

核データを用いた大気中の宇宙線輸送計算 - Cosmic-Ray Transport Simulation in the Atmosphere -

佐藤 達彦 (JAEA), 仁井田 浩二 (RIST)

2007/1/26 Symposium of Nuclear Data 2006FY @ Tokai

Table of Contents

- 研究の背景 & 目的

(Background & Purpose)

- 粒子輸送計算コードPHITSの紹介

(Introduction of the PHITS code)

- PHITSとJENDL/HEを組み合わせた大気中宇宙線輸送計算

(Atmospheric propagation simulation by PHITS coupled with JENDL/HE)

- 大気中宇宙線スペクトル解析モデルの確立

(Development of analytical model for estimating atmospheric cosmic-ray spectra)

- まとめ & 今後の予定

(Summary & Future Plan)

研究の背景

- Background -

大気中の中性子が引き起こす問題

Problems caused by cosmic-ray neutron

航空機乗務員の宇宙線被ばく

Aircrew exposure

- 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

半導体ソフトウェア

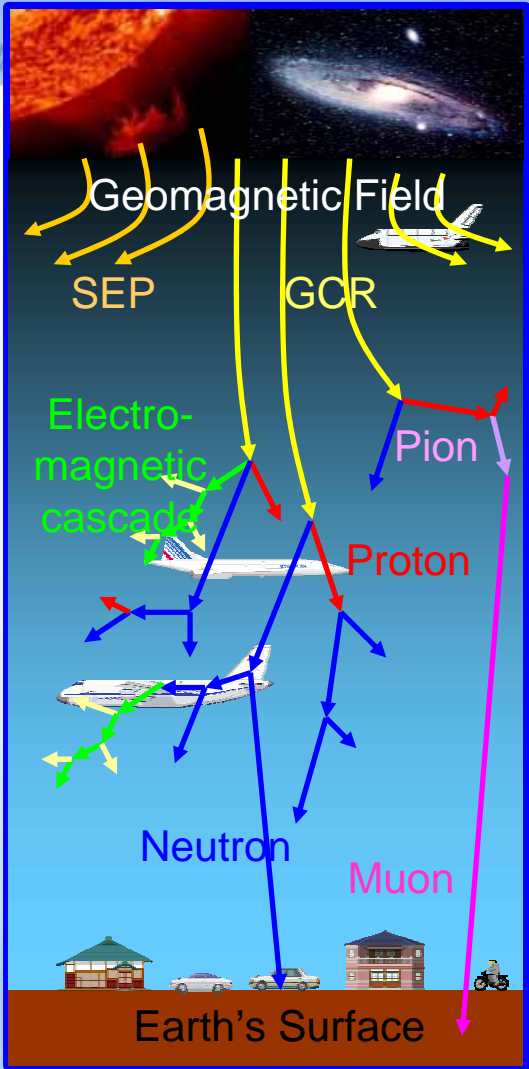
Soft-error of semi-conductor devices

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

大気中の中性子スペクトルに対する
高精度計算方法の確立が切実に要求

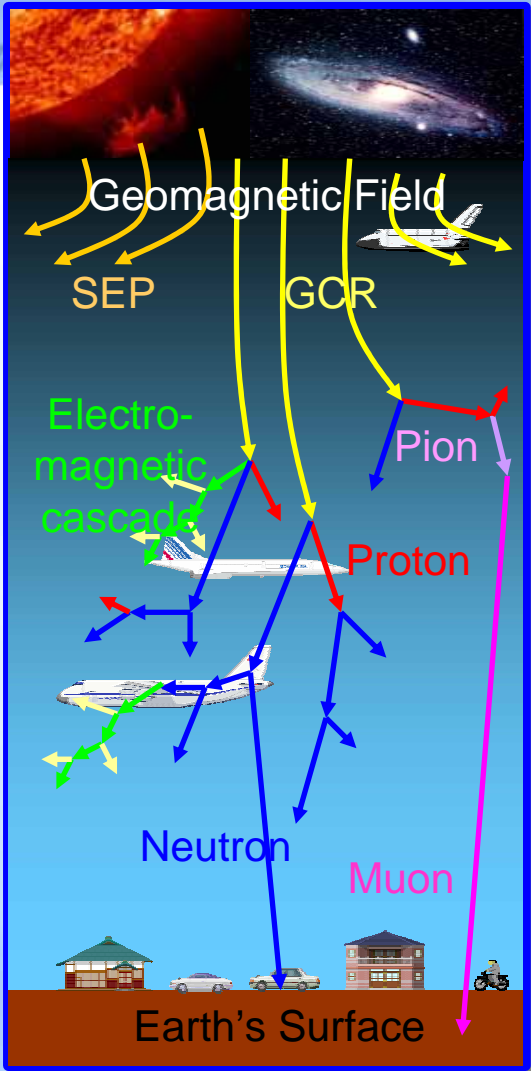
Precise calculation of cosmic-ray
neutron is requested for various purpose



Atmospheric Propagation
of Cosmic-Ray

大気中中性子スペクトル計算の現状

- Former Studies on Estimating Cosmic-ray Neutron Spectra -



Atmospheric Propagation of Cosmic-Ray

大気入射宇宙線スペクトル計算

Calculation of incident cosmic-ray spectra on earth

- 銀河宇宙線基本スペクトル
- 太陽風による減衰効果
- 地磁気による低エネルギー粒子遮断効果

CREME96, NASA model, OMERE

大気中宇宙線輸送計算

Atmospheric propagation simulation of cosmic-ray

- 大気モデル(密度・元素組成)
- 粒子輸送計算コード(1次元or3次元)

