

2024年度核融合科学研究所 スクーリング・ネットワーキング事業
プラズマ・イオンビームの基礎と応用に関するスクール

核種変換による ${}^7\text{Li}$ ドーパダイヤモンドの製作

○三宅泰斗¹, 渡邊幸志^{1,2}, 奥野広樹¹

¹理研 仁科加速器科学研究センター

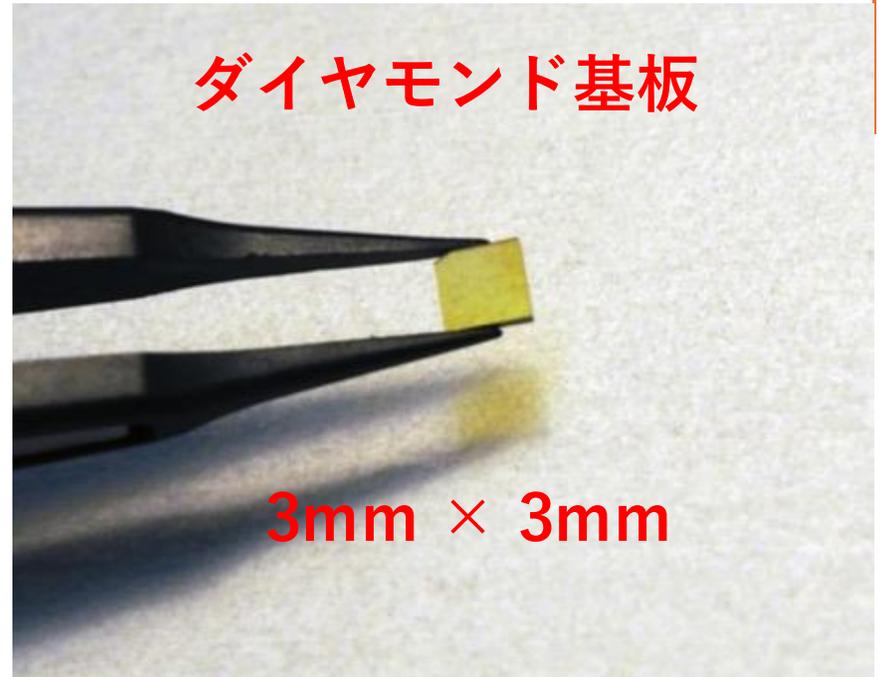
²産総研 デバイス技術研究部門

2025年2月21日



Contents

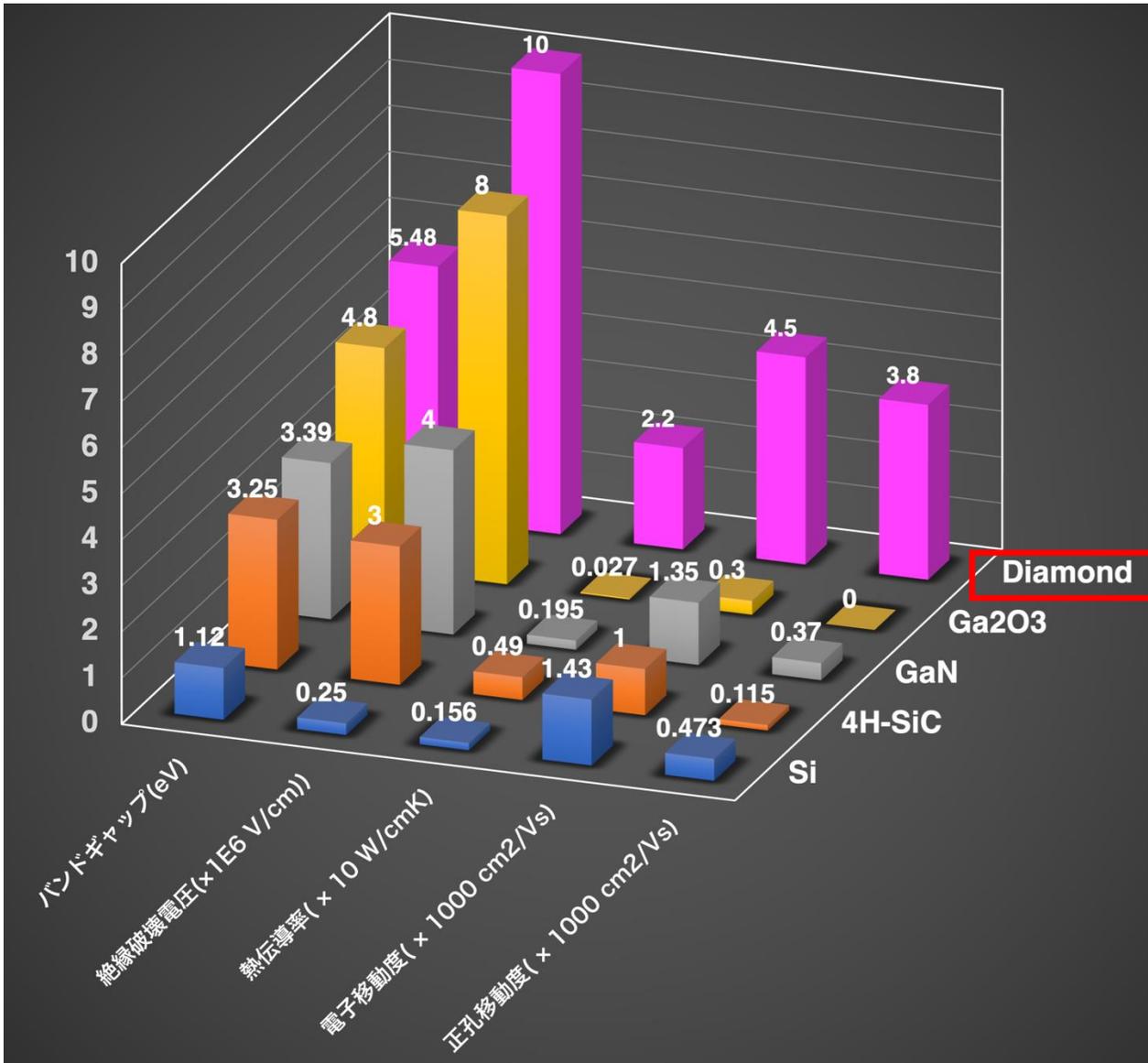
- 研究の背景: 半導体としてのダイヤモンドの特徴
- 研究概要
- その場核変換とは?
- 実験プロセス
- ^7Be イオン注入
- 今後の予定



