

# Geant4の医学分野における応用

歳藤利行

KEK計算科学センター/JST-CREST研究員

- Geant4
- 医学分野への応用
  - CRESTプロジェクト「高度放射線治療のためのシミュレーション基盤の開発」

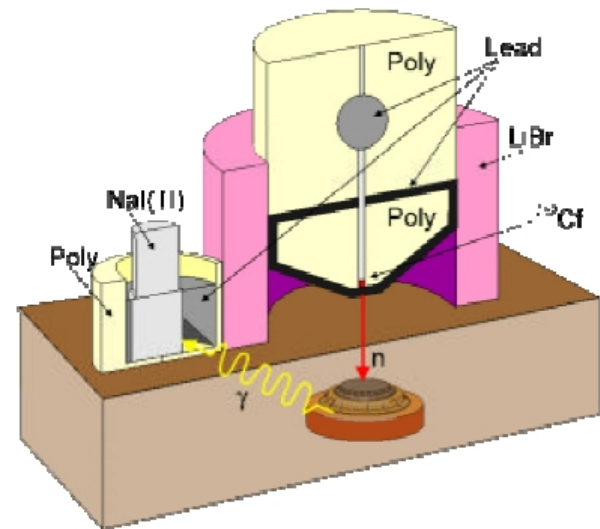
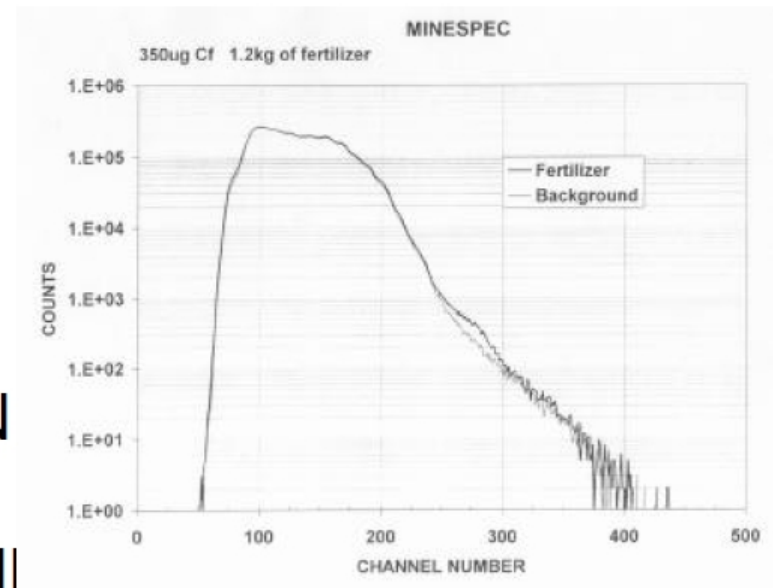
# Geant4

- 日本グループが中心となり国際共同開発を行った放射線シミュレーションのためのツールキット
  - 1994年に開発が始まり、98年に最初のバージョンがリリース
  - オブジェクト指向技術を全面的に採用
  - C++による実装
  - ツールキットとしての設計
    - あらゆる部品が付け替え可能
    - ユーザーインターフェース、可視化、解析に様々なパッケージが利用可能
  - 多彩な物理プロセスを実装済み
  - 多くの分野への応用が進んでいる
    - 素粒子実験、宇宙、医学など



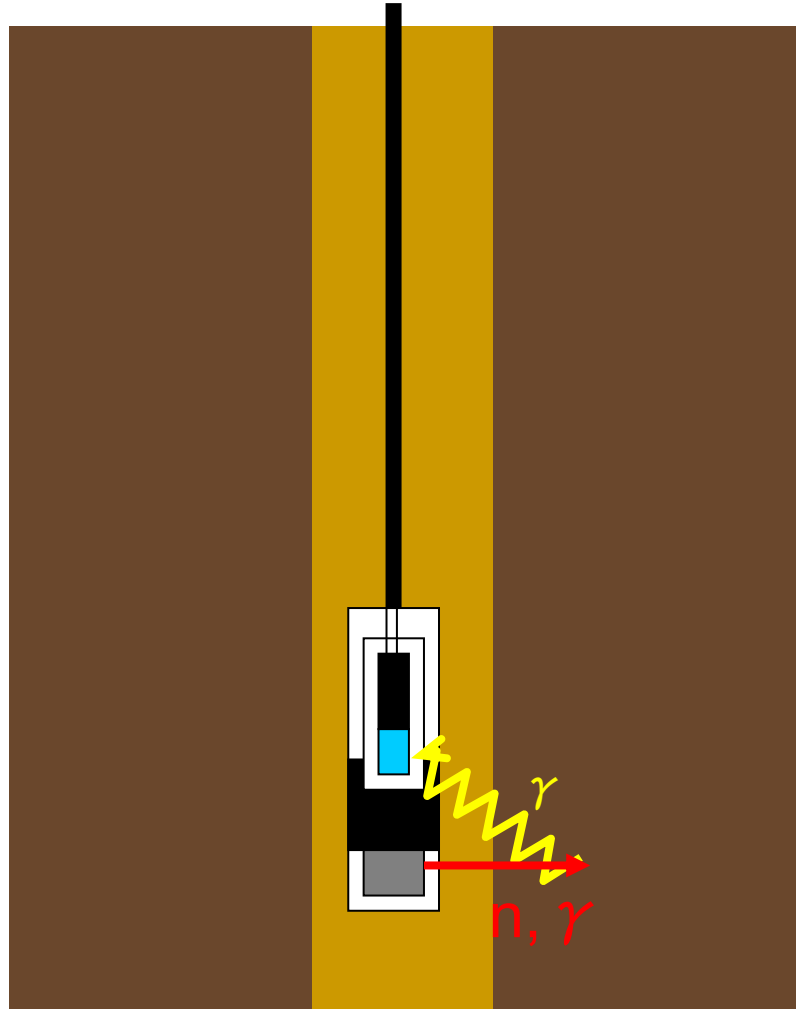
# Thermal Neutron Activation

- TNA detects explosive by properties of constituents
  - High concentration of N
  - Does not ID explosive
- Can confirm presence of all surface laid or shallow AT mines in few seconds to 1 minute
- AT up to 20 cm deep and large AP mines in < 5 minutes

