

放射線挙動解析コードPHITSの概要

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター

佐藤 達彦



PHITS

Particle and Heavy Ion Transport code System



日本原子力学会「水化学部会」第43回定例研究会 2022/06/17

PHITS開発チームメンバー

佐藤達彦¹, 岩元洋介¹, 橋本慎太郎¹, 小川達彦¹, 古田琢哉¹, 安部晋一郎¹,
甲斐健師¹, 松谷悠佑¹, 松田規宏¹, 平田悠歩¹, Lan Yao¹, Pi-En Tsai^{1*},
Hunter Ratliff^{1**}, 岩瀬広², 坂木泰仁², 執行信寛³, Lembit Sihver⁴, 仁井田浩二⁵

1. 日本原子力研究開発機構 (JAEA), 日本
2. 高エネルギー加速器研究機構 (KEK), 日本
3. 九州大学, 日本
4. ウィーン工科大学, オーストリア
5. 高度情報科学技術研究機構 (RIST), 日本

Table of Contents

1. 概要説明

2. 物理モデルの解説

3. 応用例の紹介

3.1 放射線施設設計への応用

3.2 医療, 放射線防護への応用

3.3 宇宙線挙動解析への応用

3.4 その他の応用

4. まとめ

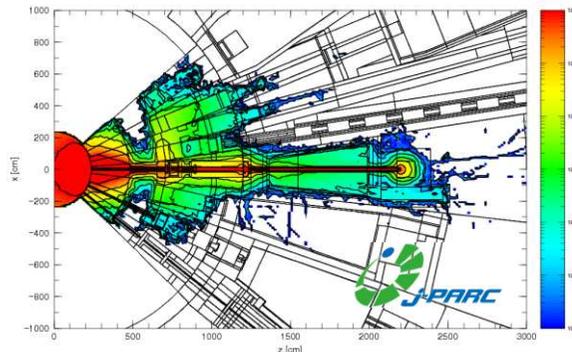
PHITSとは？

Particle and Heavy Ion Transport code System

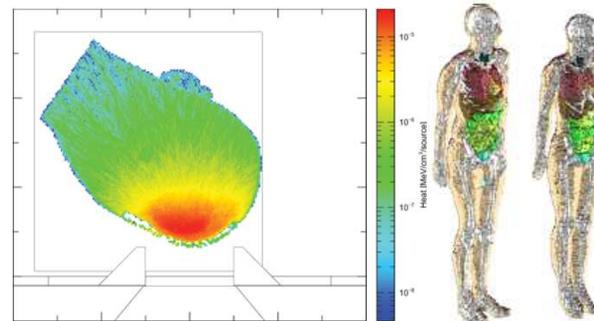
基本特性

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ライブラリを用いて模擬する**モンテカルロ計算コード**

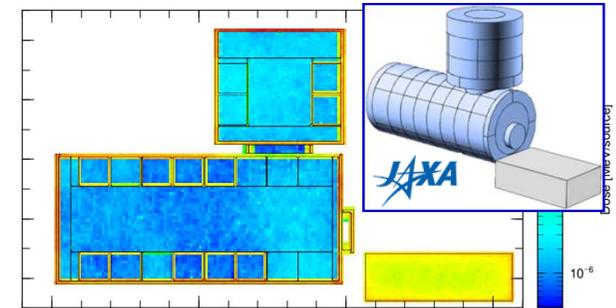
適用例



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

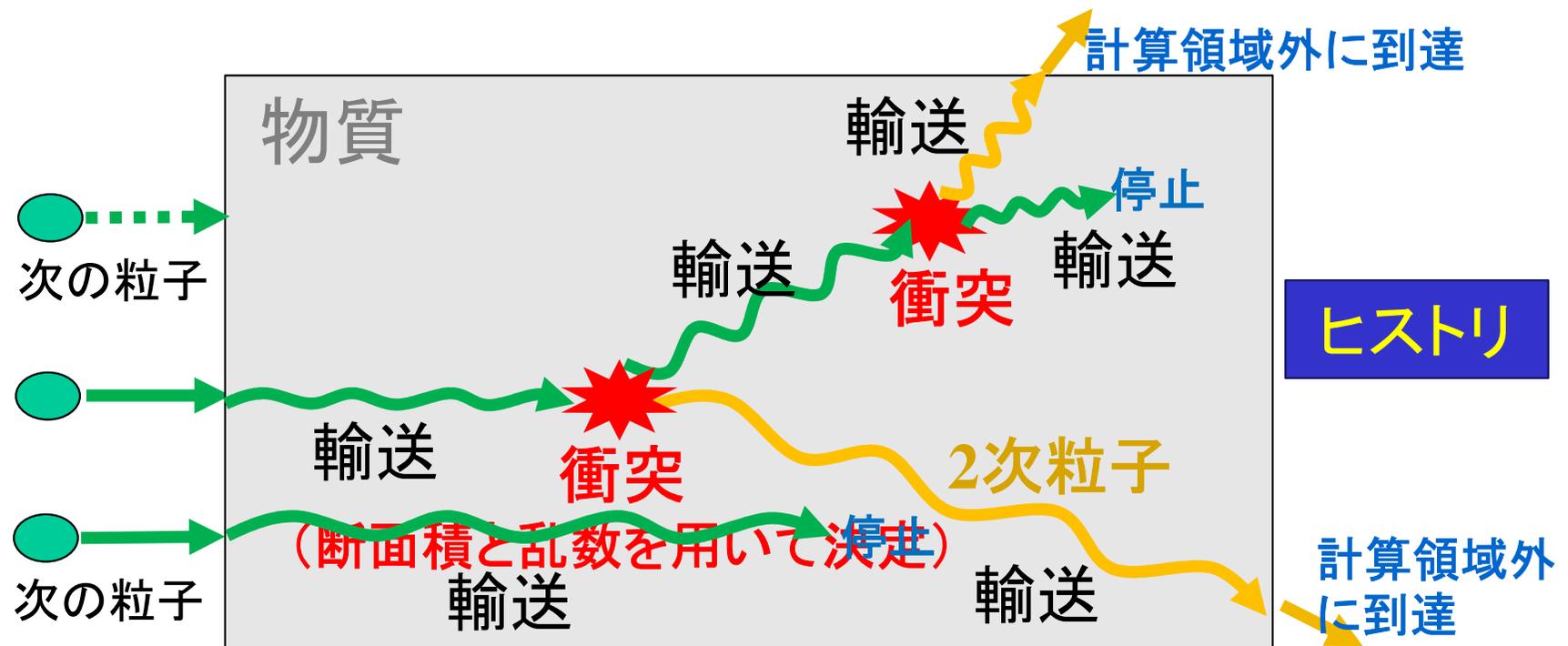
入手方法

- ✓ 利用申請書をPHITSホームページより提出*
- ✓ **全ての構成要素** (ソースコード、実行ファイル、データライブラリ、画像出力ツールなど) が集約されたパッケージを無償で入手可能

* <http://phits.jaea.go.jp/> 申請から配布までは3週間程度の時間を要する

モンテカルロ計算とは？

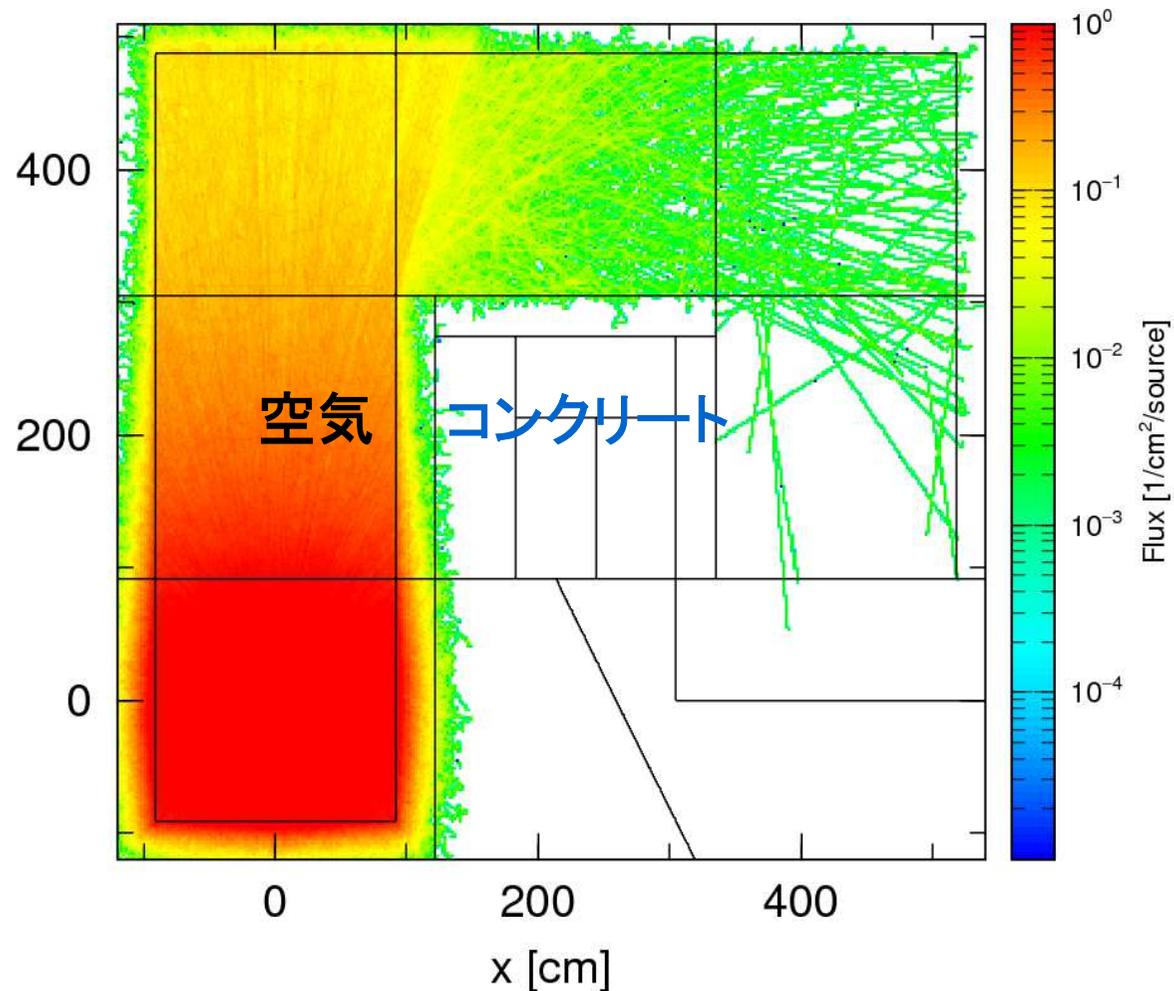
- ✓ 一般：乱数を使ったコンピュータシミュレーション手法
- ✓ 放射線挙動解析：個々の放射線挙動を乱数を用いて確率的に再現し、その平均的な振る舞いを推定する手法
 - 放射線が量子力学に従って確率的に動くため成立



- ✓ ヒストリーを繰り返すことにより、放射線の平均的な挙動が分かる
- ✓ 多くのヒストリーを繰り返して偶然の要素を排除する必要あり→計算時間が長い
- ✓ 物質内での放射線挙動を第一原理的に再現するため計算精度が良い

PHITS計算結果の例

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



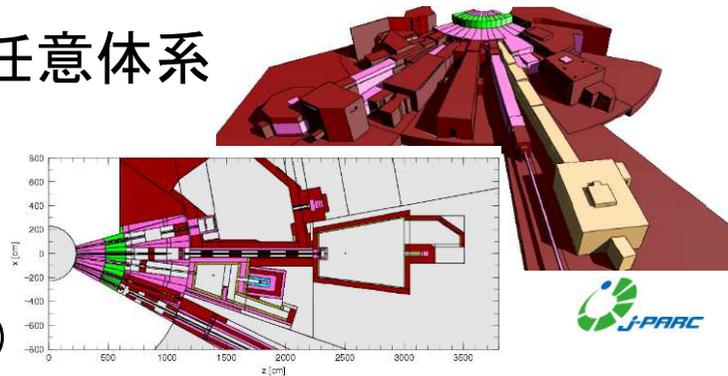
^{137}Cs から放出された100,000個の光子の挙動をPHITSで模擬

数多くの放射線挙動を模擬することにより、全体的な挙動(平均値)を導出

PHITSの基礎特性

- 言語 Fortran (Intel Fortran, gfortran)
- 入力データ形式 独自の簡易な書式を持つテキストファイル (PHITS語)
- 幾何形状 **ユーザーがプログラムを書いたりコンパイルしたりする必要なし**

- 面や立体で指定可能な任意体系
- 2D&3D描画ツール (ANGEL, PHIG-3D)
- 入出力支援外部ソフト (ParaVIEW*, SuperMC**)



ANGEL (2次元&3次元)



PHIG-3D (GUI)

➤ 計算できる物理量

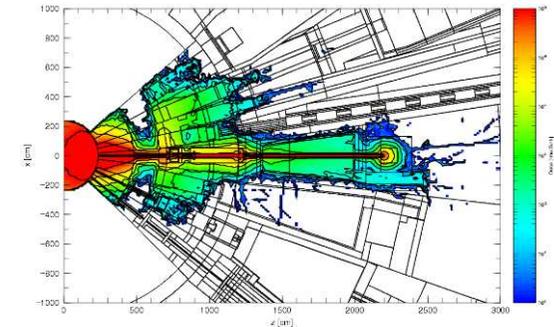
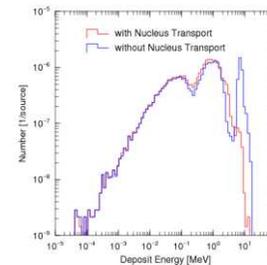
粒子フルエンス, 吸収線量, 粒子生成収率 など

➤ 出力データ形式

数値データ, 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)



*計算結果を3次元で可視化可能

**CAD形式の幾何学形状をPHITS入力形式に変換可能

他のモンテカルロ計算コードとの比較

汎用放射線挙動解析コード

コード名	開発機関	言語	特徴
MCNP(X)	LANL	FORTRAN	原子力分野で世界標準。 信頼性高い, 臨界計算機能有り
GEANT4	CERN etc.	C++	世界中で開発した様々な核反応モデルや ツールを統合するプラットフォーム
FLUKA	CERN, INFN	FORTRAN	加速器の遮へい設計で実績多数。ヨー ロッパを中心に普及
PHITS	JAEA etc.	FORTRAN	すぐ使える親切設計。講習会資料充実。 多様な計算機能。日本語サポート！

主に特定の目的で使われている放射線挙動解析コード

- 加速器遮蔽: MARS, SHIELD etc.
- 炉物理、核融合: MVP, OpenMC, SuperMC, TRIPOLI-4 etc.
- 電磁カスケード: EGS5, EGS-nrc, PENELOPE etc.
- 飛跡構造解析: GEANT4-DNA, KURBUC, PARTRAC etc.

注意！！PHITS開発チームから見た意見です

Table of Contents

1. 概要

2. 物理モデル

3. 応用例

3.1 放射線施設設計への応用

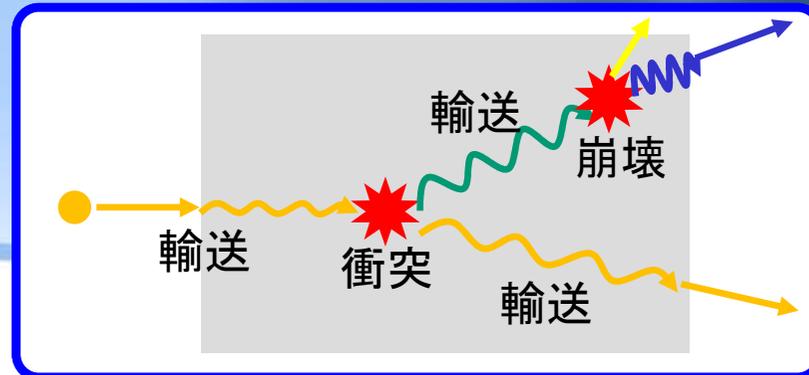
3.2 医療, 放射線防護への応用

3.3 宇宙線挙動解析への応用

3.4 その他の応用

4. まとめ

PHITSで扱う物理現象



衝突・崩壊過程	原子核反応	<ul style="list-style-type: none">• 高エネルギー核破碎反応• 核分裂反応• 吸収・原子核共鳴反応
	原子反応	<ul style="list-style-type: none">• 光電効果・コンプトン散乱・電子対生成• モラー/バーバー散乱、対消滅・制動放射• ノックアウト電子(δ線)生成• 電離/励起(飛跡構造解析モードのみ)
	粒子崩壊	<ul style="list-style-type: none">• 寿命による崩壊(μ & π粒子、中性子 etc.)
輸送過程	電離・励起	<ul style="list-style-type: none">• 連続エネルギー損失近似(CSDA)• エネルギー・角度分散
	外部場/反射	<ul style="list-style-type: none">• 電磁場• 重力• 反射面(スーパーミラー etc.)

