

令和5年度 RSICCユーザ会 会員講習会

ADVANTGとMCNPを用いた最適分散低減法による モンテカルロ法遮蔽解析（入門編＋応用編）

令和5年10月18日(水)、19日(木)

合同会社 ニュークリア・テクノロジー・コンサルティング

内 容

10月18日(水)

9:45 – 12:00

解析システムの動作確認

講義:「Ⅰ 最適分散低減法(CADIS法)の概要」

- 1. モンテカルロ法遮蔽計算と分散低減 p.5
- 2. MCNPの分散低減手法 p.13
- 3. 自動分散低減理論”CADIS“ p.22

講義:「Ⅱ ADVANTGコードの概要と使用方法」

- 1.ADVANTGコードの概要 p.32
- 2.ADVANTGコードの入力データ p.36

13:00 – 16:30

講義:「Ⅱ ADVANTGコードの概要と使用方法」(続き)

- 3.ADVANTGコードの実行方法 p.45

演習1:「単純な体系－平板状中性子深層透過問題」 p.66

演習2:「使用済燃料輸送容器(中性子)」 p.73

10月19日(木)

9:45 – 10:30

講義:「Ⅲ 様々な問題へのCADIS法の適用事例」 p.53

講義:「Ⅳ MCNP計算結果の統計指標」 p.60

10:30 – 12:00

演習3:「使用済燃料輸送容器(二次ガンマ線)」 p.73

13:00 – 16:30

演習4:「ストリーミング問題」 p.79

演習5:「スカイシャイン問題」 p.82

解析システムの動作確認

ADVANTGの動作環境確認

- オペレーティングシステムは、64ビットのLinuxが必要です(32ビットは不可)。
- コンパイラに関しては、特に用意する必要はありません。ADVANTGコードはPython2.7、C++、FORTRAN90などを用いて書かれていますが、Python2.7はパッケージに含まれており、その他の言語で書かれたプログラムはコンパイルされてシェアード・オブジェクト(Shared Object)で与えられています。
- ADVANTGのインストールと実行時には、MCNP5-1.60とMCNP用断面積データライブラリ(のXSDIRファイル)が必要になります。MCNP5-1.60を含むMCNP一式のインストールとテストをまず行っておいてください。

- MCNP5-1.60の動作確認は以下の方法で行えます。

- ① 適当なサンプルデータ(XSDIRを外部ファイルから読み込むもの:MCNPサンプル問題ではTesting/Validation_shieldingにあるデータなどが望ましい)を用意する。
- ② MCNPの断面積ファイルのあるディレクトリを表す環境変数"DATAPATH"に、使用するXSDIRファイルのディレクトリ(フォルダ)名を定義する。

Linux (bash)版のMCNP5-1.60場合 :

- export DATAPATH={XSDIRファイルのあるディレクトリ名}を実行するか、.bashrcに書いておいてからログインする。

WSLでWindows版MCNP5-1.60を用いる場合:

- 環境変数の設定(「設定」画面で「環境変数」で検索)でユーザー環境変数DATAPATHにXSDIRファイルのあるフォルダ名を定義する。

- ③ ①の入力データでMCNP5-1.60を実行してみて、断面積がきちんと読み込まれることを確認する。

- ADVANTGと組み合わせたMCNPによるモンテカルロ計算は、MCNP5以降のいずれのバージョン(最新のMCNP6.3を含む)でも可能です。ただし、MCNP5-1.60以降に新たに組み込まれたり変更された入力オプションは使用できません。

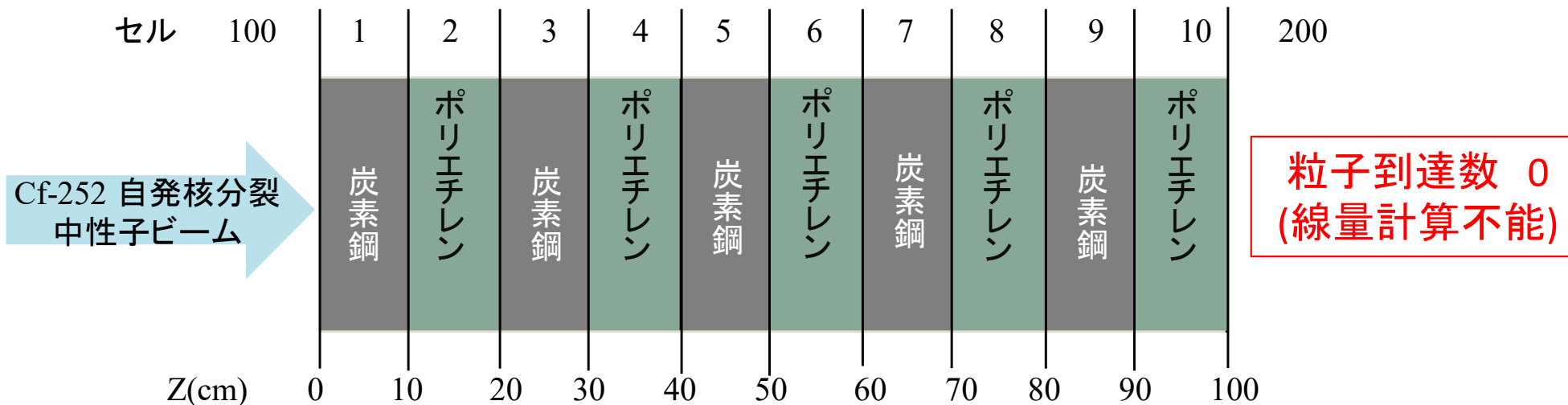
- ADVANTGのインストールについては、下記URLの一昨年及び昨年度講習資料もご参照ください。

<https://nucltech.com/2020/10/21/126/>

I 最適分散低減法 (CADIS理論) の概要

1. モンテカルロ法遮蔽計算と分散低減

深層透過における粒子の減少の例



1neutron activity in each cell							print table 126			
cell	cell	tracks entering	population	collisions	collisions * weight (per history)	number weighted energy	flux weighted energy	average track weight (relative)	average track mfp (cm)	
1	100	1005089	1005089	0	0.0000E+00	6.1329E-02	9.9748E-01	9.8384E-01	0.0000E+00	
2	1	2881229	1862178	17285837	7.8899E+00	4.2606E-03	1.1100E+00	9.3448E-01	3.9878E+00	
3	2	1834128	950246	184989814	5.5383E+01	5.9584E-05	2.7062E-01	6.3431E-01	7.3118E-01	
4	3	519345	253601	3519199	1.2236E+00	4.6785E-04	6.0585E-01	7.5127E-01	2.8132E+00	
5	4	107143	55633	10109627	2.9487E+00	4.9070E-05	2.5158E-01	6.1034E-01	6.7946E-01	
6	5	22584	11360	151534	5.1011E-02	4.7576E-04	7.0583E-01	7.2661E-01	2.7982E+00	
7	6	4510	2347	415846	1.1891E-01	5.3181E-05	2.8745E-01	5.9779E-01	7.1280E-01	
8	7	1031	486	6605	2.1239E-03	4.7771E-04	7.5618E-01	6.9465E-01	2.7548E+00	
9	8	199	104	15847	4.5327E-03	6.2714E-05	3.5732E-01	5.9173E-01	7.8608E-01	
10	9	23	15	137	4.1463E-05	5.0370E-04	9.4051E-01	7.0280E-01	2.9385E+00	
11	10	4	3	868	2.4382E-04	4.2920E-05	3.7174E-01	5.8382E-01	7.2014E-01	
12	200	0	0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	
total		6375285	4141062	216495314	6.7622E+01					

モンテカルロ法遮へい解析における分散低減の必要性

モンテカルロ法による放射線遮へい解析

= 数桁以上の深層透過問題

→ 百万個の粒子を発生させても、数個しか遮へい体外に到達しない。

→ **分散低減法の適用が必須**

● スプリットティングとロシアンルーレット

✓ Importance Sampling法

空間

✓ Weight-Window法

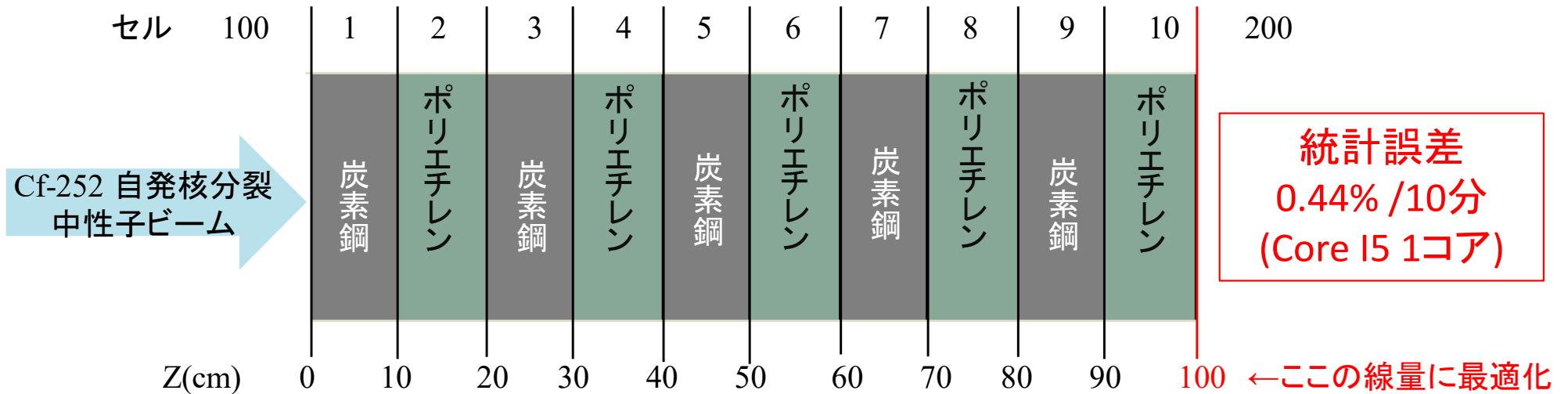
空間・エネルギー

● 線源バイアス（空間・角度・エネルギー）

● 飛程延長(Path Length Stretching)、強制衝突（Forced Collision）、etc

もっともよく
用いられる

分散低減法の効果 (ADVANTGコードでCADIS理論適用)



1neutron activity in each cell							print table 126			
cell	cell	tracks entering	population	collisions	collisions * weight (per history)	number weighted energy	flux weighted energy	average track weight (relative)	average track mfp (cm)	
1	100	59374	59374	0	0.0000E+00	3.9380E-01	9.4357E-01	1.3083E+01	0.0000E+00	
2	1	1610862	2352585	3262719	5.4069E+00	3.8678E-01	1.1257E+00	2.7237E+00	4.1141E+00	
3	2	1047069	2550142	2295226	4.9261E+00	1.2430E-01	9.6043E-01	5.6262E-01	1.8275E+00	
4	3	1031184	2930366	4626505	7.8254E-01	1.9838E-02	7.3500E-01	1.5509E-01	3.2253E+00	
5	4	1356259	2625385	2792443	3.3030E-01	7.0161E-03	8.2876E-01	2.7364E-02	1.6032E+00	
6	5	1013633	2925000	5694280	3.1915E-02	5.8997E-03	8.8446E-01	5.0194E-03	3.2559E+00	
7	6	1695852	3474583	4755419	8.6071E-02	8.4320E-05	3.8067E-01	2.1873E-03	8.4644E-01	
8	7	1574699	4034240	10097272	1.6998E-03	1.6120E-03	9.9894E-01	1.4257E-04	3.1812E+00	
9	8	3214890	5363470	12309249	5.6884E-03	6.5513E-05	3.8948E-01	7.5310E-05	8.0664E-01	
10	9	2716913	6087208	22124255	1.1662E-04	7.0812E-04	1.0078E+00	4.4397E-06	2.9775E+00	
11	10	3047627	7566878	67909648	2.9192E-04	7.7850E-05	4.8381E-01	2.1668E-06	8.9344E-01	
12	200	2950823	2950823	0	0.0000E+00	5.9190E-04	2.0373E+00	3.7003E-07	0.0000E+00	
	total	21319185	42920054	135867016	1.1572E+01					

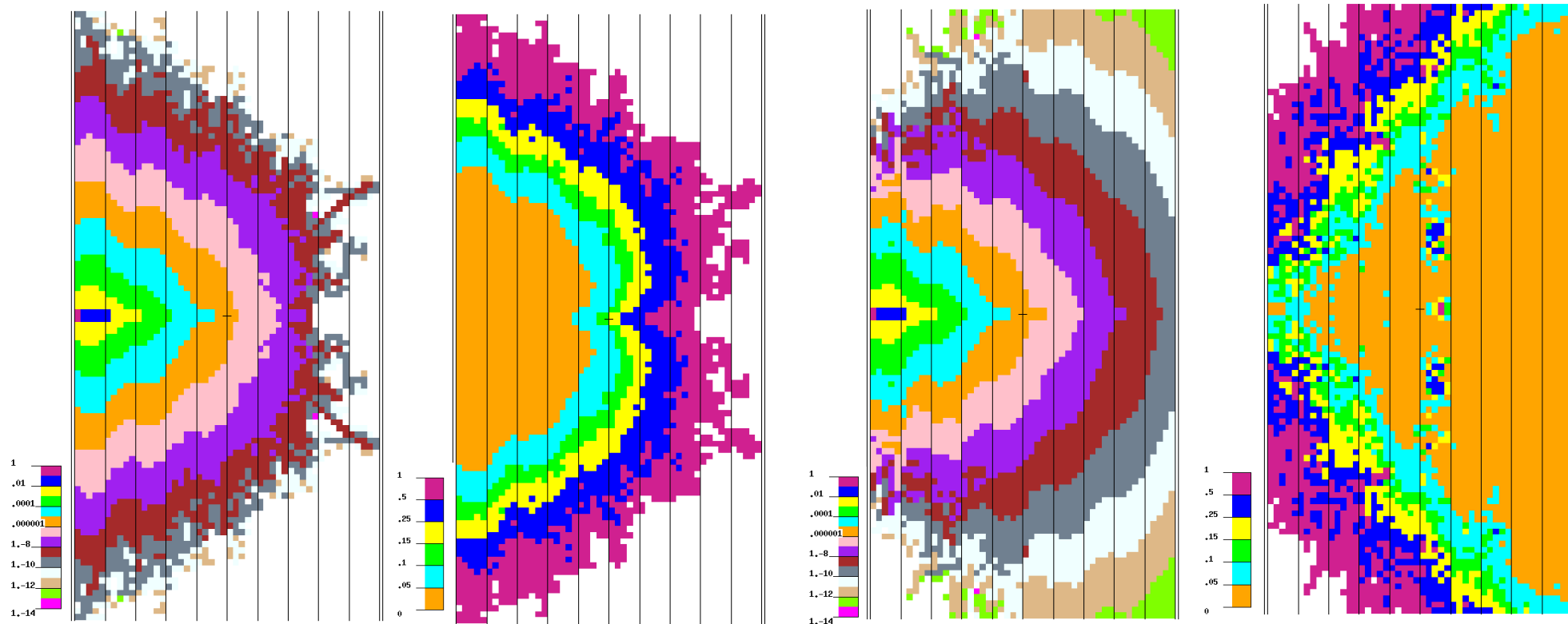
分散低減法の効果(前頁の問題の二次元線量分布)

分散低減なし

側面方向に行く粒子が多く正面に到達していない。

CADIS理論による最適分散低減

粒子が正面に向かい、端まで到達している



実効線量

統計誤差

実効線量

統計誤差

分散低減法の考え方＝重み付き粒子

インプリシット捕獲法とウェイトカットオフ*)

(Implicit capture and Weight Cut off)

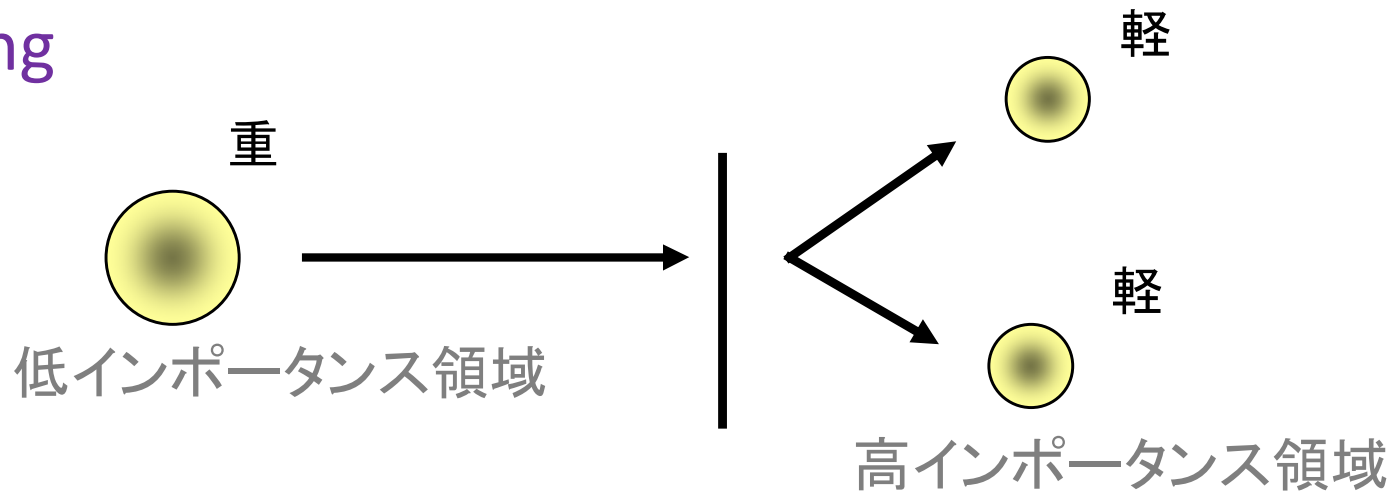
現実の現象に忠実なシミュレーション(アナログモンテカルロ法)では、粒子が捕獲反応を起こすと、その粒子が除去される。これに対して、インプリシット捕獲法では、除去されず捕獲断面積の全断面積に占める割合だけ重みを減らして生き残るように取り扱う。MCNPでは、アナログモンテカルロ法を用いるエネルギー範囲を指定した場合、及び詳細な光子の物理モデルを用いる場合を除き、インプリシット捕獲法が用いられる。インプリシット捕獲法により重みが小さくなった粒子は、ある重み以下となったときにウェイトカットオフにより追跡が終了される。MCNPのアルゴリズムはアナログモンテカルロ法ではなく、このインプリシット捕獲法とウェイトカットオフに基づいている。

*) J.S.Hendricks and T.E.Booth, MCNP VARIANCE REDUCTION OVERVIEW, LA-UR—8501173 (1985)
およびMCNP4Bのマニュアルから。

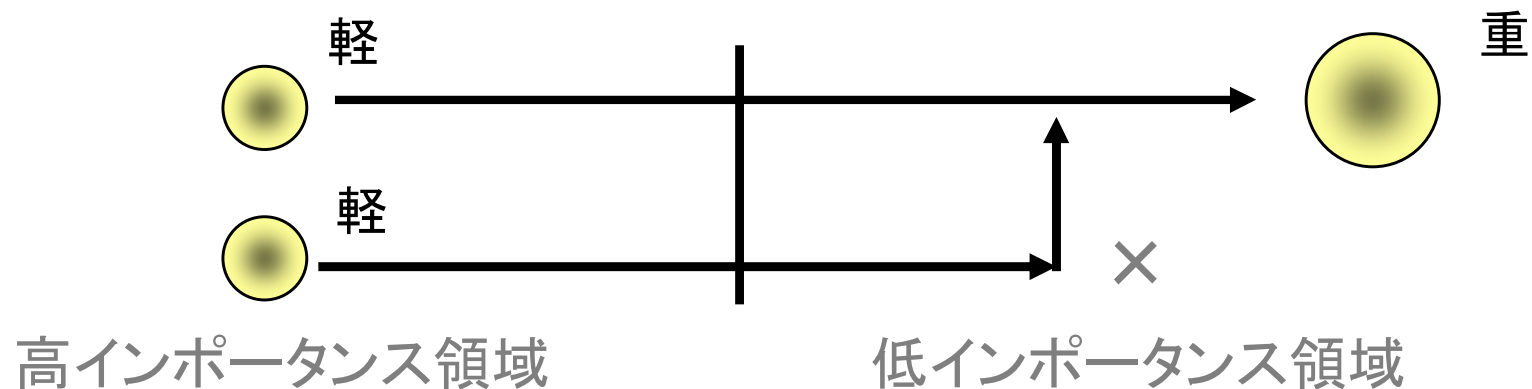
SplittingとRussian Roulette

粒子に「重み」を考えて(これを「バイアスする」という)、計算結果への影響の大きい領域(高インポートランス領域)では粒子を軽くする代わりに数を増やし、影響の小さい領域(低インポートランス領域)では粒子を重くして数を減らす。

