

# J-PARCを用いた核変換システム(ADS)の構造材の弾き出し損傷断面積の測定

(JAEA/J-PARC) 明午 伸一郎、松田 洋樹、岩元 洋介

長谷川 勝一、前川 藤夫、岩元 大樹

(KEK/J-PARC) 吉田 誠、中本 建志、石田 卓、牧村 俊助

# 内容

## ● 背景

- 弹き出し断面積の現状
- 弹き出し断面積の測定

## ● J-PARCにおける実験

- 3 GeV加速器施設(RCS)における実験
- 30 GeV加速器施設(MR)における実験

## ● PHITSコードを用いた弾き出し断面積計算

## ● 計算モデルの比較

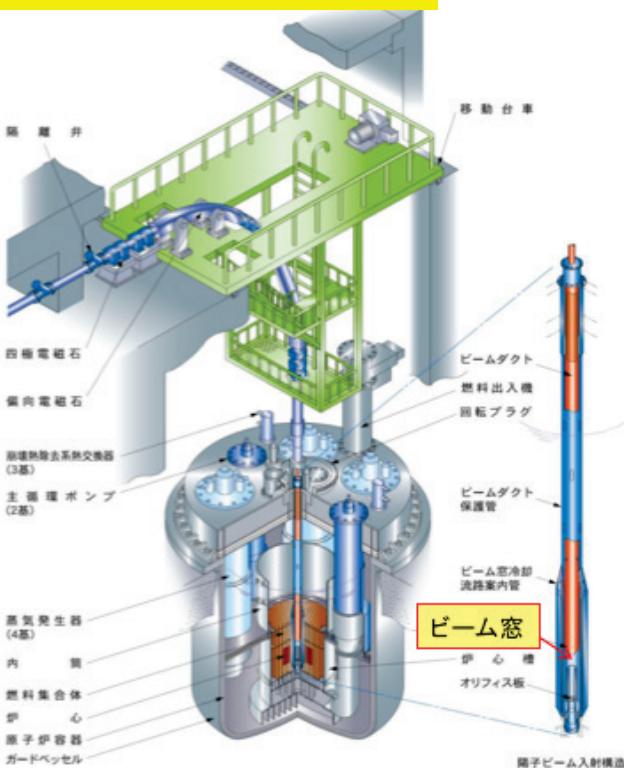
## ● 考察

## ● まとめ

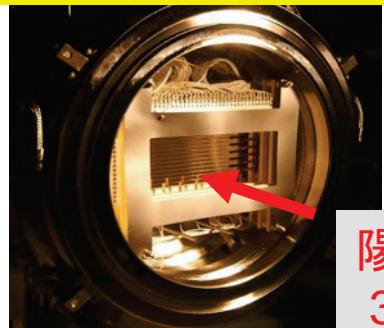
# はじめに

- 加速器駆動型核変換システム(ADS)や核破碎中性子源等の大強度陽子加速施設に用いられるビーム窓や標的等の構造材の損傷や寿命評価には、原子あたりの弾き出し数 (dpa)が用いられる。

核変換システム(ADS)  
ビーム出力 30 MW  
1.5 GeV, 20 mA  
鉛・ビスマス標的



陽子ビーム窓：アルミ合金  
(J-PARC 中性子源施設)



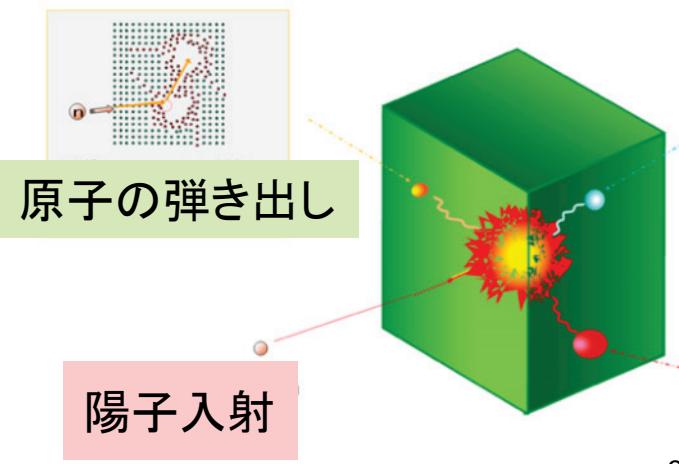
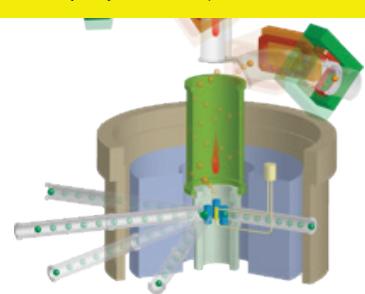
陽子  
3 GeV

ビーム窓：Ti合金  
(J-PARC ニュートリノ施設)