FLUKA, LUIN, HZETRN, GEANT, CORSIKA

高度依存性・スペクトル形状を再現不可

核反応モデルの不確かさに起因

PHITSとJENDL高エネルギーファイルを
組み合わせた大気中粒子輸送計算を実施

We developed new simulation model
based on PHITS coupled with JENDL/HE

Table of Contents

- 研究の背景 & 目的

(Background & Purpose)

- 粒子輸送計算コードPHITSの紹介

(Introduction of the PHITS code)

- PHITSとJENDL/HEを組み合わせた大気中宇宙線輸送計算

(Atmospheric propagation simulation by PHITS coupled with JENDL/HE)

- 大気中宇宙線スペクトル解析モデルの確立

(Development of analytical model for estimating atmospheric cosmic-ray spectra)

- まとめ & 今後の予定

(Summary & Future Plan)

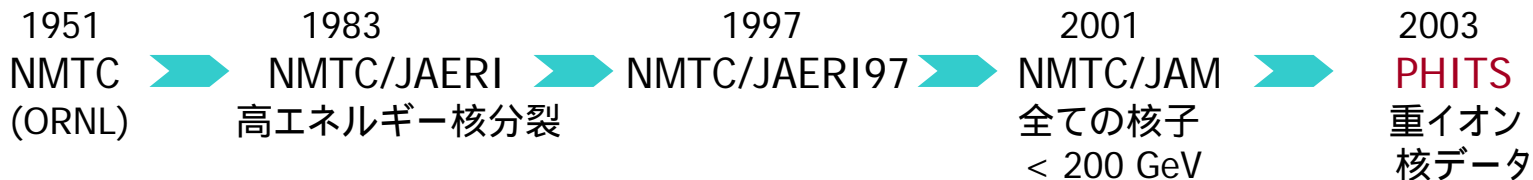
PHITSの概要

- Features of the PHITS Code -

Particle and Heavy Ion Transport code System

開発の歴史

History of PHITS development



扱える物理現象 Physics in PHITS

幅広いエネルギー範囲の全ての粒子に対する輸送及び核反応

$10^{-5}\text{eV} \sim 100\text{GeV/n}$

中性子, 陽子, μ ,
光子, 電子, 重イオン

3次元空間 核データライブラリ
重力, 磁場も考慮 INC, QMD

適用例

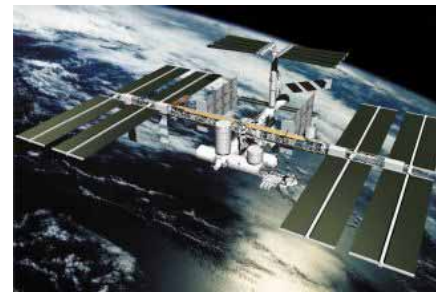
Application fields of PHITS



加速器設計



粒子線治療線量評価



宇宙開発分野

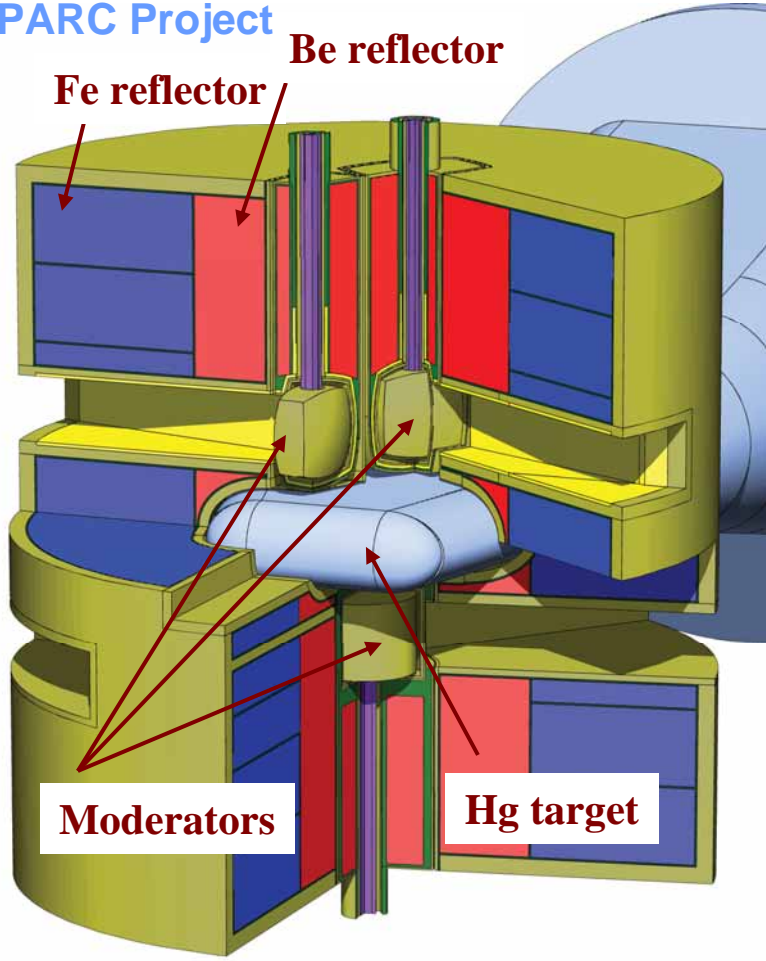
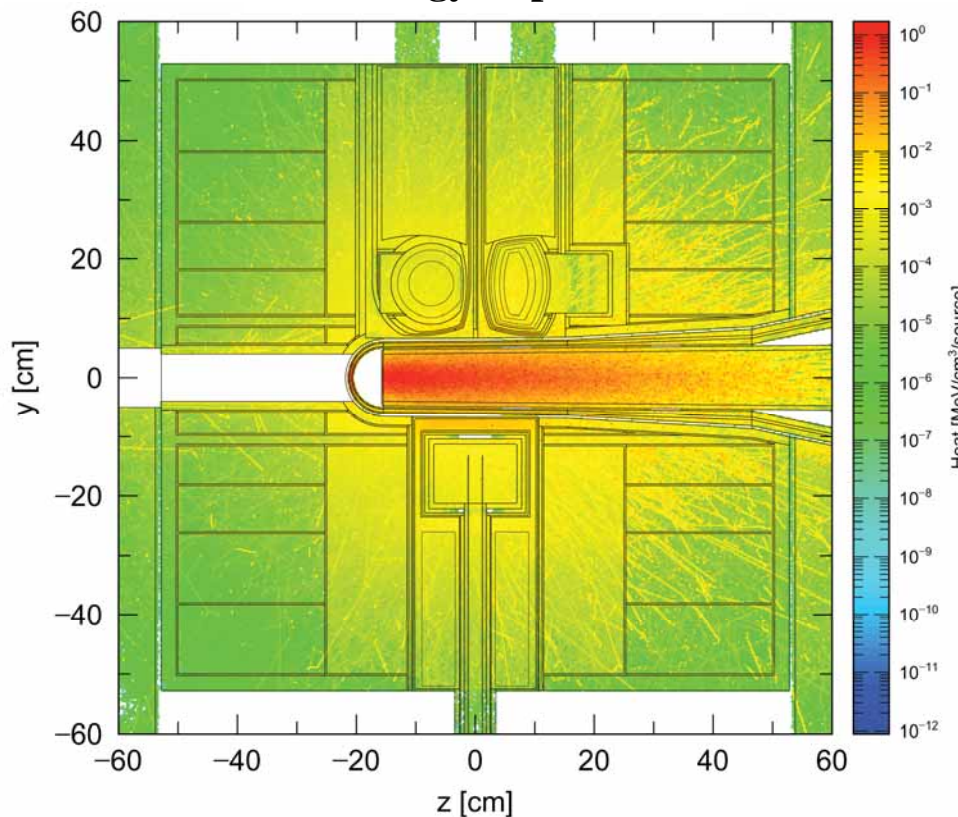
PHITSの使用例