ダイヤモンド基板

3mm × 3mm

研究の背景: 半導体としてのダイヤモンドの特徴



◆ **ダイヤモンド半導体**は優れた物性から、次世代の
パワー半導体と期待される酸化ガリウム(Ga₂O₃)を
さらに凌駕する性能が期待される。

- ✓パワー・高周波デバイス
- ✓発光デバイス
- ✓表面弾性波デバイス
- ✓電子エミッター
- ✓バイオセンサー
- ✓量子磁気センサー
- ✓量子コンピューター
- ✓量子通信デバイス
- ⋮
- ⋮

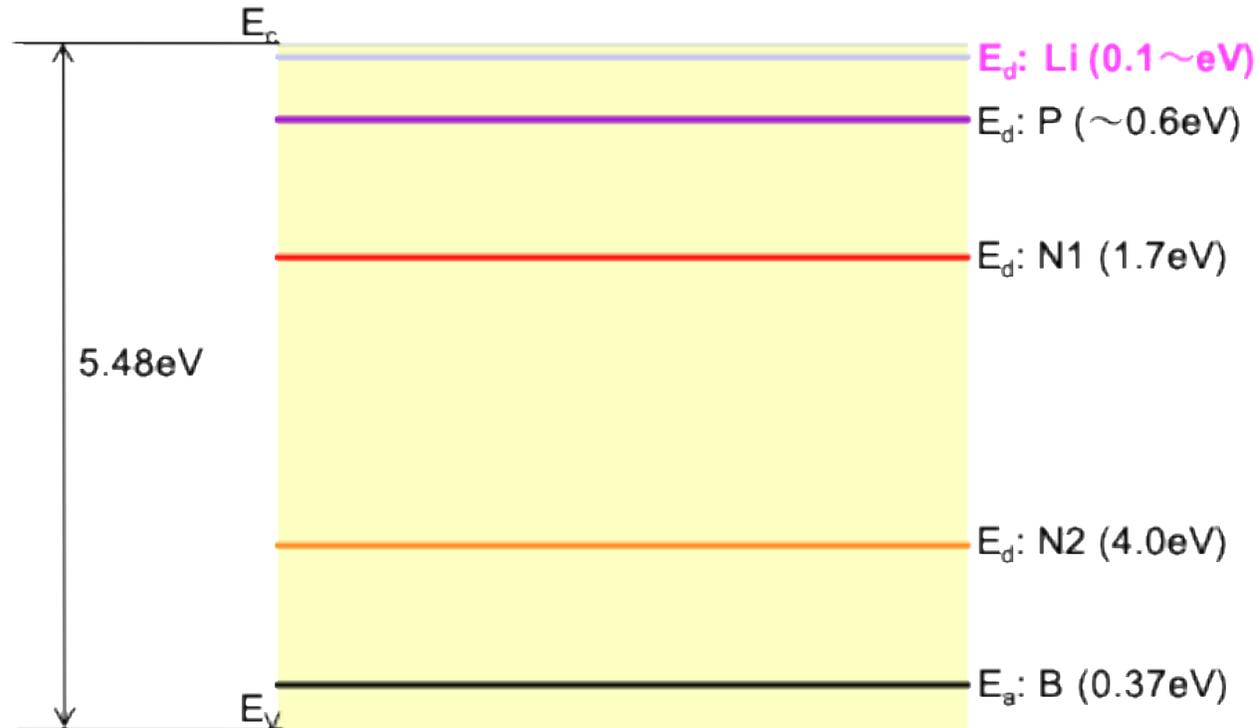
◆ デバイスとして応用するためには、

p型半導体

n型半導体

両方が必要となる。

ダイヤモンド半導体のキャリアとエネルギー準位



- p型半導体はBをドーピングして実現
- n型半導体はPをドーピングして実現
- ドナー準位が深いため、**低抵抗のために高温にする必要**
- **Liのドナー順位は0.1 eV程度と予想されている** [1]
- 室温でも低抵抗になると期待される

◆ Liドーピングn型半導体ダイヤモンドの製作には技術的な困難がある。

- 室温で高いキャリア濃度が必要
- ドーパントであるLiはダイヤモンド内で拡散しにくい [2]
- 高いエネルギーでLiをインプラントすると、ダイヤモンドの結晶構造が破損される。

[1] Phys. Rev. Lett. 66 (1991) 2010-2013.

[2] Surface & Coating Technology 307 (2016) 236-242.

研究概要

特開 2022-66822. 2022-04-14.

