

# PHITSの概要とその応用

佐藤達彦<sup>1,2</sup>, 甲斐健師<sup>1</sup>, 松谷悠佑<sup>1</sup>

1. 原子力機構, 2. 大阪大学

## 発表内容

- ✓ PHITSの概要
- ✓ 飛跡構造解析モード
- ✓ 医学物理分野への応用例
- ✓ その他の応用例
- ✓ まとめ

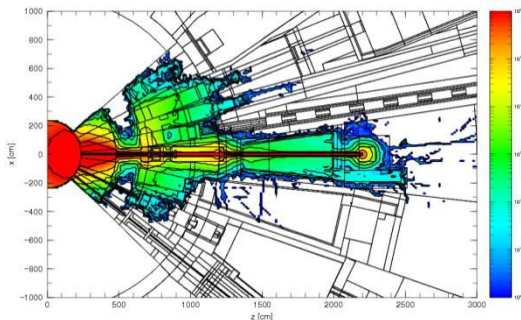
# PHITSの概要

Particle and Heavy Ion Transport code System

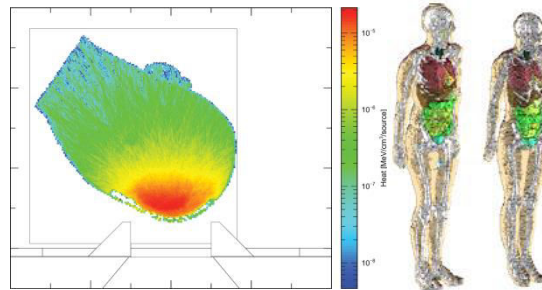
## PHITSとは？

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

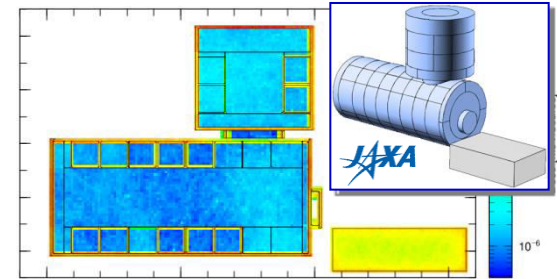
## 適用例



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（全国各地で10回以上開催，無料）
- 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）
- PHITSホームページから利用申請書を提出する（国外ユーザー，無料）

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

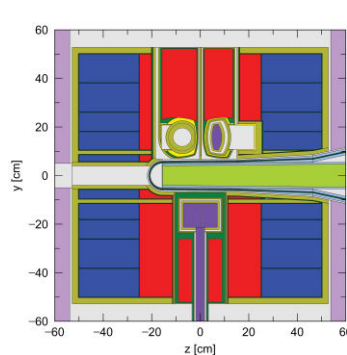
# PHITSの特徴

- 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

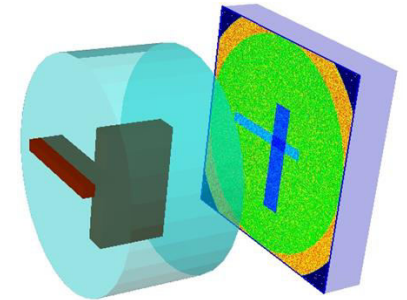
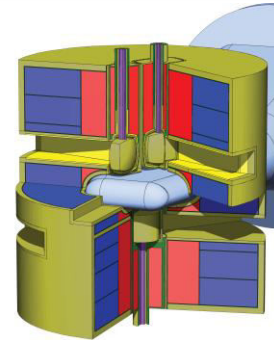
ユーザーがFortranプログラムを書く必要はない！

## ➤ 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, SuperMC)



ANGELで描画した2D&3Dジオメトリ



SimpleGEO

## ➤ 計算できる物理量

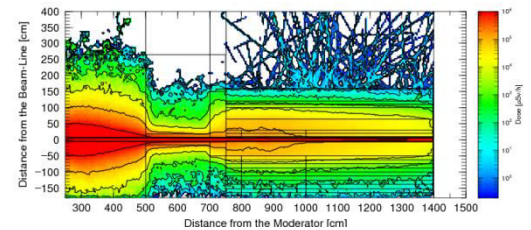
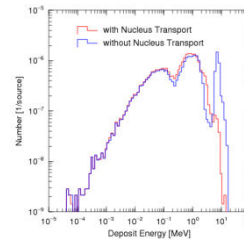
粒子フルエンス, 発熱量, 核反応生成粒子, 電離密度分布 など

## ➤ 出力データ形式

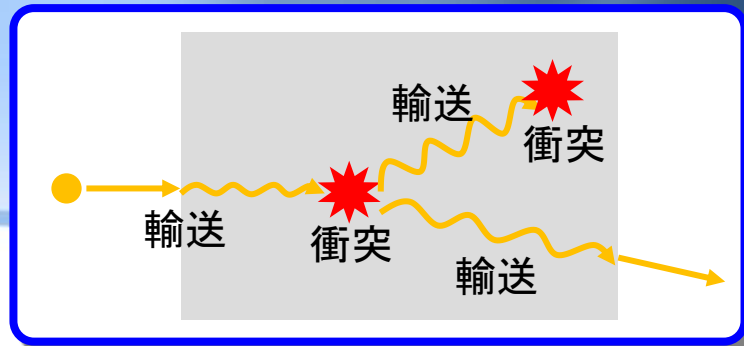
テキストデータ, ヒストグラム, 等高線図

## ➤ プラットフォーム

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



# PHITSで扱う物理現象



## 輸送過程

衝突と衝突の間の移動

外部場及び光学デバイスによる偏向

- 電磁場
- 重力
- スーパーミラー (反射)
- T0 チョッパー

電離過程によるエネルギー損失

- 阻止能: SPARもしくはATIMAコード  
連続エネルギー損失仮定 (CSDA)
- $\delta$ 線 (ノックアウト電子) 生成
- マイクロドジメトリ機能 (独自機能)
- 飛跡構造解析モード

## 衝突過程

原子・原子核との衝突

低エネルギー中性子  
光子・電子・陽電子

- 核データ (JENDL-4.0 etc.)  
+ イベントジェネレータモード  
(独自機能)

高エネルギー核子

- 核内カスケード模型 (INC)

原子核

- 量子分子動力学模型 (QMD)

# PHITSに組み込まれた物理モデル（奨励設定）

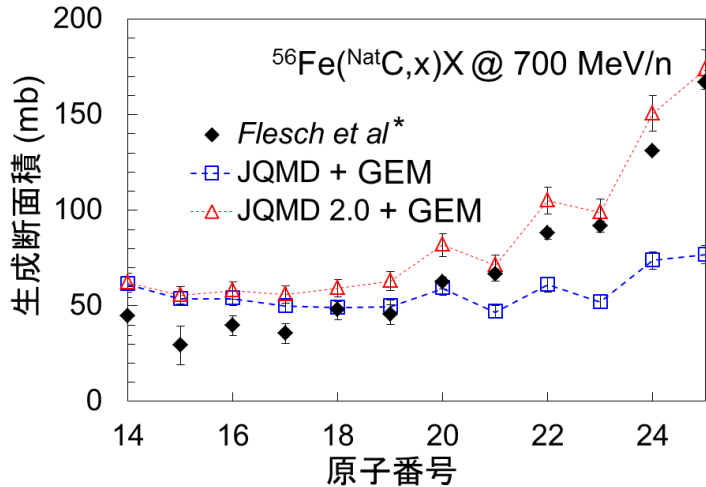
	中性子	陽子・π粒子 (その他の核子)	重イオン	μ粒子	電子・ 陽電子	光子
	1 TeV		1 TeV/u	1 TeV		1 TeV
高 ↑ エネルギー ↓ 低	核内カスケード模型 JAM 3.0 GeV + 蒸発模型 GEM		JAMQMD + GEM	仮想光子 核反応 JAM/ JQMD + GEM	EGS5	EPDL97 or EGS5
	核内カスケード模型 INCL4.6 + 蒸発模型 GEM	d t <sup>3</sup> He α	量子分子 動力学模型 JQMD + GEM	200 MeV		
	核データ ライブラリ JENDL-4.0	1 MeV	電離損失 ATIMA	ATIMA + オリジナル	1 keV	1 keV
	0.01 meV	→ 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		ミューオン 原子生成+ 捕獲反応	*飛跡構造 解析 1 meV	*水中のみ対応

