

放射線防護・放射線影響に関する、 コンピュータシミュレーション技術

日本原子力研究開発機構 放射線挙動解析研究グループ
津田 修一

1. イントロダクション

Q: 放射線のイメージは？

- 原子力発電(再稼働問題)
- 加速器施設
- 放射線がん治療、診断
- ✓ 被ばく事故、環境・食品汚染
- ✓ 原子爆弾

見えない、怖い



自然界からの放射線のイメージ

Microsoft Copilotにより生成

1. イントロダクション（つづき）

「これからも役立つツールとして放射線を安全に活用するためには、人体への影響が起こらないよう放射線から身を守ること（放射線防護）、人体への影響をよく理解することが重要」



原子力発電、放射線治療のイメージ（Microsoft Copilotにより生成）

**放射線防護・放射線影響に関する、コンピュータシミュレーション
技術を活用した最新の知見を紹介**

講義内容

1. イントロダクション

2. シミュレーション計算技術

2. 1 モンテカルロ計算手法について

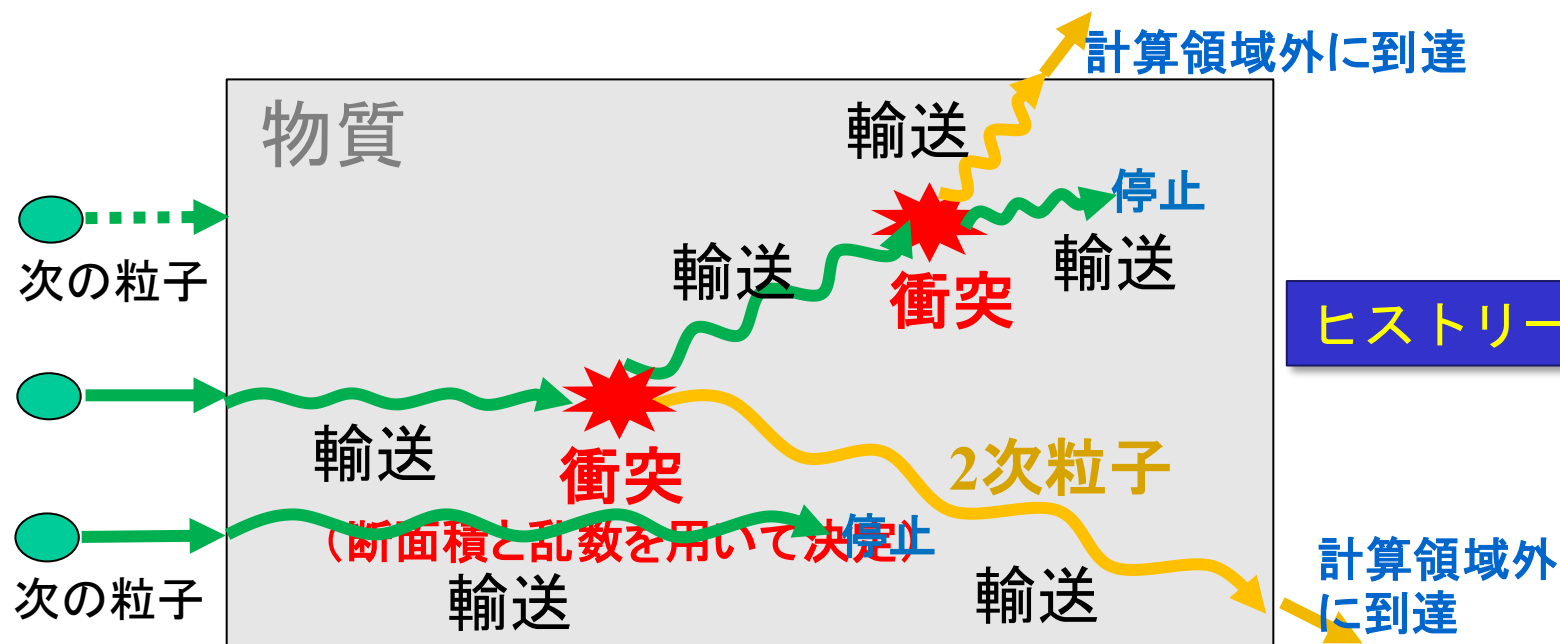
2. 2 放射線防護の研究、応用

2. 3 放射線防護以外へのシミュレーションの活用

3. まとめ

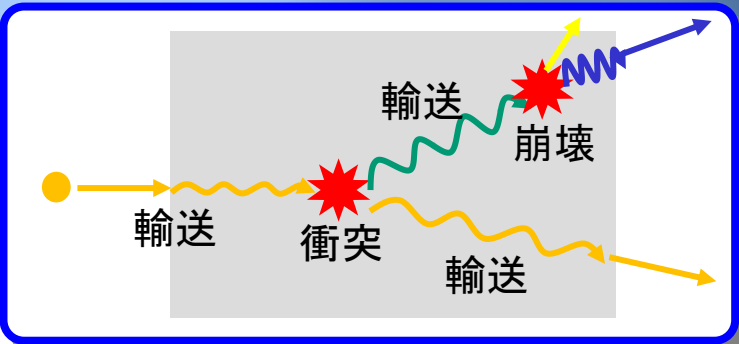
モンテカルロ計算とは？

- ✓ 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

主な物理現象



衝突・崩壊過程

原子核反応

- ・ 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

- ・ 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

- ・ 寿命による崩壊（ μ & π 粒子、中性子 etc.）

輸送過程

電離・励起

- ・ 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

- ・ 電磁場
- ・ 重力
- ・ 反射面（スーパーミラー etc.）

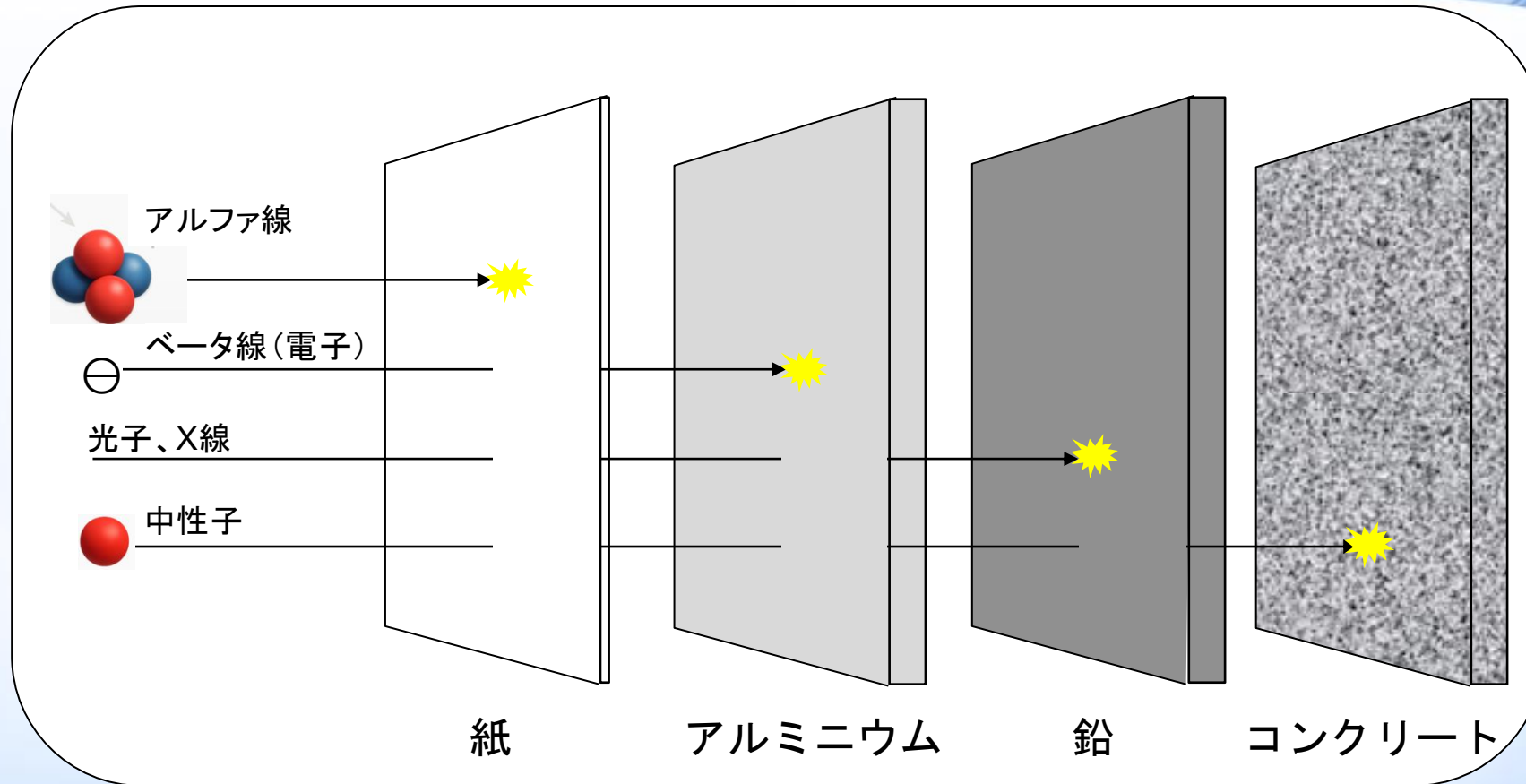
放射線の種類

主な放射線とその特性

種類	電荷 (e)	質量 (MeV)	電離能力	核反応 断面積	主な存在場所・線源
光子 (γ 線,X線)	0	0	低 (注1)	低	放射性同位元素 X線発生装置（レントゲン）
電子(β 線) 陽電子	-1 1	0.511	低	低	放射性同位元素, 電子加速器 宇宙空間（オーロラなど）
μ 粒子 (ミューオン)	± 1	105.7	中	低	大気圏内宇宙線（2次粒子）
陽子	1	938.3	中	中	宇宙線, 陽子加速器
中性子	0	939.6	なし (注1)	高	原子炉, 高エネルギー加速器 大気圏内宇宙線（2次粒子）
He原子核 (α 線)	2	3733	高	中	放射性同位元素, 宇宙線
重イオン	3以上	(注2)	極めて高	高	宇宙線, 重イオン加速器

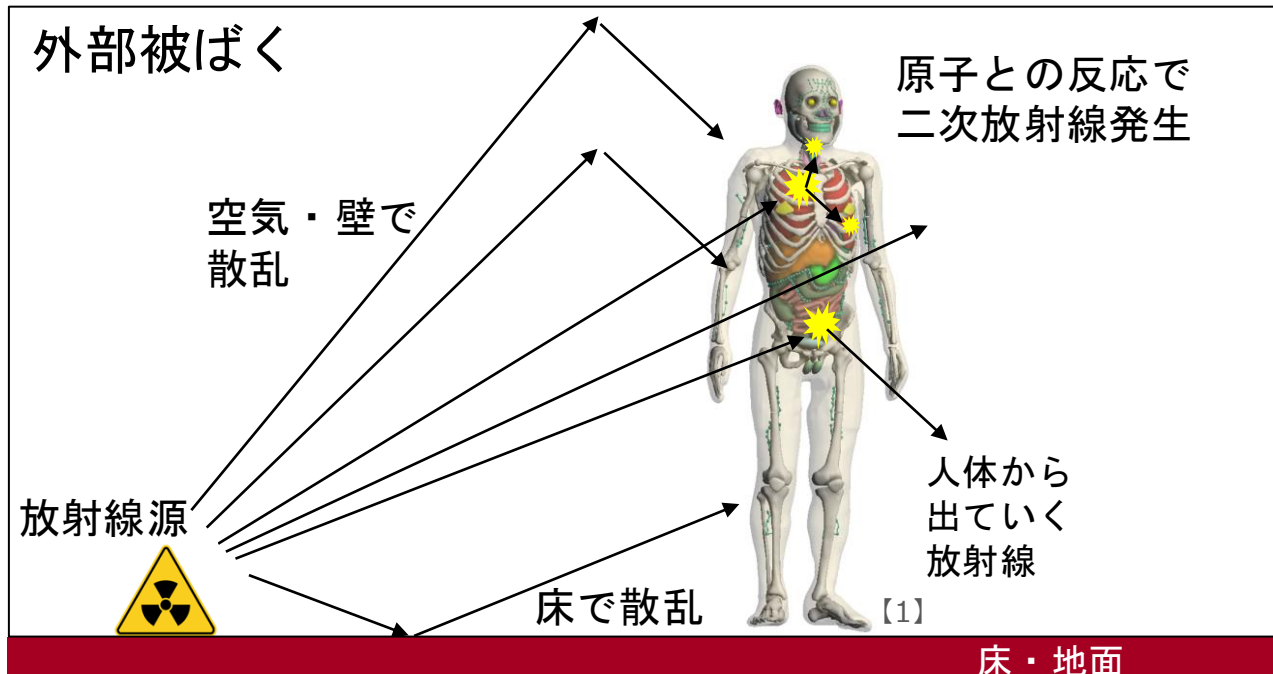
注1) 電離能力はほとんどないが, 電離能力を有する放射線を生成する能力はある
注2) 中性子数 $\times$ 中性子質量 + 陽子数 $\times$ 陽子質量 - 原子核の結合エネルギー

放射線の透過能力の違い

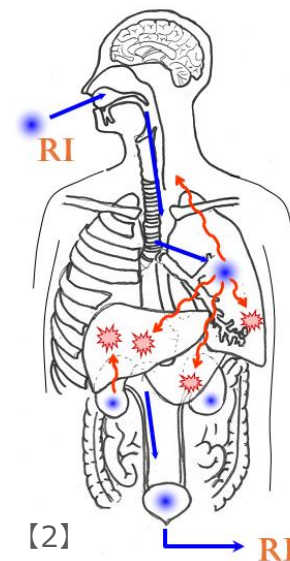


放射線や材料の種類によって、“輸送“、“衝突（反応）”等が異なる。

放射線防護研究に必要な要素 1



内部被ばく



放射性同位体
(RI) を体内に
取り込むケース

「各臓器・組織に付与されるエネルギー：吸収線量」をベースに、発がん等のリスク（線量）は総合的に推定され、国際放射線防護委員会（ICRP）から勧告されている
⇒様々な放射線・物質についてシミュレーション可能な計算コードは重要・不可欠

