

## 巻頭言 Preface

量子放射部長 小林 直人  
N. KOBAYASHI

20世紀の科学，特に物理科学においては量子論と相対性理論が新たな人類の知の世界を切り拓いたと言える。言うまでもなくそれは知の世界だけではなくトランジスターやレーザーなどの豊潤なテクノロジー群を生み出した。そして加速器科学や光科学を基盤とする量子放射の発生と利用もまさにこの量子論や相対論の大きな成果と位置づけることが出来る。

高エネルギーの電子加速器の開発とその利用は今世紀の半ばに位相安定性の原理が見出され，米国スタンフォード大学で1 GeVの電子線形加速器が建設されたのを大きな契機とし，その後原子核・素粒子の実験には不可欠の装置となっている。一方シンクロトロン放射 (SR) は高エネルギー電子が磁場で曲げられる時に放射される鋭い指向性のある光であり，やはり今世紀半ばに人工のSRが観測されている。このSRは高輝度・高指向性光源としての有用性が注目され始め，世界的には1970年代くらいからSR専用の蓄積リングが建設されるようになってきた。

当所においても1979年のつくば移転を機に，1980年500MeV電子線形加速器 TELL，1981年0.6GeV (後に0.8GeV)電子蓄積リング TERAS，1986年小型蓄積リング NIJI-I，1989年同 NIJI-II，超伝導小型リング NIJI-III，1991年自由電子レーザー専用小型蓄積リング NIJI-IVの建設・稼動を行い，産業応用を念頭においた小型SR装置群の開発とその利用研究を行ってきた。また1985年頃からは高エネルギー電子を励起源とした超低速パルス陽電子線源の開発を行い，高精度の物性評価技術の開拓を行ってきた。これらの新たな量子放射装置を用いて，現在紫外域自由電子レーザー発振技術，レーザーコンプトン散乱によるエネルギー可変高エネルギーフォトン発生・制御技術，超低速パルス陽電子発生・利用技術などの新たな量子放射源技術，シンクロトン放射利用標準計測技術など高エネルギー電子を利用したさまざまな技術開発を行っている。

特にこの5年間はこれらのそれぞれの研究分野で極めて顕著な研究の進展があった。本彙報特集号はこれらの研究活動の報告であるが，これらの研究は今後も続くものであり，その意味では滑走して離陸した地点での報告であるとお考え頂きたい。研究テーマとしては，原子力特別研究「新量子放射源の高度化と利用に関する研究」(平成5-9年度)，「自由電子レーザーの短波長・高品質化に関する研究」(平成6-10年度)，「高輝度放射光の先端利用とその高感度検出器の基盤技術に関する研究」(平成6-10年度)，「超低速陽電子ビームの形成とそれによる材料評価の高度化に関する研究」(平成6-10年度)，「放射線効果の評価手法とその標準に関する研究」(平成6-10年度)，科学技術振興調整費「X線集光素子」(平成5-9年度)で行ったものである。各研究の成果については本文をご覧くださいとして，以下では本特集号で取り扱っている主要なテーマの今後の展望を述べてみたい。

### (1) 自由電子レーザー

自由電子レーザー (Free Electron Laser ; FEL) はマイクロ波からX線に至る広大な可変波長域と，高出力・高効率といった優れたポテンシャルを持っており，魅力のあるレーザー光源である。短波長FELに関しては現在，電総研 (0.3GeV 小型蓄積リング) を始めとして米国デューク大学 (1GeV 中型蓄積リング) やドイツ・ドルトムント大学 (1.5GeV 蓄積リング) などで研究が進められている。またイタリアのElletraでもすでにFEL用アンデューレーターの設定を終えたと考えられる。短波長化も一時足踏みの様相もあったが，此処に来て1996年には239nm (分子研)，1998年には212nm (電総研)，1999年には194nm (デューク大) と発振波長が短くなり，いよいよ100nm台に突入した。これらの研究の進展により FEL 波長は間もなく真空紫外域に達するものと思われる。電総研においても可能な限り早期に150nm程度までの短波長化を実現させたいと考えている。これらの波長領域でのFELの