- Example of PHITS Calculation -

J-PARCの遮へい設計

Shielding Calculation of J-PARC Project

Energy Deposition



水銀ターゲット付近の発熱量計算
Heat around the Hg target calculated by PHITS

Table of Contents

- 研究の背景 & 目的

(Background & Purpose)

- 粒子輸送計算コードPHITSの紹介

(Introduction of the PHITS code)

- PHITSとJENDL/HEを組み合わせた大気中宇宙線輸送計算

(Atmospheric propagation simulation by PHITS coupled with JENDL/HE)

- 大気中宇宙線スペクトル解析モデルの確立

(Development of analytical model for estimating atmospheric cosmic-ray spectra)

- まとめ & 今後の予定

(Summary & Future Plan)

シミュレーション方法

- Simulation Procedure -

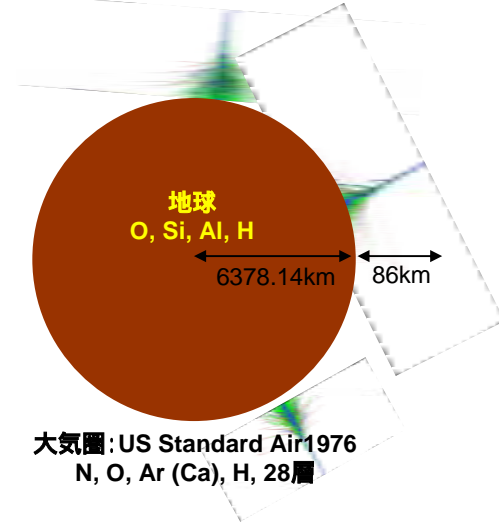


大気入射宇宙線スペクトルモデル

Incident cosmic-ray spectrum model

CREME96

地磁気強度・太陽活動周期の違い
によるスペクトルの変化を考慮



地球 + 大気モデル

Model of the earth & atmosphere

実サイズでモデル化

