

<第 41 回炉物理夏季セミナー報告>

若手研究会報告

廃棄物地層処分に対する組成・発熱量詳細解析および 3次元温度解析

東北大学 量子エネルギー工学専攻 中性子デバイス工学研究室
修士課程 1 年 (岩崎研究室) 神代 洋明

1. 序論

1.1 背景

原子力発電における使用済み燃料から排出される高レベル放射性廃棄物(High-level Radioactive Waste)には、潜在的毒性の強いマイナーアクチノイド(MA)や長寿命核分裂生成物(Long-lived Fission Product)が含まれている。これら HLW は、ガラス固化し地層処分することが想定されている。地層処分は、地下 300m 以深の安定な岩盤中に廃棄体を定置、埋設し、十分な期間人間環境より隔離する。しかし地下にそのような広大な処分場を建設することは技術的・経済的負担がおおきいため、処分場面積は可能な限り小さいことが望まれている。

処分場面積を決める制約条件の一つとして、熱の問題がある。廃棄物は放射性物質であり核崩壊熱を放出する。過度に集積し処分した場合、周囲の構造体の温度が大きく上昇し健全性が損なわれる危険性がある。以上のことから、周囲の構造体の健全性を保つために十分な広さの処分場面積の検討が必要とされており、今までにも数多くの研究がなされている。

1.2 本研究の目的および取り組み

まず、処分場面積解析に関する研究の現状について述べる。

現段階で処理されている廃棄体は、 UO_2 燃料を用いた軽水炉の HLW に PUREX 法に基づく湿式再処理を施した場合が大半であり、過去の地層処分に関する研究の多くがそれらを基準として扱われている。しかし現在、原子炉燃料・原子炉の種類の変り変わりにより HLW 組成の多様化が始まっており、それらに対応仕切れていないことが問題点として挙げられる。HLW 組成の多様化の理由として、以下の項目が挙げられる

- ・ 高速炉の運転
- ・ 再処理により得られた U,Pu を用いた MOX 燃料の装荷とそのサイクル化
- ・ PUREX 法に基づく湿式再処理だけでなく様々な再処理方法が検討されている
- ・ HLW を元素の特性に応じて分離する群分離技術も検討されている

これらの技術は実用化に向けて研究が進んでおり、処分場面積の検討をする場合上記の項目に関しても考慮する必要があると考えられるため、廃棄体の組成・発熱量の詳細解析が必要である。

また処分場面積解析のためには処分場内温度を熱解析により解析する必要があるが、廃棄体組成・発熱量解析と熱解析を連動させた解析コードは存在していない。廃棄体組成・発熱量の多様化が進む現状より、処分場面積解析を一貫して行うことが可能な解析コードの開発が必要と考えられる。

そこで本研究の目的を、廃棄物の組成・発熱量詳細解析および3次元温度解析を用いた処分場面積計算コードの作成とする。具体的な内容としては以下の通りである

- 処分場面積解析システムに必要な機能の決定・開発と検証
- 廃棄体組成・発熱量詳細解析システムの設計
- 処分場面積決定システムの設計

2. 処分場面積解析システムに必要な機能の決定および開発

2.1 処分場面積解析システムに必要な機能の決定と使用コードの決定

処分場面積の解析は、まず解析対象炉より廃棄される廃棄体の組成・および発熱量を解析し、その後その発熱量の廃棄体が設置可能な処分場面積を解析する事で決定することとする。それぞれの解析部を廃棄体組成・発熱量詳細解析システム、処分場面積決定システムとして設計を行う。ここでこれらの解析のために必要な機能および使用コードの決定を行う。まず廃棄体組成・発熱量を解析するための核燃焼計算機能が必要である。次に、得られた廃棄体発熱量を基に処分場内の温度解析を行う熱解析機能が必要である。核燃焼コードは様々なものが存在するが、燃焼の際に考慮可能な核種数が多いこと、中性子輸送計算の際にモンテカルロ法を使用しており自由な体系記述が可能なことから、本研究室で開発された HIDEC コードを使用する。HIDEC は MVP2.0 と ORIGEN2 を接続した統合燃焼計算コードであるが、熱解析機能は存在しない。そこで本研究において、HIDEC コードに熱解析機能を追加する。廃棄体組成・発熱量詳細解析システムおよび処分場面積決定システムの設計はそれぞれ3章、4章で行う。