## 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

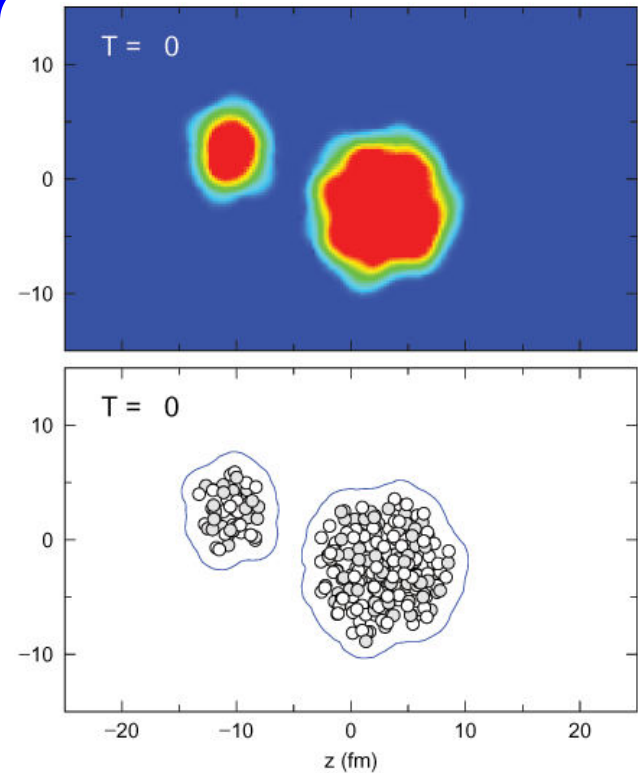
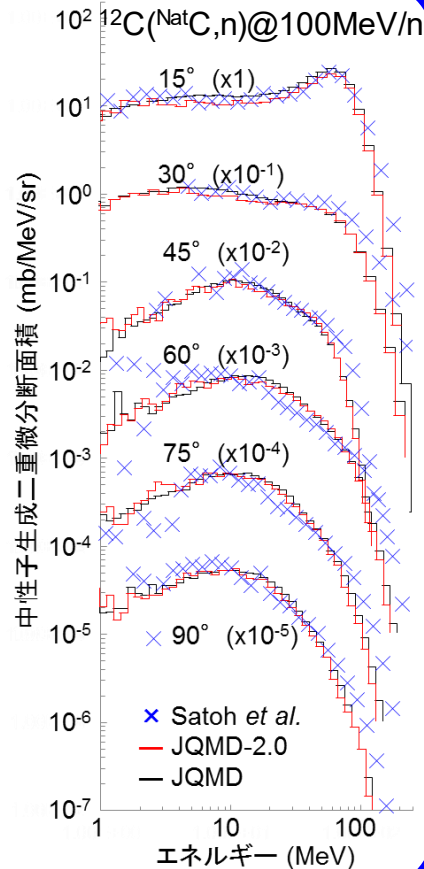
モデル及びその適用エネルギー範囲は入力ファイルにて変更可能

# 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
- 原子核-原子核衝突(重イオン入射)反応用のモデル



- 残留核生成と二次粒子生成を計算できる
- PHITS Ver.2.76 から高精度なJQMD-2.0が利用可能



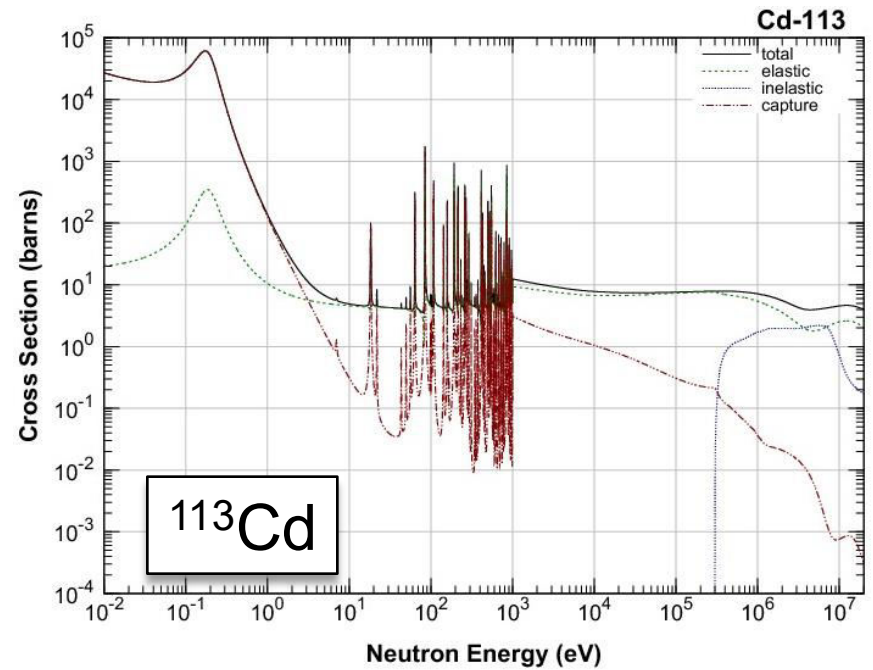
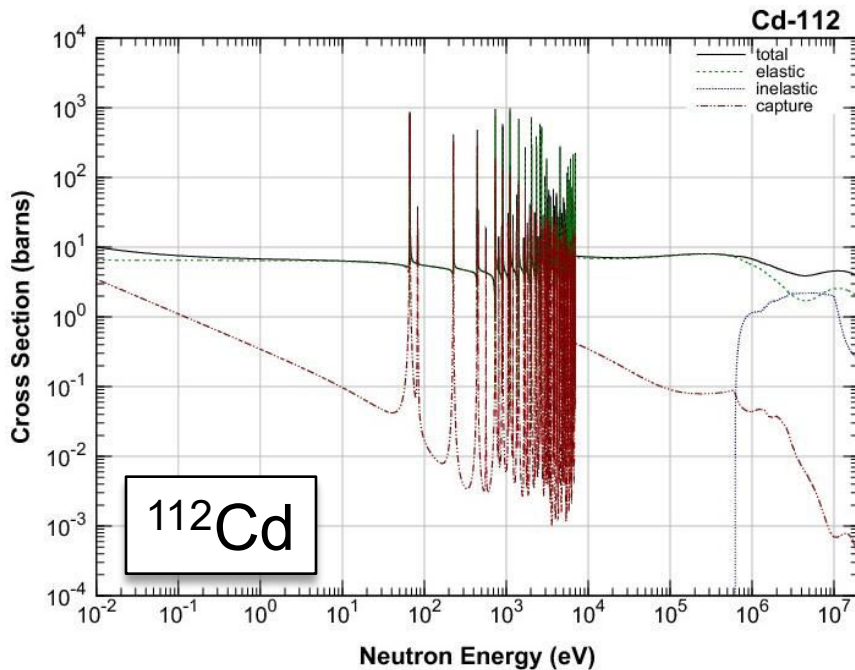
$^{56}\text{Fe} 800 \text{ MeV/u}$  on  $^{208}\text{Pb}$

# 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

# ベンチマーク

## 様々な基礎データ・応用例に対するベンチマーク論文 (Open Access)

JOURNAL OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2017  
VOL. 54, NO. 5, 617-635  
<https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1297742>



Taylor & Francis  
Taylor & Francis Group

TECHNICAL MATERIAL

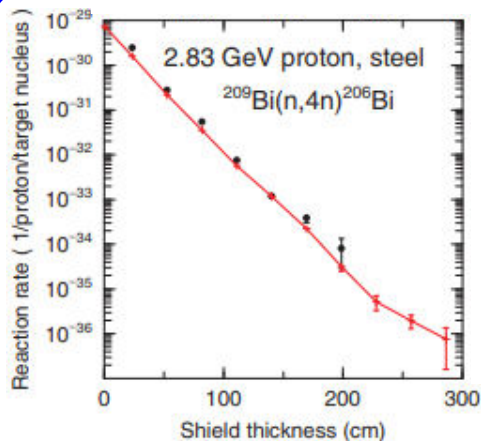
OPEN ACCESS

Check for updates

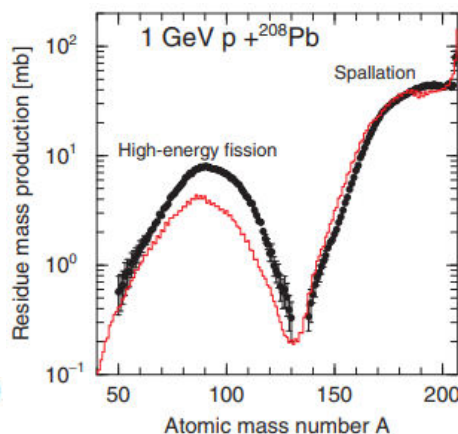
### Benchmark study of the recent version of the PHITS code

