



物質収支評価コードの開発
Object指向型コードの開発と解析例（Ⅰ）
(研究報告)

2000年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

(2)

物質収支評価コードの開発 Object指向型コードの開発と解析例(Ⅰ) (研究報告)

岡村信生* 米澤重晃*

要旨

現在、FBR(Fast Breeder Reactor)の実用化を目指した研究開発が進められており、社会に受け入れられる核燃料サイクルを構築するために幅広い技術を対象に調査・研究が行われている。再処理に関しては、以前は使用済燃料からUとPuを効率よく取り出すことが課せられた唯一の課題であったが、現在、核燃料サイクルシステムを構築する上で再処理に求められる事項は多岐にわたり、それらの要求へ十分に答えていく必要に迫られている。

再処理技術の幅広い検討の一環として、LWR(Light Water Reactor)とは異なりFBRでは低除染の燃料が許容されることから湿式再処理のみではなく乾式再処理の研究が始まり、溶融塩や液体金属を用いた電解・抽出、元素間の蒸気圧差を利用した揮発・凝縮等の様々な手法を組み合わせたプロセスが提案されている。乾式再処理は湿式再処理ほど実証プラントの経験が多くないため、工学規模のプラントを考える上ではプロセスフロー等に未だ多くの検討余地がある。そこで乾式再処理システムの設計を行う上で最も基本となる物質収支を解析・評価する時には、工程の追加等の変更に対して柔軟に対応する必要がある。

本研究は、この要求を満たす乾式再処理の物質収支評価コードを開発することを目的としている。

*:大洗工学センター システム技術開発部 再処理システムグループ

**The Development of Mass Balance Estimation Code;
The Development and The Analyzed Example with Object Type Code(I)**

Nobuo Okamura*, Shigeaki Yonezawa*

Abstract

The study and the development to put FBR(Fast Breeder Reactor) to practical use have been doing. So many kinds of technologies are investigated to construct nuclear fuel recycle received to the society. The most important aim of reprocessing has been to extract U and Pu from spent fuels effectively, but, now, the demands for reprocessing are many kinds on nuclear fuel recycle system's construction. These need to be accepted sufficiently.

The system that consists of electrolysis, extraction, with molten salt and melting metal, volatilization and condensation using the difference of vapor pressure is suggested, because, differently from LWR(Light Water Reactor), FBR can use the low decontamination factor's fuel.

When the engineering scale plant is designed, the dry reprocessing has unsolved problems(ex. process flow) because of less demonstrative scale plants of the dry reprocessing than ones of the wet reprocessing. So the analysis and the estimation of mass balance that is most fundamental in the dry reprocessing system's design need to keep up with the system's alteration(to add new processes etc.) flexibly.

This study aim is to develop the mass balance estimation code of dry reprocessing that satisfies the demand mentioned above.

*:O-arai Engineering Center System Engineering Technology Division
Reprocessing System Engineering Group

目次

1.	はじめに.....	1
2.	評価コード開発の概要.....	2
2.1	開発ツールの選定.....	2
2.2	評価コードの概要.....	5
2.3	開発手順.....	6
3.	金属燃料乾式再処理の評価.....	8
3.1	ANL 法電解プロセス物質収支評価コード.....	9
3.1.1	計算方法.....	9
3.1.2	ANL 法電解プロセス物質収支評価コードの構成・機能.....	12
3.2	抽出工程評価コード.....	15
3.2.1	計算方法.....	15
3.2.2	抽出工程評価コードの構成・機能.....	15
3.3	ANL 法電解プロセス物質収支評価コードの計算結果と評価.....	17
3.3.1	計算条件.....	17
3.3.2	計算結果と評価.....	17
3.4	抽出工程評価コードの計算結果と評価.....	19
3.4.1	計算条件.....	19
3.4.2	計算結果と評価.....	20
4.	乾式再処理プロセス物質収支評価コード.....	23
4.1	乾式再処理プロセス物質収支評価コードの構成・機能.....	23
4.2	RIAR 法の評価モデル作成.....	25
4.3	乾式再処理プロセス物質収支評価コードを用いた計算と評価.....	27
4.3.1	計算条件.....	27
4.3.2	計算結果.....	30
5.	結論.....	32
5.1	結果.....	32
5.2	今後.....	32
	参考文献.....	34
	添付資料-1 各種コードマニュアル	
	添付資料-2 コードの構造	

図表リスト

図リスト

図 2-1 FORTRAN と Object 指向型ソフトの対比.....	4
図 2-2 評価コードの概要.....	5
図 2-3 上田らの開発した抽出コード.....	6
図 2-4 開発ステップ.....	7
図 3-1 乾式再処理・燃料製造システム(ANL 法).....	8
図 3-2 ANL 法電解プロセス.....	8
図 3-3 ANL 法電解プロセスのキャンペーンの概念.....	9
図 3-4 電解槽モデル.....	10
図 3-5 ANL 法電解プロセス物質収支評価コード.....	14
図 3-6 TRU 抽出工程.....	15
図 3-7 抽出工程評価コード.....	16
図 3-8 システム内のインベントリー変化.....	17
図 3-9 電解による回収量.....	18
図 3-10 インベントリー変化.....	18
図 3-11 抽出段数と回収率の関係.....	20
図 3-12 抽出段数と回収率の関係.....	20
図 3-13 還元剤濃度と回収率の関係.....	21
図 3-14 Cd と溶融塩のモル比と回収率の関係.....	21
図 3-15 回収率と廃棄物溶融塩中の U モル数の関係.....	22
図 4-1 RIAR 法再処理プロセスフロー.....	26
図 4-2 乾式再処理プロセス物質収支評価コードの例(RIAR 法).....	26
図 4-3 ケース A) のプロセスフロー.....	28
図 4-4 ケース B)、C) のプロセスフロー.....	28
図 4-5 ケース A) のコード.....	29
図 4-6 ケース B)、C) のコード.....	29
図 4-7 バッチ毎の Pu 回収量.....	30

表リスト

表 2-1 名称と対象の対応.....	7
表 3-1 SF_M : 元素 M の分離係数.....	11
表 3-2 電解工程での分岐率.....	12
表 3-3 ANL 法電解プロセス物質収支評価コードの構成ブロックと機能.....	12
表 3-4 抽出工程評価コードの構成ブロックと機能.....	16
表 3-5 電解プロセスの計算条件.....	17
表 3-6 抽出の計算条件.....	19
表 4-1 乾式再処理プロセス物質収支評価コードの構成ブロックと機能.....	24
表 4-2 RIAR における試験結果.....	27
表 4-3 各工程の回収物への分岐率.....	27
表 4-4 1 キャンペーン当たりの平均 Pu 回収率.....	30

1. はじめに

現在、検討が行われている FBR(Fast Breeder Reactor)再処理は、FBR の特性から LWR(Light Water Reactor)再処理とは異なり低除染の再処理システムを許容する。そのため、湿式再処理のみではなく、溶融塩や液体金属を用いた電解・抽出、元素間の蒸気圧差を利用した揮発・凝縮等の様々な手法を組み合わせた乾式再処理も FBR 再処理のシステム候補として検討されている。しかし、湿式再処理と比較して乾式再処理は各工程での元素挙動が十分に把握されている訳ではないため、検討されているシステムにおいて工程の追加等の変更が行われる余地が大きい。乾式再処理プロセスの検討を行うためには、その検討の基本となるシステムの物質収支を十分に把握しておく必要がある。そこで、上述の工程等の変更に対して柔軟に対応し、システムの物質収支評価を可能にする乾式再処理物質収支評価コードの開発を本研究の目的とした。

本研究では、これまで使用される機会の多かった FORTRAN 等のプログラム言語を用いて作成された評価コードではこの様な設計要求を満たすことは困難であるため、Object 指向型ソフトを用いた新しい体系のコード開発に着手した。

今年度、作成した評価コードは以下の通りである。

- 工程単位の物質収支評価
 - ①抽出工程評価コード
- 再処理プロセスの物質収支評価
 - ②ANL(Argonne National Laboratory)法電解プロセス物質収支評価コード
 - ③乾式再処理プロセス物質収支評価コード

①は抽出工程内における機器の組み換えに対して、柔軟に対応できるように開発した。②は ANL 法の電解プロセス部分に特化したコードであるため適用範囲が限られているが、③は ANL 法のみではなく RIAR(Russian Institute of Atomic Reactor)法、フッ化物揮発法等の様々な乾式再処理プロセスに適応が可能となるように、各工程内の物流を全て分岐率を用いて表現することによって簡略化を図り汎用性をもたせたコードである。③では使用済燃料の受入、集合体解体、脱被覆等の再処理における全プロセスを一括して評価することが可能である。

2. 評価コード開発の概要

2.1 開発ツールの選定

今回開発を行った乾式再処理プロセスの物質収支評価コードに求められる機能の概略を以下に纏めた。

- 機能①: プロセスフローの特性を評価するに際して、最も基本的な情報である各工程における元素、プロセス添加物等の物質の流れを明らかにすること。
- 機能②: 乾式再処理のプロセスフローは固定されているものではないため、システム構築が自由で、工程の組み替えや新たに考案された工程の追加等に対して容易かつ迅速に対応できること。

従来型の FORTRAN 等のプログラム言語を用いて作成された評価コードでは、機能①に対しては十分な対応が可能である。然し、予め定められた仕様の範囲内で解析を実施するため変更が可能であるのは初期条件の数値データ等に限定され、ここで要求されるような機能②については、大幅にソースを変更する必要が生じるため対応が困難である。そこで、工程の変更等に対して柔軟に対応できる乾式再処理の物質収支評価を行うコードを作成するに際して、Object 指向型ソフトを利用することにした。Object 指向型ソフトの概要について以下で述べる。

先ず、Object 指向型ソフトの特徴を簡単に纏めると以下のようになる。

- ブロック(要素プログラム)が互いに独立性を保つようプログラミングできる。
- ブロック単体またはブロックの固まりがスタンドアローンで動く。
- ブロックが互いに独立性を保ちながら、相互連携が可能である。

ここからは乾式再処理を例に Object 指向型ソフトを使用することにおける利点について、FORTRAN 等のプログラム言語と比較を行いながら説明する(図 2-1)。

FORTRAN 等のプログラム言語ではある事象について解析を行うときには、その一連の作業を初期値の入力、計算条件、実際の計算／処理等と細分化して各作業毎にサブルーチンを作成する。乾式再処理では、初期値の入直は使用済燃料の受入量とその組成、計算条件は各工程での運転条件等、実際の計算／処理は電解、抽出等に相当する。最後に、複数のサブルーチンを管理するメインルーチンを作成して、コンパイルを行い実行形式に変換する。このメインルーチンで工程の順序等を指定する。よって初期条件の変更以上のこと、即ち、計算／処理工程の順序の入れ換えや追加が生じたときにはメインルーチンを書き換え再度、コンパイルを行う必要がある。

Object 指向型ソフトでは、サブルーチンに相当するものとしてブロックと呼ばれるものがある。このブロックはプログラム言語のようにテキストで表示されるものでは

なく、アイコンのような図形で表示されるものである。ユーザはこのブロックを順に並べて接続線で結線するだけで、容易に作図感覚で評価対象となるシステムのモデルを作成することができる。乾式再処理を例にとると、使用済燃料ブロック、脱被覆ブロック、溶融塩溶解ブロック、U の電解ブロック、Pu の電解ブロック、塩精製ブロックと順に並べて、隣同士のブロックを接続線で結べばよい。プロセスの変更により U の電解工程がなくなったときには、U の電解ブロックを消去し、溶融塩溶解ブロックと Pu の電解ブロックを直接結線するだけでそれ以上の作業は要求されない。データの受渡については全て接続線を通して行われることも、上述のプログラム言語と比較して大きな利点である。

プログラム言語に FORTRAN、C 等と種類があるように Object 指向型ソフトにも様々なものがあるが、本研究では EX・TD*と呼ばれるものを選定した。EX・TD は特定の分野に特化しているものではないため乾式再処理の諸工程に対応したブロックを自作する必要性は大きくなるが、筆者らは Object 指向型ソフトを初めて使用することもあり扱い易さを優先させた。

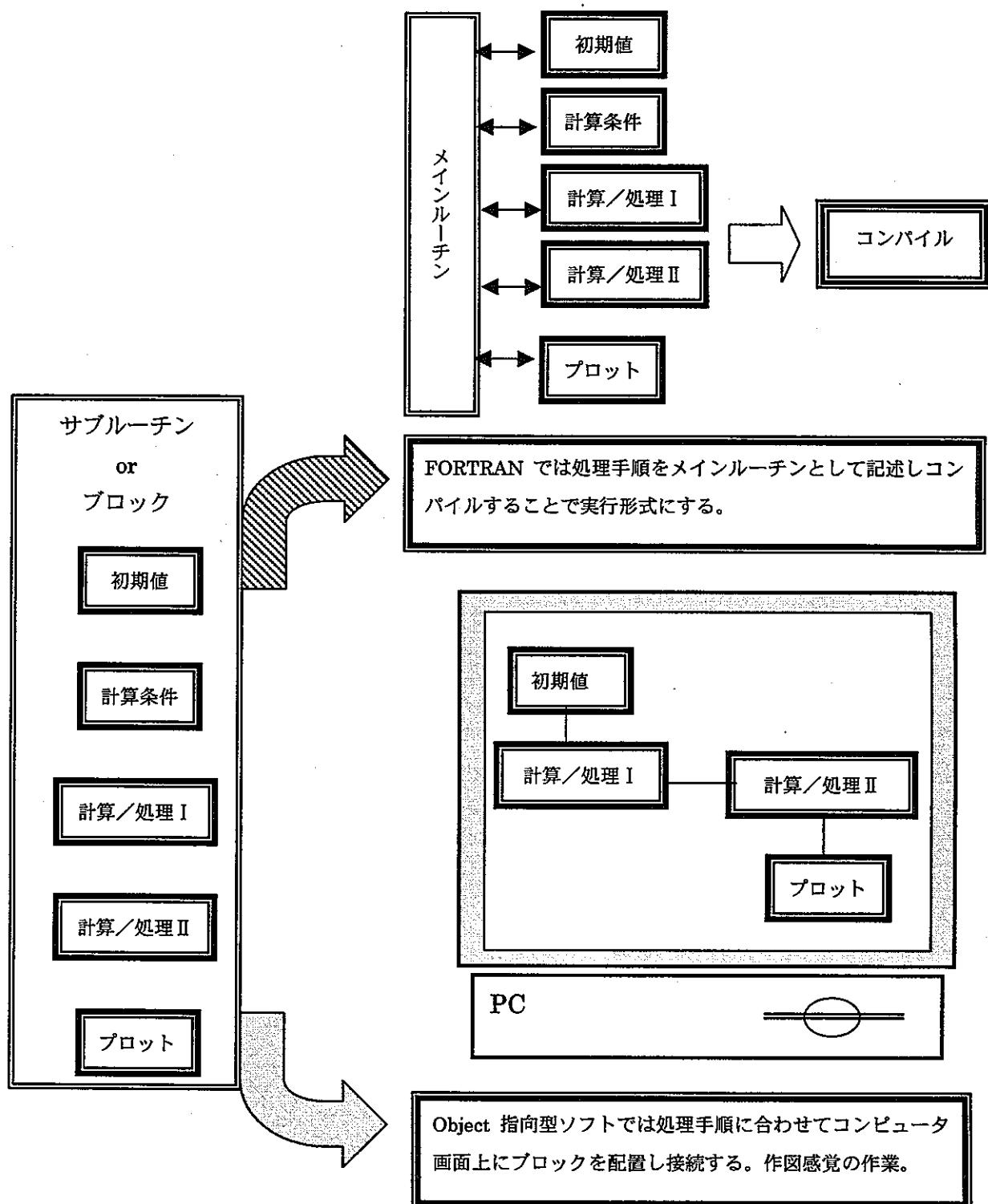


図 2-1 FORTRAN と Object 指向型ソフトの対比

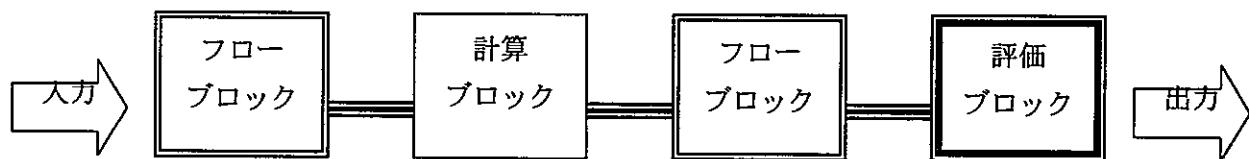
2.2 評価コードの概要

本研究で Object 指向型ソフトを用いて開発したコードは、大きく 2 種類に分けることができる。

I) 再処理プロセスの物質収支評価

II) 工程単位の物質収支評価

I)についてはこれまでにも説明してきたように、工程の順序等の変化に対応して柔軟に乾式再処理全体の物質収支の評価を行うものである。物質収支評価コードを構成するブロックは大きく 3 つのグループに分けられる(図 2-2)。



