

第 59 回放射線科学研究会 聴講記

標記研究会は平成 28 年 4 月 15 日（金）午後 1 時半から 5 時半まで住友クラブにおいて、金子忠昭章博氏（関西学院大学）、西内 満美子氏（量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所）、間久直氏（大阪大学）、須藤鎮世（就実大学名誉教授）の 4 名の講師をお招きして開催した。座長は前半 2 件を、岩瀬彰宏氏（大阪府立大学）後半 2 件を児玉靖司氏（大阪府立大学）にお願いした。なお、講演会終了後、講師の先生を囲んで技術交流会を行った。

1. 結晶表面から深さ 1nm 以内の結晶配向情報を検出する走査電子線顕微鏡観察

関西学院大学 理工学部 先進エネルギーナノ工学科 教授 金子忠昭

走査型顕微鏡（SEM）は、材料表面の評価を高倍率で手軽に観察するための汎用的な手段であるが、本講演では、SEM 観察の基本的機能であるコントラスト像の生成要因に関して、装置側からのアプローチではなく、標準試料の機能向上に焦点を当て、材料最表面の結晶配向情報を検出することを旨とした、大変ユニークな研究成果を紹介いただいた。

講演では、まず本研究に用いた標準試料である SiC 単結晶についての説明があった。SiC 単結晶には 3C, 4H, 6H など、同一の化学的特性を維持したまま積層周期の異なる多くの結晶多形が存在する（図 2 参照）。4H では 4 分子層周期、6H では 6 分子層周期で積層する。深さ情報の検知マーカーに用いられるのは (0001) 面において半周期ごとに現れる積層方向の折り返し点である（表面からの最初の検知マーカーは、4H の場合 0.5nm、6H の場合 0.75nm）。さらに、2 種類の積層方位の判別は、折り返し構造をもたない 3C バルク結晶を参照することで決



図 1 講演中の金子講師

定されること、SiC には Si 面、C 面の 2 種類の極性面が存在し、化学的特性をも考慮した検証が可能であること、などから、SiC 標準試料は、SEM コントラストに定量性を与えるという重要な機能を果たすことになる。

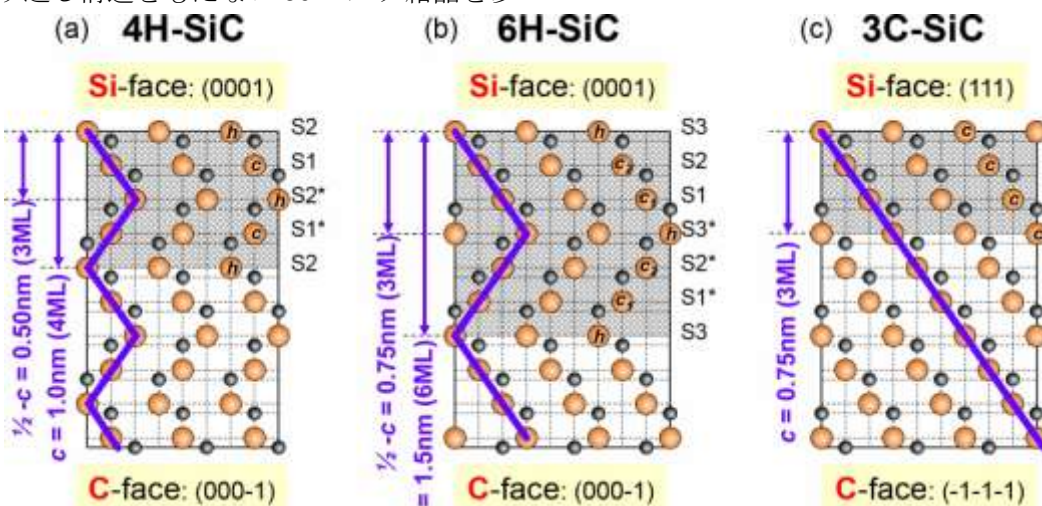


図 2 主な SiC 結晶多形およびその結晶構造

次に、SiC 基板に、標準試料として理想的な表面を得ることを目的に行った試料開発法について説明があった。これは、NEDO 事業の一環として装置や部材から講演者のグループが独自に開発したもので

