

# 高エネルギー陽子照射による金属のはじき出し断面積の計算と検証実験

岩元洋介(JAEA/基礎工)、明午伸一郎、松田洋樹 (JAEA/J-PARC)  
吉田誠 (KEK/J-PARC)、義家敏正(京大複合研)

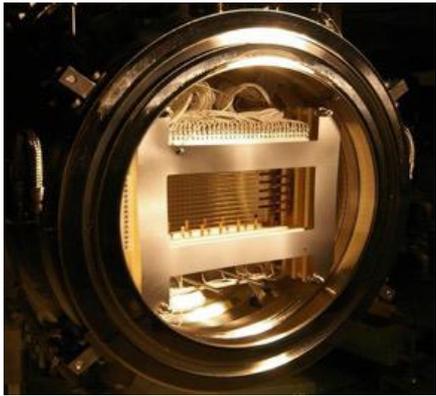
1. 背景
2. 最新モデルを用いたのはじき出し断面積の計算
3. はじき出し断面積の測定
4. まとめと今後の予定

本研究はJSPS科研費の助成を受けたものです。(25820450: 2013～2015年、16H04638: 2016～2018年、19H02652: 2019～2022年)

J-PARCにおける研究は文部科学省の原子力システム研究開発事業による委託業務として、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が実施した「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」による。

# 背景

100MeV以上の陽子照射環境下の加速器施設の材料の照射損傷の評価において、DPAが照射損傷の指標として使われている。



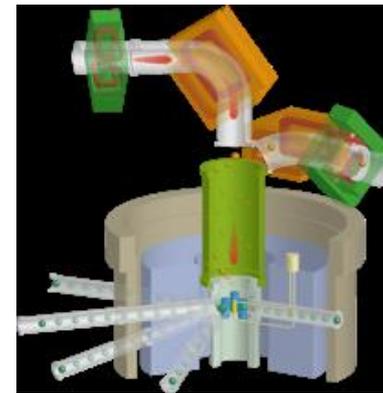
J-PARC MLFのビーム窓 (Al alloy)



ニュートリノ施設のビーム窓 (Ti alloy)



CERN LHC 超伝導磁石 (Nb alloy)



J-PARC MLFの2<sup>nd</sup> target 案 (W)

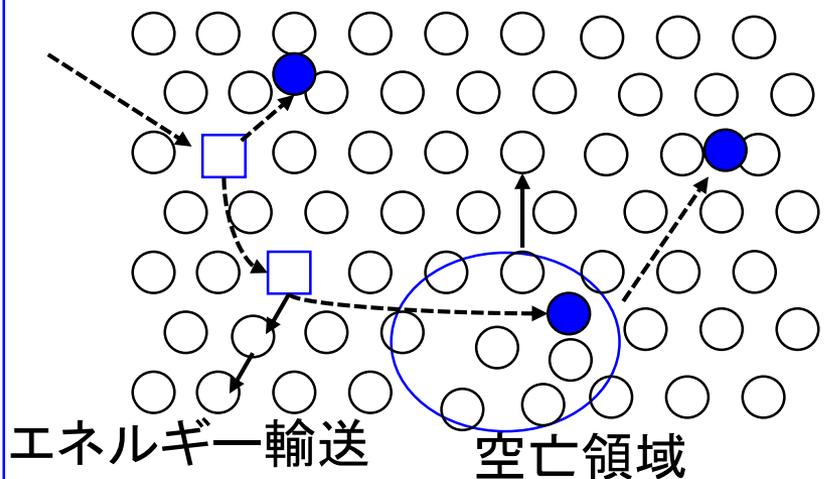
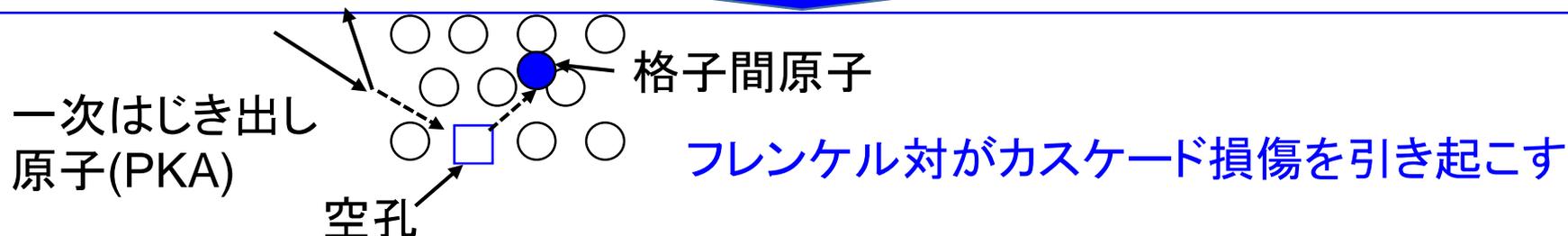
# 材料における微視的効果

DPA: 原子あたりの平均はじき出し数

$$\text{DPA} = \sigma_d \phi$$

$\sigma_d$ : はじき出し断面積 ( $\text{m}^2$ )

$\phi$ : 粒子フルエンス (particles/ $\text{m}^2$ )