Yosuke Iwamoto<sup>a</sup>, Tatsuhiko Sato<sup>a</sup>, Shintaro Hashimoto<sup>a</sup>, Tatsuhiko Ogawa<sup>a</sup>, Takuya Furuta<sup>a</sup>, Shin-ichiro Abe<sup>a</sup>, Takeshi Kai<sup>a</sup>, Norihiro Matsuda<sup>a</sup>, Ryuji Hosoyamada<sup>b</sup> and Koji Niita<sup>b</sup>

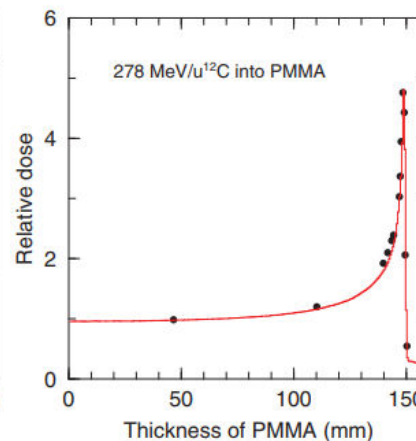
<sup>a</sup>Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki, Japan; <sup>b</sup>Research Organization for Information Science and Technology, Ibaraki, Japan



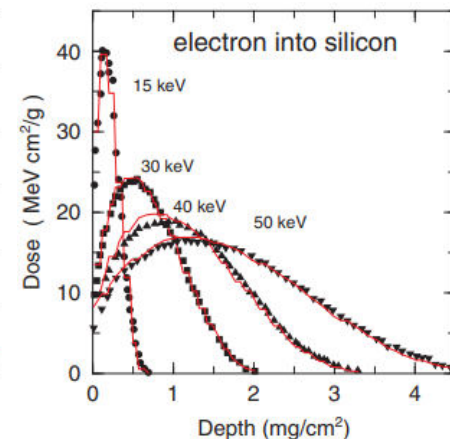
遮蔽計算



核分裂収率



粒子線治療



電子飛程

- ✓ インputファイル (PHITSパッケージ内) /phits/sample/benchmark
- ✓ 論文 <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00223131.2017.1297742>



# 小まとめ

- ◆ 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
- ◆ 洗練された核反応モデルとデータライブラリ  
(INCL4.6, INC-ELF, JQMD, JAM, JENDL-4, EGS5 etc.)
- ◆ 様々な用途に応用可能な多様な計算機能  
(マイクロジメトリ機能, 飛跡構造解析モード, 磁場マップ読込機能)

教育版PHITSも公開中(大学の講義で利用可能)

## 発表内容

- ✓ PHITSの概要
- ✓ 飛跡構造解析モード
- ✓ 医学物理分野への応用例
- ✓ その他の応用例
- ✓ まとめ

# 飛跡構造解析モードの概要

## 飛跡構造解析モードとは？

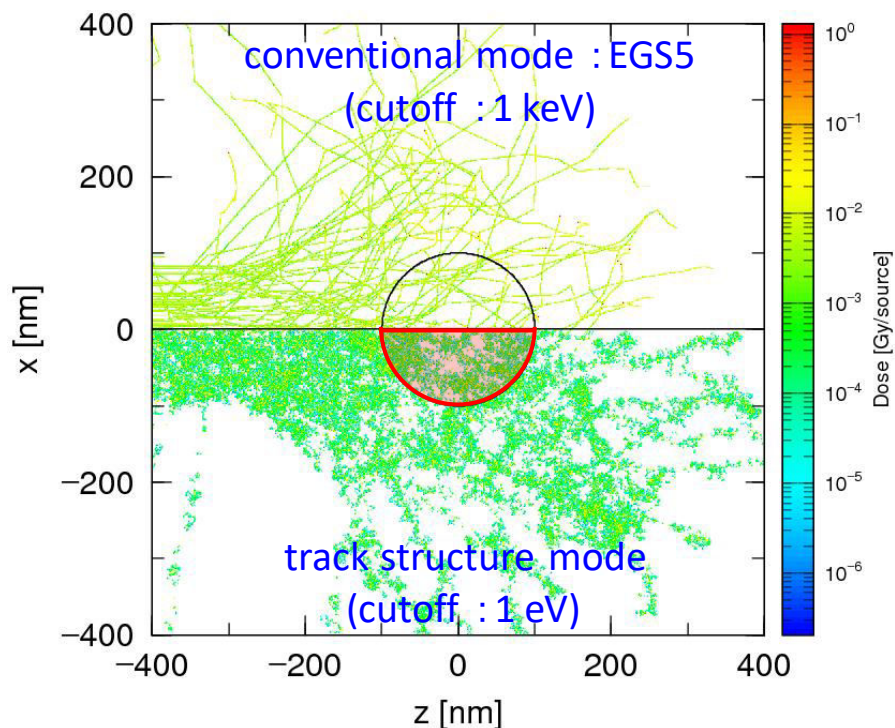
- ✓ 個々の電離・励起イベントを全てモンテカルロ的に再現する計算モード  
→ 対義語は連続エネルギー損失近似（CSDA）
- ✓ より詳細な空間スケール（nmオーダー）での放射線挙動解析が可能  
→ CSDAを使った場合は1 $\mu$ m程度が限界
- ✓ 計算時間が膨大になるので、大きな領域の計算には不向き

## 飛跡構造解析モードで得られる物理量

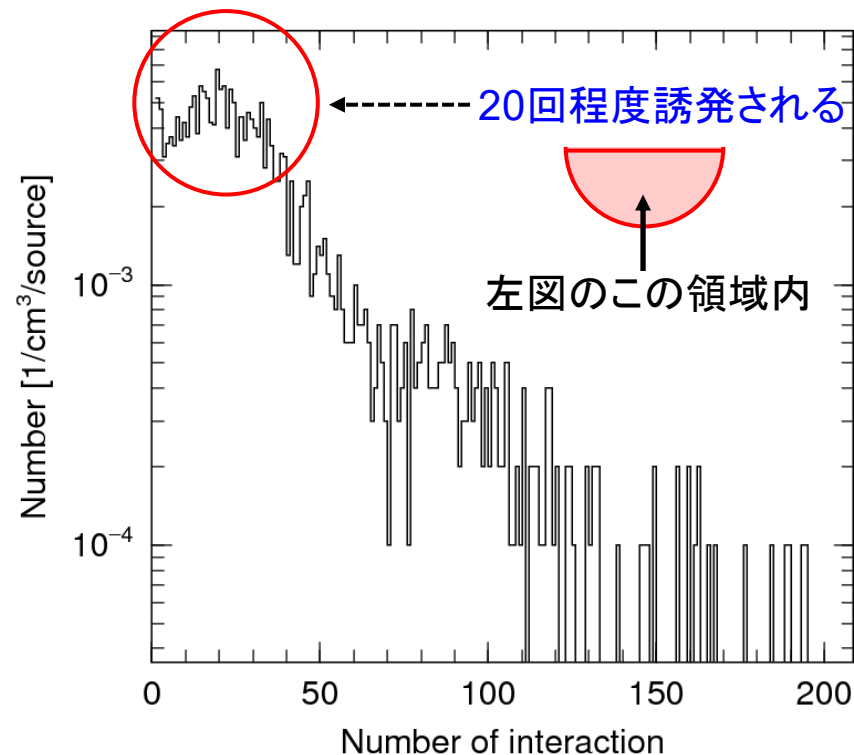
- ✓ DNAスケール（nm空間分解能）での吸収線量分布
- ✓ 微小領域内でのイベント（電離・励起・振動・解離性電子付着など）の発生頻度
- ✓ ラジカル（OH $\cdot$ , H<sub>2</sub>O $\cdot^*$ など）生成率（将来計画）
- ✓ DNAダメージ（SSB, DSB, 複雑損傷など）の生成率（将来計画）