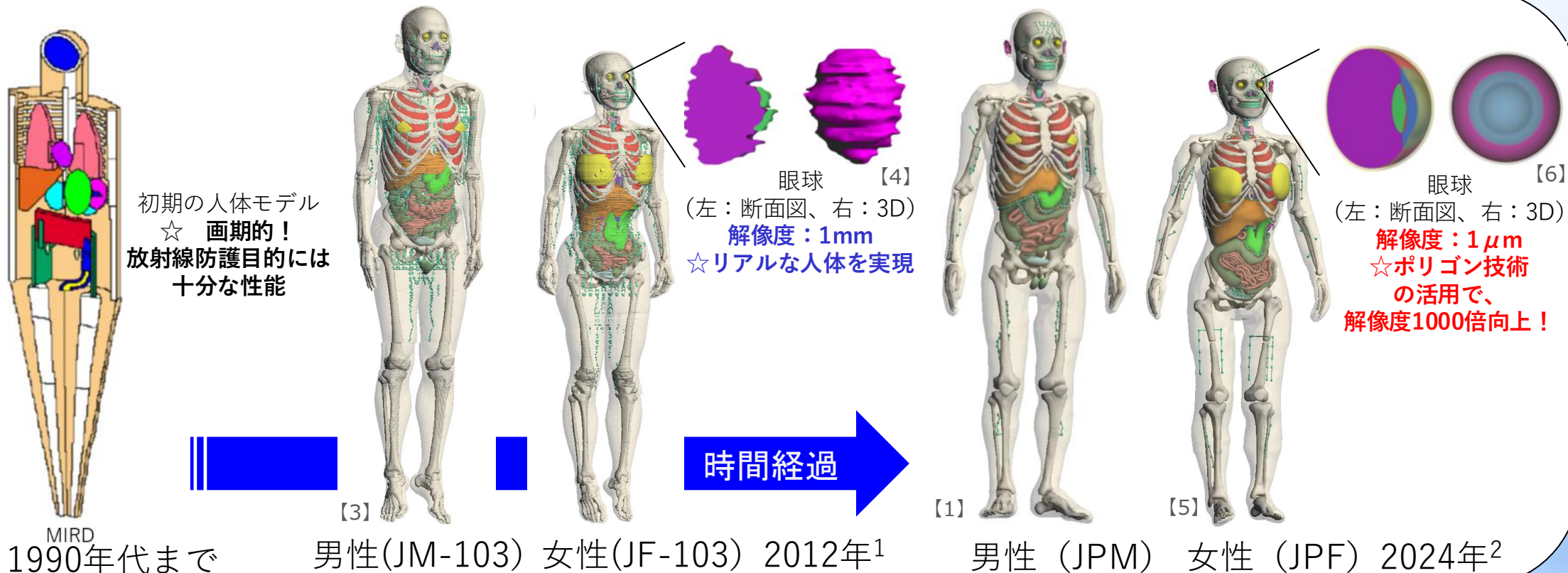
放射線防護研究に必要な要素：

人体のモデル + 体内で生じる反応を扱える計算コード

放射線防護研究に必要な要素 2

放射線防護研究に必要な要素：

人体のモデル + 体内で生じる反応を扱える計算コード

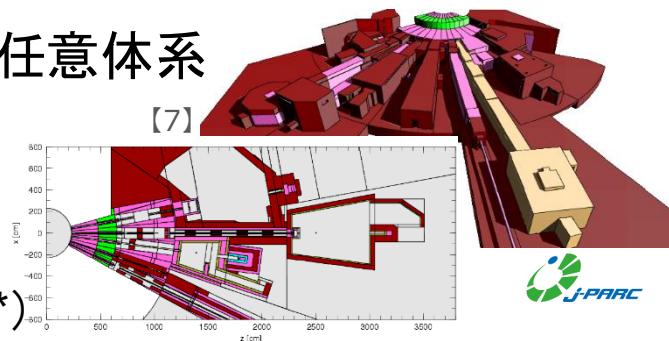


¹ K.Sato et al. Radiat. Prot. Dosim. 149(1):43-8 (2012). ² K.Sato et al. PLOS One, October (2024)

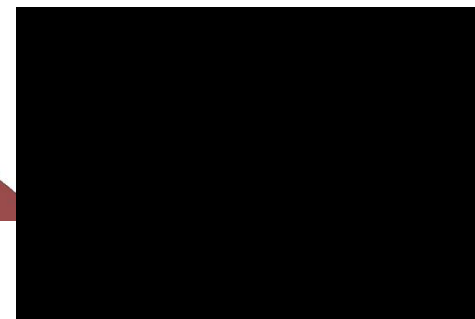
PHITSコードの基礎特性

- 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**)



【7】 ANGEL (2次元&3次元)



【9】 PHIG-3D (GUI)

- 計算できる物理量

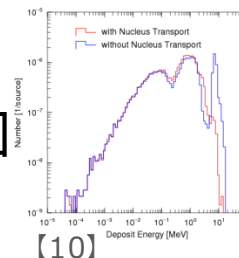
粒子フルエンス, 吸収線量, 粒子生成収率 など

- 出力データ形式

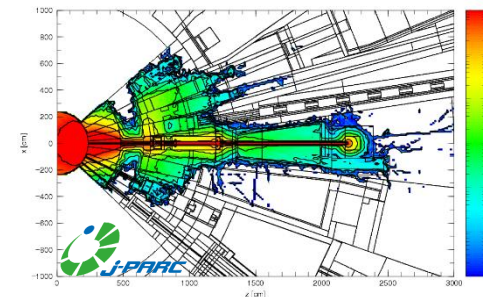
数値データ, ヒストグラム, 等高線図

- プラットフォーム

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



【10】



【11】

*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

PHITSに組み込まれた物理モデル（奨励設定）

	中性子	陽子	原子核	μ粒子	電子	光子
	1 TeV	1 TeV/n	1 TeV	1 TeV	1 TeV	1 TeV
高エネルギー	JAM + GEM 3.0 GeV	JAMQMD + GEM	JAM/ JQMD + GEM 200 MeV	JAM/ JQMD + GEM 200 MeV	EGS5, ETS or ETSART	JAM/ JQMD + GEM + JENDL + NRF
↑	INCL4.6 + GEM 200 MeV	t 3He α	JQMD + GEM 10 MeV/n	ATIMA + Original Model 1 keV	EPDL97 or EGS5	
↓	20 MeV	JENDL-5 1 MeV	d			
低エネルギー	JENDL-4 or JENDL-5 0.01 meV	ATIMA or KURBUC / ITSART 1 keV			1 keV	1 keV
		*負ミューオンのみ（捕獲反応）		*JQMD + GEM	ETS or ETSART 1 meV	

