

照射剤燃料の乾式分離、抽出技術に関する調査・検討

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1996年3月

株式会社 ペスコ

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

照射済燃料の乾式分離、抽出技術に関する調査・検討

湯本録三* 横内洋二*

小泉益通* 関 貞雄*

要 旨

照射済MOX燃料の乾式分離、抽出に関する技術の開発状況を調査し、大洗工学センターで実施する場合の試験内容、試験装置、試験装置を設置するセルの構造及びセルの設置場所等について検討した。

試験の目的はプロセスの成立性をはじめコールド試験では得られないFPやTRUの挙動を把握すること及びオフガス性状の挙動を確認することである。

試験内容の検討にあたり、取扱う試料としてはもんじゅ燃料の燃焼度9万4千MWd/ton、550日冷却1バッチ、最大重量100gを想定した。試験は燃料ピンの切断、粉末化等の前処理を除く①酸化物燃料還元工程、②電解精製工程、③陰極回収物処理工程、④TRU抽出工程の4工程をホット試験の重要課題として取り上げ、試験工程の概要、試験フロー図及び試験における課題等を明らかにした。試験装置としては、各工程毎の試験装置の概略仕様、構造等の検討を行い、その概要を示すとともに、処理後の生成物評価に必要な分析装置についてもその概要を検討した。また、使用された塩化物からTRU及び一部のFPは抽出回収され、電解精製工程等にリサイクルされる。残留FPを含む塩廃棄物はゼオライトに吸蔵し固化安定化された後、容器に封入して保管する。これらの試験を行うセルについては、既設FMF試験セル、AGFコンクリートセルの改造及びFMF地下2階倉庫、FMF増設第2補機室におけるセルを新設する場合のケースについて検討した。その結果、設置スペース、装置設置を含むセルの改造及び新設の工事の難易度、メンテナンスの方法、オフガス対応を含む換気(Ar雰囲気)設備及び試験装置の配置計画などからFMF増設第2補機室に新規に鉄セルを設置して試験を行うことが、工事上の安全確保も容易であり、放射性廃棄物の発生も少なく、最も安全に、また他の試験作業への影響を与えることなく、かつ効率的に試験操作を行うことが可能であることを明らかにした。

本報告書は、(株)ペスコが動力炉・核燃料開発事業団殿との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：07C6391

事業団担当部課室：大洗工学センター燃料材料開発部照射燃料集合体試験室 中村保雄

*：株式会社ペスコ

Investigation of Pyrometallurgical Partitioning and Extracting Technology of Irradiated Fuel

* RYOUZOU YUMOTO

* YOUZI YOKOUCHI

* MASUMICHI KOIZUMI

* SADA0 SEKI

Abstract

The state of development of pyrometallurgical partitioning and extracting technology of irradiated fuel is investigated.

Also in case of performing the test at O-arai engineering center, the contents of the test equipments, structure and arrangement of cells that equipments are installed, are studied.

The purpose of the test is to confirm the realization of the process and behavior of FP and TRU elements, and off-gass that cannot be made clear by cold test.

In this study it is assumed that $\sim 100\text{g}$ monju fuel (94,000MWd / t B.U, cooled for 550 days) per batch is treated.

Four processes are picked up except for pin sectioning and powdering, as important subjects.

They are as follows.

- ① reduction of oxide fuel
- ② electrorefining
- ③ cathode processing
- ④ extraction of TRU elements

And the outline of the test, blocked flow chart and the outline of equipment are clarified. And the outline of chart is drawn.

Moreover, the specification of analitical equipments which are necessary to analyze the product is shown.

From spent chloride, TRU and a part of FP elements are extracted and they are recycled for electrorefining and so on.

The salt -waste including residual FP elements is kept in a receptacle after being absorbed into Zeorite and soldified.

As the disposition of these tests, modified test cell in the existing FMF, modified concrete cell in AGF, new cell at B2F in the existing FMF and new cell at second auxiliary room in FMF extension are studied.

As result of considering the disposition for equipment, the difficulty of reconstucting new cell including of equipments, method of mentenance

,and equipments of ventilazion (Ar circumstance) including of management of off gas, and the plan of disposition, it is concluded that constructing iron cell into the second auxiliary room of FMF extension is best , because it is easy to construct safely ,and the occurance of radioactive waste and the influence to oter tests is little ,and it is possible to examine more efficiently.

目 次

まえがき	1
I 分離、抽出工程検討	2
1. 取り上げる工程試験	2
2. 試験のための試料	2
3. 工程試験の概要と問題点	2
3.1 酸化物燃料還元工程	2
(1) 転換への条件	2
(2) 転換技術の開発状況	3
(3) 酸化物燃料の還元法の概要	3
3.2 電解精製工程	5
(1) 開発状況	5
(2) 金属燃料の電解精製の概要	5
3.3 陰極回収物処理工程	9
(1) 開発状況	9
(2) 陰極Cd槽からCdの蒸発による分離	9
(3) 重要なポイントと問題点	9
3.4 TRU抽出工程	10
(1) 塩相からのPu、TRUの抽出	10
(2) Pu—TRU抽出効果の向上	11
(3) 重要なポイントと問題点	11
3.5 塩廃棄物の処理	11
3.6 工程試験を行った場合の生成物、廃棄物の処理に関する考察	12
4. 工程試験と分析について	14
4.1 工程試験と分析の対象に予想される元素	14
(1) MOX燃料のLi等による還元	14
(2) 電解精製工程	15
(3) 塩, Cd蒸留工程	16
(4) TRUの抽出工程	17

4.2	分析についての検討	17
II	工程試験の実験装置及び周辺装置の基本仕様	36
1.	酸化物燃料還元装置（Li還元装置）	36
2.	電解精製試験装置	39
3.	陰極回収物処理装置（カソードプロセッサ）	44
4.	TRU抽出装置	47
5.	その他の機器、治具	50
6.	電気品、雰囲気浄化系、ユーティリティ	50
7.	Ar循環精製装置	50
III	分離、抽出プラントの設置場所の調査・検討	53
1.	乾式分離、抽出試験作業の工程概要	53
2.	乾式分離、抽出試験を行うセルの計画	55
2.1	FMF試験セルの改造計画	55
2.2	AGFコンクリートセルの改造	57
2.3	FMF増設第2補機室の改造計画	58
2.4	FMF地下2階の改造計画	61
3.	乾式分離、抽出試験を行うセルの設置場所の検討	62
4.	工事工程	70
IV	主要機器の電気容量	74
1.	試験装置関連	74
2.	セル関連	74
V	開発課題、懸案事項及び参考文献の把握	76
1.	開発課題、懸案事項	76
2.	参考文献について	79
VI	まとめ	81

表 目 次

表 I - 1	条件①文殊燃料100g(Metalとして)・U:69.4w/o Pu:29.7w/o Am:0.9w/o ②94,000MWD/T, 550日冷却	26
表 I - 2	Release Gas の評価	27
表 I - 3	Volatile 物質の評価	28
表 I - 4	MOX 燃料の燃焼後のFPの量と放出するキュリーと熱量	29
表 I - 5	常陽燃料の10万MWd/Tの組成	33
表 I - 6	燃料組成のXMAによる固定	34
表 I - 7	Cdの蒸気圧	35
表 III - 1	分離, 抽出プラントの設置場所の検討・評価	63

目 次

図 I - 1	使用済 MOX 燃料の乾式再処理工程のフローシート	19
図 I - 2	Li プロセスの原理	20
図 I - 3	液体 Cd への溶解度	21
図 I - 4	使用済 MOX 燃料の乾式再処理の概要	22
図 I - 5	塩化物の蒸気圧	23
図 I - 6 (1/2)	アクチニド元素の蒸気圧	24
図 I - 6 (2/2)	アクチニド元素の蒸気圧 (上) 及び蒸発速度 (下)	25
図 II - 1	Li 還元装置	38
図 II 2 - 1	電解試験装置 (固体陰極)	42
図 II 2 - 2	電解試験装置 (Cd 陰極)	43
図 II - 3	カソードプロセッサ	46
図 II - 4	TRU 抽出装置	49
図 II - 5	Ar 循環精製装置概念系統図	52
図 III - 1	試験作業工程ブロックフロー図	54
図 III - 2	FMF - 1 試験セル配置計画図	64
図 III - 3	AGF セル配置計画図	65
図 III - 4	FMF 増設第 2 補機室鉄セル全体図	66
図 III - 5	揮発性 FP's 及びオフガス処理系統配置図	67
図 III - 6	試験用セル概念図「参考図」	68
図 III - 7	FMFB2F 配置計画図	69

参考資料

参考資料-1	MOX 燃料の元素表	82
参考資料-2	試料 100g 中の FP 等の組成及び電解精製時における FP 等の所在	83
参考資料-3 (a)	酸化物の標準生成自由エネルギーと温度の関係	84
参考資料-3 (b)	酸化物の標準生成自由エネルギーと温度の関係	85
参考資料-3 (c)	塩化物の標準生成自由エネルギーと温度の関係	86
参考資料-4	AGS による照射済燃料の乾式分離, 抽出工程中の元素分析 に関する検討	87

まえがき

高速炉燃料の再処理において経済性及び廃棄物発生量等の点で、湿式法より優れている可能性のある乾式再処理法について技術開発が進められている。高速炉の実用化に向けて必要な、経済性に優れかつ将来要求されるさまざまな要件を満足する再処理手法を選定し開発するためには、できるだけ早期に乾式再処理工程の成立性を確認し、長期的に必要な開発を同定し推進する必要がある。

本検討は、照射済MOX燃料を対象とした乾式による分離、抽出技術に関して選定された方法について具体的措置概念及び設置場所等について検討するものである。

1 分離、抽出工程検討

1.1 取り上げる工程試験

ANL法を参考にして使用済MOX燃料の乾式再処理を行う場合の全体工程フローシートを図I-1に示す。これらの各プロセスのうち動燃として技術開発を進める場合は以下の4工程を優先して行うべきであると考ええる。

- ・ 酸化物燃料還元工程
- ・ 電解精製工程
- ・ 陰極回収物処理工程
- ・ TRU抽出工程

なお、これらの試験に用いる試料は、大洗工学センター燃料材料開発部で調製され、酸化物燃料の粉末として提供されるものとする。

2. 試験のための試料

約100g(7~10万MWd/t 燃焼した場合のメタルの全量)の炉心燃料を1バッチ量/回・試験として設定している。理由としては、合理的なセルの遮蔽能力としたいため、及び実験後の廃棄物の保管能力と実験解析のための必要なサンプリング量から最小の試験試料量を考慮した。

ここでは、もんじゅ燃料、9.4万MWd/t、550日冷却の使用済燃料を参考として評価した。(ORIGENコード使用、'95.5.11計算、再開部提供)。使用済燃料を貯蔵プールから輸送する場合に1.5年位(550日)の冷却期間を経たものが必要と考えられる(再開部)。

3. 工程試験の概要と問題点

3.1 酸化物燃料還元工程

(1) 転換への条件

① ANL法のMOX燃料への適用のためには、先ずなすべきことはMOXから金属への転換が絶対条件である。

② 転換すべき内容と条件

— 1 回収されるべき元素が金属に還元されていること、金属になっていないとANL法が適用不可能である。

－ 2 回収されるべき元素

U, Pu, Np, Am, Cm. . . . アクチニド
及び必要に応じて長半減期のFP (Cs, Sr . . .)

－ 3 回収率

我が国の廃棄物処分の方策から、アクチニドは99.9%以上回収され、炉内で消滅されることが期待されている。

廃棄物中にアクチニドが入っていると、毒性が極めて長期になり、処分後の管理が困難になる。

従って、出来る限り、抽出－回収されることが期待される。

(2) 転換技術の開発状況

① 今迄の経過

酸化物の金属への転換に関して、種々な方法が開発されてきた。

一つは、最近 ^{235}U の濃縮を原子法で行う場合、コストの低減化のため UO_2 等から直接にU-金属を製造する方法が、米国で短期間強力に行われた。又、米国においてユッカーマウンテンに廃棄物処分されている軽水炉の使用済燃料からアクチニドを抽出し回収し、その後処分する対策が考えられたANL法を適用すべく研究開発が進められている。^{[1], [2]} また、我が国においても、種々の方法が開発されている。^{[3], [4]}

② 現状の評価

現在開発の途上にあって、確定された方法をあげるのは困難であり、2～3の可能性のある方法が検討されており、これらの方法のフレキシブルな方法を取り上げることにする。

(3) 酸化物燃料の還元法の概要

① 反応の内容

－ 1 酸化物燃料の組成と相

組成の一例としてもんじゅ燃料の9.4万MWd/t、550日冷却の場合を示す。(表I-1、I-4)

相として、5相存在する。ガス、揮発し易いもの、メタル相、グレイ相(Ba, Sr, Zrの酸化物を中心にした相)と、 $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ の内に希土類等の酸化物を固溶した相がある。(表I-5、I-6)

ー2 被覆管から、燃料の酸化粉末化による脱離

一般には、燃料ピンを3cm位に切断したものを、～500℃位に加熱し、空気による酸化粉末化を行う。このケースはMOXペレットの乾式回収を行う場合と似ていて、固溶しているUO₂がU₃O₈になり、UO₂の体積膨張と粉末化により燃料ピンから取り出し、分離することが出来る。

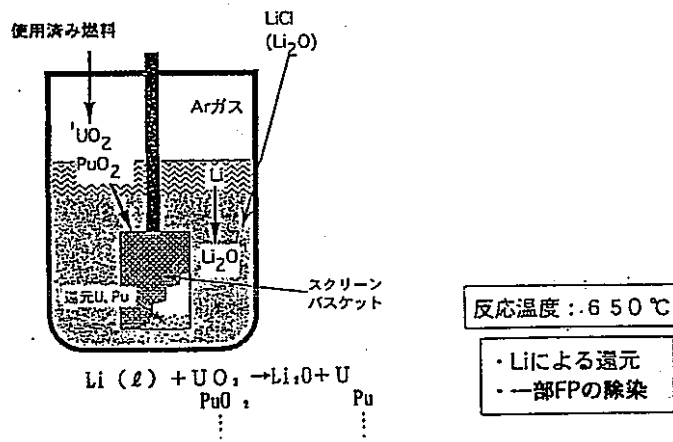
この方法は、MOX燃料の直接乾式再処理の最初の工程でこの方法を採用している。この方法により、微粉末が期待出来、還元し易くなると思われる。

ー3 本研究におけるMOX燃料ピンから燃料の脱離

MOX燃料はドリル等による機械的脱離のため、微粉末になりにくいUO₂ペレットでも還元反応が進むと報告されている。(電中研, 常磐井氏のANL報告) [3], [4]

ー4 反応の概要

ー1の酸化物燃料の組成と相のものにLiによる還元が進められる。簡単な図で一例を示す。(図I-2参照)



この反応は、熱力学的には、右側にすすむことになるが、Li₂Oが溶解しており、濃度が高くなると反応が進まず、そのため、Li₂Oを塩相中で還元してやる方法が開発されている。 [5], [6], [7]

ー5 問題点

酸化物燃料を金属に還元する最善の方法はまだ決定されていない。従って早急に開発し、確立する必要がある。キーポイントは、還元収率を99.9%位以上に高めることである。収率が下がると、酸化物廃棄物となり処分されることになる。

3.2 電解精製工程

(1) 開発状況

U, Pu, Zr等の単独な金属の電解精製については、多くのデータがある。^[8]

しかしながら、照射された金属燃料の電解精製による再処理の研究は'85年にはじめてANLによって全面的に開始されたと言えるだろう。この方法は、単純に一つの金属を電解精製するのと異なって、多くの元素を同時に取扱うために極めて複雑であり、理論的な予測が困難である。模似燃料を用いた実験経験はあるがホットの実験結果は、我々は未だ入手していない。

(2) 金属燃料の電解精製の概要

① Cd相への金属燃料の溶解

単独元素のCd中への溶解については、十分に測定されて良いデータがある^[9]

図I-3)。しかしながら大洗で行なうホット試験の場合のように、U, Pu-----FPが共存する場合の溶解度等については報告がない。

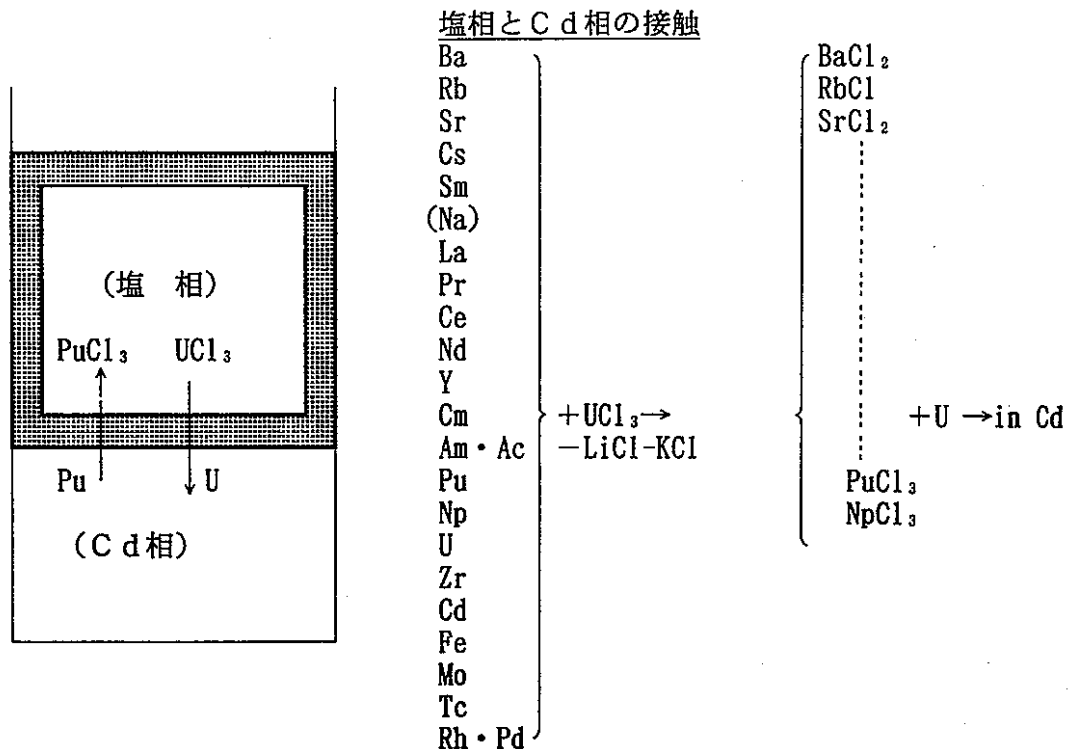
又溶解速度については、U-金属をCd中に溶解したデータ^[10]があり500°C4時間位で95%位溶解で、24時間位で100%に達するので、金属燃料をCd中に完全に溶解してからの場合と、溶解させながら電解精製する場合があるが、溶解速度が電解析出速度に追いつくようであれば後者の方が有利である。

② 塩相の組成

LiCl-KCl (60m/o ~ 40m/o 組成) が、ベースでありこれに最初の原料としてUCl₃を考慮した。LiCl-KCl-UCl₃の組成は、ANLの実験データから、LiCl-KClが94m/o、UCl₃が6m/oの組成とした(ANLのデータに基づく)。

③ 電解精製を開始し、通電する前のCdと塩相の状態

ここでは、Cd相中に溶解している各元素とLiCl-KCl-UCl₃と反応し、UCl₃の持つ ΔG^0 、(塩化物の生成の自由エネルギー)より大きい ΔG^0 を持つFPは塩相に移る。



従って塩相中において、反応にあずかっていたUCl₃の分が塩相に移り、反応にあずかっていたUCl₃は還元されてCd相に溶け込むことになる。ここで平衡状態が成立する。

④ 電解精製

この工程が、乾式再処理工程の中での中心である。U、Pu、Np、Am、Cm及び必要に応じて半減期の長い有害な元素を回収し、再び燃料に加工し燃焼消滅されることになる。

－ 1 金属燃料の電解精製の概要

ここでの重要な目的は還元された金属燃料が電解精製法によって、いかに目的とするU、Pu、Np、Am、Cm等が選択的に高い収率で得られる事を確認することである。

－ 2 目的とするU、Pu、MA等の回収

理解し易いために簡単な略図(図I-4)を用いるが、Cd相中には、前の工程で金属還元された金属燃料が、Cd相中に溶解される。この場合2つのケースがある。

ケース1: Cd量が多い場合、充分な量のCd中に金属燃料を完全に溶解する。但しこの方法だと余計なCdを取扱うことになるか、逆にこの点が2つのメリットにつながるのか検討の余地がある。

①電析による析出速度を早める。

②連続的に金属燃料を完全に溶解する場合、容量が大きいので、Cd相の

中の蓄積物の除去の回数が少なくなる。

ケース2：Cdが少ない場合、Cd中への金属燃料の溶解速度が早く、十分に電解析出の速度に追いつくことが可能なのか、但し、連続操作を進めた場合、Cd相からの蓄積元素（Zr, Rh, Pd, Mo, Ru, Tc etc）の除去の回数を頻繁に行う必要があるのか、評価検討が必要、この辺のバランスが、その後に関連する廃棄物の処理とCdのリサイクルの経済性に密接な関連を有する。（ANL等ではこの方法を採用している。）

注意事項：今回の大洗での実験では2つの方法の採用が可能なように充分なCd（ℓ）を使用出来る装置のスペースを採用している。

塩相には、前述したように、はじめの段階（即ち電解精製の開始のCd相と塩相の接触による平衡状態）でLiCl-KCl-UCl₃の中のUCl₃モル数を充分に考えておく事が、第一回目の電解精製のときに問題になる。今回の場合は、第1回バッチ量（約100gU, Pu……FP）に見合うUCl₃の量がLiCl-KClに～6m/ℓとける量とした。但し、今後数回連続して行う場合は、FPの塩化物が蓄積する場合の余裕をもたせる配慮が必要だろう。

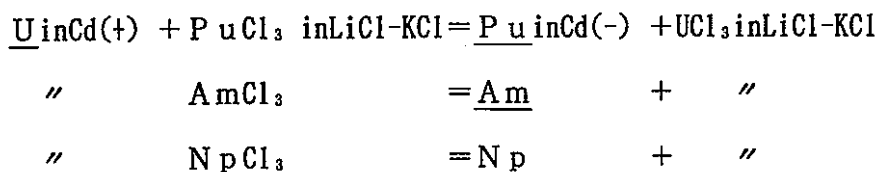
もう一つの問題は、塩相の容量が少ないと陰極Cd槽がCd相からはみ出してしまうことになる。この点は、電解精製装置の設計に反映されている。

— 3 電極精製によるU, Pu, MA等の回収に関する反応

ここでは、2種の異なったメカニズムが予想される、それは陽極Cd中に溶解しているU, Pu, MA等が陽極Cd中に移向するプロセスである。

a) 陽極Cd中に溶解しているU, Pu, MA等を陰極Cd中に移送・溶解させる方法、これは両極のCd槽中に溶解している元素の濃度の差から由来する濃淡電池の電位に逆って仕事をしてやり陽極から強制的に送り込み、陰極Cd槽に詰め込むことである。

b) a)の仕事と併用して、化学反応を強制的に逆に進める方法である。



の方法である。

⑤ 電解精製で重要なポイントと問題点

- － 1 ここでのプロセスは、対象とした元素の高い収率を得ること、又得たい対象とした元素の種類が狭くしぼれること。このために、電極精製のために最も重要なのは電析のための電位の把握である（付録－ 2）。

但し、これはあくまでも理論値であって、実際の場合には電流を通じることによる電位の増大がある。

$$E = E_0 + E_1 + E_2 \quad (E_0 : \text{理論電位、} E_1 : \text{抵抗、} E_2 : \text{分極})$$

このため、理論電位から予測される電析元素の順位が逆になる場合も予測され、この場合にあってがわれた装置で得られた結果を十分に評価し、バッチ実験を連続して行なうことである。

- － 2 ここでの最も重要な点は、U、Pu、MA等がどのような条件でどれだけ回収出来るのか又どこまで高収率が得られるのか、これの重点的な追究である。
- － 3 更にここで回収しきれなかった、U、Pu、MA等が、どこに蓄積存在しているのかを見極めることである。その一つの見ばしい部分は、電解精製中に蓄積が予想される塩相である。
- － 4 塩相には、2つの重要なポイントがある、一つは－ 3で述べたように塩相中に蓄積の可能性のあるU、Pu、MA等であり、これはある時期に、(4)のTRU工程で抽出することが必要である。一つはFPが蓄積し、崩壊熱による熱のコントロール不調のため塩を精製して、再利用するか又除去されたFPが処理処分される。この部分の度合いを見通し、次のプロジェクトに反映することである。
- － 5 最後になるが、ここまで来るのに多くのコールドテストを行う必要がある。効率よく見通すため、出来る限りの理論的評価を先行すべきである。多くの理論データは、単独なケースが多く、多元素の共存のケースの場合には、単なる見当となる場合が多いから、ホットテストは、究極的な真理の表示である。
- － 6 Cd陽極での挙動
- ここでは、陰極に移動し析出しなかった金属が蓄積する。これらの金属は、U又は実験の方法によりCdの塩化物より、その生成の ΔG° が小さい元素が残る。具体的にはZr、Cd、Nb、Mo、Tc、Rh、Pd、Ru、Ag等である。

- － 7 還元された金属燃料をCd陽極に溶解しないで、塩相中で電解精製する方法
簡便な方法の一つとして考えられるが、取り上げるには更に調査、検討が必要
である。

3.3 陰極回収物処理工程

(1) 開発状況

Cdの蒸溜については、我が国においても、充分行なわれており、あまり重要な問題は少ないと思われるが、ここではCd相中に回収され溶解されているもの、更に過飽和になって金属や金属間化合物となって沈澱しているものがある。従ってこれらの経験は少なくANLのデータが信頼し得る。

(2) 陰極Cd槽からCdの蒸発による分離

ここでのCd槽には、一バッチ分(100gHM)として、

$U = 64 \text{ g}$ 、 $Np = 0.028 \text{ g}$ 、 $Pu = 25 \text{ g}$ 、 $Am = 1.2 \text{ g}$ 、 $Cm = 0.02 \text{ g}$ 等
が回収され、存在することが予想される。Uは一部溶解、ほとんどは、金属として
沈殿又Puも同様に一部溶解し多くはCd、Pu(at500°C)で沈殿、AmとCmは
、at500°C付近では、溶解していると予測される。^[11]

① Cdの蒸発と金属の生成

Cdの蒸発は、当初は純粋な状態に近い蒸気圧で蒸発する(表I-7)。しかし
ながら、段々と溶解している元素の濃度が高まると a_{Cd} が減少し、 P_{Cd} がさがって
来る。この場合の評価もされるべきであろうがそれほど厳しくは変化しないだろう。
陰極回収物処理工程の問題は3つあって、

一つは、最終に近くなって、金属間化合物が現れて来ることである。これらの金属
間化合物を分解することに必要な温度と、それと平衡にある P_{Cd} の圧力の評価が必
要である。

もう一つは、微量に溶解しているAm、やCmの蒸気の評価である。

最後の一つは、付着している塩の除去である。

以上の3つの大まかな予想として

320°C : Cdの溶融

500°C : Cdの蒸発開始 ($P_{Cd} \approx 13 \text{ mmHg}$)

金属間化合物の分解(表I-7)

例) Cd, Puの分解の $P_{Cd} \approx 160 \text{ mmHg at } 1000 \text{ K}$

1000°C: 塩の蒸発 (図 I-5)

1300~1400°C: HMの溶解 (ここまで一挙にもって来るか?!)