陽子  
30 GeV

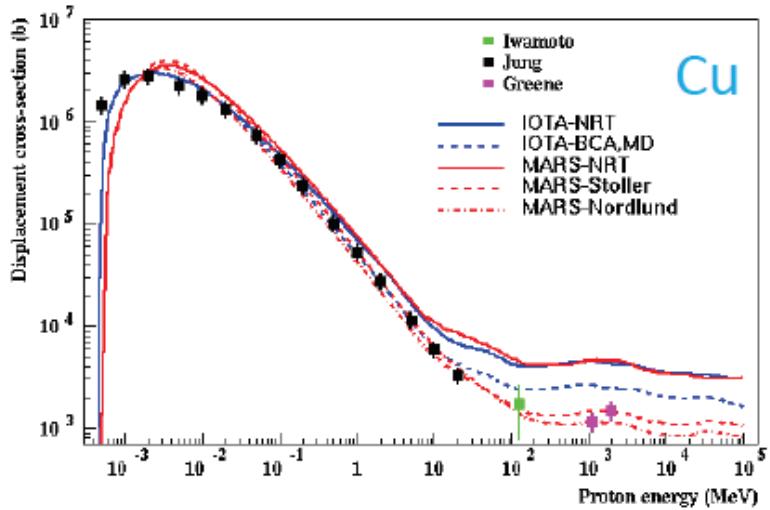
タンゲステン標的  
(建設予定: J-PARC 第2ターゲットステーション)



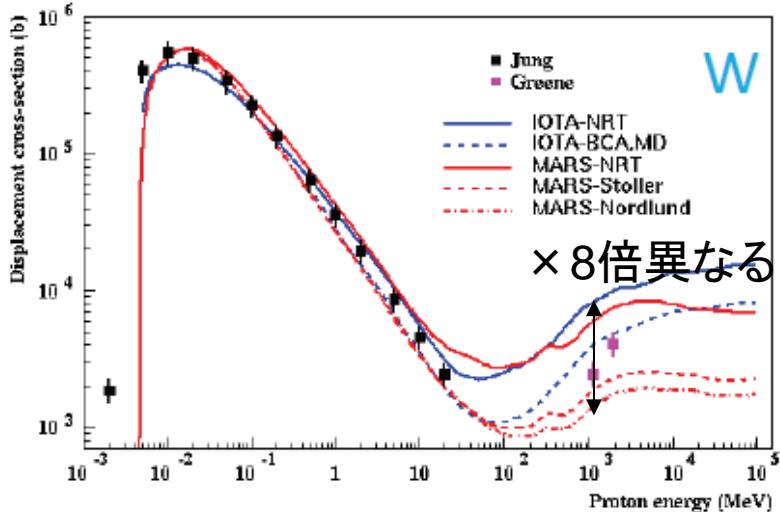
陽子入射

# 弾き出し断面積の現状

MARSコードによる評価(N. Mokhov)



- dpa: 計算で評価  
 $dpa = フラックス \times 弾き出し断面積$   
 弾き出し断面積: 巨視的断面積
- dpaによる損傷評価  
 原子炉、核融合炉等にも広く採用
- 20 MeV以上の断面積実験データが不足し  
 計算モデルの比較検討ができない
- 実験データ取得が重要



弾き出し断面積:

- マティーセン則に従い陽子入射による抵抗率変化(抵抗×断面/長さ)  $[\Omega/m]$ により測定可能
- 試料の極低温冷却が必要

$$\sigma(E) = \Delta\rho / (\phi \cdot \rho_f)$$

$\sigma(E)$ : 弾き出し断面積(巨視的断面積)

$\Delta\rho$ : 抵抗率変化率

$\phi$ : 入射陽子フルエンス

$\rho_f$ : フレンケル欠陥当たりの抵抗率増加

# J-PARC 加速器施設



- JAEA・高エネルギー加速器研究機構(KEK)の共同運営
- 大強度かつ極めて安定した陽子ビームの利用が可能
  - 高精度のビーム測定・制御により弾き出し断面積のデータ取得可能



3GeVシンクロトロン：  
早い繰り返しのシンクロ  
トロン(RCS)

- 1 MW試験と500 kWの利  
用運転(物質・生命科学  
実験施設 MLF)

メインリング：  
(MR: Main Ring)  
50 GeVシンクロトロン

- 750 kWの利用運転  
(ニュートリノ実験施設)

# 本研究の内容

- 弾き出し断面積を測定し、計算モデルとの比較検討により計算モデルの精度向上し、構造材等の損傷評価の精度向上によりADSの実現に資することを目的とする

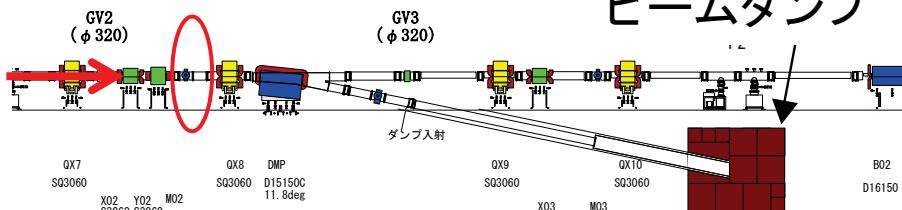
研究項目	担当機関	研究目標と方法
① 0.4～3 GeVの陽子に対する 弾き出し損傷断面積の実験的 的研究	JAEA/J- PARC	3GeVシンクロtron施設にお いて測定
② 3～30 GeVの陽子に対する 弾き出し損傷断面積の実験的 的研究	KEK/J- PARC	メインリング(MR)において測 定
③ 弾き出し損傷計算モデルの高 度化に関する研究	JAEA	実験との比較検討による計算 モデルの改善

# 0.4~3 GeV陽子の弾き出し断面積測定

## ● 3GeVシンクロトロンのダンプ 上流に装置を設置

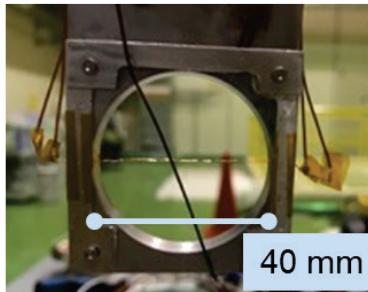
- 陽子の運動エネルギーが変更可能
- 精密なビーム調整と高精度なビーム測定が可能
- 冷凍機を用いて4 K以下の極低温に冷却し、高精度な抵抗測定
- 測定試料: Al, Fe, Cu, W