赤: 原子核反応モデルもしくはライブラリ
青: 原子反応モデルもしくはライブラリ

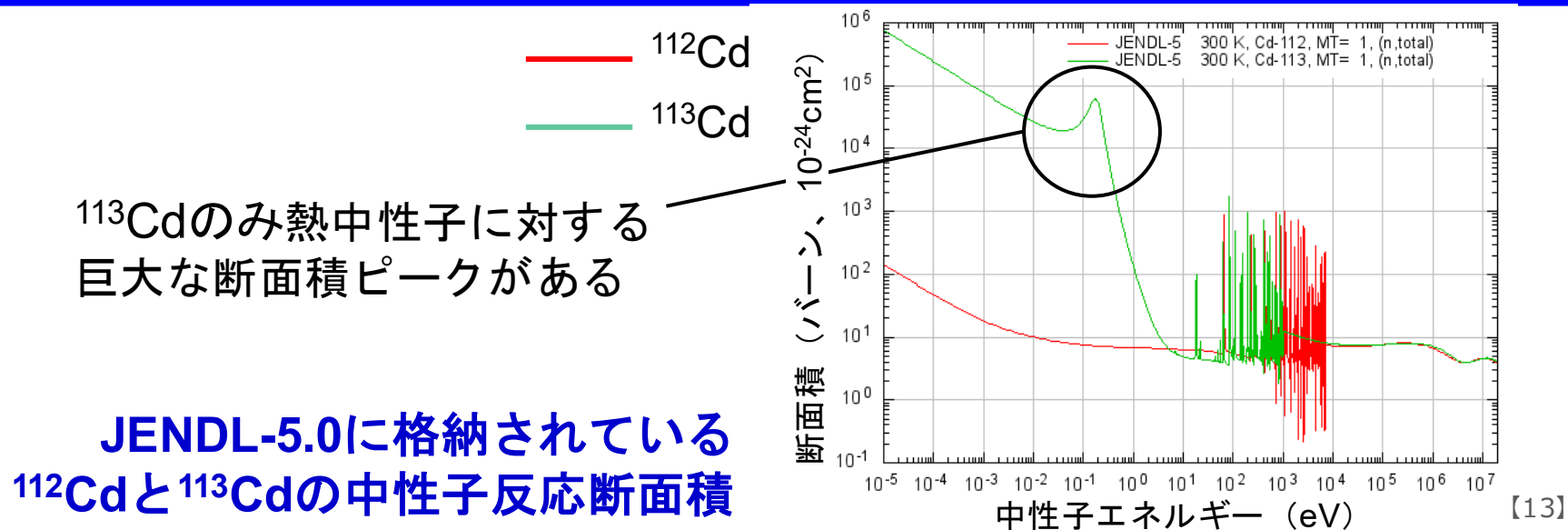
【12】

放射線の種類やエネルギーによって、様々なモデルやライブラリを切り替えて計算している。

核データライブラリJENDL

原子力機構で開発されている、“輸送”、“衝突”確率のデータライブラリ

- ✓ 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

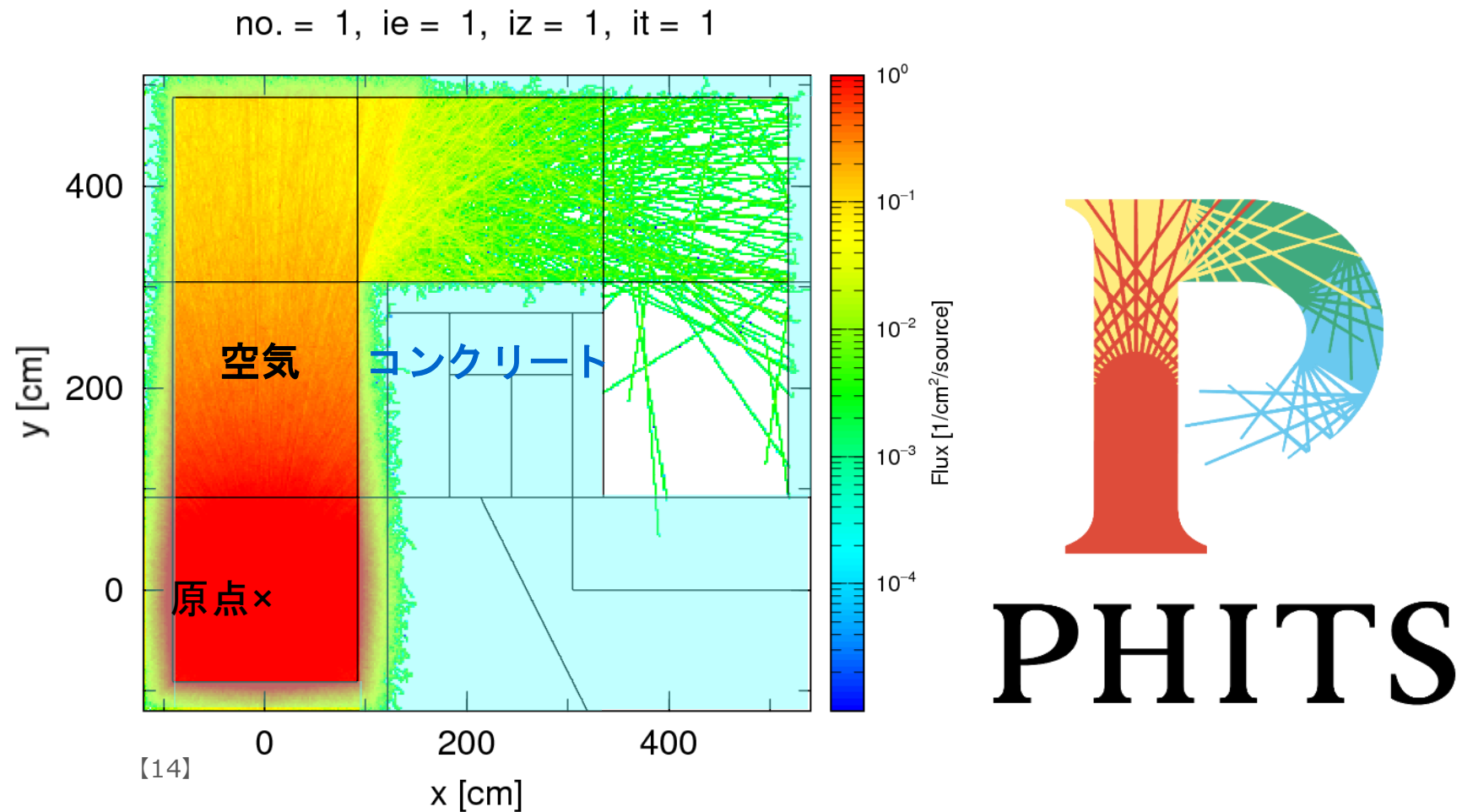


- ✓ 20MeV以下の中性子断面積 (JENDL-4、全406核種)
- ✓ 200MeV以下の中性子・陽子断面積 (JENDL-5、30核種のみ) *

放射線防護の計算に必要な物質をほぼすべてカバー

https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/Jendl_J.html

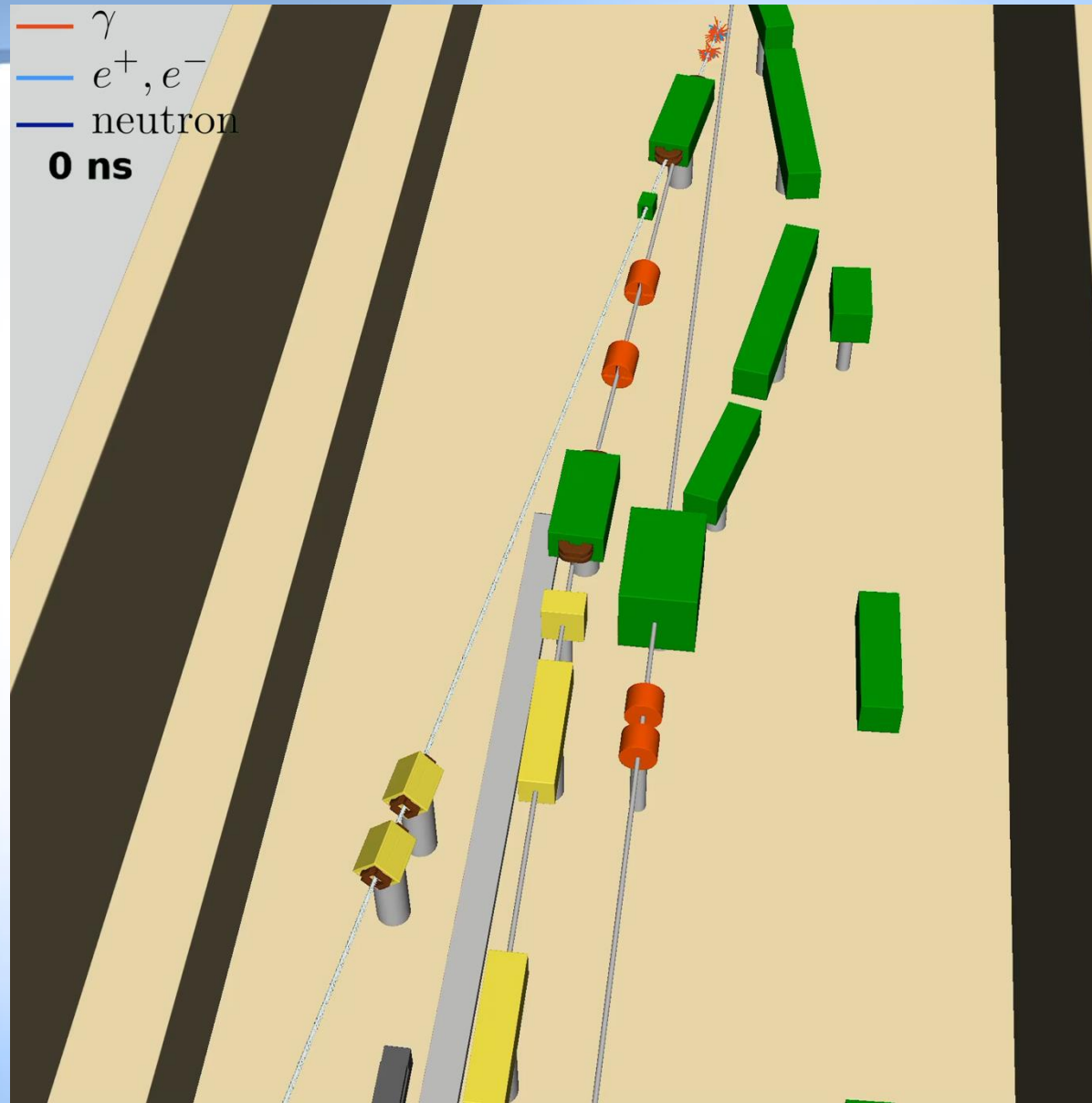
モンテカルロ計算の例 1



^{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

モンテカルロ計算の例 2



【15】

Created by
[t-4dtrack]
in PHITS

計算コードの信頼性を確認

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>

シミュレーション結果が
正しいか、実験値で検証



Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

TECHNICAL MATERIAL

OPEN ACCESS

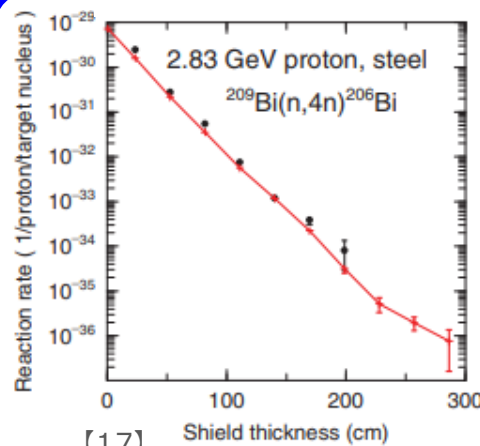
Check for updates

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

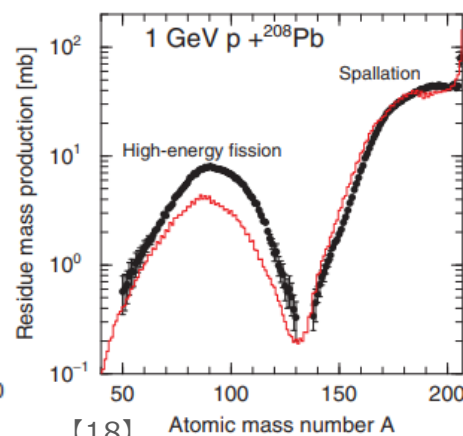
^aJapan Atomic Energy Agency, Ibaraki, Japan; ^bResearch Organization for Information Science and Technology, Ibaraki, Japan

[16]



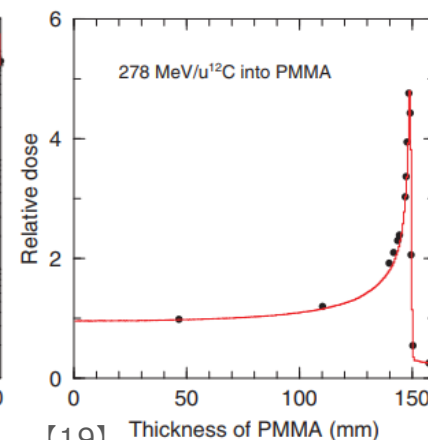
[17]

遮蔽計算



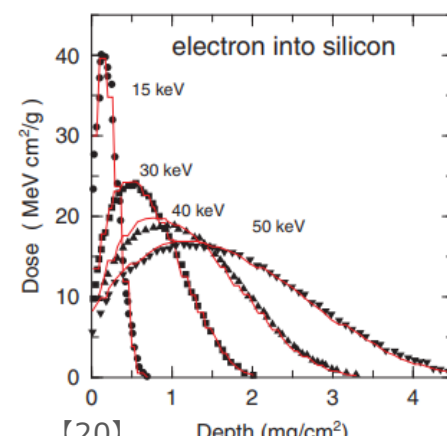
[18]

核分裂収率



[19]

粒子線がん治療



[20]

電子飛程

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

講義内容

1. イントロダクション

2. シミュレーション計算技術

2. 1 モンテカルロ計算手法について

2. 2 放射線防護の研究、応用

2. 3 放射線防護以外へのシミュレーションの活用

3. まとめ

放射線防護への活用

組織加重係数 w_T -
ICRP2007年勧告- *

実効線量 E [単位 : Sv]

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

w_R : 放射線加重係数

w_T : 組織加重係数

$D_{T,R}$: 吸収線量 (単位: Gy) $\text{Gy} = \text{J} / \text{kg}$

各臓器・組織に対する

各臓器・組織に付与されるエネルギー、シミュレーション計算で算出。

様々な知見に基づいて決定 (右表)。

臓器・組織	w_T	臓器・組織	w_T
赤色骨髄	0.12	食道	0.04
結腸	0.12	甲状腺	0.04
肺	0.12	皮膚	0.01
胃	0.12	骨表面	0.01
乳房	0.12	脳	0.01
生殖腺	0.08	唾液腺	0.01
膀胱	0.04	残りの組織	0.12
肝臓	0.04	合計	1.00



【3】

両性、全年齢で一つのデータ

- 各臓器の放射線感受性の違いを考慮。
- ただし、感受性の差を定量的に表現するほどの精度はない。

*ICRP Publication 103, 国際放射線防護委員会の2007年勧告, 日本アイソトープ協会, P31. 表3を元に作成

線量換算係数

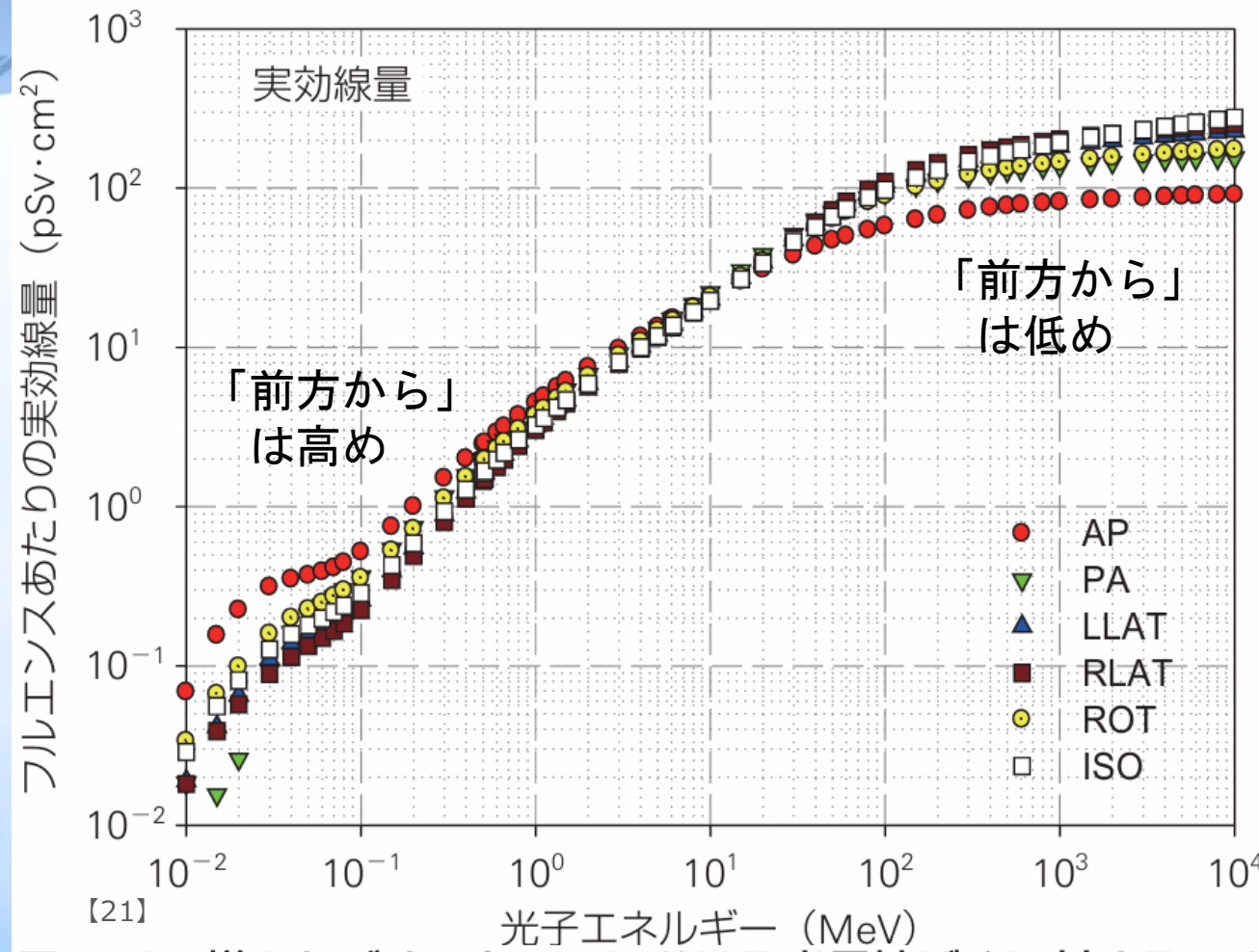


図 4.4 様々なジオメトリーにおける光子被ばくに対するフルエンスあたりの実効線量 AP：前方－後方，PA：後方－前方，LLAT：左側方，RLAT：右側方，ROT：回転，ISO：等方（カラー画像は口絵参照）

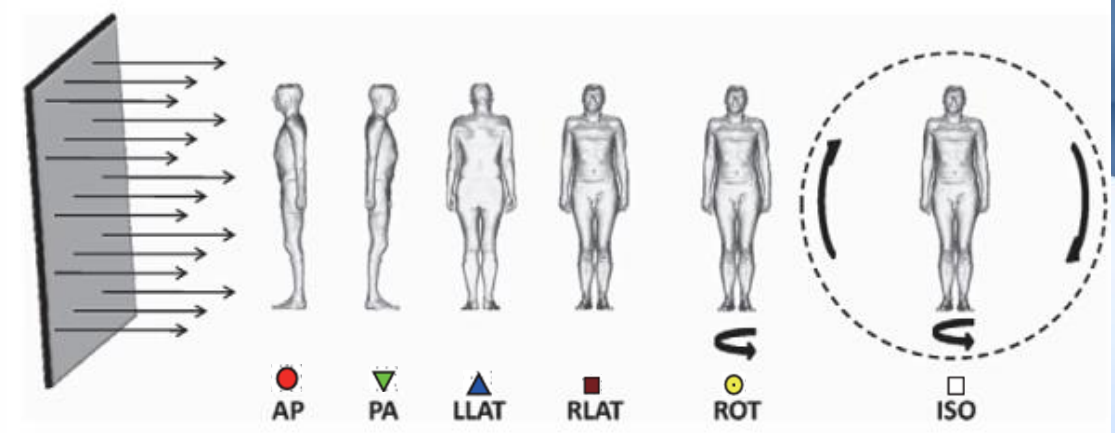
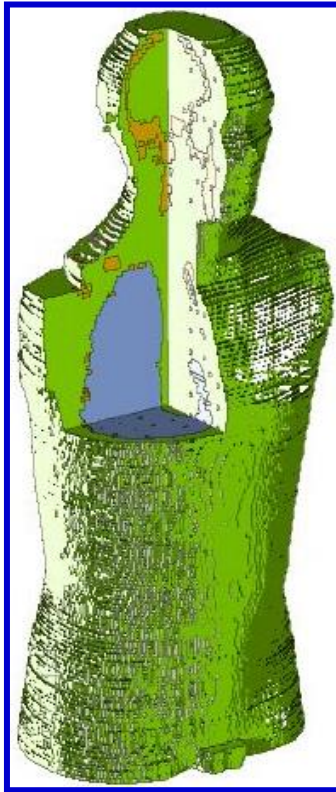


図 3.2 考慮した理想化されたジオメトリーの略図 AP：前方－後方，PA：後方－前方，LLAT：左側方，RLAT：右側方，ROT：回転，ISO：等方 【22】

“典型的な照射条件”を仮定して計算

新しい知見に基づいて更新される；
ICRP Publication 26（1977年）
ICRP Publication 60（1990年）
ICRP Publication 103（2007年）
次、いつ？