ある。ここで用いたのは、2000℃領域で発現する熱化学エッチング法であり、その特徴は、SiC 基板を反応容器内に設置し、その環境自体を Si 平衡蒸気圧で満たすことによってエッチング機能を発現しようとするものであり、反応容器を構成する部材自体の化学的特性を変えるだけで、従来の非平衡プロセスにはない優れた表面制御機能を持つ方法である。この新たな超高温技術により、硬脆材料であり、理想表面を得ることが困難であった SiC において、SEM コントラスト検証に十分耐えうる単一基底面テラスの形成が可能になったということである。

作製した SiC 標準試料の表面に対し、1keV 以下の電子線を積層方向とほぼ平行に入射させて得られる反射電子強度から、結晶表面との傾斜、回転の度合いに応じて極めて再現性の良いプロファイルが得られた。これらの結果から、表面からの反射強度を測定し、上記プロファイルと照らし合わせることによって表面直下の積層配向が何分子層からできているのかが判別可能となる。また、表面の異なる領域からの反射強度の差を観測することにより、積層配向の乱れや、らせん転位や刃状転位などの結晶欠陥を SEM コントラスト像から直接観察できる (図 3 参照)

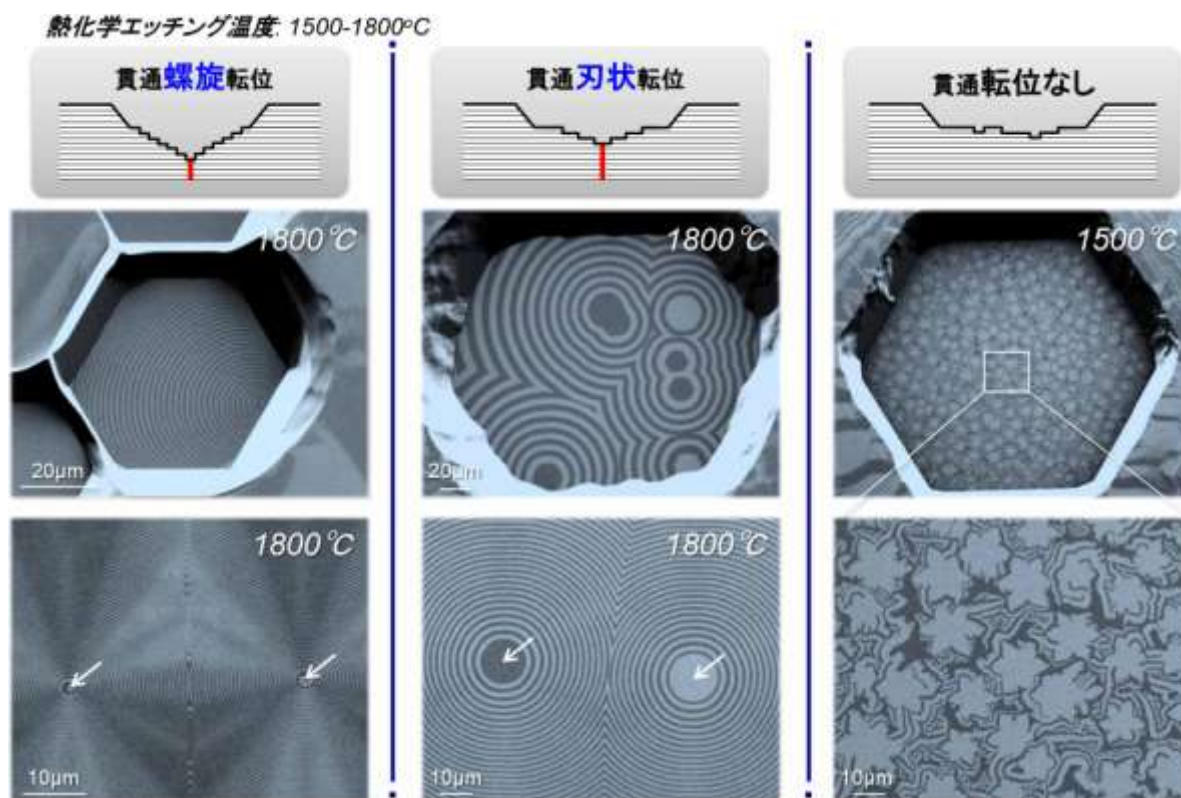


図 3 熱化学エッチングによって 4H-SiC 表面に現れる結晶欠陥 (貫通転位) 起因のステップ・テラス構造の観察例

以上のように、SiC 単結晶表面を標準試料として用いることで、材料の表面結晶構造を簡便に取得することができるようになり、現在、NEDO 事業として SiC ウエハの表面状可視化検査装置の開発を行っているとのことである。

本研究は、従来の装置側からの技術開発とは異なり、標準試料作製法の開発というアプローチから SEM 技術の新たな展開を図るものであり、今後、様々な実用材料においても応用可能な、表面結晶の情報を得る新たな方法として、大いに期待できる。

(岩瀬彰宏記)

## 2. 光で鉄の原子核を光速の 20%程度まで加速

量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学研究部門  
 関西光科学研究所 光量子科学研究部  
 高強度レーザー科学研究グループ 上席研究員 西内 満美子