### 3GeVシンクロトロン

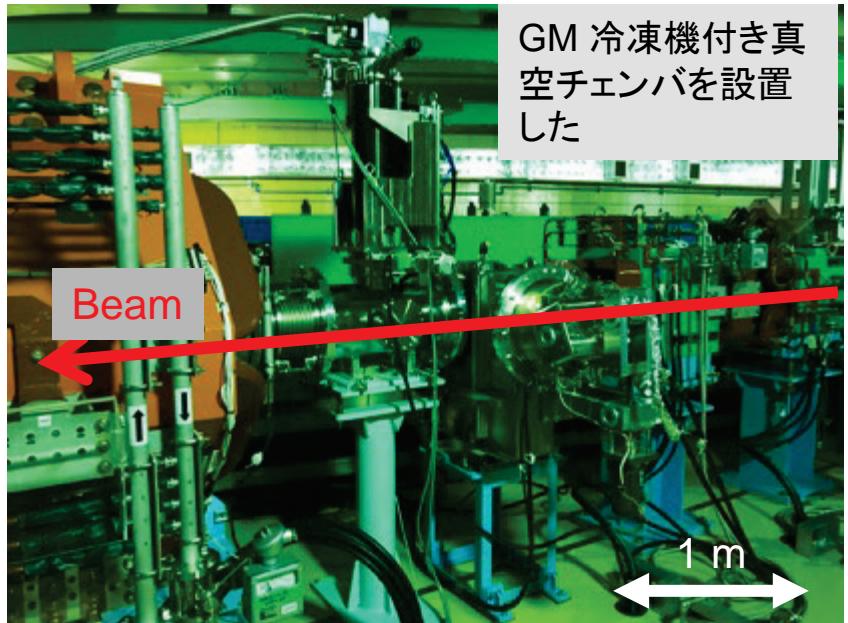
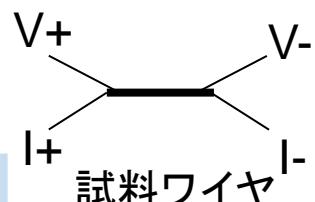


### 冷凍機及び試料

Fe wire (φ 0.25 mm)  
with purity 99.99%

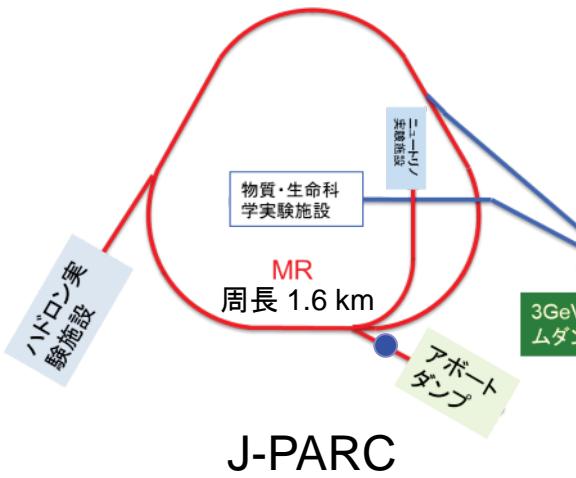


4電極式で高い精度で抵抗を取得



# 8 GeVおよび30 GeV陽子の断面積測定

## ● MRのアボートダンプラインで実験

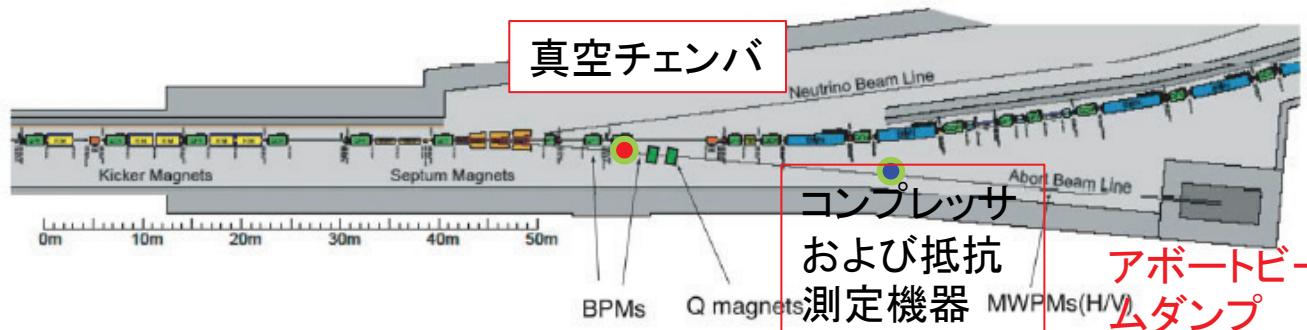


J-PARC

ワイヤーを垂直に設置  
Al, Fe, Cu, W  
(Φ0.25mm x L 50 mm)



