

平成 19 年度科学研究費補助金（学術創成研究費）研究進捗状況報告書

◆記入に当たっては、「平成 19 年度科学研究費補助金（学術創成研究費）研究進捗状況報告書等記入要領」を参照してください。

ローマ字		Urakawa Junji		②所属研究機関・ 部局・職		大学共同利用機関法人高エネルギー 加速器研究機構・加速器研究施設・教授 (平成 19 年 3 月 31 日現在)	
①研究代表者 氏名		浦川 順治					
③研究 課題 名	和文	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究					
	英文	Research for Hybrid System comprised Laser Super Cavity and Off-Axis Parabolic Reflective mirrors toward International Linear Collider					
④研究経費 <small>(千円未満四捨五入) 平成 17, 18 年度使用内訳は支出額、平成 18 年度以降の交付額は内約額、使用内訳は支出予定額を記入してください。</small>	年度	研究経費 (千円)		使用内訳 (千円) <平成 19 年度以降は支出予定額>			
		交付額	支出額	物品費	旅費	謝金等	その他
	平成 17 年度	63,300	63,300	53,009	4,488	4,148	1,655
	平成 18 年度	70,200	70,200	45,164	7,195	12,016	5,825
	平成 19 年度	64,500	64,500	37,500	7,000	14,000	6,000
	平成 20 年度	65,400	65,400	38,400	7,000	14,000	6,000
	平成 21 年度	41,100	41,100	18,100	6,000	12,000	5,000
総計							
⑤研究組織 (研究代表者及び研究分担者) *平成 19 年 3 月 31 日現在							
氏名	所属研究機関・部局・職		現在の専門		役割分担 (研究実施計画に対する分担事項)		
浦川 順治	高エネ研機構・加速器・教授		加速器科学		研究総括		
早野 仁司	高エネ研機構・加速器・准教授		加速器科学		加速器運転		
鷲尾 方一	早大・理工学術院・教授		放射線科学		ガンマ線検出法の開発		
黒田 隆之助 (H17.4~H18.3)	産業総合研究所・研究員		加速器科学		電子・レーザー衝突調整		
笹尾 登 (H17.4~H19.3)	京大・大学院理学研究科・教授		素粒子物理実験		光共振器製作		
阪井寛志	東大・物性研・助教		物理実験		光共振器製作		
東保男	高エネ研機構・共通基盤・准教授		精密機械工学		Parabolic Mirror 製作		
谷口敬	高エネ研機構・素核研・講師		素粒子物理実験		ピエゾ制御システム設計		
大森恒彦	高エネ研機構・素核研・講師		素粒子物理実験		高反射ミラーシステム製作		
横谷馨	高エネ研機構・加速器・教授		加速器理論		逆コンプトン散乱に関するシミュレーション		
照沼信浩 (H18.4~)	高エネ研機構・加速器・助教		加速器科学		レーザーワイヤー実験装置の製作		
荒木栄 (H18.4~)	高エネ研機構・加速器・技官		加速器工学		レーザーワイヤー実験装置の設置		
奥木敏行 (H18.4~)	高エネ研機構・加速器・助教		加速器科学		レーザーワイヤー実験装置の製作		

⑤研究組織（研究分担者）のつぎ			
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）
<div style="position: absolute; bottom: 20px; left: 20px;"> <p>計 13 名 (平成 19 年 3 月 31 日現在)</p> </div>			

⑥当初の背景と研究目的

学術創成研究費の3つの観点のうち本研究課題の推薦の観点及び研究計画調書に記載した研究目的を簡潔に記述してください。

1. 右図の国際リニアコライダー計画(ILC)では、大強度電子・陽電子ビームを対向する直線型の超伝導高周波加速器により 100GeV~500GeV 間のエネルギーまで加速した後、衝突点でナノメータのサイズに絞込み安定に衝突するようにしなければならない。衝突点の両近傍に数箇所、サブミクロン分解能の非破壊ビーム診断装置が必要である。数ミクロン分解能レーザーワイヤは 30km 直線高周波加速器部に数十ヶ所必要となっている。現在、国際協力研究によりレーザーワイヤビーム診断装置の開発を進めているが、数ミクロンの分解能で装置も大掛かりになっているので、新しい技術開発が必要である。本研究分野のレーザーパルス蓄積と反射ミラー技術の融合研究は全く行われていないために、ILC の未解決重要課題の一つになっている。また、レーザーワイヤビーム形状測定装置の小型化及び低価格化は重要課題である。2007 年北京の ILC-GDE(Global Design Effort)会議で ILC-RDR(Reference Design Report)をまとめて Web 公開した。そして本研究開発の重要性を記述した。

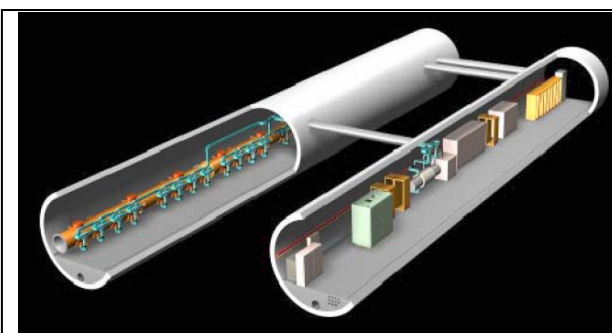


図 1. ILC 概念図 (全長 35km 以上)

本研究成果に基づいたビームサイズ測定装置により ILC 設計書を 2010 年までに完成させる予定である。

2. 光共振器によるレーザー蓄積技術と Off-Axis Parabolic(OAP)反射ミラーの技術を融合することにより、光共振器中点でサブミクロン、1mJ/pulse を高繰り返し(357MHz)で安定に実現できる小型スーパー光共振器を製作して、その性能を実証する。最近、時間精度の高いモードロックレーザーが開発され市販されている。我々のグループでは入射レーザーピークパワーの 1000 倍以上のレーザーピークパワーまで光共振器にレーザー蓄積することに成功している。我々が開発している光共振器は 42cm のミラー間隔があり、レーザーを中点で絞り込むために 2 枚の球面ミラーを使用している。この光共振器では 20 μ m までレーザー (波長 1064nm) を絞り込むことがほぼ技術的な限界になっていることを示した。OAP 反射ミラーを使って、平行レーザービームを回折限界近くまで絞り込む実験が最近行われている。しかし、2 年間の研究調査により高反射率 OAP 反射ミラー製作には財政的な困難があり、平面ミラーと球面ミラーを使用した Four mirrors 2D or 3D cavities 方式の小型スーパー光共振器製作で目的を達成することになった。電子ビーム軌道ジッターを 1 μ m 以内にするのが困難であることも実験的に明らかになったので、レーザー絞込みサイズを 5 μ m まで許容した場合、100mJ/pulse を高繰り返し(357MHz)で安定に実現できる小型スーパー光共振器製作がより実用的な目的である。