PHITSに組み込まれた物理モデル（奨励設定）

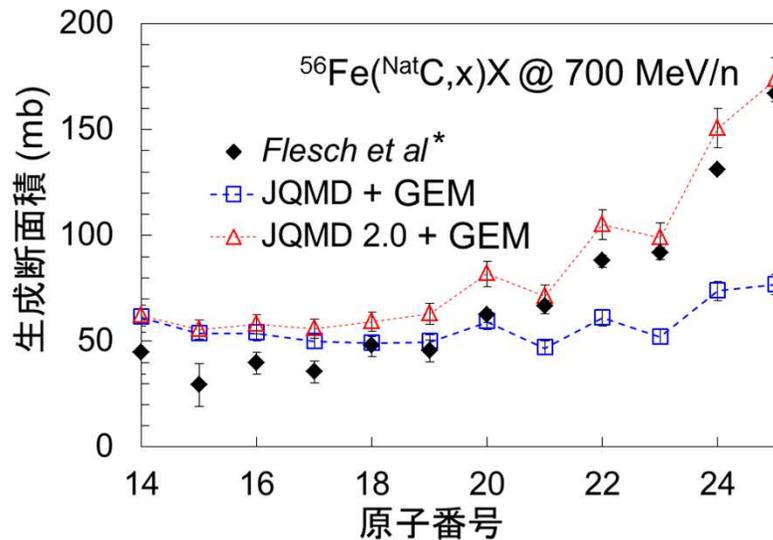
	中性子	陽子・ π 粒子 (その他の核子)	重イオン	μ 粒子	電子・ 陽電子	光子	
高 ↑ エネルギー ↓ 低	1 TeV	1 TeV/u		1 TeV	EGS5 or 飛跡構造 解析	1 TeV	
	核内カスケード模型 JAM 3.0 GeV + 蒸発模型 GEM	JAMQMD + GEM		仮想光子 核反応 JAM/ JQMD + GEM		EGS5 or EPDL97	光核反応 JAM/ JQMD + GEM + JENDL + NRF
	核内カスケード模型 INCL4.6 + 蒸発模型 GEM	d t ^3He α	量子分子 動力学模型 JQMD + GEM 10 MeV/u	200 MeV			
	20 MeV	1 MeV	エネルギー損失 ATIMA or 飛跡構造解析	ATIMA + オリジナル			
核データ ライブラリ JENDL-4.0 + (EGM) 0.01 meV	1 keV		1 keV	1 keV	飛跡構造 解析 1 meV		

粒子別の奨励物理モデルとその適用エネルギー範囲

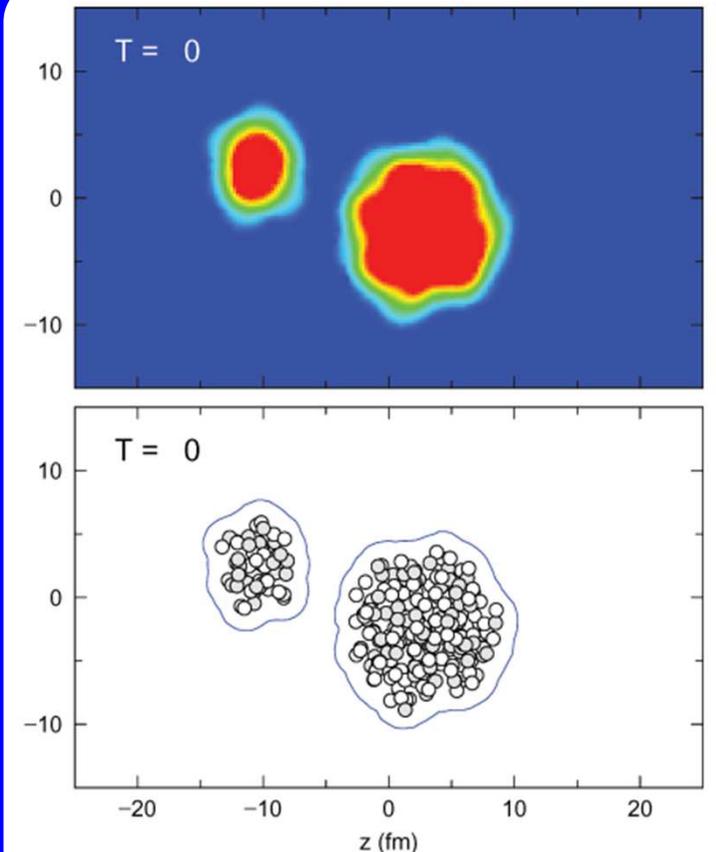
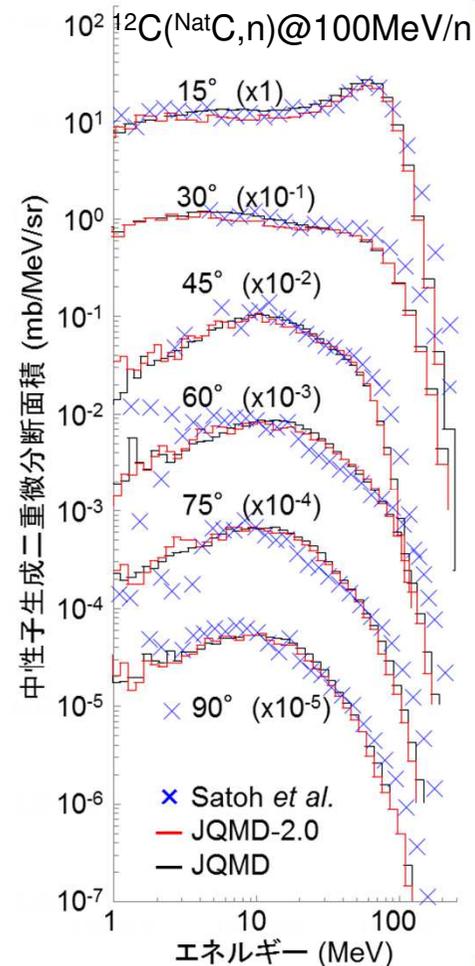
モデル及びその適用エネルギー範囲は入力ファイルにて変更可能

JQMD (JAERI Quantum Molecular Dynamics) モデル

- ✓ 原子核を核子の集合体と仮定して、その衝突による時間発展を全ての核子間力を考慮して数値解析で解く手法。
- ✓ 計算時間は掛かるが重イオン核反応シミュレーションに最適。



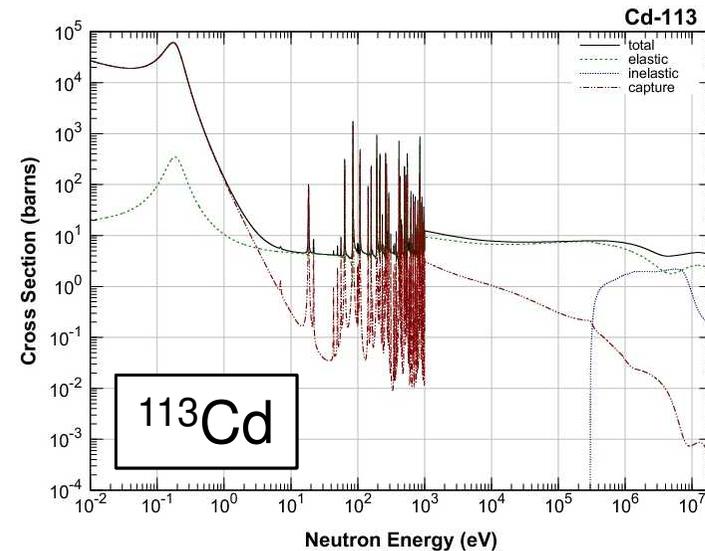
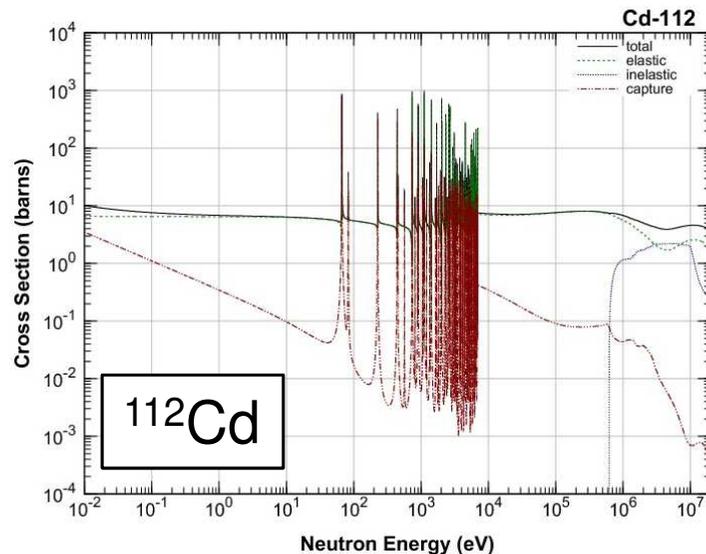
- 重イオン反応による残留核生成率 (左上図) や 2次中性子エネルギースペクトル (右図) を精度よく再現



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

核データライブラリJENDL

- ✓ 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扱えない
- ✓ 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の利用が必須



JENDL-4.0に格納されている ^{112}Cd と ^{113}Cd の中性子反応断面積

- ✓ 20MeV以下の中性子断面積(JENDL-4.0、全407核種)
- ✓ 200MeV以下の中性子・陽子断面積(JENDL-4.0/HE、25核種のみ)

http://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j40/J40_J.html
<https://rpg.jaea.go.jp/main/en/ACE-J40HE/index.htm>

イベントジェネレータモード (EGM)

核データライブラリを用いた2次粒子サンプリング

従来手法: 1次元のエネルギー分布より個々の2次粒子エネルギーを独立に決定

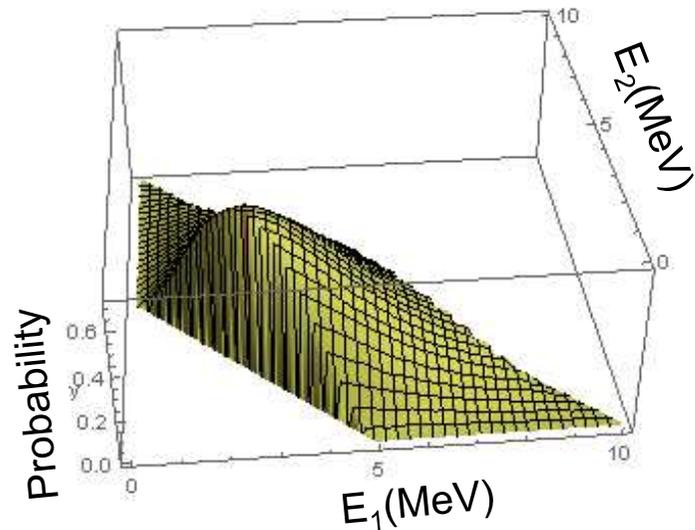
→1つの反応前後でエネルギーが保存しない!

用途: 遮蔽設計や医学物理計算など平均値が重要な計算

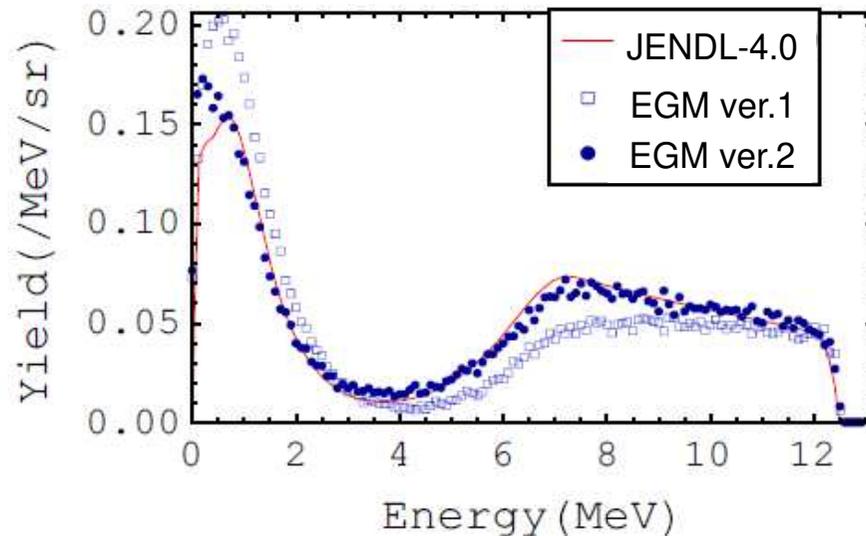
EGM: 2次元のサンプリング空間より全ての2次粒子エネルギーを同時に決定

→1つの反応前後でエネルギーが保存する!

用途: 検出器設計など個々の放射線挙動を模擬したい計算



2次元サンプリング空間

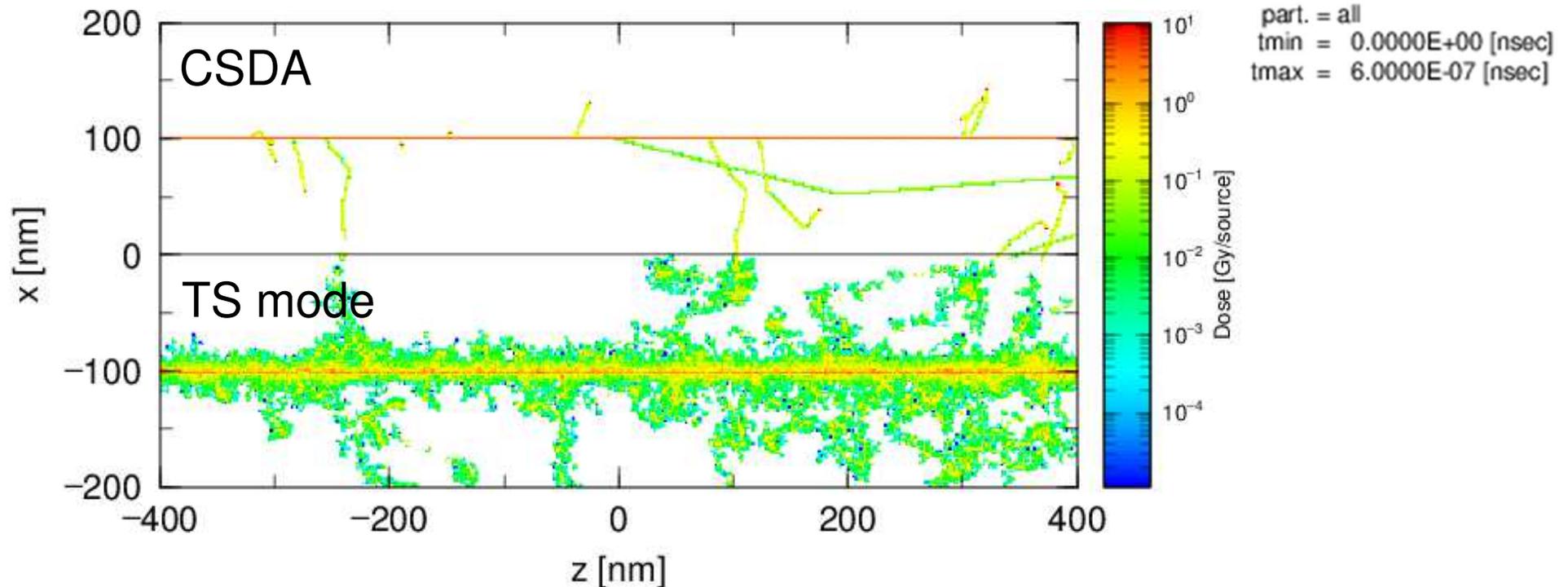


$^{150}\text{Nd}(n,2n)$ 反応による2次中性子フルエンス

飛跡構造解析モード

PHITSの中での電離・励起の扱い

- ✓ 連続エネルギー損失近似(CSDA): 数多くのイベントを1つにまとめて再現
- ✓ 飛跡構造解析モード(TS mode): 個別のイベントを全て再現



5 MeV/nの炭素イオン周辺の付与エネルギーをCSDAとTS modeで計算した結果

DNA損傷や発光応答などミクロスケールでの放射線影響メカニズム研究に応用

包括的ベンチマーク

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)

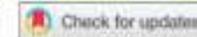
JOURNAL OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2017
VOL. 54, NO. 5, 617-635
<https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1297742>



Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

TECHNICAL MATERIAL

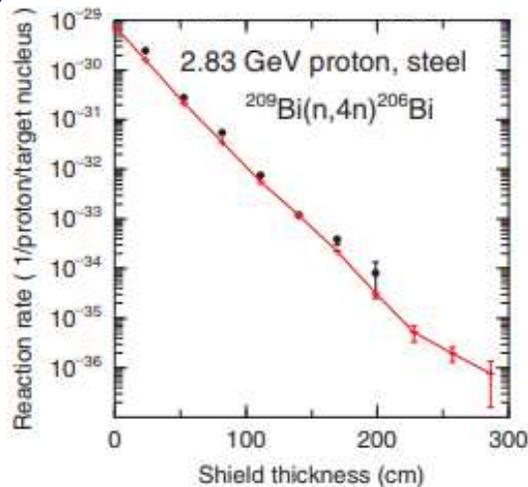
OPEN ACCESS



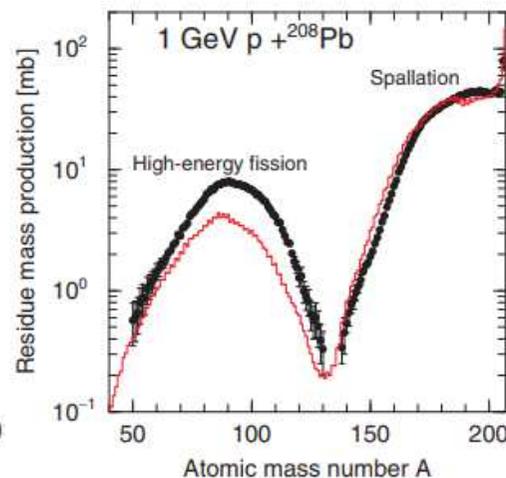
Benchmark study of the recent version of the PHITS code