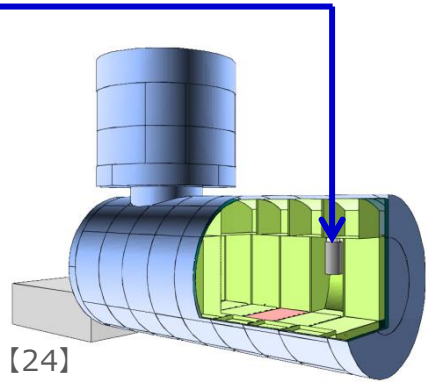
宇宙飛行士の線量評価への応用



【23】

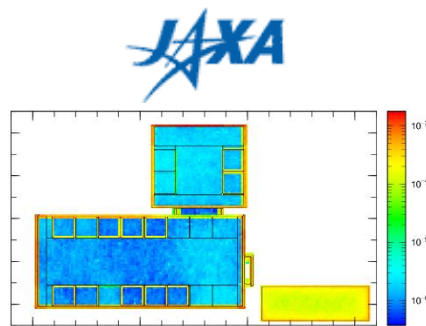
MATROSHKAプロジェクト

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

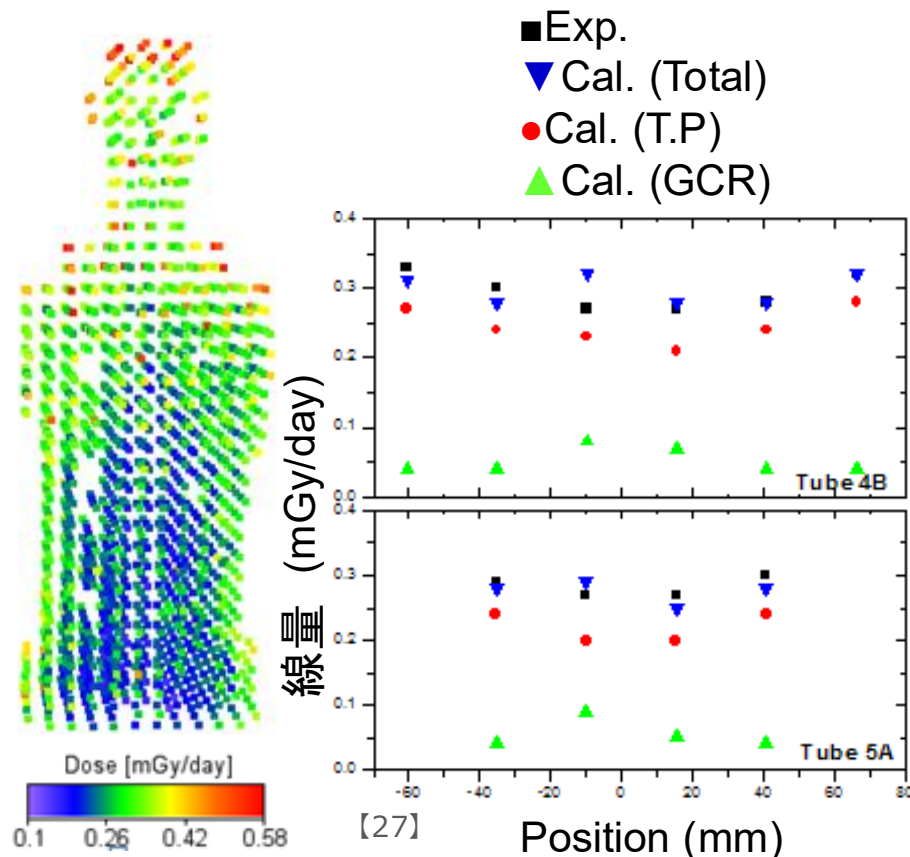


【24】

仮想きぼうモジュール



【25】



【26】

PHITSシミュレーション結果

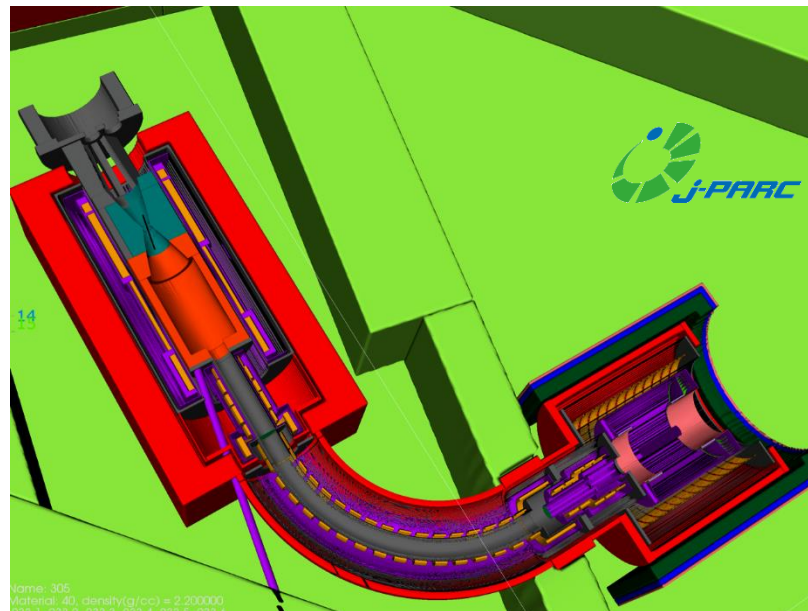
オフィシャル計算コードの1つとして利用

→実験と計算がよく一致

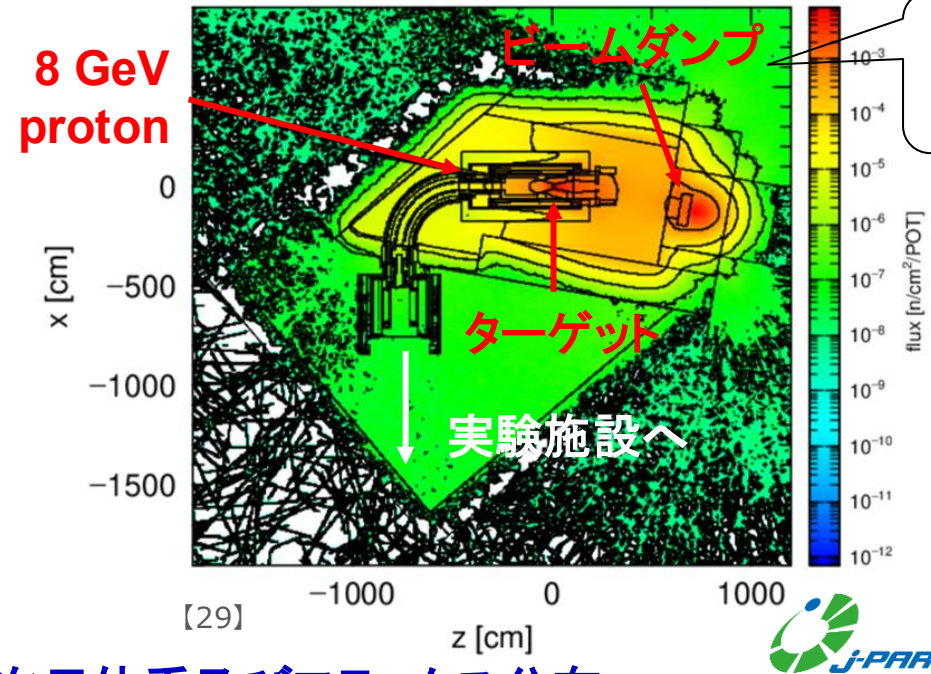
J-PARC設計への応用

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



[28]



入射ビームを
完全に止める
役割

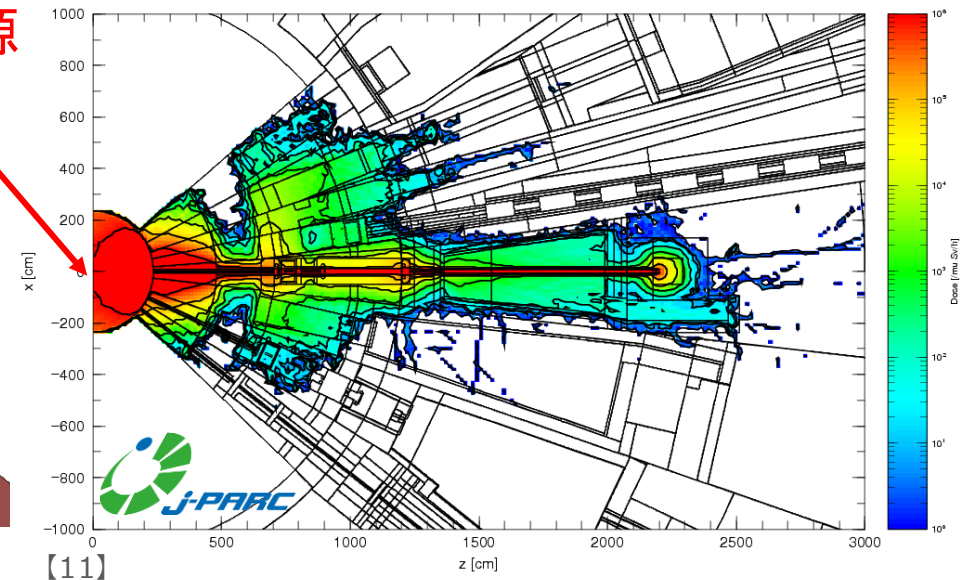
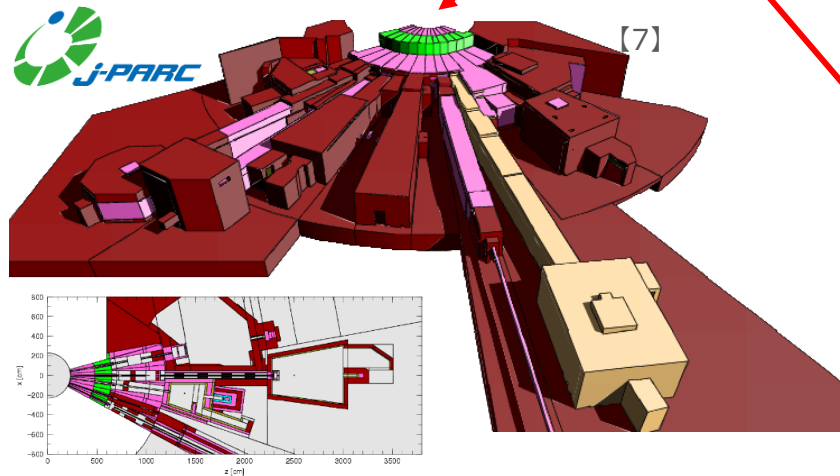
***COMET実験施設の3次元体系及びフラックス分布**

***ミューオン-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)

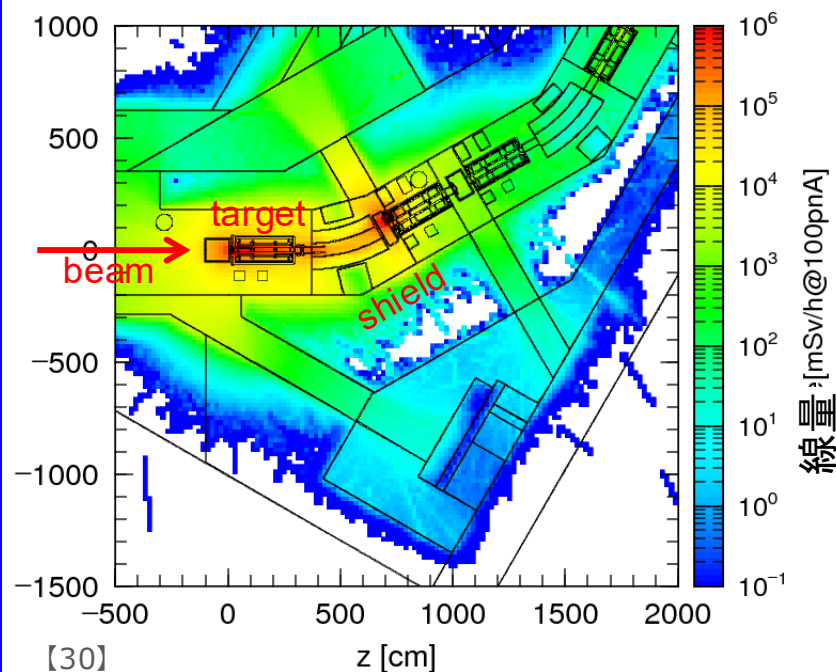
中性子ビームライン設計に使う特殊機能

- ✓ 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

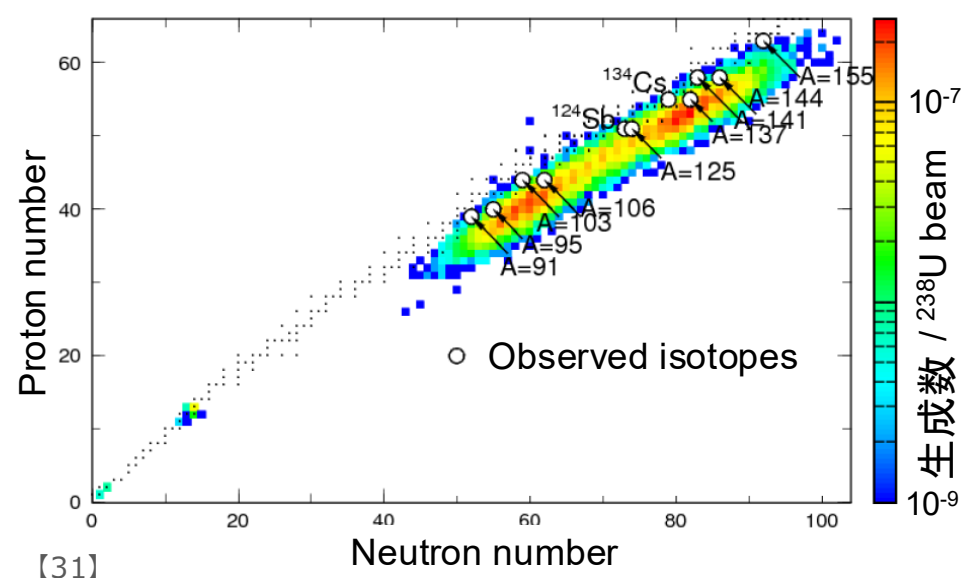


BigRIPS*周辺の線量分布

*磁場で様々なRIビームを分離する装置

Tanaka et al. Progress in Nuclear
Science and Technology 4, 201 (2014)

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

Akashio et al. EPJ Web of Conferences
153, 01022 (2017)

シビアアクシデントへの応用（１）

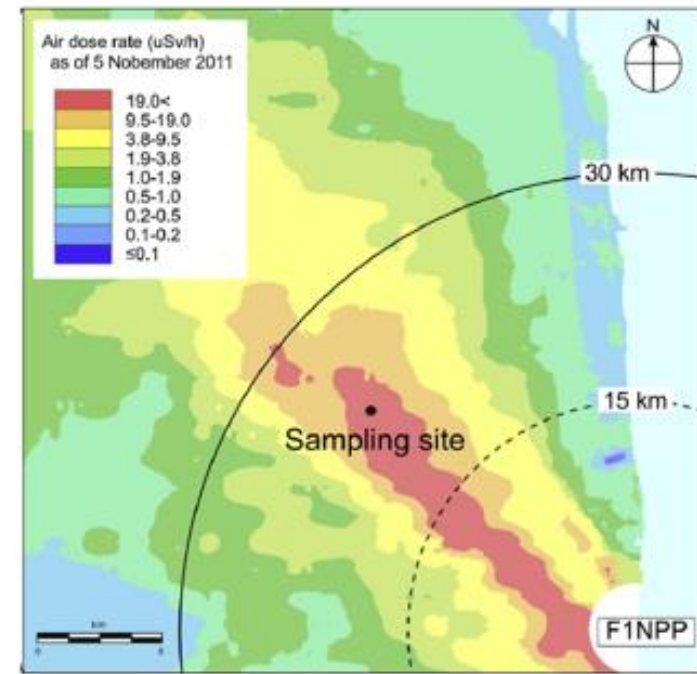
東京第一福島原子力発電所の事故

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（もしくは東日本大震災）とそれに伴う津波により発生した原子力事故



[32]

福島第一原子力発電所(F1NPP)事故後の様子



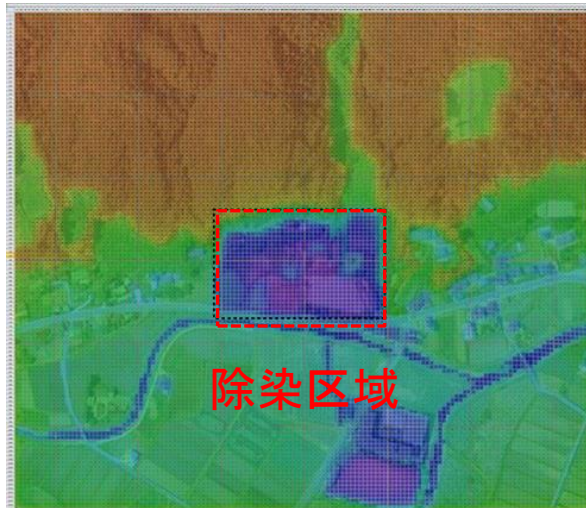
[33]