3. 光共振器がレーザーを蓄積するには、ミラー間隔をレーザー波長の半分の整数倍にしなければならない。パルスレーザーは 400 以上の縦モードの合成によりパルスが形成されている。この全てのモードについて共鳴条件を満足させるようにミラー間隔をサブナノメータで制御することになる。レーザービームの蓄積には平面高反射率ミラー 2 枚とレーザー絞込み用球面反射ミラー 2 枚で光共振器を構成する。この提案はフランスの共同研究者が行い、本研究で性能を実証することは世界で最初のものになる。レーザー蓄積と絞込みの究極技術が融合された装置は、ガンマ・ガンマ衝突型実験装置を実現するとき理想的なものになる。本技術と電子ビームを使うことにより、高エネルギー光子ビームが安定に生成できる。これにより色々な研究分野で光子ビームの利用展開が進む。

4. ILC は国際協力により必要な開発研究を欧米とアジアで進めている。ミクロンの大強度電子ビームを供給できる施設が本研究機構の先端試験加速器(ATF)だけであることから、ATF は本研究課題の唯一の拠点である。モードロックレーザー出力のパルスレーザーを外部光共振器に蓄積しているのは我々と Jefferson Lab. のグループのみである。サブミクロンのレーザービームを使ってミクロンの大強度電子ビーム診断を行う計画を持っているイギリス、ドイツ、アメリカの研究者は ATF で共同開発を行っている。我々は日本独自の本研究課題を提案したことによって、我々のリーダーシップが非常に高まった。(英国の研究者は別の案を提出して、ATF で電子ビーム形状測定を行っている。) 昨年度からフランスの研究者が本研究開発に参加することになった。特に、スーパー光共振器を使った偏極ガンマ線生成実験に参加する。

5. 人類最大の関心事の一つである宇宙の起源、余剰次元、時空概念の解明を進めるためには、現在建設されている欧州 CERN の LHC と ILC での素粒子実験を行う必要がある。この研究に必要な素粒子反応を効率良く起こすには、本研究成果は必須である。ILC は時空概念の深層究明に必要な超対称性粒子等の物理を見極める実験装置である。また、本研究成果は非常に優れた高エネルギー光子ビーム生成法になる。

⑦研究組織、研究方法、役割分担

研究代表者と研究分担者の役割分担と研究の進捗状況、本研究課題への貢献等について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記述してください。

平成17年度は光共振器の要素開発に必要な超安定モードロックレーザーを購入した。レーザー室は既存のものを使用して、基礎実験を開始した。京都大学・早稲田大学・東京大学から本実験に参加している有能な若手研究者を雇い入れ、研究開発を推進してきた。ここでは我々の提案実験と海外共同研究者が提案し

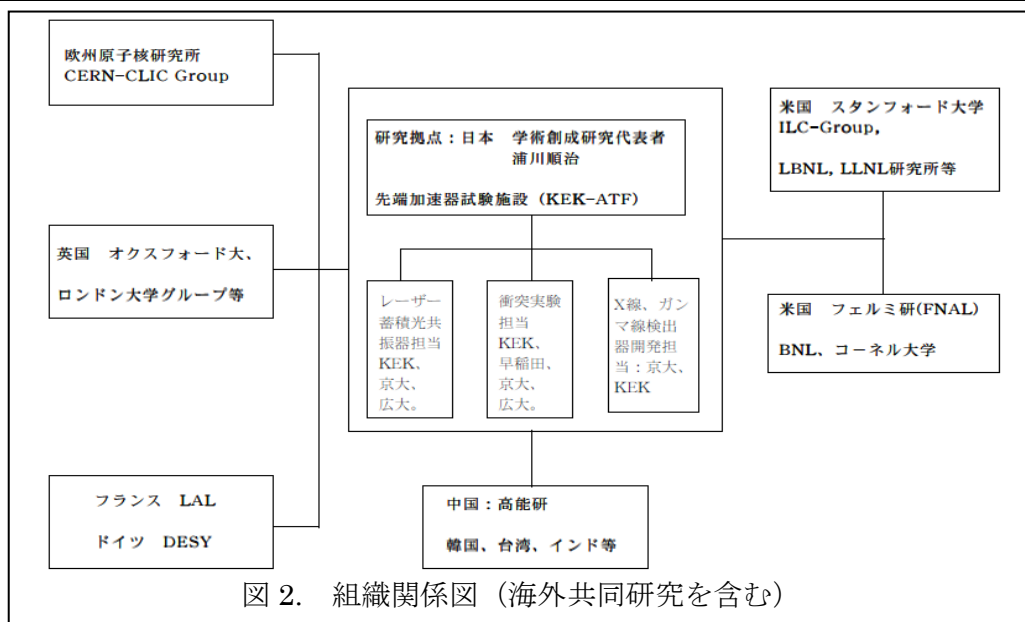


図2. 組織関係図 (海外共同研究を含む)

ている実験を同じ場所で行うことにより、相乗効果が若手研究者を通して起きる事を期待している。今までの国際協力実験においても装置の共有化や考え方の違いが若手研究者を刺激して、新しいアイデアが提案されてきた。購入する機械器具は全て担当研究者により仕様を確認後、開発実験装置に組み込むことになるので、これらの作業をポスドクと大学院生に教育を兼ねて行わせた。

現在、広島大学が加わりガンマ・ガンマ衝突装置への応用も考えるようになった。また、京都大学と早稲田大学のグループは高輝度 X 線生成への応用に取り組んでいる。そこで、43MeV の小型電子加速器とレーザー蓄積光共振器を使った開発と 1.3GeV の超低エミッタンス電子リングを使ったガンマ線生成のためのレーザー蓄積光共振器開発に分けて、人材育成も考慮に入れて 2 式の実験装置を製作することになった。目的はレーザーワイヤ開発であり何も変化していないが、より高度な装置開発になっている。また、大量に円偏極ガンマ線が生成できる可能性もあるので、偏極陽電子生成等の応用もありフランスの LAL 研究所のレーザー光学専門家が我々の研究に参加することになった。この結果、前ページに記述した困難が解決することになり、目的を達成する為の研究開発の方針は明確になった。残りの 3 年間も、課題提案で述べたのと同じ担当者がそれぞれの専門性を活かして実験装置製作に協力する。二組の装置で独立に実験を行うことができるので、問題点などの検討を素早く確かめることができるようになった。

海外との共同研究は欧米の研究所や大学等と色々な研究テーマで行っているが、このような ILC のために必須のビーム形状測定装置を同じ場所で競争しながら開発研究するのは始めてである。米国、英国、フランスの研究者達が良い意味での競争を行い、新しい成果が見えてきている。平成17年度と平成18年度合計4回の本研究に関わる Workshop での議論から確かな成果が期待できる共同実験計画が構築できたと確信している。英国オックスフォード大学が提案したレーザーワイヤ診断装置の概念図を図3に示す。ATF での電子ビームを使った共同実験は 50%以上が国際協力実験になっている。本研究テーマで参加する主な協力研究者の名前と所属は以下のようになっている。

- 米国スタンフォード大学 SLAC 所属：Douglas McCormick, LLNL：Jeff Gronberg
- フェルミ高エネルギー物理学研究所 FNAL：Marc Ross、コーネル大学：Robert Meller
- 英国オックスフォード大学：Brian Foster, David Howell, Nicolas Delerue
- ロンドン大学：Stewart Boogert, Steve Malton
- ロンドン大学王立ハウエル校：Grahame Blair, Gary Boorman, Chafik Driouichi, John Carter, Martia Price
- Cockcroft Institute：Andy Wolski