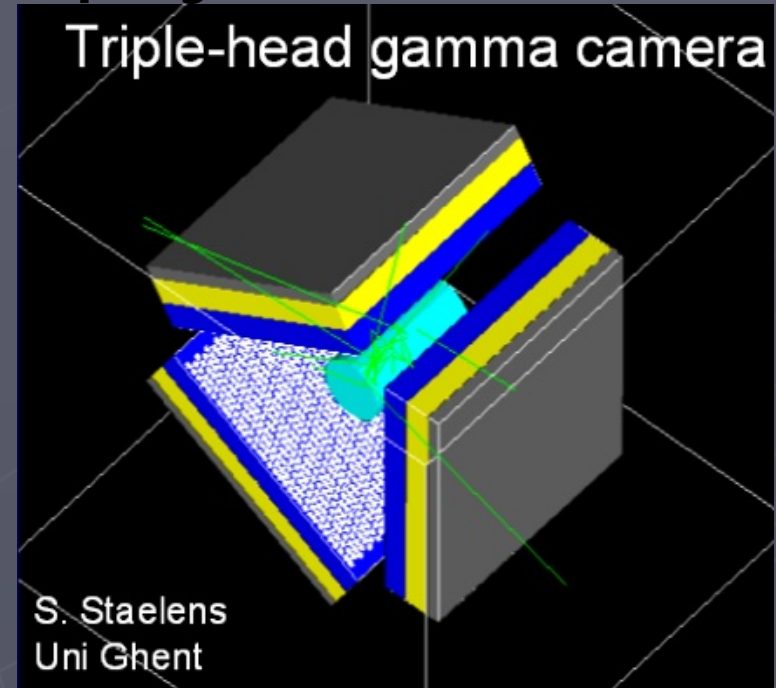
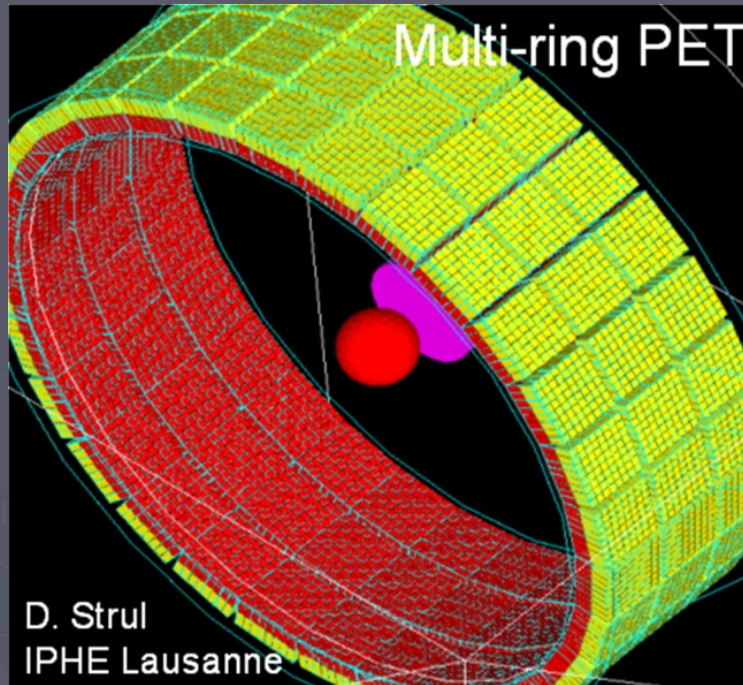


# 石油探査

- プローブを地中に入れて、C,O,Hなどの存在量をオンラインで測定する。
- シミュレーションにGeant4が使われているらしい。
- 詳細は不明(企業秘密)



# GATE: Geant4 Application for Emission Tomography



## Toolkit for Imaging applications

- ▶ based on the Geant4 toolkit
- ▶ easier to use for Imaging applications, does not require C++ programming
- ▶ Allows to describe time-dependent phenomena
- ▶ More than 400 subscribers to gate user mailing list
- ▶ <http://www.opengatecollaboration.org>

# The Geant4 DNA project

## Microdosimetry in High-Resolution Cellular Phantoms Using the Very Low Energy Electromagnetic Extension of the Geant4 Toolkit

S. Chauvie, S. Incerti, P. Moretto, M. G. Pia and H. Sezec

TABLE I  
PHYSICS PROCESSES AVAILABLE IN GEANT4 DNA

Incident particle	Processes
Electron	Elastic scattering Excitation Ionization
Proton	Charge decrease Excitation Ionization
H	Charge increase Ionization
He <sup>++</sup>	Charge decrease Excitation Ionization
He <sup>+</sup>	Charge decrease Charge increase Excitation Ionization
He	Charge increase Excitation Ionization

eVスケールのシミュレーション

DNAレベルでの放射線損傷の評価

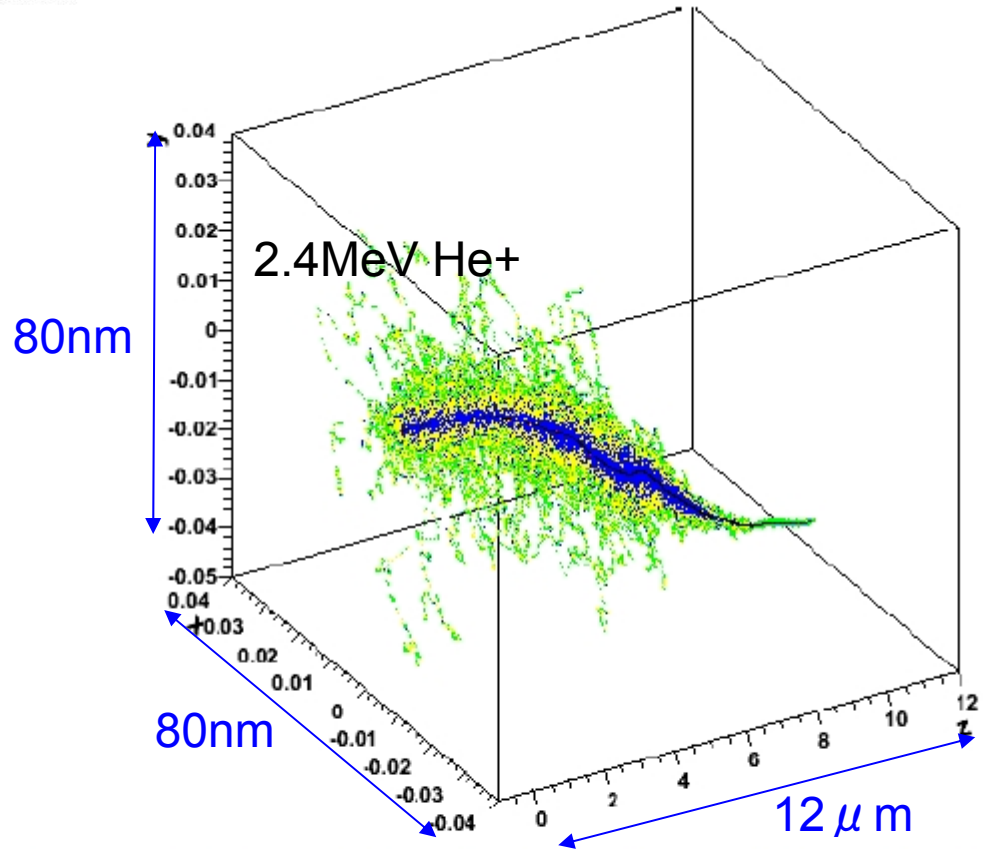


Fig. 2. Track structure of a 2.4 MeV He<sup>+</sup> particle penetrating into the high resolution cellular phantom. Unit is micrometer. The primary particle propagates from left to right. Physics processes occurring are displayed with a color code: excitation in blue, elastic scattering for electrons in green, ionization in yellow, charge decrease in black and charge increase in red.

