

令和2年度 RSICCユーザ会 会員講習会

---

# ADVANTG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）

令和2年10月15日(木)、16日(金)

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15日（木曜日）

9:10 – 11:30

講義:「最適分散低減法(CADIS理論)の概要」

講義:「ADVANTGコードの概要と使用方法」

13:00 – 17:15

演習:「ADVANTGコードのインストール」

演習:「ADVANTGコードによる解析Ⅰ: サンプル問題の解析と出力の説明」

講義:「ADVANTGコード使用上の注意点」

10月16日（金曜日）

9:15 – 11:30

講義:「ADVANTGコードの入力データ解説」

演習:「ADVANTGコードによる解析Ⅱ: 単純な体系－平板状中性子深層透過問題」

13:00 – 17:15

講義:「自動分散低減法によるモンテカルロ法遮蔽解析の注意点: 統計誤差の評価、中性子－ガンマ線結合問題」

演習:「ADVANTGコードによる解析Ⅲ: 複雑な体系－使用済燃料輸送容器または迷路ストリーミング問題」

---

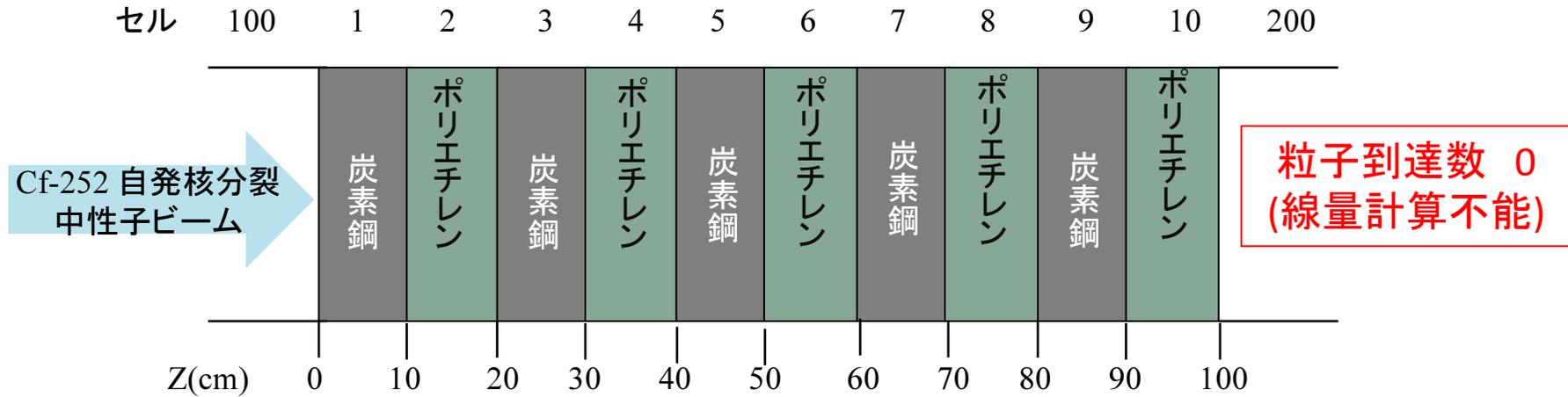
# I 最適分散低減法 (CADIS理論) の概要

---

## 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

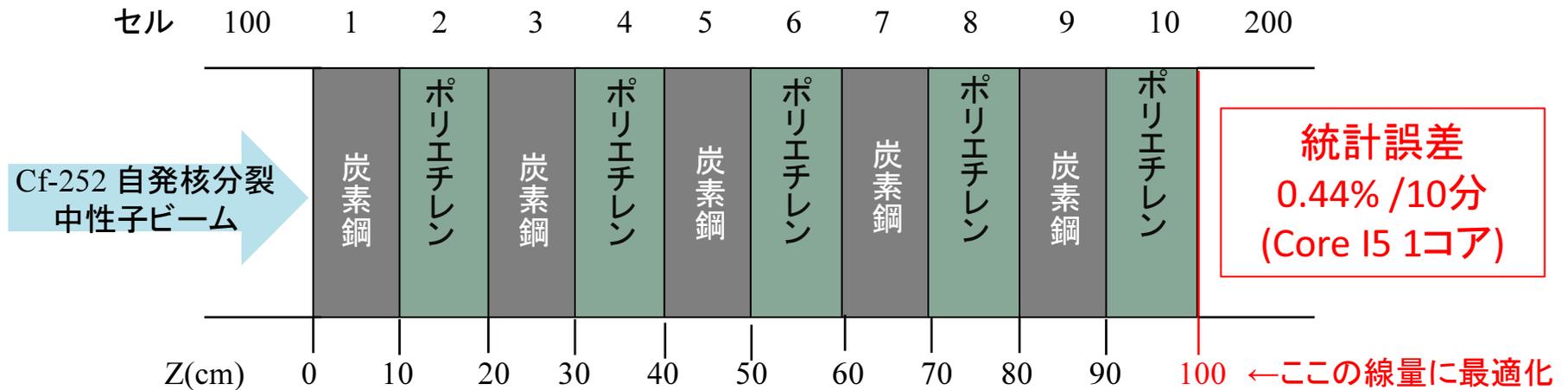
- ✓ Weight-Window法      空間・エネルギー

- **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)

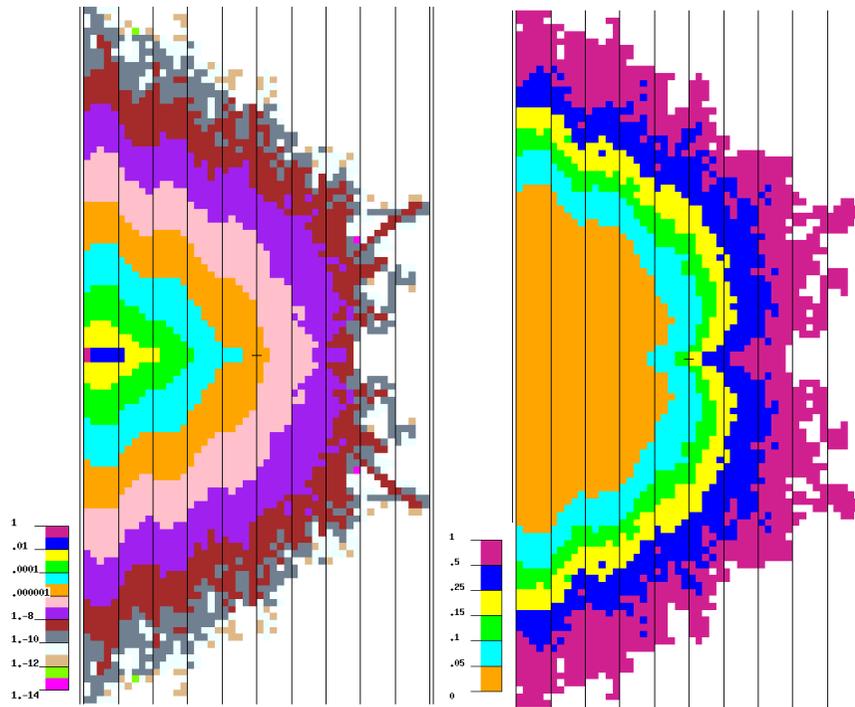


1neutron activity in each cell										print table 126	
cell	cell	tracks entering	population	collisions	collisions * weight (per history)	number weighted energy	flux weighted energy	average track weight (relative)	average track mfp (cm)		
1	100	59374	59374	0	0.0000E+00	3.9380E-01	9.4357E-01	1.3083E+01	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

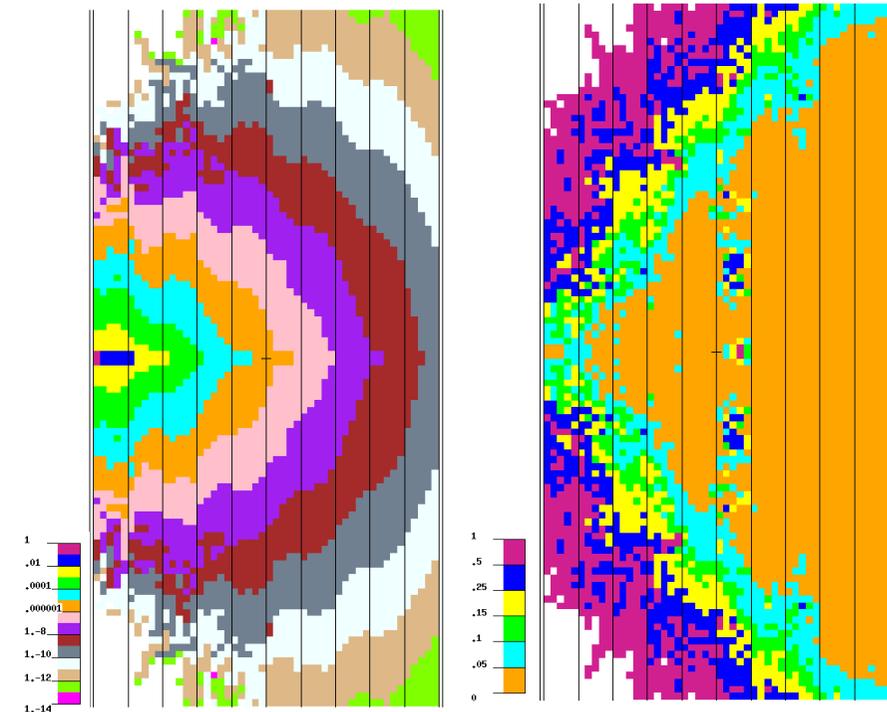
分散低減なし

CADIS理論による最適分散低減



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)

