



第15回原子力機構報告会

# 超スマートな次世代社会を支える ソフトウェア研究

令和2年11月17日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター

環境・放射線科学ディビジョン 放射線挙動解析研究グループ

安部 晋一郎

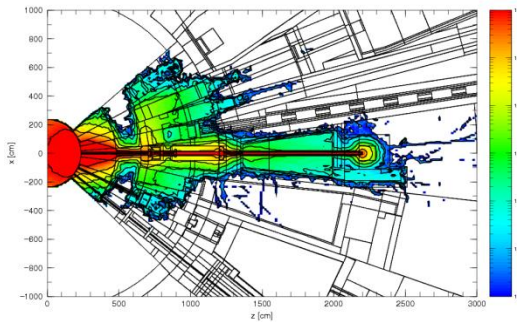
## 原子力基礎工学研究センターの使命

原子力エネルギー利用と放射線利用を支える最新の科学技術を牽引し、原子力開発を支える**基礎基盤的技術**を研究

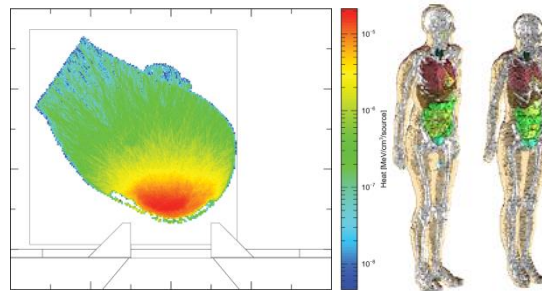
## 国産の放射線輸送計算コード **PHITS** の開発・応用研究

あらゆる物質中での様々な放射線の挙動を模擬する**モンテカルロ計算コード**

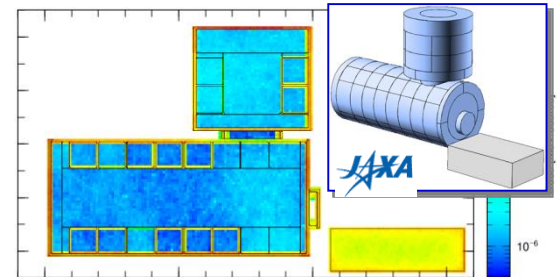
### 適用例



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

(国内外で約4,000名のユーザー)

## ソフトエラー (Soft Error)

放射線によって電子機器に生じる**一時的な誤動作**※  
半導体デバイスの保持データの反転によって生じる。

(※ 回復不可能な損傷を指すハードエラーに対し、機器自体に損傷がないため「ソフト」エラーと呼ぶ)

Cite) 講談社WEB記事, “あなたのスマホのフリーズ、原因は降りそそぐ「宇宙線」かもしれない” (2018年8月)

例1) 約1000個の半導体を並べた測定結果に基づく試算



世界中のスマートフォン(40億台稼動)で  
1日に130万台余でソフトウェア発生

Cite) Australian Transport Safety Bureau, “ATSB TRANSPORT SAFETY REPORT,” AO-2008-070, 2008.

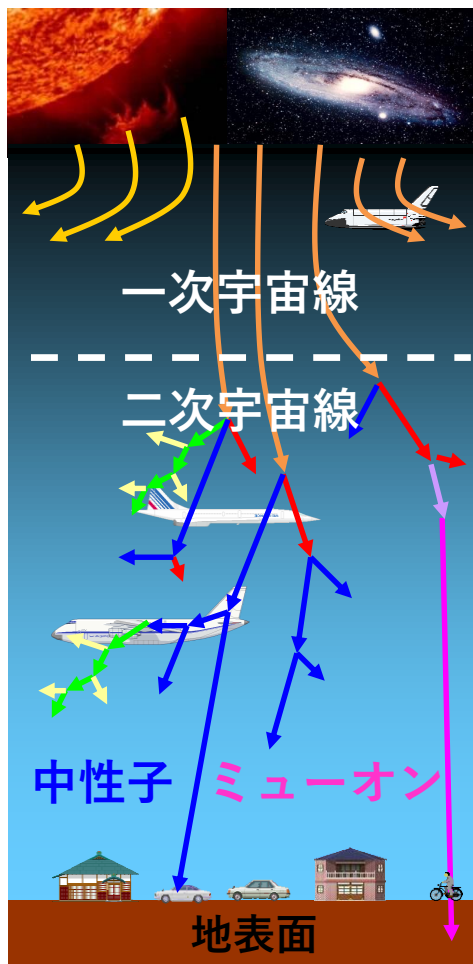
例2) 飛行機の制御システムの不具合 (2008年10月)

フライバイワイヤの  
制御システム故障により急降下

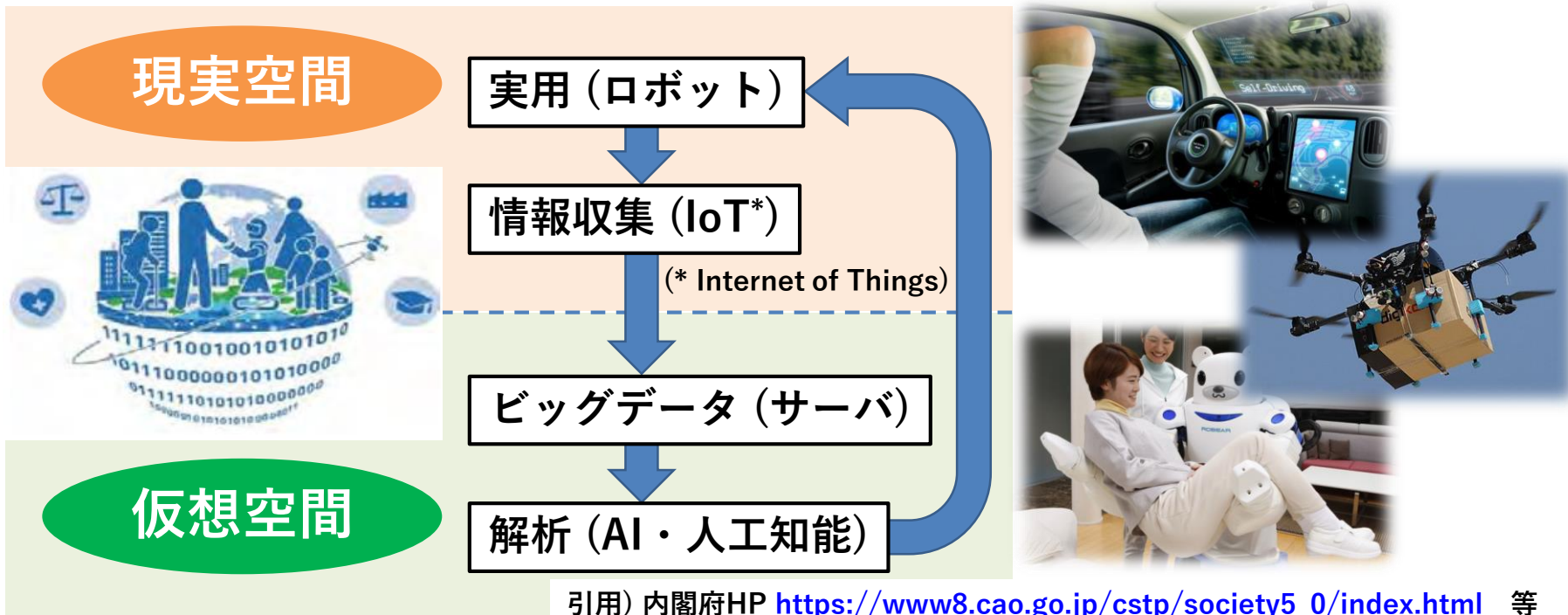
数十人の負傷者



報告書では**宇宙線の影響**である可能性が高いと指摘



IoTによる情報収集, AI・人工知能による解析で **イノベーション促進**



## 次世代社会におけるソフトウェアの危険性

- IoTの普及による **電子機器の増加に伴うエラー増加**
- 不具合が **ネットワークを介して他の機器に伝播**
- **人の介在しないAI等の不具合による甚大な被害**



## 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (OPERA)

～ 安全・安心・スマートな長寿社会実現のための高度なアプリケーション技術の創出 ～

### 地上で生じるソフトウェア率の**評価技術の開発**

#### (最終目標) 国際標準化, 評価のビジネス化

大阪大学, 九州大学, 京都工芸繊維大学, **日本原子力研究開発機構**, 東北大学, J-PARCセンター,  
名古屋大学, 高エネルギー加速器研究機構,  
(株)ソシオネクスト, (株)日立製作所, HIREC (株), 富士電機(株), 三菱電機(株), 日本システムウェア(株)  
東芝デバイス&ストレージ(株), パナソニックデバイスシステムテクノ(株)

(2017 ~ 2021年度)

### 科学研究費 基盤研究(S)

～ ミューオン起因ソフトウェア評価基盤技術：実測とシミュレーションに基づく将来予測 ～

### **ミューオン起因**のソフトウェアのメカニズム解明

世界に先駆けて新知見を創出し, 将来的な影響を見極める!