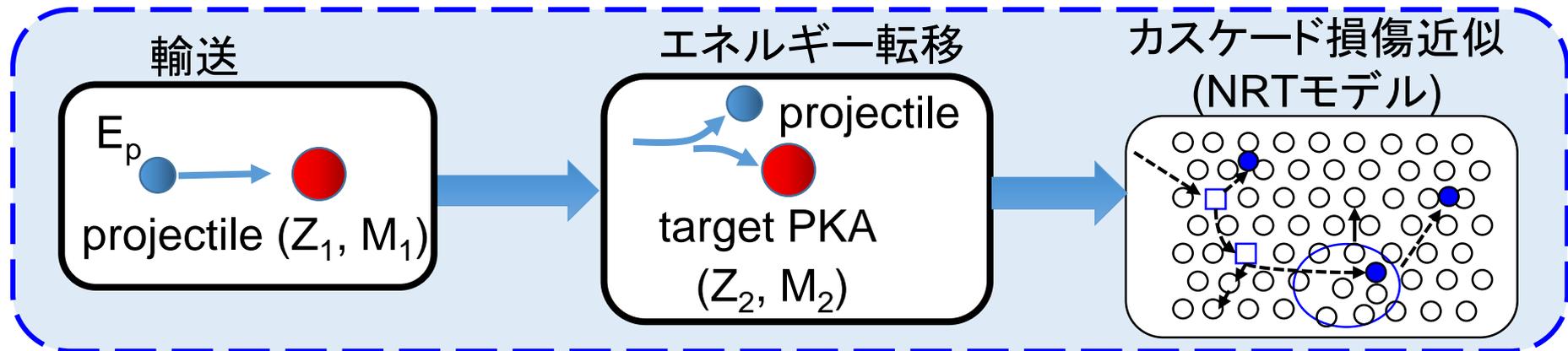


カスケード損傷は初期(数ピコ秒)に次々に起こる損傷効果のみを取り扱う

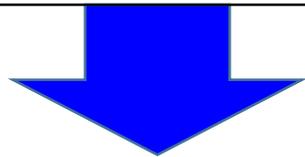
Long-rangの熱的な欠陥の移動は除く

SRIM (Transport of Ions in Material)

J.F. Ziegler, et al, see [www.srim.org](http://www.srim.org)



