

PHITS ver.3.24の概要

PHITS開発チーム一同

2021/03

最近の更新履歴

2019年04月：輸出管理規定を変更し海外へ直接配布開始

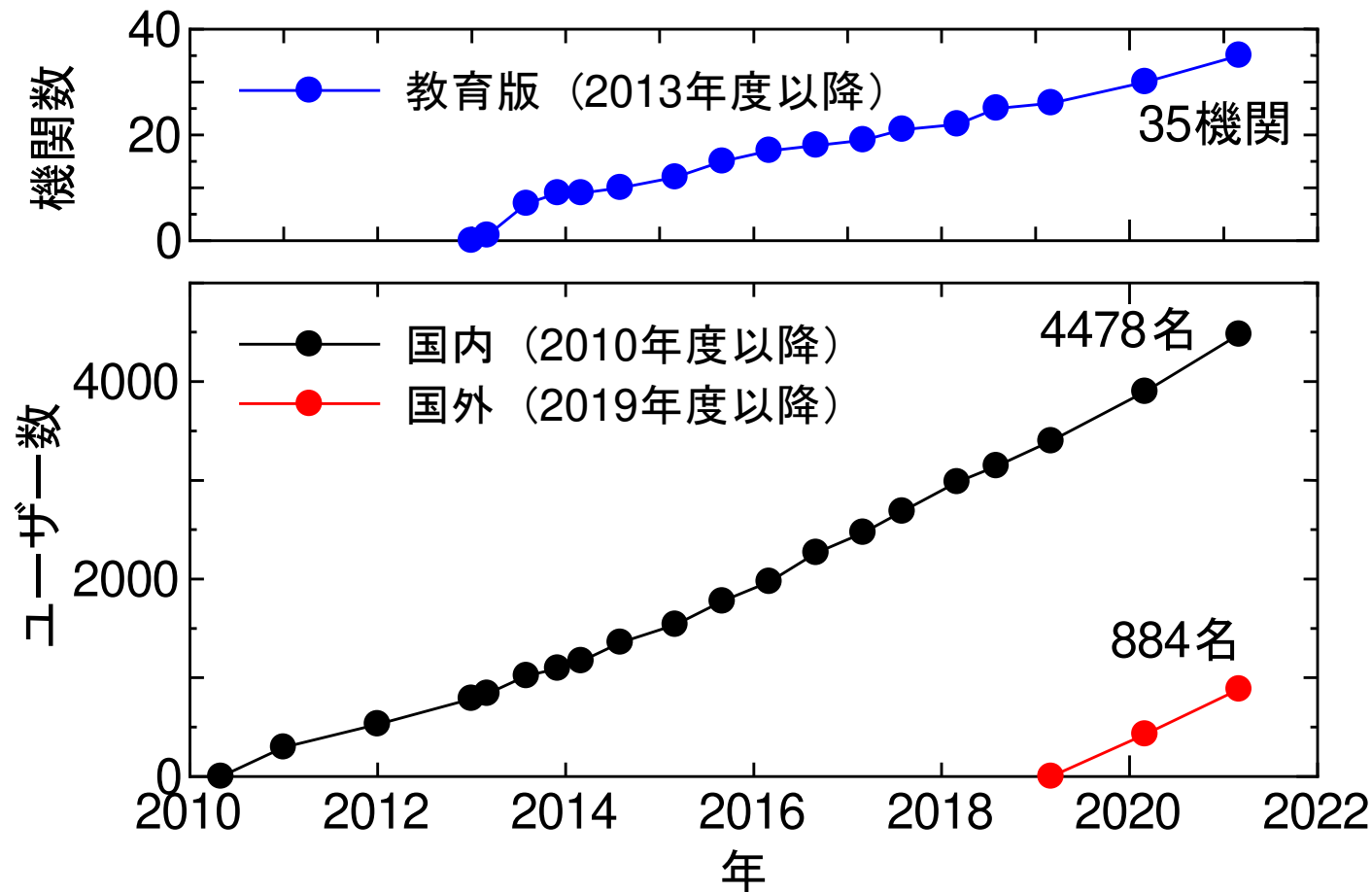
2019年11月：PHITS 3.17を講習会で配布開始

2020年04月：PHITS 3.20をRISTに登録

2020年10月：PHITS 3.22を講習会で配布開始

2021年03月：PHITS 3.24をRISTに登録

PHITSユーザー数の変化

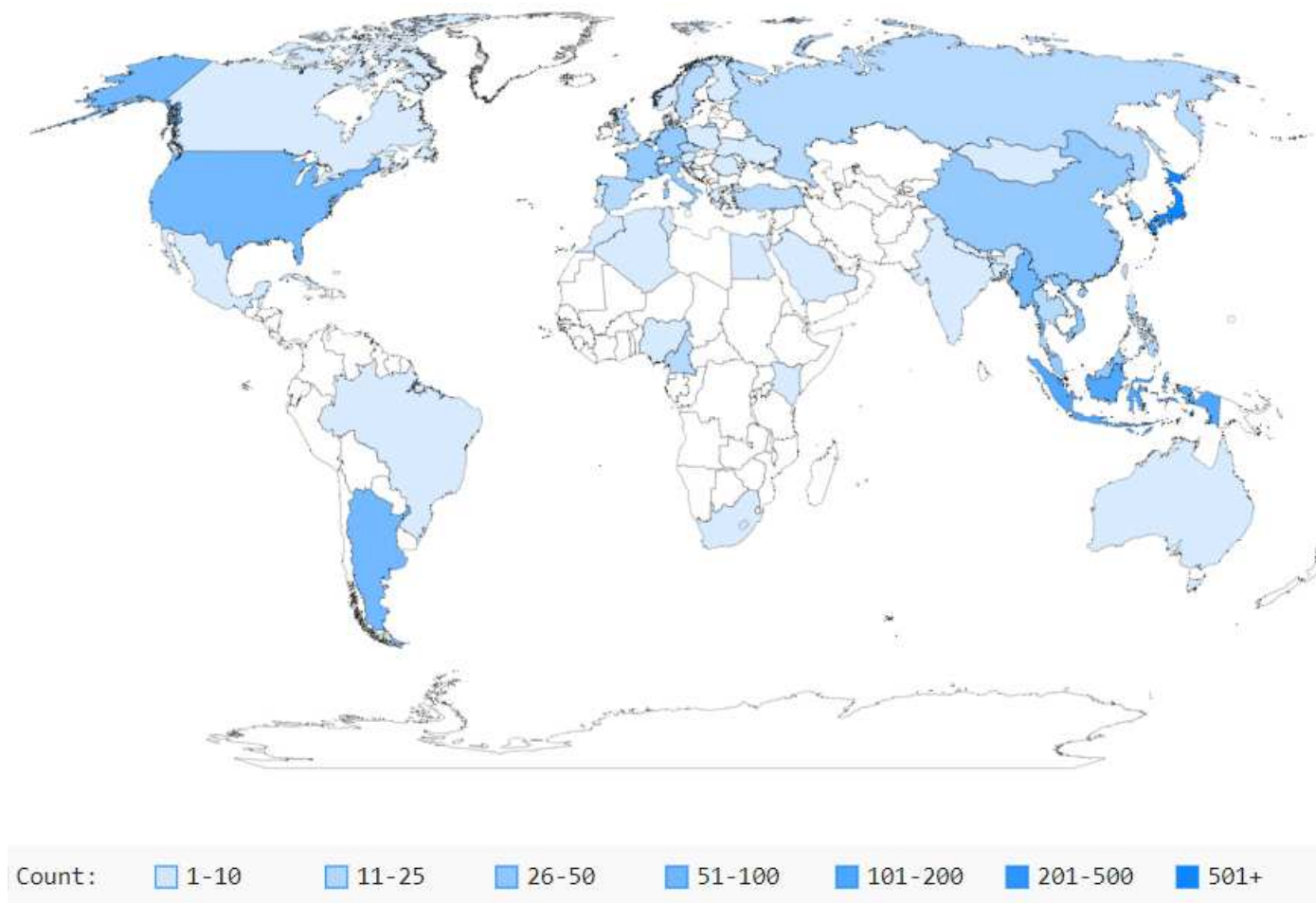


PHITSユーザー数*

5,000名突破！！

*国内:PHITS講習会に参加, もしくはRISTを通してPHITSを入手した人数
国外:2019年度以降に原子力機構より直接入手した人数

国別ユーザー数（2019年度以降）



2019年度以降の国別ユーザー数*

*2021年3月8日時点、所属機関の国でカウント

Top 10 countries

Country	#users
Japan	1018
Indonesia	112
United States	88
Myanmar	79
Argentina	68
South Korea	46
France	43
Malaysia	39
Germany	32
Italy	31

2年間で53ヶ国から1,886名が新規ユーザー登録！

https://phits.jaea.go.jp/usermap/PHITS_map_userbase.html

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	EGS5	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		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	200 MeV		
