

医療におけるPHITSを用いた 粒子線シミュレーション

大阪大学大学院医学系研究科

高階 正彰

がん治療の3本柱

✓ 手術



→ 日本では一番多い

✓ 薬物療法
(抗がん剤など)



✓ 放射線治療



放射線治療の利点

- ✓ 非侵襲的
 - 機能温存
 - 高いQOL(生活の質)が保てる
- ✓ 根治が望める

粒子線シミュレーション

✓ 安全、的確に治療を行わなければならない



✓ 粒子線照射中、後に何が起きているかを知る必要がある



✓ 放射線測定とともに、シミュレーションが重要

モンテカルロシミュレーションコード

✓ 粒子線治療関連でよく使用されるもの(6つ)

(PTCOG report 1 (2010) より)

1. FLUKA

2. GEANT4

3. MARS15

4. MCNPX

5. PHITS



(Particle and Heavy-Ion Transport code System)

6. SHIELD/SHIELD-HIT

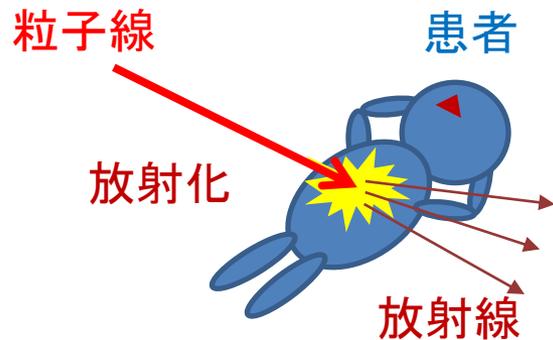
Residual radioactivity in particle cancer therapy

M. T., M. Suga, T. Horaguchi, H. Toki, K. Niita

Submitted to *Medical Physics*

Introduction

- ✓ がん治療における粒子線照射後、医療スタッフは25秒程度で患者に近づき、固定具を外すなどする
- ✓ 患者の体が放射化 → 医療スタッフ被曝
- ✓ 空間線量モニター、個人線量等、安全策は講じられている
- ✓ 患者体内放射化による被ばく線量率の時間依存性がわかればより効率的な安全確認ができる



被ばく

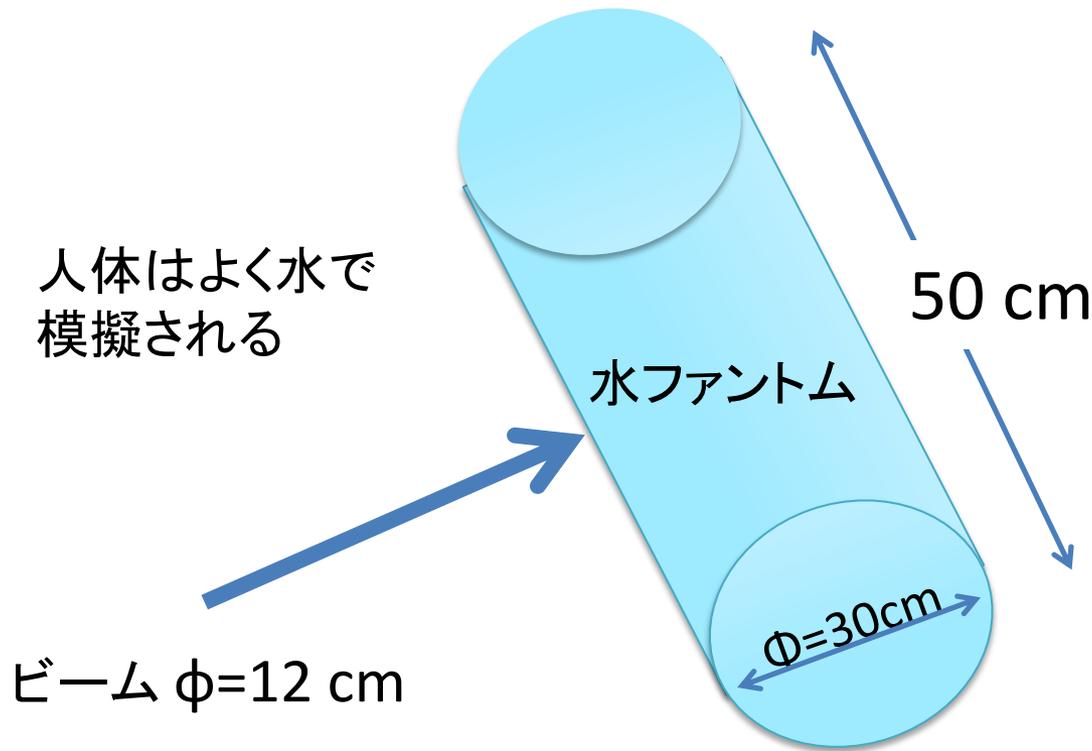
目的

- ✓ 患者体内放射化をモンテカルロシミュレーションによって調べ、何が起きているかを知る
- ✓ 患者体内放射化による被ばく線量の時間依存性を導出し、被ばく量の効率的な低減化を検討する

