

第 66 回放射線科学研究会聴講記

標記研究会は平成30年7月17日（火）午後1時半から5時半まで住友クラブにおいて、尾崎壽紀氏（関西学院大学）、馬場祐治氏（日本原子力研究開発機構）、岡安隆一氏（量子科学技術研究開発機構）及び木野村淳氏（京都大学）の4名の講師をお招きして開催した。座長は前半2件を、岩瀬彰宏ONSA専務理事が、後半2件を児玉大阪府立大学教授が務めた。なお、講演会終了後、講師の先生を囲んで技術交流会が行われた。

1. 超伝導薄膜へのイオン照射効果

関西学院大学理工学部 先進エネルギーナノ工学科 尾崎壽紀

臨界温度が液体窒素温度（77 K）を上回る銅系酸化物超伝導体（いわゆる高温超伝導体）が発見されてからすでに 30 年以上が経過する。高温超伝導体は、しかしながら、臨界電流が低く、高磁場中で電流を少し流すと超伝導状態が破れてしまうという欠点があった。そこで、数 100MeV から GeV 領域の高速重イオンを用いて 1 次元トラック状の常伝導領域を作り、磁束をピン止めすることによって臨界電流を向上させる試みが多くなされた。これにより、臨界電流は大きく向上したが、用いる加速器施設が極めて大掛かりになってしまうため、実用ベースでの利用は困難である。しかし、近年になって、比較的低いエネルギー（数 MeV 以下）のイオン照射で臨界電流を向上できるという報告がなされてきた（図 2）。尾崎講師は、米国ブルックヘブン研究所留学中に、鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ (FST) 薄膜に低エネルギープロトンビーム照射を行い、臨界電流のみならず臨界



図 1 講演中の尾崎講師。

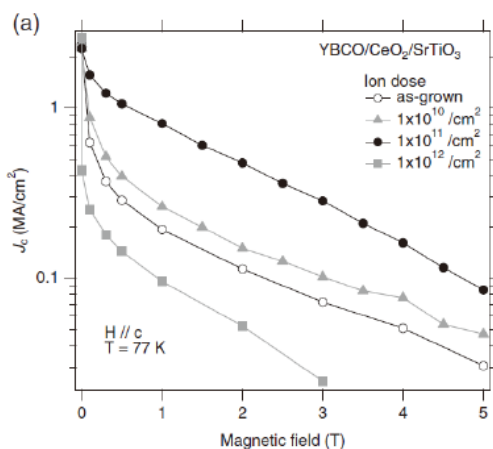


図 2 3MeV Au イオン照射した高温超伝導体 YBCO の臨界電流向 (H. Matsui et al., APL101(2012) 232 232601)。

Tandem Van de Graaff facility

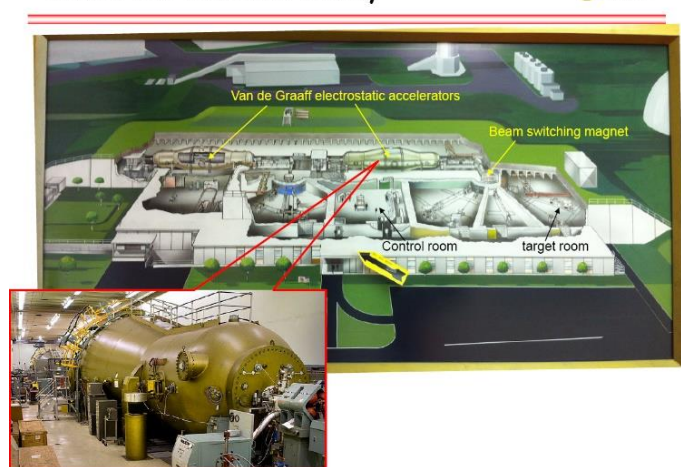


図 3 米国ブルックヘブン研究所の加速器施設の外観とタンデム加速器本体（左下図）。

温度の向上が生ずることを見出された。本講演では、この鉄系超伝導体のイオン照射効果の結果を中心に、その背景や今後の展望を語っていただいた。

講演では、まず、高温超伝導体のイオン照射効果の歴史と、ブルックヘブン研究所や米国エネルギー省のプロジェクト (Improved Superconducting Wire for Wind Generators) の概要説明があり、そのプロジェクトの下で行ったブルックヘブン研究所における実験と結果について解説があった。図 3 は、当研究所の 15MV タンデムバンデグラフ加速器施設の全体像と加速器本体の写真である。図 4 に、FST 薄膜へのプロトン照射実験の概念図を示す。STO 基板上に中間層として CeO_2 を用い、FST 薄膜 (厚さ 130nm) を 1.5mm の Al

