

## (2) 研究テーマの推移

本共同研究事業では、新しい Yb:YAG 固体レーザーを中心とした LD 励起による全固体型の 100 フェムト秒 ( $10^{-13}$ s) からナノ秒 ( $10^{-9}$ s) さらには CW 領域にいたる Yb 系での固体レーザー技術を確認する。また、そのレーザー波長を非線形光学結晶によって高調波波長変換法により高出力での紫外域の高輝度光ビーム発生技術を開発する。

次にそれらの新しい光源を利用した高輝度光ビーム加工技術および高輝度光ビーム薄膜形成技術を開発し、従来の生産技術では不可能であった 3 次元光造形・金型作成技術、光ナノ加工改質技術、薄膜成長技術などの開発研究を展開した。高輝度光ビーム加工技術研究および高輝度光ビーム薄膜形成技術研究では、新しい固体レーザーの開発を待つのではなく、既存のレーザー光源を活用して研究を進めた。本プロジェクトが、Yb:YAG を用いた固体レーザーの国内唯一の研究拠点であることを認識して、微細加工用全固体レーザー試作機を創り上げ、高輝度光ビームであるフォトン加工、薄膜のナノ加工との複合化など新型パルスレーザーの位置づけに留意して生産性と品質の両面から超短パルスと CW レーザーの特徴を生かした応用技術開発に取り組んだ。(図 -3-2)

基本計画からの計画の大きな変更は無かったが、フェーズ 1 では、平成 14 年度に実施された中間評価の指摘とこれまでの研究成果を踏まえ、多かった小研究テーマの精査・見直しと研究者の適正配置、企業との連携など研究体制を強化し、研究成果を地域産業に効果的に展開できるようにサブ研究テーマの重点化を行った。本事業における研究テーマの推移を図 -3-3~5 に示す。また、フェーズ 2 の基本計画に基づくテーマと中間評価を反映して、それ以後のフェーズ 3 における研究テーマの重点化については図 -3-6 に示すとおりである。

### A : 「高輝度 Yb : YAG 固体レーザー技術研究」

#### 高出力・超短パルス Yb:YAG 固体レーザーの開発

本研究プロジェクトでは新しいレーザー加工産業への利用を主な目的として、Yb:YAG 固体レーザーの超短パルス動作においては高平均出力、高パルスエネルギー、高パルス繰り返し周波数特性、高ビーム品質 (単一横モード) 高効率、小型、高安定動作を目標とした。さらに CW 動作でも、高ビーム品質 (単一横モード) 高効率、小型、高安定動作など、産業への実用化を目標とした。

A : 「高輝度 Yb : YAG 固体レーザー技術研究」は、高出力・超短パルス Yb:YAG 固体レーザーの開発と Yb:YAG レーザー光の波長可変法の開発の 2 テーマに分類されるが、中間評価では超短パルス化と高出力化の研究への集中、およびフェムト秒レーザーの特徴を生かした応用を見出す必要性が求められ、レーザー試作開発への集中・重点化を図った。

#### (1) 超短パルスマイクロチップレーザー及び超短パルス増幅器の開発

フェーズ 1 では Yb:YAG に特有の下準位吸収損失を低減した高出力・超短パルス LD 励起 Yb:YAG レーザーの要素技術となる独自かつ新規のエッジ励起型 Yb:YAG マイクロチップ構成のレーザーを設計・試作し、準 CW 発振において 112W、スロープ効率 63% の発振特性を実現した。また、超短パルス発生法として半導体可飽和吸収鏡 (SESAM) によるモード同期発振によりパルス幅 6.5ps の短パルス特性が得られた。さらに、フェーズ 2 では超短パルス化と高出力化の早急な実現が求められた。そこで、「高出力・超短パルス Yb:YAG レーザーの開発」の課題に発展させ、SESAM による安定なモード同期発振法に加え、非線形カー効果材料による超短パルス発振法について詳細に検討した。その結果、非線形カー効果材料と SESAM の組み合わせにより、パルス幅 410fs を達成した。しかし後述の MOPA (主発振器 電力増幅器) 装置へ組み込み用の小型マイクロチップ発振器では、SESAM の光学特性の不安定性により、安定動作はパルス幅 3.3ps となった。