方法 1

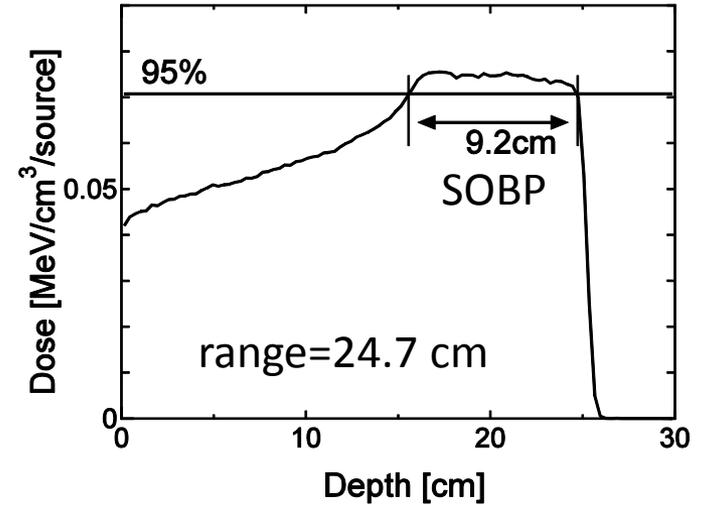
✓ RI生成

陽子、炭素照射 5Gy

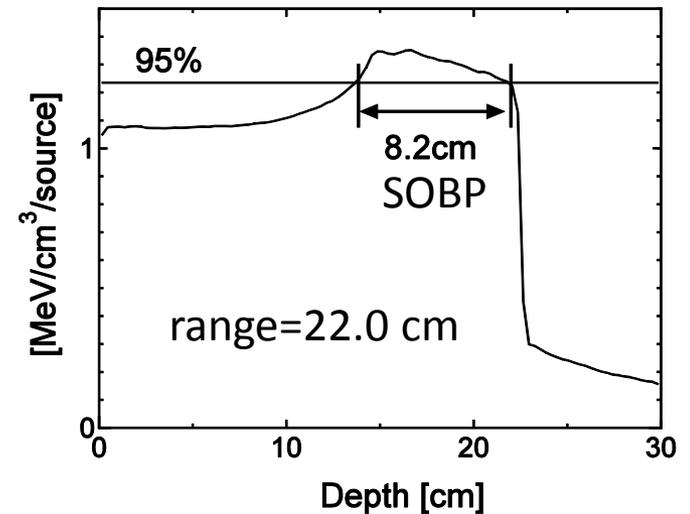


PHITSでシミュレーションする

陽子

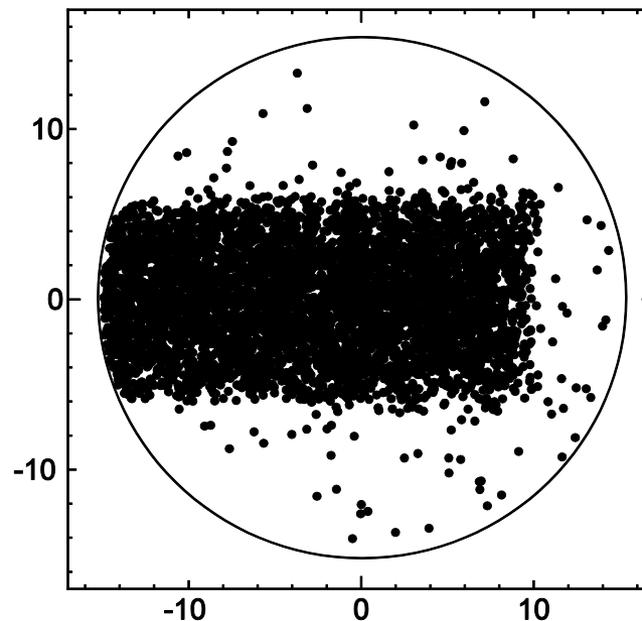
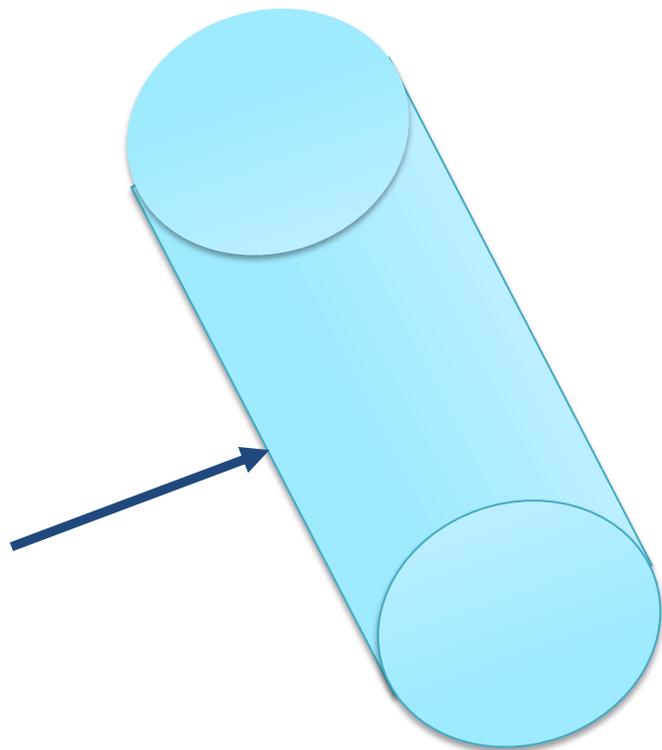


炭素



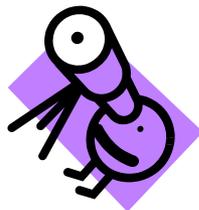
方法 2

✓ RI生成 & 放射能



例： ^{15}O の停止位置
(陽子線照射)