- A) 計算ブロック；溶媒抽出における各相間の平衡状態を分配係数に基づいて求め
る、あるいは各元素の蒸気圧に基づき凝縮・揮発量を求める等
の、乾式再処理に関する様々な諸工程の計算を行うブロック。
- B) フロー ブロック；工程間や機器内部における物質の受け渡しを制御する機能を
有するブロック。
- C) 評価ブロック；物質収支を元に、放射能や崩壊熱等の評価を行うブロック。

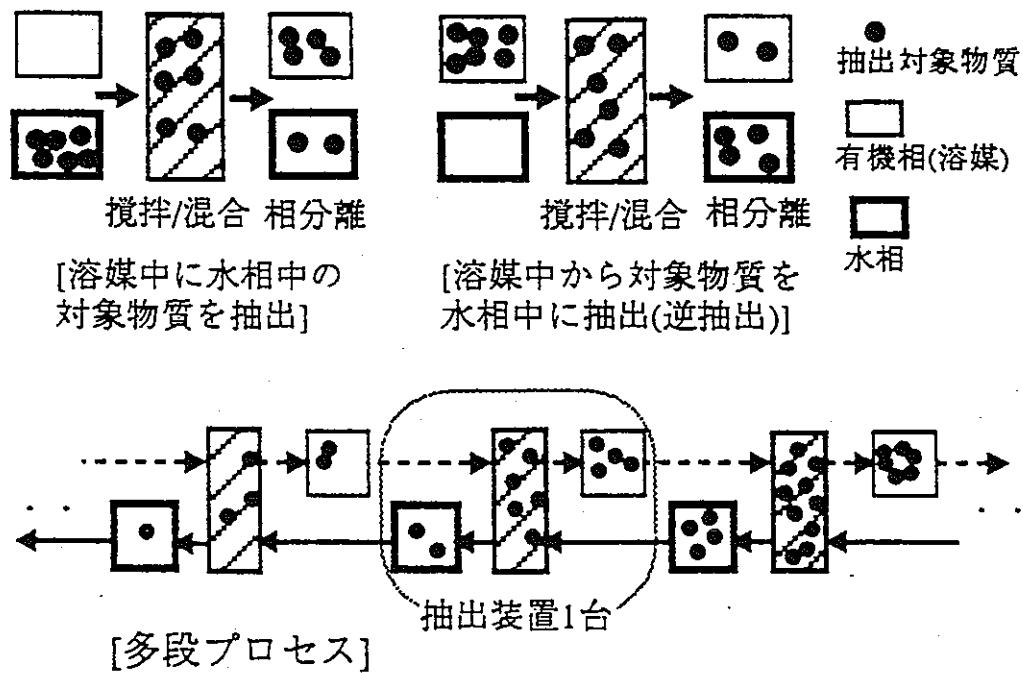
図 2-2 評価コードの概要

各ブロックの設計にあたっては少ない種類のブロックの組み合わせにより多種多様な対象の構築が可能となるように、できる限り汎用性を考慮しておくことが望ましい。

II)については解析対象を乾式再処理全体ではなく、各工程まで細分化したものである。今回は ANL 法の TRU 抽出工程について評価コードを作成した。解析の目的は、抽出器の段数や抽出で使用される Cd 量への TRU 抽出率の依存性を調べることである。Object 指向型ソフトの TRU 抽出工程への適用メリットは、TRU 抽出器の増減を I)で説明した工程等の変更のように容易に行える点である。工程中の使用機器の組み合わせ検討にも、Object 指向型ソフトは有効である。

EX・TD ではない別の Object 指向型ソフトを用いたものではあるが、上田ら^[2]の作成した湿式再処理における抽出プロセス計算コードを II)の使用例として示す。但しこの例は、元素の物流のみならず機器の運転状態も把握できるように作成されているため今回筆者らが作成した評価コードとは少し目的が異なるものであるが、Object 指向型ソフトの可能性を示すものとしてあえて取り上げた。上田らは抽出器を平衡濃度計算、物質収支計算、相分離、配管、分流、合流のブロックに分解し、これらのブロックを組み合わせることで抽出器を構成し(図 2-3)、さらに抽出器を何段もつなぐことで抽出工程を構成している。このような設計では、配管、分流、合流といったブ

ロックは、再処理工程における他の機器に対しても適用が可能である。その結果、他の機器についてのシミュレーションコードを開発する際の時間、労力が大幅に低減される。

図 2-3 上田らの開発した抽出コード^[2]

2.3 開発手順

従来のコード開発では完成後の変更には非常に多くの労力を要するため、予め解析対象や範囲を十分に検討しておかなければならなかった。本研究の様に Object 指向型ソフトを用いたコード開発では、プロセスフロー自体の変更も新しい工程の作成・追加も容易に行うことができるので、初めから詳細な計画を立てる必要がない。

しかし、Object 指向型ソフトはシステム構築の自由度が高い反面、複雑な構造を持たせると計算に要する時間が急速に長くなるという問題点も持ち合わせている。そのためシステムの構成要素である各工程では、成るべく物理現象を単純化して取り扱う必要がある。この点を考慮して、詳細な工程モデルと再処理プロセスモデルの開発を互いに調整できるように開発ステップを設定した(図 2-4)。

1)評価コードの原型の作成

- ①各工程における物質収支を求めるためのモデル作成。
- ②任意の再処理プロセスを構築するためのモデル作成。

2)①の②への組み込み。

3)③評価ブロック作成と②への組み込み。

4)モデルの詳細化

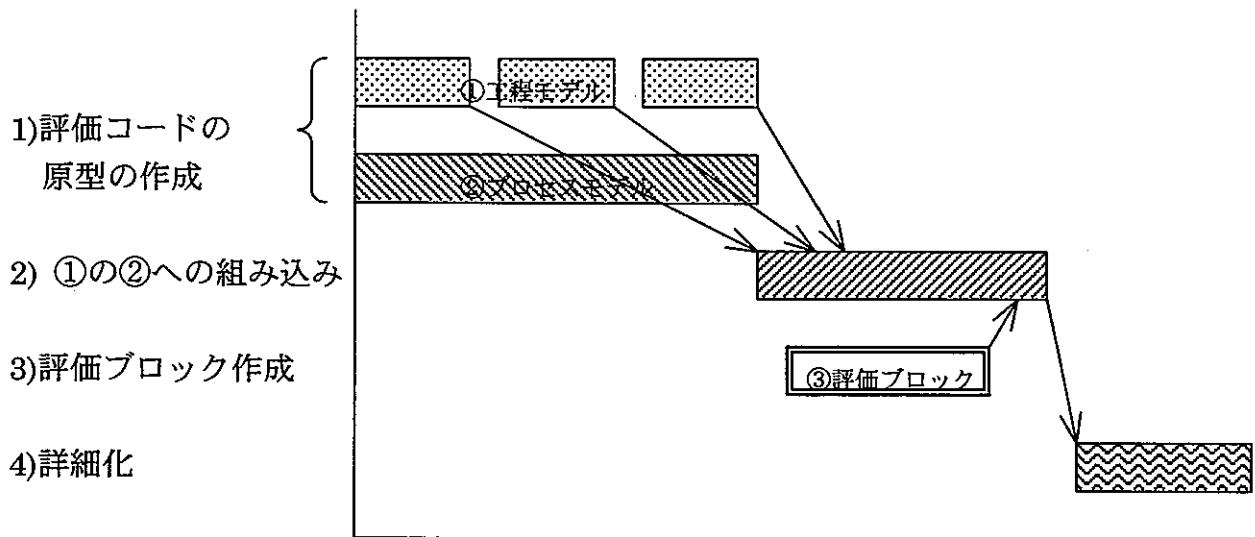


図 2-4 開発ステップ

本年度は、工程の物質収支評価コード(『抽出工程評価コード』; ①に該当)、及び乾式再処理プロセスの物質収支計算コード(『ANL 法電解プロセス物質収支評価コード』、『乾式再処理プロセス物質収支評価コード』; ②に該当)を作成した。開発ステップと対比させると、現在は評価コードの原型の作成段階である。②では濃度平衡など部分的には物理現象に基づいた計算を行うが、多くの工程は、元素毎に実験値などから得られた知見を基に設定した分岐率を入力することにより物質収支計算を行うようになっている。以下の表に、今回作成した種々のブロックや評価コードについて纏めておく。

表 2-1 名称と対象の対応

分類(対象)	名称
コード	・『ANL 法電解プロセス物質収支評価コード』 ・『乾式再処理プロセス物質収支評価コード』
	・『抽出工程評価コード』
ユニット；コードを構成する最小単位。ユニットは実際の装置に対応するパートがある場合の名称。	・抽出器ユニット ・接続配管ユニット ・U 電解槽ユニット等
ブロック；コードを構成する最小単位。ブロックは実際の装置に対応するパートがない場合の名称。	・入力ブロック ・出力ブロック ・reader ブロック等

3. 金属燃料乾式再処理の評価

米国アルゴンヌ国立研究所(Argonne National Laboratory)は IFR(Integral Fast Reactor)計画において金属燃料高速増殖炉サイクルの開発を進め、高温冶金法を用いた乾式再処理プロセスを提案した。ANL では様々な方法が検討されたが、今回著者は溶融塩電解を基本とする方法について物質収支評価コードを開発することにした。図 3-1 にシステムの全体を示すが今回対象としたのは、電解プロセス及び TRU 抽出工程である。両者の相違点は、TRU 抽出工程が単一工程であることに対して電解プロセスは複数の工程で構成されているというところである。

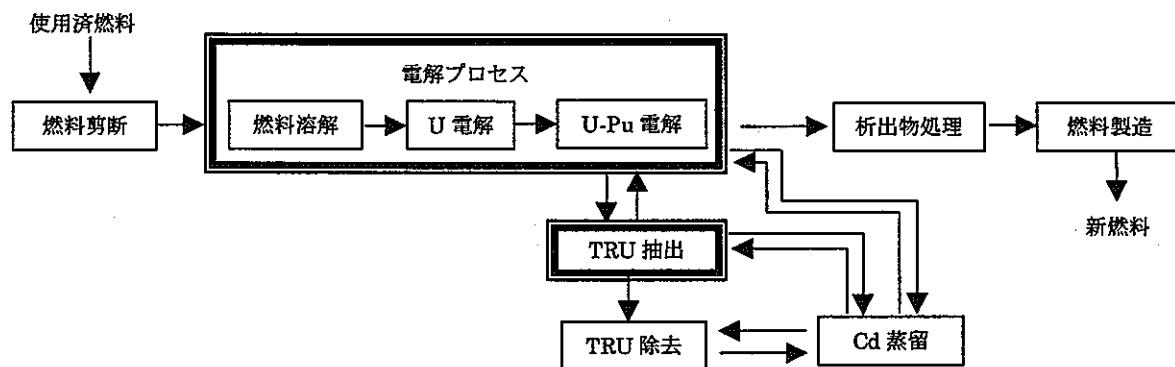


図 3-1 乾式再処理・燃料製造のシステム(ANL 法)

ANL で提案された乾式再処理・燃料製造システムでは、使用済燃料は剪断された後、電解プロセスに送られる。電解プロセスでは溶融 Cd 中で使用済燃料を溶解し、溶解度の差を利用して脱被覆と貴金属 FP の分離が同時に行われる。溶解した元素の内 TRU 元素や RE は塩化物生成自由エネルギーが Cd よりも大きいため、塩化物として溶融塩中に移行する(図 3-2①)。次に U 電解工程で、溶融 Cd を陽極として固体陰極上に U を選択的に電解析出させて回収する(図 3-2②)。次の U-Pu 電解工程では溶融塩中に溶融 Cd を入れたセラミックルツボを置き、これを陰極として U と Pu を同時に電解析出させて回収する(図 3-2③)。電解析出物は燃料に加工される。

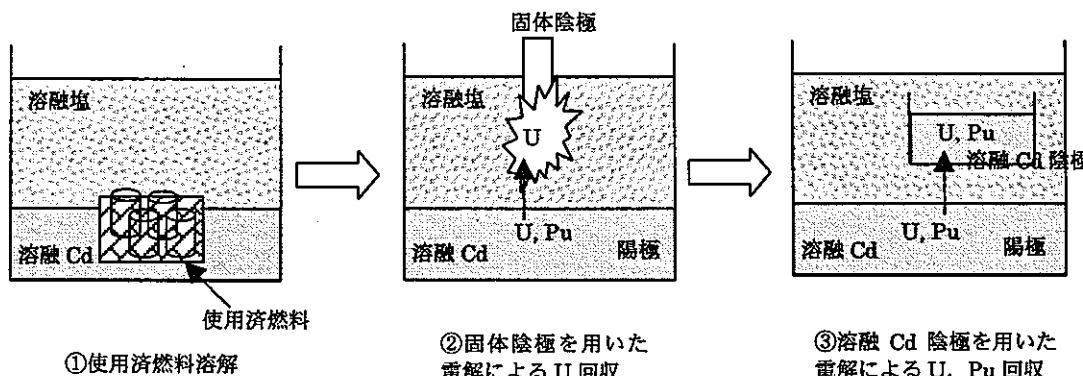


図 3-2 ANL 法電解プロセス

以上の操作を繰り返し行った後、溶融塩は TRU 抽出工程に送られ、溶融 Cd を用いた溶媒抽出により溶融塩中に蓄積した Am や Cm を回収する。溶融 Cd は蒸留により不純物を除去する。

3.1 ANL 法電解プロセス物質収支評価コード

電解プロセスでは燃料溶解→U 電解→U-Pu 電解を 1 バッチとして繰り返すが、初期のバッチでは溶融塩中の U や Pu 濃度が低く、濃度分極を起こさないようにするためにこれらの回収は行われない。使用済燃料の溶解を繰り返し溶融塩中の U あるいは Pu 濃度が十分に高くなつたバッチから電解が始まり、最終的に溶融塩の再生が必要になるまでバッチは繰り返され、これを 1 キャンペーンとする(図 3-3)。ANL 法電解プロセス物質収支評価コードはこの 1 キャンペーン中における物質収支を計算するコードである。

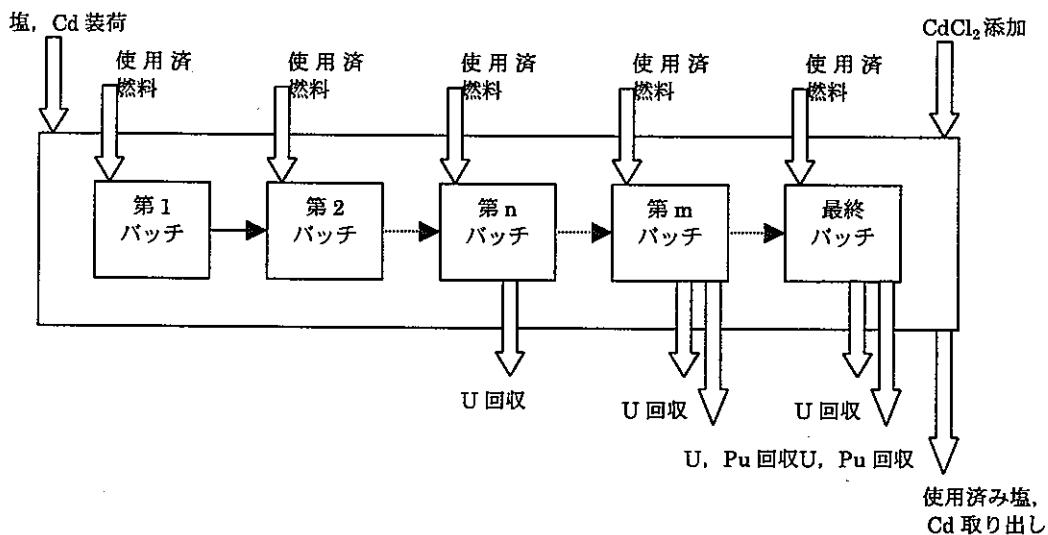
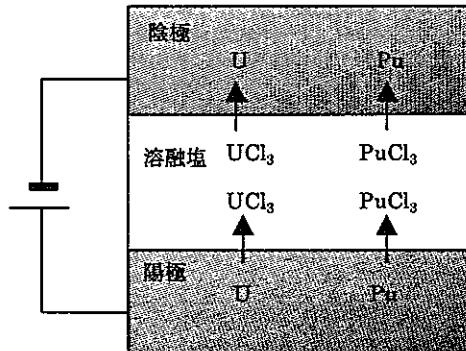


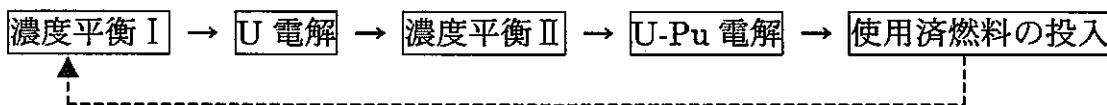
図 3-3 ANL 法電解プロセスのキャンペーンの概念^[3]

3.1.1 計算方法

電解槽で起こる反応を図 3-4 に示す。今回は処理する使用済燃料を一度、溶融 Cd に溶解させて、溶融 Cd を陽極として電解を行うことにした。陰極は、U 電解では固体陰極、U-Pu 電解では溶融 Cd 陰極を用いるものとする。

図 3-4 電解槽モデル^[3]

電解における U 電解、U-Pu 電解等の一連の作業順序は以下の様になっている。第 1 回目の使用済燃料の受入後、濃度平衡 I、U 電解、濃度平衡 II、U-Pu 電解を順に行い最後に次の使用済燃料を受け入れる。その後は濃度平衡 I から同様の手順で作業を繰り返す。