以上、教授3名、主任研究員4名、主任技術者2名、ポスドク3名、大学院生3名、その他多数である。この国際協力実験により日本の若手研究者が高い国際性を持った研究者になることが期待できる。

⑧これまでの研究経過

研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、以下の点を含めて具体的かつ明確に記述してください。

- ・本研究において得られた新たな知見、学術的なインパクト、または獨創性・新規性において格段の発展をもたらす可能性。
- ・当初に提案した研究計画を変更した場合は、その理由。(この欄の最後に線を引いて区別した上で、記述してください。)

電子ビームを $1\mu\text{m}$ 以下に絞り込むためには、超低エミッタンスの電子ビーム生成が必要である。この超低エミッタンス電子ビームは ATF で生成され、レーザーワイヤー開発実験中に電子ビームを垂直方向に $2\mu\text{m}$ 程度に絞り込んでしまったために $10\mu\text{m}$ W ワイヤーを切断してしまった。現在、この電子ビームを 37nm まで収束させる ATF2 project 実験の準備が国際協力で行われている。この電子ビームサイズも測定可能な光共振器型レーザーパルス干渉モニターを新しく提案した。ただし、このモニター開発は本研究課題の採択と同時に研究代表者が提案したものであるため、この干渉モニター開発は将来計画として本研究課題のレーザーワイヤー開発を優先している。一方、1993年に提案されたパルスレーザーを使ったレーザー干渉モニターは東京大学の研究室により 37nm のビームサイズを測定できるように改良・準備されている。

Off-Axis Parabolic 反射ミラーの開発では、焦点距離 150mm のものを製作した経験があるが反射率はグリーンレーザーに関して 90% 程度であった。この反射率を 99.99% 以上にするためには、誘電多層膜蒸着を放物面上に高精度で行う技術を開発する必要がある。純石英の平板上に誘電多層膜蒸着を行い、 99.999% 以上の反射率が 1064nm レーザーについて実現している。ここで重要な技術は放物面基板のスーパーポリッシュ技術と基板加工技術(直径 20mm の範囲で nm 以下の Roughness を達成する。)である。この技術開発には材料、加工技術、蒸着技術に新しい手法を取り入れる必要があると判断するので、 99% 反射率のものから試作を行い、4年間で 99.99% のものを製作できるように地道な研究開発を行う計画であったが、高反射率放物線ミラー開発が財政的に非現実的なものになることが判明した。そこで方針を変更して、高反射率平面ミラー2枚と高反射率球面ミラー2枚からなる光共振器によるレーザー蓄積(蓄積レーザーパルスエネルギー 1mJ から 100mJ) とレーザー絞込みサイズ $5\mu\text{m}$ 以下を実証することにした。この場合、実績のある高反射率ミラーを購入することにより、光共振器を構築できるので、重要な点はミラーの固定方法と位置フィードバック制御技術になる。

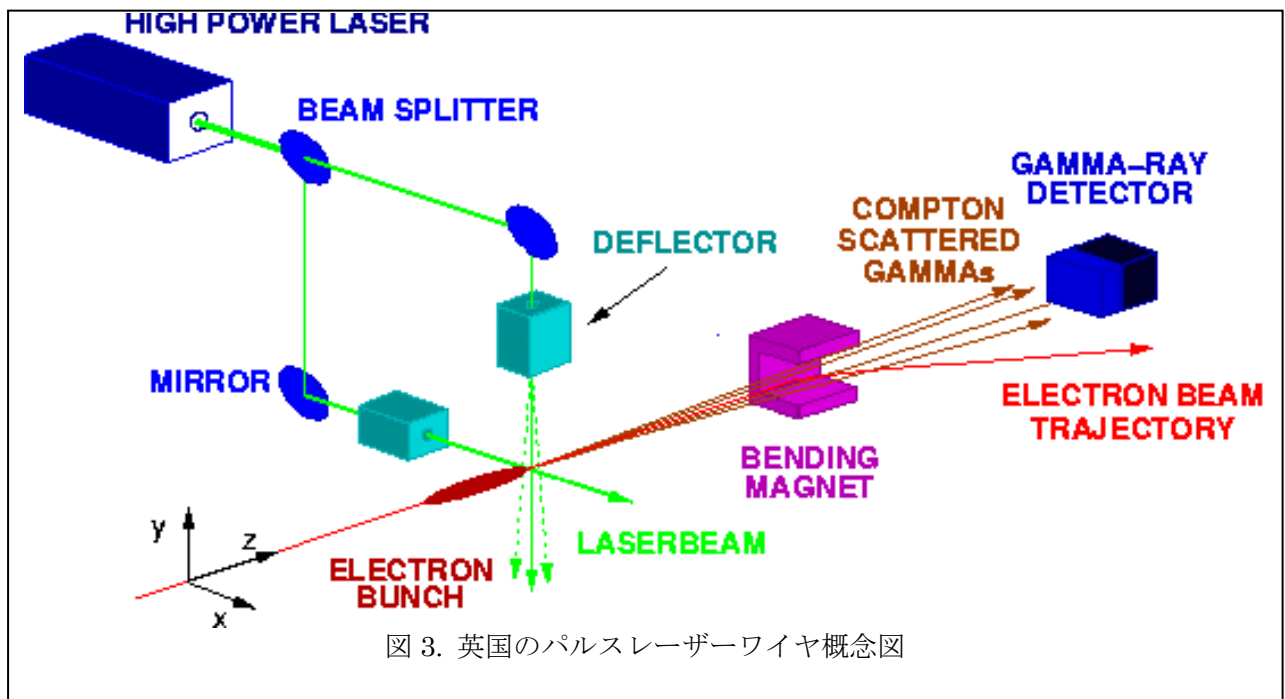
一方、純石英の平板をスーパーポリッシュした後に 99.99% 以上の反射率の誘電多層膜蒸着を行ったものを購入した。また、 1064nm パルスレーザー蓄積実験は 42cm Super Optical Cavity を製作して行っている。この実験により、 99.99% 以上の反射率の誘電多層膜蒸着技術と光蓄積共鳴状態を維持する制御系の技術開発を進めた。現在、 1064nm パルスレーザーのパルス幅 7psec (FWHM), 357MHz 繰り返し、 7W モードロックレーザー発信器からの出力を外部光共振器に蓄積して、 1.4kW まで安定増幅させるのに成功した。このレーザーのピークパワーは 1MW 相当である。我々の経験では、 99.98% 球面ミラーによる 42cm Super Optical Cavity パルスレーザー蓄積実験を行い、 1nm 精度でのミラー位置フィードバック制御を確認しているので、サブナノメートルのミラー位置制御が行われていることになる。このパルスレーザー蓄積光共振器を 43MeV 小型電子加速器に入れて、高輝度 X 線生成実験を行いながら色々な加速器のノイズ等が光共振器の安定性にどのように影響するかを調べることにした。当然のことであるが電子ビームによる実験では、検出器の開発、自動測定システムの構築、ガンマ線バックグラウンドの低減等を行うことになる。平成 19 年度から生成 X 線測定を開始する。

