

5-3 放射光でマクロ磁性を原子レベルに切り分ける —内殻吸収磁気円二色性による元素ごとの磁化測定—

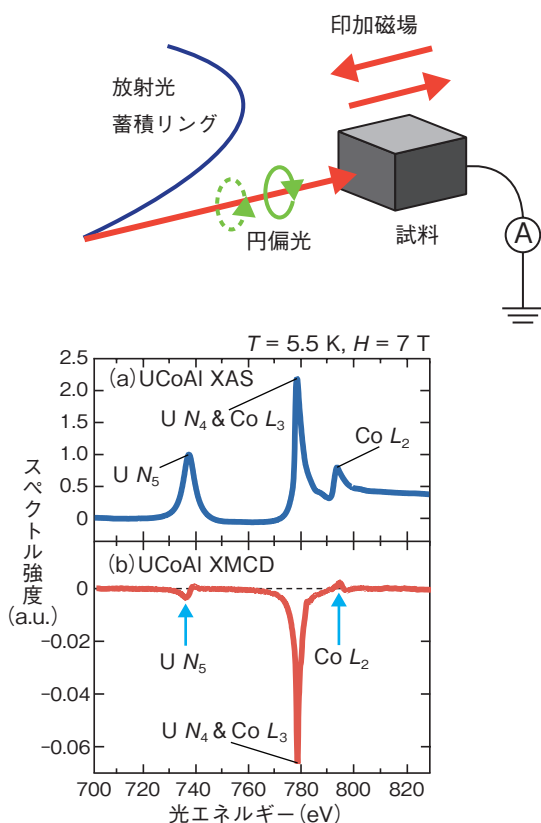


図5-11 UCoAlのU 4d-5f($N_{4,5}$)とCo 2p-3d($L_{2,3}$)吸収端での実験スペクトル

(a)XAS, (b)XMCDです。温度は5.5 K, 磁場7 Tです。→については本文を参照してください。

磁石の性質は、磁性元素と呼ばれる遷移金属元素や希土類元素、そしてアクチノイド元素が担っています。アクチノイド元素は放射性元素であるため応用は困難ですが、実に多彩な磁性を示します。

ウラン (U) とコバルト (Co) の二つの磁性元素とアルミニウム (Al) により構成されたUCoAlは、低温において磁場 (H) を印加すると、常磁性から強磁性に転移 (メタ磁性転移) します。このメタ磁性転移機構の解明には、UサイトとCoサイトそれぞれの磁気的性質を把握することが重要です。

軟X線内殻吸収磁気円二色性(XMCD)とは、左・右円偏光に対する吸収 (XAS) 強度の差として定義され (図5-10)、原理的に元素及び電子軌道選択性を有し、その強度は対象元素の持つ磁気モーメントの大きさに比例します。

UCoAl 試料は先端基礎研究センターにて育成されました。実験は大型放射光施設 SPring-8 のBL23SUで行いました。図5-11にUCoAlのU 4d-5f ($N_{4,5}$) 及びCo 2p-3d($L_{2,3}$) 吸収端でのXASとXMCDスペクトルを示します。778 eVのピークはU N_4 とCo L_3 が重なっており、

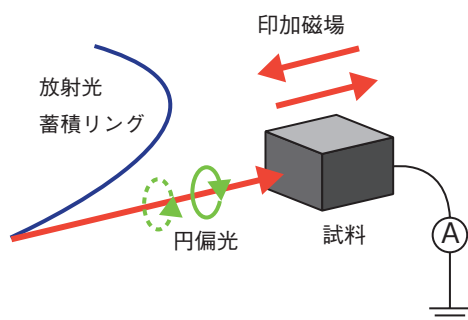


図5-10 内殻吸収磁気円二色性測定概念図

外部磁場により試料を磁化させ、その磁化方向に対して平行または反平行に左・右円偏光をそれぞれ照射します。そのときの光吸収強度を測定し、その差を取ったものがXMCDです。