大阪大学, 九州大学, 東京大学, **日本原子力研究開発機構**

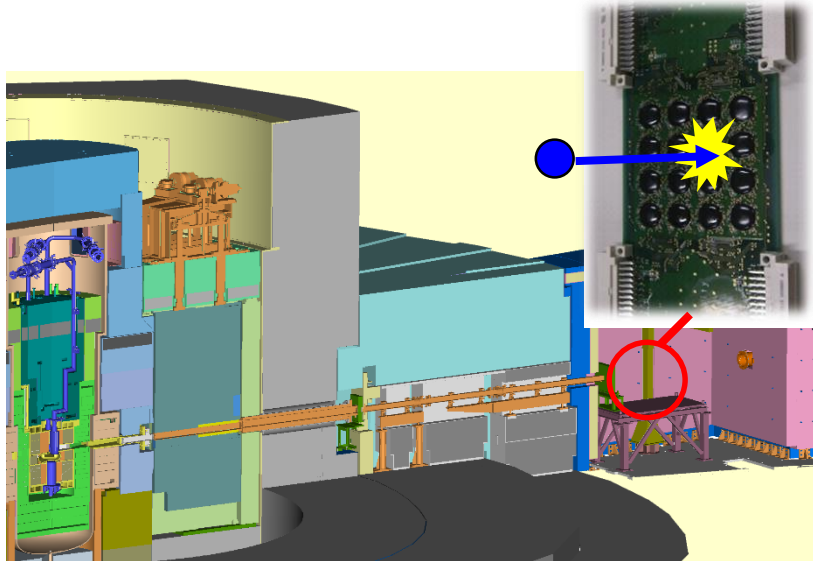
(2019 ~ 2023年度)

## ソフトウェア 率評価

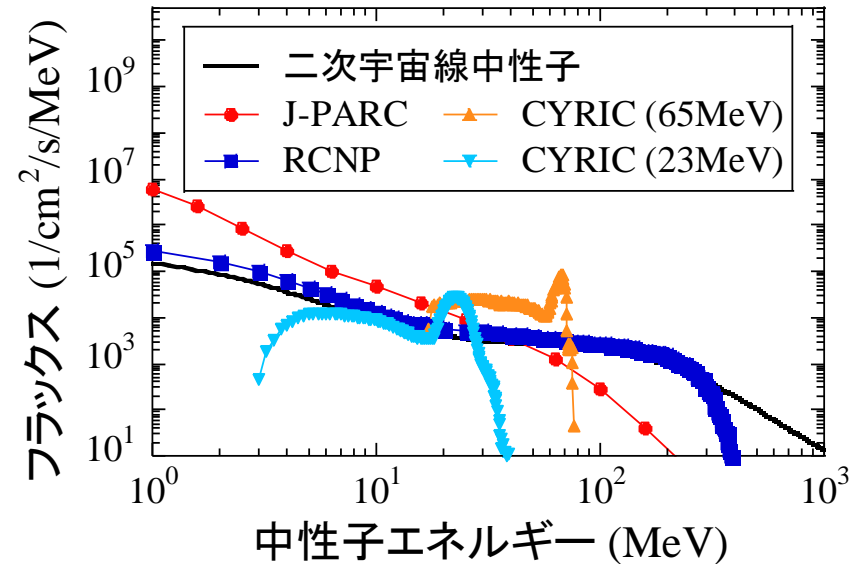
- ソフトエラー対策の技術開発の有効性検証に必須
- 実環境で使用される電子機器の信頼性の保証

**実環境での試験は困難** (電子機器を数千台配置, 数ヶ月エラー数を計測)

➔ **加速器施設での放射線照射による 加速試験法 が不可欠**



J-PARC BL10での加速試験の模式図

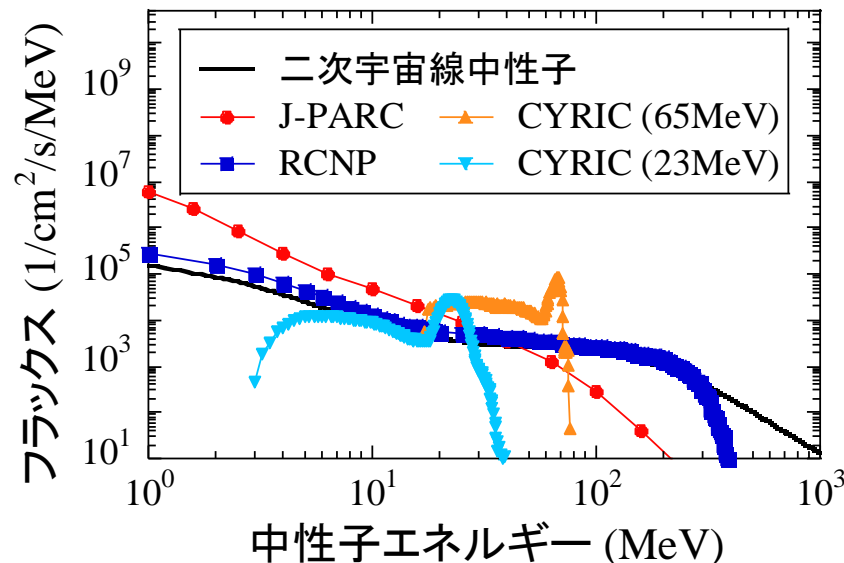
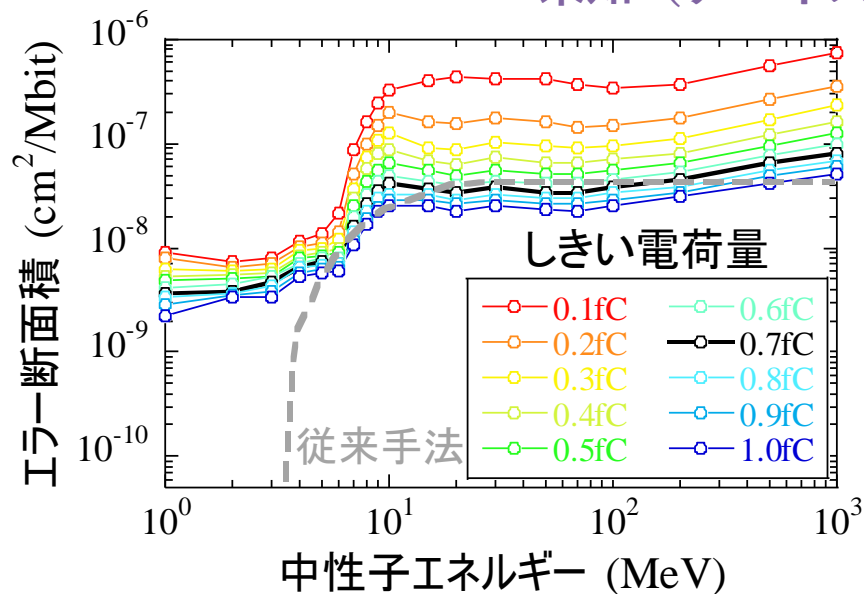


各加速器施設の中性子フラックス

多くの中性子照射施設では、地上のソフトウェア率を直接的に測れない。

**目標** **多様な中性子源**を用いたソフトウェア率評価・校正技術の確立

$$\text{ソフトウェア率} = \int \underbrace{\text{エラー断面積, } \sigma_{\text{err}}(E_n)}_{\text{未知 (デバイスに依存)}} \times \underbrace{\text{フラックス, } \phi(E_n)}_{\text{既知}} dE_n$$



従来手法 および PHITSシミュレーションで算定したエラー断面積の比較

各加速器施設の中性子フラックス

従来手法

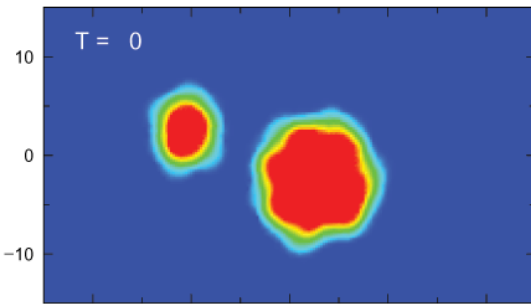
低エネルギー領域のエラー断面積を過小評価する関数を利用

考案した評価手法

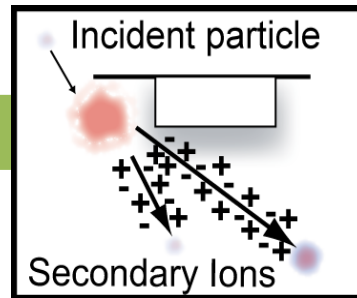
- エラー断面積をPHITSシミュレーションで詳細に算定
- しきい電荷量は1つの中性子照射試験の測定値で決定可能

高精度・短時間にソフトウェア率を算出する **実用的なモデル** を開発

(1) 核反応過程

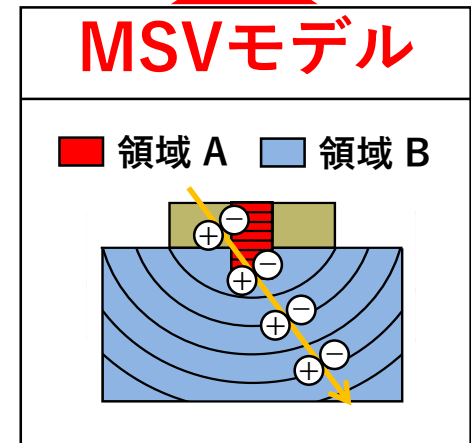
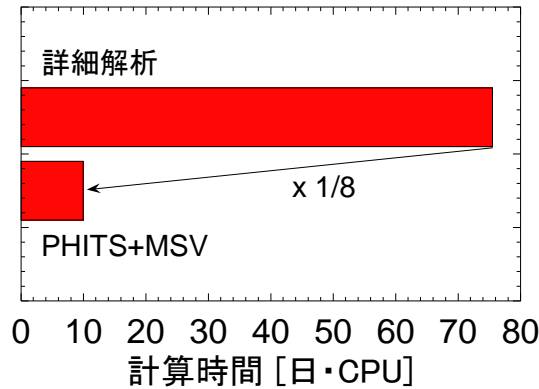
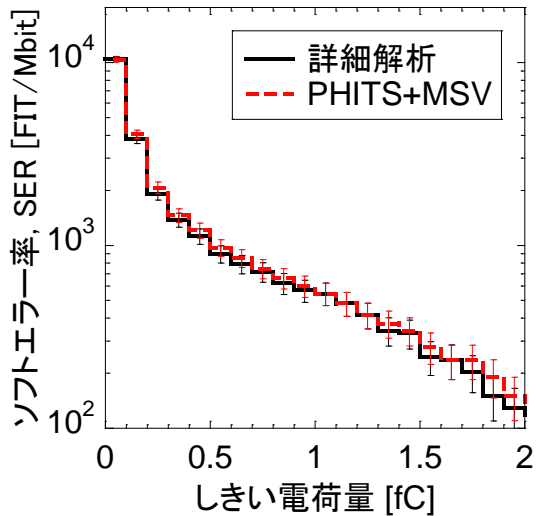
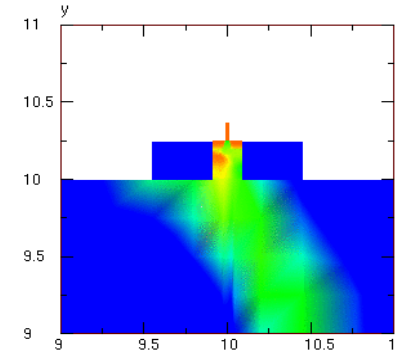