US-Standard Air 1976

高度による空気密度・温度変化を考慮

インプットファイルとしてPHITSに組み込み大気中の宇宙線挙動をシミュレーション

大気中の中性子スペクトルを計算

核反応モデル

- Nuclear Reaction Model -

JENDL高エネルギーファイル(JENDL/HE)を採用した計算

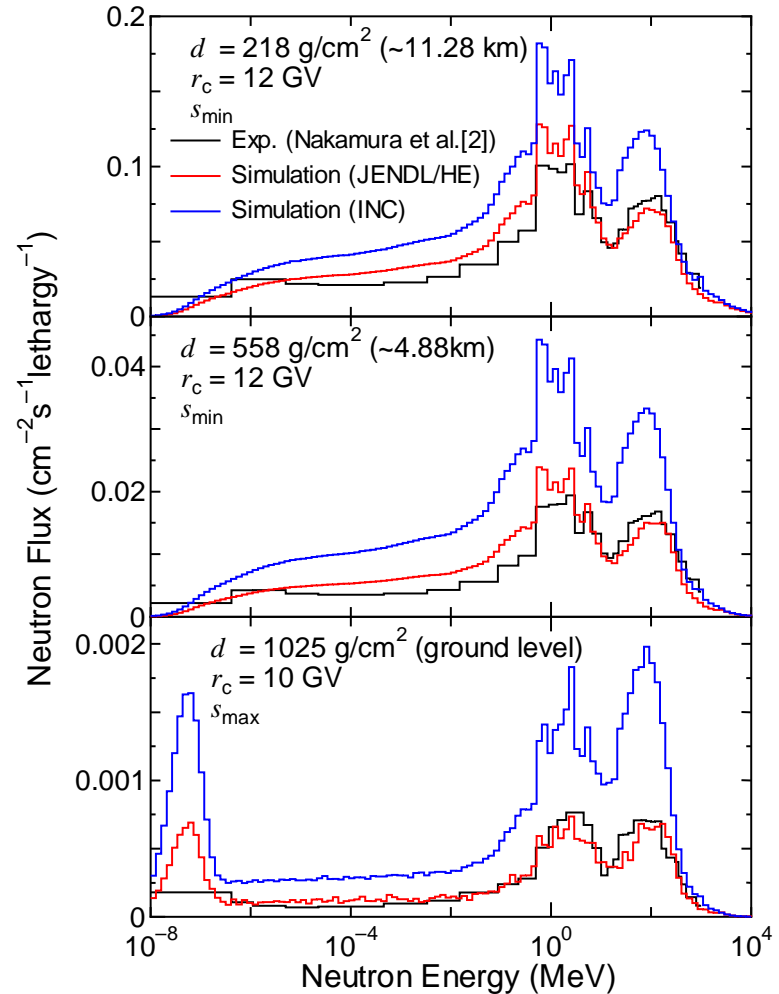
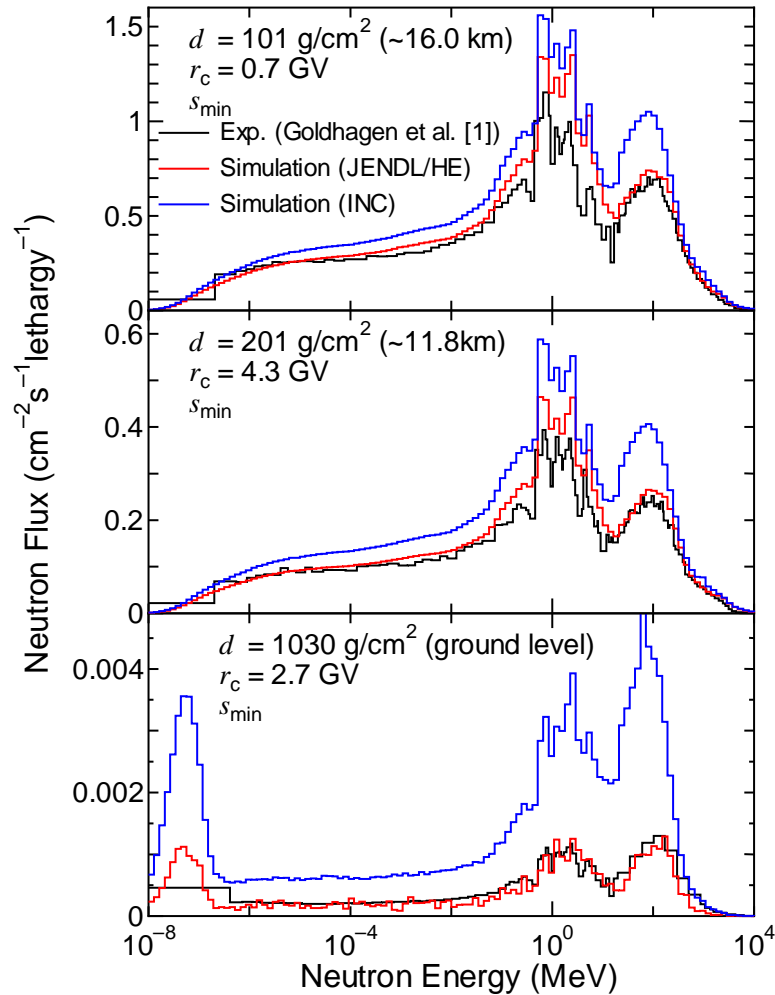
	0.001eV	1MeV	20MeV	1GeV	2.5GeV	3.5GeV	100 GeV
Neutron	JENDL/HE			INC	JAM		
Proton	Killed	JENDL/HE			INC	JAM	
Heavy Ion	Killed	JQMD				JAMQMD	
Pion	Killed						
Muon	Killed						
Photon	Killed						
Electron&Positron	Killed						

核内カスケードモデル(INC)を採用した計算

	0.001eV	1MeV	20MeV	1GeV	2.5GeV	3.5GeV	100 GeV	
Neutron	JENDL3.2		INC			JAM		
Proton	Killed	INC				JAM		
Heavy Ion	Killed	JQMD				JAMQMD		
Pion	Killed	INC			JAM			
Muon	Killed	SPAR						
Photon	Killed	ITS3.0						
Electron&Positron	Killed	ITS3.0			Killed			