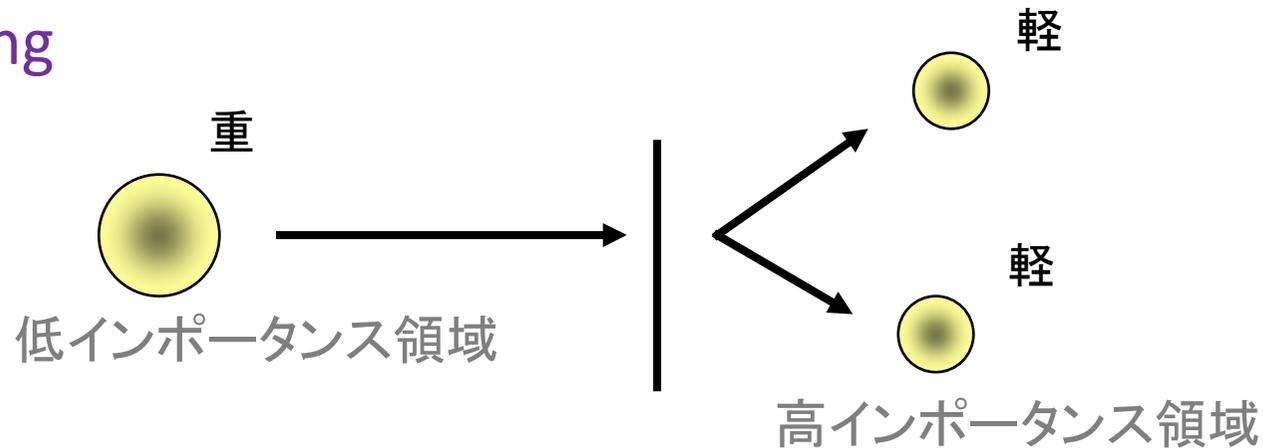
現実の現象に忠実なシミュレーション(アナログモンテカルロ法)では、粒子が捕獲反応を起こすと、その粒子が除去される。これに対して、インプリシット捕獲法では、除去されず捕獲断面積の全断面積に占める割合だけ重みを減らして生き残るように取り扱う。MCNPでは、アナログモンテカルロ法を用いるエネルギー範囲を指定した場合、及び詳細な光子の物理モデルを用いる場合を除き、インプリシット捕獲法が用いられる。インプリシット捕獲法により重みが小さくなった粒子は、ある重み以下となったときにウェイトカットオフにより追跡が終了される。MCNPのアルゴリズムはアナログモンテカルロ法ではなく、このインプリシット捕獲法とウェイ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

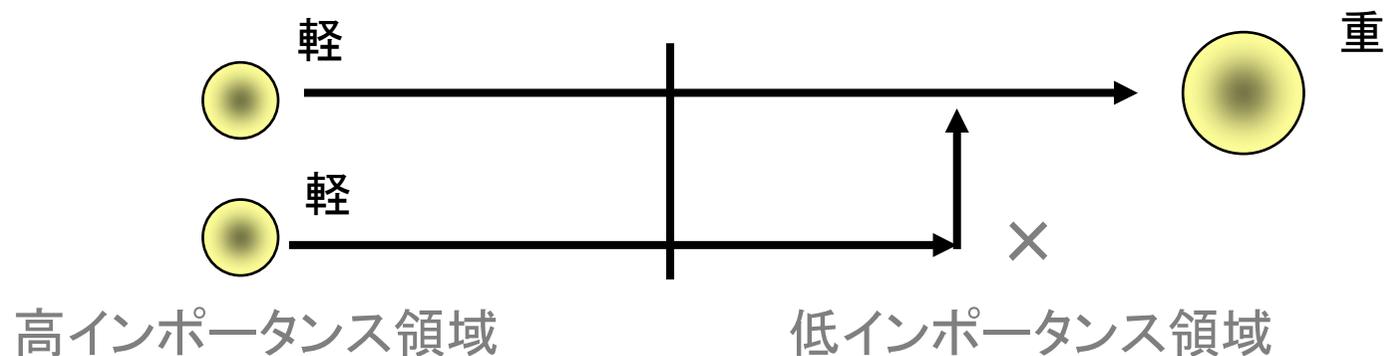
# SplittingとRussian Roulette

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

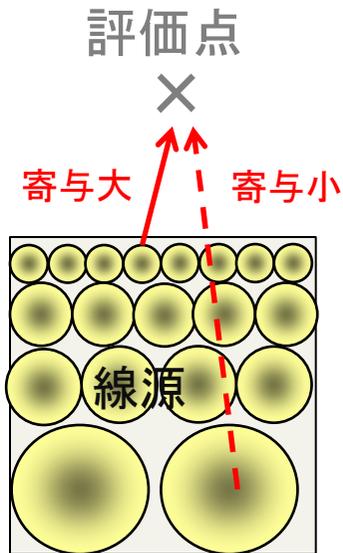


## Russian Roulette



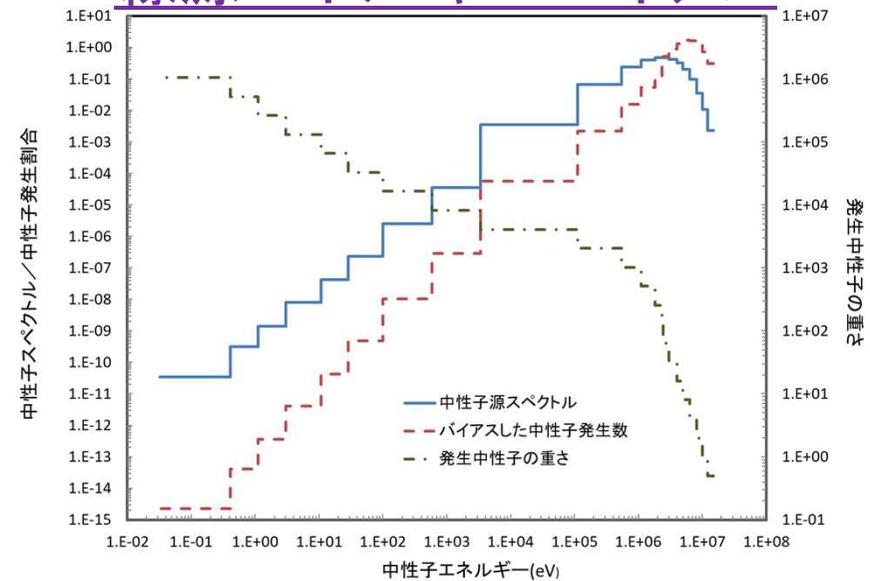
# 線源バイアス

## 線源位置バイアス



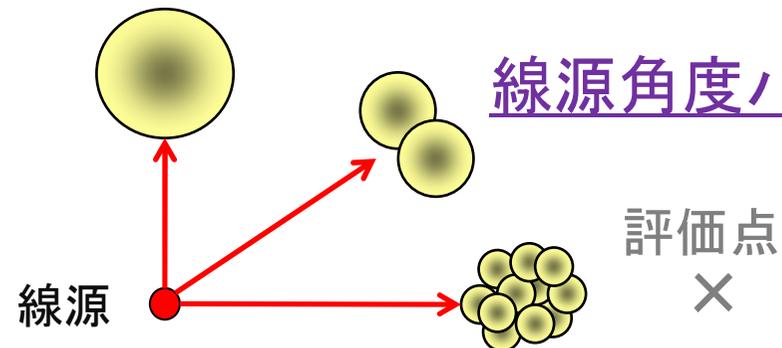
評価点に寄与の大きい近傍の線源は軽くして数多く、寄与の小さい遠い線源は重くして数少なく発生させる。

## 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。

## 線源角度バイアス



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ルーレットを受ける。ロシア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、ウェイトウイ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カードを用いてしている。

