

対話型炉心核特性計算コード Interactive Core simulator for Education(ICE) 使用マニュアル

文書番号： D0505003
日付： 2013/04/04 改訂
名前： 遠藤知弘(t-endo@nucl.nagoya-u.ac.jp)
山本章夫(a-yamamoto@nucl.nagoya-u.ac.jp)
配布先：
関連資料：
備考：

内容

1. はじめに	4
2. ICE の概要	4
2.1. 特徴	4
2.2. 制約条件	5
2.3. 開発環境	5
3. 入力データ準備	6
3.1. 対象炉心の選定	6
3.2. 断面積データの作成	6
3.3. 入力データの作成	7
4. ICE 使用方法	8
4.1. インストール・アンインストール法	8
4.2. 起動	9
4.3. 入力データの読み込み	9
4.4. 画面表示	10
4.4.1. 概要	10
4.4.2. 燃料(物質)選択	10
4.4.3. 燃料(物質)配置指定	11
4.4.4. 計算結果表示(1)	11
4.4.5. 計算結果表示(1)選択	11
4.4.6. 計算結果表示(2)	12

4.4.7. 反復回数表示.....	12
4.4.8. 操作ボタン.....	12
4.5. 各種操作.....	13
4.5.1. 原子炉への燃料(物質)装荷.....	13
4.5.2. 原子炉の燃料(物質)シャッフリング.....	13
4.5.3. [Open].....	13
4.5.4. [Save].....	13
4.5.5. [Config].....	14
4.5.6. [Restart].....	15
4.5.7. [All].....	15
4.5.8. [←](Undo).....	15
4.5.9. [→](Redo).....	15
5. 入力データの説明.....	16
5.1. NR.....	16
5.2. BoundaryCondition.....	16
5.3. BucklingZ.....	16
5.4. Length_x.....	16
5.5. Length_y.....	16
5.6. NMesh_x.....	17
5.7. NMesh_y.....	17
5.8. NMat.....	17
5.9. NG.....	17
5.10. MatName.....	17
5.11. MatColor.....	17
5.12. D.....	17
5.13. Sig_a.....	17
5.14. nu_Sig_f.....	18
5.15. chi.....	18
5.16. Sig_s.....	18
5.17. ZoneMat.....	18
5.18. NAssembly.....	18
6. 問い合わせ先.....	19
7. 謝辞.....	19
8. 参考文献.....	19
APPENDIX 1 ICE 計算方法.....	20
APPENDIX 2 入力データ例.....	22

要 約

本資料は、名古屋大学で開発された対話型炉心核特性計算コード ICE の使用方法および計算理論について取りまとめたものである。

1. はじめに

本マニュアルは、名古屋大学で開発された炉心核特性計算コード ICE (Interactive Core simulator for Education), Ver.3.0 を使用するために必要な事項を記載したものである。

2. ICE の概要

ICE は、様々なタイプの原子炉の核特性を二次元体系の多群拡散方程式に基づいて簡易に模擬(シミュレーション)し、その計算結果を視覚的に認識できるソフトウェアである。もともと、教育用に開発されたものであるが、高性能な拡散方程式ソルバーを使用しているため、実機軽水炉など、大規模な体系における計算も十分高速に行うことが可能である。

2.1. 特徴

ICE の特徴を以下に示す。

- Graphic User Interface (GUI)を用いた直感的な操作により、原子炉の基本的な設計およびシミュレーションが可能。
- 計算体系は、入力データにより指定可能であり、様々な原子炉を模擬することが出来る。計算体系の大きさや複雑さに制限はない。
- 多群拡散方程式を使用。また、エネルギー群数に制限はない。
- 各エネルギー群の中性子束分布、核分裂分布(出力分布相当)をグラフィック表示可能。
- 実効増倍率、最大相対出力分布¹などを表示
- 原子炉内の物質の指定および配置の変更(シャッフリング)がマウスのクリックで可能。
- 多群拡散方程式は、通常の有限差分法を用いて解かれる。
- 効率的な収束加速法(粗メッシュ拡散加速法を改良したもの)を使用しているため²、実機軽水炉体系などのように大規模な体系においてもほぼリアルタイムで計算結果を表示可能。
- 境界条件として、反射、真空、周期、回転を使用可能。
- 実機 PWR のように、燃料集合体総数が奇数の体系、BWR の様に偶数の体系、どちらについても 1/1 炉心体系、1/4 炉心体系の取り扱いが可能。

¹ 厳密には $\nu\Sigma_f\phi$ 、すなわち発生中性子数としている。

² A. Yamamoto, Y. Kitamura, T. Ushio, N. Sugimura, "Convergence Improvement of Coarse Mesh Rebalance Method for Neutron Transport Calculations," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **41**, pp.781-789 (2004).

2.2. 制約条件

ICE の制約条件は以下の通りである。

- 燃焼計算を行うことは出来ない。
- フィードバック効果を取り扱うことは出来ない。
- 二次元体系のみの扱い。軸方向漏れは炉心平均のバックリングとして入力可能。
- x-y 座標系
- 画面に表示可能な物質数は 20。(入力データ内の物質の最大数は制約なし。ただし、最初の 20 個が画面に表示される)

2.3. 開発環境

Microsoft VisualStudio.NET 上において、VC++を用いて開発されている。

3. 入力データ準備

入力データが既に準備されている場合、以下の作業は必要でない。しかし、新しい炉心をシミュレーションする必要がある場合には、以下の手順に従って、入力データの準備を行う。

3.1. 対象炉心の選定

本シミュレーターを用いるに際しては、まずシミュレーションを行う対象炉心を選定する必要がある。制約条件でも示したように、本シミュレーターが取り扱える幾何形状は x-y 座標系に限定されているため、高速炉のように六角集合体を用いる体系は直接シミュレーションできない。

体系の複雑さには制約はないため、小型臨界集合体のようにシンプルな体系から実機軽水炉のような大型の体系までをシミュレーション可能である。

3.2. 断面積データの作成

対象とする炉心が決まったら、断面積データの作成を行う。断面積データは、一般には SRAC などの格子計算コードを用いて求めるが、連続エネルギーモンテカルロコード MVP, MCNP などによっても作成可能である。ただし、連続エネルギーモンテカルロコードを用いる場合、散乱マトリックス、拡散係数などの導出に若干の工夫が必要であることから、一般の格子計算コードを用いることを推奨する。