また、「CW 方式 Yb:YAG レーザーの高出力化・高安定化」の課題をフェーズ 2 で立ち上げ、マイクロチップ型ダイボンドデバイスによる高出力発振特性を目指し、マイクロチップ用ダイボンド装置を開発した。その結果、CW 出力 340W、 $M^2$  値 17 の高輝度ビームを得ることに成功した。このレーザーは市販の Nd:YAG レーザー装置に比べて 5 分の 1 以下の体積で、極めて小型化が可能なのが特徴である。この装置を実際にフォトンマシニングセンタに搭載して光造形加工試験を行い、実用性が評価され、目標が達成された。さらにヒートシンク一体型マイクロチップデバイスは地域新生コンソーシアム研究開発事業に移転させて、製品化、実用化を推進させた。これにより、Yb:YAG マイクロチップレーザーは CW から超短パルス域に至る広い時間域で、小型、高出力、高輝度の特性が実現され、これらの優れた特性から新しい市場での広範囲な適用、展開が期待できる。本技術の優位性については、その他 (1) 周辺技術動向において記載した。

#### (2) 小型ナノ秒パルス Yb:YAG 系レーザーの開発

フェーズ 2 では小型、高出力、高エネルギー、高ビーム品質で高安定動作の可能な微細ロッド型 Yb:YAG レーザー増幅モジュールを設計・試作し、CW 動作の単一横モードで出力 25W、多モード動作で 55W、ナノ秒パルス動作では、パルス幅 11ns、平均出力 18W、繰り返し周波数 100kHz の出力を得た。しかし、さらに高出力化と超短パルス動作の実現の必要性が求められている。そこで、フ

フェーズではナノ秒動作からフェムト秒動作へ発展させるため「薄型スラブ Yb:YAG レーザ増幅器の開発」の課題に移行させ、高出力で超短パルス動作の MOPA (発振器 高出力増幅器) 構成システムの実現に重点化させた。この薄型スラブ Yb:YAG レーザ増幅は、高密度励起および高効率冷却が可能で優れた、画期的な増幅構成であり、CW 発振では出力 257W、変換効率 42% の世界最高値を達成した。さらに MOPA 構成では、パルス幅 3.3ps の発振器を用いて、最大平均出力 10W、パルス繰り返し周波数 100kHz、パルス幅 6.3ps の高平均出力・高パルスエネルギー特性を実現した。パルス幅は発振器によって制限されたため、Yb ファイバレーザを用いることにより、現状のチタンサファイアレーザの数倍以上の高出力で高効率かつ低コストの超短パルスレーザの実現が十分可能であることが示された。

### (3) フェムト秒域固体レーザのモード同期材料と発振法の研究

超短パルス化のためのモード同期法として、色素による可飽和吸収体を用いて共振器内で複数パルスを衝突させる CPM 法とフィードバック制御法を併用したモード同期発振法の発振実験的検討を行い、Nd:YAG レーザで 2.5ps のパルス幅を実現した。フェーズではこの技術を上記(1)の「高出力・超短パルス Yb:YAG レーザの開発」に統合させて実施し、レーザ開発に役立てている。

### (4) 半導体過飽和吸収鏡によるモード同期 Yb:YAG レーザの開発

高輝度 Yb:YAG 固体レーザ発振器に必要な超短パルス光の安定な発生技術の確立を目的としてモード同期パルス光の発生が可能な SESAM の設計論を確立した。このテーマもレーザの開発に集中化するため、「高出力・超短パルス Yb:YAG レーザの開発」の課題に統合・発展させた。

## Yb:YAG レーザ光の波長可変法の開発

### (1) 近赤外域波長可変高出力 OPO の開発

フェーズでは Yb:YAG レーザの波長可変動作として、分極反転による疑似位相整合 (QPM) を利用した PPMgLN 結晶 (MgO:LN) による OPO (光パラメトリック発振器) を設計・試作し 1.5 ~ 3.5  $\mu\text{m}$  の赤外域での広帯域波長可変特性を実現し、さらに単一モード発振による周波数可変動作法を開発した。これを利用してメタンガス等の微量分子の分析や漏洩ガスや温暖化ガスの測定光源としての利用を実現した。フェーズではこのテーマを地域負担テーマに移行させさらに実用化を推進した。

### (2) 中赤外域波長可変高出力 OPO の開発

フェーズでは、赤外域での OPO 用の非線形光学素子として、分極反転による疑似位相整合 (QPM) を利用した MgO:LN 結晶 (PPMgLN) の開発を行った。その結果、3.0mm 厚と極めて厚く大型の分極反転結晶の育成に世界で初めて成功した。さらに高出力化を実現し、フェーズで研究開発を完了させた。

