

原子力長期計画策定会議・第四分科会提出資料(平成11年11月29日)

未来を拓く新たな量子ビーム研究と核融合研究

電子技術総合研究所

小林直人

1. はじめに

今世紀の科学(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。今世紀において人類が獲得した技術においても特に前者の量子論が果たした寄与が大きく、原子力はその大きな技術成果の一つと言えよう。一方、加速器科学や光科学を基盤におく量子ビームの発生と利用もまさに量子論の大きな成果と位置づけることが出来る。古くは荷電粒子ビームの発生と利用に始まり、気体・固体レーザーの発生と利用、シンクロトロン放射光・自由電子レーザーの開発など、近年における量子ビームの利用は新たな科学と技術応用をもたらしている。一方21世紀における科学技術を展望した時、量子ビームがより身近なツールとして科学技術への寄与のみならず産業や医療福祉等にも利用が可能になることが期待されるため、原子力長期計画の中においても<見る>、<極める>、<創る>ツールとして適切にその開発戦略を策定すべきである。

一方核融合は、将来の恒久的で環境負荷の低いエネルギー供給方式として位置付けられ、多年にわたる研究開発の結果、核融合条件の実現と維持に関する技術は長足の進歩を遂げて来た。しかしながら、実用的な核融合発電の実現のためには、なお多くの技術的課題が残されており、これを解決するためのたゆみない努力と新しいアイディアに基づく果敢な挑戦が求められている。「第三段階核融合研究開発基本計画」においても、トカマク型を研究開発の中心に置きながらも、慣性核融合を含む他の方式の研究と、そのための工学技術開発の必要性を謳っている。核融合研究開発は、多岐にわたる分野での先端的な研究開発を必要とするもので、その重要性和内容の先進性に鑑み、今後も精力的な推進が期待される。

2. 新たな量子ビーム技術

新たな量子ビーム技術として自由電子レーザー、シンクロトロン放射光、エネルギー可変X・γ線、陽電子ビーム、高機能イオンビーム等の研究開発の意義、現状と開発利用の将来展望を以下に述べる。これらに共通する一つの特徴は、原子核や素粒子分野での基礎研究のために発展してきたこのような量子ビーム技術が、今世紀最終の四半世紀において広範な科学技術・産業応用・医療福祉・環境研究等にも利用が開始されていることである。今後は科学技術の牽引者としての研究者のみならず一般の技術者や医師などさまざまな利用者が普遍的に利用できるツールとして幅広く発展することも期待される。

2.1 自由電子レーザー

1) 研究開発の意義

原子力委員会によって昭和 62 年 6 月 22 日に策定された原子力開発長期計画第 3 章において、原子力基礎技術開発にあたっては「技術の芽の探索、体系的な研究開発の積み重ね等により大きな技術革新を引き起こし、ひいては科学技術全般への波及効果が期待される原子力のフロンティア領域と言われる創造的・革新的領域を重視して基礎技術開発を推進する」との方針から、原子力分野で用いられるレーザーに関する技術が取り上げられ、また平成 6 年 8 月 24 日に発表された同長期計画第 2 章では、「ビーム利用分野等について重点的に研究開発を行うべき領域を設定し、研究開発を進めて行く」とされた。

自由電子レーザー (Free Electron Laser ; FEL) は上述の様な指針に沿って原子力用レーザーとして研究開発が進められ、電機研における世界最短波長 (1998 年) の遠紫外レーザー発振の成功や、日本原子力研究所における赤外準 CW kW 級レーザー発振の成功等、世界的な成果を残している。これらの研究の結果、FEL はその超広帯域性から当初想定されたウラン濃縮、高レベル放射性廃液の再処理 (群分離)、 ^{91}Zr , ^{90}Tl , ^{99}Mo 等有用な同位体の分離や核融合プラズマの加熱といった原子力への直接利用に止まらず、むしろ医療、環境、物性、光化学といった、来るべき高齢化・福祉社会を支え得る多彩な分野への利用が見込まれるようになってきている。

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いるが、その多彩さ故に、実用化のために開発すべき要素技術は多岐に亘る。このためその開発状況は波長域によって大きく異なり、マイクロ波から赤外域ではレーザー開発から利用研究へとフェーズが移りつつあるのに対して、真空紫外から X 線域ではレーザー開発のための基礎研究が行われている段階にある。今後も更に技術開発を推し進めることによって、従来型のレーザーと相補い合いながら、21 世紀の重要な科学技術インフラとなって行くものと思われる。FEL の開発には電子・陽電子加速器が不可欠であり、特に短波長域ではそのエネルギーは数～10GeV に達するため、放射線管理が重要であり、従って原子力関連技術として今後も長期にわたって展開して行くことが是非とも必要と考えられる。

2) 研究開発の現状

FEL は、従来型のレーザーに比べ格段に広い範囲で連続波長可変性を実現し得るレーザーであり、目的とする波長域によって蓄積リングの他、リニアック、静電加速器、パルスパワー装置等各種の加速器を用いて幅広い波長域で研究開発が行なわれている。一般的には、波長が長いほど低エネルギーで小型の加速器が利用でき、実用的な装置が製作し易いが、短波長域では、高エネルギーで且つエネルギー広がり小さく収束性の良い良質の電子ビームが必要となり装置が大型となる。従って FEL の開発レベルは波長域によって大きく異なっている。

マイクロ波から赤外域にかけての長波長域では比較的発振が得やすく、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、また超伝導リニアックを用いることにより、既に kW オーダーの高平均出力 CW FEL 発生も可能となっており、物性研究、多光子光化学、半導体物理の他、医療・環境等への FEL 利用研究も行なわれつつある。短波長域では、電線研で、0.3GeV の小型蓄積リングを用いて遠紫外域(212nm まで)の FEL 発振に成功している他、デューク大学(米国)でも 1GeV の中型リングを用いて遠紫外発振が可能となっている。この他ドルトムント大学(ドイツ)で 1.5GeV の蓄積リングを用いて最近可視域発振に成功し、短波長化しつつある。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。