2.2 熱解析コードの開発

想定した熱拡散方程式は、式(1)のとおりである。

$$\rho c \frac{dH}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad \text{式(1)}$$

但し ρ は密度 [kg/m^3], c は定圧比熱 [$\text{J/Kg} \cdot \text{K}$], H は温度 [$^{\circ}\text{C}$], t は時間 [s], x, y, z は距離 [m], そして λ は熱伝導率 [$\text{W/m} \cdot \text{K}$] である。

式(1)を、有限要素法(ガラーキソ法)を用いて解く非定常熱解析コードを作成した。このとき、要素の形は3次元20節点6面体要素とし、時間に対しクラック・ニコルソンの差分式を用いて非定常問題の解析を行った。HIDEC との接続は今後の課題とし、今回は行わなかった。

式(1)を変形し、最終的に解くべき式は式(2)の通りとなる。

$$\left(\frac{1}{2}[K] + \frac{[C]}{\Delta t}\right)\{H(t + \Delta t)\} = \left(-\frac{1}{2}[K] + \frac{[C]}{\Delta t}\right)\{H(t)\} + \{F\} \quad \text{式(2)}$$

t は無次元時間[sec], Δt :微小時間[sec]であり, q を熱流速[W/m²]とすると

$\{H(t)\}$ が各接点の時間 t での温度を示す

$$[K] = \int_{V^e} \lambda \left(\frac{\delta[N]^T}{\delta x} \frac{\delta[N]}{\delta x} + \frac{\delta[N]^T}{\delta y} \frac{\delta[N]}{\delta y} + \frac{\delta[N]^T}{\delta z} \frac{\delta[N]}{\delta z} \right) dV : \text{熱伝導マトリクス}$$

$$[C] = \int_{V^e} \rho c [N]^T [N] dV : \text{熱容量マトリクス}$$

$$\{F\} = -\int_{V^e} q [N]^T ds : \text{熱流束ベクトル}$$

$[N]$ とは節点温度と要素内部の温度分布を結びつける内挿関数マトリクス(1×nの行マトリクス)である。nは節点数である。

式(2)を使用し, 温度解析を行うことを考えたフローチャート図を図1に示す。

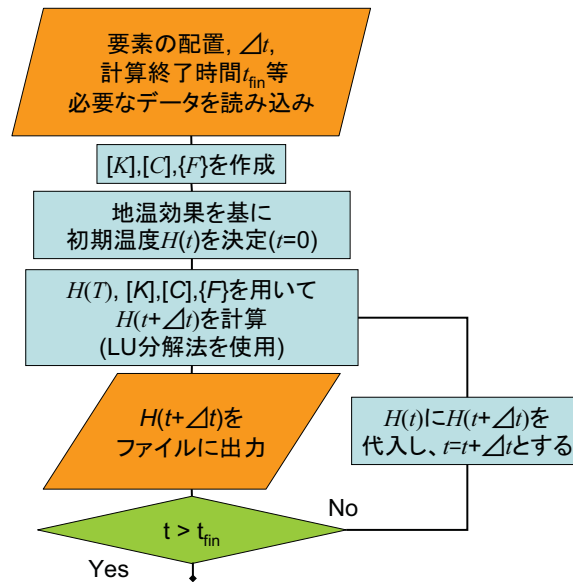


図1 温度解析コードのフローチャート図

熱解析コードは Fortran90 を用いて開発を行い, LU 分解法は LAPACK ライブラリを用いて実装した。

2.3 熱解析コードの検証

作成した熱解析コードの検証を行った。図2のような, 長さ 40mm の棒 (初期温度 $H=0$) の一端 ($x=0$) において, 時刻 $t=0$ で瞬間的に温度が 200°Cに規定される問題を考える。($x=0$ 以外の境界は断熱である。) この問題の解析式は式(3)で与えられる

$$H(x,t) = H_0 \left(1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^m D_n \exp(-\alpha P_n^2 t) \sin P_n x \right) \quad \text{式(3)}$$