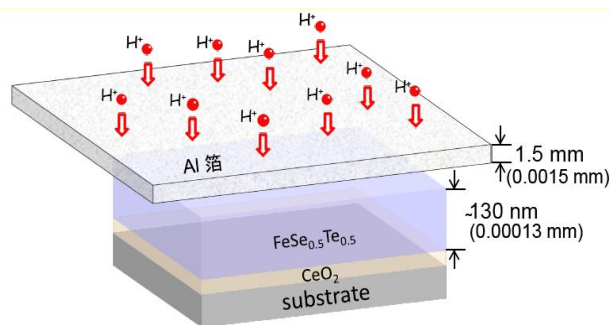


図 4 FST 薄膜へのプロトン照射実験の概念図。

膜で覆い、190keV のプロトンビームで照射した。照射量は $1 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ で、これは $1.1 \times 10^{-3} \text{ dpa}$ に相当する。照射により、臨界温度は 18K から 18.5K に上昇した。図 5 に、低温、高磁場中での FST 薄膜の臨界電流がプロトン照射によって大

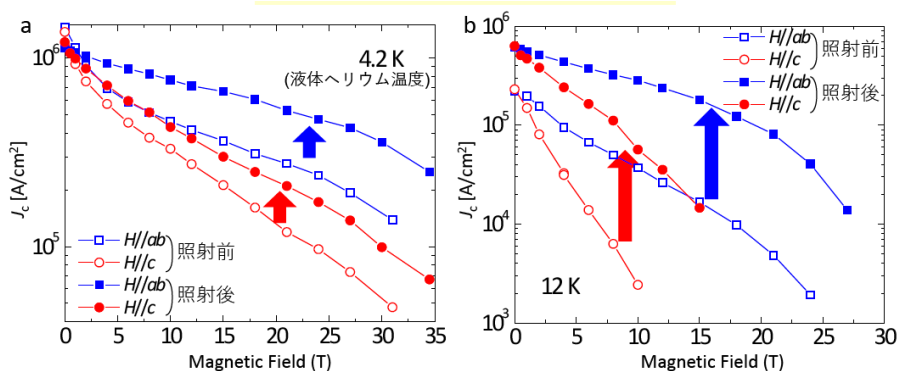


図 5 低温、高磁場中の FST 薄膜臨界電流のプロトン照射による増加。

きく増加していることを示す。このような超伝導特性の照射による向上の原因として、界面効果、FST 層間に存在する余剰鉄原子、格子ひずみ、などが考えられるが、照射前の試料は、非常にシャープな界面を持ち、また余剰層間鉄原子も見られないため、原因は、HRTEM で示されるような (図 6) 照射によって生成された格子欠陥がもたらすひずみ場ではないかと考えられる。同じような臨界電流の増加は 6 MeV の Au イオン照射においても見出されている (ただし、臨界温度は Au イオン照射では低下するようである)。

以上のように、数 100keV-数 MeV といった比較的低エネルギーのイオン照射によって高温超伝導体や鉄系超伝導体の特性の向上が見出されたことは、GeV イオン照射のような大掛かりな巨大加速器施設を使う必要がないという点で、産業界での今後の実用化への可能性を大きく開くものである。尾崎講師は、今後、QST 高崎研の TIARA など、中低エネルギーのイオン加速器を用いた超伝導体のイオン照射改質研究を推進すると聞いている。もともと固体物性が専門の方が照射効果の分野に参入されて研究展開さ