### (3) 高出力紫外光発生用希土類カルシウムオキシボレート非線形結晶の開発

Yb:YAG レーザの第 3 高調波の紫外光発生に最も優れた波長変換特性を示すことが予想される新しい非線形結晶として GdYCOB 結晶の育成と高品質化を行った。フェーズでは結晶育成中に生成する欠陥の抑制などを行い、光損傷耐性を改善させることに成功した。高周波誘導加熱型 Cz 装置により単結晶成長を行い、高品質の結晶が育成された。フェーズでもこの研究を継続させ、GdYCOB 結晶の製品化を行った。また、モノリシック波長変換素子を構成し、小型で高効率の波長 355nm の新しい紫外域パルスレーザとして製品化を達成した。

このような極めて取扱いが容易な全固体 355nm 紫外光源は、これが世界で初めてのものである。これまで応用が制限されていた汎用の理化学機器、医療機器への導入が極めて簡単になるため、幅広い応用が期待できる。

## B : 「高輝度光ビーム加工技術研究」

### 多機能フォトンマシニングセンタの開発

#### (1) ナノ秒パルス Yb:YAG レーザによるフォトンマシニングセンタの開発

開発した Yb:YAG レーザを利用した次世代のレーザ加工機への応用として多機能フォトンマシニングセンタの開発を行った。フェーズではナノ秒パルス固体レーザによるフォトンマシニングセンタを試作し、新しい 3 次元微細加工プロセスの特性解明を行った。特に、透明導電 ITO 薄膜のレーザエッチング特性を解明し、選択的除去加工を実施して、これによりフラット表示パネルの透明導電薄膜のドライエッチングの高効率化が可能となった。この成果は地域新生コンソーシアム研究開発事業 (H15 ~ H16 年度) に移行させ、UV ピコ秒レーザによる精密フラットパネル材料ドライエッチング加工装置として製品化を達成した。さらに、地域新生コンソーシアム研究開発事業 (H17 ~ H18 年度) においてレーザアブレーション加工技術の新規応用の実用化を推進している。

一方、金属光造形の開発では、既存レーザを活用し、金属光造形技術と融合し、複合金属光造形

と高速切削加工を複合した金属光造形複合加工試験機を設計、試作し、射出成形用金型の複合加工技術の開発を行った。鉄系金属粉末の金属光造形と高速切削技術を融合し、ワンプロセス・ワンマシーンで高精度光造形を実現した。さらに、フェーズ では、中間評価で指導を受けた加工分解能の向上と材料面での新規なアプローチの必要性を意識して開発を進めた。その結果、高密度・高精度でチタン製人工歯根などのバイオマテリアルにも適用可能なラピッドマニファクチャリングが可能となるとともに、量産可能な金型の大幅な納期短縮とコストの低減を実現した。これらのレーザ加工技術は我国のものづくり現場に生産プロセスイノベーションを提示できた。

この成果は地域新規産業創造技術開発事業に引き継がれ高度化・製品化を推進した。この成果に対して平成16年、産業技術大賞・文部科学大臣賞を受賞した。

フェーズ では、Yb : YAG レーザによるフォトンマシニングセンタの開発の課題に移行し、金属光造形複合加工機にAグループで開発した試作CW型Yb : YAG レーザを搭載し、加工評価を行った。ヘッドがコンパクトであり、実用化が期待できる。レーザの機能性、信頼性向上を図るべく、金型やバイオマテリアル及び金属部品など多くのアプリケーションへの適用展開に努めている。

また、超短パルスYb : YAG レーザについては、試作MOPA型Yb系超短パルスレーザを組み込んだ表面ナノ加工装置を試作し、表面ナノ加工・改質法を開発したCグループと連携した加工試験を行った。微細周期構造生成の効率化と機能向上を図るべく、金属部品の摩擦抵抗や電極・触媒などの各種アプリケーションへの適用展開を進めている。

## (2) フェムト秒パルス固体レーザ加工法の調査および基礎実験

ナノ秒およびフェムト秒パルス固体レーザを用い、液晶パネルに用いられるITO電極材料や電子基板セラミックス材料などの加工基礎実験を行い、加工条件と加工特性のデータを得た。その結果、フェムト秒パルスレーザ加工では高精度化、高効率化、さらに材料に依存しない汎用性が特徴であることを明らかにした。フェーズ では、上記の多機能フォトンマシニングセンタの課題にこの成果を展開し、フォトンマシニングセンターの開発に集中化した。