- 高エネルギー領域(数十MeV以上)の核反応を取り扱わない
- 核反応生成物によるPKAを生成しない

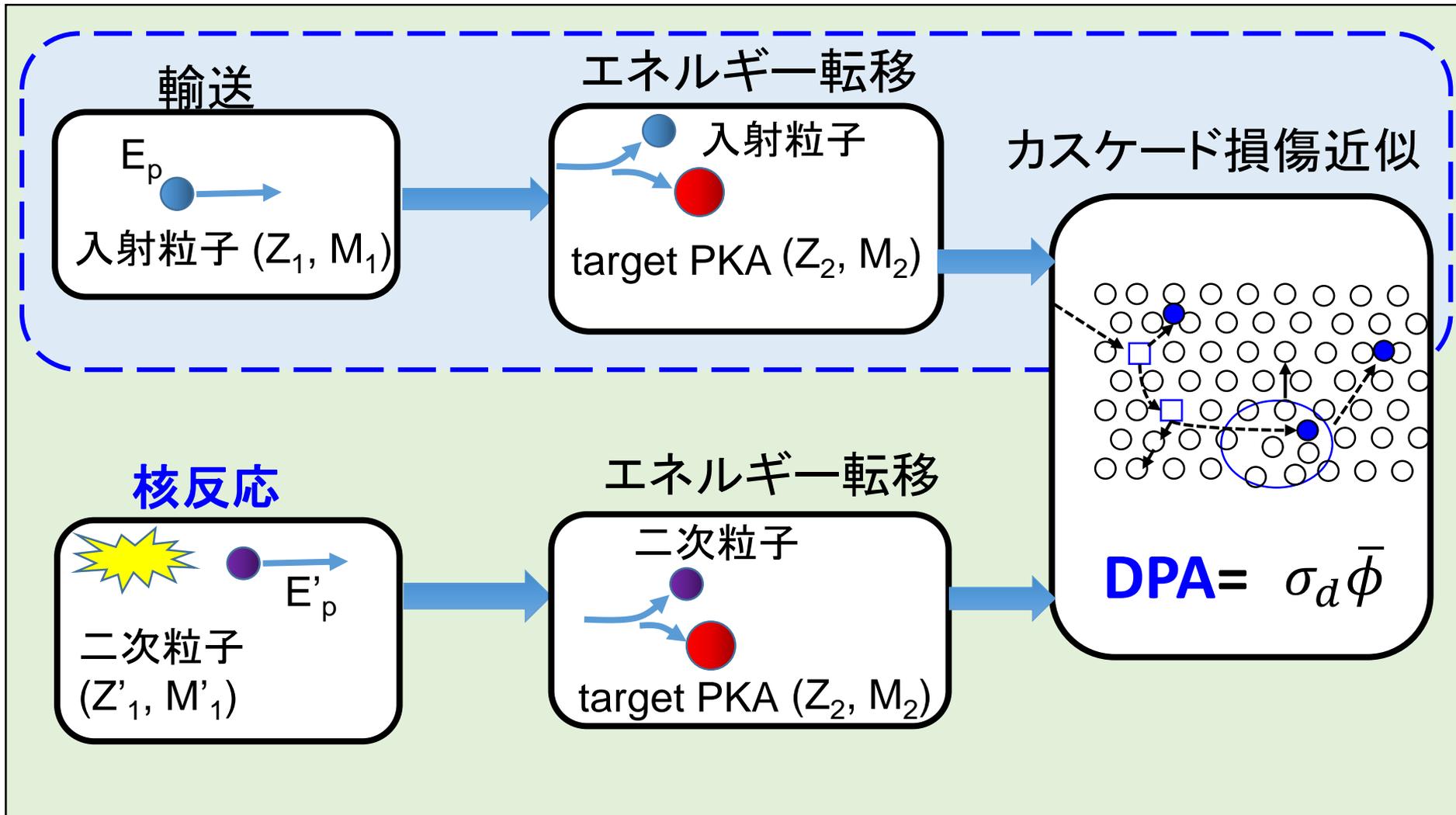


高エネルギー領域に拡張

モンテカルロ粒子輸送計算コード

例: **PHITS**, MARS, FLUKA, MCNP

# PHITSの放射線損傷計算手法



# 従来モデル(NRT)によるはじき出し数

$N_{\text{NRT}}$ : NRTモデルによる原子はじき出し数

40年以上、標準の導出手法として採用

$$N_{\text{NRT}} = \frac{0.8}{2E_D} E_d$$

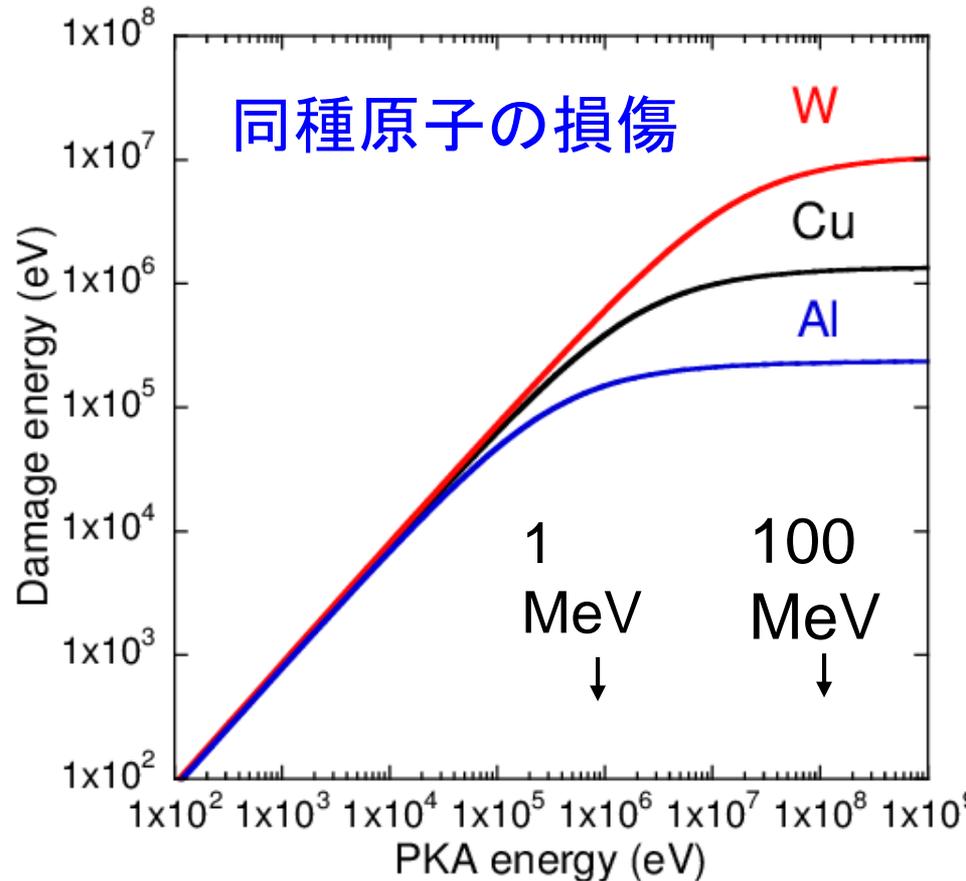
← 損傷エネルギー  
← はじき出ししきいエネルギー

$$E_d = \frac{1}{1 + kg} E_p$$

← PKAエネルギー

核的損傷による損傷エネルギー  