従って800°C付近迄でCdの蒸発は、ほぼ完了するか更に残ったU, Pu, MA等の金属を純粹に金属や合金にするときに、AmやCm、又はPuがどれだけ蒸発 (図 I-6)するのか見極めが必要であろう。

(3) 重要なポイントと問題点

陰極回収物処理工程として、最終的に金属にする場合、どれだけの金属が蒸発によりロスして行くのか、高温のための装置の設計、材料、メンテナンスへの配慮が重要である。Cdや塩の蒸発時に、何が一緒にどれだけ蒸発するのか、今回の実験では、次のステップへの設計判断資料を提供するのが、目的である。

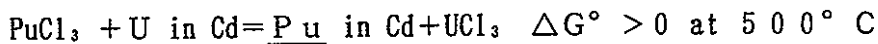
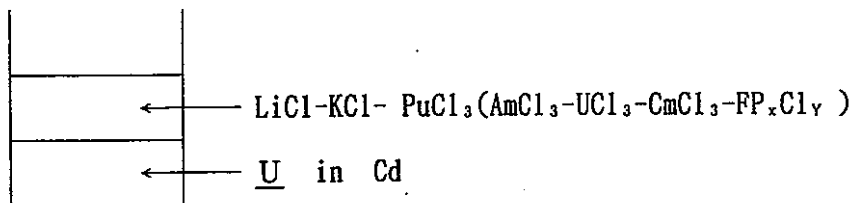
3.4 TRU抽出工程

3.2の電解精製工程において、この操作を連続して行なうと、塩相にU, Pu及びTRUが蓄積するのみならず、FPも同時に蓄積し崩壊熱等による問題が生じることは、前述した通りである。

塩の精製処置は、何回電解精製を続けたら、行なうべきかは2つの点から判断されよう。一つは、塩相の組成変化に伴う、電解精製条件への悪影響と、崩壊熱の蓄積 (この場合、大きく評価しても3.4ワット/1回 表 I-1 参照) から判断すべきであるが10回位の実験では、あまり問題にならないと判断している。口頭報告 (電中研等) では20回位と言っている。

(1) 塩相からのPu、TRUの抽出

ここでの反応は、簡単に示すと、次のようになる。一般には、



この反応において、 $\Delta G^\circ > 0$ であり反応は、僅かに右側に進むが効率は良くないので、この反応を数回繰り返すことにより、PuをCd中に回収することになる^[12]

TRUも同様である。

(2) Pu-TRU抽出効果の向上

ここでの抽出効率の向上には、一回の接触反応では限界があるので、繰り返し接触反応を行なう必要がある。

従って、遠心分離法によるパイロコンタクターの利用が考えられている^{〔13〕、〔14〕、〔15〕}ので、この適用への基礎データを蓄積しておく必要がある。

ここで回収されたPu-TRU in Cdは再び電解精製工程にリサイクルされ、燃料に加工される。

(3) 重要なポイントと問題点

ここでのポイントは、塩相中にある、Pu-TRUを抽出することで、それ以外の希土類元素等は抽出しないことである。そのため、Uが用いられているが、抽出率は理論的にあまり高くないが、利点として、PuとTRUが重点的に抽出されることである。しかしながら、Uを含むCd溶液と何回も接触抽出を行なう必要があるため、前述したように、パイロコンタクターの利用が必要になってくるし、又Cdが多量に用いられるので、そのための工学的データを取っておく事が重要である。

3.5 塩廃棄物の処理 (図I-1)

- (1) 電解精製工程で使用した熔融塩は、TRU抽出工程でCd-Uと接触し、PuとTRUは、Cd中に抽出回収される。その後この塩は、Cd-Liと接触し、Uと希土類(RE)が抽出回収される。2段階の工程で、この塩からPu、TRU、U、REが除去され、この塩の中にアルカリやアルカリ類が取り残される。
- (2) 処理された最後の塩(アルカリやアルカリ土類を含む)は、ゼオライトに吸蔵され塩固化処理されて安定な固化体となる。これは廃棄物容器に収納され、固体廃棄物保管庫に保管される。
- (3) 電解精製工程で使用された熔融塩から、Cd-Uで抽出回収されたPu及びTRUはCdと一緒に、電解精製工程にリサイクルされ、ここで再び電解精製され、陰極Cd相に回収される。
- (4) Cd-Liで抽出回収されたREは、Cdと一緒にCd蒸留工程に送られて、REは回収され安定に合金化される。この合金は廃棄物容器に収納され、固体廃棄物保管庫に保管される。

- (5) 電解精製工程で使用した陽極 Cd (白金族元素等を含む) も Cd 蒸留工程に送られ (4)と同様に処理される。

3.6 工程試験を行なった場合の生成物、廃棄物の処理に関する考察

先ず、ホットな実験を行なう前に、十分な経験とデータが必要であるが、不備な点が多く、更に前実験を充分行なう必要がある。

- (1) 1年間にこの実験を一通り、年に5回行なうこととする。
- (2) この場合1回分の実験の概要評価は次のようである。

但し、塩、Cdに関しては、前回に使用したものを再利用することも充分あり得るので、多少減少するだろう。

① 1回分として、100g (メタルとして) 試料を用いた場合

- 1 ピンを切断した段階での、ガス放出 (但し放射能の高いもの) は80%。

H	0.4 cc、	0.2 キュリー	}	× 80% …表1-2
Kr	16.0 cc	1.4 キュリー		
Xe	207.0 cc	2.3×10^{-9} キュリー		

- 2 3.1の還元工程で残りの約20%の放出が予想される。
- 3 問題は、Volatileな元素の放出であるが、これは高温処理で出る可能性が高く更に検討の余地がある (必要あれば後日評価する)。
- 4 塩化物…年当り… (II. 工程試験の実験装置の基本仕様参照)

①工程	1.7 kg/回 × 5回/年 = 8.5 kg/年	… 約5ℓ
②工程	0.5 kg/回 × 5回/年 = 2.5 kg/年	… 約1.5ℓ
③工程	少量 数10g	
④工程	0.5 kg/回 × 5回/年 = 2.5 kg/年	… 約1.5ℓ

実験中にサンプリング等を行なった場合、容器を開けるため、塩化物の蒸気が容器内から放出される。この塩化物が、Arガス等に触れ、微細粒子となってホットセル分に出る。このため微粒子の捕集を考慮しておく必要がある。

又実験後の使用済塩の処理については、ANLではゼオライト等による固化法を開発し、良好な結果を得ている。〔16〕、〔17〕

従って、前述の3.5に示したように最終的にはステンレスの容器に保存しておくことが、現状としてベターと思われる。

- 5 Cd (II. 工程試験の実験装置の基本仕様参照)

①工程	0	} 15kg/年約 2 ℓ (500°C) 再利用する場合は 15kg×1/3 = 5 kg位か
②工程	0.7 kg/回×5回/年=3.5 kg/年	
③工程	0.3 kg/回×5回/年=1.5 kg/年	
④工程	2.0 kg/回×5回/年=10 kg/年	

これらの貯蔵は、SS容器貯蔵が良い方法と思われる。リサイクルして利用するので、実際は少なくすむと考える。

4. 工程試験と分析について

4.1 工程試験と分析の対象に予想される元素

(1) MOX燃料のLi等による還元

① MOX中の元素分析 ----- (参考資料-1)

(金属としての全量が100g、含まれる全元素の予想される重量をgで示す)

a-----	64.3	25.0	0.03	1.2	0.02			
	U, Pu, Np, Am, Cm							
b-----	0.31	0.59	0.29	0.01	0.3			
	La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho,							
		0.06						
	Er, Y							
c-----	0.12	0.4						
	Sr, Ba							
d-----	1.03	0.05						
	Cs, Rb							
e-----	0.66			0.82	0.22			
	Zr, Cd, Nb, Mo, Tc							
f-----		0.4	0.81	0.1				
	Rh, Pd, Ru, Ag							
g-----	0.2	0.01						
	Te, I							
h-----	Xe, Kr, H, He							

② 還元されるもの、されないもの

-1 還元されないもの (参考資料-3)

SrO, アルカリ土類

CeO₃
La₂O₃
Nd₂O₃
Sm₂O₃
Gd₂O₃ } ランタノイド in 塩相
又は、スラグ中 (酸化物)

Y₂O₃, 希土類

Am₂O₃ (AmO₂ はOK)

-2 ほとんど還元されるもの

Aグループ U, Pu, Np, Am, Cm

特にアクチノイドの確認

Bグループ Nd, Y

Cグループ Sr

Dグループ Cs

Eグループ Zr. Mo. Tc

Fグループ Ru

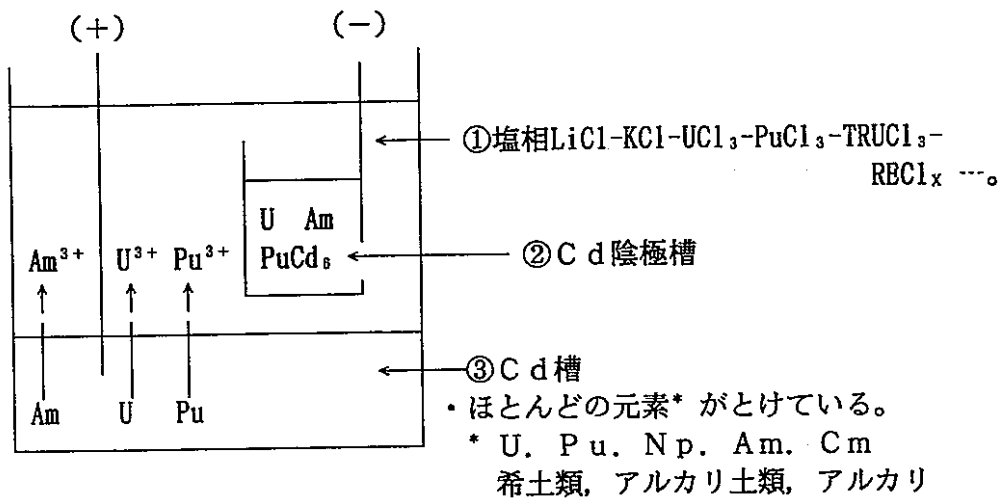
Gグループ Te

③ 収率の確認

収率の判定方法については調査中である。

(2) 電解精製工程

各部分での元素の存在予想を以下に示す。



① 塩相 (参考資料-2)

(60m/o:40m/o の比)

LiCl-KCl -----約400 g-----

UCl_3
 PuCl_3
 TRUCl_3
 RECl_3

 SrCl_2
 BaCl_2

約100g弱, この内容は⇒

Aグループ
 Bグループ
 Cグループ
 Dグループ

但し, E, F, G, Hグループ
 は, 塩化物として存在せず。

A, B, C, Dのグループに属する
 元素とその量は, 参考資料-1の通り

② Cd陰極槽 (参考資料-2)

- 1 Cdの全量約300g
- 2 Cd中に存在する元素とその量 (参考資料-1)
 - ・ Aグループ U, Pu, Np, Am, Cmが中心
 - ・ 少量のBグループが入り込むことあり
 - Amの $\Delta G^{\circ}f$ for $AmCl_3$ に近い
 - Y, Nd, Ceが興味を中心 (参考資料-4)
 - ・ 量は参考資料-1に示す量

③ Cd槽

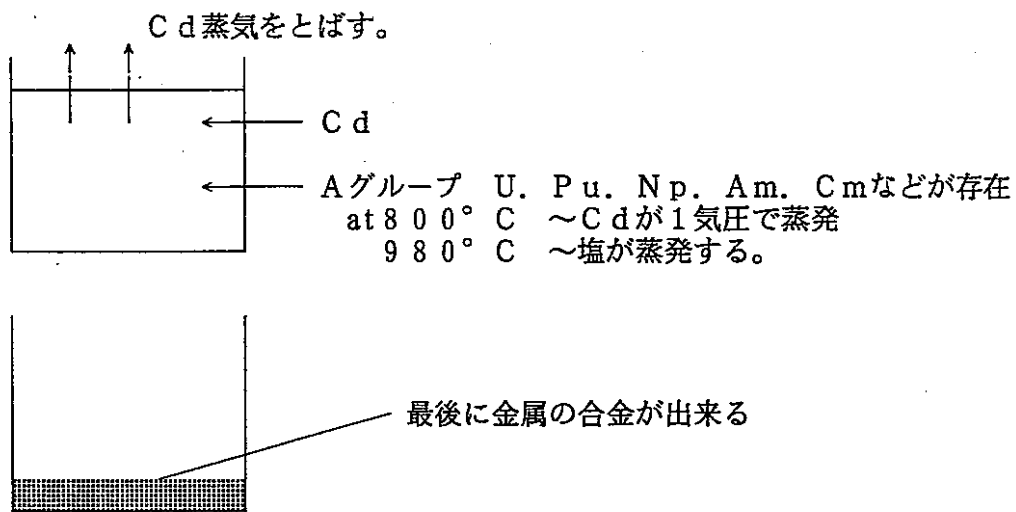
- 1 Cdの全量 約400g
- 2 Cd中に存在する元素とその量

<ul style="list-style-type: none"> ・ Aグループ ・ Bグループ ・ Cグループ ・ Dグループ ・ Eグループ ・ Fグループ 	}	参考資料-1に示す量 (これはMax) 但し、時間とともにAグループは、 減少して行く。
--	---	--

(3) 塩, Cd蒸留工程

ここは②で、得られたCd陰極に電析によって抽出されたAグループ (参考資料-1) を回収する。

① 処理工程は下図の通り。



② 分析の対象となるもの (Aグループと一部Bグループ)

最後に得られた合金について (参考資料-1)

- 1 合金の全量..... 90g弱 (Max)

—2 組成の割合…………… (参考資料-1)

—3 対象になる元素

U. Pu. Np. Am. Cm
+
Y. Nd. Ceなど

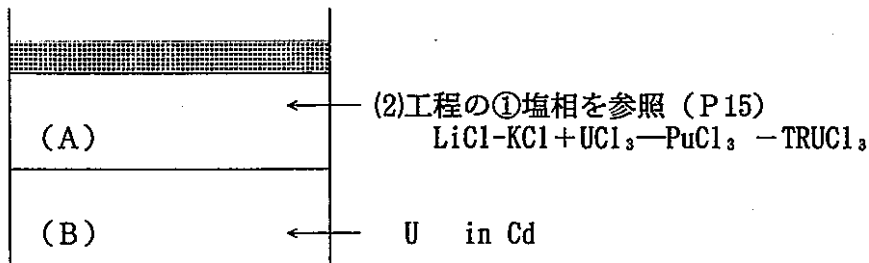
蒸留して得られたCd槽 (pureなもの) の中の元素

蒸発し易い元素

(4) TRUの抽出工程

工程②の電解精製で用いた塩相中からTRUを抽出除去する。

① 方法



• (B) 中のCdの量 = 1,000g : 約130ml

• (B) 中のTRUの量 = 10g

② 分析の対象

—1 (A) 中の元素

Aグループの全量とその組成

—2 (B) 中の元素

Cd中のUの量

Cd中のU. Pu. Np. Am. Cmの量 (Aグループ)

(表I-4参照)

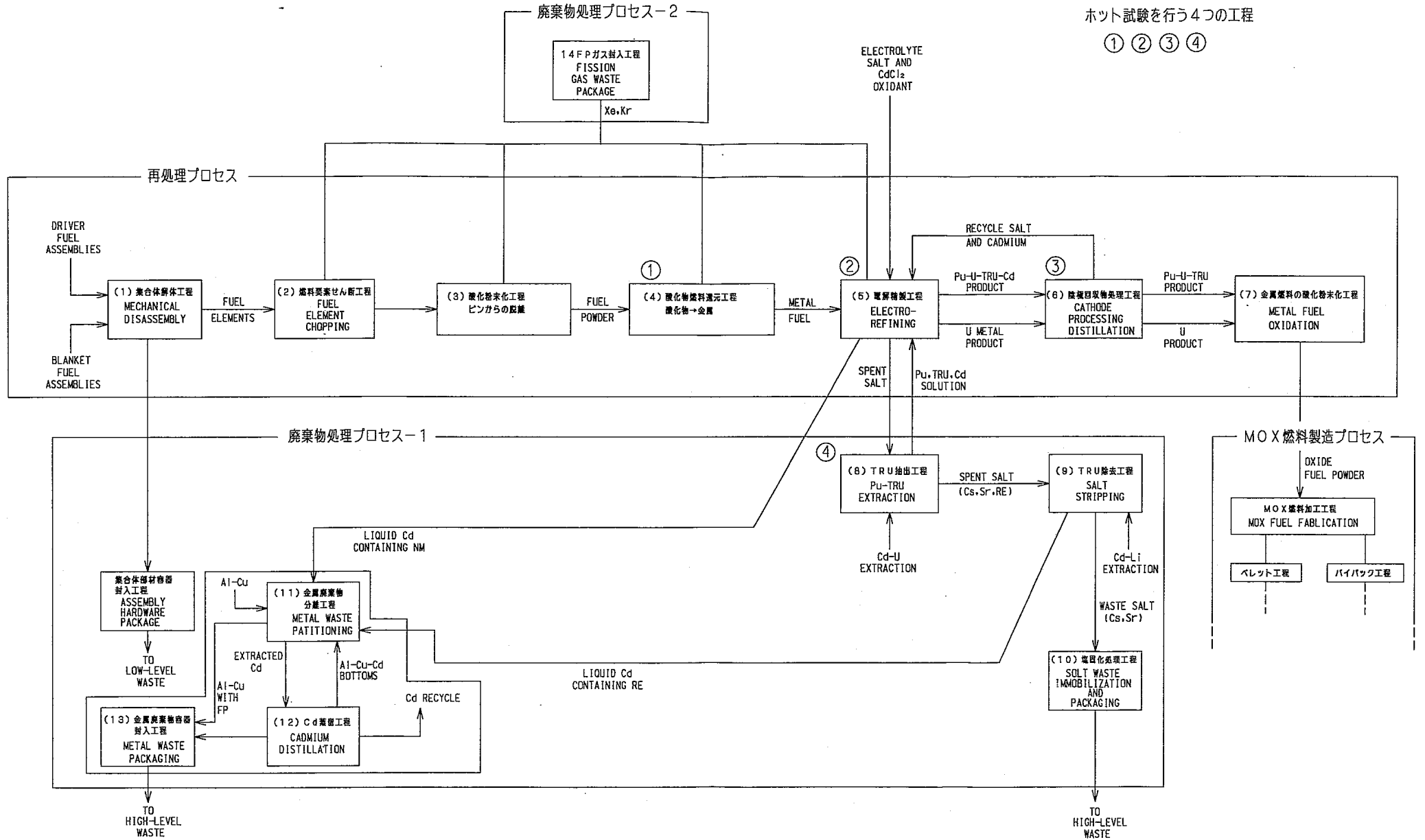
1部 Bグループ

4.2 分析についての検討

ここでの分析はいわゆる工程分析と称されるものであるが、分析の対象と予想される元素は、ほとんど1g以下の採取量で良さそうなので、分析のために試料をサンプリングすることによって、次の各実験の遂行を防げることはないと思われる。

AGSの担当Grにより、分析手法、分析法の概要等が検討されているが、主要な問題は以下のように要約できる (参考資料-5参照)

- ① Np、Am、Cmの分析技術は、総して開発中か今後の課題である。
- ② 前処理操作時に作業者の被ばく量が増大するため、被ばく対策が必要である。
- ③ AGSが現在所有している分析機器以外のICP発光分光分析：ガスクロマトグラフィー、イオンクロマトグラフィー、EPMAを導入し検討開発が必要である。



図I-1 使用済MOX燃料の乾式再処理工程フローシート

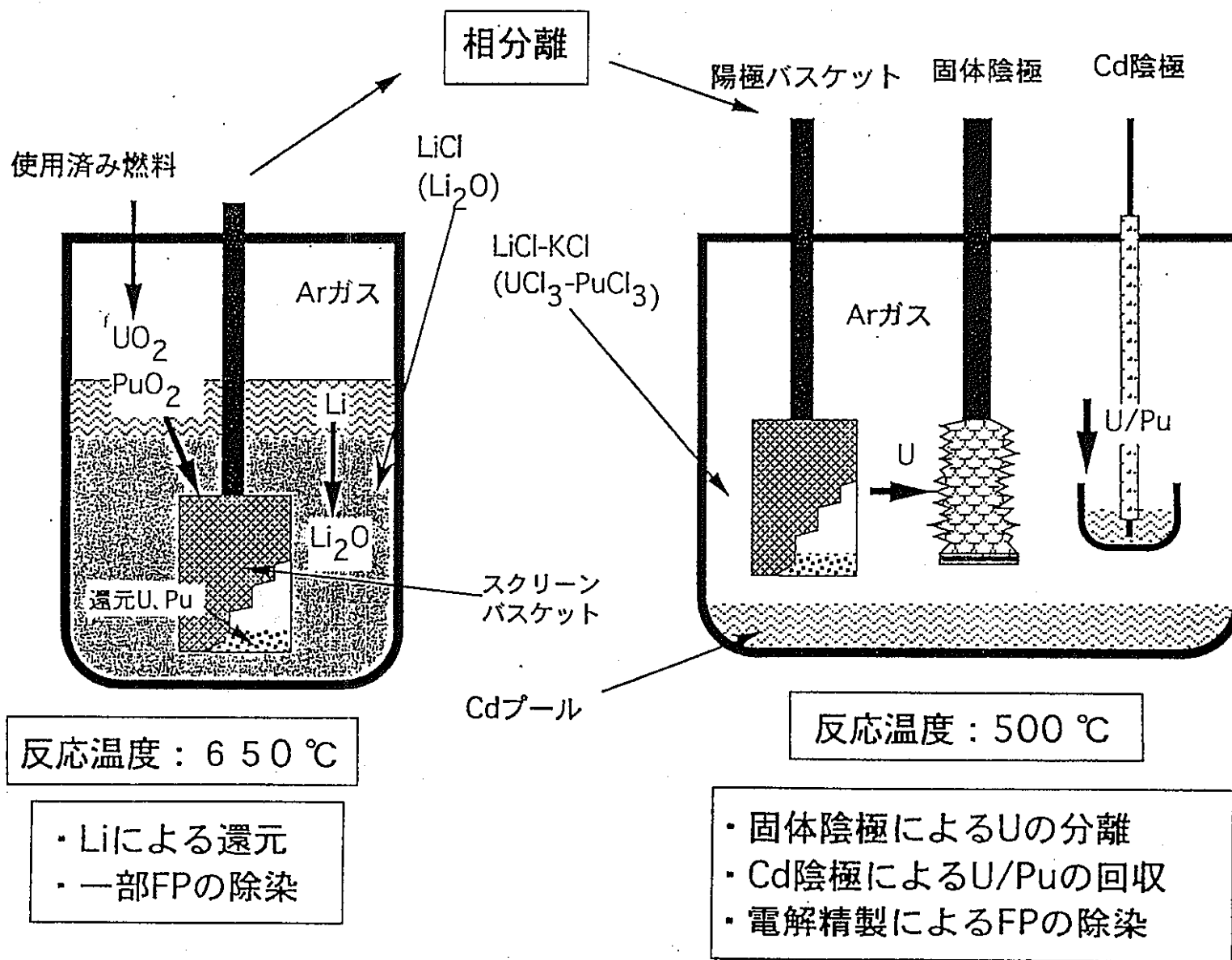


図 I - 2 Liプロセスの原理

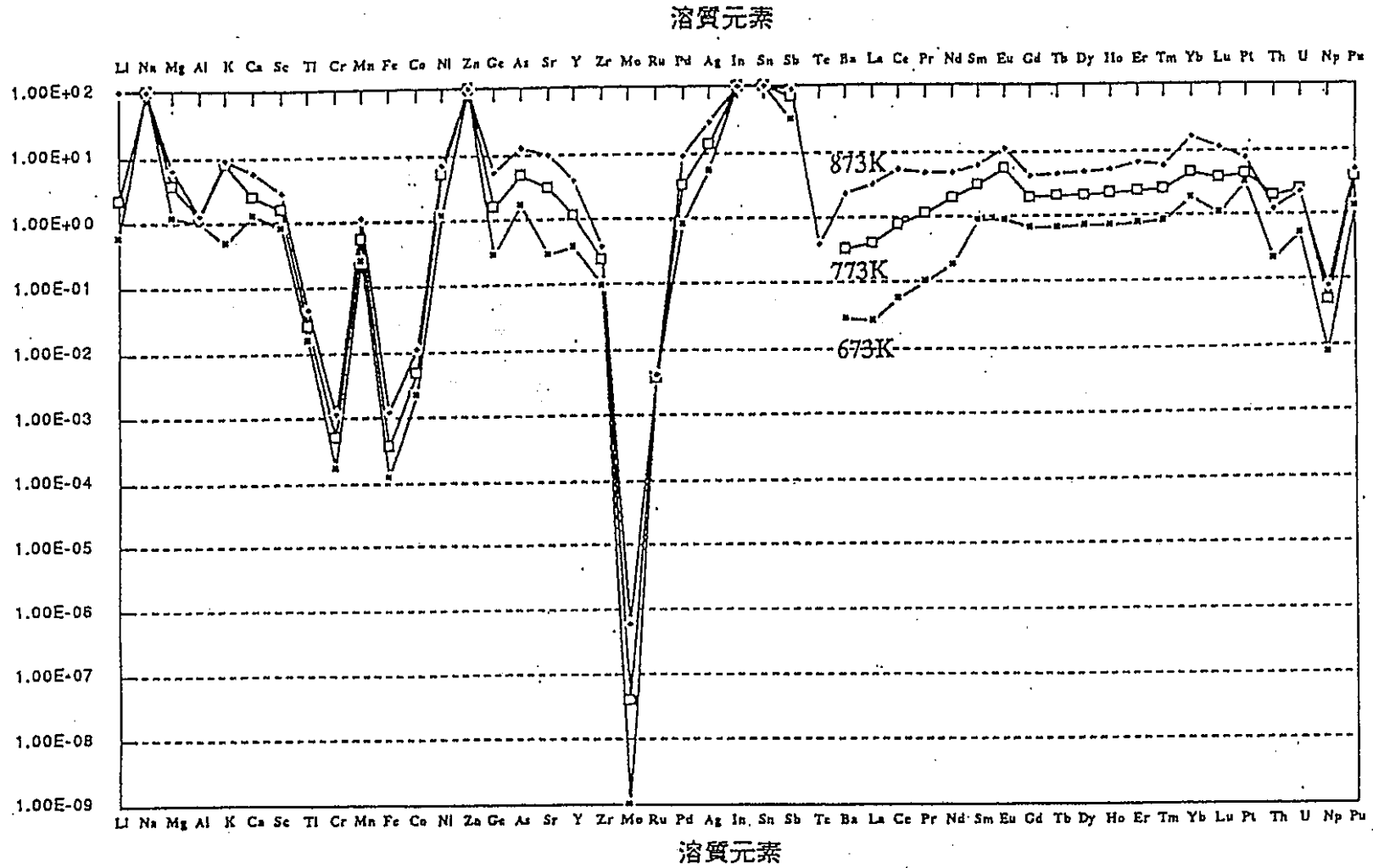


図 I - 3 液体 Cd への溶解度

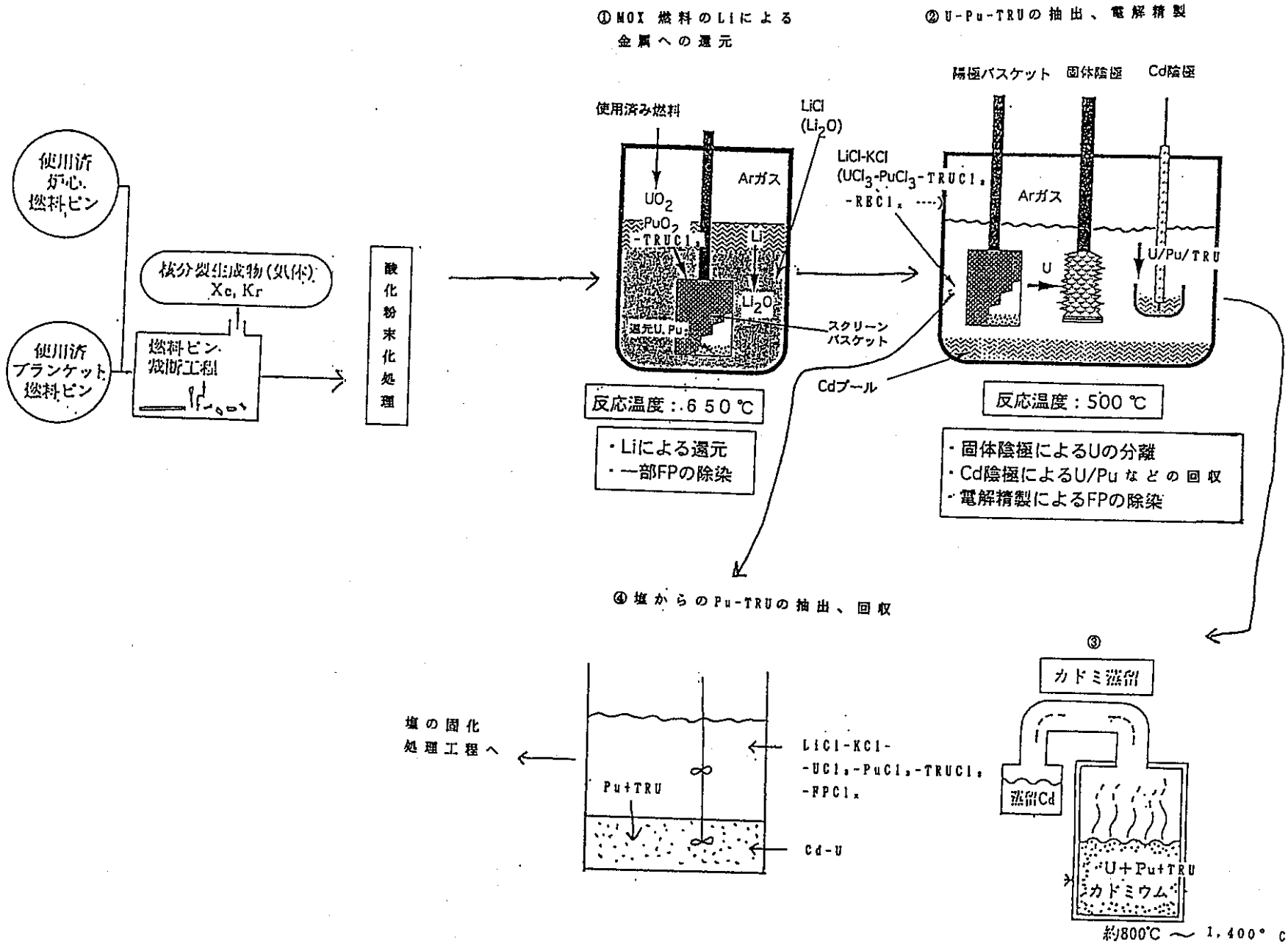


図 I-4 使用済み MOX 燃料の乾式再処理の概要 (4つの主工程)