ウェストサイズの仕様を厳しくした別の 42cm Super Optical Cavity も製作した。今、レーザーパルス蓄積とフィードバック制御の最適化を進めている。1名のポスドクと2名の学生がほぼ専属でこの装置製作に携わっているため、夏には ATF Damping Ring に設置できる予定である。この光共振器でガンマ線を生成できれば、世界最高輝度の 20MeV ガンマ線が超前方に放出される。この実験に世界の多くの研究所が注目している状況である。最近、中国高能研の博士課程の学生1名が本実験に参加した。また、フランスの LAL は独自のリング光共振器

⑧これまでの研究経過（続き）

を製作して 2008 年度に ATF Damping Ring に設置することを決定した。このように生成できる光子数は目標の 1% であるが、素晴らしい光子ビームが生成できるので、多くの研究者が協力するようになってきている。平成 19 年 5 月に LAL で第二回 Posipol Workshop07 を行う。ここで我々の 168cm Four mirrors 2D or 3D cavities 方式の小型スーパー光共振器の設計を決定して、製作に取り掛かる。この装置は平成 20 年度中に ATF Damping Ring に設置することになる。この装置で本研究課題の目的を達成するのであるが、その過程で色々な問題が見えてくると思われる。例えば、床の振動、風の影響及び温度等を測定しながら、Super Optical Cavity の共鳴状態に与える影響を調べる必要があると予測できる。168cm Super Optical Cavity の支持方法を工夫して、開発実験室の環境や電子加速器室内の実験装置の環境でも問題が発生しないように色々な対策を行う必要がある。高反射率ミラーを使った高増幅率光共振器は環境に敏感である。レーザーの絞込み状況は高品質 1.3GeV 電子ビームとの逆コンプトン散乱実験により確認することになる。

英国グループの ATF 取り出しラインでのパルスレーザーワイヤ研究開発実験の経過について報告する。本装置の概念図を下に示す。現状は垂直スキャンのみを行なっている。装置の設置は 2005 年夏に行われ、衝突信号の検出は 2006 年の 5 月に成功した。その後、電子ビームサイズは $2\mu\text{m}$ 程度でレーザーウェストサイズの測定をレーザーのウェスト位置を電子ビームに対してスキャンすることにより行っている。最近、レーザーおよびレンズの調整により、 $16\mu\text{m}$ から $6\mu\text{m}$ までレーザーウェストを絞ることに成功した。パルスレーザーのエネルギーは約 50mJ, 繰り返し 1.56Hz, レーザーパルス幅 100psec であり、電子ビームとレーザーを安定に衝突させる技術を確認したと言える。2007 年 5 月に短焦点レンズの取替えとパルスレーザーシステムの再調整を行い、ウェストサイズ $2\mu\text{m}$ 以下にする予定である。



変更理由：純石英の表面を放物面にする表面精密加工技術（基板加工技術（直径 20mm の範囲で nm 以下の Roughness を達成する技術））開発と放物面基板のスーパーポリッシュ技術開発に要求される予算が、従来の球面及び平面精密加工やその表面スーパーポリッシュに要求される支払い金額の約 10000 倍以上であることが詳細設計段階で明らかになったので、性能上及び財政上問題ない Four mirrors ring super cavity に光共振器の構造を変更した。

⑨研究遂行上の問題点等

研究遂行上に生じた問題点及びその解決方法、見通し、要望等について記述してください。

平成 17 年度と平成 18 年度の主要研究開発項目として、99% Off-Axis Parabolic 反射ミラー 2 枚と 99.9% 反射率平板ミラー 2 枚により 42cm Super Optical Cavity を製作することを掲げたが、純石英の表面を放物面にする表面精密加工技術（基板加工技術（直径 20mm の範囲で nm 以下の Roughness を達成する技術））開発と放物面基板のスーパーポリッシュ技術開発に要求される予算が、従来の球面及び平面精密加工やその表面スーパーポリッシュに要求される支払い金額の 10000 倍以上であることが詳細設計段階で明らかになった。市販の放物面ミラーを使ったレーザービーム収束実験を行い、42cm Super Optical Cavity に関する基礎的な設計条件は確認できたが、高反射率の放物面ミラーの製作費が現実的でない。2 年間の海外のレーザー光学研究者との議論により、Optical path length 168cm (=4x42cm) の Four mirrors cavity を採用して、本研究課題の目的を達成することに変更した。Four mirrors cavity では 2 枚の高反射率平面ミラーと 2 枚の高反射率球面ミラーを使用することになるので、高反射率ミラーを製作する場合の困難はなくなる。また、単純なファブリ・ペロー型光共振器の 42cm Super Optical Cavity に関するレーザー絞込み限界 20 μ m を再度検討した。球面ミラー間隔の位置フィードバック制御精度がモードロックレーザー発信器からの電気信号ノイズにより影響され、この限界値がノイズ量によって決定していることを明らかにした。この場合、位置フィードバック制御精度は 3nm まで劣化していた。我々は連続レーザー発信器を使って 0.3nm まで高精度位置フィードバック制御技術開発を行い、連続レーザービームによる絞込みレーザーウェストサイズ 5 μ m を実現している。モードロックレーザー発信器のノイズ対策とレーザービーム軌道シュミレーションによりパルス絞込みレーザーウェストサイズ 5 μ m は可能であることが分かった。ただし、5 μ m 以下は不可能である。

そこで、平成 19 年度から 168cm Super Optical Cavity の試作を行い、Four mirrors cavity の設計を開始する。既に、フランス LAL 研究所の共同研究者が 4 つの高反射率ミラーの位置制御精度の要求値と達成可能な増倍率（100000 倍以上）及び絞込みサイズ（サブミクロン程度）を示した。最近、基礎的なレーザー蓄積実験に成功したが、計算で示されたレーザーパワーには全く達していない。2008 年度に我々の研究グループと LAL 研究グループの協力により、製作した装置を KEK の先端電子加速器に設置する予定である。

一方、英国の共同研究者が通常のレンズ系でパルスレーザーをサブミクロンまで収束させる装置設計を完了させた。この 2 年間の英国グループのレーザーワイヤ開発実験では、50mJ/pulse, 100psec パルスレーザーを 6 μ m まで絞込み、安定に電子ビームと衝突させてレーザービームのウェスト測定に成功している（電子ビームのサイズは 2 μ m 程度である）。平成 19 年度 5 月から 2 μ m 以下までレーザーワイヤを絞り込み 1 μ m 以下まで絞り込める電子ビームの形状測定を行う予定である。これに成功することは、ILC に必要なレーザーワイヤの基本仕様を確認したことになる。ただし、システムの信頼性と安定性に問題は残るものと思っている。下図は彼らのレーザー・電子ビーム衝突チャンバーの写真と測定システムである。

