

## 「量子ビーム利用の可能性について」

平成 21 年 2 月

平成 27 年 12 月改訂

日本原子力学会

加速器・ビーム科学部会

「量子ビーム」はいわゆる「放射線」に類似した概念ですが，我が国で独自に導入されたもので，欧米には対応する言葉がありません。専用の装置から得られる高強度で高品位な光量子・放射光などの電磁波や，中性子線，電子線，イオンビームなどの粒子線を意味します。アルファ線，ベータ線，ガンマ線など従来の古典的放射線よりも広範囲の，方向性を持った「ビーム」を広く包括する概念です。放射性同位元素から放射線をビーム状に取り出せば物理的実体としては量子ビームと同じものになりますが，通常「量子ビーム」と言えば人工的にビームを発生する装置である加速器などから直接／間接に供給される様々なビーム，あるいはこれらの一次ビームを何らかの標的に当てて得られる二次ビームのことを言います。ビームを形成する粒子の種類は上記のように非常に多様であり，またこれらの粒子のエネルギーは低温の熱エネルギーから原子核・素粒子実験で使用される超高エネルギーまで広範囲に及んでいます。量子ビームと加速器は，いわゆる原子力が誕生する少し前から基礎科学，特に物理学の研究のツールとして発展してきました。しかし近年は加速器やその周辺技術の進歩により，産業，医療などにも応用が拡大しており，更なる展開が期待されています。

量子ビームは「エネルギー」の流れであると同時に，粒子の種類によっては「物質」の流れでもあります。また，一般にエネルギーを高くすると透過力が強くなってきます。これらを利用することで基礎科学から産業，医療にわたる非常に広い分野で応用が可能です。まず対象とする標的に照射することによってエネルギーとして注入し，標的に様々な変化を与えることができます。エネルギーや粒子の種類を選ぶと，狙った深さに狙っただけのエネルギーを与えられます。このエネルギーにより内部で化学反応を誘起したり，急激な温度変化によって材料の性質を変化させることもできます。このような材料加工の例として，自動車用タイヤの材料などに電子線を照射し，性質を改善する技術があげられます（図 1）。加熱や他の物質との化学反応によっては実現できない高度な加工が可能です。また有害な物質に照射して無害化することも可能です。



図 1：電子ビームを照射して作られた自動車用ゴム，プラスチック製品  
 (左) ラジアルタイヤ (中) エンジンルームの耐熱性電線 (右) フロントパネル

一方、人体に照射すれば体内の奥にあるガンを選択的に破壊できます。また医療機器などに照射すれば滅菌に使えます。また食品に照射することで滅菌や保存性の向上が可能です。加熱や化学物質を加える必要もなく、非常に安全な処理が簡単にできます。ビームの種類とエネルギーを選べば食品が放射能を持つ心配もありませんが、ガンマ線によるジャガイモの発芽防止処理以外は我が国ではまだ認可されていません。その他の生物学的作用の応用としては、作物の品種改良があります。

従来の X 線やガンマ線に比べ、加速器からの高速重イオンビームは高いエネルギーを作物の遺伝子に局所的に与えることができるので、今までにない突然変異を誘発する方法としての開発も進んでいます（図 2）。小さな細胞の狙った場所に高エネルギーのイオンを一個だけを照射し、影響を調べる研究も始まっています。これには近年のビーム制御技術の進歩が大きく貢献しています。

また、意外かも知れませんが今日の IT 産業の急速な発展には量子ビームと加速器の技術が大きな役割を果たしています。IT 技術に不可欠な半導体素子内部の微細なパターンの回路は、通常、高精細なネガフィルムに相当する原版を使って写真の焼き増しをするように作られます。これは大量生産に適しており、この原版を作るとき、非常に細く絞った電子線によって回路パターンの描画が行われます。光では波としての性質が出るため十分なサイズに絞ることが困難なためです。



ダリア（美榛）  
財団法人広島市農林水産振興センター

バラ（ブライダルファンタジー）  
神奈川県農業技術センター

図 2：重イオンビーム照射で誘発した花卉植物の変異体  
(写真提供：理化学研究所 仁科加速器研究センター 生物照射チーム 阿部知子先生)

一方、必要とする原子のイオンを「物質」として材料標的に打ち込むことにより、他の方法では不可能なところに望みの物質を注入できます。半導体デバイスの製造においては、半導体基板に微量の不純物元素を狙った量だけ、狙った深さに注入する必要があります。不純物を外部から熱拡散によって注入することも可能ですが、より集積性の高い場合には制御性に限界があります。現在では加速器からのイオンを直接注入することで、これを実現しています。もちろん、これら以外にもエネルギーの側面、物質としての側面の両方を同時に利用した様々な応用が可能です。