材料中のカスケード内で成立

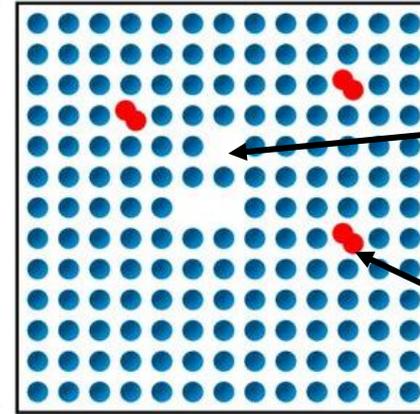
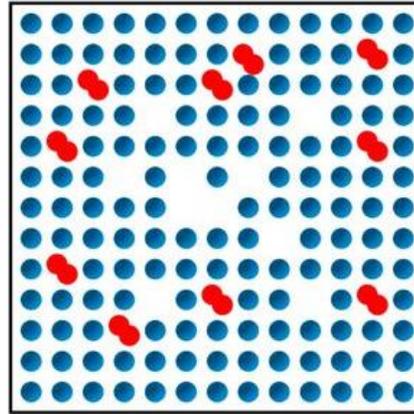
衝突は弾性的とし、核的損失と  
電子的損失は分離できると仮定



# Athermal recombination correctionを用いたPHITS計算

## 分子動力学研究

Figure 2 : K. Nordlund et al.,  
Nature Comm. 9 (2018) 1084.



Vacancy

Interstitial atom

NRT damage (従来) 実際の損傷生成

1keVの損傷エネルギーを材料に与えたときの損傷の概念図

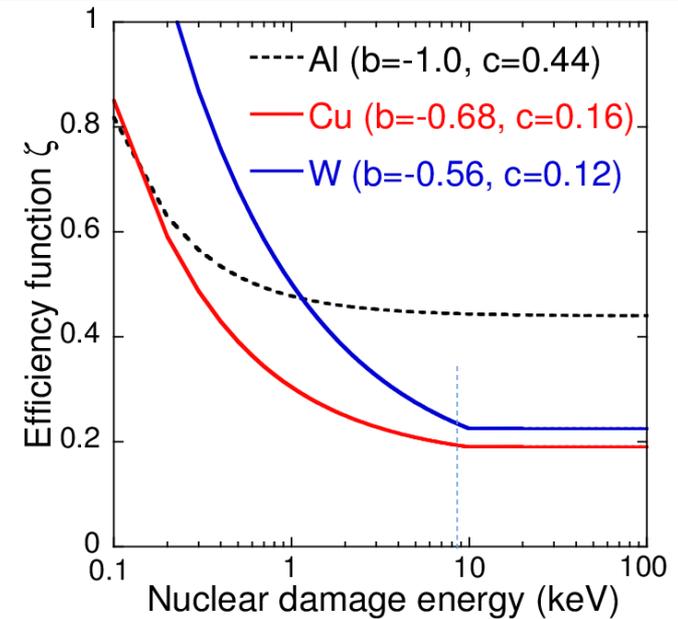
$$N_{\text{arc}} = \frac{0.8}{2E_d} T_d \zeta_{\text{arc}}(E_d)$$