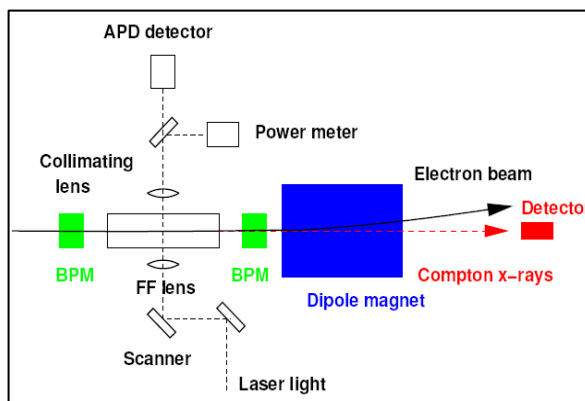
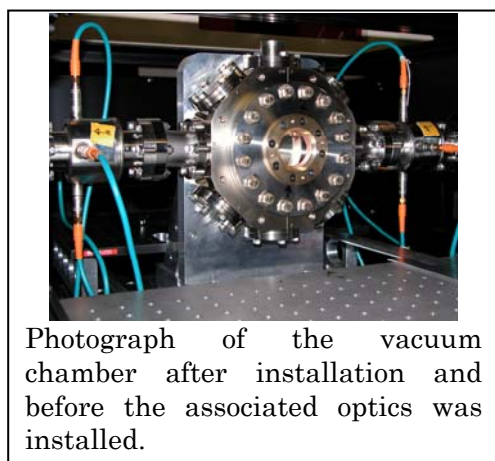


図 4. ATF に設置された英国グループの実験装置

⑩平成19年度及びそれ以降の研究計画・方法

前項の問題点と解決方法を踏まえて、今後の研究計画・方法を、具体的かつ明確に記述してください。なお、当初に提案した研究計画の変更を希望する場合は、その理由を記述してください。(この欄の最後に、線を引いて区別した上で記述してください。)

平成19年度、99.9%球面反射ミラー2枚と99.99%反射率平板ミラー2枚により168cm Super Optical Cavityを製作する。この装置を使って、共鳴状態を維持する制御実験を徹底的に光学テーブル上で行う。レーザー収束点でのレーザーサイズとレーザーパルス幅測定法を構築する。レーザービームの散乱現象を積極的に利用して、測定データの統計処理を行うことにより安定性およびレーザーサイズの推定値を得る手法を確立することが目的である。我々は既に、Super Optical Cavity性能(レーザー蓄積量及びレーザーモード)を測定する方法として、透過光測定法を確立している。

この168cm Super Optical Cavityを超高真空装置に適合するように改良を行う。ピエゾ駆動によりサブナノメータで99.9%球面反射ミラーと99.99%反射率平板ミラーを制御することになる。(150fs, 1064nmレーザーを購入して、電子ビームの縦方向測定を行う。即ち、電子ビームのバンチ長測定を高精度で行い、レーザーワイヤーがバンチ長測定にも使えることを実証する。バンチ長測定に関しては、予算的に厳しくなることが予想されるので、状況を見て中止することも考える。)

平成20年、99.9%球面反射ミラー2枚と99.99%反射率平板ミラー2枚による168cm Super Optical Cavityを小型電子加速器に設置する。衝突点での電子ビームサイズを20 μ mに調整する。このためには電子ビームのビームサイズを衝突点に対して上流と下流で測定しながら、4極電磁石を微調しなければならない。達成されている垂直エミッタンスを仮定した場合、計算上は衝突点で電子ビームを20 μ m以下にすることは可能である。この衝突実験は電子ビームとレーザービームのサイズが現状で実現されているサイズの2分の1であるため、研究者に非常に繊細なビーム調整を要求することになる。99.99%球面反射ミラー2枚と99.999%反射率平板ミラー2枚を購入する。我々でその反射率測定を行う。特に99.999%反射率平板ミラーの特性測定は非常に重要である。

平成20年度の電子ビームとレーザーパルスビームの衝突実験結果から、改良する点を分析する。改良点を取り入れて、99.99%球面反射ミラー2枚と99.999%反射率平板ミラー2枚による168cm Super Optical Cavityを製作する。この装置をATF Damping Ringに設置する。これは世界最高輝度ガンマ線生成実験である。

平成21年度、基礎的な測定と動作試験を行った後に、本装置をATF電子ビーム取り出しラインに設置する。本研究開発装置の電子ビーム形状測定分解能(および電子ビームパルス幅測定分解能)を衝突実験により見極める。また、測定時間の高速化に関する実験も行う。5年間の研究成果の総括を行い、研究開発報告書として公表する。

一方、英国Oxford Groupは平成19年度中に1 μ m以下のGreen Laser Waist Sizeを実現して、1 μ mの電子ビームサイズ測定を実証する。この装置は光共振器を使わないので、短焦点レンズの取り付け設計とパルスレーザーの品質がレーザーウェストサイズを決定する。既に2年間の衝突実験と改良設計で1 μ m以下のGreen Laser Waist Sizeは可能であると判断している。平成20年度以降はATF2用のマルチレーザーワイヤシステム構築を行うことになる。これは1台のパルスレーザー生成システムからのパルスグリーンレーザーをミラー等で切り分けて、数箇所の衝突点に導き、それぞれの衝突点でレーザーパルスを利用するものである。パルスレーザー生成システムは高価であるので、パルスレーザーを数箇所以上の衝突点へ導き、その点の近傍で垂直および水平にレーザーをスキャンすることにより、電子・陽電子ビームの垂直方向および水平方向ビームプロファイルを測定することになる。

変更理由：純石英の表面を放物面にする表面精密加工技術(基板加工技術(直径20mmの範囲でnm以下のRoughnessを達成する技術))開発と放物面基板のスーパーポリッシュ技術開発に要求される予算が、従来の球面及び平面精密加工やその表面スーパーポリッシュに要求される支払い金額の約10000倍以上であることが詳細設計段階で明らかになり、Optical path length 168cm(=4x42cm)のFour mirrors cavityによる信頼できる光共振器の設計ができ、目的をより明確なものにできたから。最終的な目的は、「光共振器中点でサブミクロン、1mJ/pulseを高繰り返し(357MHz)で安定に実現」か「レーザー絞込みサイズを5 μ mまで許容して、100mJ/pulseを高繰り返し(357MHz)で安定に実現」である。

⑪研究成果の発表状況

本研究費による成果発表に限って、これまでに発表した代表的な論文（査読有に限る）、著書（教科書、学会抄録、講演要旨は除く。）、工業所有権等、招待講演、国際会議、学会等における発表状況について、現在から順に発表年次をさかのぼり記入してください。なお、学術誌へ投稿中の論文を記入する場合は、掲載が決定しているものに限ります。

- ・例えば論文の場合、全著者名、論文名、掲載誌名、巻、最初と最後の頁、発表年（西暦）を記入してください。
- ・特に重要な論文5編以内に○を付してください。また研究代表者は太字とし、研究分担者には下線を付してください。
- ・本研究費による成果との謝辞があるものには☆を付けてください。

日本物理学会 2007 年春季大会発表

1. **福田将史**、**荒木栄**、**浦川順治**、**坂上和之**、**笹尾登**、**高野幹男**、**谷口敬**、**照沼信浩**、**東保男**、**平野耕一郎**、**本田洋介**、**武藤俊哉**、**山崎良雄**、**横山弘和**、**Liu Shengguang**、"KEK 小型電子加速器におけるレーザー蓄積装置を用いた小型 X 線源(LUCX)の開発"

2. **増田明彦**、**丑田公規**、**浦川順治**、**柏木茂**、**神谷好郎**、**黒田隆之助**、**五輪智子**、**坂上和之**、**早野仁司**、**森山亮**、**鷲尾方一**、"早稲田大学における逆コンプトン散乱を用いた水の窓領域軟 X 線生成"