レーザー光は、時間的・空間的に可干渉性が高く、エネルギーを時間空間的に集中できるという、通常の光とは異なった特徴を持つ光である。従来のレーザーは、エネルギーが小さかったことやパルス幅がDC 的であったことから、レーザーを物質に照射しても、その変化は僅かなものであった。しかし近年、レーザー技術の進歩により、エネルギーが格段に上がるとともに、パルス幅もフェムト秒にまで短縮できるようになった。これによりピーク強度がペタワット級の超高強度レーザーの利用が可能になった。本講演では、この超高強度レーザーによる高エネルギー・多価イオンの発生技術開発の現状を紹介いただき、核物理学分野など、将来における応用の可能性について話していただいた。



図1 講演中の西内講師

まず、レーザーを物質に照射することによって、なぜ高エネルギー多価重イオンが発生するのか、そのメカニズム (図2 参照) について解説いただいた。固体薄膜に高強度レーザーを照射すると、レーザーによる電離過程によって表面にプラズマが形成されて電子が原子の外に履き出され、レーザーの電磁場を感じてレーザー方向に集団的に加速を受けることになる。この時に電子が持つ運動エネルギーは約 10MeV にも達する。これら高速電子は、ターゲットの裏面 (照射面と反対側の面) から真空中へと逃げ去り、その結果、ターゲットはプラスにチャージアップする。このプラスにチャージアップしたターゲットと、逃げ去った電子群の間に作用する強い電荷分子電場が形成され、この電場に曝されたイオンは効率よく多価電離され高エネルギーにまで加速されることになる。そして、このような高エネルギー多価重イオン加速法の利点をまとめて述べられた。それは以下のようなものである。1) コンパクトな重イオン源が可能、2) フェムト秒内の多価イオンの生成・加速、3) 照射ターゲット材を変えるだけであらゆるイオンビームの加速可能、4) ピーク電流が数 10 kA におよぶ大電流イオンビームの生成、5) イオン源は点源とみなせるため、 $10^{-4}\pi$  mm mrad という横エミッタンスを持つ良質ビームが得られる。一方欠点もあり、それは従来の加速器から発生するイオンビームのように単色ビームではなく、エネルギーの広がりを持つことである。

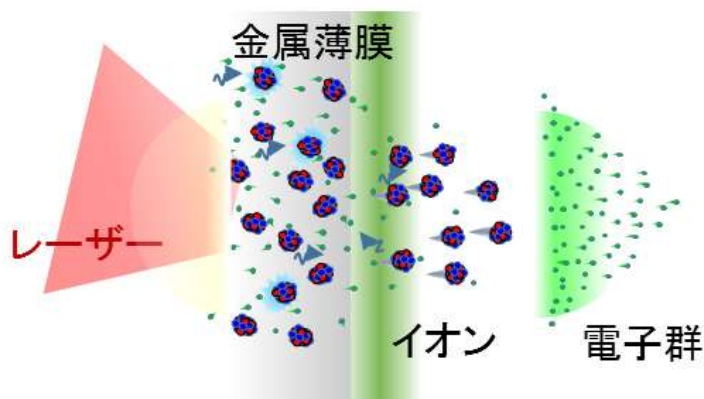


図2 レーザー駆動多価重イオン加速機構

次に、量子科学技術研究開発機構 (QST) ・関西光科学研究所において現在行われている高強度レーザーを用いた重イオン生成・加速の研究開発に関する紹介があった。QST 関西研では、高強度パルスレー