但し

$$D_n = \frac{1}{2n-1}, P_n = \frac{(2n-1)\pi}{l}, l = 80 \text{ mm}, H_0 = 200^\circ\text{C}, \alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

$$\rho c = 0.008 \text{ kcal/mm}^3 \cdot ^\circ\text{C}, \lambda = 0.1 \text{ kcal/mm} \square \square \text{ sec}, m = 100$$

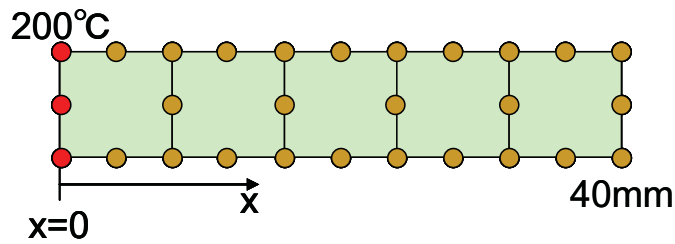


図 2 非定常解析で想定した体系

この棒を 5 つの正六面体要素に分割し、0.1 秒ごとの温度変化を計算した。その結果の数値解と、解析式による解析解を比較し妥当性を確認する。

数値解と解析解の比較を、図 3 と表 1 に示す

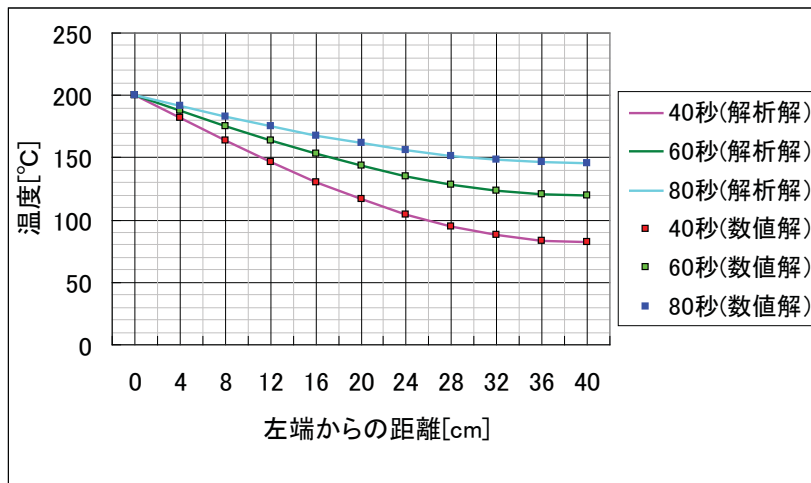


図 3 解析解と数値解の比較図

表 1 各時間での解析解・数値解の最大差

	最大差[%]
40 秒	0.14
60 秒	0.07
80 秒	0.04

図3, 表1より, 数値解と解析解が良い一致を示していることが確認できる。

2.4 2章まとめ

処分場面積解析システムに必要な機能の決定と, 開発を行った。処分場面積解析は廃棄体組成・発熱量解析部と処分場面積決定部に分割して設計することとし, それぞれの解析部での解析のために必要な機能として核燃焼計算機能と熱解析機能が必要であるとした。核燃焼計算には, 解析において考慮可能な核種数が多いこと, 自由な体系記述が可能であることから HIDEC を使用コードとした。しかし HIDEC には熱解析機能は無いため, 本研究で追加・検証を行った。熱解析コードは熱拡散方程式に有限要素法(ガラーキソ法)を適用し, クランク・ニコルソンの差分式を用いて非定常問題を解くことで実装した。開発したコードの検証のため, 解析解の存在する熱伝導非定常問題を作成したコードで数値計算した結果と解析解との比較を行った。その結果, 数値解と解析解が良い一致を示し, 開発したコードが今後の研究において使用可能であることが確認された。

3. 廃棄体組成・発熱量詳細解析システムの設計

3.1 システム概要の設計

燃料サイクル中の炉より廃棄される廃棄体の組成・発熱量の解析を可能にする解析システムを設計する。ここでは, 過去の研究で用いられた手法を参照し, それを基にサイクル解析の可能化, 解析の高度化を行うこととする。図4に従来用いられていた解析手法の例を示す^[1]。