- ✓ 各RIの停止位置 \vec{S} を記録
- ✓ 各RIの生成確率 P の導出
- ✓ 放射能の計算



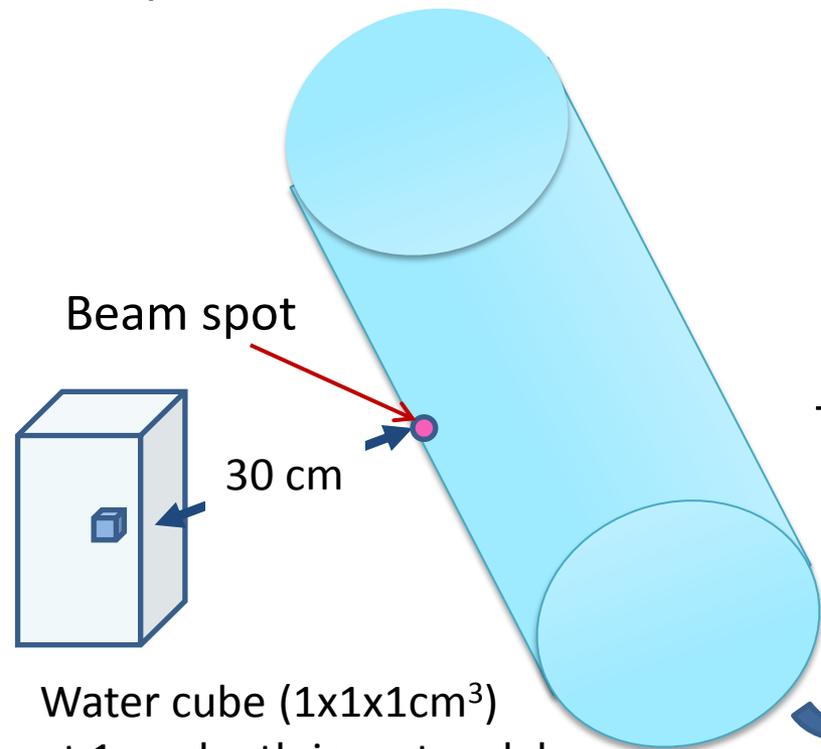
λ : 崩壊定数
 I : 電流
 e : 素電荷
 t_0 : 照射停止時間

各RIに対して

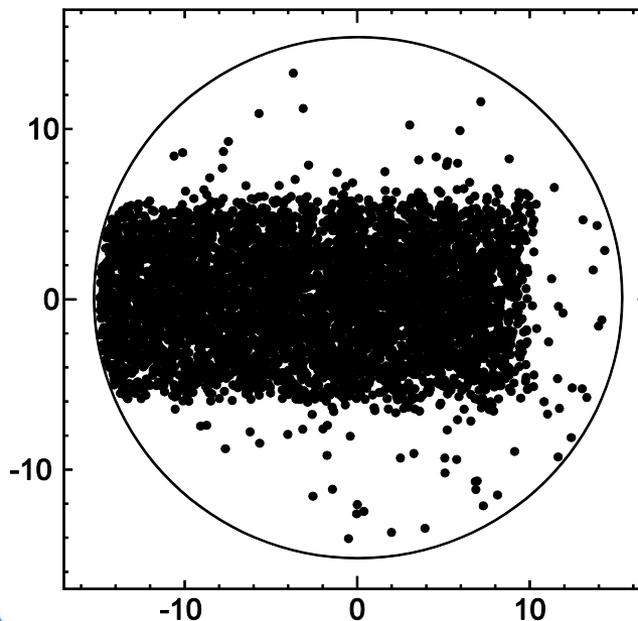
$$A(t) = \begin{cases} \frac{PI}{e} [1 - \exp(-\lambda t)] & (t \leq t_0) \\ A(t_0) \exp(-\lambda(t - t_0)) & (t > t_0), \end{cases}$$

方法 3

✓ β^+ 崩壊 & 個人線量等量



Water cube ($1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$)
at 1 cm depth in water slab
phantom ($30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$)
(個人線量当量)



例: ^{15}O の停止位置
(陽子線照射)

- ✓ \bar{S} での β^+ 崩壊 \rightarrow 対消滅 γ 線生成、
脱励起 γ 線
(電子線はすぐに止まるので β^+ のみ)
- ✓ 1崩壊当たりの water cube における
線量 D を PHITS でシミュレート

方法 4

✓ 個人線量当量率

$$\dot{H}_p(10) = \sum_i D_i A_i(t)$$

D_i :核種 i の1崩壊当たりの water cube における線量

$A_i(t)$:核種 i が与える放射能

✓ 個人線量当量

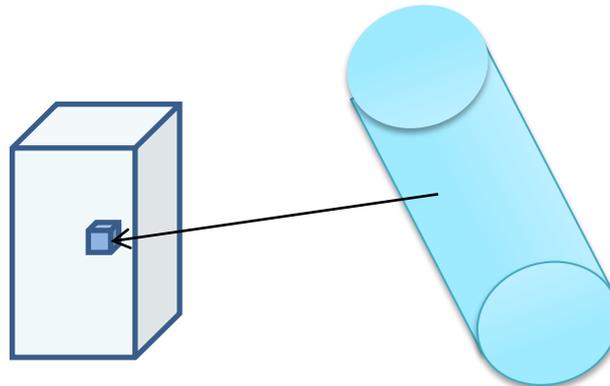
$$H_p(10) = \int_{t_1}^{t_2} \dot{H}_p(10) dt.$$

結果

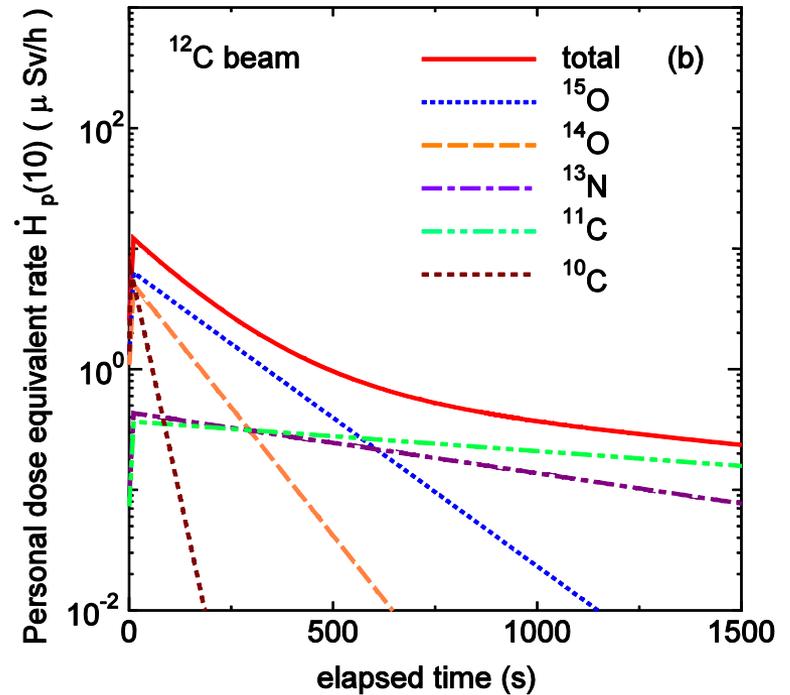
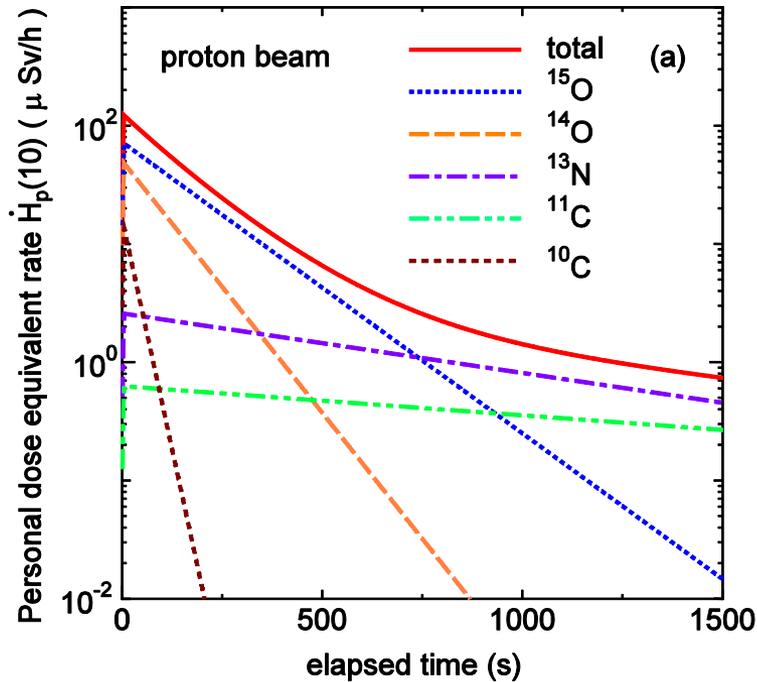
p+水、 ^{12}C +水 反応で生成される、positron emitter のうち、
寿命が20秒 – 20分 程度のものは ^{15}O , ^{14}O , ^{13}N , ^{11}C , ^{10}C