(2) 電荷付与過程



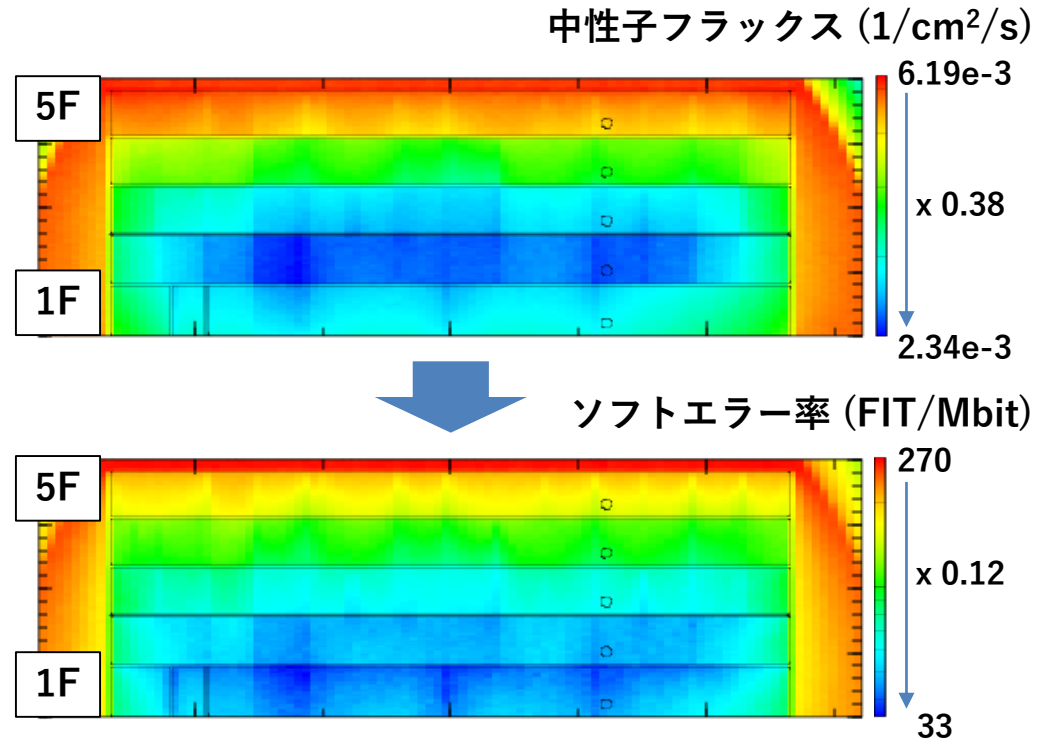
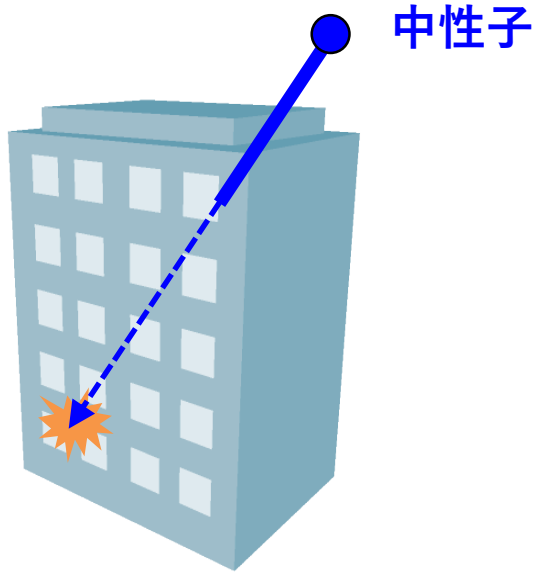
PHITS

(3) 電荷収集過程





## 電子機器の最適な設置場所をPHITSシミュレーションで特定!!



建屋内の中性子フラックスとエラー率の空間分布

### 評価のビジネス化

具体的なソフトウェア低減対策のコンサルティング

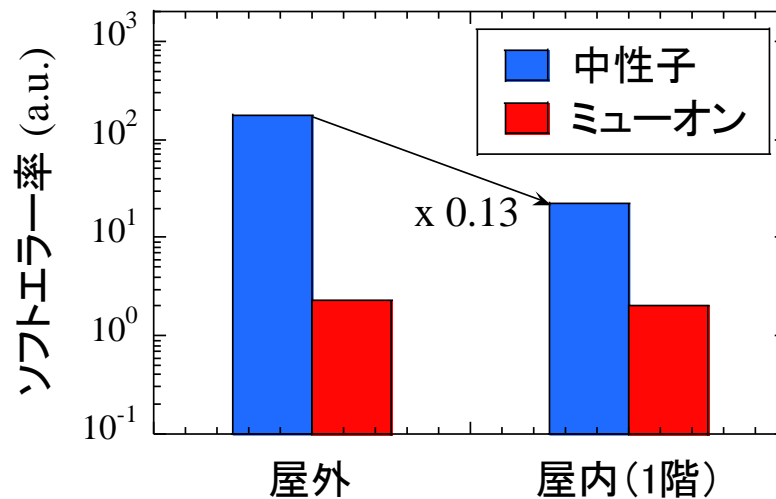
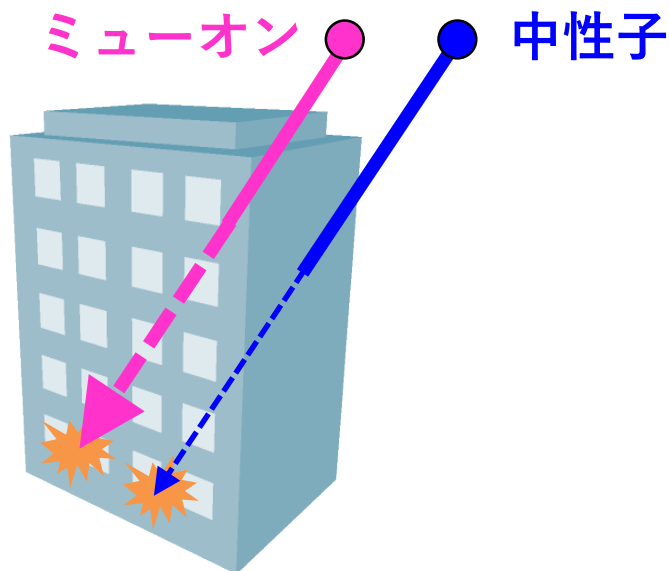
➡ 企業の経営合理化を支援!!

従来の  
認識

地上におけるソフトウェアは**二次宇宙線中性子**が主因であり  
二次宇宙線ミュオンによる影響はほとんど無い。

我々の  
研究

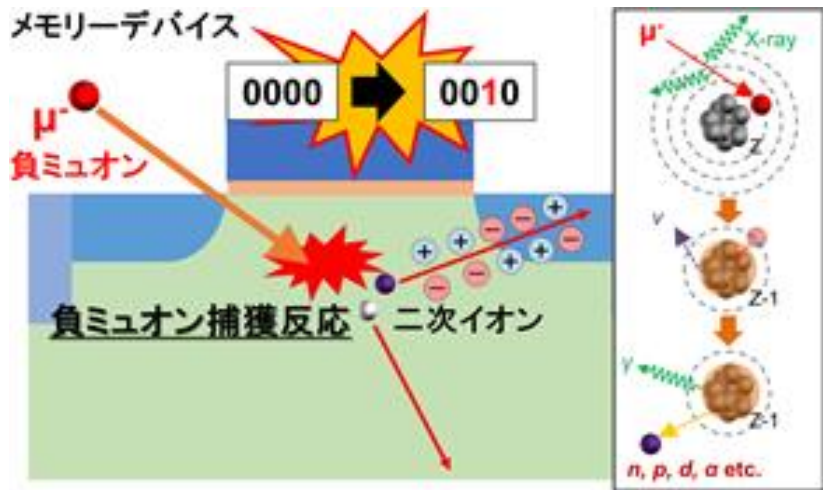
ミュオン反応モデルを新規開発, 建物まで考慮した計算  
 → 屋内のソフトウェアの**約10%程度はミュオン**が原因



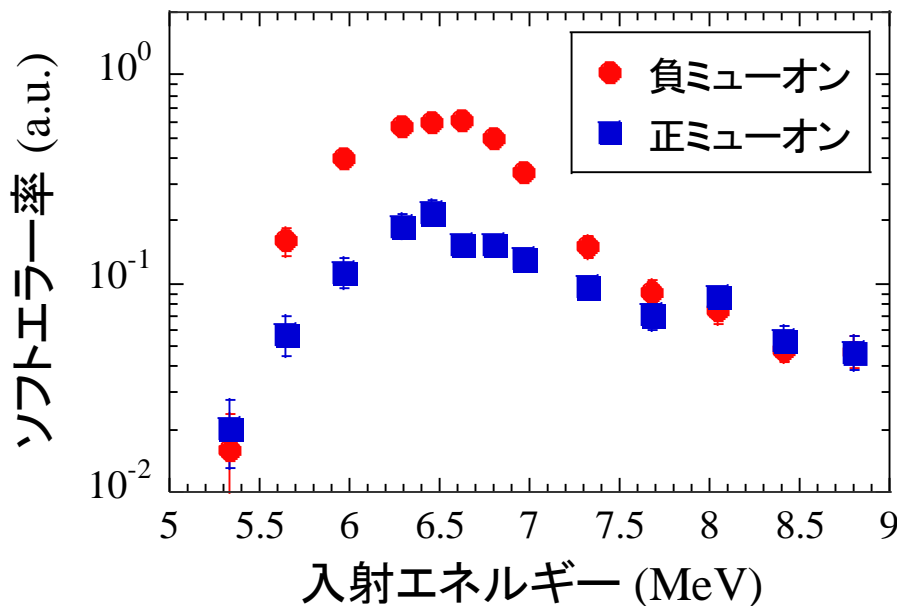
PHITSで算定した屋内外のソフトウェア率

二次宇宙線ミュオン起因ソフトウェアの**発生メカニズム**を解明し  
**ソフトウェア対策**を考案する

(2018年6月1日 プレスリリース)