応用も開始され、デューク大 FEL を使用したノースキャロライナ州立大学の研究ではワイドギャップ半導体 SiC やダイヤモンドの特性分析の研究が行われている。特にダイヤモンドはバンドギャップが 5.5eV であり、このバンドギャップ上下の遷移を誘起するのに波長可変 FEL の特徴が生かされている。またすでにフランス LURE の Super-ACO で従来から行われている SR と FEL を利用したポンプ・プローブ分光も今後広く利用が期待される。

さらに短波長の X 線領域では非常に長いアンジュレータを使った SASE (Self Amplified Spontaneous Emission; 自己増幅自発放射) 法が用いられ、そのための大規模な高輝度大電流リニアックがドイツの DESY (ドイツ電子シンクロトン施設) や、米国の SLAC (スタンフォード大学直線加速器施設), UCLA, ブルックヘブン国立研究所, ロスアラモス国立研究所, ローレンスリバモア国立研究所などで基礎実験が始まっている。わが国としても今後の方向を早急に議論する必要がある。

一方マイクロ波から赤外域にかけての長波長は比較的発振が容易で、自由電子レーザー研のように RF リニアックを用いた比較的小型の FEL システムが実現されている。当所では NIJI-IV を使った赤外域 FEL 発振を計画している。応用面においては米国ヴァンダービルト大学で世界初の FEL 治療 (腫瘍) が行われるなど新しい局面に入っているおり、当所においても標準光源や化学反応の励起源を視野に入れた研究開発に力を入れたいと考えている。

## (2) エネルギー可変単色 X・線

従来より X 線は電子線の制動放射を利用した X 線源 (管球など) が使われていたのに対して、最近では SPring8 に見られるような高輝度 X 線源が出現してその利用が飛躍的に拡大した。しかし単色光源としての X 線のニーズも高く、そのためには分光器が必要である。また、より高エネルギーのフォトンである線については、従来より放射性同位元素などの原子核内遷移を利用するしか方法がなく、エネルギー可変性等の制御性に欠けていた。これに対してエネルギー可変単色 X・線を発生させる方法として、高速電子ビームとレーザーとの衝突により発生する光を利用するレーザー逆コンプトン散乱法が最近注目されている。当所では比較的以前からこの研究に着

手しており先駆的な成果をあげて来た。

現在この手法によってエネルギー可変単色 X・線を発生させる施設が現在世界で 5 箇所稼働している。また米国ローレンス・バークレイ研究所では直線加速装置とフェムト秒レーザーを用いて、フェムト秒逆コンプトン散乱 X 線の発生に成功しており、超高速現象への利用に期待が持たれている。また当所においてはさらに直線加速装置とレーザーを組み合わせた X 線源や、FEL と蓄積リングを用いた X・線源等、さまざまな研究開発の試みを行っている。現在装置開発の課題としては高輝度化やエネルギー単色性の向上などが必要とされている。

一方、レーザー逆コンプトン散乱光子発生施設での応用研究も盛んに行われており、当所を始めとして主に基礎物理研究が多く行われている。またエネルギー可変単色 X・線を用いた CT 研究や医療診断等への応用も行われ始めており、収量の増加等線源の高度化に伴い、産業利用や核廃棄物処理等の方面での使用も検討されつつある。今後は、上記のようなフェムト秒 X・線の発生と応用、FEL などと組み合わせたエネルギー可変単色 X・線の大量・高度化、およびそれらを用いた応用研究が望まれる。また、これらを安定したビームとして応用研究に供給するため加速器までを含めたトータルのシステム化が必要になってくるが、このことは本手法によって未整備領域の X・線標準場を確立する際の場の安定性、信頼性という点においても重要である。この量子放射源は本格的な使用が始まってまだ日が浅いが、様々な応用が可能であり今後の展開に大きく期待したい。

## (3) シンクロトロン放射光

SPring8 を始めとする第3世代放射光の利用が世界的に盛んになる中で、今後の開発方向のひとつは前述の如く自由電子レーザー・SASE を利用した高輝度放射利用が挙げられる。これについては今後の世界の技術開発動向が見逃せない。しかし同時に上述の電子蓄積リング自由電子レーザーの発生利用やそれと放射光との併用によるポンププローブ分光、レーザー逆コンプトン散乱光の利用など新たな量子ビームの発生を可能とし、さらに従来挿入光源放射光の特色を生かした高性能で多面的な利用が可能な放射光リングが今後求められている。従って、併せて