nucleus		^{15}O	^{14}O	^{13}N	^{11}C	^{10}C	sum $P_{p(C)}$
lifetime		122.2 s	70.6 s	9.96 m	20.3 m	19.3 s	-
生成確率 P	p	3.14×10^{-2}	4.39×10^{-3}	5.80×10^{-3}	2.70×10^{-3}	4.67×10^{-4}	4.48×10^{-2}
	^{12}C	1.07×10^{-1}	1.35×10^{-2}	2.57×10^{-2}	6.62×10^{-2}	1.08×10^{-2}	2.23×10^{-1}
$D \times 10^6 \text{Bq}$ ($\mu\text{Sv/h}$)	p	0.959	2.73	0.915	0.974	2.11	-
	^{12}C	0.454	1.73	0.609	0.409	0.770	-

↑
1MBq あたり water cube に与える線量を $\mu\text{Sv/h}$ に変換

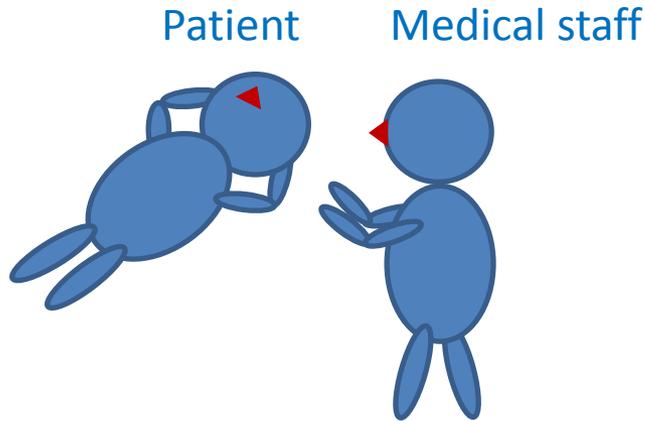


結果



- ✓ 傾きが途中で変化する
- ✓ 傾きが変わるタイミングは少し異なる(成分割合が異なるから)
- ✓ 炭素線の方が放射化は少ない(他研究の結果と一致)

医療スタッフの被ばく



➤ 照射後医療スタッフが患者のところまで来るのに約25秒かかる.*

➤ 固定具を外すのに30秒かかる.*
→ 照射終了から固定具を外すまでに55秒

➤ 仮定: 20回/日、260日/年*

* *H. Tsujii et al., Jpn J. Med. Phys. 28 (2009) 172*

- ・時間は照射開始から測る。
- ・照射時間は5秒

個人線量当量 $H_p(10) = \int_{t_1}^{t_2} \dot{H}_p(10) dt \quad t_1 = 30 [s], \quad t_2 = 60 [s]$

	treatment (μSv)	annual (mSv)
p	0.769	4.00
^{12}C	0.0908	0.472

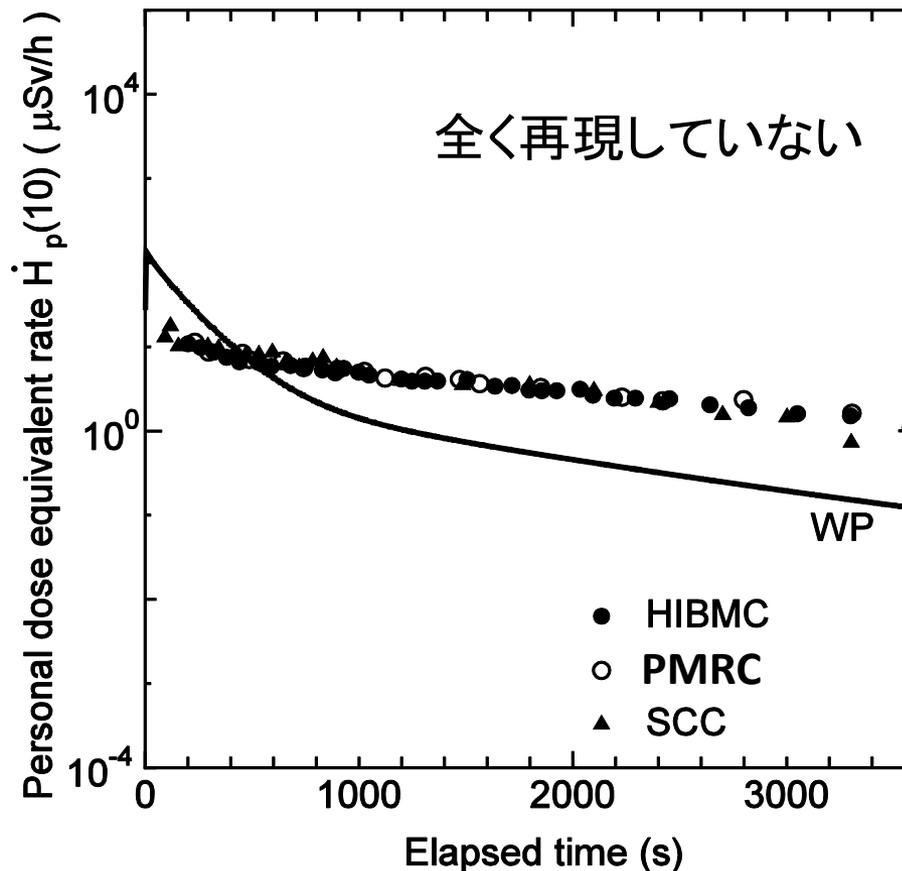
- ✓法定限度 50 mSv より小さい
- ✓日本の医療従事者の平均 (0.27~0.41mSv)*
と同程度、もしくは大きい