水中での電子の飛跡構造解析モードをPHITS version 3.02より正式実装

# 電子飛跡構造解析（サンプル計算結果）



従来手法（上）と飛跡構造解析  
モード（下）で計算した電子飛跡



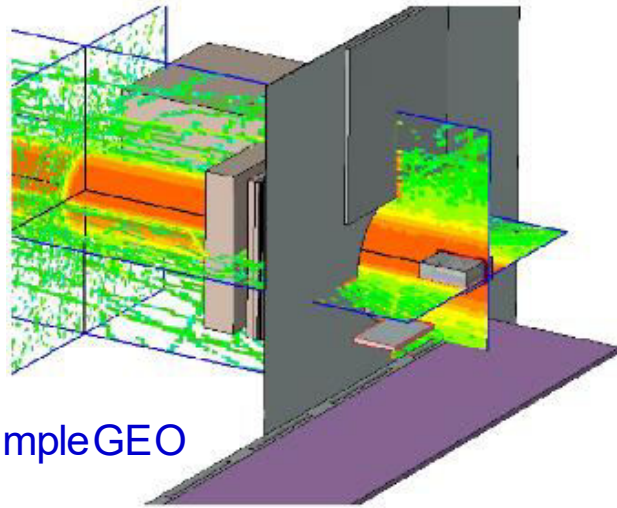
半径100nmのターゲット内で発生した  
電離と励起イベント数（1電子あたり）

電離・励起イベントの多重度（電離密度）は、DNAダメージや  
細胞致死を決定する最も基本的な物理情報

## 発表内容

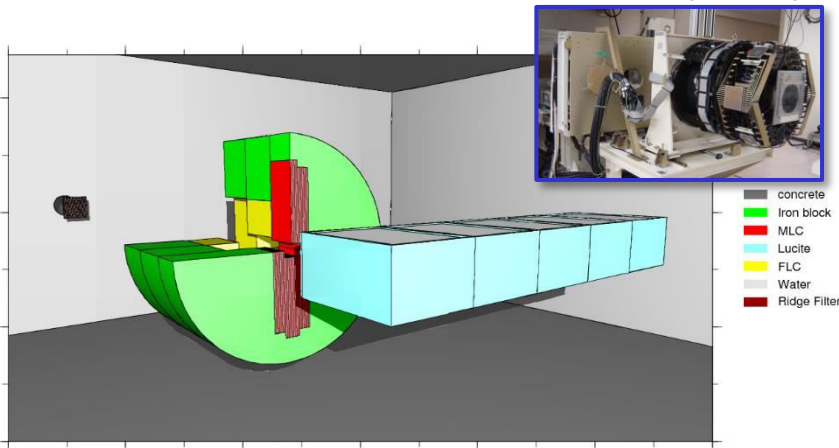
- ✓ PHITSの概要
- ✓ 飛跡構造解析モード
- ✓ 医学物理分野への応用例
- ✓ その他の応用例
- ✓ まとめ

# 粒子線治療への応用



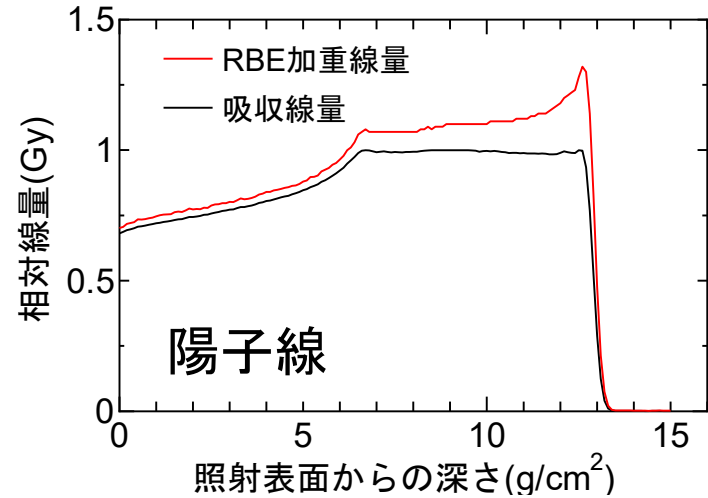
drawn by  
PHITS+SimpleGEO

O. Ploc et al. IEEE Aerospace Conf. (2017)

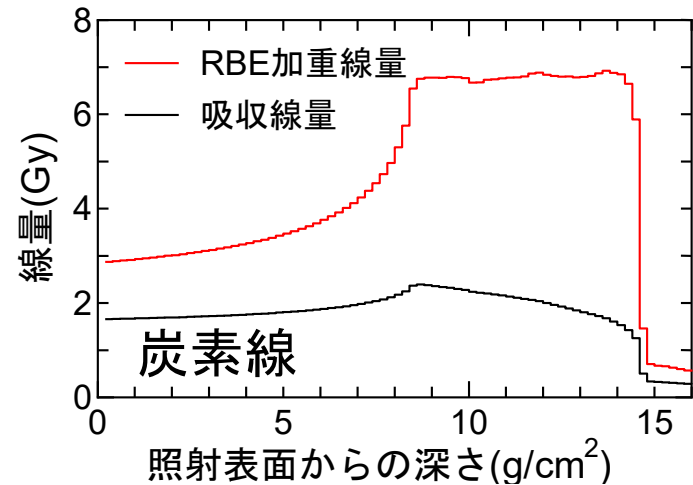


S. Yonai et al. Med Phys. 39, 4782-92 (2012)

粒子線治療場の2次散乱線評価



K. Takada et al. JRR 59, 91-99 (2018)



T. Sato et al. Radiat. Res. 171, 107-117 (2009)

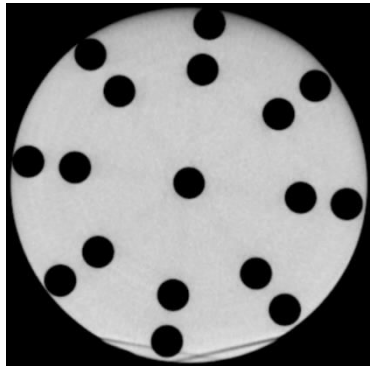
吸収線量・RBE加重線量の評価

# 医学物理計算用の補助プログラム

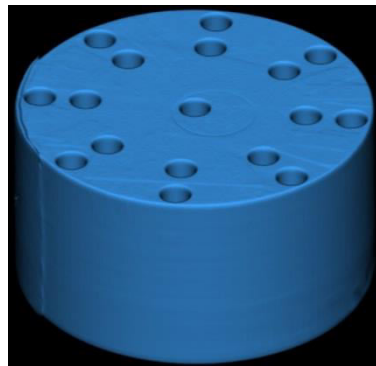
## DICOM2PHITS

DICOM形式のイメージデータをPHITS入力形式に変換するプログラム

医療画像DICOM形式のデータ



1ファイル=1スライスデータ

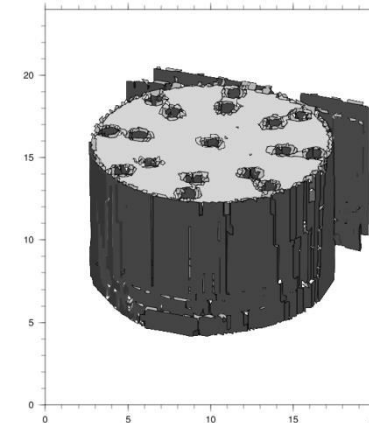


フォルダ全体のデータを3D表示

変換

入力情報

PHITS形式のボクセルデータ

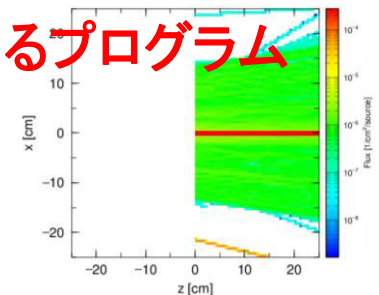


ボクセルの分解能と範囲・位置・方向, CT値から組織への変換テーブル

## PSFC4PHITS

加速器線源情報Phase-Space FileをPHITS入力形式に変換するプログラム

- ✓ 加速器部分(上流)のシミュレーションを省略し、ビーム照射部分(下流)のみのシミュレーションが可能
- ✓ IAEAのNuclear Data Services\*から入手可能

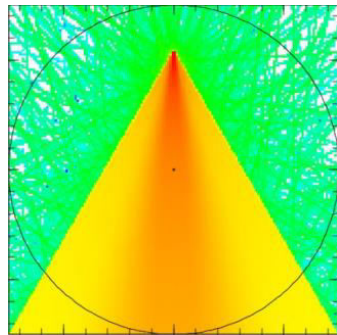
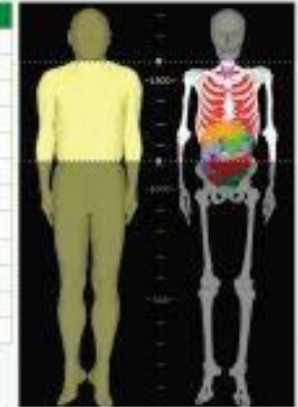