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

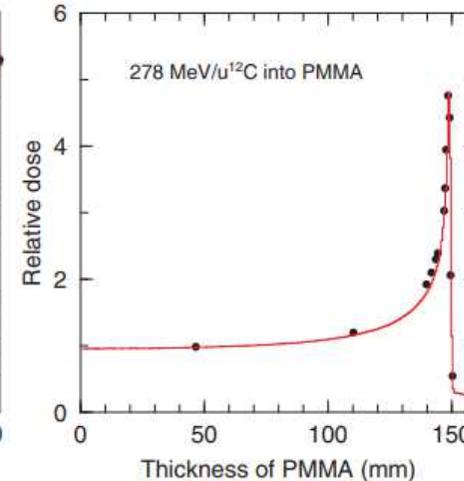
^aJapan Atomic Energy Agency, Ibaraki, Japan; ^bResearch Organization for Information Science and Technology, Ibaraki, Japan



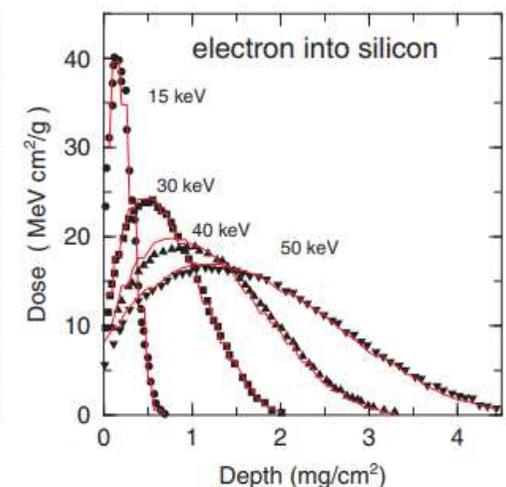
遮蔽計算



核分裂収率



粒子線治療



電子飛程

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

Table of Contents

1. 概要

2. 物理モデル

3. 応用例

3.1 放射線施設設計への応用

3.2 医療, 放射線防護への応用

3.3 宇宙線挙動解析への応用

3.4 その他の応用

4. まとめ

施設設計への応用で役立つ機能

重点サンプリングに基づく計算時間短縮

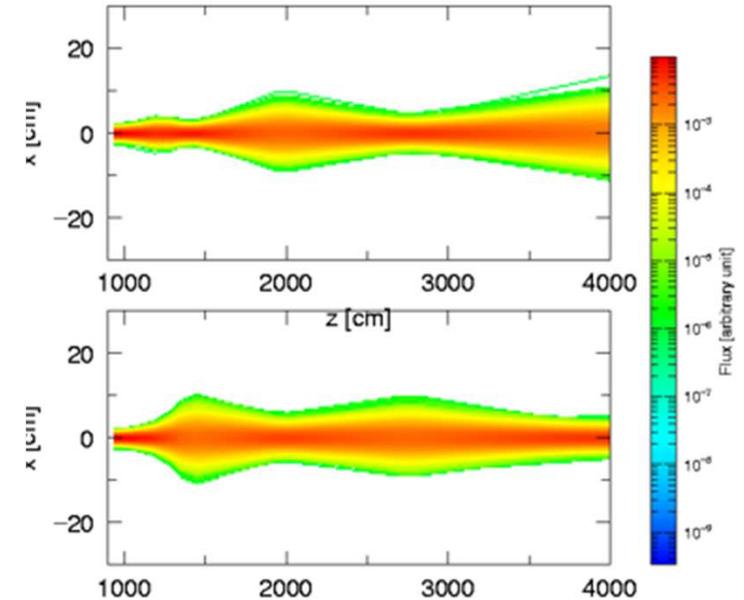
- ✓ 自動設定法 (Weight Window Generator)
- ✓ 手動設定法 (Cell importance method)

電磁場の考慮

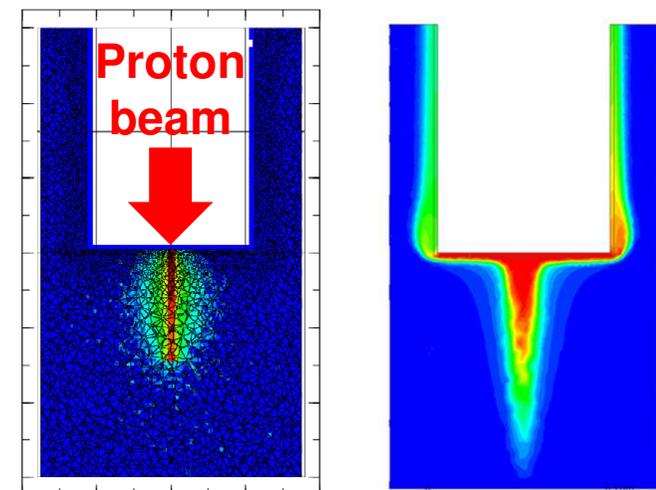
- ✓ 2重極及び4重極磁石
- ✓ ワブラー磁石(時間依存)
- ✓ 並行電場
- ✓ XYZもしくはR-Z座標系で表現する複雑電磁場

その他

- ✓ 実用量 $H^*(10)$ や防護量(実効線量)の直接計算
- ✓ ANOVAに基づく系統誤差評価
- ✓ ビーム強度や冷却時間を考慮した誘導放射能の時間変化推定
- ✓ RMSエミッタンスに基づく加速器用位相空間線源
- ✓ Ansys Fluentと組み合わせた熱流体解析



4重極磁石を模擬した例

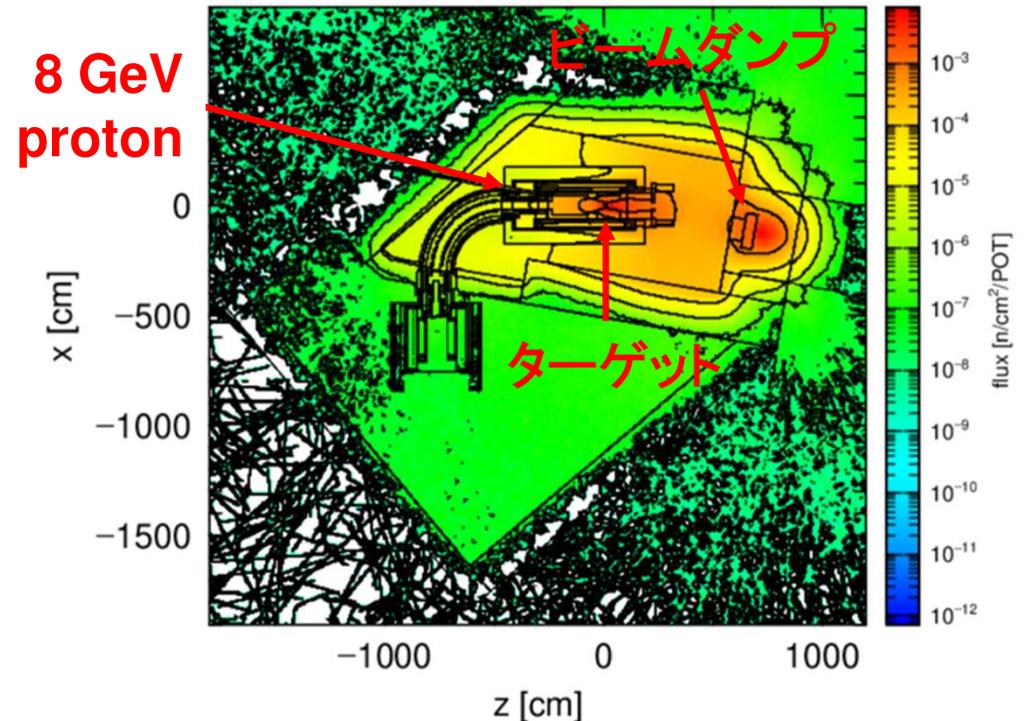
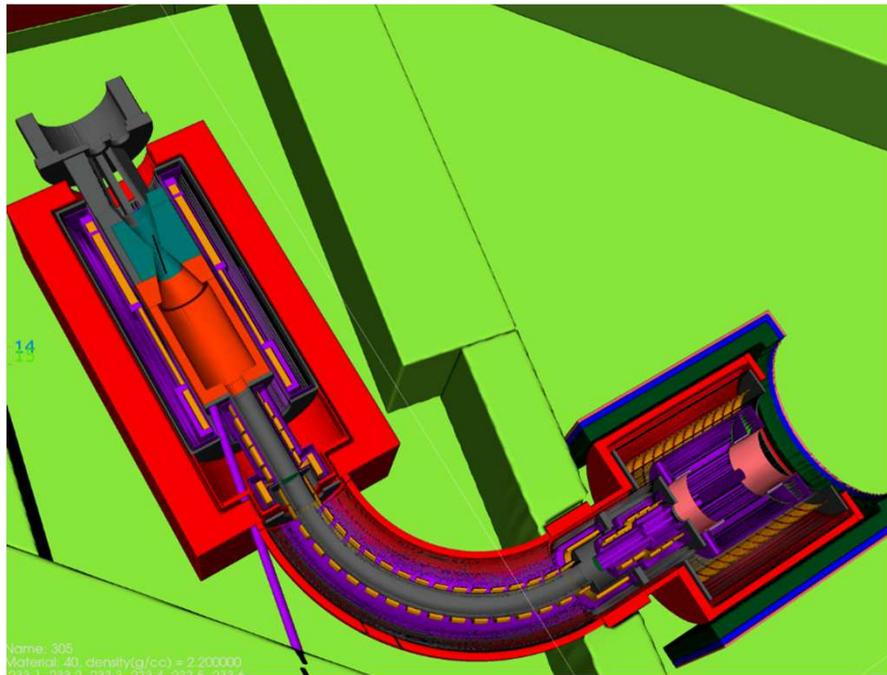


PHITS + ANSYS Fluent

J-PARC設計への応用

Japan Proton Accelerator Research Complex

- ✓ 原子力機構と高エネルギー加速器研究機構が共同で東海村に建設した加速器群
- ✓ 陽子を最大30GeVまで加速し、素粒子実験や大強度中性子源として利用



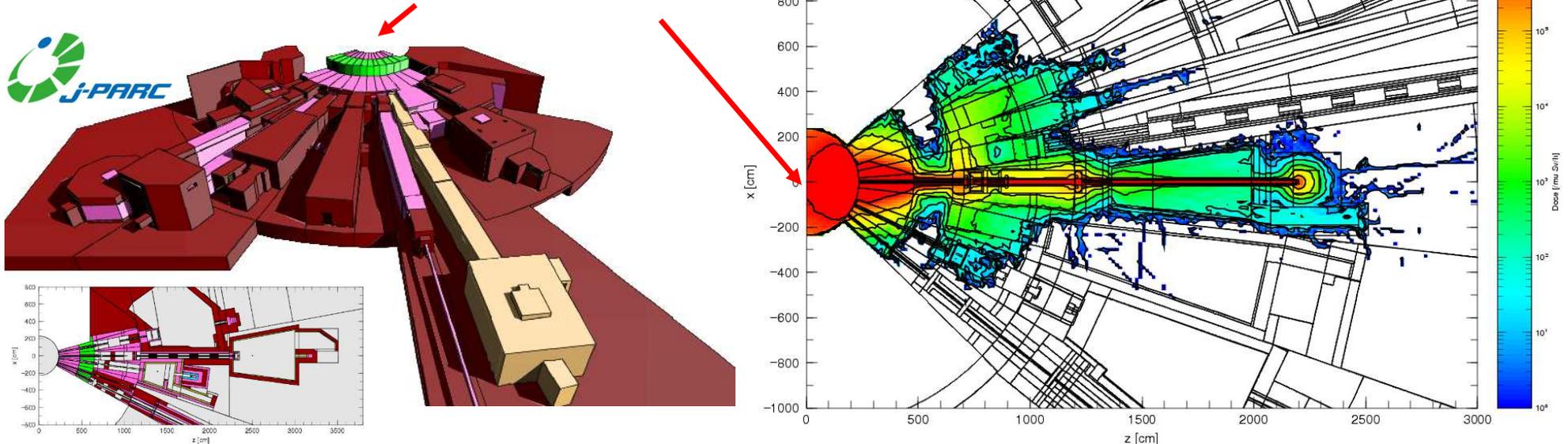
*COMET実験施設の3次元体系及びフラックス分布

*ミュオン-電子転換過程の発見を目指した素粒子実験

中性子ビームライン設計への応用

J-PARC物質・生命科学実験施設(MLF)

3GeV陽子を用いた核破砕中性子源



中性子ビームラインの2次元&3次元体系(左)及び遮蔽計算の例(右)

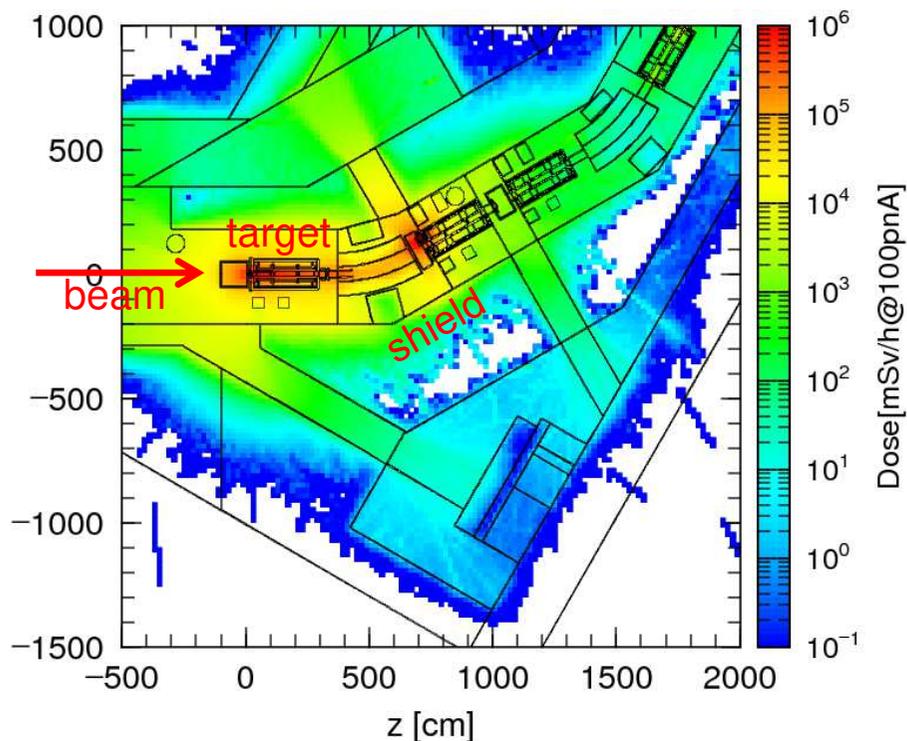
中性子ビームライン設計に使う特殊機能

- ✓ ダクト線源オプション: 長いビームラインから均等に線源を重点サンプリング
- ✓ メカニカル&光学デバイス: 多重極磁石、T0チョッパー、スーパーミラー
- ✓ 重力: 冷中性子の軌道が徐々に地面側に落ちていく効果

RIビームファクトリー設計への応用

- ✓ 理研が建設したウランまでの様々な不安定核を発生させる加速器
- ✓ ニホニウム(原子番号113)の発見で有名

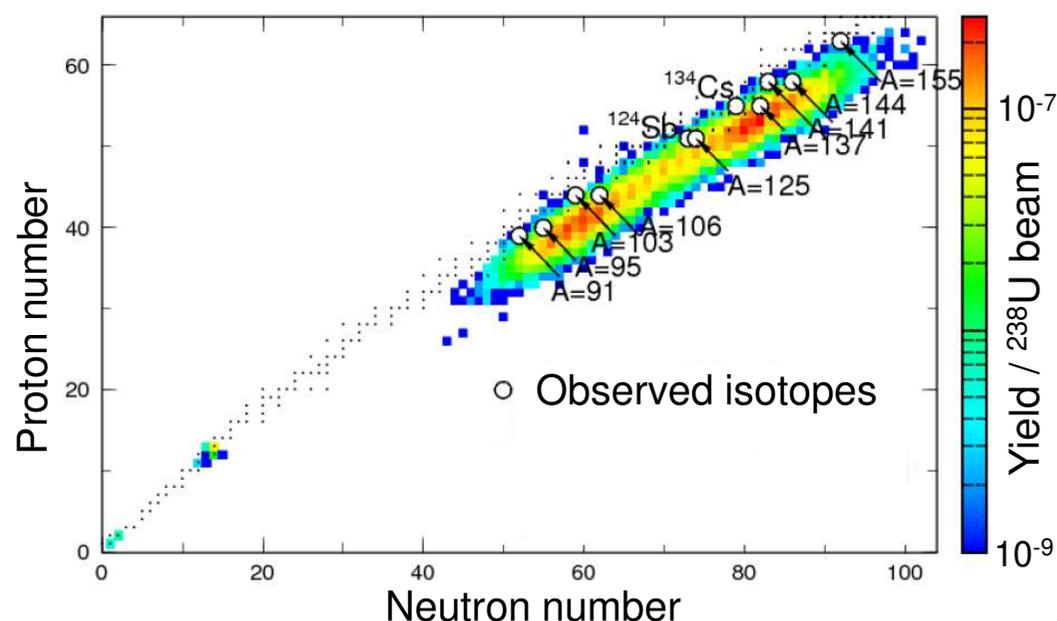
線量評価



BigRIPS*周辺の線量分布

*磁場で様々なRIビームを分離する装置

生成核種分布評価

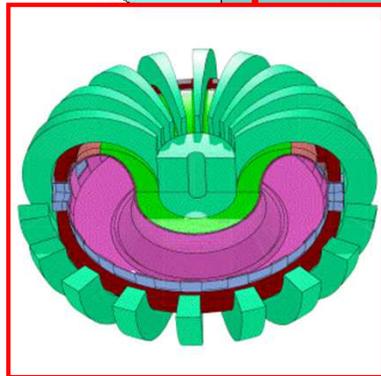
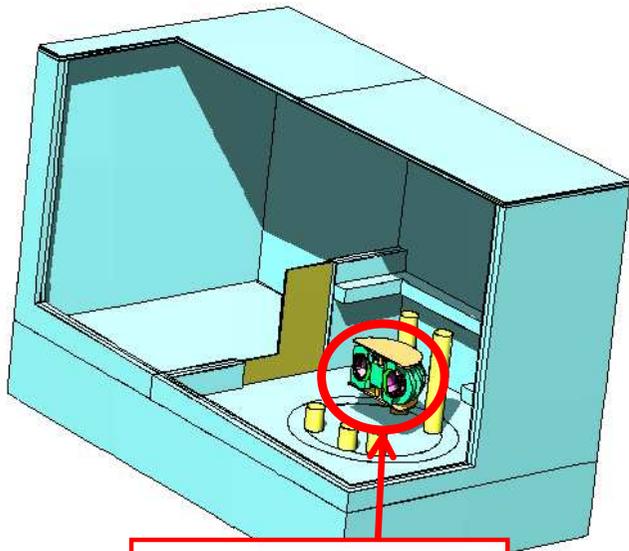