核種変換による新案

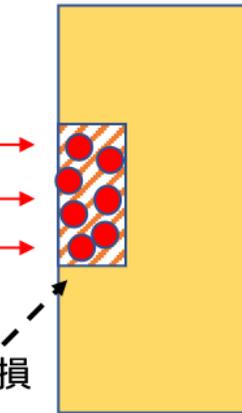
加速器で ${}^7\text{Be}$ を作成・イオン注入

熱拡散により ${}^7\text{Be}$ を
ダイヤモンド中に拡散

格子欠損のない
 Li ドーパダイヤモンドの完成

${}^7\text{Be}$ を表層に
イオン注入
 $\sim 30\text{keV}$

${}^7\text{Be}$
照射による欠損



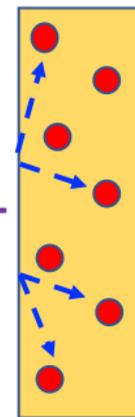
ダイヤモンド基板

加熱処理



欠損部を除去

熱拡散



電子捕獲反応
(電離放射線が発生しない)

${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$
(半減期 53 日)

“その場”核変換



${}^7\text{Li}$

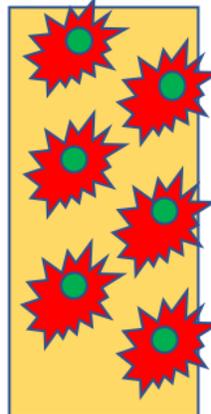


従来法の一例

${}^7\text{Li}$ をダイヤモンドにイオン注入

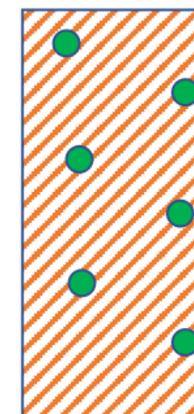
$\sim \text{MeV}$

${}^7\text{Li}$



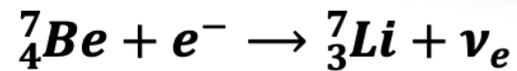
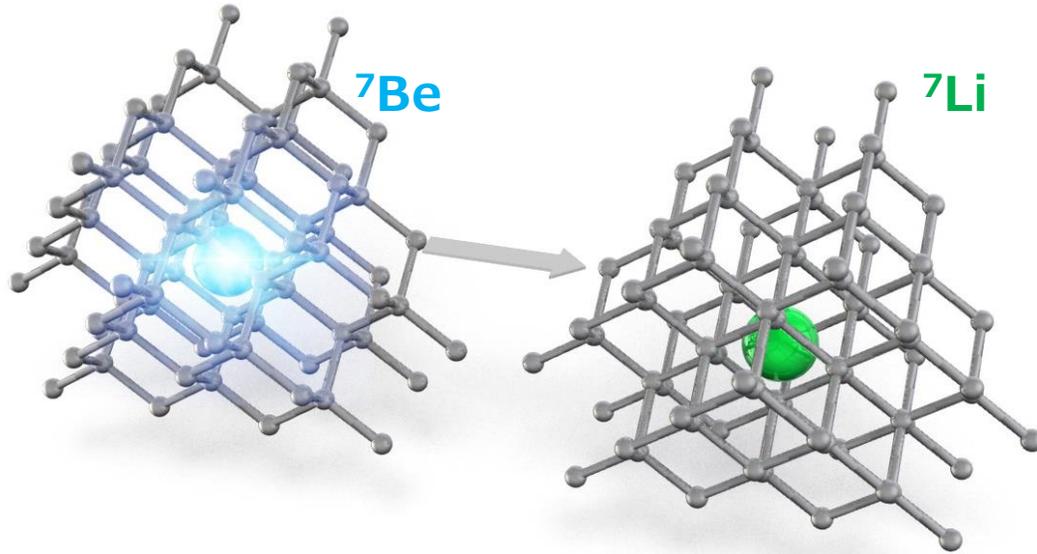
数MeVの高いエネルギーで注入すると、
格子欠損を起こしてしまう

${}^7\text{Li}$ ドーパダイヤモンドの完成(格子欠損あり)



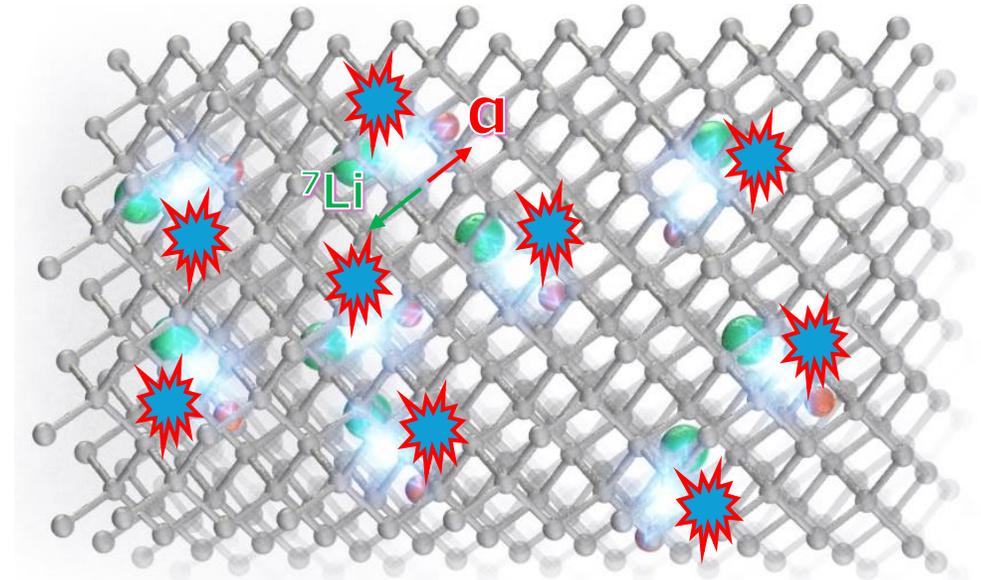
その場核変換とは？

“その場”核変換



- “その場”核変換とは、軌道電子捕獲反応のこと
- 電子が原子核に取り込まれ、原子核内の陽子と反応して中性子となり、電子ニュートリノが放出される。
- 外部に**格子を壊すような電離放射線を放出しない**・反跳による原子の移動はない。