	20 MeV	1 MeV	10 MeV/u	ATIMA + オリジナル		
	核データ ライブラリ JENDL-4.0	電離損失 ATIMA 1 keV or *飛跡構造解析 KURBUC		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

PHITS3.24に組み込まれた物理モデルとその適用エネルギー範囲

PHITS 3.20から大きな変更点なし

最近の改良点①：PHITS3.22

2020年9月から配布開始

PHITS3.20からの主な変更点(担当者)

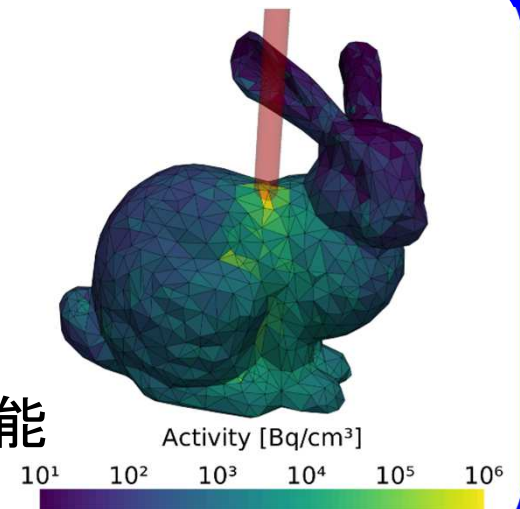
- ✓ [t-dchain]及びDCHAIN-PHITSの改良(Ratliff、松田、安部、古田、岩元)^{*1)}
- ✓ 有機液体シンチレータ応答関数計算コードSCINFUL-QMDの組込(佐藤)^{*2)}
- ✓ 断面積やカーマファクターの直接出力機能(icntl = 1)の整備(佐藤、橋本)
- ✓ 逆解きモンテカルロ(Adjointモード)の導入(佐藤)^{*3)}
- ✓ ICRU90に示された阻止能を使った計算機能の追加(佐藤)^{*4)}
- ✓ OpenMP並列のタリーメモリを非共有化し、ヒストリー分散に対応(古田)^{*5)}
- ✓ 加速器ビーム線源モードの拡張(佐藤)^{*6)}

1. 原子力機構・システム計算科学センターの支援のもとRISTの三浦孝充氏の協力により実施
2. 原子力機構・放射線挙動解析研究Grの佐藤大樹博士の協力により実施
3. 原子力機構・システム計算科学センターのAlex Malins博士の協力により実施
4. 高エネルギー加速器研究機構 波戸芳仁博士及び産業技術総合研究所の清水森人博士の協力により実施
5. 原子力機構・システム計算科学センターの支援のもと日本ヒューレット・パッカード株式会社の白井信裕氏の協力により実施
6. 量子科学技術研究開発機構の榊泰直博士の協力により実施