3. **荒木栄**、**浦川順治**、**大森恒彦**、**奥木敏行**、**栗木雅夫**、**坂上和之**、**清水洋孝**、**高橋徹**、**照沼信浩**、**広瀬立成**、**舟橋義聖**、**本田洋介**、**李小平**、**鷲尾方一**、"ILC 計画に向けた偏極陽電子源の高輝度ガンマ線生成のためのレーザー蓄積空洞開発実験"

国際会議 APAC07、招待講演

★1. **J. Urakawa**, "ACHIEVEMENT OF ATF AND ITS FUTURE PLANS", Invited talk, Proceedings of APAC 2007, FRXMA03, Indore, India, 2007 (<http://apac07.cat.ernet.in/>)

○★2. **Y. Honda**, "Beam Instrumentation Experience at ATF", Invited talk, Proceedings of APAC 2007, WEZH102, Indore, India, 2007

秋の日米合同物理学会発表(US-Japan High Energy Physics Society Meeting in Hawaii)

Liu Shengguang, **Masafumi Fukuda**, **Koichirou Hirano**, **Junji Urakawa**, "Multi-bunch acceleration on LUCX system", 2006. 10. 29-11.03

Physical Review 査読論文

Eugene Bulyak, **Peter Gladkikh**, **Vladislav Skomorokhov**, **Tsunehiko Omori**, **Junji Urakawa**, **Klaus Moenig**, and **Frank Zimmermann**, "Beam dynamics in Compton ring gamma sources", Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 9, 094001, 2006

国際会議 EPAC06

★1. **K. Sakaue**, **M. Washio**, **S. Araki**, **M. Fukuda**, **Y. Higashi**, **Y. Honda**, **M. Takano**, **T. Taniguchi**, **J. Urakawa**, **N. Sasao**, **H. Sakai**, "Development of Pulse Laser Super-Cavity for Compact High Flux X-ray Sources", Proceedings of EPAC 2006, THPCH154, Edinburgh, Scotland, 2006

2. **Sudhir Dixit**, **Nicolas Delerue**, **Brian Foster**, **David Francis Howell**, **Ken Peach**, **Graham Quelch**, **Myriam Qureshi**, **Armin Reichold**, **Graeme Hirst**, **Ian Ross**, **Junji Urakawa**, **V. Soskov**, **Alessandro Variola**, **Fabian Zomer**, **Grahame A. Blair**, **Stewart Takashi Boogert**, **Gary Boorman**, **Alessio Bosco**, **Chafik Driouichi**, **Pavel Karataev**, **Axel Brachmann**, **Josef Frisch**, **Marc Ross**, "A Study of Laser System Requirements for Application in Beam Diagnostics and Polarimetry at the ILC", Proceedings of EPAC 2006, MOPLS081, Edinburgh, Scotland, 2006

○★3. **S. T Boogert**, **G. Blair**, **G. Boorman**, **A. Bosco**, **L. Deacon**, **C. Driouichi**, **P. Karataev**, **T. Kamps**, **N. Delerue**, **S. Dixit**, **B. Foster**, **F. Gannaway**, **D. F. Howell**, **M. Qureshi**, **A. Reichold**, **R. Senanayake**, **A. Aryshev**, **H. Hayano**, **K. Kubo**, **N. Terunuma**, **J. Urakawa**, **L. J. Jenner**, **A. Brachmann**, **J. Frisch**, **M. Ross**, "A Laser-wire System at the ATF Extraction Line", Proceedings of EPAC 2006, MOPLS080, Edinburgh, Scotland, 2006

(<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/e06/INDEX.HTM>)

第一回 POSIPOL 2006 Workshop at CERN (26-28 April 2006) で発表

1. **K. Sakaue**, "Experimental plan of X-ray generation using optical cavity for laser stacking"

2. **H. Sato**, "R&D status of optical cavity for ILC polarized e+"

3. **T. Omori**, "Polarized e+ generation at KEK-ATF"

4. **J. Urakawa**, "Polarized e+ source for ILC based on Compton scheme"

日本物理学会 2006 年春季大会発表

1. **坂上和之**、**鷲尾方一**、**高野幹男**、**福田将史**、**荒木栄**、**浦川順治**、**谷口敬**、**東保男**、**本田洋介**、**笹尾登**、"レーザーコンプトン散乱を用いた小型硬 X 線源のためのレーザー蓄積装置の開発"

2. **福田将史**、**荒木栄**、**浦川順治**、**坂上和之**、**高野幹男**、**照沼信浩**、**平野耕一郎**、**武藤俊哉**、**山崎良雄**、"RF Gun Test Benchにおけるレーザー蓄積装置を用いた小型硬 X 線源の開発"

3. **照沼信浩**、**浦川順治**、**荒木栄**、**栗木雅夫**、**武藤俊哉**、**高野幹男**、**福田将史**、**平野耕一郎**、**山崎良雄**、

⑩研究成果の発表状況（続き）

“Ce-Teフォトカソードを用いた高周波電子銃”

Physical Review Letters 査読論文

1. Marcus Babzien, Ilan Ben-Zvi, Karl Kusche, Igor V. Pavlishin, Igor V. Pogorelsky, David P. Siddons, Vitaly Yakimenko, David Cline, Feng Zhou, Tachishige Hirose, Yoshio Kamiya, Tetsuro Kumita, Tsunehiko Omori, **Junji Urakawa** and Kaoru Yokoya, "Observation of the Second Harmonic in Thomson Scattering from Relativistic Electrons", Physical Review Letters, 96, 054802-1,-4, 2006

○2. T.Omori, M.Fukuda, T.Hirose, Y.Kurihara, R.Kuroda, M.Nomura, A.Ohashi, T.Okugi, K.Sakaue, T.Saito, **J.Urakawa**, M.Washio, and I.Yamazaki, "Efficient Propagation of Polarization from Laser Photons to Positron through Compton Scattering and Electron-Positron Pair Creation", Physical Review Letters, 96, 114801-1,-4, 2006
Nucl. Instr. and Meth. 査読論文

Koichiro Hirano, Masafumi Fukuda, Mikio Takano, Yoshio Yamazaki, Toshiya Muto, Sakae Araki, Nobuhiro Terunuma, Masao Kuriki, Mitsuo Akemoto, Hitoshi Hayano and **Junji Urakawa**, "High-intensity multi-bunch beam generation by a photo-cathode RF gun", Nucl. Instr. and Meth. A, ELSEVIER, 560, pp233-239 (2006)

CD-ROM 出版

★Editors: Y. Honda, T. Tauchi and **J. Urakawa**, Y. Iwashita and A. Noda, Proceedings of Nanobeam 2005 and KEK Proceedings 2005-20, 36th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, Uji Campus, Kyoto University, October 17-21, 2005

Nanobeam 2005 発表

1. G. A. Blair, Simulation of Laser-wire in ILC, Nanobeam05, 18th Oct. 2005

2. N. Sasao, Development of Pulsed Laser Stacking and Applications, Nanobeam05, 18th Oct. 2005

○★3. **J.Urakawa**, Laser Interferometer with Optical Cavity and Cavity BPMs, Proceedings of NANOBEAM 2005, 150-152, Uji, Kyoto University, Japan, October 17-21, 2005