## 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。

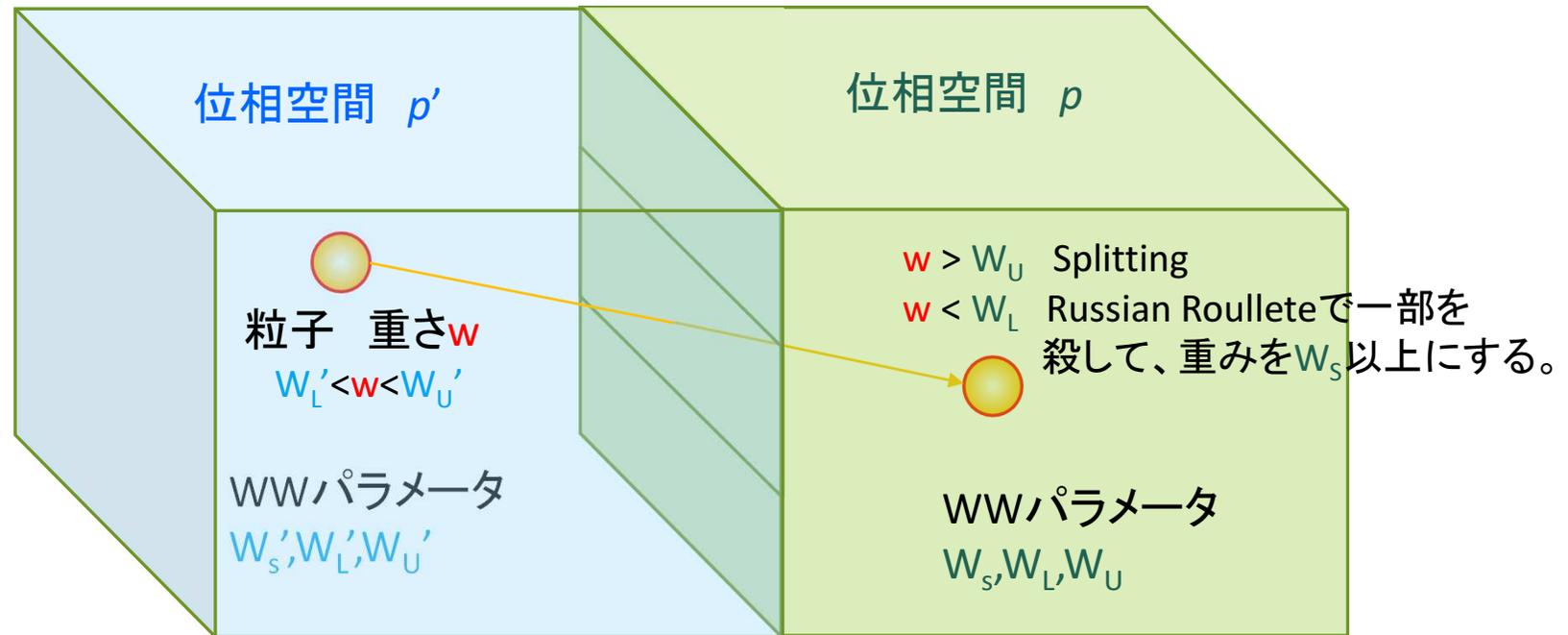
# MCNPで用いられている分散低減法

## 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。

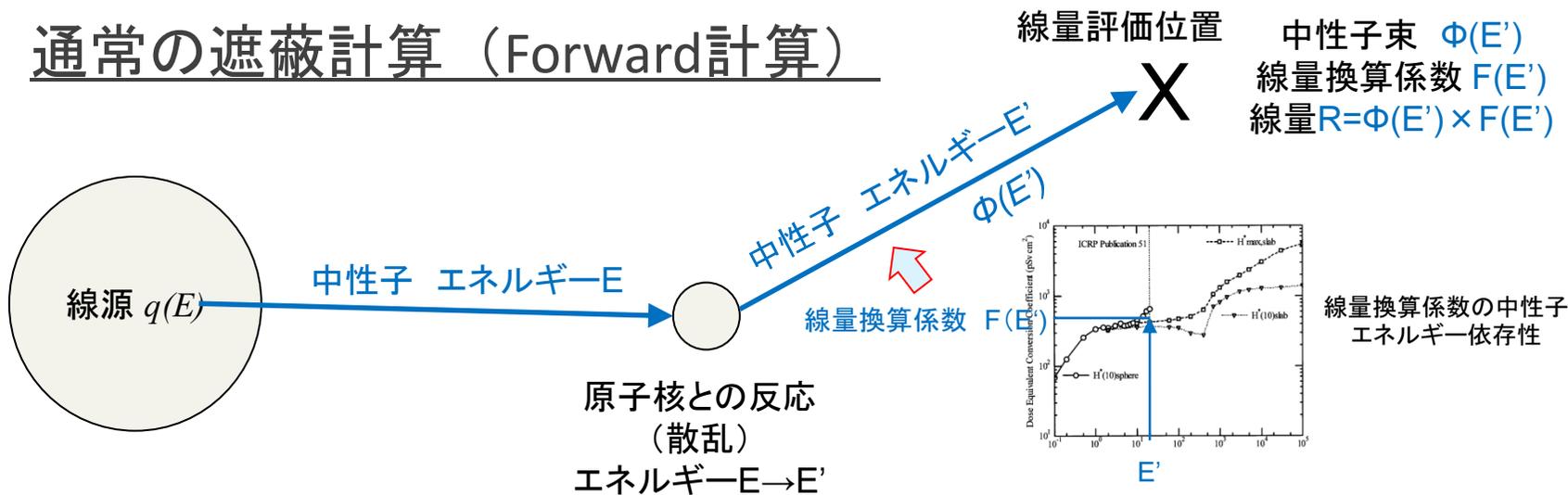
→計算時間短縮のための分散低減に、余計な計算時間と手間暇を掛けてしまう場合がある。(本末転倒)

→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？

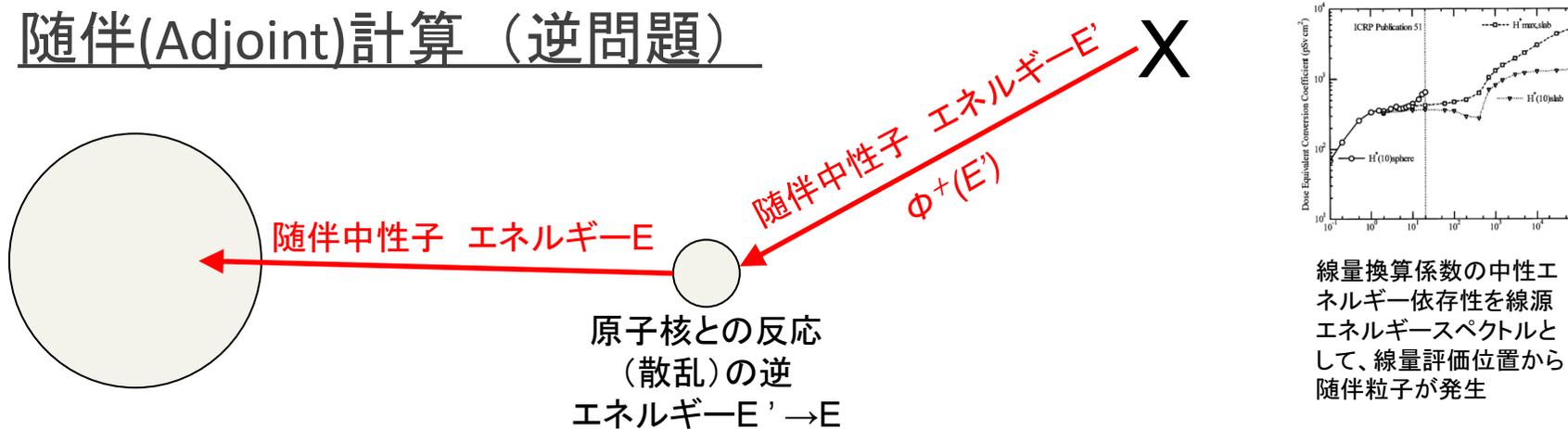
→ **随伴線束＝インポートランス関数の利用**

# 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)

## MCNPのための体系化及びコード化

John.C.Wagner & Alireza Haghghat (1997)

→ CADIS (Consistent Adjoint Driven Importance Sampling)

*(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。

## 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 <b>バイアスされた</b> 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