空間線量率と採取場所

シビアアクシデントへの応用（2）

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



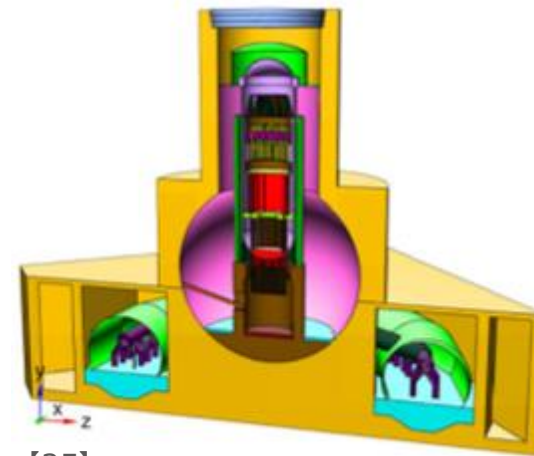
【34】

CDEで推定した除染後の空間線量率

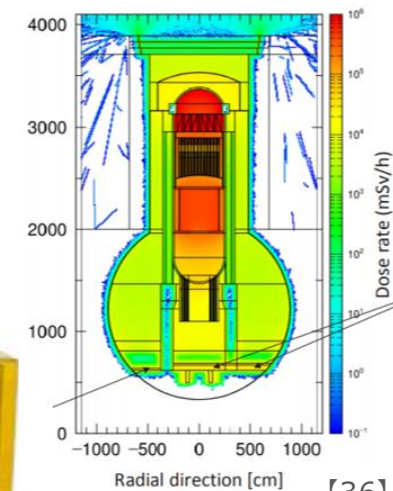
<http://nsed.jaea.go.jp/josen/>

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



【35】



【36】

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

講義内容

1. イントロダクション

2. シミュレーション計算技術

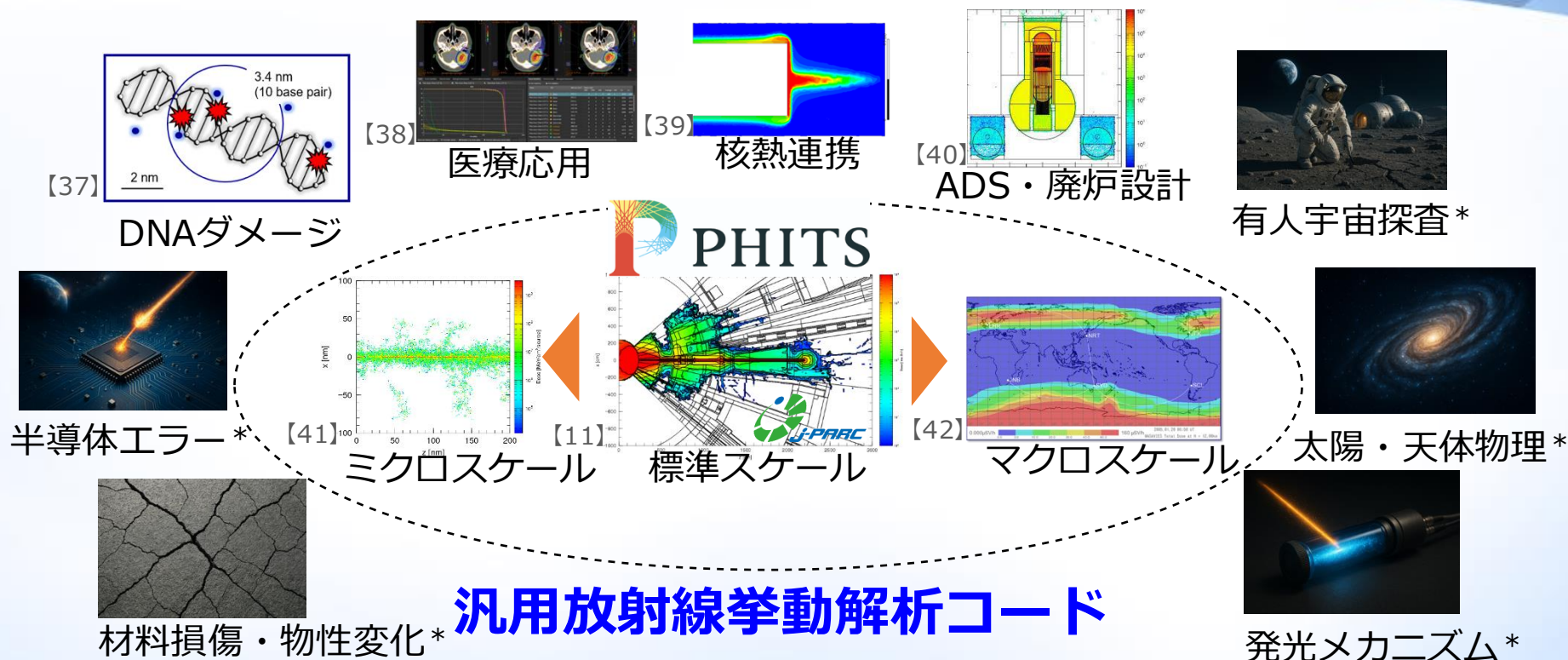
2. 1 モンテカルロ計算手法について

2. 2 放射線防護の研究、応用

2. 3 放射線防護以外へのシミュレーションの活用

3. まとめ

物質中の放射線挙動を解析する計算コードはいろいろ応用できる！



- 第一原理計算に基づく材料損傷、物性変化、生物影響などの評価モデル開発
- 医療・宇宙開発・半導体産業など様々な分野でのイノベーション促進
- 「放射線科学を全ての人に」をキャッチコピーにデファクトスタンダード化を目指す

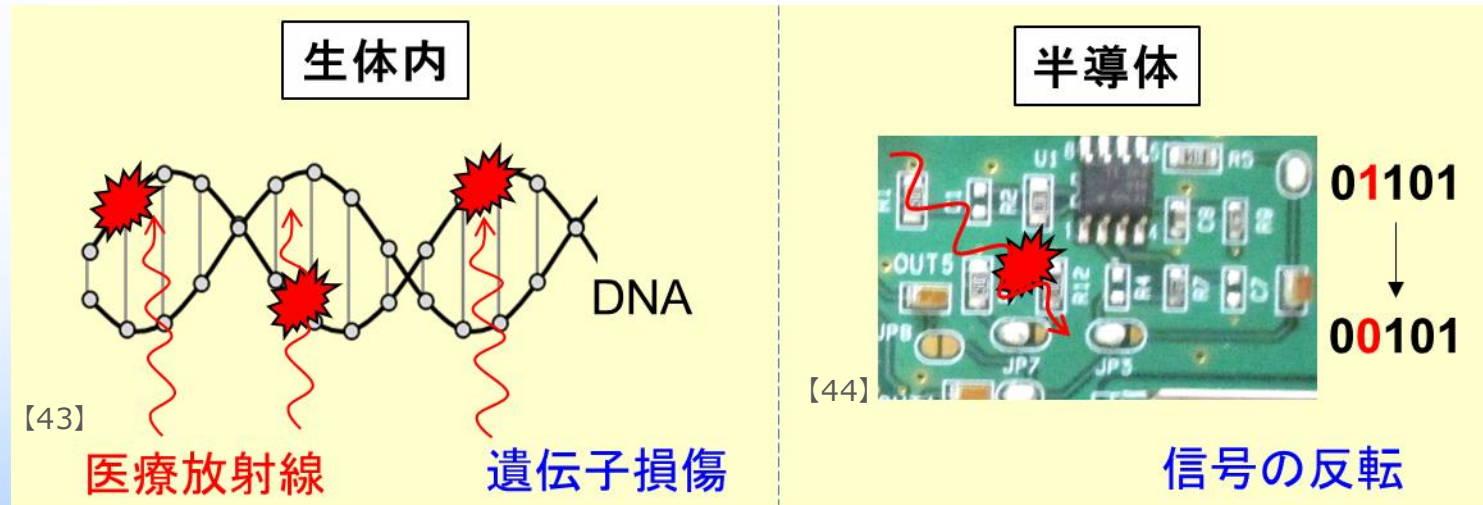
放射線の物質への影響

放射線が生物に与える影響

- ✓ 負の側面: DNA損傷, 細胞致死, 臓器機能不全, 発がん
- ✓ 正の側面: 放射線治療, 食品の貯蔵期間延長, 進化のトリガー

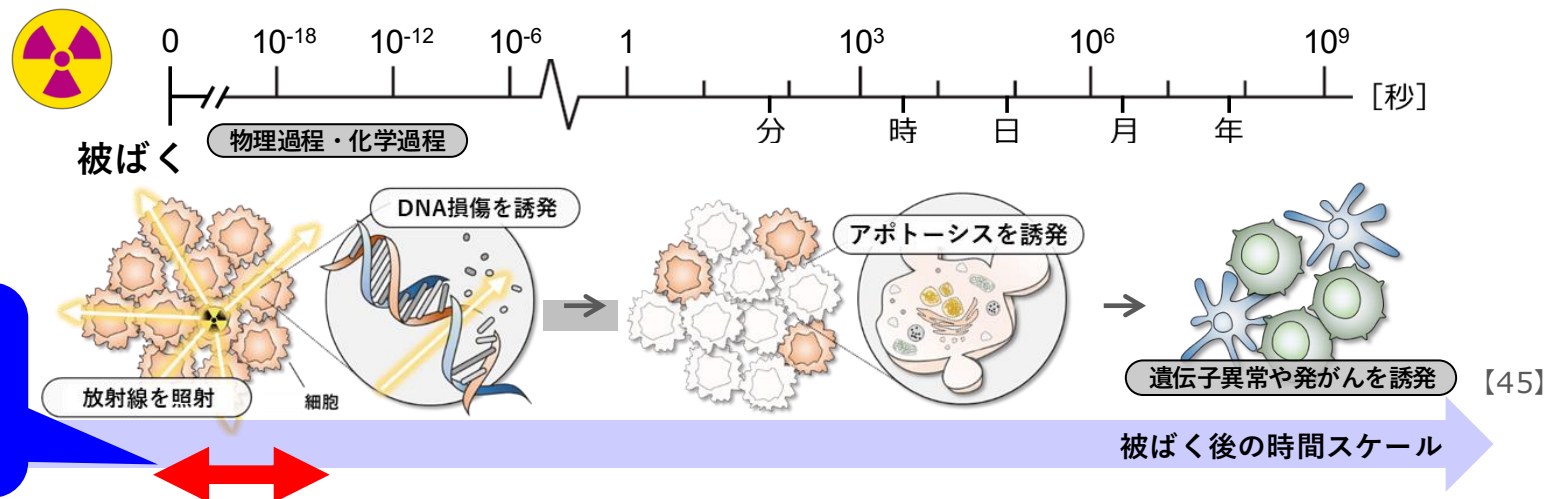
放射線が物質に与える影響

- ✓ 負の側面: 原子炉・加速器の材料損傷, 半導体エラー
- ✓ 正の側面: 放射線グラフト重合による新素材創成



発がん等の影響が生じる過程

放射線によりどんな影響が誘導されるか？



医学・生命科学・放射線防護分野へシミュレーションは応用されている。

医学（放射線治療）



Microsoft Copilotにより生成

生命科学（細胞/分子生物）



Microsoft Copilotにより生成

防護（1F事故による影響）



【32】

放射線がん治療・診断への応用

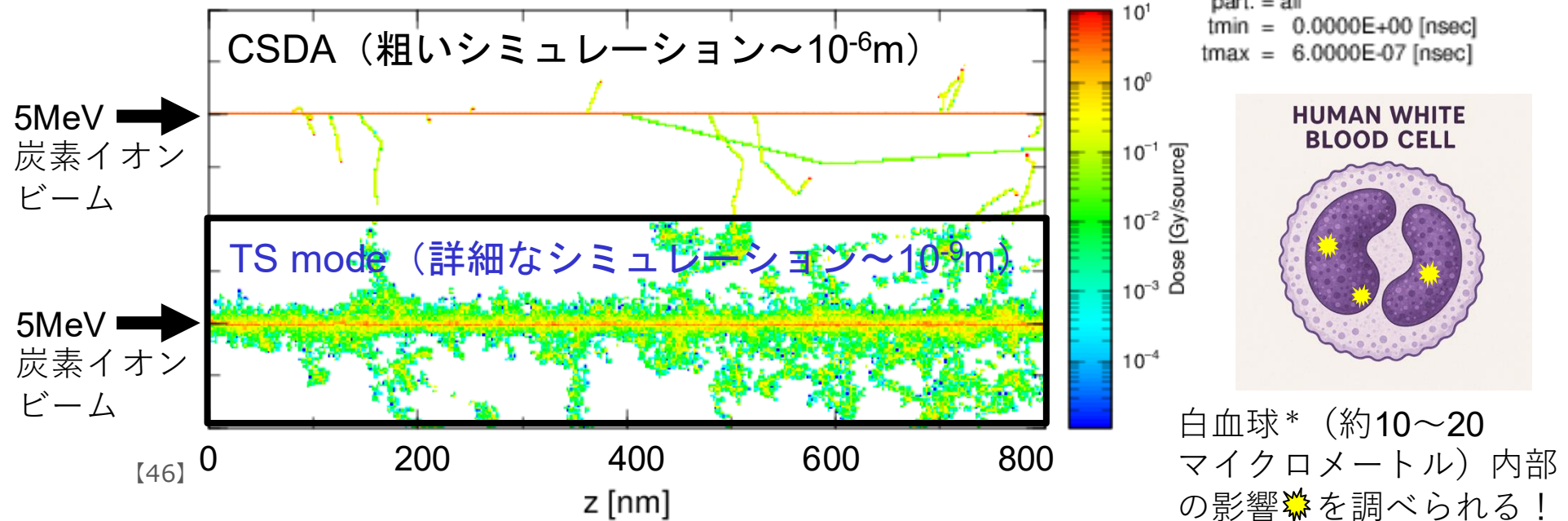
放射線がん治療	特徴
X線治療、 粒子線治療(陽子線、炭素線)	体外から照射できるため、外科手術と比較して 患者の負担小さい
放射性同位元素 (RI)治療、核医学 ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)	RIを含む薬剤を服用、直接的に、患部に照射 原子炉、加速器で発生させる中性子を、ホウ 素を取り込んだ患部に照射する。二次的に発 生するアルファ線でがん細胞を攻撃。