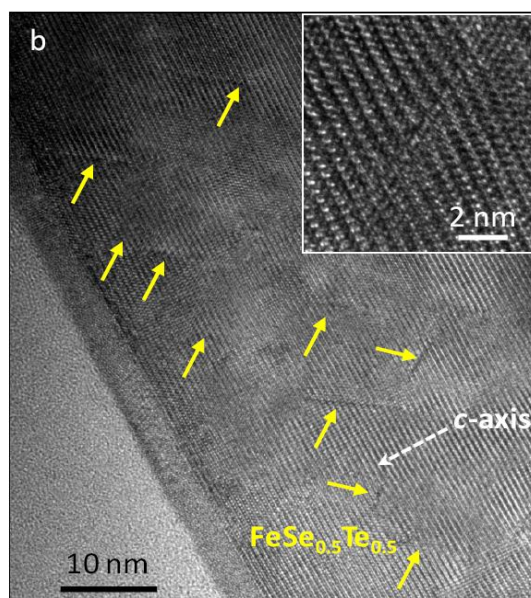


図 6 プロトン照射した FST 薄膜の HRTEM 像。

れることは大変うれしく思われる。今後の研究の進展に大いに期待したい。

(岩瀬彰宏 記)

2. 放射光X線による選択的な電子励起—その物質・材料科学への応用—

日本原子力研究開発機構 馬場祐治

X線は19世紀末に人類が最初に発見した放射線であり、物質への透過性に優れていることから、発見当初から医学における診断に応用されてきた。近年、電子ビームの制動輻射による放射光の利用が広がり、様々な分野で活用されている。馬場講師は、長年、高エネルギー加速器研究機構放射光施設(KEK-PF)や大型放射光施設SPring8を利用した化学反応や構造解析の研究に携わってこられたこの分野の第一人者である。本講演では、X線の発見から放射光誕生に至る歴史を、科学史における著名な出来事と合わせた解説があり、そのあと、従来のX線と比べた放射光の特徴として、強度が著しく大きいこと、指向性に優れていること、赤外域から高エネルギーX線域まで広いエネルギー領域のエネルギー可変であること、偏光ビームとして使用できること、パルス光である、ことなどが挙げられた。さらに、物質を改質する手段として、固体



図1 講演中の馬場講師。

SiCl₄にX線を照射したときの脱離イオン分布

2つの異なる元素(Si, Cl)からできた分子について、それぞれの内殻電子を励起してみた

内の電子を無差別に励起してしまうイオンビームや電子ビームと比較して、「特定の元素(の電子)」を選択に励起できること、「特定の結合」を選択的に励起できること、そして、「特定の向き」を選択的に励起できることが放射光の大きな特徴であることが示され、それぞれの特徴を生かした物質改質や物質分析の実験例が示された。

図2は、固体表面に吸着したSiCl₄分子にSi、ClのK吸収端のエネルギーの放射光を照射した場合の脱離イオンの質量分布を示す。両方で質量スペクトルは大きく異なり、光のエネルギーに依存した元素選択的な分子の分解が起こったことを示している。Si、Clのどちらを励起して