CRESTプロジェクト  
「高度放射線治療のためのシミュ  
レーション基盤の開発」



## 高度放射線治療のためのシミュレーション基盤の開発

研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター 教授 佐々木 節

- 2003-2008年度まで
- がんの放射線治療のシミュレーションを機器や手法によらず包括的に行うために必要なソフトウェアの開発を行う
- 特に、粒子線治療(炭素、陽子)に焦点を絞り、シミュレーション結果の妥当性の検証にも重点を置く
- 可視化に必要なツールとアルゴリズムの開発を行う
- GRID技術を採用し、並列処理を行うことで、実行時間の短縮を図る
- 私は2006年度から参加 主に炭素線シミュレーションの検証

# 参加研究機関

- KEK
- 立命館大学
- 神戸大学
- 鳴門教育大学
- 富山商船高等専門学校

Geant4

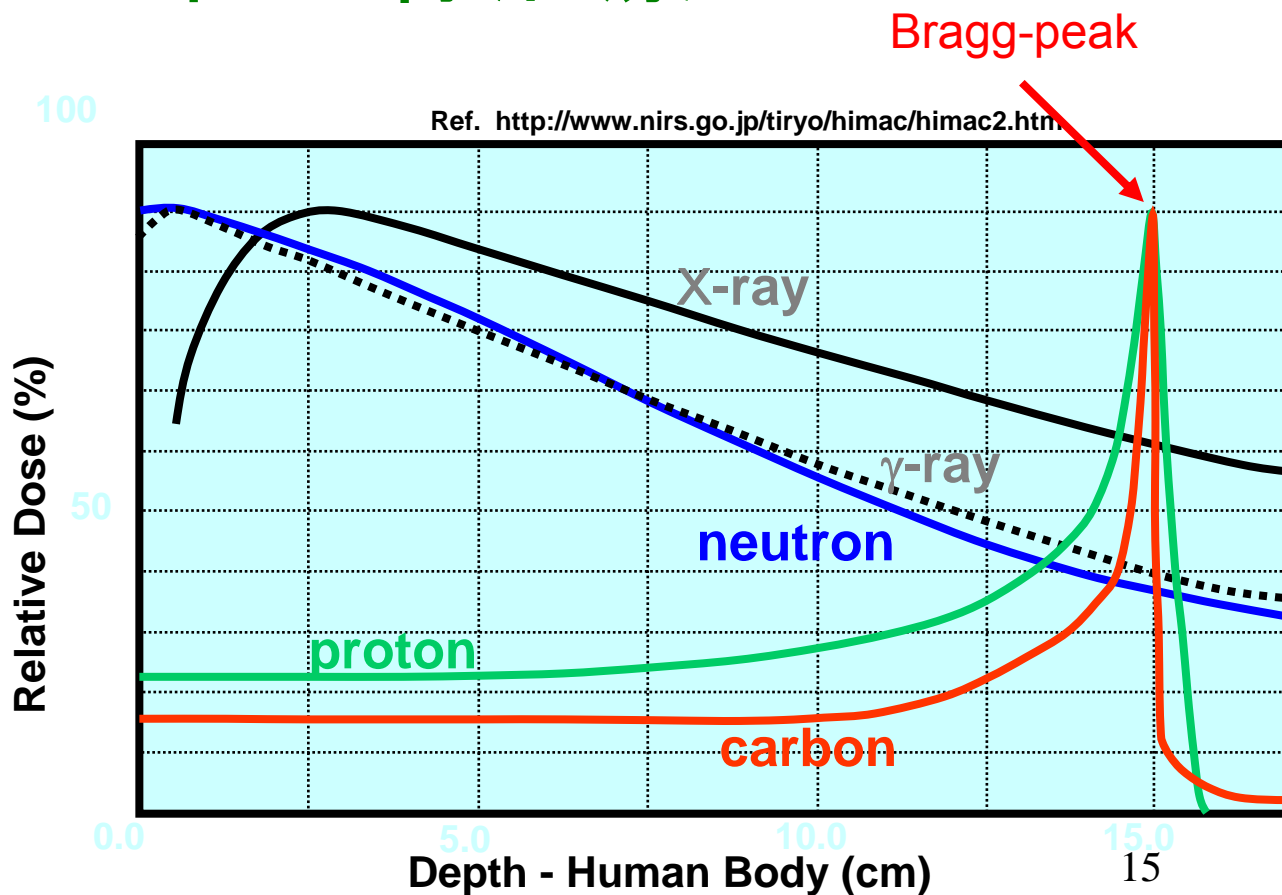
- JAXA

宇宙

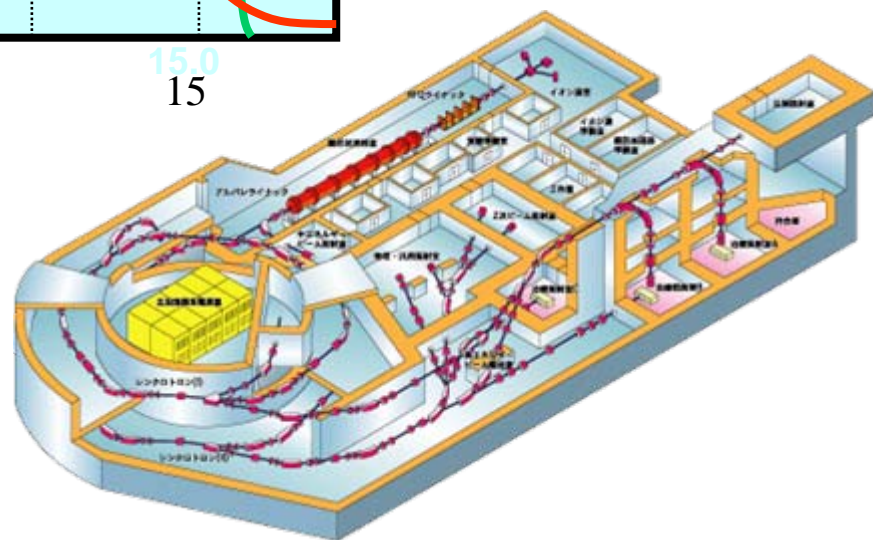
- 放射線医学総合研究所(NIRS)
- 国立がんセンター 柏
- 群馬大学
- 兵庫県立粒子線医療センター(HIBMC)
- 北里大学

医学

# 粒子線治療



放射線医学総合研究所 HIMAC  
重イオンシンクロトロン  
直径42m ダブルリング  
800MeV/nまで加速可能



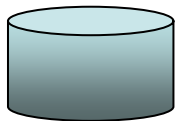
# 国内の粒子線治療施設(稼働中)