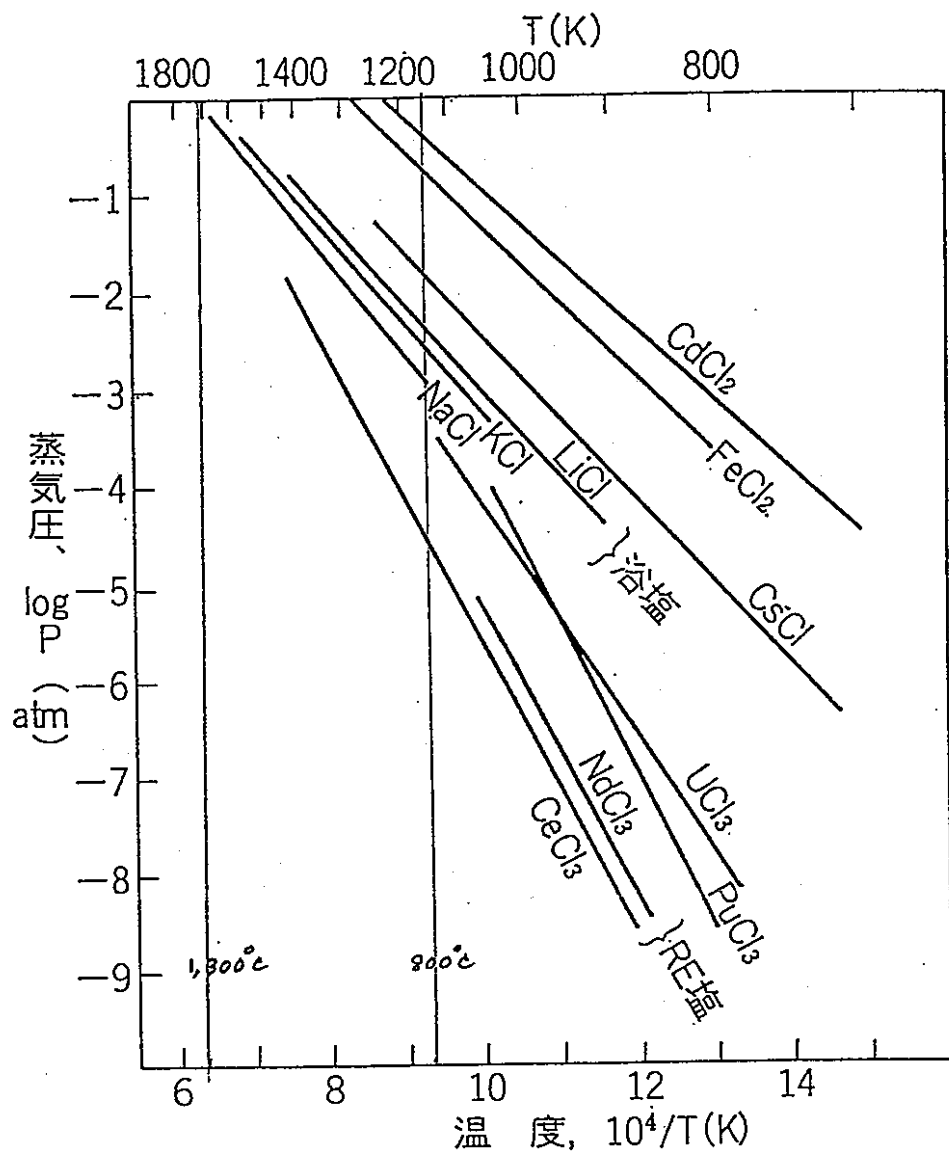


図 I - 5 塩化物の蒸気圧

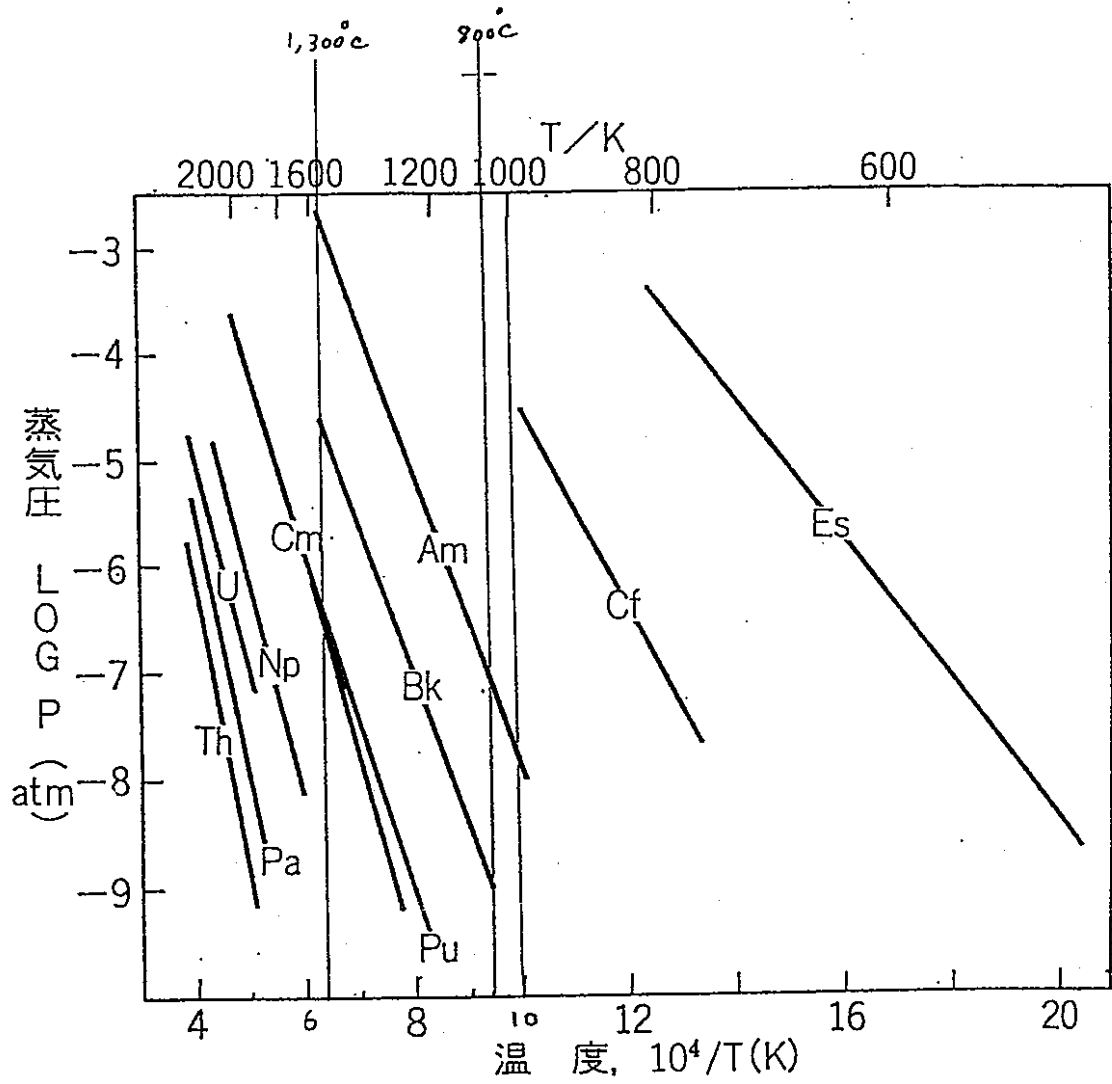


図 I - 6 (1/2) アクニド元素の蒸気圧

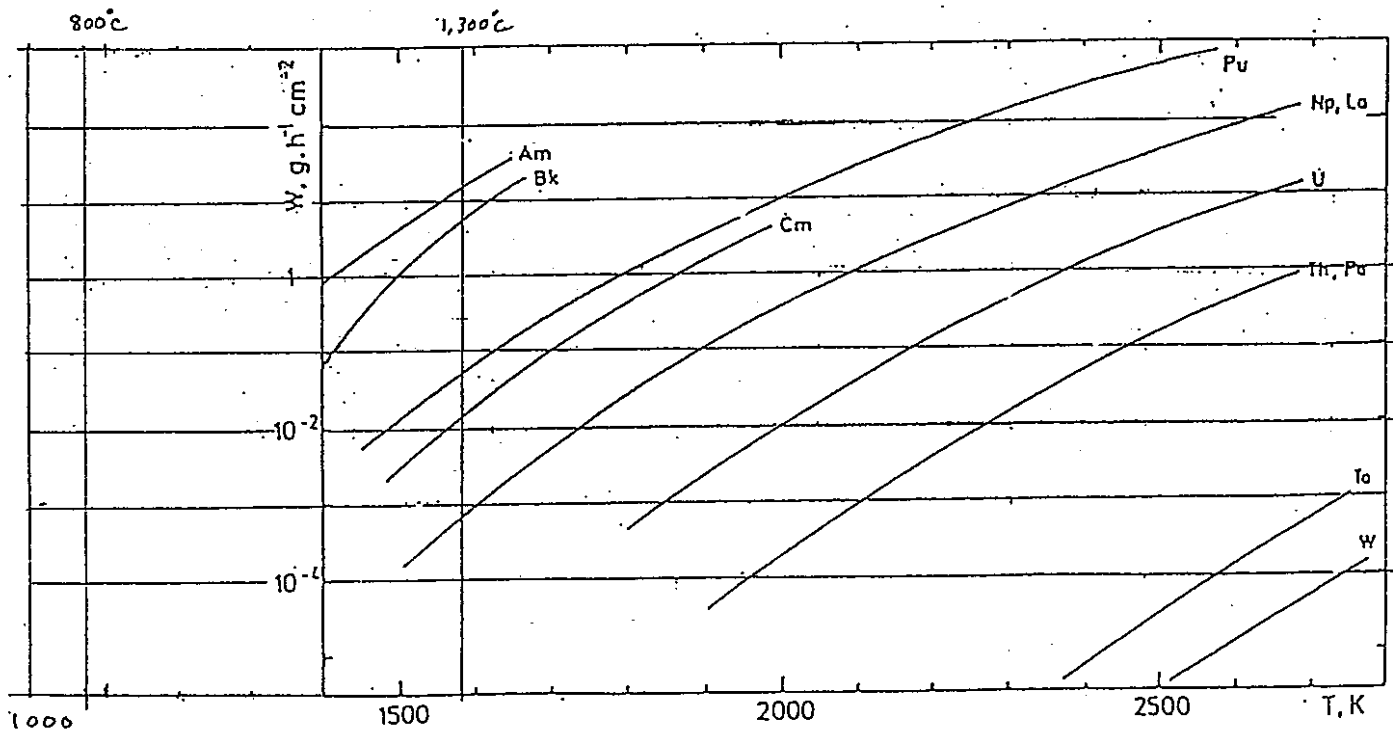
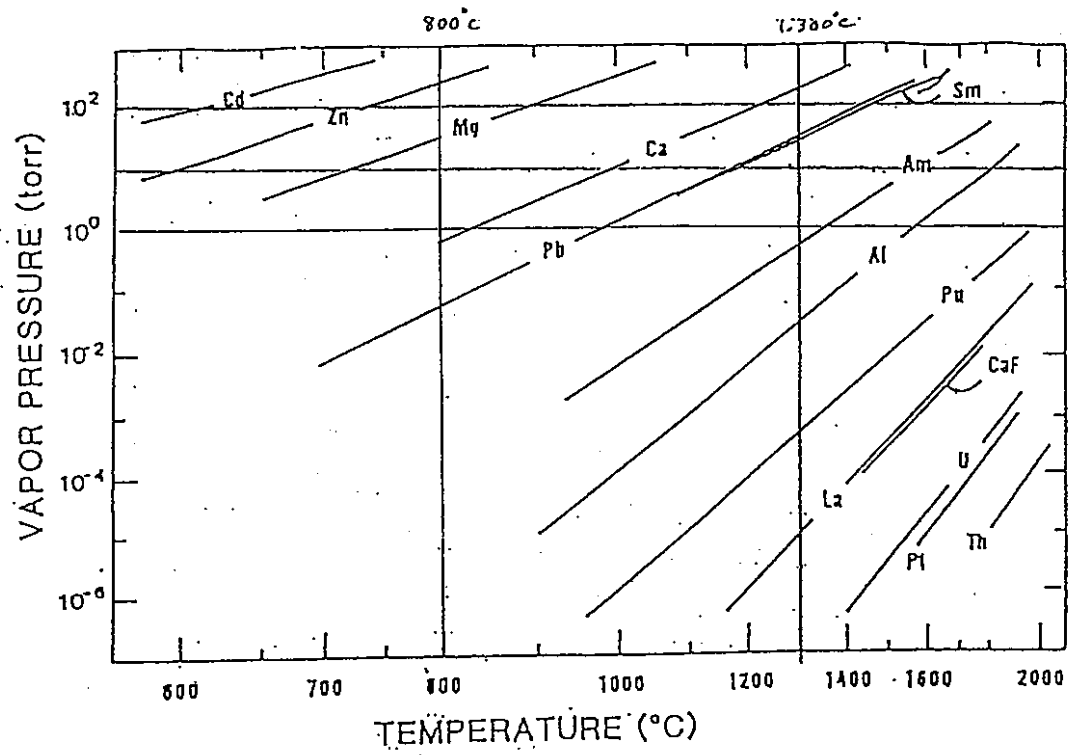


図 I - 6 (2/2) アクニチド元素の蒸気圧 (上) 及び蒸発速度 (下)

表 I - 1

条件 ① 文殊燃料 100 g (Metal として) ・U : 69.4 w/o , Pu : 29.7 w/o , Am : 0.9 w/o
 ② 94,000 MWD/T , 550 日冷却

	Charge Fuel	Discharge Fuel	Gas-1 参照Release Gas	
重量 グラム	100 g 69.4 g U 29.7 g Pu 0.9 g Am	99.72 g U 64.31 Pu 24.98 Am 1.163	1.372 g	
キュリー	434.5 キュリー*1	838.1 キュリー*2	1.621 キュリー	
ワット	1.989×10^{-1} ワット	3.417 ヲト		
容積 cm ³			298.0 cm ³	

ノート *1 Pu : 431.5 キュリー
 Am : 3.1 キュリー
 *2 Pu : 249.8 キュリー
 Am : 4.0 キュリー
 Cm : 33.42 キュリー

表 I - 2 Release Gas の評価

GAS-1	重量: g	モル数	モル%	ガス容量: cm ³ , 25°C	キュリー数	キュリー%
H	1.822×10^{-5}	1.822×10^{-5}	0.156	0.408	1.759×10^{-1}	10.85
He	3.677×10^{-3}	9.193×10^{-4}	7.877	20.59	0	0
Kr	6.126×10^{-2}	7.307×10^{-4}	6.261	16.37	1.445×10^0	89.15
Xe	1.210×10^0	9.223×10^{-3}	79.032	206.60	2.281×10^{-9}	—
I	9.348×10^{-2}	7.366×10^{-4}	6.319	16.50	1.201×10^{-5}	—
Bn	3.121×10^{-3}	3.906×10^{-5}	0.342	0.87	0	0
計	1.372×10^0	1.167×10^{-2}	100.0…… (99.98)	261.3	1.621	100.0

文殊燃料ピンの炉心部, 100g (U: 69.4w/o, Pu: 29.7w/o, Am 0.9w/o) Metal
 燃焼度 94.000 MW d/T, 冷却日数 550日

ノート) pinの切断時 : 約80% release, プレナムに存在するガス
 酸化物燃料の還元時 : 約20% release,

表 I - 3 V o l a t i l e 物質の評価

元 素	重 量 : g	モル数	モル%	キュリー	
Am	1.163×10^0			4.040×10^0	
Cs	1.026×10^0			3.947×10^1	
Ru	8.08×10^{-1}			1.227×10^2	
Mo	8.19×10^{-1}			0.0	
Tc	2.167×10^{-1}			3.674×10^{-3}	
Cd	5.601×10^{-2}			3.273×10^{-2}	
C	6.976×10^{-9}			3.160×10^{-8}	
Te	1.627×10^{-1}			1.755×10^0	
Sr				9.581×10^0	
Ba				2.592×10^1	

表 I - 4 (a) MOX燃料の燃焼後のFPの量と放出するキュリーと熱量

表 I - 4 - 1

	A Charge燃料 100g-Metal の組成 グラム	B Dis Charge燃料 9.4万MWd/Tの 組成 グラム	C Bモル数	D Bのモル比	E キュリー数	F ワット数
H						
HE		3.678×10^{-3}	9.193×10^{-4}	2.006×10^{-3}		
LJ						
BE						
B						
C						
N						
O						
F						
NE						
NA						
MG						
AI						
SI						
P						
SF						
CL						
AR						
K						
CA						
SC						
TI						
V						
CR						
MN						
FE						
CO						
NI						
CU						
ZN						
GA						
GE						
AS						
SE						
BR						
KR						
RB						
SR						
Y						
ZR						
NB						
MO						
TC						
RU						
RH						
PD						
AG						
CD						
IN						
SN						
小計	$\Sigma_i = 0.0$	$\Sigma_i = 3.678 \times 10^{-3}$	$\Sigma_i = 9.193 \times 10^{-4}$	$\Sigma_i = 2.006 \times 10^{-3}$	$\Sigma_i = 0.0$	$\Sigma_i = 0.0$

表I-4(b) MOX燃料の燃焼後のFPの量と放出するキュリーと熱量

表I-4-2

	A Charge燃料 100g-Metal の組成 グラム	B Dis Charge燃料 9.4万MWd/Tの の組成 グラム	C Bモル数	D Bのモル比	E キュリー数	F ワット数
SB						
TE						
I						
XE						
CS						
BA						
LA						
CE						
PR						
ND						
PM						
SM						
EU						
GD						
TB						
DY						
HO						
ER						
TM						
YB						
LU						
HF						
TA						
W						
RE						
OS						
IR						
PT						
AU						
HG						
TL					5.485×10^{-1}	1.262×10^{-1}
PB					1.526×10^{-1}	
BI					1.526×10^{-1}	2.591×10^{-1}
PO					2.504×10^{-1}	1.143×10^{-1}
AT						
RN					1.526×10^{-1}	5.781×10^{-1}
FR						
RA					1.526×10^{-1}	5.216×10^{-1}
AC						
TH					2.337×10^{-1}	5.880×10^{-1}
PA					4.146×10^{-1}	1.518×10^{-1}
U	6.937×10^1	6.431×10^1	2.702×10^{-1}	5.886×10^{-1}	6.033×10^{-1}	1.256×10^{-1}
NP		2.813×10^{-1}	1.187×10^{-1}	2.590×10^{-1}	2.888×10^{-1}	7.392×10^{-1}
PU	2.973×10^1	2.498×10^1	1.045×10^{-1}	2.280×10^{-1}	2.498×10^1	1.918×10^{-1}
AM	8.920×10^{-1}	1.163×10^1	4.828×10^{-1}	1.053×10^{-1}	4.040×10^1	1.149×10^{-1}
CM		2.338×10^{-1}	9.586×10^{-1}	2.090×10^{-1}	2.342×10^1	8.611×10^{-1}
BK						
CF						
ES						
小計	$\Sigma, = 9.999 \times 10^1$	$\Sigma, = 9.050 \times 10^1$	$\Sigma, = 3.797 \times 10^{-1}$	$\Sigma, = 8.286 \times 10^{-1}$	$\Sigma, = 2.773 \times 10^1$	$\Sigma, = 1.168 \times 10^1$

表 I - 4(c) MOX燃料の燃焼後のFPの量と放出するキュリーと熱量

表 I - 4 - 3

	A Charge燃料 100g-Metal の組成 グラム	B Dis Charge燃料 9.4万MWd/Tの 組成 グラム	C Bモル数	D Bのモル比	E キュリー数	F ワット数
H		1.822×10^{-1}	1.822×10^{-1}		1.759×10^{-1}	5.924×10^{-1}
HF						
LI						
BF						
B						
C					3.156×10^{-1}	
N						
O						
F						
NE						
NA						
MG						
AL						
SI						
P						
S						
CL						
AR						
K						
CA						
SC						
TI						
V						
CR						
MN						
FE						
CO						
NI						
CU						
ZN						
GA						
GE		2.846×10^{-1}	3.926×10^{-1}	8.510×10^{-1}		
AS		8.661×10^{-1}				
SE		8.910×10^{-1}	1.256×10^{-1}	2.741×10^{-1}	8.594×10^{-1}	
BR		3.121×10^{-1}	3.906×10^{-1}	8.510×10^{-1}		
KR		6.126×10^{-1}	7.310×10^{-1}	1.595×10^{-1}	1.445×10^0	2.164×10^{-1}
RB		5.249×10^{-1}	6.139×10^{-1}	1.340×10^{-1}		
SR		1.178×10^{-1}	1.345×10^{-1}	2.935×10^{-1}	9.581×10^0	1.134×10^{-1}
Y		6.186×10^{-1}	6.958×10^{-1}	1.518×10^{-1}	9.856×10^0	5.392×10^{-1}
ZR		6.617×10^{-1}	7.255×10^{-1}	1.583×10^{-1}	1.212×10^0	6.136×10^{-1}
NB		6.940×10^{-1}	7.470×10^{-1}		2.693×10^0	1.289×10^{-1}
MO		8.185×10^{-1}	8.193×10^{-1}	1.788×10^{-1}		
TC		2.167×10^{-1}	2.211×10^{-1}	4.824×10^{-1}	3.674×10^{-1}	1.843×10^{-1}
RU		8.082×10^{-1}	8.002×10^{-1}	1.746×10^{-1}	1.226×10^0	7.429×10^{-1}
RH		2.460×10^{-1}	2.391×10^{-1}	5.217×10^{-1}	1.226×10^0	1.176×10^0
PD		6.624×10^{-1}	6.226×10^{-1}	1.358×10^{-1}	6.899×10^{-1}	
AG		7.222×10^{-1}	6.693×10^{-1}	1.460×10^{-1}	5.528×10^{-1}	9.159×10^{-1}
CD		5.601×10^{-1}	4.983×10^{-1}	1.087×10^{-1}	3.273×10^{-1}	5.555×10^{-1}
IN		3.761×10^{-1}	3.276×10^{-1}	7.135×10^{-1}	8.112×10^{-1}	
SN		4.432×10^{-1}	3.737×10^{-1}	8.139×10^{-1}	1.477×10^{-1}	3.850×10^{-1}
小計	$\Sigma_1 = 0.0$	$\Sigma_2 = 3.858$	$\Sigma_3 = 3.896 \times 10^{-1}$	$\Sigma_4 = 8.50 \times 10^{-1}$	$\Sigma_5 = 2.708 \times 10^0$	$\Sigma_6 = 1.279 \times 10^0$

表 I - 4 (d) MOX燃料の燃焼後のFPの量と放出するキュリーと熱量

表 I - 4 - 4

	A Charge燃料 100g—Metal の組成 グラム	B Dis Charge燃料 9.4万Mwd/Tの の組成 グラム	C Bモル数	D Bのモル比	E キュリー数	F ワット数
SB		1.459×10^{-1}	1.200×10^{-4}	2.618×10^{-4}	5.302×10^1	1.659×10^{-1}
TE		1.627×10^{-1}	1.275×10^{-4}	2.782×10^{-4}	1.755×10^1	1.522×10^{-1}
I		9.348×10^{-3}	7.366×10^{-6}	1.607×10^{-5}	1.201×10^{-4}	
XE		1.211×10^1	9.223×10^{-3}	2.012×10^{-2}		
CS		1.025×10^1	7.713×10^{-3}	1.683×10^{-2}	3.947×10^1	1.531×10^{-1}
BA		3.698×10^{-1}	2.693×10^{-3}	5.876×10^{-3}	2.591×10^1	1.018×10^{-1}
LA		3.113×10^{-1}	2.241×10^{-3}	4.890×10^{-3}		
CE		5.900×10^{-1}	4.211×10^{-3}	9.188×10^{-3}	8.189×10^1	5.432×10^{-1}
PR		2.896×10^{-1}	2.055×10^{-3}	4.484×10^{-3}	8.288×10^1	6.023×10^{-1}
ND		8.136×10^{-1}	6.336×10^{-3}	1.383×10^{-2}		
PM		5.049×10^{-2}	3.482×10^{-4}	7.588×10^{-4}	4.681×10^1	1.686×10^{-1}
SM		2.597×10^{-1}	1.727×10^{-3}	3.768×10^{-3}	1.045×10^1	1.226×10^{-1}
EU		3.475×10^{-2}	2.288×10^{-4}	4.992×10^{-4}	4.800×10^1	1.262×10^{-1}
GD		2.827×10^{-1}	1.798×10^{-3}	3.923×10^{-3}	3.182×10^{-1}	2.875×10^{-1}
TB		2.439×10^{-2}	1.535×10^{-4}		5.691×10^{-2}	4.635×10^{-2}
DY		1.743×10^{-2}	1.073×10^{-4}			
HO		4.767×10^{-2}			6.793×10^{-2}	
ER		6.029×10^{-3}				
TM						
YB						
LU						
HF						
TA						
W						
RE						
OS						
IR						
PT						
AU						
HG						
TL						
PB						
BI						
PO						
AT						
RN						
FR						
RA						
AC						
TH						
PA						
U						
NP						
PU						
AM						
CM						
BK						
CF						
ES						
小計	$\Sigma = 0.0$	$\Sigma = 5.359 \times 10^1$	$\Sigma = 3.874 \times 10^{-3}$	$\Sigma = 8.529 \times 10^{-1}$	$\Sigma = 2.899 \times 10^1$	$\Sigma = 9.592 \times 10^{-1}$
総計	$\Sigma_{\dots\dots} = 100 (g)$	$\Sigma_{\dots\dots} = 99.72 (g)$	$\Sigma_{\dots\dots} = 0.4583 \%$	$\Sigma_{\dots\dots} = 1.000$	$\Sigma_{\dots\dots} = 838.1 \text{ ｷｬﾘ}$	$\Sigma_{\dots\dots} = 3.406 \text{ ｷｬﾘ}$

表 I - 5 常陽燃料 10 万 MWd / T の組成

a/o of FP₁ of JOYO Fuel ((Pu_{0.176}+U_{0.824})O_{1.98})
at 100,000 MWd/TON Irradiation

State	Element	at %	Valency	Free Energy of Formation (Kcal/g.atom of Oxygen)		Note
				at 1000°K	at 1500°K	
gas 2.65% volatile 2.77%	Kr	0.33				
	Xe	2.35				
	Br	0.03				
	I	0.19				
	Se	0.07	4	- 16	- 8	SeO ₂ (l)
	Cd	0.06	2	- 38	- 15	CdO (s, l)
	Cs	2.11	1	- 35	- 8	Cs ₂ O (l)
Rb	0.31	1	- 45	- 12	Rb ₂ O (l)	
metal 7.19%	Tc	0.67	4	- 31	- 20	TcO ₂ (s)
	Ru	1.81	8	- 7	- 2	RuO ₄ (s)
	Rh	0.52	1	- 10	- 4	Rh ₂ O (s)
	Ag	0.10	1	-	-	Ag ₂ O
	Sb	0.04	3	- 35	- 25	Sb ₂ O ₃ (s)
	Te	0.36	4	- 17	- 5	TeO ₂ (l)
	Mo	2.61	4	- 46	- 36	MoO ₃ (s)
	Pd	1.07	2	-	-	PdO (s)
	In	0.01	3	- 50	- 33	In ₂ O ₃ (s)
oxide 9.99%	U	64.07	4	- 109	- 99	UO ₂ (s)
	Pu	13.31	4	- 102	- 92	PuO ₂ (s)
	Sn	0.04	4	- 45	- 32	SnO ₂ (s)
	Sr	0.68	2	- 117	- 108	SrO (s)
	Y	0.39	3	- 119	- 109	Y ₂ O ₃ (s)
	Zr	2.83	4	- 108	- 97	ZrO ₂ (s)
	Nb	0.02	2 5	- 78	- 68	NbO (s)
	Ba	0.80	2	- 111	- 100	BaO (s)
	La	0.65	3	- 123	- 112	La ₂ O ₃ (s)
	Ce	1.33	3	- 123	- 112	Ce ₂ O ₃ (s)
	Pr	0.60	3	- 123	- 112	Pr ₂ O ₃ (s)
	Nd	2.00	3	- 118	- 106	Nd ₂ O ₃ (s)
	Pm	0.12	3			Pm ₂ O ₃ (s)
	Sm	0.44	3	- 122	- 112	Sm ₂ O ₃ (s)
	Eu	0.06	3			Eu ₂ O ₃ (s)
	Gd	0.03	3			Gd ₂ O ₃ (s)
Tb	0.003	3			Tb ₂ O ₃ (s)	
Dy	0.001	3			Dy ₂ O ₃ (s)	

Σ = 100%

表 I - 6 燃料組成の XMA による固定

Summary of occurrences of fission product elements analyzed by XMA.