★4. **J.Urakawa**, Polarized Positron Source Based on Compton Scattering, Proceedings of NANOBEAM 2005, 254-256, Uji, Kyoto University, Japan, October 17-21, 2005

著書：浦川順治、光科学研究の最前線、「光科学研究の最前線」編集委員会出版、加速器とレーザー、232-235, August, 2008

2006 年日本加速器学会年会発表

1. Yoshio Kamiya, Masakazu Washio, Yoshimasa Hama, Tachishige Hirose, Kazuyuki Sakaue, Hiroyuki Nagai, Ryo Moriyama, Keita Komiya, Yuta Kato, Tomoko Gowa, Tomoaki Nomoto, Akihiko Masuda, Aki Murata, **Junji Urakawa**, Toshiyuki Takatomi, Nobuhiro Terunuma, Masao Kuriki, Ryunosuke Kuroda, Shigeru Kashiwagi, "Development of a Cs₂Te Cathode RF Gun at Waseda University", 481-483, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 2-4, 2006, Sendai Japan)

2. Masafumi Fukuda, Sakae Araki, Yasuo Higashi, Koichiro Hirano, Yosuke Honda, Toshiya Muto, Kazuyuki Sakaue, Noboru Sasao, Liu Shengguang, Mikio Takano, Takashi Taniguchi, Nobuhiro Terunuma, **Junji Urakawa**, Yoshio Yamazaki, Hirokazu Yokoyama, "Present status of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX)", 487-489, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 2-4, 2006, Sendai Japan)

3. Kazuyuki Sakaue, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Toshiya Muto, Noboru Sasao, Liu Shengguang, Mikio Takano, Takashi Taniguchi, Nobuhiro Terunuma, **Junji Urakawa**, Masakazu Washio, Hirokazu Yokoyama, "LASER UNDULATOR COMPACT X-RAY SOURCE (LUCX) USING PULSED-LASER STACKING CAVITY", 702-704, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 2-4, 2006, Sendai Japan)

4. Ryo Moriyama, Yoshio Kamiya, Kazuyuki Sakaue, Tomoko Gowa, Akihiko Masuda, Masakazu Washio, Ryunosuke Kuroda, Shigeru Kashiwagi, Hitoshi Hayano, **Junji Urakawa**, Kiminori Ushida, "DEVELOPMENT OF HIGH BRIGHTNESS SOFT X-RAY SOURCE BASED ON INVERSE COMPTON SCATTERING", 708-710, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 2-4, 2006, Sendai Japan)

Journal of Applied Physics 査読論文

Shigeru Kashiwagi, Ryunosuke Kuroda, Takashi Oshima, Fumio Nagasawa, Tomoaki Kobuki, Daisuke Ueyama, Yoshimasa Hama, Masakazu Washio, Kiminori Ushioda, Hitoshi Hayano, and **Junji Urakawa**, "Compact soft x-ray source using Thomson scattering", JAP, Vol. 98, No. 12, 123302-1, -6, 2005

○★Sakae Araki, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Yoshimasa Kurihara, Masao Kuriki, Toshiyuki Okugi, Tsunehiko Omori, Takashi Taniguchi, Nobuhiro Terunuma, **Junji Urakawa**, X.Artru, M.Chevallier, V.Strakhovenko, Eugene Bulyak, Peter Gladkikh, Klaus Monig, Robert Chehab, Alessandro Variola, Fabian Zomer, Susanna Guiducci, Pantaleo Raimondi, Frank Zimmermann, Kazuyuki Sakaue, Tachishige Hirose, Masakazu Washio, Noboru Sasao, Hirokazu Yokoyama, Masafumi Fukuda, Koichiro Hirano, Mikio Takano, Tohru Takahashi, Hiroki Sato, Akira Tsunemi, Jie Gao

⑩研究成果の発表状況（続き）

and Viktor Soskov, “Conceptual Design of a Polarised Positron Source Based on Laser Compton Scattering - A Proposal Submitted to Snowmass 2005 -”, KEK Preprint 2005-60, Physics/0509016, CARE/ELAND Document-2005-013, CLIC Note 639, LAL 05-94, September 2005

2005年日本加速器学会年会発表

1. Ryo Mariyama, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Ryunosuke Kuroda, Shigeru Kashiwagi, Hitoshi Hayano, **Junji Urakawa**, “Injection Laser Effect on Transverse Emittance in a Photocathode RF Electron Gun”, 373-375, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 20-22, 2005, Tosu Japan

2. S.Araki, T.Muto, T.Nakamura, J.Odagiri, N.Terunuma, M.Kuriki, H.Hayano, **J.Urakawa**, Y.Yamazaki, M.Fukuda, K.Hirano, M.Takano, “Control System of Multi-bunch Photo-cathode RF Gun Test Bench”, 436-438, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 20-22, 2005, Tosu Japan

3. Masafumi Fukuda, Sakae Araki, Koichiro Hirano, Toshiya Muto, Mikio Takano, Nobuhiro Terunuma, **Junji Urakawa**, Yoshio Yamazaki, “Plan of X-ray Generation using a Pulsed Laser Super Cavity in RF Gun Test Bench”, 778-780, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 20-22, 2005, Tosu Japan

4. Shuichi Minamiguchi, Kentaro Hidume, Taku Saito, Masakazu Washio, Ryunosuke Kuroda, Shigeru Kashiwagi, Hitoshi Hayano, **Junji Urakawa**, Kiminori Ushida, “Soft X-ray generation via inverse Compton scattering and its application”, 799-801, 778-780, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 20-22, 2005, Tosu Japan

ILC-BDIR Workshop 発表(<http://www.pp.rhul.ac.uk/workshop/>)

1. A. Bosco, “First thoughts on Electro-Optic scanning”, ILC-BDIR Workshop, 21st June 2005

2. G. Blair, “Beam Size Monitors”, ILC-BDIR Workshop, 21st June 2005

3. G. Blair, “Plans for Laser-wire System”, ILC-BDIR Workshop, 21st June 2005

4. Y. Honda, “ATF-DR Laser wire”, ILC-BDIR Workshop, 21st June 2005

5. A. Aryshev, “Micron electron beam optics at ATF extraction line for laser wire experiment”, ILC-BDIR Workshop, 21st June 2005

6. N. Delerue, “Laser optics for the ATF Laser-wire”, ILC-BDIR Workshop, 21st June 2005

7. D. Howell and Fred Gannaway, “Vacuum Chamber Design and Infrastructure Requirements for the ATF Laser-wire Experiment”, ILC-BDIR Workshop, 21st June 2005

⑪本研究費による研究成果の社会・国民への発信

Web、マスメディア、「ひらめき☆ときめきサイエンス」等の公開行事による情報発信について記入してください。

・Webを利用したものはURL、新聞掲載では新聞名、掲載年月日等、パンフレットの場合は題名、発行年月、発行数等、行事では、行事名、実施日、テーマ、参加者数等。

本研究課題のWebは<http://atfweb-lo.kek.jp/lwi/>で一般に公開している。我々の国際協力研究は、それぞれの国の大学や研究所でレーザーワイヤ研究開発を含むWebを立ち上げて、情報交換を積極的に行っている。勿論、知的所有権に関わる重要な情報はPassword Protectionによって管理している。以下、本研究課題に