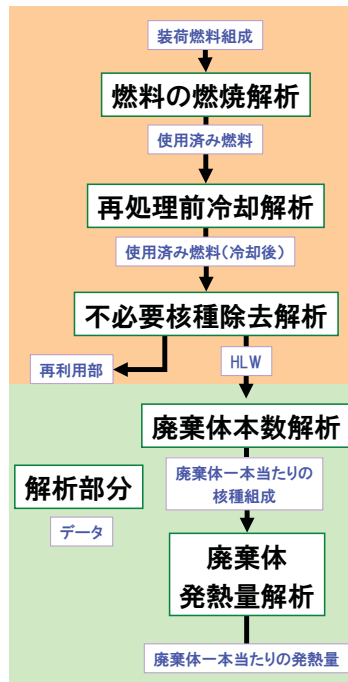


図4 従来の廃棄体組成・発熱量解析手法

緑色の太枠で囲われた部分が実際に計算を行う解析部分であり、紫色の細枠で囲われたものは各計算部の入力・出力データである。核計算には SWAT(SRAC+ORIGEN)コードが用いられている。この従来のシステムを基に、燃料サイクルの可能化、および解析の高度化のための新手法を設計した。図 5 に新手法の廃棄体組成・廃棄体詳細解析システムの概要を示す。

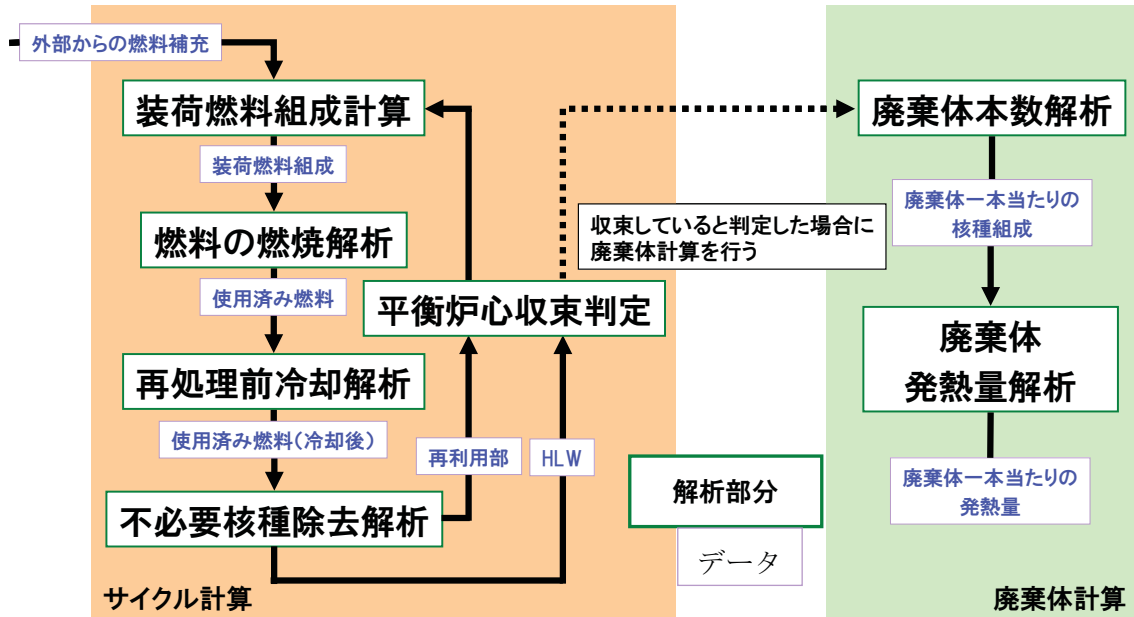


図 5 設計した廃棄体組成・発熱量解析システム 概要

図の見方は、図 4 と同様である。解析はサイクル計算と廃棄体計算に分かれており、サイクル計算中の平衡炉心収束判定においてサイクルが収束したと判定した場合にサイクル計算を打ちやめ、廃棄体計算へと移行する。解析部分の名称が図 4 と同じであっても、解析の詳細、使用するコードを変更している部分があり、その詳細と比較に関して、次節で述べる。