Efficiency function based on tabulated parameters

$$\zeta_{\text{arc}} = \frac{1 - c}{(2E_d/0.8)^b} T_d^b + c$$

Cu:  $b = -0.68$ ,  $c = 0.16$

W:  $b = -0.56$ ,  $c = 0.12$

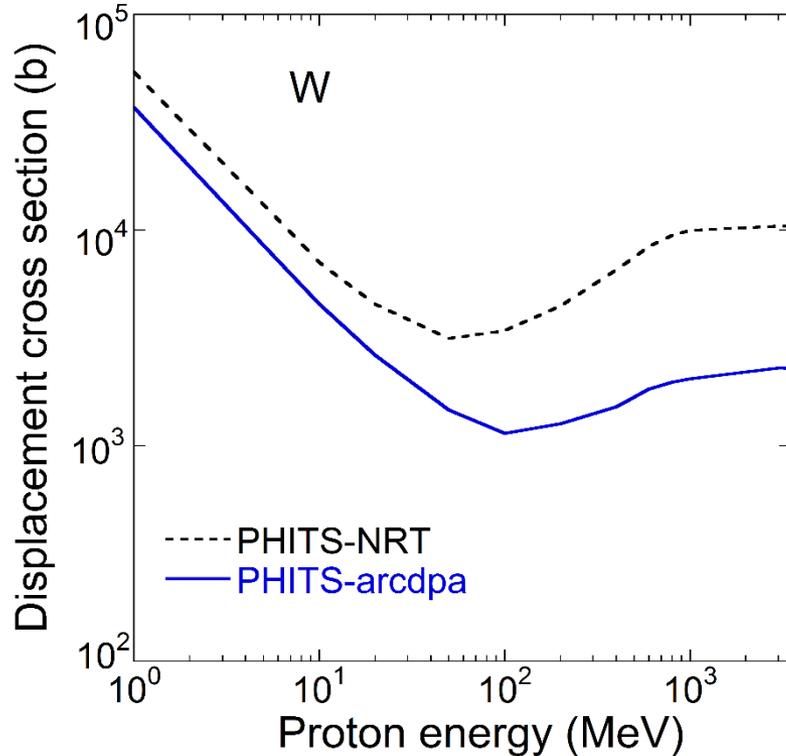


欠陥生成効率

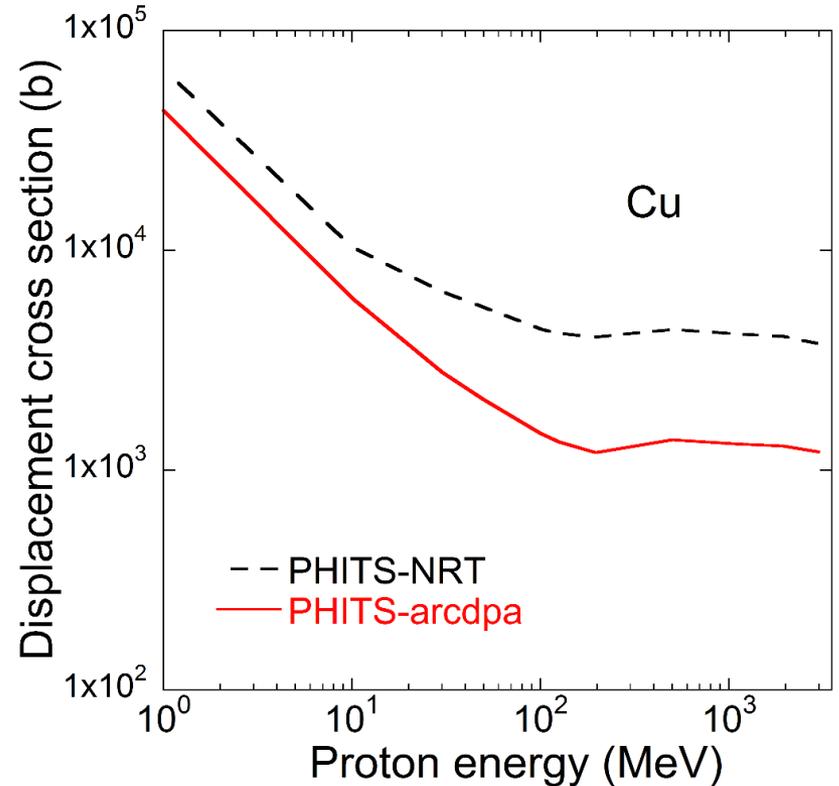
# NRT-dpaとarc-dpaの計算値

$$\sigma_{\text{NRT or arc}} = \int_{t_d}^{t_{\text{max}}} d\sigma_{\text{sc}}/dt \cdot N_{\text{NRT}} dt$$

$d\sigma_{\text{sc}}/dt$  : クーロン散乱断面積



陽子+タングステンのはじき出し断面積



陽子+銅のはじき出し断面積

arc-dpa(新規) はNRT(標準)に比べ約3倍小さい

# 研究の背景及び課題（検証実験）

【従来】加速器領域（十MeV以上）は、BNL実験（1.1, 1.9GeV陽子+銅）のみ。

【はじき出し断面積の実験値導出方法】

極低温（4K程度）の照射欠陥に伴う電気抵抗増加とビームフルエンスから導出

$$\sigma_{\text{exp}} = \frac{1}{\rho_{FP}} \frac{\Delta\rho_{\text{metal}}}{\phi}$$

**損傷率**

$\Delta\rho_{\text{metal}}$ : 電気抵抗率増加 ( $\Omega\text{m}$ )

$\phi$ : ビームフルエンス ( $1/\text{m}^2$ )

$\rho_{FP}$ : Frenkel-pair 電気抵抗率 ( $\Omega\text{m}$ )

*J. Nucl. Mater.* 49 (1973/74) 161.

