

# PHITSコードと 空気シャワーシミュレーション

佐藤 達彦(日本原子力研究開発機構)

## Table of Contents

- PHITSの紹介
  - PHITSの概要
  - PHITSに組み込まれた物理モデル
  - PHITSの応用例
- 宇宙線挙動解析への応用
  - 空気シャワーシミュレーション
  - 大気圏内宇宙線スペクトル計算モデル
- まとめと今後の予定

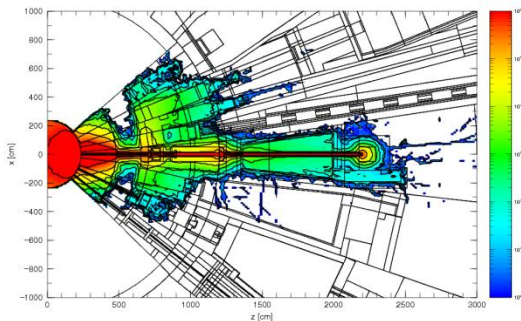
# PHITSの概要

Particle and Heavy Ion Transport code System

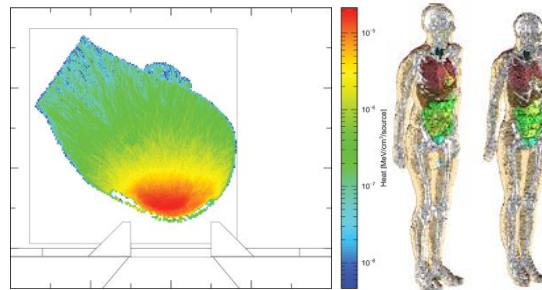
## PHITSとは？

任意の体系中における様々な放射線の挙動を、核反応モデルや核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コード

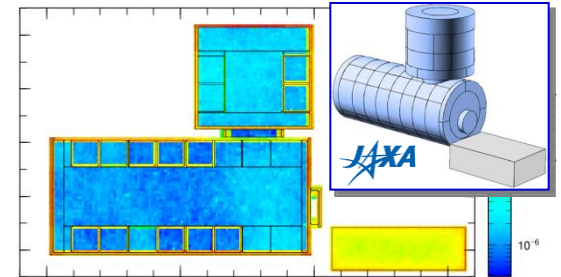
## 適用例



加速器遮へい設計



放射線治療 & 防護研究



宇宙・地球惑星科学

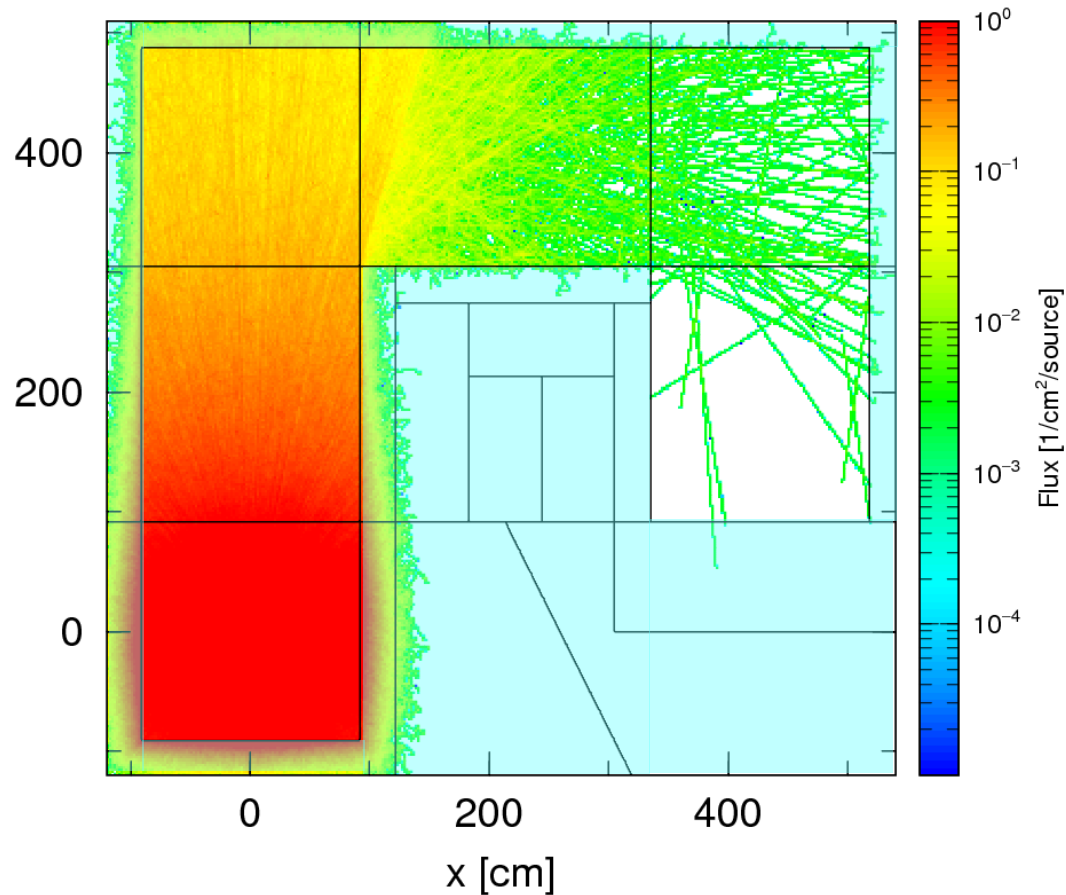
## 入手方法

- PHITS講習会に参加する
- RISTの原子力コードセンターに依頼する(国内ユーザー, 手数料13,176円)
- OECD/NEA DatabankもしくはRSICCに依頼する(国外ユーザー)

<http://phits.jaea.go.jp/>

# PHITS計算結果の例

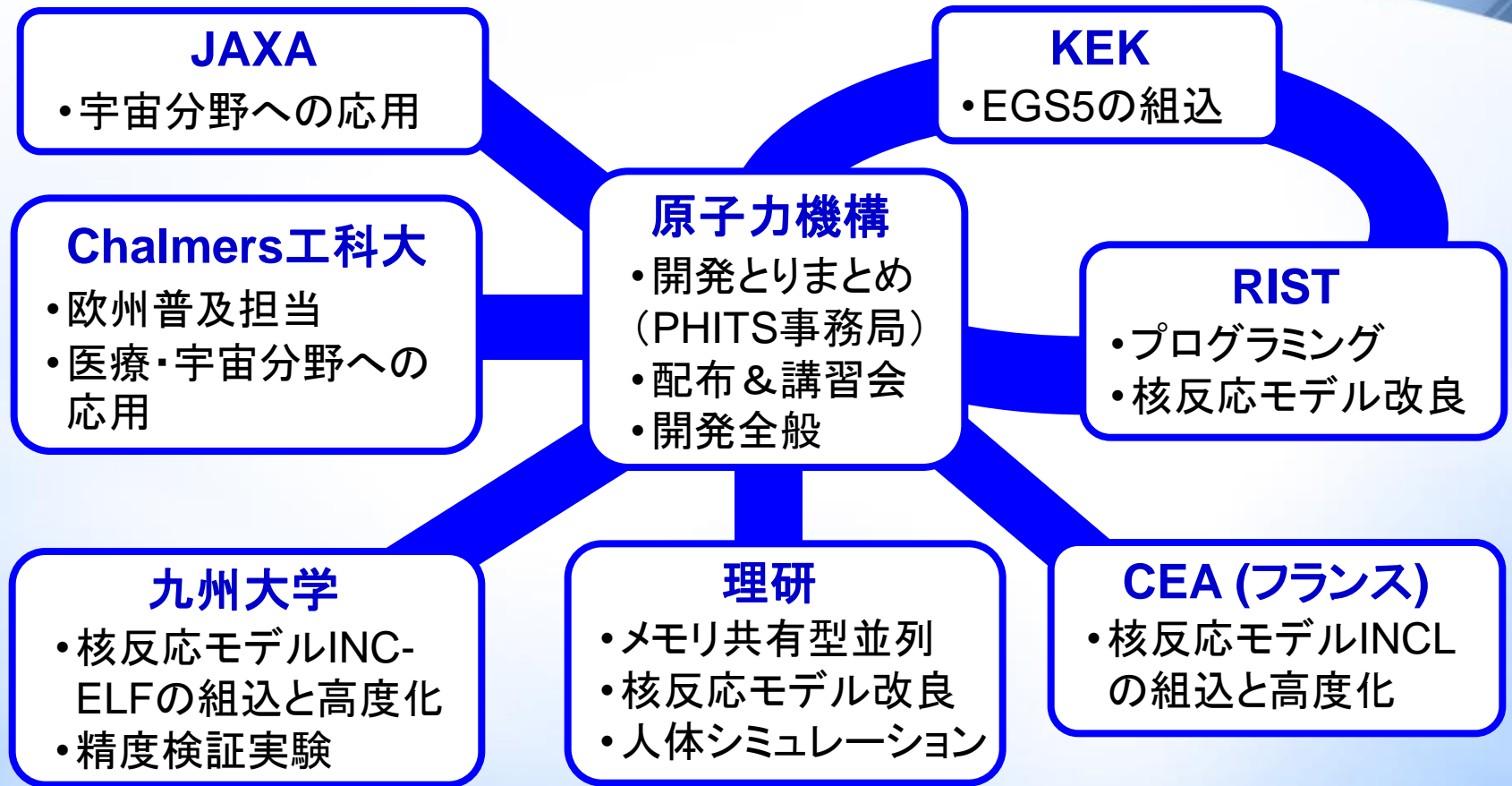
no. = 1, ie = 1, iz = 1, it = 1



$^{137}\text{Cs}$  から放出された100,000個の光子の挙動を模擬

個々の放射線挙動を乱数を用いて模擬することにより、全体的な挙動(平均値)を導出

# PHITS開発体制



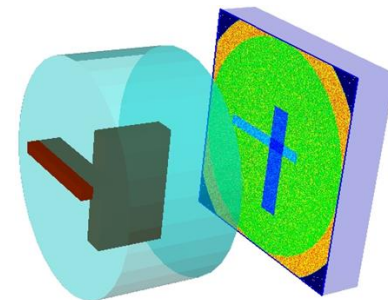
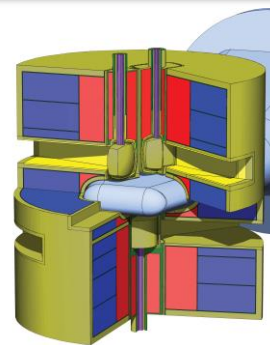
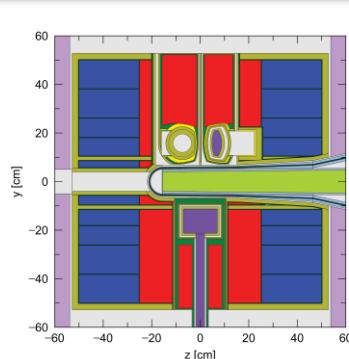
# PHITSの特徴

- 言語 Fortran (Intel Fortran 11.1, Gfortran 4.71 or later)
- 入力データ形式 任意フォーマットのASCIIコントロールファイル

ユーザーがFortranプログラムを書く必要はない！

## ➤ 幾何形状

- 任意の3次元体系
- 2D&3D描画ツール (ANGEL)
- GUI入力支援ソフト (SimpleGEO\*, option)