## レーザアブレーション機構と最適加工条件の解明

### (1) レーザアブレーション現象の高感度・超高速その場観測システムの開発

レーザアブレーション機構の解明のため、高感度・高速でその場計測できるプリ・ポスト観測システムの開発を行った。フェーズ では、下記(2)の分光計測技術に取り入れ、高感度・高速アブレーション分光計測技術の開発に注力した。

### (2) 高感度・高速アブレーション分光計測技術の開発

フェーズ では高輝度光ビーム加工の実時間プラズマモニタリングシステムとして、発光プラズマ時間分解空間分布測定法を用い、基礎研究を実施した。さらにフェーズ では、リアルタイムレーザ加工モニタリングシステムを試作し、アブレーション量が導出可能など新規かつ有用なモニタリング技術を実現させた。特に、プラズマ誘導電流計測法は、独創性が高く、非常に有効なモニタリング法として期待されている。

### (3) フェムト秒レーザによる透明材料のアブレーション加工機構の検討

フェーズ でフェムト秒レーザ光の透明材料中の自己集束効果により発生するプラズマチャネルリングを高感度、超高速でその場計測するシステムを開発した。また、プラズマチャネルリングを利用した固体内部改質法を開発し、光導波路を形成した。フェーズ で、加工材料および応用分野へのアプローチを推進するため、この課題の一部を上記(2)へ統合させ、高感度・高速アブレーション分光計測技術の開発に集中化した。

これらの高感度・高速アブレーション分光計測技術、モニタリング技術は、前述したように地域新生コンソーシアム研究開発事業のLIPPAプロセスによる透光性電磁波シールド材の開発に展開し、レーザを応用した透明材料の加工技術、レーザ微細加工システムに、また精密フラットパネル材料ドライエッチング加工装置の開発への展開では、UVピコ秒レーザによる透明導電ITO薄膜の選択的除去加工の実用化を目指している。

## C : 「高輝度光ビームによる薄膜形成技術」

### 高出力パルスレーザを用いた超鏡面精密洗浄技術の開発と機能性薄膜の創成

#### (1) 高密度薄膜磁性媒体の開発のためのスパッタ条件などの探索

単結晶シリコンを垂直磁気記録の基板として利用して、記録密度を向上させることを目指し、シリコン基板表面のナノ秒レーザパルス光によるドライ洗浄装置の設計、製作をフェーズ で行った。その結果、Si基盤表面の粗さが洗浄前に比べて2乗平均値で約1/4に改善され、平滑化が達成された。実用化に向けて従来にない新規なレーザ薄膜形成技術の研究開発の必要性が求められ、フェーズ ではさらにレーザ光洗浄付きのスパッタリング装置を開発し、単結晶シリコンによる洗浄実験と薄膜磁性媒体の作製を行い、良好な特性が得られて、加工サンプルとして市場調査を開始した。

この装置は今後、半導体製造プロセスに一大変革をもたらす可能性を秘めている。また、レーザー光を拡散させずに、シリコン表面に照射させたとき、シリコン表面にアブレーションによる再結晶模様が現れることを確認している。この技術は今後、次世代ディスプレイといわれる電界放射型 F E D のエミッターなどに応用される可能性がある。

(2) 対向電極スパッタリング法による薄膜磁性媒体の作製

高記録密度媒体を作製することを目的として、フェーズ Ⅱ では単結晶 Si ウエハーの超鏡面基板を用いた高密度薄膜磁性体スパッタリング条件の探索を行い、Sr フェライト薄で大きな垂直方向保磁力が実現し目標達成したため、フェーズ Ⅲ でこの課題を完了させ、この成果を(1)高密度薄膜磁性媒体の開発のためのスパッタ条件などの探索に展開させた。

(3) 高機能硬質膜のレーザー表面加工・改質技術の開発

地場産業の眼鏡枠業界で課題になっている難加工性硬質薄膜 (TiNi、DLC) に超短パルス高強度レーザー光を照射することによって、波長や偏光、照射光量により表面の微細構造が制御できることを初めて実現した。中間評価でこのテーマのユニーク性が評価されたため、フェーズ Ⅲ でさらに重点的に研究を進め、表面ナノ加工及び改質技術の確立と、10cm×10cm の大面積のサンプル加工を達成し、市場調査を開始した。このナノ加工技術はマイクロマシン等のナノテクノロジー分野において、極微小表面のドライポロジ特性を制御し最適化する技術として新しい応用が期待できる。また、自動車部品や金型等の摩擦磨耗が関与する機械製品の耐久性と信頼性向上のための応用が可能である。