[t-dchain]とDCHAIN-PHITSの改良

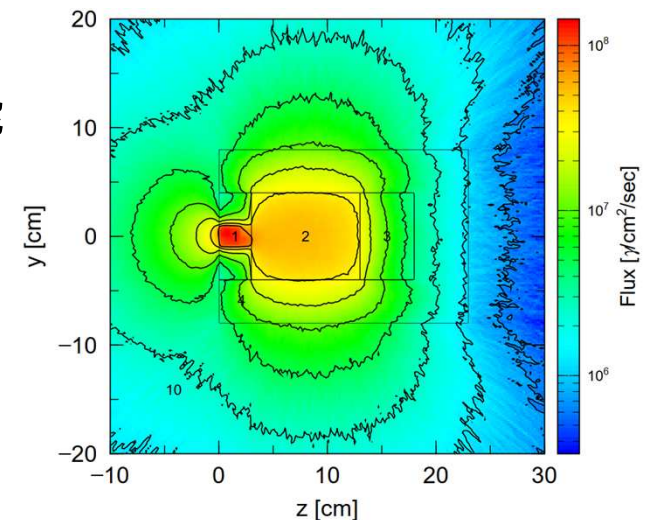
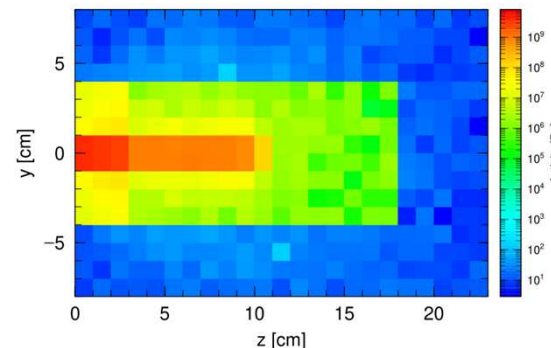
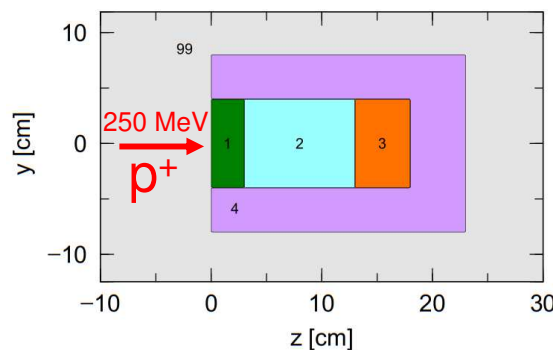
主な改良点

- ✓ PHITSからDCHAINへの統計誤差の引き渡し機能
- ✓ ハイブリッド放射化断面積ライブラリの整備
例) JENDL/AD + FENDL/A + JENDL-4.0 + ENDF + JEFF
- ✓ 光子線量換算係数の更新(ICRP 116 & ICRP 74)
- ✓ ビーム出力と組み合わせた誘導放射能時間変化表示機能
- ✓ 連続四面体ジオメトリへの適用



PHITS → DCHAIN-PHITS → PHITSの接続計算による誘導放射能線量評価

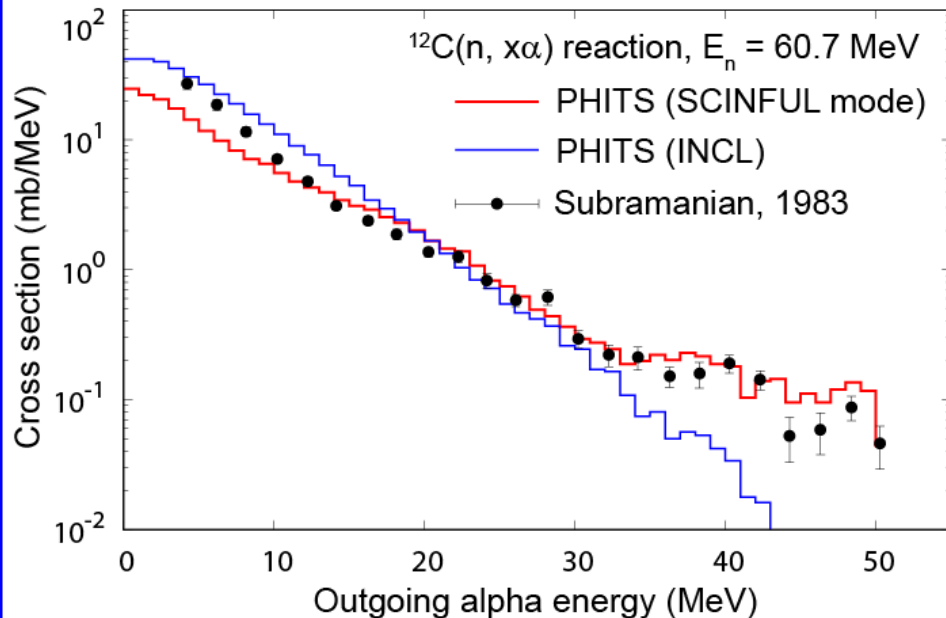
DCHAIN-PHITSで自動出力される[source]セクション
(* .pht)を使って誘導放射能による線量評価が簡単に可能



PHITS(収率・中性子フラックス) → DCHAIN-PHITS(誘導放射能) → PHITS(γ線フラックス・線量)