ANGELで描画した2D&3Dジオメトリ

SimpleGEO

## ➤ 計算できる物理量

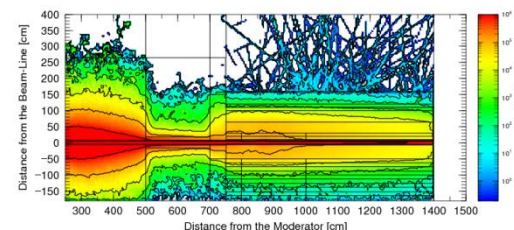
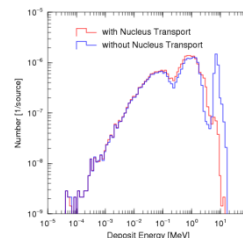
粒子フルエンス, 発熱量, 核反応生成粒子, 電離密度分布 など

## ➤ 出力データ形式

テキストデータ, ヒストグラム, 等高線図

## ➤ プラットフォーム

Windows, Mac, Linux (MPI & OpenMP 並列対応)



\* GUI-based software originally for FLUKA, <http://theis.web.cern.ch/theis/simplegeo/>

## Table of Contents

- PHITSの紹介
  - PHITSの概要
  - PHITSに組み込まれた物理モデル
  - PHITSの応用例
- 宇宙線挙動解析への応用
  - 空気シャワーシミュレーション
  - 大気圏内宇宙線スペクトル計算モデル
- まとめと今後の予定

# PHITSに組み込まれた物理モデル

	中性子	陽子・π粒子 (その他の核子)	重イオン	μ粒子	電子・ 陽電子	光子	
軸 ↑ エネルギー ↓ 低	200 GeV		100 GeV/n	100 GeV	100 GeV	100 GeV	
	核内カスケード模型 JAM 3.0 GeV + 蒸発模型 GEM		量子分子 動力学模型 JQMD + 蒸発模型 GEM	仮想光子 核反応 JAM/ JQMD + GEM 200 MeV	原子 データ ライブラリ EEDL / ITS3.0 / EPDL97	原子 データ ライブラリ JENDL- 4.0 / EPDL97	光 核反応 JAM/ JQMD + GEM + JENDL 2 MeV
	核内カスケード模型 INCL4.6 + 蒸発模型 GEM	d t <sup>3</sup> He α	10 MeV/n		or	or	
	20 MeV	1 MeV	電離損失 SPAR or ATIMA		EGS5	EGS5	
	核データ ライブラリ JENDL-4.0 10 <sup>-5</sup> eV	1 keV			1 keV	1 keV	

→ イベントジェネレータモード:

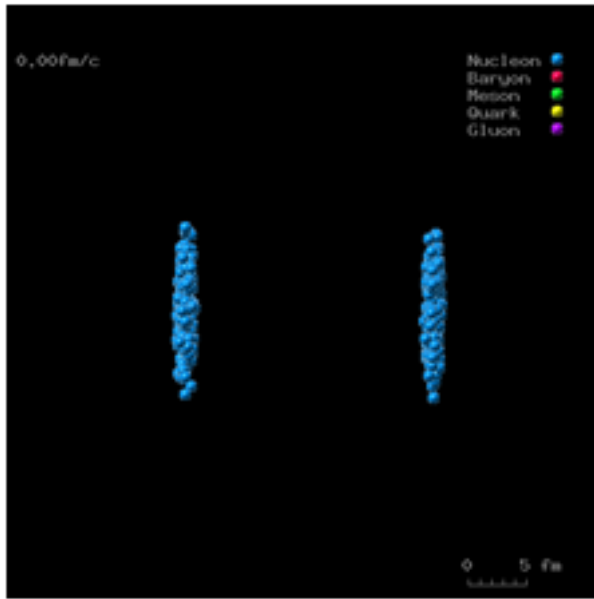
核反応による2次粒子を特定可能!

PHITSに組み込まれた物理モデルとその適用エネルギー範囲\*

\*モデル及びその適用エネルギー範囲は入力ファイルにて変更可能

# JAM (Jet AA Microscopic Transport) モデル

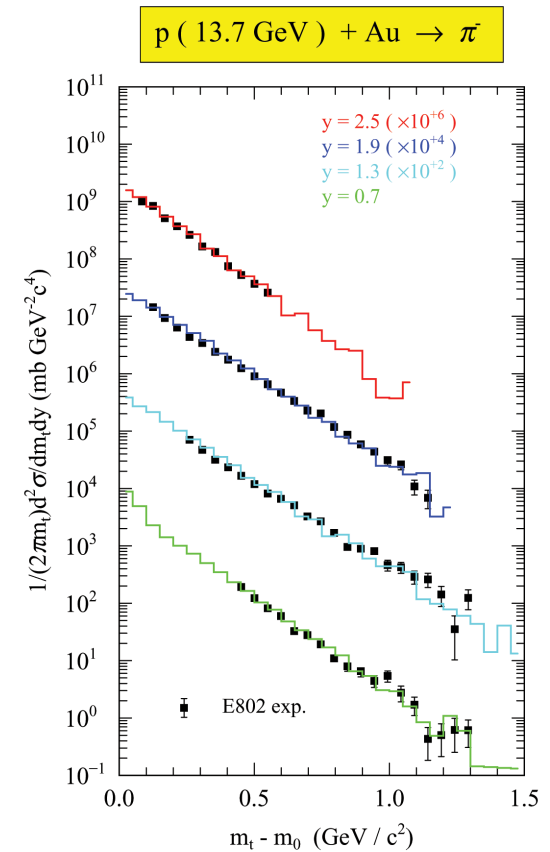
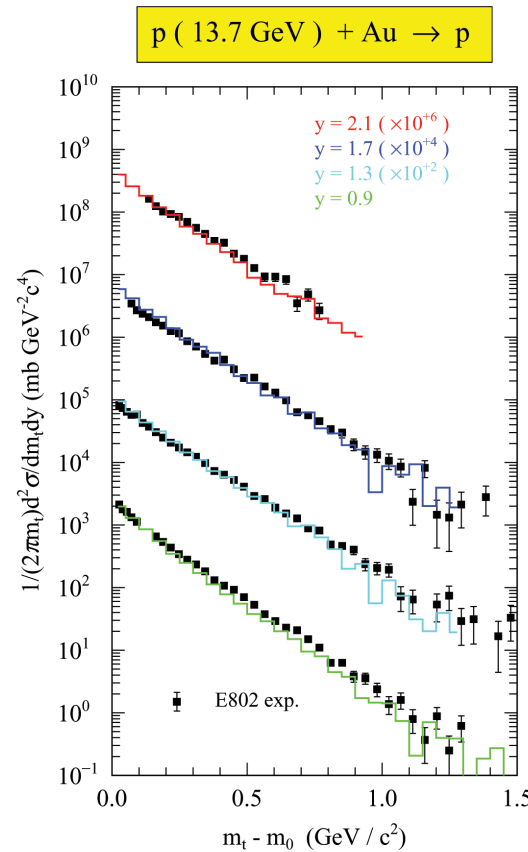
- 高エネルギー核子同士の衝突によって生成する様々な共鳴状態や反粒子などを共鳴モデルやストリングモデルを使って再現する核反応モデル
- 幅広いエネルギー(20MeV~200GeV)の核反応を模擬可能



Au+Au 200GeV/n in CM

119 kinds of Mesons

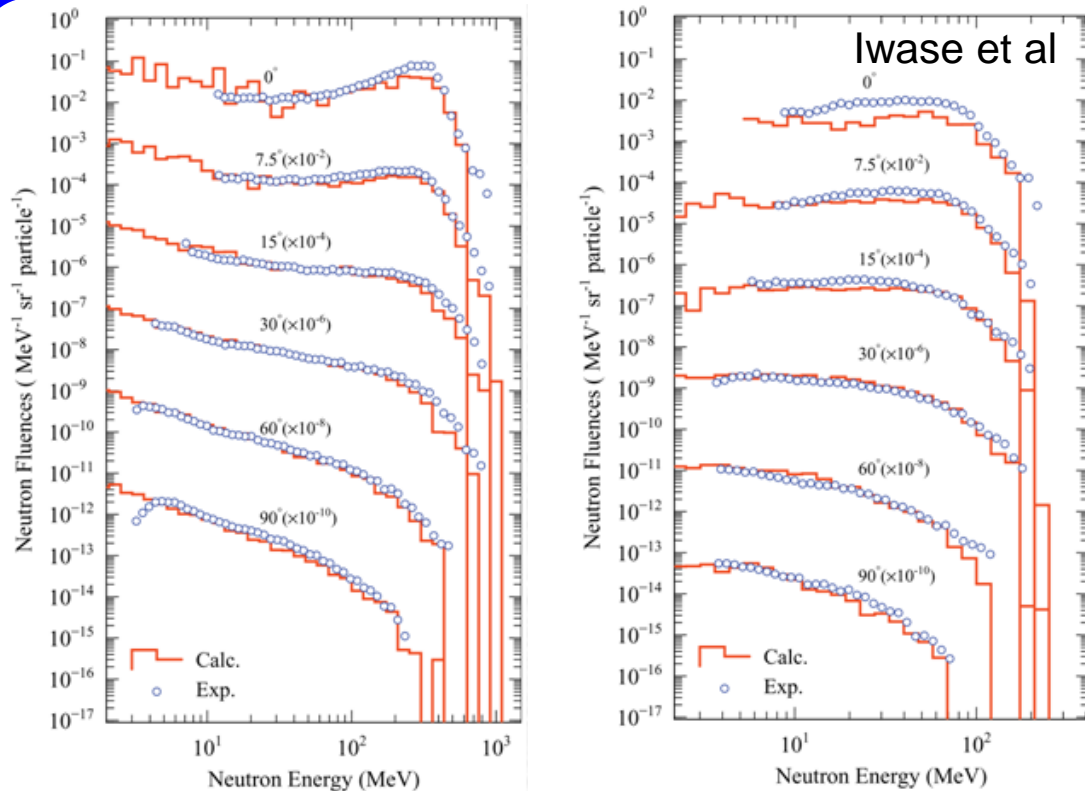
170 kinds of Baryons



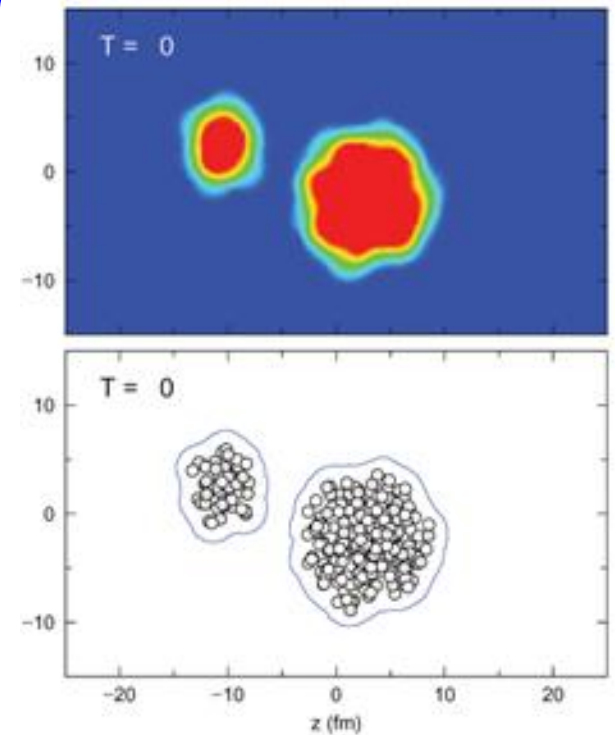


# JQMD (JAERI Quantum Molecular Dynamics) モデル

- 原子核を核子の集合体と仮定して、全ての核子間力を数値解析で解く手法
- 入射放射線の核種・エネルギーとターゲット核種の情報から核反応の終状態を予測することができる