\*URL <https://www-nds.iaea.org/phsp/phsp.htmlx>

# CT撮影時の線量評価システム：WAZA-ARI

## WAZA-ARIとは？

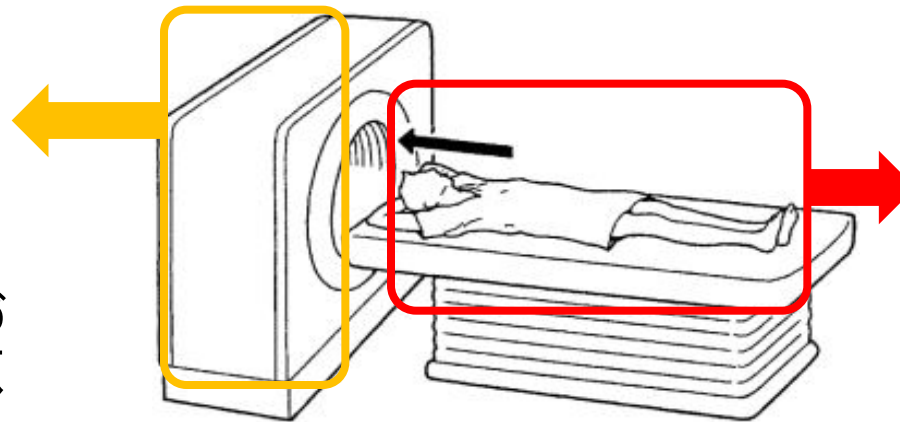
- CT撮影時の患者の線量を評価するWebベースのシステム
- PHITSと日本人ボクセルファントムを組み合わせて計算したCT機種毎の被ばく線量データベースを格納



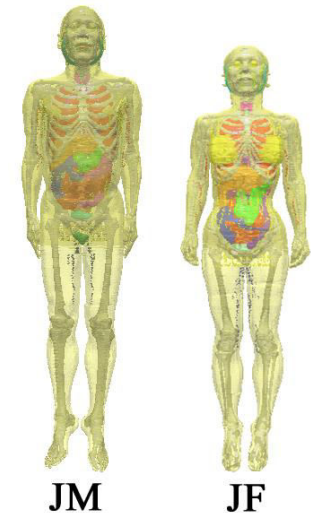
実験的検証に基づいて機種毎の線源強度を決定

線源モデル

## PHITSによるCT線量計算



CT検査



JM JF  
人体モデル

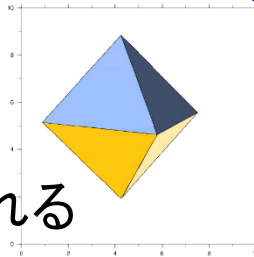


# 連続四面体ファントム

## ✓ 連続四面体形状とは？

3次元ポリゴン的一种

全ての要素が四面体で構成される



## ✓ 用途は？

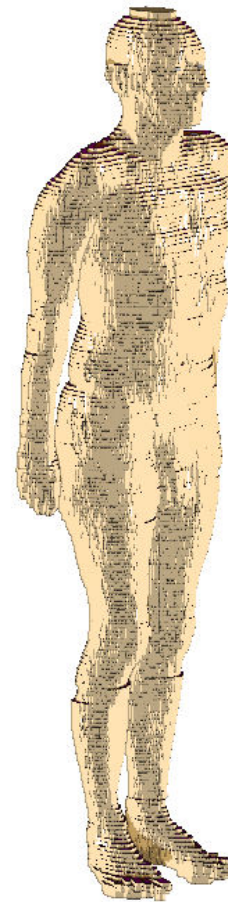
人体など幾何学形状では表現できない複雑な体系を表現する

CADジオメトリを連続四面体形状を介して間接的に読み込むことができる

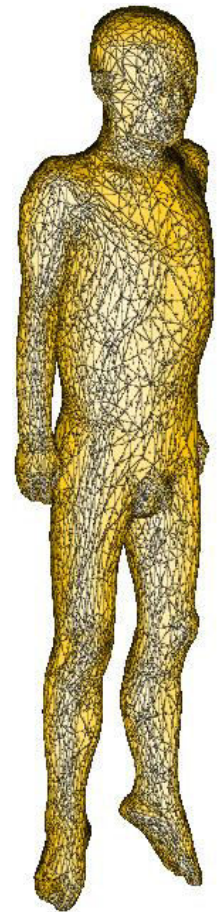
## ✓ 計算時間は？

入射粒子	ボクセル	四面体
陽子 100MeV	1720秒	362秒
光子 1MeV	561秒	143秒

四面体の方が速い！（PHITSのみ）



ボクセルファントム  
(ICRP110)



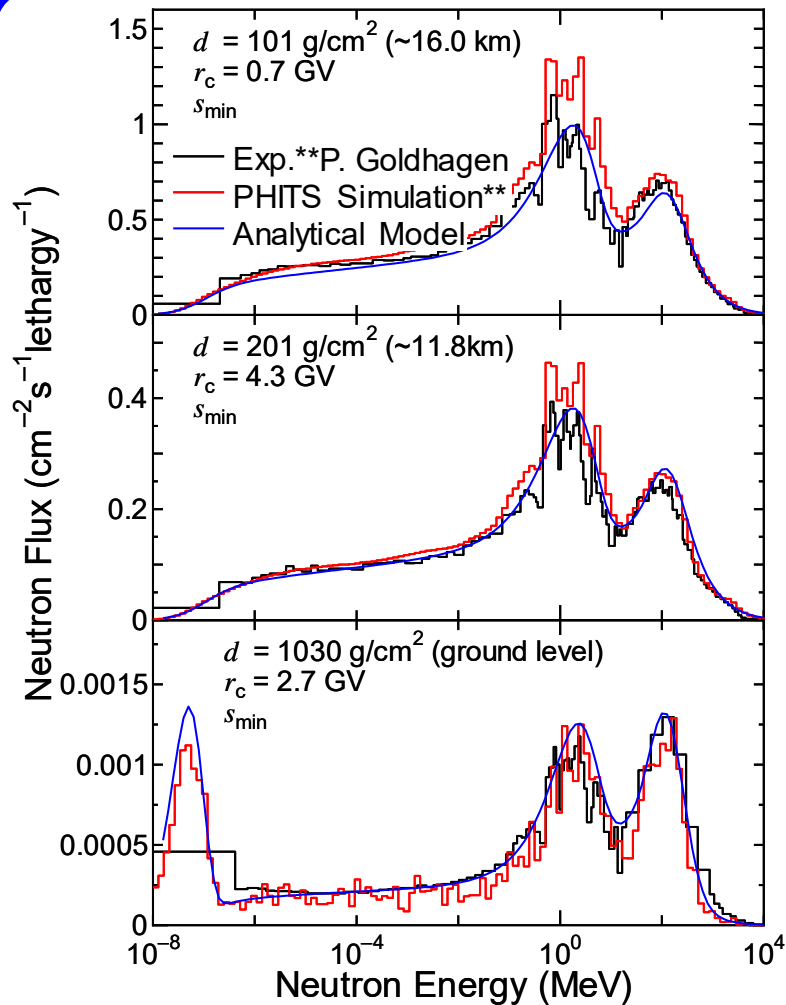
四面体ファントム  
(Y.S. Yeom et al.)