濃度平衡 I ; 濃度分極を起こさないように、溶融塩中のアクチノイド元素の濃度が 2mol%以上になるように CdCl_2 を用いて調整。

U 電解 ; 固体陰極を用いて U を回収する。

濃度平衡 II ; U の分配係数をもとに他のアクチノイド元素の溶融塩中濃度を求める。

U-Pu 電解 ; 溶融 Cd 陰極を用いて U と Pu を同時に回収する。但し、Pu/U 比が 2.5 より小さいときには U-Pu 電解を行わない。

使用済燃料の投入 ; 新たな使用済燃料を陽極 Cd 中へ溶解させる。

コード中におけるこれら一連の作業の取扱について、濃度平衡 I、濃度平衡 II で行った平衡計算と U 電解、U-Pu 電解で行った電解計算とに分けて説明する。

1) 平衡計算

溶融塩と溶融 Cd 間における元素 M の分配係数は、以下のように表現される。

$$D_M = \frac{X_{MCl}}{X_{MCd}} \cdots \cdots \cdots (1)$$

D_M : 元素 M の分配係数

X_{MCl} : 溶融塩中における元素 M のモル濃度

X_{MCd} : 溶融 Cd 中における元素 M のモル濃度

このとき両相における濃度が溶解限度以下では、分配係数(D;Distribution Coefficient)は以下のように塩素分圧の関数として記述することができる。

$$D_M = (\gamma_M / \gamma_{MCl_n}) \cdot P_{Cl_2}^{1/2} \cdot \exp(-\Delta G_{MCl_n}^0 / RT)$$

γ_M, γ_{MCl_n} ; 溶融 Cd と溶融塩中での活量係数
 $\Delta G_{MCl_n}^0$; MCl_n の標準生成自由エネルギー

次に、U の分配係数に対する各元素の分配係数の比を分離係数(SF;Separation Factor)と定義する。

$$SF_M = \frac{D_M}{D_U} \quad \dots\dots(2)$$

$$= (\gamma_M / \gamma_{MCl_n}) (\gamma_{UCl_3} / \gamma_U) \cdot \exp[(n-3)/3 + (\Delta G_{UCl_3}^0 - \Delta G_{MCl_n}^0) / RT] \quad \dots\dots(3)$$

対象とする元素の塩化物イオンの価数が U と同じ 3 値であるときには、分離係数は(3)式のように塩素分圧に依存せずまたアクチニド元素と希土類元素の活量係数が溶融 Cd と溶融塩中で Henry の法則にほぼ従うため、分離係数は U の分配係数には依存せず殆ど一定の値を示すことが報告されている^[3]。よって、分離係数はあたかも各元素の物性値のように取り扱うことが可能である。本コードで平衡計算を行う上で使用した分離係数の値について以下に示す。

表 3-1 SF_M:元素 M の分離係数^[3]

元素名	U	Pu	MA(Am)	RE(Ce)
分離係数	1	1.88	3.08	45

濃度平衡 I では、溶融塩中の U 濃度が 2mol% より小さいときには U 濃度を 2mol% となるように溶融塩と陽極 Cd 中の U のインベントリーを決定し、そのときの U の分配係数をもとに分離係数を用いて他の元素の溶融塩中における濃度を求める。

濃度平衡 II では、U 電解によって変化した電解槽中の U インベントリーをもとに U の分配係数を計算し、分離係数を用いて他の元素の溶融塩中における濃度を算出する。

2) 電解計算

各元素の電解による回収量は、あらかじめ実験結果等^[3]を基にインベントリーに対する析出物として取り出せる割合を分岐率として設定し、インベントリーに分岐率を乗じることで求めた。

$$(回収量) = (インベントリー) \times (分岐率)$$

実際に使用した分岐率を表 3-2 にまとめた。

表 3-2 電解工程での分岐率

工程	元素	分岐率[%]
U 電解	U	68
U-Pu 電解	U	57
	Pu	33

3.1.2 ANL 法電解プロセス物質収支評価コードの構成・機能

ANL 法電解プロセス物質収支評価コードは図 3-3 に示したキャンペーンでの物質収支を計算するものであり、A)工程の流れをコントロールするメインブロックと、B)U 電解および U-Pu 電解による回収量を計算するブロックから構成される。表 3-3 に ANL 法電解プロセス物質収支評価コードの構成ブロックと機能を纏める。コードのマニュアルは添付資料 1 に示す。

表 3-3 ANL 法電解プロセス物質収支評価コードの構成ブロックと機能

A) メインブロック

名称	ブロック ／ユニット	機能
①入力ブロック (初期装荷)	□ 初期装荷 □	工程に入力される物質量(初期装荷時の溶融塩と使用済燃料中の元素のモル数)を定義する。
②入力ブロック (燃料装荷)	□ 燃料装荷 □	工程に入力される物質量(2 バッチ目以降における使用済み燃料中の元素のモル数)を定義する。
③合流ブロック	□ 新規 □ recycle □ 受入 □	入力ブロックとリサイクルにより戻ってきた物質を合流させる機能を有する。
④選択ブロック	□ 終了 □ recycleへ □	分離工程と end ブロックを接続。設定された繰り返しバッチ数の間はリサイクルさせる機能を有する。
⑤end ブロック	□ END	物流の終点。

B)計算ブロック

名称	ブロック ／ユニット	機能
②濃度平衡ユニット		溶融 Cd 陽極と溶融塩の両相間における平衡を求める。(ユニットは reader ブロック、平衡計算ブロック、writer ブロックから構成される。)
②-1)reader ブロック		処理前の溶融塩中の物質量を読み出し、計算ブロックにわたす。
②-2)平衡計算ブロック		溶融 Cd 陽極と溶融塩の両相間における各元素の分配平衡を計算する。
②-3)writer ブロック		計算後の溶融塩中の物質量を記録して次ブロックに渡す。
③U 電解ユニット		U 電解による元素の回収量を計算する。(ユニットは reader ブロック、U 電解計算ブロック、writer ブロックから構成される。)
③-1)reader ブロック		②-1)と同じ。
③-2)U 電解計算ブロック		固体陰極への各元素の析出量を計算する。
③-3)writer ブロック		②-2)と同じ。

④U-Pu 電解ユニット		U-Pu 電解による元素の回収量を計算する。(ユニットは reader ブロック、Pu 濃度確認ブロック、U-Pu 電解計算ブロック、writer ブロックから構成される。)
④-1)reader ブロック		②-1)と同じ。
④-2)Pu 濃度確認ブロック		溶融塩中の U-Pu のモル比が設定値を超えているか判断する。設定値以下の時には U-Pu 電解は行わない。
④-3)U-Pu 電解計算ブロック		液体 Cd 陰極への各元素の析出量を計算する。
④-3)writer ブロック		②-2)と同じ。

ANL 法電解プロセス物質収支評価コードは、図 3-5 のようにブロックを結合することで構成される。

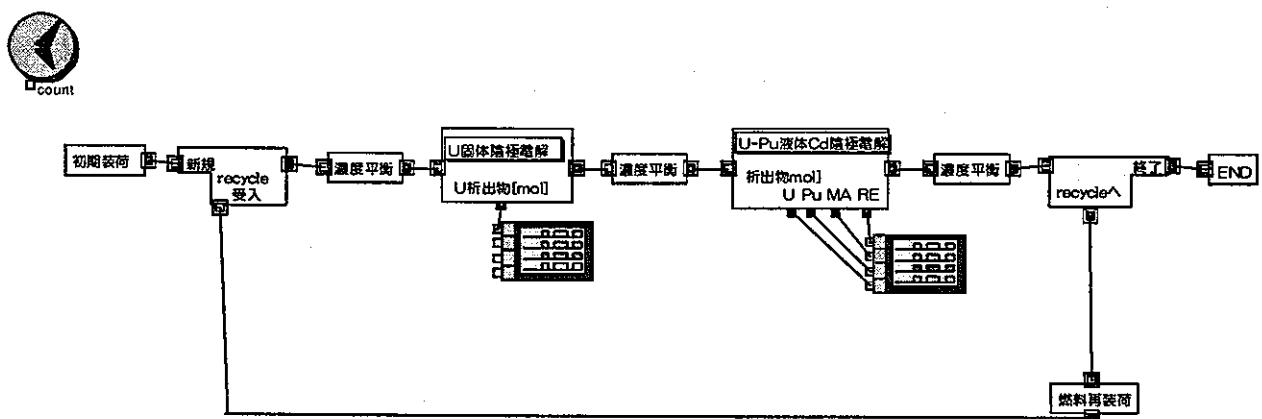


図 3-5 ANL 法電解プロセス物質収支評価コード

3.2 抽出工程評価コード

TRU 抽出工程では図 3-6 に示すように液相として塩化物溶融塩と溶融 Cd を用い、酸化還元反応に基づく向流多段の溶媒抽出により溶融 Cd 中に TRU 元素を抽出する。今回検討した抽出工程では、Cd 中には還元剤として初期に U を溶解させておく。ここで作成した抽出工程評価コードは、TRU 抽出工程での物質収支を評価するコードである。

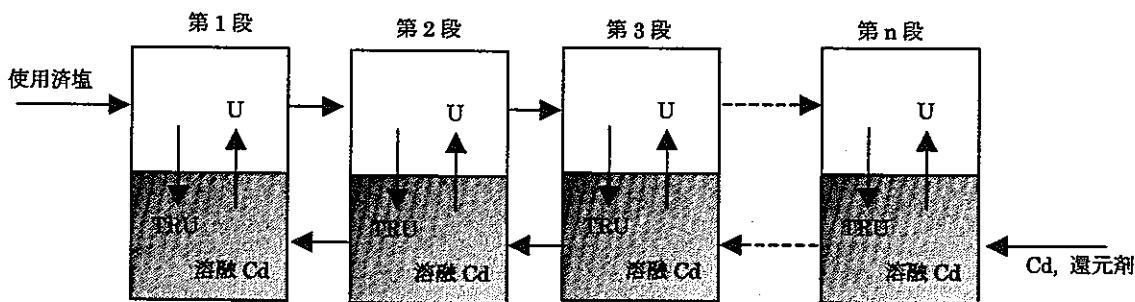


図 3-6 TRU 抽出工程^[3]

3.2.1 計算方法

計算方法は 3.1.1 で示した分離係数を用いて行った。使用した分離係数の値は表 3-1 のものであり、計算手順は以下の通りである。

- 手順 1 ; 溶融塩中の U 濃度と Cd 中の U の初期濃度を基に U の分配係数を求める。
- 手順 2 ; 分離係数を用いて他の元素の Cd 中への抽出量を決定。
- 手順 3 ; 他の元素の抽出量から還元剤として溶融塩中へ移行した U 量を算出。
- 手順 4 ; 新しい U の分配係数を求める。
- これ以後、U の分配係数が収束するまで手順 2～手順 4 を繰り返し行う。

3.2.2 抽出工程評価コードの構成・機能

抽出器を表 3-4 の機能を有するブロック(ユニット)から構成するものとし、これらのブロック(ユニット)を図 3-7 のように結合することで抽出工程評価コードは構成される。抽出段数は③抽出器ユニットと④接続配管ユニットを増やすことで任意に設定される。抽出工程評価コードのマニュアルは添付資料 1 に示す。

表 3-4 抽出工程評価コードの構成ブロックと機能

名称	ブロック ／ユニット	機能
①入力ブロック (溶融塩相)	溶融塩相の入力	工程に入力される物質量（溶融塩と各元素のモル数）を定義する。
②入力ブロック (Cd 相)	Cd相の入力	工程に入力される物質量（Cd と還元剤（劣化 U）のモル数）を定義する。
③抽出器ユニット	溶融塩相 金属相 抽出器	酸化還元による分配平衡に基づき、溶融塩中から各元素の抽出量を計算する。
④接続配管ユニット	接続配管	抽出器ユニットの接続。
⑤end ブロック	END	物流の終点。
⑥出力ブロック	出力[mol] Cd U Pu MA RE	計算結果を読み出す。

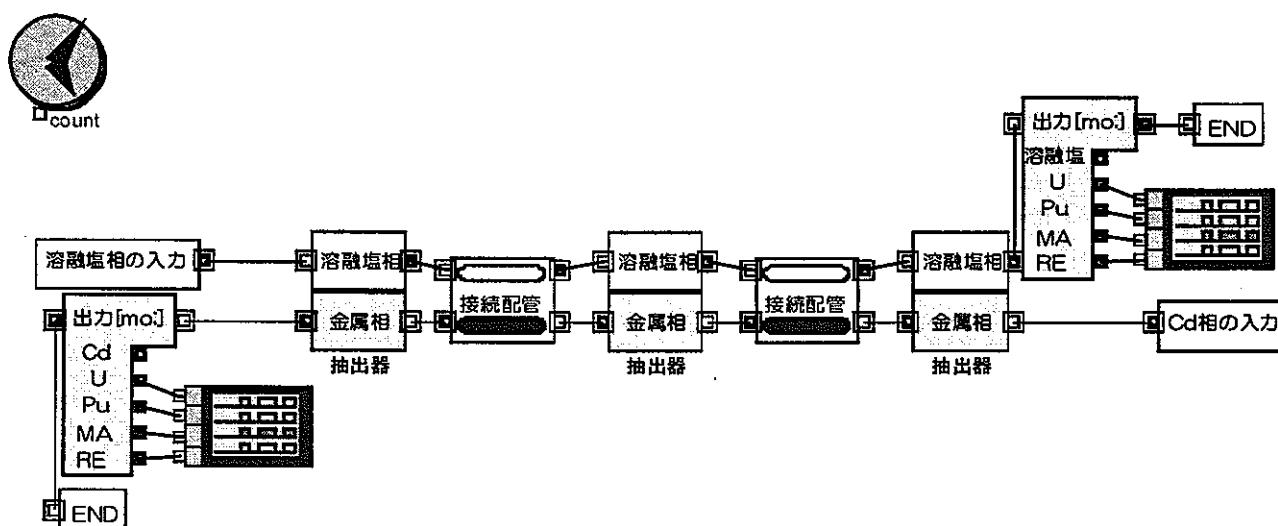


図 3-7 抽出工程評価コード

3.3 ANL 法電解プロセス物質収支評価コードの計算結果と評価

3.3.1 計算条件

ANL 法電解プロセス物質収支評価コードを用いて以下の項目について計算した。

- ①システム内のインベントリー変化
- ②電解による回収量

各物質の量は表 3-5 のとおりである。また、運転条件として 1 キャンペーンでは 20 バッチの作業を行うものとした。この条件は電中研報告¹⁴⁾にある電解プロセスの物質収支を模擬するものであり、これを本コードの計算結果と比較することにより Object 指向型ソフトを用いた評価コードの適応性を判断する。

表 3-5 電解プロセスの計算条件

物質	モル数[mol]	
システム内の溶融塩	4000	
システム内の Cd	7000	
1 バッチ毎に補給する燃料の量	U	187.5
	Pu	30.98
	MA	0.797
	RE	7.979