3) 開発・利用の将来展望

FEL 開発は現在、赤外域での大出力発振、真空紫外から X 線を目指した極短波長発振が 2 つの大きな流れとなっている。上述の様に、赤外 FEL は既に平均出力 kW レベルが達成され、10kW~100kW も現実の物として考えられる様になっている。極短波長域では遠紫外域発振が達成され、更に X 線 FEL 発生も検討されている。X 線領域では、光共振器を使わず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を開発する必要がある。ドイツの DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) や、米国の SLAC (スタンフォード大学の直線加速器施設)、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の共同研究グループでは数 nm から数 Å の X 線 FEL 発生が検討され、その基礎実験が始まっている。

FEL は、赤外域ではレーザーメス、心筋梗塞治療、歯の改質等の医療分野やフロン、ダイオキシンの分解等環境分野、超高速半導体素子研究等の個体物理研究の他、切削・溶接やピーニング、ロケット、誘雷といった FEL のパワー利用も可能になると思われる。また紫外域でも FEL をプローブとする色素やタンパク質のダイナミクスの観測等興味深い利用研究が行われており、将来 X 線 FEL が実現できれば生体の 3 次元その場観測等極めて付加価値の高い分野への利用の可能性もでてくる。また最近では短波長での波長選択性を生かしてダイヤモンド等ワイドギャップ半導体の物性研究にも用いられている。

今後、上述の様な装置開発に加えて、小型の電子ビーム源とマイクロアンジュレータを組み合わせたテーブルトップ FEL の開発等により、FEL は 21 世紀初頭には従来型レーザーと相補い合いながら、原子力分野に止まらず基礎科学から産業に至る幅広い分野で、高齢化・福祉社会、超情報化社会を支える重要なツールとなって行くものと思われる。

2.2 エネルギー可変単色 X・γ 線

1) 研究開発の意義

エネルギー可変の放射線は、人工的に放射線を発生させる技術の発展とともに様々な形

で実現され、人類の科学の発達を促してきた。粒子線加速器はその代表例であり、高強度で単色性のよい放射線が発生することが可能である。X・ γ 線に関しては、粒子加速器からの制動放射を利用した2次放射線がよく利用されているが、これらは本質的に白色光である。高輝度X線として使われている放射光も同様であり、モノクロメータ等のフィルターを用いて、単色光を得ている。

一方、放射線検出器の校正などに利用されているX・ γ 線標準場においては、単色光である必要から放射性同位元素が用いられている。しかし利用できる放射性同位元素の種類が限られているために、2 MeV 以上のエネルギー領域においてはX・ γ 線標準場は確立されていない。しかし、加速器の高度化に伴い、高エネルギー領域での標準場の整備が必要とされている現在、エネルギー可変単色 γ 線の線源開発は非常に重要である。

2) 研究開発の現状と将来展望

エネルギー可変単色X・ γ 線が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現象を利用した方法がある。この方法はレーザー逆コンプトン散乱と呼ばれ、近年の電子蓄積リングの発展に伴い、急速に実用化が進んだ。その結果、本手法によってエネルギー可変単色X・ γ 線が発生させる施設が現在世界で5箇所稼働している。本手法を用いて非常に短パルスのX・ γ 線が発生させることが可能であり、フェムト秒パルスのX・ γ 線が発生させることによって、従来にない超高速度現象をX・ γ 線領域で観測することが可能となる。現在、直線加速装置とフェムト秒レーザーを用いて、逆コンプトン散乱X線の発生に米国LBNLで成功したのを初めとして、世界各国での開発が始まっている。更に、直線加速装置とレーザーを組み合わせたX線源の開発や、FELと蓄積リングを用いたX・ γ 線源の開発等、様々な開発研究が活発に行われており、エネルギー可変単色X・ γ 線の発生技術の発達は、この数年で格段に進歩してきた。現在、本手法によって得られる γ 線の収量は一秒間に 10^7 個程度であり、更に高輝度化を目指す研究が行われている。

既設のレーザー逆コンプトン散乱光子発生施設での応用研究は、既に盛んに行われており、主に基礎物理研究が多く行われている。一方、エネルギー可変単色X・ γ 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、収量の増加等の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、短パルスX・ γ 線の発生と応用、PDLやスーパーキャビティ等を組み合わせた、エネルギー可変単色X・ γ 線の大収量・高度化、および、それらを用いた応用研究が進められる。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・ γ 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り、産・学・官各組織が一体となって、早急に着手すべき課題である。先に述べたように、この線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な期待が寄せられる。

2.3 シンクロトロン放射光

1) 研究開発の意義

SPRING 8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（自己増幅自発放射）を利用した高輝度放射光利用が挙げられる。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が、我が国としてもその開発の指針を明らかにする必要がある。しかし同時に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、また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、さらに従来の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。

2) 研究開発の現状と将来展望

放射光の発見からまだ半世紀であるが、最近の発展はまさに驚異的である。例えば輝度は過去10年で7桁以上も向上している。第3世代放射光と呼ばれる巨大施設が稼働してからも世界各国で建設ラッシュが今でも続いており、これは放射光利用研究が科学技術の幅広い領域に関わる根強いニーズを反映している証拠である。

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。特に産業応用が可能な光源技術の面では、電子技術総合研究所において電子蓄積リング TERAS (0.8 GeV, 1981年)、小型蓄積リング NIJI-I (1986年)、NIJI-II (1989年)、超伝導小型リング NIJI-III (1989年)、自由電子レーザー専用リング NIJI-IV (1991年) などの中小蓄積リングが産業界との協力を含めて建設・利用されてきたのを始め、国内の通信・電機・重工関連の各社においても放射光施設建設と利用が推進されてきた。今後は前述の自由電子レーザーやエネルギー可変X- γ 線発生などの技術を導入した多面的な光源技術開発が必要とされよう。

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あい、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）中型マシンでありながら高エネルギーかつ低エミッタンスであること、（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、（3）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。