SCINFUL-QMDモードの実装

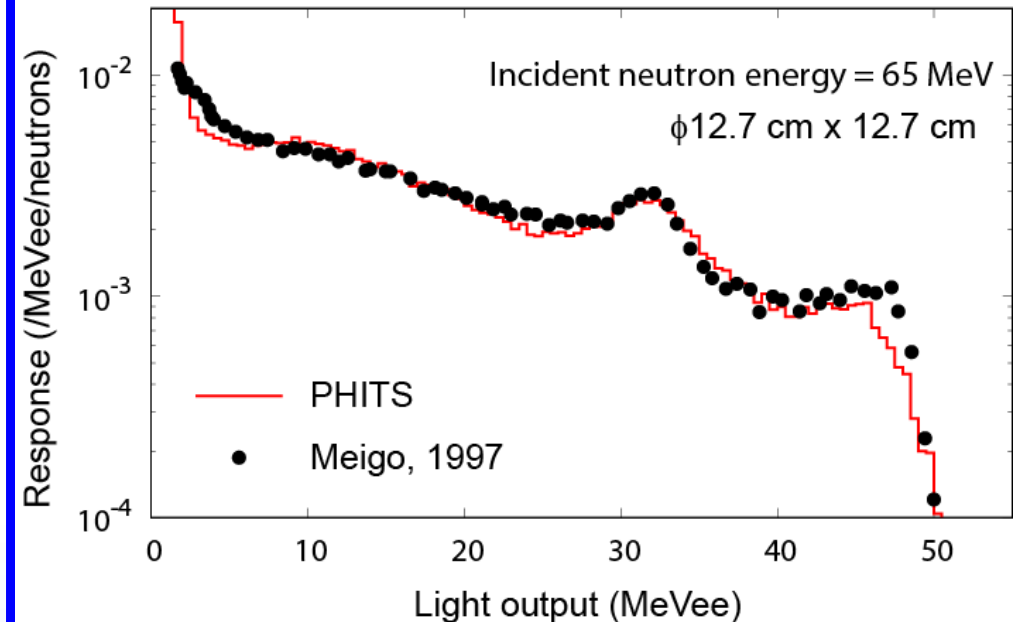
- ✓ SCINFUL-QMDに格納された中性子・炭素原子核反応断面積を利用 (iscinful=1)



中性子入射反応における炭素原子核からのアルファ粒子の生成断面積

Ref.) T. S. Subramanian et al., Phys. Rev. C, **28**, 521 (1983).

- ✓ 同梱のusr tally.fを使って有機シンチレータの光出力分布が計算可能



65MeV中性子を照射した液体有機シンチレータの応答関数分布

Ref.) S. Meigo, Nucl. Instr. Meth. A, **401**, 365 (1997).

中性子に対する有機シンチレータの応答関数および検出効率の実験データを精度よく再現

最近の改良点②：PHITS3.24

2021年3月から配布開始

PHITS3.22からの主な変更点(担当者)

- ◆DICOM2PHITSを大幅改良したRT-PHITSの開発(古田・佐藤)*1)
- ◆最新のDPA計算手法の導入(岩元)
- ◆3次元ジオメトリ描画ツールPHIG-3Dの開発(岩元)*2)
- ◆宇宙線線源モードの開発(佐藤)
- ◆ユーザー定義Anatally機能の開発(佐藤・橋本)
- ◆ヒストリーカウンター機能の開発(佐藤)*3)
- ◆JENDL/DEU-2020 [frag data]の実装(橋本)*4)
- ◆1回のPHITS実行で複数の線源に対して計算する機能の開発(佐藤)*3)
- ◆エラーが発生したソースコードの箇所を出力する機能を導入(佐藤)*5)

1. 量子科学技術研究開発機構の古場裕介博士、米内俊祐博士、松本真之介博士、張維珊博士、大阪大学の渡部直史博士、佐々木秀隆氏の協力により実施
2. 海上技術安全研究所の大西世紀博士の協力により実施
3. 高度情報科学技術研究機構の古立直也博士の協力により実施
4. 原子力機構・核データ研究Grの中山梓介博士の協力により実施
5. 原子力機構・システム計算科学センターの支援のもと伊巻正氏の協力により実施

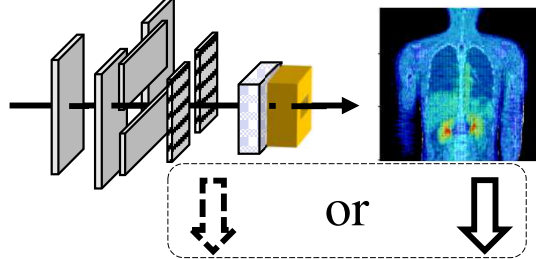
RT-PHITSの開発

RadioTherapy package based on PHITS

DICOMデータ (RT-Plan, PET-Image, CT-Image, RT-Structure, RT-Dose)

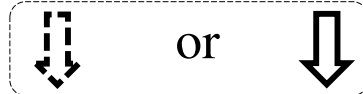
放射線治療計画

標的核医学治療



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

開発中



中間ファイル (ビーム体系、線源情報、患者体系、タリー設定)