Splitting

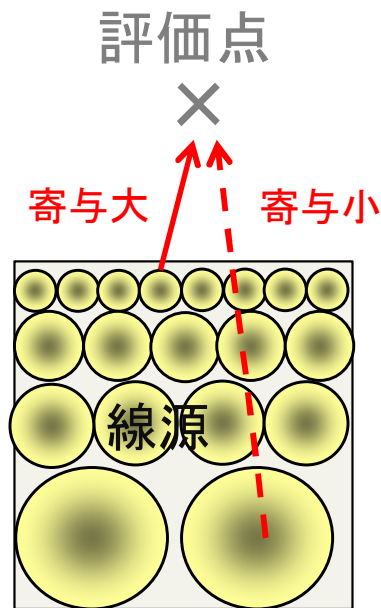


Russian Roulette



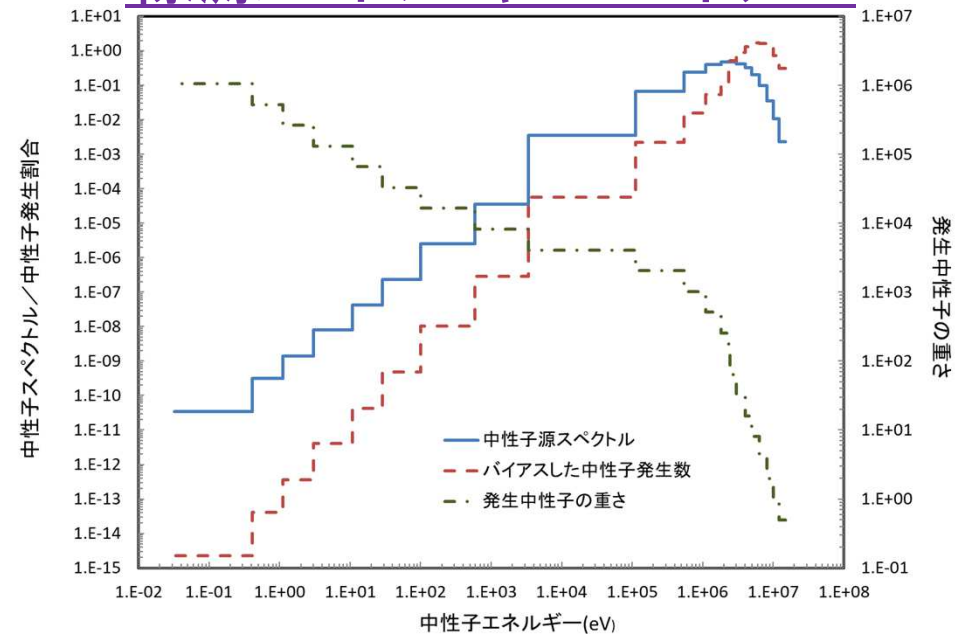
線源バイアス

線源位置バイアス

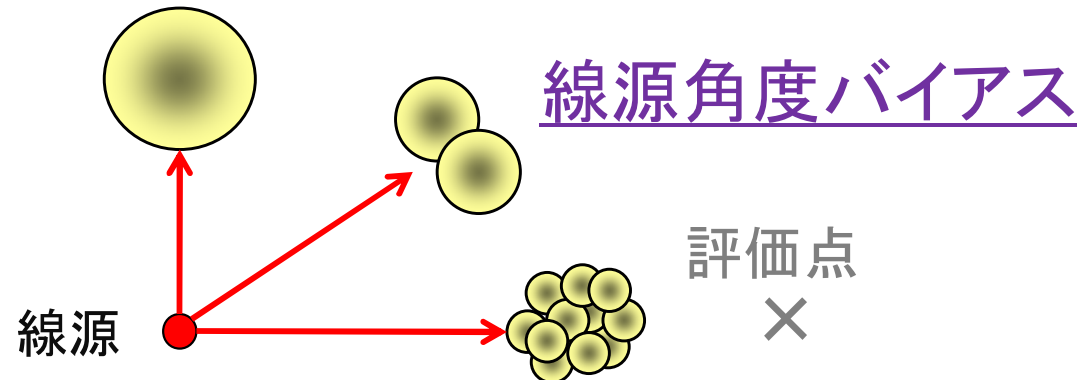


評価点に寄与の大きい近傍の線源は軽くして数多く、寄与の小さい遠い線源は重くして数少なく発生させる。

線源エネルギーバイアス



透過力の強い高エネルギー粒子は軽くして数多く、低エネルギー粒子は重くして数少なく発生させる。



評価点に向かう粒子を軽くして数多く発生させる。

I 最適分散低減法 (CADIS理論) の概要

2. MCNPの分散低減手法

MCNPで用いられている分散低減法

①時間とエネルギーのカットオフ法 (Time and Energy Cutoff)

MCNPでは、粒子が飛行している時間を計測している。これが指定した時間以上になったとき、追跡を終了する。また減速の結果、粒子のエネルギーが指定したエネルギー以下となったときに追跡を終了する。MCNPではCUTカードで指定する。

②空間スプリッティング／ロシアンルーレット（前述） (Geometry Splitting and Russian Roulette)

この方法を用いた場合は、高インポートランス領域から低インポートランス領域へと輸送される粒子はロシアンルーレットを受ける。ロシアンルーレットでは複数の粒子のうち、指定した重みより小さい粒子は、その重みを他の粒子に加えられて追跡が終了する。逆に、低インポートランス領域から高インポートランス領域へ輸送される粒子は分割され、より多くの追跡が行われる。このようにして、計算結果への影響の大きい(重要度の高い)領域を指定してサンプリングを行う方法である。MCNPではセル毎のインポートランス(IMP)を相対値で与えて指定する。

MCNPで用いられている分散低減法

③エネルギー Splitting / ロシアンルーレット (Energy Splitting/Russian Roulette)

指定したエネルギー群毎に Splitting / ロシアンルーレットを行う方法である。Splittingにより増える粒子数の比を群毎に与えて指定する。MCNPでは、**ESPLT**カードとして独立に与えることもできるが、後述の Weight Windowの中でも用いられる。

④強制衝突法 (Forced Collision)

衝突の数が少なく点検出器への寄与が得にくい、薄い物質中で強制的に衝突を起こさせる方法である。点検出器とともに用いて、点検出器に寄与する衝突の数を増やす働きをする。指定したセルで粒子を分割し、重みを衝突粒子と非衝突粒子分に分けてサンプリングする。MCNPでは**FCL**カードとして与える。

⑤DXTRAN

この方法はMCNP独特の方法で、DXTRANと呼ばれる小さな球状の空間を指定し、そこへ散乱の結果到達する粒子を解析的に計算する方法である。散乱に関する角度バイアスの一種である。**DXC**カードで指定する。

MCNPで用いられている分散低減法

⑦線源バイアス法 (Source Biasing) (前述)

指定した発生位置、エネルギー、角度によって、分布を保存しながら発生する粒子数の数を変える方法である。MCNPでは線源指定でSBカードとして与える。

⑧ 飛程延長法 (Path Length Stretching)

粒子を長い距離にわたって飛行させるために、ある方向について衝突点間の距離を仮想的に延ばし、これに対応して重みを下げる方法である。この方法は、粒子の重みを大きく変動させるために、ウェイトウィンドウ法と組み合わせて使用することが必要である。MCNPではEXTとVECTカードを用いている。

⑨ 相関サンプリング法 (Correlated Sampling)

摂動計算に用いられる分散低減法である。摂動前後で各ヒストリーの開始時点の乱数が同一になるようにサンプリングを行い、微少な摂動の影響を調べる方法である。

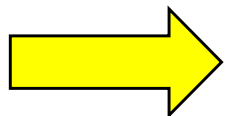
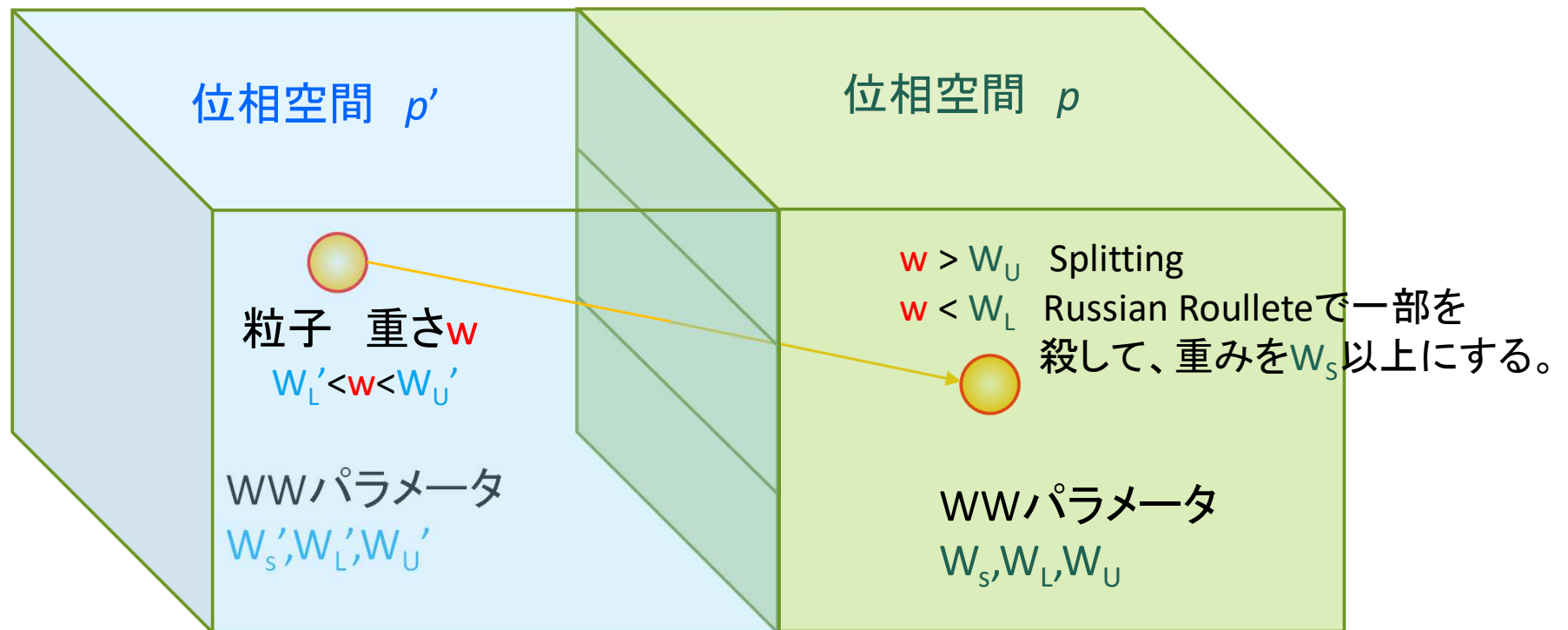
MCNPで用いられている分散低減法

⑩ ウェイトウィンドウ法 (Weight Window)

エネルギー及び空間で粒子の取り得る重みの範囲を指定し、範囲以下の粒子はロシアンルーレットをかけ、範囲以上の粒子は重みを分割してサンプリングを続ける方法である。つまり、空間スプリットイング／ロシアンルーレットとエネルギー／ロシアンルーレットを同時に行う方法である。空間とエネルギーの2次元メッシュ(ウェイトウィンドウ)について、そのウェイトウィンドウの下限重みWL、ロシアンルーレットで生き残る下限重みWS、及び上限重みWUを与える。WS及びWUは、全てのウィンドウについてWLの定数倍の値が用いられ、WLのみを入力で指定する。下限重みWL以下の粒子は、ロシアンルーレットにより他の粒子と統合され、上限重みWU以上の粒子はスプリットイングを受ける。これにより、粒子の重みは常にウェイトウィンドウの範囲に収まり、重みのゆらぎが小さくなるため、分散低減に寄与する。粒子の重みのばらつきが大きくなるような他の分散低減法(線源バイアス、指数変換法など)は、ウェイトウィンドウ法と併用しないと、誤った計算結果を与えるおそれがある。ウェイトウィンドウ法のパラメータ(以下WWパラメータと呼ぶ)WLを最適に与える方法は経験に頼るところが大きい。

Weight Window法

空間とエネルギーから成る位相空間の「窓」を通るたびに、Russian Roulette/Splittingを行う。



**WWパラメータ W_S 、 W_L 、 W_U の設定が難しい。
経験と試行錯誤が必要。**

Weight Window Generator (WWG)

最初のMCNPを用いたモンテカルロ計算で、最適なWWパラメータを求め、これを次の計算に適用する機能



WWGカードでWeight Window Generatorの使用を指定すると、位相空間セル(幾何形状セルとエネルギー群から構成されるウィンドウ)に入射する粒子数からのインポートランスを次の式で計算する。

$$\text{インポートランス} = \frac{\text{位相空間セルに入射する粒子による検出器応答}}{\text{入射した粒子の重さの和}}$$

WWパラメータはセル毎でも、MESHカードで与えるメッシュ毎でも与えることができる。

Weight Window Parameter生成機能(MCNPのWWG)の問題点

モンテカルロ計算でパラメータを求めるため、粒子が検出器に到達しなくてはパラメータが定まらない。

十分に粒子を到達させるには、本計算に匹敵する計算時間が必要。

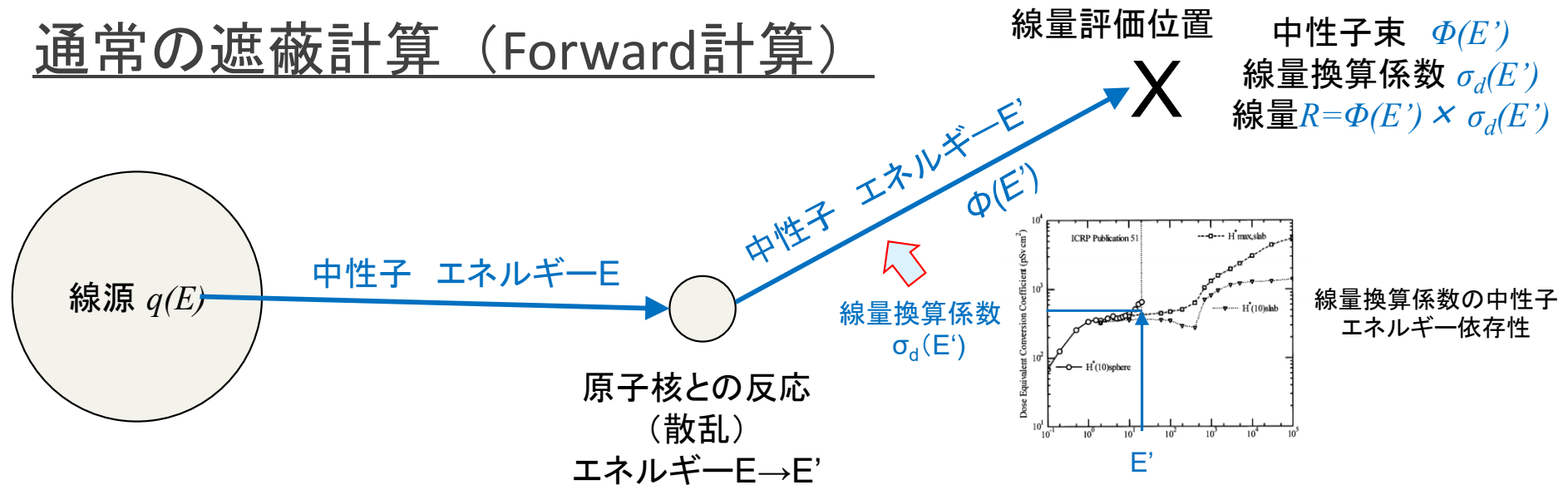
→計算時間短縮のための分散低減に、余計な計算時間と手間暇を掛けてしまう場合がある。(本末転倒)

→経験も、試行錯誤も、余分なモンテカルロ計算も行わずに自動的に分散低減が実現できないか？

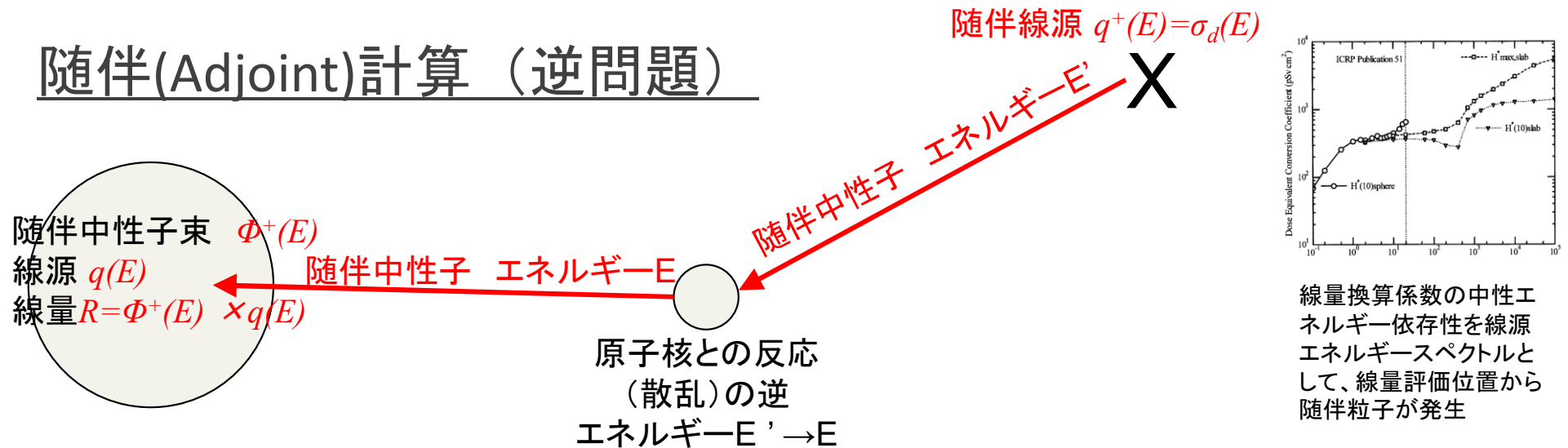
→ **随伴線束＝インポートランス関数の利用**

随伴(Adjoint)計算とForward計算

通常の遮蔽計算 (Forward計算)



随伴(Adjoint)計算 (逆問題)



随伴計算で、どの位置の線源や反応が線量に効くか、が判る。

I 最適分散低減法 (CADIS理論) の概要

3. 自動分散低減理論 “CADIS”

随伴計算を用いた分散低減パラメータの設定

古くからアイデアはあった。

- *Tang & Hoffman*(1988)
- *P.C.Miller et al.* for McBEND(1990)
- *M.W.Mickael* for MCNP WWG (1995)

理論の体系化及びMCNPのためのコード化

John.C.Wagner & Alireza Haghghat (1997)

→ **CADIS** (Consistent Adjoint Driven Importance Sampling)

CADIS 理論

(J.C.Wagner and A.Haghighat, N.S.E 128,1998)

CADIS (Consistent Adjoint Driven Importance Sampling)

- インポートランス関数(随伴線束)を、「線源バイアス」と「輸送バイアス」の設定に使用して、「一貫した」取り扱いを行う。
- 随伴線束は離散座標法(Sn法)などの決定論的方法で計算する。
- ただし、あくまで計算効率化のためなので、随伴線束の計算には本番のモンテカルロ法による線束の計算ほどの精度は求められず、モデル、群構造、角度分点などは簡略化して短い時間で計算できるようにしてよい。

CADIS 理論

随伴線束で表した検出器応答(線量率や反応率)

Forward Fluxで表した
検出器応答

$$R = \int_{V_d} \int_E \sigma_d(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E) dE d\vec{r}$$

Adjoint Fluxで表した
検出器応答

$$R = \int_{V_d} \int_E q(\vec{r}, E) \phi^+(\vec{r}, E) dE d\vec{r}$$

$\phi(\vec{r}, E)$ 空間 \vec{r} とエネルギー E における線束 (Forward Flux)

$\phi^+(\vec{r}, E)$ 空間 \vec{r} とエネルギー E における随伴線束 (Adjoint Flux)

$\sigma_d(\vec{r}, E)$ 空間 \vec{r} とエネルギー E での検出器応答関数 (線量率換算係数)

$q(\vec{r}, E)$ 空間 \vec{r} とエネルギー E での線源 (線源分布・エネルギースペクトル)

R 検出器応答 (評価点における線量、反応率など)

CADIS 理論

線源バイアス

バイアスされた線源分布

$$\hat{q}(p) = \frac{\phi^+(p)q(p)}{\int_p \phi^+(p)q(p)dp} = \frac{\phi^+(p)q(p)}{R}$$

最適な粒子の重み

$$W(p) = \frac{R}{\phi^+(p)}$$

p	空間とエネルギーから成る位相空間での座標 $=(\vec{r}, E)$
$\hat{q}(p)$	位相空間座標 p における バイアスされた 線源
$q(p)$	位相空間座標 p における線源＝線源分布・エネルギースペクトル
$\phi^+(p)$	位相空間座標 p における随伴線束
R	検出器応答(評価点における線量、反応率など)
$W(p)$	位相空間座標 p における最適な粒子の重み

CADIS 理論

輸送バイアス = 最適な重みを持った粒子の輸送方程式

通常^の輸送方程式

$$\phi(p) = \int_{p'} K(p' \rightarrow p) \phi(p') dp' + q(p)$$

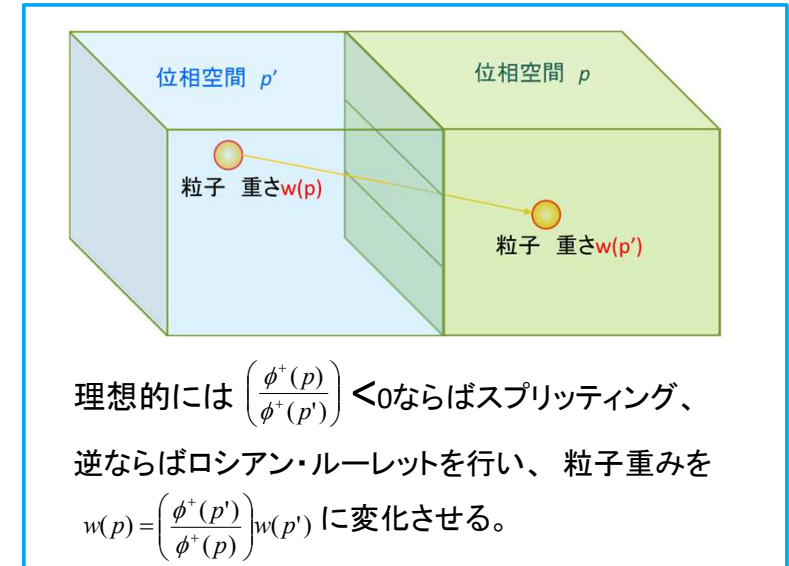
バイアスされた粒子の輸送方程式

$$\hat{\phi}(p) = \int_{p'} \hat{K}(p' \rightarrow p) \hat{\phi}(p') dp' + \hat{q}(p)$$

$$\text{where} \quad \hat{\phi}(p) = \frac{\phi^+(p)\phi(p)}{R} \quad \hat{q}(p) = \frac{\phi^+(p)q(p)}{R}$$

$$\hat{K}(p' \rightarrow p) = K(p' \rightarrow p) \left[\frac{\phi^+(p)}{\phi^+(p')} \right]$$