Double differential cross section of neutron



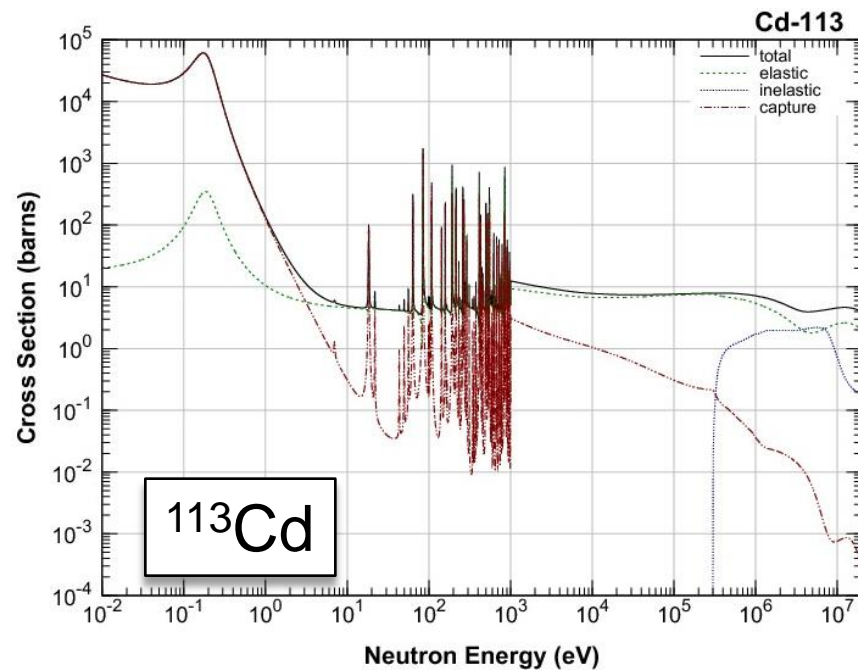
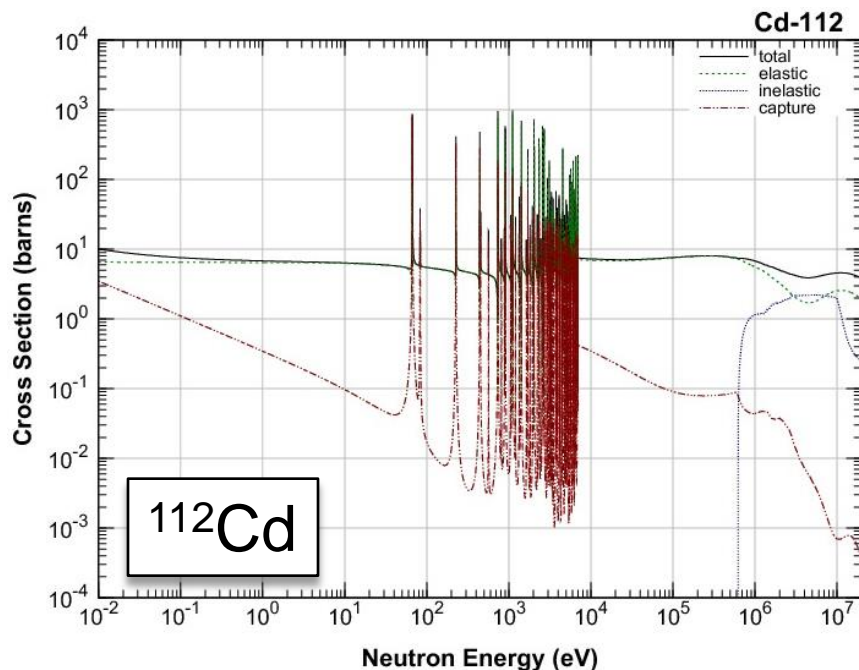
<sup>56</sup>Fe 800 MeV/u on <sup>208</sup>Pb

# 核データライブラリ JENDL4.0

低エネルギー中性子は原子核と共鳴して、  
特定の核種・エネルギーのみ断面積が極めて大きくなる

原子核を核子の集合体として扱う核反応モデルは使えない

各核種ごとに断面積を実験値ベースで評価した核データライブラリが必要



JENDL4.0に格納されている $^{112}\text{Cd}$ と $^{113}\text{Cd}$ の中性子反応断面積

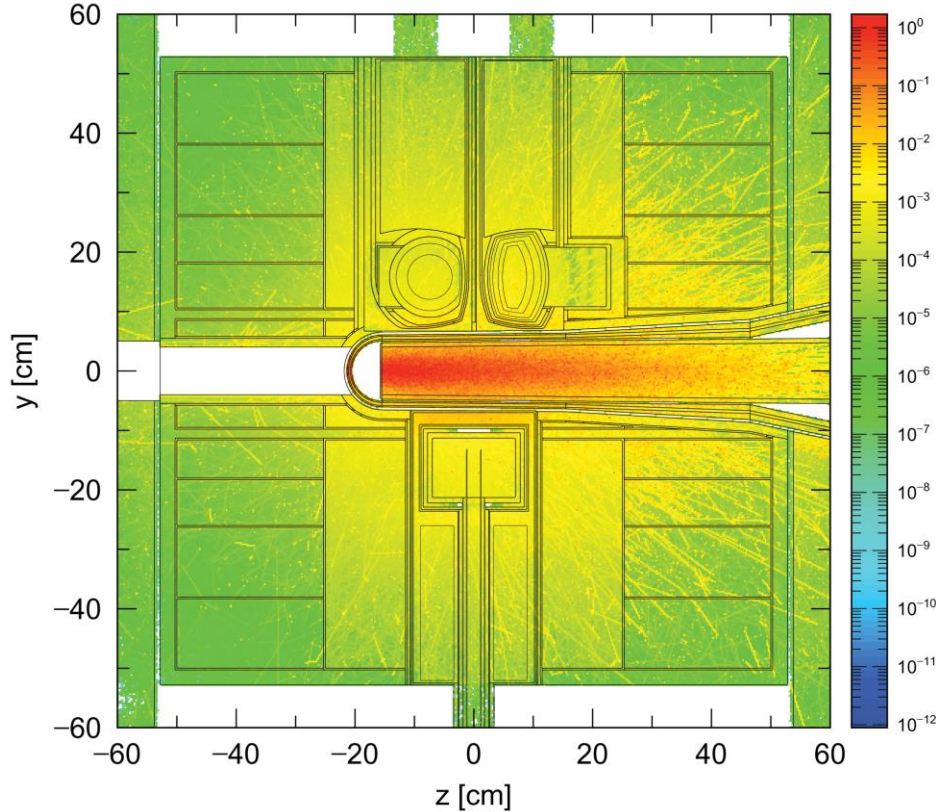
## Table of Contents

- PHITSの紹介
  - PHITSの概要
  - PHITSに組み込まれた物理モデル
  - PHITSの応用例
- 宇宙線挙動解析への応用
  - 空気シャワーシミュレーション
  - 大気圏内宇宙線スペクトル計算モデル
- まとめと今後の予定