Location of microanalysis	Elements detected
White metallic inclusion	Molybdenum Ruthenium Palladium
Grain boundary	Strontium Barium
Matrix (PuO ₂ -UO ₂)	Zirconium Lanthanum Cerium Neodymium Molybdenum

Fission Product Behavior in PuO₂-UO₂ Fuel

Chemical State	Gaseous		Stable Oxides			Unstable Oxides
			II(Valency)	III(Valency)	IV(Valency)	
Fission Products	Xe Kr	I Cs Rb Br Cd	Sr Ba	Y La R.E*	U Pu Zr	Mo Rh Ru Tc Pd
Phase	Gas Phase		Gray Phase		Main Phase	Metallic Phase
Chemical Behavior	inert Gas	Gaseous at >1200°C	Forms perovskite,		Forms solid soln. containing Y.La.R.E	
Results	occupies free volume	concentrate in cold region & react with cladding	Segregates as a separated oxide & concentrated in low temp. side			

* R.E : Rare Earth Element

表 I - 7 Cd の蒸気圧

(1) $\log P_{cd^\circ}$ (mmHg) = $-5,819 \cdot T^{-1} - 1.257 \log T + 12.287$ 594 ~ 1050K
 (K. K. K. ELLY. Bull. Us. Bur. Mines, 1935, No. 383)

(2) P_{cd°	500 ° C 773K	600 ° C 873K	700 ° C 973K	768 ° C 1,041K	1,000K
P_{cd° (mmHg)	13.46	84.14	355.6	802.7	498
P_{cd° (atm)	1.77×10^{-2}	1.11×10^{-1}	4.68×10^{-1}	1.05	<u>0.655</u>
$\log P_{cd^\circ}$ (mmHg)	1.13	1.93	2.55	2.90	2.697

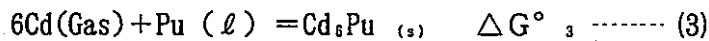
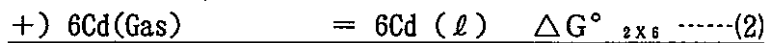
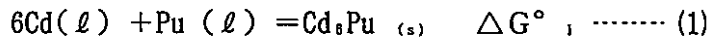
(3) $Cd_6Pu_{(s)} = 6Cd(Gas) + Pu(\ell)$ ----- (A) 式

(A) 式の平衡のとき P_{cd}

P_{cd} for (A) at 1000k = 162 mmHg = 2.13×10^{-1} atm

P_{cd° for pure Cd^o (ℓ) at 1000k = 498 mmHg

ノート)



ΔG°_1 : 高温冶金物性値集調査報告 T93033-P25
 H-6年4月電中研

$\Delta G^\circ_3 = \Delta G^\circ_1 + 6 \times \Delta G^\circ_2 = 6RT \log P_{cd}$

at 1000kの時

$\Delta G^\circ_1 = -164.3 + 1.082 \times 10^{-1} T = -56.1 \text{ (kJ/mol)} = -13.408 \text{ cal}$

$\Delta G^\circ_2 = RT \log P_{cd} = 4.576 \times 1,000 \log 0.655 = -840.9 \text{ cal}$

$\Delta G^\circ_3 = -18.453 \text{ cal}$

$\therefore \log P_{cd} = -6.72 \times 10^{-1}$

$P_{cd} = 2.13 \times 10^{-1} \text{ atm} = 162 \text{ mmHg}$

II 工程試験の実験装置及び周辺装置の基本仕様

1. 酸化物燃料還元装置 (Li還元装置) (図II-1参照)

1.1 目的

電解精製試験装置に金属原料を供給するために、受入れ原料の酸化物を金属にする装置

1.2 設計条件

- (1) 処理容量 : 100gHM/ バッチ
- (2) 還元反応 : $UO_2 + 4Li \rightarrow U + 2Li_2O$
- (3) 浴塩の種類 : LiCl
- (4) 浴塩の量 : 約100 リットル(40.3mol)
- (5) 酸化物およびLi量 : UO_2 換算で114g, Li は11.7g
- (6) 反応容器の寸法 : ルツボ外形 $\phi 90\text{mm} \times 200$ (内径 $\phi 80$)、浴の深さ12.0cm

1.3 装置仕様

(1) 反応容器

- ・材質 : SUS304
- ・使用温度 : 通常650° C(700° Cも実施)
- ・寸法 : $\phi 90$ (内径 $\phi 80$) $\times 200$

(2) 製品回収用バスケット

- ・材質 : SUS304
- ・使用温度 : 通常650° C(700° Cも実施)
- ・寸法 : $\phi 45$ (内径 $\phi 40$) $\times 150$
- ・その他 : 内側面にバッフル板 4枚(幅5mm)

底に325 メッシュのスクリーン付き(塩のドレイン用)

(3) 攪拌装置 (攪拌インペラー)

- ・材質 : SUS304
- ・使用温度 : 650° C(700° Cも実施)
- ・回転数 : 900rpm (最高回転数)
- ・羽根 : 直径20 \times 20 4枚羽

(4) 電気炉

- ・使用温度：常用800° C

(5) その他

- ・浴温度計測装置(熱電対 常用700° C程度)
- ・試料投入ポート (φ12) およびロート
- ・塩のサンプルポート (φ10)

1.4 関係補機

(1) Li還元装置回収バスケット取扱装置

- ・試験開始前には計量した燃料粉をバスケットに投入し、取付けフランジに取付ける
治具
- ・試験終了時には還元金属燃料が入っているバスケットを取付けフランジから取り外す
治具

(2) Li還元装置ヘッドアッセンブリ取扱装置

- ・試験開始前には攪拌装置、熱電対等が組込まれたヘッドアッセンブリに、取付けフ
ランジにセットされた回収バスケットを組込む治具
- ・試験終了時には攪拌装置、熱電対等が組込まれたヘッドアッセンブリから還元金属
燃料が入っている回収バスケットを取り外す治具

(3) Li還元装置ヘッドアッセンブリ回転/昇降装置 (本体の設計に含める)

- ・試験開始時にはヘッドアッセンブリー一式を装置本体上部に移動し本体内に下降させ
て所定の位置に固定する。
- ・試験終了時にはヘッドアッセンブリー一式を装置本体内から引出し、取扱位置まで回
転移動する。

(4) サンプリング管ホルダ

- ・サンプリング管を一時的に保持する棚

<その他>容器からの取り出し、容器への収納や移し替え等は、マニプレータを用いて
手動で行う、また容器の移動や各種部品/部材の移動はマニプレータまたはホイスト
行う。

1.5 総重量：150Kg

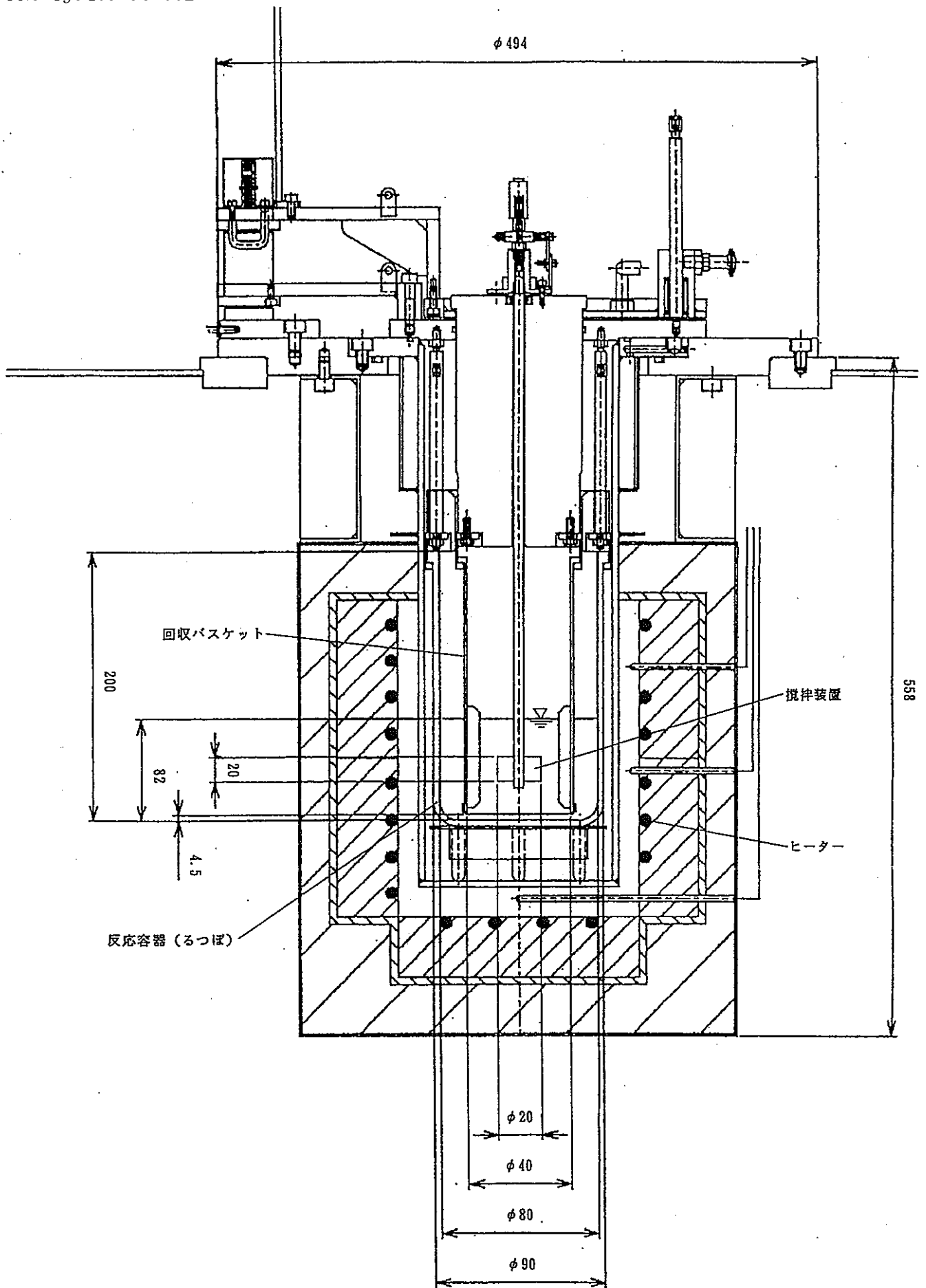


図 II - 1 Li 還元装置

2. 電解精製試験装置（図Ⅱ-2-1、図Ⅱ-2-2 参照）

2.1 目的

金属燃料から熔融塩電解法によりUおよびPu等を分離回収する装置

2.2 設計条件

(1) 処理容量：100gHM/ バッチ

(2) 陰極析出物の回収率の目安：

- ・ 固体陰極：金属U
- ・ Cd陰極：U, Pu(HM)

(3) 熔融塩およびCd中のHM濃度：

- ・ 固体陰極：熔融塩中のU 濃度：4wt%
- ・ Cd陰極：熔融塩中のU 濃度：1.5wt%
- ・ 熔融塩中のPu濃度：2wt%

(4) 陰極析出物：

- ・ 固体陰極：金属U 約50g
- ・ Cd陰極：金属間化合物(PuCd_x, UCd_x)約80g
- ・ U, Pu(HM)：約20g

(5) 熔融塩およびCd量

- ・ 熔融塩：約490g
- ・ Cd：約400g
- ・ 陰極Cd：約300g(Cd 中析出HM濃度7wt %)

(6) 電解精製槽の寸法

- ・ 内径φ80、高さ150mm

2.3 装置仕様

(1) 電解槽

- ・ 材質：低炭素鋼
- ・ 使用温度：500° C
- ・ 寸法：内径φ80×150mmH

(2) 陽極バスケット

- ・材 質：SUS304
- ・使用温度：500° C
- ・寸 法：内径φ20×40mmH

(3) 固体陰極

- ・材 質：低炭素鋼
- ・使用温度：500° C
- ・寸 法：約φ10×30mmH

(4) Cd陰極るつぼ

- ・材 質：ZrO₂
- ・使用温度：500° C
- ・寸 法：内径約φ35×35mm

(5) 電気炉

- ・形 式：ヒーター加熱方式
- ・使用温度：常用500° C

(6) その他

- ・電解槽はリフターで上下できる構造とする
- ・電解槽上蓋には陽極バスケット用、陰極用、攪拌機用、熱電対用、サンプリング用、参照電極用、Arガス入口および出口の他、予備孔を設ける

2.4 関連補機

(1) 電極取扱装置

・試験開始前には、前工程のLi還元装置で回収された金属燃料が投入された陽極バスケットを陽極軸クランプに取付け、また、固体陰極あるいはCd陰極を陰極軸クランプに取付ける冶具

・試験終了時には貴金属類等の未溶解金属残滓が入っている陽極バスケットを陽極軸から取り外し、また、U デンドライトが付着している固体陰極あるいはPu/Uが沈析しているCd陰極を陰極軸から取り外す冶具

(2) 電解精製装置ヘッドアッセンブリ取扱装置

- ・試験開始前には攪拌装置、熱電対等が組込まれたヘッドアッセンブリに、陽極軸

にセットされた陽極バスケット、および陰極軸にセットされた固体陰極あるいはCd陰極を組み込む治具

・試験終了時には攪拌装置、熱電対等が組込まれたヘッドアッセンブリから陽極バスケット、固体陰極あるいはCd陰極を取り外す治具

(3) 電解精製装置ヘッドアッセンブリ回転/昇降装置（本体の設計に含める）

・試験開始前にはヘッドアッセンブリー式を装置本体上部に移動し本体内に下降されて所定の位置に固定する。

・試験終了時にはヘッドアッセンブリー式を装置本体内部から引出し、取扱位置まで回転移動する。

(4) 固体陰極析出物（デンドライ）回収装置

・固体陰極からデンドライト状のUをはぎ取り、回収容器に収納する装置

(5) Cd陰極析出物取出し装置

・Pu/Uが沈析しているCdインゴットをCd陰極のつばを反転取出す治具。

(6) 陰極アッセンブリ、陽極アッセンブリ保管棚

・使用していない陰極アッセンブリ、陽極アッセンブリあるいは処理待ちの陰極アッセンブリを一時的に吊して保管する治具を有する棚

(7) サンプリング管ホルダ

・サンプリング管を一時的に保持する棚

(8) 回収物計量器（上皿天秤）

<その他>容器から取出し、容器への収納や移し替え等は、マニプレータを用いて手動で行う。また容器の移動や各種部品/部材の移動はマニプレータまたはホイストで行う。

2.5 総重量：160Kg

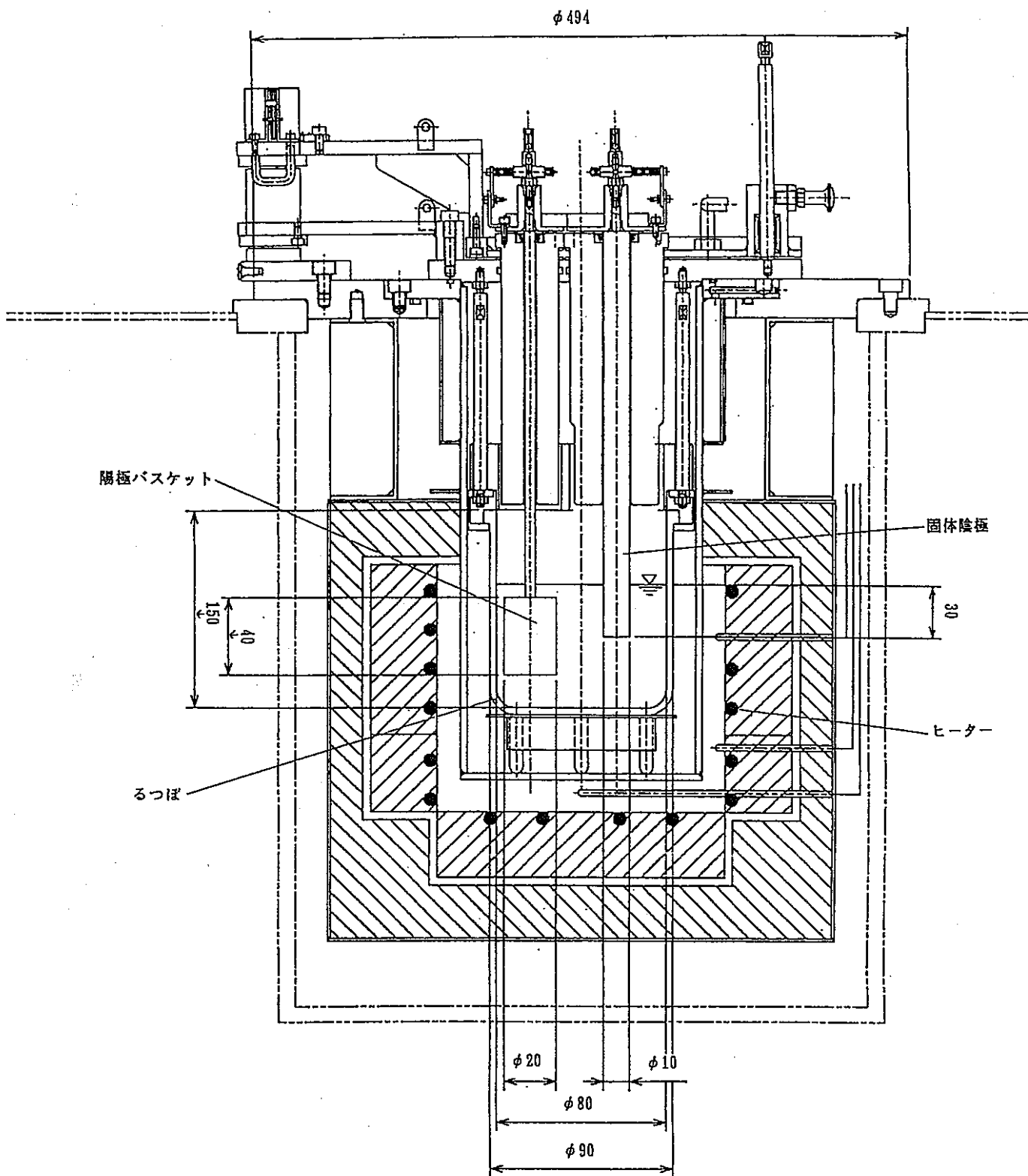


図 II 2 - 1 電解試験装置 (固体陰極)

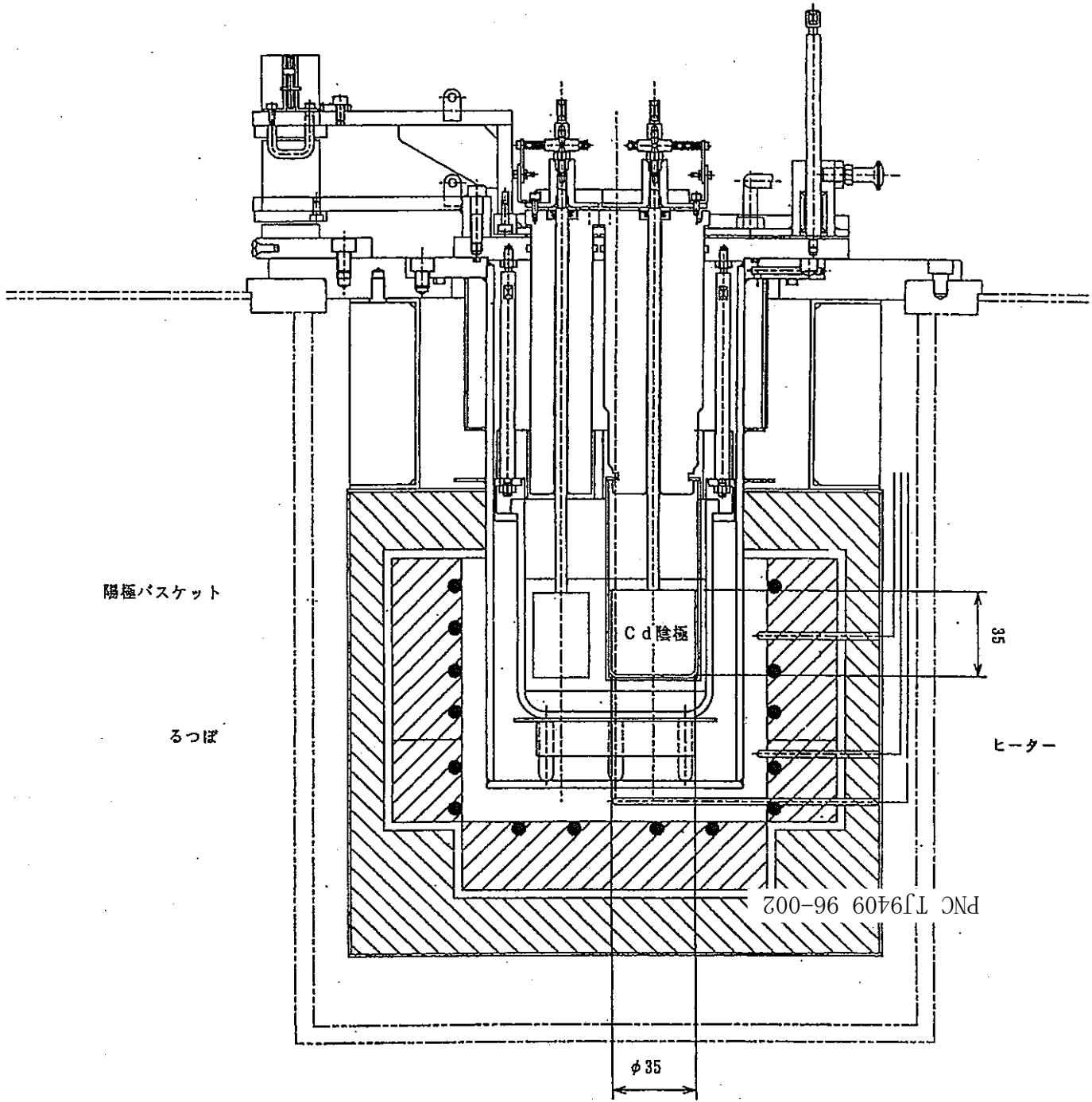


図 II - 2 - 2 電解試験装置 (Cd 陰極)

3. 陰極回収物処理装置（カソードプロセッサ）（図Ⅱ-3参照）

3.1 目的

電解精製工程で回収した析出物を蒸留する装置（カソードプロセッサ）

3.2 設計条件

(1) 処理容量：100gHM/ バッチ

(2) 陰極析出物

・ 固体陰極：Cd 約 3g

溶融塩 (LiCl-KCl) 約 5g

金属U 約50g

(溶融塩の持ち込みを10%、Cdの持ち込みを5%想定)

・ Cd陰極：Cd 約300 ~140g

金属間化合物(PuCdx, UCdx) 約80g

塩 (LiCl-KCl) 約 5g

U, Pu(HM) 約20g

(Cd 中の析出HM濃度7wt%から15wt %と想定)

(3) 回収るつぼの寸法：内径80φ、高さ100mm(容積約165 ~370ml)

3.3 装置仕様

(1) 蒸留装置本体容器 (bell-jar)

・ 材 質：SUS304

・ 寸 法：φ400mm × 600mmH

・ 形 式：熱放射（自然対流）冷却方式

(2) 回収るつぼ

・ 材 質：グラファイト

・ 使用温度：1400° C

・ 寸 法：約φ60×80mm

(3) 溶解るつぼ

a 第1るつぼ

・ 材 質：ZrO₂

- ・使用温度：1400° C
- ・寸法：約φ40φ×80mm

b 第2るつぼ

- ・材質：グラファイト
- ・使用温度：1400° C
- ・寸法：約φ60×180mm

c 受容器

- ・材質：グラファイト
- ・使用温度：1400° C
- ・寸法：約φ80×180mm

(4) コンデンサー

- ・材質：タンタル
- ・使用温度：1400° C
- ・寸法：約φ60×80mm

(5) 誘導加熱装置

形式：無冷却誘導コイル方式
使用温度：常用1400° C (最高1500° C)

(6) その他

- ・熱電対コンデンサー、受け容器底、誘導加熱コイルに設置
- ・Bell-jar昇降装置を設置

3.4 関連補機

(1) サンプリング機

- ・インゴット化した回収金属燃料を再溶解し、均一に攪拌している状態でサンプルを取る装置（メカニズムとしては射出成型装置のメカニズムを応用）
- ・サンプル管破碎装置も付属

(2) 回収物計量器（上皿天秤）

<その他>るつぼへの投入、るつぼからの取出し、るつぼの設置や取出し、容器への収納や移し替え等は、マニプレータを用いて手動で行う。また容器の移動や各種部品/部材の移動はマニプレータまたはホイストで行う。