冷凍機(4 K)  
付き真空チェンバを設置

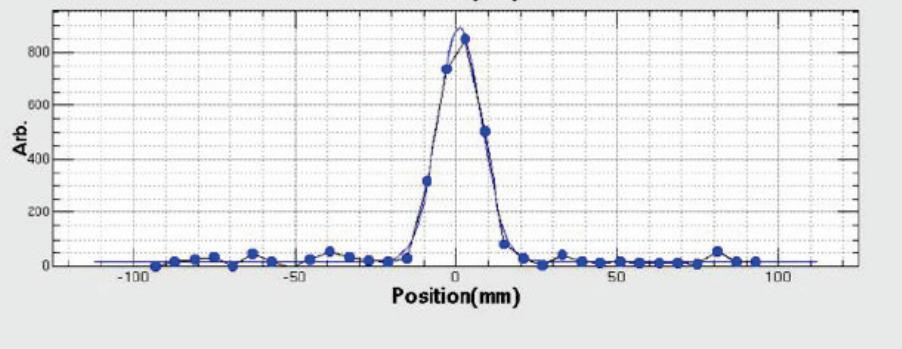


# 陽子のビーム形状と抵抗変化測定

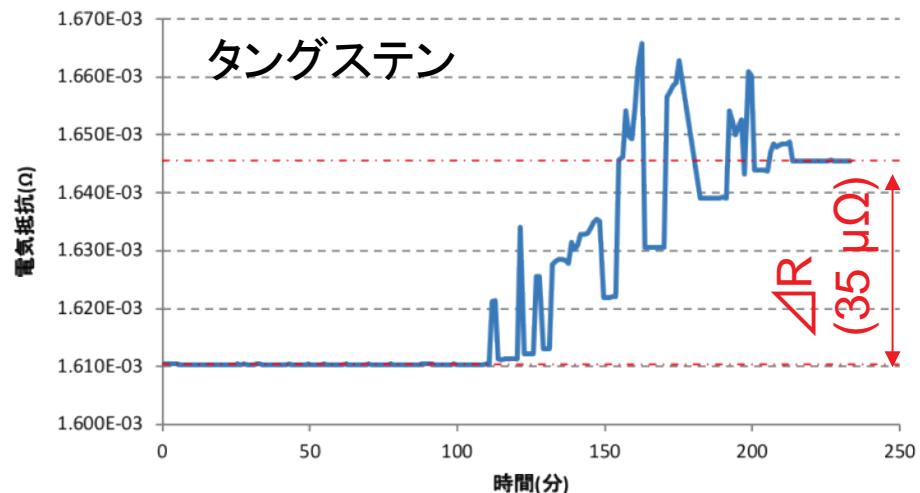
- 断面積導出: 試料ワイヤーと直交するビーム幅( $\sigma_h$ )が必要
- ビームを試料中心に合わせることが必要、補正電磁石などにより直徑0.25 mmのワイヤ中心に照準した。

$$\sigma(E) = \Delta\rho / (\overline{\phi(E)}\rho_{fp}) = \frac{\pi\sqrt{2\pi}\underline{\sigma_h}\Delta RD}{4N_p(E)\rho_{fp}} \left[ \int_{-D/2}^{D/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\underline{\sigma_h^2}}\right) dx \right]^{-1}$$

ビーム幅測定



ビーム照射中の抵抗の振舞い



- 試料付近に設置したビームプロファイ尔モニターの測定データからビーム幅を導出した。

冷却到達温度: ~3.5 K (一時的な上昇 ~10 K)

# PHITSコードによる弾き出し断面積計算

## ● PHITSコードにより断面積を計算

- 一般的なNorgett-Robinson-Torrens (NRT)モデル(1975)

- 非熱的再結合補正モデル: arcモデル

- Al: Almazouzi, Fe, Cu, W: Nordlund パラメータ

$$\sigma_{disp-calc}(E) = \sum_i \int_{E_d}^{T_i^{max}} N_d(T_i) \frac{d\sigma}{dT_i} dT_i,$$

二次粒子生成  
断面積(barn)

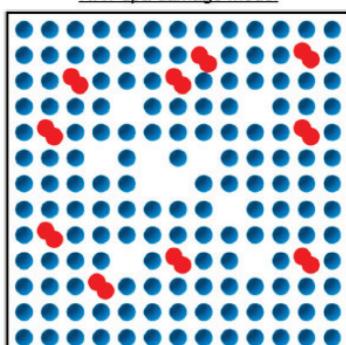
arc: Athermal  
Recombination  
Correction

### NRTモデルの弾き出し数 ( $N_d$ )

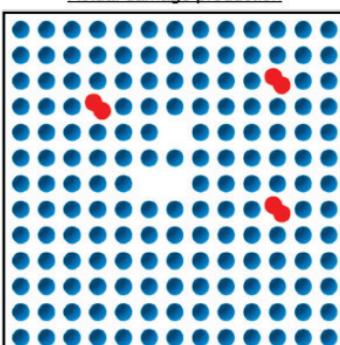
$$N_d(T_d) = \begin{cases} 0 & , T_d < E_d \\ 1 & , E_d < T_d < \frac{2E_d}{0.8} \\ \frac{0.8T_d}{2E_d} & , \frac{2E_d}{0.8} < T_d < \infty \end{cases},$$