InputCreator4PHITS

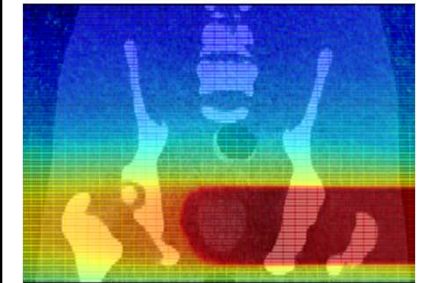
PHITS input

位相空間ファイル

PHITS

線量分布

一般DICOMソフト

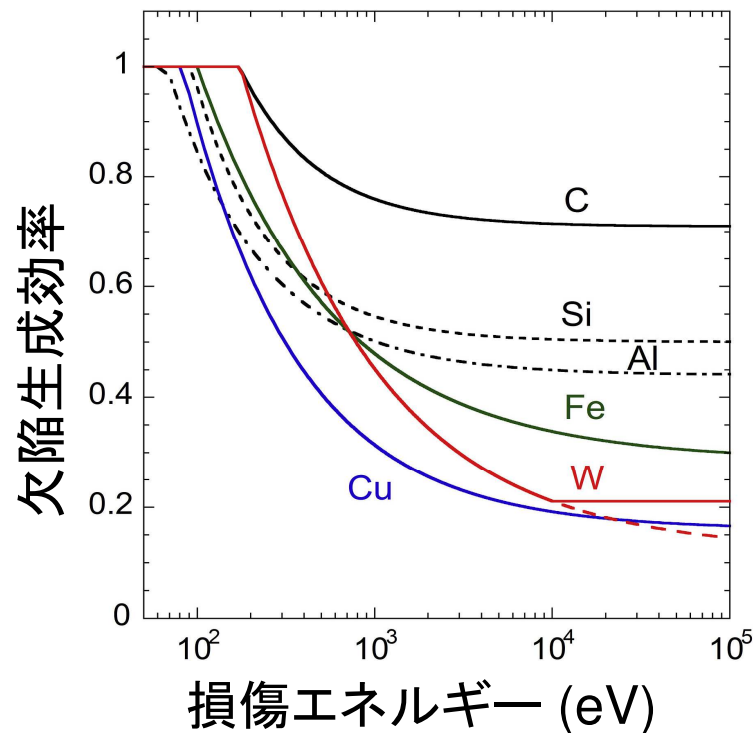


詳細解析

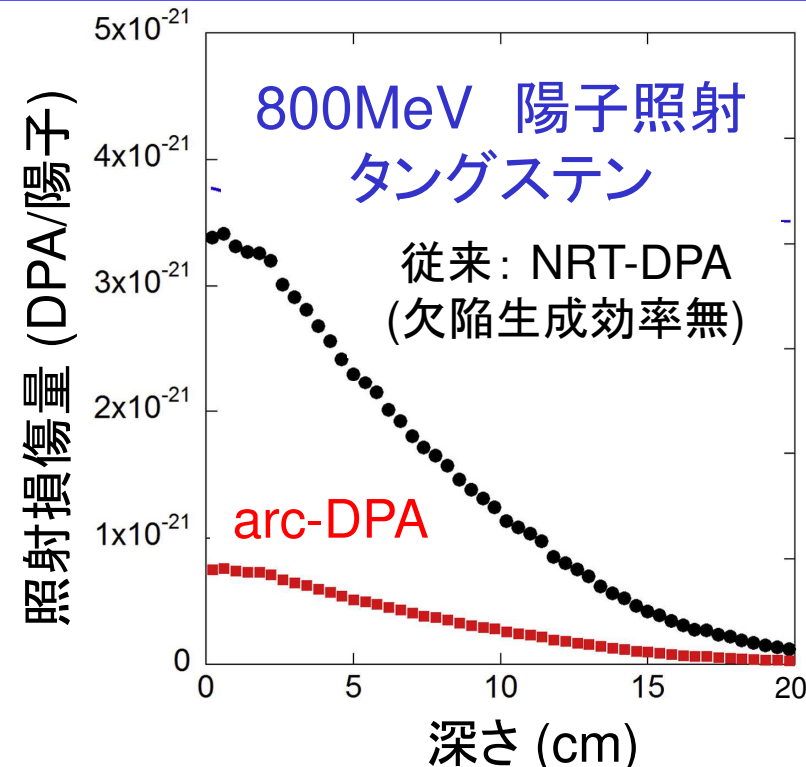
- ・ 3次元表示
- ・ DVH 解析

最新の照射損傷計算手法の導入

- ✓ **DPA**: 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(欠陥が増える)と材料特性が劣化する
- ✓ 材料の**欠陥生成効率**を考慮した新しい指標(**arc-DPA**)を計算可能とした



組み込んだ欠陥生成効率の例



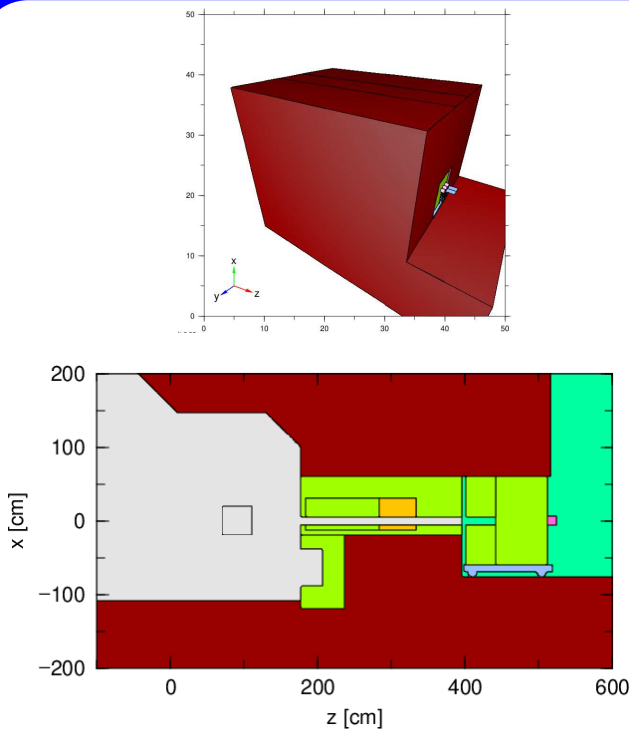
陽子照射時のタングステン中のDPA分布

- ✓ [t-dpa]において、arc-DPAの場合 **idpa=1**、NRT-DPAの場合 **idpa=0** を指定
- ✓ arc-DPA はNRT-DPAより一般的に小さくなる