* Nuclear Safety Research Group, Kyoto Univ. Research Reactor Institute
Resume of 106th Seminar (S. Kimura) (in Japanese)
<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/seminar/zemi.html>

測定との比較

測定を行っている論文 *H. Tsujii et al., Jpn J. Med. Phys. 28 (2009) 172*

- ✓ 照射条件はほぼ同じ(陽子、炭素、range, volume, 5Gy 照射)
- ✓ 水ではなく、Tough Water Phantom (TWP) を使用



測定との比較

測定を行っている論文

H. Tsujii et al., Jpn J. Med. Phys. 28 (2009) 172

- ✓ Tough Water Phantom (TWP)
(人体軟組織等価ファントム)

タフ材料データ(重量割合)

元素	タフウォーターWD
H	0.084
C	0.674
N	0.022
O	0.195
P	—
Al	—
Cl	0.002
Ca	0.023
Si	—

ターゲット中に
新たに炭素を
加える必要あり

陽子線照射の場合でやってみる

測定との比較(方法)

水ファントムでのPHITS計算を基に個人線量当量率 $\dot{H}_p(10)$ を導出

$$\dot{H}_p(10) = \sum_i D_i A_i(t)$$

D_i は水ファントムの場合と同じと仮定

$$A(t) = \begin{cases} \frac{PI}{e} [1 - \exp(-\lambda t)] & (t \leq t_0) \\ A(t_0) \exp(-\lambda(t - t_0)) & (t > t_0), \end{cases}$$



TWPの場合の、各RIの生成確率 P が分かればよい

ある核種Aが生成される確率
(近似的)

$$P = R \sum_T n_T \sigma_{T(a,x)A}$$

↑
ターゲットの中の原子核

↑
Tの個数密度(既知)

← 断面積(重要)

range(水の場合と同じと仮定)

必要な反応

✓ 水ファントム

全ての生成物は、 $p+^{16}\text{O}$ 反応から作られる

✓ タフウォーターファントム

^{15}O , ^{14}O , ^{13}N : $^{16}\text{O}(p,x)$ → 水の場合と同じ、個数密度の補正のみ

^{10}C : 寄与は小さいと予想されるので無視

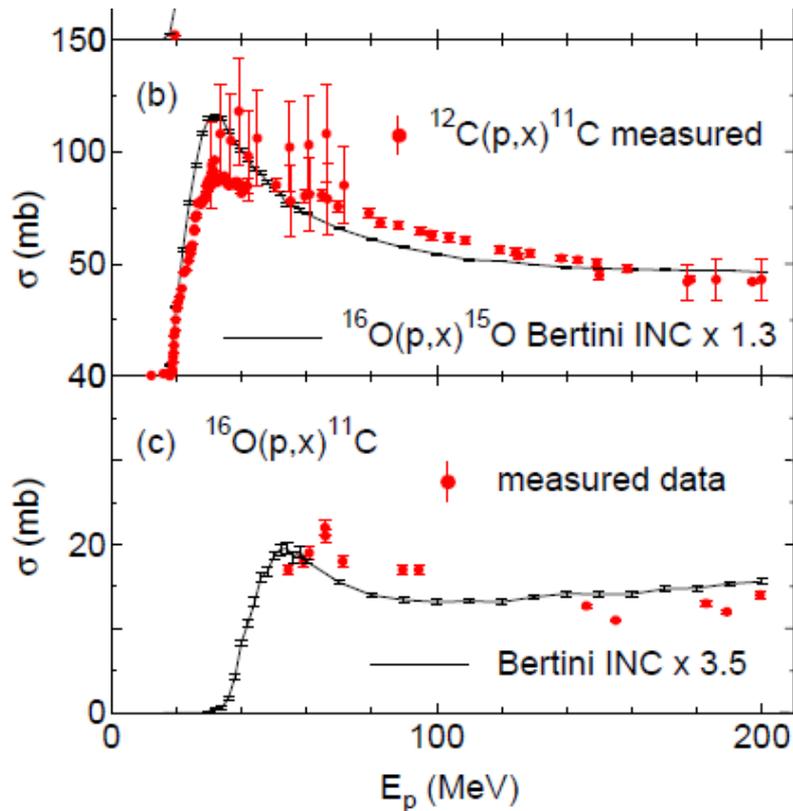
^{11}C : $^{16}\text{O}(p,x)^{11}\text{C}$ & $^{12}\text{C}(p,x)^{11}\text{C}$

$$P_{^{11}\text{C}}^{(TWP)} \cong R \left[\sigma_{^{12}\text{C}(p,x)^{11}\text{C}} n_{^{12}\text{C}}^{(TWP)} + \sigma_{^{16}\text{O}(p,x)^{11}\text{C}} n_{^{16}\text{O}}^{(TWP)} \right]$$

既知

必要な反応

- ✓ PHITSでは、このエネルギー領域の核反応は Bertini Intra-Nuclear Cascade (INC) を使っている



$$\sigma_{^{12}\text{C}(p,x)^{11}\text{C}} \cong 1.3 \sigma_{^{16}\text{O}(p,x)^{15}\text{O}}^{(INC)}$$

$$\sigma_{^{16}\text{O}(p,x)^{11}\text{C}} \cong 3.5 \sigma_{^{16}\text{O}(p,x)^{11}\text{C}}^{(INC)}$$

必要な反応

- ✓ 水ファントム (WP) の結果を用いて、TWP の場合の ^{11}C の生成確率を見積もる

$$P_{^{11}\text{C}}^{(\text{TWP})} = R \left[\sigma_{^{12}\text{C}(p,x)^{11}\text{C}} n_{^{12}\text{C}}^{(\text{TWP})} + \sigma_{^{16}\text{O}(p,x)^{11}\text{C}} n_{^{16}\text{O}}^{(\text{TWP})} \right]$$