2.4 陽電子ビーム

1) 研究開発の意義

21世紀における人類文明の維持・発展のためには、高度情報化、エネルギー、環境問題等の解決に対応できる先端材料の研究開発、技術革新が不可欠である。特に情報処理、高効率エネルギー貯蔵・変換、環境浄化・保全等に保わる新材料の開発は最重要課題の一つである。このような先端材料開発では、原子の配列や欠陥（欠陥）などの原子レベルの情報を正確に取得し、それらを制御することが必要である。陽電子ビームは、材料表面や材料中の電子の振舞いを直接知ることができ、原子配列、欠陥、不純物等を高感度で判別できる貴重な材料評価ツールである。このため陽電子ビーム利用は、未来を拓く新素材開発に不可欠なマイクロ情報を把握するためのキーテクノロジーと位置付けられ、物質・材料科学への寄与のみならず、エネルギー、環境、情報分野への波及効果は大きい。

2) 研究開発の現状

陽電子は、電子の反粒子であるが故に、電子に捕えられ電子と消滅する。この消滅から得られるのは電子の情報に他ならない。これが材料中の電子の振舞いを直接知ることができる所以である。この特長を利用することで、半導体デバイスや超伝導物質などにおける電子挙動の解明が図れ材料開発に反映できる。また陽電子は、原子の結合状態・配列や原子空孔等の微視的構造を識別でき、電子部品、電力機器等に用いられる機能材料や原子炉、航空機等に用いられる構造材料における欠陥挙動や原子配列変化を、非破壊で観測できる。欠陥や原子配列の動的挙動に関する知見は、材料製作プロセス技術を大幅に前進させる原動力となり、特性及び信頼性の改善や新素材開発に非常に有用である。

近年電子技術総合研究所等においてエネルギー分散の少ない低速陽電子ビームの発生・制御技術が開発され、陽電子励起オージェ分光法などにより固体最表面や表面近傍の不純物、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。また日本原子力研究所高崎研究所においては、世界に先駆けて反射高速陽電子回折像の観測に成功しており、この最新表面分析技術をSiC半導体など原子レベルでの材料制御技術に適用することが可能である。

このような陽電子ビームの物質・材料科学への寄与に加え、陽電子は現在人類が比較的容易に発生・利用し得る唯一の反粒子であることから、医療診断や粒子・反粒子系を用いたプラズマ物理、素粒子物理、宇宙物理等の基礎科学にも貢献できると考えられる。

3) 開発利用の将来展望

陽電子により固体最表面の原子・電子状態や分子構造を知ることができるため、各種触媒、センサーや薄膜・多層膜構造を有する素子の開発で今後重要となる表面・界面の正確な情報が取得できる。この情報に基づき、機能付与・高度化に関する指針が得られ、高性能光励起触媒や極微量分子認識センサー、超高密度メモリ等の高性能材料の開発を大幅に

進展させることができると考えられる。また陽電子は原子や電子、空孔に関する情報を精密に取得することができるため、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超高機能材料の創製に最適な分析ツールとして利用が期待される。

このような領域に陽電子応用を拡大するためには、現在主流のラジオアイソトープベースの陽電子利用をさらに発展させるとともに、電子加速器等を活用して現状より高強度で時間変動やエネルギー分散の少なくビーム径も極微小な高品質陽電子ビームの形成が必要となる。

電総研では従来からの世界最高性能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・制御を目指しており、原研高崎においては加速器等をベースにした陽電子利用研究施設の整備を計画しており、高強度で時間変動やエネルギー分散の少ない高品質ビームを利用した先端材料開発の飛躍的進展を目指している。

また以上のような陽電子計測方法の高度化等の技術開発を進めると同時に、電子ビームやイオンビームなど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。これにより熱・光・応力・放射線等の外乱印加時に材料内で発生する様々な過渡現象や表面・界面等の特質変化を把握することが可能となり、得られる情報の精度と信頼性の向上が期待できる。イオン・ポジトロン複合利用は、高性能半導体や光機能材料等の先端材料開発の進展と物質・材料科学の新たな展開をもたらすことが期待される。

2.5 高機能イオンビーム

1) 研究開発の意義

イオンビーム技術は従来原子核反応等の基礎研究のための有効なビーム技術として出発し現在でも高エネルギーのイオンビームは不安定核の創出など人類の知的領域の拡大に大きな寄与をしている。しかし一方でイオンビームはその物質との多彩な相互作用のために1960-70年代頃からは(1)分析ツールおよび(2)照射・注入ツールとしての利用が注目され、この四半世紀の間に飛躍的にその利用が拡大した。前者の例としてMeV領域の軽イオンビームを用いるRBS(ラザフォード後方散乱法)やPIXE(粒子線励起X線放出)などが分析手法として既に広く利用されている。また後者の例として半導体の伝導性制御のためのイオン注入技術はすでに産業界では必須の技術であり、また半導体以外の新規材料の創製やバイオ材料への新たな照射効果等にもイオンビームが多く利用されている。また近年ではその制御方法における技術革新も目覚しく、マイクロビーム、シングルイオンヒット、クラスターイオンビーム等の技術開発によりその能力に磨きがかけられつつある。このようにイオンビームはそのエネルギー範囲・イオン種・制御方法の多様性により物質に対するさまざまな効果が期待されるため今後も研究開発の意義が大きいものである。

2) 研究開発の現状と将来展望

イオン注入・照射法では、従来のSiでは形成不可能な半導体素子（低損失パワーデバイスや耐熱・耐放射線半導体素子）用材料として注目されているワイドギャップ半導体・炭化ケイ素(SiC)やダイヤモンドへ等のドーピング技術や、非熱平衡組成半導体の結晶成長方法としてのイオンビーム誘起結晶成長法などが半導体分野への新たな応用として期待されている。また金属酸化物へイオン注入を行い光・電子機能の特性向上を図るなどの無機材料への応用や、フィルムへの高エネルギーイオン照射後、飛跡のエッチング処理により血液中ウイルスの分離・微量放射線物質の除去等の高性能分離膜創製を行うなどの高分子材料への応用も期待されている。