^{238}U ビームによる各元素の生成率

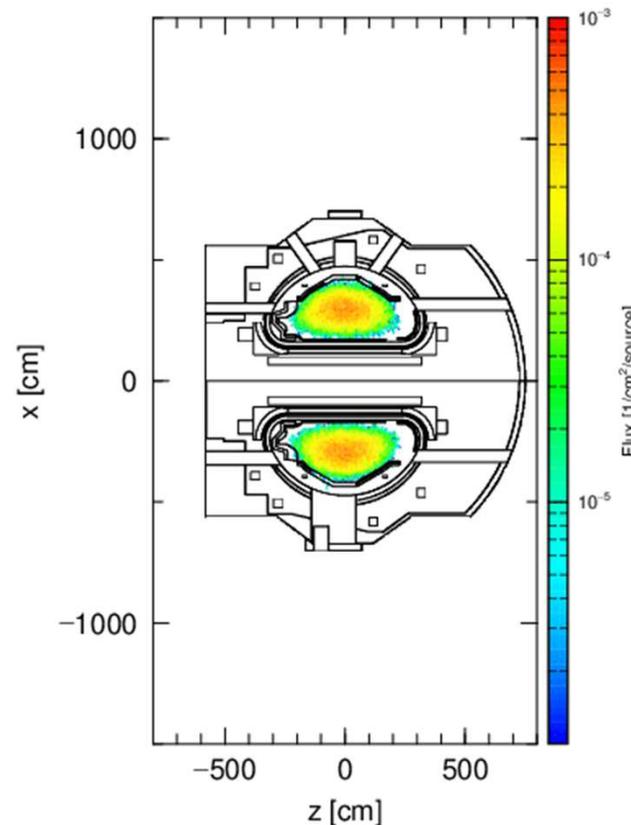
核図表上に生成率を出力する機能が有用

トカマク型核融合装置設計への応用

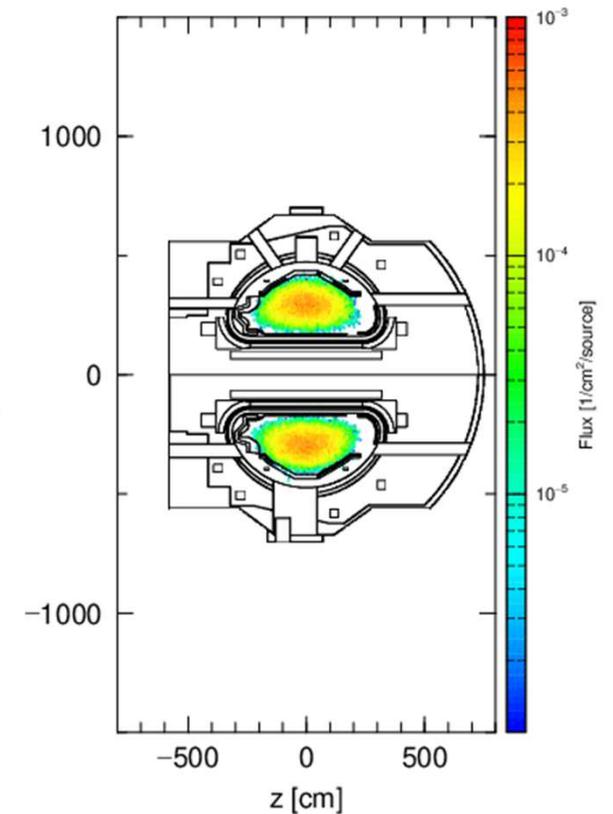
複雑形状を有するトカマク型装置の放射線による発熱、損傷、放射化量評価のためには精度の良い放射線挙動解析が必須



PHITS内で再現したJT-60



遮蔽効果あり

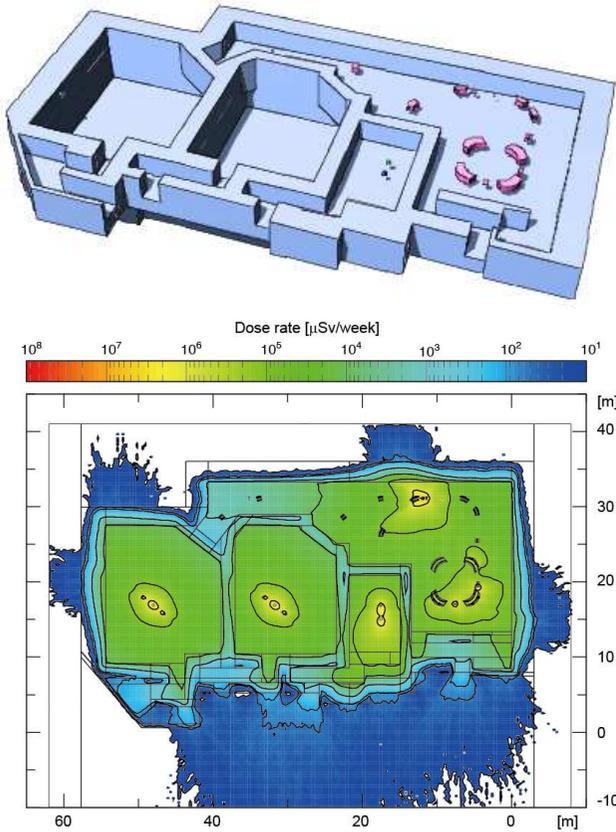


遮蔽効果なし

装置中心部近傍における中性子フラックス

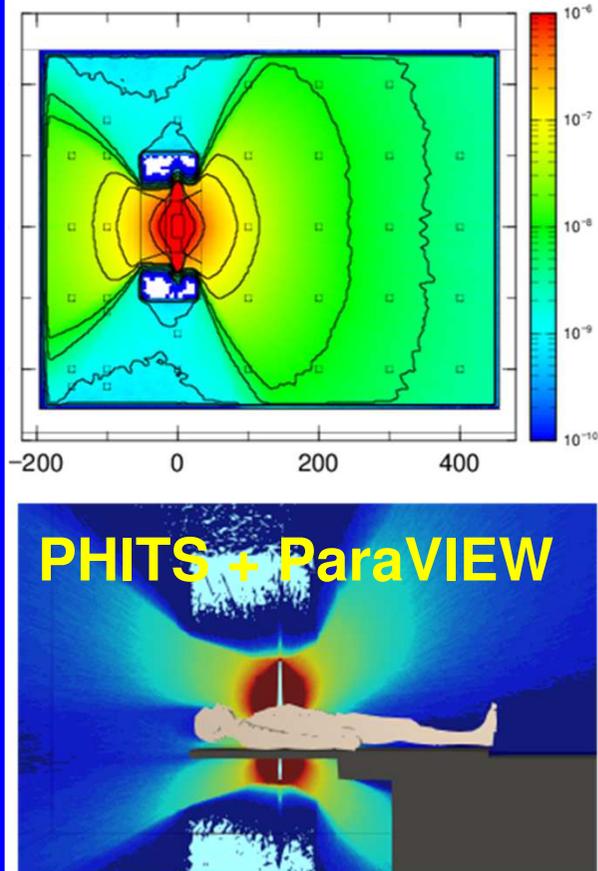
その他の放射線施設設計への応用

粒子線治療施設



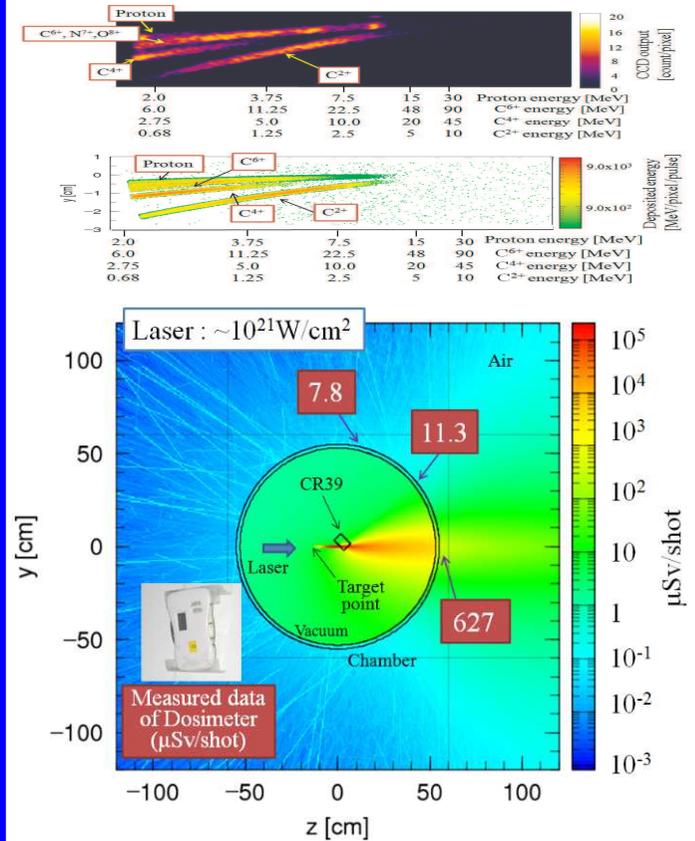
福井県立病院
陽子線がん治療センター
Sato et al. J. Nucl. Sci.
Technol. 49, 1097 (2012)

放射線診断施設



九州大学医学部保健学科
CT検査室
Fujibuchi et al. Japanese J.
Radio. Tech. 75, 1297 (2019)

レーザー加速器施設



QST関西光科学研究所
J-KARENレーザーシステム
Sakaki et al. Rev. Sci. Instr.
85, 02A705 (2014)

許認可申請での利用実績多数

<https://phits.jaea.go.jp/image/shinsei-PHITS.pdf>

Table of Contents

1. 概要
2. 物理モデル
3. 応用例
 - 3.1 放射線施設設計への応用
 - 3.2 医療, 放射線防護への応用
 - 3.3 宇宙線挙動解析への応用
 - 3.4 その他の応用
4. まとめ

医療・放射線防護への応用で役立つ機能

RI線源機能

- ✓ 核種名と放射能を指定すれば、その崩壊により放出される線源スペクトルを自動決定
- ✓ 時間を指定することにより娘核種の寄与も考慮可能

ボクセル&メッシュファントム読込機能

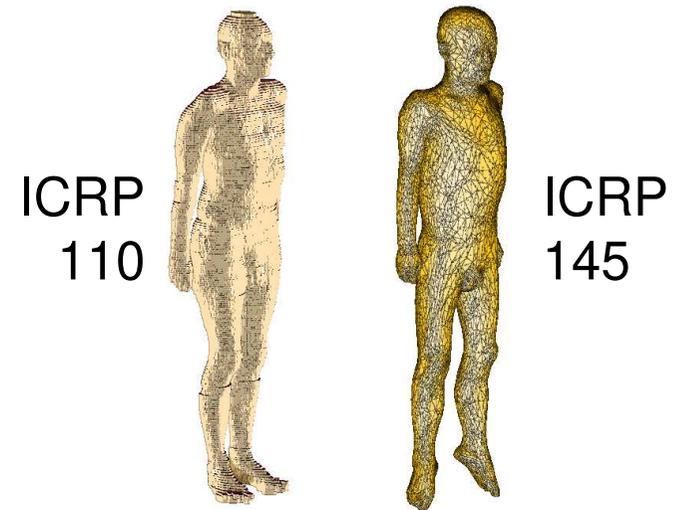
- ✓ 直方体(ボクセル)や四面体メッシュの集合で人体の複雑な形状を詳細に表現
- ✓ 四面体メッシュ内の粒子輸送を高速化する独自のアルゴリズムを導入*

マイクロジメトリ機能

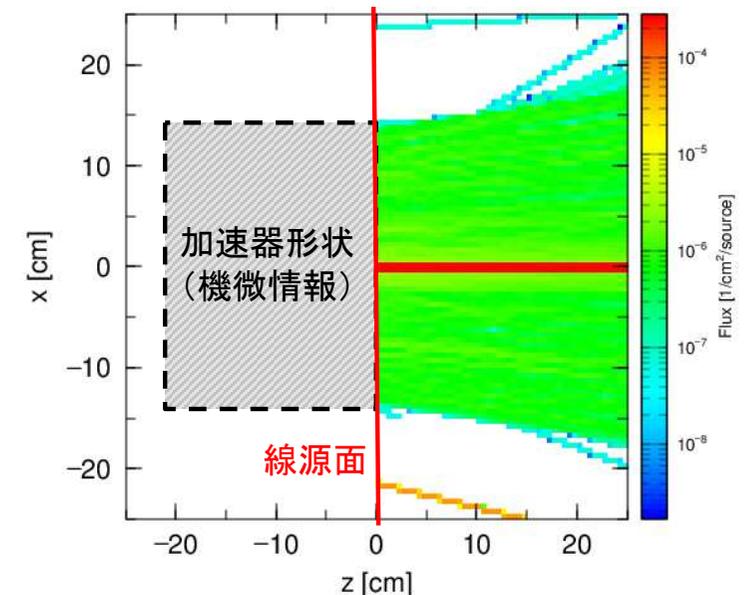
- ✓ ミクロ空間における線量を飛跡構造解析を行うことなく解析的に計算する独自機能**
- ✓ 巨視的な体系内における微視的な影響評価に有用

Phase-space file converter (PSFC)

- ✓ IAEAが提供する医療用加速器線源情報をPHITSが読み込める形式に自動変換するサブプログラム
- ✓ 加速器形状を再現することなく医学物理計算が可能



ボクセル&メッシュファントムの例



Simulation using PSFC

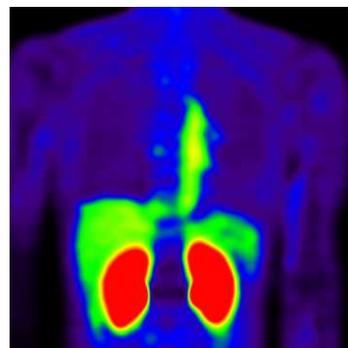
RT-PHITS (RadioTherapy package based on PHITS)

- ✓ DICOM画像 (CT, PET, SPECT) や治療計画 (Plan) データをPHITS入力形式に変換
- ✓ PHITSで計算した3次元線量分布をDICOM RT-Dose形式に変換

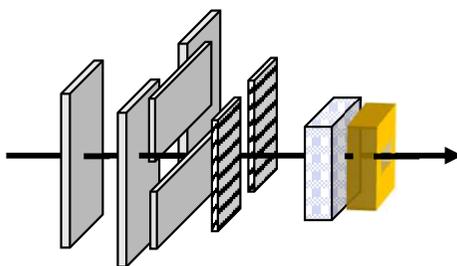
DICOM画像 & 治療計画データ



CT

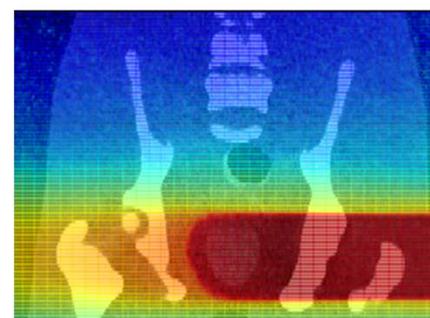


PET/SPECT



RT-plan

市販のDICOMソフト



- ✓ ROI
- ✓ DVH

RT-dose

RT-PHITS (CT2PHITS, PET2PHITS, Plan2PHITS, PHITS2DICOM etc.)