より精緻な放射線防護・医学物理計算が可能

## 発表内容

- ✓ PHITSの概要
- ✓ 飛跡構造解析モード
- ✓ 医学物理分野への応用例
- ✓ その他の応用例
- ✓ まとめ

# 大気圏内の宇宙線挙動解析



大気圏内の中性子フラックス

## PHITSシミュレーション

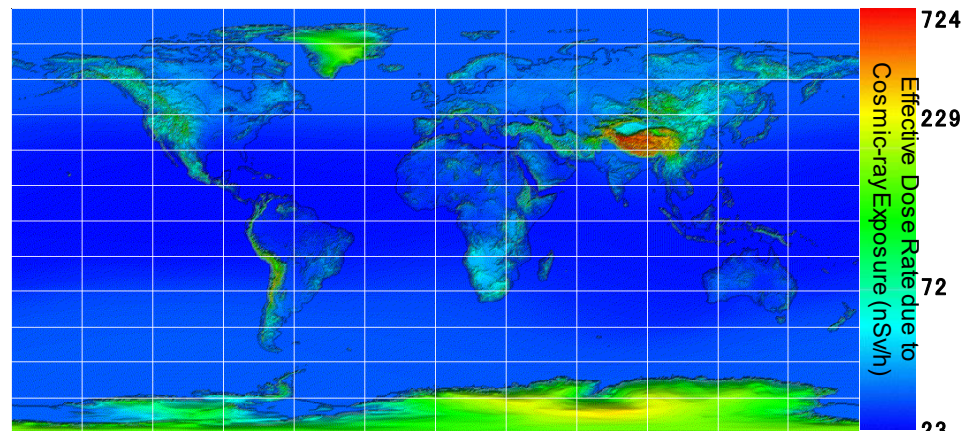
- 大気圏内の宇宙線挙動を太陽活動度，地磁気強度を考慮してPHITSで計算

### モデル化

任意地点・時間における宇宙線フラックス・被ばく線量を瞬時に計算可能とした

ソフトウェアEXPACSとしてWebで公開

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

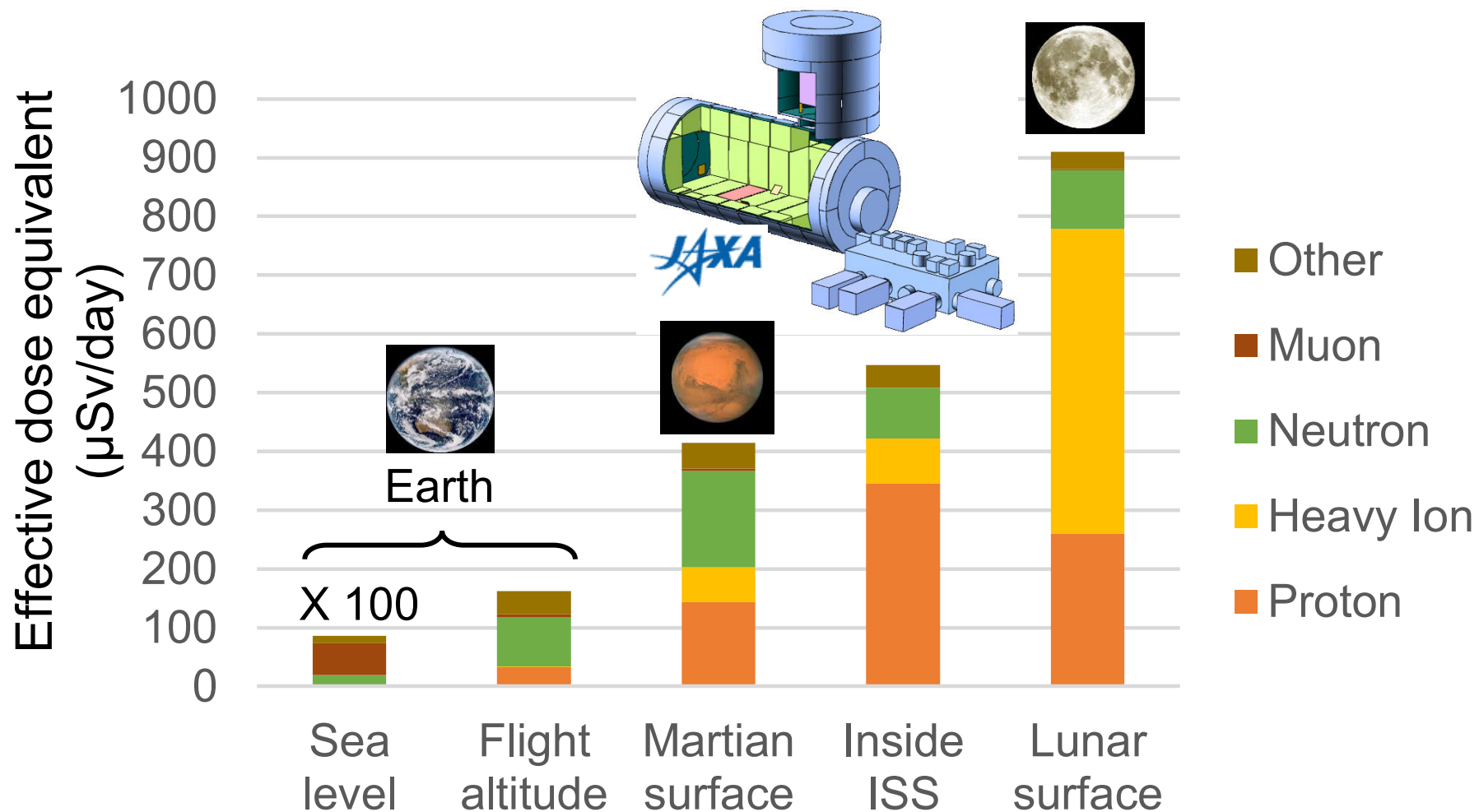


地表面における宇宙線被ばく線量分布

日本の航空会社による乗務員被ばく線量管理や地球惑星物理学に利用

T. Sato, *PLOS ONE*. **10**, e0144679 (2015), T.Sato, *Sci Rep* **6**, 33932 (2016)

# 宇宙飛行士の被ばく線量推定



地球・月・火星・国際宇宙ステーション内での実効線量当量の比較

# 太陽フレア時の地球への影響

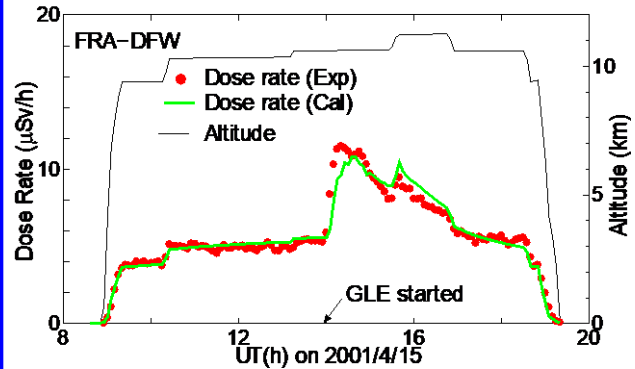
## Warning System for AVIation Exposure to Solar Energetic Particle

### 航空機被ばく警報システム：WASAVIES

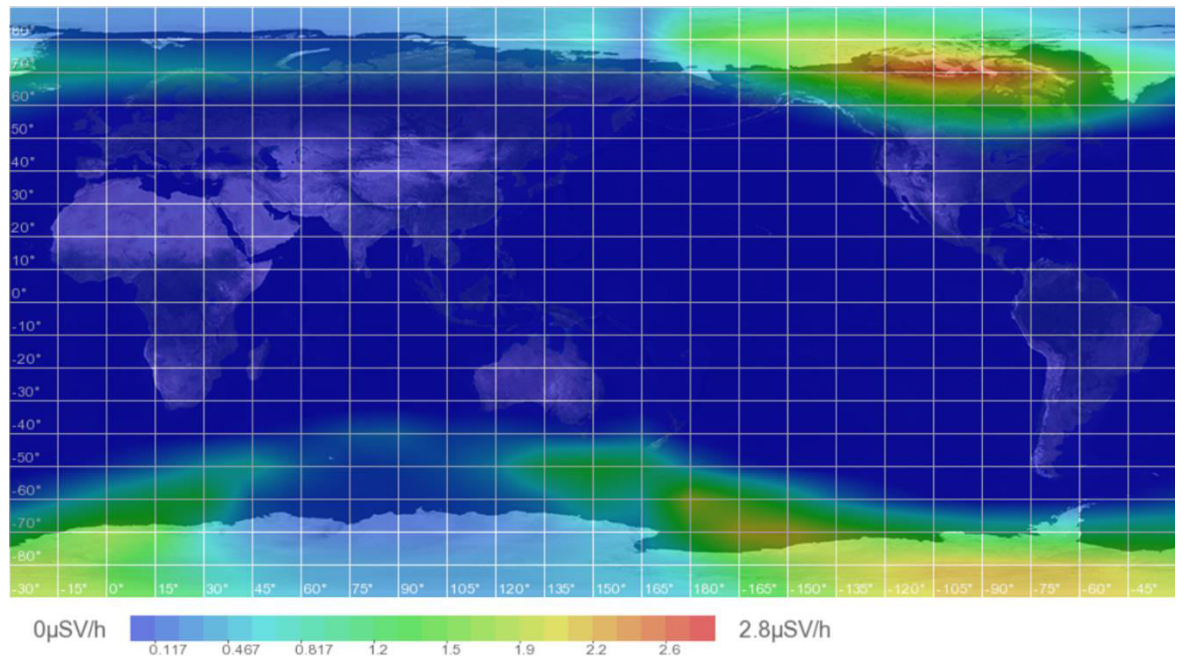
- ✓ 太陽フレアが発生した際の大気圏内における宇宙線フラックス上昇の情報をリアルタイムで発信するシステム
- ✓ 大気圏内の宇宙線挙動解析にPHITSを利用