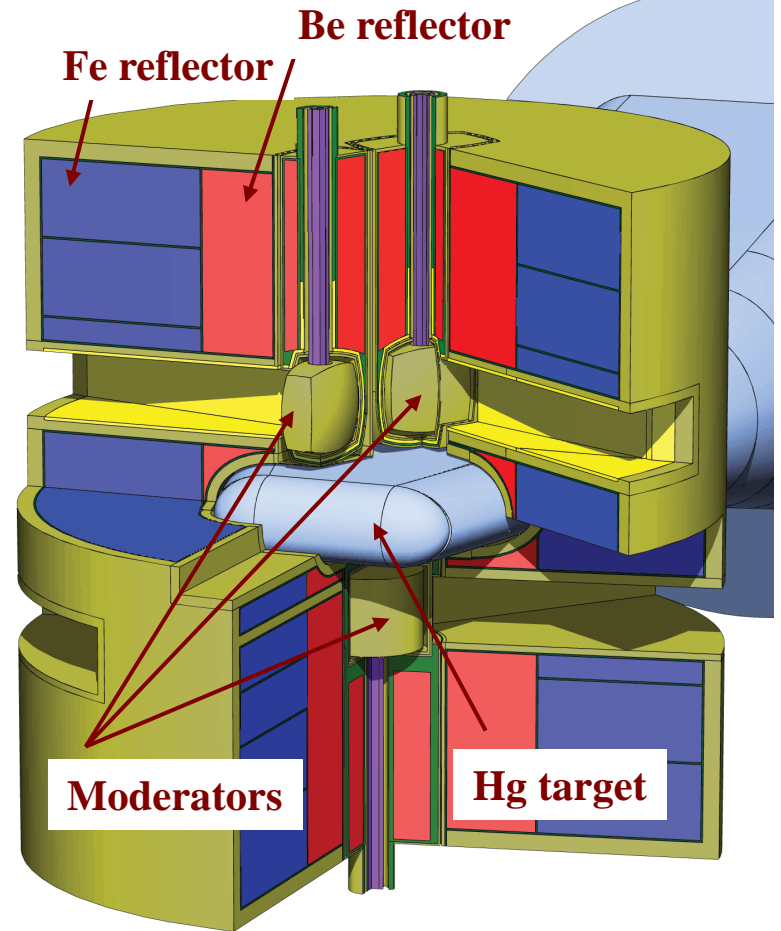
# 加速器施設の設計

## J-PARCのターゲット設計

Energy Deposition

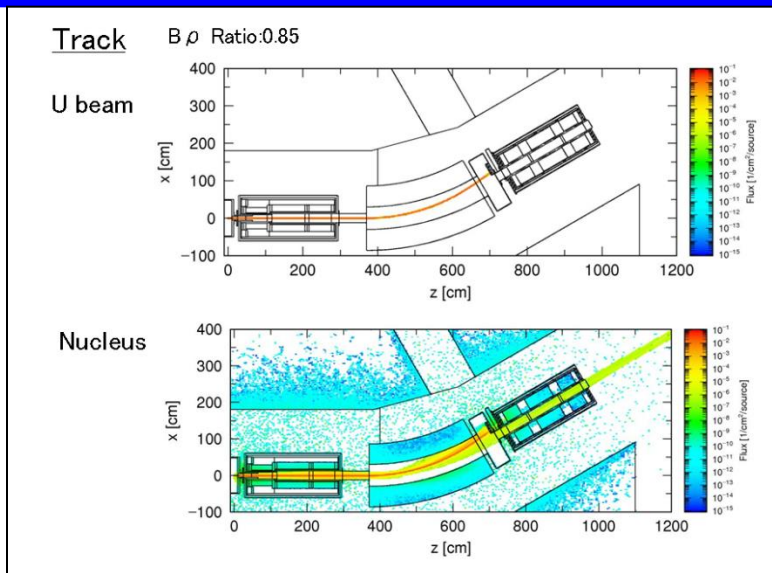


水銀ターゲット付近の電離量計算

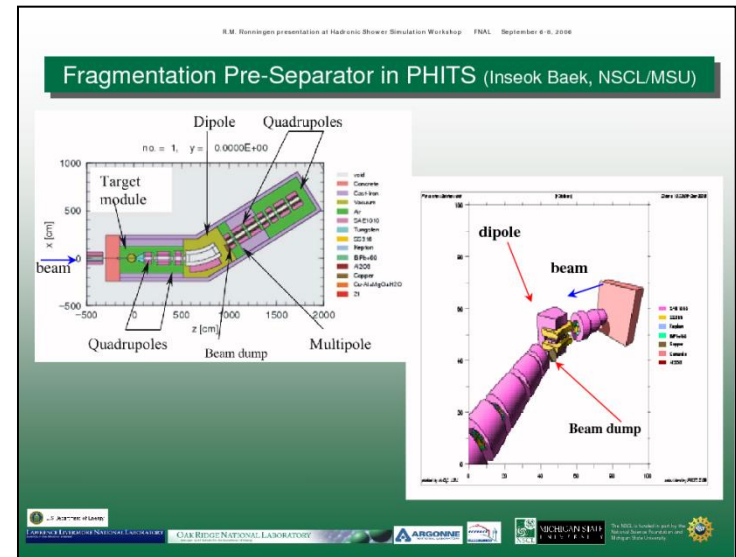


水銀ターゲット付近の幾何形状

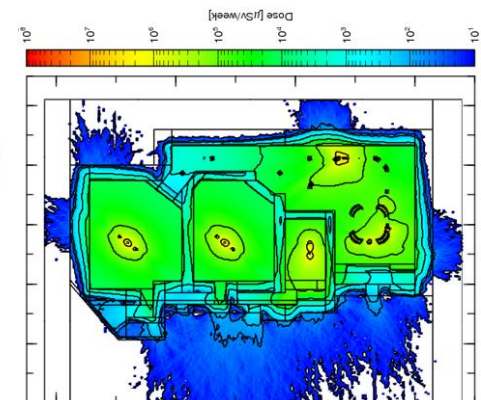
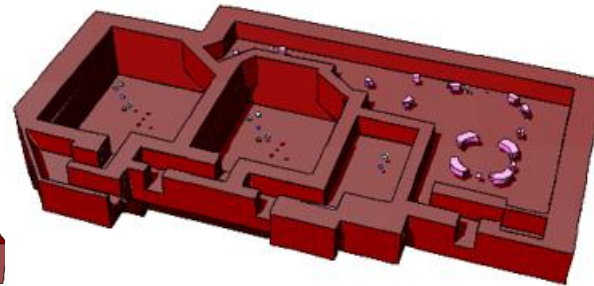
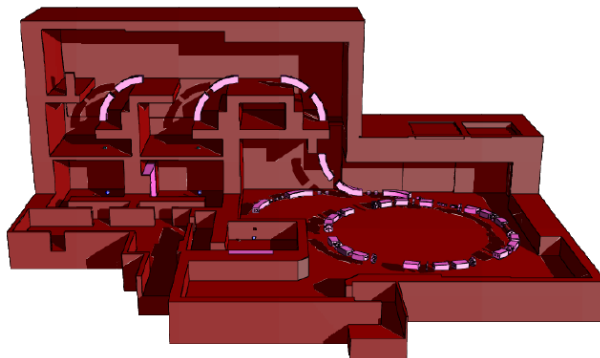
# その他の施設における遮蔽設計の例



RIBF at RIKEN by T. Ohnishi



FRIB at MSU by I. Baek

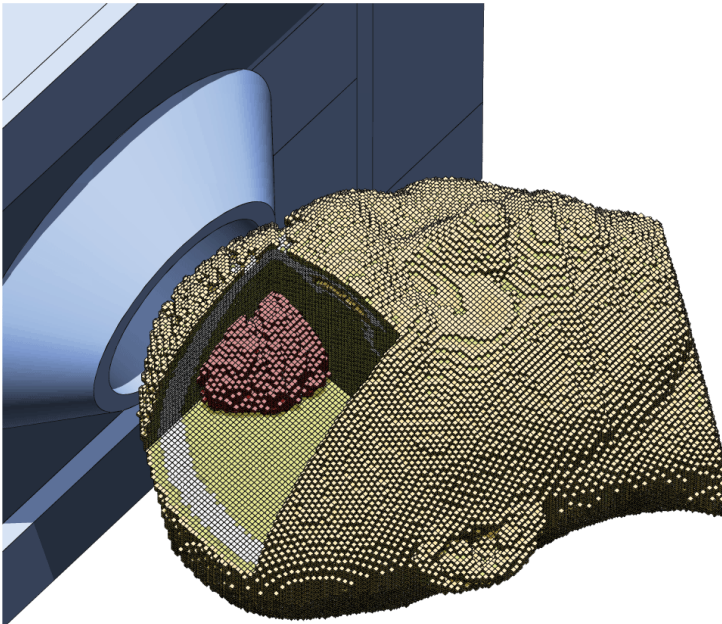


粒子線治療用加速器施設 (HIMAC新棟, 福井県立病院陽子線がん治療センターなど)

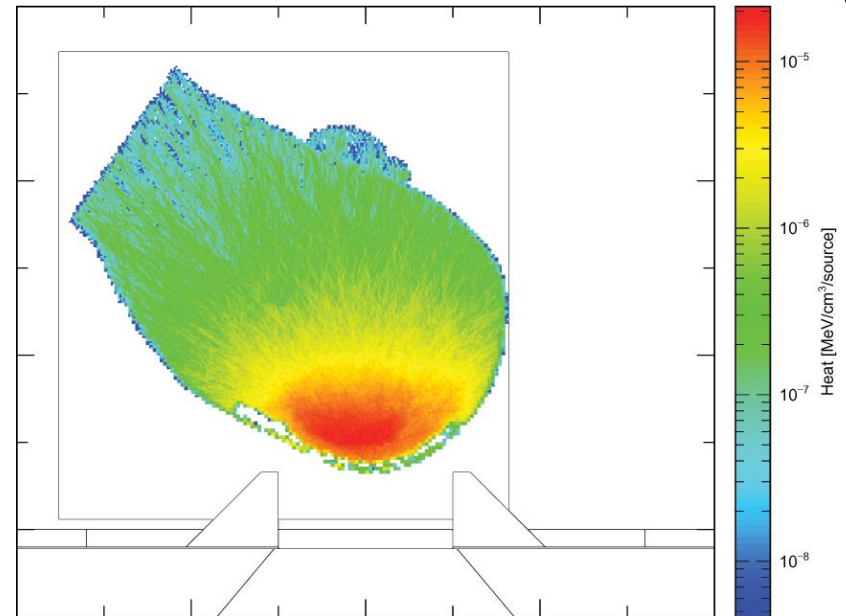
# 放射線治療計画への応用

## JCDS (JAEA Computational Dosimetry System)

- 原子力機構JRR-4で行われていたホウ素捕捉療法 (BNCT) 用の治療計画システム
- DICOMフォーマットのCTとMRIデータからPHITS入力ファイルを作成
- 腫瘍部分の定義などは, 画像を元に各自が判断する必要有



PHITSで出力した患者の3次元画像



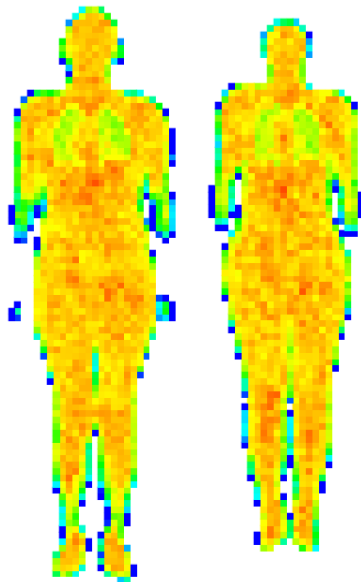
PHITSで計算した発熱量分布

# 放射線防護分野への応用

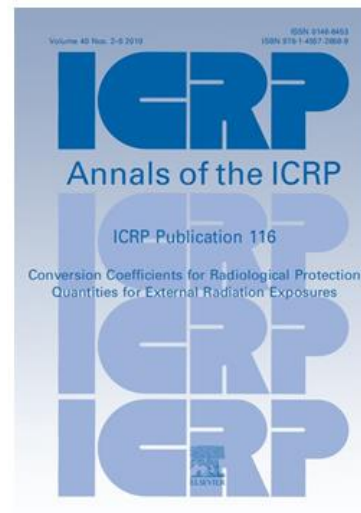
## フルエンスから人体の被ばく線量への換算係数の計算

1. 様々な放射線が人体ファントムに入射したときの各臓器の吸収線量をPHITSで計算
2. 放射線による人体影響の違い(放射線荷重係数)や各臓器の放射線感受性(組織荷重係数)の違いを考慮して全身で積分

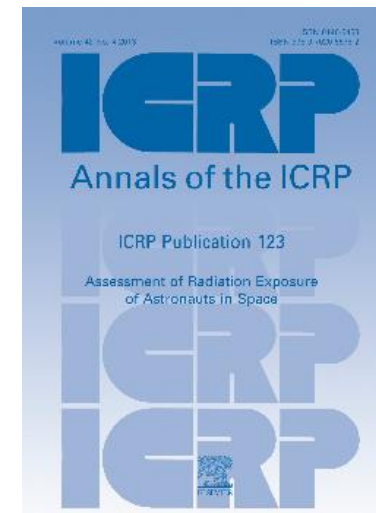
放射線場の情報から人体被ばく線量がすぐに推定可能



ICRP/ICRUの標準成人  
男性(左) & 女性(右)ファントム



ICRP Pub.116



ICRP Pub.123

ICRPによる線量換算係数の評価に利用

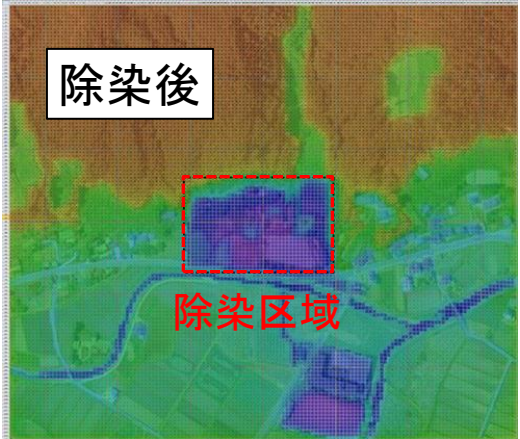
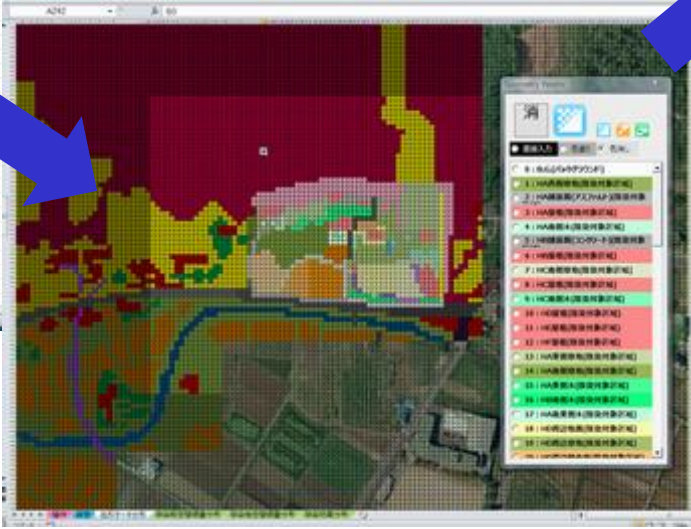
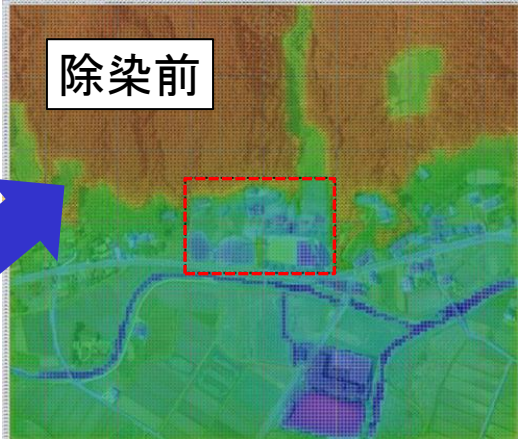
# 福島原発事故対策