バイオテクノロジー分野への利用では、イオンビームの植物育種への新しい効果が見出されており、植物遺伝子の機能解析や植物の品種改良に期待できる新しい突然変異体を作ることが判明している。イオンによるこの突然変異誘発の特異性に基づき、高エネルギーマイクロビームを用いて種子照射部位の高精度制御を行うことで、イオンビーム育種技術が飛躍的に進展する事が期待される。これにより紫外線に強い植物等の耐環境性植物や高収量作物、環境ホルモンを吸収・分解する環境浄化植物などが創出できる可能性があり、食糧資源の確保や地球環境の保全への貢献が期待できる。またイオン誘起突然変異や損傷回復に係わる遺伝子の単離・解析を通して、遺伝子機能が明らかになり、生物ゲノム研究や21世紀のバイオサイエンスの中心課題である発生学の発展にも貢献できると考えられる。これらは世界に先駆けて我が国が開発した先端的な植物バイオ技術であり戦略的な開発課題である。またイオンビームは細胞や組織の状態を維持しDNAのみに損傷を与えるため、生体機能を解析する手段として有用である。さらにマイクロビームの利用は、細胞間相互作用や情報伝達系の解析、発生や形態形成の解析の新規手段としても考えられる。

一方高度分析手法の開拓の面では、微小領域の元素分析がマイクロビームPIXE法により、高感度で検出でき、陽子ビームをサブ μm の大きさまで絞り、結晶粒界、生物細胞等微小な領域での元素分布を画像化するのは有用な手段である。また材料表面層の構造解析（構造感応型イオン誘起電子分光）として数MeVヘリウム/陽子ビーム等を試料に照射した際に、試料表面から放出される2次電子の収量及びそのエネルギー分布を測定して、シリコン半導体表面の微細構造の解析が可能である。このような解析法は照射損傷を受けやすい絶縁体及び強誘電体に対しても適用でき、有効な分析手段である。

イオンビームは、前述のようによく見る能力（分析評価）、く創る能力（物質生成）の両面において非常に優れたツールである。今後はナノビーム、超低速分子・クラスタービーム、REビーム等のビーム技術高度化により利用研究は技術革新に寄与できると考えられる。またレーザー、陽電子等他の手法との複合化の研究も進められており、分析・物質生成両面での利用が期待される。また従来時間分解の点では他の量子ビームに比べてその開発が遅れているためフェムト秒領域のイオンビームの発生制御などの研究開発が求められよう。

3. 核融合研究

前述のように、核融合発電実現のための研究開発は長足の進歩を遂げ、次段階の磁気閉じ込め方式においては、超長時間の燃焼を、慣性閉じ込め方式においては、現在建設中の装置で入力10倍以上の出力を見込むまでにいたっている。しかしながら現状では、炉の規模や効率、コスト、炉用材料などの点から、実用核融合発電への道は確定してはおらず、より小型で保守の容易な核融合炉を目指した様々な方式と炉用材料の研究開発が進められている。

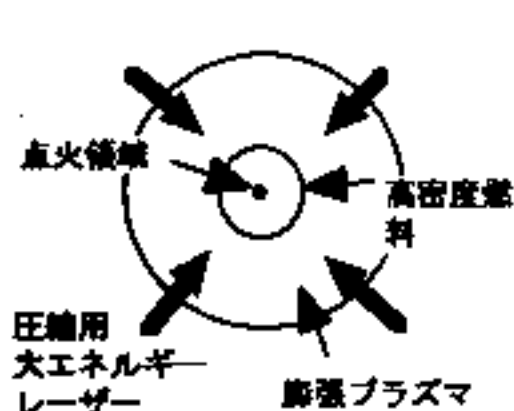
3.1 慣性核融合

慣性核融合では、強力なレーザーなどを照射して燃料球を高温高密度に圧縮し、このプラズマが飛散する前に一気に核融合反応を起こしてしまう。これを、数Hzの頻度で繰り返し、定常的な熱出力を得て発電する方式であるが、炉の構造が単純で、超高真空や強力な磁界コイルが不要、などの利点を有し、米国では、磁気閉じ込め方式とほぼ同じ予算規模で研究開発が進められている。米国で現在建設中のガラスレーザーNIF (National Ignition Facility、1.8MJ、192ビーム)は、2005年以降に、入射レーザーエネルギーの10倍以上の反応出力を得ることを目標にしている。

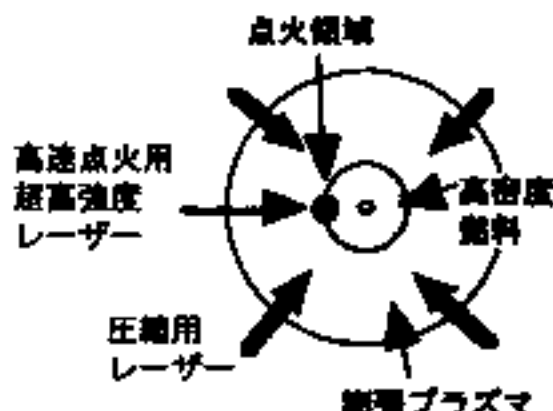
慣性核融合の今後の主な課題としては、以下のものが挙げられる。

1) 反応利得の増大

最近、従来の、多数の一樣レーザービームによる一樣圧縮と燃料の中心部からの反



中心点火方式



高速点火方式

応点火方式（中心点火方式）に対して、同様に圧縮された燃料に対して超高強度レーザーパルス照射して強制的に周辺部から点火する方式（高速点火方式）が提案された。従来に比べて、少ないレーザーエネルギーで大きな反応出力が期待されるため、原理検証のための実験が各国で進められている。相対論的領域にまで達する超高強度のレーザー光とプラズマの相互作用による光の高密度領域への進入や、大量の高エネルギー粒子指向的発生など、新しい物理の領域を含んでおり、その研究は核融合以外の分野にまで、急速な広がりを見せている。