Webシステム（開発中）



航空機実験による精度検証



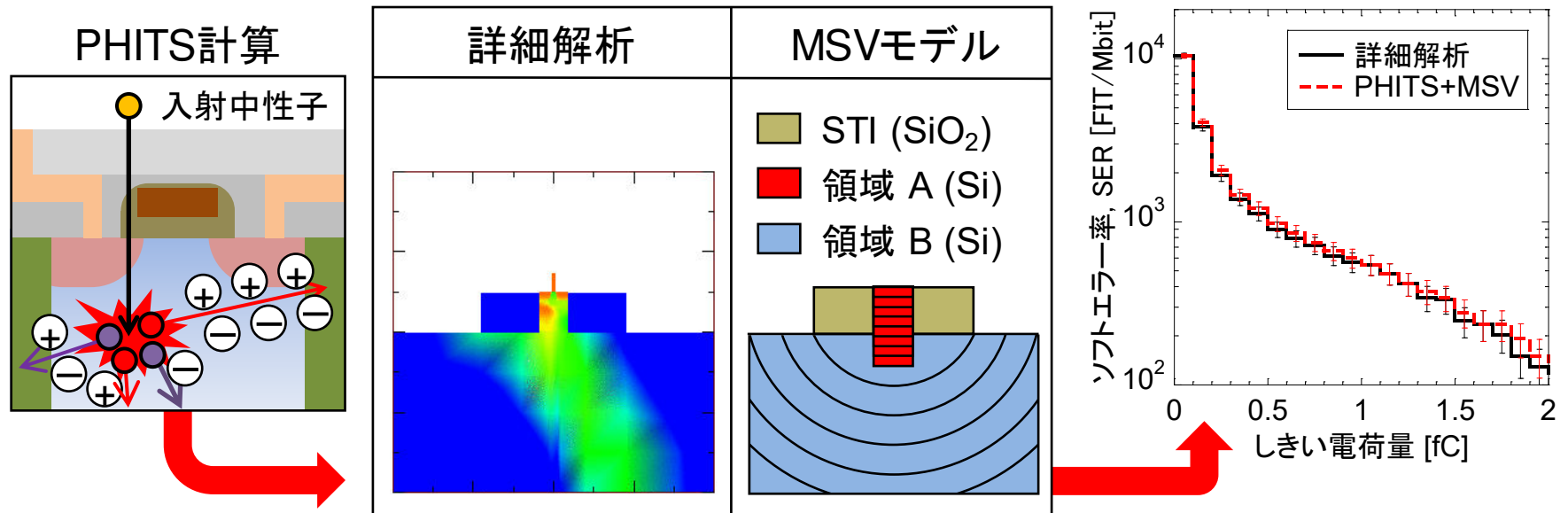
2017年9月に発生したフレア時の航空機高度における宇宙線強度マップ

# 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？

- 放射線照射により半導体メモリ内にノイズ電荷が誘起され、あるしきい値以上の電荷が収集されると記憶データが反転し、電子機器にエラーが起きる
- 地上環境では、宇宙線中性子が半導体内で核反応を起こして発生する

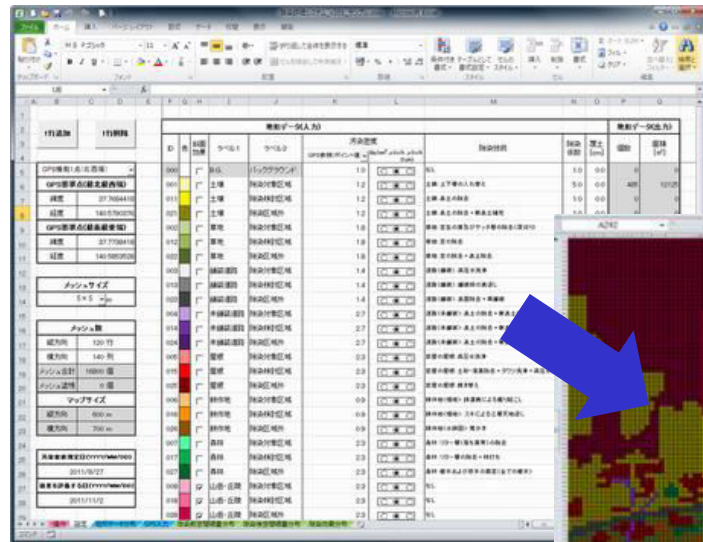
中性子核反応で生成する2次粒子を評価可能なイベントジェネレータモードが不可欠



デバイスシミュレータと繋いだ詳細解析 / 多重有感領域モデルによるSER評価

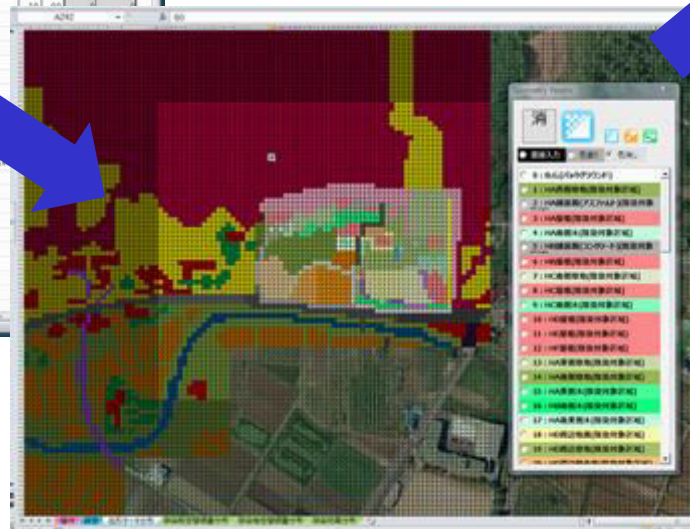
# 除染効果評価システムCDE

- 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

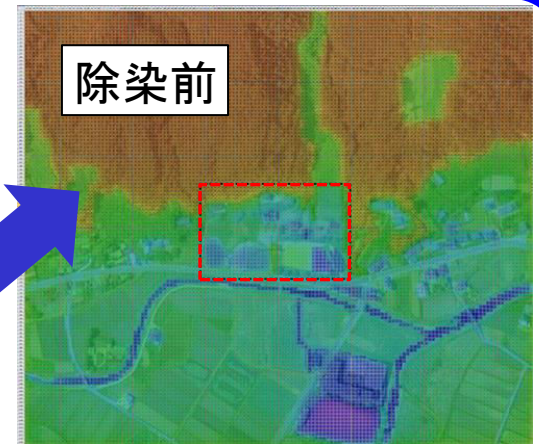


使いやすい表計算ソフトウェアで提供

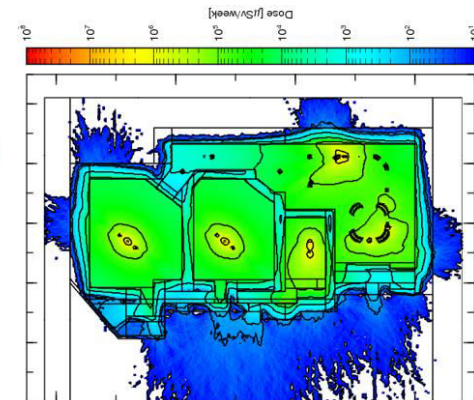
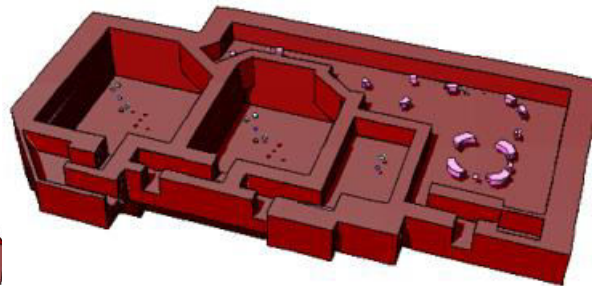
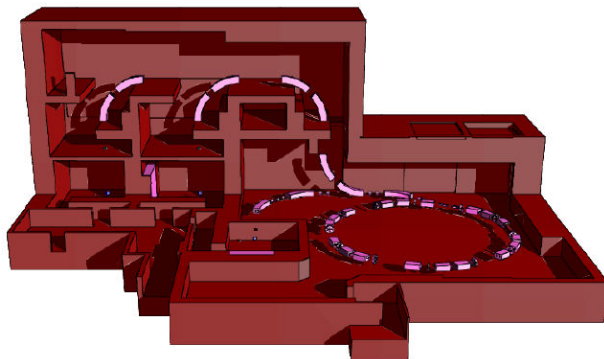
空間線量率の計算と結果の可視化