量子ビームを標的に照射すると、しばしば標的から光量子を含む二次粒子が発生します。またエネルギーが十分あればビームはその標的を通過します。これらのエネルギー、強度、種類を測定すれば従来の化学分析などでは実現できなかった高感度で精密な各種の組成・構造分析ができ

ます。人体に X 線を照射して診断を行う手法は説明の必要がないほどに普及しています。逆に調べたい試料の一部をイオン化して加速器で加速し、ビームにして放射線検出器で測定すれば、一粒ずつをカウントできるので、原理的に原子一個からの超高感度分析も可能です。

このように、広義の原子力である量子ビームと放射線の技術は今や様々な分野で不可欠なツールになっています。あまり知られていませんが、最近の調査によると、実はこれらの経済規模は現時点で原子力発電のそれとほぼ同じであることが分かっています。最近では、量子ビームを用いて福島原発事故への取り組みも行われています。これらの量子ビームを使った原子力発電に直接関係のない医療・農業・工業応用の研究も原子力の重要な一部として社会的に認知されています。一方、将来に向けて加速器からのビームを直接原子力／核融合のシステムに組み込んでエネルギーを発生させたり、厄介な放射性物質をより害の少ないものに変える技術の研究開発も進められています。上記の様々な事例のうち、いくつかは放射性同位元素からの古典的「放射線」でも実現不可能ではありません。しかしビームに方向性を与えられる、強度が大きい、エネルギーと粒子の種類が制御できる、オン・オフが可能などの点で格段に優れているため、多くの場合、加速器から得られる量子ビームの利用が不可欠です。ただし、加速器は一般に大型で高価であるので、常にコストを考えねばなりません。加速器はその内部で高電圧を発生させ、その電場で電子、イオンなどの電気を帯びた粒子（荷電粒子）を加速します。装置の種類によっては磁場を使って誘導電場を発生させ、これを加速に使うこともあります。これらをそのままビームとして取り出して利用できますが、光量子、中性子などは電気を持っていないので加速器では直接加速できません。そこで、加速器でいったん適当な荷電粒子を加速して標的に当てるなどの方法でこれらの非荷電粒子を二次的に発生し量子ビームとして取り出します。

我が国の大型放射光施設「SPring-8」(<http://www.spring8.or.jp/ja/>)、大強度陽子加速器施設「J-PARC」(<http://j-parc.jp/>)、X線自由電子レーザー施設「SACLA」(<http://xfel.riken.jp/index.html>)はそれぞれ高強度で幅広いエネルギー範囲の光量子、中性子ビーム、および高強度 X 線レーザーを発生できる世界有数の装置であり、これらを用いた各種材料、タンパク質などの精密構造解析により、新材料や新薬の開発が大きく発展することが期待されています。近年の著しい技術の進展により、得られる量子ビームの範囲はさらに拡大しつつあり、放射性同位元素のイオンのビームまで利用できるようになっています。また、これらを照射・測定する際の空間的・時間的な精度も飛躍的に向上しつつあります。

量子ビームの応用は多様性に富んでいるため、小型の加速器から得られる低エネルギーのビームで十分な場合もありますが、これらの小型装置でも通常は一部屋を占有してしまうのが現状です。一方で高エネルギーのビームを必要とする場合も多く、この場合は非常に大きなスペースが必要で、コストもかかります。特殊な大型加速器には直径が数キロメートルに達するものがあります。例えば、現在深部ガン治療に用いられる高エネルギーイオン加速器は、体育館にやっと入るくらいの大きさになってしまいます。これがテーブルに載る程度に小型化できれば、どこの病院にも設置することができ、医療に革命的なインパクトをもたらします。通常電気工学的方法で電極間に発生できる電圧（電界）には限度があるので、プラズマやレーザーの超高強度の電場を利用して加速を行い、小型で高エネルギーのビームを得るための基礎研究も進められています。加速器は電気製品の一つなのですが、物理実験用の研究装置として発展してきたこともあり、一般に家電品と比べるとまだ信頼性は高くありません。医療・産業応用が今後進展するに従い、小型・

低コスト化はもちろん、信頼性やエネルギー効率の向上も極めて重要です。いずれにせよ量子ビームの利用拡大は加速器技術の発展と表裏一体であり、両者は緊密な連携のもとに並行して進めねばなりません。

以上のように、量子ビームは今や我々の生活になくてはならないツールとなり、未踏の基礎研究領域の開拓や全く新しい産業分野の創生にも貢献するようになってきました。