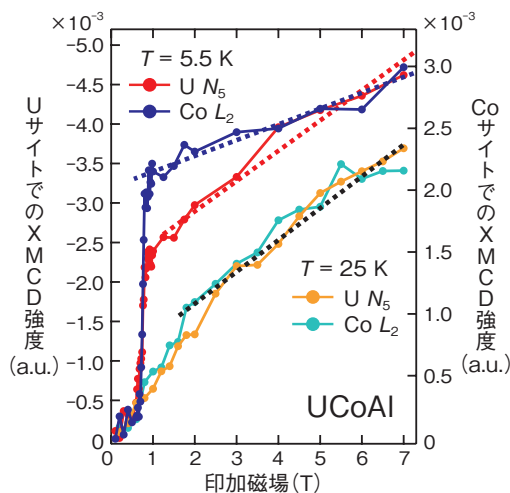


図5-12 UとCoサイトでのXMCD強度の磁場依存性

図5-11(b)の→で示したXMCD強度の磁場による変化の様子で、UとCoの元素ごとの磁化曲線に対応します。測定温度は25 Kと5.5 Kです。

両元素の情報が混じっています。一方、735 eV(U N_5)と795 eV(Co L_2)のピーク (図5-11(b)の→)からは、UサイトとCoサイトの磁性情報を個別に抜き出すことができます。

図5-12に、温度 $T = 5.5$ K, 25 Kで測定したUサイトとCoサイトにおけるXMCD強度(磁気モーメント)の磁場依存性を示します。25 Kでは両サイトともに同様な振る舞いを示します(---線)。5.5 Kでは0.7 Tで急峻なメタ磁性転移が両サイトで観測されています。そして、0.7 T以上での磁場に対する磁気モーメントの増加率(傾き)は、Coサイトの方がUサイトよりも小さくなっていることが分かります(---線と---線)。また、25 Kから5.5 Kになったときの傾きは、Uサイトではほぼ同じ(---線と---線)ですが、Coサイトでは小さくなっています(---線と---線)。つまり、UサイトよりCoサイトの傾きの方が強い温度依存性を示しています。これまでUCoAlの磁性は、U元素が支配していると考えられてきましたが、元素別に磁性を調べることで、Co元素の磁性への寄与の重要性を明確に示すことができました。これは、ウラン化合物の示す強磁性のメカニズム理解に資する成果です。

●参考文献

Takeda, Y. et al., Separation of Magnetic Properties at Uranium and Cobalt Sites in UCoAl using Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism, Physical Review B, vol.88, issue 7, 2013, p.075108-1-075108-6.

5-7 X線及び中性子で構造材料の残留応力を観る

—表面から内部までの残留応力を評価し、機械・構造物の強度信頼性向上に資する—

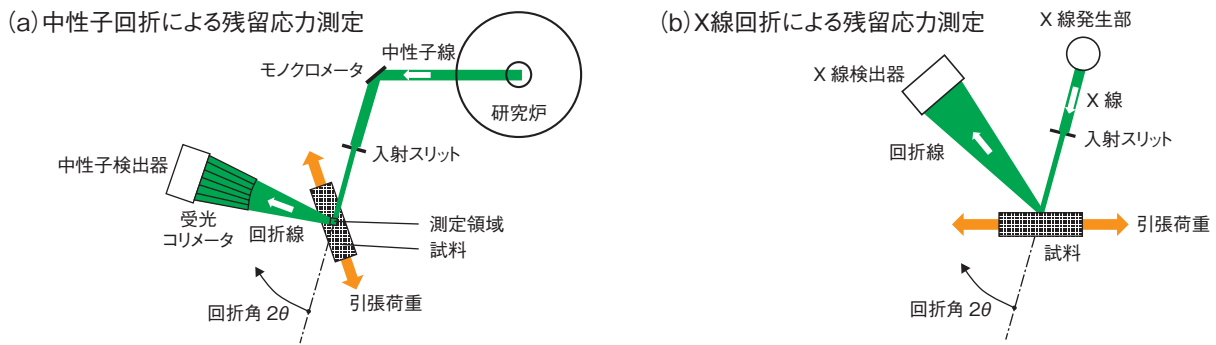


図 5-20 残留応力測定の実験レイアウト

(a) 研究炉で発生した中性子から必要なエネルギーの中性子をモノクロメータによって取り出し、試験片に照射します。回折線を中性子検出器でとらえて、回折角 2θ を決定し、そこから残留応力を求めます。測定領域は入射スリットと受光コリメータで規定し、また、試験片を走査することで試料内の三次元的残留応力分布が得られます。(b) X線回折では応力測定原理は同様ですが、X線は試料表面層内で回折するため、試料表面の応力が測定されます。