計算結果

- Results of the Simulation -

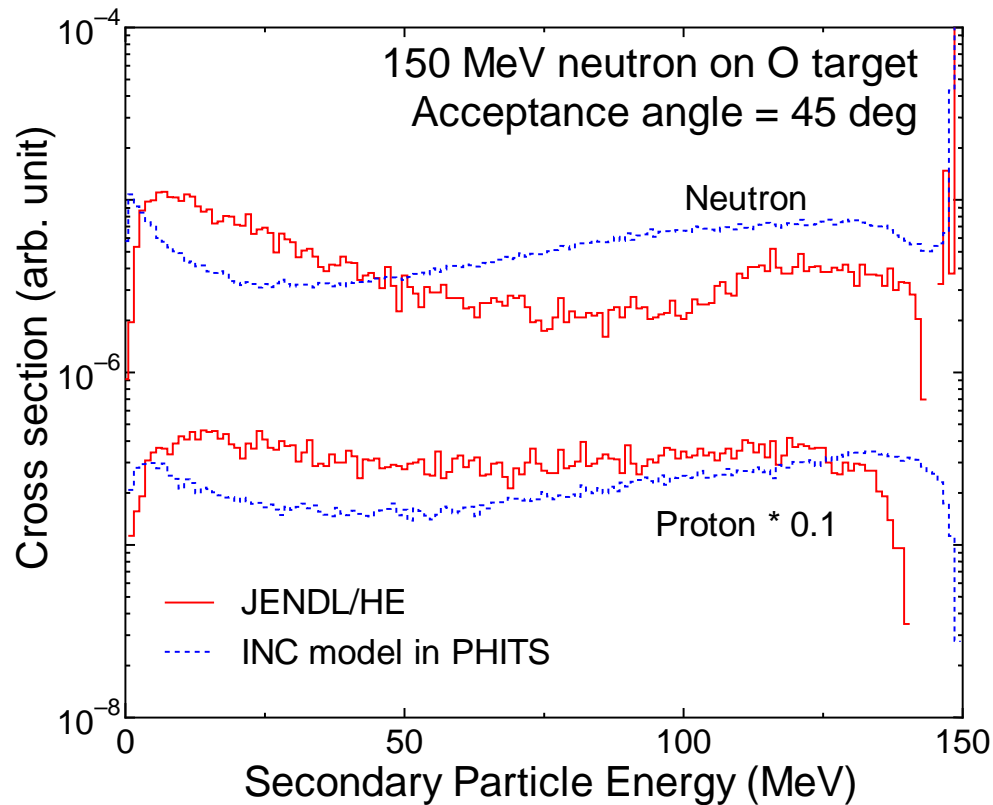


大気中の中性子スペクトル(実験値との比較)

Calculated neutron spectra in the atmosphere in comparison with experimental data

JENDL/HE VS 核内カスケードモデル

- Comparison between JENDL/HE and INC model -



150MeV中性子 + 酸素原子核反応により発生する2次粒子スペクトル

Secondary particle spectra produced by n(150MeV)+O reaction

大気中宇宙線輸送計算における中性子透過率の過大評価

This discrepancy causes the overestimation of the cosmic-ray neutron spectra

大気中宇宙線輸送シミュレーションのまとめ

- Summary of Atmospheric Propagation Simulation of Cosmic-Ray -

大気中中性子スペクトル

Cosmic-Ray Neutron Spectrum

PHITSとJENDL/HEを組み合わせたシミュレーションは、
測定値を極めて精度良く再現 ➡ **世界初の快挙！！**

Simulation employing PHITS coupled with JENDL/HE can
reproduce experimental data ➡ **First in the world !!**

大気中宇宙線輸送計算

Atmospheric cosmic-ray propagation simulation

加速器遮へい設計

Shielding design of accelerator facility

入射粒子: 高エネルギー荷電粒子

遮へい体: 主に軽核で構成される厚い物体 (大気 1000g/cm²)

大気中中性子スペクトル測定実験は、最良の遮へい実験の一種



JENDL/HEを用いれば、従来よりも適切な加速器の遮へい設計が可能になる？

JENDL/HE can also play an important role in the high-energy accelerator shielding design

Table of Contents

- 研究の背景 & 目的

(Background & Purpose)

- 粒子輸送計算コードPHITSの紹介

(Introduction of the PHITS code)

- PHITSとJENDL/HEを組み合わせた大気中宇宙線輸送計算

(Atmospheric propagation simulation by PHITS coupled with JENDL/HE)

- 大気中宇宙線スペクトル解析モデルの確立

(Development of analytical model for estimating atmospheric cosmic-ray spectra)

- まとめ & 今後の予定

(Summary & Future Plan)

解析モデルの開発

- Development of the Analytical Model -

パラメータ

Cosmic-ray neutron spectra depend on ...

- **高度(Altitude)**: 高いほど大きい* (10000mで約100倍程度)
- **地磁気緯度(Cut-off rigidity)**: 高い(磁極に近い)ほど大きい(約3倍程度変動)
- **太陽活動(SMP)**: 活動が激しいと小さい(約30%程度変動)
- **周辺環境(Local geometry)**: 水分が多いと小さい(約50%程度変動)