2) 高効率で高繰り返し動作が可能なドライバーの開発

従来の単発動作の実験用レーザーに対して、数 Hz の繰り返し頻度で動作する、高効率で短波長の高出力レーザーの開発が開始されている。KrF レーザーは、燃料の圧縮に有利な紫外光を高効率で発生し、気体であるレーザー媒質の循環冷却も容易であることから、実用的なレーザードライバーの有力候補として、米国や電総研で開発が進められている。励起用電子ビームの高繰り返し動作実証が重要である。また、発光ダイオード励起固体レーザーも、効率がよく、高繰り返し動作が容易なことから、米国や大阪大学で開発が進められているが、励起用ダイオードの高価格、出力の波長変換の必要性、などの課題があげられている。

3.2 磁気閉じ込め核融合

磁気閉じ込め核融合方式は、トカマク型を中心に研究開発が進められており、その成果は、核融合研究開発推進の中心的役割を果たしている。その詳細は他所に譲るが、一方、より小型で単純な構造の炉への要求から、他の閉じ込め方式の研究開発も、特に米国では、再び増大してきている。単純構造の磁気閉じ込め方式のうち、最も開発が進み、高いベータ値を達成しているのが、逆磁場ピンチ方式である。

1) 逆磁場ピンチ方式

逆磁場ピンチ装置は、弱い磁界を用いても大きな磁気シアによるプラズマ閉じ込めが実現でき、強力なオーム加熱により容易に高いベータ値が実現できるという特徴を持つ。このため、常伝導磁場コイルを用いた単純な構造の炉を実現できる可能性がある。また、容器壁における高い熱負荷が容易に実現できることから、プラズマ壁相互作用の研究にも適した装置である。米国(MST)や、電総研(TPE-RX)による、プラズマ電流 1 MA 級の装置による実験が進められ、その大型化への比例則が検証されつつある。今後の課題は、磁場揺動の抑制による閉じ込め時間の向上で、このためには、中性粒子ビーム入射などによる能動的な電流駆動が有効と考えられ、その準備が進められている。

4. おわりに

量子ビーム技術及び核融合技術は、21 世紀において人類が持続的発展と新たな知と文化の地平を切り開くためにも必要な原子力領域の先端科学技術である。量子ビーム技術においては、自由電子レーザーを主体とした第 4 世代放射光のように大型装置開発を目指すことが必要と考えられるものの、一方で産業や医療福祉等広い範囲で人間生活に役立つ versatile な量子ビーム源の開発が期待されており、原子力長期計画においてもこの両面における配慮が必要であろう。一方核融合技術においても、上述の如く小型で保守の容易な簡易型核融合炉を目指した研究開発が今後求められている。慣性核融合および磁気閉じ込め核融合ともそのための必要な技術開発に焦点を当てた技術開発が必要である。