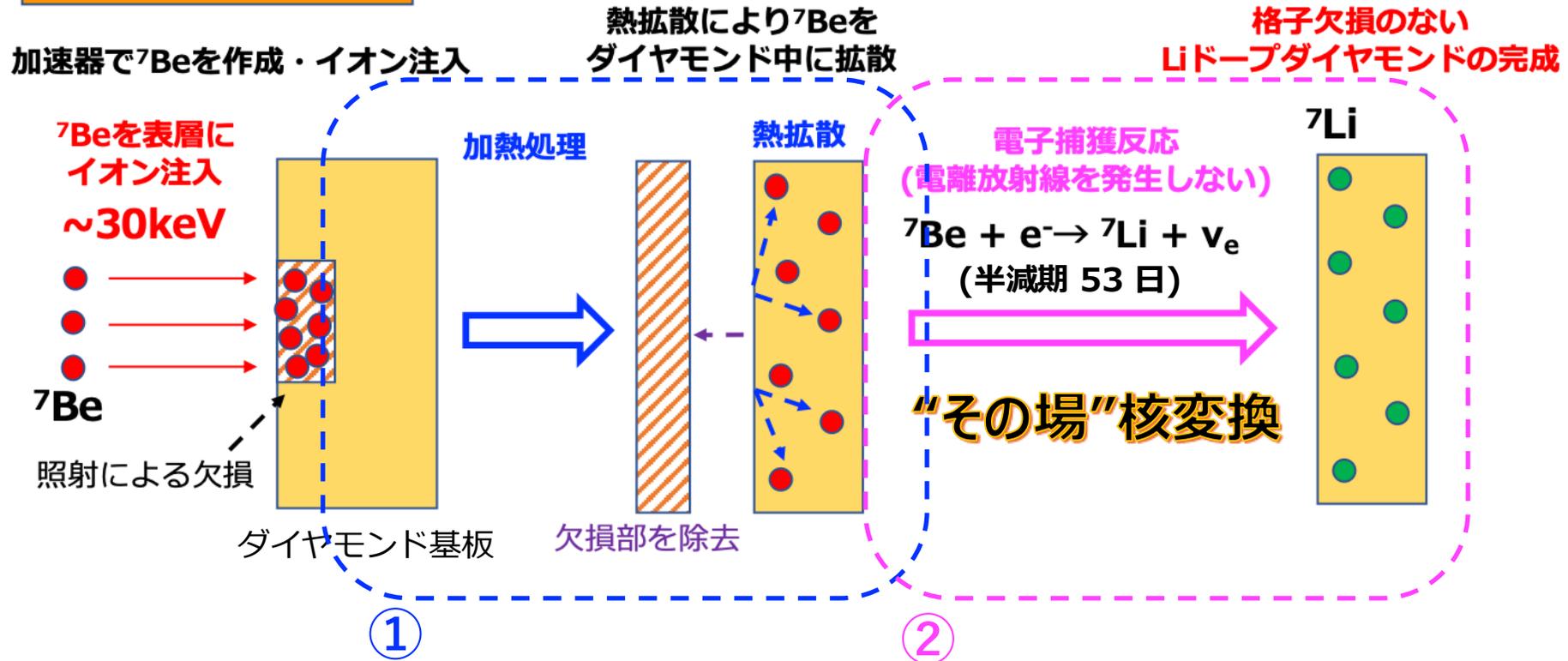
α (アルファ)崩壊による核変換



- 例えば、 α 崩壊による核変換の場合、数MeVのエネルギーを持つ α 粒子が放出される。 α 粒子放出の反跳により、元の原子自体も移動する。
- 格子の結合エネルギーは数eV程度なので、 α 線や反跳により**格子が欠損してしまう**。

研究の目的

核種変換による新案



- ① Beが熱拡散するか → 安定同位体Be-9によるコールドテスト
- ② Be-7をイオン注入できるか → Be-7のイオン注入

※基板の特性評価は産総研で担当

実験プロセス

^9Be イオン注入

SIMS分析

RTA

SIMS分析

特性評価

⋮

^7Be イオン注入

RTA

γ 線測定

ホール効果測定

⋮

^9Be によるコールドテスト

- イオン注入方法・条件の検討(注入エネルギー, ドーズ量等)
- 加熱処理(Rapid Thermal Annealing処理)条件の検討(温度, 時間, 雰囲気ガス等)
- イオン注入ダイヤモンドの特性評価方法の検討(CL測定, TEM分析, XPS分析等)
- Beのダイヤモンド中の熱拡散の調査