- $K(p' \rightarrow p)$ 位相空間座標 p' から p への輸送カーネル(移動する確率)
 $\hat{K}(p' \rightarrow p)$ バイアスされた輸送カーネル
 $\hat{\phi}(p)$ 位相空間座標 p におけるバイアスされた線束



CADIS 理論

MCNPのWeight Windowへの適用

目標とする粒子の重み

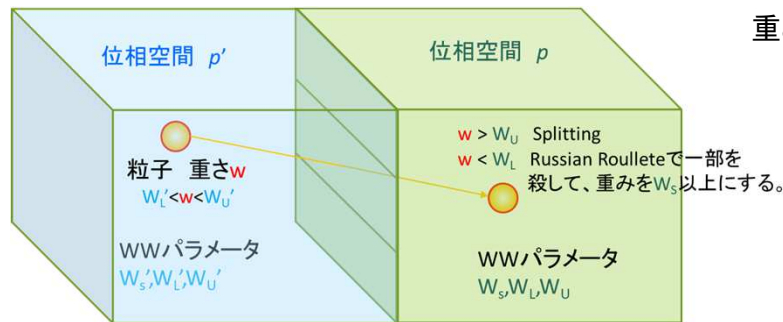
$$W(p) = \frac{R}{\phi^+(p)}$$

粒子をこの重みに
ほぼ保つために

MCNPのWeight Window Parameter

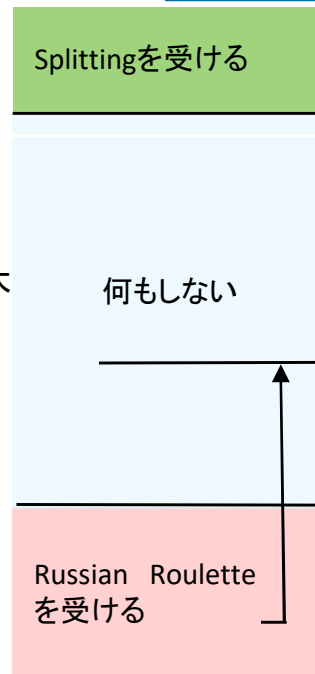
位相空間毎に与える粒子重みの下限 W_L (この重み以下の粒子はロシアルーレットを受ける)を次式で計算する。

$$W_L = \frac{2}{1+C_U} \frac{R}{\phi^+(p)}$$



($0.25 < w_L/w_L' < 4.0$ が望ましい)

重み大



$$w_U = C_U \times w_L$$

次のパラメータはMCNP入力のWWPカードで指定する。

C_U それ以上の重みの粒子をスプリットする重み(w_U)と w_L との比

(WUPN, デフォルト=5)

C_S ロシアルーレットを生き残った粒子に与えられる重み(w_s)と w_L との比

(WSURVN, デフォルト= $0.6 \times C_U$)

Forward CADIS (FW-CADIS)理論

CADIS理論は単一の検出器応答(R)には有効だが...

→ 線量分布のような複数の R の計算の効率化はどうか。

次の随伴線源を考えてCADIS理論を適用することにより、複数の検出器応答(R_1, R_2, \dots, R_N)の統計誤差を一様とすることができる。

$$q^+ = \frac{\sigma_{d,1}}{R_1} + \frac{\sigma_{d,2}}{R_2} + \dots + \frac{\sigma_{d,N}}{R_N}$$

where $\sigma_{d,i}$ i 番目の検出器の応答関数
 R_i i 番目の検出器の応答

R_i の計算にForward計算(通常の輸送計算)による検出器位置での線束の計算が必要なため、“Forward CADIS”と呼ばれる。。

主な随伴計算を用いた自動分散低減の試み

McBEND(UKAEA,1967): 随伴拡散計算による自動分散低減【有償】

AVATAR(LANL+K.A.V.Riper,1997):3次元Sn法随伴計算 (THREEDANT)+MCNP
【非公開】

LIFT (LANL,S.A.Turner,1997):指数変換法やDXTRANに似たゼロ分散理論に基づく方法。【非公開】

A³MCNP(UFL,A.Haghighat,1998): CADIS理論に基づく3次元Sn法随伴計算 (TORT)+MCNP-4A 【有償】

ECBO (NUPEC,S.Mitake & MRI,O.Sato): CADIS理論に基づく、公開コード(DORT, ANISN)を組み合わせた1, 2次元Sn法随伴計算でMCNP用のWeight Window Parameterと線源バイアスを生成する。【公開,2007】

MAVRIC (ORNL,J.Wagner,2005): KENO-VI形状を採用した多群モンテカルロコードMONACOとForward CADIS法に基づく自動分散低減による3次元多群モンテカルロ法遮蔽計算【公開,2005】

ADVANTG (ORNL, S.W. Mosher ,2013): 3次元離散座標法コードDENOVOを用いて、Forward CADIS法に基づき、MCNPのWeight Window Parameterを生成するコード。【公開,2015】

CADIS理論に基づくコード

CADIS理論の評価

深層透過問題の分散低減における現時点での“Gold Standard”

2019年のイリノイ大学のMunkとカリフォルニア大学バークレー校のSlaybaughによる中性子深層透過問題におけるハイブリッド法(によるモンテカルロ法の分散低減)に関するレビュー¹⁾では、“At present, the Consistent Adjoint-Driven Importance Sampling (CADIS) and Forward-Weighted Consistent Adjoint-Driven Importance Sampling (FW-CADIS) hybrid methods are the gold standard by which to reduce the variance in problems that have deeply penetrating radiation”として、現時点ではCADISとFW-CADISが深層透過問題の分散低減に最適な手法であると評価している。

1) Madicken Munk and Rachel N. Slaybaugh, “Review of Hybrid Methods for Deep Penetration Neutron Transport,” Nucl. Sci. Eng., 193, pp.1055–1089 (Oct 2019)

Ⅱ ADVANTGコードの概要と使用方法

1. ADVANTGコードの概要

ADVANTGは、オークリッジ国立研究所(ORNL)で開発されたMCNPのWeight Window Parameterと線源バイアスをCADISまたはFW-CADIS理論に基づいて生成するコードである。

S. W. Mosher, A. M. Bevill, S. R. Johnson, A. M. Ibrahim, C. R. Daily, T. M. Evans, J. C. Wagner, J. O. Johnson and R. E. Grove, *ADVANTG—An Automated Variance Reduction Parameter Generator*, ORNL/TM-2013/416 (November 2013)

ADVANTGの公開バージョン

ADVANTG 3.0.1: 2015年に公開された、Forward CADIS法によるMCNP用自動分散低減コード。DENOVOを用いて3次元離散座標法で随伴線束を計算する。

RSICC CODE PACKAGE CCC-831 : ADVANTG 3.0.1: Automated VArIaNce reducTion Generator

ADVANTG 3.2.1: ADVANTG 3.0.1から、複数のセルにまたがる線源や円筒形状メッシュタリーの取扱い、随伴線束計算における反射境界や一回散乱線源の取扱いの追加、などを改良。2019年8月公開

RSICC CODE PACKAGE CCC-854 : ADVANTG 3.2.0: Automated VArIaNce reducTion Generator

AVANTGコードの処理フロー

ステップ	処理内容	
ADVANTG Step 1	<ul style="list-style-type: none"> ・MCNP入力データを読み込み、次のデータを生成する。 ①Forward 及び Adjoint Flux計算用DENOVO入力データ ②DENOVOで用いる巨視的断面積を計算するためのGIP (ANISN形式群独立巨視的断面積計算コード) 入力データ(材質組成データ) 	
FW-CADIS のときのみ	GIP(F)	DENOVOのForward計算で用いる巨視的断面積を計算する。
	DENOVO(F)	FW-CADIS法で用いるForward Fluxを3次元Sn法で計算する。
	FORADJ	Forward FluxからDENOVOによるAdjoint計算で用いる随伴線源分布を計算する。
	DENOVO(A)	FW-CADIS法及びCADIS法で用いるAdjoint Flux(随伴線束)を3次元Sn法で計算する。
ADVANTG Step 2	最適分散低減のために、Step 1で読み込んだMCNP入力データに線源バイアスデータを書き加えたデータと、外部Weight Window Parameterファイルを作成する。	
MCNP (ADVANTG Step 3)	Step2で作成した線源バイアス付MCNP入力データとWeight Window Parameterファイルを用いたMCNPによるモンテカルロ法計算の実行	

Ⅱ ADVANTGコードの概要と使用方法

2. ADVANTGコードの入力データ

ADVANTGの入力データ (1/2)

分類	キーワード	変数	内容	選択肢	デフォルト	
Driver	model	name	形状モデル MCNP5またはSWORD	mcnp / sword	mcnp	
	method	name	分散低減法 CADIS法、Forward CADIS法、DENOVO輸送計算(DX)	cadis / fwcadis / dx		
	outputs	name ...	出力形式 (複数可) (MCNP計算、SILO図示、Sn法応答計算、なし)	mcnp / silo / response / none	mcnp silo	
Model	MCNP関連	mcnp_input	filename	MCNP5の入力ファイル名		
		mcnp_tallies	int ...	分散低減のターゲットとするタリー番号 (複数可)		
		mcnp_material_names	int name ...	MCNPの材質番号と材質名 (SILOで図示するとき用いる)		
		mcnp_min_source_samples	int >= 0	線源サンプル数の最小値		1E+06
		mcnp_max_source_samples	int >= 0	線源サンプル数の最大値		1E+08
		mcnp_target_source_density	int >= 0	1メッシュに含まれる線源の最小平均サンプル数		100
		mcnp_max_point_sources	int >= 0	点線源として扱う最大の線源数。これ以上は体積線源と見做す。		20
		mcnp_force_point_source	bool	線源を点線源として一回散乱法と組み合わせてSn計算を行うか?	true / false	FALSE
		mcnp_min_rays_per_face	int >= 0	1方向について各メッシュをレイトレーシングする最小本数		10
		mcnp_ray_directions	axis ...	レイトレーシングの方向 (複数可)	x / y / z	x y z
		mcnp_num_rays	int >= 0	レイトレーシング本数のノミナル値		1
		mcnp_lost_rays	int	見失うことが許されるレイトレーシングの最大本数		10
		mcnp_mix_tolerance	real >= 0.0	二つの混合材質の組成を同じか、違うかを判断する精度		0.01
		mcnp_unfolding_origin	real (3)	レイトレーシングでMCNP形状をUnfoldingする原点座標		
		mcnp_unfolding_safe	bool	レイを見失いにくい安全だが計算時間が掛かるUnfoldingを行うか?	true / false	FALSE
	mcnp_tally_min_radius	int real, ...	MCNPで円筒メッシュタリーを用いている場合のタリー毎の最小及び最大半径。タリー番号 半径の組を必要数入力する。			
	mcnp_tally_max_radius	int real, ...	MCNPで円筒メッシュタリーを用いている場合のタリー毎の最大半径。タリー番号 半径の組を必要数入力する。			
	mcnp_tally_min_theta	int real, ...	MCNPで円筒メッシュタリーを用いている場合のタリー毎の最小及び最大角度 (単位は360° が1)。タリー番号 角度の組を必要数入力する。			
	mcnp_tally_max_theta	int real, ...	MCNPで円筒メッシュタリーを用いている場合のタリー毎の最大角度 (単位は360° が1)。タリー番号 角度の組を必要数入力する。			
	SWORD関連	sword_input	filename			
		sword_mix_tolerance	real			
		sword_small_sources	bool			
		sword_sampling	name	米国海軍調査研究所が開発した検出器応答解析システムSWORDの分散低減パラメータを計算する際のオプション。		
		sword_subcell	int	MCNPを用いる場合は関係ないため、省略。		
		sword_subcell x	int			
sword_subcell y		int				
sword_subcell z		int				
Method	FW-CADIS関連	fwcadis_spatial_treatment	name	Forward CADIS法の空間取り扱いオプション	pathlength / global	pathlength
		fwcadis_response_weighting	bool	応答関数のエネルギー依存性に応じた随伴線源を用いるか否か	true / false	TRUE
		fwcadis_min_response	real >= 0.0	空間取り扱いオプションがglobalのときに、随伴線源を作成する際に用いる検出器応答の最小・最大値。例えば、ある値以下の線量の位置については重視しないように随伴線源を作成するのに用いる。		0
	fwcadis_max_response	real >= 0.0			(無限)	
	DX関連	dx_adjoint	bool	methodでdxを選んで分散低減パラメータを計算せずに、Sn計算のみを行う際に、	true / false	FALSE
dx_forward		bool	Adjoint, Forward計算を行う/行わないを選択する。	true / false	FALSE	
CADIS関連はオプション入力なし						
Weight Window 及び Sn計算の空間メッシュ	mesh_refinement	name	メッシュ分割をMCNPと同じ形式で与えるか、均一幅で与えるか。	mcnp / uniform	mcnp	
	mesh x	real	【mesh_refinement=mcnpのとき】			
	mesh y	real	メッシュ区間の境界座標 (cm)			
	mesh z	real				
	mesh_x_ints	int >= 0	【mesh_refinement=mcnpのとき】			
	mesh_y_ints	int >= 0	各メッシュ区間のメッシュ分割数	1区間に1メッシュ		
	mesh_z_ints	int >= 0				
	mesh_max_width	real >= 0.0	【mesh_refinement=uniformのとき】			
	mesh_x_max_width	real >= 0.0	設定できるメッシュ幅の最大値。X, Y, Z方向全てをmesh_max_widthで設定できるが、			
	mesh_y_max_width	real >= 0.0	x, y, zそれぞれで設定も出来る。			
	mesh_z_max_width	real >= 0.0				
	mesh_min_width	real >= 0.0	【mesh_refinement=uniformのとき】		0	
	mesh_x_min_width	real >= 0.0	設定できるメッシュ幅の最小値。X, Y, Z方向全てをmesh_min_widthで設定できるが、		0	
mesh_y_min_width	real >= 0.0	x, y, zそれぞれで設定も出来る。		0		
mesh_z_min_width	real >= 0.0			0		

ADVANTGの入力データ (2/2)

分類	キーワード	変数	内容	選択肢	デフォルト	
多群断面積ライブラリ	anisn_library	name	Sn法計算に用いるANISN形式断面積ライブラリの選択	27n19g / 200n47g / BUGLE-96 / BPLUS / DABL69 / DPLUS / FENDL67		
	anisn_upscatter	bool	熱中性子群の上方散乱を考慮かどうか。	true / false	FALSE	
	anisn_zaid_map	int >= 0	ANISN形式断面積ライブラリ中の核種を特別に指定する場合に使用(通常はMCNP入力のみに基づき自動的に選ばれる)			
ソルバー (DENOVOのSn法計算パラメータ)	denovo_discretization	name	DENOVOで用いる差分法。デフォルトはsc(Step Characteristics)。	ld / sc / tld / twd / wdd / wdd ff	sc	
	denovo_x_blocks	int >= 0	DENOVOのX, Y, Z方向ブロック分割数。MPIによる並列計算で1ブロックに一つのスレッド		1	
	denovo_y_blocks	int >= 0	が割り当てられる。		1	
	denovo_z_blocks	int >= 0			1	
	denovo_energy_sets	int >= 0	並列計算でのエネルギー群分割数。分割1個に1スレッド。		1	
	denovo_partition_upscatter	bool	上方散乱群を分割する/しない。	true / false	FALSE	
	denovo_quadrature	name	角度分点セット。デフォルトはqr (Quadruple Range)	glproduct / ldfe / levelsim / qr / userdefined	qr	
	denovo_quad_order	even int > 1	【denovo_quadrature=qrのとき】三角角度分点次数		10	
	denovo_ldfe_order	int >= 0	【denovo_quadrature=ldfeのとき】三角角度分点次数		1	
	denovo_quad_num_azi	int >= 0	角度分点毎の極角、方位角数		4	
	denovo_quad_num_polar	int >= 0	角度分点・オクタント毎の方位角の数		4	
	denovo_quad_num_azi_vec	int >= 0	非対称分点の極軸方向。X軸、Y軸、Z軸のいずれか。	x / y / z	z	
	denovo_quad_polar_axis	axis ...	【denovo_quadrature=userdefinedのとき】角度分点ファイル名			
	denovo_quad_file	filename	散乱マトリクスの散乱角ルジャンドル展開次数		3	
	denovo_pn_order	int >= 0	自群自散乱の輸送補正方法	cesaro / diagonal / none	diagonal	
	denovo_transport_correction	name	Monte Carlo法による一回散乱線源を使用する/しない	true / false	FALSE	
	denovo_mc_first_collision	bool	Monte Carlo法による一回散乱線源計算の粒子数		10000	
	denovo_mc_num_particles	int >= 0	内部反復解法。GMRES法またはSource Iteration(Richardson)	gmres / si	gmres	
	denovo_solver	name	上方散乱(外部反復)の解法。Gauss-SeidelまたはGMRES	gauss seidel / gmres	gauss seidel	
	denovo_multigroup_solver	name	内部反復の前処理法。Diffusion Syntheticまたは前処理なし。	dsa / none	none	
	denovo_preconditioner	name	上方散乱のtwo-grid 加速法の適用。	true / false	FALSE	
	denovo_two_grid	bool	GMRES解法でのKrylov vectorの最大数。		20	
	denovo_krylov_space	int >= 0	内部反復最大数。		100	
	denovo_max_iterations	int >= 0	内部反復の収束精度。		0.001	
	denovo_tolerance	real > 0.	上方散乱(外部反復)の収束精度。		0.01	
	denovo_upscatter_tolerance	real > 0.	外部反復を行う際の内部反復の最大数。		10	
	denovo_upscatter_inner_iterations	int >= 0	外部反復を行う際の内部反復の収束精度。		0.01	
	denovo_upscatter_inner_tolerance	real > 0.	計算する最初と最後の群番号。(第0群から始まることに注意)。		0	
	denovo_first_group	int >= 0	DENOVOの詳細出力を出力する/しない	true / false	TRUE	
	denovo_verbose	bool	DENOVO計算モデルの境界条件。外面6面に対して1=鏡面反射または0=真空を指定。	0 / 1		
	denovo_reflect	int (6)	mcnp_inputで指定するファイル以外のファイルを基として線源バイアス等のデータを加えるときは、そのファイル番号を指定する。		100	
	出力オプション	mcnp_input_template		Weight Windowで起こすSplittingの最大分割数		100
		mcnp_mxsplit	int >= 2	Weight Windowの上限重み(WUPN)と下限重み(WW parameter)との比		5.0
mcnp_ww_ratio		real >= 2.0	線源バイアスの種類。空間-エネルギー、空間のみ、エネルギーのみ、なし	space_energy / space / energy / none	space_energy	
mcnp_sb_type		name	バイアスされた線源確率分布を計算するためのサンプリングの最小数と最大数		1E+06	
mcnp_min_sb_samples		int >= 0	線源分布の1区間あたりの目標とするサンプリング数		1E+08	
mcnp_max_sb_samples		int >= 0	MCNP入力に存在する線源バイアス(SB)を考慮する/しない。	true / false	FALSE	
mcnp_target_sb_density		int >= 0	MCNP線源データ(SDEF)のWGTパラメータ補正のサンプリング数		1E+07	
mcnp_user_sb_sampling		bool	Weight Window メッシュ数を減らすための係数(まとめるメッシュ数)		1	
mcnp_num_wgt_samples	int >= 2	mcnp_ww collapse factor		1		
mcnp_ww_factor	real >= 1	応答分布あるいは線源分布をSilo形式で出力	true / false	TRUE		
Silo	mcnp_ww_target	int	体積平均・エネルギー積分線源強度をSilo形式で出力	true / false	TRUE	
	mcnp_ww_strength	bool	Weight Window targetをSilo形式で出力	true / false	TRUE	
	mcnp_ww	bool	反応率を出力するためのANISN形式断面積のポジションと反応名		FALSE	
	mcnp_ww_reactions	int name ...				