(4) 超短パルス高強度レーザーによる機能性硬質薄膜制御技術の研究

フェーズ Ⅲ では高機能硬質膜へ高品質化した超短パルスの高強度レーザー光を照射し、周期的ナノ構造の生成過程の解明し、周期的ナノ構造を創生するナノ加工技術を開発した。さらに、この課題も中間評価の指摘によりフェーズ Ⅲ では上記課題(3)に統合させた。

### 高出力パルスレーザーを用いた長寿命 HID ランプの創成

(1) 耐高温ハロゲン化金属薄膜創生とレーザー応用表面改質装置及び長寿命 HID ランプの開発

フェーズ Ⅲ ではシリカガラスの球形放電管の内壁面に SiC や窒化物などの薄膜をナノ秒パルスレーザーによるアブレーションにより形成して、高温のハロゲン化金属に対して耐性のある保護膜の形成法の確立および薄膜形成装置の開発を行った。さらにフェーズ Ⅲ では、超長寿命の高輝度放電等ランプ管球の開発の可能性を追究した。その結果、無電極タイプの放電管球での長寿命化が可能と評価された。

(2) 管球材料の劣化メカニズムの解明と最適材料の選択

フェーズ Ⅲ では高出力放電ランプの長寿命および安定化を目的として、石英からの劣化メカニズムの解明および評価方法を確立する研究を行った。また、高出力パルスレーザー照射による材料のダメージおよび表面改善効果の評価について検討した。実用可能なテーマへの重点化を進めるため、フェーズ Ⅲ ではこのテーマを上記(1)に併合させた。

### レーザー誘起化学反応を用いた選択薄膜成長技術の開発

(1) 有機金属原料および Ⅲ 族元素水素化合物原料の光化学反応過程に関する基礎的検討

フェーズ Ⅲ で紫外域レーザーによるアンモニアならびに Ⅲ 族有機金属原料の光化学反応を利用して InN などの窒素化合物半導体のレーザー援用有機金属化学的堆積 (Laser-assisted MOCVD) 成長法を初めて実現させた。フェーズ Ⅲ では低温での InNO<sub>x</sub> 薄膜を作製し、紫外線照射下で H<sub>2</sub>S ガスの分解脱臭による、TiO<sub>2</sub> を凌ぐ光触媒効果を有することを初めて見出した。それにより光触媒効果による環境浄化材としての実現を目指した開発研究を実施し、所期の目的を達成した。さらに、この金属酸化物薄膜の低温成膜技術は光触媒のみならず、半導体材料、セラミックス薄膜、超硬度コーティングなど幅広い応用分野が期待される。