電気抵抗率増加 = フレンケル対あたりの電気抵抗率の和

【課題】

取り扱いが煩雑な冷媒である液体ヘリウム、液体窒素を利用（装置の大型化）  
→ 利用可能な施設が限定（様々な放射線種やエネルギーのデータ取得で問題）

様々な施設で実験可能なはじき出し断面積の測定手法を開発し、  
100 MeV – 30 GeV陽子に対する測定を実施。

# これまでののはじき出し断面積測定

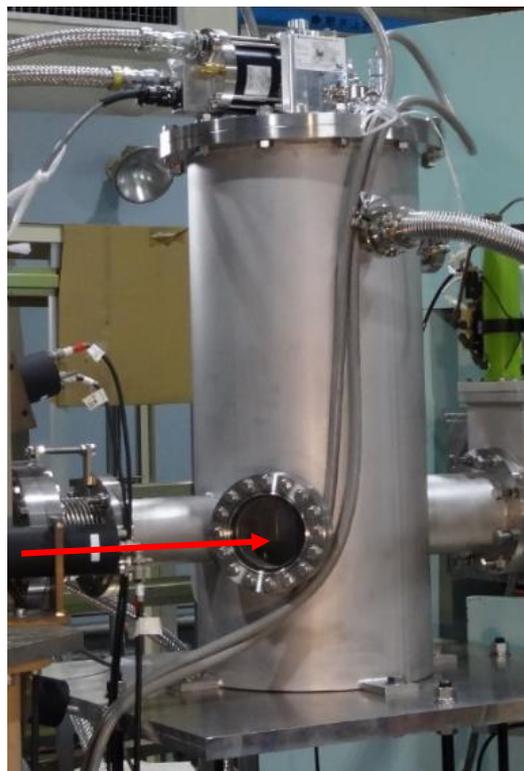


京大複合研 FFAG施設

125 MeV p + Cu

Y. Iwamoto et al., J. Nucl. Mater.,  
458, (2015) 369-375.

前回(2017年)に報告

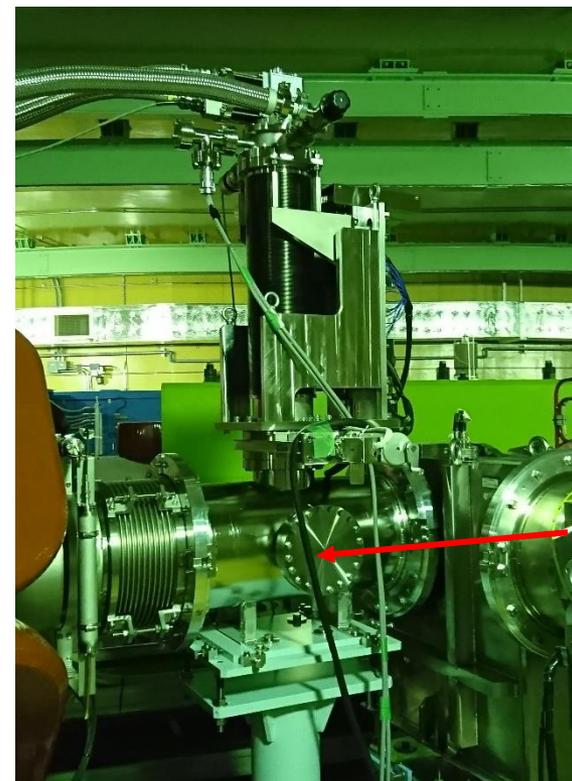


阪大RCNP

200-400 MeV p + Cu,  
Al, W

Y. Iwamoto et al., J. Nucl. Mater.,  
508, (2018) 195-202.

今回報告



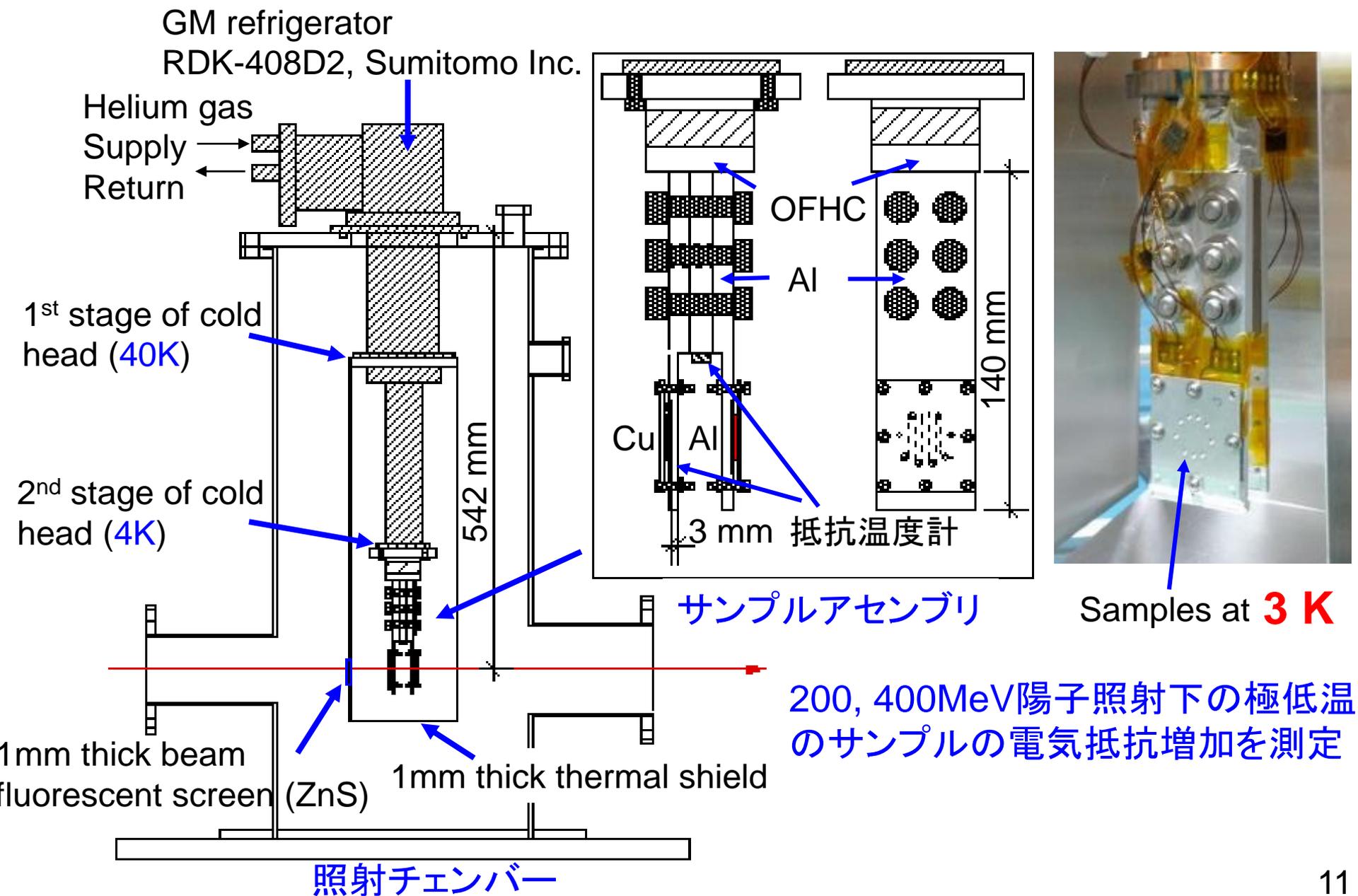
J-PARC

0.4-30 GeV p + Al, Fe,  
Cu, W

明午さん、松田さんが中心

今回報告

# RCNPにおける照射チェンバーとターゲットアセンブリ



# J-PARC



# J-PARCにおける30 GeV陽子を用いた測定

● H29年度:

- 原子核素粒子共同利用実験 審査委員会(PAC)の審議を開始した
- 実験に用いるチェンバーの製作を開始した。

● H30年度:

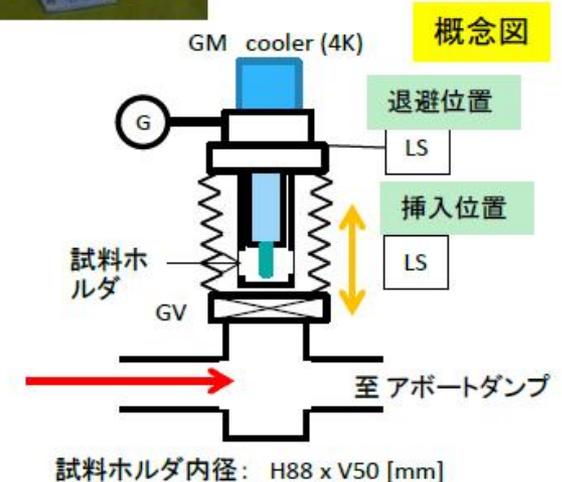
- H31年1月に開催されたPACで実験が承認された。
- 低温試験・真空試験を実施し、冷却効率が優れた試料の信号配線の方法を見出した。
- 加速器グループと調整し、実験装置設置に関する詳細を決定した。

● H31年度:

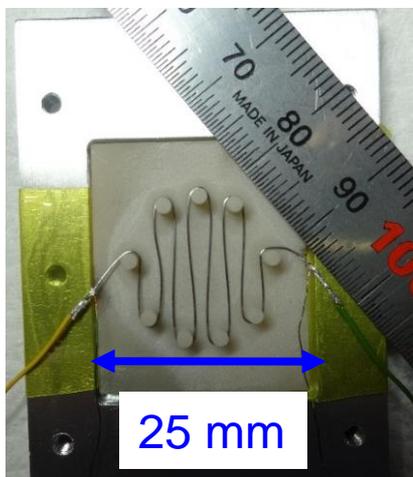
- 実験用チェンバー架台を製作し、据付けが完了した後に、断面積を測定を開始した。