必要な入力データ (1/6)

ADVANTG コードを用いて、CADIS法あるいはFW-CADIS法でMCNP用の分散低減パラメータ(Weight Window Parameter及び線源バイアス)を計算するのに最低限必要な入力データは次の七種類である。その他はデフォルト設定(入力省略)でも問題ない場合が多い。

- `method` 分散低減法(CADIS法、Forward CADIS法)の選択
- `mcnp_input` MCNPの入力ファイル名
- `mcnp_tallies` 分散低減のターゲットとするタリー番号
- `fwcadis_spatial_treatment` Forward CADIS法の空間取り扱いオプション
- `mesh_x, mesh_y, mesh_z` 及び `mesh_x_ints, mesh_y_ints, mesh_z_ints`
メッシュ区間の境界座標 (cm)と分割数
- `anisn_library` Sn法計算に用いるANISN形式断面積ライブラリの選択
- `denovo_x_blocks, denovo_y_blocks, denovo_z_blocks`
DENOVOのX,Y,Z方向ブロック分割数。(並列計算可能なとき)

必要な入力データ (2/6)

method *cadis / fwcadis / dx*

cadis CADIS法で分散低減パラメータを計算する

fwcadis Forward CADIS法で分散低減パラメータを計算する

dx DENOVOコードを用いたSn法計算のみを行う

mcnp_input (ファイル名)

分散低減の対象とするMCNP (MCNP5-1.60)の入力データのファイル名を指定する。

mcnp_tallies タリー番号 (複数可)

分散低減の対象とするタリー番号 (MCNPタリー入力のFn:plの"n")を与える。このタリーの統計誤差を最も小さくするように分散低減を行う。メッシュタリー (FMESH) も可。

必要な入力データ (3/6)

`fwcadis_spatial_treatment` *pathlength / global*

FW-CADIS法で随伴線源分布を計算するときの空間的取り扱いのオプションを指定する。メッシュタリーには*global*が、それ以外には*pathlength*が適している。

<i>pathlength</i>	Path-length weightingを用いる
<i>global</i>	Global weightingを用いる

`mesh_x` *X方向メッシュ境界の座標(cm)*

`mesh_y` *Y方向メッシュ境界の座標(cm)*

`mesh_z` *Z方向メッシュ境界の座標(cm)*

`mesh_x_int` *X方向メッシュ分割数*

`mesh_y_int` *Y方向メッシュ分割数*

`mesh_z_int` *Z方向メッシュ分割数*

MCNPのメッシュごとWeight Window Parameter (wwinpファイル)のメッシュ分割及びForward, Adjoint計算を行うDENOVOの空間メッシュ分割を指定する。

必要な入力データ (4/6)

anisl_n_library *27n19g / 200n47g / BUGLE-96 / BPLUS / DABL69 / DPLUS / FENDL67*

DENOVOを用いたForward及びAdjoint計算に用いるANISN形式断面積ライブラリを次の中から選ぶ。分散低減のためのSn計算にはそれほど精度は要求されないので、できるだけ群数の少ないもの(27n19gなど)が計算時間を節約できて望ましい。

Table 3-1. Multigroup libraries

Library	anisl _n _library option	# of groups (N / G)	# of isotopes or elements	Evaluation	Reference
27n19g	27n19g	27 / 19	393	ENDF/B-VII.0	Wiarda et al. 2008
200n47g	200n47g	200 / 47	393	ENDF/B-VII.0	Wiarda et al. 2008
BUGLE-96	bugle96	47 / 20	120	ENDF/B-VI.3	White et al. 1995
BPLUS	bplus	47 / 20	393	ENDF/B-VII.0	N/A
DABL69	dabl69	46 / 23	80	ENDF/B-V	Ingersoll et al. 1989
DPLUS	dplus	46 / 23	393	ENDF/B-VII.0	N/A
FENDL67	fendl67	46 / 21	71	FENDL-2.1	López Aldama and Trkov, 2004

必要な入力データ (5/6)

denovo_x_blocks	<i>X方向のDENOVOのブロック数</i>
denovo_y_blocks	<i>Y方向のDENOVOのブロック数</i>
denovo_z_blocks	<i>Z方向のDENOVOのブロック数</i>

- ◆ 並列計算のために、DENOVOの空間メッシュをまとめてブロック化するときのX方向、Y方向、Z方向のブロックの数を与える。各ブロックに1つのスレッドが与えられる。
- ◆ $\text{denovo_x_blocks} \times \text{denovo_y_blocks} \times \text{denovo_z_blocks}$ がPCの最大スレッド数を超えるとエラーとなる。
- ◆ デフォルトはすべて1であるが、スレッドの数が許す限り、これに1以上の整数を与えることで、ADVANTGの計算時間の大半を占めるDENOVOの計算時間は短くなる。
- ◆ denovo_x_blocks 、 denovo_y_blocks 、 denovo_z_blocks は、それぞれ mesh_x 、 mesh_y 、 mesh_z の約数で、約数以外の場合はそれ以下の最大の約数に自動的に変更される。

必要な入力データ (6/6) (円筒メッシュタリーの時のみ)

`mcnp_tally_min_radius` *タリー番号1 内半径1 タリー番号2 内半径2 ...*

`mcnp_tally_max_radius` *タリー番号1 外半径1 タリー番号2 外半径2 ...*

分散低減の対象とする円筒メッシュタリー(FMESH)のタリー番号と内半径、外半径を入力する(単位cm)。タリー番号と内半径、外半径の組合せは複数個入力できる。

`mcnp_tally_min_theta` *タリー番号1 最小角度1 タリー番号2 最小角度2 ...*

`mcnp_tally_max_theta` *タリー番号1 最大角度1 タリー番号2 最大角度2 ...*

分散低減の対象とする円筒メッシュタリー(FMESH)のタリー番号と最小角度、最大角度を入力する(単位はturn=360°を1とする)。タリー番号と最小角度、最大角度の組合せは複数個入力できる。

これらを与えずに`mcnp_tallies`で円筒メッシュタリーの番号を与えた場合はメッシュタリー全体が分散低減対象となる。

Ⅱ ADVANTGコードの概要と使用方法

3. ADVANTGコードの実行方法

環境設定ファイル *advantg.rc*

ADVANTGをインストールしたディレクトリに *advantg.rc* というbash用環境設定ファイルが生成される。

これを次のいずれかの方法で有効化する。

1) ADVANTG使用前に実行
次のコマンドを実行しておく。

```
source $ADVANTG/advantg.rc
```

(*\$ADVANTG*はADVANTGをインストールしたディレクトリ)

2) ログイン時の環境設定で実行
.bashrcの最後に右の*advantg.rc*の内容を書いておく。
あるいは、次の1行を最後に書いておく。

```
source $ADVANTG/advantg.rc
```

(*\$ADVANTG*はADVANTGをインストールしたディレクトリ)

(*advantg.rc*の内容)

```
ADVANTG=/home/sato/advantg      (インストールしたディレクトリ)
export ADVANTG

LD_LIBRARY_PATH=$ADVANTG/lib:$LD_LIBRARY_PATH
LD_LIBRARY_PATH=$ADVANTG/packages/exnihilo/lib:$LD_LIBRARY_PATH
LD_LIBRARY_PATH=$ADVANTG/packages/openmpi/lib:$LD_LIBRARY_PATH
LD_LIBRARY_PATH=$ADVANTG/packages/python/lib:$LD_LIBRARY_PATH
export LD_LIBRARY_PATH

PATH=$ADVANTG/bin:$PATH
PATH=$ADVANTG/packages/advantg/bin:$PATH
PATH=$ADVANTG/packages/exnihilo/bin:$PATH
PATH=$ADVANTG/packages/msx/bin:$PATH
PATH=$ADVANTG/packages/openmpi/bin:$PATH
PATH=$ADVANTG/packages/python/bin:$PATH
PATH=$ADVANTG/packages/radiant/bin:$PATH
PATH=/mnt/c/LANL/MCNP61/MCNP_CODE/bin:$PATH
export PATH

PYTHONPATH=$ADVANTG/packages/advantg/python:$PYTHONPATH
PYTHONPATH=$ADVANTG/packages/exnihilo/python:$PYTHONPATH
PYTHONPATH=$ADVANTG/packages/msx/python:$PYTHONPATH
export PYTHONPATH

OPAL_PREFIX=$ADVANTG/packages/openmpi
export OPAL_PREFIX

DATAPATH=/mnt/c/LANL/MCNP61/MCNP_DATA
export DATAPATH

SCALE_DATAPATH=$ADVANTG/data/scale
export SCALE_DATAPATH
```

ADVANTGの実行方法

実行方法 (1) シェルスクリプトを使用

ADVANTGのインストールで生成されるシェルスクリプト`advantg`を用いて実行する。

`advantg` 入力ファイル名

注) 実行前に設定ファイル`advantg.rc`を`source`コマンドで実行しておく。

実行方法 (2) pythonで実行

ADVANTGに付属しているpython 2.7を用いてpythonスクリプトを実行する。

`python` pythonスクリプトファイル名

注) システムにpython 3などがインストールされているときは、`python`というコマンドをADVANTGに付属しているpython 2.7を実行するようにPATH変数で設定しておく。この設定は`advantg.rc`を実行することで行われる。

ADVANTGの入力データ例

(サンプル問題 ueki35)

入力データの例 (ueki35.adv)

method	cadis			
mcnp_input	ueki35			
mcnp_tallies	5			
mcnp_material_names	1	paraffin		
	2	graphite		
anisn_library	27n19g			
denovo_pn_order	1			
denovo_quad_num_polar	2			
denovo_quad_num_azimuthal	2			
mesh_x	-25	107.5	112.5	
mesh_x_ints		53	3	
mesh_y	-40	-2.5	2.5	40
mesh_y_ints		15	3	15
mesh_z	-40	-2.5	2.5	40
mesh_z_ints		15	3	15

pythonスクリプトの例 (ueki35.py)

```

from advantg.driver import run

inp = {
    "method": "cadis",
    "mcnp_input": "ueki35",
    "mcnp_tallies": 5,
    "mcnp_material_names": {1: "paraffin",
                             2: "graphite"},
    "anisn_library": "27n19g",
    "denovo_pn_order": 1,
    "denovo_quad_num_polar": 2,
    "denovo_quad_num_azimuthal": 2,
    "mesh_x": [-25, 107.5, 112.5],
    "mesh_x_ints": [53, 3],
    "mesh_y": [-40, -2.5, 2.5, 40],
    "mesh_y_ints": [15, 3, 15],
    "mesh_z": [-40, -2.5, 2.5, 40],
    "mesh_z_ints": [15, 3, 15]
}

run(inp)

```

実行シェルスクリプトの内容

シェルスクリプト *advantg* (*\$ADVANTG/packages/advantg/bin/advantg*)

```
#!/bin/sh
# Call the run_advantg.py script with all arguments
python $ADVANTG/packages/advantg/bin/run_advantg.py "$@"
```

pythonスクリプト *run_advantg.py*

```
# Remove the directory in which this file resides from the module
# search path, otherwise `import advantg` will find the launch script
import os
import sys

sys.path[0] = os.getcwd()

from advantg.__main__ import main
main()
```


ADVANTGの出力とMCNPの実行

- ADVANTGの計算終了後、次の二つのディレクトリが生成される。

`model/` ADVANTG内のMCNP5-1.60の計算に用いられた入力等

`output/` ADVANTGからの出力

- 次の二つのファイルを用いてMCNPによる解析を実施する。

`output/inp` 線源バイアスが付加されたMCNPの入力データ

`output/wwinp` Weight Window Parameter

- この二つのファイルを適当な名前（`○○○.inp`、`○○○.wwinp`）に変更し、次のようにMCNPの実行を行う。

```
mcnp5        inp=○○○.inp     wwinp=○○○.wwinp out=○○○.out runtpe=○○○.run
```

```
             meshtal=○○○.fmesh mctal=○○○.tal
```

MCNPは、`wwinp`ファイルにより外部からメッシュ毎のWeight Window Parameterを与えることの出来るいずれのバージョン（MCNP4以降）も用いることが出来る。

ADVANTGの出力とMCNPの実行

- ADVANTGの計算終了後、次の二つのディレクトリが生成される。

`model/` ADVANTG内のMCNP5-1.60の計算に用いられた入力等

`output/` ADVANTGからの出力

- 次の二つのファイルを用いてMCNPによる解析を実施する。

`output/inp` 線源バイアスが付加されたMCNPの入力データ

`output/wwinp` Weight Window Parameter

- この二つのファイルを適当な名前（`○○○.inp`、`○○○.wwinp`）に変更し、次のようにMCNPの実行を行う。

```
mcnp5        inp=○○○.inp      wwinp=○○○.wwinp out=○○○.out runtpe=○○○.run
```

```
             meshtal=○○○.fmesh mctal=○○○.tal
```

MCNPは、`wwinp`ファイルにより外部からメッシュ毎のWeight Window Parameterを与えることの出来るいずれのバージョン（MCNP4以降）も用いることが出来る。

ADVANTGの出力とMCNPの実行 (続き:演習用シェルスクリプト)

ADVANTG.sh

```
#!/usr/bin/bash
if [ -d model ]; then rm -rf model ; fi
if [ -d fwcadis_adj_solution ]; then rm -rf fwcadis_adj_solution ; fi
if [ -d fwd_solution ]; then rm -rf fwd_solution ; fi
if [ -d adj_solution ]; then rm -rf adj_solution ; fi
if [ -d output ]; then rm -rf output ; fi
source $CODES/ADVANTG/advantg.rc
advantg $1.adv
if [ -f "output/wwinp" ]; then
    cp output/wwinp $1.wwinp
    cp output/inp $1.inp
    rm -rf model
    rm -rf fwcadis_adj_solution
    rm -rf fwd_solution
    rm -rf adj_solution
    rm -rf output
fi
rm -f adv.inp
```

ADVANTGをインストールしたディレクトリ

ADVANTGの入力データ例(演習1)

```
method          fwcadis
fwcadis_spatial_treatment  global
mcnp_input      1d-slab.inp
mcnp_tallies    12
anisl_library   27n19g
mesh_x          -100 100
mesh_x_ints     10
mesh_y          -100 100
mesh_y_ints     10
mesh_z          0 100
mesh_z_ints     20
```

runmcnp62.sh

```
#!/usr/bin/bash
#
export TMPDIR=~/.work/$USER`date +%H%M%S`
# script to run MCNP.
#
# set environment variable for directory containing MCNP6.2 and XSDIR file
#
export MCNP_EXE=$CODES/MCNP6.2/MCNP_CODE/MCNP620/bin/linux/mcnp6
export DATAPATH=$CODES/MCNP6.2/MCNP_DATA/
#
#
if [ -d $TMPDIR ]; then
    echo $TMPDIR " is exist. Try again 1-second later."
    exit
fi
#
mkdir $TMPDIR
echo " Working directry is \"$tmpdir "."
#
cp $1.inp $TMPDIR/inp
cp $1.wwinp $TMPDIR/wwinp
#
pushd $TMPDIR
    $MCNP_EXE i=inp mctal=tal xsdir=xsdir o=outp tasks $2
popd
#
mv $TMPDIR/outp $1.out
mv $TMPDIR/runtpc $1.run
if [ -f $TMPDIR/tal ] ; then mv $TMPDIR/tal $1.tal ; fi
if [ -f $TMPDIR/meshtal ] ; then mv $TMPDIR/meshtal $1.fmesh ; fi
rm -rf $TMPDIR
exit
```

MCNP6.2の実行形式プログラム

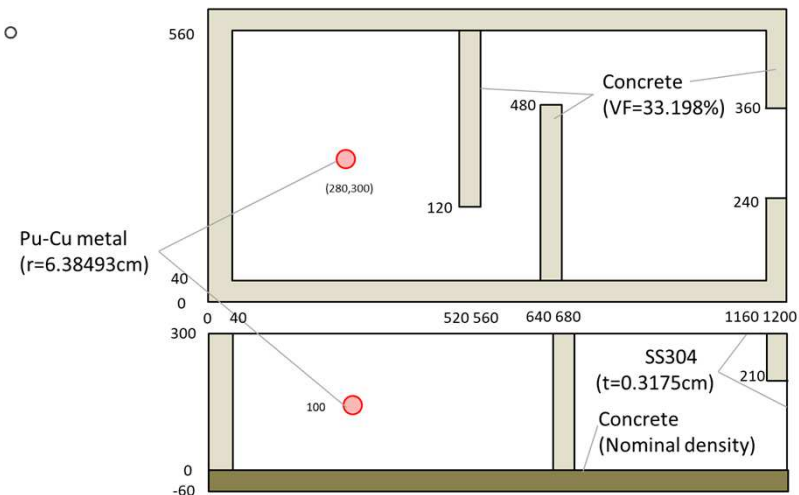
MCNP断面積データ(XSDIR)のあるディレクトリ

Ⅲ 様々な問題へのCADIS法の適用事例

-
1. ストリーミングを伴う線量分布の計算 (JEZEBEL実験)
 2. CADIS法によるスカイシャイン線量計算例

1. ストリーミングを伴う線量分布の計算 (Jezebel実験)

- Forward CADIS法を用いることにより、CADIS法では難しい線量分布のような複数の点における線量計算値の分散を同時に低減することが可能となる。
- その例として、CADIS法(及びForward CADIS法)による分散低減を行う遮蔽計算システムMAVRIC (SCALEコードシステムの一部)のサンプル問題となっている Jezebel 臨界実験装置の事故解析について示す。
- このサンプル問題は、1954年に実験が行われた球形状のプルトニウム金属の臨界実験装置"Jezebel"が臨界事故を起こした際の実験室周りの線量分布計算を行うものであり、SCALEコードシステムの臨界解析コードKENO-VIを用いて得られた臨界時の中性子源を線源としてMAVRICで線量分布計算を行う。
- ここでは、ADVANTGとMCNPを用いて、この問題をCADIS法及びForward CADIS法を用いた分散低減とともに計算した例を示す。

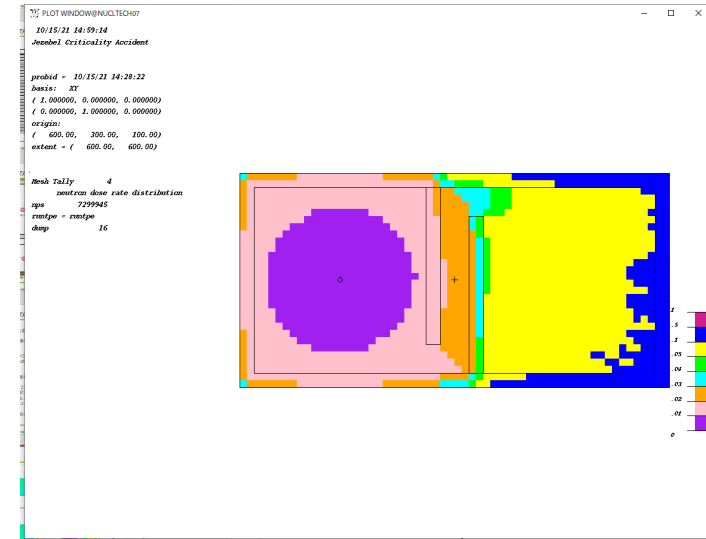
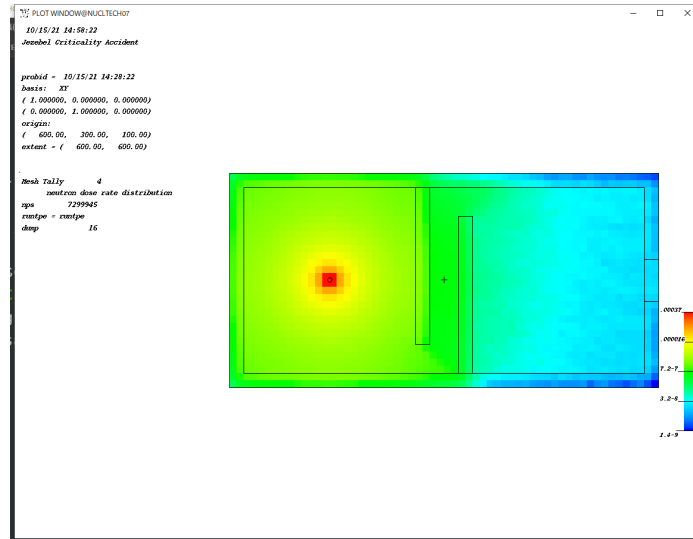


Jezebelの実験室のモンテカルロ法計算モデル

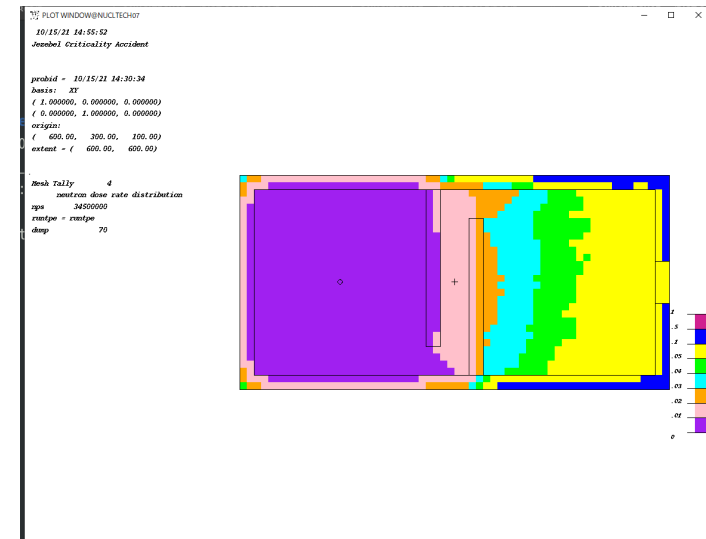
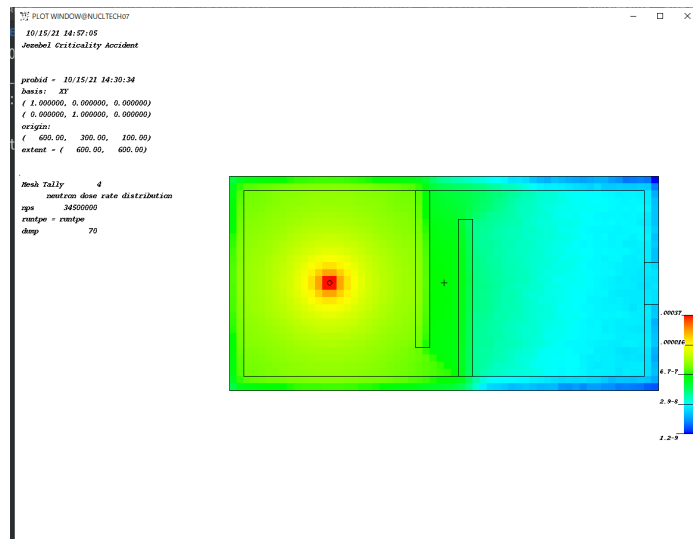
1. ストリーミングを伴う線量分布の計算 (Jezebel実験) (続き)