負ミュオン捕獲反応による  
ソフトウェア発生の様式図



J-PARC MUSEでのミュオン照射実験結果

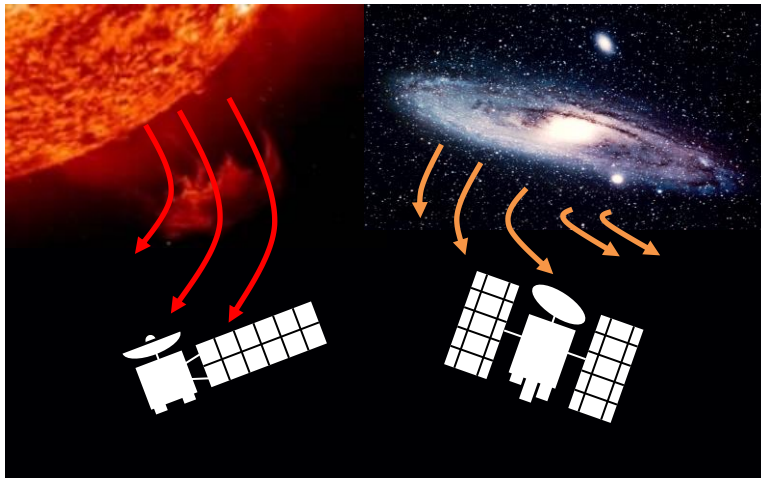
**負ミュオン捕獲反応**がソフトウェアを多く引き起こす事を  
シミュレーション・実験の双方より**世界で初めて実証!!**

捕獲反応の発生確率・二次イオン生成は原子核種に依存  
➡ **材料の選定によってソフトウェア耐性が向上!!**

IoTやAIによりイノベーションを創出する次世代社会を迎えるには  
安心・安全の観点からソフトウェア率の評価・対策は非常に重要

半導体ソフトウェアの理論・メカニズム解明研究を行う  
国内唯一の研究機関として、様々な企業や大学の研究開発に貢献

今後の10年に向けて



過酷な放射線環境下で  
長期間運用される電子機器

高機能・高性能・省電力の  
電子機器が次世代宇宙機に必要

一次宇宙線陽子起因ソフトウェアの  
影響が懸念

これまで蓄積した知見・技術を  
陽子起因ソフトウェア評価・対策に  
活用し、**将来の宇宙開発にも貢献!!**

# 参考資料

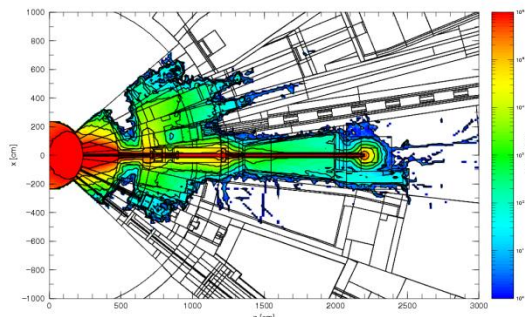
～ PHITSの概要と特徴 ～

## Particle and Heavy Ion Transport code System

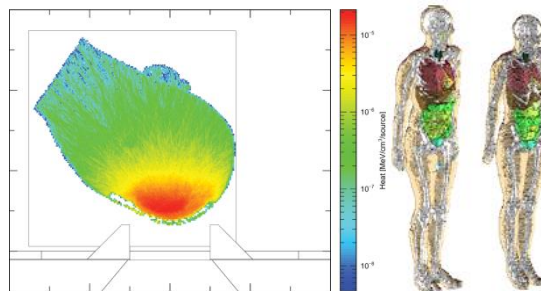
### PHITSとは？

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

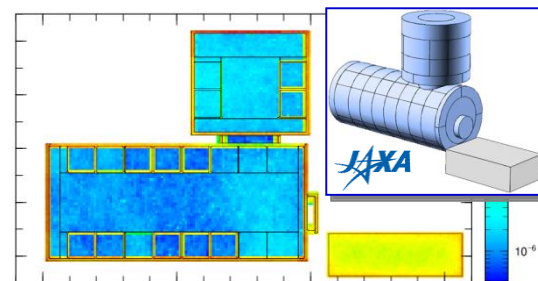
### 適用例



加速器遮へい設計



放射線治療 & 防護研究



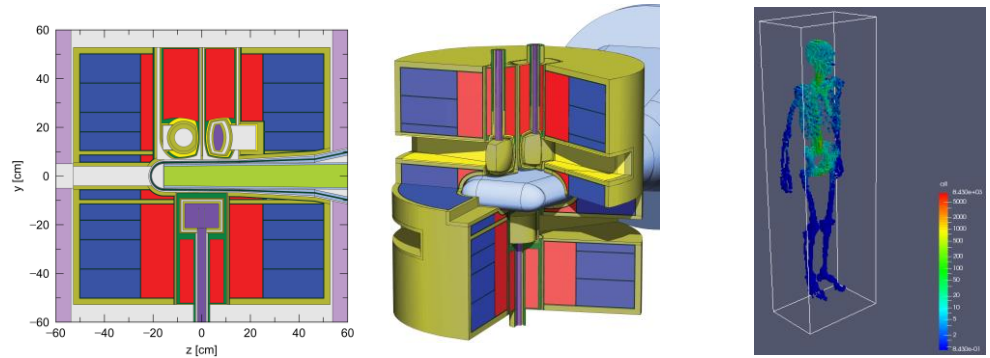
宇宙・地球惑星科学

### 入手方法

- PHITS講習会に参加
- RISTの原子力コードセンターに依頼 (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 (国外ユーザー, 無料)

- **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**

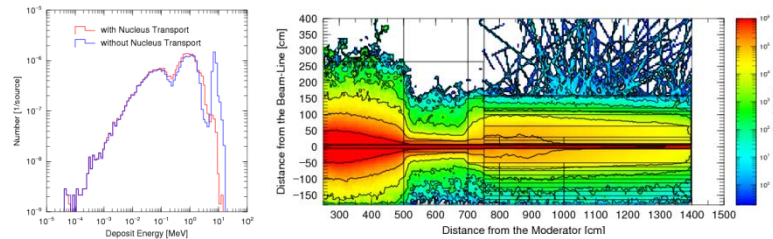
- 任意の3次元体系
- 2D&3D描画ツール (ANGEL)
- 入出力支援ソフト  
(ParaVIEW\*, SuperMC\*\*)



ANGELで描画した2D&3Dジオメトリ ParaVIEW

- **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 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)

	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	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		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 10 MeV/u	200 MeV		
	20 MeV	1 MeV	電離損失 ATIMA	ATIMA + オリジナル		
核データ ライブラリ JENDL-4.0	1 keV		1 keV	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



## 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

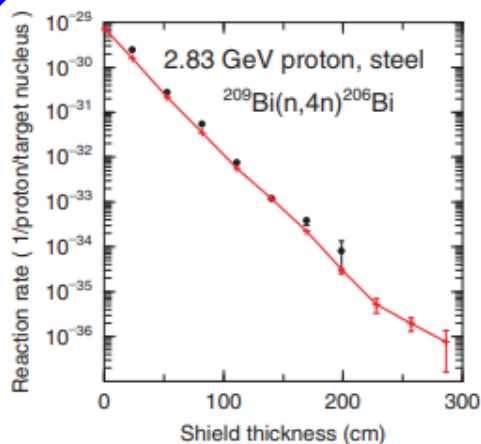
OPEN ACCESS

Check for updates

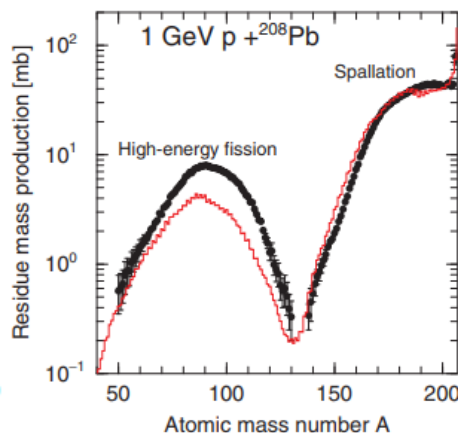
### Benchmark study of the recent version of the PHITS code

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>

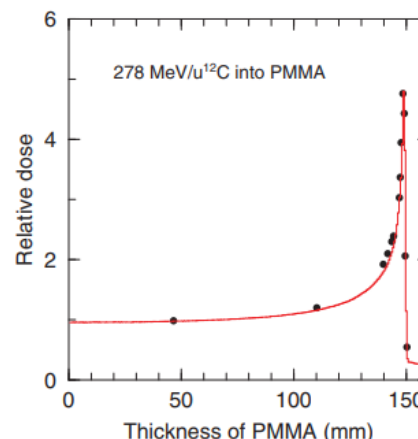
<sup>a</sup>Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki, Japan; <sup>b</sup>Research Organization for Information Science and Technology, Ibaraki, Japan