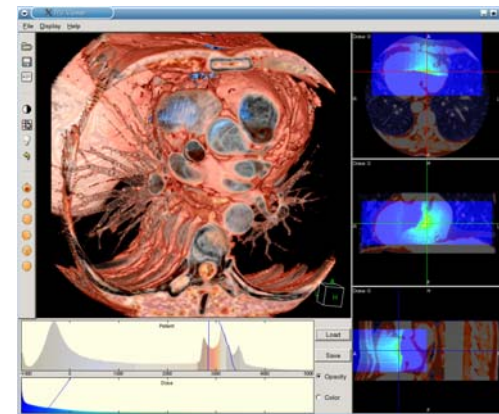
# ソフトウェア開発

# システム構成図

Knowledge DB



GRID Deployment



visualization/interactivity

framework for medical application  
PTSSim

DICOM interface

Scoring Package

Geant4

Physics List  
for Radiotherapy

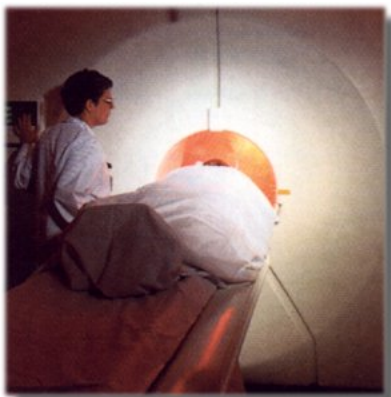
modeler

Dose Calculation Engines

JQMD

PHITS

EGS



# ビーム照射系の実装

Purpose:

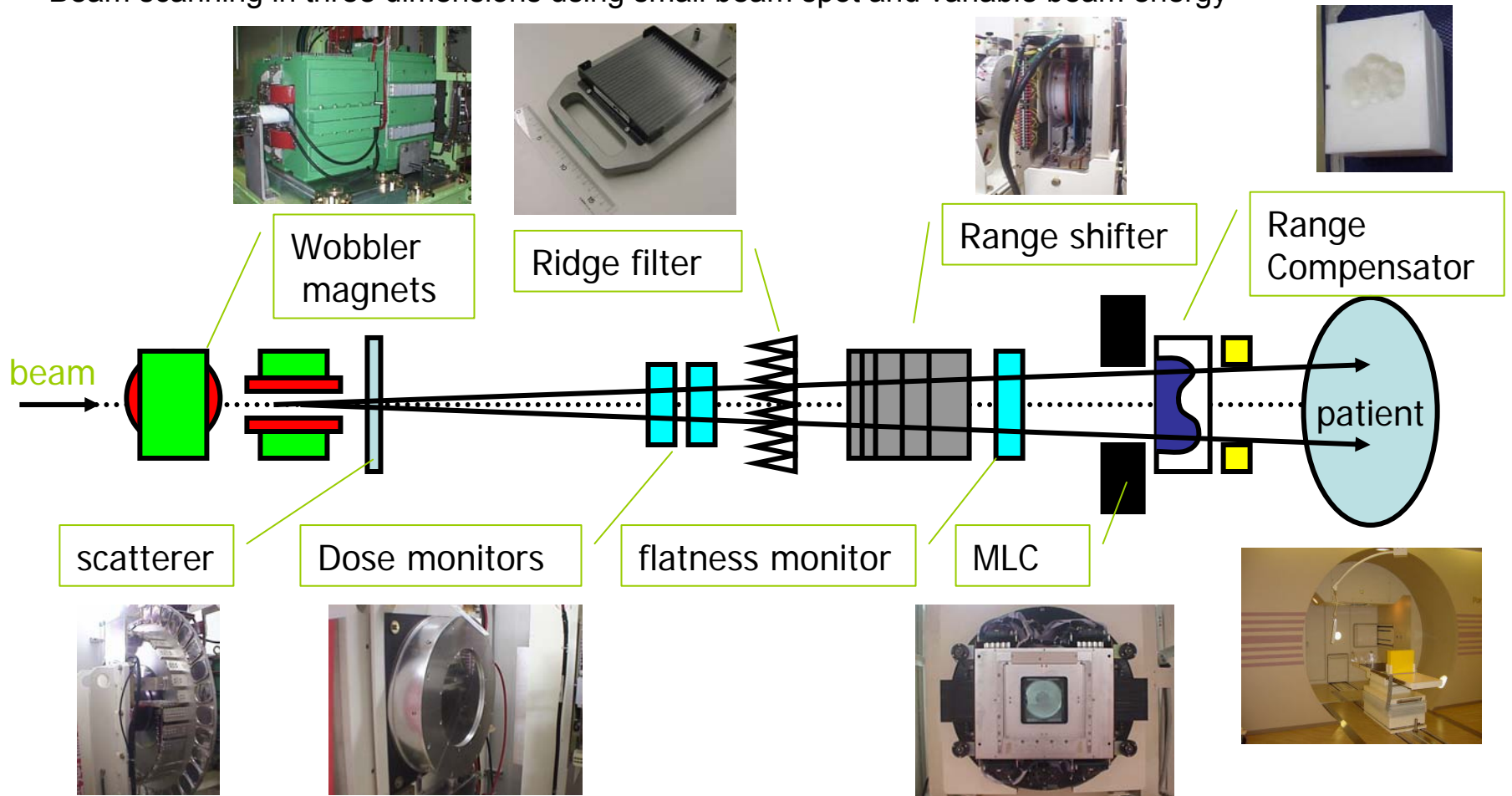
Widen the beam size to fit the tumor size with keeping lateral flatness of beam flux

Adjust the depth of Bragg peak in a patient volume with the tumor position

Other technology:

Double scattering, Spiral wobbling system for shortening the irradiation system

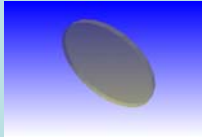
Beam scanning in three dimensions using small beam spot and variable beam energy



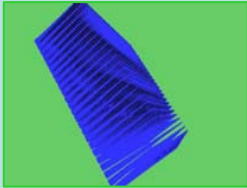
# 照射機器クラス

G4Mmodule

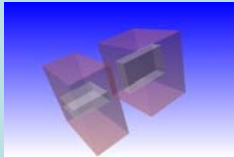
Scatter



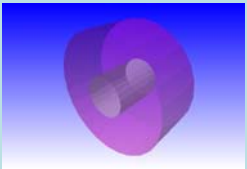
Ridge filter



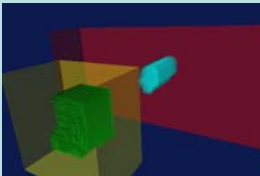
Wobbler Magnets



Collimator

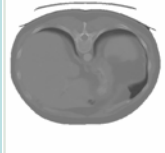


Multi-leaf collimator



Bolus

DICOM data



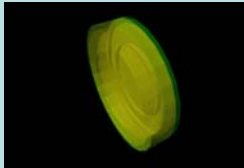
Double Scatter



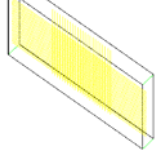
Propeller blade



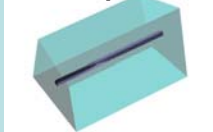
Ionization Chamber



Wire Chamber



Water phantom



etc.