ADVANTG-MCNPによる計算例

分散低減無し



CADIS



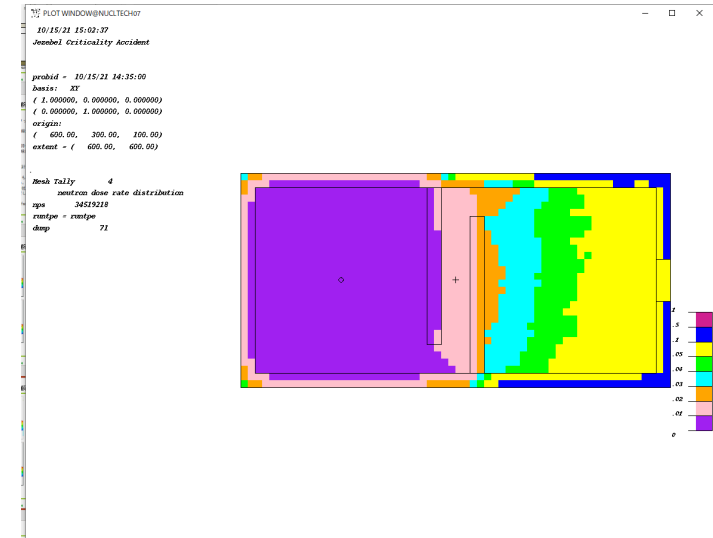
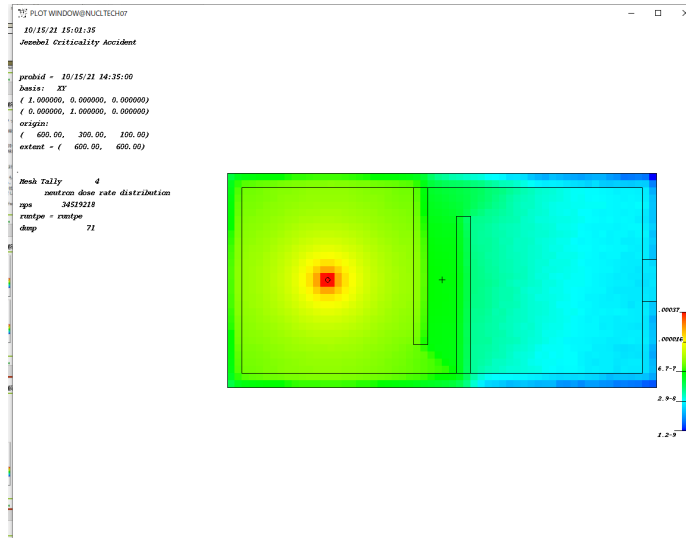
(線量分布)

(統計誤差)

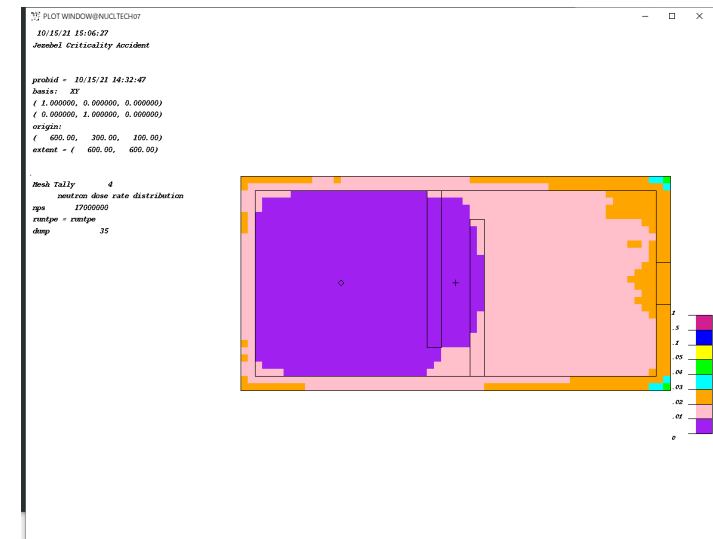
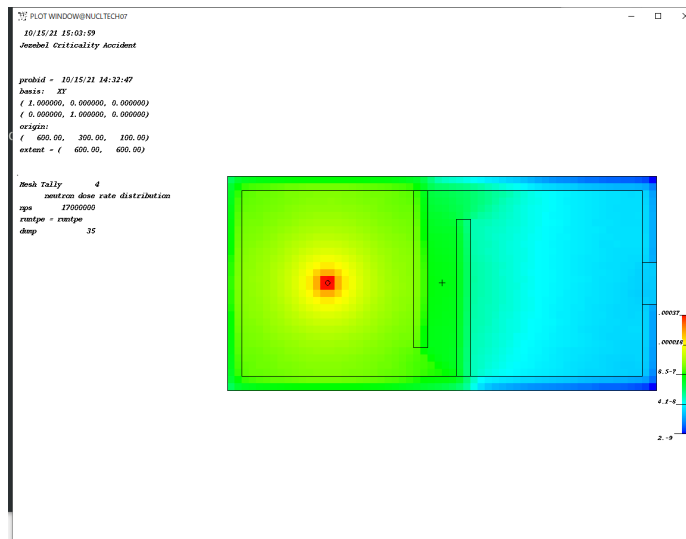
1. ストリーミングを伴う線量分布の計算 (Jezebel実験) (続き)

ADVANTG-MCNPによる計算例(続き)

Forward-CADIS
pathlength



Forward-CADIS
global



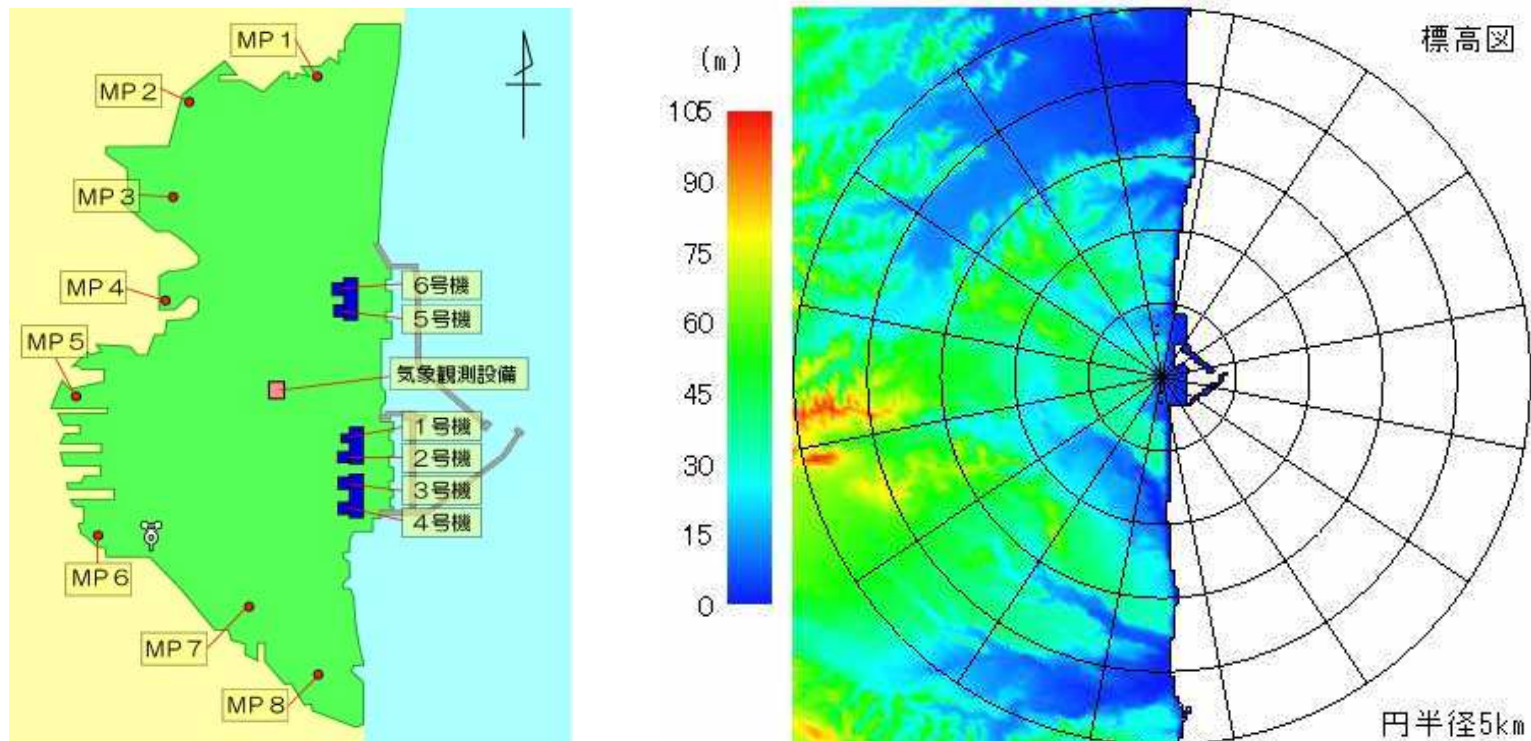
(線量分布)

(統計誤差)

2. CADIS法によるスカイシャイン線量計算例

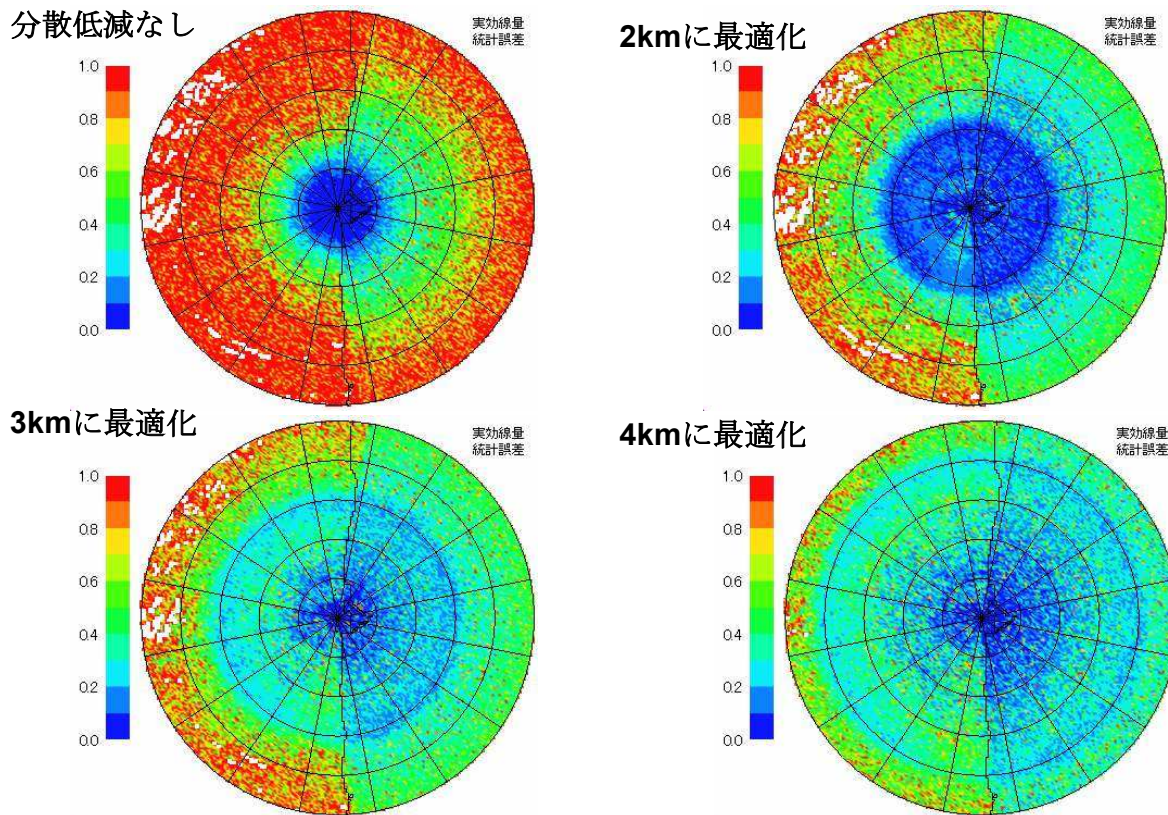
福島第一原子力発電所周辺(5kmまで)の地形をモデリングして、1号炉の建屋内2-3MeVのガンマ線源が充満した場合の線量率分布を、MCNP4c2に組み込んだ次期イベント面検出器(NESXE)で計算した。

CADIS法(ECBOコード)により、中心から2,3,4kmの円状の検出器に対して分散低減を最適化し、それらの計算結果を統計誤差を重みとして平均した。その結果、当時の計算機能力(シングルコア、Pentium4)でも数時間で、2.5km近辺までほぼ10%以下、4km付近でも20%程度の統計誤差で線量率分布を求めることが出来た。

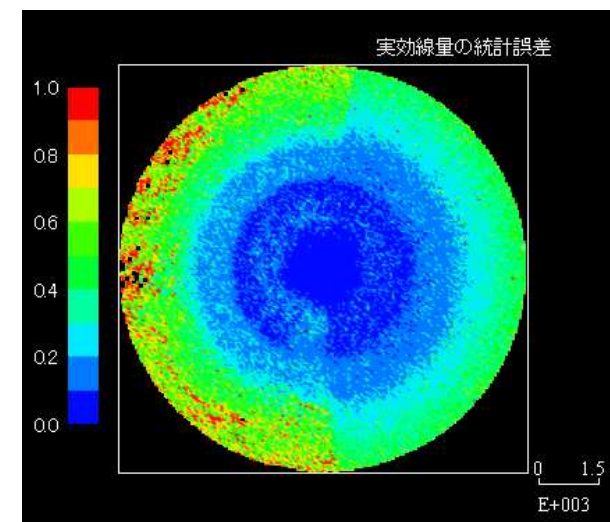
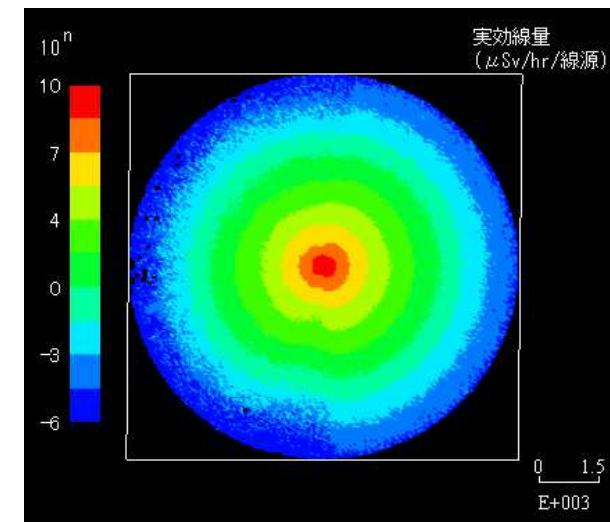


2. CADIS法によるスカイシャイン線量計算例 (続き)

最適分散低減のターゲットとする距離毎の統計誤差



平均した線量率と統計誤差

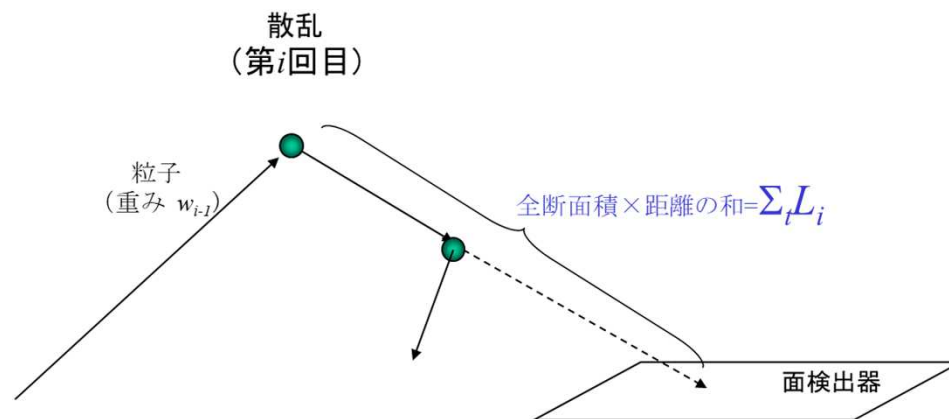


2. CADIS法によるスカイシャイン線量計算例 (続き)

次期イベント面検出器(NESXE)

- NESXEは、散乱が生じて粒子の方向が定まったら、散乱後の飛跡の延長が設定した面検出器と交叉するかどうかを調べて、交叉する場合には散乱点から面検出器までの減弱を乗じた粒子の重みをカウントする検出器である。
- 散乱のたびに検出器の方向を向く確率と減弱を乗じた重みを常にカウントする点検出器と比べると、実際にその方向に向いた粒子だけをカウントするNESXEは、突然にタリー値が上昇するような不安定性は少ないと考えられる。
- 面検出器をメッシュ状に与えることにより、平面上での線量率分布をNESXEで容易に求めることができ、NESXEのメッシュ毎の高さを変えることにより、地形に応じた地表の線量分布も求めることができる。
- MCNPのオリジナルのタリーには無いが、MCNP4c2に組み込むためのTALLYXサブルーチンは作成されて使用されたことがある。

NESXEの原理



この粒子による面検出器での線束

$$\phi = \sum_i \frac{w_i \cdot \exp(-\sum_t L_i)}{\cos \theta_i}$$

IV MCNP計算結果の統計指標

MCNPの統計指標*)

MCNPでは、評価量(タリー:Tallyと呼んでいる)に関して、次の量を出カリストに出力し、以下の10の判定基準で計算結果の統計的妥当性を判定する。

タリー平均値 Tally Mean \bar{x}

- ① (計算の後半では)ヒストリー数(N)の増減で \bar{x} の値が大きく変動しないこと

相対誤差 Relative Error R

- ② $R < 0.1$ (点検出器では $R < 0.05$)
 ③ R は N とともに単調減少すること
 ④ (計算の後半では) R は $1/\sqrt{N}$ で減少すること

分散の分散 Variance of the the Variance VOV

- ⑤ VOV の値は0.1より小さいこと(すべての種類のタリー)
 ⑥ (計算の後半では) VOV は単調に減少すること
 ⑦ (計算の後半では) VOV は $1/N$ で減少すること