画像診断	特徴
CT、レントゲン(X線)	社会に広く浸透済み
MRI	磁場と電波を利用した検査

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

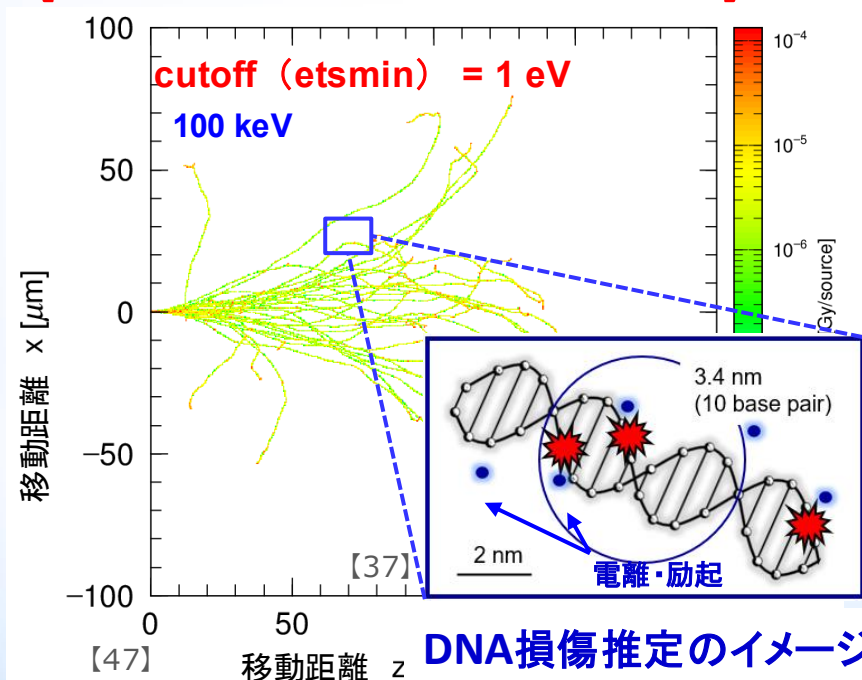
DNA損傷や発光応答などミクロスケールでの放射線影響メカニズム研究に応用

* Microsoft Copilot
により生成

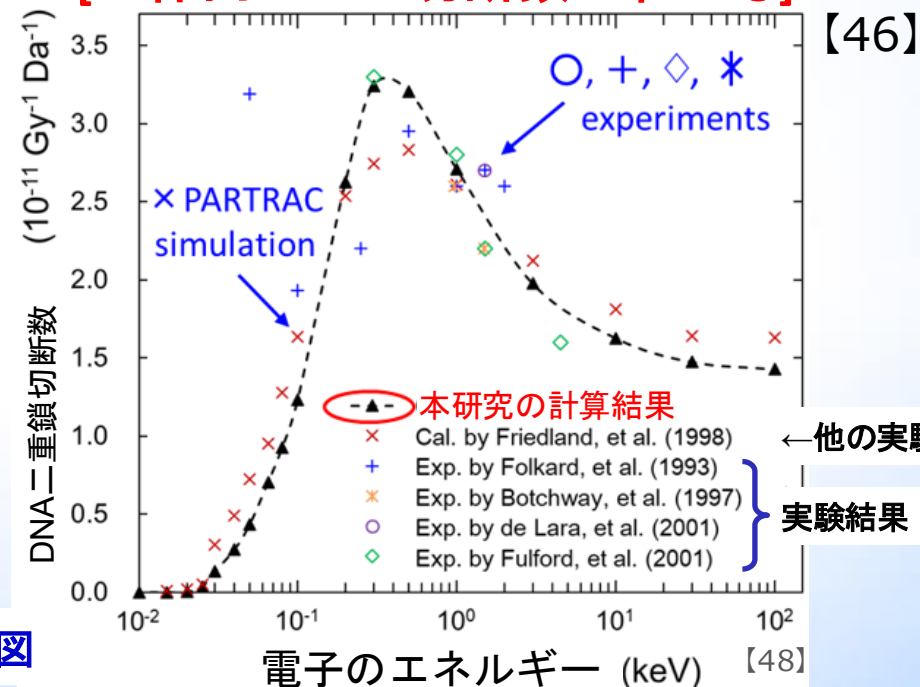
初期の放射線影響の予測

各原子衝突（電離・励起）の距離を測定すると生体のDNA切断数が予測可能

[原子衝突の2点間距離を測る] → [生体内のDNA切断数がわかる]



DNA損傷推定のイメージ図

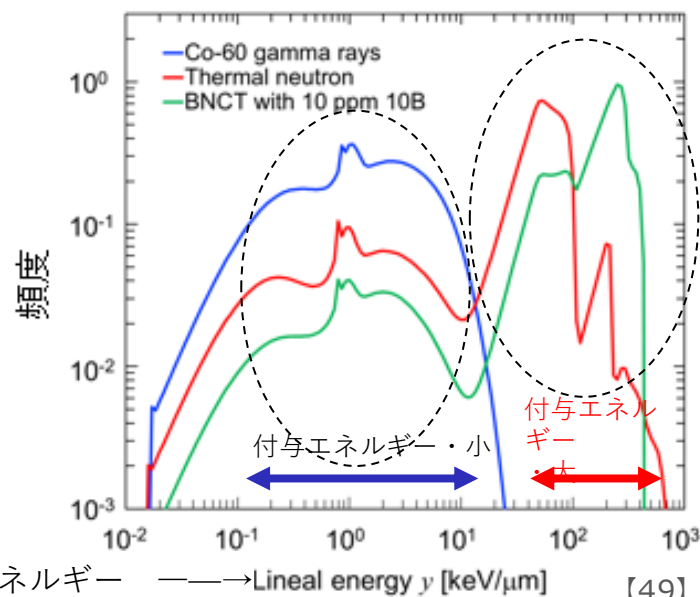


原子スケールに着目した解析を実施すると
生体の初期の放射線影響(DNA損傷)の解明が可能に！

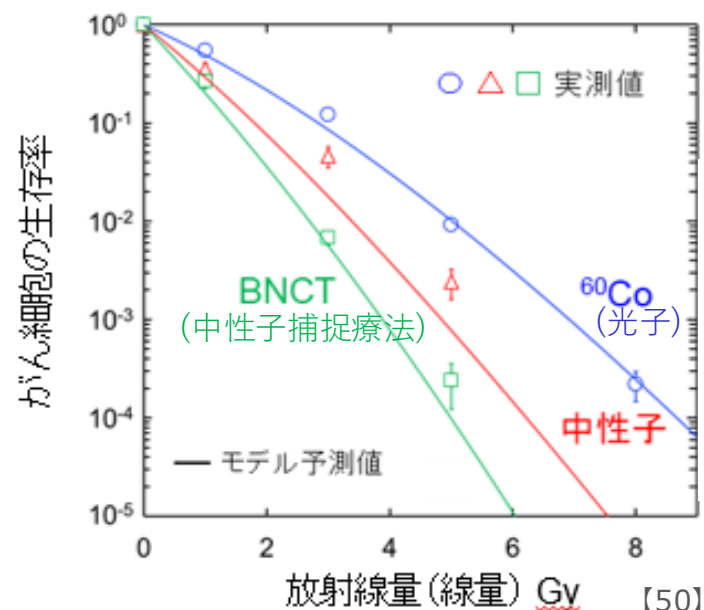
放射線治療効果の予測

生体細胞を構成するマイクロサイズの放射線の反応(エネルギー付与)の解析
→ 細胞の生死(がん細胞の殺傷効果)を予測することが可能

[ミクロなエネルギー付与の分布] → [様々な放射線照射による治療効果]



微小な領域に付与されるエネルギー



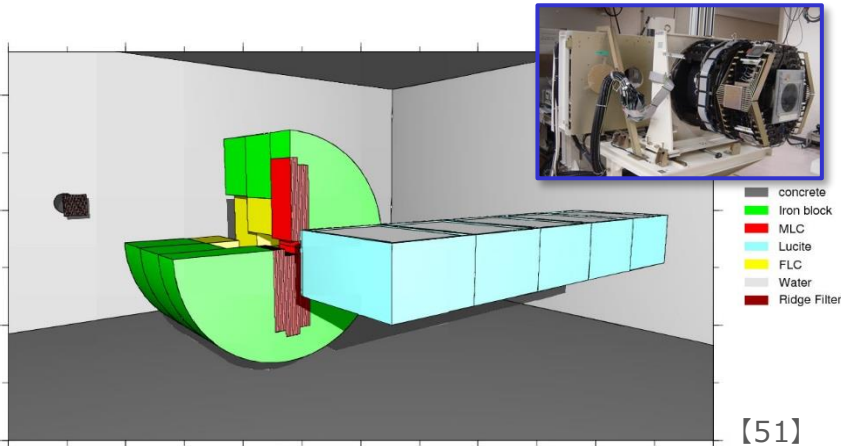
放射線の種類によって異なる、治療効果(がん細胞を殺傷する能力)の違いを検討できる

原子スケールに着目した解析を実施すると
医療で用いられる放射線治療効果の予測も可能に！

粒子線治療への応用

著作権上の都合により図表を非公開としています。
以下の文献をご参照ください。

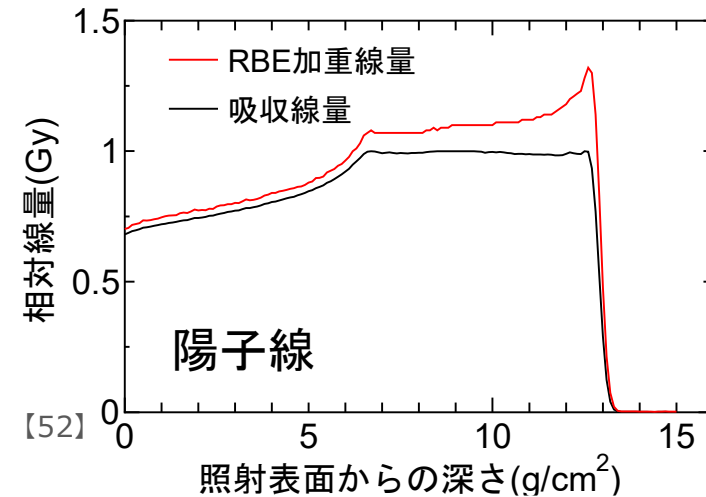
O. Ploc, T. Dachev. *Et al.* "Fragmentation from heavy ion beams in HIMAC BIO room calculated with PHITS and measured with Liulin," *2017 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, 2017, pp. 1-10.
<https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943842>
Figure 7.



【51】

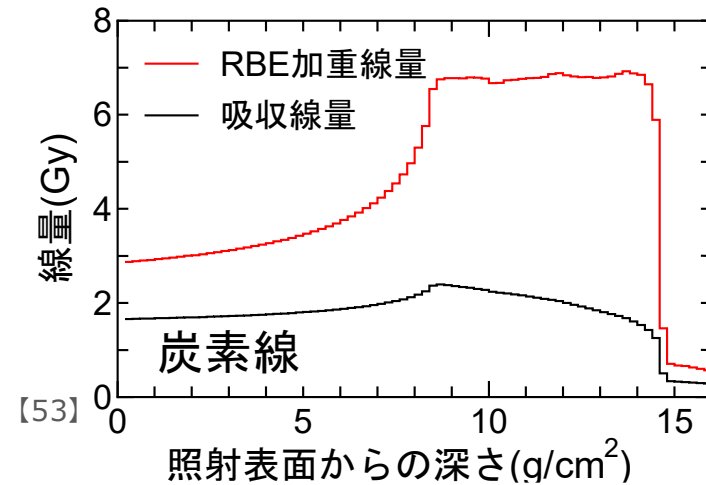
S. Yonai et al. *Med Phys.* 39, 5028-39 (2012)

粒子線治療場の2次散乱線評価



【52】

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



【53】

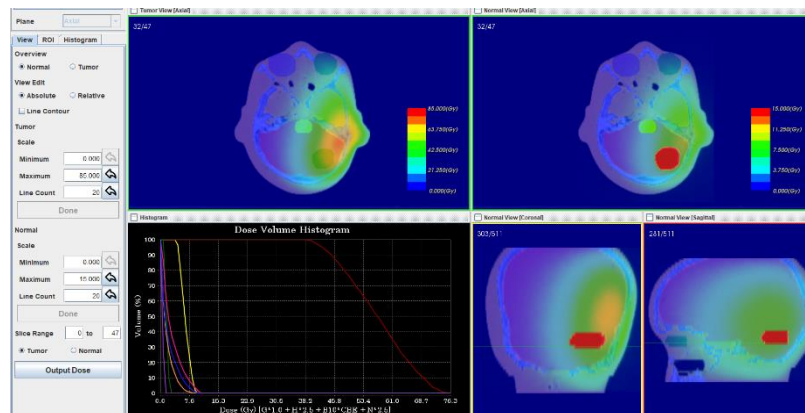
T. Sato et al. *Radiat. Res.* 171, 107-117 (2009)

吸収線量・RBE加重線量*の評価

* 放射線の種類、エネルギーの違いにより異なる、生物に及ぼす効果を考慮した線量

ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）への応用

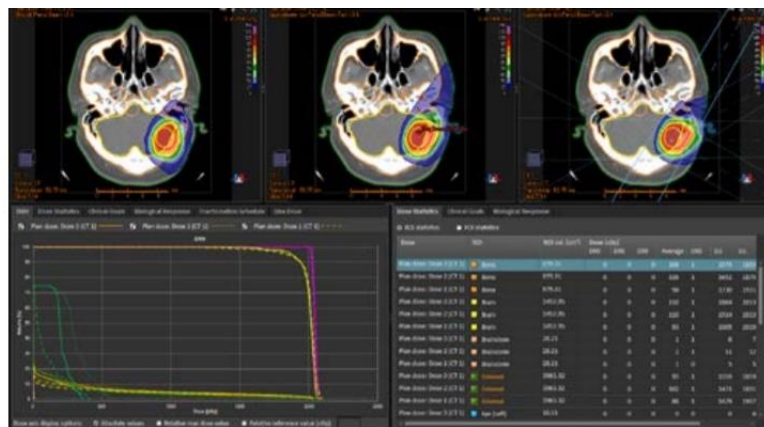
BNCT用治療計画システム



[54]

Tsukuba Plan (筑波大学)

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

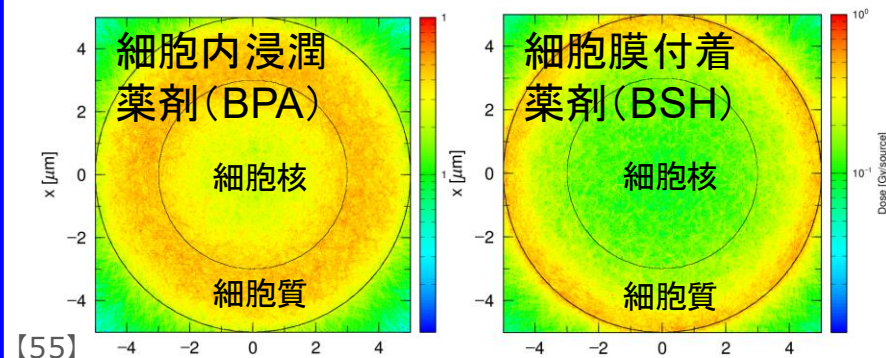


[38]

NeuCure™ (住友重機械工業)