3.3.2 計算結果と評価

ANL 法電解プロセス物質収支評価コードによる計算結果を図 3-8 および図 3-9 に示す。

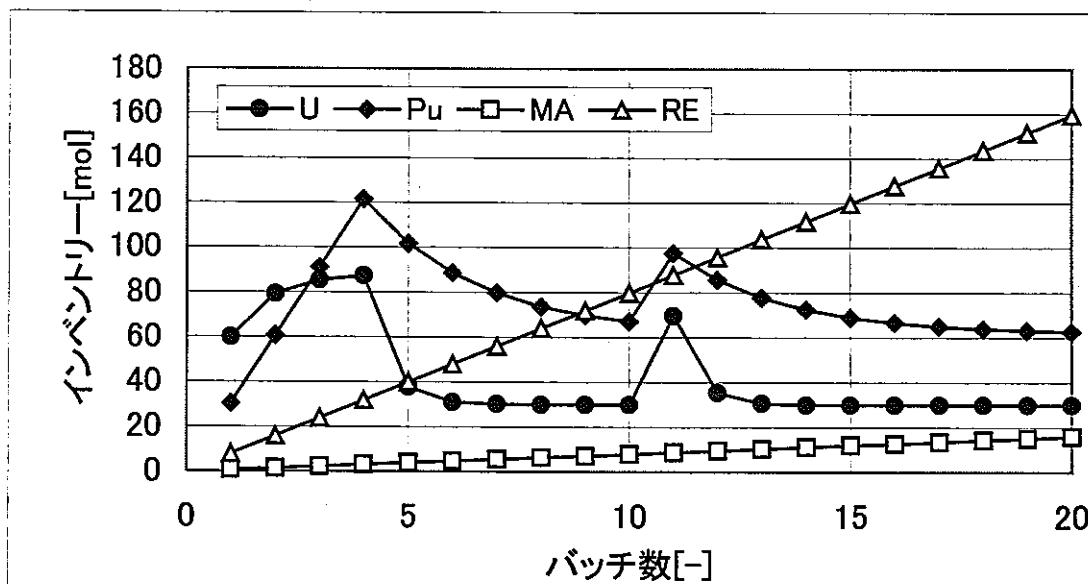


図 3-8 システム内のインベントリー変化

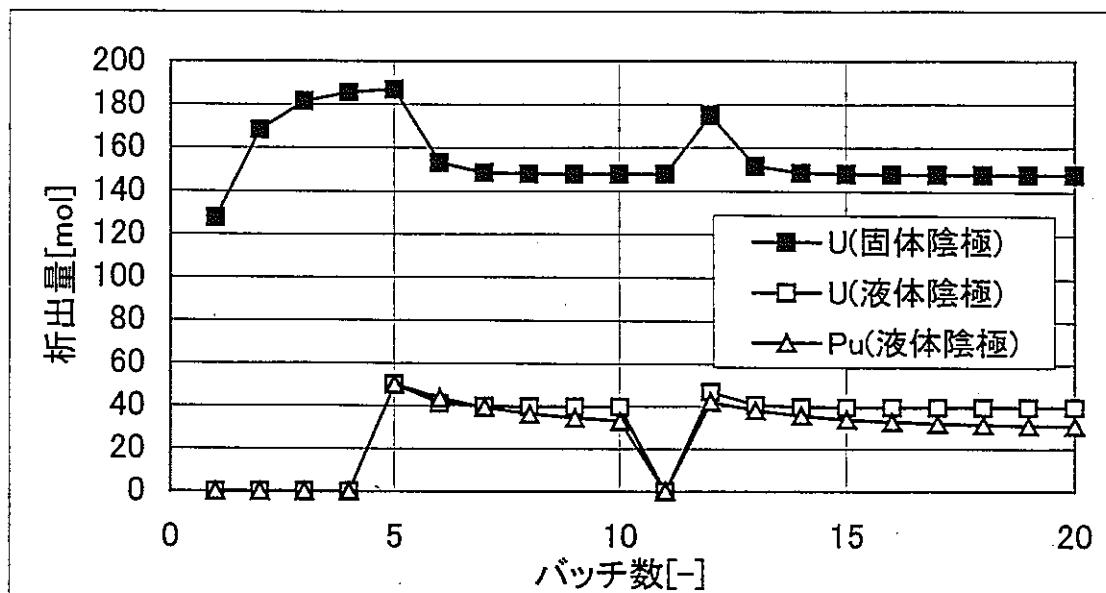
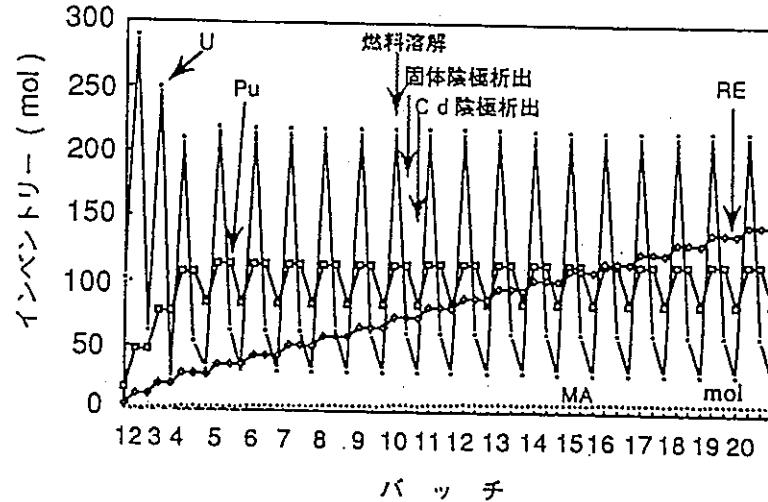


図 3-9 電解による回収量

初めの数バッチ間は Pu の溶融塩中濃度が薄いため、溶融 Cd 陰極電解が行われない。この間は、U の固体陰極電解のみが行われ Pu/U 比が増加する。その後、Pu の溶融塩中濃度が電解を行うのに十分な値に達すると U-Pu 電解が行われ、U、Pu のインベントリーが一定値に近づく様子がわかる。RE は電解による析出が殆どないため、インベントリーは単純増加する。

電解による回収量を見ると溶融 Cd 陰極で回収される元素のうち、U はほぼ一定であるが Pu は徐々に減少している。回収量は分岐率を基に算出しているため、これは U-Pu 電解直前の溶融塩中の Pu/U 比がバッチとともに減少していることを示している。11 バッチ目で U-Pu 電解が一度行われなくなることからも Pu/U 比の減少は明らかである。

図 3-10 インベントリー変化^[8]

インベントリー変化について、本コードの計算結果(図 3-8)と電中研の評価結果(図 3-10)を比較する。図 3-8 は図 3-10 の Cd 陰極析出時のデータをプロットしたものである。本コードでは複雑な電解計算は取り扱わず計算過程において分岐率を用いることによって簡略化を行っているが、初期の Pu インベントリー変化等の傾向は比較的よく一致している。然し図 3-10 では、本コードの計算結果とは異なり 11 バッチ目にも U-Pu 電解が行われている。これは計算手順の簡略化に問題があったものと思われる。本コードでは、電解中に起こる溶融 Cd 陽極、陰極と溶融塩間での元素の動的な移動については全く考慮していない。計算手順の簡略化には今後、更なる検討を行う必要がある。

3.4 抽出工程評価コードの計算結果と評価

3.4.1 計算条件

TRU 抽出工程では、以下の 3 因子が回収率に影響を及ぼす。このことについて抽出工程評価コードを用いて計算し、抽出挙動を評価した。

- ①抽出段数の増加
- ②還元剤濃度の増加
- ③Cd/溶融塩モル比の増加

また、今回の設定では還元剤として劣化 U を用いているため、TRU 元素の回収に伴い溶融塩中の U が増加するという問題がある。この影響を把握するために、上記の 3 種類の変化に伴う TRU 回収率と廃棄物溶融塩中の U の関係について評価した。計算条件は表 3-6 のとおりである。値は抽出器 1 基当たりの物量であり、U、Pu、MA、RE の量は抽出工程に流入する初期のものである。

表 3-6 抽出の計算条件

		①抽出段数	②還元剤濃度	③Cd/溶融塩のモル比
溶融塩[mol]		4000mol	←	←
溶融塩に含まれる元素[mol]	U	20mol	←	←
	Pu	70mol	←	←
	MA	10mol	←	←
	RE	140mol	←	←
Cd[mol]		40000mol	40000mol	24000～80000mol
Cdに含まれる元素[mol]	U	400mol	150～500mol	400mol
	Pu	0mol	←	←
	MA	0mol	←	←
	RE	0mol	←	←
抽出段数[段]		1～10	3	3

3.4.2 計算結果と評価

先ず最初に、①抽出段数の増加による回収率への影響を示す。本コードの計算結果を図 3-11 に、電中研の評価結果を図 3-12 に示す。

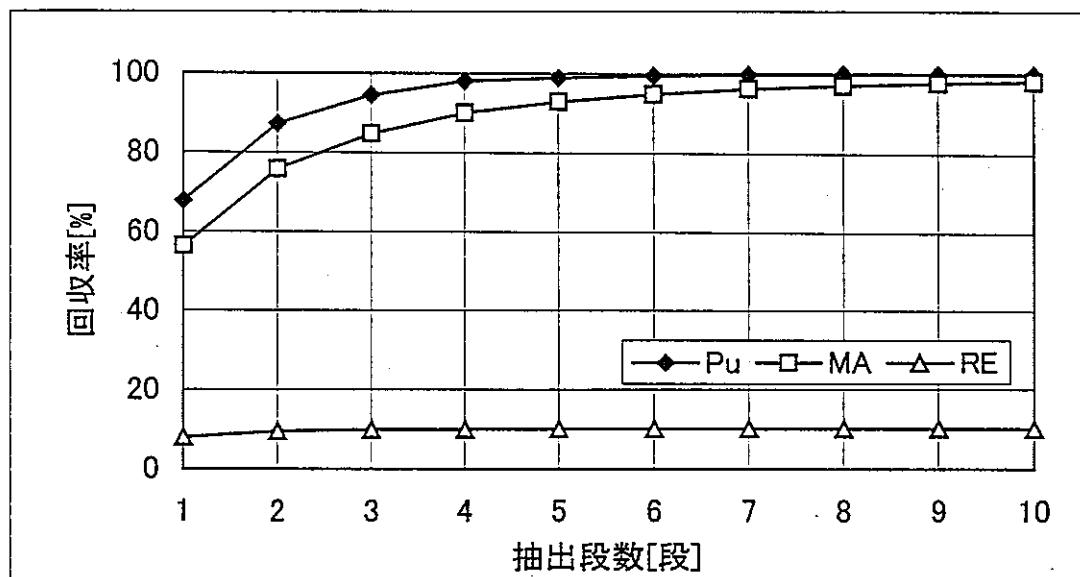


図 3-11 抽出段数と回収率の関係

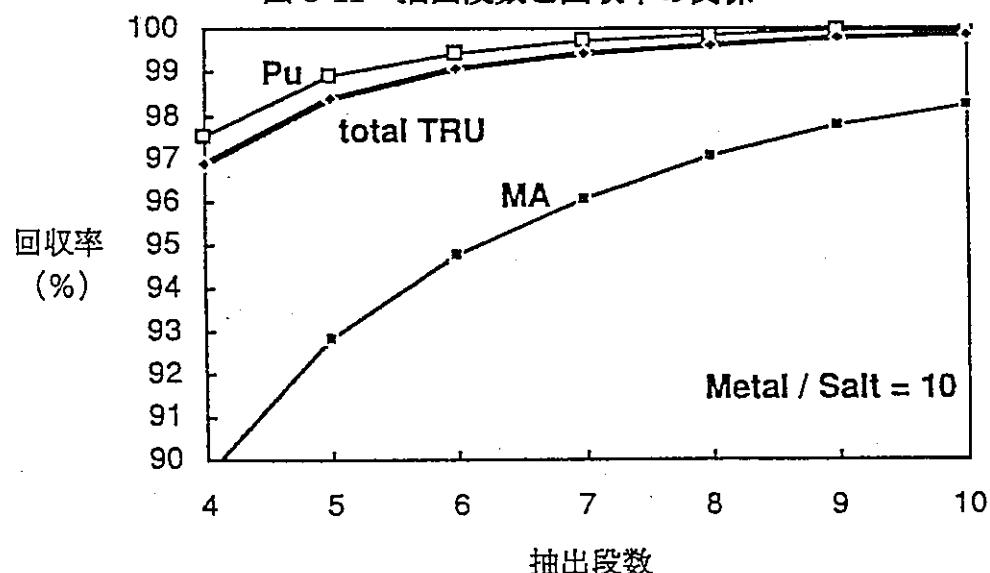


図 3-12 抽出段数と回収率の関係^[3]

ここにおける回収率は次式で定義される。

$$(回収率[\%]) = \frac{(Cd\text{により回収され電解プロセスへ戻る元素Mのモル数}[mol])}{(電解プロセスから受入れた溶融塩中の元素Mのモル数}[mol])} \times 100$$

両者を比較すると、傾向も回収率の値も殆ど一致している。抽出工程において Object

指向型ソフトを用いて作成した本コードは、解析評価を行う道具として十分なものであるといえる。

次に②還元剤濃度の増加、③Cd/溶融塩モル比の増加による影響について、本コードを用いて計算した結果を示す。

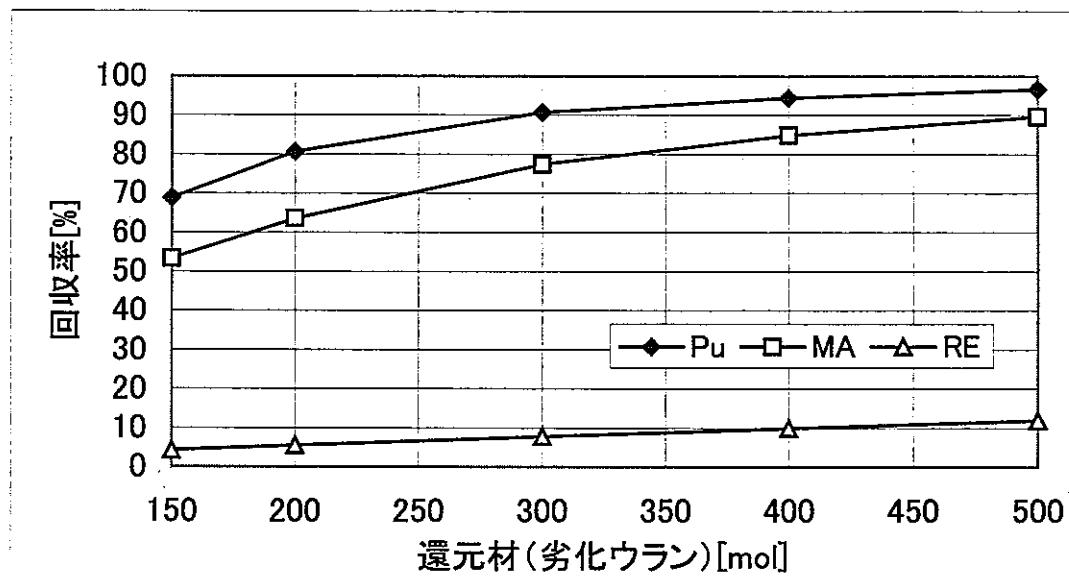


図 3-13 還元剤濃度と回収率の関係

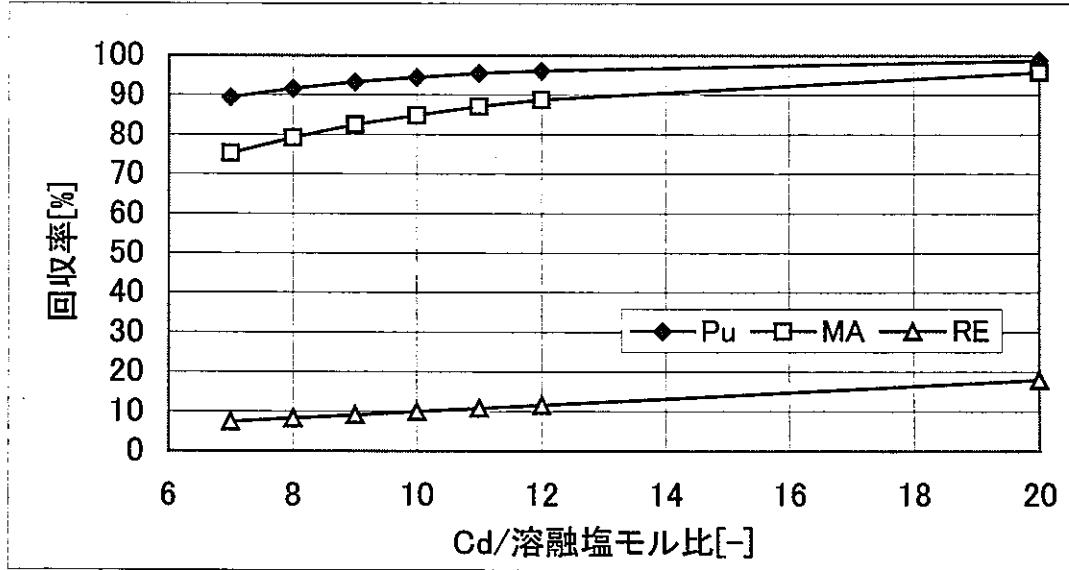


図 3-14 Cd と溶融塩のモル比と回収率の関係

還元剤のモル数、Cd/溶融塩モル比は抽出段数と同様に、値が増加するに従い回収率は上がる。②還元剤濃度の増加(図 3-13)では回収率が他の場合と比較して低いところで計算を打ち切っているが、これは Cd 中の還元剤の濃度限界という制約条件による。

件に起因する。

①抽出段数の増加、②還元剤濃度の増加、③Cd/溶融塩モル比の増加という何れの方法を用いてもPu、MAの回収率は増加し、90%以上の回収が可能であることが分かった。一方、REは全ての方法において分離係数が大きいことから回収率は上がらず、新燃料へ混入する量は全REの10%前後に抑えられる。