MRアボートダンプ  
ラインに設置した断  
面積測定用極低温  
真空チェンバー

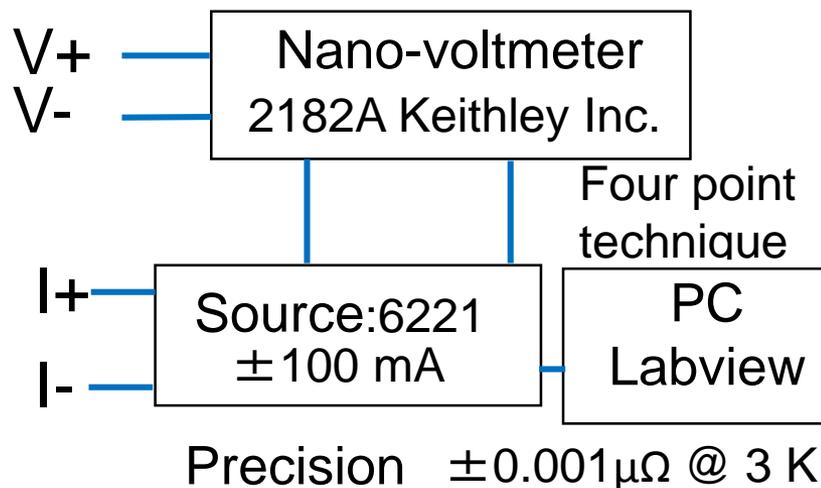


# サンプル

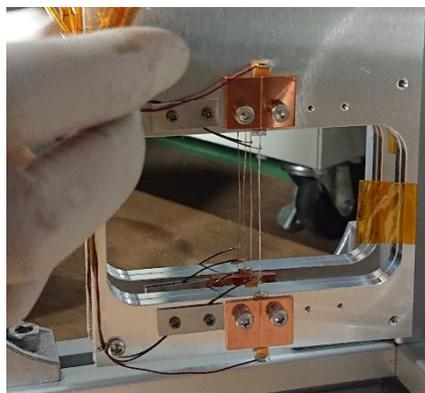


直径125  $\mu\text{m}$  のワイヤ  
サンプル

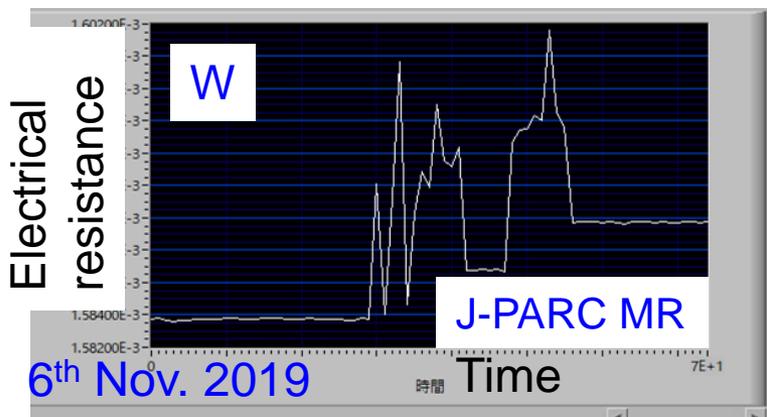
RCNPやFFAGで使用



ビームロスを極力減らす。



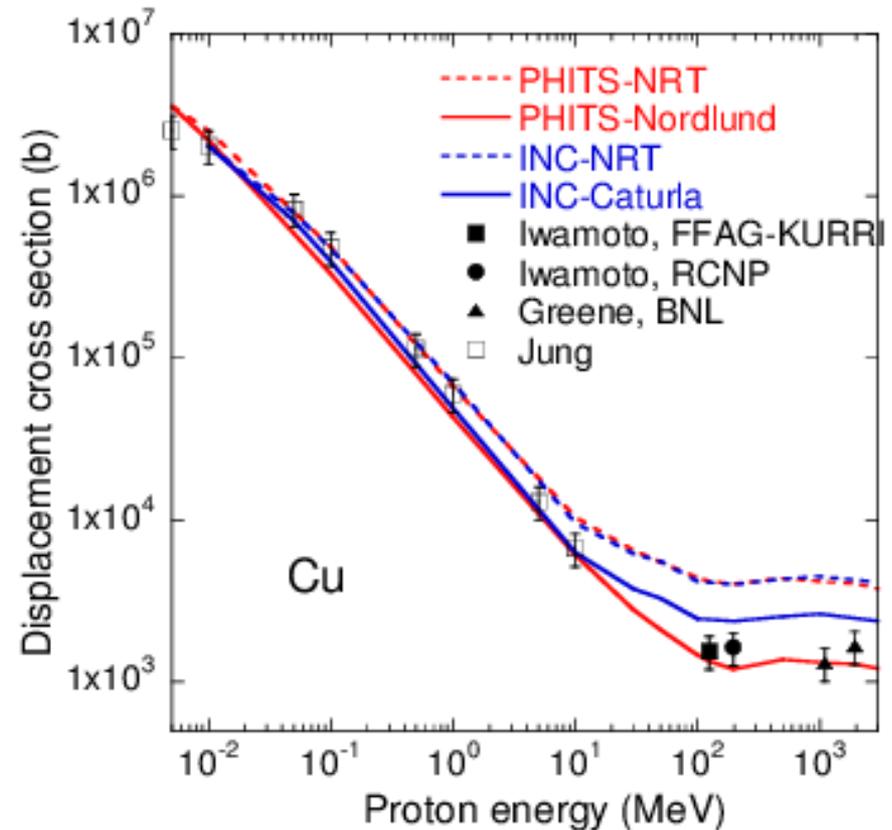
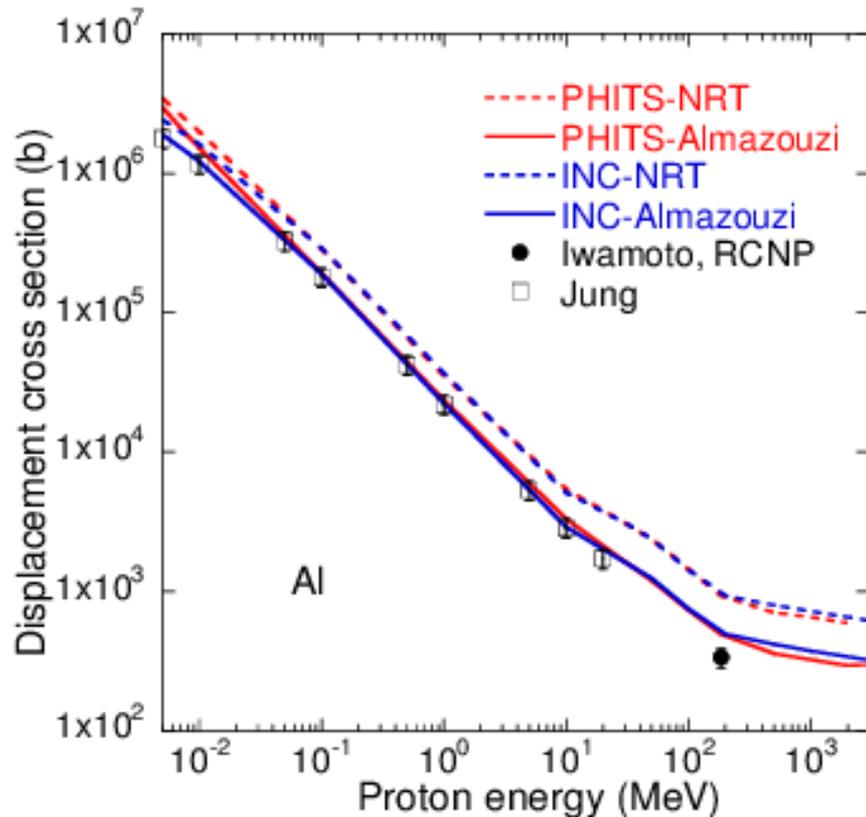
4ワイヤサンプル  
(Al, Fe, Cu, W)