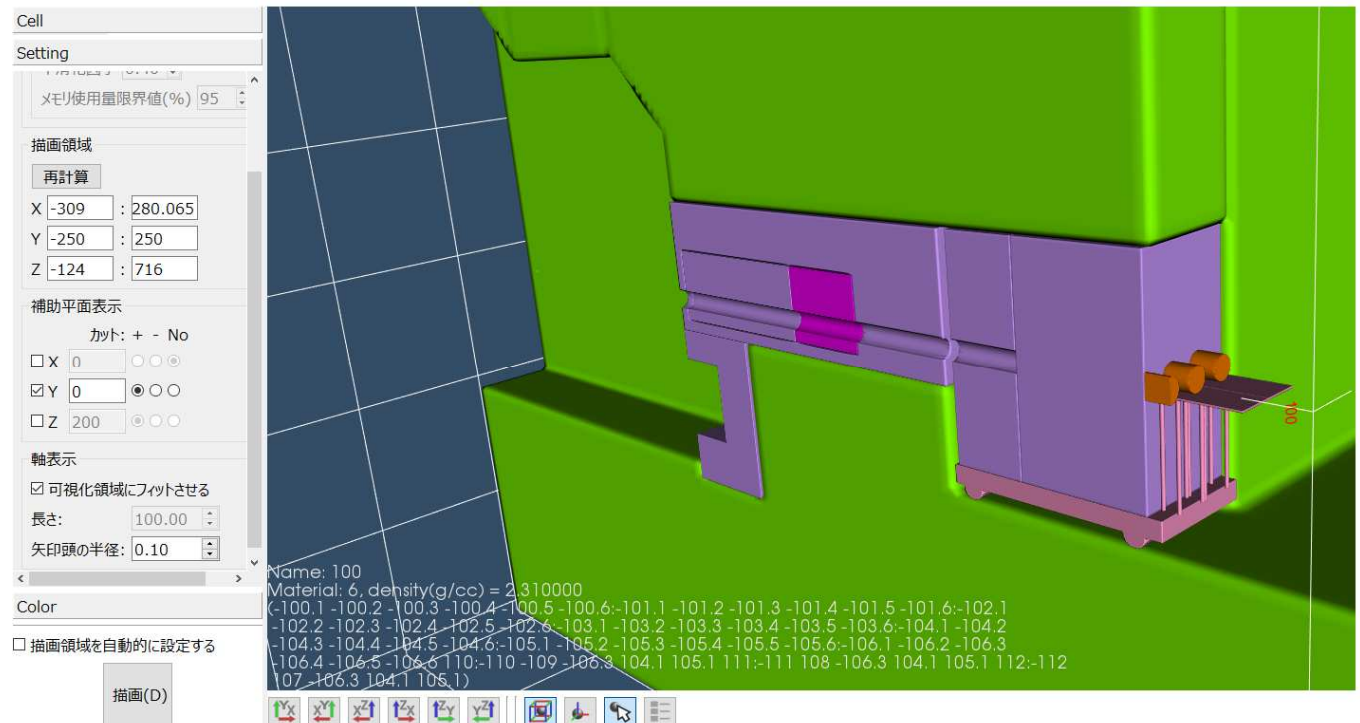
3次元ジオメトリ描画ツールPHIG-3Dの開発

PHIG-3Dとは？

- ✓PHITS Interactive Geometry viewer in 3Dの略
- ✓PHITS入力ファイルを読み込み、その3次元体系を描画するGUIソフトウェア
- ✓マウスによる回転・拡大、指定した断面やセルの選択表示が直感的に可能



[t-3dshow] & [t-track]



PHIG-3Dによる断面表示

- ✓ 要素数の多い体系(Latticeやtetraなど)では、メモリ不足のため正しく描画できない場合があります
- ✓ 32bit PCでは動作しません

宇宙線線源モードの開発

PHITS宇宙線モードの特徴

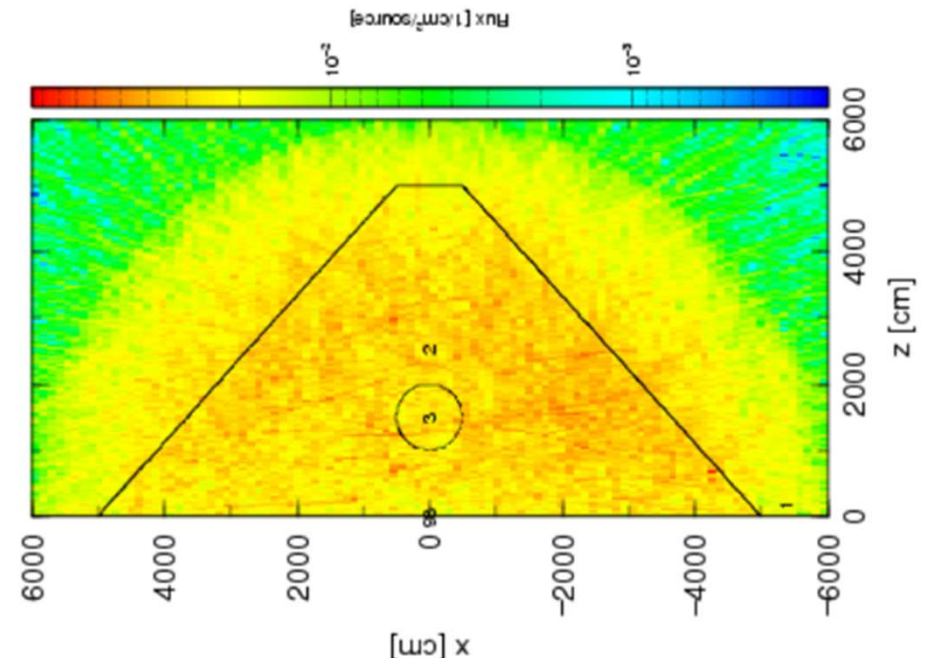
- ✓ 宇宙空間及び大気圏内における宇宙線フラックスのエネルギー&角度分布を絶対値も含めて再現*
- ✓ 発生する宇宙線の角度やエネルギー範囲を限定することが可能
- ✓ 入力パラメータは、緯度・経度・高度・年月日など簡単に設定可能な値
- ✓ 過去に発生した巨大な太陽高エネルギー粒子イベント(SPE)にも適用**

[source]セクションの例

```
e-type = 26    $ cosmic-ray source
icenv = 1      $ terrestrial GCR mode
alti=1.0      $ altitude in km
glat = 35.0    $ latitude in degree
glong = 142.0  $ longitude in degree
icyear = 2020  $ year
icmonth = 1    $ month
icday = 5      $ day
```

*T.Sato PLOS ONE 11: e0160390 (2016)