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

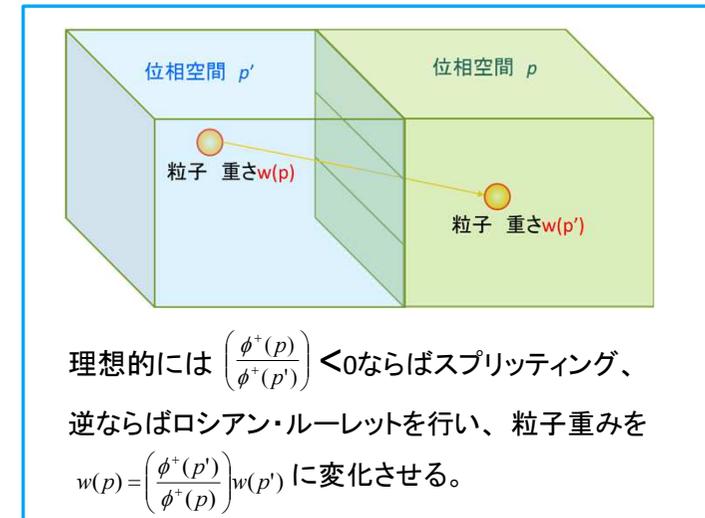
### バイアスされた粒子の輸送方程式

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

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

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

- $K(p' \rightarrow p)$  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

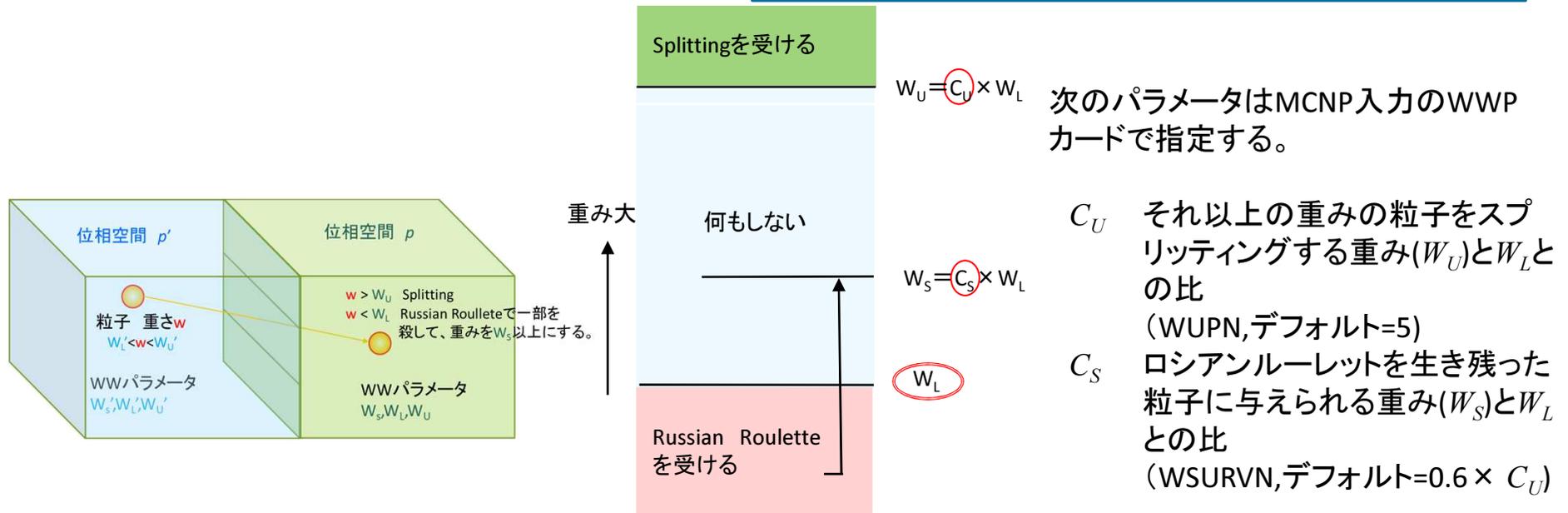
$$W(p) = \frac{R}{\phi^+(p)}$$

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。

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



# 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】

**A<sup>3</sup>MCNP**(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】

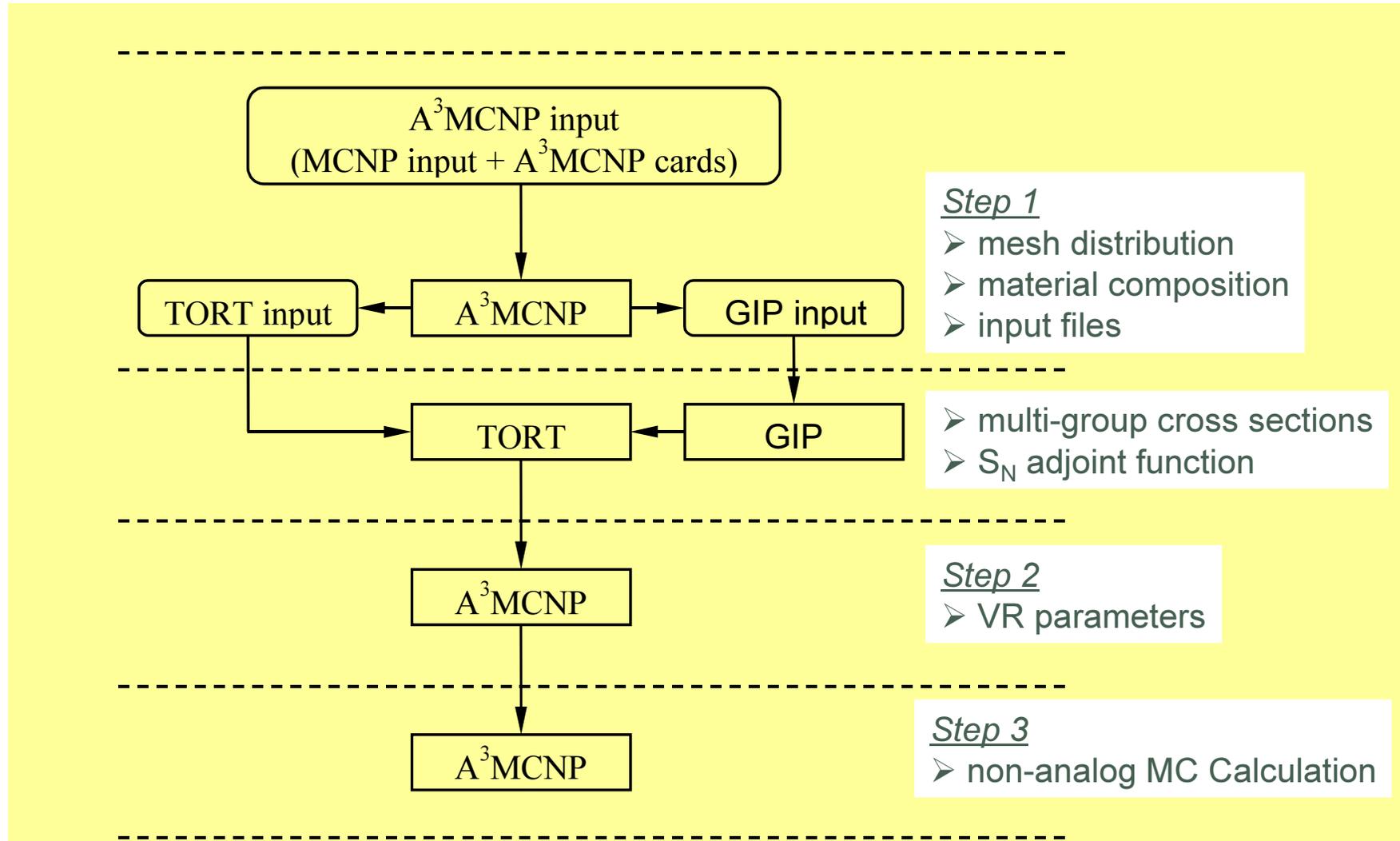
CADIS理論に基づくコード

## A<sup>3</sup>MCNP

---

- CADIS理論に基づき、ペンシルバニア州立大（当時）のA.HaghighatとJ.Wagnerが1998年に開発
- TORTによる3次元随伴線束計算と改造したMCNP-4Aの組み合わせ
- MCNPの入力からTORTの入力を自動生成
- PWRキャビティドシメトリでは、50,000倍のFOMの向上が見られた。
- 有償で販売（2000年ごろ）

# A<sup>3</sup>MCNP の処理の流れ

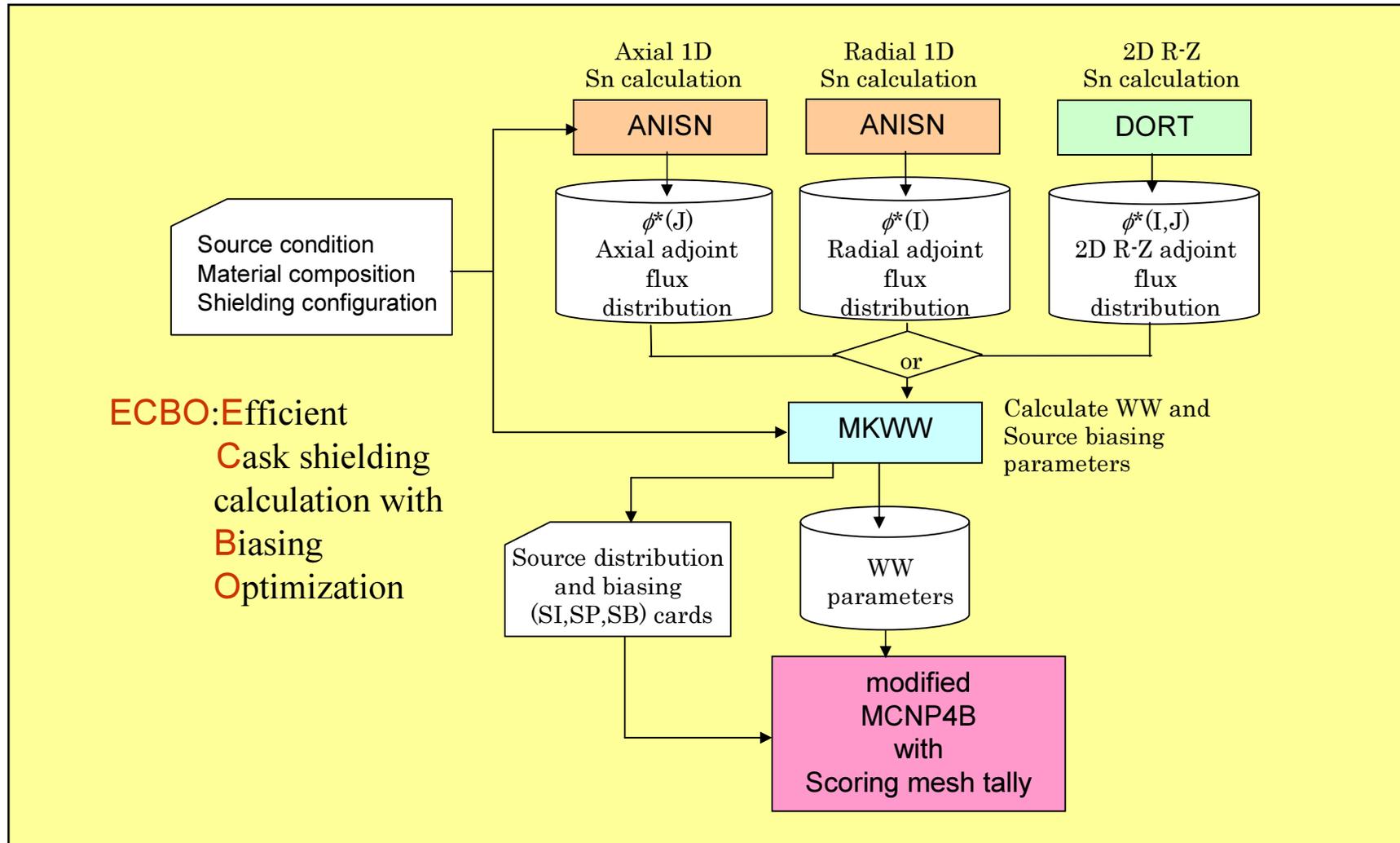


## ECBO

---

- 核燃料輸送容器（RZ形状）専用
- 1次元Sn法（ANISN）、2次元Sn法(DORT)+MCNP4C以降（MCNP5,MCNP6）
- Weight Window Parameterと線源エネルギーバイアス、空間バイアス（軸方向のみ）を最適化
- FOMの向上(WWパラメータがデフォルトの場合に比較して) =中性子約100倍、FPガンマ線約1000倍
- RIST 原子力コードセンターから公開

# ECBO の処理の流れ



## SCALEシステムのMAVRIC

---

MAVRIC : KENO-VI形状を採用した多群モンテカルロコードMONACOと  
Forward CADIS理論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

⇒SCALE6.2(2016年5月登録)からは連続エネルギー計算も可能

MONACO : 多群3次元モンテカルロ法中性子・ガンマ線輸送計算コード

DENOVO : 三次元X Y Z形状Sn法中性子・ガンマ線輸送計算コード。  
MAVRICで、MONACOの最適分散低減をCADIS理論で行う際の随伴線束計算に用いる。

### Forward CADIS法

線量分布などの分布量の計算を行う際に、決定論的手法を用いたForward計算結果を利用して、CADIS法における随伴線源を計算して最適化する手法

# 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。。

---

## Ⅱ ADVANTGコードの概要と使用方法

---

### 1. ADVANTGコードの概要

---

# ADVANTG

---

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

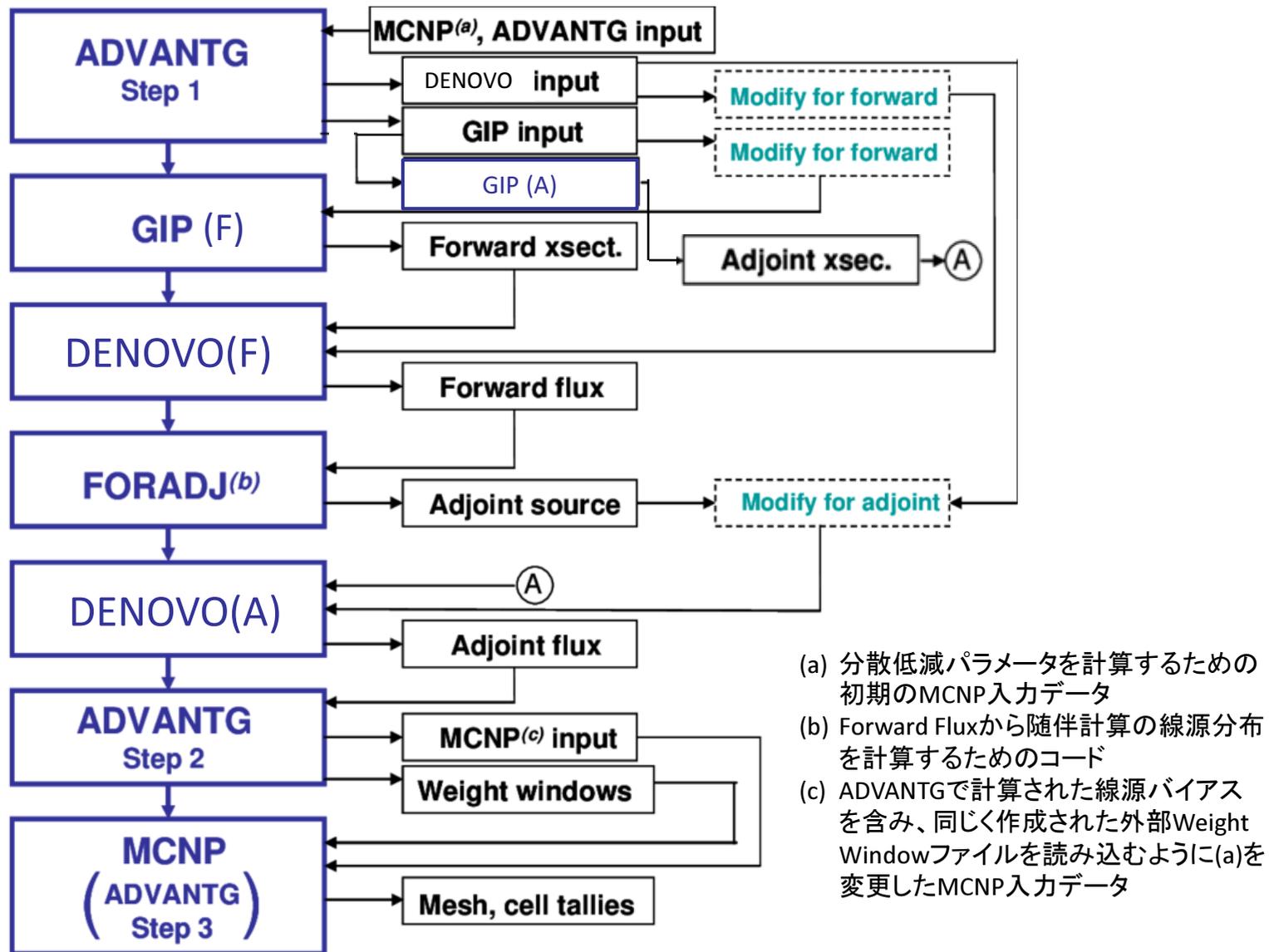
ADVANTG 3.0.1: 2015年に公開された、Forward CADIS法によるMCNP用自動分散低減コード。DENOVOを用いて3次元離散座標法で随伴線束を計算する。