^7Be によるホットテスト

- ^7Be 試料の作成方法の検討
- ^7Be のイオン注入
- γ 線測定
- ホール効果測定装置の構築
- 電極形成

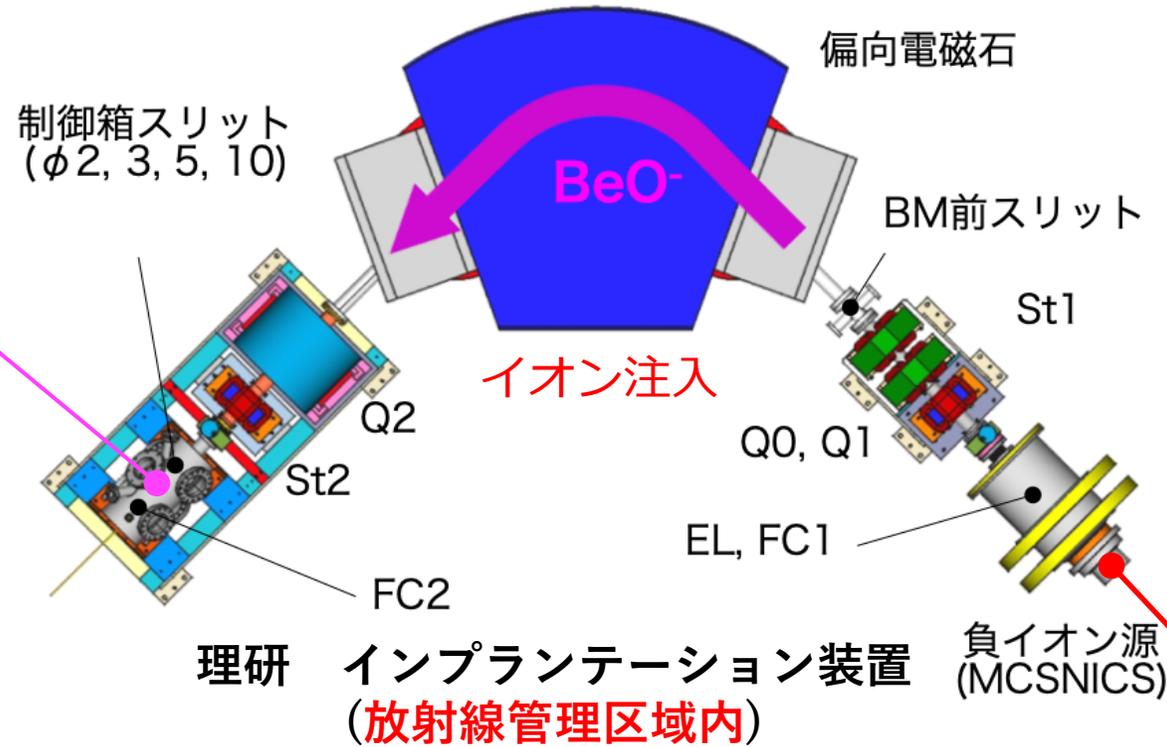
放射線管理区域内での作業



ダイヤモンド基板へのBeのイオン注入



試料ホルダー (Ti製)