**A.J.Tylka, 31st ICRC (2009)



ミューオラジオグラフィを再現した計算結果

ユーザー定義anatally機能の開発

ユーザー定義anatallyとは？

- ✓ 複数のPHITSタリー結果をユーザーが定義したプログラムに従って解析し、新しいタリー結果として出力する機能
- ✓ サンプルとして、線量平均LET、及びSMKモデル*に従って粒子線治療・BNCT・標的核医学治療における生物学的線量を導出するプログラムを整備

*T.Sato & Y.Furusawa, Radiat. Res. 178, 341-356 (2012)

線量平均LETを計算するサンプルの流れ

粒子輸送計算 (icntl = 0)

Tally 1
└ 付与エネルギー

Tally 2
└ 付与エネルギー × LET

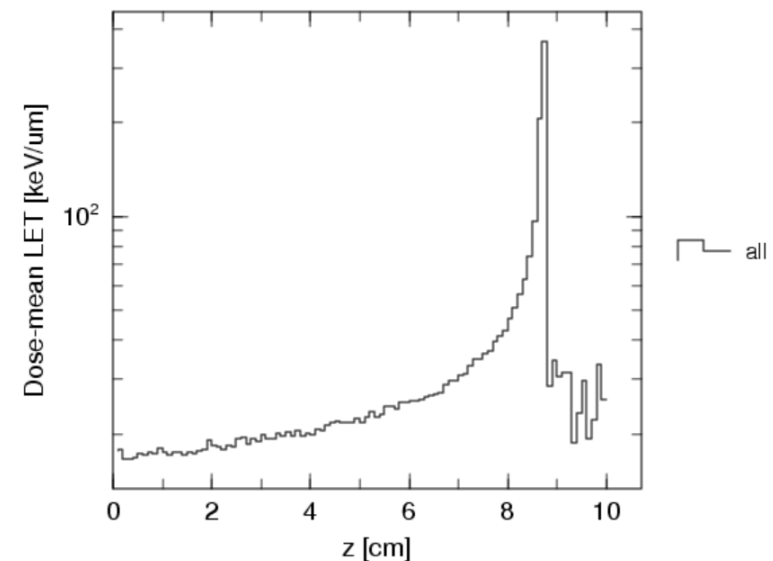
ユーザー定義anatally計算 (icntl = 17)

Tally 2

Tally 1

=

Anatally
線量平均LET



炭素イオンの線量平均LET深さ分布

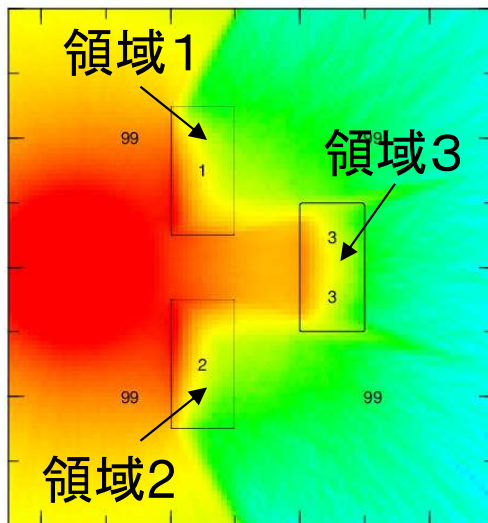
詳しくは [phits/utility/usranatal](#) を参照

ヒストリーカウンター機能の開発

ヒストリーカウンターとは？

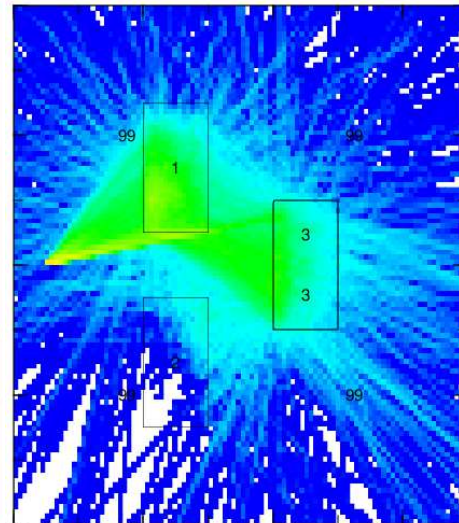
- ✓ あるヒストリー内で発生した全ての粒子が経験したカウンターの最大値を保存
- ✓ ヒストリーカウンターでタリーに制限を掛けることにより、特定のイベントを経験した粒子の挙動を線源発生まで遡ってスコアすることが可能