ザーJ-KAREN を用いたイオン加速研究がおこなわれている。このレーザーシステムは、ターゲット上に10Jのエネルギーのパルスをもつ20フェムト秒、 $3\mu\text{m}$ という極小時間空間に絞り込み、 $10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$ という世界最高レベルの集光強度を誇る装置である。重イオン加速実験では、 $0.8\mu\text{m}$ のアルミ薄膜基板裏面に、加速したい原子（今の場合は鉄）を分布させたものをターゲットとして用い、多価電離された高エネルギーの鉄イオンの生成加速を確認した。重イオンの検出にも工夫を凝らし、重いイオンの検出に適しているポリイミドを検出材料とした固体飛跡検出器を何枚も重ねて、加速された鉄イオンのエネルギーと個数を決定した。その結果、加速された鉄イオンの個数は、 $10\text{--}16\text{ MeV}/u$  ( $560\text{--}900\text{GeV}!!$ ) 領域で、 $10^6$  個/1ショット以上であることが明らかになった。さらに、湾曲型X線結晶分光器による手法を用いて鉄イオンの価数を調べた結果、電子が1個、あるいは2個だけ残された高電離状態の多価イオン ( $\text{Fe}^{+24}$ ,  $\text{Fe}^{+25}$ )

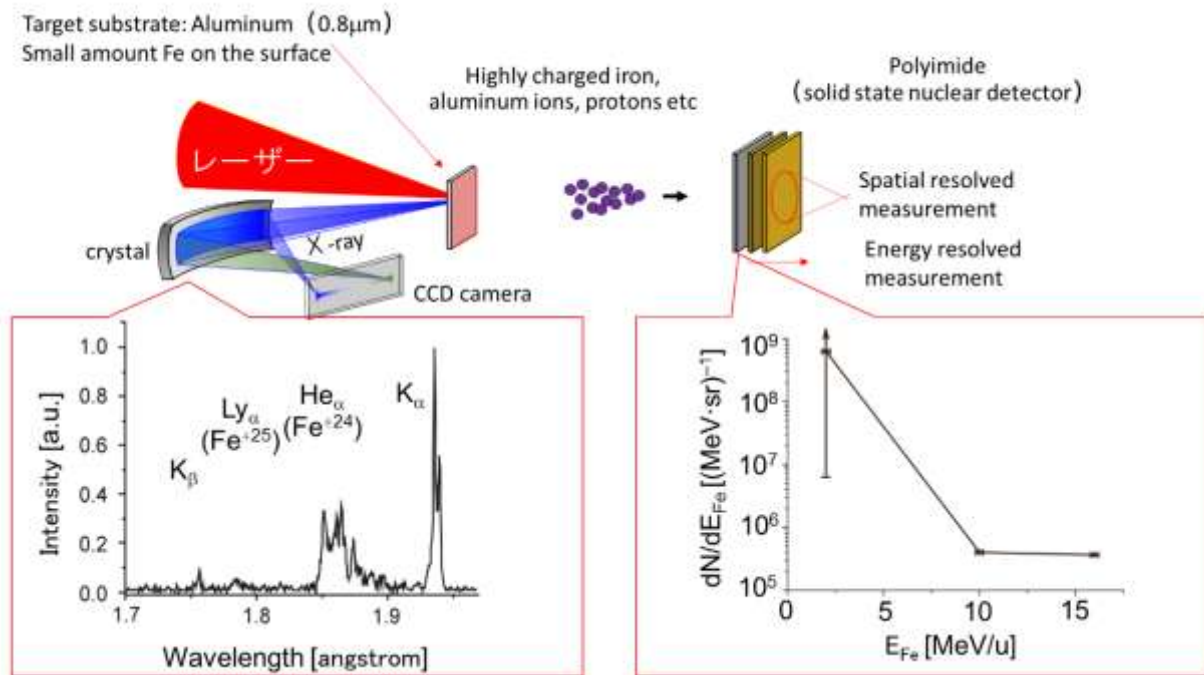


図3 J-KAREN レーザーによる多価高エネルギー鉄イオン加速実験

が得られていることが確認された (図3)。

これらの実験結果を踏まえ、講演では、レーザー駆動型イオン源を、核物理実験や RI ビーム加速器実験に応用する構想を話された。現在、理研などでは、天体核物理などの研究を行うため、大型の RI ビームファクトリーを用いた研究がおこなわれている。レーザー駆動型重イオン源を利用できれば、従来よりもはるかに小型の加速器システムを用いて、高エネルギー多価イオンビーム、あるいは不安定核ビームの利用ができるようになるのである。講演では触れられなかったが、高エネルギー重イオンビームは、がん治療においても多く利用されてきており、医療分野でも、本レーザー技術の応用が考えられる。実用までには、エネルギーの単色化や鉄以外のイオンの加速など、開発すべき点はいろいろ残されているようであるが、将来に向けた広い分野での応用のため、研究の発展を大いに期待したい。

(岩瀬彰宏記)

## 3. レーザーを用いた低侵襲な診断・治療技術の開発

大阪大学 大学院工学研究科<sup>1</sup>、大学院生命機能研究科<sup>2</sup>、  
大阪大学国際医工情報センター<sup>3</sup>  
准教授 間 久直<sup>1</sup>，教授 粟津 邦男<sup>1, 2, 3</sup>