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



- (a) 分散低減パラメータを計算するための初期のMCNP入力データ
- (b) Forward Fluxから随伴計算の線源分布を計算するためのコード
- (c) ADVANTGで計算された線源バイアスを含み、同じく作成された外部Weight Windowファイルを読み込むように(a)を変更したMCNP入力データ

# 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"> <li>・MCNP入力データを読み込み、次のデータを生成する。</li> <li>①Forward 及び Adjoint Flux計算用DENOVO入力データ</li> <li>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)</li> </ul>	
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コードのインストール

---

## ADVANTGのインストール手順

---

- ① 動作環境の確認
- ② MCNP5-1.60が動作することの確認
- ③ ADVANTGコードのインストール
- ④ サンプル計算の実行

## ① 動作環境の確認

---

### ADVANTGの動作環境

- ✓ 64ビットのLinuxが必要(32ビットは不可)
- ✓ Windows10(64ビット)のWSL(Windows Subsystem for Linux)も使用可
- ✓ Cygwinは不可
- ✓ MCNP5-1.60がインストールされて実行できること
- ✓ WSLの場合はWindows上にMCNP5-1.60がインストールされていれば、Linux上に無くても可
- ✓ テストを行ったLinux distribution
  - Ubuntu 18.04 LTS (Windows10 WSL1にてテスト)
  - Ubuntu 20.04 LTS (Windows10 WSL1にてテスト)
  - OpenSUSE-Leap-15.1 (Windows10 WSL1にてテスト)
  - VINE Linux 6.5

## ② MCNP5-1.60が動作することの確認

### 1) MCNP実行形式プログラムへのPATH設定の確認

```
$ echo $PATH
```

(MCNPインストールディレクトリ)/MCNP\_CODE/bin

WSLでWindows用MCNP5-1.60を使う場合は次をPATHに加える。

```
/mnt/c/LANL/MCNP61/MCNP_CODE/bin
```

(C:¥LANL¥MCNP61にインストールされている場合)

### 2) MCNP断面積データへのパス変数の確認

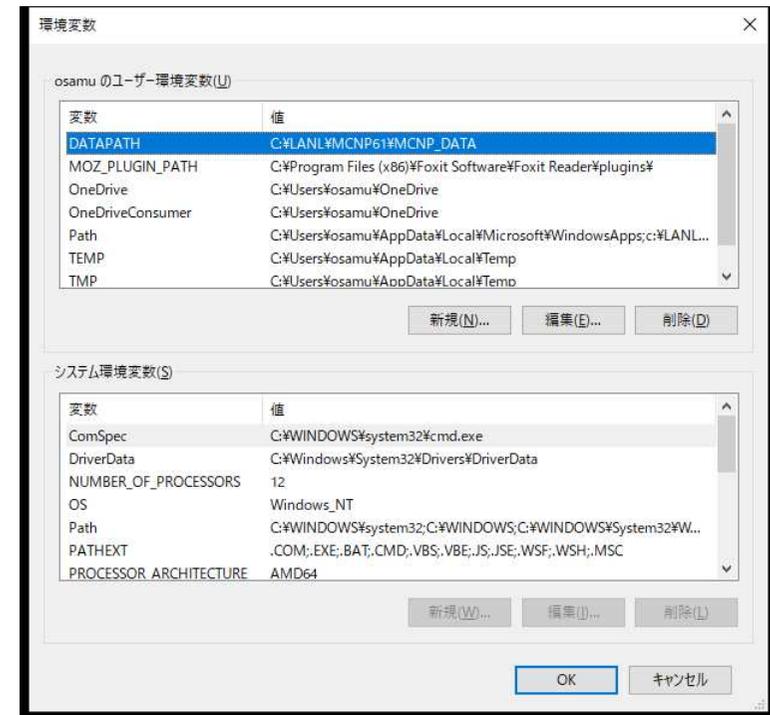
- Linux上のMCNPを用いる場合

```
$ echo $DATAPATH
```

(MCNPインストールディレクトリ)/MCNP\_DATA

- WINDOWS上のMCNPを用いる場合

右に示すようにWINDOWSの環境変数としてDATAPATHを設定しておく。



### 3) MCNP5-1.60の動作確認

MCNPのサンプル問題用データなどを用いて、次のコマンドで動作することを確認する。

(MCNP5用サンプルデータとして VALIDATION\_SHIELDINGにあるFE09i を使う場合)

```
$ cd (MCNPインストールディレクトリ)/MCNP_CODE/MCNP5/Testing/VALIDATION_SHIELDING/Inputs/
```

```
$ mcnp5 inp=ueki35
```

(Linux上のMCNPを用いる場合)

```
$ mcnp5.exe inp=ueki35
```

(Linux上のMCNPを用いる場合)

### ③ ADVANTGコードのインストール

#### 1) 自己解凍型シェルスクリプトの実行

- ・必要に応じてDVD中の次のファイルをディスクにコピーする。

`ADVANTG-3.2.1-No-MCNP/advantg-3.2.1-linux-x86_64-setup_nomcnp.sh`

- ・上記のファイルを実行 (rootでなくてもよい)

```
$ advantg-3.2.1-linux-x86_64-setup_nomcnp.sh
```

#### 2) 次の質問に回答しながらインストールを実行

MCNP5-1.60 executable [EMPTY]: →MCNP5-1.60の実行形式ファイル名

MCNP5-1.60 data directory [EMPTY]: →XSDIRファイルの在るディレクトリ

Installation directory [(ユーザーホームディレクトリ) /advantg]:

→ADVANTGをインストールするディレクトリ

(回答例)

```
This binary software distribution is compatible with 64-bit Linux
operating systems running glibc 2.5 or later.

(Press <Ctrl>-C to abort at any time)

MCNP5-1.60 executable [EMPTY]: /mnt/e/MCNP/MCNP_CODE/bin
File not found: /mnt/e/MCNP/MCNP_CODE/bin
Use this filename anyway? [n]: n

MCNP5-1.60 executable [EMPTY]: /mnt/e/MCNP/MCNP_CODE/bin/mcnp5.exe
MCNP5-1.60 data directory [EMPTY]: /mnt/e/MCNP/MCNP_DATA
Installation directory [/home/sato/advantg]:
```

MCNPの実行形式  
ファイル名を間違え  
ると再入力を促す。

### ③ ADVANTGコードのインストール

- RSICC 配布DVDの内容

ADVANTG-3.2.1-No-MCNP/

advantg-3.2.1-linux-x86\_64-setup\_nomcnp.sh

ADVANTGの自己解凍インストールシェルスクリプト

licenses/

ライセンス関連文書一式

C831.pdf

ADVANTG 3.2.0の配布文書

c854mnycp.01

ccc854パッケージの配布テキストファイル

- 配布されるコード

ADVANTG-3.2.1 CADIS理論に基づくMCNP用最適分散低減コード(SnコードDENOVOも含む)

MSX-1.1 放射化による線量計算のためのモンテカルロ-決定論的手法ハイブリッド計算コード

NAGSS-1.0 MSXで計算されたガンマ線源をMCNP5-1.60(ORNL改良版)用の線源に変換するコード

Radiant-1.0 レイトレーシングでMCNPの形状モデル鳥瞰図を作成するコード

- ADVANTG関連の付属文書 (インストール後に ./docに展開される)

ADVANTG-3.0.pdf ADVANTG 3.0のマニュアル(ORNL/TM-2013/416 Rev. 1)

ADVANTG-3.2.pdf ADVANTG 3.2の改良点の説明

MPI-readme.pdf MPIによる並列計算をクラスターで行うときの注意事項

## ④ サンプル計算の実行

➤ 次の4種類のサンプル問題がADVANTG 3.2.1に付属

cargo	Ba-133線源による荷物検査用NaIパネルの試験
n17	2018年ANSでの発表に使った中性子源問題
jpdr	日本最初の動力炉JPDR解体の際の放射化解析(JAEA 助川氏)
ueki	各種材質の中性子遮蔽実験(旧・船研 植木氏)

➤ 上記のうちから、ueki35のケースを実施してみる。

### 1. 分散低減を行わない場合のMCNP計算

```
$ source advantg.rc
$ cd example/advantg/ueki/35
$ mcnp5 inp=ueki35      → 6分間計算
$ mv outp ueki35.no-ww.out
```

### 2. ADVANTGを用いて分散低減を適用した場合のMCNP計算

```
$ advantg ueki35.adv
$ cd output
$ mcnp5 inp=inp wwinp=wwinp → 6分間計算
$ mv outp ../ueki35.out
```

### 3. ueki35.no-ww.out(分散低減なし)とueki35.out(ADVANTGで分散低減)を比較

## ④ サンプル計算の実行

Ueki35.no-ww.out

```
1tally      4      nps =    112939
tally type 4  track length estimate of particle flux.
tally for neutrons
this tally is modified by a dose function.
this tally is all multiplied by 4.05000E+07
volumes
  cell:      3
           1.25000E+02

cell 3
      5.81412E-03 0.5029
```

```
=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      4
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  0.50  yes  yes  0.35  yes  yes  constant  random  0.00
passed?   yes  no  yes  yes  no  yes  yes  yes  yes  no
=====
```