兵庫粒子線医療センター  
ガントリーノズル

国立がんセンター  
ガントリーノズル

: 9798  
es : 1392

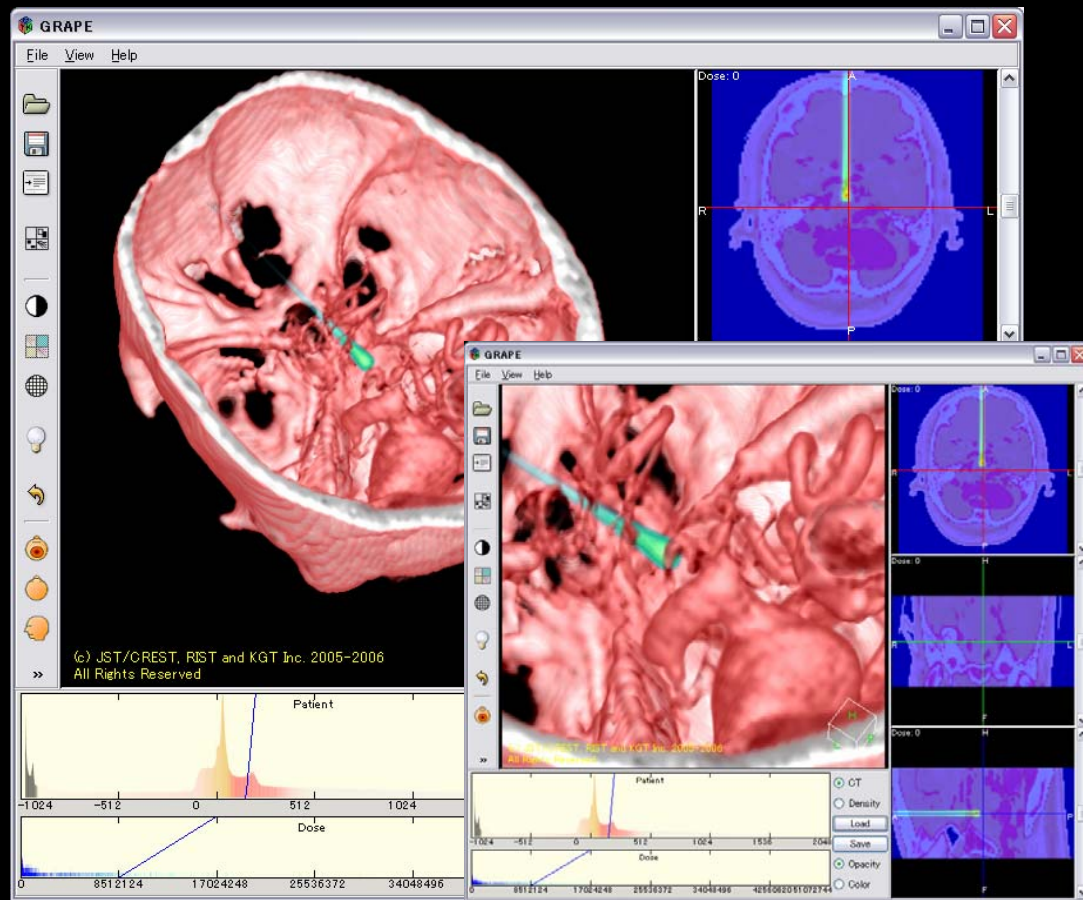
UC San Francisco  
Eye Treatment Facility

C++のコーディングをしなくても機器の変更が可能



# 可視化ツール gMocren

- 1. 高品位ボリューム・レンダリングの実現
  - 人体内部の精密可視化
  - マウスによるインタラクティブな可視化
- 2. ボリューム融合
  - 人体組織と線量分布のボリュームデータを融合し、同時に可視化



# 陽子線検証

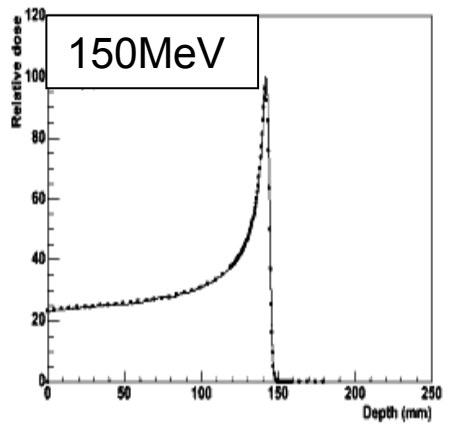
- 水中のDepth-dose distributionが正しく再現できるか？
- 既存の治療計画装置による計算との比較  
どう改良されたか？