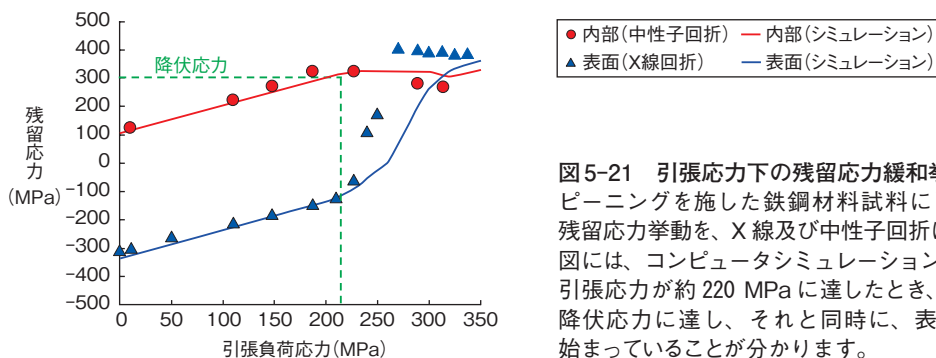


図 5-21 引張応力下の残留応力緩和挙動

ピーニングを施した鉄鋼材料試験片に引張応力を負荷した際の残留応力挙動を、X線及び中性子回折によって測定した結果です。図には、コンピュータシミュレーションの結果も併せて示します。引張応力が約 220 MPa に達したとき、内部の引張応力が材料の降伏応力に達し、それと同時に、表面圧縮残留応力の緩和が始まっていることが分かります。

機械・構造物の典型的な損傷形態である疲労き裂や応力腐食割れなどの“割れ”は、あらかじめ部材の表層に圧縮力(=圧縮残留応力)を導入しておくことで防止できます。ピーニング法は、代表的な圧縮残留応力導入技術の一つであり、原子炉各部の溶接部や自動車部品などの強度向上のために適用されています。しかし、そうして導入した圧縮残留応力は、機械が稼働中に受ける外部からの荷重や熱の作用で緩和する可能性があり、その場合、割れ防止効果は低下し、破壊事故のリスクが増加します。したがって、圧縮残留応力の緩和過程を理解することは、機械・構造物の強度信頼性評価の上で大変重要です。

残留応力の測定には X 線や中性子を用いた回折法が適しています。X 線では表面下 10 μm 程度の極表面層内の測定が可能で、一方、中性子線を用いると、その物体透過能の高さから、例えば数 cm 厚さの鉄鋼材料内部の残留応力分布が数 mm の空間分解能で非破壊的に測定できます。そのため、X 線と中性子線の両者を利用することで、物体表面から内部にかけての残留応力分布評価が可能です。

本研究では、ピーニングにより表面に圧縮残留応力を

導入した鉄鋼製試験片に、引張荷重を負荷しながら X 線と中性子によって残留応力を測定しました。中性子及び X 線回折装置のレイアウトを図 5-20 に、また、測定結果を図 5-21 に示します。引張応力の増加とともに、表面と内部の残留応力が増加していき、引張応力が約 220 MPa に達したとき、内部の残留応力(●)が材料の降伏応力に達します。そして、それと同時に表面層内の圧縮残留応力(▲)の緩和が始まります。すなわち、表面の圧縮残留応力緩和は、内部の降伏によって引き起こされていることが明確に示されました。また、その緩和開始条件は、コンピュータシミュレーションの結果と一致することが確認されました。

以上の検討に引き続き、現在では熱負荷に起因する残留応力緩和挙動を検討しています。このような、残留応力緩和に関する知見を応用することで、機械・構造物の強度信頼性評価精度の向上が可能であり、また、今後、より安全で高性能な機械・構造物の開発につながるものと期待されます。

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(No.23360061)「残留応力緩和に及ぼす結晶学的微視構造の影響」の成果の一部です。

●参考文献

Akita, K. et al., Relaxation Behavior of Laser-Peening Residual Stress under Tensile Loading Investigated by X-Ray and Neutron Diffraction, Mechanical Engineering Journal, vol.1, no.4, 2014, p.14-00183-1-14-00183-8.