Ueki35.out

```
1tally      4      nps =   2344252
tally type 4  track length estimate of particle flux.
tally for neutrons
this tally is modified by a dose function.
this tally is all multiplied by 4.05000E+07
volumes
  cell:      3
           1.25000E+02

cell 3
      4.03513E-03 0.0102
```

```
=====
results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally      4
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  no  decrease  random  3.91
passed?   yes  yes  yes  yes  yes  yes  no  no  yes  yes
=====
```

---

## Ⅱ ADVANTGコードの概要と使用方法

---

### 3. 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、DENOV0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。			
	SWORD関連	sword_input	filename			
		sword_mix_tolerance	real			
		sword_small_sources	bool			
		sword_sampling	name			
		sword_subcell	int	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。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				
sword_resolution	float					
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法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=mcnp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=mcnp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	anis_library	name	Sn法計算に用いるANIS形式断面積ライブラリの選択	27n19g / 200n47g / BUGLE-96 / BPLUS / DABL69 / DPLUS / FENDL67	
	anis_upscatter	bool	熱中性子群の上方散乱を考慮かどうか。	true / false	FALSE
	anis_zaid_map	int >= 0	ANIS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zaid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			4
	denovo_quad_num_azi_vec	int >= 0	角度分点・オクタント毎の方位角の数		
	denovo_quad_polar_axis	axis ...	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_file	filename	【denovo quadrature=userdefinedのとき】角度分点ファイル名		
	denovo_pn_order	int >= 0	散乱マトリクスの散乱角ルジャンドル展開次数		3
	denovo_transport_correction	name	自群自群散乱の輸送補正方法	cesaro / diagonal / none	diagonal
	denovo_mc_first_collision	bool	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_num_particles	int >= 0	Monte Carlo法による一回散乱線源計算の粒子数		10000
	denovo_solver	name	内部反復解法。GMRES法またはSource Iteration(Richardson)	gmres / si	gmres
	denovo_multigroup_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_preconditioner	name	内部反復の前処理法。Diffusion Syntheticまたは前処理なし。	dsa / none	none
	denovo_two_grid	bool	上方散乱のtwo-grid 加速法の適用。	true / false	FALSE
	denovo_krylov_space	int >= 0	GMRES解法でのKrylov vectorの最大数。		20
	denovo_max_iterations	int >= 0	内部反復最大数。		100
	denovo_tolerance	real > 0.	内部反復の収束精度。		0.001
	denovo_upscatter_tolerance	real > 0.	上方散乱(外部反復)の収束精度。		0.01
	denovo_upscatter_inner_iterations	int >= 0	外部反復を行う際の内部反復の最大数。		10
	denovo_upscatter_inner_tolerance	real > 0.	外部反復を行う際の内部反復の収束精度。		0.01
	denovo_first_group	int >= 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_last_group	int >= 0			
denovo_verbose	bool	DENOVOの詳細出力を出力する/しない	true / false	TRUE	
denovo_reflect	int (6)	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		
出力オプション	mcnp_input_template		mcnp_inputで指定するファイル以外のファイルをもと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。		
	mcnp_mxsp1n	int >= 2	Weight Windowで起こすSplittingの最大分割数		100
	mcnp_ww_ratio	real >= 2.0	Weight Windowの上限重み(WUPN)と下限重み(WW parameter)との比		5.0
	mcnp_sb_type	name	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_min_sb_samples	int >= 0	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_max_sb_samples	int >= 0			1E+08
	mcnp_target_sb_density	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+04
	mcnp_user_sb_sampling	bool	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_num_wgt_samples	int >= 2	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_ww_collapse_factor	real >= 1	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
Silo	silos_response_ids	bool	応答分布あるいは線源分布をSilo形式で出力	true / false	TRUE
	silos_source_ids	bool		true / false	TRUE
	silos_source_strength	bool	体積平均・エネルギー種分線源強度をSilo形式で出力	true / false	TRUE
	silos_ww	bool	Weight Window targetをSilo形式で出力	true / false	FALSE
	silos_edit_reactions	int name ...	反応率を出力するためのANIS形式断面積のポジションと反応名		

## 必要な入力データ (1/5)

---

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
- `anisan_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。(並列計算時のみ)

## 必要な入力データ (2/5)

---

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。点検出器 (F5タリー)は不可。

## 必要な入力データ (3/5)

### `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 (4/5)

**anisl<sub>n</sub>\_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 <sub>n</sub> _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 (5/5)

---

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ので、 $\text{denovo\_x\_blocks} \times \text{denovo\_y\_blocks} \times \text{denovo\_z\_blocks}$  のスレッドが必要となる。

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。

---

## Ⅱ ADVANTGコードの概要と使用方法

---

### 4 . 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の入カデータ例

## (サンプル問題 ueki35)

入カデータの例 (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_azi   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_azi":   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。

---

## Ⅲ ADVANTGコードの解析演習

---

各演習問題のMCNP入力データは事前に提供します。

演習1に関しては、ADVANTGの入力データも用意しますので、他の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。

$^{252}\text{Cf}$ 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 ( $1\text{cm}$ 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

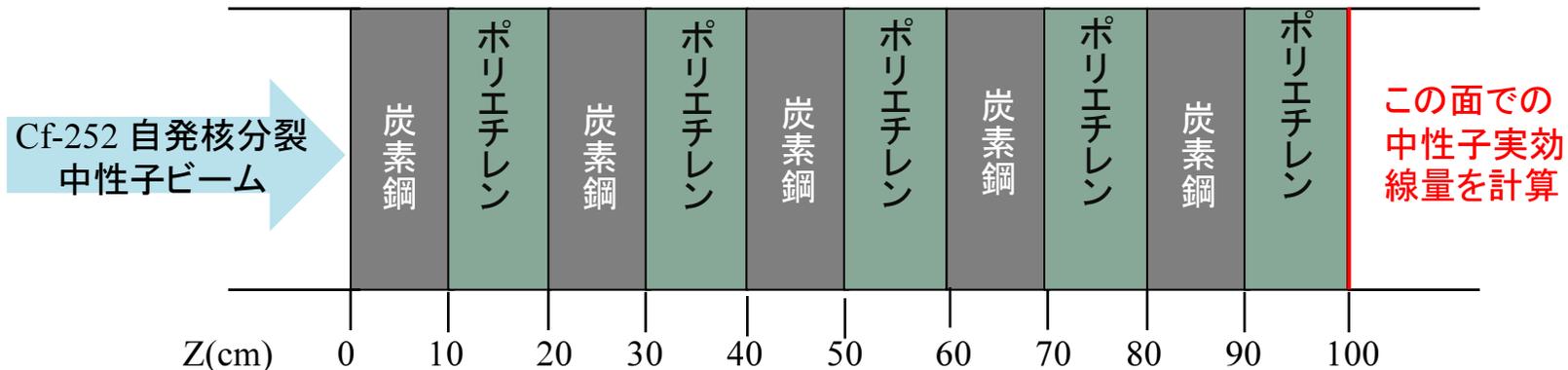


図1 1次元透過問題のモデル (鉄・ポリエチレン層が5組)

# 演習1 1次元透過問題

## 組成

炭素鋼 :		密度	$7.8212\text{g/cm}^3$
	Fe	99wt%	$8.350 \times 10^{-2} \text{ atom/barn/cm}$
	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%	$3.922 \times 10^{-3} \text{ atom/barn/cm}$
ポリエチレン :		密度	$0.92\text{g/cm}^3$
	H		$7.900 \times 10^{-2} \text{ atom/barn/cm}$
	C		$3.950 \times 10^{-2} \text{ atom/barn/cm}$

## タリー

- ✓ 深さ100cmの表面に面検出器を設定し、こ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

$^{252}\text{Cf}$ 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  $1\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}$  となる。



# 演習1 1次元透過問題

## ADVANTGでの分散低減

X方向、Y方向に±100cmの範囲で随伴線束を計算し、CADIS法により分散低減パラメータを算出する。(計算範囲外は一定のWeight Window Parameterとなる)

