

■ 極低温における放射線物性の研究



極低温放射線物性研究グループ ■ 岩瀬 彰 宏 ■

1. はじめに

極低温放射線物性研究グループは、旧物理部固体物理第2研究室で行っていた照射損傷の基礎研究をさらに発展させる目的で、平成5年度、先端基礎研究センターの発足と同時にスタートした。東海研タンDEM加速器を用いた極低温照射による「金属の照射損傷過程における電子励起効果」を中心に研究の遂行を行ったが、この5年間は、高崎研TIARAによる電子線低温照射実験や理研リングサイクロトロンによるGeVイオン照射実験が新たに開始されるなど、総合的な格子欠陥研究の体制が整えられた時期でもあった。以下に、本研究テーマのもとで遂行された研究成果の概要を報告する。

2. イオン照射した金属、高温超伝導体の格子欠陥生成・消滅と電子励起効果

我々は、100MeV程度の高エネルギー重イオンを極低温照射したFCC金属において、欠陥生成及び消滅断面積測定や欠陥回復スペクトルの観測から、欠陥生成消滅過程にイオンによる電子励起が大きな役割を果たすことを示した¹⁾。これらの実験結果は世界的にも大きな話題となった。従来、伝導電子密度の大きい金属では、電子励起状態はただちに緩和されてしまい原子の変位には寄与しない、というのが常識だったからである。同様の実験は、BCC金属である純鉄においても行なわれた²⁾。図1に、欠陥消滅断面積と電子的阻止能の関係を示す。実験結果は、異なった欠陥消滅断面積を持つ2種類の欠陥の存在を示唆する。

断面積を有する2種類の欠陥の存在を示唆するが、いずれの断面積も電子的阻止能、即ち、電子励起密度の増加に伴って増加することが判る。これは、FCC金属で電子格子相互作用の大きいNi、Ptなどで見られる現象と同じである。純鉄も、Ni同様、電子格子相互作用の大きい金属の1つである。従って、本結果は、電子励起に伴う格子欠陥消滅（照射アニーリング）は、結晶形に関係なく電子格子相互作用の大きさに支配されるという、我々の主張を裏付けている。また、鉄においては、電子励起密度が大きくなると欠陥生成断面積が急増することが見い出されている。図2に

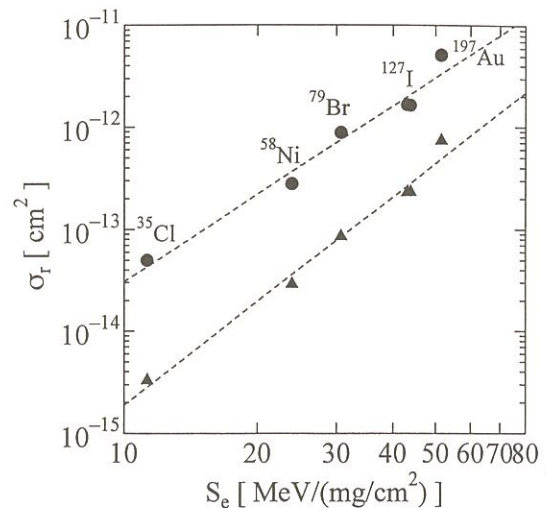


図1 各種イオンを低温照射した純鉄における欠陥消滅断面積の電子的阻止能依存性。実験結果は、異なった欠陥消滅断面積を持つ2種類の欠陥の存在を示唆する。

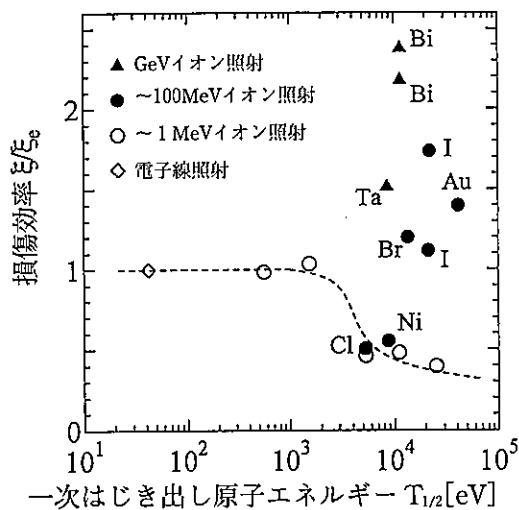


図2 高エネルギーイオン (~100MeV), GeV イオン (3-4 GeV), 低エネルギーイオン (~1 MeV), 及び、電子線 (2 MeV) を低温照射した純鉄における損傷効率の1次はじき出し原子エネルギー依存性