## 除染効果評価システムCDE

- 除染作業前後の空間線量率の計算から除染効果を評価するソフトウェア
- PHITSを用いて汚染環境中の空間線量率計算に必要なデータベースを作成

行追加	行削除	ID	地目	方位	方位	汚染濃度	除染状況	線量	高さ	線量	線量
SPX除染前(点:汚染)		000	平地	北	北	1.0	未除染	1.0	0.0	0.0	0.0
SPX除染前(線:汚染)		001	土壌	南	南	1.2	未除染	1.2	0.0	0.0	1.2
SPX除染前(面:汚染)		002	平地	南	南	1.2	未除染	1.2	0.0	0.0	1.2
SPX除染前(面:汚染)		003	平地	南	南	1.8	未除染	1.8	0.0	0.0	1.8
SPX除染前(面:汚染)		004	平地	南	南	1.8	未除染	1.8	0.0	0.0	1.8
SPX除染前(面:汚染)		005	平地	南	南	1.4	未除染	1.4	0.0	0.0	1.4
SPX除染前(面:汚染)		006	平地	南	南	1.4	未除染	1.4	0.0	0.0	1.4
SPX除染前(面:汚染)		007	平地	南	南	2.7	未除染	2.7	0.0	0.0	2.7
SPX除染前(面:汚染)		008	平地	南	南	2.7	未除染	2.7	0.0	0.0	2.7
SPX除染前(面:汚染)		009	平地	南	南	2.3	未除染	2.3	0.0	0.0	2.3
SPX除染前(面:汚染)		010	平地	南	南	2.3	未除染	2.3	0.0	0.0	2.3
SPX除染前(面:汚染)		011	平地	南	南	0.9	未除染	0.9	0.0	0.0	0.9
SPX除染前(面:汚染)		012	平地	南	南	0.9	未除染	0.9	0.0	0.0	0.9
SPX除染前(面:汚染)		013	平地	南	南	2.3	未除染	2.3	0.0	0.0	2.3
SPX除染前(面:汚染)		014	平地	南	南	2.3	未除染	2.3	0.0	0.0	2.3
SPX除染前(面:汚染)		015	平地	南	南	2.3	未除染	2.3	0.0	0.0	2.3
SPX除染前(面:汚染)		016	平地	南	南	2.3	未除染	2.3	0.0	0.0	2.3
SPX除染前(面:汚染)		017	平地	南	南	2.3	未除染	2.3	0.0	0.0	2.3
SPX除染前(面:汚染)		018	平地	南	南	2.3	未除染	2.3	0.0	0.0	2.3
SPX除染前(面:汚染)		019	平地	南	南	2.3	未除染	2.3	0.0	0.0	2.3
SPX除染前(面:汚染)		020	平地	南	南	2.3	未除染	2.3	0.0	0.0	2.3

空間線量率の計算と結果の可視化



使いやすい表計算ソフトウェアで提供

除染地域の地図の上に汚染分布のデータを入力

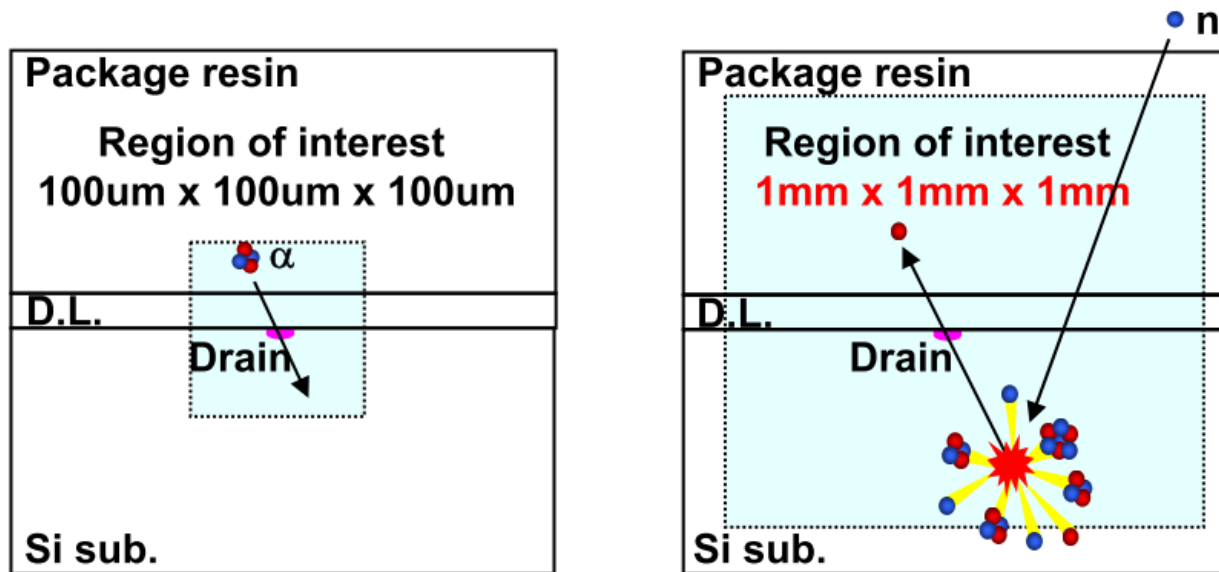


# 半導体ソフトウェア発生率評価

## 半導体ソフトウェアとは？

- 放射線照射により有感領域にあるしきい値以上のエネルギー付与があるとその半導体のビットが反転し、プログラムのエラーが起きる
- 地表面では、宇宙線中性子が有感領域で核反応を起こして発生する

中性子核反応で生成する2次粒子を評価可能なイベントジェネレータモードが不可欠



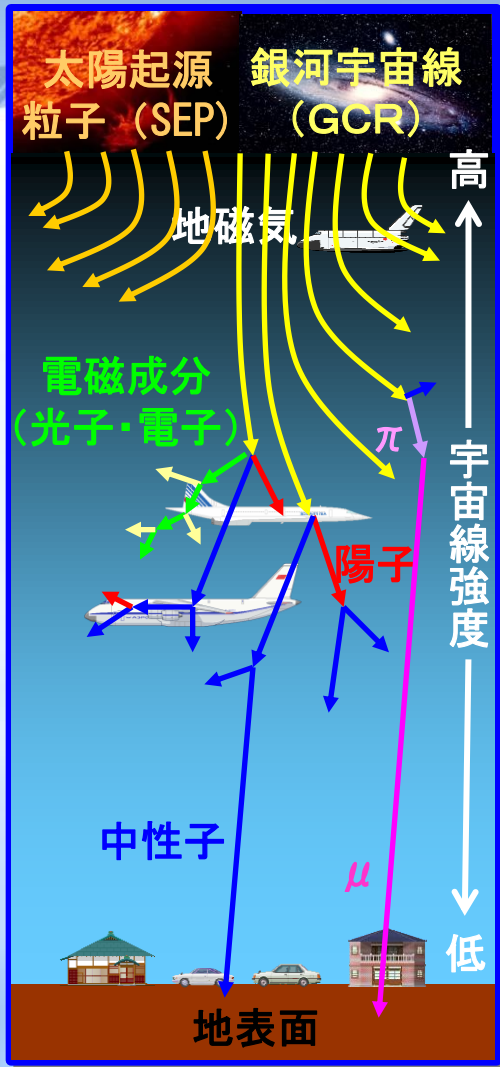
D.L. : Dielectric (metallization) Layer

中性子の核反応モデルにPHITSを使った半導体ソフトウェア発生率計算

## Table of Contents

- PHITSの紹介
  - PHITSの概要
  - PHITSに組み込まれた物理モデル
  - PHITSの応用例
- 宇宙線挙動解析への応用
  - 空気シャワーシミュレーション
  - 大気圏内宇宙線スペクトル計算モデル
- まとめと今後の予定

# 研究の背景



## 大気中の宇宙線が引き起こす「工学的」問題

### 航空機乗務員の宇宙線被ばく

- ICRPが90年勧告で職業被ばくに認定
- 文科省WGが各航空会社に5mSv/yearの自主管理を要求

### 半導体ソフトエラー

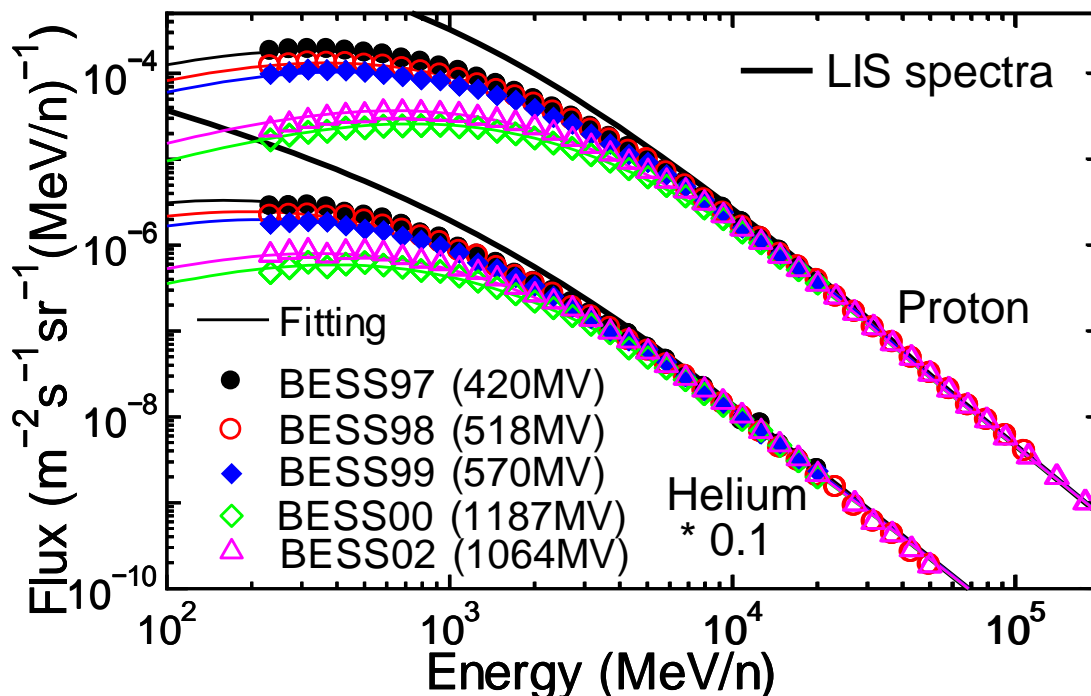
- 従来:放射線強度の強い環境でのみ問題
- 近年:地表面においても大きな問題

## 「工学的」空気シャワーシミュレーションの特徴

- 全放射線の種類・エネルギーごとのフラックスが必要
- 全地球上(緯度・経度・高度)のデータが必要
- 長期間に渡る時間変動のデータが必要
- 平均値に影響を与えない高エネルギー宇宙線(数100GeV以上)は無視してよい