最後に、回収率を上げることによる廃棄物溶融塩中のU量について、①～③の方法別に比較する。

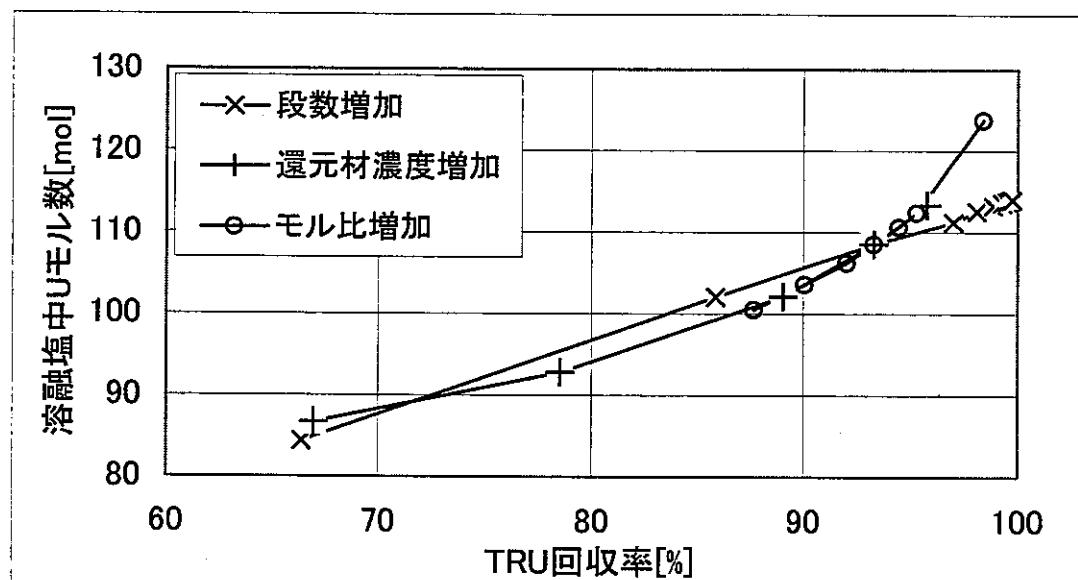


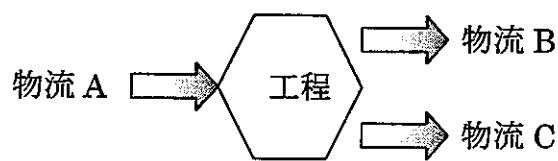
図3-15 回収率と廃棄物溶融塩中のUモル数の関係

回収率が93%程度までは、抽出段数によって回収率を上げる①の方法で廃棄物溶融塩中のU量が最も多くなる。然しほり回収率を93%以上に設定すると、②、③の方法による廃棄物溶融塩中のU量が急激に増加するため、①の方法が最も有利になることが判明した。

4. 乾式再処理プロセス物質収支評価コード

乾式再処理プロセス物質収支評価コードは、前述の ANL 法電解プロセス物質収支評価コードとは異なり ANL 法のみではなく RIAR 法、フッ化物揮発法等、任意の乾式再処理プロセスの物質収支を評価する目的で開発した。両者の相違を図 2-4 の開発ステップで示すと、ANL 法電解プロセス物質収支評価コードは①工程モデル(濃度平衡等)+②プロセスモデル(但し一部分)、乾式酸処理プロセス物質収支評価コードは②プロセスモデルとなる。乾式再処理プロセス物質収支評価コードでは、①工程モデルの代わりに分岐率を使用することにより②プロセスモデルを形成している。

分岐率の定義を以下に示しておく。



$$B = A \times (B \text{への分岐率})$$

$$C = A \times (C \text{への分岐率})$$

4.1 乾式再処理プロセス物質収支評価コードの構成・機能

乾式再処理プロセス物質収支評価コードの特徴を以下に纏める。

- 各工程での物質収支は全て分岐率を基に算出。
- 溶融塩のリサイクルも考慮することが可能。
- 各ブロックの機能に汎用性をもたせることによりブロックの種類を抑制。
- プロセスのモデル化を行うときのルールの単純化。

再処理プロセス内の各工程(電解、抽出、凝縮・揮発等)で用いる分岐率は、過去の実験・試験結果、酸化還元電位等の物性値を基に検討し設定する。

乾式再処理プロセス物質収支評価コードのマニュアルは添付資料 1 に示す。また構成要素となるブロックとその機能を表 4-1 に纏めた。

表 4-1 乾式再処理プロセス物質収支評価コードの構成ブロックと機能(1/2)

名称	ブロック /ユニット	機能
①入力ブロック (使用済燃料受入)		工程に入力される物質量を定義する。 単位は kg。
②入力ブロック (溶融塩量調整)		工程に入力される物質量を定義する。 単位は kg。
③分岐 ブロック	③-1)分岐ブ ロック (2 経路)	 設定された分岐率に従い入量を 2 つの経路に分ける。
	③-2)分岐ブ ロック (3 経路)	 設定された分岐率に従い入量を 3 つの経路に分ける。
	③-3)分岐ブ ロック (2 経路/U 電 解)	 設定された分岐率に従い入量を 2 つの経路に分ける。この際、U 電解回収後の溶融塩中の Pu 富化度が設定された値になるまで U を回収する。ANL 法や RIAR 法の U 電解工程専用のブロックである。
	③-4)分岐ブ ロック (3 経路/U 電 解)	 設定された分岐率に従い入量を 3 つの経路に分ける。③-3)と同様の機能を持つ。
④select ブロック	 設定されたバッチ毎にルートを切り替える。	
⑤合流ブロック (branch)		2 つの経路からの物質を合流させる。
⑥合流ブロック (recycle)		リサイクルにより還流された物質を合流させる。
⑦end ブロック		物流の終点。

表 4-1 乾式再処理プロセス物質収支評価コードの構成ブロックと機能(2/2)

名称	ブロック /ユニット	機能																																	
⑧出力 ブロック	⑧-1) 出力ブロッ ク(mass)	<p>OUTPUT-MASS</p> <table border="1"> <tr><td>cycle</td><td>salt</td><td>□</td></tr> <tr><td>U</td><td>■ Pd(NM) ■ Br(HG)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Pu</td><td>■ Ag(NM) ■ I (HC)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Np</td><td>■ Zr ■ Kr(NG)</td><td>□</td></tr> <tr><td>...</td><td>■ Mo ■ Xe(NG)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Cm</td><td>■ Tc ■ 3H</td><td>□</td></tr> <tr><td>RE-1</td><td>■ Cd ■ 14C</td><td>□</td></tr> <tr><td>RE-2</td><td>■ Sn ■ Li, Na, K, Rb(ALM)</td><td>□</td></tr> <tr><td>RE-3</td><td>■ Sb ■ Cs(ALM)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Ru(NM)</td><td>■ Se(CC) ■ Be, Mg, Ca, Ba(ALE)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Rh(NM)</td><td>■ Te(CC) ■ Sr(ALE)</td><td>□</td></tr> </table> <p>計算結果(元素／塩の質量) を読み出す。</p>	cycle	salt	□	U	■ Pd(NM) ■ Br(HG)	□	Pu	■ Ag(NM) ■ I (HC)	□	Np	■ Zr ■ Kr(NG)	□	...	■ Mo ■ Xe(NG)	□	Cm	■ Tc ■ 3H	□	RE-1	■ Cd ■ 14C	□	RE-2	■ Sn ■ Li, Na, K, Rb(ALM)	□	RE-3	■ Sb ■ Cs(ALM)	□	Ru(NM)	■ Se(CC) ■ Be, Mg, Ca, Ba(ALE)	□	Rh(NM)	■ Te(CC) ■ Sr(ALE)	□
cycle	salt	□																																	
U	■ Pd(NM) ■ Br(HG)	□																																	
Pu	■ Ag(NM) ■ I (HC)	□																																	
Np	■ Zr ■ Kr(NG)	□																																	
...	■ Mo ■ Xe(NG)	□																																	
Cm	■ Tc ■ 3H	□																																	
RE-1	■ Cd ■ 14C	□																																	
RE-2	■ Sn ■ Li, Na, K, Rb(ALM)	□																																	
RE-3	■ Sb ■ Cs(ALM)	□																																	
Ru(NM)	■ Se(CC) ■ Be, Mg, Ca, Ba(ALE)	□																																	
Rh(NM)	■ Te(CC) ■ Sr(ALE)	□																																	
	⑧-2) 出力ブロッ ク (decay heat)	<p>OUTPUT-DECAY HEAT</p> <table border="1"> <tr><td>TOTAL</td><td>□</td></tr> <tr><td>U</td><td>■ Pd(NM) ■ Br(HG)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Pu</td><td>■ Ag(NM) ■ I (HC)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Np</td><td>■ Zr ■ Kr(NG)</td><td>□</td></tr> <tr><td>...</td><td>■ Mo ■ Xe(NG)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Cm</td><td>■ Tc ■ 3H</td><td>□</td></tr> <tr><td>RE-1</td><td>■ Cd ■ 14C</td><td>□</td></tr> <tr><td>RE-2</td><td>■ Sn ■ Li, Na, K, Rb(ALM)</td><td>□</td></tr> <tr><td>RE-3</td><td>■ Sb ■ Cs(ALM)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Ru(NM)</td><td>■ Se(CC) ■ Be, Mg, Ca, Ba(ALE)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Rh(NM)</td><td>■ Te(CC) ■ Sr(ALE)</td><td>□</td></tr> </table> <p>計算結果(4 年冷却時の崩壊 熱)を読み出す。</p>	TOTAL	□	U	■ Pd(NM) ■ Br(HG)	□	Pu	■ Ag(NM) ■ I (HC)	□	Np	■ Zr ■ Kr(NG)	□	...	■ Mo ■ Xe(NG)	□	Cm	■ Tc ■ 3H	□	RE-1	■ Cd ■ 14C	□	RE-2	■ Sn ■ Li, Na, K, Rb(ALM)	□	RE-3	■ Sb ■ Cs(ALM)	□	Ru(NM)	■ Se(CC) ■ Be, Mg, Ca, Ba(ALE)	□	Rh(NM)	■ Te(CC) ■ Sr(ALE)	□	
TOTAL	□																																		
U	■ Pd(NM) ■ Br(HG)	□																																	
Pu	■ Ag(NM) ■ I (HC)	□																																	
Np	■ Zr ■ Kr(NG)	□																																	
...	■ Mo ■ Xe(NG)	□																																	
Cm	■ Tc ■ 3H	□																																	
RE-1	■ Cd ■ 14C	□																																	
RE-2	■ Sn ■ Li, Na, K, Rb(ALM)	□																																	
RE-3	■ Sb ■ Cs(ALM)	□																																	
Ru(NM)	■ Se(CC) ■ Be, Mg, Ca, Ba(ALE)	□																																	
Rh(NM)	■ Te(CC) ■ Sr(ALE)	□																																	
	⑧-3) 出力ブロッ ク (radioactivi ty)	<p>OUTPUT-RADIOACTIVITY</p> <table border="1"> <tr><td>TOTAL</td><td>□</td></tr> <tr><td>U</td><td>■ Pd(NM) ■ Br(HG)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Pu</td><td>■ Ag(NM) ■ I (HC)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Np</td><td>■ Zr ■ Kr(NG)</td><td>□</td></tr> <tr><td>...</td><td>■ Mo ■ Xe(NG)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Cm</td><td>■ Tc ■ 3H</td><td>□</td></tr> <tr><td>RE-1</td><td>■ Cd ■ 14C</td><td>□</td></tr> <tr><td>RE-2</td><td>■ Sn ■ Li, Na, K, Rb(ALM)</td><td>□</td></tr> <tr><td>RE-3</td><td>■ Sb ■ Cs(ALM)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Ru(NM)</td><td>■ Se(CC) ■ Be, Mg, Ca, Ba(ALE)</td><td>□</td></tr> <tr><td>Rh(NM)</td><td>■ Te(CC) ■ Sr(ALE)</td><td>□</td></tr> </table> <p>計算結果(4 年冷却時の放射 能)を読み出す。</p>	TOTAL	□	U	■ Pd(NM) ■ Br(HG)	□	Pu	■ Ag(NM) ■ I (HC)	□	Np	■ Zr ■ Kr(NG)	□	...	■ Mo ■ Xe(NG)	□	Cm	■ Tc ■ 3H	□	RE-1	■ Cd ■ 14C	□	RE-2	■ Sn ■ Li, Na, K, Rb(ALM)	□	RE-3	■ Sb ■ Cs(ALM)	□	Ru(NM)	■ Se(CC) ■ Be, Mg, Ca, Ba(ALE)	□	Rh(NM)	■ Te(CC) ■ Sr(ALE)	□	
TOTAL	□																																		
U	■ Pd(NM) ■ Br(HG)	□																																	
Pu	■ Ag(NM) ■ I (HC)	□																																	
Np	■ Zr ■ Kr(NG)	□																																	
...	■ Mo ■ Xe(NG)	□																																	
Cm	■ Tc ■ 3H	□																																	
RE-1	■ Cd ■ 14C	□																																	
RE-2	■ Sn ■ Li, Na, K, Rb(ALM)	□																																	
RE-3	■ Sb ■ Cs(ALM)	□																																	
Ru(NM)	■ Se(CC) ■ Be, Mg, Ca, Ba(ALE)	□																																	
Rh(NM)	■ Te(CC) ■ Sr(ALE)	□																																	

4.2 RIAR 法の評価モデル作成

本章では、図 4-1 に示すロシア原子炉研究所(Russian Institute of Atomic Reactor)の乾式再処理プロセスへ本コードを適用し、 PuO_2 回収量の解析評価を行った。RIAR で研究されている酸化物燃料の乾式再処理プロセスでは、先ず集合体を解体してピン毎に脱被覆を行った後、溶融塩中に使用済燃料を塩素化溶解させる。固体陰極を用いた電解により UO_2 及び貴金属元素を回収した後、Pu を酸化物の沈殿物として回収する。この後、再度電解を行い溶融塩中の残存 UO_2 を固体陰極上に析出させて回収する。最後に、リン酸塩を添加することでアルカリ金属元素を除く殆ど全ての MA、FP 元素をリン酸塩沈殿物として除去し、溶融塩の再生を行う。RIAR では回収した UO_2 は貯蔵しておき、 PuO_2 のみを MOX 燃料の原料として用いる。

RIAR 法のプロセスを本コードでモデル化したものを図 4-2 に示す。

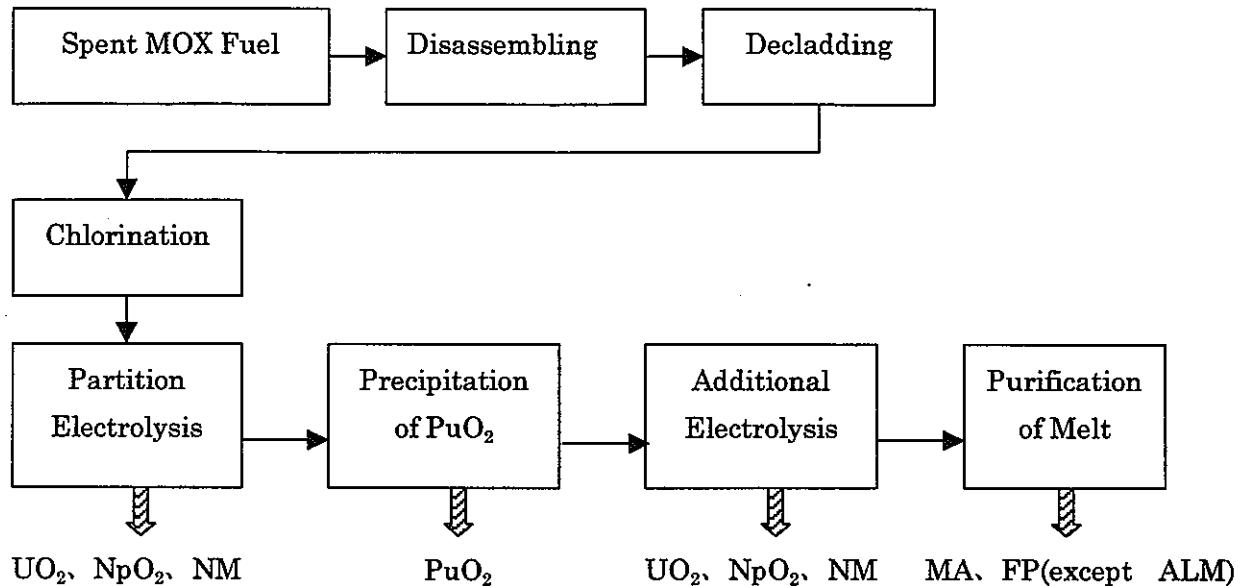


図 4-1 RIAR 法再処理プロセスフロー

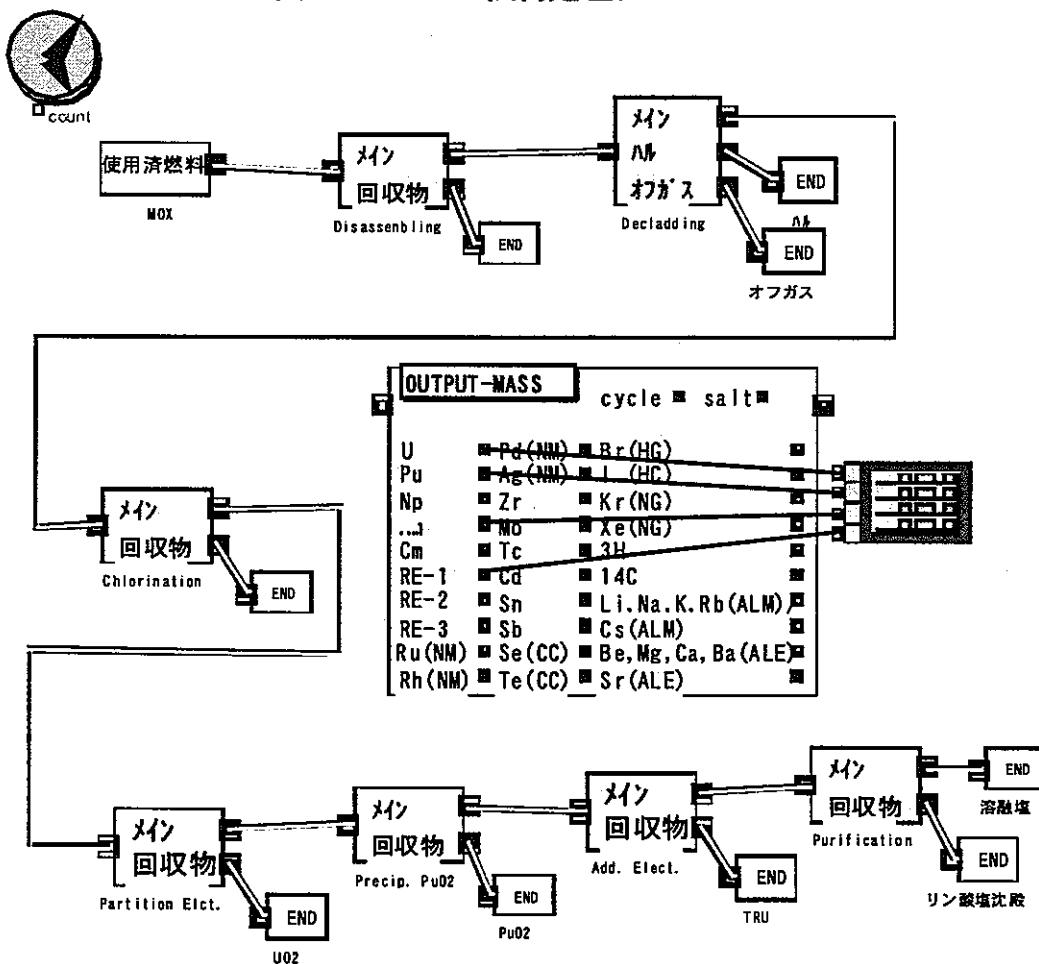


図 4-2 乾式再処理プロセス物質収支評価コードの例(RIAR 法)

