验过程中，有150名404厂的技术人员和工人及70名第二设计院的技术人员参加，他们在完成任务的同时，接受了培训，学到了宝贵的实际专门知识，对他们以后的工作大有益处。

我们认为在我国萃取法核燃料后处理工厂建设中，清华大学是作出了重大贡献的，没有我们59—64年间的工作，领导部门不可能果断地抛弃落后流程采用新流程，不可能在短短不到2年内完成如此规模的热实验，事实上，这是一项完全丢掉苏联框框我国全靠自力更生掌握的重大核技术。中间工厂和大厂的快速建成和一次投产成功说明了我们的科研成果是扎实的，充分的，经得起实践考验的。一所高等学校完成如此重要的科研任务，在世界上也是很少见的。在美、苏、英、法等核大国以及后来的德、日等国，这类科研都由规模巨大、经费充足的国家实验室承担，高等学校只是做做原理性实验和辅助研究。58年我们曾派出教师到苏联大学对口专业进修，在学校实验室里只是做些放射性同位素制备，示踪量放射性实验，从事后处理的科研机构 and 工厂中国人是进不去的。一些外国专家对我们的工作深感钦佩，德国卡尔斯鲁厄核研究中心的有名后处理专家G.考赫博士于1986年参观我们的热实验室时很感慨地说：“你们早就掌握了后处理的know how！”。

三十年已经过去，过眼烟云，已成陈迹，可喜的是这段历史已记录在新中国的核工业史和军工史中。1952年院系调整以后，清华的化学化工大大削弱，在我国学术界没有什么地位，然而在原子能新专业成立后十年就完成了这项重大的核化学化工科研项目，我们为之感到自豪。这个成就是在当时校、系正确领导下取得的。蒋南翔、何东昌同志经常给予关心和支持，滕藤同志不但对制定工作方针、确定研究路线给予具体的指导，还亲自参加研究，指导大学生和研究生的研究工作。广大的教职工、学生和外协人员的大力协同、奋勇拼搏更是完成这项科研的基础。

我们在三十年后的今天写下这些，主要是为了激励后人。中国人民有志气，有能力，能够自力更生掌握尖端新技术。在改革开放的新形势下，我们要开扩眼界，把握世界核能发展动向，奋发图强，研究解决核燃料循环中的新课题，为我国乃至世界核能事业的再度辉煌作出贡献。

(1994年10月)