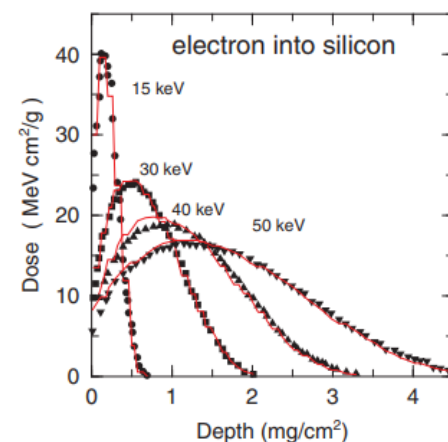
遮蔽計算



核分裂収率



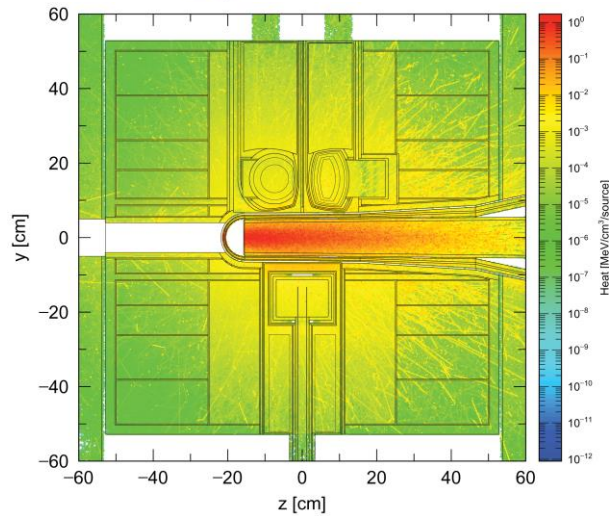
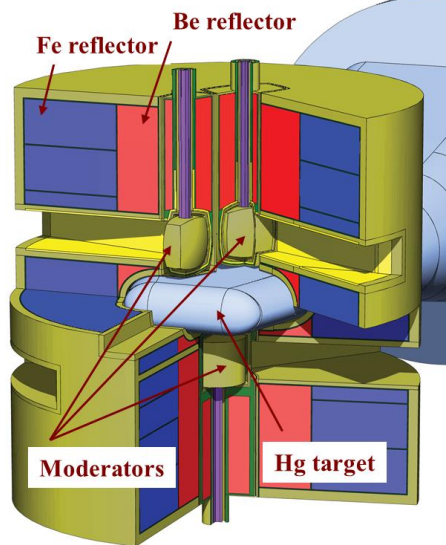
粒子線治療



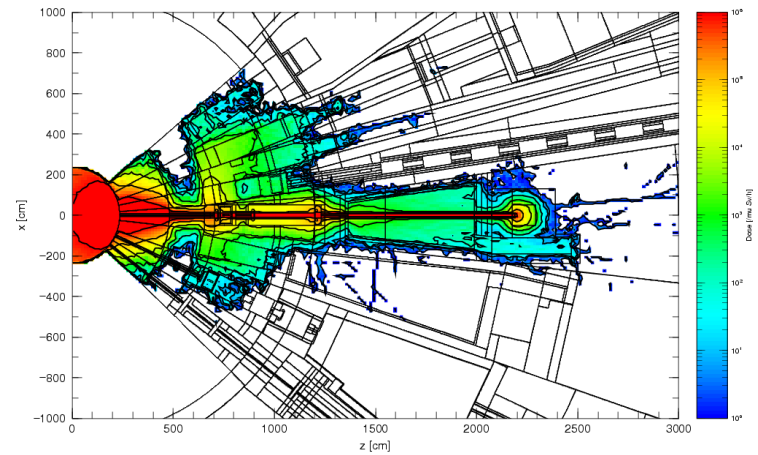
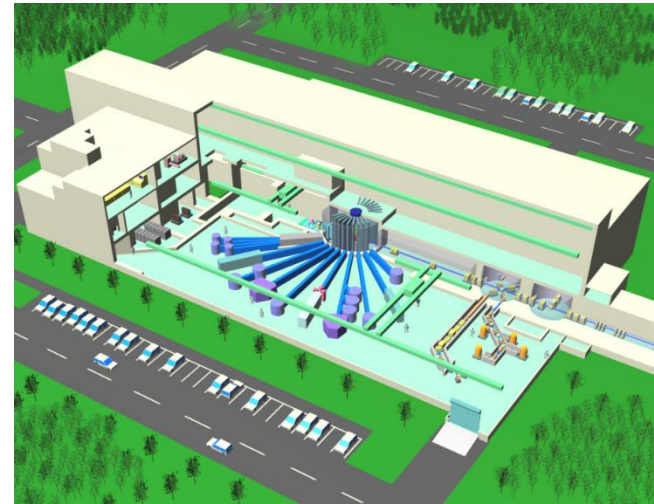
電子飛程

# 参考資料

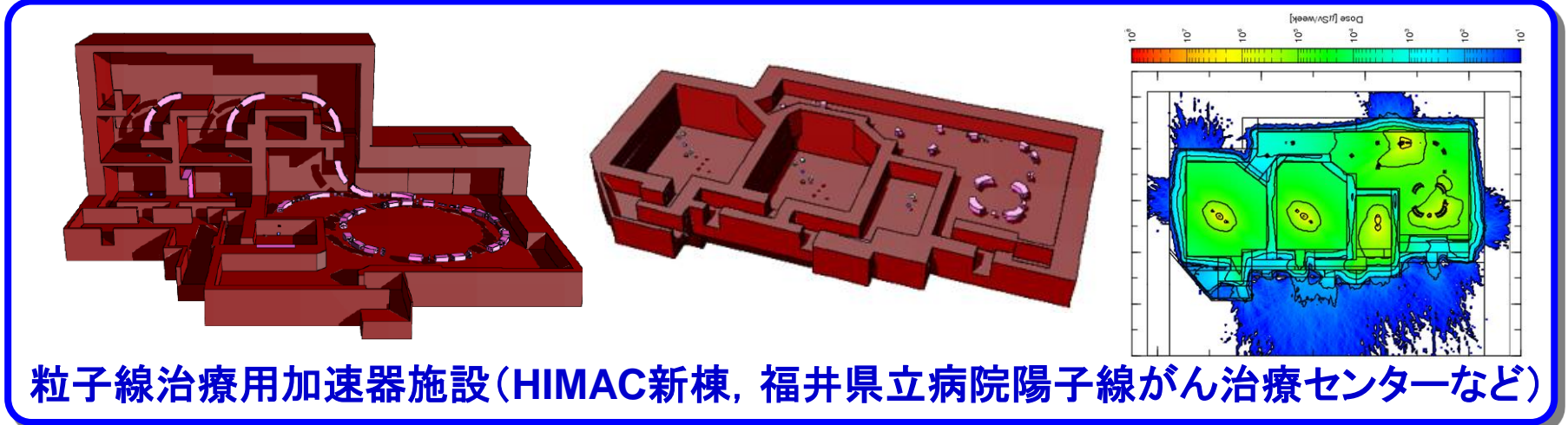
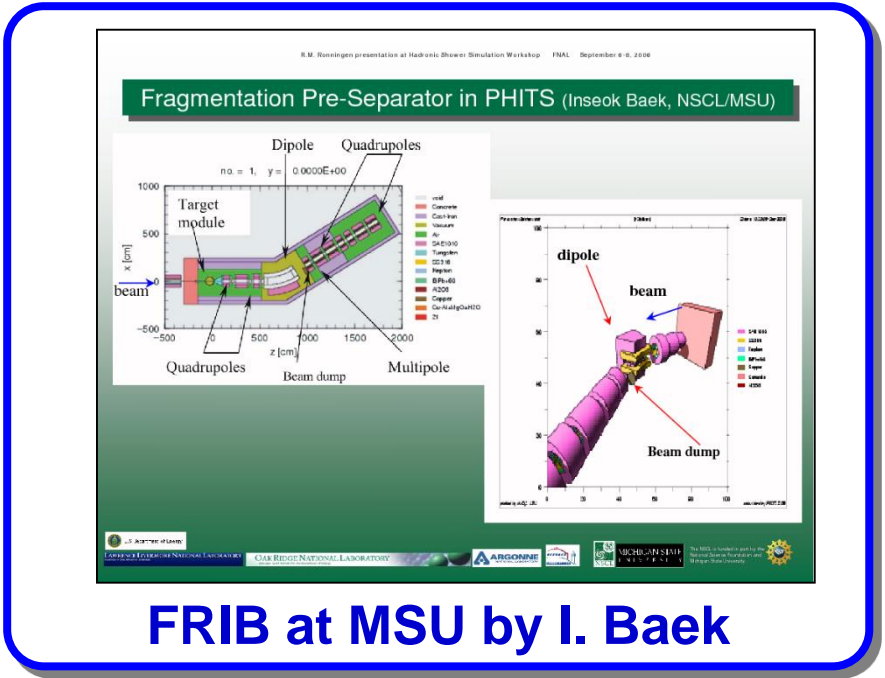
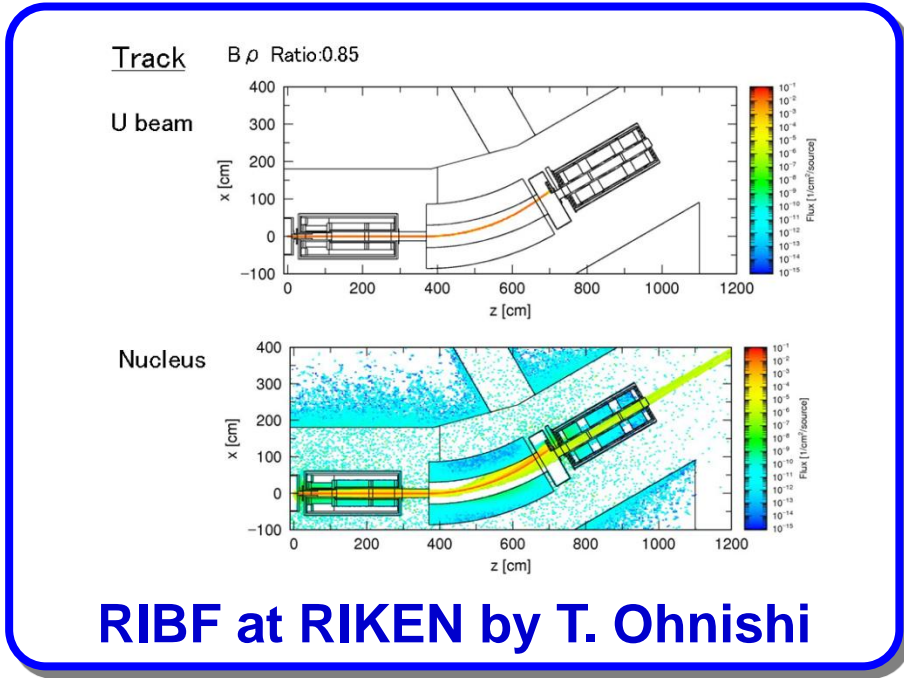
～ PHITSの応用例 ～