4.3 乾式再処理プロセス物質収支評価コードの計算と評価

4.3.1 計算条件

本コードを使用するためには、各工程における分岐率を設定する必要がある。今回は、表 4-2 に示した RIAR での試験結果^[4]から求めた。

表 4-2 RIAR における試験結果^[4]

元素	使用済燃料 [g]	U電解工程 (Partition Electrolysis) [g]	Pu沈殿工程 (Precipitation of PuO_2) [g]	絞り電解工程 (Additional Electrolysis) [g]
U	1779	414	8.57	1308
Pu	411	1.47	390	4.53
Np	17.6	9.78	0.388	4.98
Am	15.3	1.27×10^{-2}	2.72	0.529
Cm	5.86×10^{-2}	6.36×10^{-5}	0	2.27×10^{-3}

算出した分岐率を以下の表 4-3 に纏めた。但し、リン酸塩沈殿工程(Purification of Melt)における分岐率は仮設定とする。

表 4-3 各工程の回収物への分岐率

元素	U電解工程 [%]	Pu沈殿工程 [%]	絞り電解工程 [%]	リン酸塩沈殿工程 [%]
U	23.30	0.63	96.40	99.00
Pu	0.36	95.37	23.90	99.00
Np	55.60	4.97	67.10	99.00
Am	0.08	17.79	4.20	900
Cm	0.11	0.00	3.90	900

RIAR で行われた試験結果より、この RIAR 法プロセスでは 1 バッチの処理で PuO_2 沈殿工程において Pu の約 95% を回収することが可能である。ここでは Pu 回収を高めるため、RIAR 法プロセスに変更を加えて解析を行った。

処理の方式は、10 バッチを 1 キャンペーンとして、1 キャンペーン当たりの Pu の回収量を評価した。10 バッチの間は同じ溶融塩をリサイクルして使用するものと設定した。解析対象としたのは、以下の 3 ケースである。

ケース A) 絞り電解工程、リン酸塩沈殿工程を 5 バッチに 1 度行う(図 4-3)。

ケース B) 絞り電解工程、リン酸塩沈殿工程を 5 バッチに 1 度行い更に、絞り電解工程で回収された TRU 元素を次のバッチで受け入れる使用済燃料に混ぜて処理を行う(図 4-4)。

ケース C) ケース B と同様の処理を行うが、 PuO_2 沈殿工程における Pu の回収物への分岐率を 95.37% から 80% に低下させた。

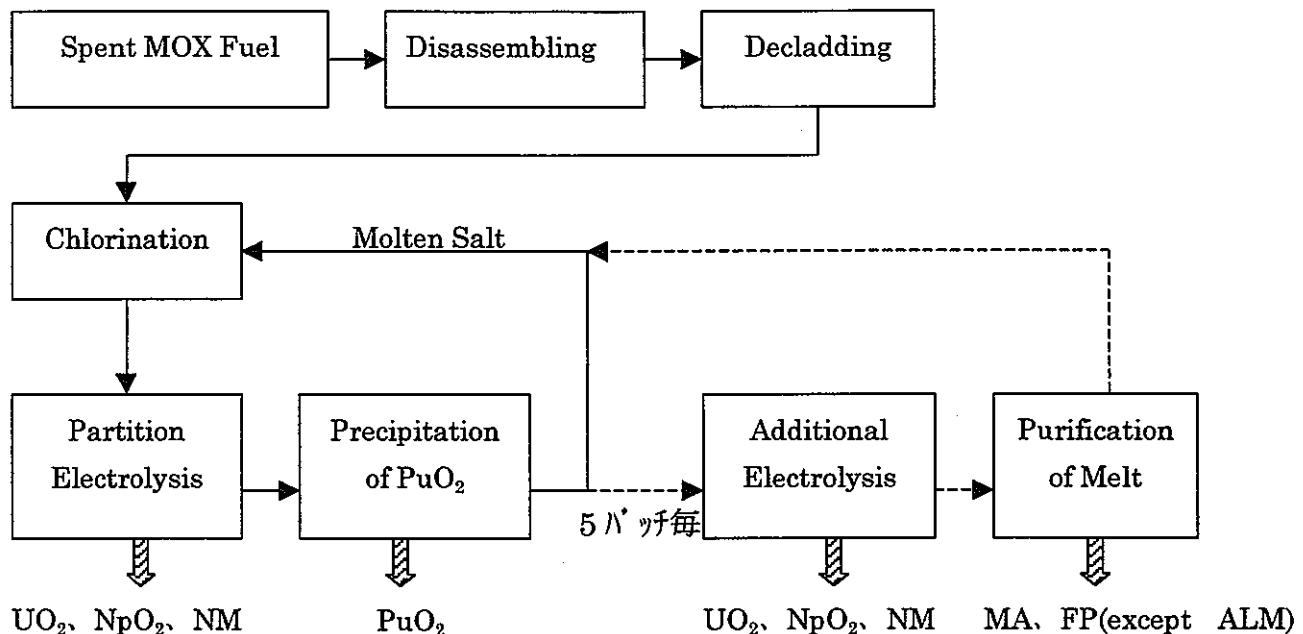


図 4-3 ケース A) のプロセスフロー

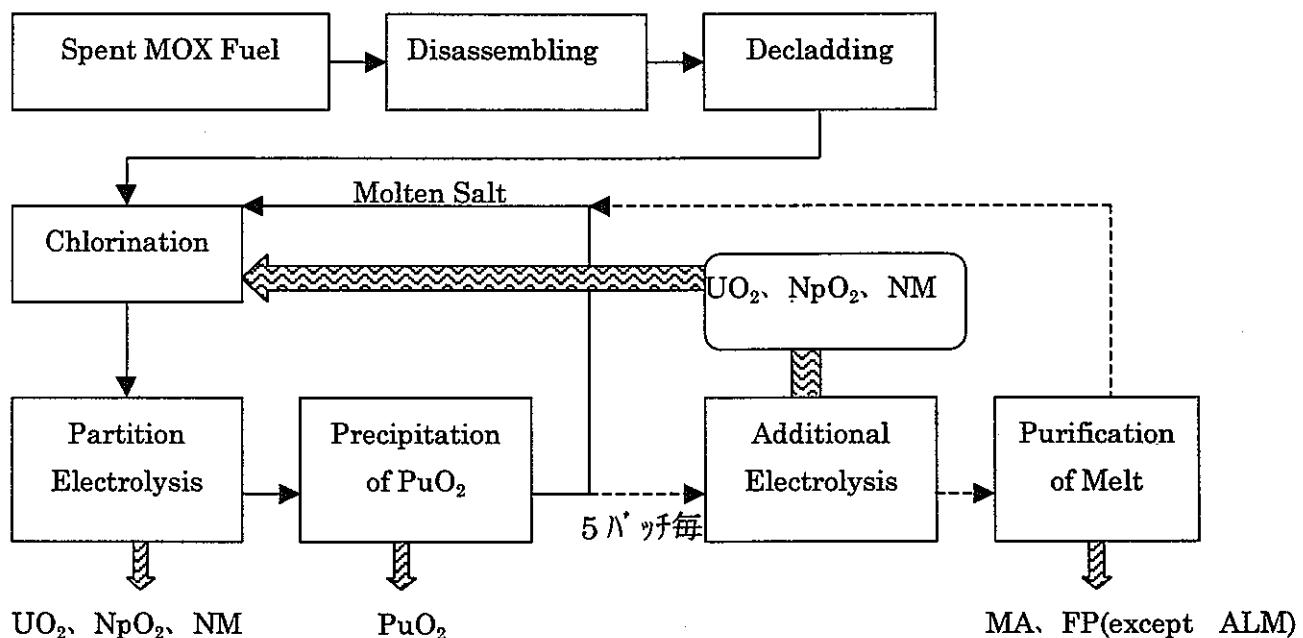


図 4-4 ケース B), C) のプロセスフロー

ケース A の評価コードモデルを図 4-5 にケース B、C のモデルを図 4-6 に示す。

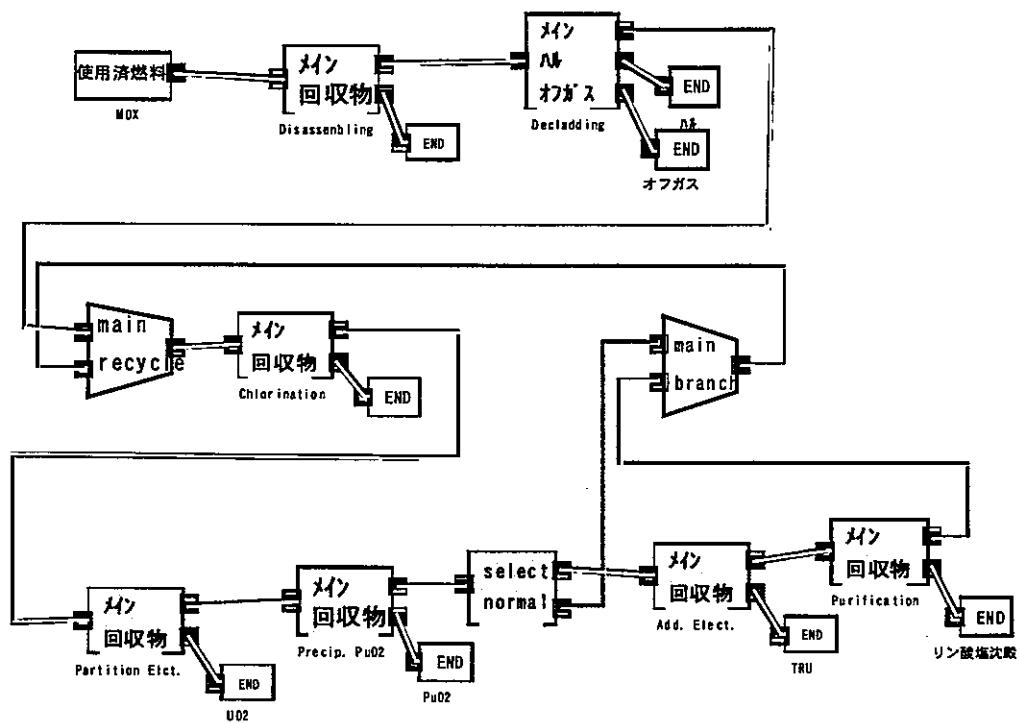


図 4-5 ケース A)のコード

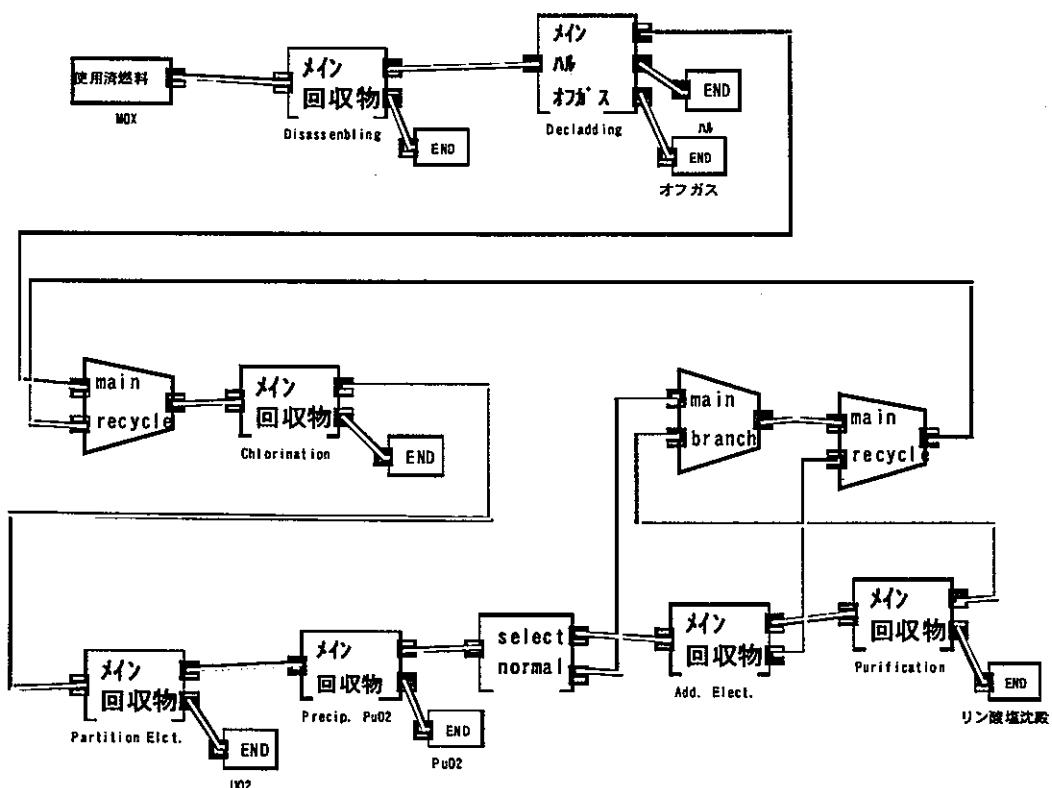


図 4-6 ケース B), C)のコード

4.3.2 計算結果

バッチ毎の Pu の回収量を図 4-7 に示す。溶融塩をリサイクルすることにより 3 バッチ目を越えたところから、どのケースにおいても 1 バッチ毎に受け入れる Pu の量にはほぼ等しい量が Pu 沈殿工程で回収できるようになった。5 バッチ終了後に絞り電解工程、リン酸塩沈殿工程により溶融塩を精製するため、6 バッチ目では溶融塩中の Pu のインベントリーが減少し回収量も低下する。

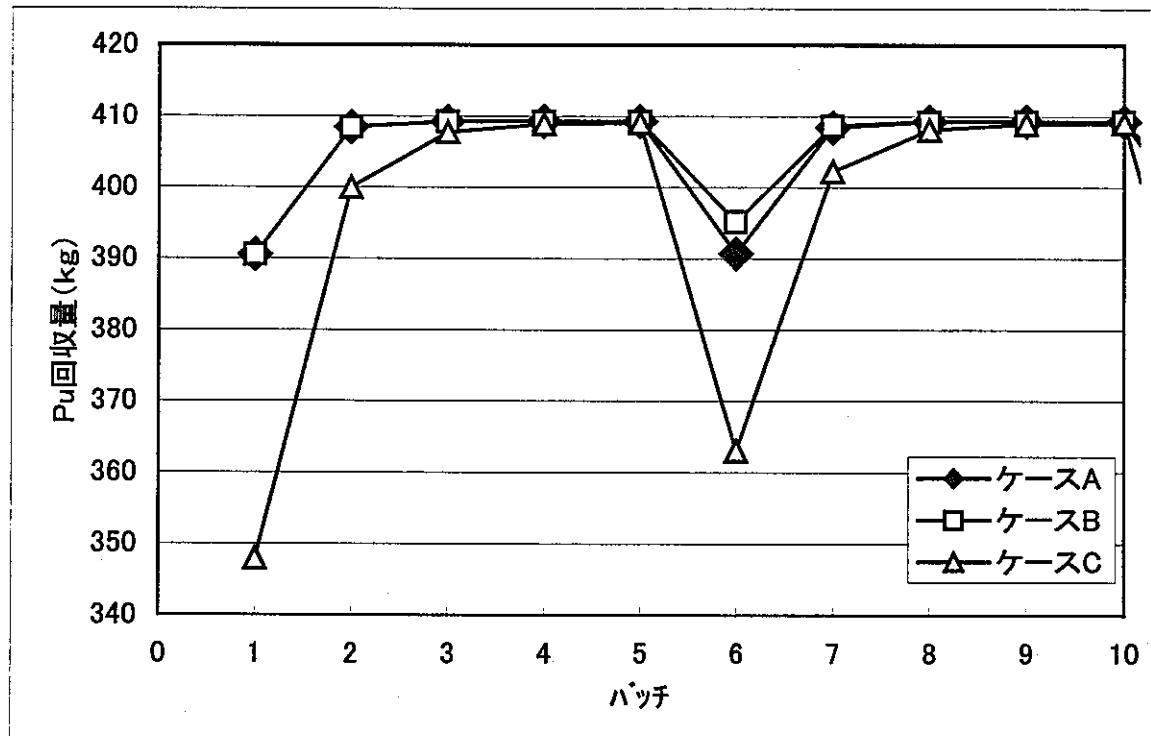


図 4-7 バッチ毎の Pu 回収量

各ケース毎の 1 キャンペーンでの平均 Pu 回収率を以下の表に纏める。

表 4-4 1 キャンペーン当たりの平均 Pu 回収率

ケース	平均 Pu 回収率[%]
A	98.6
B	98.8
C	96.7

溶融塩をワンスルーで使い捨てるのではなくリサイクルすることによって、Pu の高回収率の実現が可能である。ケース A)と B)を比較すると、絞り電解工程の回収物を再び処理することによる Pu 回収率向上への影響は小さいといえる。ケース C)の結果から Pu 沈殿工程における回収率が低い場合でも、溶融塩をリサイクルすることに