簡易計算式

Analytical function to reproduce MC results

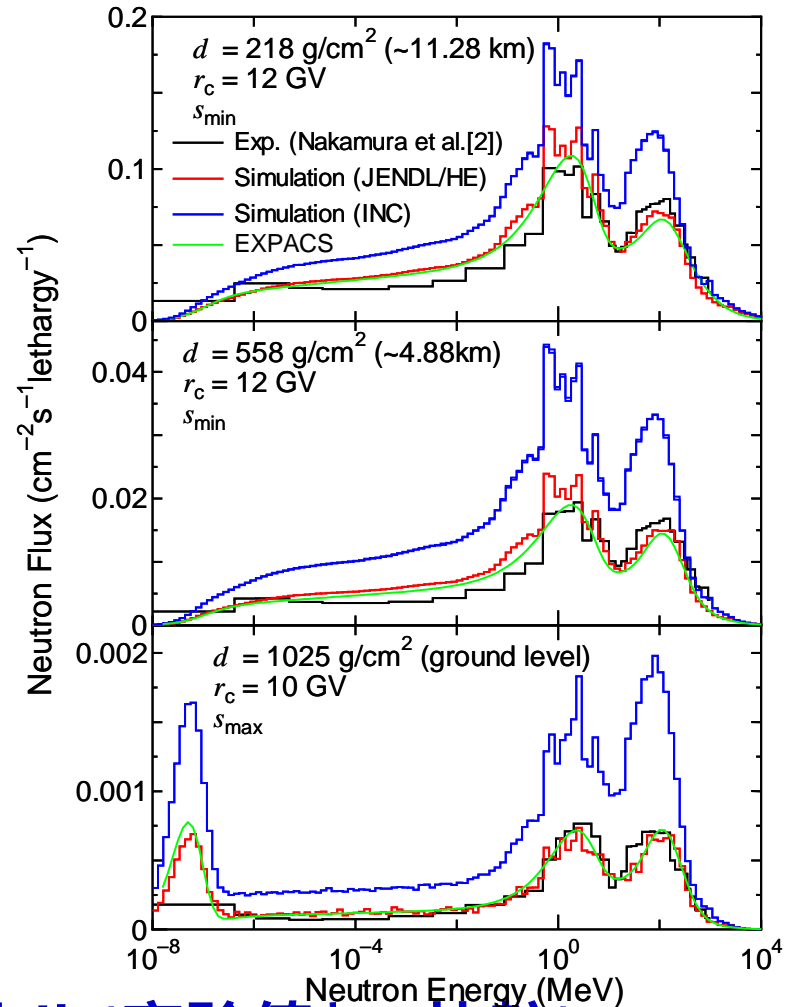
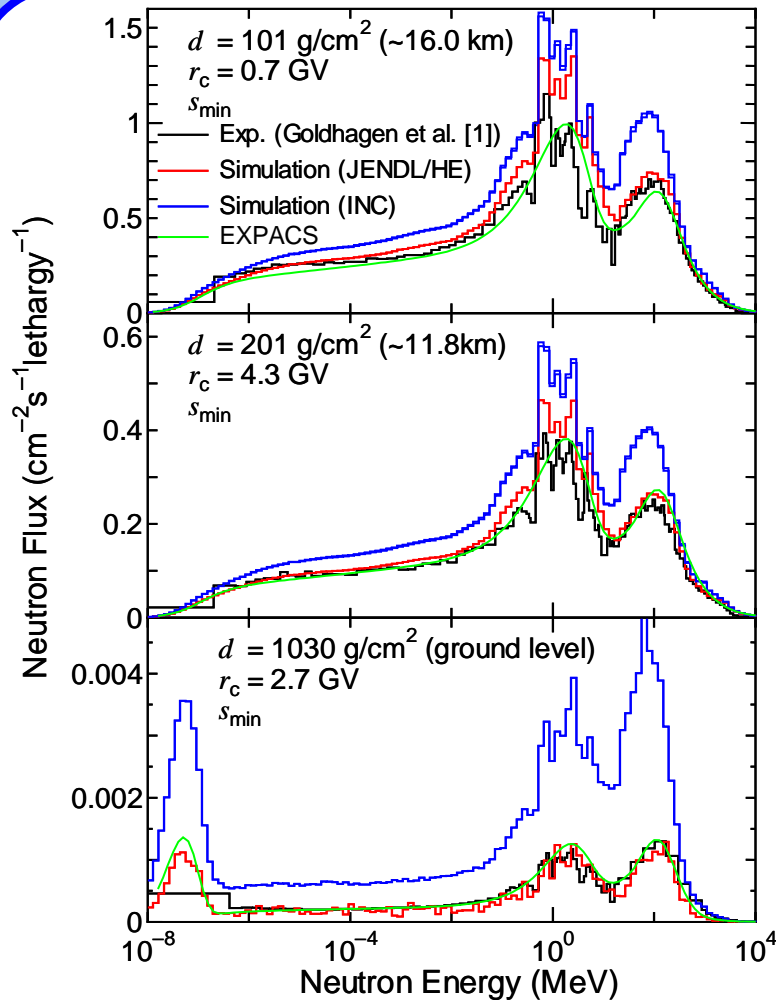
$$\bar{\phi}_B(E) = c_1 \left(\frac{E}{c_2} \right)^{c_3} \exp\left(\frac{-E}{c_2} \right) + c_4 \exp\left\{ \frac{-[\log_{10}(E) - \log_{10}(c_5)]^2}{2[\log_{10}(c_6)]^2} \right\} + c_7 \log_{10}\left(\frac{E}{c_8} \right) \left\{ 1 + \tanh\left[c_9 \log_{10}\left(\frac{E}{c_{10}} \right) \right] \right\} \left\{ 1 - \tanh\left[c_{11} \log_{10}\left(\frac{E}{c_{12}} \right) \right] \right\}$$
$$c_4(r_c, d) = a_5(r_c) + \frac{a_6 d}{1 + a_7 \exp(a_8 d)}$$
$$\log_{10}[f_G(E, w)] = g_1 + g_2 \log_{10}\left[\frac{E}{g_3(w)} \right] \left\{ 1 - \tanh\left\{ g_4 \log_{10}\left[\frac{E}{g_5(w)} \right] \right\} \right\}$$
$$a_i(s, r_c) = b_{i1}(s) + \frac{b_{i2}(s)}{1 + \exp[(r_c - b_{i3})/b_{i4}]}$$

大気中の任意地点*における中性子スペクトルの導出に成功!

Succeeded in estimating cosmic-ray neutron spectra at anywhere in the world!

解析モデルによる結果

- Results of the Analytical Model -



大気中の中性子スペクトル(実験値との比較)