FOM Figure of Merit

- ⑧ (計算の後半では)FOMは統計的に一定値であること
 ⑨ (計算の後半では) FOMは単調減少あるいは増加しないこと

確率密度関数 Tally PDF $f(x)$

- ⑩ 大きい方から201個のスコアリングに関連するイベントのSLOPEが3以上であること。

*) J.K.Shultis and R.E.Faw, *AN MCNP PRIMER*, (December 2011)の内容に基づく。

MCNPの統計指標（出力例と相対誤差R）

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      114
=====
tfc bin      --mean--      -----relative error-----      ----variance of the variance----      --figure of merit--      -pdf-
behavior      behavior      value  decrease  decrease rate      value  decrease  decrease rate      value  behavior      slope
desired      random      <0.10  yes      1/sqrt(nps)      <0.10  yes      1/nps      constant  random      >3.00
observed      random      0.02   yes      yes              0.00   yes      yes        constant  random      4.88
passed?       yes        yes     yes      yes              yes     yes      yes        yes       yes        yes
              ①          ②      ③        ④              ⑤      ⑥        ⑦          ⑧          ⑨          ⑩
=====

```

分散 $\sigma^2 = \int [x - E(x)]^2 f(x) dx = E(x^2) - [E(x)]^2$. の有限個のサンプルでの推定値である、

推定標準偏差 $S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \approx \bar{x}^2 - \bar{x}^2$ ただし $\bar{x}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2$.

を用いて、平均値 \bar{x} の推定分散 $S_{\bar{x}}^2 = \frac{S^2}{N}$ を求めることができる。ここで、 x_i

はヒストリー*i*のタリー値、*N*はヒストリー数である。統計的に意味のあるサンプリング (*N*を無限と見なせる)が行われていれば、 \bar{x} の信頼区間は次の通りとなる。

65%信頼区間 $\bar{x} - S_{\bar{x}} < E(x) < \bar{x} + S_{\bar{x}}$,

95%信頼区間 $\bar{x} - 2S_{\bar{x}} < E(x) < \bar{x} + 2S_{\bar{x}}$,

推定分散から相対誤差は $R \equiv \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}}$ で求められる。

MCNPの統計指標 (FOMとVOV)

相対誤差の判断基準

Range of R	Quality of Tally
> 0.5	Meaningless
0.2 to 0.5	Factor of a few
< 0.1	Reliable (except for point/ring detectors)
< 0.05	Reliable even for point/ring detectors

FOMの定義：大きいほど計算効率が良い

$$\text{FOM} = \frac{1}{R^2 T}$$

VOVの定義

$$\text{VOV} = \frac{S^2(S_x^2)}{S_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} - \frac{1}{N}$$

MCNPの統計指標(確率密度関数PDFの傾き)

タリーの確率密度関数

タリーするイベントの頻度

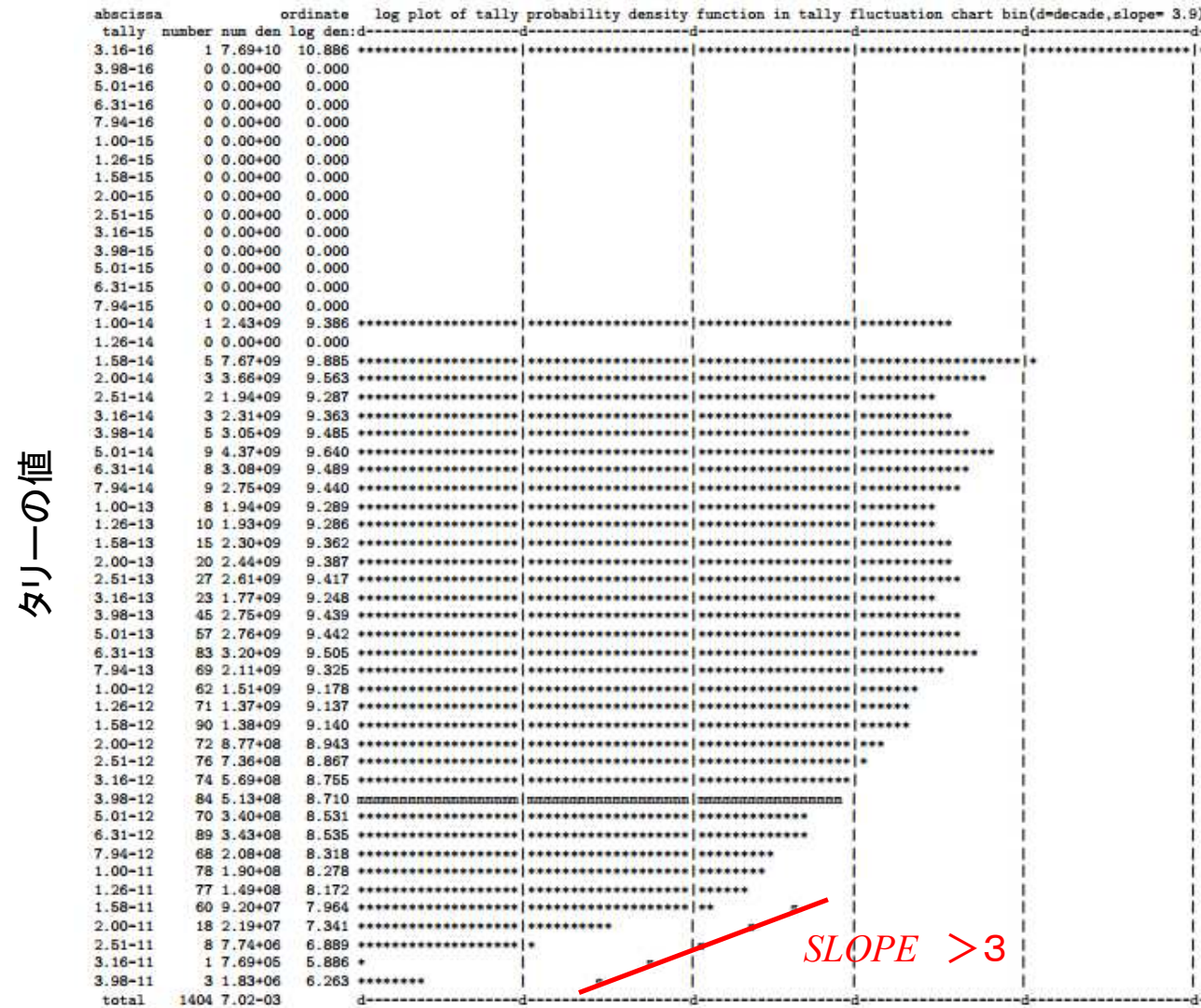


Figure 8. An example of the Tally PDF plot produced in the MCNP output.

解析演習

-
- 各演習問題のMCNP入力データは事前に提供します。
 - データの確認はMCNP6.2で行っています。
 - 断面積ライブラリはMCNPに付属ENDF71xライブラリ(.80c)を用います。
 - 基本となるADVANTGの入力データも用意しますので、演習の際にこれを参考として入力を作成ください。

演習1 1次元透過問題

【概要】

鉄とポリエチレンから成る1次元半無限平板多重層の透過問題である。鉄はいわゆる炭素鋼であり、厚さは10cmである。ポリエチレンも同じ厚さであり、鉄と交互に並べられている。

^{252}Cf の自発核分裂中性子が、この多層の半無限平板に対して垂直に、一様・平行なビームとして入射している。単位強度 ($1 \text{ n/cm}^2/\text{s}$)の中性子ビームが入射しているときの、各層の境界における中性子線量率及び二次ガンマ線線量率 (1cm 線量率) を計算されたい。

モデル

鉄とポリエチレンの層が5組配列された半無限(ビームと直角方向が無限)平板

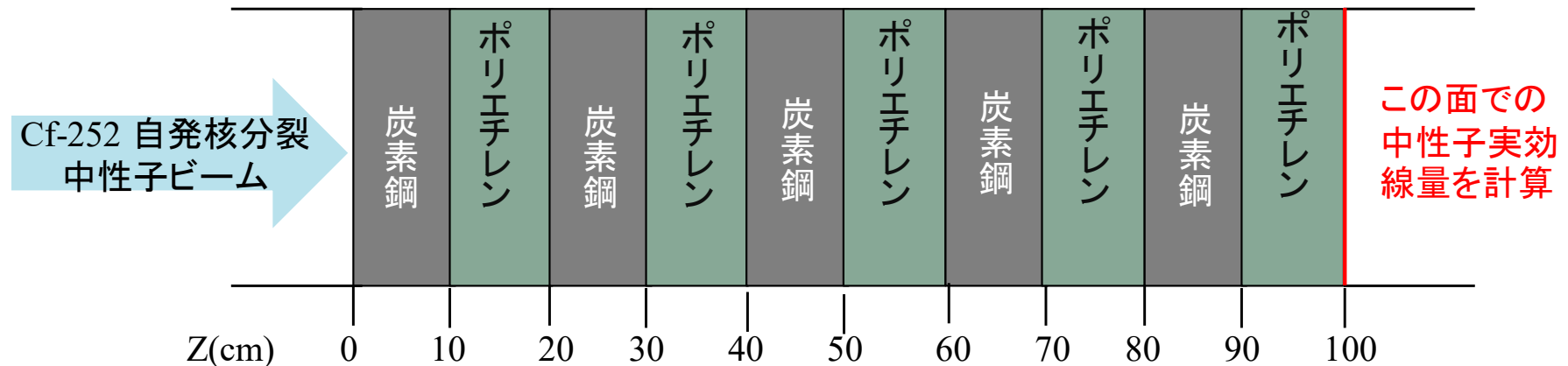


図1 1次元透過問題のモデル (鉄・ポリエチレン層が5組)

演習1 1次元透過問題

組成

炭素鋼 :	密度	7.8212g/cm ³
Fe	99wt%	8.350 × 10 ⁻² atom/barn/cm
同位体組成	Fe-54	5.84535 atom%, Fe-56 91.75436 atom%,
(米国NIST)	Fe-57	2.11910 atom%, Fe-58 0.28240 atom%
C	1wt%	3.922 × 10 ⁻³ atom/barn/cm
ポリエチレン :	密度	0.92g/cm ³
H		7.900 × 10 ⁻² atom/barn/cm
C		3.950 × 10 ⁻² atom/barn/cm

タリー

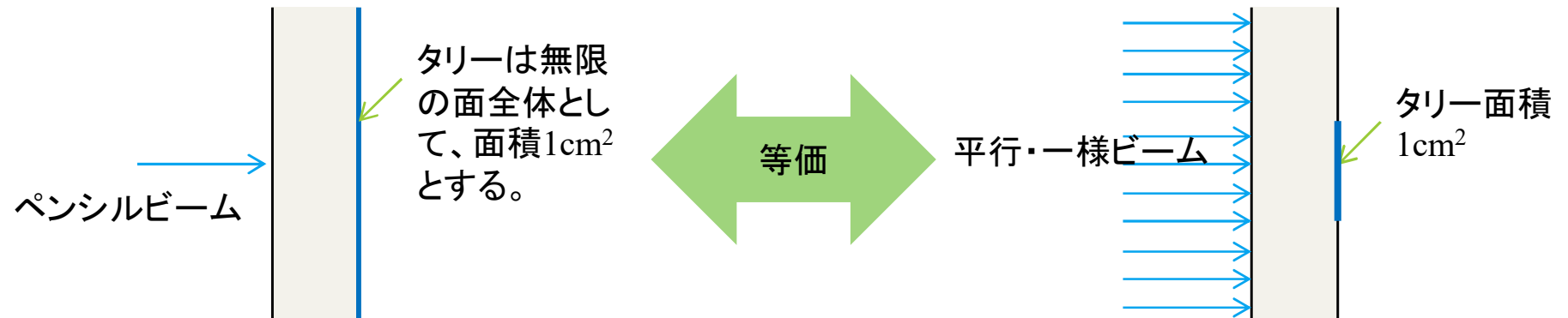
- ✓ 深さ10cmごとに面検出器を設定し、これらの面での実効線量を計算する。
- ✓ 線量換算係数は、日本原子力学会標準の実効線量への換算係数を用いる。
- ✓ 半無限平板である面検出器の面積は1として、この面で積分した中性子線量の統計誤差を最小にするように、分散低減を行う。
- ✓ 線量及び統計誤差の分布をみるためにメッシュタリーも用いる。

演習1 1次元透過問題

線源

^{252}Cf の自発核分裂中性子スペクトルを持ったペンシルビーム状の中性子線源を、面に垂直に入射させる。

半無限平板体系であるので、Reciprocal Theoryにより、これは一様な平行ビームが入射するのと等価となる。各面検出器の面積を1としたことによりペンシルビーム線源とした場合の等価な線源強度は $1\text{n/cm}^2/\text{s}$ となる。



随伴線束の計算モデル

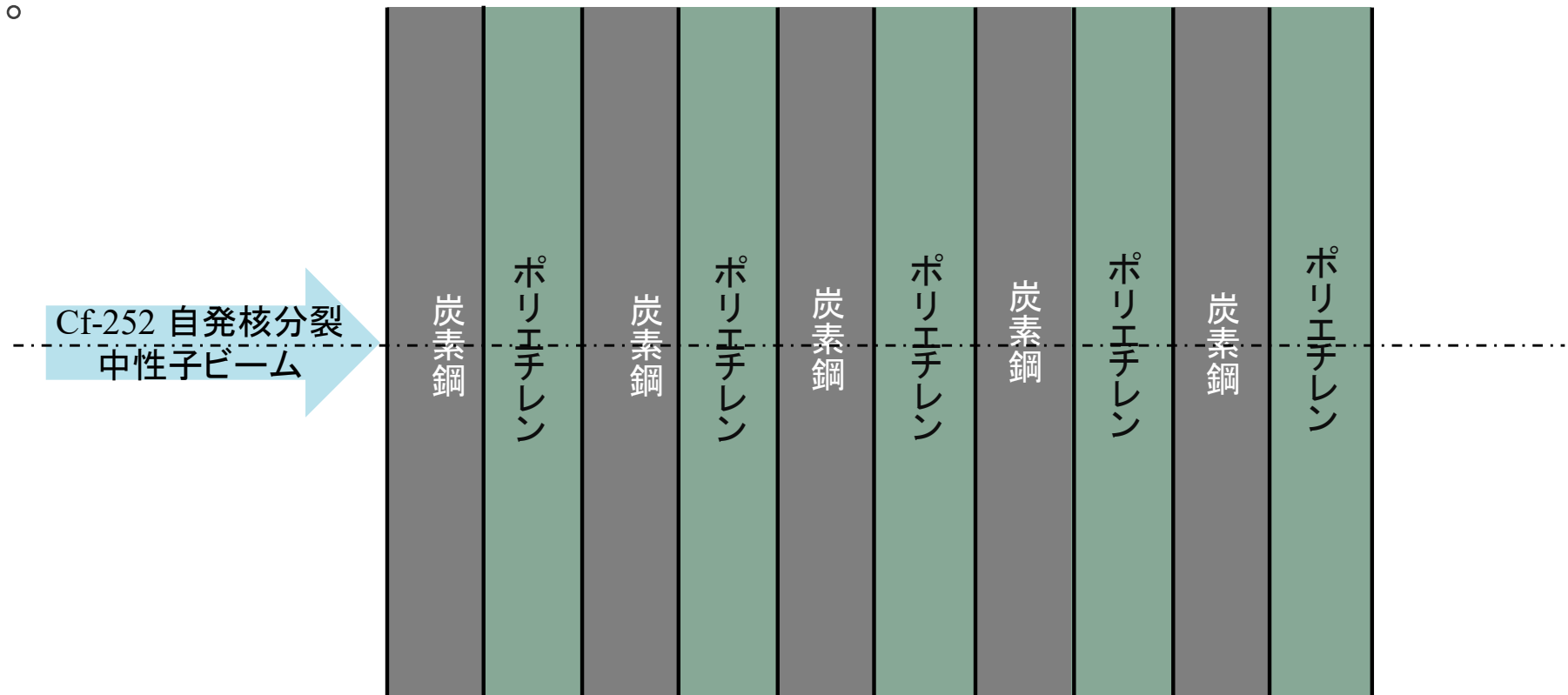
- X方向、Y方向に $\pm 100\text{cm}$ 、Z方向に $0\sim 100\text{cm}$ の範囲で随伴線束を計算する(計算範囲外は一定のWeight Window Parameterとなる)。
- X方向、Y方向のメッシュ幅は 20cm 、Z方向のメッシュ幅は 5cm とする。
- 随伴線源(最適化対象のタリー)は次の二つのケースを考える。

ケース1	一番外側の面タリーのみを随伴線源とする	⇒	CADIS法
ケース2	10cm厚さごとの全ての面タリーを随伴線源とする	⇒	FW-CADIS法

演習1 1次元透過問題 (ケース0)

ケース0 分散低減なし

ADVANTGを用いないで、出口面及び各境界面での1cm線量当量を計算する。



★全ケースともCPU時間は10分として、各ケースの各面での統計誤差及びMCNPの10の計算結果判断基準（付録参照）を比較する。

演習1 1次元透過問題 (ケース1)

ケース1 CADIS法による出口面の分散低減

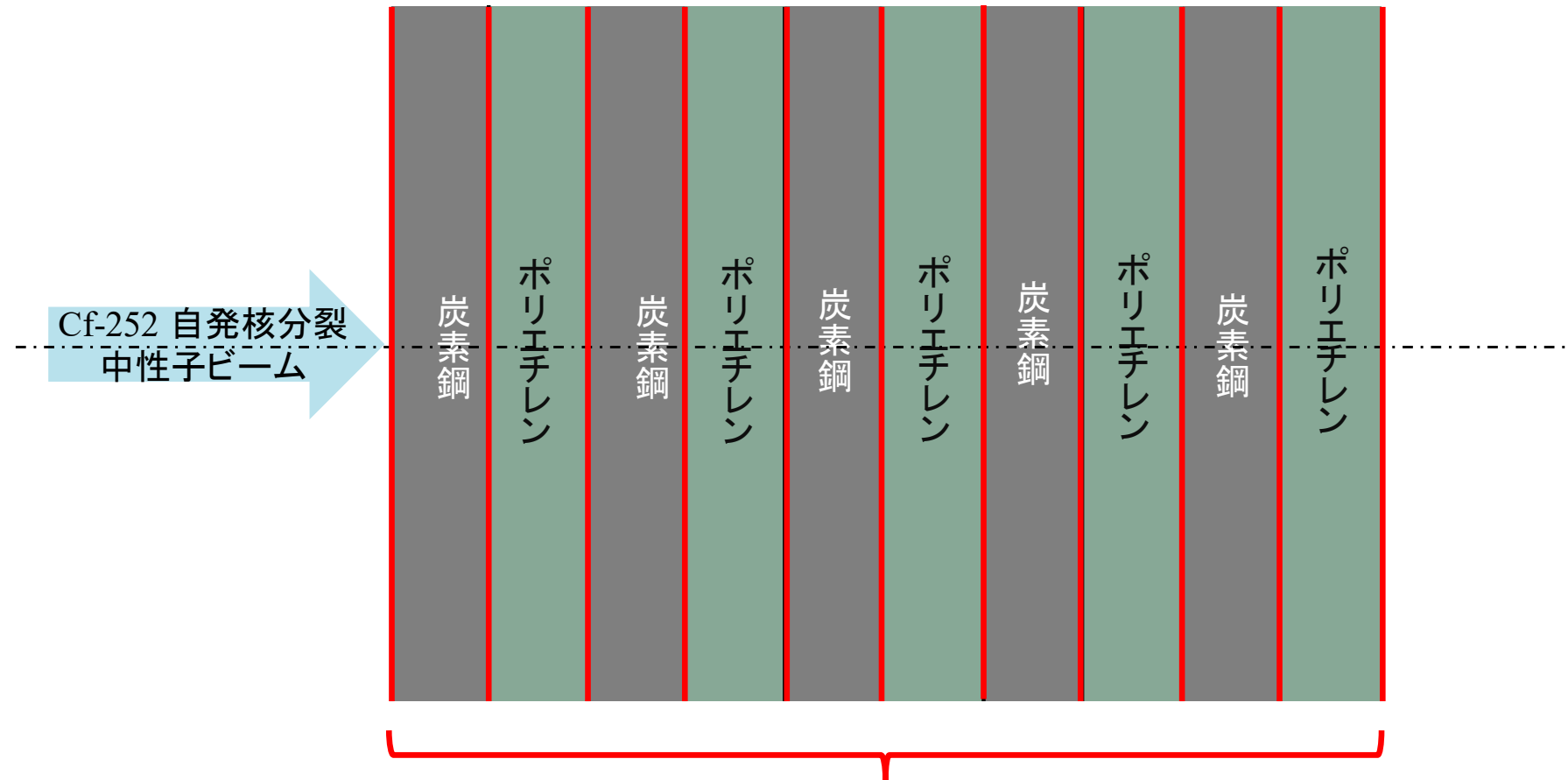
出口面に随伴線源を設定してCADIS法により算出した分散低減パラメータを用いて、出口面及び各境界面での1cm線量当量を計算する。



演習1 1次元透過問題 (ケース2)

ケース2 Forward CADIS法による系全体の分散低減

各境界面に随伴線源を設定してForward CADIS法により計算した分散低減パラメータを用いて、出口面及び各境界面での1cm線量当量を計算する。

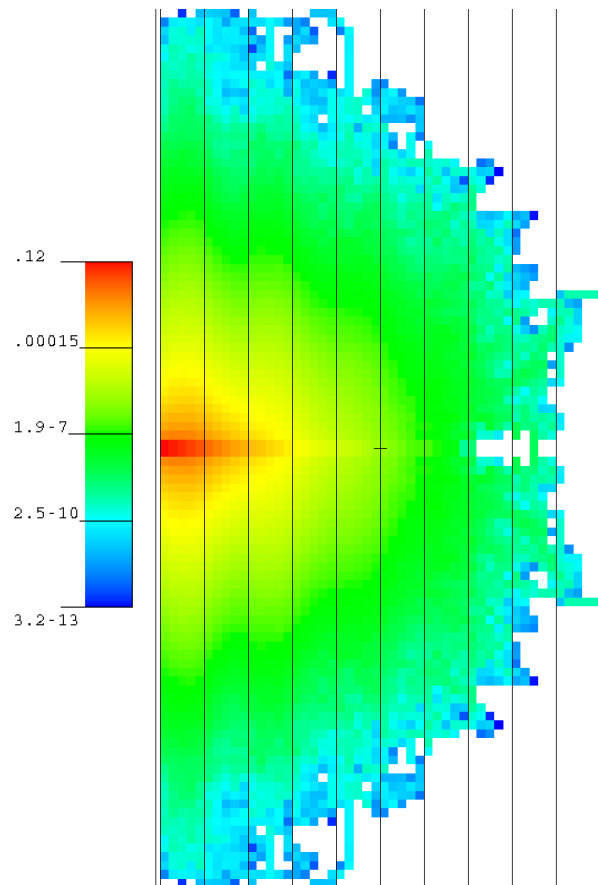


随伴線源(中性子の実効線量換算係数)

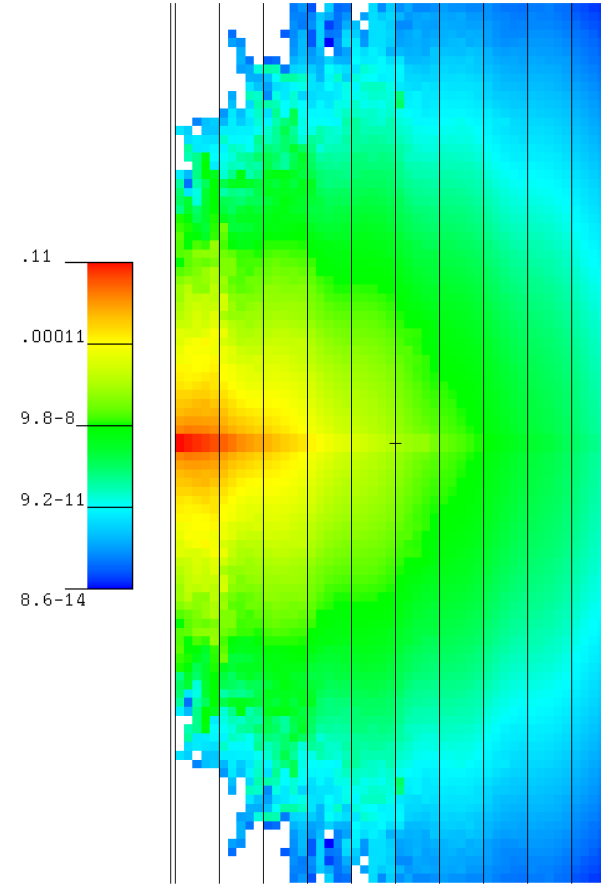
演習1 1次元透過問題（計算結果の例）

FMESHによる実効線量分布計算結果

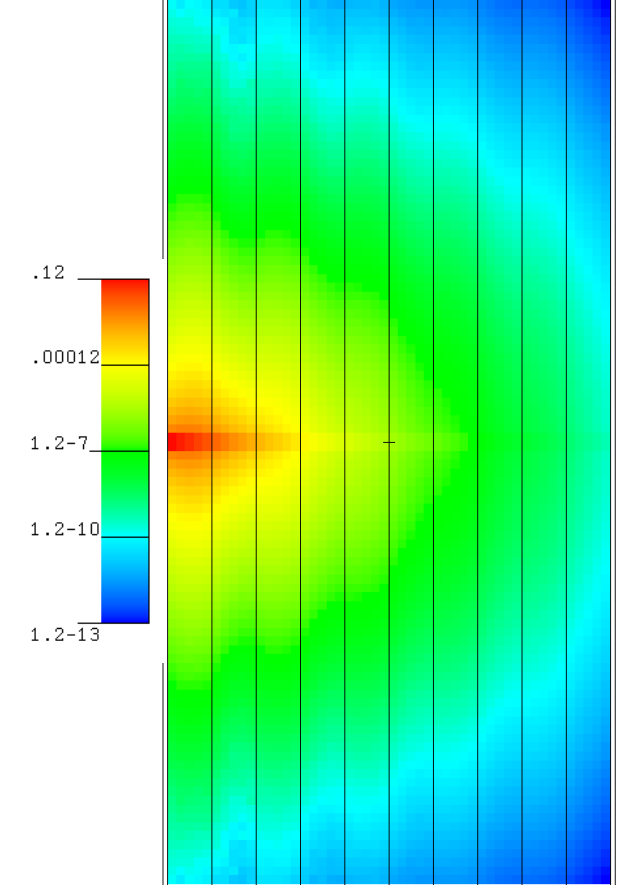
分散低減無し



CADIS法



FW-CADIS法



演習2、3 使用済燃料輸送容器遮へい解析

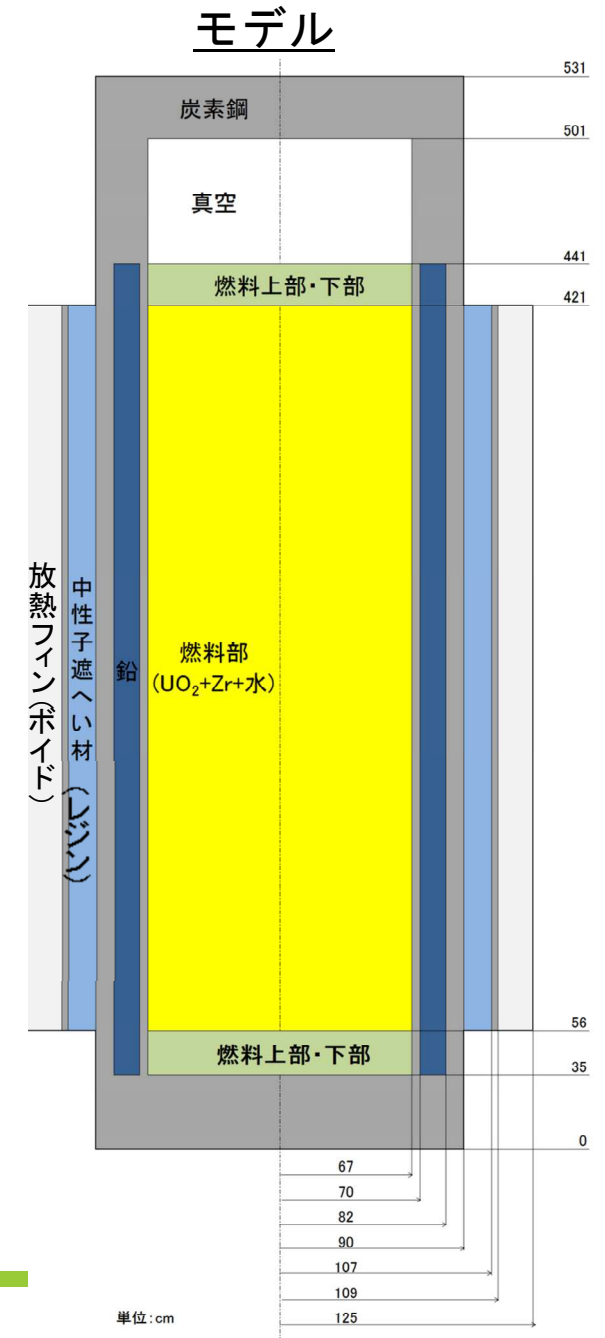
【概要】

実際の輸送容器を模擬した解析を行い、ADVANTGの実用性を確認する。

この輸送容器はPWRからの使用済み燃料を輸送する比較的大型の湿式輸送容器をデフォルメしたものである。

(寸法)

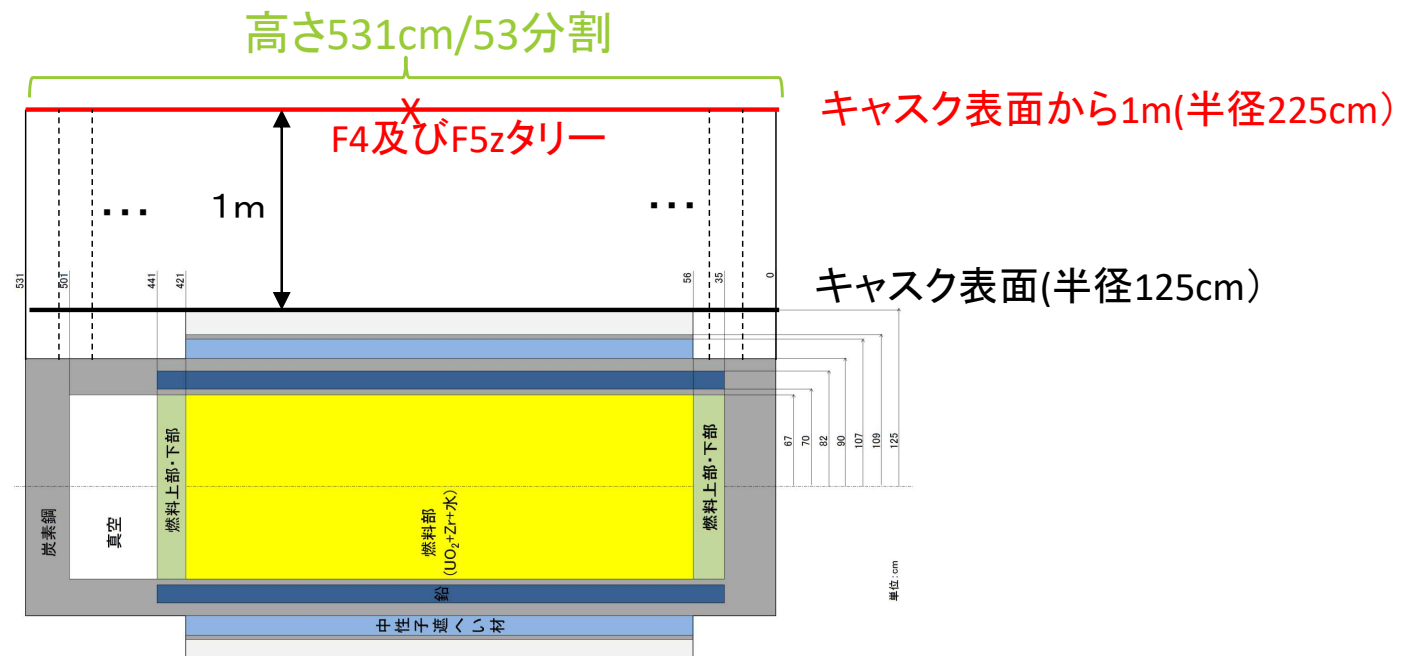
全長	531 cm
外半径 (放熱フィン先端)	250 cm
本体胴外径	180 cm
キャビティ内径	134 cm
キャビティ長	466 cm
側胴部鉛厚さ	12 cm
中性子遮蔽材 (レジン) 厚さ	17 cm
蓋部炭素鋼厚さ	30 cm
底部炭素鋼厚さ	35 cm



演習2、3 使用済燃料輸送容器遮へい解析(続き)

タリー

- ✓側面の表面から1mの位置に円筒状のメッシュタリーを設定して、中性子及び二次ガンマ線による1cm線量当量を計算する。
- ✓メッシュタリーの半径方向の厚さは1cm（半径225 - 226 cm）とし、軸方向に高さ約10cmずつに区切って、軸方向の線量分布を評価する。
- ✓線量換算係数は、ICRP publication 74に記載された1cm線量当量（ $H^*(10)$ ）への換算係数を用いる。
- ✓メッシュタリーに加えて燃料中心高さ（キャスク下端から238.5cm）の表面から1mの位置に半径1cm×高さ1cmの円環状セルによるF4タリーとリング検出器（F5zタリー）を設けて、統計指標を調べる。



演習2、3 使用済燃料輸送容器遮へい解析(続き)

線源

- ✓ ^{239}Pu の熱中性子入射核分裂中性子スペクトル (Wattの式で表す)を持った一様線源が、燃料部に均一に広がっているものとする。

(Wattの式)

$$f(E) = C \exp(-E/a) \sinh(\sqrt{bE})$$

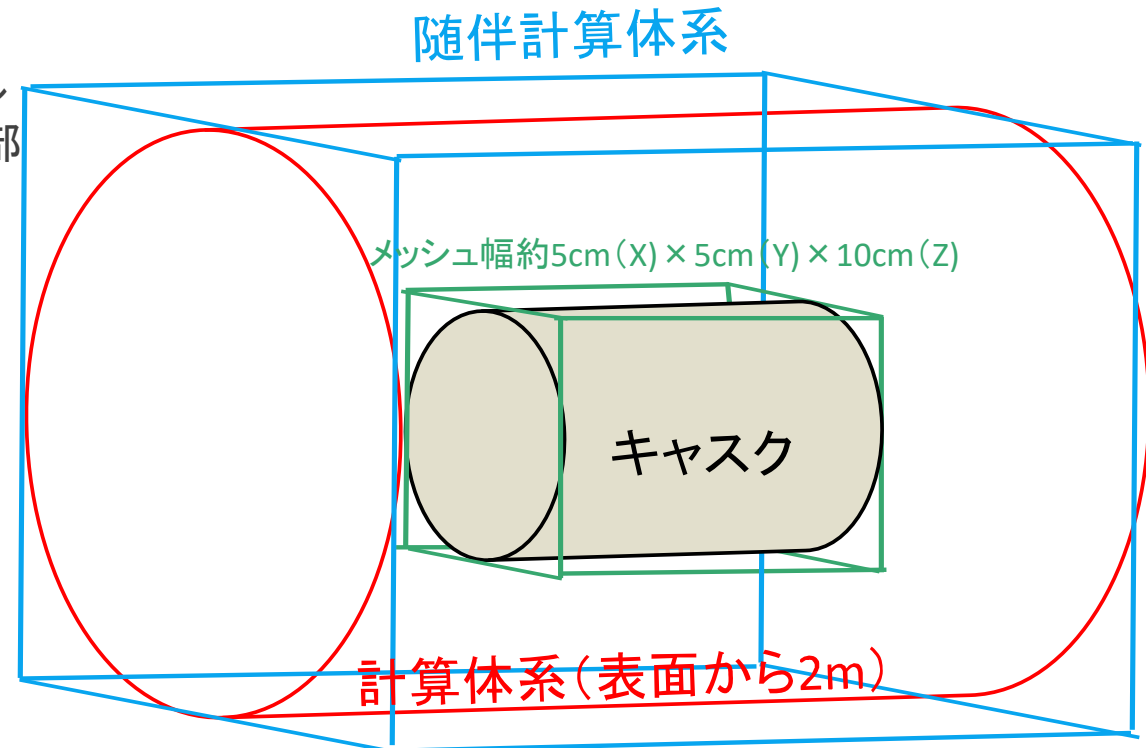
a=0.966
b=2.842

(MCNP6.2 manual CCC850, Apedix C)

- ✓ 線源エネルギーバイアスを128群構造で与える。
- ✓ 線源空間バイアス(半径、軸方向)は与えない。

ADVANTGによる分散低減

- ✓ FW-CADIS法により、側面表面から1mでの中性子及び二次ガンマ線の線量布の統計誤差を最小にするような分散低減パラメータを計算する。
- ✓ 上図のように円筒形状のMCNPIによる計算体系を包含する直方体のモデルで随伴線束を計算する。
- ✓ 随伴計算メッシュ幅はキャスクを含む部分(X,Y=0~125cm、Z=0~531cm)のX,Y方向は約5cm、Z方向は約10cmとし、それより外側は1メッシュとする。



演習2、3 使用済燃料輸送容器遮へい解析(続き)

計算ケース

- (1) ADVANTGを用いたFW-CADIS法による分散低減
- (2) アナログ・モンテカルロ法(分散低減なし)

- ◆ 上記のケースの計算を中性子(演習2)及び二次ガンマ線(演習3)の線量率について行う。
- ◆ メッシュタリーについては、線量分布の相対誤差Rの分布を比較する。
- ◆ F4及びF5zタリーについては、10個の統計指標を比較する。

演習2、3 使用済燃料輸送容器遮へい解析 (解析結果:中性子)

分散低減無し

(F5zタリ一) 5.49337E-10 ± 2.25%

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      5
=====
tfc bin --mean-- -----relative error----- ----variance of the variance---- --figure of merit-- -pdf-
behavior behavior value decrease decrease rate value decrease decrease rate value behavior slope
desired random <0.05 yes 1/sqrt(nps) <0.10 yes 1/nps constant random >3.00
observed random 0.02 yes yes 0.01 yes yes constant random 10.00
passed? yes yes yes yes yes yes yes yes yes yes
=====