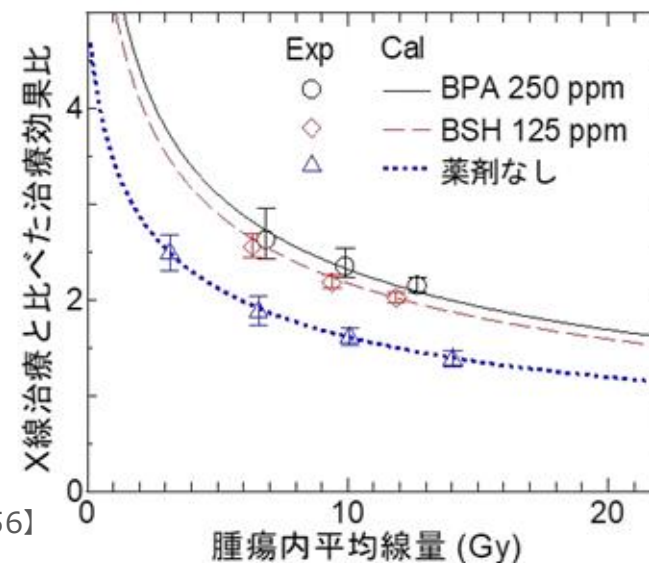
医療機器製造販売承認番号 : 30200BZX00083000

薬剤治療効果推定モデル



[55]

細胞レベルの線量解析結果



[56]

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)

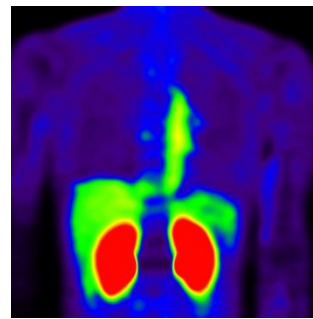
RT-PHITS (RadioTherapy package based on PHITS)

- ✓ 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

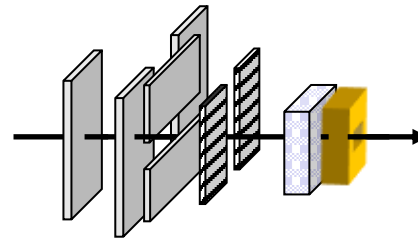
DICOM画像 & 治療計画データ



CT

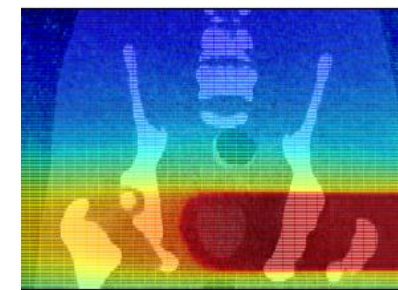


PET/SPECT



RT-plan

市販のDICOMソフト



RT-dose

- ✓ ROI
- ✓ DVH

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

PHITS入力ファイル

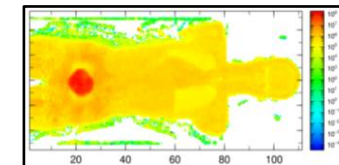


ボクセルファントム

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

PHITS

PHITS出力ファイル

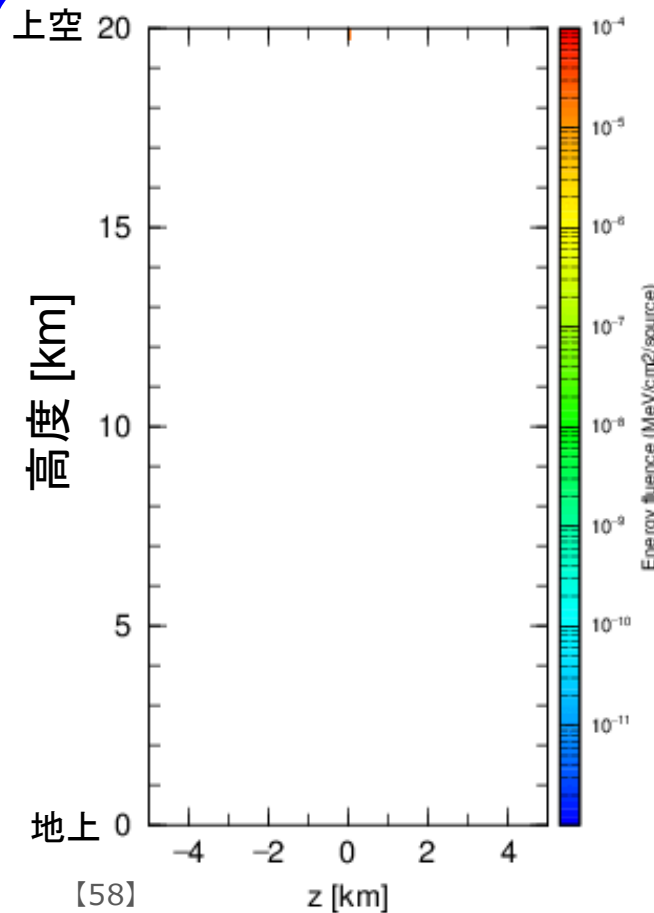


3次元線量分布

【57】

phits/utility/RT-phits

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>

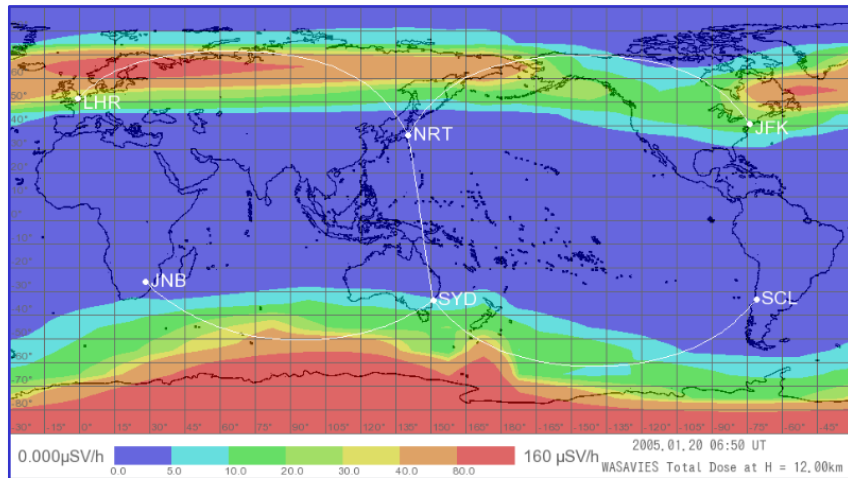
- ✓ 日本の航空会社による航空機乗務員被ばく線量管理や年代測定高精度化に貢献
- ✓ 地球惑星科学分野でも幅広く利用（宇宙線強度と気温や火山活性度の相関など）

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

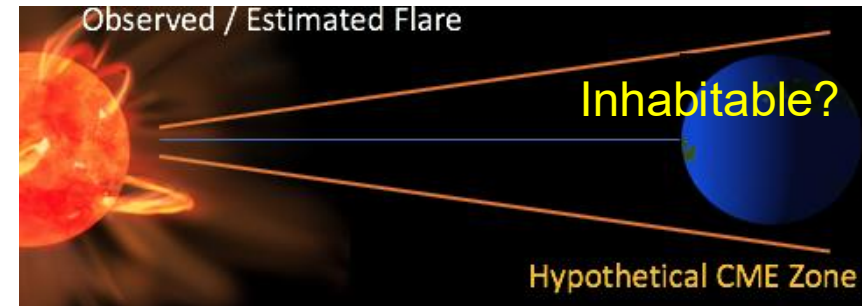
[42]



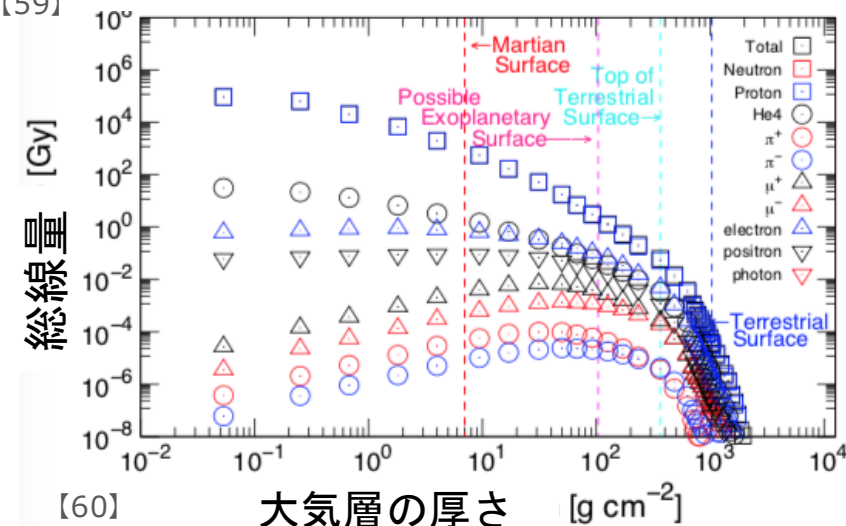
2005年1月に発生した太陽フレアのピーク時における高度12kmでの被ばく線量率

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



[59]



[60]

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

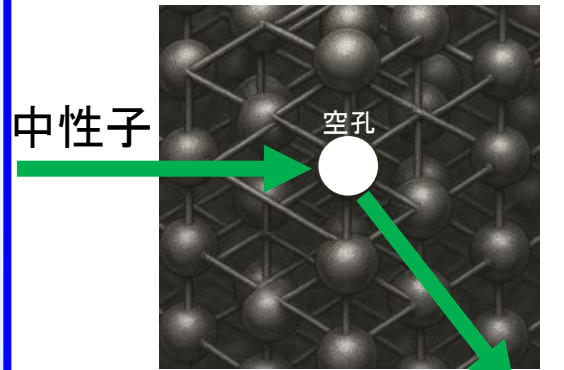
YA Yamashiki et al. ApJ 881, 114 (2019)

材料物質科学への応用

DPA計算機能

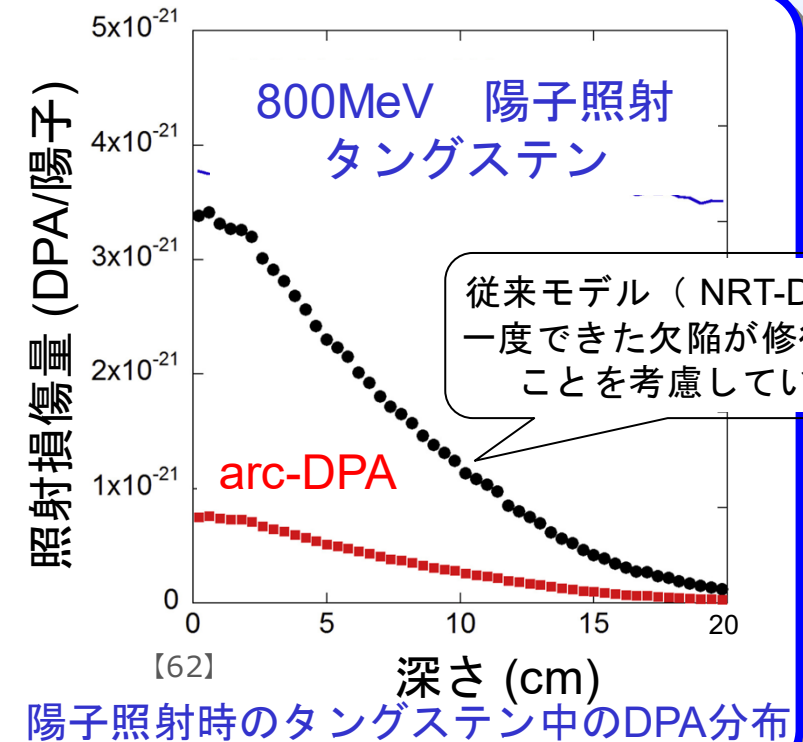
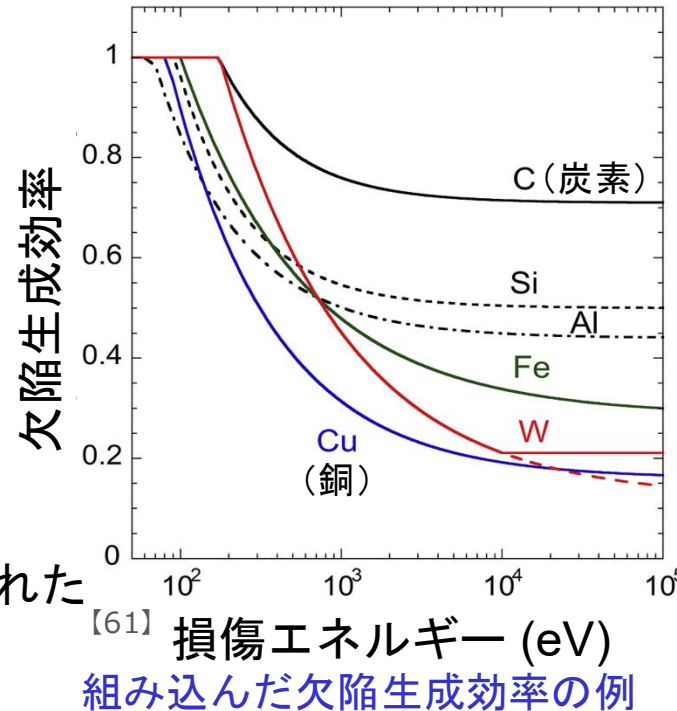
- ✓ DPAとは？→放射線照射により結晶格子からはじき出される原子数の平均値
→照射損傷の指標。DPAが大きくなると延性などの材料特性が劣化する
- ✓ PHITSのDPA計算機能の特徴→従来指標（NRT-DPA）のみならず、材料の欠陥生成効率を考慮した新しい指標（arc-DPA）も計算可能