3.5 総重量 700kg

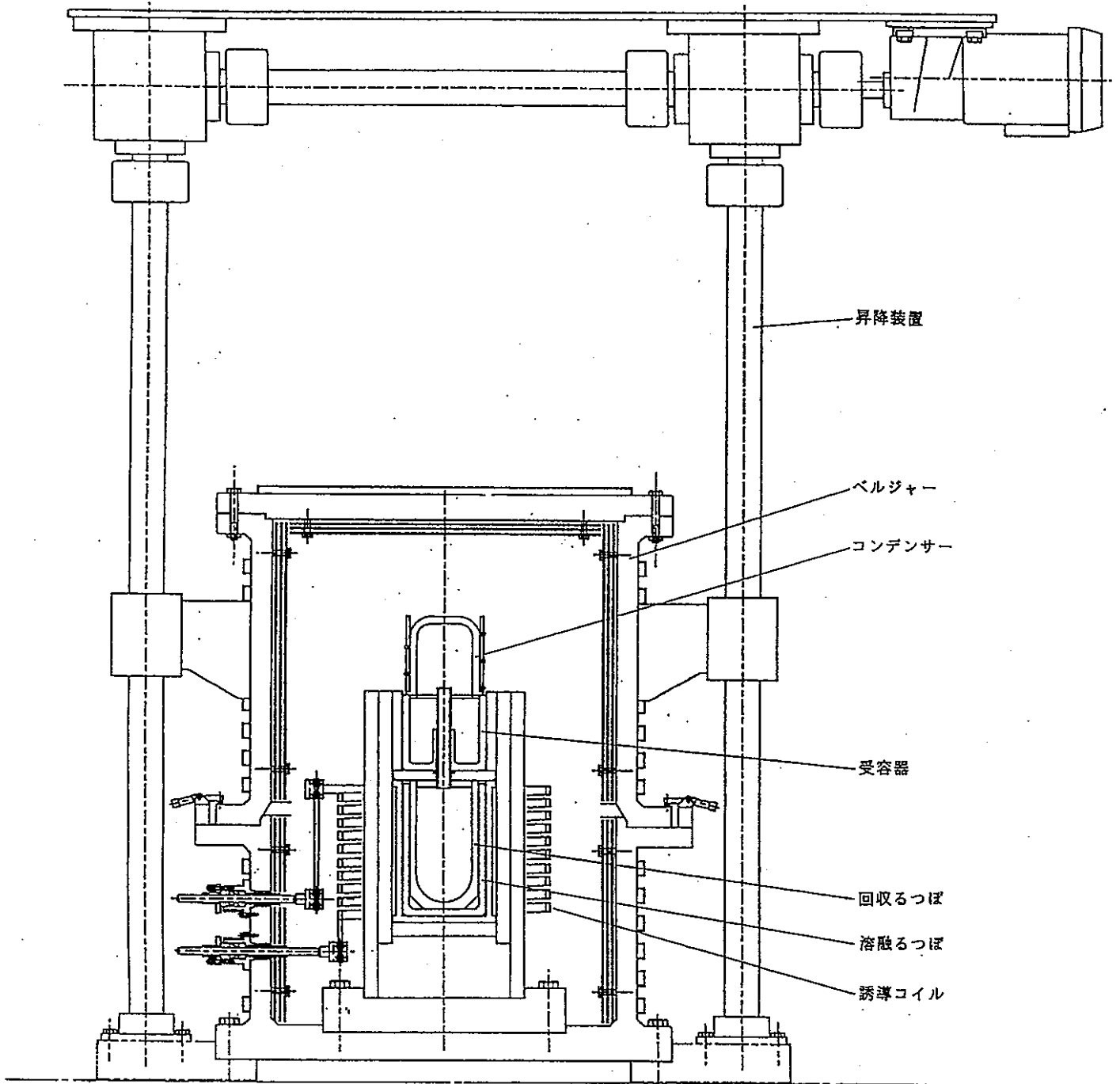


図 II - 3 カソードプロセッサ

4. TRU 抽出装置 (図Ⅱ-4 参照)

4.1 目的

電解精製試験工程で使用した塩からTRU を抽出して回収する装置

4.2 設計条件

(1) 処理容量 : 500g/ バッチ

(2) 抽出対象物 :

- ・電解精製装置使用済塩 : U、Pu等を含む熔融塩(KCl-LiCl)約500g
- ・使用済塩中TRU 濃度 : 2wt % (約300ml)

(3) 抽出金属量

- ・抽出金属中TRU 濃度 : 1wt % (仮定)
- ・抽出金属量(Cd) : 1000g(約130mol)

(4) 抽出槽の寸法

- ・容積約700ml として、内径φ70、高さ200mm

4.3 装置仕様

(1) 抽出槽 (2槽)

- ・材 質 : SUS304
- ・使用温度 : 500 ° C
- ・寸 法 : φ70×200mmH

(2) 移送配管

- ・材 質 : SUS304
- ・使用温度 : 550 ° C
- ・寸 法 : 約φ20×1000mm(長さ要検討)
- ・構 造 : 移送配管外側に加熱用ヒーターを巻き付けた構造

(3) 予備ポート

- ・材 質 : SUS304
- ・使用温度 : 500 ° C
- ・寸 法 : φ70×200mmH

(4) 電気炉

- ・形式：ヒーター加熱方式
- ・使用温度：常用500 ° C（最高800 ° C）

(5) その他

- ・熱電対を各抽出槽、移送配管入口、内部、出口、電気炉に設置
- ・抽出槽は取り出し可能な構造
- ・移送は移送先容器を負圧にして圧送

4.4 関連補機

(1) TRU抽出装置ヘッドアッセンブリ取扱装置

- ・試験開始前には攪拌装置、熱電対等が組込まれたヘッドアッセンブリに、反応槽及び移し替え槽あるいは予備槽を組込む治具
- ・試験終了時には攪拌装置、熱電対等が組込まれたヘッドアッセンブリから反応槽及び移し替え槽あるいは予備槽を取外す治具

(2) TRU抽出装置ヘッドアッセンブリ回転／昇降装置（本体の設計に含める）

- ・試験開始時にはヘッドアッセンブリー式を装置本体上部に移動し本体内に下降させて所定の位置に固定する。
- ・試験終了時にはヘッドアッセンブリー式を装置本体内から引出し、取扱位置まで回転移動する。

(3) 移送用配管ホルダ

- ・Li還元装置、電解精製装置からTRU抽出装置へ塩を移送する配管、および各槽（るつぼ）間の移送に使用する配管を一時的に吊して保管する棚

(4) 反応槽、移し替え槽および予備槽保管棚

- ・使用していない各槽（るつぼ）あるいは処理待ち槽を一時的に保管する棚

(5) サンプリング管ホルダ

- ・サンプリング管を一時的に保持する棚

(6) 回収物計量器（上皿天秤）

<その他> 容器からの取出し、容器への収納や移し替え等は、マニプレータを用いて手動で行う。また容器の移動や各種部品／部材の移動はマニプレータまたはホイストで行う。

4.5 総重量 180 kg

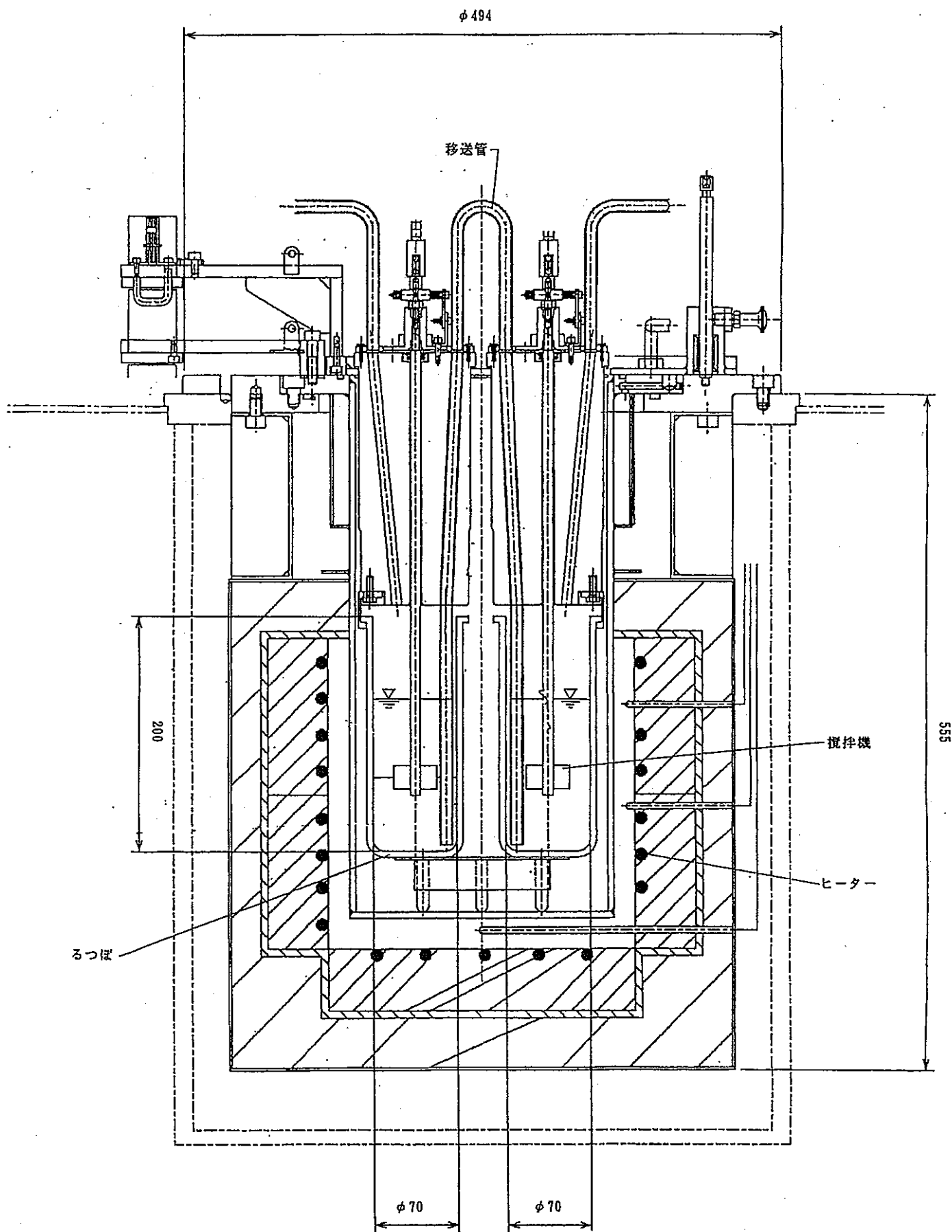


図 II - 4 TRU抽出装置

5. その他の機器、治具

- (1) 受入れ燃料粉容器保管棚
- (2) 燃料粉容器開蓋治具
- (3) 燃料粉計量器（上皿天秤）
- (4) 廃棄塩収納容器及び保管庫
- (5) 回収金属燃料インゴット収納容器
- (6) るつぼコーティング治具
- (7) 受入れ酸化物燃料乾燥装置
- (8) サンプル洗浄水乾燥固化装置
- (9) 回収金属燃料酸化装置（酸化物で払い出す場合）

6. 電気品、雰囲気浄化系、ユーティリティ

- (1) アルゴン雰囲気浄化装置
 - ・アルゴンガスポンベ
 - ・再生用アルゴン水素ガスポンベ
- (2) 電解精製装置電源
 - ・直流安定化電源（定電圧／定電流）
- (3) 加熱装置電源
 - ・カソードプロセッサ：高周波誘導加熱電源
 - ・その他の装置：抵抗加熱電源
- (4) 測定装置
 - ・電流計／電圧計
 - ・クーロンメータ
- (5) ユーティリティ
 - ・制御用圧縮空気
 - ・冷却水（試験装置冷却、アルゴン雰囲気浄化装置冷却）

7. Ar循環精製装置

Ar循環精製装置の概念系統図を図Ⅱ－5に示す。

ガスバブラを設けているが、このガスバブラはセル内を常時一定負圧に維持するため、

FMF試験セルのN₂循環系におけるシールポット方式に該当するものである。不純物としてのH₂O、O₂の濃度は、現状では100ppm以下を考えているが、今後詳細な検討が必要である。

Ⅲ 分離、抽出プラントの設置場所の調査・検討

1. 乾式分離、抽出試験作業の工程概要

大洗工学センター照射燃料集合体試験施設（以下FMF）で行われる、照射済MOXの乾式分離、抽出試験作業の工程について述べる。

実施される工程試験は次の4工程である。

- ・ 酸化物燃料還元工程
- ・ 電解精製工程
- ・ 陰極回収物処理工程
- ・ TRU抽出工程

これらの工程試験を行うホットセルでの作業を工程フロー図にして以下に示す。

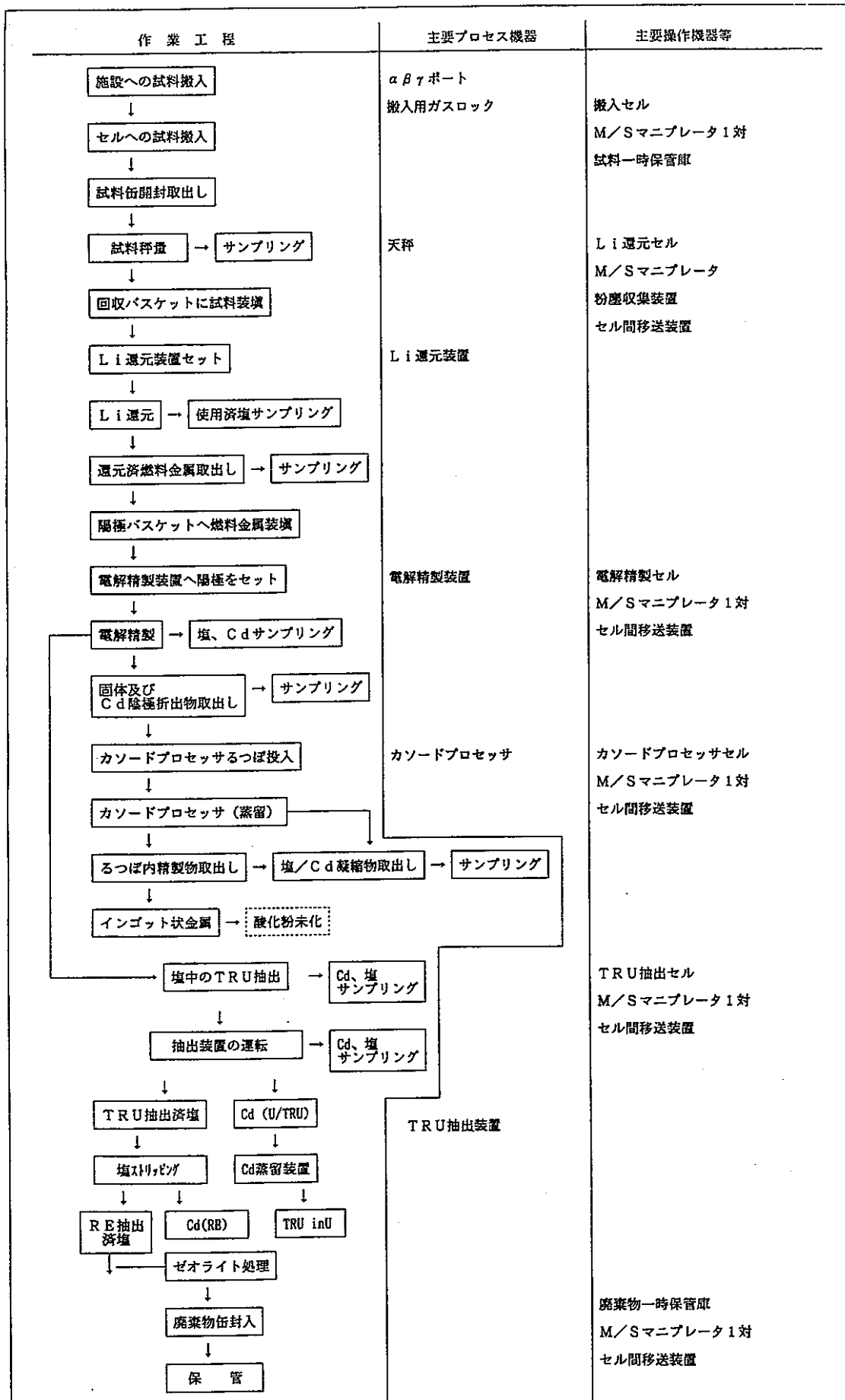


図 III - 1 試験作業工程ブロックフロー図

2. 乾式分離、抽出試験を行うセルの計画

本試験を実施するセルの設置場所についてF M F 試験セル、F M F 増設第2補修室、F M F 地下2階及びA G F コンクリートセルの4ヵ所を対象として、設置スペース、設置の容易さ、メンテナンス、換気（不活性雰囲気）設備対応等の技術事項及び工事費、工事工程等を比較検討し設置場所選定のための条件を整理する。

以下に4ヵ所の検討対象のうち、F M F 試験セル、A G F コンクリートセルについては、改造を含めた設置計画の概要を、またF M F 増設第2補修室及びF M F 地下2階エリアについてはセル建設を前提とした設計計画の概略を述べる。

2.1 F M F 試験セルの改造計画

(1) 前提条件

① 利用するセルのスペース制限

利用できる試験セルのスペースはPNCの指示により3ワークステーション以内とする。ここでは既設セルのE通、2-3通間の3ワークステーションを対象場所とする。

ただしセルの改造工事中及び分離抽出装置設置後もF M F 本来の常陽燃料のP I Eに支障があってはならないとする。既設N₂循環精製装置の改造はないものとする。

② 雰囲気

F M F 試験セルは現在高純度のN₂雰囲気となっているためA r 雰囲気に置換しなければならない。N₂循環精製装置はそのままとし、試験セル全体の雰囲気をN₂からA r 雰囲気にするかまたは試験装置を設置するエリアのみ、セル内を仕切って独立したA r 雰囲気セルとする場合の2通りがある。

本検討では、既設のN₂循環精製装置をそのまま転用して既設試験セルのN₂雰囲気をA r ガスに置換するものと仮定するが以下のような問題が考えられる。

- 1 転用する場合の問題

- ・ N₂循環精製装置をA r 用に転用する場合、N₂に対しA r の質量が大きいいため循環精製系内に組込まれているブロワー等に過大な負荷がかかり、極端な場合は故障が発生することが考えられる。
- ・ A r は熱伝導率が悪く、F M F 試験セル内の他の試験装置のモーター等にトラブ

ルが発生する心配がある。

(2) 操作の概要

乾式分離・抽出試験装置の操作にはM/S マニプレーター、パワーマニプレータ、インセルククレーン等を用いて、遠隔操作により行う。対象試験装置の構造・補機を用いて行う場合の操作概要はⅡ章を参照されたい。

(3) 保 守

F M F 試験セルと全く同じ操作用機器を用いて、遠隔保守を行う。

(4) セルの改造

① 機器の配置計画

- ・既設試験セル内に分離、抽出装置を設置する場合の配置計画を図Ⅲ-2に示す。
L i 還元装置、電解試験装置、カソードプロセッサ、T R U 抽出装置の主要4装置の設置スペースは有効で各1 m²程度が必要であるか、ほかに試料、製品、塩廃棄物等の保管スペース及び原料燃粉の取扱い、試料の秤量等のスペースが必要になる。

② 工事の問題点

- ・試験セル内を除染し、作業員がセルに入って工事を行う方法と除染をしないで遠隔で工事を行う方法の2通りが検討の対策として考えられる。
- ・除染に関しては具体的な除染方法、採用すべき除染機器の検討からはじまり、モックアップ等の試験を行う必要がありさらに除染工事の実施には長期間を要し、必要人員の調達、作業員の被ばく対策が必要であり、膨大な廃棄物量が発生し、これらに要する経費もまた莫大なものとなる。
- ・遠隔据付工事が現実に実施できるかどうかについては、完全なモックアップ試験が必要である。また多分セル内での遠隔溶接が必要であり遠隔溶接法の開発もおこなわれなければならない。

2.2 AGFコンクリートセルの改造計画

(1) 前提条件

- ① 2,000セルラインの全セルを使用する。
- ② 各ボックスの改造は行わない。ただしAr循環精製系は新設する。
- ③ 遠隔保守ではなく直接保守とする。

(2) 機器配置計画

- ① No.4セル、No.5セル、No.6セル、No.7セルの4セルを使用して各試験装置を配置する。全体配置計画を図Ⅲ-3に示す。
- ② 試験で発生する塩廃棄物、その他の廃棄物、製品等は、各ボックスの一部を使用して保管する。
- ③ 各ボックスにおける試験装置の設置位置は、マニプレータの操作範囲から検討して、ボックス前面壁から1,200mmの位置を中心とした場所になる。
- ④ 各ボックス内の試験装置の上面はボックス床上から600mm程度が想定されている。最良の操作位置ではないが操作は可能である。
- ⑤ 電気、流体は既設のコネクターを介して試験装置に接続する。
- ⑥ 全体配置計画で問題は、No.5セルのニューマチック・ステーションの位置が障害となること及びコンベアによる物品の搬出入時の空気の流入に対する対策を検討する必要があることである。

(3) Ar循環精製系の設置計画

- ① ボックスの給気口及び排気口を利用して配管する。Ar循環精製装置は操作室に設置する。ただし循環装置をボックス間をセル遮蔽壁を介して行う配管工事は、配管経路でどうするかという問題とあわせて非常な困難が予想される。場所的に狭いので、かつ他の複雑な配管が錯綜する地下室を経由する案、セル前面の遮蔽壁を貫通させる案共現状では採用し難い。
- ② 循環精製系に代わりワンスルー方式を採用する案は、前述と同様、困難な別途配管工事が必要であるばかりでなく、Ar純度をO₂及びH₂O濃度100ppm以下に確保することは現状ではメーカーにおける調査でも確証が得られていない。

(4) 運転操作の概要

- ① 試料及び資材の搬入は既設ローディングステーションまたはNo.1セルを利用して行い、コンベアでNo.4～No.7の各セルへそれぞれ受け入れる。

② 試験操作は主として既設のM/Sマニプレーターで行う。試験装置からつば、陽極バスケット、陰極等を取出すときは一時退避型の吊り上げ装置を補助装置として設置する。

③ 廃棄物の保管は各ボックス内のスペースを利用して行う。

(5) 保 守

ボックスは固定されるので、ボックスごと除染セルへ搬出することはできない。ボックス内を遠隔除染及び直接除染の後直接人が入って機器の搬出、修理を行う。

(6) 問題点

① 除染作業に時間、経費がかかり廃棄物が大量に発生する。

② 作業員に対する被ばく対策が必要である。

③ A r 循環精製装置の設置場所の検討及び装置とボックス間の配管接続工事に係わる困難さをクリアするため詳細な検討が必要である。

④ A r コンベア開口部にガスロックを設ける必要があるが、現実には実現困難である。

⑤ 2,000Ci ラインの4セルを乾式分離・抽出試験に使用するとA G F本来の試験特に増設鉛セルにおける試験が遂行できなくなる。

2.3 F M F 増設第2補機室の改造計画

(1) 前提条件

① 第2補機室はF M F 増設部の1階に位置し、10～17通及びF₁～H₁通間の範囲内において面積約26㎡(16m×11m)の広さを有する。

② 鉄セル設置スペースの床面積は16.9m×3m=50.7㎡である。

③ 床の耐荷重は10ton/㎡であり、設置予定床面積の全耐荷重は507tonである。

④ 鉄セル設置スペース床以外の周辺床の耐荷重は2ton/㎡である。

⑤ 第2補機室の天井有効高さは7mである。

⑥ 7.5tonクレーンの作動範囲は鉄セル設置スペースを十分にカバーしている。

⑦ F M F 増設部セルと鉄セル間には将来用として計画された気送管の取合部が用意されており、本鉄セル工事に利用することが可能である。

⑧ 補機室内には将来設備用の電源として3φ200V28KW、2φ100V29KWが用意されている。

- ⑨ 第2補機室は放射線管理区域種別のグリーン区域として $-2 \sim -7$ mmH₂O の負圧管理及び空調が行われている。
- ⑩ 鉄セル設置スペースの周辺スペースが十分であり、Arガス循環精製装置の設置が可能である。

(2) 鉄セルの設置計画

第2補機室に設置する鉄セルの全体計画を図Ⅲ-4に示す。

- ① 鉄セル設置スペース内に鉄セルを設置する。スペース的に問題はない。
- ② 鉄セルの重量は概算で約320tonで、鉄セル設置スペースの耐床荷重507tonを十分に下廻っている。
- ③ Ar循環精製装置の本体の設置位置並びに揮発性F P s及びオフガス処理系の配置を図Ⅲ-5に示す。

(3) 鉄セルの寸法、構造

- ① 鉄セルの概念図を図Ⅲ-6（参考図）に示す。
- ② 鉄セル全体の寸法は奥行1,600mm×長さ15,900mm×高さ2,800mmである。
- ③ 遮蔽壁は厚さ300mmの鋼板とし床を除く全セル周辺に設置する。
- ④ 鉄セルはローディングセル、試験セル、除染セル及び修理用ボックスから構成される。
- ⑤ 試験セル内には奥行1,300mm×長さ9,000mm×高さ1,600mmの固定型のSUS製アイソレーションボックスを設置する。Arガス量を少なくするためできるだけ小型化を図った。また、除染セルの内壁はSUS板でライニングを施すものとし、気密度はそれぞれ0.1vol%/hr以下の α タイトとする。

(4) セル設備

- ① 遮蔽窓及びマニプレーターを組合せたワークステーションは、ローディングセル2、試験セル6、除染セル2の合計10とする。
- ② ローディングセルと試験セル及び試験セルと除染セルの間にそれぞれ小型ガスロック及び大型ガスロックを設ける。
- ③ 各セルの背面にセル内工事用の遮蔽扉を設ける。
- ④ 除染セルに附属して修理用グローブボックスを設ける。
- ⑤ 天井に搬入用及び搬出用の β - γ ポート及び α - γ ポートを設置する。
- ⑥ 試験セル天井にけんすい型のモノレールホイストを設ける。

(5) Ar 循環精製装置

- ① 試験セル内は高純度のAr雰囲気としO₂及びH₂Oの不純物含有量は100ppm以下とする。
- ② 上記①のAr雰囲気を維持するための循環精製装置を設置する。循環精製系統図を図Ⅱ-5に示す。

(6) オフガス及び揮発性FPの対策

- ① オフガスとして試料から放出される主な核種はKr及びXeである。1試料中の含有量はKrが1.445Ci(5.35×10^{10} Bq)、Xeがトレーサー量とすれば、全生成量の大部分はピン切断時(またはパンクチャー時)に放出されているものと想定できる。例えば20%の残留量が放出されたとしても290mciであり、最終的には大気中に放出可能である。
- ② 揮発性FPのうち主要なものはRuとCsである。その含有量はRuが 1.226×10^2 Ci及びCsが39.47Ci(Bq:25.6Ci)である。これらはピンパンクチャーの後も試料内に捕捉残留していて電解試験時に徐々に揮発してAr雰囲気中に出てくる。揮発性のFPはゼオライト吸着塔で捕捉する。ただしFPの揮発量と捕捉効率、その条件等不明の点が多く調査と場合によっては技術開発が必要と考えられる。

(7) 試験機器配置計画

- ① 試験セルにLi還元装置、電解試験装置、カソードプロセッサ、TRU抽出装置の主要機器の配置を図Ⅲ-4に示す。
- ② 試料の秤量、取扱い、陽極、陰極の取扱い等のスペースを考慮する。
- ③ Ar循環精製装置を操作室に設置する。設置スペースは2m×5m程度を予定する。

(8) 運転操作の概要

- ① 試料及び実験資材はβ-γポートから搬入セルにキャスクにより直接搬入する。また試料は気送管によっても行うことができるよう計画する。
- ② 試料、実験資材は搬入セルよりガスロックを通して、試験セルに搬入される。
- ③ 分析試料は試験セルのα-γポートよりキャスクで搬出する。
- ④ 陽極、陰極、るつぼ等の取扱は天井ホイストクレーンとM/Sマニプレータで行う。
- ⑤ 試験機器のリプレース方法は天井ホイストクレーンに吊り下げたインパクトレン

チをM/Sマニプレータを利用して試験機器上部の遠隔ボルトと位置合せを行い、ネジをゆるめて機器を取りはずす、または逆の方法で据え付けを行う。

- ⑥ 廃棄物とくに塩廃棄物は当分、セル内に保管する。WDFで処理技術の開発を進める必要がある。

(9) 保守

- ① 試験セルは遠隔保守を基本とする。
- ② 試験機器は遠隔で取りはずし大型ガスロックを通して除染セルに移動し、遠隔除染の後、修理用グローブボックスに移動して直接グローブ操作により修理する。
- ③ セル内のフィルター、各種パッキン、ボルト、ナット、その他原位置で交換または、修理するものはそれが可能なように計画する。

2.4 FMF地下2階の改造計画

(1) 前提条件

FMF地下2階に現在倉庫として使用されているスペースがある。FMF地下2階倉庫周辺の概要を示すと次のとおりである。

- ① 周囲は厚さ約1,600mmの普通のコンクリート壁で囲まれており、7通側はコンクリートブロック積となっている。
- ② 現状の内法は、奥行5,500mmに後打ちコンクリート予定部約2,000mmを加えて7,500mm、巾5,000mm、高さ6,500mmである。
- ③ 7通と8通の間に巾3,900mmの廊下がある。
- ④ 6～7通、E～F通間には廃水サンプリング室がある。
- ⑤ 同じく6～8通、C～D通間は排風機室の一部となっている。