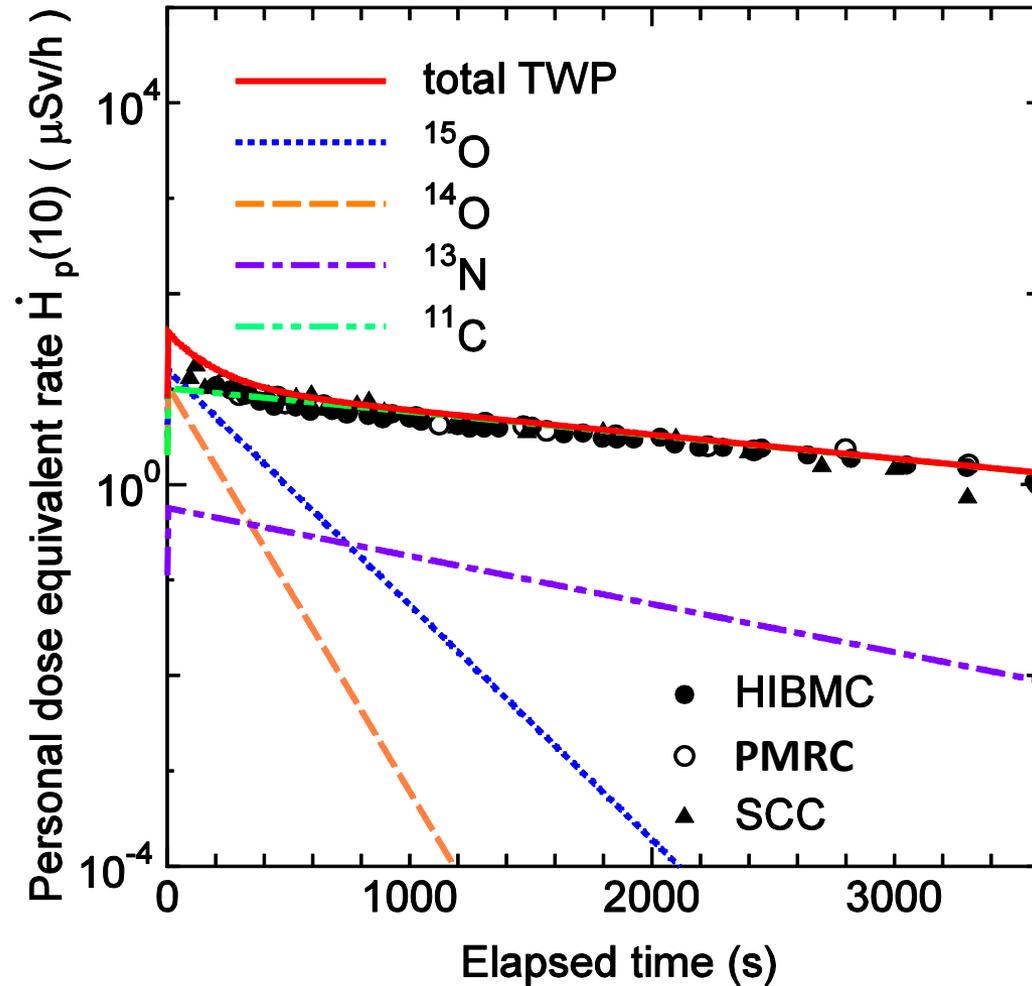
$$\cong R \left[\underbrace{1.3 \sigma_{^{16}\text{O}(p,x)^{15}\text{O}} n_{^{16}\text{O}}^{(\text{WP})}}_{\parallel} \frac{n_{^{12}\text{C}}^{(\text{TWP})}}{n_{^{16}\text{O}}^{(\text{WP})}} + 3.5 \underbrace{\sigma_{^{16}\text{O}(p,x)^{11}\text{C}} n_{^{16}\text{O}}^{(\text{WP})}}_{\parallel} \frac{n_{^{16}\text{O}}^{(\text{TWP})}}{n_{^{16}\text{O}}^{(\text{WP})}} \right]$$

$$P_{^{15}\text{O}}^{(\text{WP})} / R \qquad P_{^{11}\text{C}}^{(\text{WP})} / R$$

(全ての値は既知、Rは等しいと仮定)