# 照射機器シミュレーションの検証(陽子線)

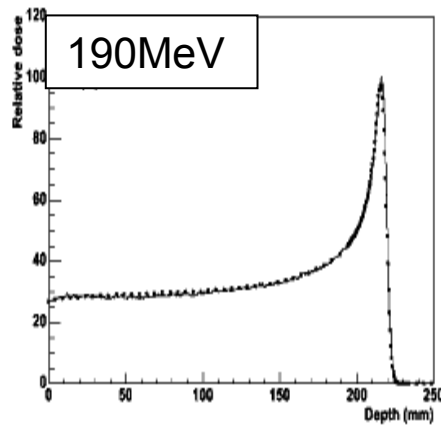
水中のDepth-Dose distribution

- Simulation
- Measurement

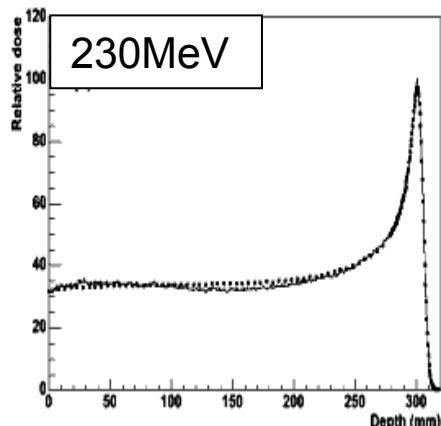
## 単一エネルギー



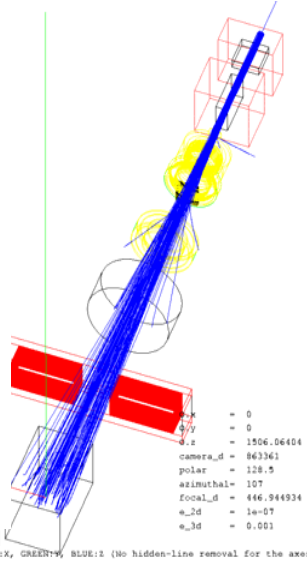
250mm



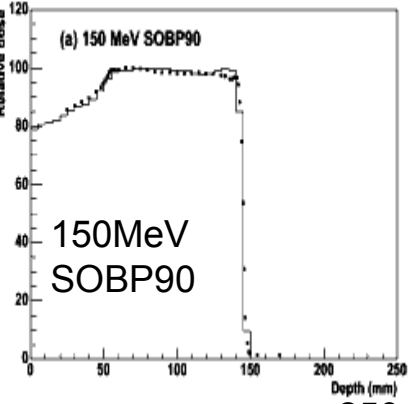
250mm



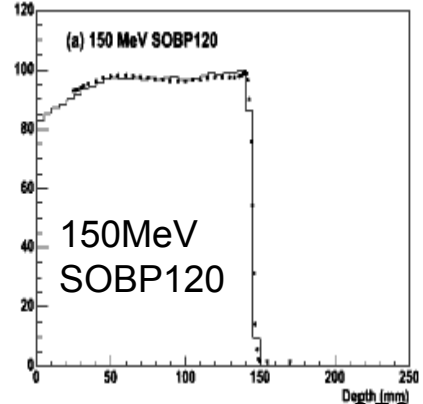
300mm



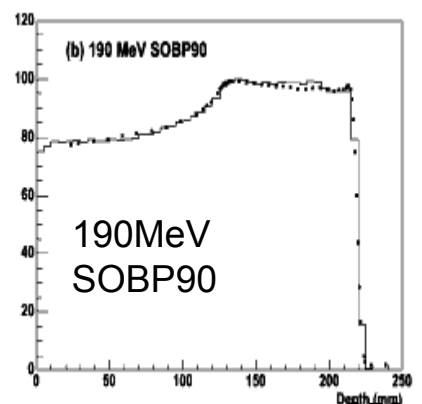
## 拡大ブラッグピーク



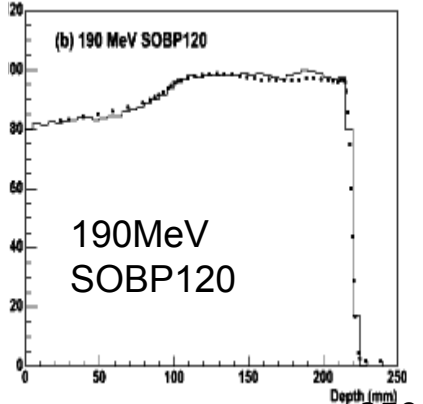
250mm



250mm



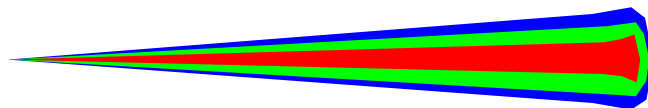
250mm



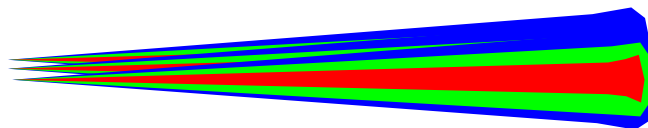
250mm

# 治療計画装置による計算との比較

- ペンシルビームアルゴリズム
  - 細いビームによる線量分布をモデル化



- 照射野の形に応じて重ね合わせる



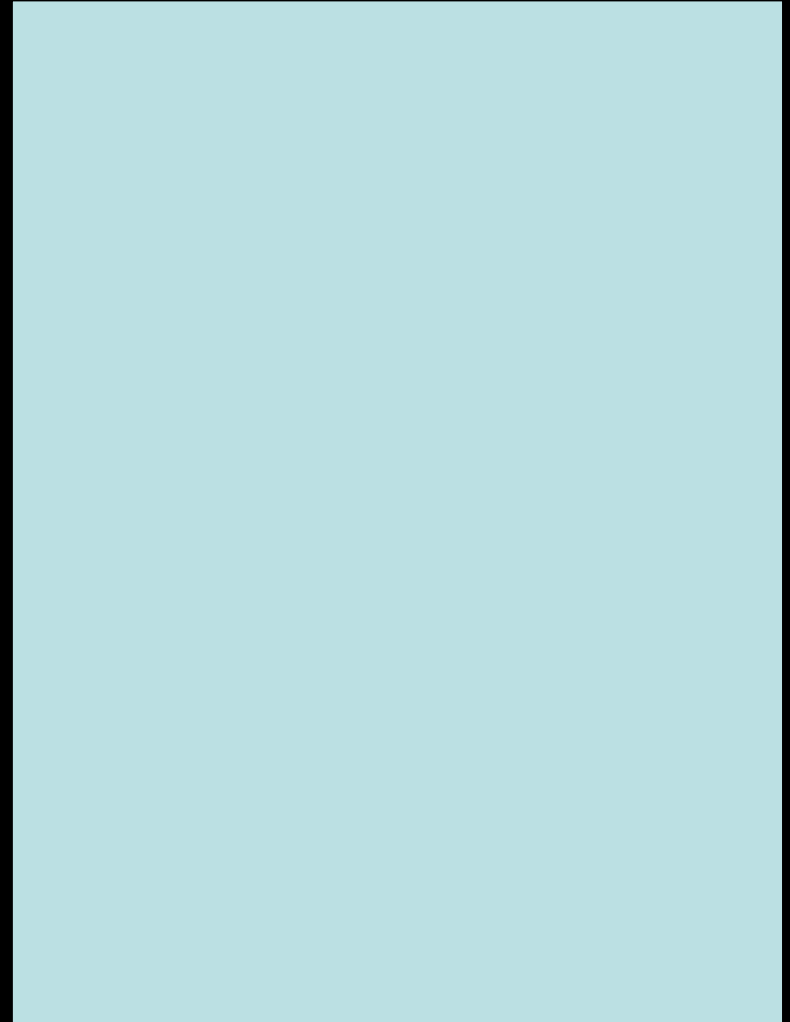
# 治療計画装置との比較(患者のデータ)

150MeV 陽子線 HIBMC

Geant4



治療計画装置

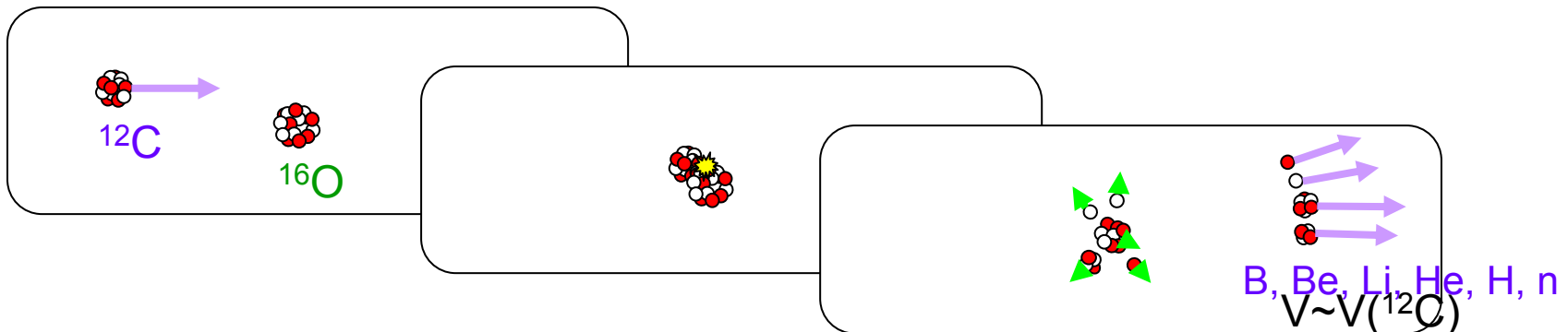


# 炭素線検証

- 水中のDepth-dose distributionが正しく再現できるか？
- 核破碎反応モデルは正しいか？

# 核破碎反応

- 原子核同士の衝突により核が壊れる反応
- 400MeV/n  $^{12}\text{C}$  の場合(水中飛程 $\sim 30\text{cm}$ )ビームの70%が核破碎反応を起こす。
- Geant4に組み込まれたモデル
  - Binary Cascade Model
    - Geant4標準
  - QMD Quark Molecular Dynamics
    - JQMD: 原研による実装
    - G4QMD ver9.1(2007年12月リリース)から
  - Wilson's abrasion