大気中における宇宙線挙動

# 大気入射宇宙線スペクトルモデルの構築



気球実験**BESS**\*で測定した大気TOPにおける銀河宇宙線スペクトル

$$\text{大気入射スペクトル} = \text{LISスペクトル} \times \text{Solar modulation効果} \times \text{地磁気効果}$$

**BESS**実験  
Rigidityの指数  
関数でfitting

**Force Field Formalism**  
太陽活動度(FFP)は地上中性子  
モニタの計数率より決定

**Vertical Cut-off Rigidity**  
各緯度・経度の値はMagneto-  
Cosmicsで計算

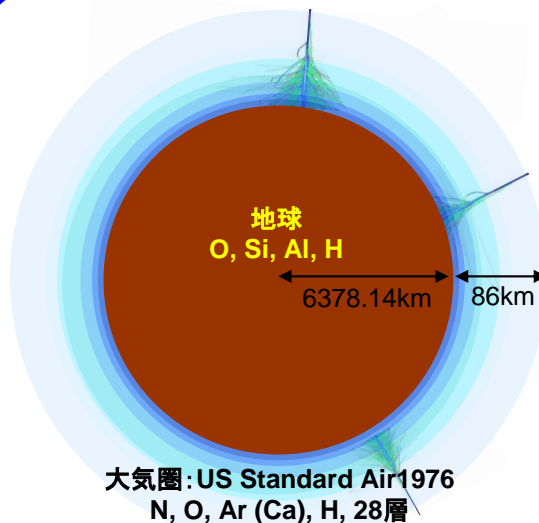
\*Shikaze et al, Astropart. Phys. 28, 154 (2007)

# 空気シャワーシミュレーション方法



## 大気入射宇宙線モデル

- ・ 入射粒子: 陽子, Heイオン
- ・ エネルギー: 1MeV~200GeV
- ・ FFP: 400MV~1800MV
- ・ Rc: 0.1GV~17GV



## 地球+大気モデル

- US-Standard Air 1976
- ・ 大気: 高度86kmまで考慮
- ・ 地球: 地下10mまで考慮



## 核反応モデル

## JENDL高エネルギー 核データファイル

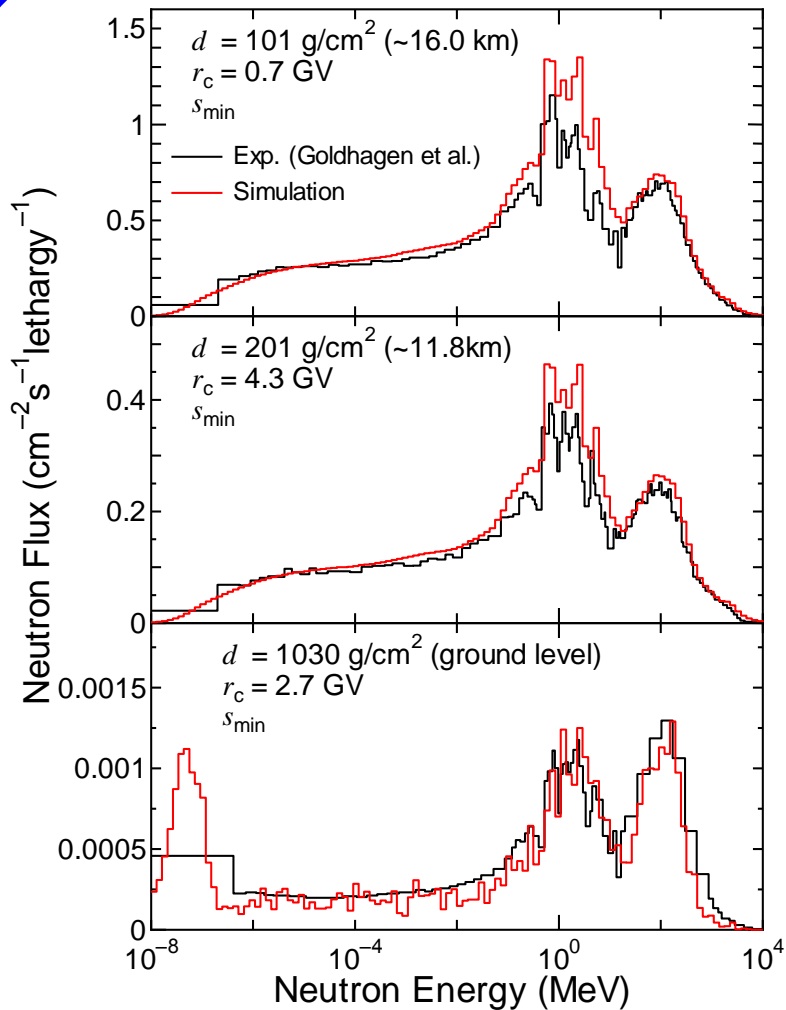
3GeV以下の  
中性子・陽子核反応

インプットファイルとしてPHITSに組み込む

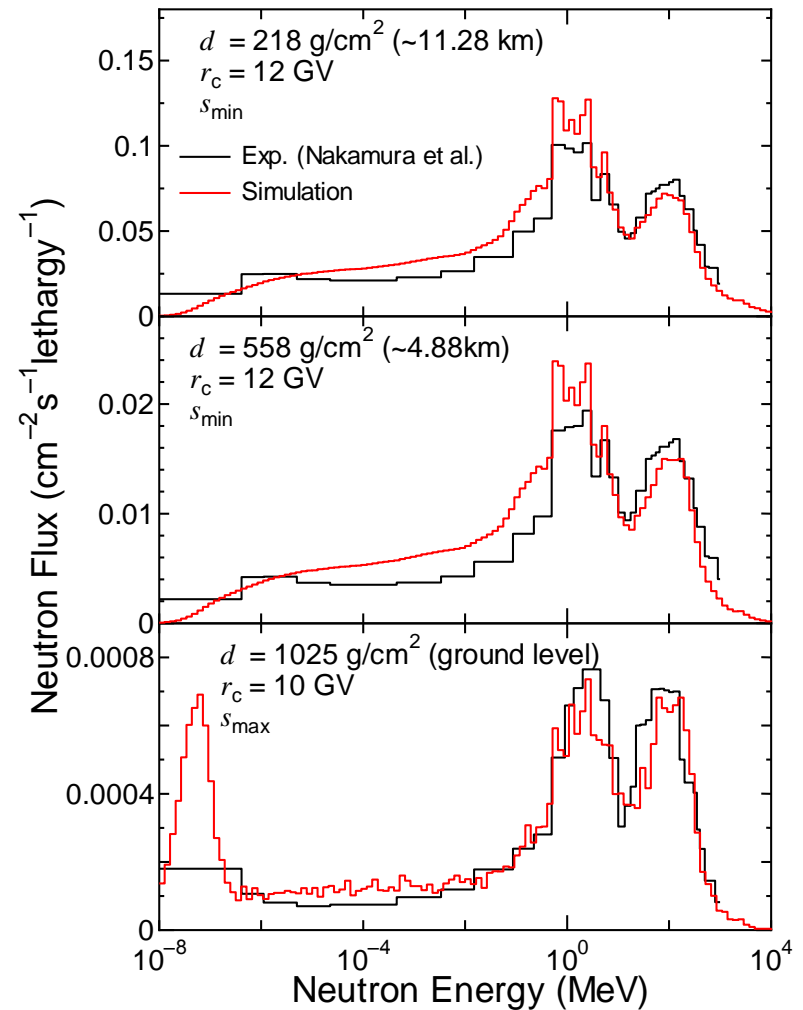
大気圏内の宇宙線挙動を解析(40CPU×2ヶ月)

大気中の中性子・陽子・ $\alpha$ ・ $\mu^\pm$ ・ $\gamma$ ・ $e^\pm$ スペクトルを計算

# 計算結果と測定値の比較（中性子）



アメリカにおける測定値との比較

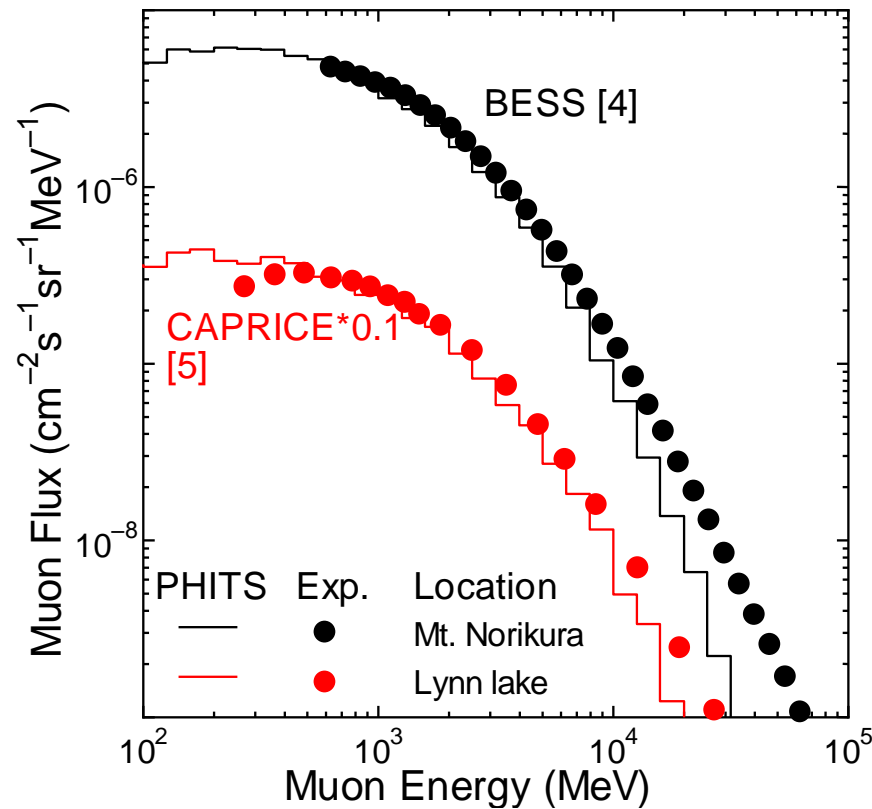
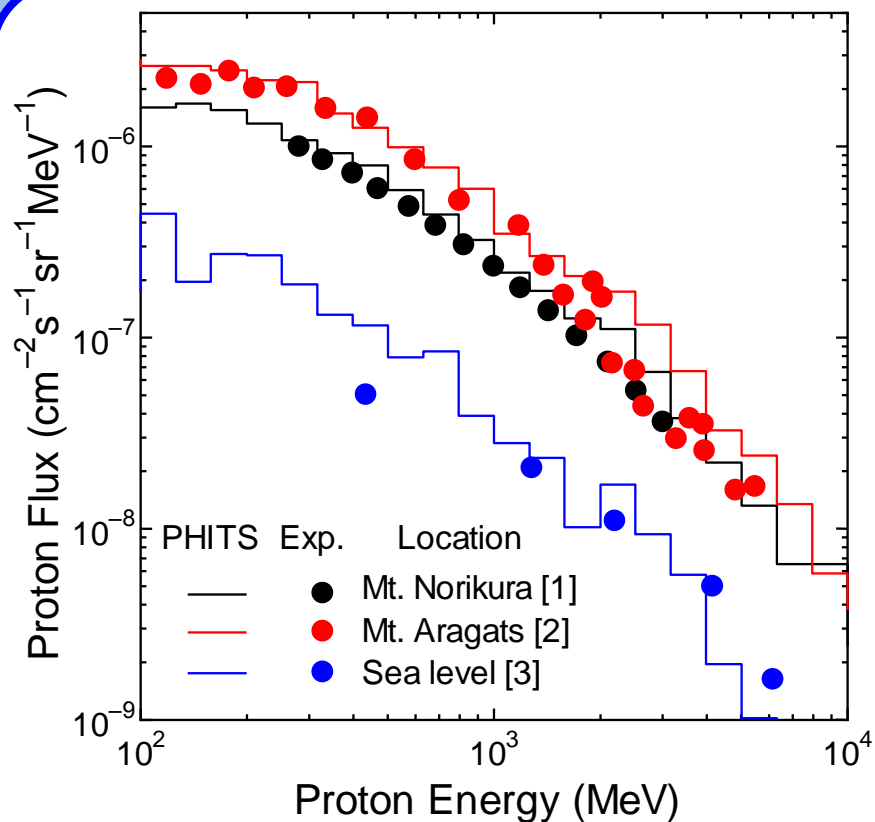


日本における測定値との比較

[1] P. Goldhagen, et al., Radiat. Prot. Dosim., 110, 387-392 (2004).

