



14. Bi-2212 への高エネルギーイオン照射によって導入された 欠陥構造のイオン種依存性

Ion species dependence of defect structures in high energy ion irradiated Bi-2212

佐々木優吉、黄達祥、幾原雄一*

岡安悟、有賀武夫、北条喜一**

財団法人 ファインセラミックスセンター 東京大学大学院工学研究科

日本原子力研究所**

1. 緒言

酸化物超電導体への高い臨界電流密度特性の付与を目的として、種々の方法による磁束ピン止め点の導入が行われる。その一つの手段として、イオン照射を用いた超電導体内への nm サイズの微細欠陥を導入する方法がある。一方、磁束ピン止め効果は、導入された欠陥の構造と深く関与することが知られている。従って、イオン照射効果を理解するためには、導入された照射欠陥構造を知る必要がある。通常、照射欠陥構造は、阻止能との関係で議論される。本研究では、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212) 超電導単結晶を用いて、Au と Fe を照射イオンとする高エネルギー照射を行い、導入された照射欠陥構造と照射条件との関係について、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた直接観察による検討を行った。その結果、イオン照射によって導入される欠陥構造は、単に阻止能のみに依存するのではなく、照射イオンの種類にも依存することが分かった。

2. 実験

Bi-2212 単結晶 ($2 \times 2 \times 0.02\text{mm}$) を用いて、原研タンデム加速器により試料の $\langle 001 \rangle$ に沿って Au-230MeV または Fe-180MeV の照射を行った。これら試料は、照射前後において SQUID を用いた測定を行い、磁気特性の変化について評価した。また、照射試料の断面方向からの TEM 観察を行い、照射イオンの飛程と照射欠陥構造との関係を検討した。さらに、飛程に沿った阻止能の計算を EDEP-1 コードを用いて計算し、照射欠陥構造と阻止能の関係を調べた。

3. 結果と考察

Au および Fe イオンを用いて、おのおの照射密度 $3.3 \times 10 \text{ ions/cm}^2$ および $4.4 \times 10 \text{ ions/cm}^2$ で照射した試料の照射前後の磁気特性を図 1 に示す。不可逆磁場の値が、Au-230MeV 照射では約 40 倍、Fe-180MeV 照射では約 15 倍の特性の向上を示しており、磁束ピン止め点が導入されたことが確認される。この照射効果の違いは、照射密度ではなく主に生成した照射欠陥構造に依存するものであると推定される。

照射試料の磁束ピン止め点となる照射欠陥構造を知るために、TEM による構造解析を行った。図 2 に Au-230MeV で照射した Bi-2212 試料の飛程に沿って観察した照射欠陥構造の TEM 像を、また図 3 に Fe-180MeV で照射

した試料の観察結果を示す。Au-230MeV 照射によって形成された欠陥については、昨年度の本研究会で報告したように、照射イオンの進入深に沿ってカラムの太さが徐々に細くなり、それに伴って、楕円状のカスケード欠陥がカラム状欠陥に沿って生成すること、そしてさらに試料深部においては、ターゲット物質の電子励起によるカラム欠陥の生成は確認できなくなり、一列に配列したカスケード欠陥のみが観察され、最終的にイオンが停止する領域において、ランダムなカスケード欠陥の分布が観察される。この一連の構造変化を図4に示す阻止能と進入深さとの関係と比較すると、阻止能 ($-dE/dx$) の大きさの変化との対応によってよく説明される。また、カラム状欠陥が生成する下限値も $\approx 16\text{keV/nm}$ と、これまでに報告されている結果と一致している。一方、Fe-180MeV の照射欠陥のについては、表面から約 $14\mu\text{m}$ 程度の深さまで延びた長いカラム状欠陥が確認され、その最大カラム径は、ほぼ均一で Au をイオン源とするカラム欠陥の最大カラム径よりも細い。この変化は、定性的には阻止能との関係で整理される(図4)。即ち、Fe-180MeV 照射の場合、電子励起過程における阻止能 ($-dE/dx$) が、Bethe のモデルの適用範囲から Firsov のモデルの適用範囲に移行する領域を含むため、阻止能の値があまり変化しない領域が TEM 観察した範囲内に含まれる。図4の計算結果に現れたプラトーな領域がそれに対応するが、観察されたカラム状欠陥の径が広い範囲にわたってほぼ一定となっており、計算結果と定性的な一致を示している。また、カラム状欠陥の径が細いことも、阻止能の値との関係で理解できる。