$T_d$ : 弹き出しおエネルギー

c NRT-dpa damage model



Actual damage production

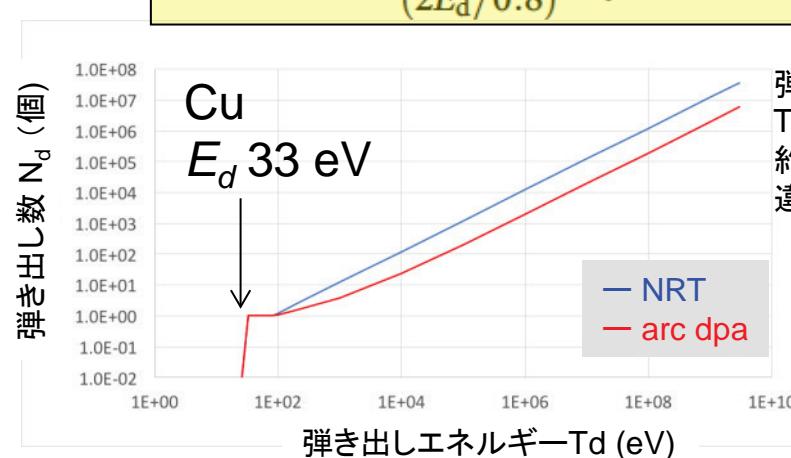


arcモデル: 瞬時の再結合を示唆

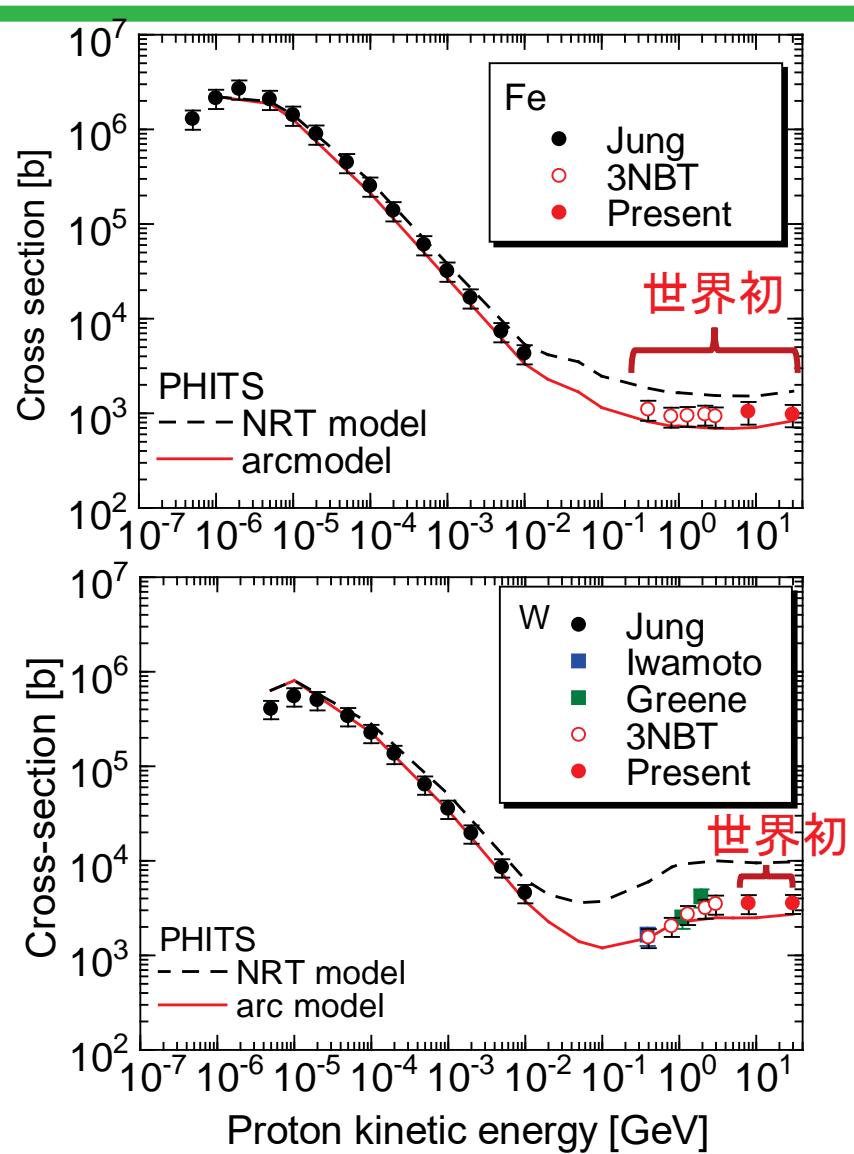
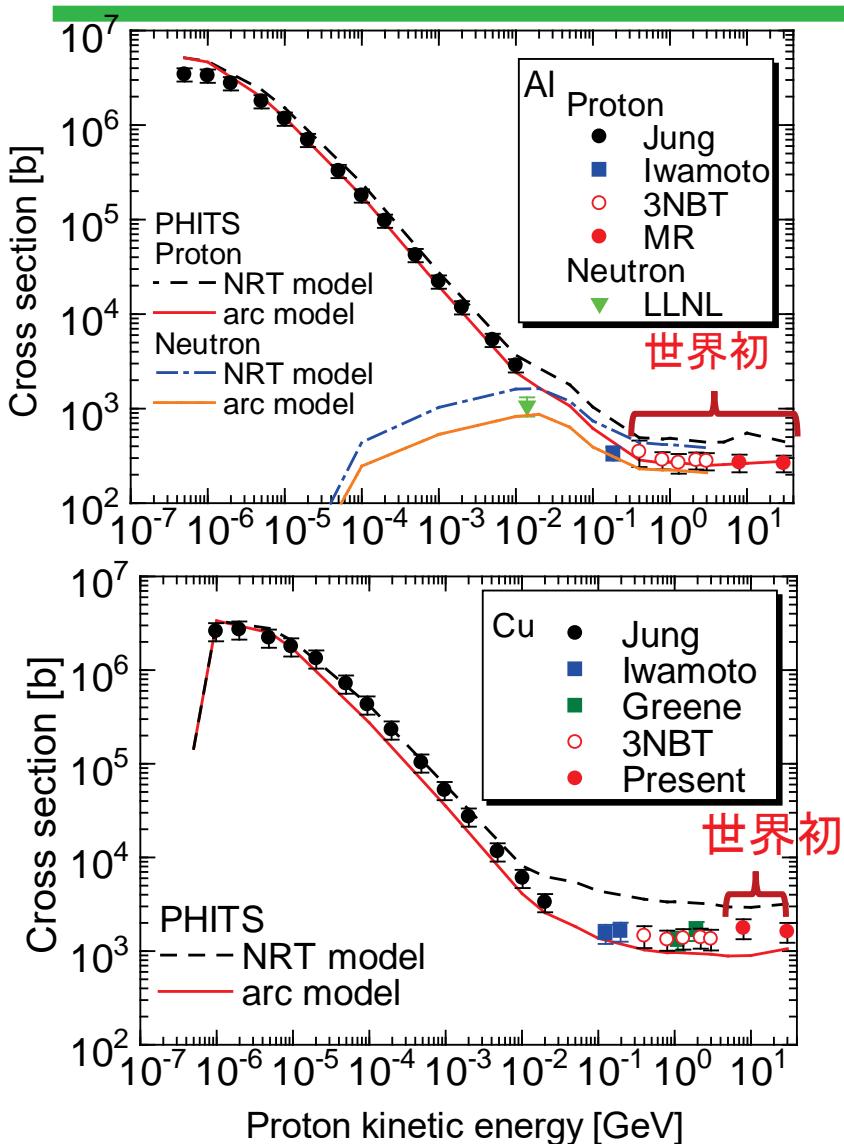
### arcモデルの弾き出し数 ( $N_d$ arcdpa)