単色光源であるレーザーは、分子の光吸収ピークに波長を合わせることで、特定の分子のみにエネルギーを吸収させることができる。これを利用すると、正常な組織に低侵襲な診断・治療を行うことが可能になる。なかでも、波長 2~20  $\mu\text{m}$  程度の中赤外線は、分子内部の振動と共鳴する波長領域である。様々な生体分子の中で、ある特定の分子のみに選択的にエネルギーを吸収させることができるため、正常組織に損傷を与えずに、病変部のみに対する選択的な治療が可能となる。また、生体組織がどの波長を強く吸収するかを調べることによって、組織の診断を行うことも可能である。このような背景のなか、近年、非線形光学



図 1 講演中の間講師

技術の一つである差周波発生 (DFG) を用いた高出力の中赤外波長可変レーザーを用いた動脈硬化症治療への応用が試みられている。動脈硬化治療では、正常動脈に低侵襲であり、病変部を選択的に除去可能な技術が求められる。講演は間氏により行われた。彼らのグループは、5.75  $\mu\text{m}$  の中赤外線レーザーを用いて、in vitro レベルで動脈硬化病変部の選択的除去が可能であることを示した。さらに現在は、量子カスケードレーザーを光源とし、中空光ファイバーを治療用カテーテルに用いた治療装置の開発を進めているとのことである。胆石も中赤外線レーザーを用いた治療が可能であるが、ヒトの胆石は患者ごとに主成分が異なる。そこで、間講師らは中赤外波長可変レーザーを用いて、胆石の吸収スペクトルに最適な波長レーザーにより胆石破碎を行う診断・治療システムの開発を進めている。実験の結果、DFG レーザーの波長を胆石の吸収が大きい波長に合わせることで、より低いパワー密度でも周囲の組織に低侵襲で胆石を破碎できることが明らかになった。しかも、破碎片は、数  $\mu\text{m}$  程度まで微小化されていることも分かった。さらに、早期消化管がんに対して行われる内視鏡的粘膜下層剥離術 (ESD) において、電気メスの代わりに炭酸ガスレーザーを用いる安全な手技を開発した。ブタを用いた実験で、筋層に低侵襲に粘膜層を選択的に切開可能なこと、粘膜下層を電気メスと同等に剥離可能なことを示した。現在、装置の実用化を目指しているとのことである。一方、光を利用したがん治療法として光線力学治療 (PDT) が知られている。これは、がんを選択的に集積させた光感受性物質に光を照射して発生する活性酸素種により、がん細胞を選択的に死滅させる低侵襲な治療法である。講師らは、光感受性薬剤を用いた PDT において、LED がレーザーの代替になり得ることを示し、さらにマウス膀胱がん細胞に対して、赤色 LED に比べて緑色 LED では一重項酸素発生量が多く、細胞殺傷効果も大きいことを明らかにした。