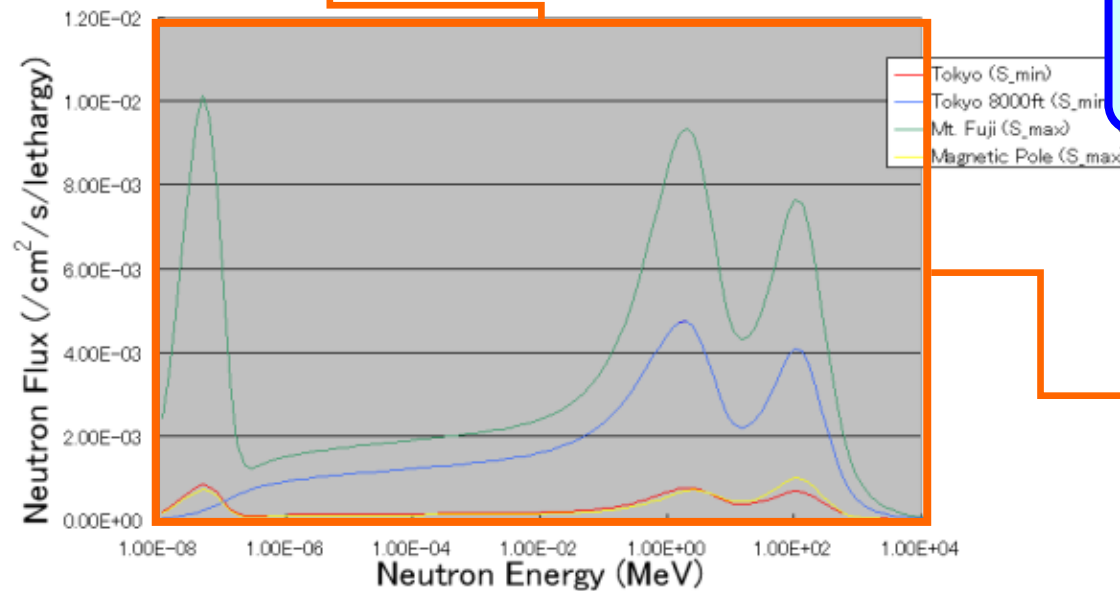
Calculated neutron spectra in the atmosphere in comparison with experimental data

EXPACSの開発

- Development of EXPACS -

EXcel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum

Title	Tokyo (S_min)	Tokyo 8000ft (S_min)	Mt. Fuji (S_max)	Magnetic Pole (S_max)
Configuration	Ground	Pilot-Location	Ground	Ground
Altitude	0 (km)	8000 (ft)	3,777 (km)	1034 (g/cm ²)
Cut-off Rigidity	12 (GV)	12 (GV)	1 (GV)	0 (GV)
Solar Modulation Potential	465 (MV)	465 (MV)	1700 (MV)	1700 (MV)
Local Effect Parameter	0.15 Water Frac.	1 Mass(100ton)	0 Water Frac.	1 Water Frac.
H*(10)	5.81 E-03 (uSv/h)	3.70E-02 (uSv/h)	7.13E-02 (uSv/h)	6.23E-03 (uSv/h)
Effective Dose	4.41 E-03 (uSv/h)	2.81 E-02 (uSv/h)	5.51 E-02 (uSv/h)	5.26E-03 (uSv/h)
User Response	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00



EXPACSサンプル画面

入力情報

Input Information

- 高度 (km, ft, g/cm²)
- 地磁気強度: COR (GV)
- 太陽活動: SMP (MV)
- 周辺環境: 航空機の大きさ
地面の水分含有量

出力情報

Output Information

- 中性子スペクトル
- H*(10) (uSv/h)
- 実効線量 (uSv/h)
- ユーザー指定応答
ソフトウェア発生率BGR
検出器応答関数 etc.

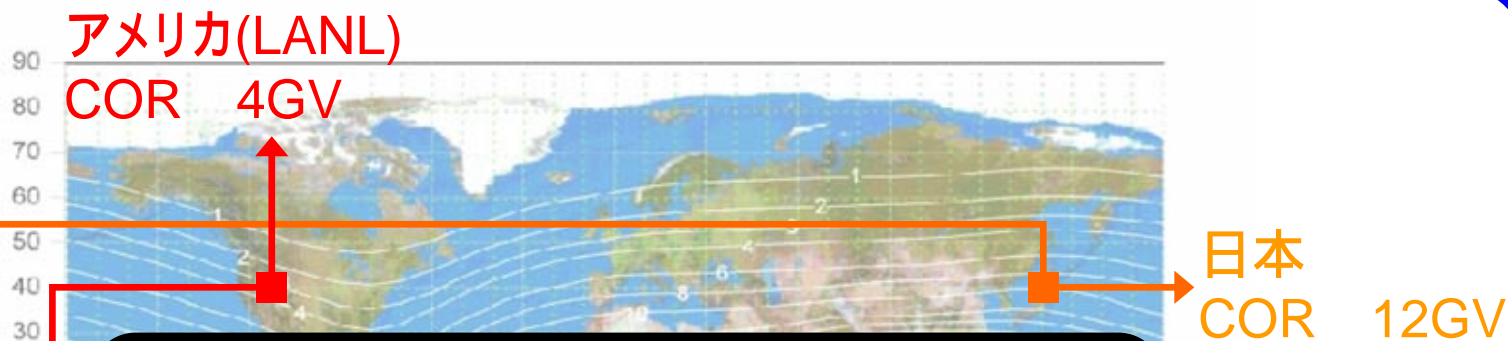
Web上で一般公開

Open for public via its web site



EXPACSの中性子線量率予測精度に関する検証

- Benchmark Calculation of EXPACS in terms of Neutron Dose -



Neutron Dose Rates in Various Locations

Location (Altitude)	Detector	Exp. (uSv/h)	Cal.(uSv/h)
Los Alamos (2200m)	DARWIN	0.058	0.052
Tokai-mura (10m)	DARWIN	0.0077	0.0065
*Mt. Fuji (40m)	Bonner Ball	0.0064	0.0055
*Mt. Fuji (2600m)	Bonner Ball	0.034	0.034
Air@Nagoya(20500ft)	Rem-Counter	0.24**	0.23
Air@Nagoya(28500ft)	Rem-Counter	0.45**	0.48

*Kowatari et al.

世界各地のCut-off Rigidity (地磁気の強さ)

**高エネルギー寄与
補正済み

地球上任意地点における中性子線量を精度約10%の範囲内で予測可能!