硝酸ベリリウム溶液



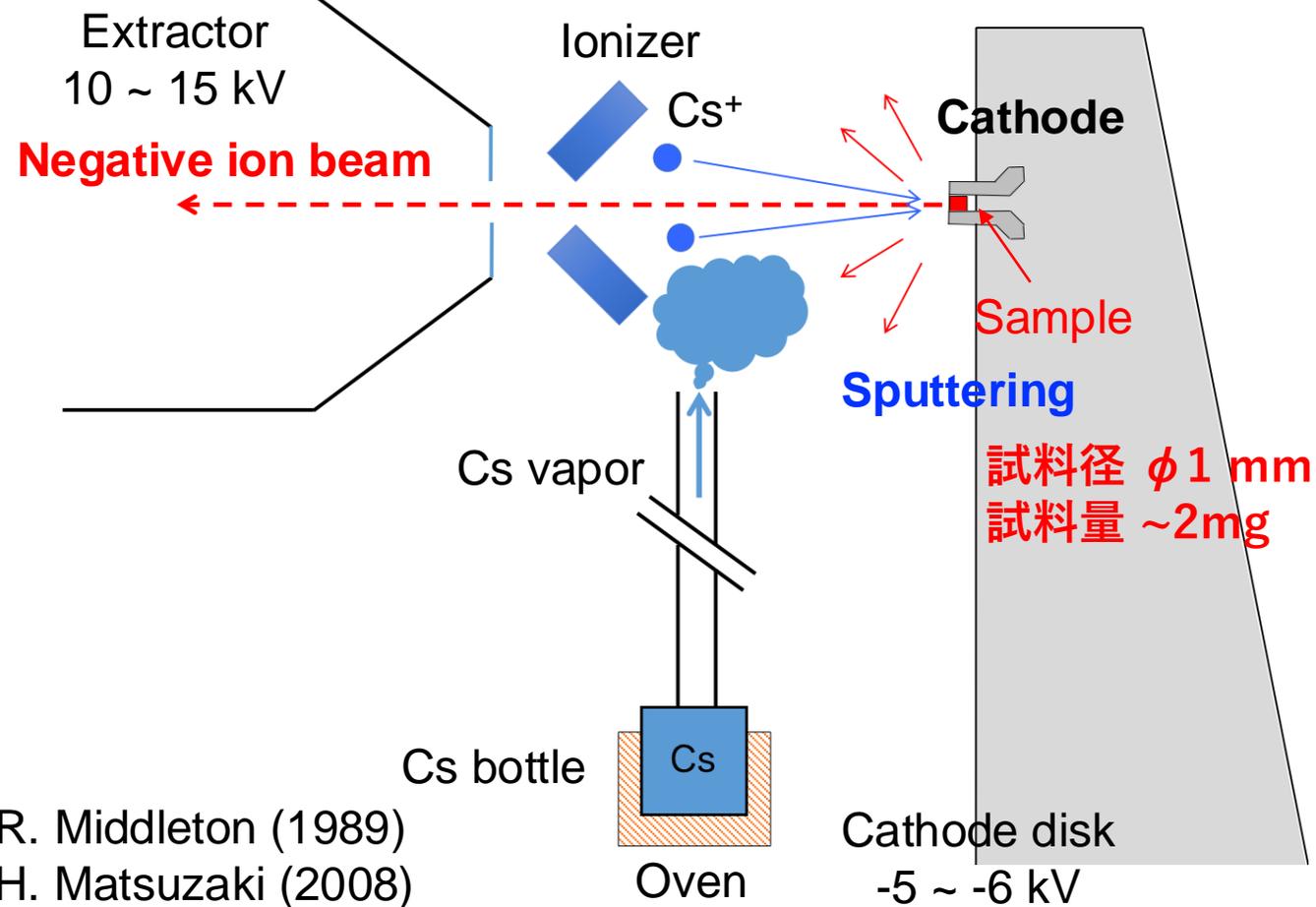
蒸発乾固・焼成



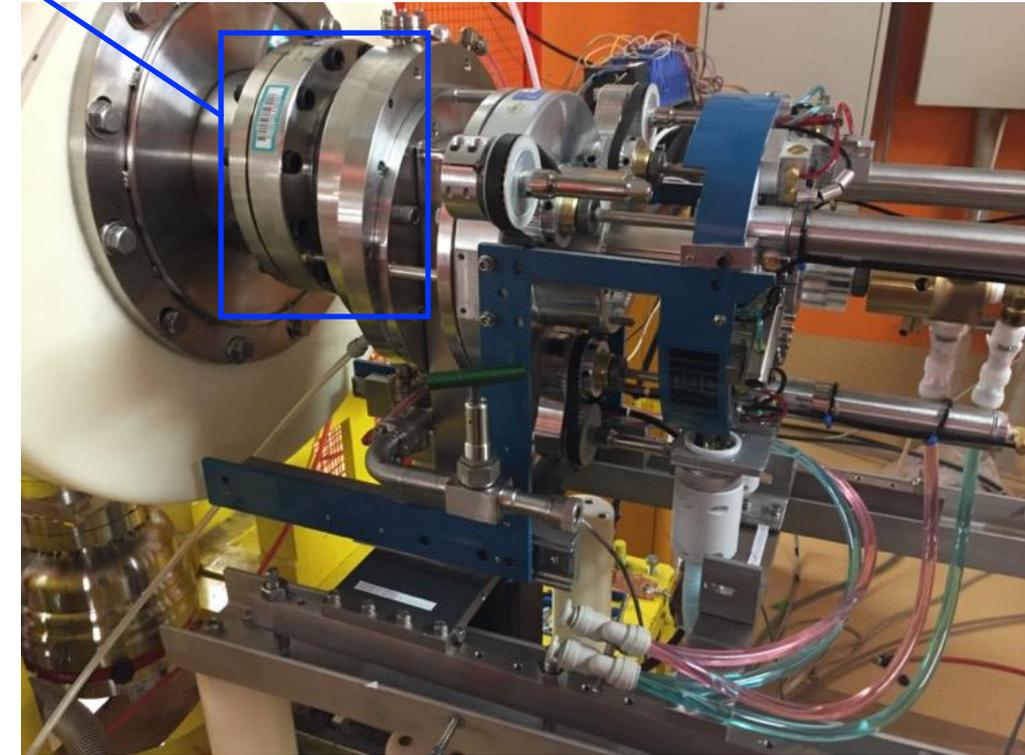
BeO試料 1mg~

- 装置を放射線管理区域内に構築
- 硝酸ベリリウム溶液から酸化ベリリウム(BeO)の試料を作成
- インプランテーション装置により、BeO⁻イオンをダイヤモンド試料へイオン注入(φ3 mmのコリメータ使用)
- 加速エネルギー 20 keV程度
- ドーズ量 $10^{13} - 10^{17}$ ions/cm² (⁹Be)
- 非密封の⁷Beの使用許可を取得

Csスパッター型負イオン源における負イオン生成プロセス



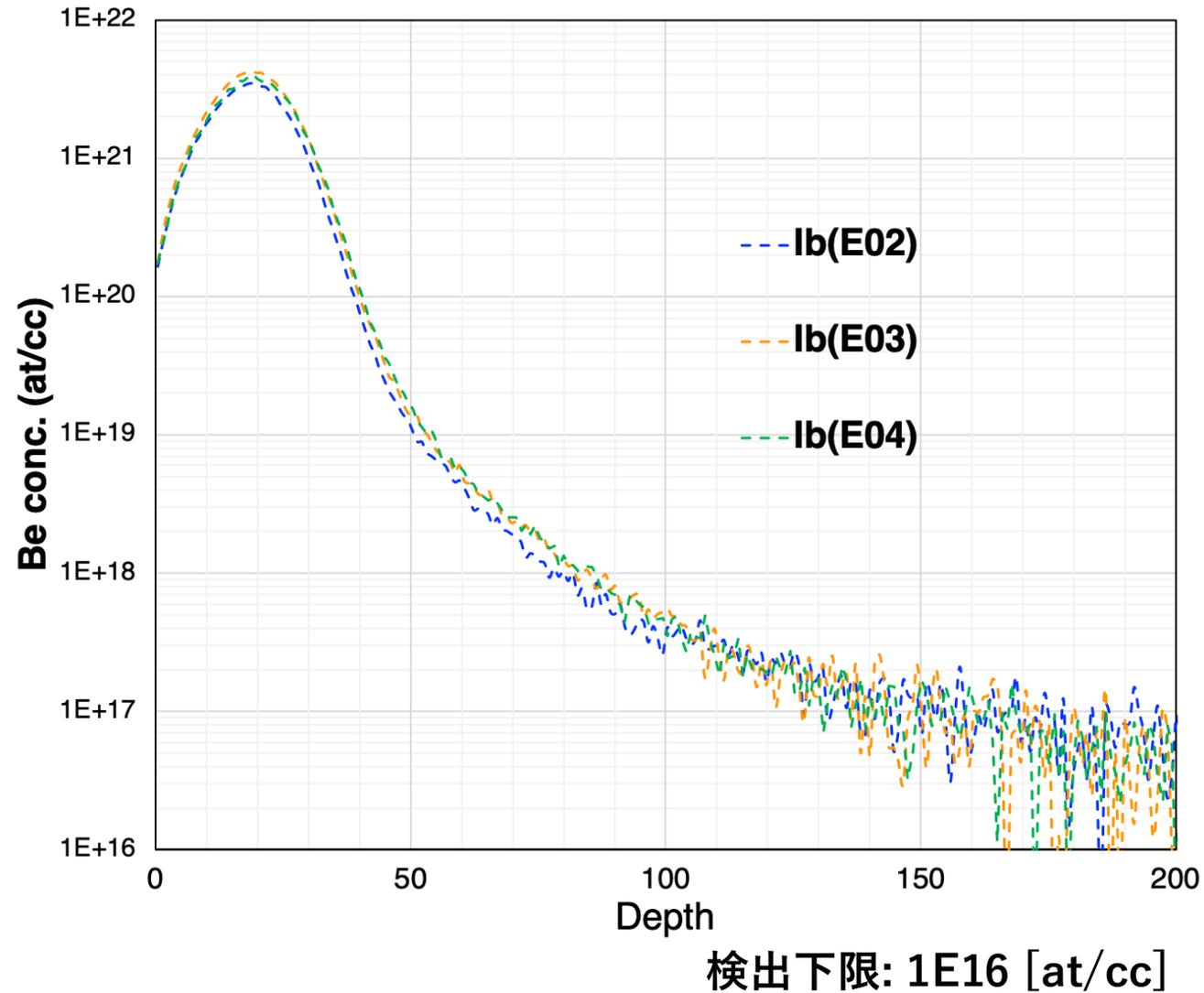
Negative ion source using Cs sputtering (MCSNICS)