自由電子レーザーの開発と利用

原子力

- ・群分離
- ・同位体分離
- ・核融合プラズマ加熱

医療・バイオ

- ・レーザーメス
- ・歯の改質
- ・コレステロール除去
- ・医薬品製造
- ・酵素・蛋白質の構造解析

環境

- ・ダイオキシンの分解
- ・フロン分解
- ・レーザーレーダー
- ・リモートセンシング

パワー

- ・切削・溶接
- ・ピーニング
- ・ロケット
- ・誘雷
- ・エネルギー伝送

光化学

- ・化学反応過程のダイナミクス
- ・CVDによる新材料創製
- ・デポジション
- ・ドーピング
- ・精製

物性

- ・表面物性
- ・非線型光吸収
- ・エネルギーバンド解析

半導体素子

- ・THz超高速デバイス
- ・共鳴トンネルダイオード

短波長： VUV-X線
長波長： kW~100kW(CW)
小型化： テーブルトップ

自由電子レーザーシステム



加速器

- ・高品質大電流蓄積リング
- ・高輝度大電流リニアック
- ・小型電子ビーム源

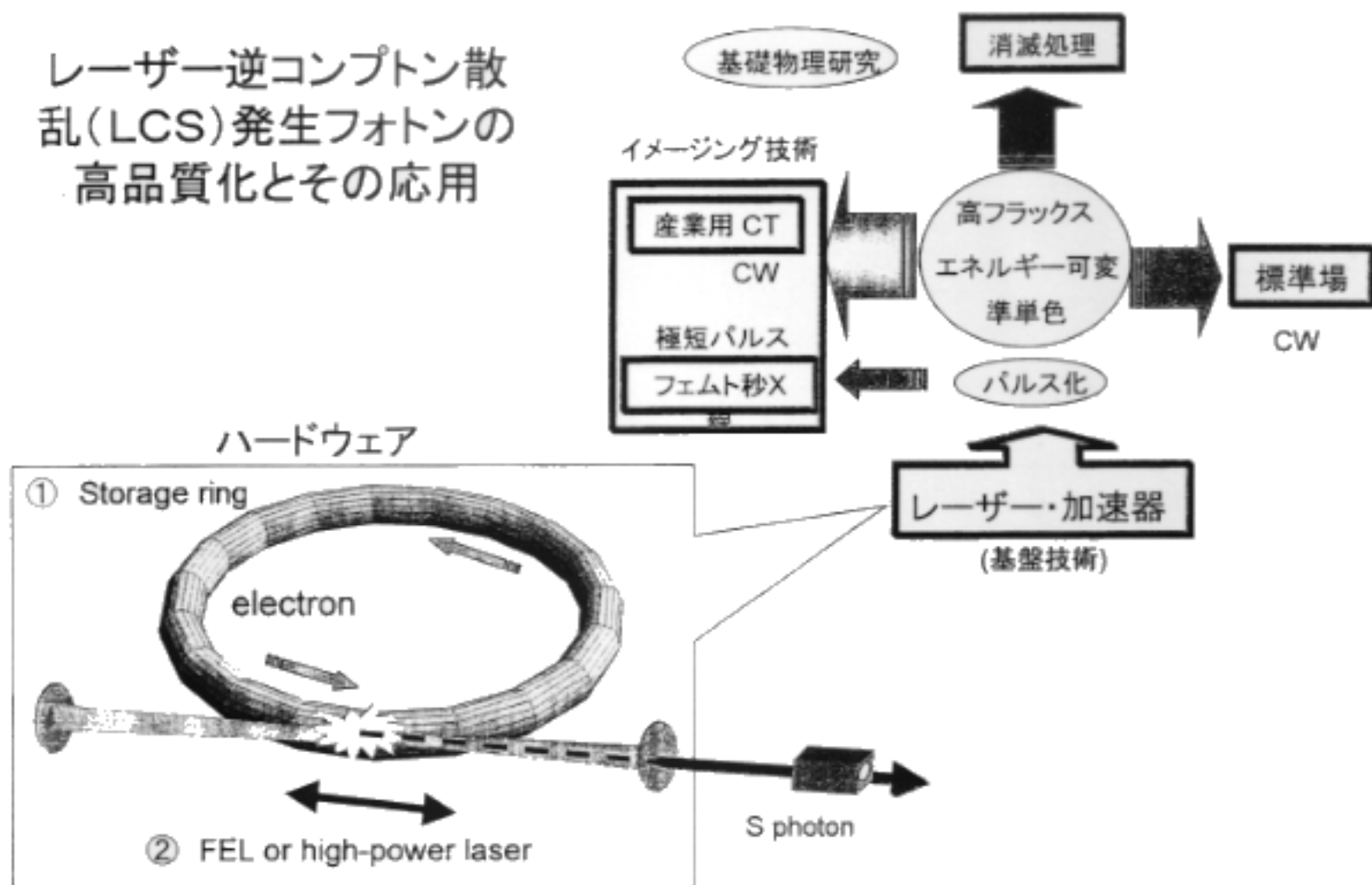
アンジュレータ

- ・長尺化
- ・小型化
- ・高精度化

光共振器

- ・ミラー材質・寿命
- ・最適構造
- ・高安定性

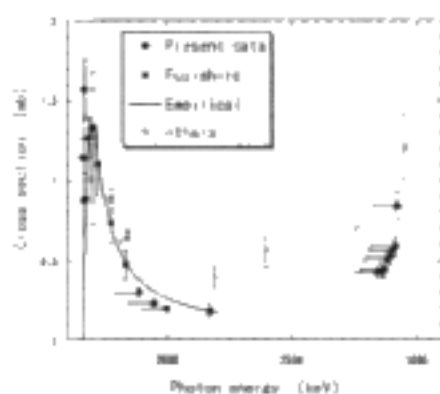
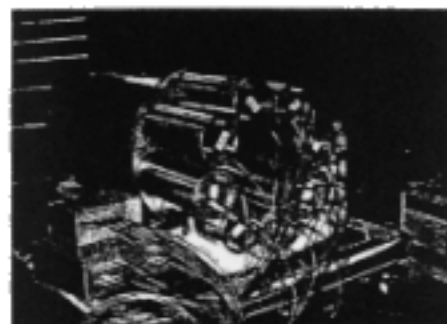
レーザー逆コンプトン散乱(LCS)発生光子の 高品質化とその応用