本シミュレーターは、任意の群数で計算が可能である。そのため、作成する断面積のエネルギー群数は任意である。しかし、本シミュレーターの目的の一つが「計算結果をすぐに可視化すること」であることを考えると、エネルギー群数は少ない方がよい。例えば熱中性子炉の場合には 2 群を推奨する。

本シミュレーターの幾何形状の制約から、対象とする原子炉の幾何形状を近似なしに扱うことは一般的には困難である。そこで、均質化を行う必要がある。どの範囲で均質化を行うかは、シミュレーションの目的による。例えば、実機軽水炉のシミュレーションを行う場合、燃料は集合体単位で交換されるため、集合体を均質化して取り扱う必要がある。また、臨界集合体など、より燃料が小さい場合にも、燃料交換を行う単位で均質化をすることを推奨する。例えば、原研の TCA では燃料棒単位で燃料の交換・配置変更を行うことが出来るため、燃料棒(セル)の均質化を行う必要がある。ここで一点注意が必要なのは、GUI で表示される炉心マップの大きさは、一定であることである。そのため、燃料数(領域数)が多ければ一つの燃料要素(領域)は小さく、逆に燃料数が少なければ一つの燃料要素は大きくなる。このことから、あまりにも燃料要素の数を増やすと、GUI 上での燃料の配置・交換が行いにくくなる可能性がある。

3.3. 入力データの作成

前節で求めた断面積データを用いて、入力データの作成を行う。この際、必要なデータは以下のようなものである。

- ・境界条件
- ・軸方向バックリング値
- ・燃料サイズ
- ・物質数
- ・物質名
- ・断面積
- ・初期物質配置
- ・全炉心での集合体数

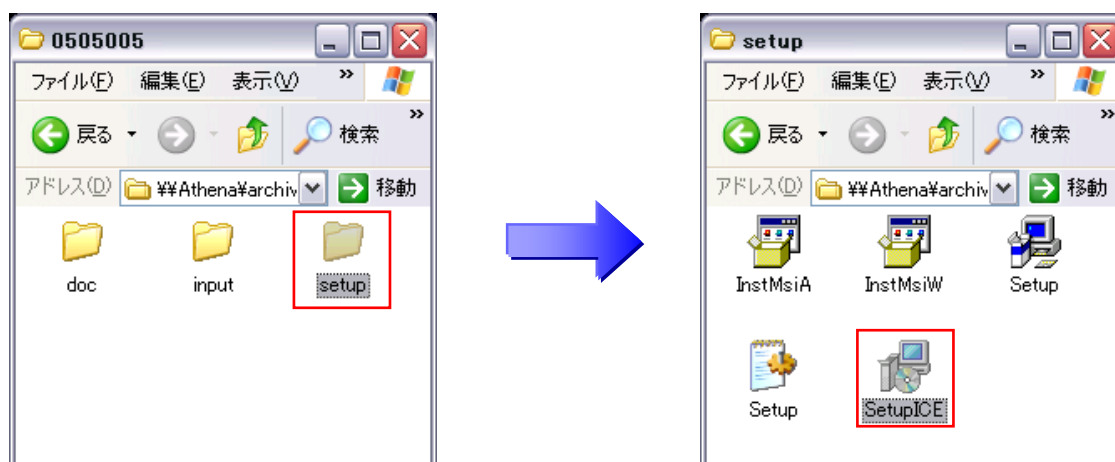
入力データの詳細な説明を 5 章に示す。

4. ICE 使用方法

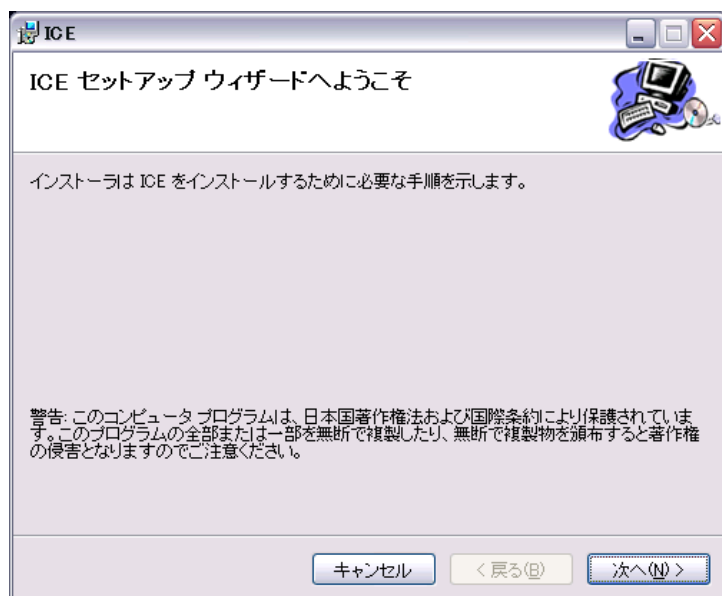
4.1. インストール・アンインストール法

ICE は、Microsoft 社の VisualStudio.NET の VC++言語を用いて開発されている。ICE のインストールは SetupICE Windows インストーラパッケージを用いて簡単にセットアップすることができる。