カウンター設定 領域1: in→ +10、領域2: in→ +100、領域3: in→ +1000 & out→ -2000



カウンター設定無し

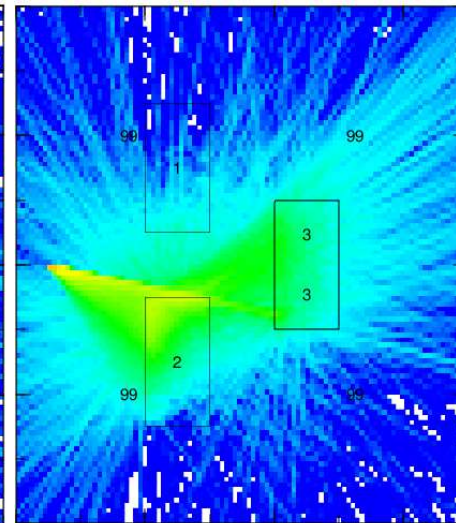
全てタリー



chmin(1) = 1005

chmax(1) = 1015

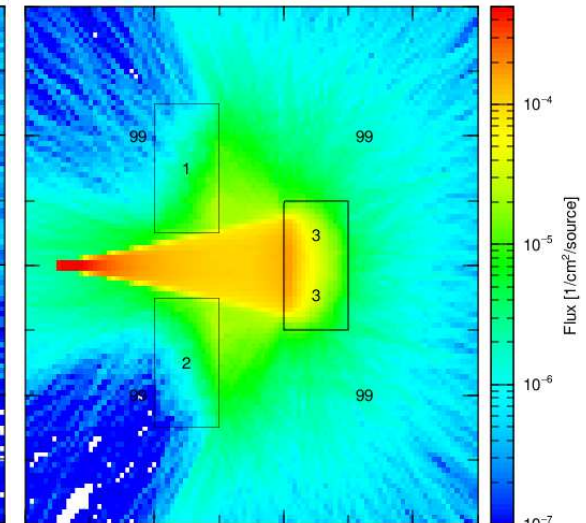
領域1→領域3



chmin(1) = 1095

chmax(1) = 1105

領域2→領域3



chmin(1) = 995

chmax(1) = 1005

領域3に直接入射

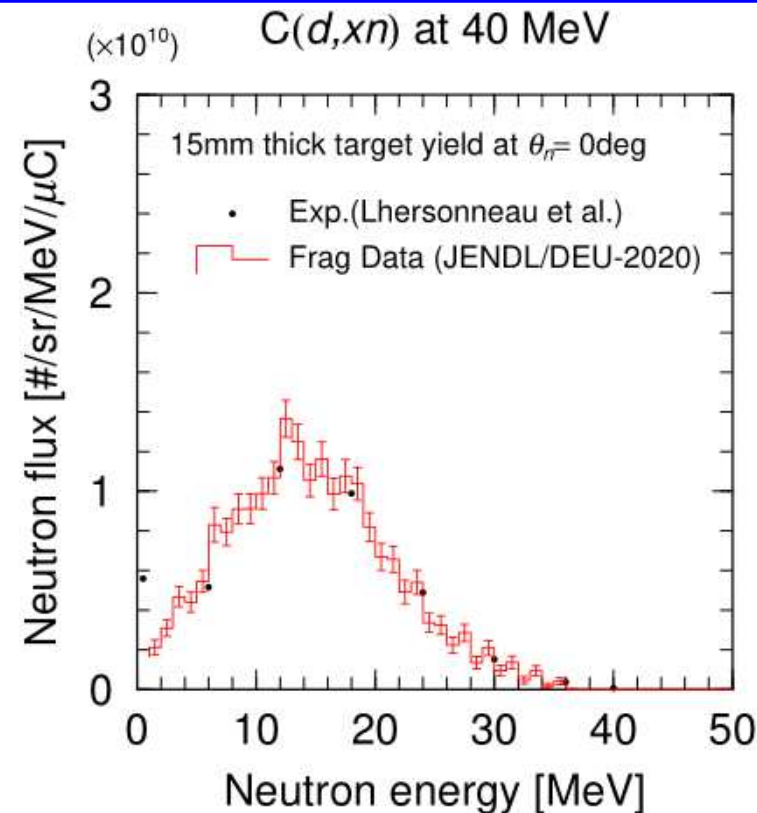
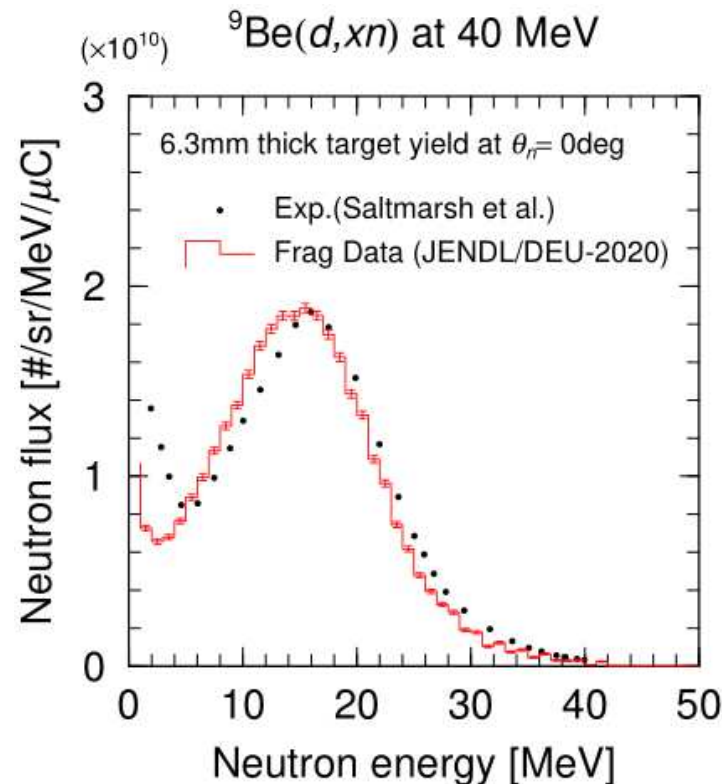
入射経路の特定が可能に

詳しくは [phits/sample/misc/history_counter](https://phits.sourceforge.io/sample/misc/history_counter) を参照

JENDL/DEU-2020 [frag data]の実装

- ✓ 重陽子核データライブラリJENDL/DEU-2020*の[frag data]用ファイルを実装
- ✓ 重陽子加速器を用いた中性子源となる ${}^6,{}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{12,13}\text{C}$ 標的の反応を模擬

*S. Nakayama et al., J. Nucl. Sci. Technol., DOI:10.1080/00223131.2020.1870010



厚い ${}^9\text{Be}$ (左図)とC(右図)標的における重陽子入射反応の中性子スペクトル

- ✓ [frag data]セクションにて、opt=5とし、phits/XS/fragdata/にある各標的ファイルを指定

詳しくは phits/recommendation/NeutronSource を参照

今後の予定

◆核データ親和性の向上

- ✓ JENDL-4.0/HE対応核種の拡充
- ✓ 重陽子・ α 粒子・光子ライブラリへの対応

◆新たな計算機能の追加

- ✓ 飛跡構造解析モードの拡張(イオン・ターゲット)

◆ユーザー支援機能の拡充

- ✓ 入力ファイル作成を支援する専用エディタの開発
- ✓ RT-PHITS専用Viewerの開発

◆計算精度の向上

- ✓ 最新の蒸発モデル・核分裂モデルの導入・改良
- ✓ 遮蔽実験データベースSINBADを用いたベンチマーク