ただし、EDEP-1 の計算によると、Bi-2212 への Fe-180MeV の照射においては、阻止能の値が 16keV/nm を越えることがなく、最大でも 13keV/nm 程度である。この条件においてもカラム状欠陥は形成されており、イオン種に依存してカラム状欠陥の形成に必要な阻止能の最小値が異なることが分かる。そのために、Fe-180MeV 照射においては、イオンの飛程に沿ってかなり深い領域までカラム状欠陥が形成されている。Au-230MeV および Fe-180MeV の照射によって形成された照射欠陥の飛程に沿った変化を図5に示す。

一方、Bi-2212 の磁気特性に対する Au-230MeV 照射および Fe-180MeV 照射の違いは、図1に示すように 2~3 倍程度の違いが確認される。観察結果からは、Fe-180MeV 照射によって形成されたカラム状欠陥の方がむしろ欠陥の長さは長い、Bi-2212 内のカラム状欠陥の磁束ピン止め効果に及ぼす欠陥の径の影響が大ききことに依存した結果であると推定される。この結果は、荻窪らによって示されたカラム状欠陥の直径と磁束ピンニング力密度との関係に対応するものと考えられる。

測定温度 : 50k

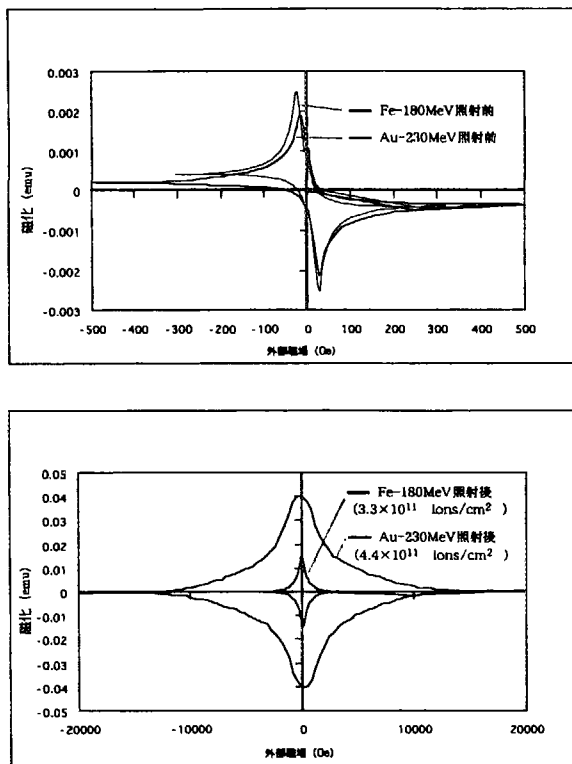


図 1 Au-230MeV と Fe-180MeV のイオン照射による Bi-2212 の磁気特性の変化

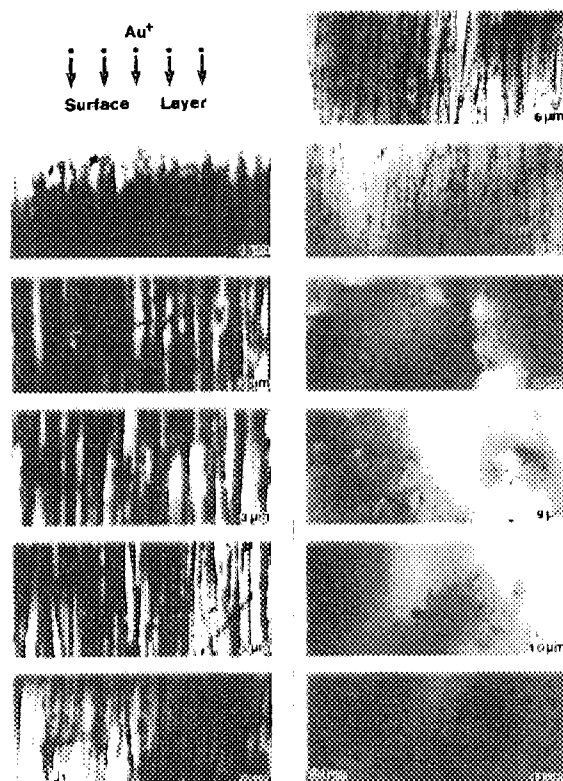


図 2 Au-230MeV のイオン照射によってつくられた照射欠陥の TEM 像

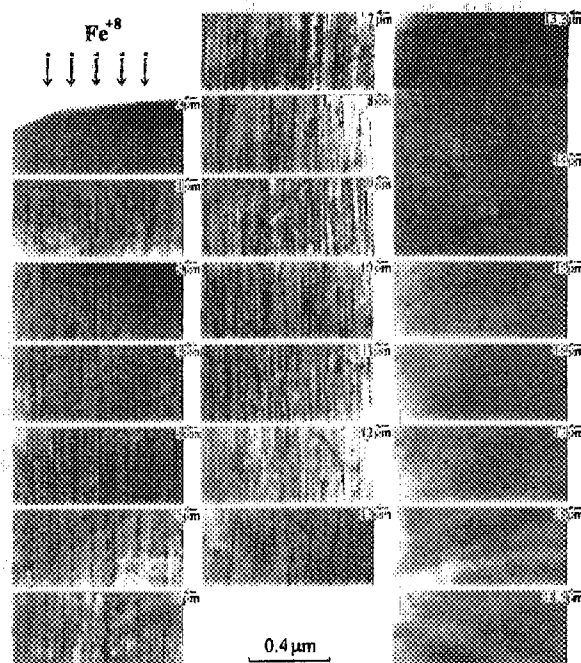


図 3 Fe-180MeV のイオン照射によってつくられた照射欠陥の TEM 像

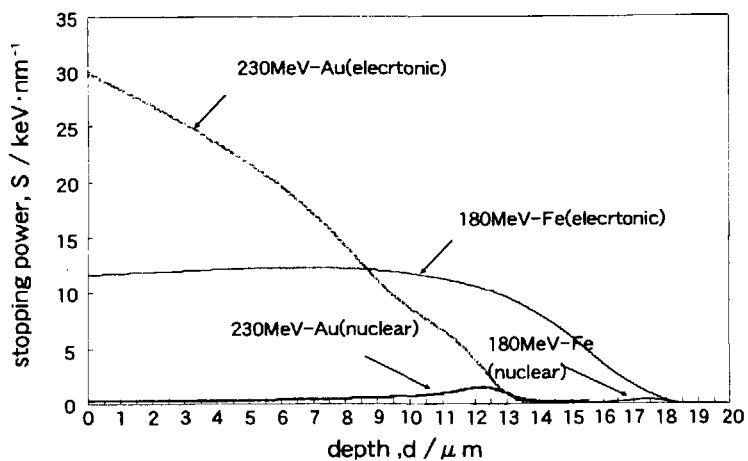


図 4 EDEP-1 コードで計算された照射イオンの飛程と阻止能の関係

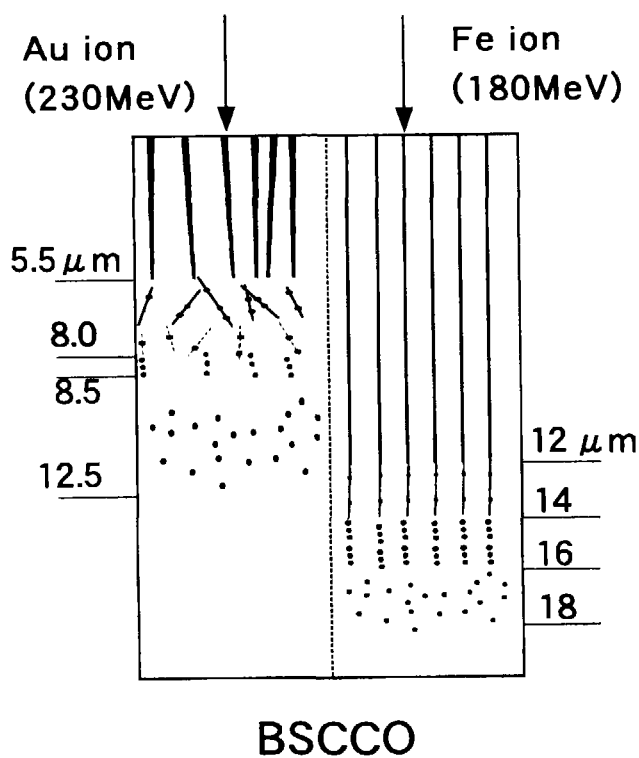


図 5 Au-230MeV と Fe-180MeV のイオン照射によって形成された照射欠陥の模式図