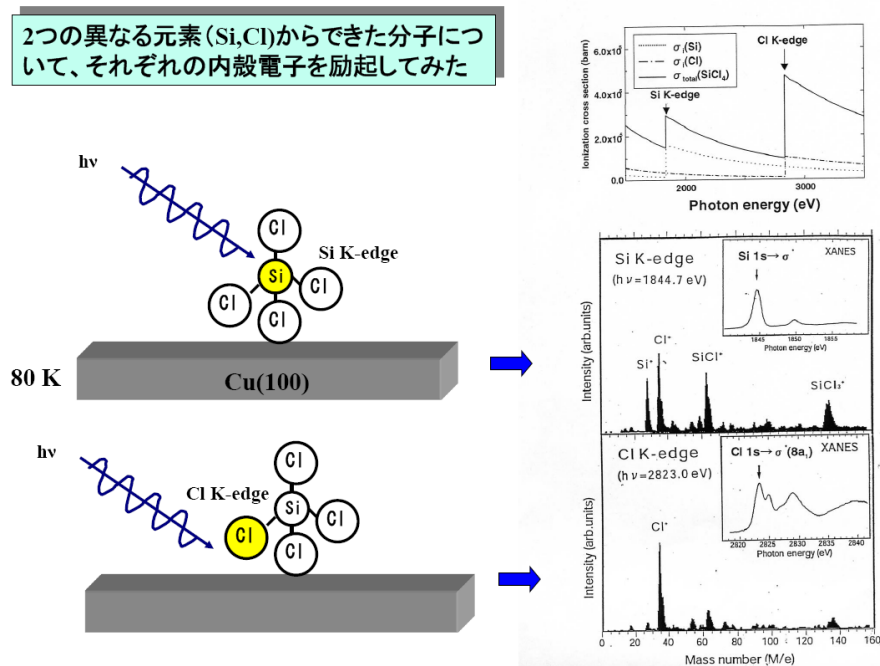


図2 固体表面に吸着したSiCl₄分子の放射光照射による脱離イオンの質量スペクトル

エネルギーに依存した元素選択的な分子の分解が起こったことを示している。Si、Clのどちらを励起して

も同じように分子の分解が起こるように思われるが、Cl の脱離は Cl 1s 電子を価電子帯の空の軌道に励起する共鳴励起エネルギーのみで起こる。この軌道は反結合性が強いため、Si-Cl 間に反発力が生じて選択的解離が起こると考えられる。

次に、「特定の結合」を選択的に励起した実験例を図 3 に示す。チオ硫酸ナトリウム ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) の 2 つの硫黄原子は、-2 価、+6 価と電荷が大きく異なる（したがって吸収端の X 線エネルギーは異なる）。-2 価の S のみを励起すると S+ のみが脱離するが、+6 価の S のみを励起すると Na が脱離する。すなわち、同じ元素でも異なる結合状態の元素を選択的に励起し、特定の結合部分だけを選択的に切断できたことになる。このような放射光の選択的励起を用いて材料表面の化学状態を改質することは応用上も大変興味あるが、例えば、現状での SPring8 の使用料をもとに計算すると、 1cm^2 の面積の表面の 1 原子層を改質するためには 14,000US ドルかかるそうで、まだ現実的とはいえないという評価が示された。

最後に、「特定の向き」を選択的に励起する実験例が示された。この実験では水平偏光した光を用いる。図 4 に示すように、2 原子分子に水平偏光の光を照射した場合、X 線の電場の振動で電子は励起されるが、上図の配置のほうの電子は励起され、下図の配置では励起されない。偏光放射光のこのような性質を利用して、黒鉛の炭素原子を窒素で置き換えた物質の構造を調べた例を図 5 に示す。窒素の K 吸収端領域の X 線吸収スペクトルの入射核依存性は、黒鉛中の炭素と同じ傾向であり、これは、 π 軌道が面に垂直なため、その励起が水平偏光 X 線の垂直入射では消失し、斜め入射で強められることから、黒鉛中の炭素原子の位置に窒素原子が置き換わったことを示す。

S K-edge 励起による $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ の分解・脱離

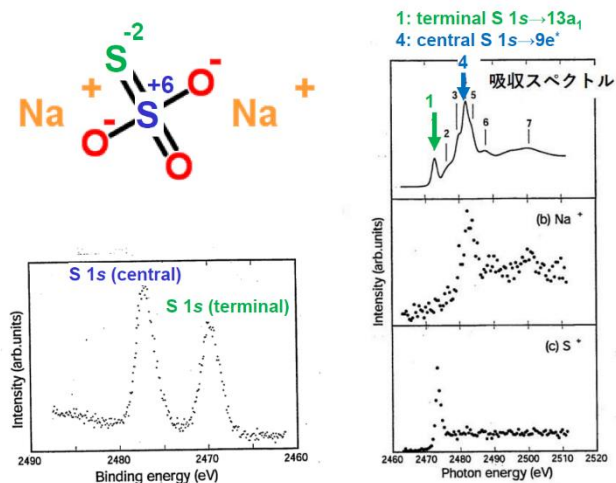


図 3 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 分子に放射光を照射したときの脱離イオンの放射光エネルギー依存性。

二原子分子に X 線を照射したときの吸収(上から見た図)