5-10 放射線がん治療の副作用低減に新たな道筋 —放射線が当たっていない細胞で起こるバイスタンダー効果の特徴を発見—

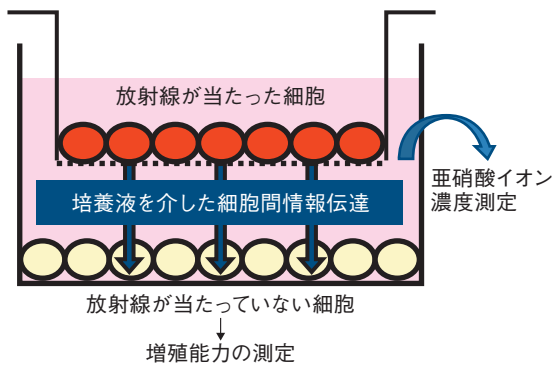


図 5-26 バイスタンダー効果の検出方法

γ線あるいは炭素イオンビームを照射した細胞(上側)と照射していない細胞(下側)を、同じ容器の中で培養液を共有させながら多孔膜で隔てて培養しました。培養後、照射していない細胞の増殖能力と培養液中の一酸化窒素が酸化して生じる亜硝酸イオン濃度を測定しました。

バイスタンダー効果とは、放射線が当たった細胞で生じる何らかの作用により、周囲の放射線が当たっていない細胞が放射線に当たったかのような反応を示す現象です。

私たちは、高崎量子応用研究所のコバルト 60 ガンマ線照射施設とイオン照射研究施設を用いて、培養したヒト肺由来の正常線維芽細胞(WI-38株)集団の一部にγ線あるいは重粒子線の一種である炭素イオンビームを照射した後、照射していない(放射線が当たっていない)細胞の増殖能力を詳細に調べました(図5-26)。

その結果、放射線が当たっていない細胞の増殖能力は、γ線でも炭素イオンでも、細胞に与えられるエネルギーの量(吸収線量)に応じて、しかし放射線の種類によらず、同じように低下することを見だしました(図5-27)。また、実験系内の一酸化窒素を意図的に消去した実験では、γ線あるいは炭素イオンビームのどちらの場合でも、照射していない細胞の増殖能力は全く低下しないことが分かり、バイスタンダー効果が伝わるためには、一酸化窒素の生物学的な合成が必要であることを突き止めました。一方、培養液中の一酸化窒素が酸化して生じる亜硝酸イオンの濃度を測定したところ、亜硝酸イオンの濃度