3.2 廃棄体組成・発熱量詳細解析システムの各解析部の詳細および比較

3.1 節で設計した廃棄体組成・発熱量詳細解析システムの各解析部の詳細を述べる。

➤ 燃料の燃焼解析

核燃焼計算を行う。従来は SWAT(SRAC+ORIGEN)を使用していたが、新手法では HIDEK を使用する。HIDEK では千核種以上の燃焼を取り扱うことが可能であるため解析制度の向上が見込まれる。モンテカルロ法を用いる MVP を使用していることにより、近似を含まない高精度の解析が可能となる。使用する断面積ライブラリは JENDL-3.3 である。炉心の種類や燃焼度（出力）を設定し解析を行い、炉心全体の体系を考慮した炉心燃焼計算が可能である。例を以下に示す。

(例)

- ・ PWR 45GWd/ItHM
- ・ BWR 30GWd/ItHM
- ・ 高速炉 800Mwt 600 日

➤ 再処理前冷却解析

燃料の燃焼解析と同様に、HIDECを使用した核燃焼(崩壊)計算を行う。実際の運用例などを基に、再処理可能な放射線量となるまでに必要な再処理前期間を設定する。HIDECコードを使用しているため、上記と同様に千種以上の核種の崩壊を扱うことが可能であり精度の向上が見込まれる。

➤ 不必要核種除去計算

核種毎に除去率を掛け、核種を再利用部と HLW 部に分ける。この部分で使用される除去率は核種毎に除去率を設定することが可能である。除去された部分を HLW、除去されず残ると想定する部分を再利用部とし、装荷燃料組成計算に使用する。

➤ 装荷燃料組成計算

原子炉に装荷する燃料組成を決定する。このとき、再利用部からの燃料を装荷することが可能である。外部からの燃料補充、装荷燃料の条件も設定可能である。不必要核種除去計算より不必要核種が除去された部分、主に U,Pu 等の核種組成を装荷燃料の組成計算に用いることにより燃料サイクルを想定した解析が可能となる。

➤ 平衡炉心収束判定

設定された平衡炉心収束条件と現サイクルの結果の比較を行い、平衡炉心収束条件を満たす場合はサイクル計算を停止し、廃棄体計算へと移行する。平衡炉心とは、現サイクルとそのひとつ前のサイクルの結果がほぼ同じとなることであり、平衡炉心に収束した炉心ではサイクルが進んでも燃料組成・HLW 組成がほぼ変化しないことが期待される。

➤ 廃棄体本数解析

廃棄体条件より、サイクルより排出される廃棄体の本数を計算する。廃棄方法に併せ様々な廃棄体条件を設定可能である。

(例)

- ・ 一括ガラス固化体
- ・ 焼成体(Sr,Cs)
- ・ 高含有ガラス固化体

➤ 廃棄体発熱量解析

再処理前冷却解析と同様に、HIDECを使用した核燃焼（崩壊）計算を行う。このとき、廃棄体発熱量は時間による変化を考慮した解析が可能である。HIDECコードを用いて解析を行うため、従来の解析よりも高精度での解析が見込まれる。

装荷燃料組成計算および平衡炉心収束判定を追加したことにより燃料サイクルを想定した解析が可能となった。また燃焼コードの変更により、解析精度の向上が見込まれる。

3.3 3章まとめ

廃棄体組成・発熱量詳細解析システムの設計を行った。過去の研究を基に、燃料サイクルを想定した解析の可能化、使用コードの変更を行い、解析対象の高度化、計算精度の向上を図った。また下記の各解析部の詳細および比較を述べた。