欠陥に伴う電気抵抗増加  
の測定に成功

J-PARCにおける30 GeV陽子照射のタングステンの電気抵抗変化

# 実験値と計算値の比較



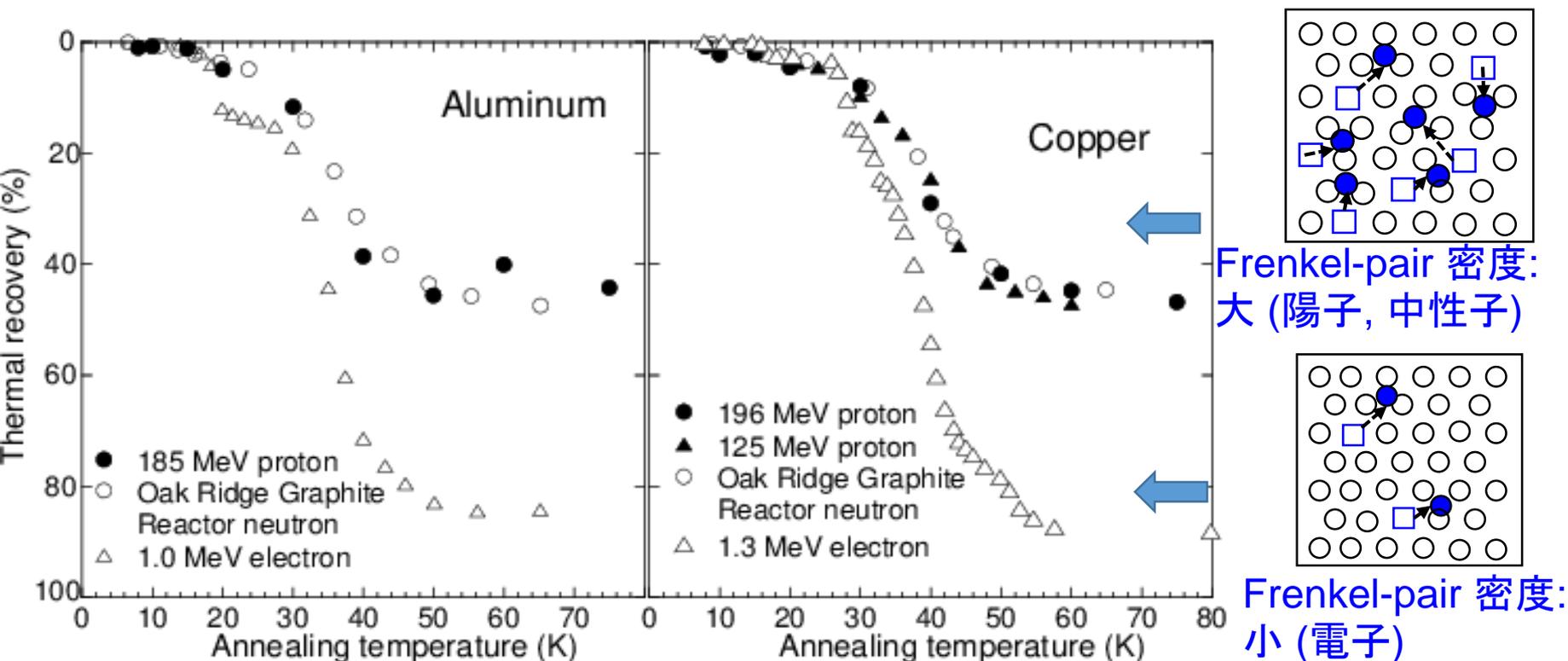
広いエネルギー範囲にわたりarc-dpaの計算値が実験値を良く再現  
\* J-PARCの実験値は未発表のため省略

# 照射後のアニールによる欠陥回復測定

照射後、極低温(4K)のサンプルを、各温度で電気ヒーターにより10分加熱し、4Kに戻したときの電気抵抗を測定

$$\text{熱回復} = 1 - \frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_0} (\%)$$

$\Delta\rho$  ← 残留している放射線照射による電気抵抗増加  
 $\Delta\rho_0$  ← 初期の放射線照射による電気抵抗増加



# まとめと今後の予定

---

## 【まとめ】

- 京大炉FFAG, RCNP, J-PARCにおいて0.1-30 GeV陽子照射によるAl, Fe, Cu, Wのはじき出し断面積測定をおこなった
- 広いエネルギー範囲にわたりarc-dpaの計算値が実験値を良く再現

## 【今後の予定】

- 米国フェルミ国立加速器研究所において、120 GeV陽子に対する測定を開始
- Arcモデルを用いた様々な分野(原子炉、核融合、重イオン照射)におけるDPA計算の再評価