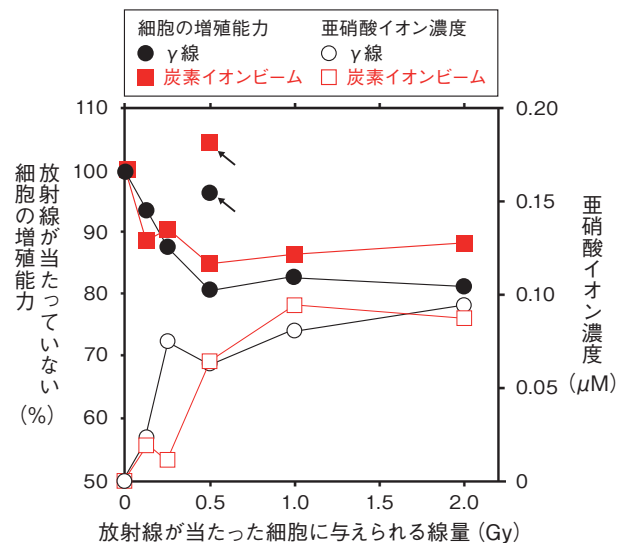


図 5-27 放射線が当たっていない細胞の増殖能力の低下と培養液中の亜硝酸イオン濃度の上昇の関係

▲は実験系内の一酸化窒素を意図的に消去した場合の増殖能力を示します。

の上昇(すなわち、一酸化窒素の合成量の増加)と細胞の増殖能力の低下(バイスタンダー効果)に相関があり、一酸化窒素の合成がバイスタンダー効果の重要なメカニズムであることを世界で初めて発見しました。細胞内で多様なストレスに応答する核内因子κBなどの転写因子とその下流の一酸化窒素合成酵素が放射線的作用により活性化されるのではないかと考えています。

近年、がん患部に集中して放射線のエネルギーを与えて治療する重粒子線がん治療に期待が集まっていますが、重粒子線でも、皮膚とがん患部の間に存在する正常組織の被ばくは避けられません。この正常組織の被ばくにおいて、放射線が当たった細胞から当たっていない細胞へのバイスタンダー効果が影響する可能性があります。本成果によりそのメカニズムの一端を明らかにしました。今後、ヒトの正常組織で一酸化窒素の消去あるいは生成の抑制に有効な薬剤が開発されれば、放射線がん治療の副作用低減に役立つことが期待できます。

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(No.25740019)「重イオン誘発バイスタンダー効果の時空間依存性の解析」の成果の一部です。

●参考文献

Yokota, Y. et al., The Bystander Cell-Killing Effect Mediated by Nitric Oxide in Normal Human Fibroblasts Varies with Irradiation Dose but not with Radiation Quality, International Journal of Radiation Biology, vol.91, issue 5, 2015, p.383-388.