$$N_{d,arcdpa}(T_d) = \begin{cases} 0 & , T_d < E_d \\ 1 & , E_d < T_d < \frac{2E_d}{0.8} \\ \frac{0.8T_d}{2E_d} \xi_{arcdpa}(T_d) & , \frac{2E_d}{0.8} < T_d < \infty \end{cases}$$

$$\xi_{arcdpa}(T_d) = \frac{1 - c_{arcdpa}}{(2E_d/0.8)^{b_{arcdpa}}} T_d^{b_{arcdpa}} + c_{arcdpa}.$$



# 実験と計算モデルの比較

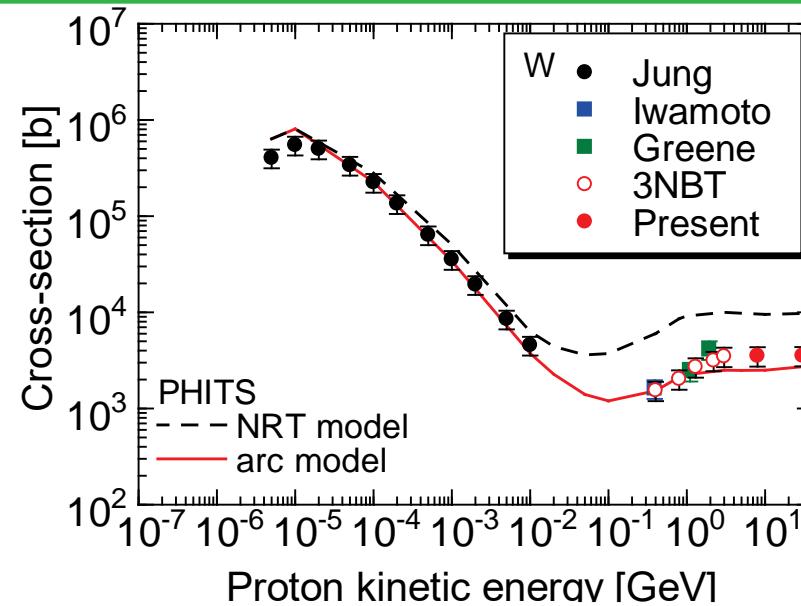
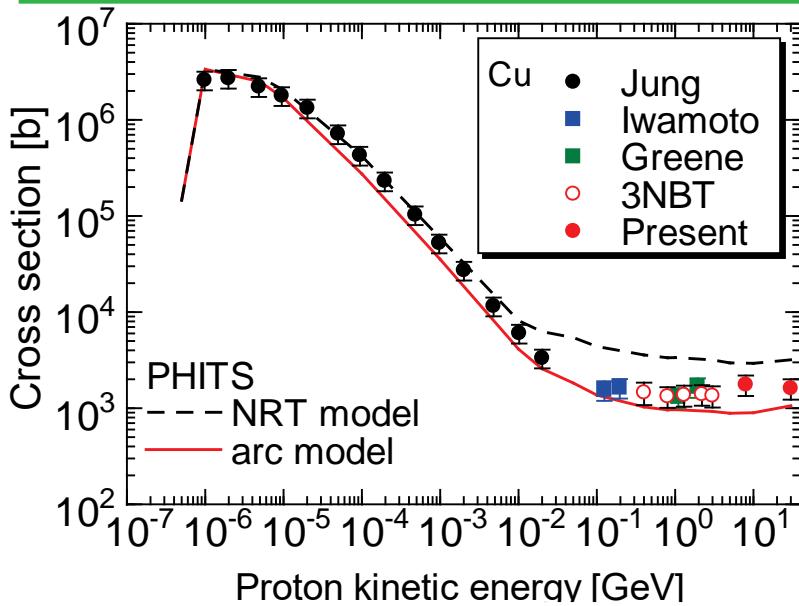