```

(F4タリ一) 7.98813E-10 ± 29.79%

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      14
=====
tfc bin --mean-- -----relative error----- ----variance of the variance---- --figure of merit-- -pdf-
behavior behavior value decrease decrease rate value decrease decrease rate value behavior slope
desired random <0.10 yes 1/sqrt(nps) <0.10 yes 1/nps constant random >3.00
observed random 0.30 yes yes 0.12 yes yes constant random 0.00
passed? yes no yes yes no yes yes yes yes yes no
=====

```

CADIS(F4に最適化)

(F5zタリ一) 5.41996E-10 ± 0.10%

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      5
=====
tfc bin --mean-- -----relative error----- ----variance of the variance---- --figure of merit-- -pdf-
behavior behavior value decrease decrease rate value decrease decrease rate value behavior slope
desired random <0.05 yes 1/sqrt(nps) <0.10 yes 1/nps constant random >3.00
observed decrease 0.00 yes yes 0.00 yes yes constant random 2.82
passed? no yes yes yes yes yes yes yes yes no
=====

```

(F4タリ一) 5.38513E-10 ± 0.79%

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      14
=====
tfc bin --mean-- -----relative error----- ----variance of the variance---- --figure of merit-- -pdf-
behavior behavior value decrease decrease rate value decrease decrease rate value behavior slope
desired random <0.10 yes 1/sqrt(nps) <0.10 yes 1/nps constant random >3.00
observed random 0.01 yes yes 0.00 yes yes constant random 9.86
passed? yes yes yes yes yes yes yes yes yes yes
=====

```

FW-CADIS(FMESHに最適化)

(F5zタリ一) 5.43275E-10 ± 0.17%

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      5
=====
tfc bin --mean-- -----relative error----- ----variance of the variance---- --figure of merit-- -pdf-
behavior behavior value decrease decrease rate value decrease decrease rate value behavior slope
desired random <0.05 yes 1/sqrt(nps) <0.10 yes 1/nps constant random >3.00
observed random 0.00 yes yes 0.00 yes no constant increase 2.82
passed? yes yes yes yes yes yes yes no no
=====

```

(F4タリ一) 5.30683E-10 ± 1.30%

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      14
=====
tfc bin --mean-- -----relative error----- ----variance of the variance---- --figure of merit-- -pdf-
behavior behavior value decrease decrease rate value decrease decrease rate value behavior slope
desired random <0.10 yes 1/sqrt(nps) <0.10 yes 1/nps constant random >3.00
observed random 0.01 yes yes 0.00 yes yes constant random 10.00
passed? yes yes yes yes yes yes yes yes yes yes
=====

```

演習2、3 使用済燃料輸送容器遮へい解析 (解析結果:二次ガンマ線)

分散低減無し

(F5zタリー) 2.40063E-10 ± 0.68%

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      105
=====
tfc bin  --mean--  -----relative error-----  ---variance of the variance---  --figure of merit--  -pdf-
behavior  behavior  value  decrease  decrease rate  value  decrease  decrease rate  value  behavior  slope
desired  random  <0.05  yes  1/sqrt(nps)  <0.10  yes  1/nps  constant  random  >3.00
observed  random  0.01  yes  yes  0.01  no  no  constant  random  5.05
passed?  yes  yes  yes  yes  yes  no  no  yes  yes  yes
=====

```

(F4タリー) 2.68127E-10 ± 10.44%

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      114
=====
tfc bin  --mean--  -----relative error-----  ---variance of the variance---  --figure of merit--  -pdf-
behavior  behavior  value  decrease  decrease rate  value  decrease  decrease rate  value  behavior  slope
desired  random  <0.10  yes  1/sqrt(nps)  <0.10  yes  1/nps  constant  random  >3.00
observed  increase  0.10  yes  yes  0.02  yes  yes  constant  random  0.00
passed?  no  no  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  no
=====

```

CADIS(F4に最適化)

(F5zタリー) 2.40395E-10 ± 0.22%

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      105
=====
tfc bin  --mean--  -----relative error-----  ---variance of the variance---  --figure of merit--  -pdf-
behavior  behavior  value  decrease  decrease rate  value  decrease  decrease rate  value  behavior  slope
desired  random  <0.05  yes  1/sqrt(nps)  <0.10  yes  1/nps  constant  random  >3.00
observed  random  0.00  yes  yes  0.03  no  no  constant  random  2.78
passed?  yes  yes  yes  yes  yes  no  no  yes  yes  no
=====

```

(F4タリー) 2.39018E-10 ± 2.05%

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      114
=====
tfc bin  --mean--  -----relative error-----  ---variance of the variance---  --figure of merit--  -pdf-
behavior  behavior  value  decrease  decrease rate  value  decrease  decrease rate  value  behavior  slope
desired  random  <0.10  yes  1/sqrt(nps)  <0.10  yes  1/nps  constant  random  >3.00
observed  random  0.02  yes  yes  0.00  yes  yes  constant  random  5.09
passed?  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes
=====

```

FW-CADIS(FMESHに最適化)

(F5zタリー) 2.41084E-10 ± 0.23%

```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      105
=====
tfc bin  --mean--  -----relative error-----  ---variance of the variance---  --figure of merit--  -pdf-
behavior  behavior  value  decrease  decrease rate  value  decrease  decrease rate  value  behavior  slope
desired  random  <0.05  yes  1/sqrt(nps)  <0.10  yes  1/nps  constant  random  >3.00
observed  random  0.00  yes  yes  0.01  no  no  constant  random  2.21
passed?  yes  yes  yes  yes  yes  no  no  yes  yes  no
=====

```

(F4タリー) 2.34683E-10 ± 2.14 %

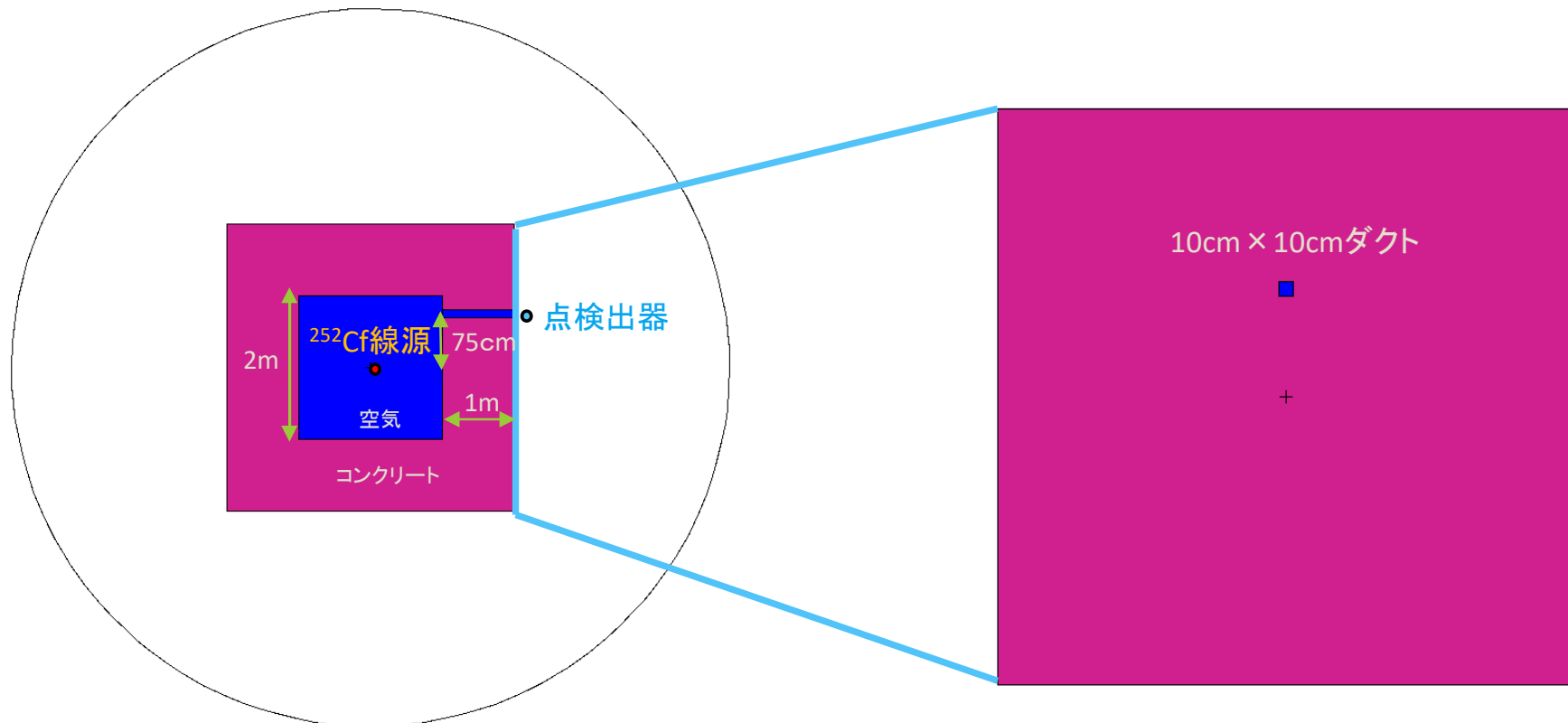
```