まず、配布 CD の「setup」ディレクトリにある SetupICE Windows インストーラパッケージをダブルクリックして実行する。



後は「ICE セットアップウィザード」に従って、インストールフォルダを選択することで ICE のセットアップが完了する。



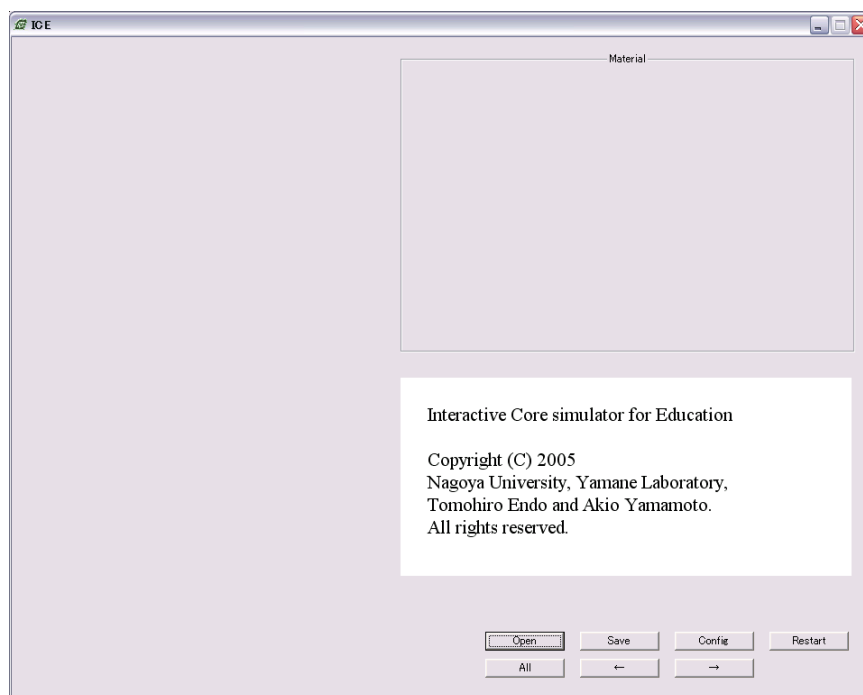
これにより「スタート」→「すべてのプログラム」→「ICE」に ICE のショートカットが作成される。

インストールした ICE をアンインストールする場合には、「コントロールパネル」→「プログラムの追加と削除」→「ICE」を選択すればよい。

4.2. 起動

ICE を起動するためには、「スタート」→「すべてのプログラム」→「ICE」にある ICE のショートカットをダブルクリックすることで起動することができる。なお ICE のアイコンは名古屋大学のマークである。

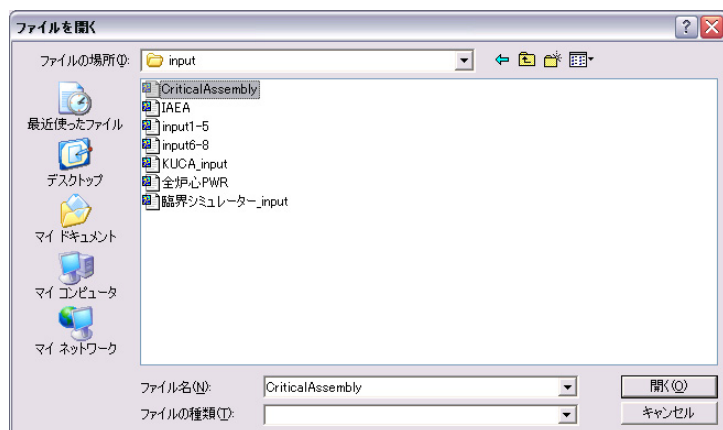
これにより ICE が起動し、初期画面が表示される。



4.3. 入力データの読み込み

ICE を起動した段階では、計算体系などの情報は全く設定されていない。これを設定するために、入力データを読み込む必要がある。

入力データは、起動画面の[Open]ボタンをクリックし、表示されるファイル選択ダイアログから入力データを指定する。

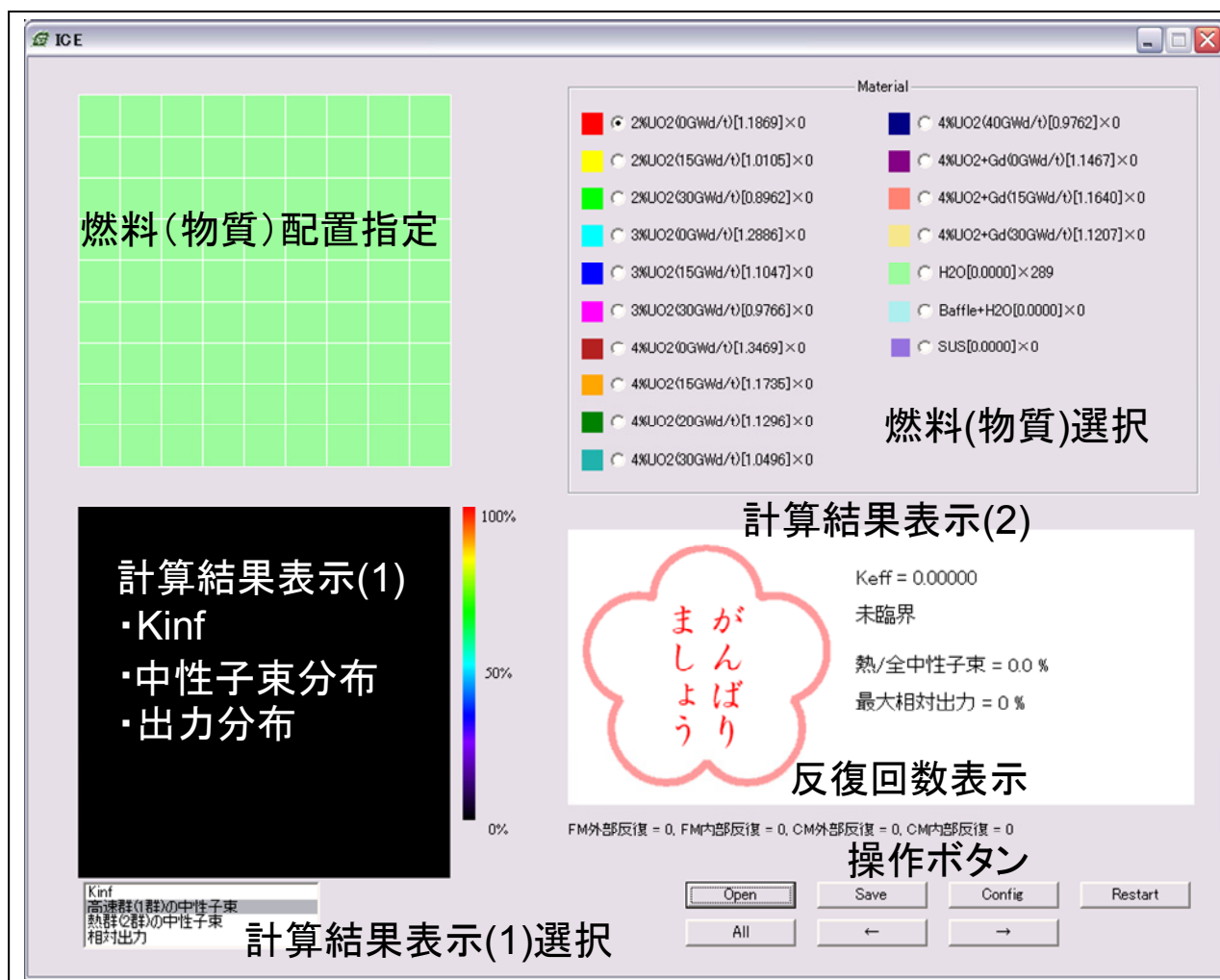


表示されたファイルのうち入力データを選択し、[開く]をクリックするとデータが読み込まれる。なお、入力データに誤りなどがある場合は、この時点でエラーメッセージなどが表示される。