本講演により、中赤外線レーザー、あるいは LED を用いた新しい低侵襲な診断・治療法が画期的な成果をあげつつあることがよく分かった。このような医工連携研究分野は、今後ますます進展が期待される分野であるとの強い印象を受けた。

(児玉靖司記)

#### 4. 捏造された直線閾値なしモデルと進化の過程で獲得されたホルミシス

就実大学 名誉教授 須藤 鎮世

放射線による生体への影響に関する講義では、「直線しきい値無しモデル」が放射線による発がんを考える際の基本であると教えられる。本講演のタイトルは、その基本的な考え方が“捏造されたもの”であると断言している点で刺激的である。では、捏造されたとする根拠はどこからくるのか— 講師の話は、ショウジョウバエにX線による遺伝子突然変異が生じることを示したマラーの実験（1927年）まで遡る。マラーの実験結果は、直線しきい値なし（Linear No Threshold: LNT）モデルに合致していた。1946年にこの研究成果でノーベル賞を受賞したマラーの影響力は絶大であり、米国科学アカデミー（NAS）も、LNTモデルを支持した。米国科学界への影響力も大きいロックフェラー財団の思惑とも一致し、米国科学アカデミーの「電離放射線の生物影響に関する委員会（BEIR）」はLNTモデルを支持する考えを示した。さらに、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）がBEIRの資料を採用し、国際放射線防護委員会（ICRP）が、この考え方をICRP勧告に取り入れ、現在に至っている。講師は、広島・長崎における被爆者の生涯調査（LSS）もLNTを支持しないと主張する。LSSは被ばく線量推定に残留放射線を考慮していない。このことが推定被ばく線量を過小評価することになり、それはがんリスクの過大評価を意味することになる。固形がんにおける線量効果関係をみても、低線量域での直線性は成立しがたく、しきい線量の設定が可能であると主張する。

さて、ここまでの講演の感想として、歴史的背景から、LNT仮説が科学的に正しいことが立証されて放射線防護の原則になった訳ではないことはよく示されたと思う。LNT仮説こそが、「放射線量がゼロでないと安心できない」という一部公衆の極端な“放射線恐怖症”の元になっていることも否定できない。しかし一方で、「しきい値あり仮説」を採用することは、放射線防護において、現状以上の混乱を引き起こすであろうことは容易に想像される。「科学的な正しさ」にまだ判定を下せないならば、安全サイド（LNTモデル）に立って放射線防護体系を構築することは、防護の運用面では賢明な選択であろう。したがって、今後も科学的議論の継続は望まれるが、LNTモデルに内包される科学的根拠の脆弱性が現状の防護体系を変更するだけの理由にはなり得ないとの印象である。

一方、低線量域の放射線に被ばくすることにより、生体反応に対する刺激効果（ホルミシス）が得られるという報告は数多くあり、本講演でも、低線量被ばくにより、テトラヒメナの増殖がよくなる、ショウジョウバエの突然変異頻度が自然頻度よりも低下する、マウスの寿命が延びる、家の中のあるラドン濃度域では肺がんの死亡者数が減少する等の報告が紹介された。また、インド・ケララ地方の高放射線バックグランド地域住民は、対照地域住民よりがん死亡率が低いことはよく知られている。しかし、これらは全て観察された現象の報告に止まっており、低線量放射線被ばくによる生体影響のメカニズムに関する研究の推進は、今後の大きな課題として残されている。本講演は、現状の放射線影響に関する定説に疑問を呈し、その根拠を歴史的観点も含めて解説している点で貴重であり、これから放射線影響学を学ぼうとする若い世代には特に刺激的であったと思う。

（児玉靖司記）



図1 講演中の須藤講師