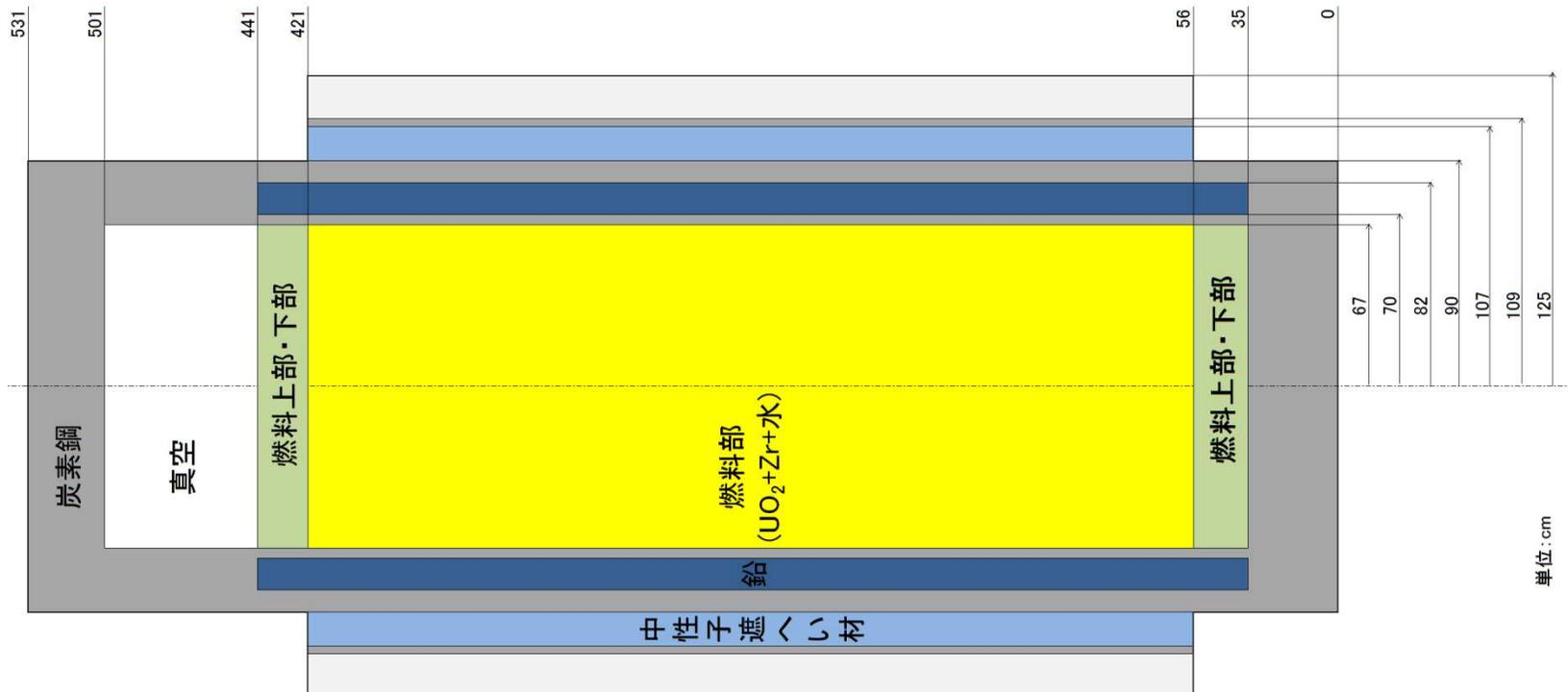


# 演習2 使用済燃料輸送容器遮へい解析

## 【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ものをデフォルメしたものである。

## モデル



## 演習2 使用済燃料輸送容器遮へい解析

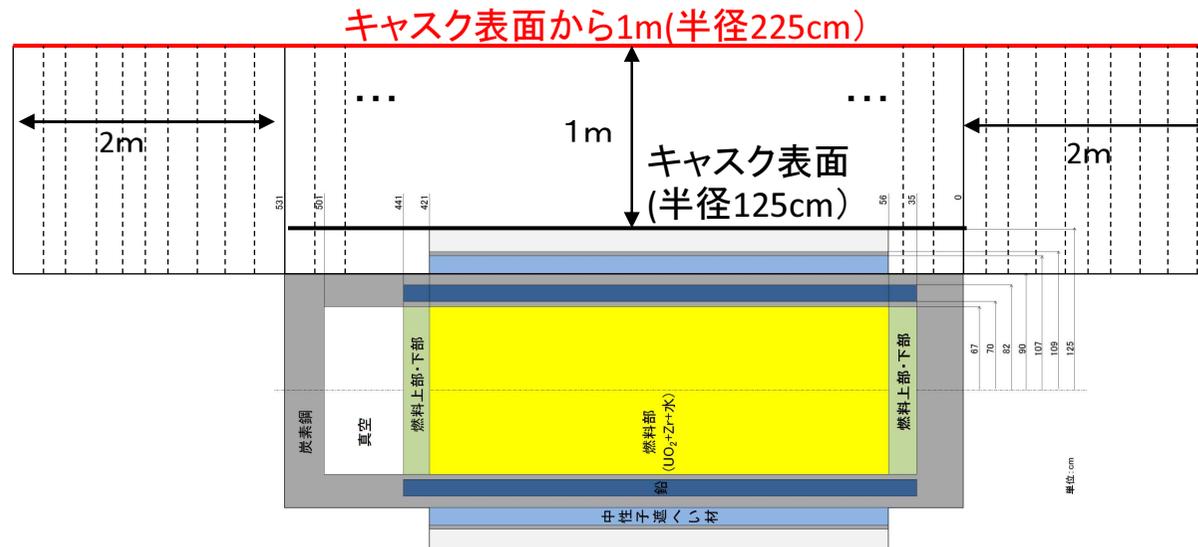
### 組成

核種	燃料部	燃料上部・下部	鉛	炭素鋼	レジン
H	3.99E-02	3.99E-02			5.70E-02
B-10					1.87E-05
C				3.92E-03	2.23E-02
N					1.39E-03
O	2.90E-02	1.99E-02			2.58E-02
Al					7.67E-03
Fe				8.35E-02	
Zr	2.90E-03	2.90E-03			
Pb			3.28E-02		
U-235	1.93E-04				
U-238	4.34E-03				
	UO <sub>2</sub> 18.31%				
備考	Zr 6.28%	Zr 6.28%			
	水 63.51%	水 63.51%			

## 演習2 使用済燃料輸送容器遮へい解析

### タリー

- ✓ 側面の表面から1mの位置に円筒状の面検出器を設定して、中性子及び二次ガンマ線による実効線量を計算する。
- ✓ 面検出器は軸方向に高さ20cm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。



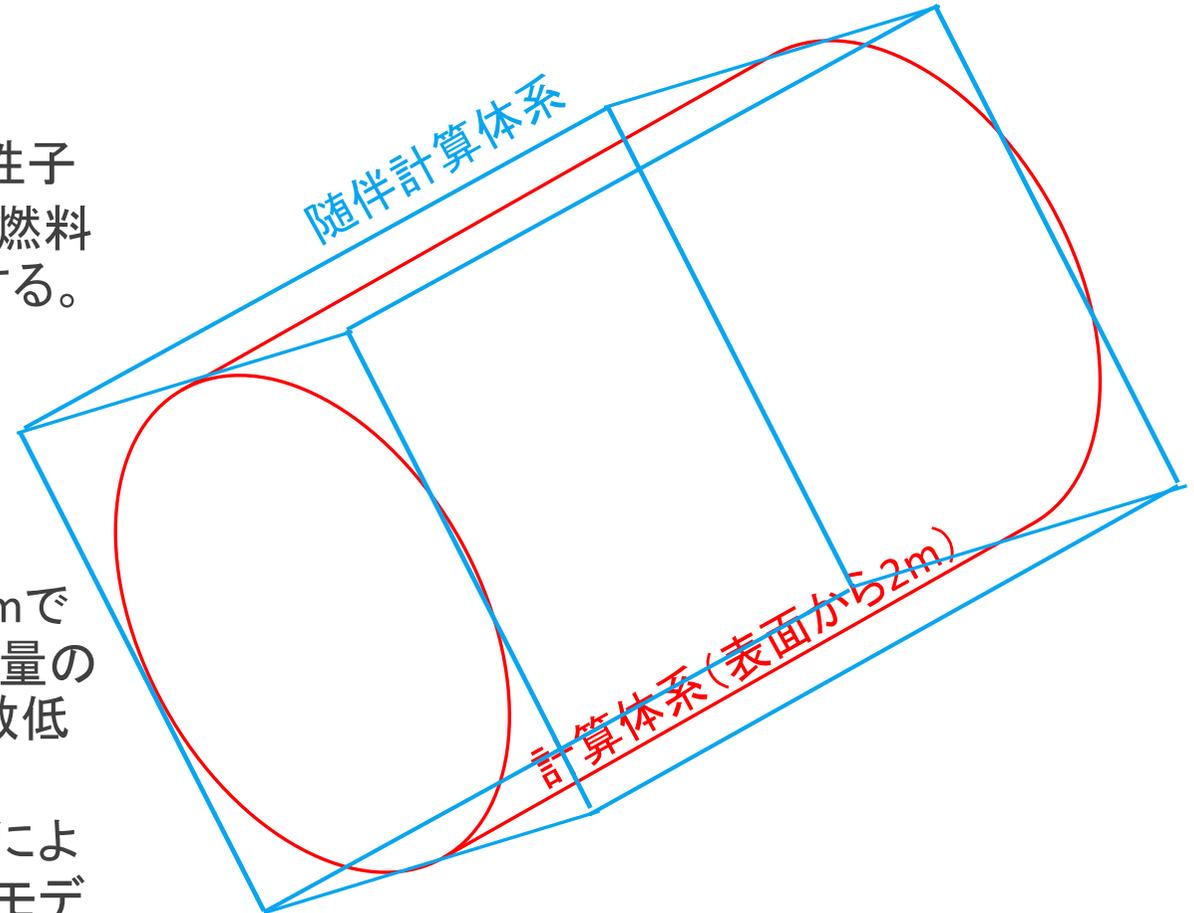
## 演習2 使用済燃料輸送容器遮へい解析

### 線源

$^{239}\text{Pu}$ の熱中性子入射核分裂中性子スペクトル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。

### ADVANTGによる分散低減

- ✓ 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。
- ✓ 右図のように円筒形状のMCNP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。
- ✓ 計算メッシュ幅はX,Y,Zとも約10cmとする。



## 演習3 Jezebel臨界実験装置の事故解析

---

### 計算ケース

- (1) CADIS
- (2) FWCADIS、空間オプション Path Length Stretching
- (3) FWCADIS、空間オプション Global
- (4) アナログ・モンテカルロ法(分散低減なし)

## 演習3 Jezebel臨界実験装置の事故解析

---

### 【概要】

ロスアラモス国立研究所のJezebel臨界実験装置で臨界事故が起きた際の室内の中性子線量分布を計算する。

Jezebelは1950年代に用いられた、金属プルトニウム球体から成る臨界実験装置である。

この計算モデルは、SCALEシステムの臨界事故解析システムCAASのサンプル問題として作成されたもので、KENO-VIを使って臨界時の中性子線源を計算し、これを線源としてMAVRICで線量分布計算を行うものである。