4.4. 画面表示

4.4.1. 概要

入力データが読み込まれると、以下のような画面が表示される。ただし、画面の状態は入力データによって変化するため、以下と完全に同じ画面になるとは限らない。



以下に実行画面の各部について説明を示す。

4.4.2. 燃料(物質)選択

原子炉に配置する燃料(物質)を選択する。各燃料(物質)は

- ・燃料(物質)の名前[Kinf]×燃料(物質)体数

の書式で表示される。ここで Kinf とはその燃料(物質)の無限増倍率の値であり、入力データを読み込む際に自動的に計算される³。また燃料(物質)体数は、原子炉内に選択した物質が全部で何体配置され

³ Kinf は収束判定基準 10^{-5} として反復計算により求めている。

ているかを表す。炉心を 1/4 体系で模擬する場合、必ずしも燃料(物質)配置指定画面における体数とは一致しないことに注意しなければならない(入力データ説明の NAssembly の項目を参照)。

各燃料(物質)の書式の左隣には、燃料(物質)配置指定画面にその燃料(物質)を配置した時の色が表示されている。この色を変更したい場合には、その色が表示されている四角領域にマウスのカーソルを持っていき右クリックすることで、「色の設定」ダイアログを開くことができる。



このダイアログにおいて色を選択することで、燃料(物質)の色を変更することができる。「色の作成」をクリックすることで、より詳細な色の決定が可能である。

4.4.3. 燃料(物質)配置指定

原子炉内の燃料(物質)の配置を指定する。マウスの左クリックを押すことで燃料(物質)を原子炉内に装荷し、右クリックを押すことで原子炉内における燃料(物質)のシャッフリングを行う。詳細については 4.5 節に示す。

4.4.4. 計算結果表示(1)

原子炉内の燃料(物質)の K_{inf} のマップや、中性子束分布、出力分布を表示する。中性子束分布は

$$k_{eff} = \langle \nu \Sigma_f \phi \rangle$$

となるように規格化されている。また、出力分布は、原子炉内の燃料部分のみに対する出力の体積重み平均値を 1.0(100%)として、規格化された形で表示される。なお出力分布は、厳密には中性子発生量分布($\nu \Sigma_f \phi$)であることに注意する必要がある。ここで表示される結果は、計算メッシュごとの値である。領域内を詳細にメッシュ分割して計算を行えば、計算結果はスムーズな表示となる。一方、メッシュ分割が荒い場合、計算結果はモザイク状となる。また各メッシュの実際の長さに関係なく、単純にメッシュごとに結果が出力されるので、各メッシュ幅を同じにして計算したほうが出力結果は見やすくなる。

4.4.5. 計算結果表示(1)選択

計算結果表示(1)画面に表示する計算結果を選択する。普通の k_{eff} 固有値計算の場合には、 K_{inf} 、各エ

エネルギー群の中性子束、相対出力が選択できる。なお[Config]において随伴計算をチェックした場合には、Kinf、各エネルギー群の随伴中性子束が選択できる。

4.4.6. 計算結果表示(2)

実効増倍率、余剰反応度、熱/全中性子束、最大相対出力を表示する。熱/全中性子束比は炉心全体の
中性子束の積分値に対する値が表示される。また、最大相対出力は、炉心内でもっとも相対出力の大
きな部分(計算メッシュ)の値を表示する。

また、計算された原子炉の特性に応じて、「よくできました」などの評価が表示される。判定基準は
以下のようにになっている。

「がんばりましょう」：実効増倍率が 1.0 未満、もしくは最大相対出力が 170%以上

「よくできました」：実効増倍率が 1.0 以上かつ最大相対出力が 150%~170%

「たいへんよくできました」：実効増倍率が 1.0 以上かつ最大相対出力が 130%~150%

「免許皆伝」：実効増倍率が 1.0 以上かつ最大相対出力が 120%~130%

「??⁴」：実効増倍率が 1.0 以上かつ最大相対出力が 120%未満

[Config]において随伴計算の項目チェックした場合、随伴計算には出力という概念が無いので、「がん
ばりましょう」等の評価はどれだけ臨界近接できたか(k_{eff} をどれだけ 1 に近づけたか)によって決定さ
れる。

4.4.7. 反復回数表示

収束解を得るまでの反復回数を表示する。収束解を得るまでの反復回数を表示する。FM は詳細メッ
シュ計算を、CM は、粗メッシュ加速計算(CMFD 加速法)を示す。いずれも計算をスタートしてから収
束にいたるまでの合計値である。