PHITS入力ファイル

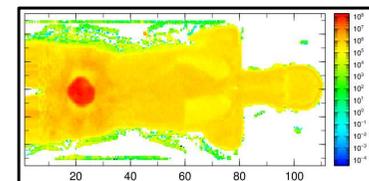


ボクセルファントム

- ✓ RI線源 in xyz mesh
- ✓ Phase space file [source]セクション

PHITS

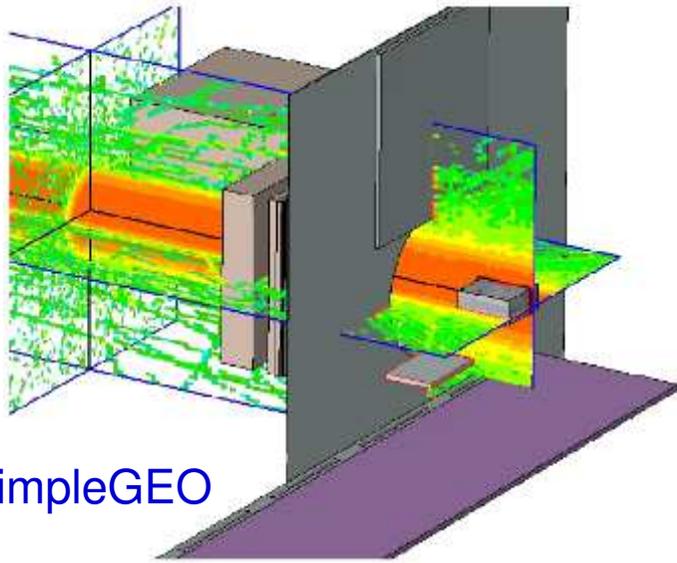
PHITS出力ファイル



3次元線量分布

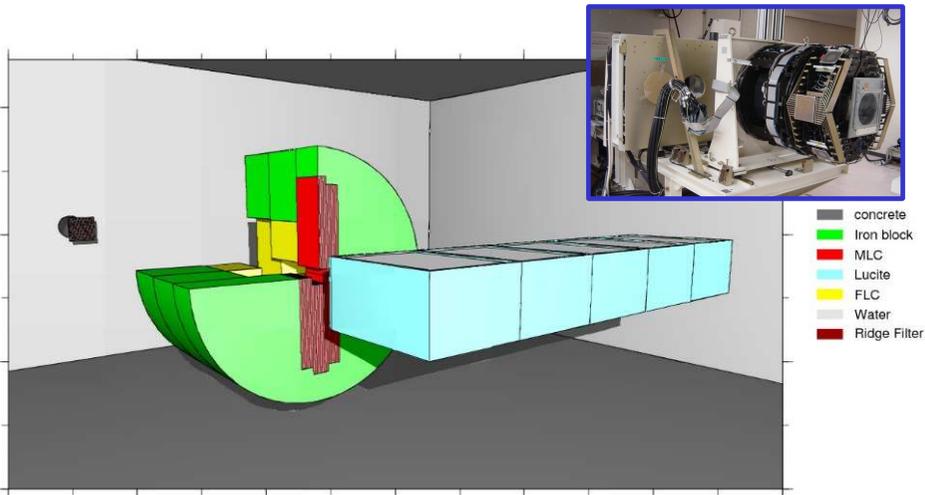
phits/utility/RT-phits

粒子線治療への応用



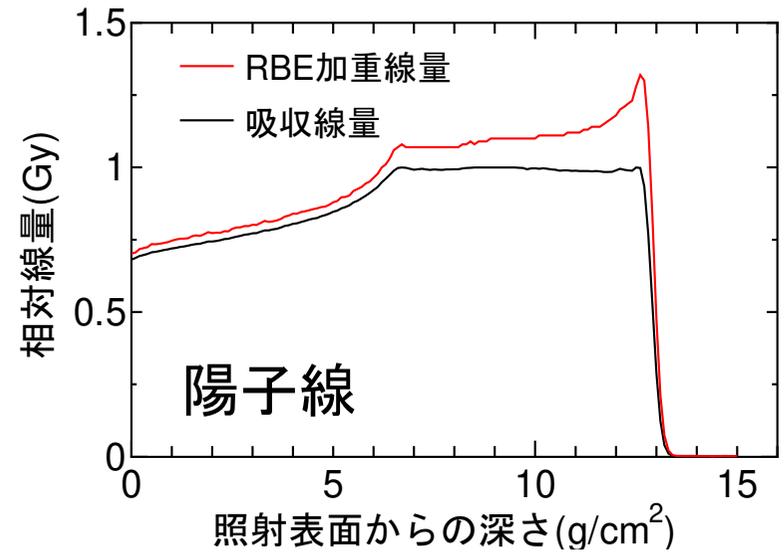
drawn by
PHITS+SimpleGEO

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

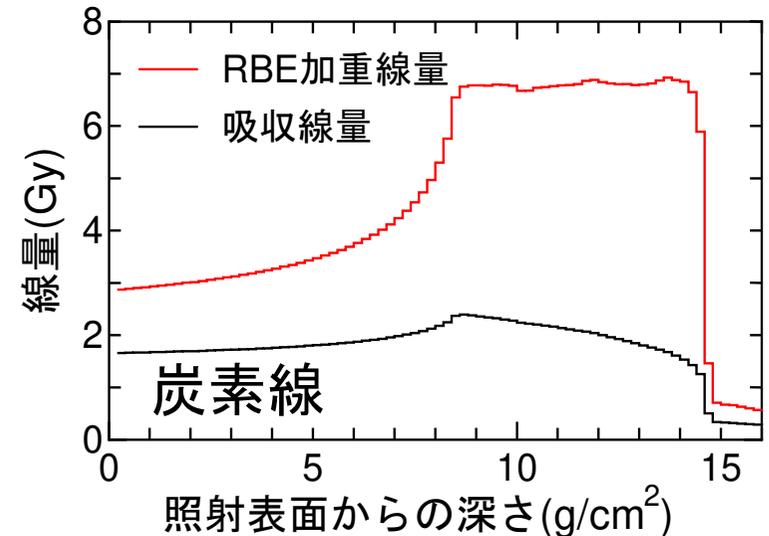


S. Yonai et al. Med Phys. 39, 5028-39 (2012)

粒子線治療場の2次散乱線評価



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

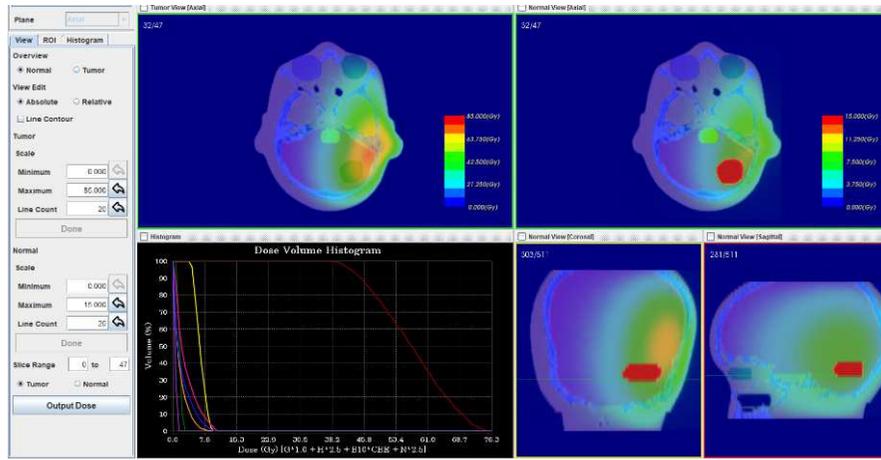


T. Sato et al. Radiat. Res. 171, 107-117 (2009)

吸収線量・RBE加重線量の評価

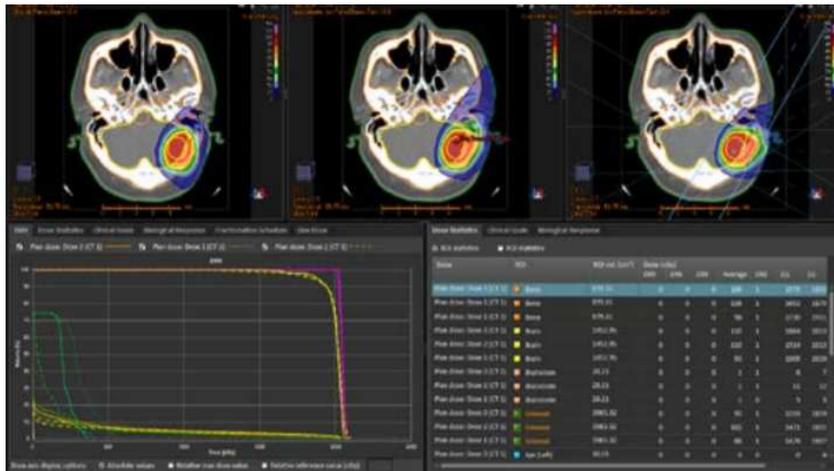
ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) への応用

BNCT用治療計画システム



Tsukuba Plan

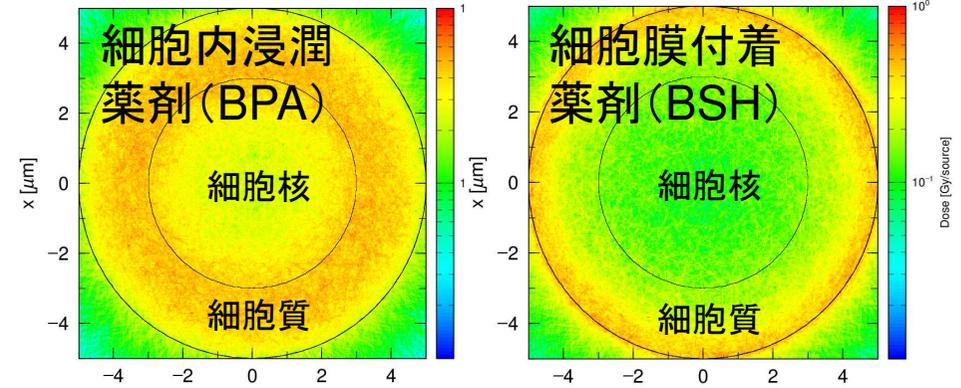
Kumada et al. Appl. Radiat. Iso. 166, 109222 (2020)



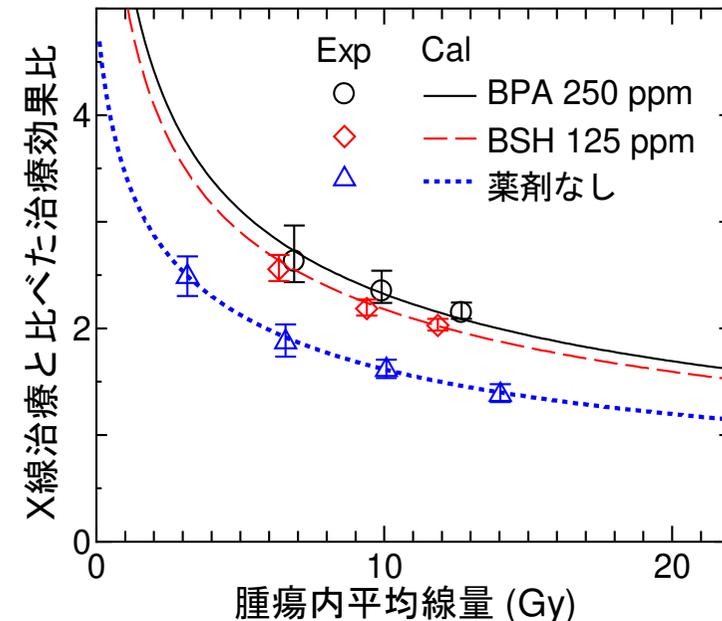
NeuCure™ (住友重機械工業)

医療機器製造販売承認番号 : 30200BZX00083000

薬剤治療効果推定モデル



細胞レベルの線量解析結果



薬剤集積性を考慮した治療効果比の評価

T. Sato et al. Sci. Rep. 8, 988 (2018)

核医学への応用

PHITS-based Application for Radionuclide Dosimetry In Meshes

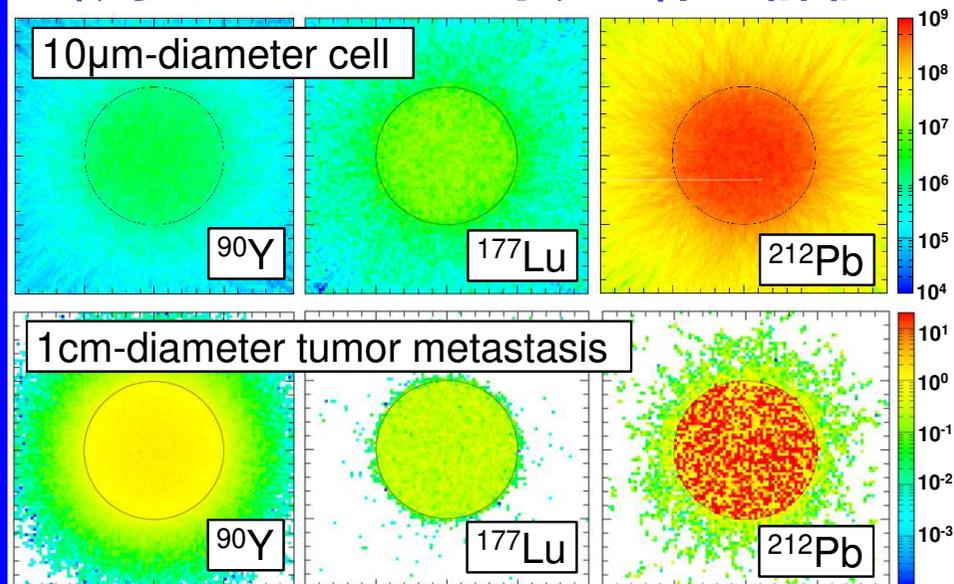


- ✓ メッシュ型人体模型を使って核医学用のPHITS入力ファイルを自動作成
- ✓ 計算結果をParaVIEWで可視化

**Memorial Sloan Kettering
病院で開発され無償公開**

<https://www.paradim-dose.org/>

微小ターゲットに対する線量評価



直径10µmの細胞(上段)と1cmの転移がん(下段)周辺の吸収線量分布

- ✓ α 線や低エネルギー β 線を使った核医学では、微小スケールでの線量不均一性が大きい
- ✓ PHITSを使って細胞や転移がんスケールのS値を評価

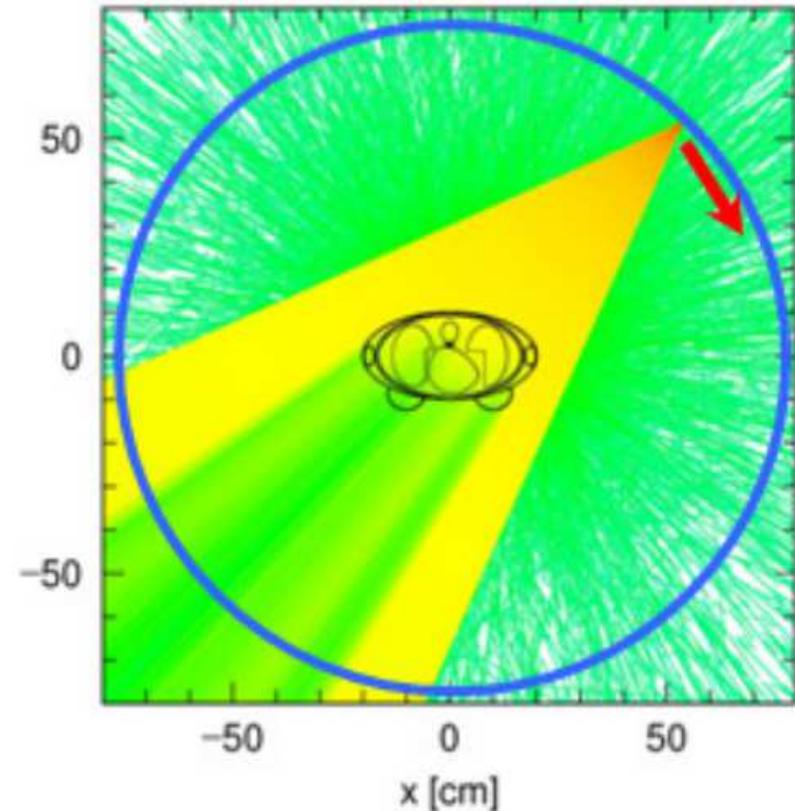
放射線診断への応用

WebベースのCT撮影臓器線量評価ソフトウェア: WAZA-ARI

臓器線量出力欄

Organ / Tissue	Dose (mGy)
Gonad	
Prostate / uterus	
Urinary bladder	
Colon	
Small intestine	
Kidney	
Pancreas	
Gall bladder	
Stomach	
Spleen	
Adrenals	
Liver	
Heart	
Lungs	
Breast	
Esophagus	
Thymus	
Thyroid	
Salivary glands	
Oral cavity	
Out of Thorax	
Lens	
Brain	
Lymphaden	
Muscle	
Skin	
Bone	
Active marrow	

CT機種や人体模型の選択欄



WAZA-ARIのインタフェース

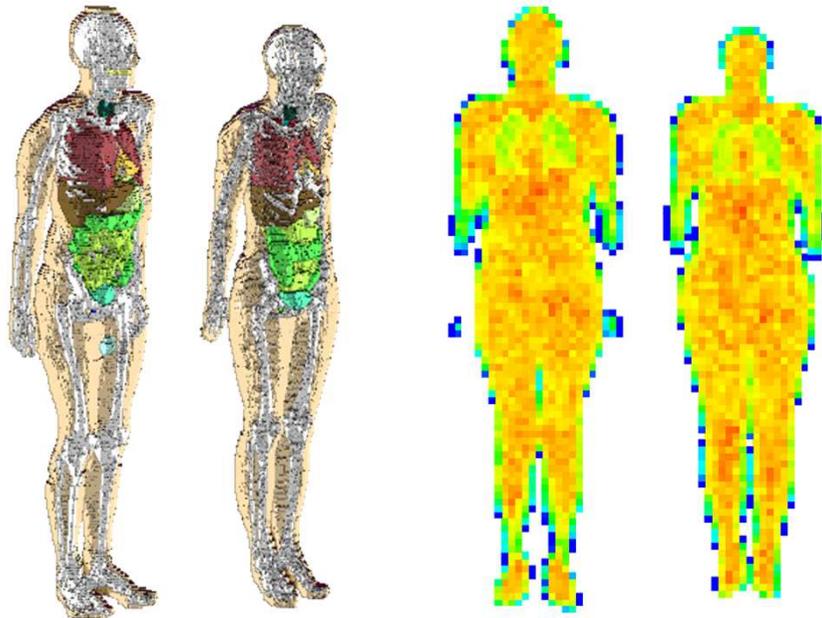
- ✓ 様々なCT機種・患者の体格に対する臓器線量データベースを構築
- ✓ Webベースソフトウェアにすることにより誰でも簡単に評価可能