よりキャンペーン全体での回収率を高めることが可能であるといえる。

1 バッチのみを考えると、電解操作をメインとした乾式再処理では抽出器の段数で回収率を稼げる湿式法と異なり、1回の電解操作による回収率がプロセス全体の性能に対して大きな影響をもつ。そのため、乾式再処理では1キャンペーンを一つの区切りと考え、如何に溶融塩をリサイクルしていくかが回収率向上を図る上で重要な課題となる。

5. 結論

5.1 結果

乾式再処理における物質収支を評価するために、Object指向型ソフトを用いたコード開発に着手した。本年度は、開発ステップの第1段階である評価コードの原型の作成を行った。この段階では、①工程モデルと②プロセスモデルの両方を同時に構築していく。①工程モデルでは抽出工程評価コードを、②プロセスモデルでは ANL 法電解プロセス物質収支評価コードと乾式再処理プロセス物質収支評価コードを作成した。

抽出工程評価コードと ANL 法電解プロセス物質収支評価コードについては物質収支の計算結果を電中研で行われた ANL 法に対する評価^[3]と比較して、Object指向型ソフトを用いて開発した評価コードが十分に有効なものであることを確認した。更に、抽出工程評価コードを使用して行った抽出挙動の評価では、工程内の機器の組み換えを Object指向型ソフトの特性を生かし容易に行うことが可能であった。評価結果として、TRU 回収率の向上には抽出器段数の増加という方法が、廃棄物への還元剤 U の移行を最も抑制できることが分かった。

乾式再処理プロセス物質収支評価コードでは同じ②プロセスモデルでも濃度平衡等、物理現象を取り扱う ANL 法電解プロセス物質収支評価コードとは異なり、汎用性をもたせるために全ての工程の物流を分岐率で表現した。それによりあらゆる乾式再処理プロセスに対して、使用済燃料の受入、集合体解体、脱被覆等、再処理における全ての工程を一括して評価することが可能となった。本コードを用いて RIAR 法プロセスを評価したところ、湿式再処理とは異なり 1 パッチではなく 1 キャンペーンをプロセスの区切りとして評価を行うことが重要であることが Pu の回収量から確認できた。

5.2 今後

今後は、抽出工程評価コードと同種のコードを再処理の各工程に対して作成していく。更に、乾式再処理プロセス物質収支評価コードの構成要素である分岐率で物流を扱う工程ブロックを、これらの工程評価コードへ置き換えて行く予定である。

具体的には以下のようない項目について検討・開発を進める。

- a) 各ブロックの汎用性を高め共通化するための検討
- b) 電解シミュレーションおよび凝縮・揮発シミュレーションコードの開発
- c) 乾式再処理プロセス物質収支評価コードの機能強化(保留、遅延など)
- d) 評価項目定量化についての検討および評価ブロックの作成

乾式再処理については各要素技術の研究が十分に進んでおらず、実験結果も限られた

条件のものであることが多いため、実験によるデータ収集等の進展に合わせてコードの改良・検証を進める必要がある。

参考文献

- [1] 荒木勝啓,”EX・TDによるシミュレーション入門”,白桃書房(1996)
- [2] 上田吉徳,五十嵐幸,”核燃料再処理抽出プロセス計算コードへの Object DPS の適用”,ケミカルエンジニアリング Vol.43,No.3(1998)
- [3] 小山正史,飯塚正利,”乾式再処理プロセスの性能評価”,電力中央研究所報告 T92078(1993)
- [4] A.V.Bichikov, S.K.Vavilov, et.al., “Pyroelectrochemical Reprocessing of Irradiated FBR MOX Fuel III Experiment on High Burn-Up Fuel of the BOR-60 Reactor”, Global'97,Oct. 5-10,Vol.2,p912(1997)

添付資料

添付資料-1 各種コードマニュアル

- 1.抽出工程評価コード
- 2.ANL 法電解プロセス物質収支評価コード
- 3.乾式再処理プロセス物質収支評価コード

添付資料-2 コードの構造

～抽出工程評価コードを例にコードの階層構造について～

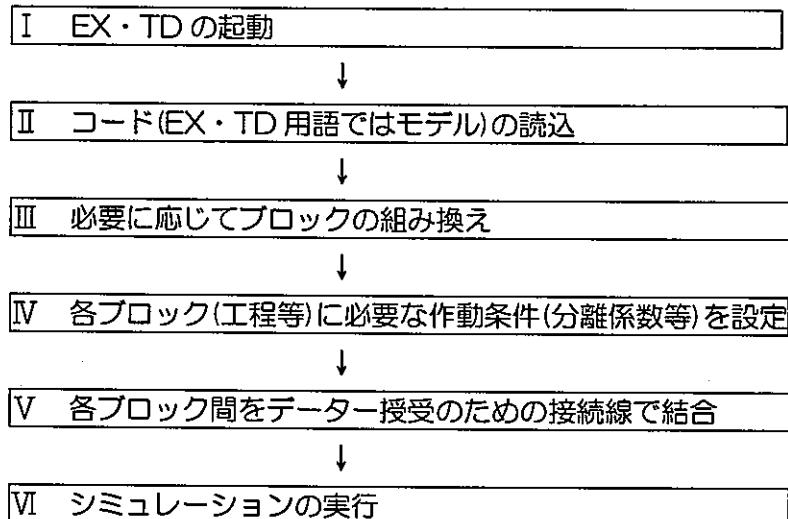
添付資料-1 各種コードの使用マニュアル

ここでは、本報告書中で紹介された

- 1, 抽出工程評価コード
- 2, ANL 法電解プロセス物質収支評価コード
- 3, 乾式再処理プロセス物質収支評価コード

の具体的な使用法について記す。尚、U 電解工程評価コード、U-Pu 電解工程評価コードについては、ANL 法電解プロセス物質収支評価コードの構成要素となっているため敢えて個別に使用法を説明することはしない。先ず最初に EX・TD 自身の使用法において、各種コードを利用する上で最小限必要とされる事項について以下に触れる。EX・TD 共通事項の説明を読んだ後は、必要なコードのマニュアルを見ることで十分に扱える様に本添付資料は構成してある。

➤ 基本的な操作手順 <➤



各種コードの個別使用説明に入る前に、コードの使用法の中で共通の約束事(EX・TD 自身の特徴でもある)について説明する。特にコードを使用時に各ブロック(工程等)の組み換えを行う上で、以下の 3 つの約束事は重要となる。

約束事① 作業領域

各種ブロックを用いてシステムを組み上げるときには、以下のブロック(Executive:シミュレーションの時間経過を管理している。)の右下領域で作業を行う。



図 A-1 Executive ブロック

約束事② コネクタ接続-アイテム・値

各種ブロック間のデータの受け渡しは、コネクタ同士を接続線で結合させることによって行われる。コネクタには、

- ; アイテム入力コネクタ
- ; アイテム出力コネクタ
- ; 値入力コネクタ
- ; 値出力コネクタ

の4種類がある。アイテム用のコネクタはアイテム用のもの同士、値用のコネクタは値用のもの同士でしか結線することはできない。ここでアイテムと値の相違点について触れる。再処理プロセスの中で工程間を移動する U、Pu 等元素のそれぞれの物量データが、値に相当する。この値をブロック間で直接受け渡すためには、例えば 20 元素の挙動を再処理システム内で追跡しようとする場合は、全てのブロック間を元素の数に等しい 20 本の接続線を用いて結合する必要が生じる。そこで、アイテムという概念が有意性を示す。アイテムはこれら複数の値を一つに纏めて扱うための、いわば箱に相当するものと考えることができる。アイテムを用いることによってブロック間において個別の値を接続線で受け渡す必要が無くなり、作業の軽減化が図られる。特に、バッチ処理を行う乾式再処理プロセスの様に離散事象を扱うときには、アイテムの概念が非常に有効となる。

約束事③ データの終点

各種コード内で移動するアイテムには、全て受け入れ先が必要である。これは使用済燃料等の入力ブロックによって発生させられたアイテムは、系内を循環し続けるか END ブロックによって系外へ排出されることが絶対条件であり、各ブロックのアイテム出力コネクタは必ず接続線により結線されていなければならない。値に関してはこの様な規則がないため、あるブロックから出力される値を必要としないときには値出力コネクタは接続線により結線されていなくてよい。



図 A-2 END ブロック

1. 抽出工程評価コード

先ず最初に具体例として、3段の抽出器を連結したものを以下に示す。

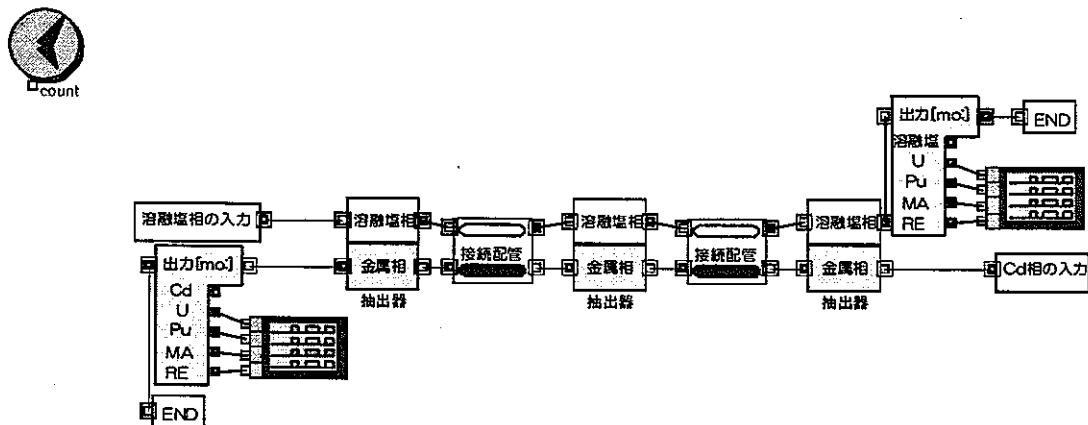


図 A-3 抽出工程評価コードの全体図

各ブロック(ユニット)の役割については本報告書に記してある。ここでは抽出器基數の変更、各装置の作動条件設定、データの取り出し方について触れる。

▼抽出器基數の変更▼

抽出器基數は、基本的に自分が必要としている抽出器ユニットの数だけコピーをして接続線で結線すればよい。その際、抽出器ユニット間には必ず接続配管ユニットを挟む必要がある。接続配管ユニットは、データ授受のタイミングを計る役割を担っている。

▼条件設定▼

各装置の作動条件設定は、対象としているブロックをマウスでダブルクリックすることにより表示される条件設定画面で行う。その時に、作動条件を設定する必要がないブロック(ここでは、配管接続ユニット、出力ブロック等)をクリックした場合は、

設定不要

図 A-4 エラーメッセージ

というメッセージが表示される。具体的に、どの様な作動条件の設定を要求されるかについて以下の表に纏めた。

表 A-1 抽出工程評価コード作動条件

ユニット名	作動条件	内容
入力(溶融塩相の入力)	受入のバッチ間隔	アイテム内のデータ授受のタイミングを揃えるオプションであり通常は1に設定。
	溶融塩量	溶媒としての溶融塩量。単位はmol。
	U量、Pu量、MA量、RE量	入量時に溶融塩中に含まれる元素の量。単位はmol。
入力(Cd相の入力)	受入のバッチ間隔	アイテム内のデータ授受のタイミングを揃えるオプションであり通常は1に設定。
	Cd量	溶媒としてのCd量。単位はmol。
	U量、Pu量、MA量、RE量	入量時にCd中に含まれる元素の量。通常は還元剤であるUのみ設定。単位はmol。
抽出器	溶融塩、Cd	受け入れる溶媒量。通常は上述の2つのブロックの値と整合させる。単位はmol。
	Pu・MA・REのSF	Uの分配係数を基に決定した各元素の分離係数。
	Pu・MA・REのCd中での限界濃度	抽出側であるCd中における溶解濃度の上限値。単位はmol%。

▼データ取扱▼

最後にデータの取り出し方について述べる。基本的にデータはブロック間をアイテムという箱に乗って移動している。そこでアイテム内の値を取り出す道具として、出力ブロックが用意されている。出力ブロックを経過したアイテム内の値データは、ユニットの下部に設けてある値出力コネクタから取り出すことができる。プロッタブロックを接続することで値(物量)の時系列データの保存が可能となり、プロッタブロックをダブルクリックすることによりグラフと表計算ソフト形式の時系列データが閲覧できる。

使用するときには、自分が情報を得たい物量が流れる接続線に対して出力ブロックを割り込ませればよい。



出力ブロック

プロッタブロック

図 A-5 データ取り扱い用ブロック

2.ANL 法電解プロセス物質収支評価コード

最初に、全体像を示す。

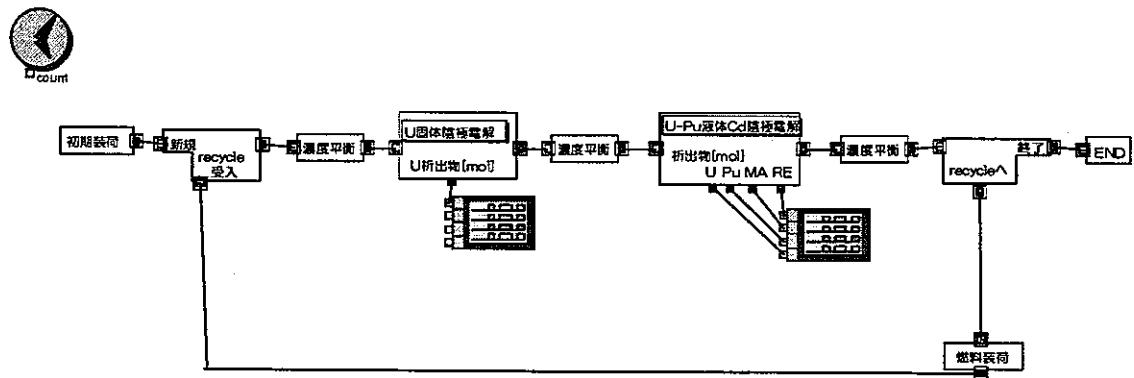


図 A-6 ANL 法電解プロセス物質収支評価コードの全体図

各ブロック(ユニット)の役割については本報告書に記してある。本コードでは、システムの組み換えは行わないものと考えているので、ここでは各装置の作動条件設定、データの取り出し方について触れる。

▼条件設定▼

各装置の作動条件設定は、対象としているブロックをマウスでダブルクリックすることにより表示される条件設定画面で行う。その時に、作動条件を設定する必要がないブロック(ここでは、合流ブロック、END ブロックのみ)をクリックした場合は、

設定不要

図 A-7 エラーメッセージ

というメッセージが表示される。具体的に、どの様な作動条件の設定を要求されるかについて以下の表に纏めた。

表 A-2 ANL 法電解プロセス物質収支評価コード作動条件

ユニット名	作動条件	内容
入力(初期装荷) <input checked="" type="checkbox"/> 初期装荷	システム中の溶融塩量	電解槽内の溶融塩量。単位は mol。
	システム中の Cd 量	陽極の液体 Cd 量。単位は mol。
	U、Pu、MA、RE 量	初期に液体 Cd 陽極に含まれる元素の量。単位は mol。
濃度平衡 <input checked="" type="checkbox"/> 濃度平衡	Pu、MA、RE の SF	U の分配係数を基にした各元素の分離係数。
	AC 元素の濃度下限値	濃度分極を起こさせないためにこの下限値以上の AC 元素が溶融塩中に溶解する様に $CdCl_2$ を用いて調整する。単位は mol%。
	U、Pu、MA、RE の Cd 中での限界濃度	陽極である Cd 中における溶解濃度の上限値。単位は mol%。
U 電解 <input checked="" type="checkbox"/> U 固体陰極電解 <input checked="" type="checkbox"/> U 析出物 [mol]	Pu、MA、RE の SF	U の分配係数を基にした各元素の分離係数。
	U の回収率	回収率。単位は %。
U-Pu 電解 <input checked="" type="checkbox"/> U-Pu 液体 Cd 陰極電解 <input checked="" type="checkbox"/> 析出物 [mol] U Pu MA RE	溶融塩中 Pu/U 比の下限値	Pu/U の濃度比をある程度高めてから電解を行う必要がある。設定した下限値以下の場合は、U-Pu 電解ユニットはスキップされる。
	Pu、MA、RE の SF	U の分配係数を基にした各元素の分離係数。
	U、Pu、MA、RE の回収率	回収率。単位は %。
選択 <input checked="" type="checkbox"/> 終了 <input checked="" type="checkbox"/> recycleへ	recycle 数	溶融塩を精製せずに連続使用する cycle 数。
入力(燃料装荷) <input checked="" type="checkbox"/> 燃料装荷	U、Pu、MA、RE 量	2cycle 目以降の装荷燃料組成。単位は mol。