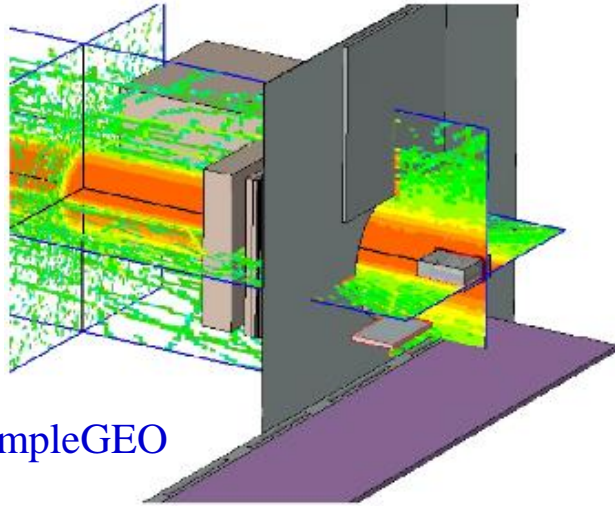


中性子発生装置周辺の  
電離量計算



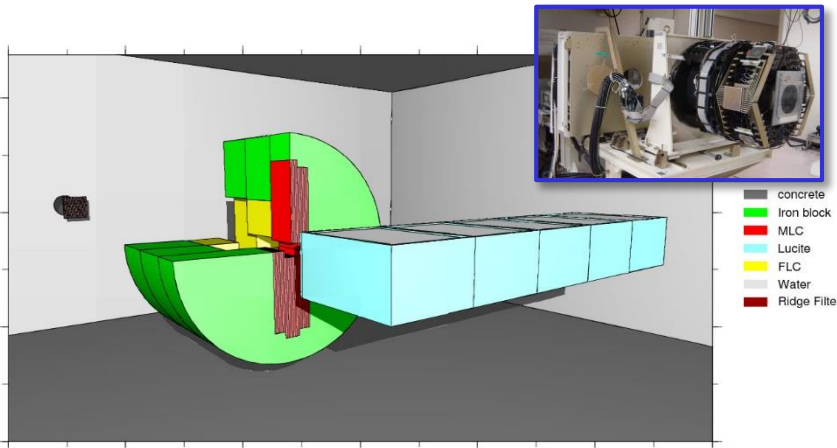
中性子ビームライン周辺の  
発熱量計算





drawn by  
PHITS+SimpleGEO

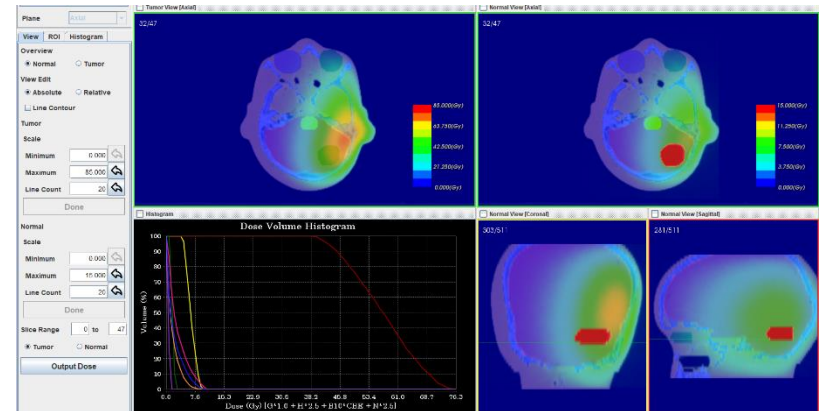
O. Ploc et al. IEEE Aerospace Conf. (2017)



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

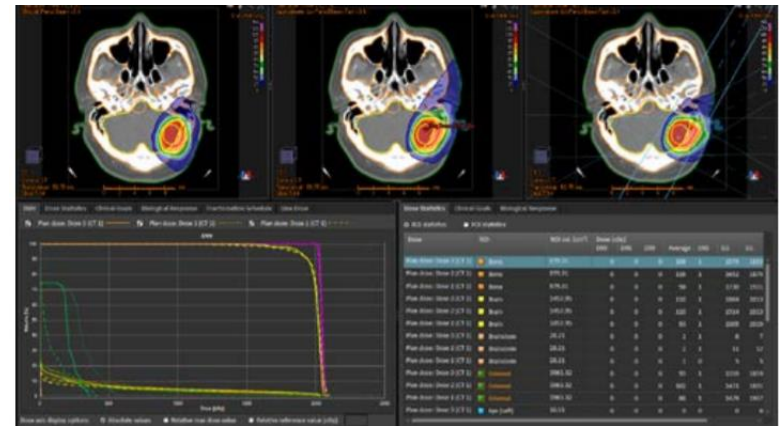
粒子線治療場の2次散乱線評価

## BNCT用治療計画システム



## Tsukuba Plan

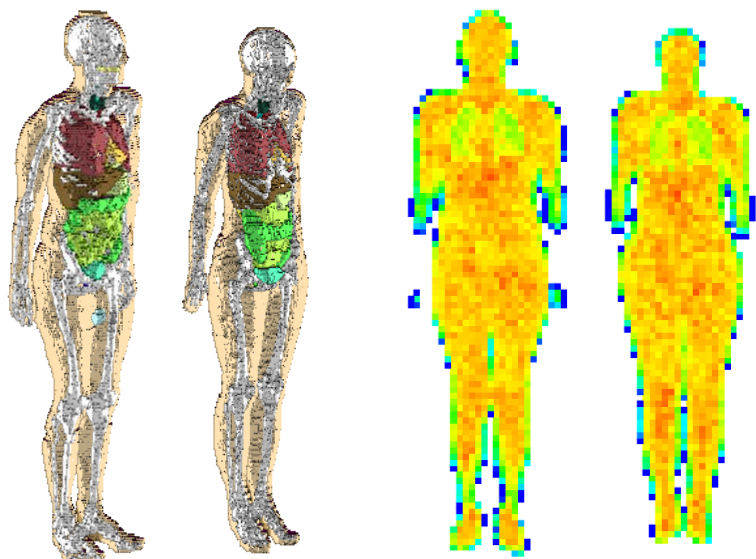
Kumada et al. Radiat. Prot. Dosim. 180, 286 (2018)



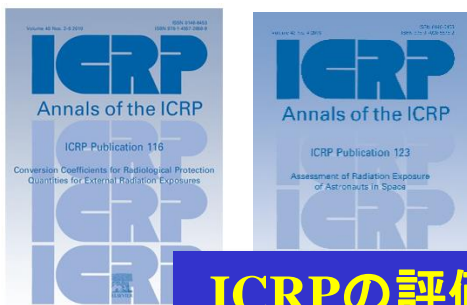
## NeuCure™ (住友重機械工業)

医療機器製造販売承認番号 : 30200BZX00083000 20

## 線量換算係数の計算



ICRP/ICRUの標準人体模型

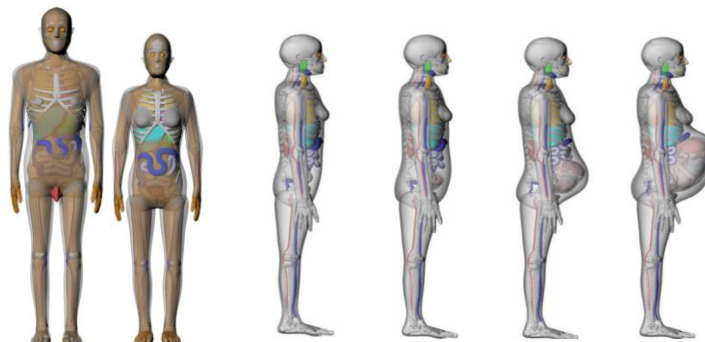


ICRP Pub.116  
ICRP Pub.123

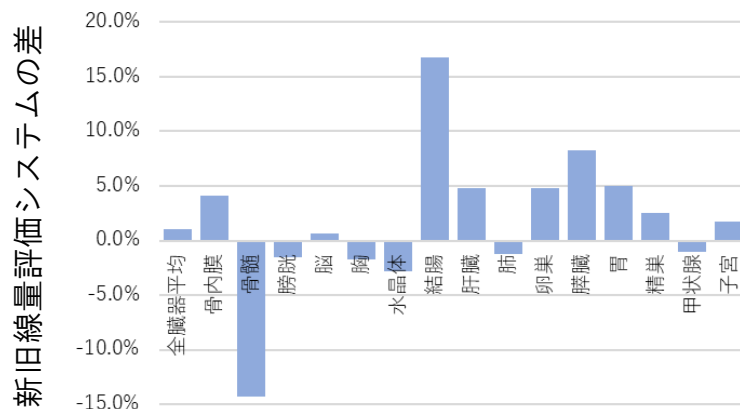
ICRPの評価に活用

T. Sato et al. *Phys. Med. Biol.* **54**, 1997, (2009)  
T. Sato et al. *Phys. Med. Biol.* **55**, 2235, (2010)

## 原爆被爆者の臓器線量再評価



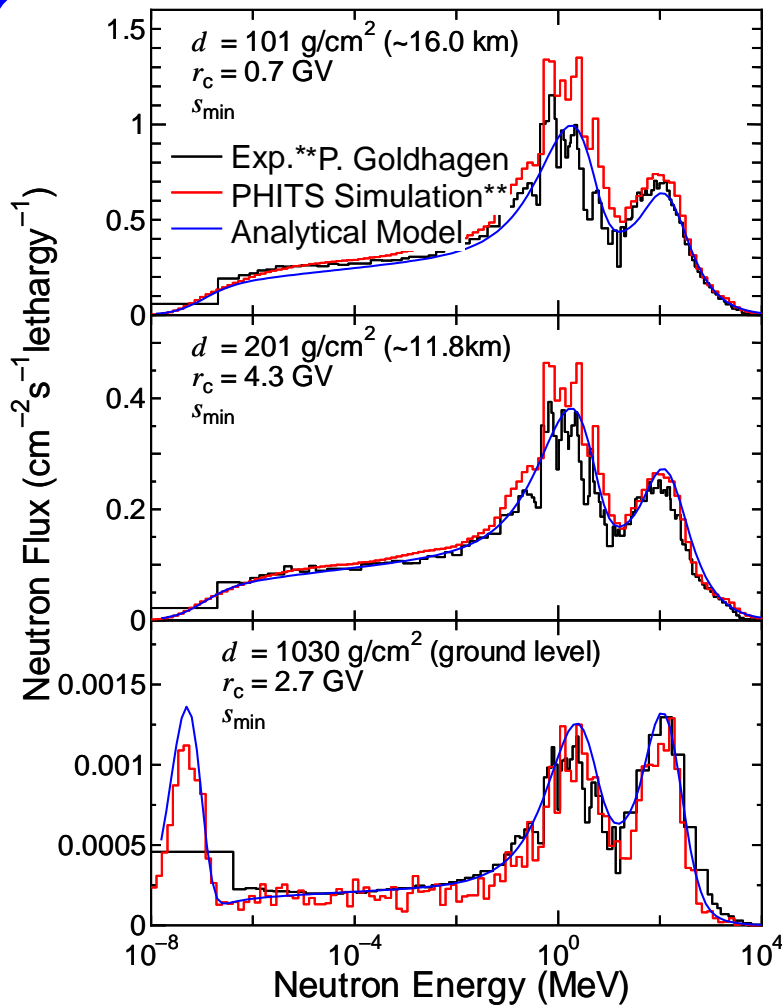
1945年の日本人体型を再現した人体模型



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.* (2020)