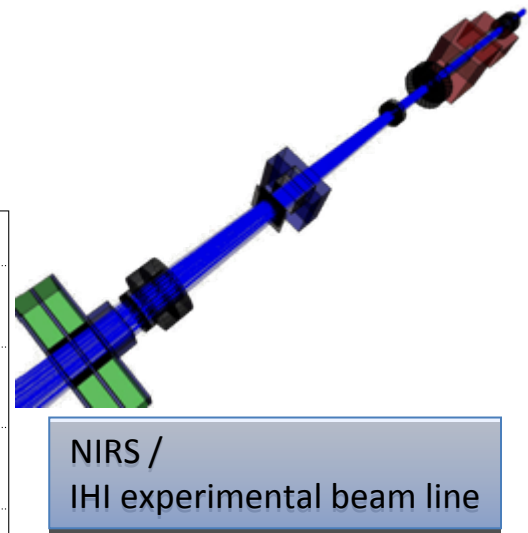


# 照射機器シミュレーションの検証(炭素線)

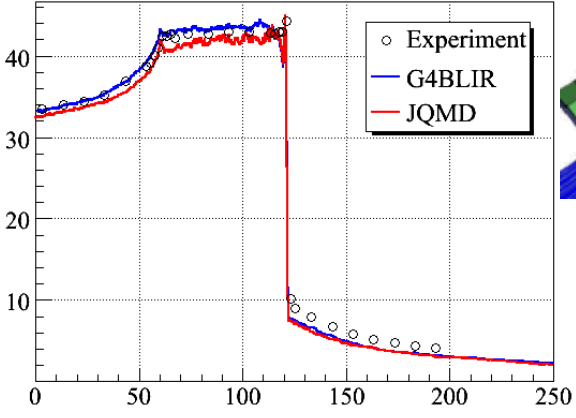
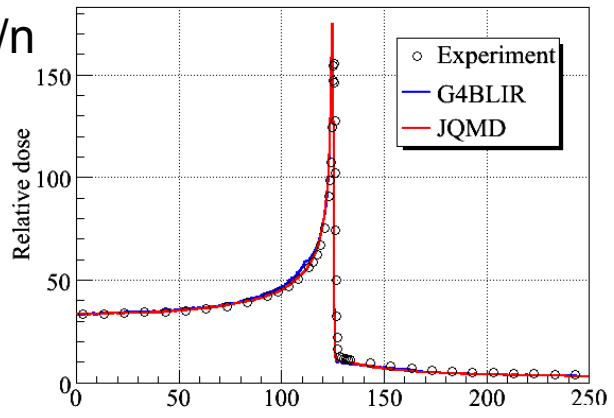
Depth-Dose distribution

単一エネルギー

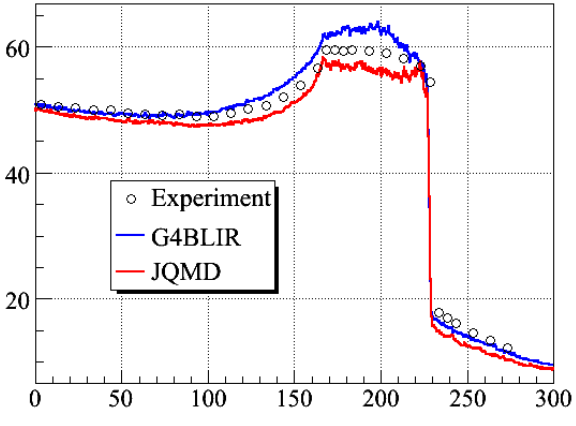
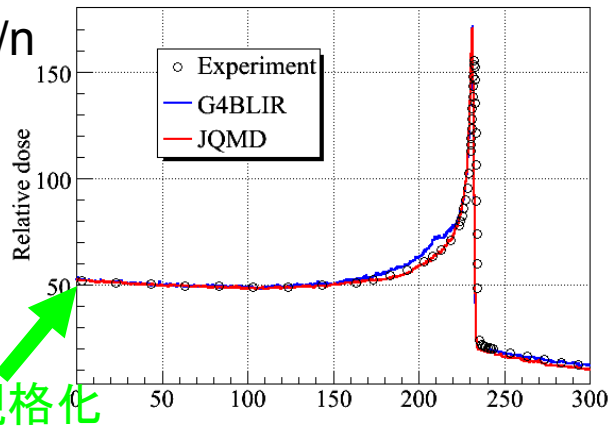
拡大ブラッグピーク



290MeV/n



400MeV/n



Depth in water (mm)

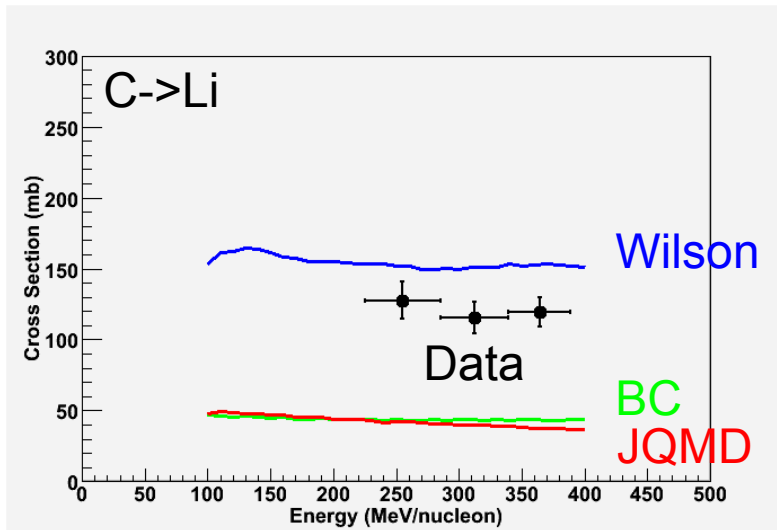
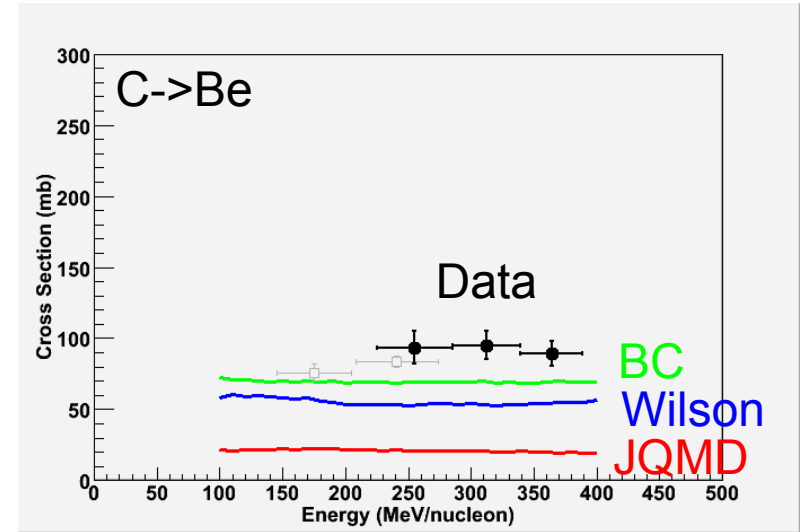
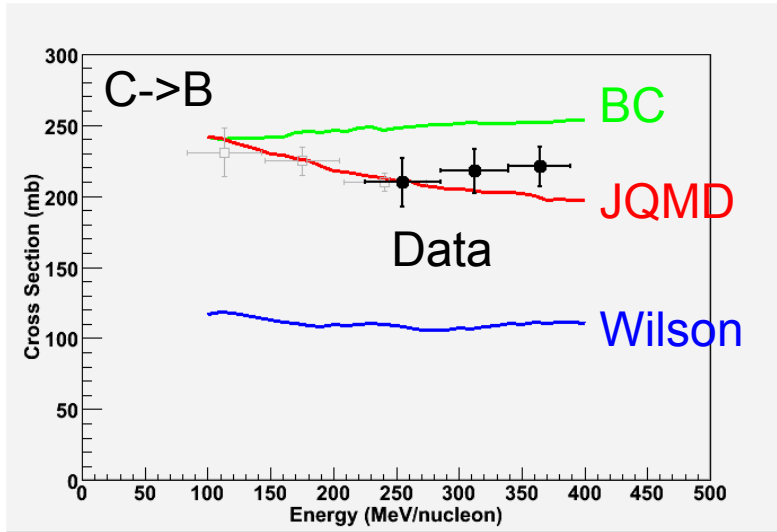
Depth in water (mm)