$$\cong 13.6 P_{^{11}\text{C}}^{(\text{WP})}$$

TWPの場合の結果



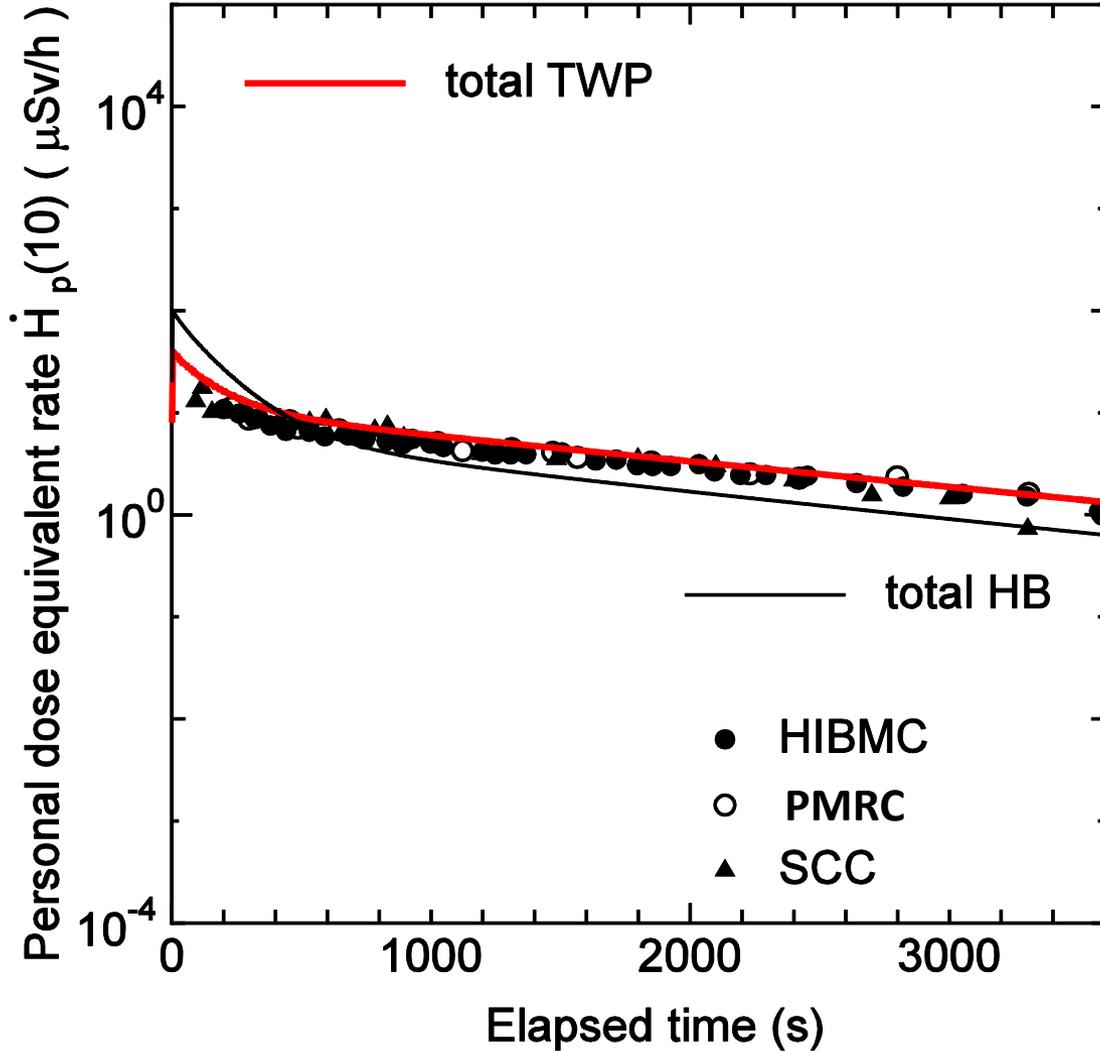
赤線は実験データをよく再現

この場合、600秒以降は ^{11}C からの寄与がほとんど

人体の場合はどうなるか

- ✓ 人体 (Human Body, HB) の組成
- ✓ TWP の場合とまったく同じことをやってみる
(元素は一様分布していると仮定)

HBの場合の結果



TWP の場合に比べると
少しずれている

結果：個人線量当量

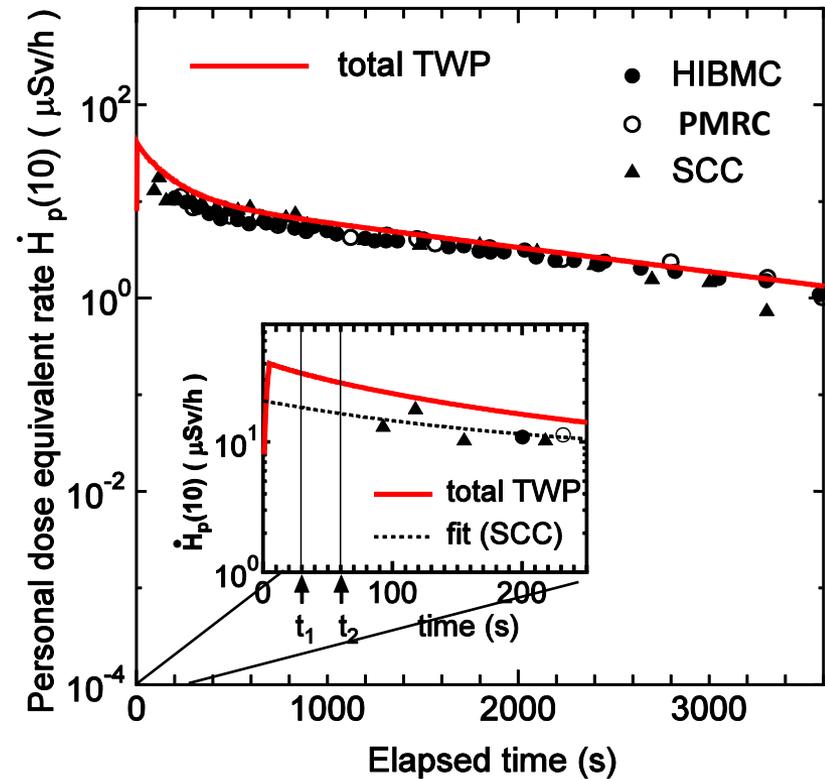
個人線量当量 $H_p(10) = \int_{t_1}^{t_2} \dot{H}_p(10) dt \quad t_1 = 25 [s], \quad t_2 = 55 [s]$

*fitした関数から導出

	一回当たりの線量 (μSv)	年間線量 (mSv)
測定* (TWP)	0.147	0.764
WP	0.769	4.00
TWP	0.248	1.29
HB	0.569	2.96

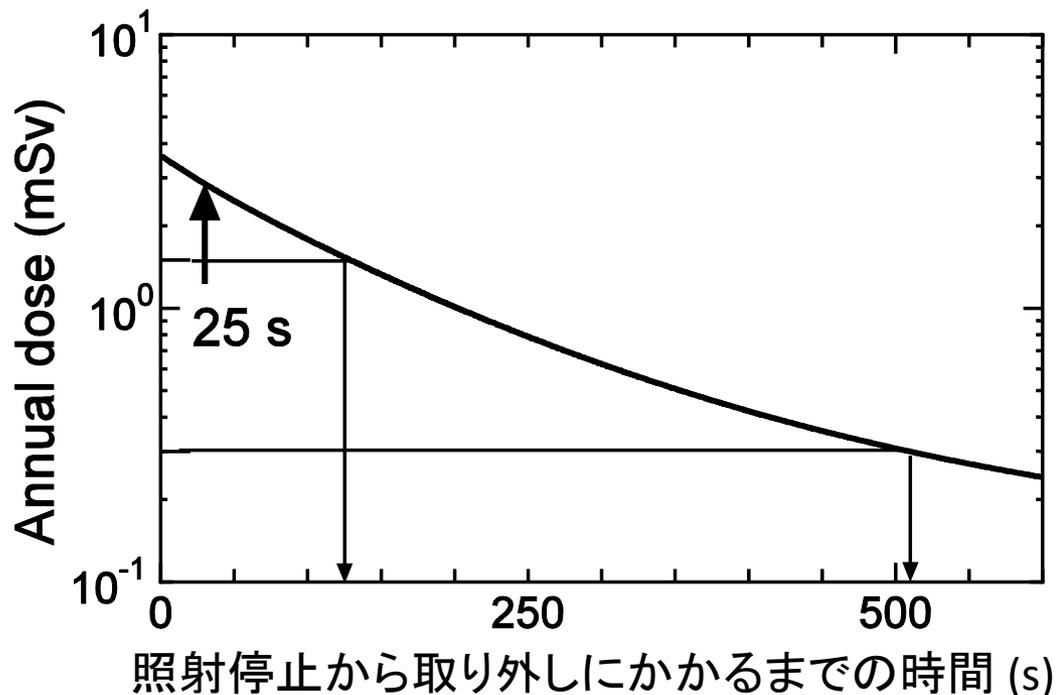
1.7倍

factor 2 くらいの誤差であるとする、人体からの寄与だけで日本の医療従事者の平均 (0.27~0.41mSv) よりも大きい



fit : 2つの指数関数の重ね合わせでフィット

固定具を外しにかかるまでの時間と、 年間線量の関係 (HBの場合)