この面での研究開発を行うことが必要である。

今後の放射光利用研究としては、情報・エレクトロニクス、生命科学、物質・材料、環境科学、光・放射線の標準計測、次世代産業科学技術などが挙げられよう。特に次世代産業科学技術の中では、産業用の新たな光プロセス技術や分析技術のための新たな放射光源開発（入射器、蓄積リング、挿入光源、次世代放射光技術）が大きな開発課題の一つである。今後の放射光施設のメリットは、研究開発のキーワードのひとつでもある「融合領域」の強力な推進力になり得るということである。分野の異なる研究者が幅広い波長や特性の光源を共有することにより相互に影響し合い、刺激し合うことによって新しい分野を切り開いたり、従来とは異なる視点にたった融合領域の研究をみいだす可能性をもつ。今後このような放射光の必要性として、(1) 低エミッタンスと同時に高フォトンフラックスであること、(2) さまざまな種類・特性の異なる放射光の利用が可能なこと、(3) 異なる領域の研究集積性・融合性が可能なこと、(4) 運用面での柔軟性があり他の研究インフラ・研究グループとの有機的なリンクが可能なこと、などが挙げられよう。これにより、さらなる放射光のポテンシャルを引き出すことができ将来への大きな貢献が期待できる。しかし、このような多様なニーズを同時に満たす放射光というのは実現性に大きな困難がある。そのため今後の放射光施設としては技術的に必要な優先度を考慮して設計し、ユーザーにとっても利用しやすいものが求められると考えられる。

#### (4) 陽電子ビーム

陽電子は、電子の反粒子であり電子と出会うと消滅し、 $\gamma$ 線を放出する。陽電子が物質中に侵入して電子と遭遇して $\gamma$ 線が出るまでの寿命やその際放出される2本の $\gamma$ 線の角度相関などから、物質中の電子の振舞いを直接且つ非破壊的に知ることができるため、陽電子は物質中または表面の原子配列・欠陥・不純物などの高感度評価方法として極めて有用である。当所においては10数年以上前から電子線形加速器TELLを利用したエネルギー分散の少ない低速陽電子ビームの発生・制御技術を開発しており、陽電子消滅分光法(PAS)、陽電子励起オージェ電子分光法(PAES)などにより物質中・表面近傍や最表面の欠

陥、不純物、原子・電子状態、分子構造などを極めて高感度で知ることができるようになってきた。この施設は世界的にも有数の貴重な施設であり、共同研究の要請が多数寄せられている。当所ではこの超低速パルス陽電子ビーム発生・利用技術をさらに発展させ、特に超高強度・高品質の陽電子発生・制御とその応用を目指している。

陽電子は従来にはない物性特性を分析できる新たなツールであり、当所では電子デバイスや光デバイスのための材料評価を念頭に研究を進めている。たとえばSiC、ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体のイオン注入に付随する欠陥評価を行ったり、Si最表面上の酸素の反応過程などの研究がその例である。今後は対象範囲を広め、ナノ構造、ヘテロ構造や量子細線、単分子層構造等の解析に利用して革新的物質・材料の創製につなげるための最適な分析ツールとして利用して行きたいと考えている。

また電子加速器を利用した発生陽電子の高強度化や計測方法の高度化等の技術開発を進めると同時に、シンクロトロン放射光、電子ビーム、イオンビームなど他のビームを用いた相補的な分析手段と組み合わせることで、得られる情報の精度と信頼性の向上を図ることができる。さらに物質・材料の静的な特性だけでなく、光・熱・放射線等さまざまな環境下での動的な特性の分析や、極微小領域の分析など応用の幅も広げたいと考えている。

以上、本報告書の巻頭にあたり、今後の量子放射源研究開発の展望の一端を述べた。これらを踏まえて、現在所内では次期の放射光リングの技術的検討を重ねており、新たな量子放射源の開発と利用を通じて新しい産業科学技術への貢献が出来ないかと考えている。今後とも皆様には格段のご支援・ご鞭撻をお願い申し上げたい。また本報告書に記載の研究推進にあたって多大なご支援を頂いた当所関係者、とりわけ山崎鉄夫前量子放射部長（現京都大学エネルギー理工学研究所教授）、清水肇前電子基礎部長（現九州工業技術研究所長）ならびに工業技術院・科学技術庁関係各位へ深甚の謝意を表したい。