4.4.8. 操作ボタン

ICE の操作を行うためのボタンである。詳細については次節に示す。

⁴ 秘密である。

4.5. 各種操作

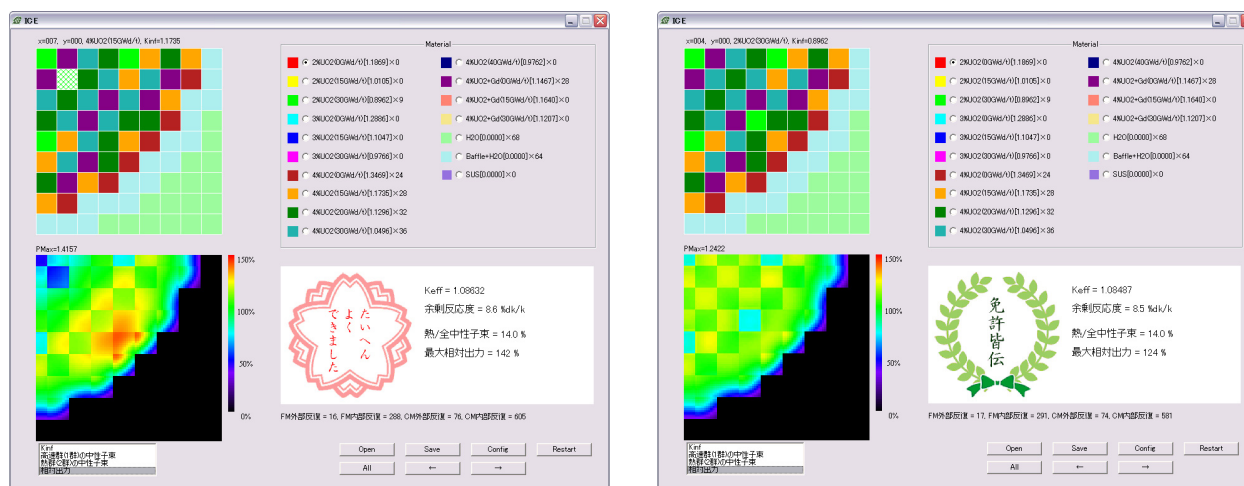
4.5.1. 原子炉への燃料(物質)装荷

原子炉へ燃料(物質)を配置するためには、燃料(物質)選択画面で配置したい燃料(物質)をマウスの左クリックで選択する。その後に、燃料(物質)配置指定画面において、領域(グリッド、マス目)をマウスで左クリックすると、その位置に選択した物質が配置される。配置した瞬間から計算を行い、計算終了とともに結果を表示(更新)する。また、[All]ボタンを押すと指定された物質が全ての計算領域に配置される。計算を最初からやり直したいときなどに有用である。

4.5.2. 原子炉の燃料(物質)シャッフリング

原子炉内で燃料(物質)の位置を交換するためには、燃料(物質)配置指定画面において、交換したい燃料(物質)の領域をマウスで右クリックする。すると、右クリックされた領域が網掛け表示になる。その状態で、別の領域をマウスで右クリックすると、位置の交換が完了する。交換した瞬間から計算を行い、計算終了とともに結果を表示(更新)する。

なお、炉心を 1/4 体系で模擬する場合、炉心の位置ごとに(全炉心体系の)燃料体数が異なる場合がある(入力データ説明の NAssembly の項目を参照)。このような領域間では燃料の交換はできない。具体的には、NAssembly の値が異なっている領域間では、燃料(物質)の交換を行うことはできない。



4.5.3. [Open]

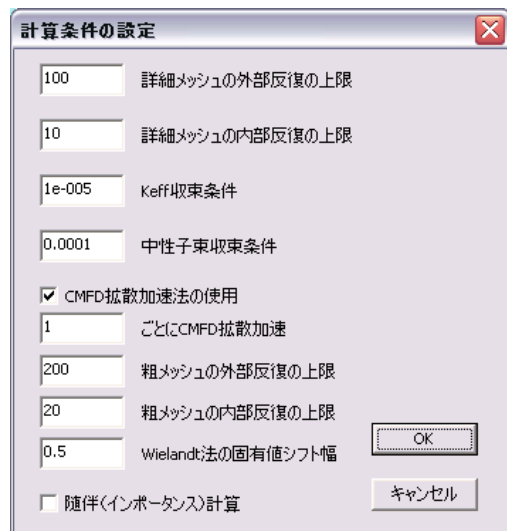
操作ボタンの[Open]をクリックすることで、入力データを読み込むことができる。すでに入力データが読み込まれていた場合には、その入力データは破棄されて新規に入力データが読み込まれる。

4.5.4. [Save]

操作ボタンの[Save]をクリックすることで、現在設計した原子炉の情報を ICE の入力テキスト形式でセーブすることができる。具体的には各燃料(物質)の色および配置がセーブできる。ただし、現在読み込まれている入力データに対して上書きすることはできない。

4.5.5. [Config]

操作ボタンの[Config]をクリックすることで、「計算条件の設定」ダイアログを開くことができる。



具体的にここで設定できる条件は以下のようなものである。

- ・ 詳細メッシュ計算の外部反復の上限 (初期値: 100)
- ・ 詳細メッシュ計算の内部反復の上限 (初期値: 10)
- ・ 詳細メッシュ計算の k_{eff} の収束判定基準 (初期値: 1.0×10^{-5})
- ・ 詳細メッシュ計算の中性子束の収束判定基準 (初期値: 1.0×10^{-4})
- ・ CMFD 拡散加速法を使用するか否か (初期値: CMFD 拡散加速法を使用)
- ・ 詳細メッシュの外部反復の何回ごとに CMFD 拡散加速法を適用するか (初期値: 1)
- ・ 粗メッシュ計算の外部反復の上限値 (初期値: 200)
- ・ 粗メッシュ計算の外部反復の上限値 (初期値: 20)
- ・ 粗メッシュ計算における Wielandt 法の固有値シフト幅 (初期値: 0.5)
- ・ 随伴固有値計算を行う (初期値: 行わない、普通の k_{eff} 固有値計算)

ICE は実数の計算を倍精度(double)で行っているため、 k_{eff} や中性子束の収束判定基準がある程度厳しくても(例えば 10^{-10} 以下でも)計算が可能である。ただし、あまりに厳しくすると数値計算の丸め誤差により判定基準を満たす収束解が得られないことに注意する必要がある。

もし万が一計算が発散するようならば、計算条件を以下の順に沿って設定し直すと、計算が発散せずに上手く計算できるかもしれない。

- ① Wielandt 法の固有値シフト幅を大きな値にする (例えば固有値シフト幅を 1.0×10^{16} にすると Wielandt 法を適用しないことになる)。
- ② 詳細メッシュの外部反復 1 回ごとではなく、多数回詳細メッシュの外部反復をした後に CMFD 拡散加速法を適用する
- ③ ②でも発散する場合、CMFD 拡散加速法を使用しない

以上の①～③の計算条件の設定することで、より安定に計算が収束するようになる。しかし、その分収束するまでの計算時間が長くなる。

4.5.6. [Restart]

操作ボタンの[Restart]をクリックすることで、現在の k_{eff} ・中性子束分布の収束値を引き継いで再計算を行うことができる。なお、燃料(物質)の配置変更などを行う通常の場合には、全て平坦な初期中性子束分布を仮定して計算を行っている。

収束判定基準を満たさずに詳細メッシュの外部・内部反復の上限を超えた場合には、何回か Restart することで収束解を得ることができる。

また一見無事に計算が収束した場合でも、 k_{eff} ・中性子束分布が疑似収束している場合があるので、Restart することで正しく収束しているかどうか確認することができる。 k_{eff} ・中性子束分布が疑似収束に陥る場合、[Config]で k_{eff} ・中性子束分布の収束判定基準を厳しく設定し直したほうがよい。