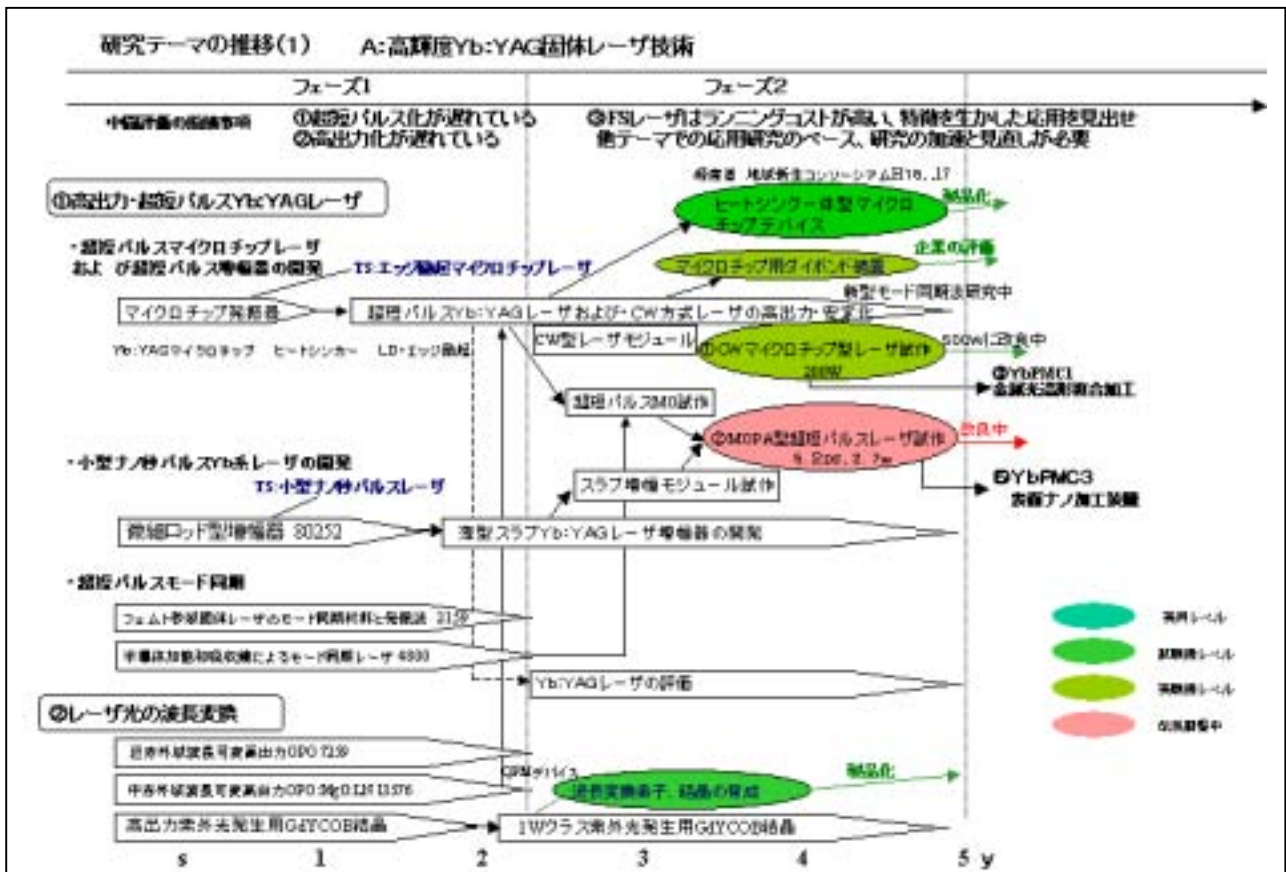


図 - 3 - 3 研究テーマの推移(1)