固定具を外すのに
30秒かかると仮定

放医研のケース(25秒後に開始)を参照値として

年間線量を半分にする

→ 120 秒程度待つ

年間線量のオーダーを一つ下げる

→ 500 秒程度待つ

結論

- ✓ PHITSによる水ファントム放射化計算を基に、TWP、人体(HB)の場合での放射化と医療スタッフの被ばく量を見積もった。
- ✓ TWPの場合は測定データ(放射能の時間的変化)をよく再現した
- ✓ 人体の場合で、年間被ばく線量は2.96 mSv
- ✓ 半分に下げるためには120秒待つ必要がある
- ✓ 1ケタ下げるためには500秒待つ必要があるが、これは長すぎて無理

AMD(反対称化分子動力学)を用いた 核反応計算

櫻井 勇介 (阪大医・保健学科4回生)
高階 正彰 (阪大医)
小野 章 (東北大理)

背景と目的

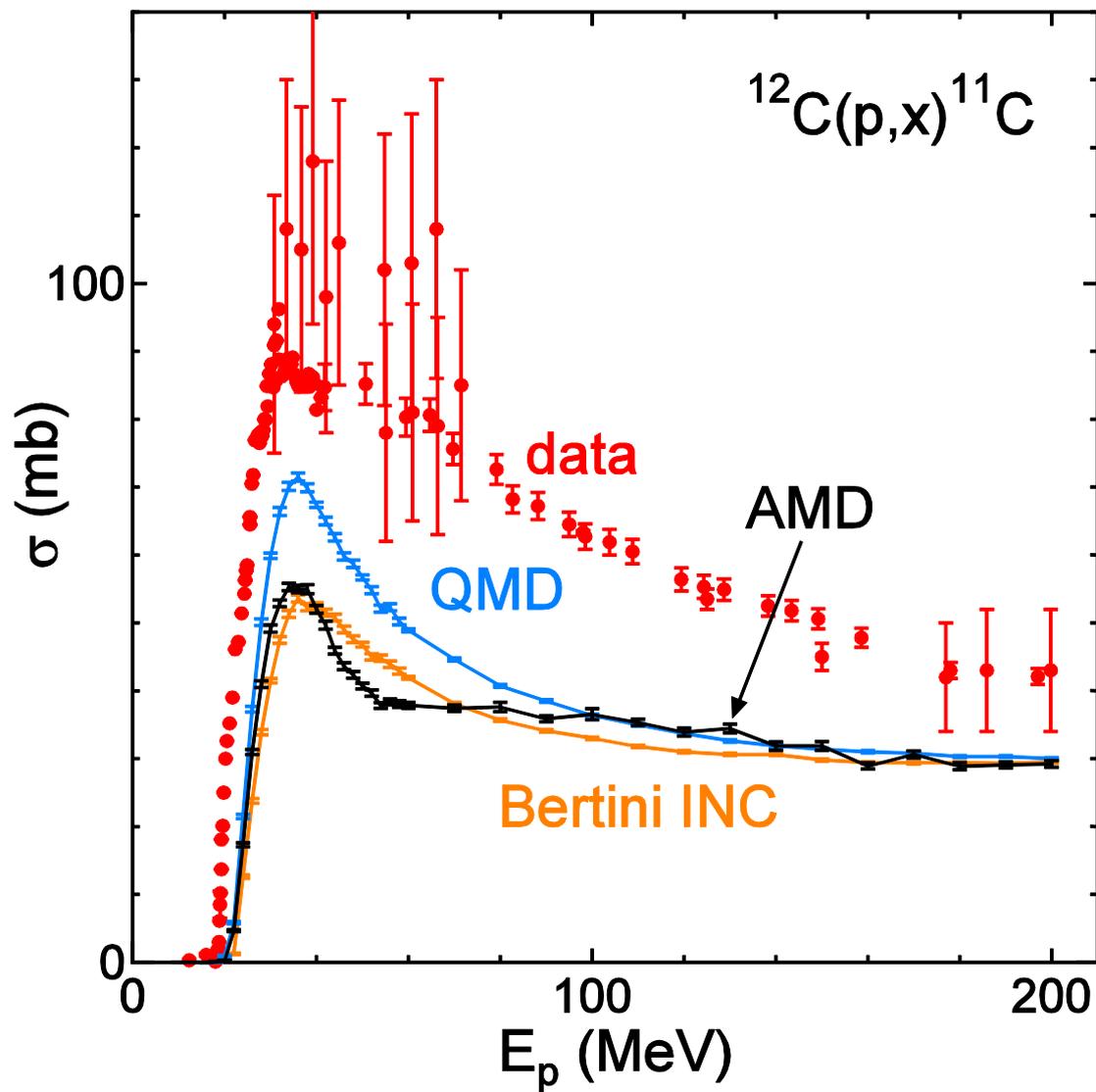
- ✓ 2次中性子のスペクトルは、 $E_p \sim 200\text{MeV}$ の領域で、QMDでもCascadeモデルでもある程度の精度は得られる。
- ✓ しかし、特定の放射性元素の生成断面積は断面積も小さいので精度が出ない。
- ✓ 精度が良いと言われているAMDは、どれくらい使えるか？
- ✓ もし使えるのであれば、データが存在しない領域で、データの代わりに使うこともできる。
- ✓ まずは、 ^{12}C ターゲットで試してみる。

方法

- ✓ AMDでダイナミカルな過程を計算
- ✓ 生成された原子核に対して、蒸発過程*を適用し
最終的な生成確率を導出 → 断面積へ

*GEM: *S. Furihara, Nucl. Instr. Meth. B 171 (2000) 251*

結果



現在のまとめ

- ✓ 現在までに $^{12}\text{C}(p,x)$ 反応に適用した
- ✓ 現在のところ、Bertini INC, QMD とそれほど変わらないか
- ✓ 今後はもっと小さな断面積の反応を調べていく