9-4 世界最大の大電流負イオンビーム生成に成功 —ビームの一様性を改善して JT-60SA 要求値以上の電流生成(32A)を達成—

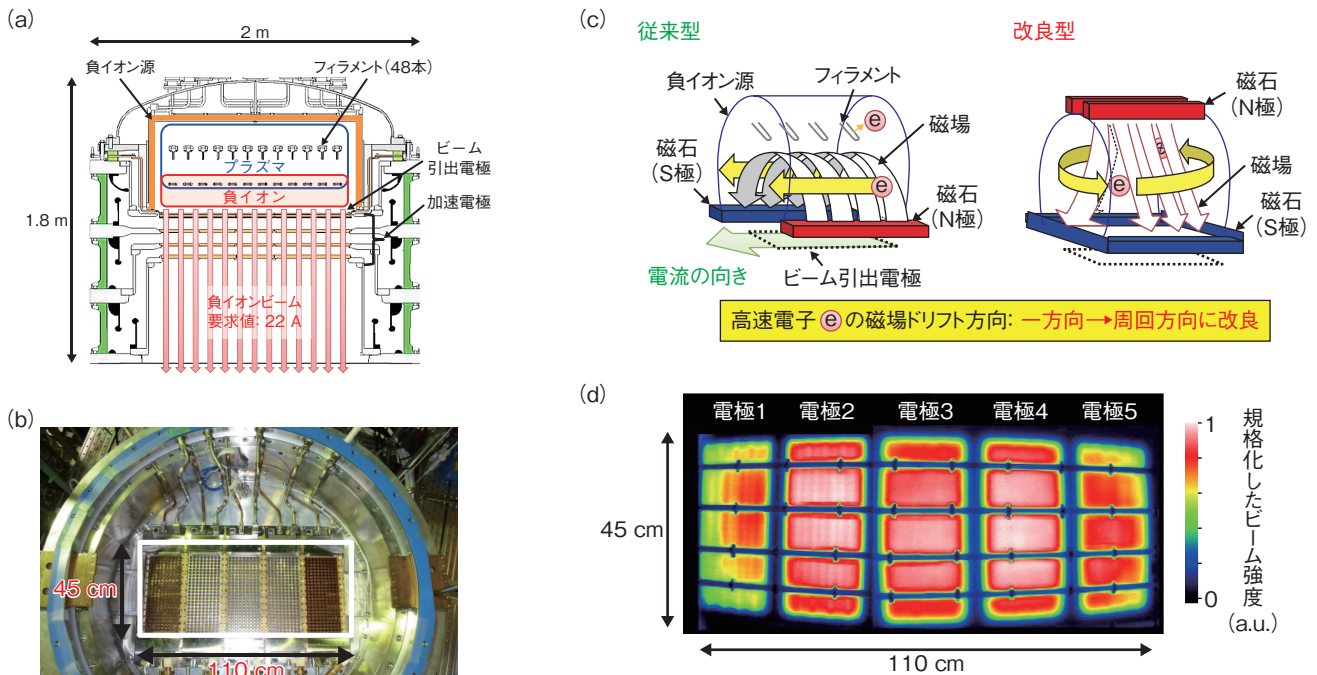


図9-11 JT-60 負イオン源の断面図と引出電極
(a) 直径 2 m, 高さ 1.8 m の世界最大級の大きさを誇ります。
(b) 世界最大の引出面積から 22 A の大電流ビームを引き出します。

図9-12 JT-60 負イオン源の改良前後の磁場構造と改良後のビーム強度分布

(c) 従来の磁場構造から、高速電子の偏りを抑制する新たな磁場構造を開発しました。(d) 磁場構造を改良することで、引出領域から一様な 32 A のビームを引き出しました。

JT-60SA や ITER では、核融合プラズマの加熱や電流駆動を目的として、高出力・大電流の中性粒子ビームを注入することが必要です。原子力機構では世界に先駆けて大型の負イオン源（実機 JT-60 負イオン源）を開発してきました（図 9-11(a)）。この負イオン源の特徴は、ビームの引出面積が $45 \times 110 \text{ cm}^2$ と非常に大きく、計 1100 孔のビーム孔を有している点です（図 9-11(b)）。JT-60SA 計画では、この負イオン源を用いて 22 A の負イオンビーム生成が求められています。しかし、これまでの負イオンビームは空間的な一様性が悪く、1 孔から生成させる負イオンビーム強度に偏りがありました。そのため、大きな発散成分を持つビームが多く生成されて加速電極へ衝突することで、ビームの電流値が減少してしまい、大電流負イオンビーム生成が実現できていませんでした。

そこで、負イオンビームの一様性が悪くなる原因を解明するために、実機 JT-60 負イオン源を用いた試験を実施してきました。その結果、負イオンビームは負イオンビームの素と考えられているプラズマと同方向へ偏っていることを突き止めました。このプラズマはフィラメントから放出される高速電子によって生成し、高速電子

は負イオン源の磁場構造の影響を強く受けてドリフトします（磁場ドリフト）。さらに、この高速電子の軌道を計算にて追跡した結果、磁場ドリフトする方向が、改良前の従来型の磁場構造では常に一方向であることが判明しました。つまり、負イオンビームの一方向に偏る原因は、負イオン源の磁場構造によって生じる磁場ドリフトによる高速電子の一方向への偏りと直結していることを見いだしました。そこで、高速電子の偏りを抑制してプラズマをより一様に生成するために、負イオン源に装着した永久磁石の組合せを工夫した新たな磁場構造を開発しました（図 9-12(c)）。

この新しい磁場構造で高速電子の偏りを抑制して、一様なプラズマを生成することができました。さらに、負イオンビームの空間分布の一様性を、全体の引出面積に対して 68% から 83% に大幅に改善しました（図 9-12(d)）。この一様な領域から 32 A という世界最大の大電流負イオンビーム生成に成功しています（従来型では最大 17 A）。この電流値は、JT-60SA での要求値（22 A）を大きく超えるものであり、JT-60SA 計画の進展に貢献することができました。

●参考文献

Yoshida, M. et al., Improvement of Uniformity of the Negative Ion Beams by Tent-Shaped Magnetic Field in the JT-60 Negative Ion Source, Review of Scientific Instruments, vol.85, issue 2, 2014, p.02B314-1-02B314-4.