Table of Contents

- 研究の背景 & 目的

(Background & Purpose)

- 粒子輸送計算コードPHITSの紹介

(Introduction of the PHITS code)

- PHITSとJENDL/HEを組み合わせた大気中宇宙線輸送計算

(Atmospheric propagation simulation by PHITS coupled with JENDL/HE)

- 大気中宇宙線スペクトル解析モデルの確立

(Development of analytical model for estimating atmospheric cosmic-ray spectra)

- まとめ & 今後の予定

(Summary & Future Plan)

まとめ

- Summary -

大気中宇宙線輸送計算

Atmospheric Propagation Simulation of Cosmic-Rays

PHITSとJENDL/HEを組み合わせたシミュレーションは、
大気中の中性子スペクトルに対する測定値を**極めて精度良く再現**

Simulation employing PHITS coupled with JENDL/HE can
reproduce experimental data for cosmic-ray neutron spectra

大気中中性子スペクトル予測モデル

Analytical Model for Estimating Cosmic-Ray Neutron Spectra

シミュレーション結果を解析し、従来の方法よりも
簡便で精度良く予測可能なモデルを確立

Develop an analytical model that can predict neutron
spectra precisely in comparison with former models

EXPACSを開発

地球上任意地点における中性子線量を精度約10%以内で予測可能

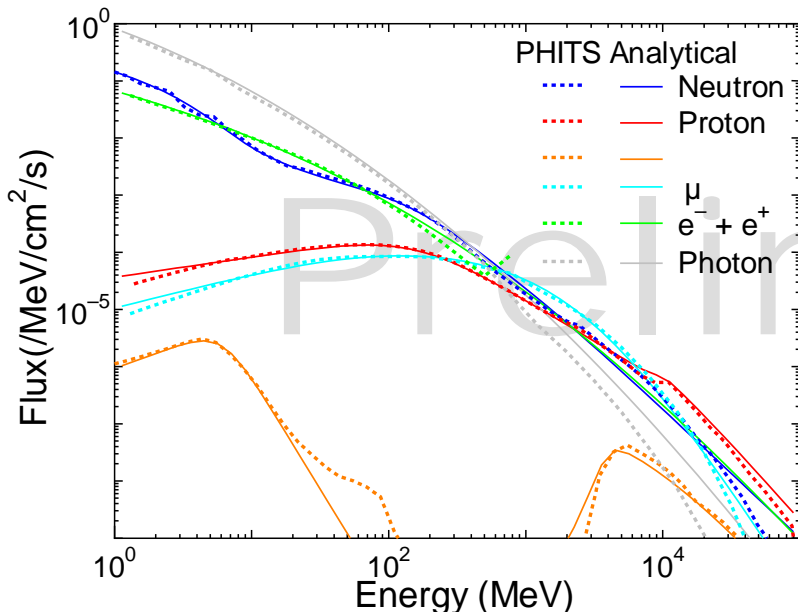
Develop EXPACS, which can estimate cosmic-ray neutron
dose at anywhere in the world within 10% accuracy

今後の予定 (其の一)

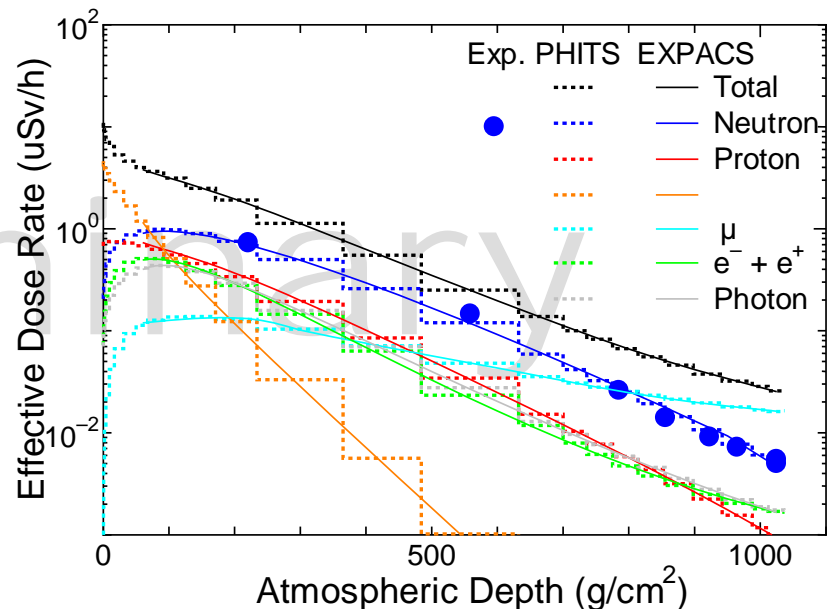
- Future Plans (I) -

中性子以外の粒子に対する大気中スペクトル計算

Atmospheric Propagation Simulation of Cosmic-Rays



高度12kmにおけるスペクトル@東京
Spectra at 12km altitude @ Tokyo



線量率高度変化@東京
Altitude dependence of doses @ Tokyo

JENDL/HEを用いた計算では, μ , e^\pm , の計算不可

生成チャンネルのJENDL/HEへの組込が強く期待

Incorporation of pion-production channel is strongly requested

今後の予定 (其の二)

- Future Plans (II) -

航路線量計算プログラムの開発

Development of Route-Dose Calculation Code



JISCARD (Webベース, 放医研)

線量計算モデル: CARI-6 (米国)

開発した解析モデル

結果を航空会社に提供

被ばく線量の自主規制 (5mSv/年) に役立つ

used in voluntary action for managing aircrew dose

他の惑星へ適用

Application to other planets

- 有人火星飛行時の放射線影響評価
- 惑星表面の放射線環境 ◆◆◆ 惑星表面の元素構成

惑星科学分野に応用

Apply the simulation technique to planet science