断面積誤差の主要因:  $\rho_f$  (フレンケル欠陥あたりの抵抗率增加) ~20%  $\sigma(E) = \Delta\rho / (\phi \cdot \rho_f)$

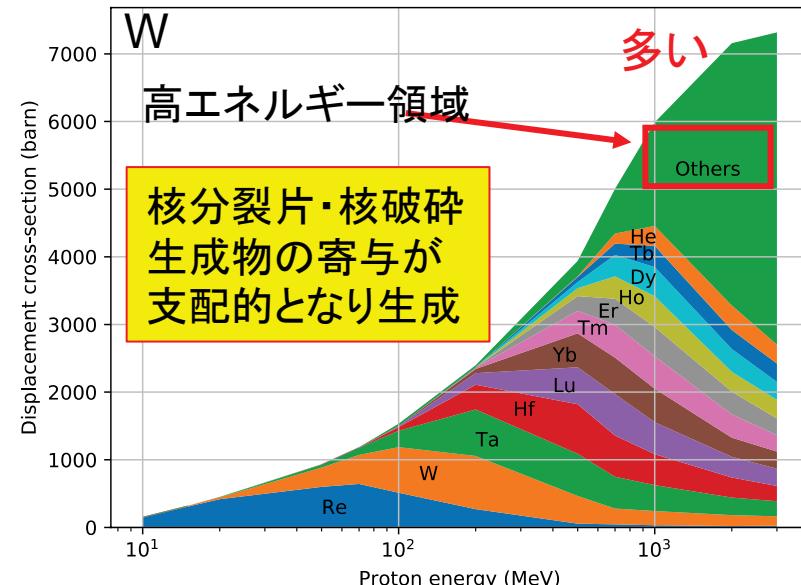
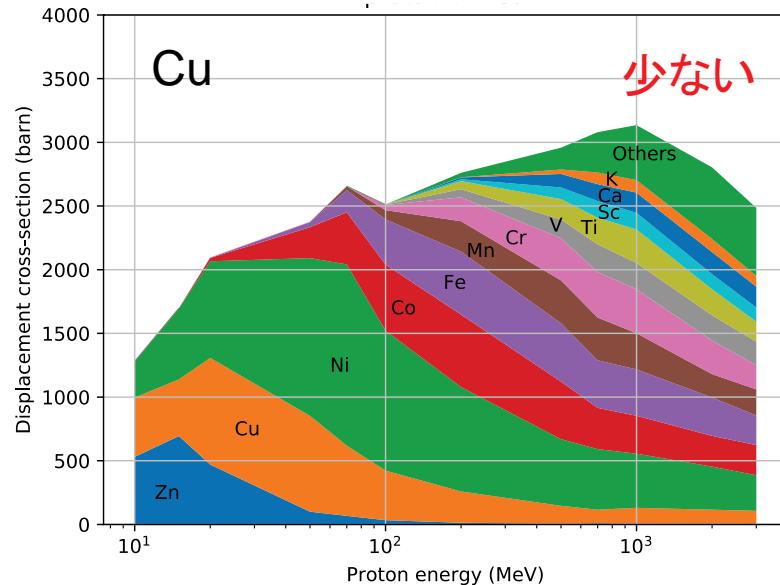
◎ 弾き出し数(dpa)評価には既存の(NRT)モデルでなく非熱的再結合を補正した(arc)モデルが必要