[2] T. Nakamura, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 42, 843-853 (2005).

# 計算結果と測定値の比較 (陽子・ミュオン)



**Proton (left) and Muon (right) Spectra in the Atmosphere**

[1] T. Sanuki et al., *Phys. Lett.* **B 577**, 10-17 (2003)

[2] N. M. Kocharian et al., *Sov. Phys. JETP* **35**, 933-942 (1959).

[3] I. S. Diggory et al., *J. Phys. A: Math., Nucl. Gen.* **7**, 741-764 (1974)

[4] T. Sanuki et al., *Phys. Lett.* **B 541**, 234-242 (2002)

[5] J. Kremer et al., *Phys. Rev. Lett.* **83**, 4241-4244 (1999)

## Table of Contents

- PHITSの紹介
  - PHITSの概要
  - PHITSに組み込まれた物理モデル
  - PHITSの応用例
- 宇宙線挙動解析への応用
  - 空気シャワーシミュレーション
  - 大気圏内宇宙線スペクトル計算モデル
- まとめと今後の予定



# 大気圏内宇宙線スペクトル迅速計算モデルPARMA

## PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere

### 導出方法

- 高度： 0～20kmまで18条件
  - 地磁気強度： Vertical Cut-off Rigidity 0.1～17 GVまで18条件
  - 太陽活動度： Force-Field Potential 400～1800MVまで5条件
- 合計18×18×5=1620条件に対する宇宙線スペクトルの系統性を解析

### 大気圏内宇宙線スペクトルを関数化

#### 関数系 (例)

$$\bar{\phi}_B(E) = c_1 \left(\frac{E}{c_2}\right)^{c_3} \exp\left(\frac{-E}{c_2}\right) + c_4 \exp\left\{\frac{-[\log_{10}(E) - \log_{10}(c_5)]^2}{2[\log_{10}(c_6)]^2}\right\} + c_7 \log_{10}\left(\frac{E}{c_8}\right) \left\{1 + \tanh\left[c_9 \log_{10}\left(\frac{E}{c_{10}}\right)\right]\right\} \left\{1 - \tanh\left[c_{11} \log_{10}\left(\frac{E}{c_{12}}\right)\right]\right\}$$
$$\log_{10}[f_G(E, w)] = g_1 + g_2 \log_{10}\left[\frac{E}{g_3(w)}\right] \left\{1 - \tanh\left[g_4 \log_{10}\left[\frac{E}{g_5(w)}\right]\right]\right\}$$

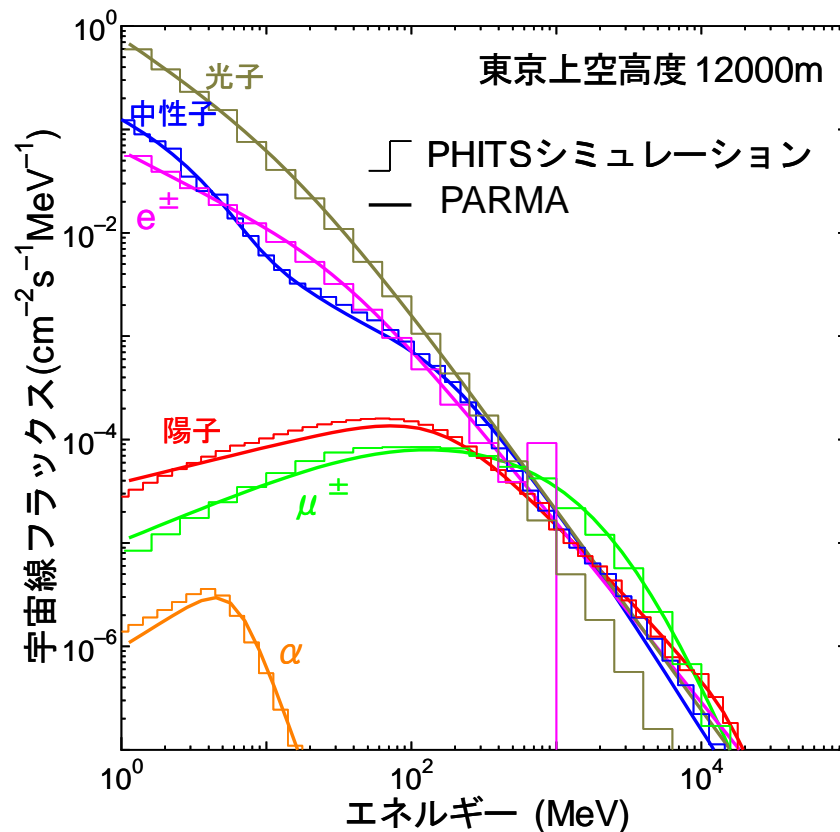
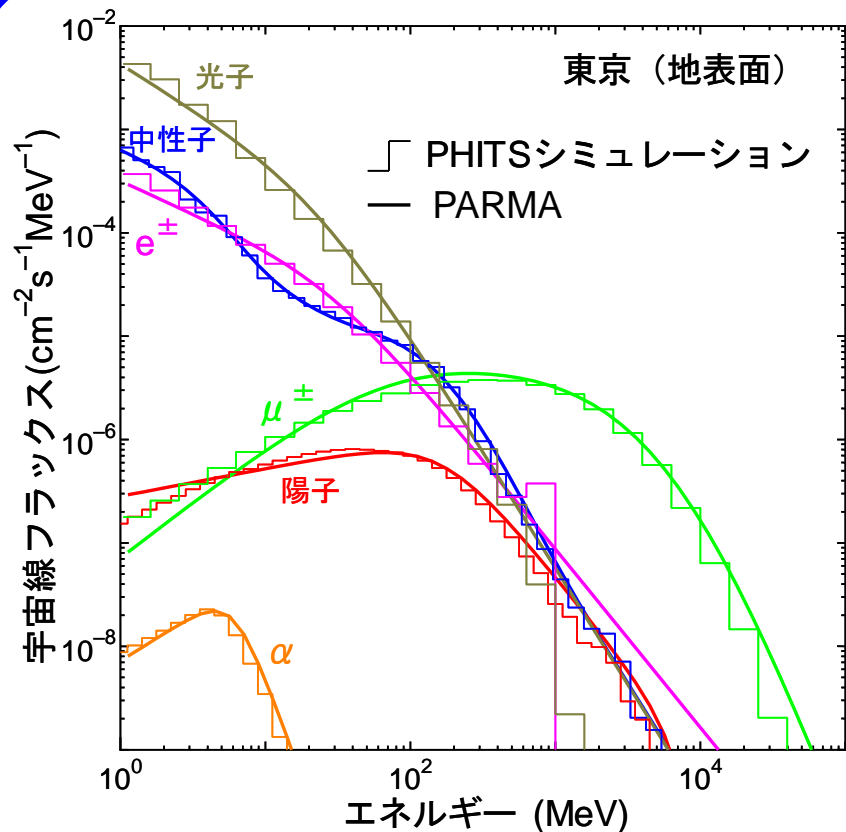
フリーパラメータ：モンテカルロ計算結果を最小自乗フィッティングして決定

大気中任意地点\*時間\*\*における宇宙線スペクトルを高精度かつ迅速に計算可能

\*高度20kmを除く

\*\*1750年以降。また、太陽フレア時を除く

# PARMAによる計算結果



太陽活動極小期の東京における宇宙線スペクトル

モンテカルロ計算結果を極めてよく再現！

# PARMAを応用したソフトウェア①：EXPACS

EXcel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum

**入力欄**  
 ・高度  
 ・緯度・経度  
 ・年月  
 ・周辺環境

**出力欄**  
 各放射線別の被ばく線量率

**出力欄**  
 宇宙線スペクトル  
 (数値データ)

**EXPACS ver. 2.00**

Excel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum, Copyright© 2006, 日本原子力研究開発機構  
 開発者: 佐藤 達彦, 放射線防護研究グループ, 日本原子力研究開発機構, E-mail: nsed-expacs@jaea.go.jp  
 参考文献: T.Sato and K.Niita, "Analytical Functions to Predict Cosmic-Ray Neutron Spectra in the Atmosphere", Radiat. Res. 166, 544-555 (2006)  
 URL: <http://ncedwww.tokai-sc.jaea.go.jp/ers/radiation/rprm/EXPACS/expacs.html>

Japanese ▼

白色のセルに条件を入力して下さい

高度または大気深度	11 (km)
場所または	35.7 緯度 (北緯)
地磁気強度	139.7 経度 (東経)
時間または	2007 年
太陽磁場強度	5 月
周辺環境	地表面
周辺環境パラメータ	0.15 水分含有率
出力フラックス単位	( $\mu\text{cm}^2/\text{s}/(\text{MeV}/\text{n})$ )
出力線量単位	(nSv/h)

**入力条件確認**

大気深度	228.4 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )
地磁気強度	11.297432 (GV)
太陽磁場強度	0.39562 (GV)
周辺環境パラメータ	0.15 水分含有率

計算結果	被ばく線量 (nSv/h)	
	実効線量	H*(10)
合計線量	1.61 E+03	1.71 E+03
中性子	6.06 E+02	7.16 E+02
陽子	3.00 E+02	2.57 E+02
ヘリウム原子核	7.94 E+01	2.83 E+00
$\mu$ +粒子	7.11 E+01	7.94 E+01
$\mu$ -粒子	6.24 E+01	6.97 E+01
電子	1.13 E+02	8.04 E+01
陽電子	1.05 E+02	2.03 E+02
光子	2.72 E+02	7.63 E+01