は、損傷効率 (欠陥生成断面積の実験値と、弾性的相互作用によってのみ欠陥が生成すると仮定して求めた断面積の計算値との比、ここでは、電子線照射の損傷効率の値で規格化したものをプロットしてある) を弾性的相互作用による1次はじき出し原子 (PKA) エネルギーの平均値に対してプロットしている。Br, I, Biイオンなど、電子的阻止能の大きな高エネルギー (100MeV ~ 4 GeV) 重イオンに対しては、損傷効率が非常に大きくなる。この実験結果は、高密度電子励起による欠陥生成が起こっていることを示唆するものであり、NiやPtでは見られなかった現象である。鉄は、Ni, Ptと異なり900℃, 1400℃といった高温、あるいは高压で構造変態を起こすことは良く知られている。まだ確証はないが、電子励起による欠陥生成が、これら構造変態と関係しているとなれば非常に面白い。イオンの飛跡に沿った領域が、励起電子から格子系へのエネルギー伝達により高温、高压状態になり、構造変態を起こした後急冷される過程で欠陥が生成されたと考えることができるからである。この現象を応用すれば、高エネルギーイオン照射のみならず超高温、超高压といった非平衡場を用いて、常温、常圧では実現不可能な構造、あるいは物性を持った材料ができる可能性がある。

我々が本テーマを開始したちょうど同時期、全く別の物質で高密度電子励起による欠陥生成が注目された。それは、酸化物 (高温) 超伝導体をGeVイオンで照射すると、高密度電子励起によりイオンの飛跡に沿って柱状の欠陥が生成されるというものである。この柱状欠陥の内部は超伝導性が劣化した状態になっており、また、その直径が超伝導のコヒーレンス長と同程度であったことから、磁束量子に対して極めて有効なピンニングセンターとして作用し、超伝導臨界電流の大幅な向上に寄与することが明らかになった。そのため、GeV領域の重イオンを照射した高温超伝導体において、多くの研究が行われた。しかし、これらの研究の大部分は超伝導研究の側からのアプローチであり、柱状欠陥がどのようなメカニズムでできるのか、あるいは、電子励起密度との関連、といった放射線物性的観点からの考察はあまり成されていない。そこで我々は、格子定数、転移点直上の電気抵抗、といった照射に敏感な物理量を種々のイオンで照射することにより、欠陥生成と電子励起との関連を追求した³⁻⁵⁾。図3に、高温超伝導体 EuBaCuOの照射によるc軸の伸びを照射量で割った値 (c軸の伸び率) を初期電離断面積 (dJ/dX) に対してプロットした。伸び率は、ちょうどdJ/dXの4乗に比例する⁴⁾。これは、低温照射後の電気抵抗測定から求めた照射効果においても見られる依存性である⁵⁾。照射効果が電子的阻止能

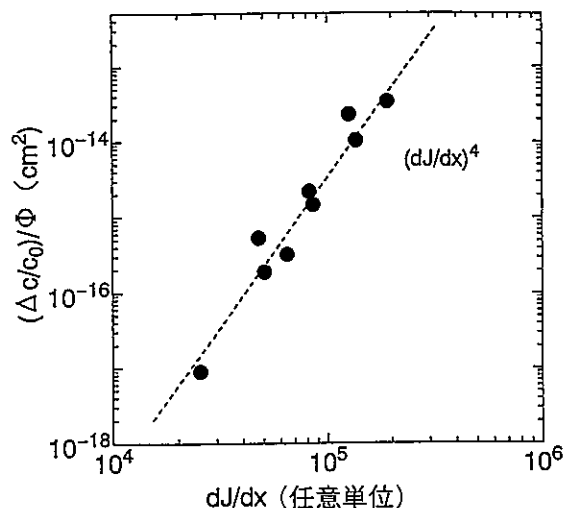


図3 高エネルギーイオン照射した高温超伝導体 EuBaCuOのc軸伸び率の初期電離断面積依存性

ではなく初期電離断面積で記述されるということは、欠陥生成機構に対する重要な知見を与える。初期電離断面積は、イオンの飛跡に沿って生成された正電荷の密度を表わす。従って、実験結果は、励起電子から格子系へのエネルギー伝達が正電荷同士のクーロン反発ポテンシャルによるもの（いわゆるクーロン爆発）に起因する事を示している。我々は、クーロン爆発を通じて格子系へ伝達されたエネルギーによる熱スパイクが最終的に照射効果をもたらしたとして初期電離断面積の4乗則を説明したが⁵⁾、国際的なコンセンサスを得るには至っていない。今後は、電子励起に伴って発生する高エネルギー2次電子（デルタ線）によるエネルギー散逸の空間分布などに関する実験等を行い、より定量的な議論へと発展させていく予定である。