R. Middleton (1989)
H. Matsuzaki (2008)

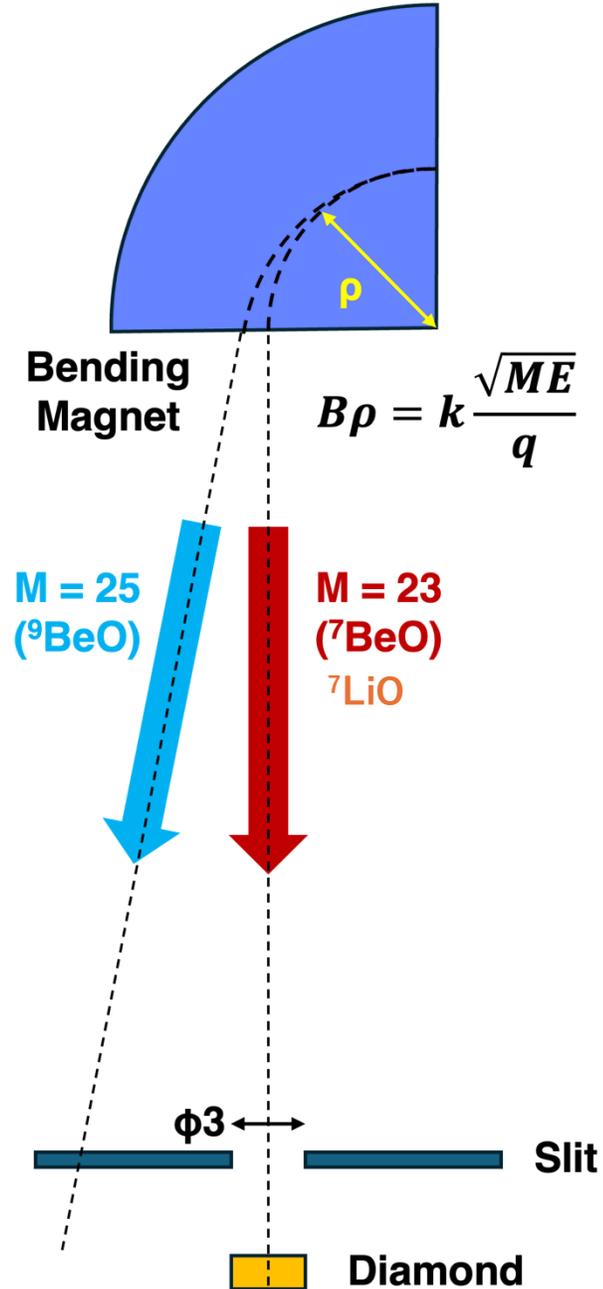
- 加速器質量分析(AMS)等でも使用されるCsスパッター型負イオン源
- 1. CsオーブンでCsが蒸気化 → アイオナイザーでCs⁺へ熱イオン化
- 2. 熱イオン化したCsイオンを試料表面に照射(スパッタリング) → 試料負イオンが生成・引き出し