▼データ取扱▼

最後にデータの取り出し方について述べる。本コードでは抽出工程評価コードの様に、出力ブロックを用いなくても電解による析出物量を把握できるようにしてある。U 電解と U-Pu 電解のブロックには、それぞれ下部に析出物量データの取り出し口として値出力コネクタが用意されている。プロッタブロックを接続することで値(物量)の時系列データの保存が可能となり、プロッタブロックをダブルクリックすることによりグラフと表計算ソフト形式の時系列データが閲覧できる。尚、ここで得られる析出物量は、mol 単位で表現されている。

3. 乾式再処理プロセス物質収支評価コード

最初に、全体像を示す。このコードは汎用型であるためここでは、例として ANL 法(金属燃料)を取り上げる。但し、一部の工程を簡略化している。

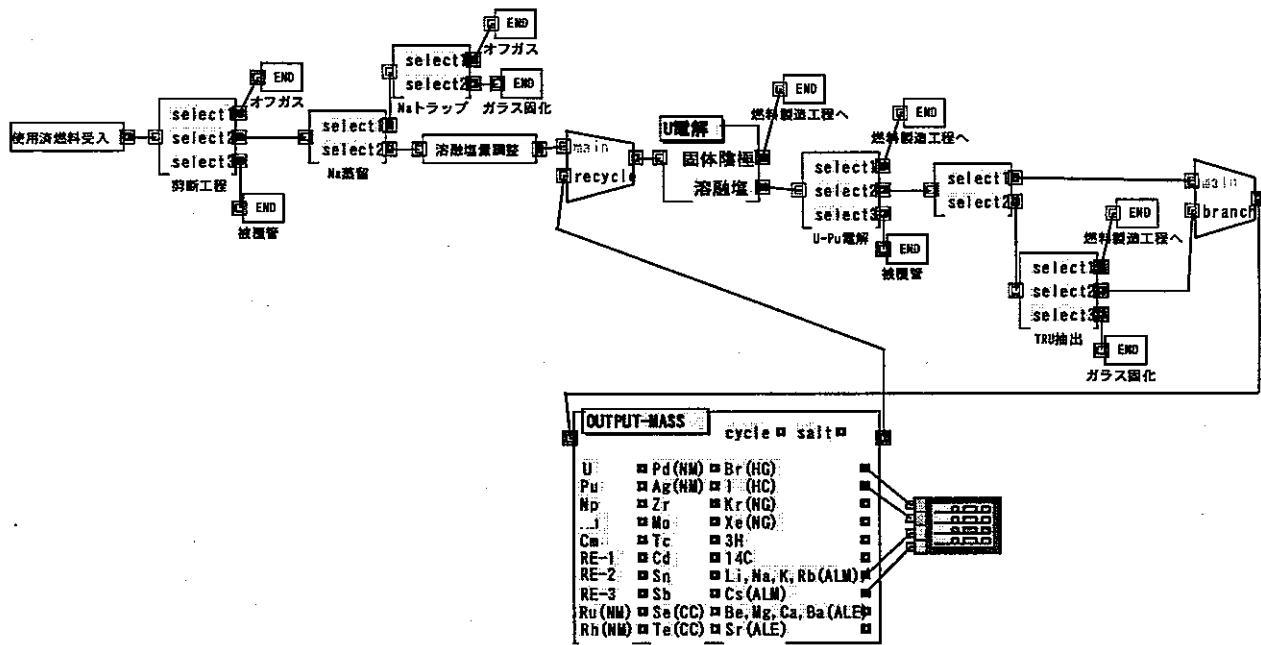


図 A-8 乾式再処理プロセス物質収支評価コードの全体図(例、ANL 法)

各ブロック(ユニット)の役割については本報告書に記してある。ここではシミュレーションの対象となる再処理プロセスの組み方、各装置の動作条件設定、データの取り出し方について触れる。

▼プロセスの組み方▼

基本的に本コードは、物流の分岐と合流から成っている。先ず、分岐について触れる。

あらゆる再処理プロセスの物量を模擬できる様に、個々の工程は分岐ブロック(2 分岐と 3 分岐の 2 種類)のみで表現する。剪断工程、Na 蒸留工程、電解工程、TRU 抽出工程、溶融塩(物流)の分流に至るまで、殆どの工程を分岐率のみで扱う。工程の作動条件として入力する分岐率は、文献等を参考に決定する。然し U-Pu を同時に電解させるプロセスでは、先に U 電解を行い溶融塩中の Pu 富化度を調整するケースがある。その為、U 電解工程については、U の析出量を分岐率ではなく溶融塩中の Pu 富化度を基に設定できる様に特別に作成されたブロックを使用することも可能である。

溶融塩(物流)の合流には、別々の工程へ分流されたものを合わせるブロックとリサイクルされた溶融塩を工程中に戻すブロックの 2 種類がある。前者はただ入力された物量を合計するだけであるが、後者は物量を合計するだけではなく溶融塩のリサイクル状態の情報も記憶するため、両者の使い分けは厳密に行う必要がある。

実際にシミュレーションを行う再処理プロセスを模擬するときには、入力ブロック(使用済燃料受入)から始めて各工程を分岐ブロックで順番に表現していかなければよい。

▼条件設定▼

各装置の作動条件設定は、対象としているブロックをマウスでダブルクリックすることにより表示される条件設定画面で行う。その時に、作動条件を設定する必要がないブロック(ここでは、合流ブロック、ENDブロックのみ)をクリックした場合は、

設定不要

図 A-9 エラーメッセージ

というメッセージが表示される。具体的に、どの様な作動条件の設定を要求されるかについて以下の表に纏めた。

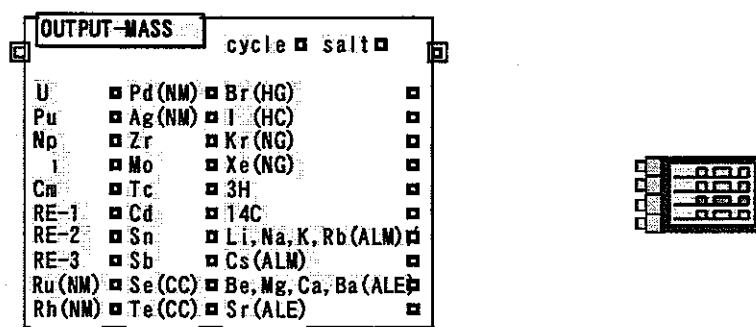
表 A-3 乾式再処理プロセス物質収支評価コード作動条件

ユニット名	作動条件	内容
入力(使用済燃料受入)	使用済燃料受入間隔	何 cycle 毎に燃料を受け入れるかを決定するオプション。通常は 1 に設定。
	各元素の量	受け入れる使用済燃料中の元素の量。単位は kg。
溶融塩量調整	初期量	第 1cycle でシステムに入量される溶融塩量。単位は kg。
	補給量	第 2cycle 以後、システムに補給される溶融塩量。負の値に設定すれば余剰塩の除去を再現。単位は kg。
分岐(2 分岐)	分岐率 <input checked="" type="checkbox"/> select1 <input type="checkbox"/> select2	各元素の分岐率を入れる。単位は%。
分岐(3 分岐)	分岐率 <input checked="" type="checkbox"/> select1 <input type="checkbox"/> select2 <input type="checkbox"/> select3	各元素の分岐率を入れる。単位は%。
U 電解(2 分岐)	分岐率	各元素(U、Pu は除く)の分岐率を入れる。単位は%。
	Pu 富化度	ここで設定した溶融塩中での Pu 富化度を満たすように U を陰極へ析出させる(Pu の析出は無し)。単位は%。
U 電解(3 分岐)	分岐率	各元素の分岐率を入れる。U、Pu はその他(オフガス、スライム等を想定)に分岐する割合を入力。単位は%。
	Pu 富化度	ここで設定した溶融塩中での Pu 富化度を満たすように U を陰極へ析出させる(Pu の析出は無し)。単位は%。
選択	分岐間隔 <input checked="" type="checkbox"/> select <input type="checkbox"/> normal	default では nomal へ流れるが、設定した間隔(cycle)毎に select へ流れる。溶融塩精製工程等に適用可。

▼データ取扱▼

最後にデータの取り出し方について述べる。基本的にデータはブロック間をアイテムという箱に乗って移動している。そこでアイテム内の値を取り出す道具として、出力ブロックが用意されている。出力ブロックを経過したアイテム内の値データは、ユニットの下部に設けてある値出力コネクタから取り出すことができる。プロッタブロックを接続することで値(物量)の時系列データの保存が可能となり、プロッタブロックをダブルクリックすることによりグラフと表計算ソフト形式の時系列データが閲覧できる。

使用するときには、自分が情報を得たい物量が流れる接続線に対して出力ブロックを割り込ませればよい。



出力ブロック

プロッタブロック

図 A-10 データ取り扱い用ブロック

尚、出力ブロックは、質量読み取り用(OUTPUT-MASS)の他に、崩壊熱読み取り用(OUTPUT-DECAY HEAT)、放射能読み取り用(OUTPUT-RADIOACTIVITY)の2種類が用意してある。崩壊熱と放射能は、FBRで15万 MWD/t 燃焼後、4年間冷却した使用済燃料の同位体組成を基に算出される。単位は、崩壊熱が W、放射能が Ci である。

添付資料-2 コードの構造

本報告書中では添付資料 1 のマニュアルも含めて、コードについてはその利用方法を中心に説明してきた。混乱を避けるためにもコードの構造(EX・TD そのもの)については、言及してきていない。基本的には階層構造になっており、ブロックの集合体→ブロック単体→ソースの順に階層を降りていく。ここでは抽出工程評価コードを例に、コードの構造を簡単に説明する。

先ず、抽出工程評価コードの全体図は以下の様になっている。

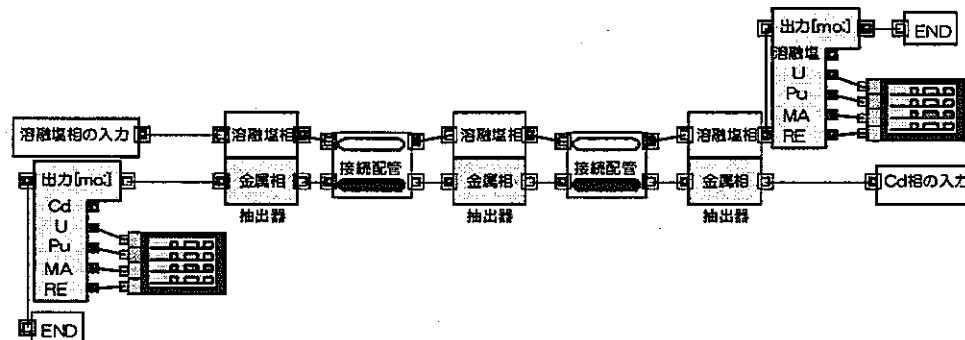


図 A-11 抽出工程評価コードの全体図

コード全体は複数のブロックによって構成されている。ブロック自体は本報告書でも述べたように FORTRAN のサブルーチンに相当し、これ以上分解できない最小単位のものと更に複数のブロックへと分解できるものがある。このコード全体図の中で、最小単位のブロックはプロッタブロックのみである。ここでは抽出器ユニット(ブロック)に注目し、そのブロックの中身について見ることにする。

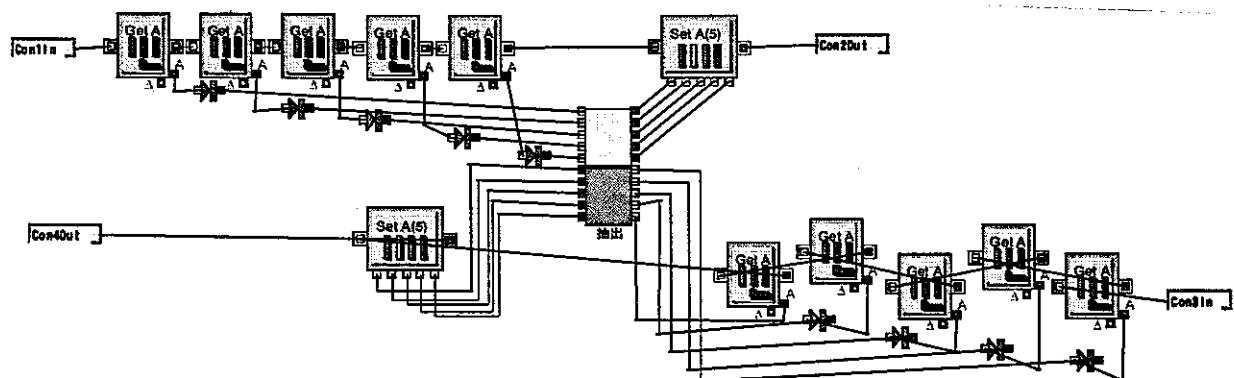


図 A-12 抽出器ユニット

赤い四角で囲まれた [Com1In] 等が、抽出器ユニットのアイテム入出力コネクタに相当する。この図の中のブロックは全て最小単位のブロックであり、これ以上分解することはできない。最小単位のブロックは、ModL 言語という C 言語に非常に近い特徴を備えたプログラム言語で記述されている。図の中央部にある抽出と表記されたブロック以外は、EX・TD に既存のものを利用している。既存のブロックは、データの出し入れやデータ授受のタイミングを揃える役割を担っている。

抽出と表記されたブロックは独自に作成したものであり、内容は本報告書で説明された Cd-溶融塩の 2 相間における元素の平衡状態を計算するものである。以下にソースリストを示す。

```

on simulate
{
    real ii, tap, taa, tar, uccb;
    real msb, usb, psb, asb, rsb, mca, uca, pca, aca, rca;
    real ts, tc, ut, pt, amt, rt;
    real msc, usc, psc, asc, rsc, mcc, ucc, pcc, acc, rcc;
    real disp, disa, disr;

    ii = 100;

    if(msbIn == imsb && mcaIn == imca)
    {
        msb = msbIn;
        usb = usbIn;
        psb = psbIn;
        asb = asbIn;
        rsb = rsbIn;
        mca = mcaIn;
        uca = ucaIn;
        pca = pcaIn;
        aca = acaIn;
        rca = rcaIn;

        ts = msb + usb + psb + asb + rsb;
        tc = mca + uca + pca + aca + rca;

        ut = usb + uca;
        pt = psb + pca;
        amt= asb + aca;
        rt = rsb + rca;

        ucc = 0;

        while(ii > cond)
        {

            uccb = ucc;

            tap = sfp * ((usb/ts)/(uca/tc));
            psc = pt / ((tc/(ts*tap)) + 1);
            disp = pt - (tc * limp * 0.01);
            if(psc < disp)
            {
                psc = disp;
            }
        }
    }
}

```

```

        taa = sfa * ((usb/ts)/(uca/tc));
        asc = amt / ((tc/(ts*taa)) + 1);
        disa = amt - (tc * lima * 0.01);
        if(asc < disa)
        {
            asc = disa;
        }
        tar = sfr * ((usb/ts)/(uca/tc));
        rsc = rt / ((tc/(ts*tar)) + 1);
        disr = rt - (tc * limr * 0.01);
        if(rsc < disr)
        {
            rsc = disr;
        }

        usb = ts - msb - psc -asc -rsc;
        uca = ut - usb;

        ucc = uca;

        ii = realabs((ucc - uccb) / ucc);
        if(psc == disp && asc == disa && rsc == disr)
        {
            ii = 0;
        }

    }

    msc = msb;
    usc = usb;
    mcc = mca;
    pcc = pt - psc;
    acc = amt - asc;
    rcc = rt - rsc;

    mscOut = msc;
    uscOut = usc;
    pscOut = psc;
    ascOut = asc;
    rscOut = rsc;
    mccOut = mcc;
    uccOut = ucc;
    pccOut = pcc;
    accOut = acc;
    rccOut = rcc;

}
else
{
    mscOut = msbIn;
    uscOut = usbIn;
    pscOut = psbIn;
    ascOut = asbIn;
    rscOut = rsbIn;
    mccOut = mcaIn;
    uccOut = ucaIn;
    pccOut = pcaIn;
    accOut = ecaIn;
    rccOut = rcaIn;
}

}

```

EX・TD を利用したコード制作ではこの様に反応の基本式のみをプログラム言語を用いて記述すれば後は、ブロックによるモデリング作業で自由に様々なシステムを組み上げることが可能である。これが、メインルーチンでシステムを固定化してしまう FORTRAN 等の一般的なプログラム言語と比較して大きな自由度を持っている理由である。