- 燃料の燃焼解析
- 再処理前冷却解析
- 不必要核種除去計算
- 装荷燃料組成計算
- 平衡炉心収束判定
- 廃棄体本数解析
- 廃棄体発熱量解析

4 処分場面積決定システムの設計

4.1 システム概要の設計

3章で設計した廃棄体組成・発熱量解析システムにより得られた廃棄体発熱量を用いて処分場面積を決定するシステムを設計した。図6にシステムの概要を示す。

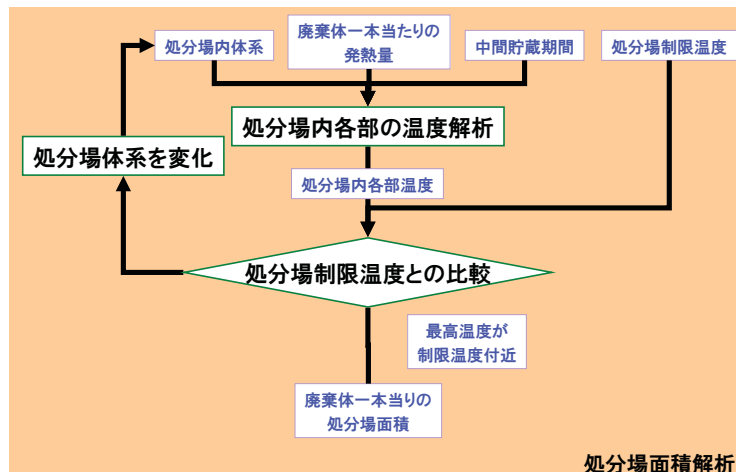


図6 処分場面積決定システム

適切な処分場面積であると判断されるまで、様々な間隔で廃棄体が配置された処分場内体系を用いて温度解析を行う。各解析部の詳細に関して次節で述べる。

4.2 処分場面積決定システムの各解析部の詳細

▶ 処分場内各部の温度解析

開発した熱解析コードを用いて、処分場内各部の温度解析を行う。廃棄体発熱量と中間貯蔵期間、処分場体系を設定可能であり、処分場全体の体系を考慮した熱解析が可能である。また廃棄体発熱量の経時変化を考慮した熱解析が可能であり、計算体系内の総ての部分の温度の経時変化を解析可能である。

▶ 処分場制限温度との比較

処分場制限温度と処分場内温度を比較し、処分場体系が適切か否かを判断する。こちらにも、処分場内温度の系時変化に対応した比較が可能である。

▶ 処分場体系を変化

処分場内の温度が処分場制限温度に対し高ければ廃棄体設置間隔を広げ、処分場内の温度が低ければ廃棄体設置間隔が狭まるように処分場内体系を変更する。

4.3 4章まとめ

処分場面積決定システムの設計を行った。温度解析部には開発した熱解析コードを使用し、3章で設計した廃棄体組成・発熱量解析システムより得られた廃棄体発熱量を用いて解析することを考慮し設計した。下記の各解析部に関してその詳細を述べた。

▶ 処分場内各部の温度解析

▶ 処分場制限温度との比較

▶ 処分場体系を変化

5. 結言

本研究では、廃棄物の組成・発熱量詳細解析および3次元温度解析を用いた処分場面積計算コードの作成のためのシステム設計および必要機能の開発を行った。

1章では序論として背景を述べ、研究の目的を廃棄物の組成・発熱量詳細解析および3次元温度解析を用いた処分場面積計算コードの作成とした。

2章では処分場面積解析システムの設計のための使用コードを HIDEC とし、HIDEC コードに熱計算機能を追加するために熱解析コードの開発を行った。熱解析コードは、熱拡散方程式に対して有限要素法を適用させて解くことで実装した。開発したコードを用いて、解析解の導出が可能である非定常問題の解析解と数値解を比較することで検証を行った。その結果、数値解と解析解が良い一致を示したため熱解析コードの妥当性が証明されたとし、今後の研究で使用可能であるとした。

3章では廃棄体組成・発熱量詳細解析システムおよび処分場面積決定システムの設計を行

い、各解析部の詳細を述べた。システムは過去の研究を基に燃料サイクル計算可能化、計算精度の向上化を図り設計した。

4章では、処分場面積決定システムの設計を行い、各解析部の詳細を述べた。2章で開発した熱解析コードを使用し、また3章で設計した廃棄体組成・発熱量組成解析システムより得られた廃棄体発熱量を用いて解析することを考慮し設計した。

以上で、処分場面積解析コード開発のための各解析システムが得られた。今後はこのシステムのコード開発、および設計したシステムを用いた解析を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 水谷謙一 「高レベル放射性廃棄物の地層処分に対する群分離の高度化に関する研究」．修士学位論文．東北大学(2008)
- [2] 小形好弘 「高レベル放射性廃棄物の地層処分に対する分離変換技術の影響評価」．修士学位論文．東北大学(2009)