# 議論(1)：断面積の質量数依存性

## —高エネルギー領域のタンクステンの断面積の振舞い—

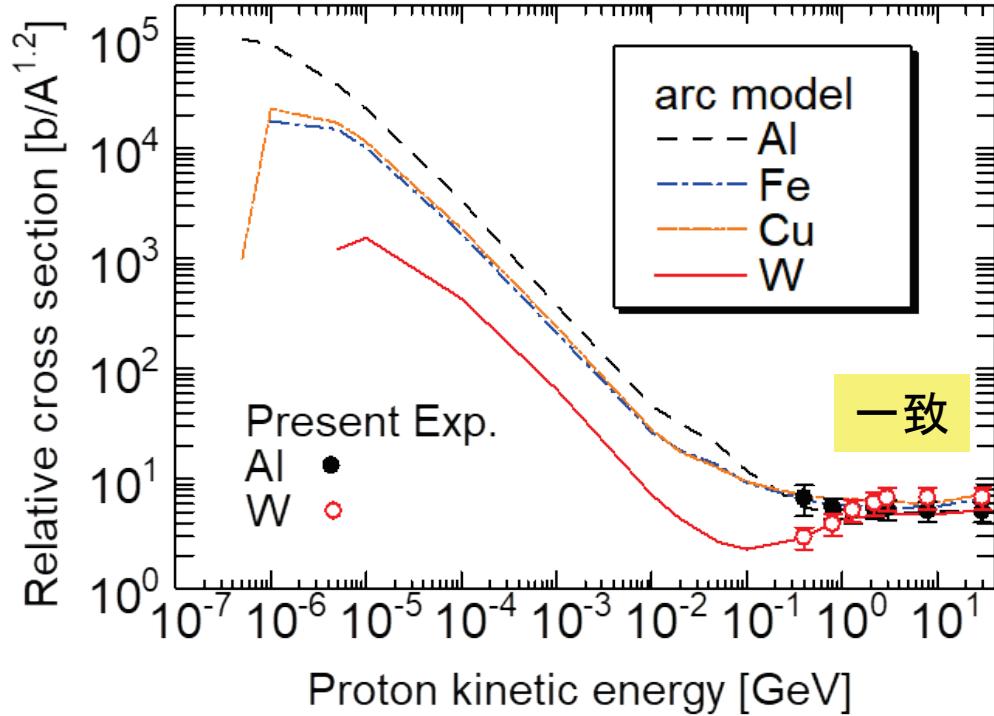


※弾き出しに寄与する二次粒子を評価



# 議論(2): 断面積の質量数依存性

## — 断面積 $\propto$ 質量数<sup>1.2</sup> と 断面積飽和の原因 —



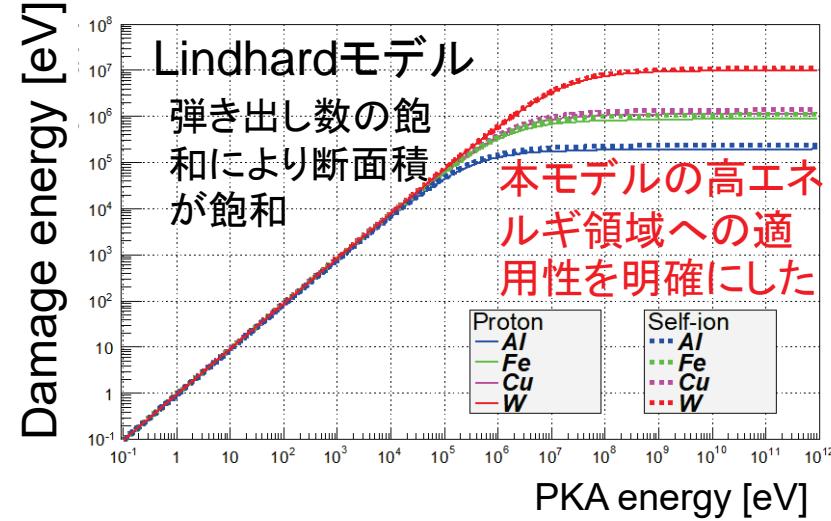
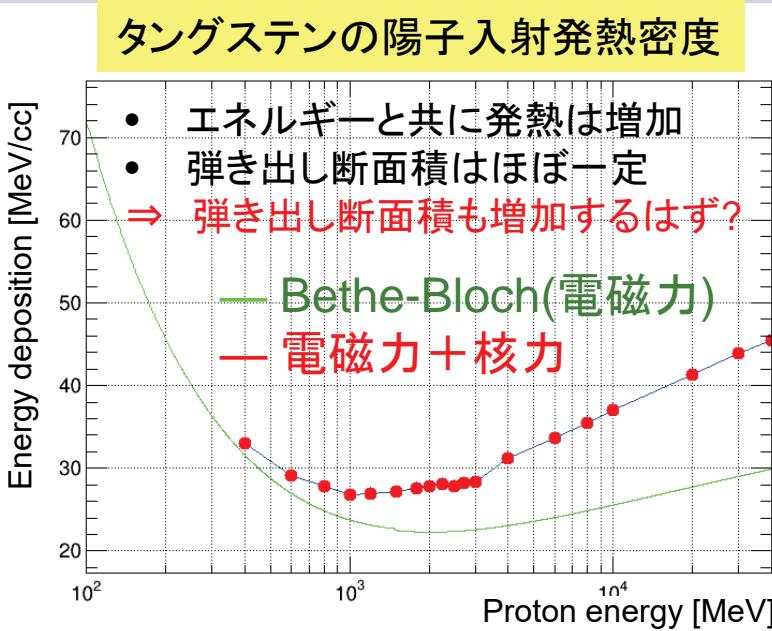
考察: 数GeV領域でA<sup>1.2</sup>則( $\propto A^{1.2}$ )の振舞い

### 【考察】 弹き出し数の質量依存

- 反応断面積  $A^{2/3}$
- 弾き出し数 (Lindhardモデル)より  $A^{1.6}$
- 放出エネルギー  $A^{-1}$
- 合計  $\sim A^{1.2}$

新たな知見

### 発熱密度の入射陽子エネルギー依存性



# まとめ

- 入射陽子エネルギー領域 (0.4 GeV~ 30 GeV) の標的・ビーム窓の損傷評価で重要な弾き出し断面積を取得した。鉄およびアルミなどの重要な材料の実験データを世界で初めて得た。
- 計算モデルとの比較検討
  - 既存のNRTモデルは実験を~3倍過大評価
  - arcモデルは実験とよい一致を示した。  
→ 弾き出し(dpa)評価にはarcモデルの適用が不可欠
  - 高エネルギー領域の弾き出しのメカニズムを明確にした。
- ADSの実現性や大強度陽子加速器施設の安全性向上に貢献
  - 原子炉・核融合炉の材料の損傷評価の精度向上
- 成果 論文 7 件、口頭発表 11 件
  - 原子力機構プレス発表： 2020年7月 、所内表彰(2020年9月)
  - 本研究は高い評価をいただき、原子力学会 論文賞 受賞の内定受理した(授賞式 本年3月17日)



# 昇温による損傷緩和の測定

- 照射後の試料をヒーターで20分間昇温し、再冷却を行い昇温による緩和を測定
- 100~200 MeV陽子及び中性子とほぼ同じ結果 (T<20 Kでは緩和は殆ど無い)