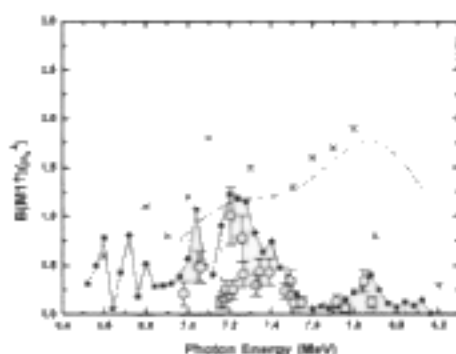
エネルギー可変 γ 線の利用

エネルギー可変 γ 線

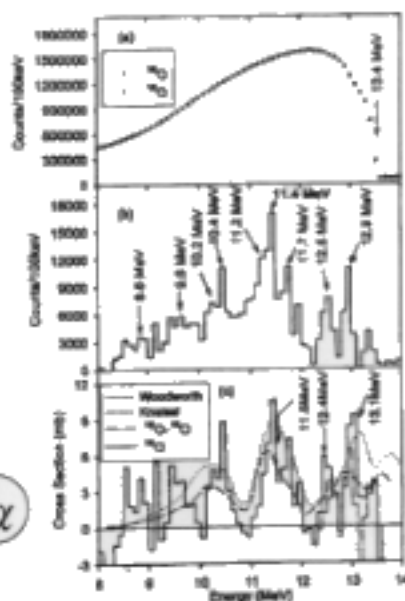
高精度光中性子測定



高偏極 γ 線測定



高分解能透過 γ 線測定



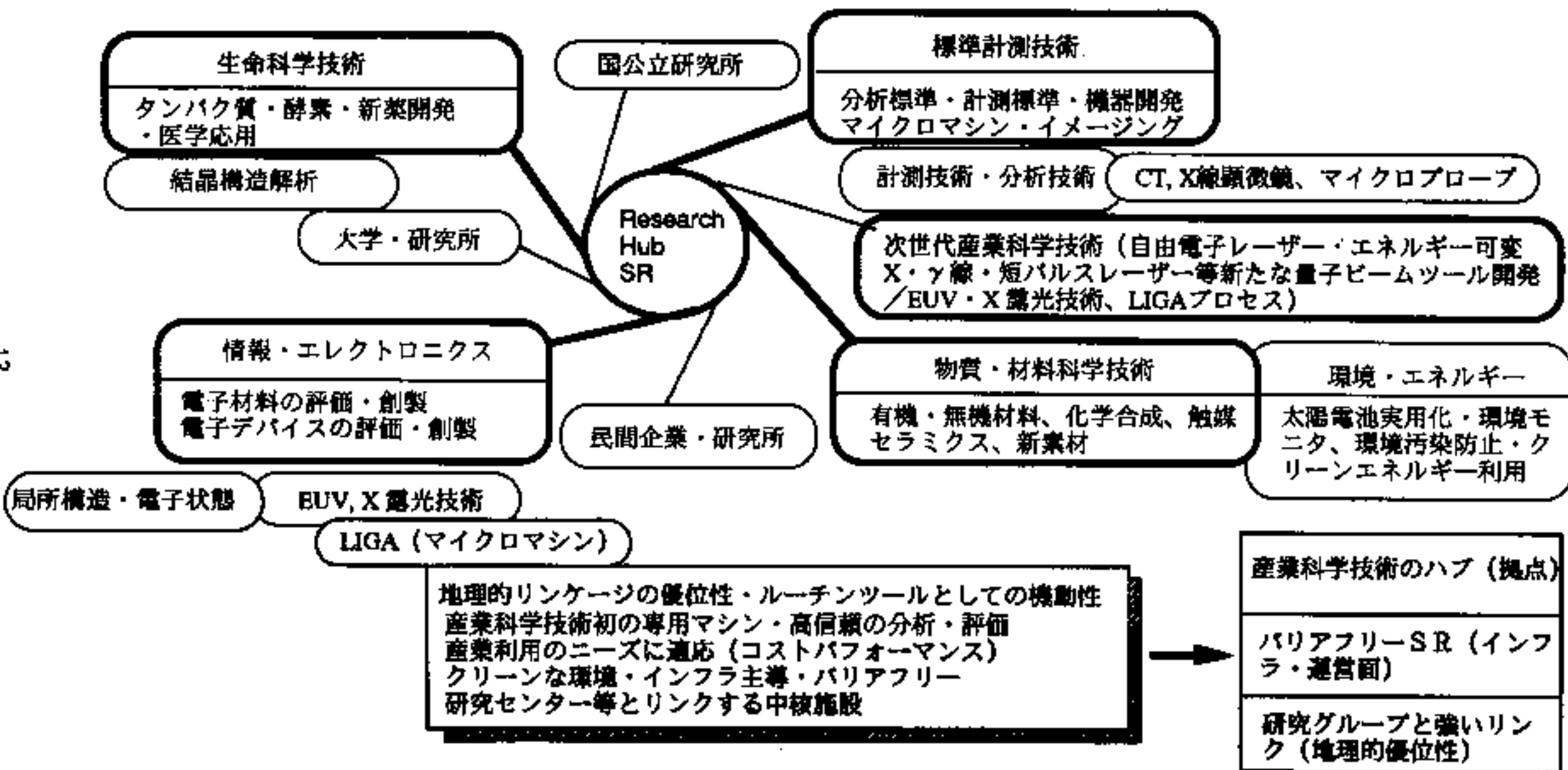
高精度光荷電粒子測定



Figure 3. Examples of the track shapes in each event type: (a) $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ candidate, (b) $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ candidate, (c) cosmic ray-induced particle, and (d) low-energy electron produced by bremsstrahlung photons from TERA5. Widths of the tracks are roughly proportional to dE/dx .

Research Hub SR (仮称) の特徴

産業科学技術等にバリアフリーな研究ツールを提供
研究のハブ(中心)施設として機能



先端的なポジトロン利用研究の展開

加速器 → ポジトロン ← RI

高度化

高品質ポジトロンビーム

高強度
高安定ビーム電流
エネルギー制御
微小ビーム径
短パルス

観測事象

消滅ガンマ線

寿命

回折、励起分光

21世紀の社会を支える先端材料開発
— エネルギー、環境、情報 —

物質・材料科学

微細構造制御、精密欠陥制御

情報

電子の運動状態・
運動量分布

欠陥種・分布
電子密度

最表面原子・電子状態
表面原子・分子構造
吸着状態

応用

超高速半導体デバイス
極低損失超伝導デバイス

耐環境性半導体デバイス
超高強度合金・炉壁材料

高性能光励起触媒・環境浄化膜
極微量分子認識センサー
超高密度メモリ

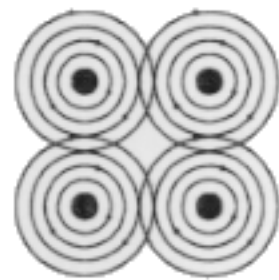
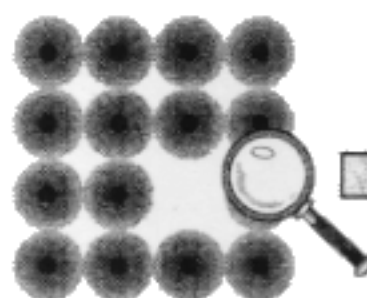
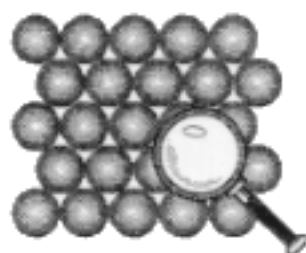
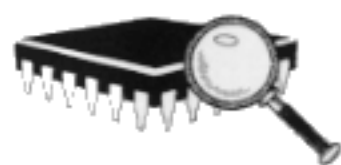
相補的評価手段
イオンビーム等

新規半導体材料開発

原子炉材料開発

高分子材料開発

耐環境材料開発



原子構造

欠陥構造

電子構造

高機能材料開発のための微細構造解析・機能評価の3要素

陽電子の特徴

正電荷
物質を構成していない異種粒子

欠陥への選択的捕捉
高感度
大きさ・種類の同定

対消滅・ガンマ線の放出
非破壊
消滅相手の電子の運動量

低速陽電子ビーム
(低エネルギー分散)

表面敏感性
表面特異反応

深度制御可能(エネルギー可変)
任意深さの情報(γ線の高透過性)

触媒
表面・界面機能材料

表面分析

特定位置・深さ分析

半導体デバイス
薄膜形成
表面保護膜

高機能イオンビームを用いた先端科学技術

新機能材料の創製



- ・イオン注入によるワイドギャップ半導体の伝導性制御
- ・イオン注入による電子-光機能材料
- ・イオンビームの飛跡を利用した分離機能材料
- ・レーザー等との複合化