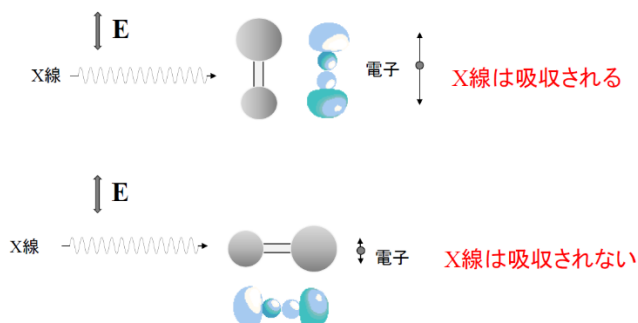


図 4 水平偏光した放射光を 2 原子分子に照射したときの様子。

放射光の強度やエネルギー分解能、マイクロビーム化など、放射光は最近目覚ましい進歩を遂げているようで

明確な入射角依存性

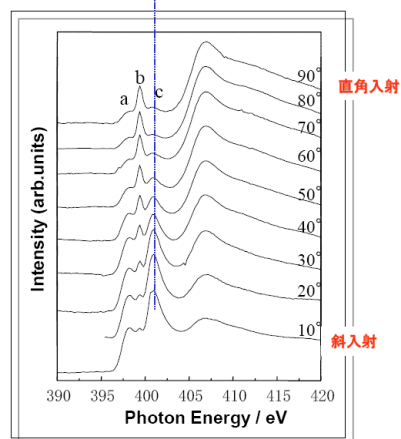


図 5 窒素ドーピング黒鉛の X 線吸収スペクトルの入射角度依存性。

る。このような放射光技術の進化に伴い、電子励起の選択性を用いた放射光の物質表面改質・分析における応用分野がますます発展することが期待される

(岩瀬彰宏 記)

3. HSP90 阻害剤と放射線の併用療法の可能性

量研機構・放射線医学総合研究所 岡安隆一

講師の岡安隆一博士は、コロラド州立大学で博士の学位を取得され、その後も23年余りの長期にわたって米国のいくつかの研究室で研究者として活躍してこられた。

講演の最初に、米国で独立した研究者として渡り歩いたその苦労話を披露された。その貴重な体験談を一番聞いて欲しい学生を含めた若い聴講者が会場に少なかったのは残念であった。さて、岡安博士が本講演で紹介されたのは、放射線と薬剤によるがんの併用療法の可能性を探る研究である。岡安博士が着目したHSP90阻害剤のTAS-116は、放射線による細胞生存率の解析において、がん併用療法に適する薬剤として優れた特徴が2つみられた。1つは、複数のがん細胞でX線の致死作用を増感するのに対し、正常細胞では増感効果が見られない点である。岡安博士は、この現象のメカニズム解明は今後の課題と紹介されたが、この特徴は、放射線と薬剤の併用療法においては理想的



図1 講演中の岡安講師。

な結果であり、今後の活用が期待される。もう1つの特徴は、重粒子線である炭素線との併用においても増感効果を示し、さらにこの場合にも、正常細胞では増感効果を示さない点である。重粒子線のような高LET放射線は、低LET放射線に比べると殺細胞効果が高く、薬剤の併用効果は余り期待されないと予測されるが、それを覆す結果が得られている。TAS-116による放射線致死増感のメカニズムを探るために、放射線誘発DNA 2本鎖切断 (DSB) 数を計測したところ、TAS-116併用により、X線、及び炭素線のどちらの場合でも、被ばく後の細胞あたりのDSB数が明らかに増加していた。このことは、TAS-116が、放射線によって生じたDSBの修復を阻害していることを示唆している。そこで、DSB修復阻害効果について明らかにするために、DSB修復に関わる主要な修復酵素の発現や活性について調べたところ、TAS-116処理は、相同組換えに働くRAD51タンパク質の発現を抑制し、また、非相同末端結合で主要な役割を果たしているDNA-PKcsの発現を抑制することが明らかになった。すなわち、TAS-116は、DSB修復に係る2つの経路のどちらにも抑制的影響を与えることが分かった。さらに、TAS-116の併用は、放射線によるアポトーシスの誘導も増強することが明らかになった。加えて、TAS-116の放射線増感作用は、腫瘍を移植したマウスを用いた動物実験でも観察された。以上のように、本講演で岡安博

士が紹介されたHSP90阻害剤のTAS-116は、がんの放射線併用療法のひとつとして、大変有望であることが明らかになった。これらの一連の研究成果を元に、さらに毒性が少なく、がん細胞への選択性の高い薬剤が開発されていくことを期待したい。