4.5.7. [All]

操作ボタンの[All]をクリックすることで、現在選択している燃料(物質)が全ての計算領域に配置される。誤って[All]ボタンを押してしまった時には、あせらず[←]ボタンを押して1個前の炉心に戻せばよい。

4.5.8. [←](Undo)

操作ボタンの[←]をクリックすることで、直前に行った操作を取り消す(undo)することができる。操作の取り消しは、過去 100 回分にさかのぼって行うことができる。燃料をシャッフリングするつもりが誤って左クリックを押して別の燃料を装荷してしまった場合や、誤って[All]ボタンを押してしまった際には[←]をクリックすればよい。

4.5.9. [→](Redo)

操作ボタンの[→]をクリックすることで、「操作の取り消し」の取り消し、すなわち redo を行うことが可能である。

5. 入力データの説明

入力データファイルの形式は以下の順に沿って記述される。空白およびタブが入力の区切りとなる。また大文字・小文字を厳密に区別することに注意が必要である。

5.1. NR

炉心内の燃料(物質)領域の x, y 方向の数を入力する。炉心内の物質配置の表示は、この領域毎に行われる。また、CMFD 拡散加速計算を行う際には、この領域が CMFD 拡散加速計算の粗メッシュに対応する。

5.2. BoundaryCondition

West(左端)、East(右端)、North(上端)、South(下端)の順に境界条件を入力する。以下のパラメータを選択することが出来る。

Reflective : 完全反射境界条件。その境界で中性子が完全に反射する境界条件。その境界を線対称として、反対側にも同じ体系が存在する、という仮定になる。

Vacuum : 真空境界条件。その境界から流出した中性子は戻ってこないという仮定になる。

Periodic : 周期境界条件。反対側から流出・流入した中性子が、着目している境界から流入・流出する、という境界条件。本境界条件が指定されると、反対側の境界条件は強制的に **Periodic** となる。

Rotational : 回転境界条件。体系の左上を回転の中心とする回転境界条件のみが使用できる。すなわち、左端と上端のみにたいして **Rotational** を使用可能である。この境界条件が適用されると、上端から流出・流入した中性子が、左端から流入・流出することとなる。

5.3. BucklingZ

軸方向バックリングを入力する。以下のパラメータを入力できる。

No : 軸方向バックリングを使用しない。

Yes : 軸方向バックリングを使用する。この場合は、続けて軸方向バックリングの値[1/cm²]を入力する。

5.4. Length_x

各領域の x 方向の長さ[cm]を NR で指定した領域数分入力する。

5.5. Length_y

各領域の y 方向の長さ[cm]を NR で指定した領域数分入力する。

5.6. NMesh_x

各領域の x 方向のメッシュ分割数を NR で指定した領域数分指定する。中性子束・相対出力のグラフィック表示は、このメッシュ毎に行われる。

5.7. NMesh_y

各領域の y 方向のメッシュ分割数を NR で指定した領域数分指定する。中性子束・相対出力のグラフィック表示は、このメッシュ毎に行われる。

5.8. NMat

入力データに用意する燃料(物質)数。数に制約はないが、画面上に表示されるのは、最初の 20 個までである。

5.9. NG

高速、熱エネルギー群数。画面表示の"熱/全中性子束"の表示は、ここで入力したエネルギー群の指定を用いて計算される。

5.10. MatName

燃料(物質)名。NMat で指定した物質数分入力する。名前にスペースを入れることは出来ない。スペースを入れたい場合にはアンダースコア"_"で代用すること。

5.11. MatColor

画面上に表示される燃料(物質)の色を指定する。以下のパラメータを指定可能である。

Skip : 物質の色をデフォルト処理に委ねる。

Set : 物質毎の色を RGB(各要素 0~255)で入力する。全ての物質について、配色情報を入力する必要がある。例えば、物質が 10 個ある場合、 $3(\text{RGB}) \times 10(\text{物質数})=30$ のデータを入力する必要がある。

5.12. D

物質毎の拡散係数[cm]を入力する。物質毎に 1~NG まで入力し、それを物質数 NMat だけ繰り返す。

5.13. Sig_a

物質毎の巨視的吸収断面積[1/cm]を入力する。ここで、吸収の定義は、捕獲+核分裂であり、散乱断面積の寄与を含まない。入力形式は拡散係数と同じである。

5.14. nu_Sig_f

物質毎の巨視的核分裂断面積 $\times \nu$ [1/cm]を入力する。入力形式は拡散係数と同じである。

5.15. chi

物質毎の核分裂スペクトルを入力する。入力形式は拡散係数と同じである。非核分裂性物質については、0を入力する。

5.16. Sig_s

物質毎の散乱断面積[1/cm]を入力する。物質毎に
1→1 群、1→2 群 …… 1→NG 群、2 群→1 群、2 群→2 群 …… 2 群→NG 群 ……
と入力し、これを物質数 NMat だけ繰り返す。

5.17. ZoneMat

ICE を起動したときの初期物質配置を指定する。なお、ICE では、物質番号は 0 から始まる定義と
なっていることに注意しなければならない。以下のパラメータを指定可能である。

All : All を指定したとき、引き続いて入力された番号の物質が全領域に配置される。

Set : Set を指定したとき、引き続いて初期物質配置を物質番号で全領域数分指定する。

5.18. NAssembly

計算体系を全炉心に展開した場合の各領域における燃料体数を指定する。以下のパラメータを指定
可能である。

Skip : 計算体系が全炉心に対応する場合、全ての領域で NAssembly は 1 として入力される

Set : 原子炉を 1/4 体系で模擬するとき使用する。特に、PWR など、炉心に装荷される燃料集合体数
が奇数のものについては、本パラメータを設定しないと、1/4 炉心体系の計算時に燃料体数が正し
く表示されない。また、ここで入力した値が異なる炉心位置の間で、燃料(物質)の配置交換を行う
ことが出来ない設定となっている。

6. 問い合わせ先

ICE を使用した際に、計算結果がおかしかったり、何らかのバグを発見された場合には、下記の連絡先までご連絡下さい。

名古屋大学 工学研究科 マテリアル理工学専攻 量子エネルギー工学分野
量子エネルギーシステム工学講座 助教 遠藤 知弘
t-endo@nucl.nagoya-u.ac.jp