バイオへの利用



- ・イオンビーム植物育種
- ・マイクロビームによる生体機能解明

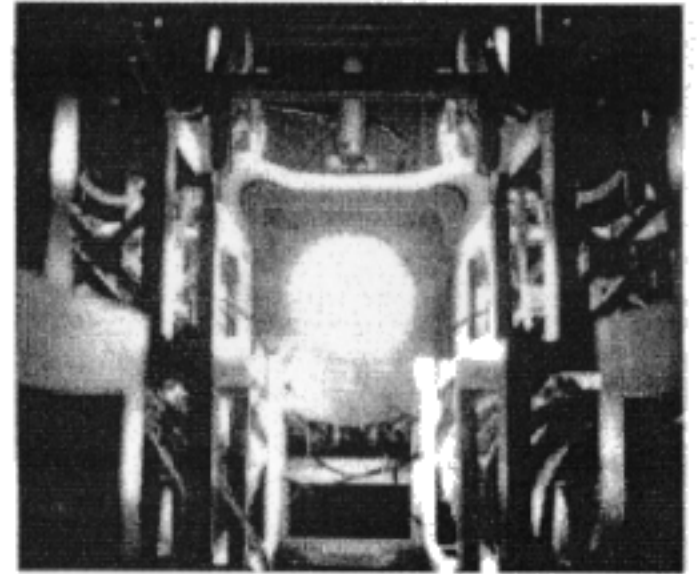
高度分析技術



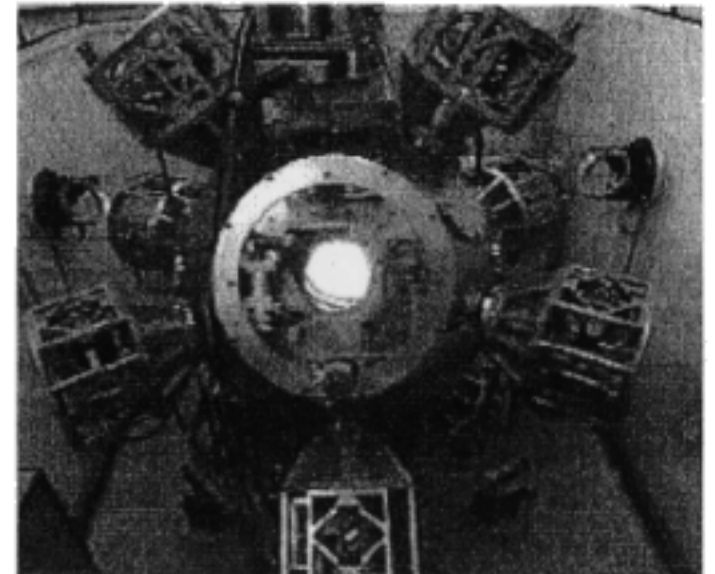
- ・微小領域の元素分析（マイクロビームPIXE）
- ・材料表面層の構造解析（イオン誘起電子分光）
- ・フェムト秒イオンビーム分析技術

④ KrFレーザーによる核融合の研究

- KrFレーザーの特徴
 - 短波長、高効率
 - 繰り返し動作が容易
- Super-ASHURA
 - 3kJ, 12ビーム
 - 高速点火検証に向けて
照射実験開始
- 高繰り返し動作増幅器の開発
 - 電子ビームの1 Hz 動作開始



動作中の主増幅器

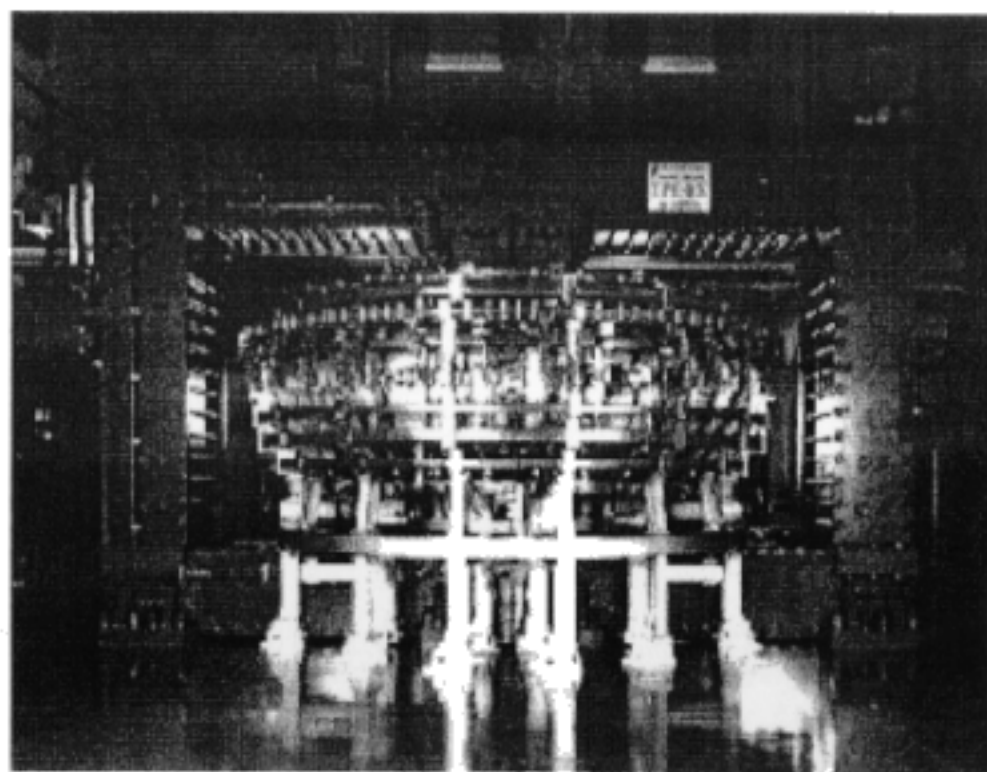


照射容器



逆磁場ピンチ核融合の研究

- 逆磁場ピンチの特徴
 - 低磁界、単純構造
 - オーム加熱による高 β 実現
- TPE-RX
 - $R / a = 1.7\text{m} / 0.45\text{m}$
 - 放電電流 0.5 MA $\rightarrow$ 1MA
- 閉じ込め性能の向上へ
 - 中性粒子ビーム入射による
ポロイダル磁界の能動的制御



TPE-RX装置