CTを模擬したPHITS計算例

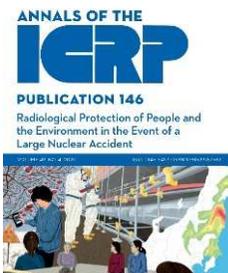
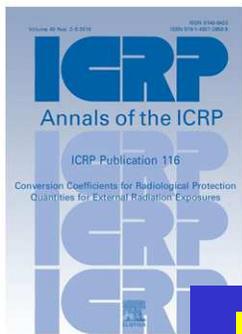
QSTサーバーで公開され、全国約2,000病院で利用された実績

放射線防護分野への応用

線量換算係数の計算



ICRP標準ボクセルファントム

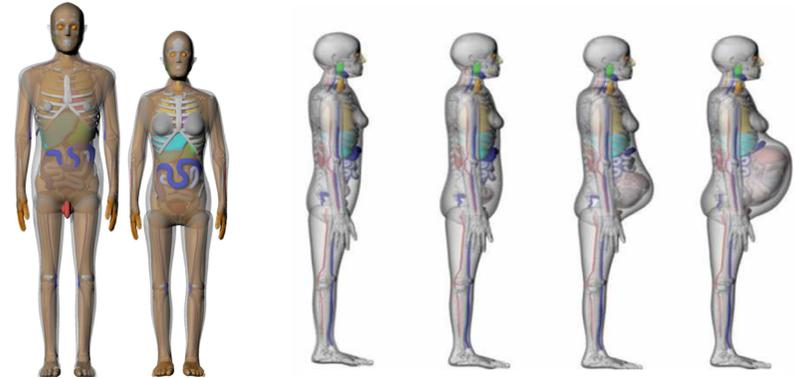


ICRP
Publication
116, 123, 146

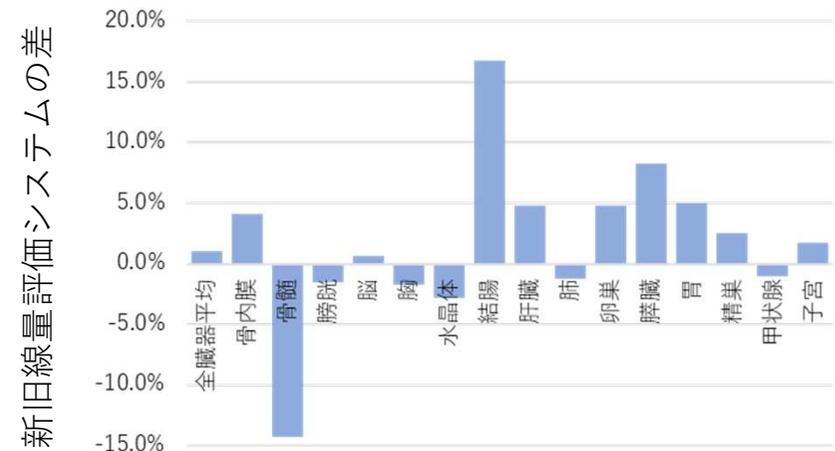
ICRPの評価に活用

T. Sato et al. *Phys. Med. Biol.* 54, 1997 (2009)
D. Satoh et al. *JNST* 53, 69-81 (2015)

原爆被爆者の臓器線量再評価



1945年の日本人体型を再現したファントム

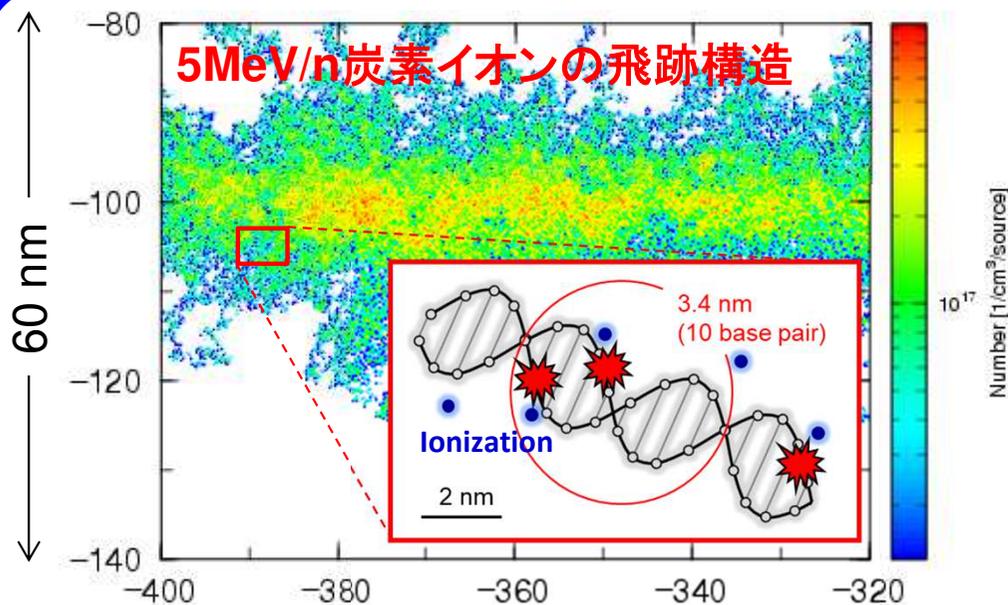


新旧線量評価システムによる結果の差

将来の疫学調査に利用予定

C. Paulbeck et al. *Radiat. Res.* 192, 538 (2019)
T. Sato et al. *Radiat. Res.* 194, 390 (2020)

放射線生物学への応用

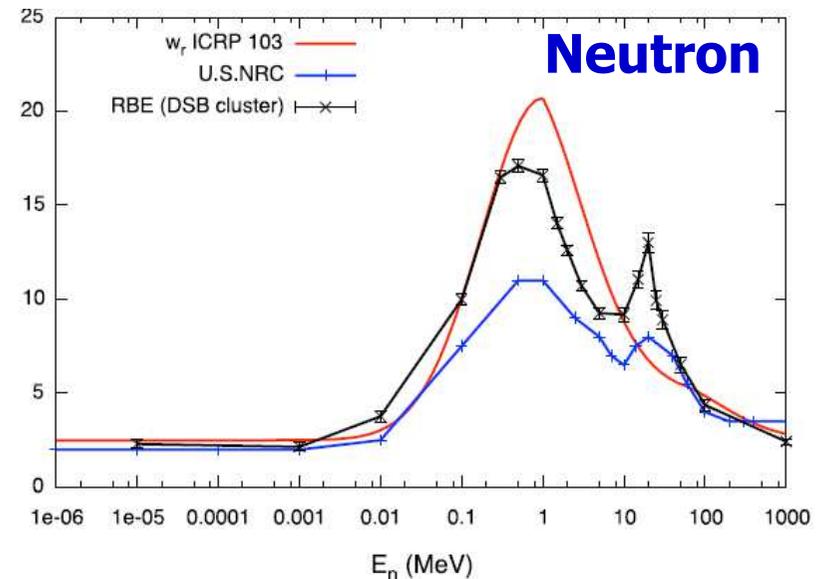


ナノメートルスケールでの電離・励起分布

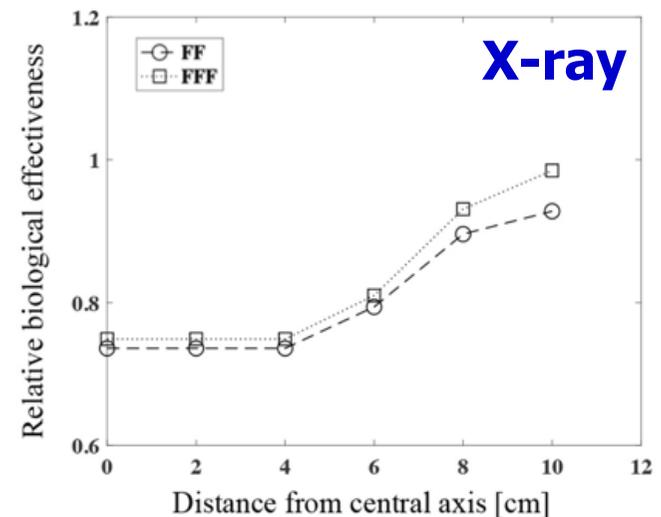
- ✓ 特定の範囲内にある電離・励起数を自動集計してDNA損傷数を推定
- ✓ スタンダードDNAダメージ形式 (SDD) で出力
- ✓ DNA損傷計算用ユーザー定義タリーとしてPHITSパッケージに組込

Matsuya J. App. Phys. 126, 124701 (2019)

DNA二重鎖切断生成率のRBE



Baiocco et al., Sci Rep 6, 34033 (2016)



Nakano et al., BJR Open, 3, 1 (2021)

Table of Contents

1. 概要
2. 物理モデル
3. 応用例
 - 3.1 放射線施設設計への応用
 - 3.2 医療, 放射線防護への応用
 - 3.3 宇宙線挙動解析への応用
 - 3.4 その他の応用
4. まとめ

宇宙線挙動解析への応用で役立つ機能

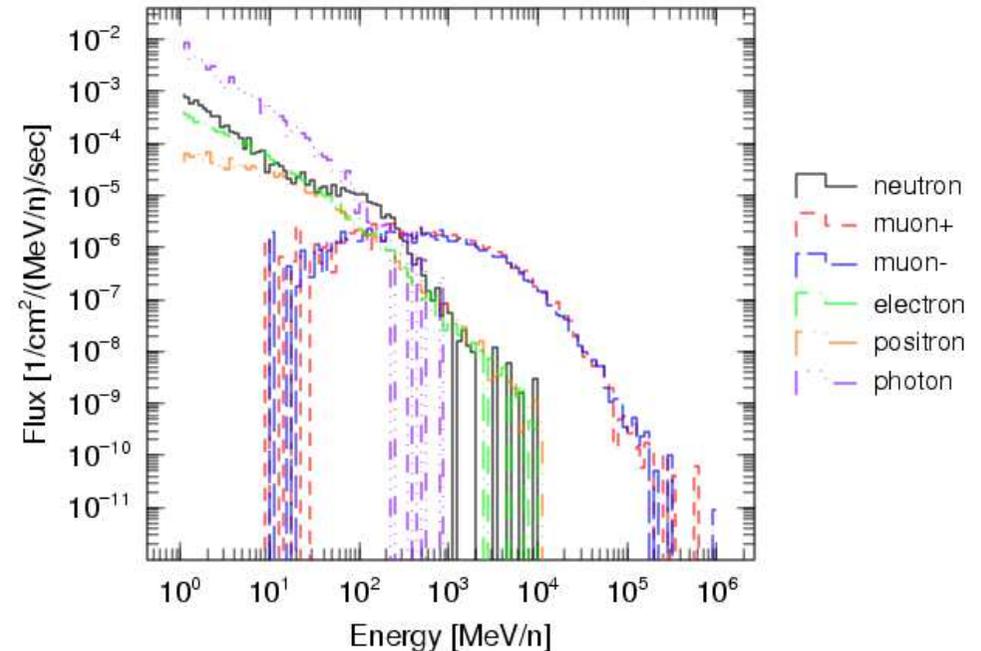
宇宙線線源モード

適用宇宙線タイプ

- ✓ 宇宙空間における銀河宇宙線
- ✓ 大気圏内における銀河宇宙線(大気圏内で発生した2次粒子含む)
- ✓ 宇宙空間における太陽放射線(過去に発生した5つの巨大イベントを模擬)

入力パラメータ

- ✓ 時間(年月日)
- ✓ 場所(緯度・経度・高度もしくは宇宙空間)
- ✓ 宇宙線のエネルギーと角度範囲

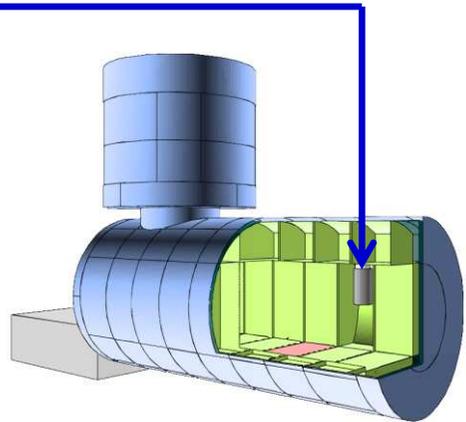
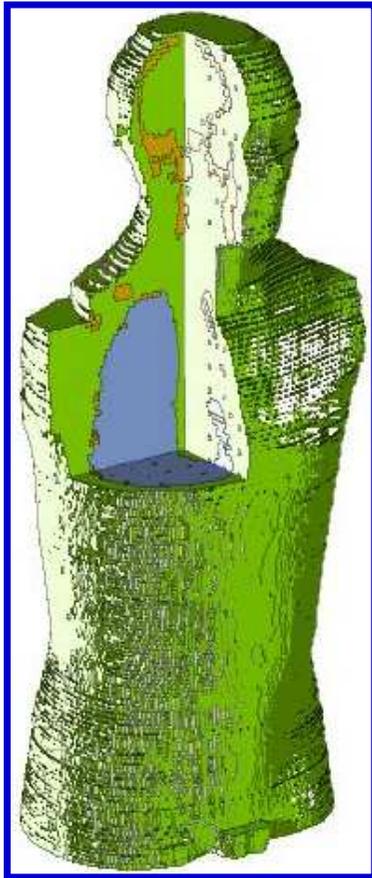


PHITSの宇宙線線源モードで再現したニューヨーク地表面における宇宙線フラックス

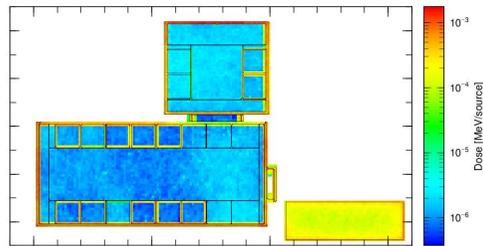
線量当量計算機能

- ✓ 成人男女に対する線量換算係数を使用して各臓器の線量当量を評価
- ✓ 吸収線量に線質係数Q(L)を乗じて特定の場所における線量当量を評価

宇宙飛行士の線量評価への応用

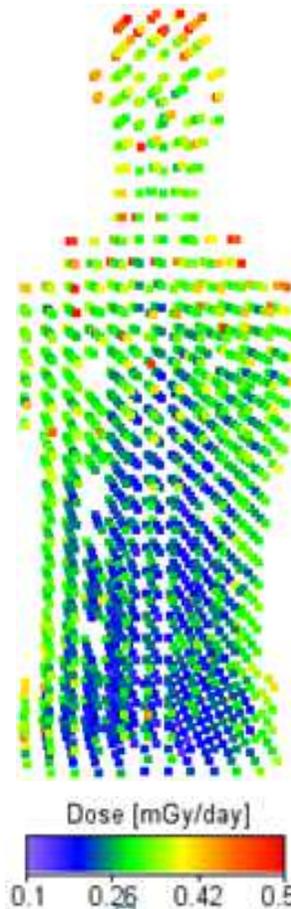


仮想きぼうモジュール



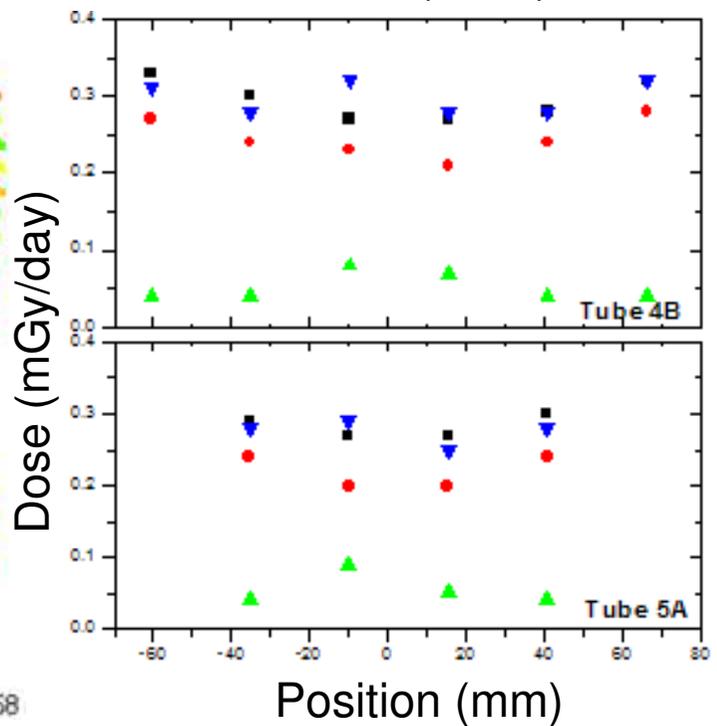
MATROSHKAプロジェクト

放射線検出器を埋め込んだ物理ファントムを国際宇宙ステーションに搭載



Dose [mGy/day]
0.1 0.26 0.42 0.58

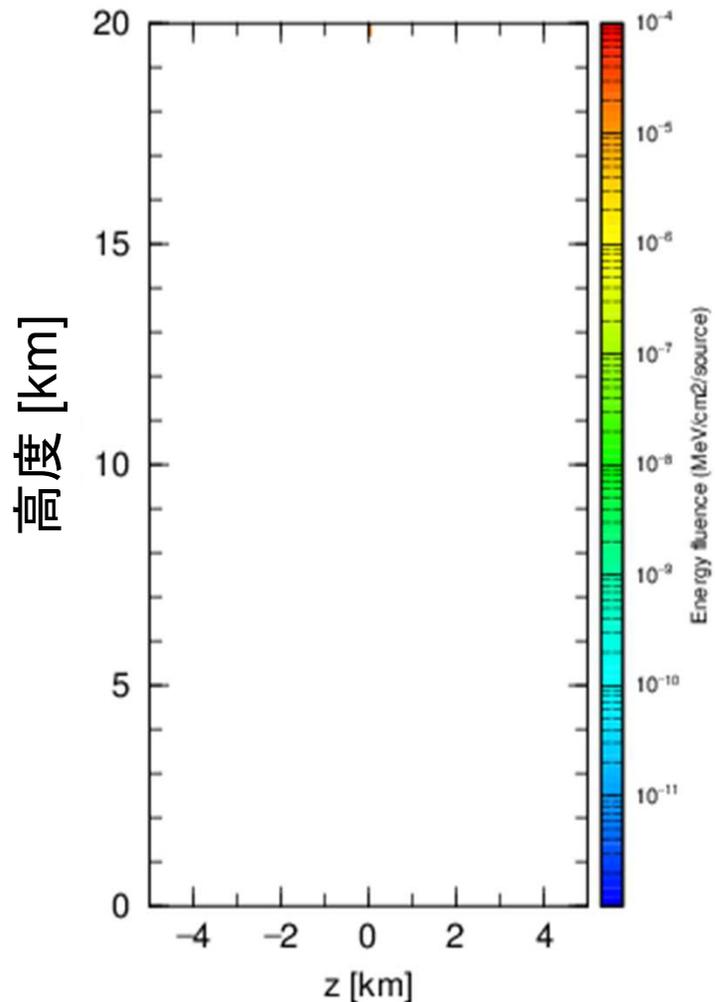
- Exp.
- ▼ Cal. (Total)
- Cal. (T.P)
- ▲ Cal. (GCR)