7. 謝辞

まず ICE の原型となる計算コードを過去に開発して下さい、本研究室卒業の須田さんに厚く御礼を申し上げます。過去に須田さんが開発された「臨界シミュレーター」を現在の PC でも使えるように作り直したい、というのが、私が ICE を開発するに至った動機でありました。

私が学部 4 年の頃から思い描いていたこの目標を、4 年間という年月を経て何とか達成することができたのも、山本章夫助教授によるご助言の賜物であったと感謝しております。この場を借りて厚く御礼を申し上げます。

遠藤 知弘

8. 参考文献

- [1] A. Yamamoto, Y. Kitamura, T. Ushio, N. Sugimura, “Convergence Improvement of Coarse Mesh Rebalance Method for Neutron Transport Calculations,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **41**, pp.781-789 (2004).
- [2] 小林啓祐, 原子炉物理, コロナ社, (1996)
- [3] M. Tatsumi and A. Yamamoto, “Advanced PWR Core Calculation Based on Multi-group Nodal-transport Method in Three-dimensional Pin-by-Pin Geometry,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **40**, pp.376-387 (2003)-
- [4] T. M. Sutton, “Wielandt Iteration as Applied to the Nodal Expansion Method,” *Nucl. Sci. Eng.*, **98**, pp.169-173 (1988)

Appendix 1 ICE 計算方法

ここでは ICE の計算方法について述べる。ICE は、二次元体系の多群拡散方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_g(x, y) \frac{\partial \phi_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-D_g(x, y) \frac{\partial \phi_g}{\partial y} \right) + \Sigma_{r,g}(x, y) \phi_g(x, y) \\ &= \frac{1}{k_{\text{eff}}} \chi_g(x, y) \sum_{g'=1}^G \nu \Sigma_{f,g'}(x, y) \phi_{g'}(x, y) + \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^G \Sigma_{s,g' \rightarrow g}(x, y) \phi_{g'}(x, y) \end{aligned}$$

$$\Sigma_{r,g}(x, y) = \Sigma_{a,g}(x, y) + D_g(x, y) B_z^2 - \Sigma_{s,g \rightarrow g}(x, y)$$

B_z^2 : 炉心平均の z 軸方向のバックリング

を有限差分法により解いている。各エネルギー群の内部反復の計算は線逐次緩和法(LSOR)を用いている^[2]。ただし LSOR の加速因子 ω は 1 としている。

このままでは収束解を得るまでに計算時間が掛かるので、外部反復の回数を削減するための加速法として、CMFD (Coarse-Mesh Finite-Difference) 拡散加速法を使用している^[3]。CMFD 拡散加速法とは、本来より粗い空間メッシュ・エネルギー群数の中性子拡散方程式を解き、その結果を利用することで、詳細な空間メッシュ・エネルギー群数の計算の収束を早くする方法である。ただし単純な粗メッシュ計算では詳細メッシュの計算を再現することができないので、粗メッシュ計算において詳細メッシュの中性子の流れを再現するように補正項が加えられる。

ICE の場合、何回か詳細メッシュの外部反復計算を行った後に、各燃料(物質)領域を粗い空間メッシュとした 1 群拡散計算を行う。ただし、その際に詳細メッシュの反応率を再現するように、各燃料(物質)領域の断面積を 1 群に縮約する。また、詳細メッシュにおける中性子の流れを再現するように、粗メッシュにおける中性子の流れの計算に以下のような補正項を加える。

$$J_{i+1/2}^{\text{coarse}} = -\frac{2D_i D_{i+1}}{D_i \Delta_{i+1} + D_{i+1} \Delta_i} (\phi_{i+1}^{\text{coarse}} - \phi_i^{\text{coarse}}) + D_{i+1/2}^+ \phi_i^{\text{coarse}} - D_{i+1/2}^- \phi_{i+1}^{\text{coarse}}$$

D_i : 粗メッシュ i における 1 群拡散係数

Δ_i : 粗メッシュ i のメッシュ幅

ϕ_i^{coarse} : 粗メッシュ i の 1 群中性子束

$D_{i+1/2}^+$ 、 $D_{i+1/2}^-$: 粗メッシュにおける中性子の流れの補正係数

ここで 2 つの補正係数 $D_{i+1/2}^+$ 、 $D_{i+1/2}^-$ は、詳細メッシュと粗メッシュで + 向き中性子の流れと - 向き中性子の流れがそれぞれ同じになるように決定する。つまり、部分中性子流を保存するように決定する。

まず、詳細メッシュにおける領域境界の中性子の正味の流れ $J_{i+1/2}^{\text{fine}}$ と領域境界の中性子束 $\phi_{i+1/2}^{\text{fine}}$ を求める。次に、詳細メッシュにおける + 向き中性子の流れ $J_{i+1/2}^+$ と - 向き中性子の流れ $J_{i+1/2}^-$ を以下のように求める。

$$J_{i+1/2}^+ = \frac{1}{4}\phi_{i+1/2}^{fine} + \frac{1}{2}J_{i+1/2}^{fine}$$

$$J_{i+1/2}^- = \frac{1}{4}\phi_{i+1/2}^{fine} - \frac{1}{2}J_{i+1/2}^{fine}$$

こうして求められた $J_{i+1/2}^+$, $J_{i+1/2}^-$ より、補正係数 $D_{i+1/2}^+$, $D_{i+1/2}^-$ を以下の式から求める。

$$J_{i+1/2}^+ = -\frac{D_i D_{i+1}}{D_i \Delta_{i+1} + D_{i+1} \Delta_i} (\phi_{i+1}^{coarse} - \phi_i^{coarse}) + D_{i+1/2}^+ \phi_i^{coarse}$$

$$J_{i+1/2}^- = \frac{D_i D_{i+1}}{D_i \Delta_{i+1} + D_{i+1} \Delta_i} (\phi_{i+1}^{coarse} - \phi_i^{coarse}) + D_{i+1/2}^- \phi_{i+1}^{coarse}$$

ICE では、この粗メッシュ拡散計算を、粗メッシュの k_{eff} ・中性子束が十分収束するまで行う（具体的には、詳細メッシュ計算の外部・内部反復の判定基準の 0.5 倍の判定基準を満足するまで、粗メッシュの外部・内部反復を行う）。こうして収束した粗メッシュの 1 群中性子束を再現するように、詳細メッシュの中性子束を規格化することで、詳細メッシュ計算の収束性を向上させている。