(2) セルへの改造

- ① FMF地下2階倉庫をセルに改造する場合の計画を図Ⅲ-7に示す。
- ② 7通側のコンクリートブロックの代わりに普通コンクリート厚さ1,200mmを打設し、遮蔽壁とする。
- ③ セル内面をSUS板でライニングし気密構造の $\alpha-\gamma$ セルとする。
- ④ 7通側壁に遮蔽窓1ヶ、M/Sマニプレーター1対及び遮蔽扉を設ける。
- ⑤ セル内法は奥行5,500mm、巾5,000mm、高さ6,500mmである。
- ⑥ セル内天井にけんすい型のダブルレールホイストを設けて、セル内機器の操作、

メンテナンスに使用する。

- ⑦ セル内に試験機器、廃棄物保管庫、資材保管エリアを設ける。
- ⑧ 電気、Arガス等のユーティリティ配管をセル前面壁に遮蔽プラグ方式で設ける。

(3) 改造計画上の問題

- ① 試料の搬出入設備 ($\alpha - \gamma$ ポート方式または $\beta - \gamma$ 方式+ガスロック方式) を設置するスペースがない。
- ② メンテナンス計画を考慮した設計が困難である。極端な言い方をすればメンテナンス不可能であるので、メンテナンスフリーの機器、セルとしなければならない。デコミッシングも現状計画で不可能である。
- ③ Ar循環精製装置の設置場所選定し難い。
- ④ 試験機器の配置に問題がある。セル内の試験機器のうち、2列配置がさけられず、奥側の機器の操作はできないか、または極めて難しい。

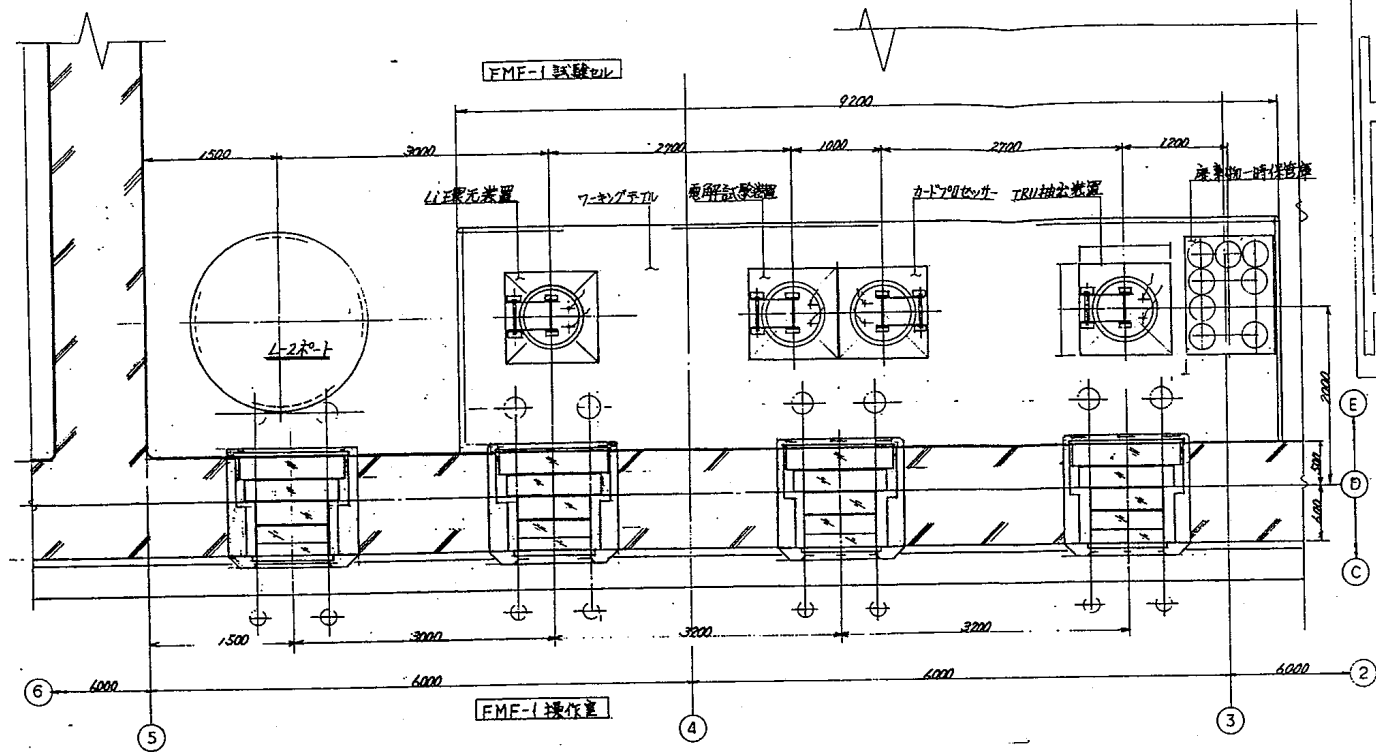
3. 乾式分離、抽出試験を行うセルの設置場所の検討

前記2の乾式分離、抽出試験を行うセルの設置計画に基づきセルのスペース、装置の設置計画、設置工事の難易度、操作性、メンテナンス性、換気(不活性雰囲気)設備対応等について最も適した試験場所の選定に資するために比較検討して表Ⅲ-1に示す。

表Ⅲ-1 分離抽出プラントの設置場所の検討・評価

検討項目	設置場所	F M F 試験セル	F M F 増設第2補機室 (鉄セル増設案)	F M F 地下 2階 (コンクリートセル増設案)	AGFコンクリートセル	備考
1	設置スペース	①6×20 ^{mL} ×7 ^{mH} ②5.5×12 ^{mH} ③既設改造なしで転用 ④セル内設置、配管にてセル外排気 ○	①2.2×2.8 ^{mH} ×16 ^{mL} ②4×23 ^m ③サビリアに設置可 ④セル内に設置、配管にてセル外排気 ◎	①5×6.5 ^{mL} ×5.5 ^{mH} ②4×6 ^m ③操作室に設置不可 ④セル内設置、配管によりセル外排気 △	①2×2×2 ^{mH} ×4セル ②4.5×14.2 ^m ③操作室に設置不可 ④配管工事が極めて困難 ×	
2	設置の容易さ	①既設装置の撤去、移設 ②除染なしを想定 ③汚染区域、遠隔据付け ④少量発生を予想 ⑤架台、揮発性PP捕集装置及びオフガス処理系等の配管設置が困難遠隔据付け法の開発が必要 △	①工事受入れ準備ができています。 ②なし ③非汚染区域内 ④なし ⑤容易 ◎	①前面仕切り壁撤去 ②なし ③非汚染区域 ④なし ⑤普通 ○	①既設装置の撤去 ②有 ③汚染区域内工事 ④大量の高、低廃棄物 ⑤Ar循環系、揮発性PPオフガス処理系の配管、本体工事非常に困難 △	
3	設備メンテナンス	(1)全遠隔保守 (2)_____ (3)_____ ◎	① _____ ②遠隔保守が基本(ホイスト、照明はセル内近接保持) ③ _____ ○	① _____ ② _____ ③除染後セル内近接保守 △	① _____ ② _____ ③除染後近接保守 △	
4	換気(雰囲気)設備	(1)既設利用 (2)新設 ・設置場所 ・設備形式 (ハケジ型か原位置組立型か) (3)揮発性PP及びオフガス対策	①N ₂ 循環系を改造なしでArガス系に転用、O ₂ 、H ₂ O濃度100ppm以下負圧-30mmHg、O保持 ② _____ ③セル外より新Arガスを電解試験装置に注入し当該装置より吸着塔(ゼオライト)を経てセル外へ配管により排気 △	①Ar循環系、設置スペースなし ②O ₂ 、H ₂ O濃度100ppm以下、セル内負圧-80mmHg、O保持、サビリア設置、ハケジ型 ③新Arガス装置内吹込み(正圧)→揮発性PP吸着塔(ゼオライト)→HEPA→排気 ◎	①同左 ②工事が困難 ×	
5	試験装置の配置、操作性	(1)マンニプレート操作範囲と試験装置の配置 (2)試料、物品の搬出入、移動 (3)雰囲気純度の維持に関する問題 (4)隣接する他の試験への影響	①特に問題なし、良好 ②特に問題なし、良好 ③ _____ ④1窓1対マンニプレートに試験装置2基以上設置することが必要となり操作性に難 ○	①一部マンニプレート操作範囲外となる可能性あり ②搬出入口設置不可、物流システム問題あり ③セル内Arガス雰囲気不可 ④1窓1対マンニプレートに試験装置4基設置、操作不可となる可能性あり △	①陽極、陰極等装置内器具の引上げ操作に難(マンニの上方操作範囲限界) ②特に問題なし ③コンベア等の操作による空気の流れが避けられない ④AGF増設セル内試験及び分析等の試料調整、搬送ができなくなるAGF本来の試験作業不可。 ×	
6	総合評価	除染なし遠隔据付 △	◎			
	(1)経済性 (2)安全性 (3)工事難易度 (4)施設機能性 (目的と施設規模、構造、操作保守性が合致しているか)	○ ○ △ ○	○ ○ ○ ◎	×	×	

注) ◎:非常に好都合
○:普通
△:困難
×:不可



平面図

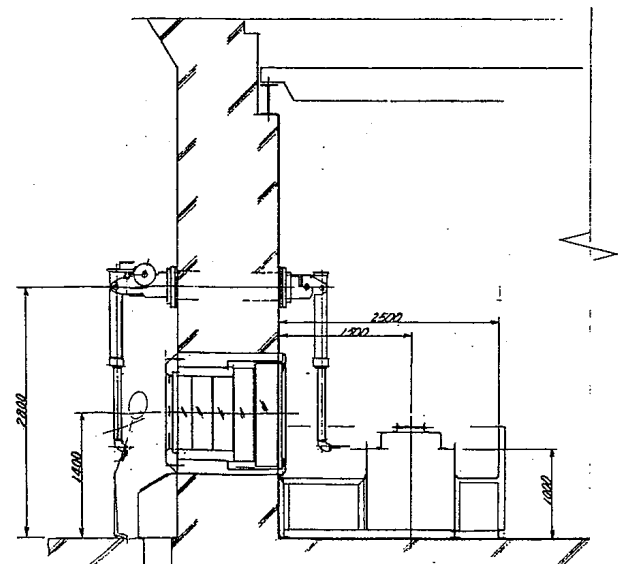
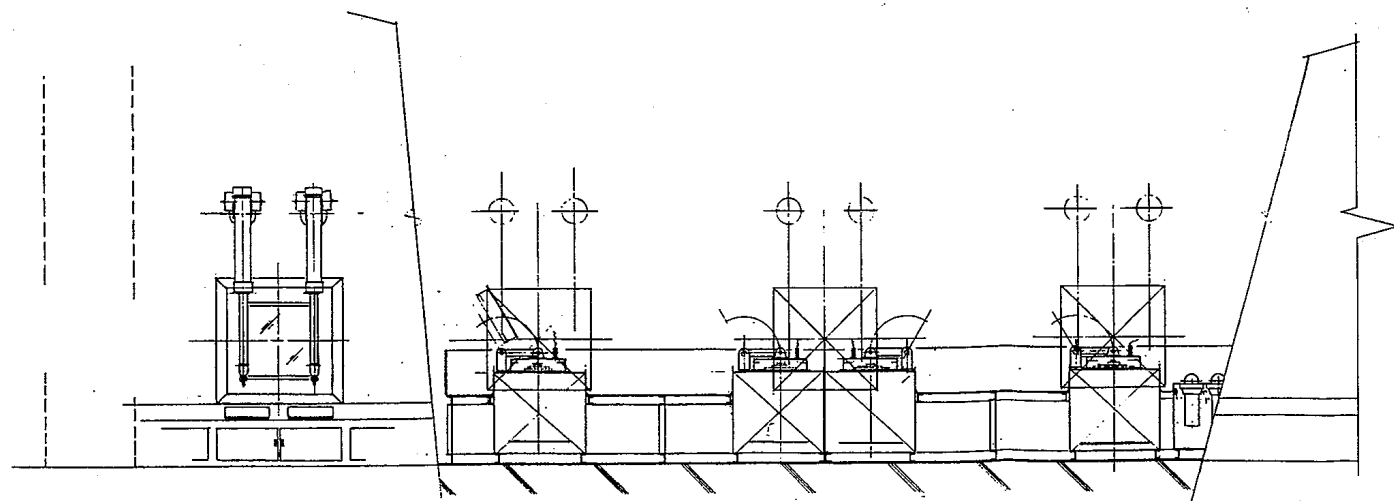
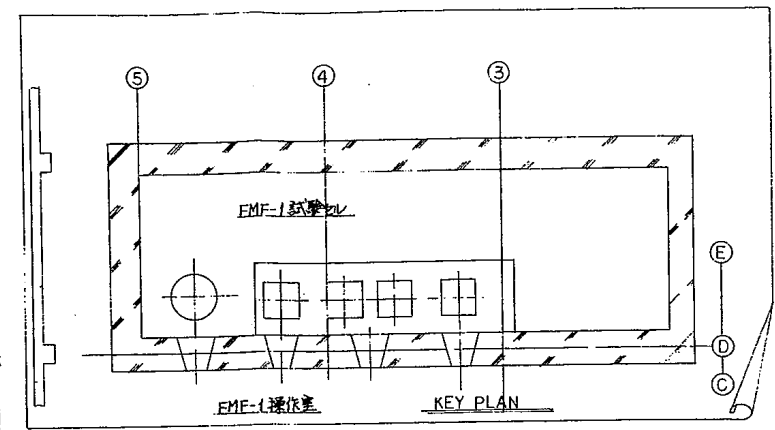
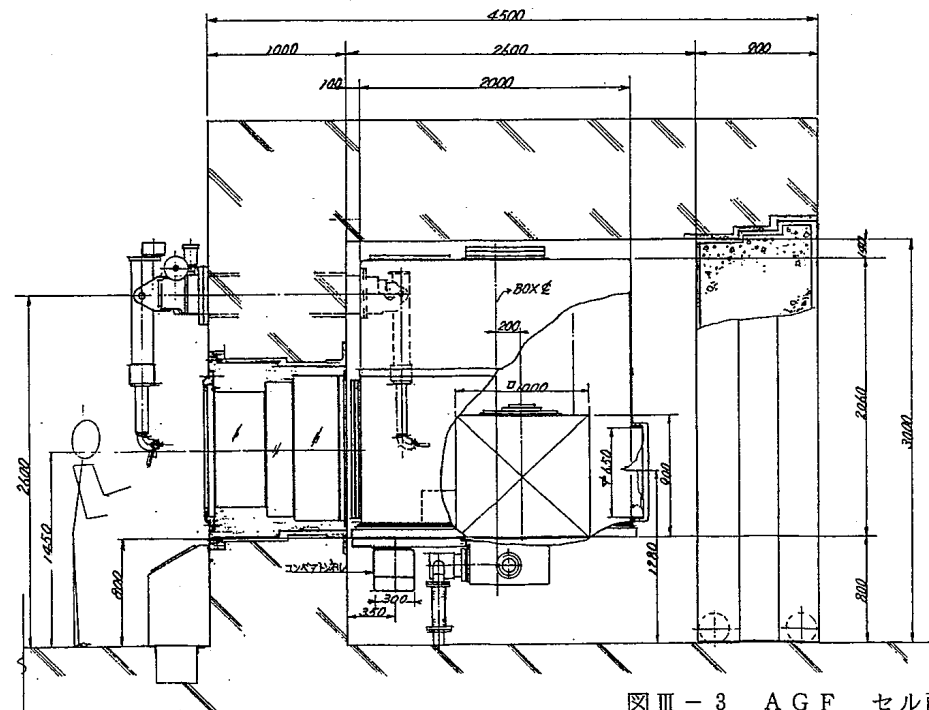
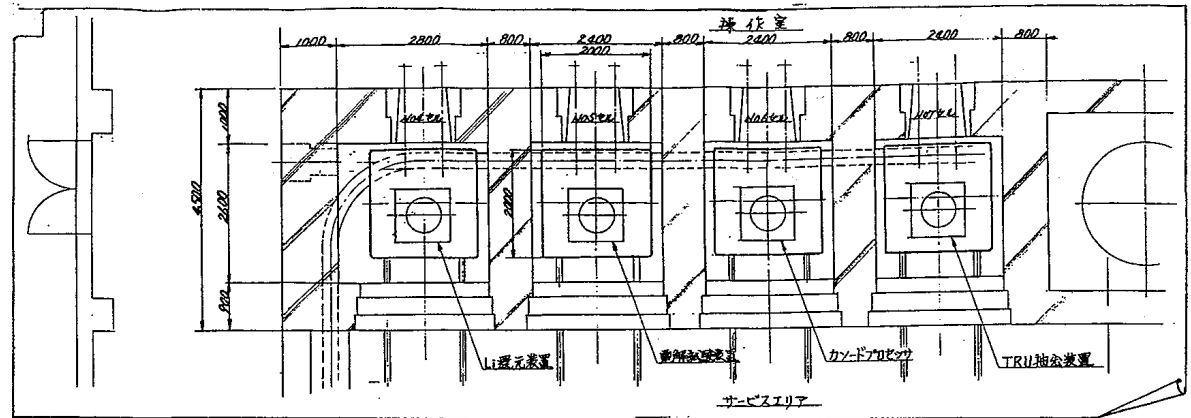
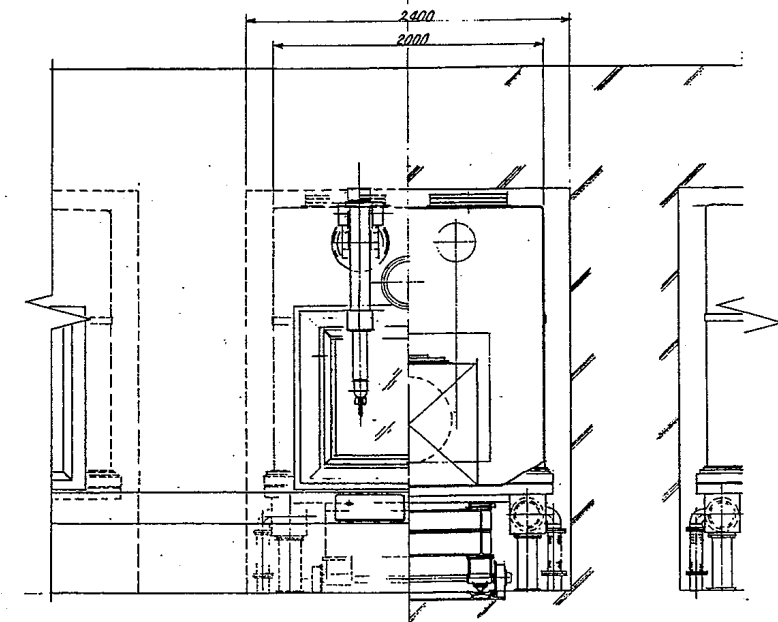
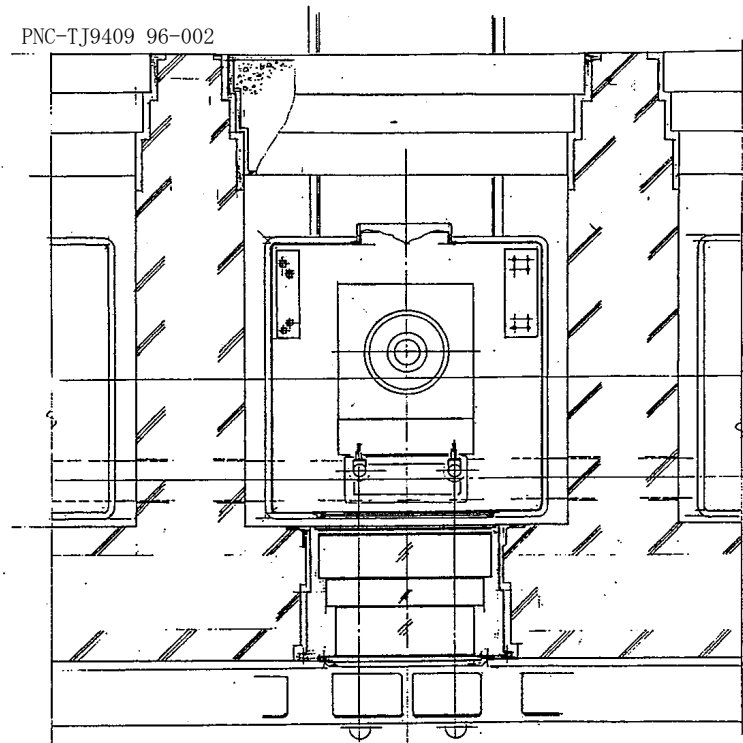


図 III - 2 F M F - 1 試験セル配置計画図



図Ⅲ-3 AGF セル配置計画図

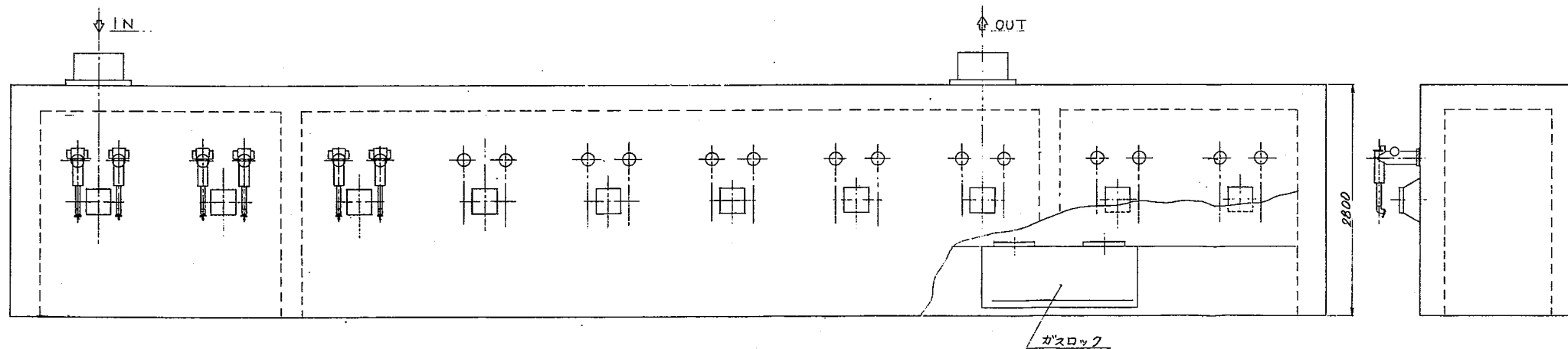
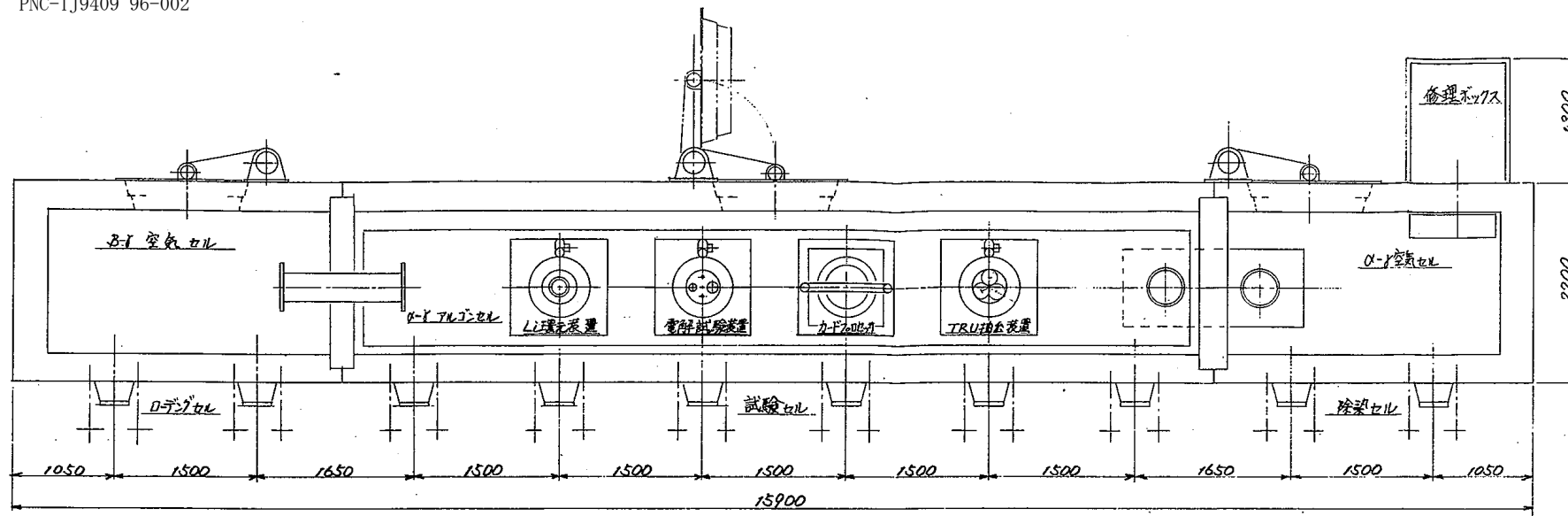


図 III - 4 F M F 増設第 2 補機室 鉄セル全体図

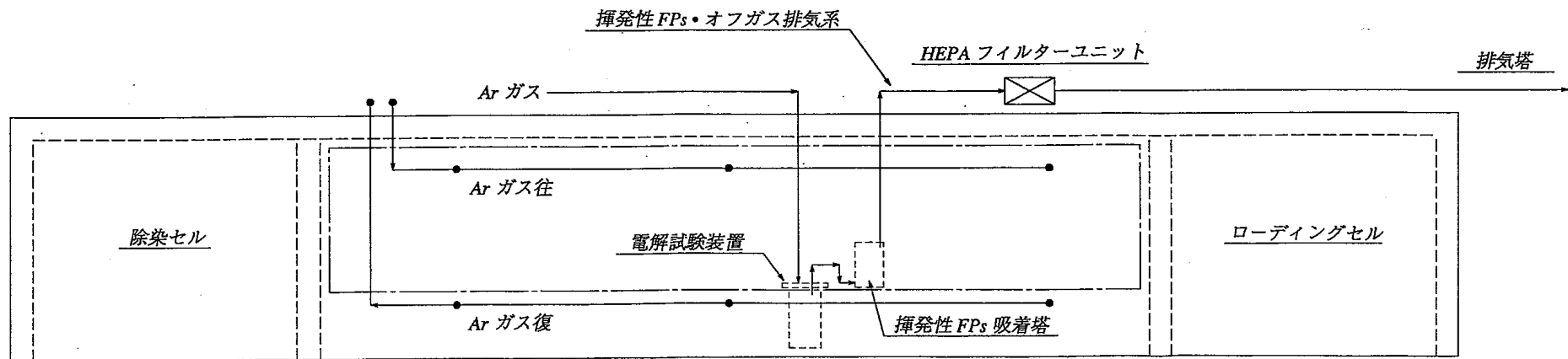
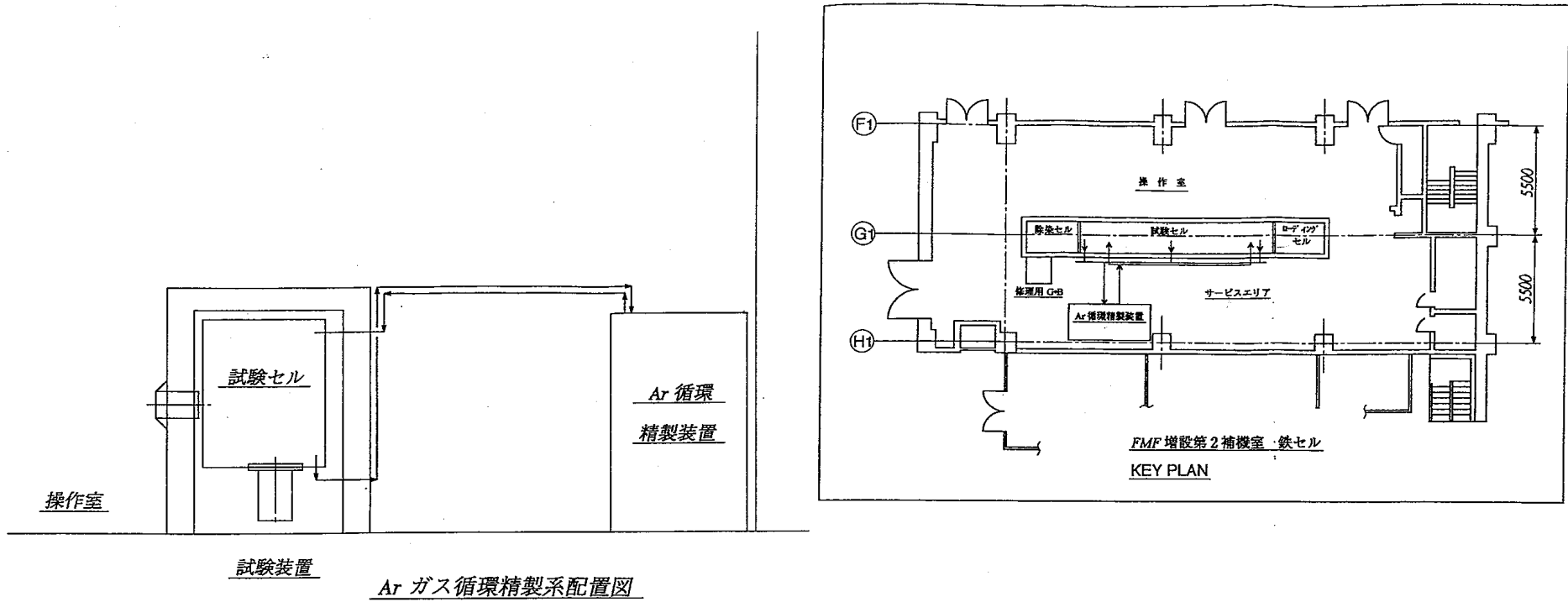