(児玉靖司 記)

4. 高強度低速陽電子ビームライン開発と材料研究への応用

京都大学複合原子力科学研究所 木野村淳

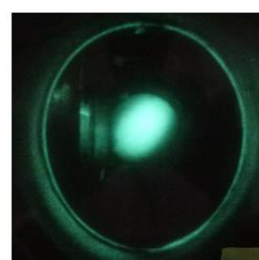
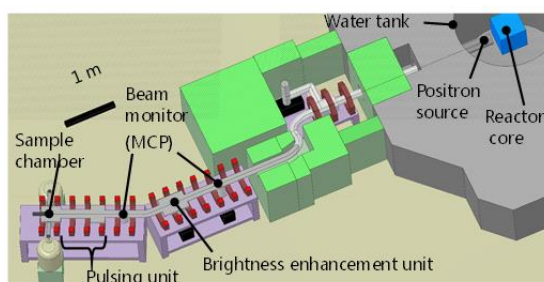
陽電子は電子の反粒子であり、最も容易に得られる反粒子である。放射性同位元素の β^- 崩壊で電子が放出されるが、同様に β^+ 崩壊で陽電子が放出される。電子で出来ることは基本的に陽電子で可能であるが、陽電子の特徴を生かしたものとして、癌の診断に用いられるPET(Positron Emission Tomography)がよく知られている。講演では①陽電子について(陽電子計測)、②低速陽電子ビームとその発生制御方法、③照射材料の測定例、④ 高強度低速陽電子ビームの応用、⑤ 高強度低速陽電子ビーム将来展望、⑥まとめが行われた。

まず材料中の欠陥や添加元素の分析手段として陽電子消滅法とドップラー広がり測定が紹介された。従来多くの場合はNa-22等を用いた β^+ 崩壊で発生する陽電子が用いられるが、Na-22の場合0.2MeVにピークをもつブロードなエネルギー分布を持つ。陽電子のエネルギーを一定かつ可変にすると、打ち込み深さを表面から数 μ メートルまで任意の深さに制御でき、薄膜試料や表面分析可能となる。強い陽電子ビームを放射性同位元素で得るためには、非常に数量の多い放射能が必要となる。陽電子の発生方法としては、 β^+ 崩壊でなくても電子と陽電子の対生成を起こすことが可能な1.022MeV以上のガンマ線があれば原理的に可能である。そのためガンマ線の発生のために、数10MeV以上のエネルギーの電子線加速器の制動輻射が多く用いられる。

一方原子炉の炉心は非常に高いガンマ線場である。この



図1 講演中の木野村講



MCPスクリーンの発光を用いたビーム調整の様子



Thermal power	Positron Flux (e^+/s)
1MW	8.0×10^5
5MW	2.4×10^6

図2 陽電子ビームラインの性能確認: ビーム発生 K. Sato et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 342 (2015) 102.

ガンマ線を利用した高強度陽電子源がミュンヘン工科大FRM-IIやデルフト工科大RID等で稼働している。京都大学複合原子力科学研究所の5MW研究用原子炉を用いた低陽電子ビームラインの建設が平成24年より開始した。図2にその概要を示す。炉心に接してWを用いた電子対生成部とエネルギーを熱エネルギーまで下げる陽電子モデレータ部がある。その後電場と磁場を用いて陽電子を炉室へ輸送する。ビームの高輝度化とパルス化を行った後、試料チャンバーに導かれる。

平成18年度夏より本格運転が始まる予定である。連続ビームだけでなくパルスビーム化もできるので、寿命-運動量相関測定 (AMOC, Age-momentum correlation) も可能である。これは陽電子消滅の寿命測定 (PAL) と消滅 γ 線ドップラー幅測定を組み合わせた測定手法である。陽電子の消滅相手の核内電子の運動量が分かるので、消滅サイトを知ることができる。

この装置を用いて可能な研究の紹介として、講師が産総研の低速陽電子ビームラインを用いて行った、イオン照射を行いながら、電子加速器による高強度陽電子ビームでの陽電子寿命測定について述べた。試料はSi基板上の $2\mu\text{m}$ の熱酸化 SiO_2 膜である。nsオーダーの寿命値を示すo-Psの強度は照射損傷を受けると低下することを利用して、150keVのArイオン照射後のo-Psの寿命変化を測定している (図3左図)。ArイオンビームをON/OFFによる変化を図3右図に示す。この変化より構造緩和に関する知見を得ている。