ただし収束するまで粗メッシュ拡散計算を行っているので、詳細メッシュの k_{eff} と中性子束が収束するまでには、必然的に粗メッシュの計算回数がかかなり多くなる。そこで、粗メッシュ拡散計算の外部反復の回数を減らすために、Wielandt 法を適用した^[4]。Wielandt 法とは、解くべき固有値方程式

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right) J^{coarse} + \Sigma_a \phi^{coarse} = \frac{1}{k_{\text{eff}}} \nu \Sigma_f \phi^{coarse}$$

を以下のように変形することで、外部反復の収束効率を上げる手法である。

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right) J^{coarse} + \left(\Sigma_a - \frac{\nu \Sigma_f}{\lambda} \right) \phi^{coarse} = \left(\frac{1}{k_{\text{eff}}} - \frac{1}{\lambda} \right) \nu \Sigma_f \phi^{coarse}$$

ここで λ は k_{eff} の推定値であり、 λ が k_{eff} の収束値に近ければ近いほど外部反復の回数を少なくすることができる。ただし、その代償として、左辺の行列の対角成分が小さくなるので、内部反復の回数は増える傾向がある。ICE では

$$\lambda = k_{\text{eff}} + \delta$$

として Wielandt 法で用いる λ の固有値シフト幅 δ を計算条件として設定することができる。 δ を小さくすれば粗メッシュ計算の外部反復回数を減らすことが期待できるが、あまりに δ を小さくし過ぎると粗メッシュ計算の内部反復の回数が増えるのであまりメリットはない。また δ を十分に大きくすれば（例えば δ を 1.0×10^{16} に設定すれば）、結果的に Wielandt 法を適用しないことになる。

Appendix 2 入力データ例

入力データのサンプルは、配布 CD の「input」ディレクトリの中に入っている。「input」ディレクトリにある入力データのサンプルの概要を以下に示す。

- CriticalAssembly.txt : 臨界集合体模擬体系
- IAEA.txt : IAEA2 次元体系のベンチマーク体系
- KUCA.txt : KUCA 模擬体系
- PWR1.txt : PWR1/4 体系(燃料装荷用)
- PWR2.txt : PWR1/4 体系(シャッフリング用)
- PWR3.txt : PWR 全炉心体系
- 臨界シミュレーター.txt : ICE の原型である「臨界シミュレーター」の入力データ一例として、CriticalAssembly.txt の内容を以下に示す。

< CriticalAssembly.txt : 臨界集合体模擬体系 >

```
NR      16      16
BoundaryCondition      Rotational Vacuum      Rotational Vacuum
BucklingZ      No
Length_x
5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0
Length_y
5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0
NMesh_x
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
NMesh_y
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
NMat    15
NG      1      1
MatName
1%濃縮ウラン燃料
2%濃縮ウラン燃料
3%濃縮ウラン燃料
4%濃縮ウラン燃料
5%濃縮ウラン燃料
```

10%濃縮ウラン燃料

20%濃縮ウラン燃料

水

重水

Be

黒鉛

鉄

Gd

Hf

B4C

MatColor Set

0 143 0
50 205 50
173 255 47
255 255 0
255 215 0
255 165 0
255 0 0
0 255 255
0 0 255
138 43 178
0 0 0
192 192 192
0 0 139
255 255 255
128 128 128

D

1.2122 4.0147e-1
1.2147 4.3208e-1
1.2173 4.4988e-1
1.2198 4.6091e-1
1.2224 4.6793e-1
1.2344 4.7686e-1
1.2562 4.5941e-1
1.6284 1.5109e-1
1.2965 6.9329e-1
6.6163e-1 4.8247e-1

8.3613e-1	6.2299e-1
1.0951	3.3051e-1
2.0479	5.9030e-1
1.1194	2.3460e-1
3.7949	1.6134e-1

sig_a

1.1980e-2	6.8726e-2
1.2980e-2	9.3310e-2
1.3898e-2	1.1225e-1
1.4750e-2	1.2796e-1
1.5547e-2	1.4158e-1
1.8930e-2	1.9329e-1
2.3918e-2	2.6370e-1
2.6316e-4	1.8490e-2
3.6889e-5	3.6673e-5
4.8639e-4	8.0644e-4
1.3280e-5	3.4232e-4
1.5937e-3	2.9197e-2
8.6582e-3	4.3602e-1
1.0773e-2	9.7370e-1
6.7836e-3	1.9235

nu_sig_f

6.0372e-3	9.0727e-2
8.0525e-3	1.4922e-1
9.9292e-3	1.9314e-1
1.1692e-2	2.2885e-1
1.3358e-2	2.5932e-1
2.0626e-2	3.7168e-1
3.1900e-2	5.1885e-1
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0

chi

1.0 0.0
1.0 0.0
1.0 0.0
1.0 0.0
1.0 0.0
1.0 0.0
1.0 0.0
0.0 0.0
0.0 0.0
0.0 0.0
0.0 0.0
0.0 0.0
0.0 0.0
0.0 0.0
0.0 0.0
0.0 0.0

sig_s

2.4156e-1	2.1498e-2	6.8084e-6	7.6155e-1
2.4073e-1	2.0752e-2	9.4046e-6	6.7814e-1
2.3991e-1	2.0075e-2	1.1504e-5	6.2868e-1
2.3910e-1	1.9456e-2	1.3328e-5	5.9523e-1
2.3832e-1	1.8884e-2	1.4979e-5	5.7076e-1
2.3463e-1	1.6539e-2	2.1966e-5	5.0571e-1
2.2814e-1	1.3349e-2	3.3649e-5	4.6183e-1
1.5171e-1	5.2722e-2	1.2694e-6	2.1877
2.4365e-1	1.3463e-2	8.3278e-9	4.8076e-1
4.9407e-1	1.0489e-2	5.3953e-7	6.9009e-1
3.9288e-1	5.7680e-3	3.8379e-7	5.3471e-1
3.0228e-1	5.0304e-4	4.8505e-4	9.7887e-1
1.5412e-1	3.0621e-35	5.9665e-4	1.2807e-1
2.8704e-1	6.5254e-34	2.0223e-3	4.4515e-1
8.1054e-2	1.0052e-19	9.1338e-5	1.4239e-1

ZoneMat All 7
NAssembly skip
END