図 III - 5 揮発性 F P 's 及びオフガス処理系統配置図

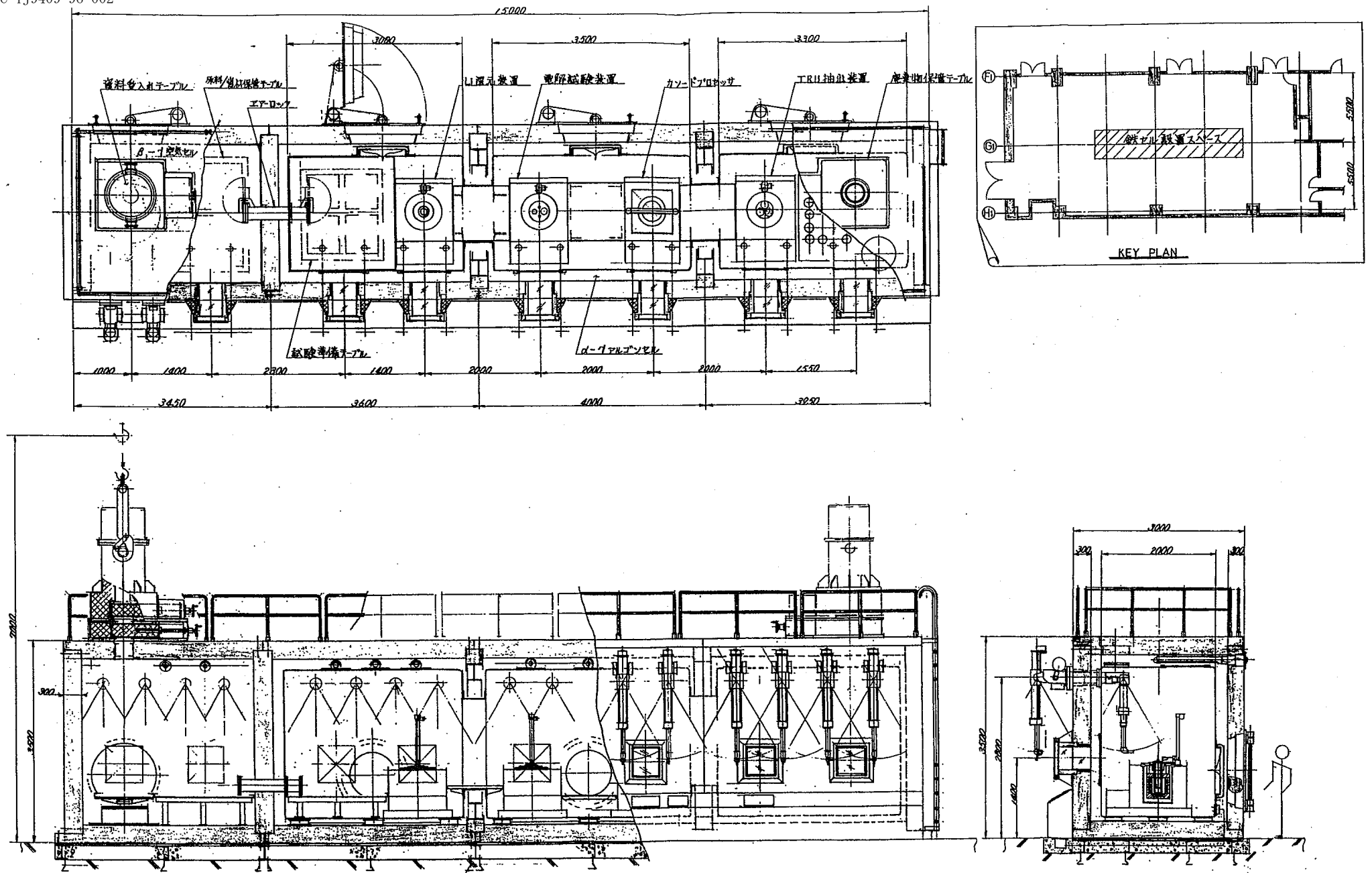


図 III - 6 試験用セル 概念図「参考図」

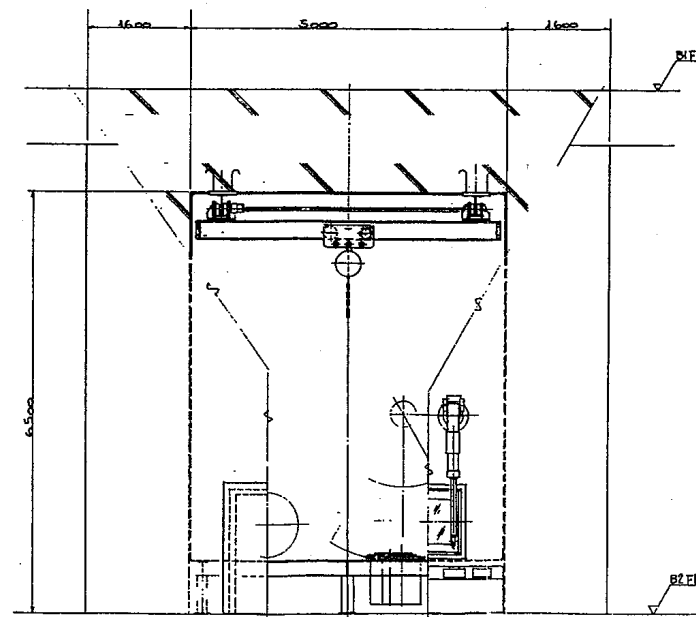
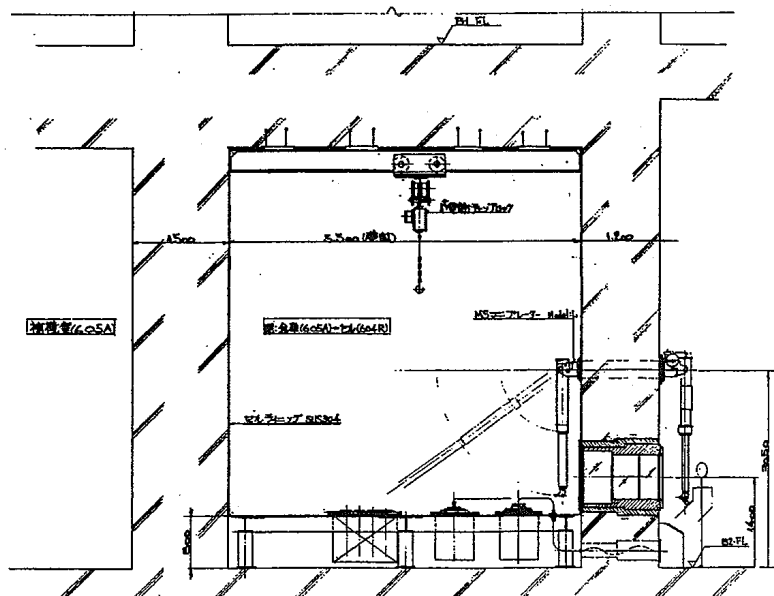
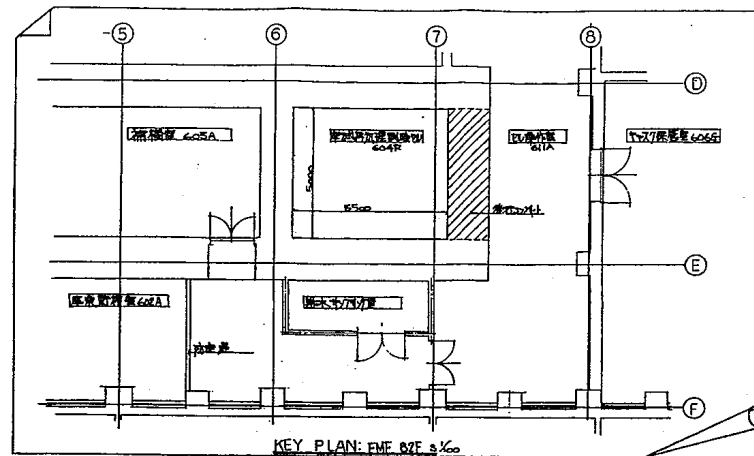
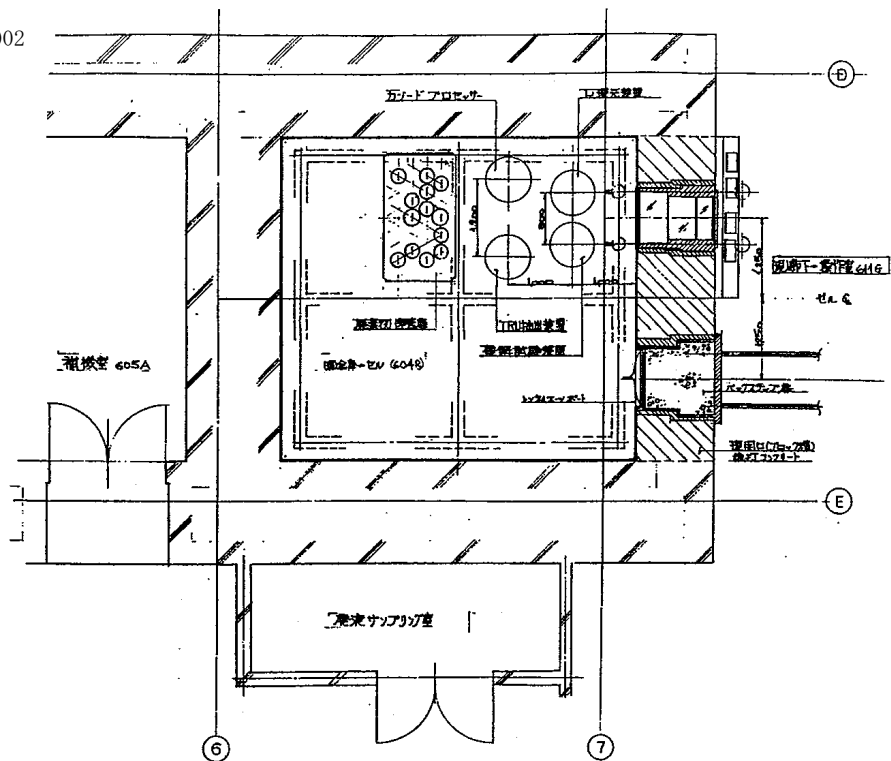


図 III - 7 F M F B 2 F 配置計画図

4. 工事工程

乾式分離、抽出試験を行うセルの設置計画を検討し、FMF試験セルの改造及びFMF増設第2補機室（鉄セル増設）の2ケースについての工事工程を検討して表Ⅲ－2および表Ⅲ－3に示す。

4.1 FMF増設第2補機室の改造（鉄セル設置）工程について
概略工程は表Ⅲ-2に示すとおりである。

(1) 鉄セル工事

製作据付工事は次の各工事を含む期間は18ヶ月を見込む

- ・基礎工事
- ・鉄セル本体
- ・インセルボックス
- ・ガスロック
- ・扉
- ・照明
- ・モノレールホイスト
- ・ポスティングポート
- ・修理用G. B
- ・その他補機

なお、試験調整その他に6ヶ月を見込む

(2) 鉄セル付属設備工事

製作、調達及び据付調整工事は次の各工事を含み、期間は24ヶ月を要求するものとする。

- ・気送管
- ・Ar循環系装置
- ・オフガス処理系装置
- ・給排気系工事
- ・電気工事
- ・マニプータ
- ・遮蔽室
- ・除染設備
- ・キャスク
- ・モックアップ設備
- ・その他補機

(3) 試験装置製作

試験装置本体の製作は12ヶ月を見込む。据付けまでの間に6ヶ月間のモックアップ期間を見込み、主として遠隔で試験装置の着脱を確認する試験を行う。本据付けを完了した後、酸化ウランを用いた実験条件の確立のための試験を行う（性能確認）必要がある。そのため少なくともウラン試験+調整で1年以上の期間を見込む必要があると考える。

4.2 FMP 試験セル改造工事について

セルの計画で述べたようにFMP試験セルの改造コンセプトには、次の3通りが考えられる。

ケース1 は 試験セルの一部を囲って、Ar雰囲気セルとする。

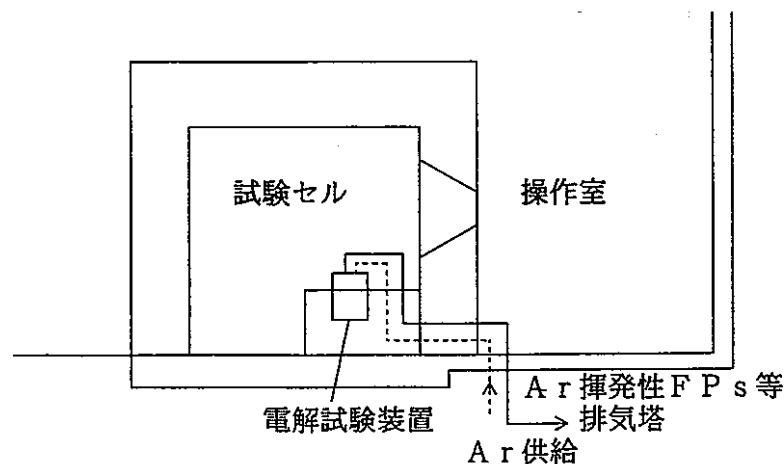
ケース2 は 試験セルのN₂循環精製装置のファン、モーターなど稼働部等の消耗劣化対策を行った後、セル全体をAr雰囲気セルに交換する。

ケース3 は N₂循環精製装置システムを現状のままでとし、循環ガスをN₂からArに替えてAr雰囲気セルに変換する。

改造工程の検討ではケース1、ケース2は除染を伴うことが予想されるので除外し、ケース3をとりあげたが、以下のような課題がクリアされたとはいえ、実現の可能性にはなお慎重な検討が必要である。

① 揮発性FP/及びオフガス処理設備の配管貫通位置の確定と設置工事方法

除染なしの場合で処理設備の配置計画を下図のように考えた場合、配管の貫通工事を遠隔で設置することができるかどうか最大のキポイントとなる。遠隔溶接を含む工事方法の開発、モックアップ試験が必要となる。



② 除染作業を実施し工事を行う場合は除染のみで1年以上の期間、多大な経費を要し、また膨大な廃棄物が発生することと作業員の被ばくが避けられないことを覚悟する必要がある。

③ MOX燃料の照射後試験機器と乾式分離・抽出試験装置が共存する場合の相互障害作用の懸念

正常状態ばかりでなく、異常事態が発生することも考慮に入れた解析が必要である。

- ・ Arが熱伝導率がよくない為、モーターなど回転機の放熱に難点があり、トラブルが発生したという情報がある。
- ・ 乾式分離・抽出試験装置が運転中に予想外の高温状態が発生し、例えば腐食性ガスやCd蒸気が発生し、FMF試験セルの機器や遮蔽窓等を腐食したり、蒸着膜を形成する等の不測の事態発生対応が必要である。

IV 主要機器の電気容量

1. 試験装置関連 40.1kW

(1) Li還元装置

- ・加熱ヒーター : 4kW (1.5kW+1.5kW+1.0kW)
- ・攪拌ヒーター : 80W
- ・回転昇降装置モーター : 400W(200W×2 基)

(2) 電解精製装置

- ・電解電源 : 1kW
- ・加熱ヒーター : 4kW (1.5kW+1.5kW+1.0kW)
- ・攪拌ヒーター : 80W
- ・回転昇降装置モーター : 400W(200W×2 基)

(3) カソードプロセッサ

- ・誘導加熱電源 : 15kW
- ・容器昇降装置モーター : 500W

(4) TRU 抽出装置

- ・加熱ヒーター : 4kW (1.5kW+1.5kW+1.0kW)
- ・攪拌ヒーター : 240W(80W ×3 基)
- ・回転昇降装置モーター : 400W(200W×2 基)

(5) 移送配管ヒーター : 10kW (3本分)

(6) 測定/制御電源 : 2kW (500W ×4 基)

2. セル関連 45kW

F M F 増設第 2 補機室の改造 (鉄セル設置) のセル概念に基づき検討した付属機器についての電気容量を示す。

(1) アルゴン循環精製系 : 20kW

(内蔵プロア、内蔵真空ポンプ、再生加熱ヒーター、
制御電源を含む)

(2) 真空ポンプ : 3kW(3 基分)

(3) 照明 : 6kW(300W/ 灯×20灯)

(4) ホイスト等 : 2kW

- (5) 除染装置 : 10kW (プラスト装置、吸引装置)
- (6) 修理用G. B 関係 : 1kW
- (7) M/S マニプレーター : 1kW
- (8) ガスロック台車 : 2kW

注1) FMF 第2 補機室に準備されている鉄セル用電源は商用3相200V、22.9KW
非常用单相100V(3kW) である。したがって、現在の検討段階の設備容量
約85kWに対しては大幅に不足する結果となっている。Ar循環精製系の20
kW(非常用電源) は常時稼働するものとして、その他設備の需要率、不
等率等を0.6 としても使用電力は不足する可能性が大であり、電源の増
容量化をはかる必要がある。

注2) アルゴン雰囲気浄化系は非常用電源系に接続する必要があり、非常用電
源系3kWの増容量化が必要である

V. 開発課題、懸案事項及び参考文献の把握

1 開発課題、懸案事項

1.1 ホット試験について

MOX燃料の乾式処理によるホット試験は、多分内外的に初めて行われる試験である。従ってこのホット試験のために十分な模擬試験によるコールド試験が先行的に行われる必要がある。

ホット試験でなされるべき重要点は

(1) プロセスについて

① リサイクルの目的であるU、Pu、Np、Am、Cmの抽出回収が、実際に高効率（99.9%位）で回収されるかをはじめて実証することになる。模擬燃料を用いたコールド試験は、ANL等で行われてきたが概略の方向を見積もるもので実際にTRUを使用出来ないのどこに行くのか明確に評価するのは不可能である。これは、TRU（U、Pu、Np、Am、Cm）は似ているようで、実は5f電子の挙動が異なるので、物理化学的性質が相当異なって来ることに由来する。

② ホットの試料中には、約40種以上の元素を含み巾広く周期率表の中に分散し多くの挙動を示す。このため一連の乾式処理を実際に行った場合各工程でどこに確実に存在するのか、又どこに逸散してしまうのかコールド試験では限界があるので明確に出来ない。長期のホット運転を行ったとき、安全保守、計量管理の点から、放射能物質の思わぬ所への蓄積又は逸散が問題になる。このためホット試験で各種FPの挙動を明らかにするのであるが、ホット試験は、手数（時間、人員、資金…）がかかりすぎる。このため出来るだけ理論的手法（熱力学的評価等）に基づいて、方向を見定め、更に模擬燃料等を用いたコールド試験を行い、ホット試験の内容を出来る限りしぼることが重要となる。

(2) 遠隔操作、自動化について

① 乾式処理は湿式と異なり、高温（500°～1400°C付近）で行なうため、装置の取扱が難しくなる。特に運転中での試料の取り出しや、運転の開始、終了時の装置内の機器のセットや取り外し等である。

このため、コールド試験で予察試験を行なっておく必要があり、ホットでの取扱いの不具合を反省し評価しておく必要がある。

(3) 装置等の材料

- ① 高温の熔融塩や金属を放射線の下で使用するため腐食が一般の場合より著しく促進される心配がある。従って現在考えられ、使用される材料についての腐食挙動を明確にし、将来の材料開発のためのデータの蓄積が望ましい。

1.2 工程試験について

- (1) 4つの主要工程の中で、MOXを金属に変換する最初の工程は未だ開発中で、現在その方法は一つにしばられてはいるが、他の3つの工程と比較すると、最終製品の分離と処理等が不十分で検討の余地が残されている。従ってコールド試験による今後の成果が期待される。

- (2) 実験から生ずる廃棄物及び揮発性ガスについて

特に懸念される廃棄物は塩化物である。4番目の最終工程でTRUが除去され希土類等のFPが塩化物中に蓄積されてくる。

今迄の場合は、廃棄物は酸化物に変えられガラス中に固化安定化されるが、この場合はゼオライト中に固化安定化される。この方法は、ANLで開発された新しい有望な方法であるが、確証実験が継続中であり、更に調査を続ける必要がある。

ここでは、塩化物をゼオライトに吸蔵させ、ステンレス保管容器に入れて、固体廃棄物保管庫に保管することになる。

揮発性ガスについては、高温(500~600 °C)でガス状のものが、装置内から外に出て室温に冷却されるとAir-sol になる場合とガス状のままのものがある。

Air-sol になったものはアブソーバーやHEPAフィルターで捕集されるが、ガス状となるRu酸化物はリークする等の問題があるので、揮発性ガスについては検討の必要がある。

1.3 工程試験の実験装置及び周辺装置について

- (1) Li還元装置

ここでは、有望で開発中の実験方法であり、装置等が提案されているが、コールド実験による確証実験が更に必要であり調査を続ける必要がある。

- (2) TRU抽出装置

ANLでは遠心分離を利用したパイロコンタクターによる、TRUの抽出を期待し

ているが、ここでは小規模なはじめてのホット試験であり、簡単で操作し易いバッチ方式を採用している。実際には数回の繰返し抽出が必要となるが、ここでは無理で1回か2回の抽出でどれだけ抽出回収されるのかと云う確証実験となる。

(3) サンプル等について

4つの工程装置において、反応の度合や、収率等を評価する必要がある。この場合必要な相からサンプリングを行なうことになるが、水溶液と異なってサンプリングによる組成の均一性が必配される。分析のためには微量のサンプリング量でOKであるが、少量で組成の均一性が保証される方法を検討しておく必要がある。

一応4つの工程について、必要な装置及び関連補機等について網羅したが、一つの工程から次の工程に、試料をどう移しかえるかについては更に検討の余地が残されている。

1.4 セル基本設計に向けて検討課題

次年度以降の概念設計及び基本設計に向けて、重要なあるいは検討に時間を要する課題があることが判った。主な課題を次に挙げる。

(1) 遠隔システムに関する課題

- ① 試験機器のモジュール化とモジュールの遠隔着脱機構
- ② モジュールの移動とメンテナンス

(2) 揮発性FPsの吸着効率の検討

(3) 鉄セル遮断に対する中性子源の影響評価、中性子源遮断対策

2. 参考文献について

- [1] 半田 宗男他、「アクチニド金属の製造」－金属燃料サイクル技術：報告書、
P-35～43、金属燃料サイクル技術研究専門委員会、日本原子力学会
(1995. 10月)
- [2] 難波 隆司他、「ANLアクチニドリサイクルについて」－金属燃料サイク
ル技術：P-156～165、金属燃料サイクル技術研究専門委員会、
日本原子力学会(1995. 10月)
- [3] 掛樋 勲他、「リチウム還元プロセス技術の紹介」－第15回金属燃料サイ
クル技術研究専門委員会－、日本原子力学会(1994. 12月)
- [4] 小林 邦明他、「UO₂の金属または塩化物への転換に関する研究」、
PNC ZJ1010 96-002、(1992. 6月)
- [5] 難波 隆司、「リチウムプロセス」－金属燃料サイクル技術報告書－、
P-158～159、金属燃料サイクル技術研究専門委員会、
日本原子力学会(1995. 10月)
- [6] 掛樋 勲他、「リチウム還元プロセス技術の紹介」－第15回金属燃料サイ
クル技術研究専門委員会－、日本原子力学会(1994. 12月)
- [7] 小林 邦明他、「UO₂の金属または塩化物への転換に関する研究」、
PNC ZJ1010 96-002、(1992. 6月)
- [8] 小泉 益通他、「熔融塩電解による高純度ウランの製造」、電気化学第33
巻、P-35～43、1965
- [9] 小山 正史他、「液体カドミウムへの溶解度」－高温冶金法物性値集、
P-106、電力中央研究所報告、T93033、(1994. 4月)
- [10] 天本 一平他、「金属ウランのCd中への溶解」－熔融塩電解精製基礎試験－
PNC PN6410 94-019、(1994. 9月)
- [11] 小山 正史他、「液体カドミウムへの溶解度」－高温冶金法物性値集－
P-108、電力中央研究所報告、T93033、(1994. 4月)
- [12] 五十嵐 幸、「熔融塩電解プロセス廃棄塩の処理シュミレーション(1)」
PNC N8410 94-400 (1994. 9月)

- [13] 伊藤靖彦、「パイロコンタクターによる還元抽出工程」－金属燃料サイクル技術－、P－106、金属燃料サイクル技術研究専門委員会、日本原子力学会、（1995. 10月）
- [14] 井上 正他、「還元・抽出技術」－超ウラン元素の乾式分離要素技術の開発と効率的分離プロセスの構築－、電力中央研究所報告、P－35～44、（1997. 7月）
- [15] 五十嵐 幸、「熔融塩電解プロセス廃棄塩の処理シュミレーション(1)」
PNC N8410 94-400 （1994. 9月）
- [16] 小山 正史他、「塩廃棄物の安定化処理－ANL乾式再処理技術開発の現状」
第1回技術進捗検討会報告資料、P－34、金属燃料サイクル技術研究専門委員会、日本原子力学会、（1995. 10月）
- [17] 河合 努、「使用済塩固化－FBR金属燃料サイクルにおける廃棄物処理技術開発の現状」、P－14～19、第10回金属燃料サイクル技術研究専門委員会、日本原子力学会、（1993. 2月）

VI まとめ

FBRの照射済MOX燃料を乾式再処理する場合の乾式分離・抽出に関する技術を調査し、大洗工学センターで行なう先行的ホット試験の内容と、この試験を実施するための主な実験装置についてその概要及び概略仕様を明らかにした。またそれらの装置を設置し、実験するためのホットセル等の施設についての設置場所等について、調査・検討を行い、FMF増設第2補機室が有力な候補であることを明らかにした。

今回の調査の要点は、金属燃料についてANLが開発した革新的方法（電解精製が中心）をMOX燃料に適用し、その成立性を概略明らかにしたことである。ここで行なわれる小規模なホット試験は、多分内外的にはじめての試みである。そのため今までになされた模擬実験等の成果や、熱力学的評価を生かし、実験内容の妥当性を明らかにしているが、現段階では不十分な点もいくつか残っており、現状進めているコールド実験等の成果を取り入れ、さらなる調査検討がされることが望まれる。

MOX燃料の元素表 : Total元素 100gの各元素の%とグラム数

H %	2.01	0.16	0.2											
希ガス	Xe	Kr	H	He										
g	1.21	0.06	0.004	0.00002										
A %	59.0	22.8	0.03	1.1	0.02									
アクチノイド	U	Pu	Np	Am	Cm									
g	64.3	25.0	0.03	1.2	0.02									
B %	0.50	0.92	0.45	1.38	0.08	0.38	0.05	0.04					0.15	
ランタノイド (希土類)	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Y	
g	0.31	0.59	0.29	0.91	0.05	0.26	0.035	0.03					0.06	
C %	0.59	0.29												
アルカリ土類	Ba	Sr												
g	0.37	0.12												
D %	0.13	1.68												
アルカリ	Rb	Cs												
g	0.05	1.03												
E %	1.58	0.11		1.79	0.48									
	Zr	Cd	Nb	Mo	Tc									
g	0.66	0.05		0.82	0.22									
F %	0.52	1.36	1.75	0.15										
貴金属	Rh	Pd	Ru	Ag										
g	0.25	0.66	0.81	0.07										
G %	0.28	0.16												
	Te	I												
g	0.16	0.01												