最後に将来の実験構想として、京大複合研の陽電子ビームラインを用いた装置の説明があった。陽電子ビームラインにイオン加速器を付けて材料中の過渡的な照射効果を研究する意欲的なものである。京都大学の陽電子ビームラインの建設に協力していただいた、日本陽電子科学会のメンバーを中心とする研究協力者への謝辞で講演が終了した。

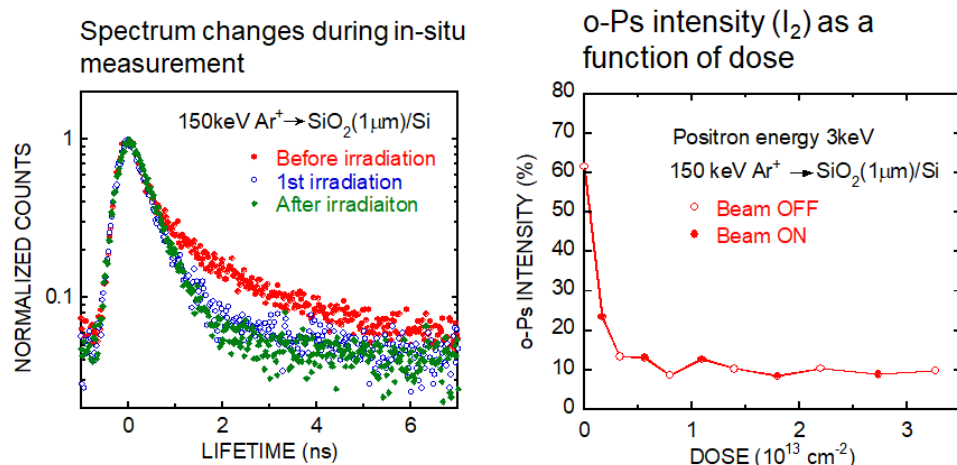


図3 SiO_2 への照射とその場測定、A. Kinomura et al., J. Phys. Conf. Ser. 443 (2013) 012043。

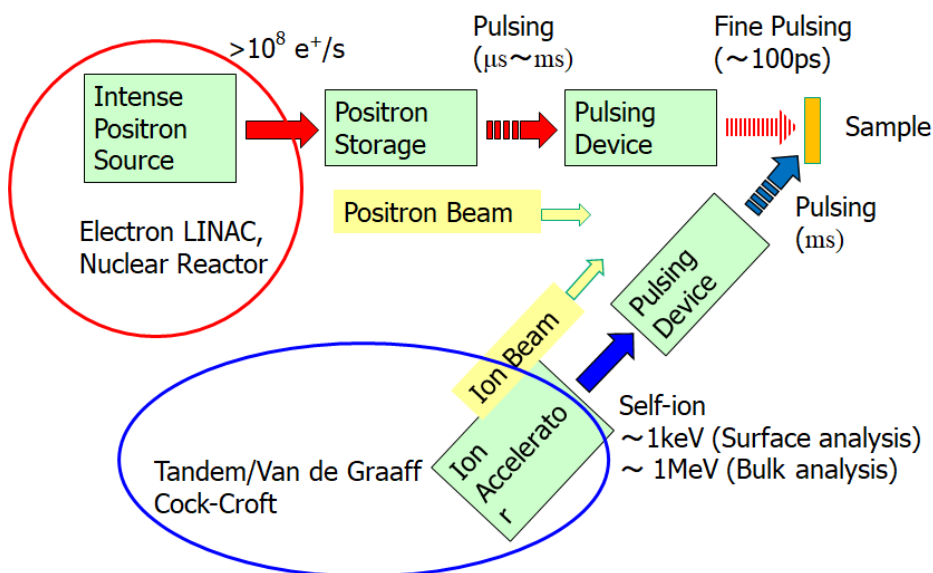


図4 京都大学複合原子力科学研究所の陽電子ビームラインを用いた、将来の実験構想。