ここでは、中性子発生分布は金属Pu内で一様としたモデルで、ADVANTGとMCNPを用いた室内の線量分布計算を行う。

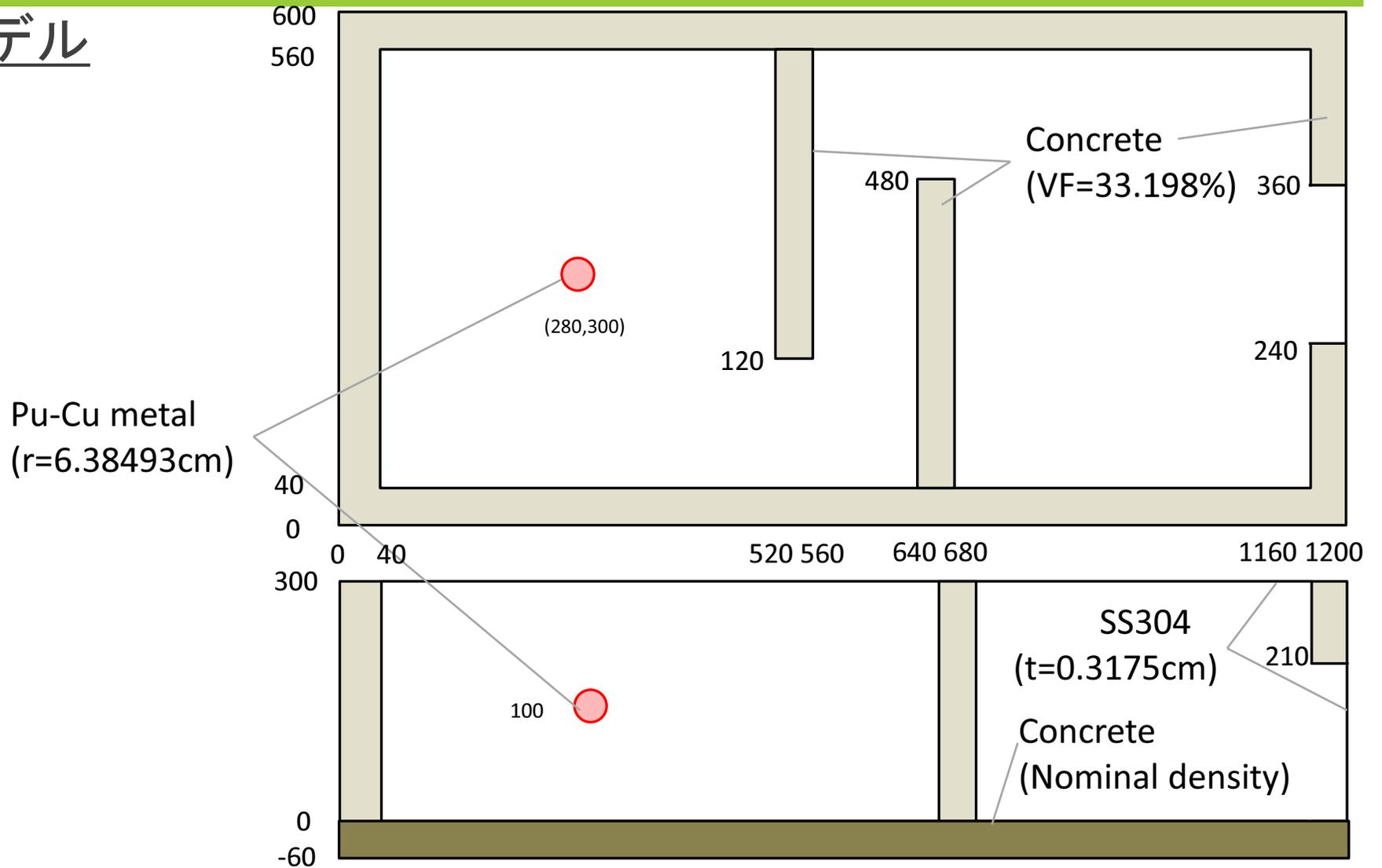
# 演習3 Jezebel臨界実験装置の事故解析

## 組成

Pu-Cu metal			Concrete (Nominal Density)			Concrete (VF=33.198%)			SS304		
Cu-63	29063	9.510E-04	H	1001	8.501E-03	H	1001	2.822E-03	C	6000	3.185E-04
Cu-65	29065	4.242E-04	C	6000	2.020E-02	C	6000	6.706E-03	Si-28	14028	1.570E-03
Pu-239	94239	3.705E-02	O	8016	3.551E-02	O	8016	1.179E-02	Si-29	14029	7.976E-05
Pu-240	94240	1.751E-03	Na	11023	1.632E-05	Na	11023	5.419E-06	Si-30	14030	5.264E-05
Pu-241	94241	1.167E-04	Mg-24	12024	1.469E-03	Mg-24	12024	4.878E-04	P	15031	6.947E-05
Total	4.029E-02		Mg-25	12025	1.860E-04	Mg-25	12025	6.175E-05	Cr-50	24050	7.592E-04
			Mg-26	12026	2.048E-04	Mg-26	12026	6.799E-05	Cr-52	24052	1.464E-02
			Al	13027	5.558E-04	Al	13027	1.845E-04	Cr-53	24053	1.660E-03
			Si-28	14028	1.568E-03	Si-28	14028	5.205E-04	Cr-54	24054	4.132E-04
			Si-29	14029	7.965E-05	Si-29	14029	2.644E-05	Mn-55	25055	1.741E-03
			Si-30	14030	5.256E-05	Si-30	14030	1.745E-05	Fe-54	26054	3.454E-03
			K-39	19039	3.759E-05	K-39	19039	1.248E-05	Fe-56	26056	5.370E-02
			K-40	19040	4.716E-09	K-40	19040	1.565E-09	Fe-57	26057	1.229E-03
			K-41	19041	2.713E-06	K-41	19041	9.005E-07	Fe-58	26058	1.639E-04
			Ca-40	20040	1.076E-02	Ca-40	20040	3.573E-03	Ni-58	28058	5.284E-03
			Ca-42	20042	7.182E-05	Ca-42	20042	2.384E-05	Ni-60	28060	2.020E-03
			Ca-43	20043	1.499E-05	Ca-43	20043	4.975E-06	Ni-61	28061	8.746E-05
			Ca-44	20044	2.316E-04	Ca-44	20044	7.688E-05	Ni-62	28062	2.779E-04
			Ca-46	20046	4.440E-07	Ca-46	20046	1.474E-07	Ni-64	28064	7.043E-05
			Ca-48	20048	2.076E-05	Ca-48	20048	6.892E-06	Total		8.759E-02
			Fe-54	26054	1.128E-05	Fe-54	26054	3.745E-06			
			Fe-56	26056	1.771E-04	Fe-56	26056	5.879E-05			
			Fe-57	26057	4.090E-06	Fe-57	26057	1.358E-06			
			Fe-58	26058	5.443E-07	Fe-58	26058	1.807E-07			
			Total	7.968E-02		Total	2.645E-02				

# 演習3 Jezebel臨界実験装置の事故解析

## モデル



D. E. Peplow, *MAVRIC: MONACO WITH AUTOMATED VARIANCE REDUCTION USING IMPORTANCE CALCULATIONS*, ORNL/TM-2005/39 Version 6.1 Sect. S6, Appendix C (June 2011)

## 演習3 Jezebel臨界実験装置の事故解析

### タリー

- ✓ 体系全体をX, Y, Z方向ともに20cmの大きさのメッシュに分割し、中性子実効線量分布を計算する。
- ✓ 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。

### 線源

$^{239}\text{Pu}$ の熱中性子入射核分裂中性子スペクトルを持った線源が、中心座標(280cm,300cm,100cm)の半径6.38493cmのPu-Cu球内に様に分布しているものとする。

### ADVANTGによる分散低減

- ✓ メッシュタリーで計算する中性子線量の統計誤差を最小にするように分散低減パラメータを計算する。
- ✓ 計算範囲は体系全体として、X, Y, Z方向ともに20cmの大きさのメッシュで随伴線束やWeight Window Parameterを計算する。
- ✓ CADIS法、FW-CADIS法、ADVANTGによる分散低減なし、の3通りの統計誤差の分布をMCNPの図示機能（オプションにzを指定して、runtpeファイルから計算結果を図示）を用いて比較する。
- ✓ メッシュタリーで線量分布を計算するので、fwcadis\_spatial\_treatmentはglobalを選択する。

---

## IV 自動分散低減法によるモンテカルロ法 遮蔽解析の注意点

---

MCNPの計算結果の統計誤差

---

## MCNPの統計誤差に関する出力項目と判定基準\*)

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カし、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の計算結果の統計誤差

### 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の計算結果の統計誤差

## タリーの確率密度関数

### タリーするイベントの頻度

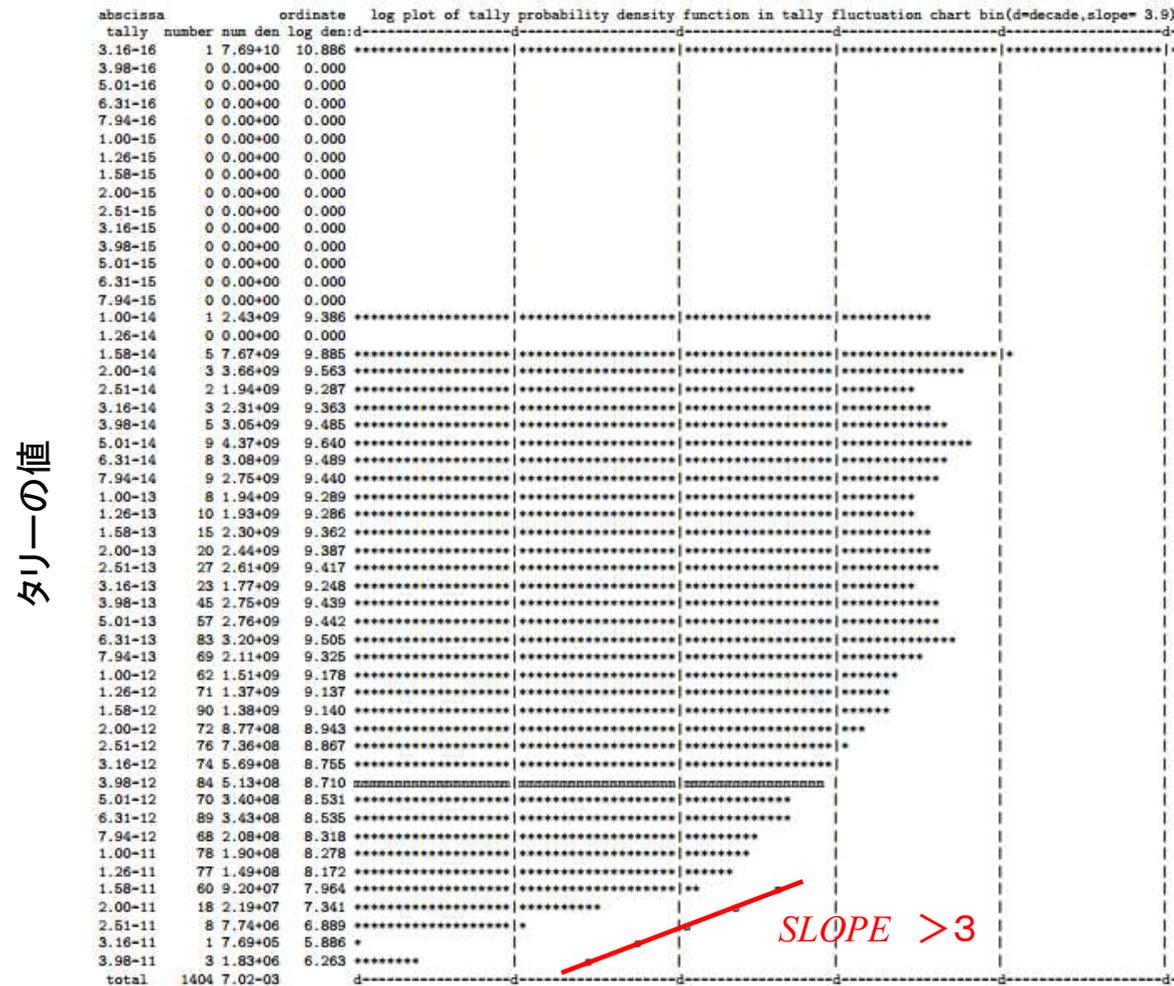


Figure 8. An example of the Tally PDF plot produced in the MCNP output.