3. 高温超伝導体中の 照射欠陥による磁束ピンニング

前にもふれたが、高温超伝導体中の照射欠陥、特に高エネルギー重イオンによる柱状欠陥における磁束ピンニングは重要な研究テーマの1つである。我々は、理研リングサイクロトロン加速器を用いてGeV重イオン照射したBi系単結晶において主に交流帯磁率の測定から、また、東海研タンデム加速器を用いて~100 MeV重イオン照射したY系薄膜試料において電気抵抗測定から、それぞれ、磁束と柱状欠陥の相互作用の研究を行った。帯磁率測定からは、磁束と柱状欠陥の動的相互作用のデータが得られている。Bi-2212単結晶では、柱状欠陥の導入により磁束線がランダムに凍結する「ボーズグラス相」が出現するが、一方、より2次元性の強いBi-2201では、照射後もボーズグラス相は出現せず、磁束の熱運動は照射前と同じく熱活性化型（アレニウス型）の温度依存性を呈することが明らかになった⁶⁾。タンデム加速器に新たに設置した極低温重イオン照射チェンバーは、極低温照射した試料に、その場で最大6 Tの磁場をかけることの出来る装置である。我々は、低温に冷却したY系薄膜試料中に重イオン照射によって柱状欠陥を生成し、試料温度を上げることなく高磁場下の磁束ピンニング特性の測定に成功した。図4に、電気抵抗測定から求めた超伝導臨界電流の磁場角度依存性を示す。照射前には、磁場方向と超伝導面が平行になった時 intrinsic pinning 効

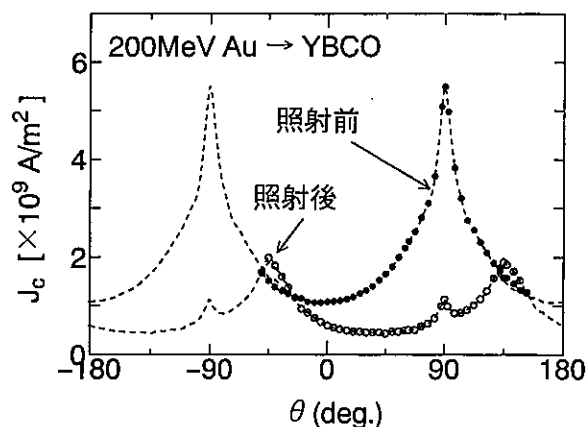


図4 高エネルギー金イオンを照射した高温超伝導体 YBaCuO の臨界電流の磁場角度依存性

果による臨界電流の増加が顕著にみられる。照射後は、照射による層状構造の乱れにより、この効果は著しく減少するが、磁場と柱状欠陥が平行になったとき、柱状欠陥の磁束ピンニングにより臨界電流が増加する。この実験は2つの点で大きな意味を持つ。1つは、低温照射後、照射欠陥が熱的にアニールされない状態でのピンニング特性が測定されたこと、そして、臨界電流測定が、今まで数多くなされてきた直流帯磁率によるものではなく、電気抵抗を用いてなされていることである。これは実用的観点からも重要なことである。

4. その他の研究と今後の展望

以上、主に高エネルギー重イオン照射を用いた研究について述べたが、これらの他にも、点欠陥導入による熱分解黒鉛の電流磁気特性変化の研究など、高崎研における電子線低温照射による研究も進展した。また、低温比熱測定から、高温超伝導体の表面バリアーの存在を示すデータが得られたことも特記に値する⁷⁾。さらに、鉄銅モデル合金を用いた軽水炉圧力容器の照射脆化や、金属中の水素の挙動の研究、そして、合金の照射誘起析出におけるカスケード損傷効果の研究⁸⁾など、所内外、国内外の各研究グループとの協力研究も順調に進んだ5年間であった。さて、今後の展望であるが、関係各位の多大なる理解と協力のおかげで、新たな大テーマ「高エネルギー照射場における材料機能の研究」を、新しく発足した物質科学研究部において平成10年度から実施できることが決定した。このテーマのもとでは、今まで旧物理部や先端基礎研究センターにおいて遂行してきた放射線物性に関

する基礎研究をさらに深めるとともに，研究成果が原子力材料の耐照射性評価などへも寄与できることを目指し，さらに，高エネルギー照射場による非平衡ダイナミックスを用いた新材料の開発，といった分野にも積極的に取り組む覚悟である。

参考文献

- 1) A. Iwase and T. Iwata, Nucl. Instr. Meth. B90 (1994) 322.
- 2) Y. Chimi et al., J. Nucl. Mater.(1998)in press; Mat. Res. Soc. Symp.Proc. (1998) in press.
- 3) N. Ishikawa et al., Physica C259(1996)54.
- 4) N. Ishikawa et al., Nucl. Instr. Meth. B135 (1998)184.
- 5) A. Iwase et al., Nucl. Instr. Meth.(1998)in press.
- 6) N. Kuroda et al., Nucl. Instr. Meth(1998)in press.
- 7) M. Watanabe and T. Iwata, Phys. Rev. Lett. 72 (1994)3429.
- 8) A. Iwase et al., J. Nucl. Mater. 238(1996) 224, 244(1997)147.