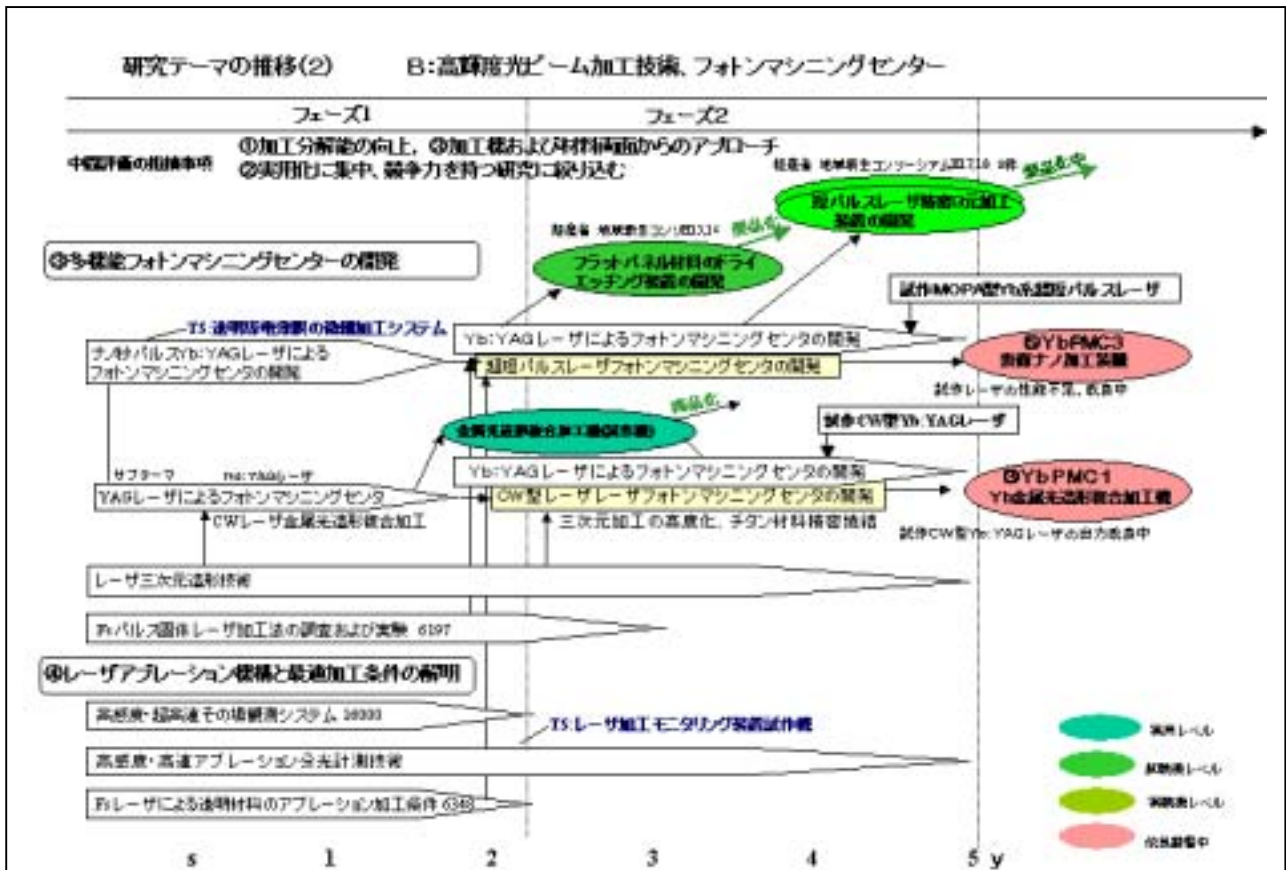


図 - 3 - 4 研究テーマの推移(2)

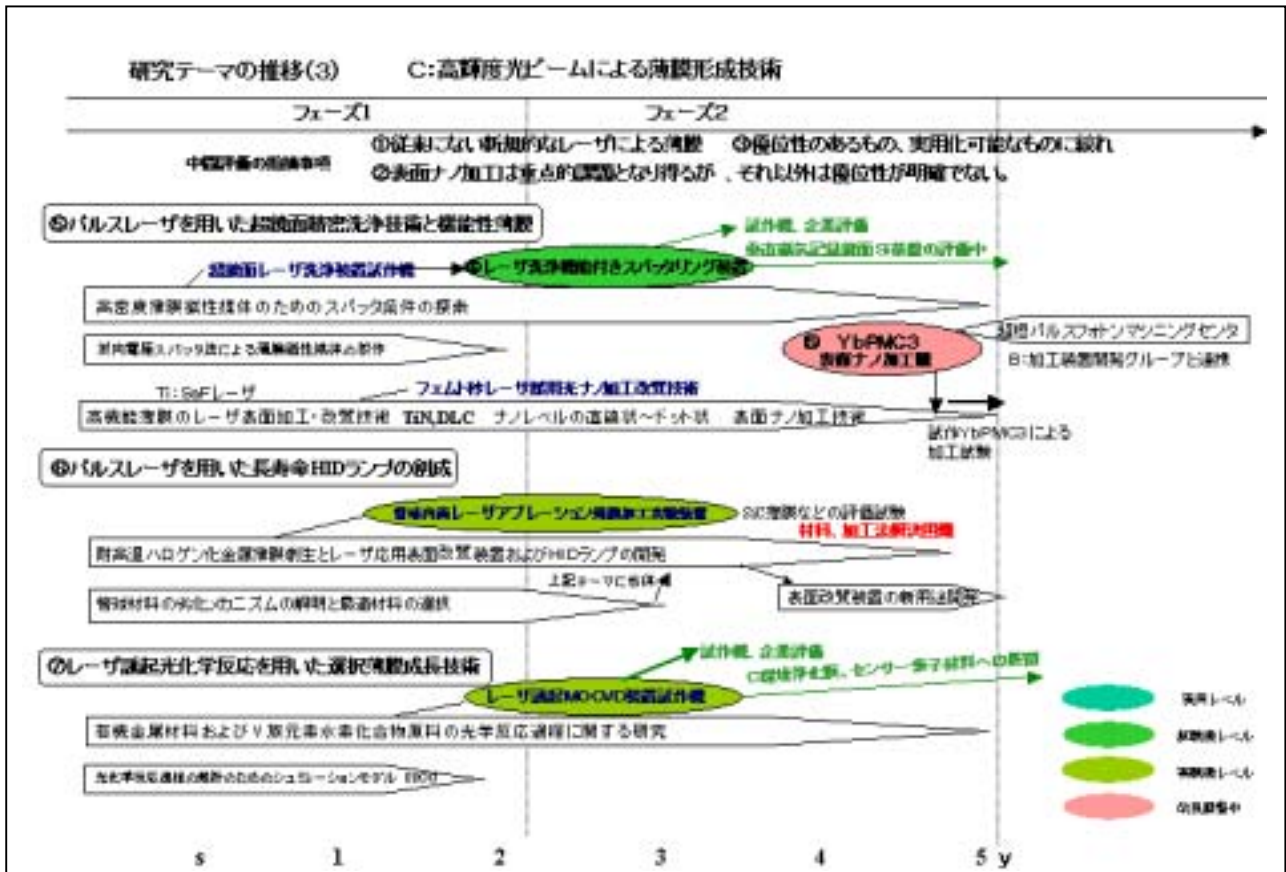


図 - 3 - 5 研究テーマの推移(3)