大気圏内の中性子フラックス

## PHITSシミュレーション

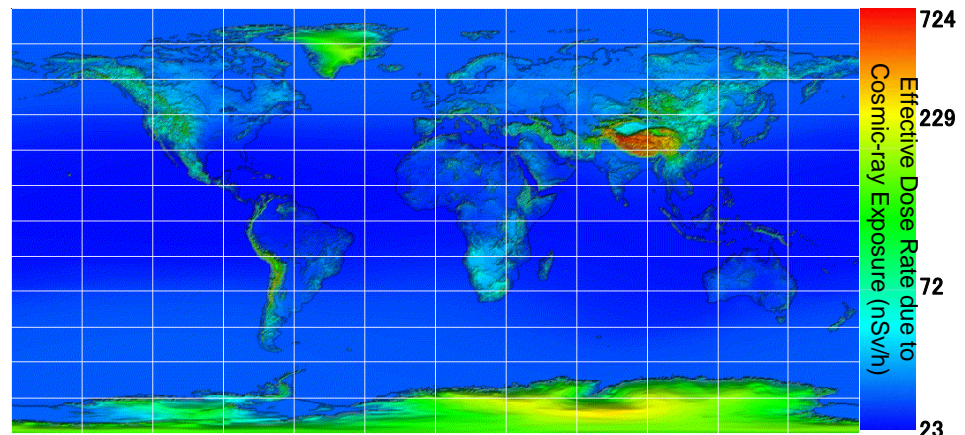
- 大気圏内の宇宙線挙動を太陽活動度, 地磁気強度を考慮してPHITSで計算

### 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

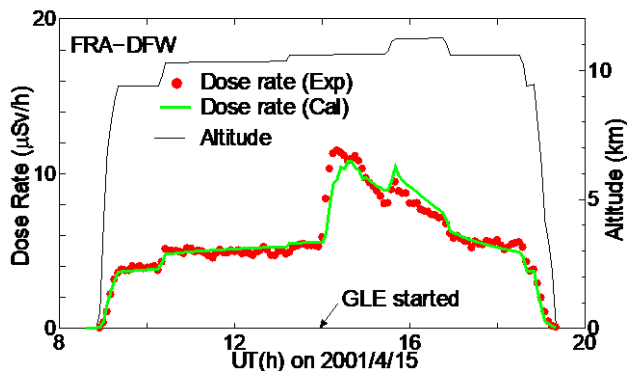
## Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particle

### 航空機被ばく警報システム: WASAVIES

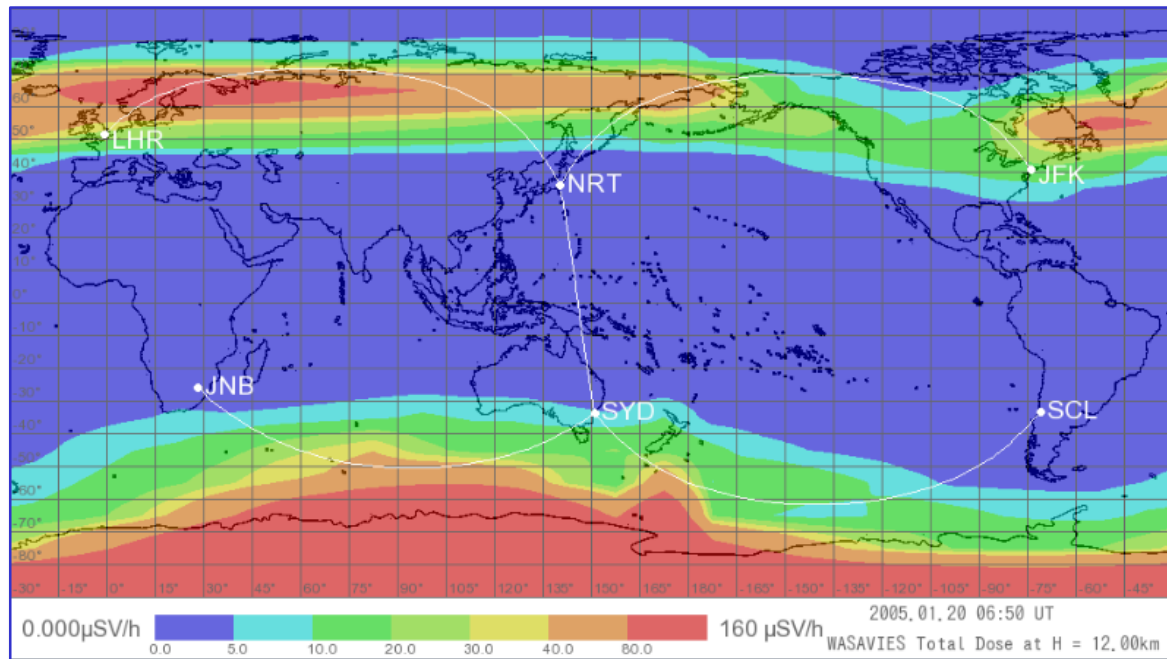
- ✓ 太陽フレアが発生した際の大気圏内における宇宙線フラックス上昇の情報をリアルタイムで発信するシステム
- ✓ 大気圏内の宇宙線挙動解析にPHITSを利用



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



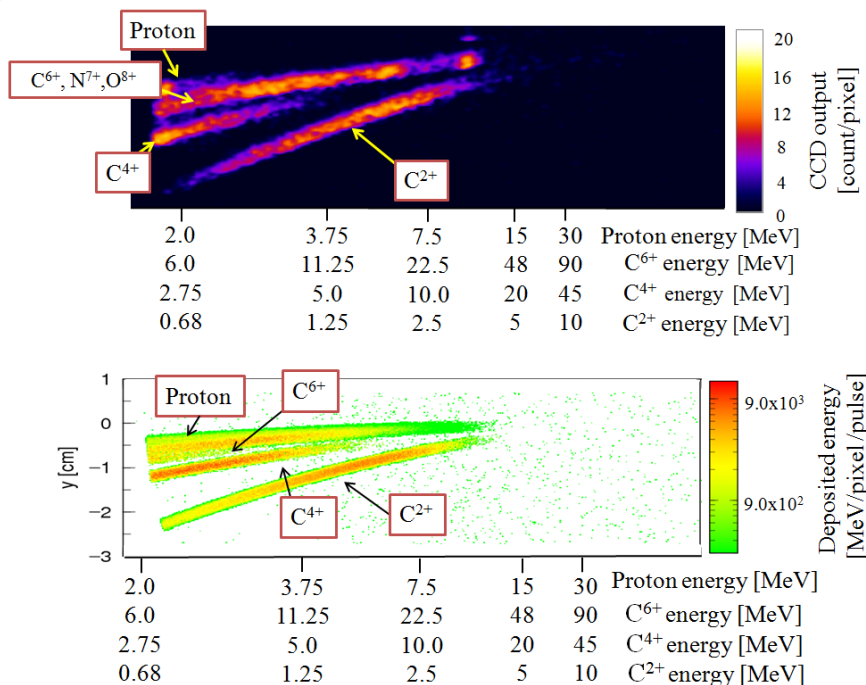
航空機実験による精度検証



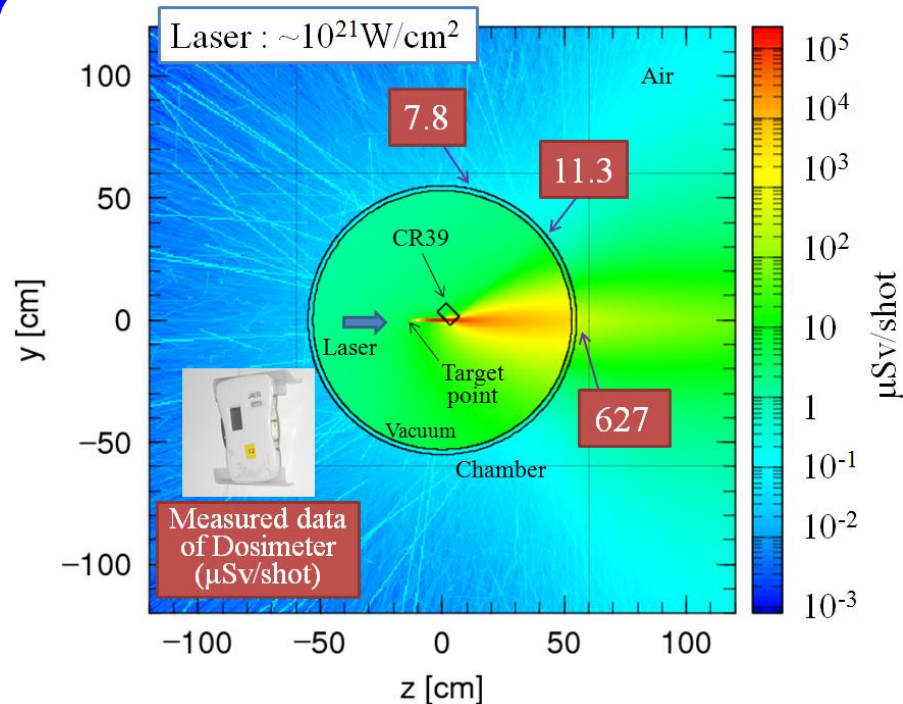
2005年1月に発生したフレア時の  
航空機高度における宇宙線強度マップ



- ✓ 高強度レーザーを物質に照射することで発生する電場にてイオンを加速するレーザー駆動小型加速器の開発が世界各地で進められている
- ✓ そのビーム診断系開発や軌道計算、線量評価にPHITSを利用