試料100g中のFP等の組成および電解精製時におけるFP等所在

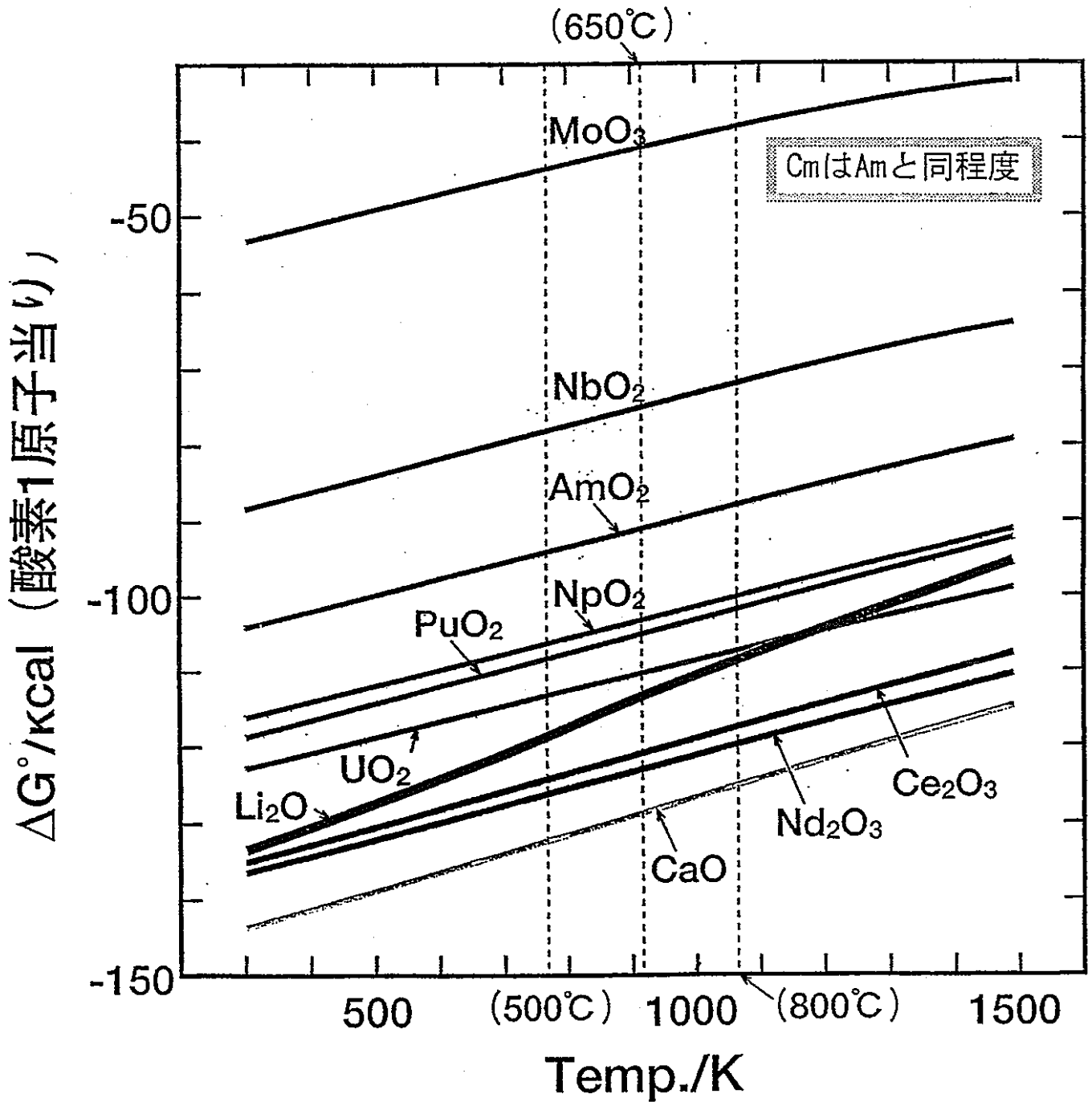
黄金膜	アルカリ	アルカリ	アルカリ	イデ	ラ	希土類+	CHARGE 量	DISCHARGE	C	D	a/o	ΔG° (500°C) for塩化物	塩 相	Cd 相	Cd 相
						希土類+	A	B	Bのモル数	Bのモル比		f		(陽 極)	(陰 極)
						希土類+	100g	99.72%				KJ/mol-Cl			
						C		9.4 万MWh/t 550日冷却							
						H		1.822×10^{-3}	1.822×10^{-3}						
						HE		3.678×10^{-3}	9.193×10^{-4}	2.006×10^{-3}	0.2006				
						TL									
						PB									
						BI									
						PO									
						AT									
						RN									
						FR									
						RA									
						AC									
						TH									
						PA									
				●		U	6.937×10^1	6.431×10^1	2.702×10^{-1}	5.896×10^{-1}	58.96	-232.35	14 ○		●
				●		NP		2.813×10^{-3}	1.817×10^{-1}	0.02590×10^{-1}	0.0259	-242.91	18 ○		●
				●		PU	2.973×10^1	2.498×10^1	1.045×10^{-1}	2.280×10^{-1}	22.80	-261.41	16 ○		●
				●		AM	8.920×10^{-1}	1.163×10^0	4.826×10^{-3}	1.053×10^{-1}	1.053	-266.38	13 ○		●
				●		CM		2.339×10^{-1}	9.586×10^{-1}	2.090×10^{-1}	0.0209	-264.99	15 ○		●
						GE		2.846×10^{-1}	3.926×10^{-1}	8.510×10^{-1}	0.0009				
						AS		8.661×10^{-3}							
						SE		9.910×10^{-3}	1.256×10^{-1}	2.741×10^{-1}	0.0274				
						BR		3.121×10^{-3}	3.906×10^{-1}	8.510×10^{-1}	0.0085				
						KR		6.126×10^{-3}	7.310×10^{-1}	1.593×10^{-1}	0.1595				
	●					RB		5.244×10^{-3}	6.139×10^{-1}	1.340×10^{-1}	0.134	-361.76	3 ○		
		▲				SR		1.178×10^{-1}	1.345×10^{-3}	2.935×10^{-3}	0.2935	-353.75	4 ○		
				+		Y		6.186×10^{-3}	6.958×10^{-1}	1.518×10^{-3}	0.1518	-272.50	11 ○		
						ZR		6.617×10^{-1}	7.255×10^{-1}	1.583×10^{-3}	1	-194.18 ZrCl ₄ , -195.28 ZrCl ₃	△		
						NR		6.940×10^{-3}	7.470×10^{-1}		1.788	-147.7 NbCl ₅		○	
						MO		8.185×10^{-1}	8.193×10^{-1}	1.788×10^{-3}	0.4824	-67.96	22	○	
						TC		2.167×10^{-1}	2.211×10^{-3}	4.824×10^{-3}	1.746	-46.02	23	○	
						RU		8.082×10^{-1}	8.002×10^{-3}	1.746×10^{-3}	0.5217			○	
	○					RH		2.460×10^{-1}	2.391×10^{-3}	5.217×10^{-3}	1.358			○	
	○					PD		6.624×10^{-1}	6.226×10^{-3}	1.358×10^{-3}	0.146	-86.43	21	○	
	○					AG		7.222×10^{-3}	6.693×10^{-1}	1.460×10^{-3}	0.1087	-136.30	20	○	
						CD		5.601×10^{-1}	4.983×10^{-1}	1.087×10^{-3}	0.0071			○	
						IN		3.761×10^{-3}	3.276×10^{-3}	7.135×10^{-3}	0.0081				
						SN		4.432×10^{-3}	3.737×10^{-3}	8.139×10^{-3}					
						SB		1.459×10^{-3}	1.200×10^{-1}	2.618×10^{-1}	0.0262				
						TE		1.627×10^{-1}	1.275×10^{-3}	2.782×10^{-1}	0.2782	-74.0 ※	○		
						I		9.348×10^{-3}	7.366×10^{-1}	1.607×10^{-3}	0.1607				
						XE		1.211×10^0	9.223×10^{-1}	2.012×10^{-3}	2.012				
	●					CS		1.025×10^0	7.713×10^{-3}	1.683×10^{-3}	1.683	-366.65	2 ○		
		△				BA		3.698×10^{-1}	2.693×10^{-3}	5.876×10^{-3}	0.5876	-367.66	1 ○		
						LA		3.113×10^{-1}	2.241×10^{-3}	4.890×10^{-3}	0.489	-293.62	6 ○		
						CE		5.900×10^{-1}	4.211×10^{-3}	9.188×10^{-3}	0.919	-287.37	8 ○		
						PR		2.896×10^{-1}	2.055×10^{-3}	4.484×10^{-3}	0.4484	-288.89	7 ○		
						ND		9.136×10^{-1}	6.336×10^{-1}	1.383×10^{-1}	1.383	-281.45	9 ○		
						PM		5.049×10^{-3}	3.482×10^{-1}	7.598×10^{-1}	0.076				
						SM		2.597×10^{-1}	1.727×10^{-3}	3.768×10^{-3}	0.3768	-278.10 SmCl ₃ , -345.91 SmCl ₂	5 ○		
						EU		3.475×10^{-1}	2.288×10^{-1}	4.922×10^{-1}	0.0499	-245.39	11 ○		
						GD		2.827×10^{-1}	1.798×10^{-1}	3.923×10^{-1}	0.0392	-273.20	10 ○		
						TB		2.439×10^{-3}	1.535×10^{-3}						
						DY		1.743×10^{-3}	1.073×10^{-3}						
						HO		4.767×10^{-3}							
						ER		6.029×10^{-3}							
						小計	$\sum 4 = 0.0$	$\sum 4 = 5.359 \times 10^1$	$\sum 4 = 3.874 \times 10^{-1}$	$\sum 4 = 8.529 \times 10^{-1}$					
						総計	$\sum 1+2+3+4 = 100(g)$	$\sum 1+2+3+4 = 99.72 (g)$	$\sum 1+2+3+4 = 0.4583 \text{モル}$	$\sum 1+2+3+4 = 1.000g$	100%				

熱力学的諸量		標準生成自由エネルギー			
材 料	標準状態における酸化物 (800K)				
酸化物	ΔG_f° (kJ/mol-O)	酸化物	ΔG_f° (kJ/mol-O)	酸化物	ΔG_f° (kJ/mol-O)
PdO	-6.38	GeO2	-212.47	NpO2	-444.53
Rh2O3	-45.13	Fe3O4	-213.02	PuO2	-450.11
PbO2	-58.80	MoO2	-221.11	CeO2	-459.84
RbO2	-80.17	WO2	-221.28	TiO	-464.31
RuO2	-83.63	Rb2O	-231.00	Eu2O3	-469.69
CuO	-84.56	Li2O2	-231.96	BaO	-472.09
CsO2	-87.25	Cs2O	-239.64	UO2	-473.03
TeO2	-88.08	V2O5	-240.81	ZrO2	-473.67
PO(g)	-89.25	BaO2	-248.42	Al2O3	-474.96
Pb2O3	-108.69	K2O	-249.51	PuO1.61	-475.04
Cu2O	-117.89	Mn2O3	-250.44	Pu2O3	-482.87
Bi2O3	-129.72	ZnO	-267.58	EuO	-490.02
ReO3	-138.59	Ga2O3	-276.32	CeO1.714	-491.30
PnO	-143.70	Mn3O4	-277.39	PuO	-492.71
Co3O4	-144.14	Na2O	-303.82	Li2O	-493.03
TcO2	-147.52	Cr2O3	-308.62	Am2O3	-497.17
Rb2O2	-147.83	Nb2O5	-309.32	HfO2	-498.03
ReO2	-153.97	NbO2	-324.56	SrO	-509.95
Cs2O2	-166.58	MnO	-326.04	MbO	-515.41
NiO	-168.66	NbO	-333.99	Ce2O3	-518.14
Na2O2	-177.36	V2O3	-336.26	La2O3	-521.10
CoO	-177.83	Ta2O5	-338.02	Nd2O3	-526.57
CdO	-180.68	UO3	-338.89	Sm2O3	-529.96
MoO3	-182.55	B2O3	-347.18	BeO	-530.93
CO(g)	-197.62	VO	-355.56	Gd2O3	-532.04
SnO	-202.51	U3O8	-380.02	CaO	-553.03
Fe2O3	-203.40	SiO2	-382.83	Y2O3	-557.33
P2O3(g)	-205.52	AmO2	-391.17		
SnO2	-205.53	TiO2	-399.07		
FeO	-212.03	U4O9	-433.50		

引用文献 日本熱測定学会、熱力学データベースMALT-2

燃料成分を金属に還元
希土類元素の分離が可能

Li還元の原理：



酸化物の標準生成自由エネルギーと温度の関係

熱力学的諸量		標準生成自由エネルギー			
材 料		標準状態における塩化物 (773 K)			
塩化物	態	ΔG_f° (kJ/mol-Cl)	塩化物	態	ΔG_f° (kJ/mol-Cl)
TcCl ₂	s	-46.02	MgCl ₂	s	-258.33
ZrCl ₃	s	-67.22	PuCl ₃	s	-261.41
MoCl ₃	s	-67.96	TmCl ₃	s	-263.15
WCl ₂	s	-81.89	CmCl ₃	s	-264.99
AgCl	l	-86.43	DyCl ₃	s	-265.92
NiCl ₂	s	-94.25	AmCl ₃	s	-266.38
HCl	g	-99.26	ErCl ₃	s	-269.02
FeCl ₂	s	-124.36	HoCl ₃	s	-269.09
VCl ₃	s	-135.37	YCl ₃	s	-272.50
CdCl ₂	s	-136.30	GdCl ₃	s	-273.02
CrCl ₂	s	-148.58	SmCl ₃	s	-278.10
ZnCl ₂	s	-150.93	NdCl ₃	s	-281.45
UCl ₅	s	-159.21	CeCl ₃	s	-287.37
VCl ₂	s	-168.08	PrCl ₃	s	-288.89
MnCl ₂	s	-189.36	LaCl ₃	s	-293.62
NpCl ₄	s	-189.76	CaCl ₂	s	-337.82
BeCl ₂	s	-190.18	NaCl	s	-339.58
ZrCl ₂	s	-194.18	YbCl ₂	s	-343.71
ZrCl ₄	g	-195.28	LiCl	s	-345.27
UCl ₄	s	-198.75	SmCl ₂	s	-345.91
UCl ₃	s	-232.35	SrCl ₂	s	-353.75
NpCl ₃	s	-242.91	RbCl	s	-361.76
EuCl ₃	s	-245.39	KCl	s	-363.76
ScCl ₃	s	-247.65	CsCl	s	-366.65
YbCl ₃	s	-257.77	BaCl ₂	s	-367.56

引用文献
日本熱測定学会、熱力学データベースMALT-2

A G Sによる照射済燃料の乾式分離、抽出工程中の元素分析に関する検討

1996.2

乾式再処理の行程中における元素分析手法について検討した。検討内容について以下に箇条書きで示す。

○分析手法

元素の定量、定性分析手法を示す。

- | | |
|------------------|------------------|
| 1) U,Pu,Np,Am,Cm | 質量分析、放射線計測 |
| 2) アルカリ金属 | 原子吸光分析、ICP発光分光分析 |
| 3) アルカリ金属以外の金属 | ICP発光分光分析 |
| 4) ガス成分 | ガスクロマトグラフィー、ガスマス |
| 5) ハロゲン元素 | イオンクロマトグラフィー |

また、元素の構造分析手法を以下に示す。

- | | |
|---------|-------------|
| 6) 構造分析 | X線回折、蛍光X線回折 |
|---------|-------------|

さらに表面分析法を以下に示す。表面分析では定量が困難であるが、元素の分布状態を測定することができる。

- | | |
|---------|------|
| 7) 表面分析 | EPMA |
|---------|------|

○分析機器の分析最小試料量

分析機器の最小試料量（メタル）を表1に示す。ガスクロマトグラフィー、X線回折以外は、分析に際して試料を硝酸溶液で溶解する等の前処理が必要である。溶解はセル内で行なうため、遠隔操作性を考慮すると少なくとも0.1~1gが必要である。また、X線回折もセル内で遠隔操作により測定するため試料は1g以上必要である。

○各分析機器の分析法の概略

分析機器の分析手順の概要ををまとめて図1に示す。また各分析機器の分析手順を以下に示す。

1) 質量分析

試料を硝酸で溶解した後、陰イオン交換分離法により元素毎に分離する。その後試料を質量分析用フィラメントに焼き付け、真空中で試料をイオン化し、その同位体比を分析する。スパイク溶液を添加することで定量分析を行なうことができる。

2) 放射線計測

試料を硝酸で溶解した後、陰イオン交換分離法等により元素毎に分離する。その後試料を焼き付けた試料皿を半導体検出器に組み込み、試料から放出される放射線エネルギーを分析する。

3) 原子吸光分析

試料をバーナー等の熱源で解離させて原子化して原子蒸気を作る。これに適当な波長の光を透過させると、基底状態にある原子の原子数に応じて吸光がおこる。この吸光量から試料濃度を求める。

4) ICP発光分光分析

測定する試料を溶液化し、これをICP部へ導入してアルゴンプラズマにより各元素を励起させる。励起された原子がエネルギーの低い状態へ遷移する時に各元素固有の波長を持った光を放出する。この光を分光分析する。

5) ガスクロマトグラフィー

試料を真空中で加熱し試料中に含まれるガス成分を抽出する。抽出されたガス成分をキャリアーガスによりガスクロマトグラフィーに導入する。ガスクロマトグラフィーに設けられたカラム内で分離されたガス成分を分析する。

6) ガスマス

各ガス成分をカラムを通して分離しイオン化した後、質量分析部へ挿入する。質量分析部では各元素の質量数と量を測定する。

7) イオンクロマトグラフィー

目的成分を溶液化させ、そのイオンをイオンクロマトにより分離する。目的成分によりカラムを選択し、各イオンの吸着性の相違により分離し、溶離液をディテクターへ輸送し濃度を検出する。

8) X線回折

元素分析の結果から未知試料に含まれる各化合物の構造を推定した後、未知試料のX線回折図と、推定物質のJCPDS Powder Diffraction File (通称ASTMカード) と照合して構造を決定する。

9) 蛍光X線回折

サンプリング管内壁に沈着した未知試料にX線を照射し、二次的に発生してくる蛍光X線を測定する。得られた蛍光X線の波長を解析する事で試料を構成する元素の同定ができ(定性)、また試料より発生する蛍光X線の強度は各元素の含有量に依存することから、その強度を測定して含有元素の量がわかる(定量)。

10) EPMA (電子プローブX線マイクロアナライザ)

電子線を物質の表面に照射し、電子と物質との相互作用により発生する特性X線を検出する。検出した特性X線の波長またはエネルギーを測定し、元素を決定する。

○AGSの分析条件と問題点

AGSで所有している分析機器は、質量分析、放射線計測、X線回折である。そこでこの三種類の分析機器で分析を行う際の問題点を以下に示す。

1) 質量分析

質量分析ではこれまでにU,Puを測定してきた実績がある。またNp,Am,Cmは試験的に標準試料を分析した経験がある。現在、照射済燃料中のNp,Am,Cmを分析するための前処理操作を含め分析技術開発を行っている。

Npの同位体では²³⁷Np以外に安定な同位体がない。質量分析は同位体比により定量を行なうので、有用な同位体がないNpの定量は困難である。

2) 放射線計測

放射線計測ではこれまでにU,Pu,Np,Am,Cmの分析を行なってきた。このうちU,Pu,Npは定量分析も可能である。Am,Cmの定量分析は今後の技術化開発課題であり、現在はAm,Cmのうち一部の核種 (²⁴¹Am) のみ定量が可能である。

放射性核種であるFP,REは放射線分析により分析可能である。しかし、FPとREは半減期が短いものが多いため線量が高くなり、前処理操作時に作業者の被ばく量が増大する。そのため、被ばく対策と分析技術開発を行なう必要がある。

3) X線回折

現在AGSのX線回折装置が設置されているセルはair雰囲気であるため、搬入された試料はその化学形態が変化する可能性がある。そこで金属、カドミウム化合物、塩化物の構造解析のためには、セル内の雰囲気を制御できるように改造を行なう必要がある。

元素の構造解析は、取得したスペクトルと文献データを比較し同定する。文献には金属、酸化物のデータは整備されているが、カドミウム化合物、塩化物のデータは整備されていない。そのため、分析に際しては標準試料を用いてデータ取得から着手しなければならない。

金属相の分析は析出の状況により困難な場合がある。複雑な合金系だと文献データと比較しても同定できない場合がある。

次に今後導入計画がある機器は、ICP発光分光分析、ガスクロマトグラフィー、イオンクロマトグラフィー、EPMAである。これらの機器を用いた分析が可能であるが、分析に着手するためには技術開発より行う必要がある。

最後に現在導入計画のない機器は、原子吸光分析、蛍光X線回折である。そのため、これらの機器を用いた分析を行うためには分析機器の導入から始めなければならない。

○燃料溶解に関する注意点

AGSでは金属及び酸化物燃料の溶解経験はあるが、カドミウム化合物、塩化物の溶解経験がない。そのため、カドミウム化合物、塩化物を溶解するためのモックアップ試験が必要である。

また、アルカリ金属が多量に含まれた溶液中の元素分析を行なうためには、溶液中からアルカリ金属を除去する必要がある。そのためアルカリ金属の除去法を調査、研究する必要がある。

試料はセル内で遠隔操作により溶解するため、遠隔操作性を考慮して試料重量で1gは必要である。

表1 元素分析法

分析方法	分析元素	検出限界(μg) ^{*1}	最小試料重量(g) ^{*3}	分析精度(%) ^{*4}
質量分析	U	2	0.1~1	0.03
	Pu	2		0.03
	Np	2		0.03
	Am	2		0.03
	Cm	2		0.03
	Nd	0.2		0.0015

分析方法	分析元素	検出限界(μg) ^{*1}	最小試料重量(g) ^{*3}	分析精度(%) ^{*5}
放射線計測	U	10	0.1~1	10
	Pu	1		10
	Np	1		10
	Am	1		10
	Cm	1		10
	Co	10		10
	Sb	10		10
	Cs	10		10
	Ce	10		10
	Eu	10		10

分析法	分析元素	検出限界(ml) ^{*1}	検出限界濃度(mg/l) ^{*2}	最小試料重量(g) ^{*3}	分析精度 ^{*5}
吸光度分析	Na	数ml	0.035	0.1~1	
	Rb		0.110		
	Cs		0.130		
	Li		0.010		

分析法	分析元素	検出限界(ml) ^{*1}	検出限界濃度(mg/l) ^{*2}	最小試料重量(g) ^{*3}	分析精度 ^{*5}
ICP発光分析	Ba	数10ml	0.001	0.1~1	
	Sr		0.002		
	Fe		0.005		
	Zr		0.012		
	Mo		0.189		
	Ru		0.160		
	Y		0.006		
	La		0.072		
	Ce		0.098		
	Pr		0.099		
	Nd		0.147		
	Sm		0.188		

- *1 検出限界 : 各分析機器で測定可能な最小量
- *2 検出限界濃度 : 溶媒で希釈された試料を分析する場合、分析可能な濃度の最小値
- *3 最小試料重量 : 前処理等の操作を考えた場合必要な最小量。ただし単体ではなく、混合物として必要な量
- *4 分析精度 : 分析機器が有する精度（カタログ値）。同位体の中で存在量の少ないものは、さらに分析精度が悪くなる。また、前処理やサンプリングを行うため実際の定量精度は悪くなる。
- *5 分析精度 : 分析機器が有する精度。分析に際しては、前処理やサンプリングを行うため、実際の定量精度は悪くなる。

表1 元素分析法

分析手法	分析元素	*6 検出限界(μ l)	*2 検出限界濃度(ppm)	*3 最小試料重量(g)	*5 分析精度(%)
ガスクロマトグラフィー	H2	10	1	0.1~1	
	N2		0.4		
	O2		0.3		
	CH4		1		
	CO		1		
	CO2		1		
	C2H6		1		

分析精度	分析元素	*1 検出限界(g)	*2 検出限界濃度(ppm)	*6 最小試料重量(g)	*5 分析精度
イオンクロマトグラフィー	Cl		25	0.1~1	
	F		25		

分析手法	分析元素	*1 検出限界(g)	*3 最小試料重量(g)	*5 分析精度(%)
X線回折	ほぼ全ての元素	1	1	

- *1 検出限界 : 各分析機器で測定可能な最小量
- *2 検出限界濃度 : 溶媒で希釈された試料を分析する場合、分析可能な濃度の最小値
- *3 最小試料重量 : 前処理等の操作を考えた場合必要な最小量。ただし単体ではなく、混合物として必要な量
- *5 分析精度 : 分析機器が有する精度。分析に際しては、前処理やサンプリングを行うため、実際の定量精度はさらに悪くなる。
- *6 最小試料重量 : 本分析はキャリアーガス中のサンプル濃度を分析する。そのため、機器や配管の大きさによりサンプル濃度が変化するので、最小試料重量は使用する機器の仕様により異なる。

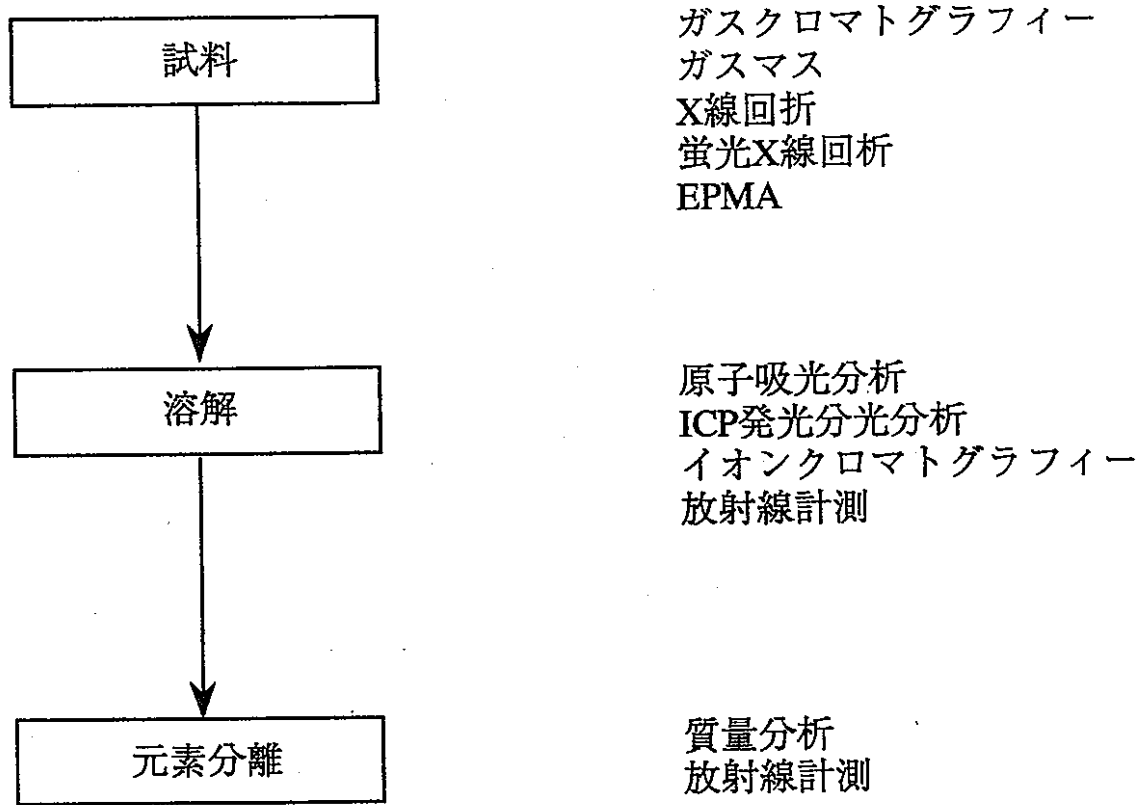


図1 分析機器の分析手順の概要