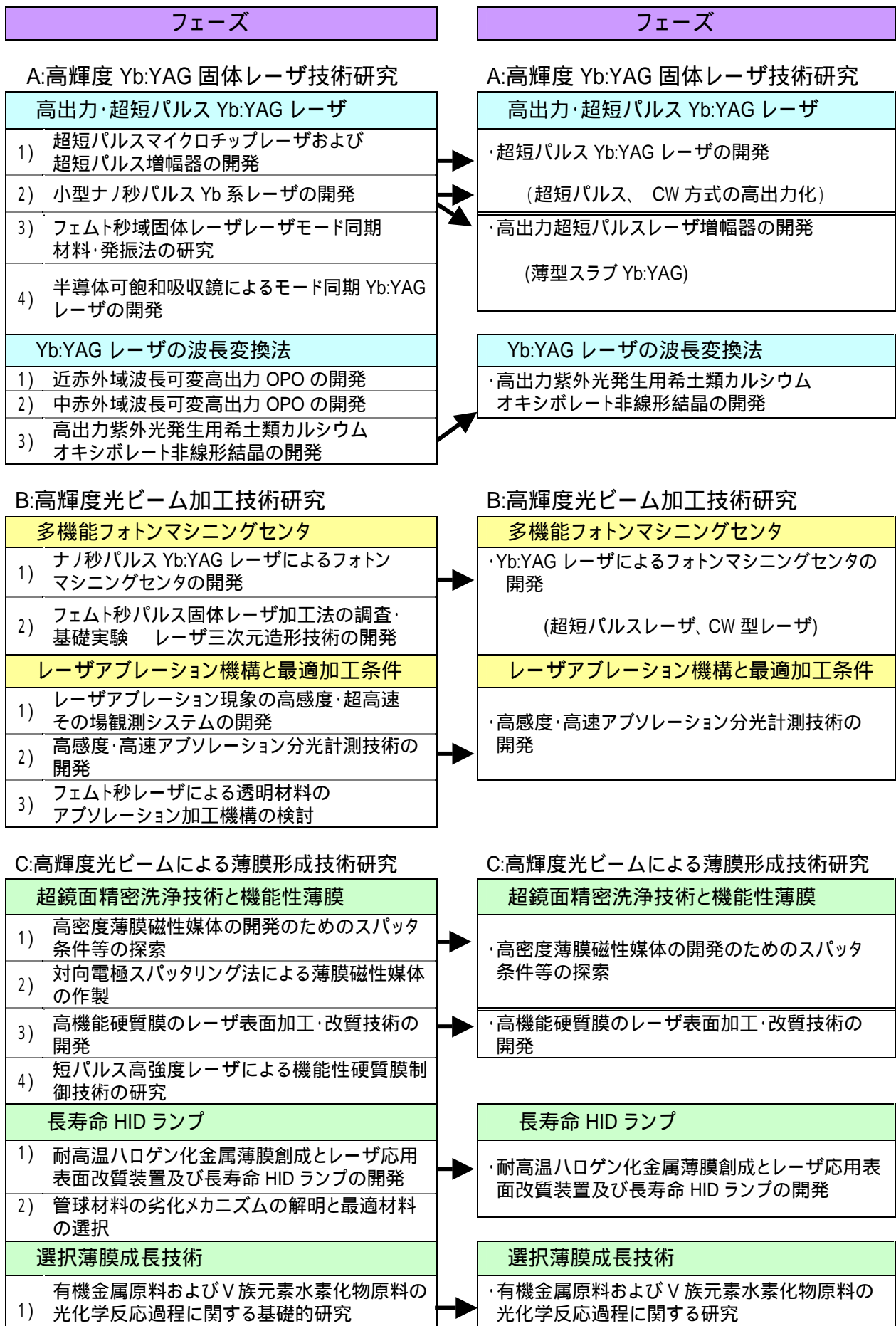


図 -3-6 研究テーマの重点化