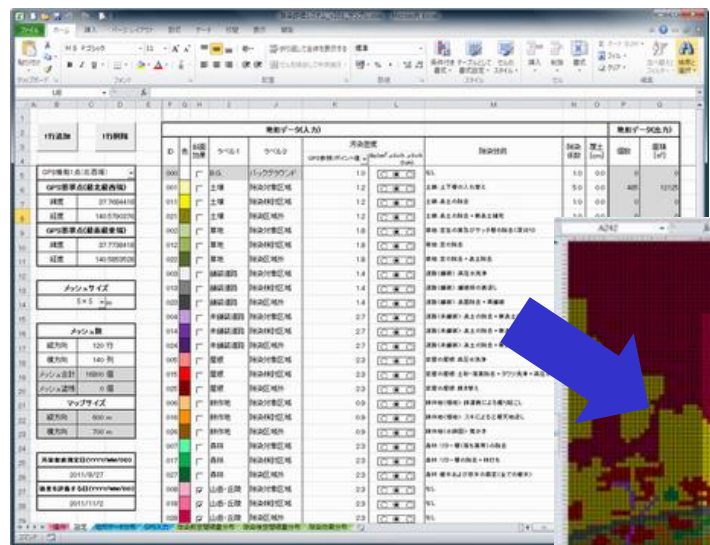


生成イオン核種とエネルギー分布を診断した結果とPHITSによる計算値の比較



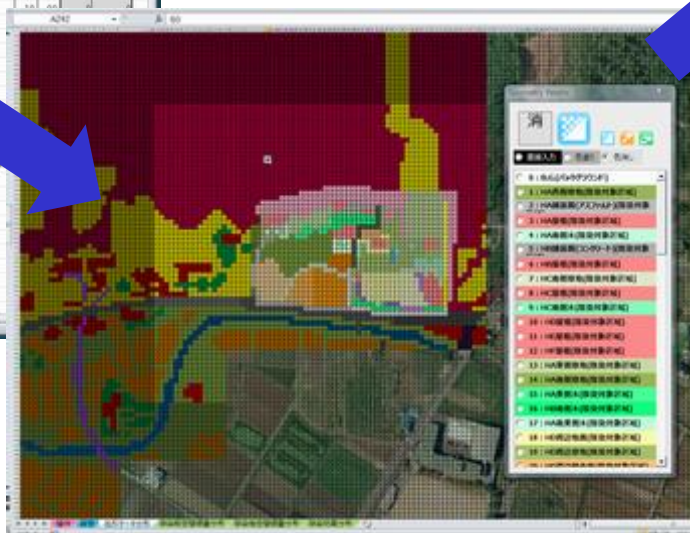
レーザー1ショットあたりに発生する線量測定値とPHITSによる計算値の比較

- 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

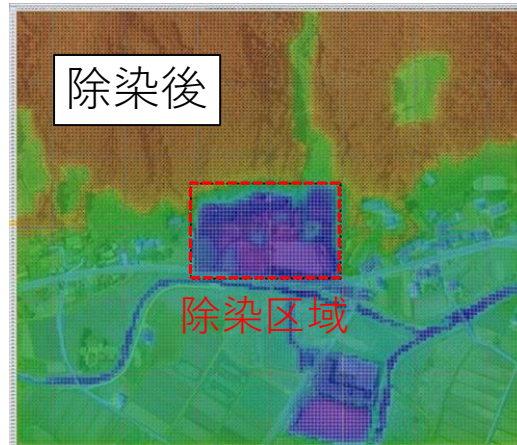
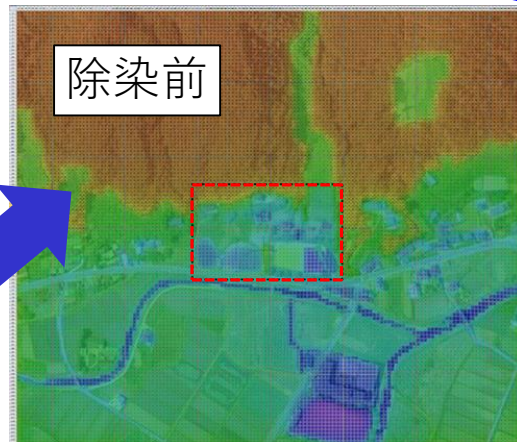


使いやすい表計算ソフトウェアで提供

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



# 参考資料

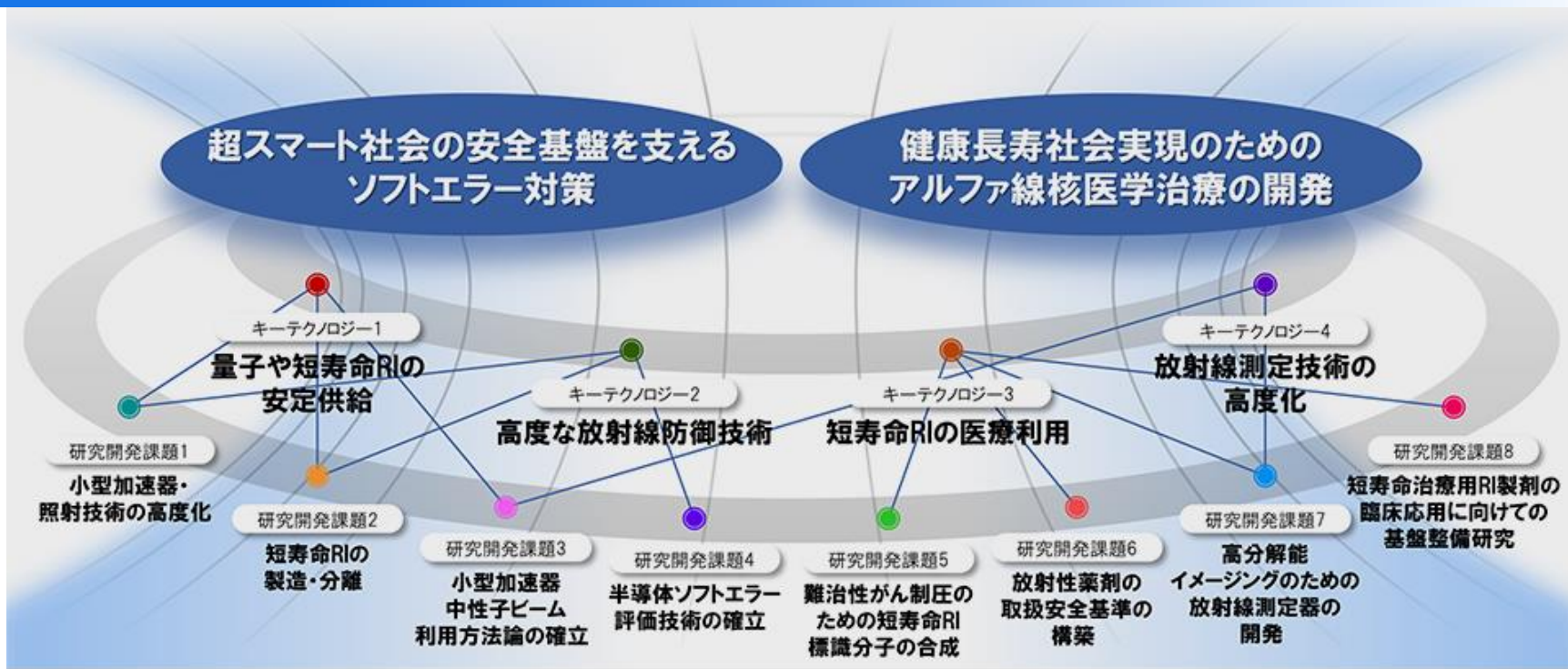
～ OPERAの概要 ～

## 「組織」対「組織」の本格的な産学連携



新たな基幹産業の育成の核となる革新的技術創出を目指す

産学パートナーシップを拡大し、我が国のオープンイノベーションを加速することを目指す



## 量子アプリ共創コンソーシアム [量子アプリ共創協議会]

### 【幹事機関】

大阪大学

### 【民間企業】

㈩京都メディカルテクノロジー/㈱HIREC/㈱イービーエス/㈱トヨタ自動車/㈱金属技研/㈱シマフジ電機/㈱富士電機/㈱ソシオネクスト/中部電力/㈱アトックス/㈱日立製作所/㈱日本メジフィジックス/㈱住友重機械工業/㈱富士フィルムRIファーマ/三菱電機/㈱ヤマト科学/㈱シヤチハタ/㈱日本システムウェア/東芝デバイス&ストレージ/テリックスファーマジャパン/㈱マイコン

### 【大学等・研究開発】

理化学研究所/名古屋大学/九州大学/東北大学サイクロロンRIセンター/東北大学電子光理学研究センター/京都工芸繊維大学/量子科学技術研究開発機構/日本原子力研究開発機構/J-PARCセンター/早稲田大学/東京大学/物質構造科学研究所

## 量子アプリ共創コンソーシアムと資金・知・人材の好循環

- 幹事機関における知的財産の一元管理と経費の見える化
- 公開シンポジウムの開催



- RA雇用経費や加速器運転経費等の積算根拠の見える化

- クロアボ制度の充実(大学・企業間)
- インターンシップ制度の導入

## □ 事業内容

- QiSS成果について、医薬品及び医療機器として承認をめざす等の成果普及事業
- QiSS成果について、宇宙線による半導体誤動作ソフトウェアの評価方法標準化等の成果普及事業
- 上記成果の知財ライセンス及び証明書発行事業
- 放射性医薬品又はその原料の供給事業
- 人材育成ならびに技術普及事業