SIMS分析結果の一例① イオン注入の再現性

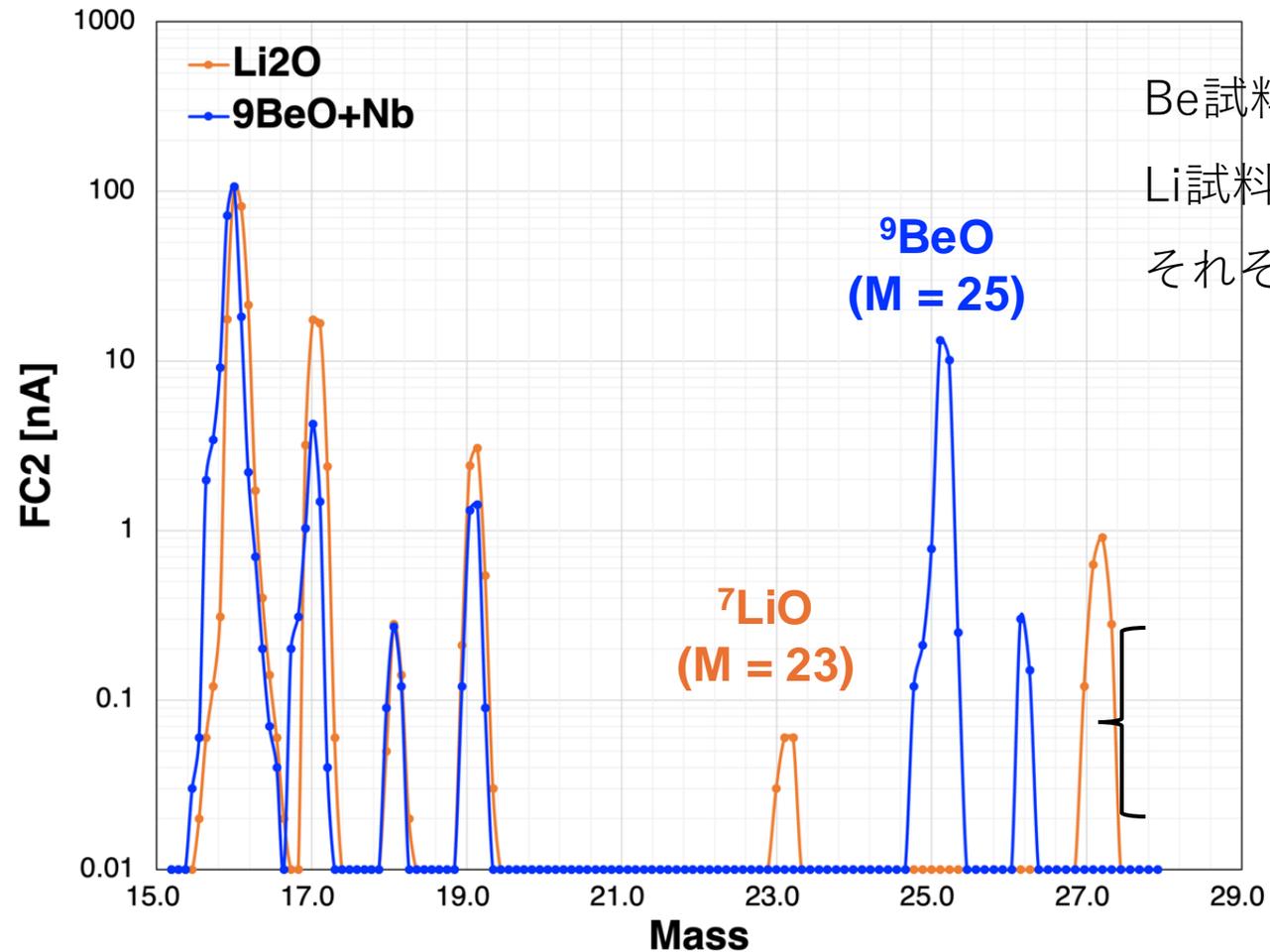


- 同じエネルギー、同程度のドーズ量($\sim 9E15$ ions/cm²)でBeをイオン注入した試料を準備
- 注入エネルギー 20 keV
- ドーズ量 6×10^{15} cm⁻²
- ダイヤモンド HPHT Ib(100)基板
- E02, E03, E04
- SIMS分析により、プロファイルの**良い再現性**が得られた。

Be-7のイオン注入



- Be-7として試料中に含まれるのは極微量(~pg以下)
- 電流値として測定することが困難なため、同じ質量数の ${}^7\text{LiO}$ (M = 23) によりパラメータを調整



Be試料からはLiが、
Li試料からはBeが、
それぞれ検出されない

今後の予定

^9Be イオン注入

SIMS分析

RTA

SIMS分析

特性評価

⋮

^7Be イオン注入

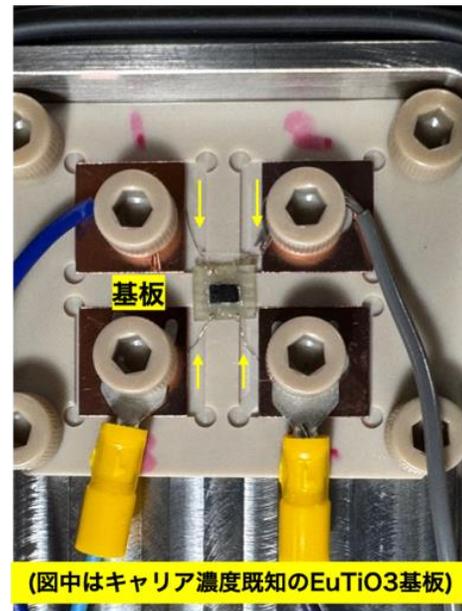
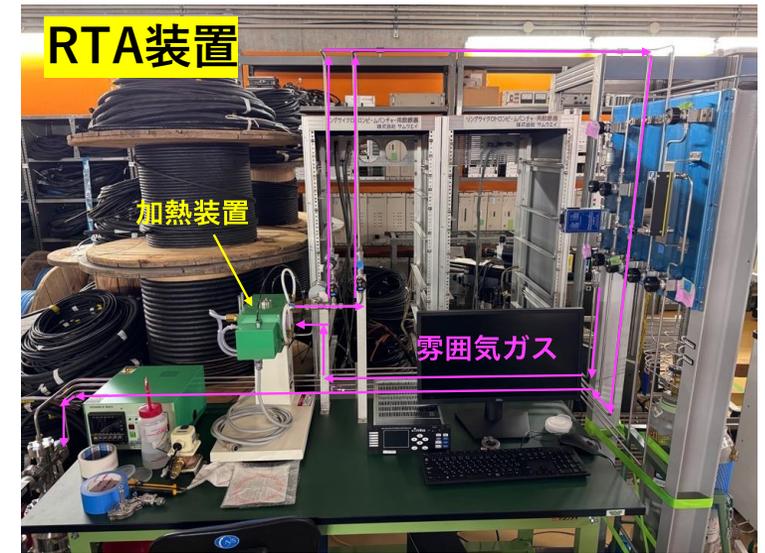
RTA

γ 線測定

ホール効果測定

⋮

- ^7Be のイオン注入を実施
- 放射線管理区域内での**RTA装置**, **ホール効果測定装置**の整備を進めている。
- ^7Be の壊変とともに物性がどのように変化するか調査する。



まとめ

- ◆ **イオンビームの応用**として、
「核種変換を利用した半導体製造への取り組み」を紹介した。
- ◆ 放射線管理区域内での実験環境を整備した。
- ◆ 安定同位体Be-9によるダイヤモンド基板中のBeの拡散挙動の調査の後、
放射性同位体Be-7のイオン注入を実施した。
- ◆ 今後は、Be-7の壊変に伴うダイヤモンド基板の特性(ホール効果)の変化の調査を進める予定である。

謝辞

本研究は、キヤノン財団第13回研究助成「新産業を生む科学技術」の助成を受けたものです。
Be-7は理研RIBFおよびJSPS科研費16H06278の助成を受けた短寿命RI供給プラットフォームによって供給されました。