除染地域の地図の上に汚染分布のデータを入力



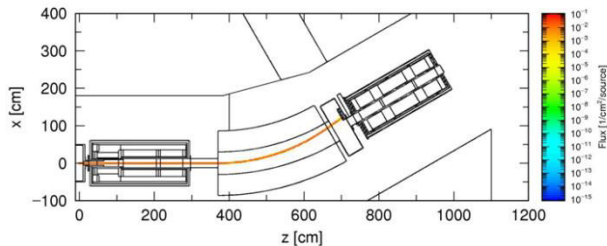
# 加速器施設の遮蔽・ビーム設計



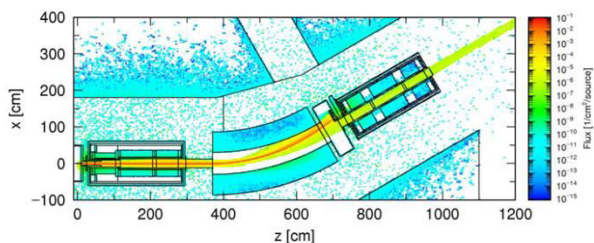
粒子線治療用加速器施設（HIMAC新棟，福井県立病院陽子線がん治療センターなど）

Track  $B\rho$  Ratio:0.85

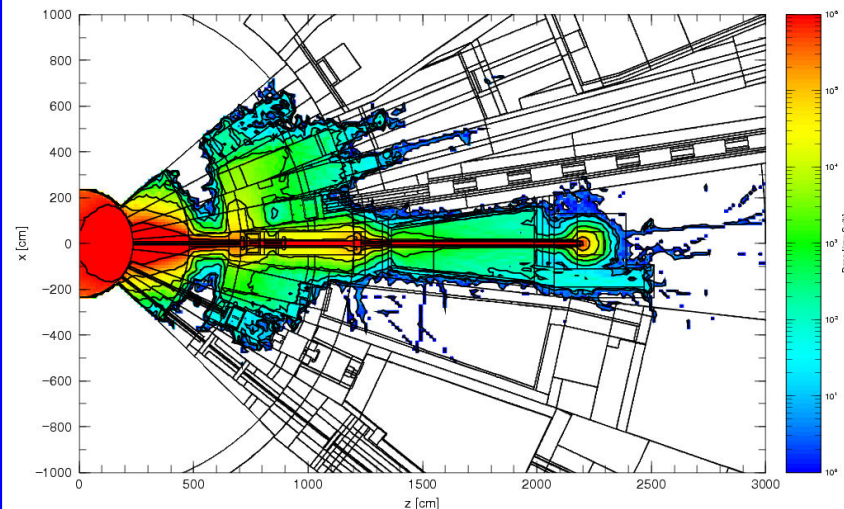
U beam



Nucleus



RIBF at RIKEN by T. Ohnishi



J-PARC



## 発表内容

- ✓ PHITSの概要
- ✓ 飛跡構造解析モード
- ✓ 医学物理分野への応用例
- ✓ その他の応用例
- ✓ まとめ

# まとめ

## コードを支える基盤技術

計算科学  
並列化, 高速化

核データ  
JENDL-4, JENDL-HE

核反応モデル  
JQMD, JAM, SMM

人体モデル技術  
ボクセルファントム

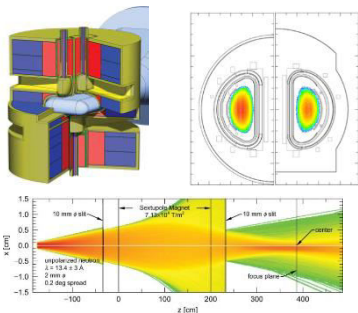
誘導放射能計算  
DCHAIN-SP

**PHITS**  
*Particle and Heavy Ion Transport code System*  
あらゆる物質中での様々な放射線挙動を  
核反応モデル・核データを用いて模擬

## コードの利用分野

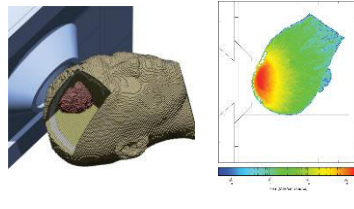
### 放射線施設設計

- ・加速器 (J-PARC, RIBF)
- ・核融合 (JT-60)
- ・レーザー駆動加速器



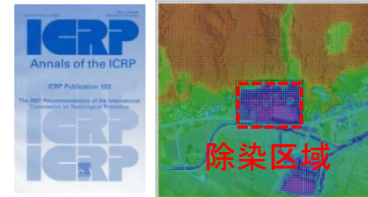
### 医学物理計算

- ・粒子線治療, BNCT
- ・CT診断線量評価
- ・X線治療



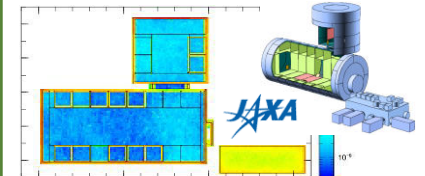
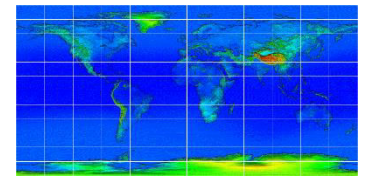
### 放射線防護研究

- ・線量換算係数  
(ICRP110,116,123)
- ・福島原発事故対策



### 宇宙線・地球科学

- ・空気シャワー
- ・宇宙線被ばく評価



国内外4,000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

# 最後に

PHITS最新版リリース状況や講習会案内など、より詳しい情報は、ホームページ&Facebookページをご参照ください

## PHITS

Particle and Heavy Ion Transport code System

[ホーム](#) | [お知らせ](#) | [入手方法](#) | [使い方](#) | [例題とツール](#) | [講習会案内](#) | [コード変更履歴](#) | [よくある質問](#) | [参考文献](#) | [English page](#)

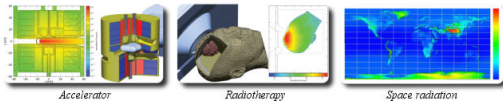
最終更新日 2014/08/25

### 最新情報

2014/08/25: PHITS研究会アブストラクト集の公開 [詳細](#)  
2014/08/20: PHITS出張講習会のご案内(帝京大学, 平成26年11月8-9日) [詳細](#)  
2014/07/01: PHITS出張講習会のご案内(東京工業大学, 平成26年10月23-24日) [詳細](#)  
2014/06/30: PHITS出張講習会のご案内(大阪大学, 平成26年9月29-30日) [詳細](#)  
2014/05/15: 第10回PHITS定期講習会/研究会のご案内(原子力機構, 平成26年8月30-9月1日) [詳細](#)  
2014/03/04: 平成25年度原子力学会賞 特賞・技術賞の受賞決定 [詳細](#)  
2014/01/10: 移行作業開始に関するお知らせ [詳細](#)  
2013/12/18: gfortranによるコンパイルについて [詳細](#)  
2013/11/20: PHITS ver. 2.64リリース [詳細](#)  
2013/10/29: 「ボクセルファントムの作り方(DICOMからPHITS入力形式への変換)」資料更新 [詳細](#)  
2013/08/01: 新しいPHITSの参考文献が公開されました [詳細](#)  
2013/06/18: 入手方法のページを更新しました  
2013/02/12: RIST newsに最新版PHITS(v2.52)の解説記事が掲載されました [RIST newsのページ](#)  
2013/01/09: 新着版PHITSの公開 [詳細](#)  
2012/11/08: PHITSユーザー交流のためのFacebookページ開設のご案内 [詳細](#)

### PHITSとは?

広いエネルギーを持つ各種の放射線を扱える汎用の粒子・重イオン輸送計算コード。任意の体系中における陽子・中性子・重イオン・電子・光子などの挙動を、核反応モデル及びびデータをを用いて模擬することができます。加速器工学、放射線医療、宇宙工学、また粒子と原子核の輸送現象に關する多くの分野の研究をサポートします。[詳細](#) (pdf, 9.8MB, 2014/2/19 update)



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

<https://www.facebook.com/phitscommunity>

- ✓ 初級コース@徳島大学 (6月22~23日), @東京都市大学 (6月29-30日)
- ✓ 中級コース&研究会@KEK (8月5~6日)
- ✓ 定期講習会 (日本語&英語) @いばらき量子ビームセンター (8月20-21日)

参加申込受付中!