PHITSシミュレーション結果

オフィシャル計算コード1つとして利用
→実験と計算がよく一致

大気圏内の宇宙線挙動解析への応用



空気シャワーの例

目的

- ✓ 宇宙線被ばくによる航空機乗務員や電子機器への影響評価
- ✓ 宇宙線起因核種を用いた年代測定やミュオンラジオグラフィのデザイン

PHITS シミュレーションと数学モデル化

- ✓ 様々な条件に対する空気シャワーシミュレーションを実施
- ✓ その結果を系統的に解析して大気圏内任意地点・時間における宇宙線フラックスを再現する数学モデルを構築

アウトカム

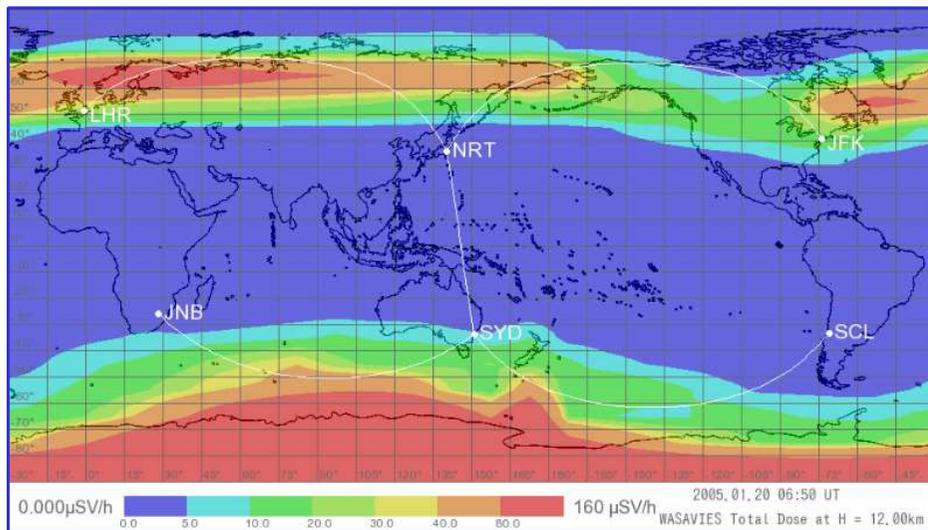
- ✓ **PARMA**: PHITSの宇宙線線源モードに利用
- ✓ **EXPACS**: EXCELで簡単に使えるPARMA
<https://phits.jaea.go.jp/expacs>

- ✓ 日本の航空会社による航空機乗務員被ばく線量管理や年代測定高精度化に貢献
- ✓ 地球惑星科学分野でも幅広く利用（宇宙線強度と気温や火山活性度の相関など）

太陽フレアの影響評価への応用

航空機被ばく警報システム WASAVIESの開発

- ✓ 巨大な太陽フレア時における被ばく線量率増加をリアルタイムで検知し、航空会社に警報を発信
- ✓ 太陽放射線が引き起こす空気シャワーシミュレーションにPHITSが利用

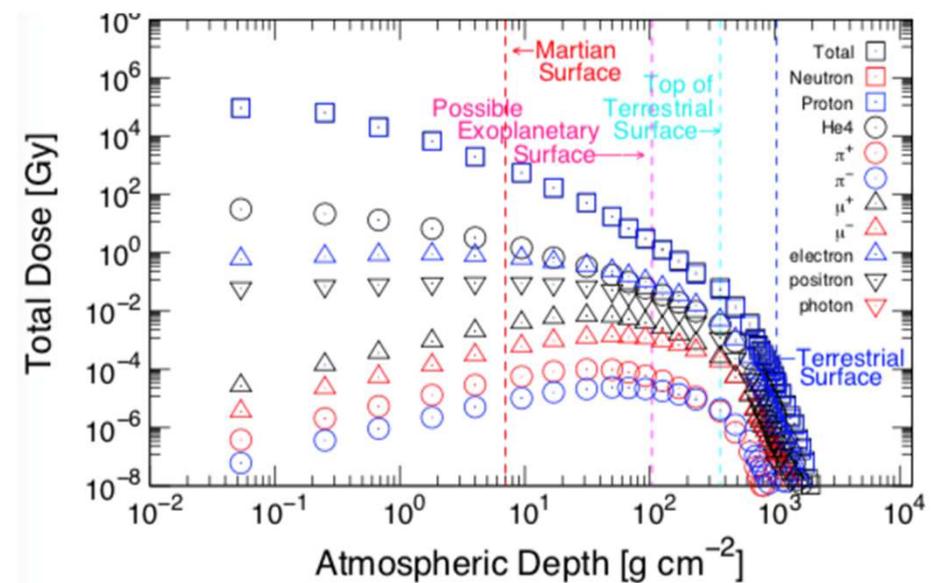
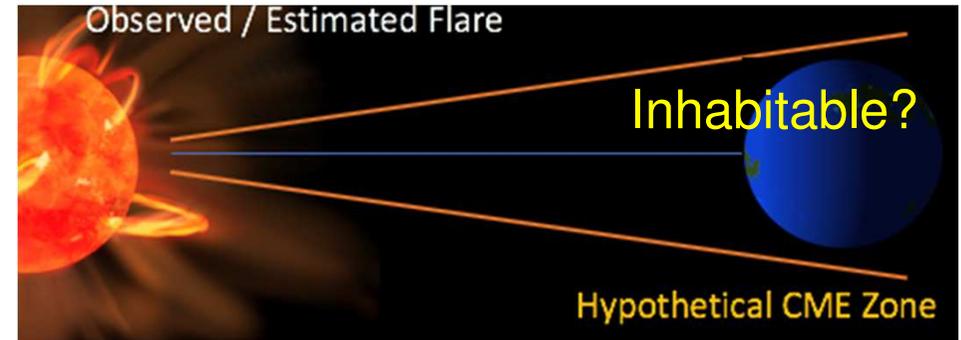


2005年1月に発生した太陽フレアのピーク時における高度12kmでの被ばく線量率

T. Sato et al. Space Weather 16, 924 (2018)

<https://wasavies.nict.go.jp/>

恒星フレアの系外惑星生命 居住可能性への影響評価



理論上最大級の恒星フレアが発生した場合の系外惑星大気圏内の吸収線量

YA Yamashiki et al. ApJ 881, 114 (2019) 37

Table of Contents

1. 概要
2. 物理モデル
3. 応用例
 - 3.1 放射線施設設計への応用
 - 3.2 医療, 放射線防護への応用
 - 3.3 宇宙線挙動解析への応用
 - 3.4 その他の応用
4. まとめ

検出器設計への応用で役立つ機能

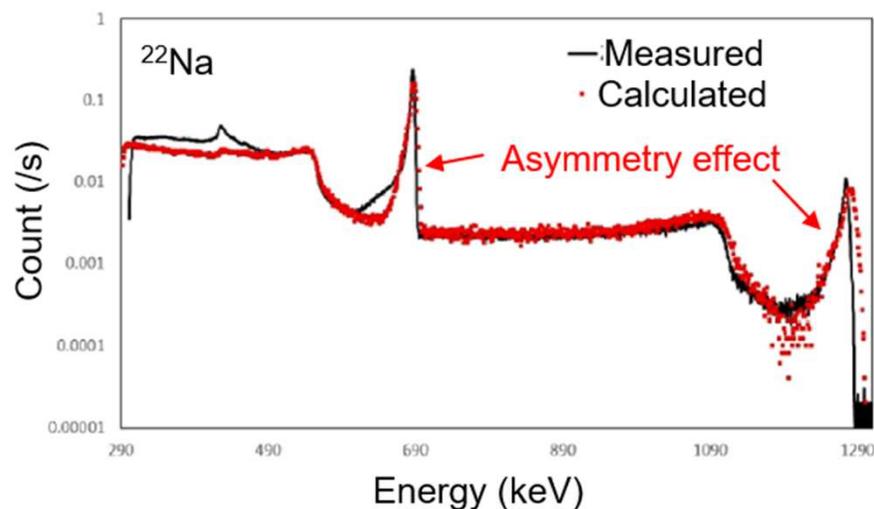
検出器分解能を考慮する機能

- ✓ ファノ因子で表現したガウス分布

$$f(E_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(E_L - E)^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$\text{with } \sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + FE}$$

- ✓ ユーザー独自関数

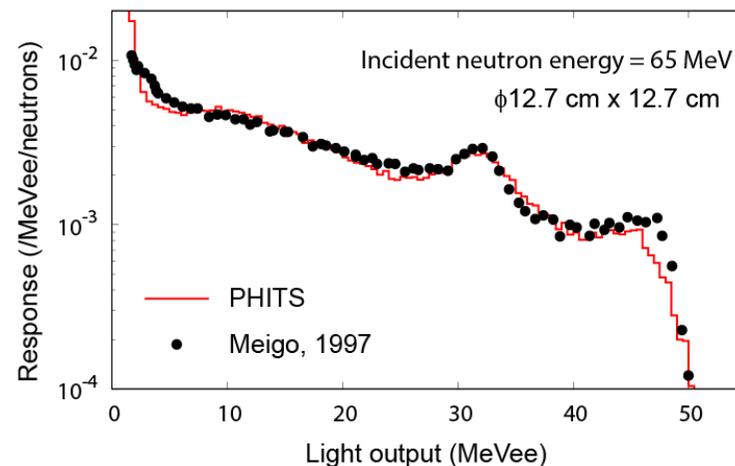


非対称効果を考慮して計算した
CdZnTe検出器の応答関数

SCINFUL-QMD*モード

- ✓ SCINFUL-QMD: 有機シンチレータの
応答関数専用計算コード
- ✓ 精度の高い中性子・炭素反応断面積
- ✓ 消光効果を考慮した付与エネルギー
から発光量への変換係数

複雑な形状や線源に対する有機シン
チレータの応答関数を計算可能

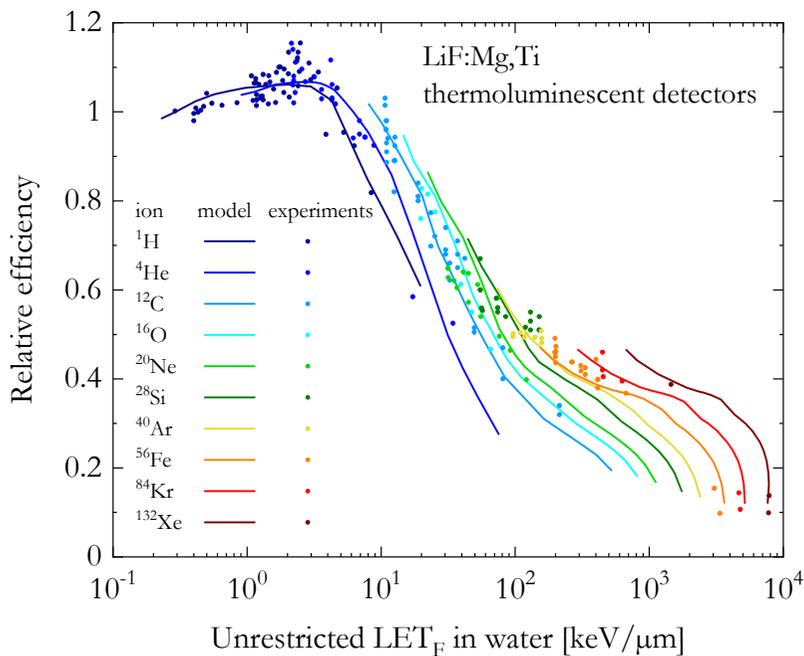


65MeV中性子入射に対する有機液体
シンチレータの応答関数

検出器設計への応用

マイクロジメトリ $d(z)$ モデル

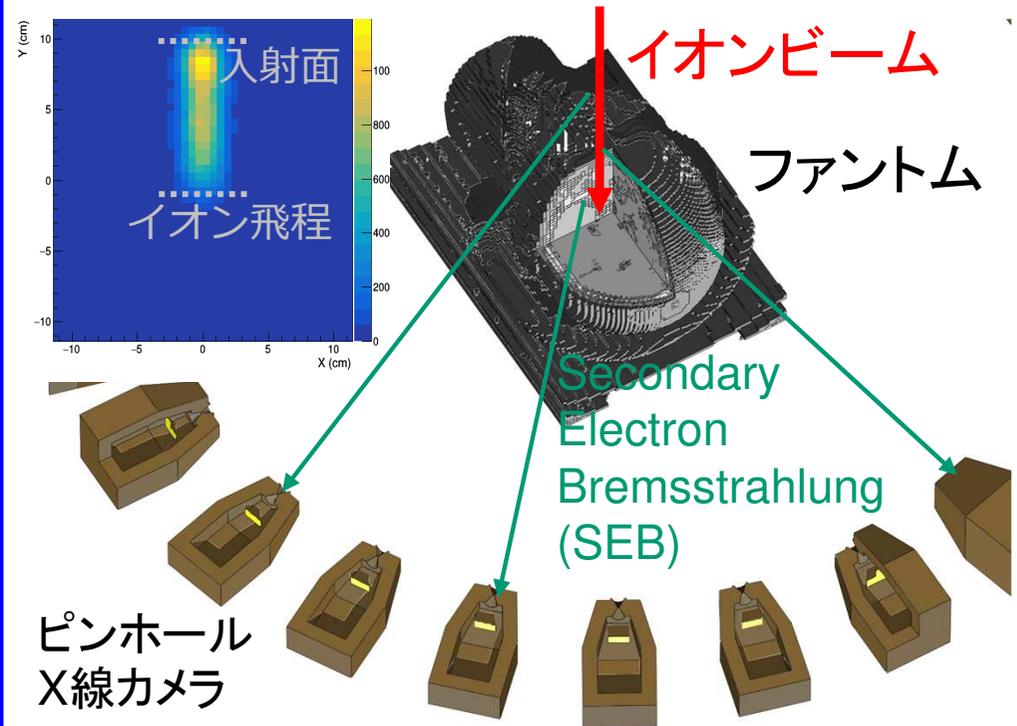
- ✓ 微小空間における線量分布 $d(z)$ に基づいて検出器応答を決定するモデル
- ✓ LETでは表現できなかったイオン種依存性を再現
- ✓ PHITSのマイクロジメトリ機能が活用



LETの関数として表したTLD (LiF:Mg,Ti) 検出器の様々なイオンに対する応答

イオンビームイメージングシステム

- ✓ 2次電子制動放射(SEB)を検出することにより粒子線治療の飛跡を検出
- ✓ SEBフラックスの正確な推定が不可欠
- ✓ PHITSの δ 線生成機能と誘導放射能計算機能が活用