ここで規格化



# 炭素-水反応

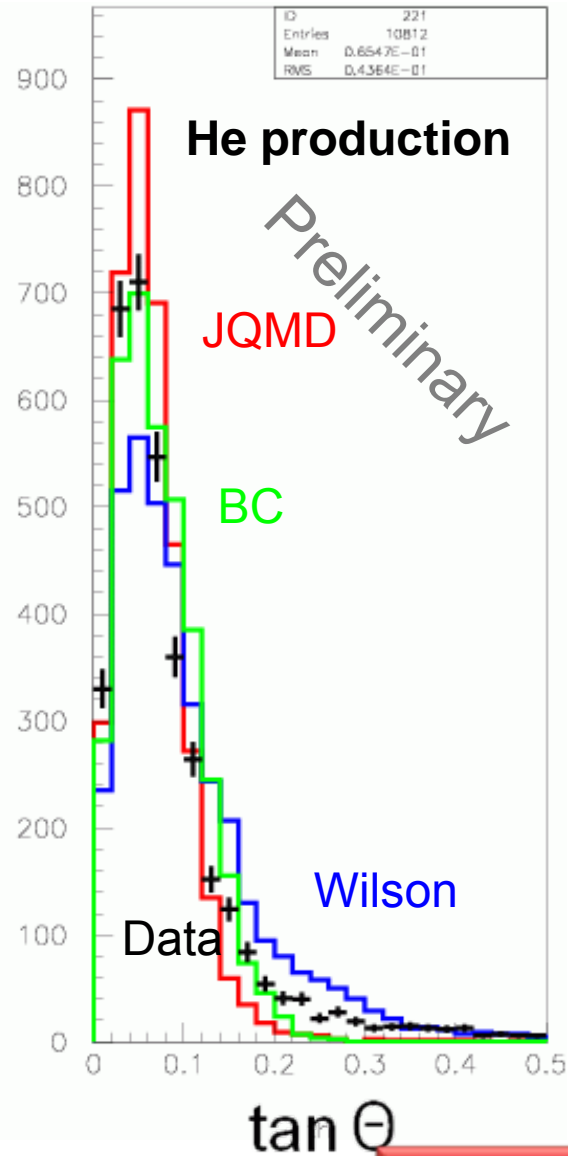
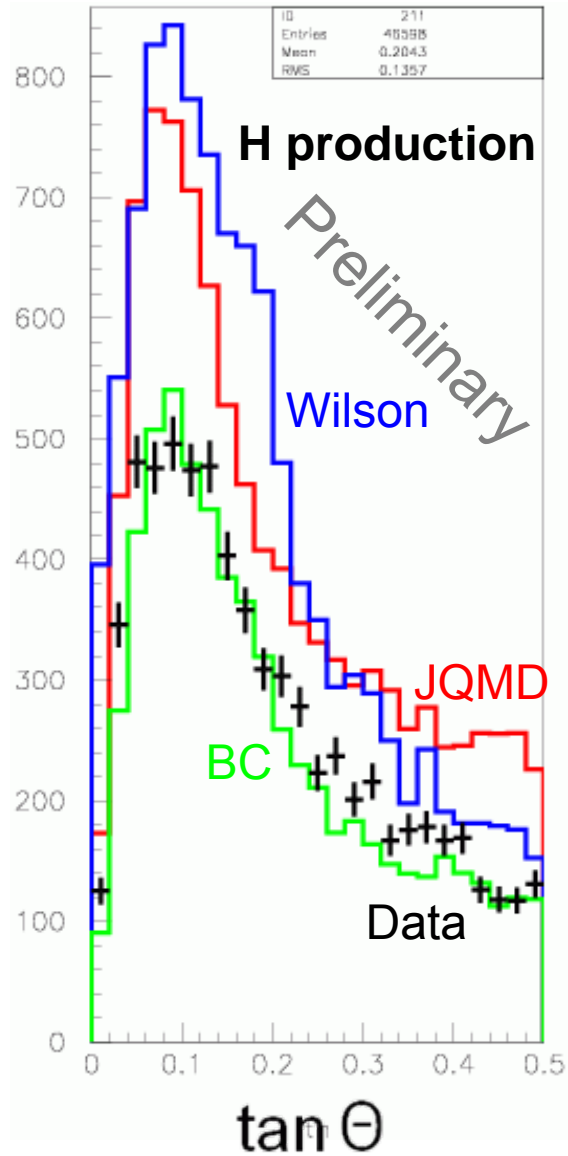
## B, Be, Li 生成断面積



Data: P152実験  
T. Toshito et al., PRC 75 054606 (2007)

# 炭素-水反応

## 水素、ヘリウムの生成



200-400MeV/n

Important for lateral dose

# 今後の課題

- 新たな粒子線治療施設に対応
- 生物学的効果の取り込み
- 炭素線シミュレーション精度の向上  
など

# まとめ

- Geant4は基本設計の柔軟性と取り扱い可能な粒子、相互作用の多さから、高エネルギー物理学以外の様々な分野で利用されている。
  - 惑星科学、資源工学、半導体工学、医学
- CRESTプロジェクト
  - 「高度放射線治療のためのシミュレーション基盤の開発」
    - これまで未整備であった粒子線治療シミュレーションに必要なソフトウェアの開発を行った
      - 新しい装置の設計、治療法の開発
      - 多くの部品は、他の放射線治療とも共通に利用可能
        - 可視化、DICOMの取り扱い
    - シミュレーション結果の検証
      - モンテカルロ計算の有効性が実証できたが、解明すべき課題も残る