=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      114
=====
tfc bin  --mean--  -----relative error-----  ---variance of the variance---  --figure of merit--  -pdf-
behavior  behavior  value  decrease  decrease rate  value  decrease  decrease rate  value  behavior  slope
desired  random  <0.10  yes  1/sqrt(nps)  <0.10  yes  1/nps  constant  random  >3.00
observed  random  0.02  yes  yes  0.00  yes  yes  constant  random  5.06
passed?  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes
=====

```

演習4 ストリーミング問題

- ^{252}Cf 中性子源が中心に置かれた内法2m、壁厚1mの立方体の部屋にオフセットされた10cm × 10cmの正方形断面ダクトがある場合のダクト出口での中性子線量率を計算する。
- 随伴線束は壁の外側までを一辺5cmの立方体のメッシュに分割して計算する。壁の外は1メッシュあればよい。
- ダクト出口の中性子1cm線量当量率を点検出器で計算する。

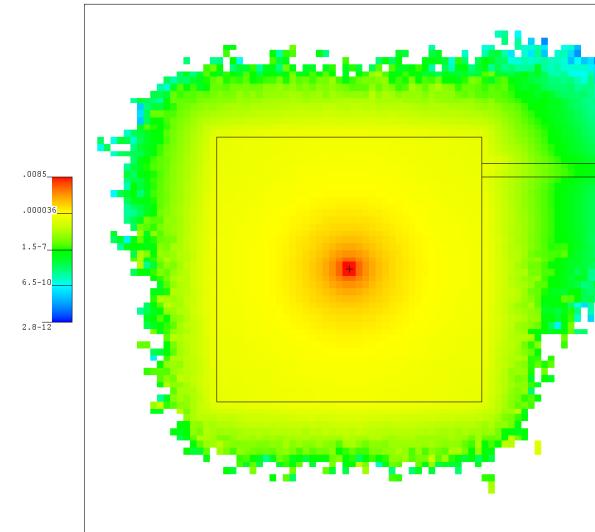
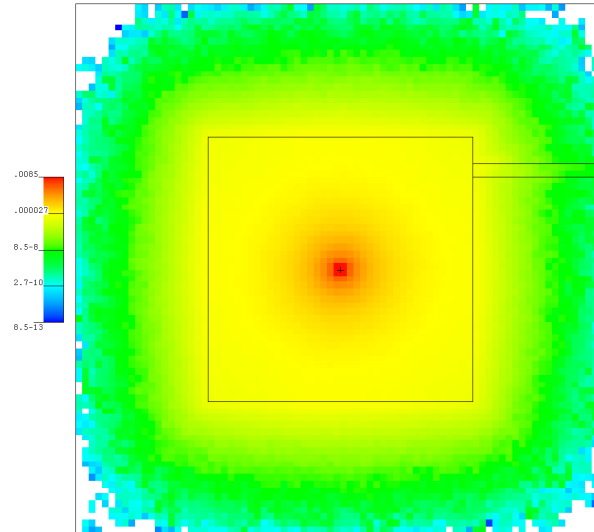


演習4 ストリーミング問題 (計算例:線量率、相対誤差分布)

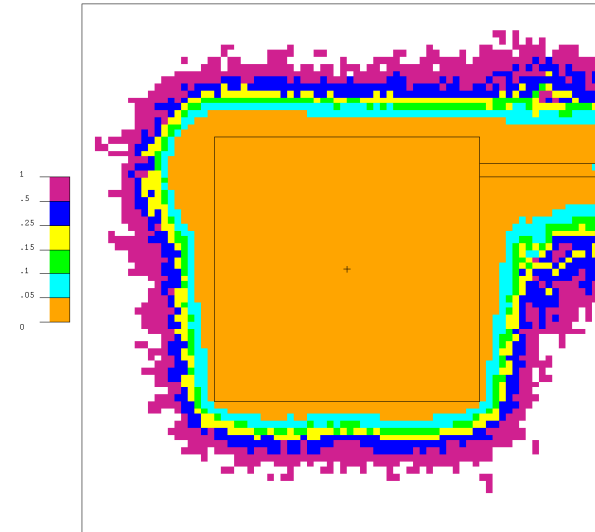
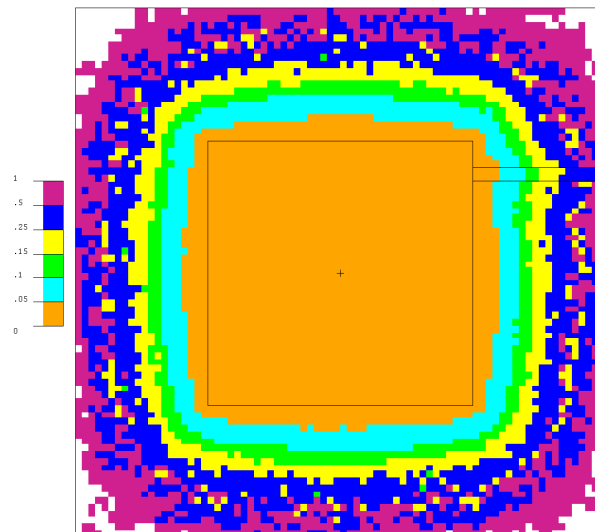
分散低減無し

CADIS法

線量率



相対誤差



演習4 ストリーミング問題 (計算例:統計指標)

分散低減無し

```
=====
                      results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally                    5
tfc bin  --mean--  -----relative error-----  ----variance of the variance----  --figure of merit--  -pdf-
behavior  behavior  value  decrease  decrease rate  value  decrease  decrease rate  value  behavior  slope
desired  random  <0.05  yes  1/sqrt(nps)  <0.10  yes  1/nps  constant  random  >3.00
observed  random  0.08  yes  yes  0.26  yes  no  constant  random  2.27
passed?   yes  no  yes  yes  no  yes  no  yes  yes  no
=====
```

相対誤差 7.7% ヒストリー数 3,420,088

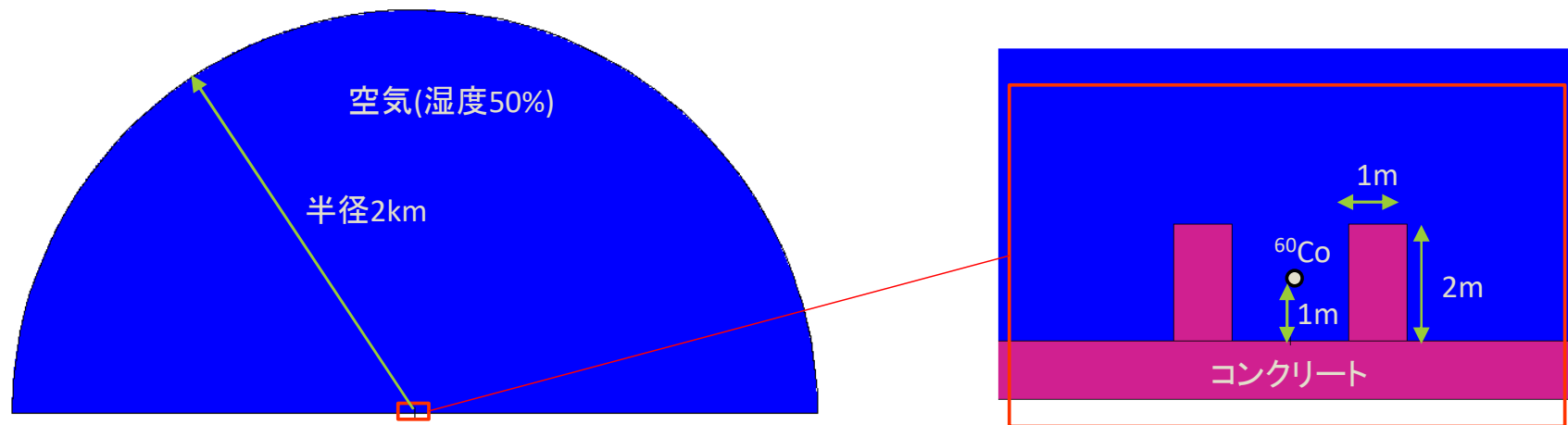
CADIS法

```
=====
                      results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally                    5
tfc bin  --mean--  -----relative error-----  ----variance of the variance----  --figure of merit--  -pdf-
behavior  behavior  value  decrease  decrease rate  value  decrease  decrease rate  value  behavior  slope
desired  random  <0.05  yes  1/sqrt(nps)  <0.10  yes  1/nps  constant  random  >3.00
observed  random  0.00  yes  yes  0.01  yes  yes  constant  random  3.74
passed?   yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes  yes
=====
```

相対誤差 0.73% ヒストリー数 18,626,588

演習5 スカイシャイン問題

- 高さ2m、壁厚1mの円筒形サイロの中心の地表から1mの位置に置かれた ^{60}Co ガンマ線源からのスカイシャイン線による線量率を計算する。
- 散乱空間はサイロ中心の地表から2kmまでの範囲として、地表から1mの高さでの1cm線量当量率分布を計算する。
- 距離100m、500m、1000mの線量率に対して分散低減を最適化した場合の線量率及び相対誤差の分布を比較する。
- サイロを含む4m(X) × 4m(Y) × 2m(Z)の直方体領域はメッシュ幅5cm、その外側はメッシュ幅約50m(サイロ外側から2kmまでを40分割)として随伴線束を計算する。

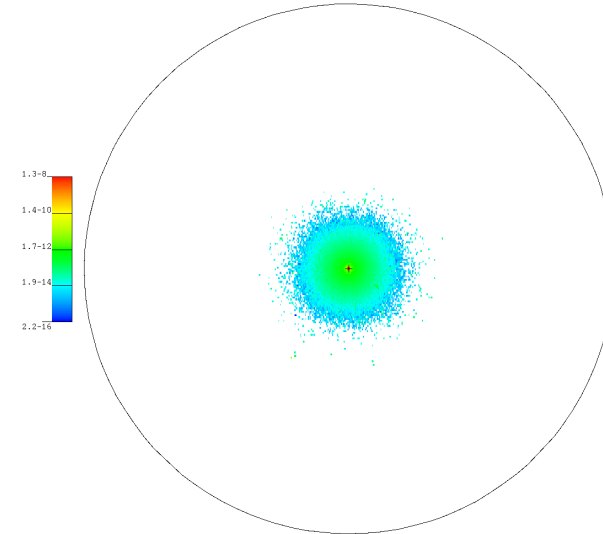
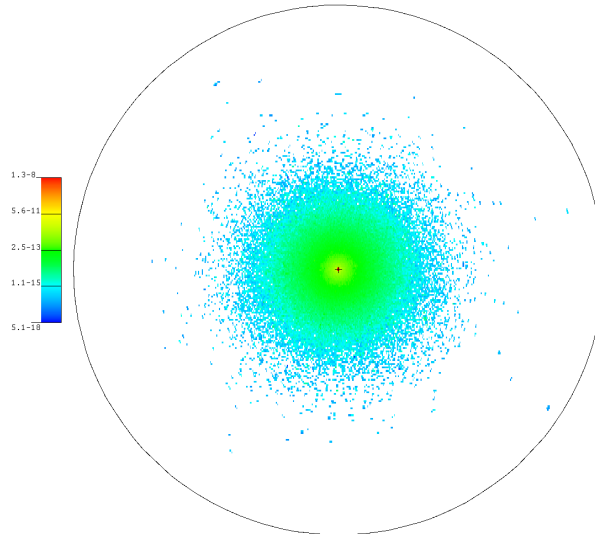


演習5 スカイシャイン問題 (計算例: 線量率、相対誤差分布)

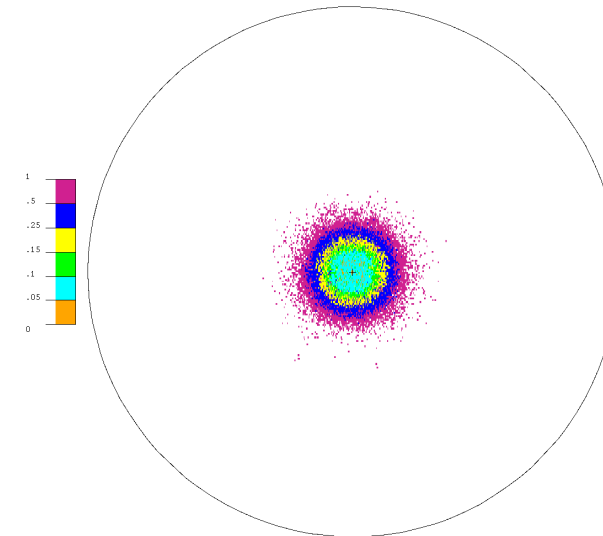
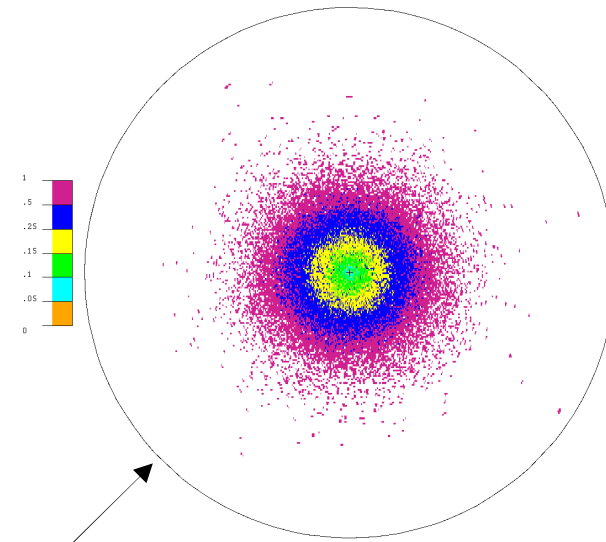
分散低減無し

FW-CADIS法 距離100mに最適化

線量率



相対誤差



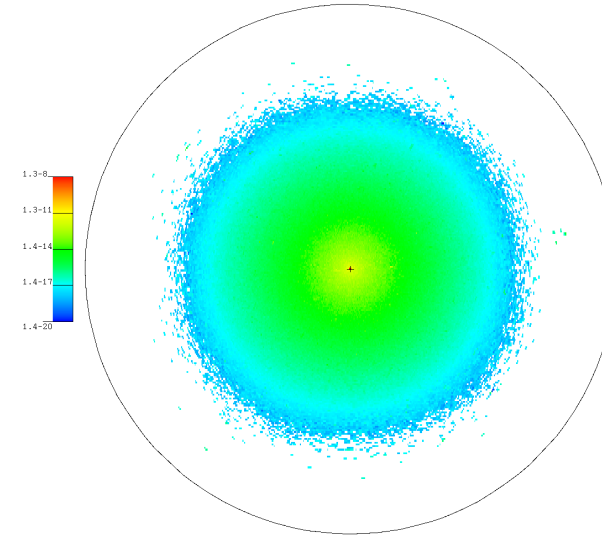
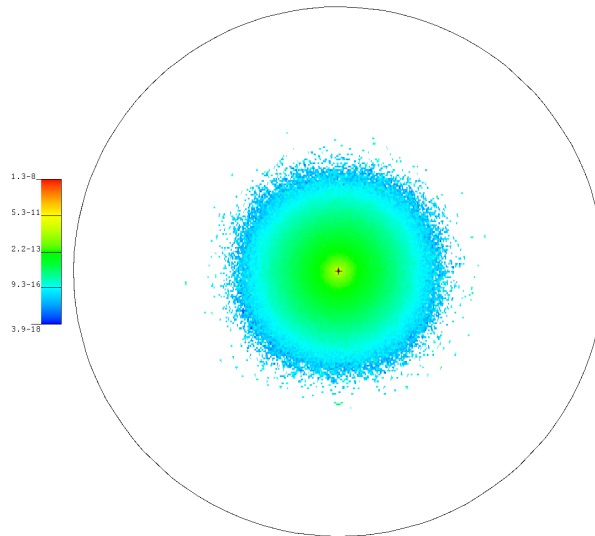
半径2km

演習5 スカイシャイン問題 (計算例: 線量率、相対誤差分布)

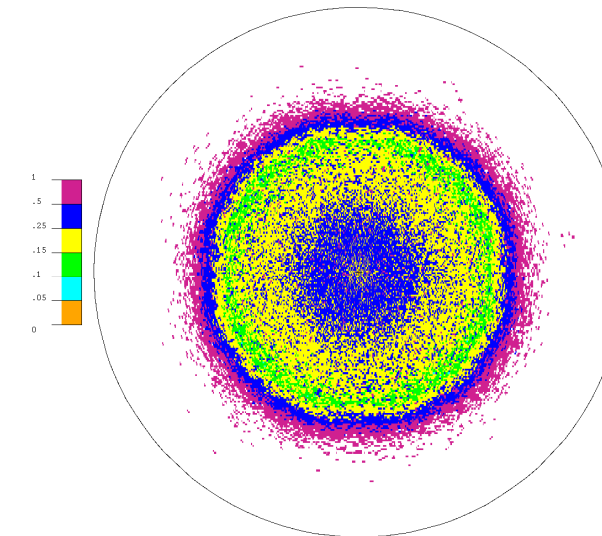
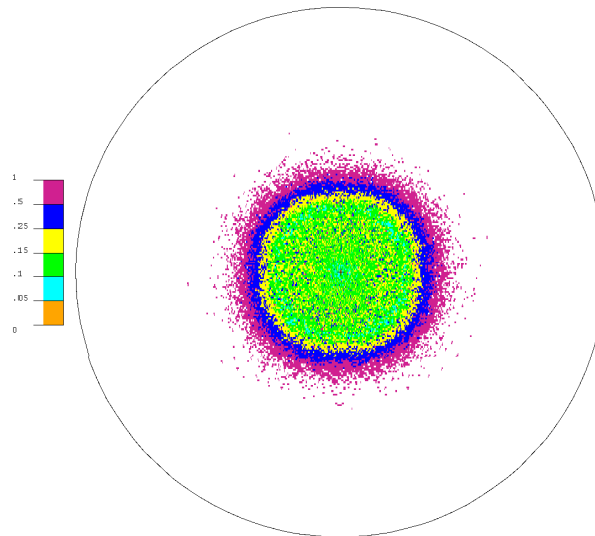
FW-CADIS法 距離500mに最適化

FW-CADIS法 距離1000mに最適化

線量率



相対誤差



演習5 スカイシャイン問題（距離毎の相対誤差）

リング検出器(F5zタリー)により計算した1cm線量当量率と相対誤差

距離 (m)	分散低減なし	FW-CADIS 距離100mに最適化	FW-CADIS 距離500mに最適化	FW-CADIS 距離1000mに最適化
100	4.77E-13 ± 0.33%	4.75E-13 ± 0.13%	4.70E-13 ± 0.95%	4.64E-13 ± 1.5%
200	1.08E-13 ± 0.38%	1.08E-13 ± 0.61%	1.08E-13 ± 2.0%	1.03E-13 ± 1.2%
300	3.18E-14 ± 0.66%	3.31E-14 ± 5.4%	3.18E-14 ± 0.81%	3.11E-14 ± 1.8%
400	1.04E-14 ± 0.92%	9.55E-15 ± 2.3%	1.04E-14 ± 0.44%	1.05E-14 ± 3.8%
500	3.64E-15 ± 1.3%	3.32E-15 ± 4.7%	3.68E-15 ± 0.31%	3.49E-15 ± 0.92%
600	1.34E-15 ± 2.1%	1.11E-15 ± 12%	1.33E-15 ± 0.74%	1.28E-15 ± 0.61%
700	4.85E-16 ± 2.4%	1.68E-15 ± 78%	4.80E-16 ± 1.5%	4.99E-16 ± 0.98%
800	1.92E-16 ± 4.1%	1.41E-15 ± 91%	1.81E-16 ± 3.0%	1.93E-16 ± 0.84%
900	7.94E-17 ± 6.5%	6.48E-17 ± 48%	6.98E-17 ± 8.3%	7.69E-17 ± 0.50%
1000	3.37E-17 ± 9.3%	9.04E-18 ± 26%	4.76E-17 ± 49%	3.12E-17 ± 0.86%

単位：μSv/h/線源光子