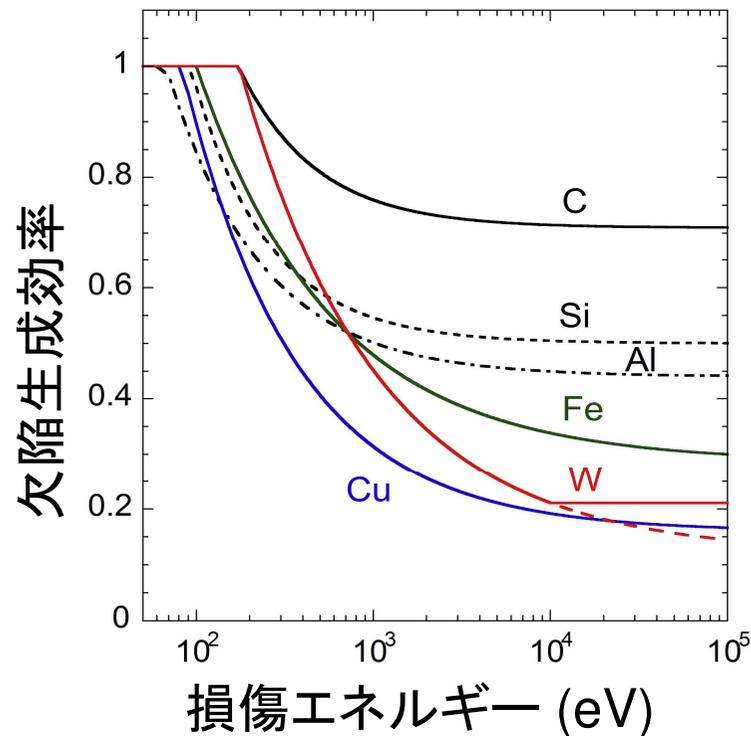


システム全体の概要

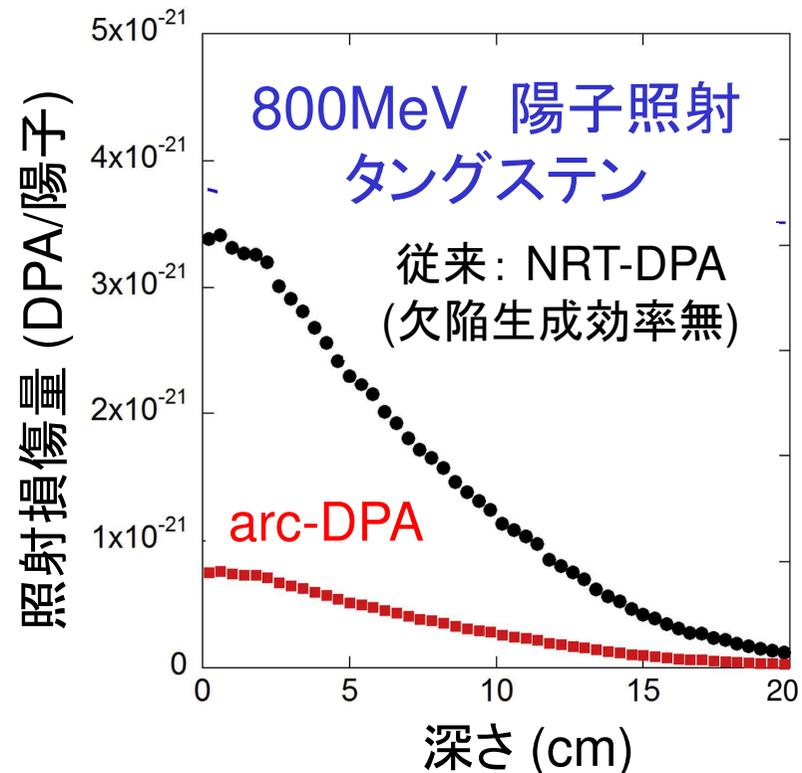
材料物質科学への応用

DPA計算機能

- ✓ DPAとは？→放射線照射により結晶格子からはじき出される原子数の平均値
→照射損傷の指標。DPAが大きくなると延性などの材料特性が劣化する
- ✓ PHITSのDPA計算機能の特徴→従来指標(NRT-DPA)のみならず、材料の欠陥生成効率を考慮した新しい指標(arc-DPA)も計算可能



組み込んだ欠陥生成効率の例



陽子照射時のタングステン中のDPA分布

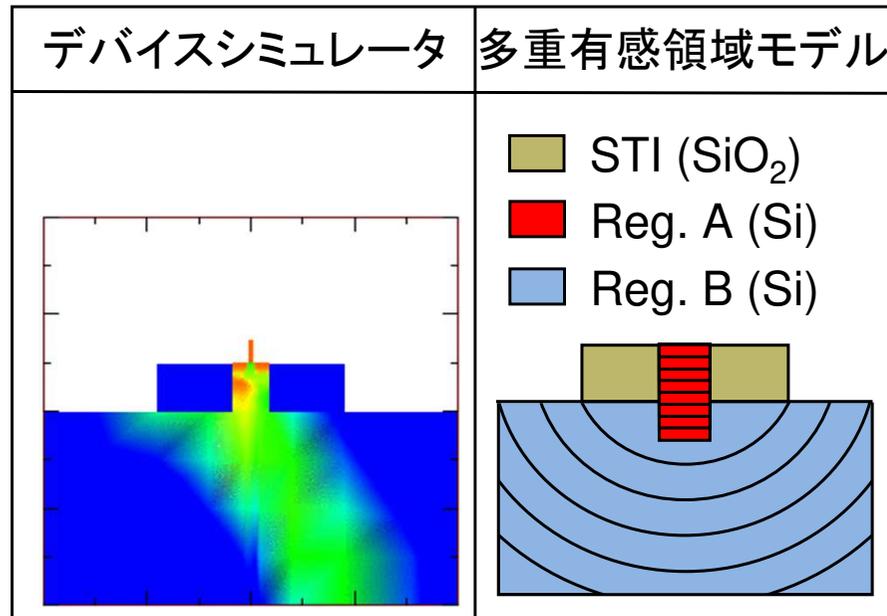
デバイス工学への応用

半導体ソフトエラー発生率評価

- ✓ 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現象
- ✓ 地上環境では、宇宙線中性子が半導体内で引き起こす核反応が主因

イベントジェネレータと宇宙線線源モードが有用

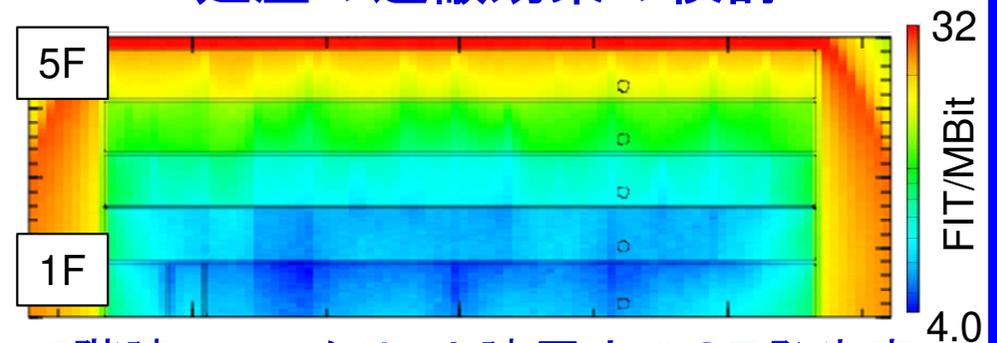
ソフトエラー発生率評価モデルの開発



高精度

短計算時間

建屋の遮蔽効果の検討



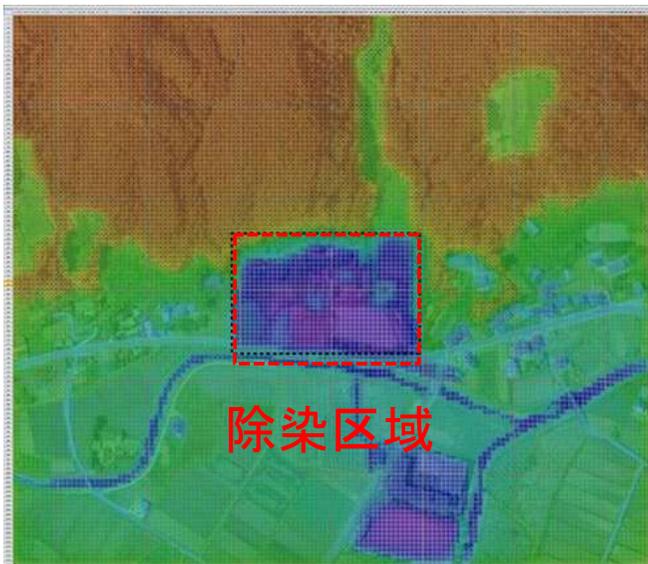
5階建てコンクリート建屋内のSE発生率

- ✓ ソフトエラー発生率はコンピュータを下層階に設置することにより低減可能
- ✓ 遮蔽の効いた環境ではミューオン捕獲反応によるソフトエラーが無視できない

シビアアクシデントへの応用

除染効果システムCDE

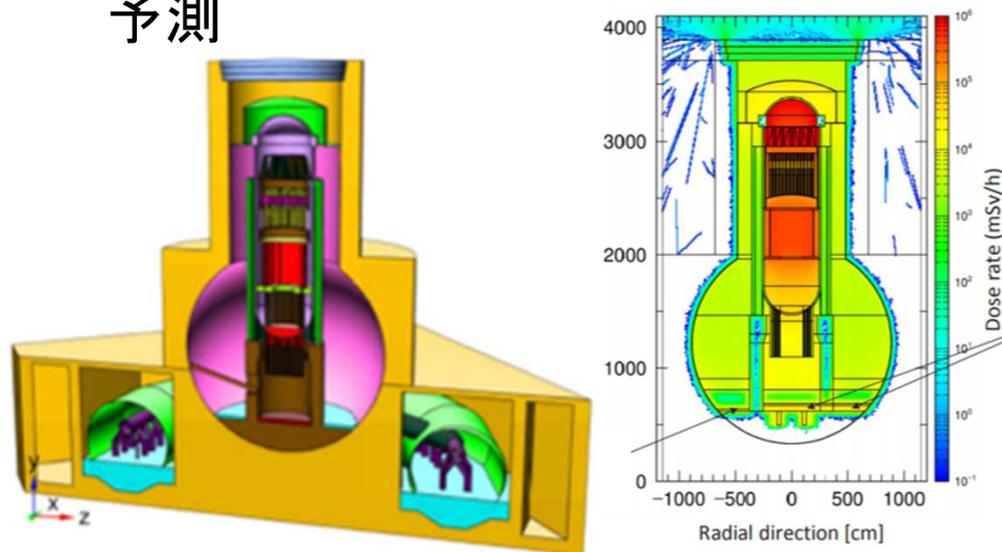
- ✓ 除染作業後の空間線量率を予測するEXCELソフトウェア
- ✓ 地表面での放射能濃度と空間線量率の関係をPHITSでデータベース化
- ✓ 国の除染計画策定に利用



CDEで推定した除染後の空間線量率

廃炉設計

- ✓ 廃炉工程の最適化のためには、プラント内の線量率分布を予測することが不可欠
- ✓ 内部調査情報とPHITSによる計算を組み合わせ、最確な線量率分布を予測

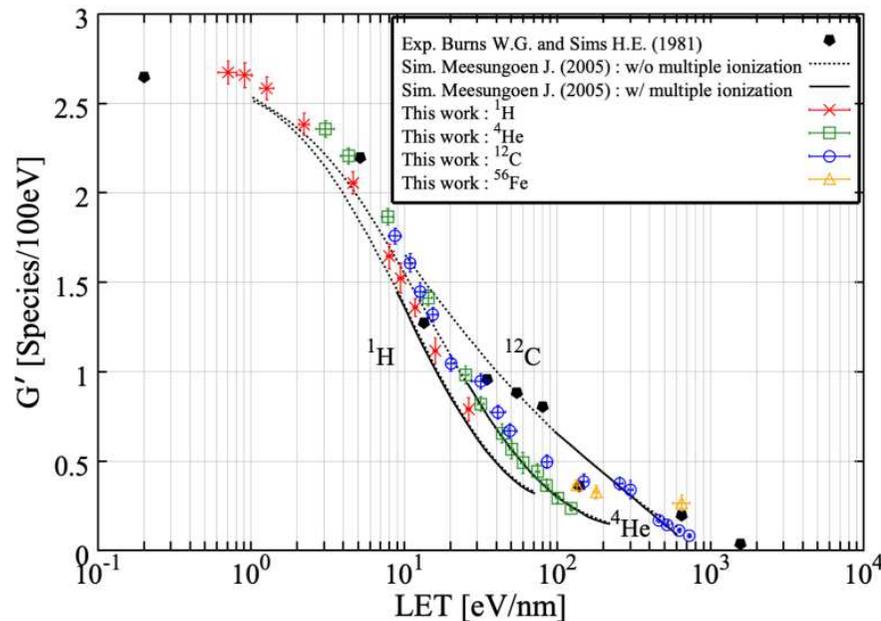


福島第一原子力発電所の線量率分布を予測したシミュレーション

ラジカル生成G値の推定モデル開発（将来計画）

背景 & 目的

- ✓ ラジカル生成G値の推定は、放射線化学や放射線生物で極めて重要
- ✓ G値はLETのみならずイオン種にも依存
 - 飛跡構造解析やマイクロジメトリ機能が有効
- ✓ マイクロジメトリに基づく検出器効率推定モデルのG値版を開発できないか？



OHラジカルG値のLET依存性

Baba et al. Sci Rep (2021)

現状

- ✓ 飛跡構造解析モードを使えば水和電子の生成率は計算可能
- ✓ ラジカル生成G値は計算できない
- ✓ ラジカルの拡散やラジカル同士の反応は全く考慮できない

今後の重点開発項目！

Table of Contents

1. 概要
2. 物理モデル
3. 応用例
 - 3.1 放射線施設設計への応用
 - 3.2 医療, 放射線防護への応用
 - 3.3 宇宙線挙動解析への応用
 - 3.4 その他の応用
4. まとめ

PHITSの特長

- ◆ 幅広いエネルギー範囲の全ての放射線挙動を解析可能
- ◆ 簡単に使えるインタフェースと画像出カツール
ANGEL、PHIG-3Dなど
- ◆ 洗練された物理モデルとデータライブラリ
JQMD、JENDL、イベントジェネレータモード、飛跡構造解析モードなど
- ◆ 様々な用途に使える特殊機能とサブプログラム
RI・宇宙線線源、マイクロジメトリ機能、RT-PHITSなど

- ✓ 世界50ヶ国以上で幅広く利用
- ✓ ユーザー数は年間約1,000名ペースで増加

教育版PHITSも公開中(大学の講義で利用可能)

より詳しく知りたい方は

PHITS

Particle and Heavy Ion Transport code System

Home | News | How to Get | How to Use | Samples | Tutorial schedule | Update log | FAQ | Reference | Contact | 日本語

Last Update : 2021/03/08

What is new?

2021/03/08: Upload PHITS-user distribution maps since FY2019 (at the bottom of this page)
2020/10/21: Announcement of PHITS online tutorial (detail)
2020/05/25: Upload instruction for how to couple with thermal fluid dynamics (detail)
2020/04/09: Release of update patch from PHITS3.10 (or later) to PHITS3.30 (detail)
2020/01/07: Announcement of PHITS course in Argentina (detail)
2019/10/31: Release of update patch from PHITS3.10 to PHITS3.17 (detail)
2019/10/17: Release of update patch from PHITS3.10 to PHITS3.16 (detail)
2019/09/25: Instructions for how to convert dump files between PHITS and other Monte-Carlo codes (detail)
2019/09/06: Announcement of PHITS course in Myanmar (detail)
2019/04/09: Release of PHITS 3.10 and introduction of new export control policy (detail)
2019/03/01: Addition of information about operation environment in "How to Use" (detail)
2018/01/16: Sample user-defined tally for [-deposit] with out-of-deposit is uploaded (detail)
2018/01/09: Publication on the latest PHITS (Ver.3.02) (detail)
2017/08/24: Lecture notes were updated (detail)
2017/02/02: Registration of PHITS 3.00 in IAEA/NEA Databank
2016/12/22: Upload instruction how to use Paraview coupled with PHITS (detail)
2016/09/30: Release of update patch to PHITS2.80 (detail)
Log of PHITS information before Aug. 2016: [link](#)

公式ホームページ

- ✓ 更新版リリース情報やPHITS講習会の案内を掲載
- ✓ 質問・バグ報告 (PHITS事務局に直接送りたい場合)

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



Phits

フォロワー727人

Facebook

「いいね」

最新のバグ情報や便利な使い方などをこまめに更新

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

PHITS



あなたの投稿に返信があったときライブ通知しますか? 通知を有効にする

すべてのカテゴリ | すべてのタグ | 最新 | トップ | カテゴリ

月 6月10日 - 7月10日

注トピック

A review paper on the medical application of PHITS

news | [medical application](#)

0

31

5日

Syntax highlighting and execution of PHITS input files support for Sublime Text

editor | [github.com](#)

0

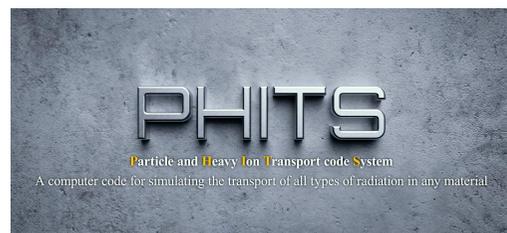
52

11日

ユーザー掲示板 ぜひご利用ください!

質問やバグ情報などをユーザー同士で共有

<https://meteor.nucl.kyushu-u.ac.jp/phitsforum/>



Youtube

プロモーション動画。講習会動画もアップロード予定

<https://www.youtube.com/watch?v=G6-XTIctRgA>