金属：規則的に原子が整列しているが...*



中性子と原子が衝突して、金属原子が弾きだされている

弾きだされた原子



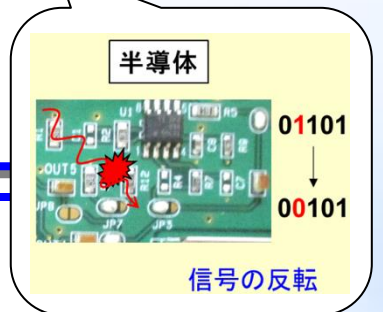
従来モデル（NRT-DPA）：一度できた欠陥が修復されることを考慮していない

デバイス工学への応用

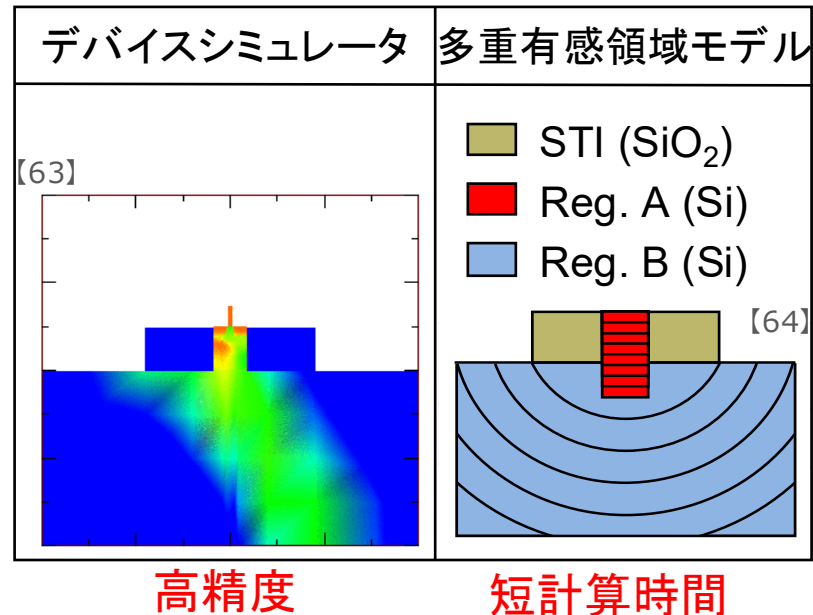
半導体ソフトウェア発生率評価

- ✓ 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

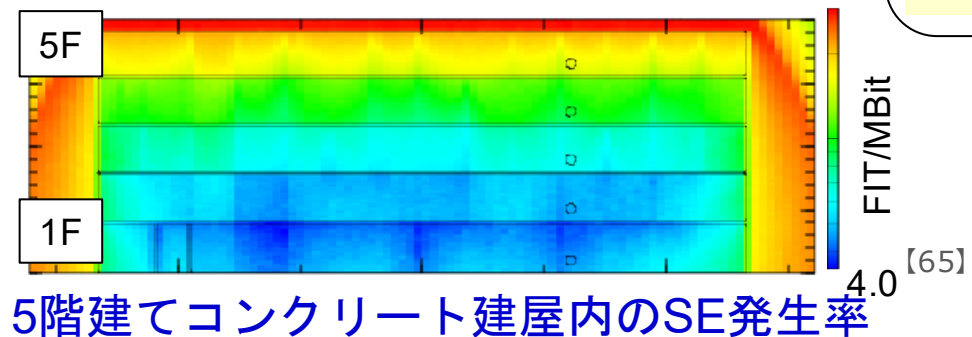
イベントジェネレータと宇宙線線源モードが有用



ソフトウェア発生率評価モデルの開発



建屋の遮蔽効果の検討



- ✓ 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

講義内容

1. イントロダクション

2. シミュレーション計算技術

2. 1 モンテカルロ計算手法について

2. 2 放射線防護の研究、応用

2. 3 放射線防護以外へのシミュレーションの活用

3. まとめ

3. まとめ

- 放射線防護に関する最新の知見を紹介
- シミュレーション技術なくして、詳細な線量推定は不可能！
- DNAレベルから宇宙規模までシミュレーション、いろいろな応用が可能
- 放射線防護、基礎科学、様々な分野で活用
- 一方で、計算結果には“不確かさ”があることを忘れないで！

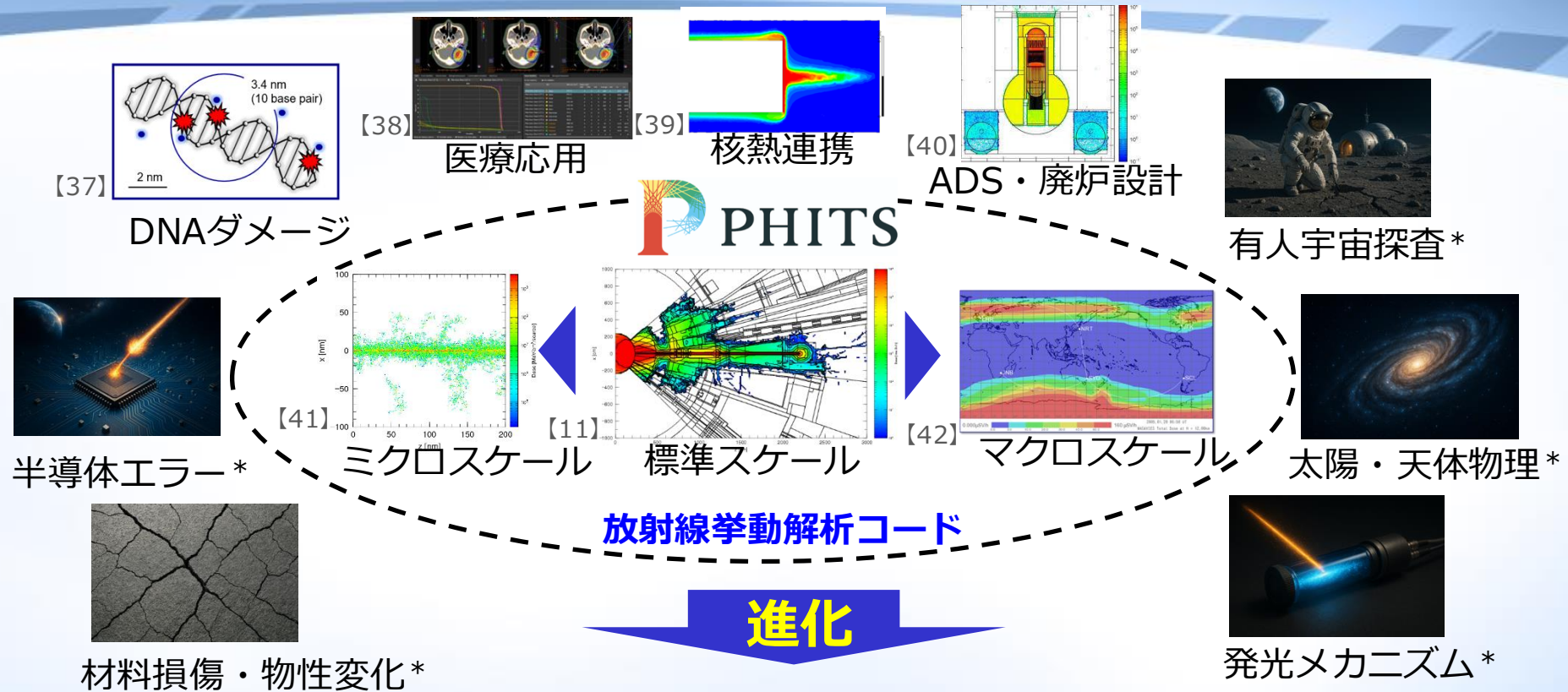
PHITSの特長

- ◆ 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力ツール
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、マイクロドジメトリ機能、RT-PHITSなど

- ✓ 世界70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）

最後に一言、



皆さんのアイディア次第で、シミュレーション技術
は進化、活用のは無限大に広がります！

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	✦	MIT License / 2024 Japan Atomic Energy Agency
【2】	✦	ICRP2007年勧告に準拠した線量評価手法やデータ等 (1990年勧告からの主な変更点) について, 日本原子力研究開発機構, 原子力規制委員会ホームページ (https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/houshasen/210000100.html)
【3】		CC-BY 4.0 / Sato, K., Furuta, T., Satoh, D., & Tsuda, S. (2024). Construction of new polygon mesh -type phantoms based on adult Japanese voxel phantoms. PloS one, 19(10), e0309753.
【4】	✦	日本原子力研究開発機構ホームページ (https://www.jaea.go.jp/02/press2024/p24102502/)
【5】	✦	MIT License / 2024 Japan Atomic Energy Agency
【6】	✦	日本原子力研究開発機構ホームページ (https://www.jaea.go.jp/02/press2024/p24102502/)
【7】	✦	PHITS開発チーム
【8】	✦	PHITS開発チーム
【9】	✦	PHITS開発チーム
【10】	✦	PHITS開発チーム

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【11】	+	PHITS開発チーム
【12】	+	PHITS開発チーム
【13】	+	Plotting Tool for ENDF (Evaluated Nuclear Data File), Nuclear Data Center (https://www.ndc.jaea.go.jp/ENDF_Graph/)
【14】	+	PHITS開発チーム
【15】	+	PHITS開発チーム
【16】		CC-BY-NC-ND 4.0 / Iwamoto, Y., Sato, T., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S. I., ... & Niita, K. (2017). Benchmark study of the recent version of the PHITS code. Journal of Nuclear Science and Technology, 54(5), 617-635.
【17】		CC-BY-NC-ND 4.0 / Iwamoto, Y., Sato, T., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S. I., ... & Niita, K. (2017). Benchmark study of the recent version of the PHITS code. Journal of Nuclear Science and Technology, 54(5), 617-635.
【18】		CC-BY-NC-ND 4.0 / Iwamoto, Y., Sato, T., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S. I., ... & Niita, K. (2017). Benchmark study of the recent version of the PHITS code. Journal of Nuclear Science and Technology, 54(5), 617-635.
【19】		CC-BY-NC-ND 4.0 / Iwamoto, Y., Sato, T., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S. I., ... & Niita, K. (2017). Benchmark study of the recent version of the PHITS code. Journal of Nuclear Science and Technology, 54(5), 617-635.
【20】		CC-BY-NC-ND 4.0 / Iwamoto, Y., Sato, T., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S. I., ... & Niita, K. (2017). Benchmark study of the recent version of the PHITS code. Journal of Nuclear Science and Technology, 54(5), 617-635.

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【21】	+	ICRP Publication 116, 外部被ばくに対する放射線防護量のための換算係数, 日本アイソトープ協会
【22】	+	ICRP Publication 116, 外部被ばくに対する放射線防護量のための換算係数, 日本アイソトープ協会
【23】	+	Reprinted from Advances in Space Research, Vol.50 Issue4, M. Puchalska et al., Simulations of MATROSHKA experiment outside the ISS using PHITS, 490, 2012, with permission from Elsevier.
【24】	+	PHITS開発チーム
【25】	+	PHITS開発チーム
【26】	+	PHITS開発チーム
【27】	+	Simulations of the MATROSHKA experiment at the international space station using PHITS, L. Sihver et al., Radiation and Environmental Biophysics, Volume 49, Springer Nature, 2010, reproduced with permission from SNCSC
【28】	+	PHITS開発チーム
【29】	+	PHITS開発チーム
【30】	+	Tanaka,K., Inabe, N., Yoshida, K., & Kubo, T. (2014). Evaluation of radiation levels and comparison with PHITS calculations for the BigRIPS separator in Radioactive Isotope Beam Factory. Progress in Nuclear Science and Technology, 4, pp. 201-204

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【31】		CC-BY 4.0 / Akashio, A., Tanaka, K., Imao, H., & Uwamino, Y. (2017). Measurement of activation of helium gas by ^{238}U beam irradiation at about 11 A MeV. In EPJ Web of Conferences (Vol. 153, p. 01022). EDP Sciences.
【32】	✦	東京電力ホールディングス
【33】	✦	Reprinted from Anthropocene, Vol.14, Yukihiro Satou et al., First successful isolation of radioactive particles from soil near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, 73, 2016, with permission from Elsevier.
【34】	✦	PHITS開発チーム
【35】	✦	燃料デブリ取り出し工程の検討に向けた線量測定・評価に関する最近の成果, 日本原子力研究開発機構ホームページ (https://fukushima.jaea.go.jp/info/20221222_2.html)
【36】	✦	日本原子力研究開発機構, Proceedings of the 2017 Symposium on Nuclear Data November 16-17, 2017, iVil, Tokai-mura, Ibaraki, Japan(JAEA-Conf 2018-001), 2018
【37】	✦	PHITS開発チーム
【38】	✦	住友重機械工業株式会社ホームページ (https://www.shi.co.jp/info/2020/6kgpsq000000dax0.html)
【39】	✦	PHITS開発チーム
【40】	✦	PHITS開発チーム

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【41】	✦	PHITS開発チーム
【42】	✦	Used with permission of John Wiley & Sons - Books, from Space weather : The international journal of research & applications., Tatsuhiko Sato et al., 16, 2018; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.
【43】	✦	PHITS開発チーム
【44】	✦	PHITS開発チーム
【45】	✦	PHITS開発チーム
【46】	✦	PHITS開発チーム
【47】	✦	PHITS開発チーム
【48】	✦	Reprinted with permission from Modeling of yield estimation for DNA strand breaks based on Monte Carlo simulations of electron track structure in liquid water. Copyright 2019, AIP Publishing. This article may be downloaded for personal use only. Any other use requires prior permission of the author and the AIP Publishing
【49】		CC-BY 4.0 / Matsuya, Y., Fukunaga, H., Omura, M., & Date, H. (2020). A Model for Estimating Dose-Rate Effects on Cell-Killing of Human Melanoma after Boron Neutron Capture Therapy. Cells, 9(5), 1117.
【50】		CC-BY 4.0 / Matsuya, Y., Fukunaga, H., Omura, M., & Date, H. (2020). A Model for Estimating Dose-Rate Effects on Cell-Killing of Human Melanoma after Boron Neutron Capture Therapy. Cells, 9(5), 1117.

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【51】		Yonai, S., Matsufuji, N., & Namba, M. (2012). Calculation of out - of - field dose distribution in carbon - ion radiotherapy by Monte Carlo simulation. Medical Physics, 39(8), 5028-5039.
【52】	✚	CC-BY 4.0 / Takada, K., Sato, T., Kumada, H., Koketsu, J., Takei, H., Sakurai, H., & Sakae, T. (2018). Validation of the physical and RBE-weighted dose estimator based on PHITS coupled with a microdosimetric kinetic model for proton therapy. Journal of radiation research, 59(1), 91-99.
【53】	✚	PHITS開発チーム
【54】	✚	PHITS開発チーム
【55】	✚	PHITS開発チーム
【56】		CC-BY 4.0 / Sato, T., Masunaga, Si., Kumada, H. et al. Microdosimetric Modeling of Biological Effectiveness for Boron Neutron Capture Therapy Considering Intra- and Intercellular Heterogeneity in ¹⁰ B Distribution. Sci Rep 8, 988 (2018).
【57】		CC-BY 4.0 / 佐藤達彦. (2025). 核医学治療における内部被ばく線量計算法の最近の動向—モンテカルロ法—. RADIOISOTOPES, 74(2), 183-188.
【58】	✚	PHITS開発チーム
【59】	✚	PHITS開発チーム
【60】	✚	© AAS. Reproduced with permission. Yamashiki, Yosuke A., et al. "Impact of stellar superflares on planetary habitability." The Astrophysical Journal 881.2 (2019): 114. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2a71

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【61】		CC-BY 4.0 / Iwamoto, Y., Meigo, S. I., & Hashimoto, S. (2020). Estimation of reliable displacements-per-atom based on athermal-recombination-corrected model in radiation environments at nuclear fission, fusion, and accelerator facilities. Journal of Nuclear Materials, 538, 152261.
【62】		CC-BY 4.0 / Iwamoto, Y., Meigo, S. I., & Hashimoto, S. (2020). Estimation of reliable displacements-per-atom based on athermal-recombination-corrected model in radiation environments at nuclear fission, fusion, and accelerator facilities. Journal of Nuclear Materials, 538, 152261.
【63】		PHITS開発チーム
【64】		PHITS開発チーム
【65】		PHITS開発チーム