**PARMAモデルで計算した大気中宇宙線スペクトル**

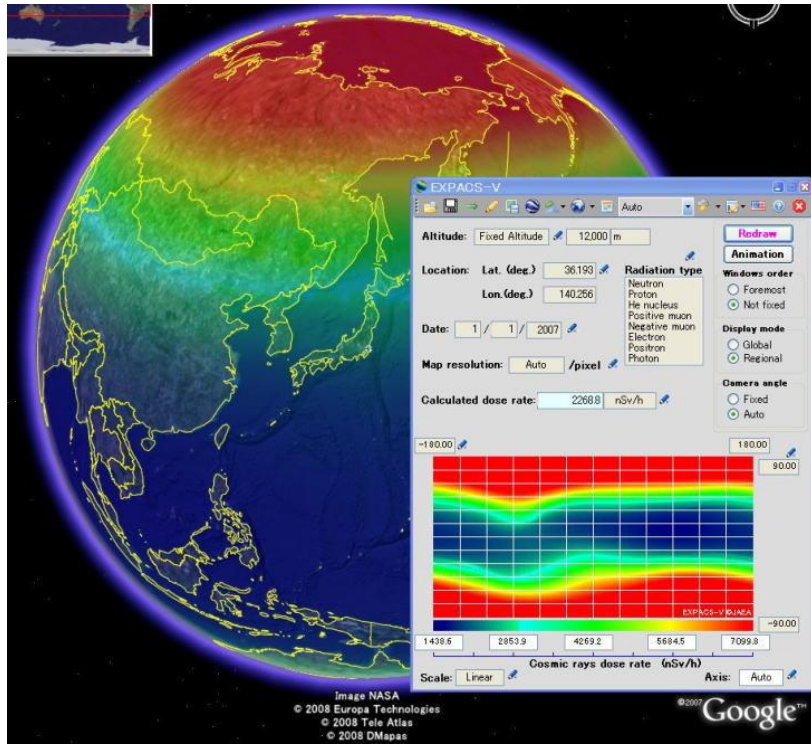
**出力欄**  
 宇宙線スペクトル  
 (グラフ)

PARMAモデルで計算した大気中宇宙線スペクトル							
各粒子のフラックス ( $\mu\text{cm}^2/\text{s}/(\text{MeV}/\text{n})$ )							
エネルギー(MeV/n)	中性子	陽子	ヘリウム原子核	$\mu$ +粒子	$\mu$ -粒子	電子	陽電子
1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
1.0E+01	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01
1.0E+02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02
1.0E+03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03
1.0E+04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04
1.0E+05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05

Web上で一般公開

Google EXPACS 検索

# PARMAを応用したソフトウェア ②



宇宙線被ばく線量率可視化ソフトウェア  
EXPACS-V(原子力機構)

<http://phits.jaea.go.jp/expacs/>

独立行政法人 放射線医学総合研究所  
航路線量計算システム(JISCARD)  
Japanese Internet System for Calculation of Route Doses

HOME | 航路線量計算 | 対象都市 | 条件説明 | 語句説明 | 関連情報

航路線量計算

システムご利用マニュアル >> テキスト版 / 動画版

1. 出発空港選択
2. 到着都市選択
3. 飛行時期選択
4. 条件の確認
5. 線量計算結果

## 1. 出発空港選択

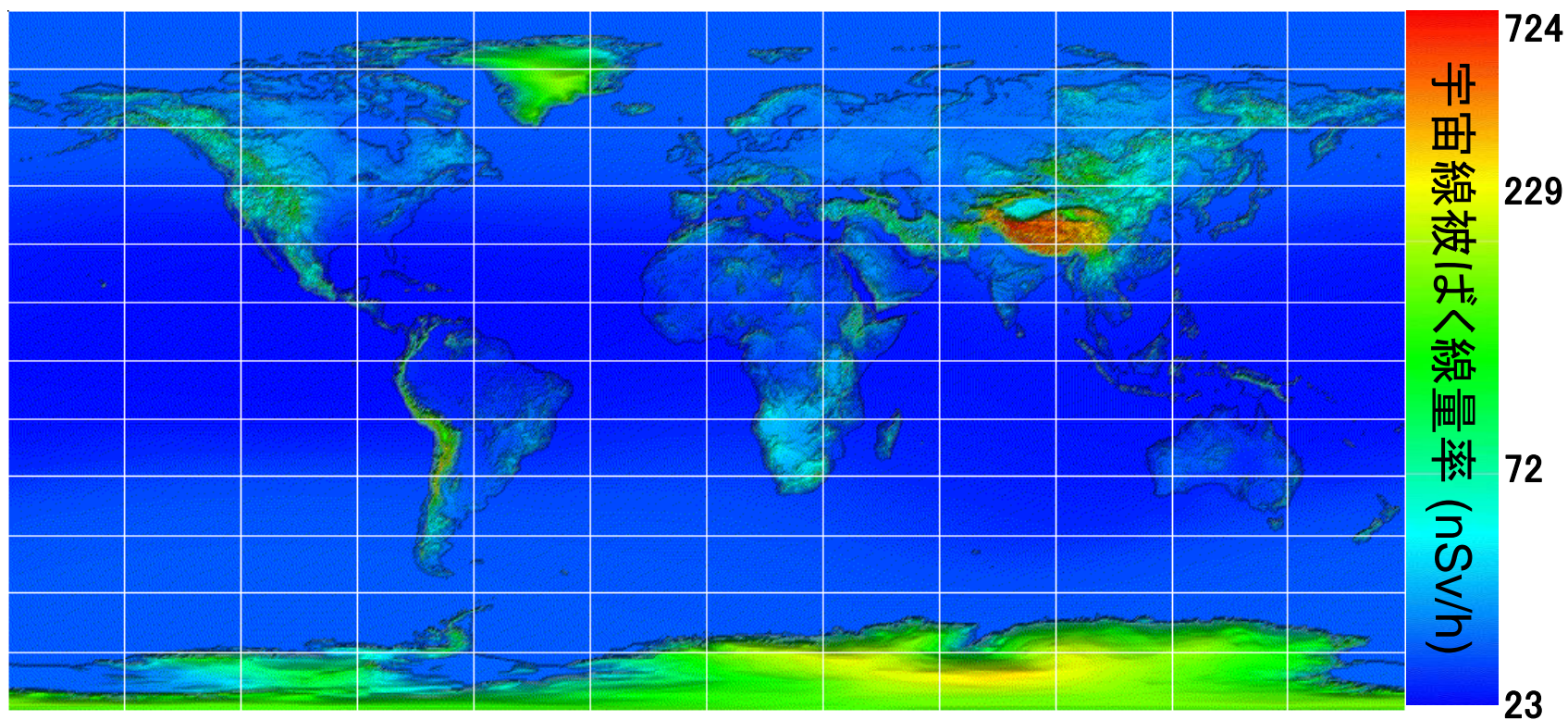
下の地図から、出発空港を選択してください。



航路線量計算プログラム  
JISCARD(放医研)

<http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/>

# 宇宙線被ばく線量の世界地図



PARMAで計算した地表面における宇宙線被ばく線量率  
(2006年6月)

# モデルの応用先

- 日本の航空会社による乗務員被ばく線量管理
- 半導体ソフトウェア発生率評価
- 宇宙線生成核種の生成率評価
- 宇宙気候学, 星雲冬仮説への応用
- 宇宙線計測実験のバックグラウンド評価

## Table of Contents

- PHITSの紹介
  - PHITSの概要
  - PHITSに組み込まれた物理モデル
  - PHITSの応用例
- 宇宙線挙動解析への応用
  - 空気シャワーシミュレーション
  - 大気圏内宇宙線スペクトル計算モデル
- **まとめと今後の予定**

# PHITSの特長

- ◆ 幅広いエネルギー範囲の全ての放射線の挙動を解析可能
- ◆ シンプルなユーザーインターフェイスに基づく多様な計算機能
- ◆ 洗練された核反応モデルと核データ  
(INCL4.6, JQMD, JAM, JENDL-4 etc.)
- ◆ 様々な用途に使える独自の計算機能  
(マイクロドジメトリ機能, イベントジェネレータモード, ビームライン設計機能)

**国内外1,600名以上のユーザーが  
工学・理学・医学の様々な分野で利用している**

- ✓ 全国各地で講習会を年10回程度開催(4/27~28京大炉講習会の受付中)
- ✓ 教育版PHITSも公開中

<http://phits.jaea.go.jp/>



# 空気シャワーシミュレーションのまとめ

1. PHITSを用いた空気シャワーシミュレーションにより、大気圏内の様々な条件で測定した宇宙線スペクトルを再現することに成功した
2. その結果を基に、大気圏内の任意地点・時間における宇宙線スペクトルを迅速に計算可能な数学モデルを構築した
3. 構築したモデルは、放射線防護、半導体工学、地球惑星物理など様々な分野で活用されている

ただし、極端に高いエネルギー(1TeV以上)の宇宙線が入射したときの空気シャワーシミュレーションはPHITSでは再現できない

# 今後の予定①：数学モデル適用範囲の拡張

項目	現在モデル	次期version
高度範囲	地表面～20km	地表面～ <b>大気TOP</b>
エネルギー範囲	1 MeV～100 GeV*	<b>10 keV</b> ～100 GeV
放射線の種類	n, p, $\alpha$ , $\mu^\pm$ , $e^\pm$ , $\gamma$	n, p, $\alpha$ , $\mu^\pm$ , $e^\pm$ , $\gamma$ , <b>重イオン</b> (~ Ni)
Vertical Cut-off Rigidity	0 GV ~ 17 GV	0 GV ~ <b>20 GV</b>
角度分布	積分フラックス	<b>角度微分フラックス</b>

\*中性子は0.01eV～100GeV

# 今後の予定②：任意入射スペクトルへの適用

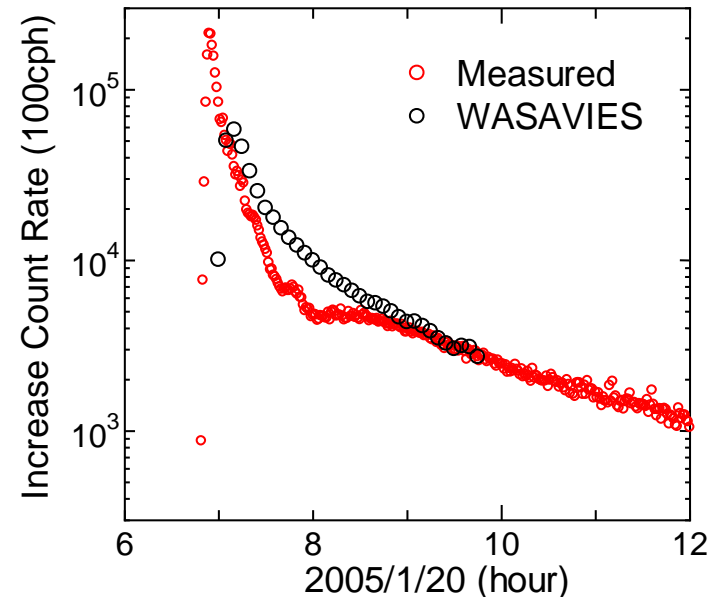
様々なエネルギーの単色陽子が大気に入射したときの空気シャワーシミュレーションを実施して応答関数データベースを構築する

## 太陽フレア時の被ばく線量評価モデル：WASAVIES

太陽フレアが発生してから数時間以内に大気圏に侵入する太陽高エネルギー粒子フラックスを予測し、その結果と上記データベースを組み合わせ、航空会社に被ばく線量上昇警報を出すシステム

**モデルは完成  
今後はシステム構築**

Kataoka et al. Space Weather (2014)  
T. Sato et al. Radiat. Prot. Dosim (2014)



太陽フレア時の地上中性子モニタ  
計数率の時間変化

# 謝辞

## 共同研究者

### (PHITS開発チーム)

仁井田浩二, 松田規弘, 橋本慎太郎, 古田琢哉, 岩元洋介, 岩瀬広,  
小川達彦, 安部晋一郎, 中島宏, 深堀智生, 奥村啓介, 甲斐哲也,  
千葉敏, L. Sihver

### (空気シャワーシミュレーションとその応用)

保田浩志, 片岡龍峰