直接関係しているWeb URLである。ATF国際協力：<http://atf.kek.jp/collab/ap/>

早大軟X線源<http://www.rise.waseda.ac.jp/proj/sci/S99H03/j-S99H03.html>, <http://atfweb.kek.jp/lucx/test.html>

英国：<http://www.hep.man.ac.uk/lc-abd/>, <http://www.pnp.physics.ox.ac.uk/~delerue/laserwire/>

ドイツ：<http://ilc.desy.de/>

米国：<http://ilc.fnal.gov/> 等十数か所以上のWebがリンクされて国際的な公開を推進している。

パンフレットの場合は題名、発行年月、発行数等：ナノビームの実現、2005年11月、2万枚

行事名：Posipol Workshop06 at CERN (2006, 4) <http://posipol2006.web.cern.ch/Posipol2006/> 約50名, 次回 Posipol Workshop07 at LAL (2007, 5) <http://events.lal.in2p3.fr/conferences/Posipol07/index.html>

Laser Wire Mini-Workshop：本課題採択前に5回開催、その後3回開催した。

BDIR05 <http://www.pp.rhul.ac.uk/workshop/> 約70名,

Nano2005 <http://www.wal.kuicr.kyoto-u.ac.jp/NanoBM> 約120名,

EPAC06 <http://ilcagenda.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=721> 26名

ILC-GDE Workshop：本課題採択後6回開催された。今後も2010年まで同様に開催される。

米国 Snowmass2005 約250名, イタリア Frascati <http://www.linearcollider.org/cms/?pid=1000185> 約260名

インド Bangalore <http://ilcagenda.cern.ch/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=6> 約210名,

カナダ Vancouver <http://ilcagenda.cern.ch/conferenceTimeTable.py?confId=316> 約250名,

スペイン Valencia <http://ific.uv.es/~ilc/ECFA-GDE2006/> 約300名, 中国北京 Beijing 約280名,

次回はドイツ Hamburg DESY <http://lcws07.desy.de/> で行われる。

⑬当初の研究目的の達成度を自己評価してください。

該当する を塗りつぶすとともに、理由を記述してください。

- 予定以上に進展している
- 概ね予定どおり進展している
- やや遅れている
- 遅れている

(理由)

レーザーワイヤの開発研究で最も重要な点は、高分解能でビームサイズを短時間測定できるようにすることである。この目的を実現するためにサブミクロンのレーザーワイヤを安定に生成して、そのワイヤで電子ビームを高速スキャンできる Super Optical Cavity を製作することになる。逆コンプトン散乱によって生成されたガンマ光子またはX線量をレーザーワイヤ位置に対して測定することにより、電子ビームのプロファイルを得ることができる。高密度電子ビームのサイズを $5\mu\text{m}$ とした場合、数 μm 以下のレーザー絞込みによる電子ビームスキャンが必要である。ILC 加速器ではビーム収束系を除くと電子・陽電子ビームサイズは $5\mu\text{m}$ 程度であるので、CW レーザー Super Optical Cavity 技術は確立している。高速スキャンのために CW レーザーをパルスレーザーに変える試みは、我々が世界で最初に行い原理証明実験を成功させた。この2年間で 42cm Super Optical Cavity の安定化技術を徹底的に見極めて、制御回路を改良することに成功した。単純な 42cm Super Optical Cavity の実用化を示す過程で、色々な改良を行い最終的な目的（「光共振器中点でサブミクロン、 1mJ/pulse を高繰り返し(357MHz)で安定に実現」か「レーザー絞込みサイズを $5\mu\text{m}$ まで許容して、 100mJ/pulse を高繰り返し(357MHz)で安定に実現」)は平成 21 年度末までに達成できる見通しであるので、研究開発は順調である。ただし、既に説明したように Optical Cavity の構造を 168cm Four mirrors cavity に変更したので、新しい基礎実験が必要になった。今までに開発したミラー制御技術は同様に使え、色々な許容量を大きくする設計が可能になったので、168cm Four mirrors cavity のミラー取り付け機械設計が重要である。今まで得た振動、レーザー発信器からのノイズ、圧電素子取り付け方法等に関する経験が十分に活かされれば、Four mirrors cavity は色々な点で優れた Super Optical Cavity になる。我々研究グループはフランスのレーザー専門家の基礎実験結果を深く分析して、168cm Four mirrors cavity のプロットタイプを平成 19 年度中に完成させる。

⑭現時点で得られている研究成果の学術的価値、関連分野への波及性について自己評価してください。

世界、日本における位置づけ、インパクトなどを記述してください。

我々が ATF Damping Ring で使用している CW レーザーワイヤのウェストサイズは約 $5\mu\text{m}$ (r. m. s.) であり、 $1\mu\text{m}$ 以下まで絞り込むことが次の重要な課題になっている。これは世界最小のレーザーウェストサイズのワイヤを安定に生成して、超精密 3 次元移動架台によって超高真空中の高エネルギー電子ビームを垂直方向に $1\mu\text{m}$ ステップでスキャンしていることになる。ただし、CW レーザーワイヤでは 10 分程度の測定時間が必要であり、電子ビームが 50Hz や 100Hz で振動しているとその振幅も含めて測定していることになる。

CW レーザーワイヤをパルスレーザーワイヤに変えて、レーザー空間密度を上げ、ガンマ線生成量を増やすことにより高速スキャンが可能になる。この場合、機械的なスキャンから圧電素子によるミラーズキャンに変更して、10kHz 程度の速度まで上げることは可能である。そのためには現在検出器で得られているガンマ線量を 6 万倍以上にすることが統計的に必要である。これは高輝度ガンマ線生成であり、 6×10^8 光子/秒の単色ガンマ線ビームを定常的に生成していることになる。この量は第三世代放射光源 (20MeV γ -ray) で得られている量の 1000 倍以上に相当する。

現時点で得られている光共振器内のレーザーピークパワーは数 MW であり、CW レーザーワイヤ 100W と比較して 3×10^4 倍ピークパワーを上げたことになる。ただし、実現できたレーザーウェストサイズは $40\mu\text{m}$ であるので、生成ガンマ線は 5×10^2 倍の 5×10^6 光子/秒の単色ガンマ線ビームになる。平成 19 年度中にこの光共振器が ATF Damping Ring に設置され、この輝度のガンマ線が定常的に生成できれば第三世代放射光源では得られないガンマ線ビームを生成したことになる。このガンマ線ビームは原子炉核燃料廃棄物の定量的診断や一部の有毒核廃棄物の短寿命化による処理に使える画期的な成果になる。

この Super Optical Cavity の実用化技術はサブナノメータミラー位置制御であり、レーザー光の新しい制御技術を実用化したことになる。これによって光科学研究に役立つ新しい道具を提供することになる。レーザーウェストサイズを $5\mu\text{m}$ 以下にできれば、我々の目的は達成され、また逆コンプトン散乱による小型光子ビーム源が実用化することになる。次世代マイクロリソグラフィから医学利用までの波及効果がある。

⑮研究費の使用状況

以下の点について記入してください。

- ・当初の研究計画調書に記載した研究費の使用内訳について変更があった場合は、主な変更点及びその理由（変更により当初の研究目的の達成に支障が生じないのかを含めて）。
- ・高額の出費がある場合は、用途、金額、研究上必要な理由等（物品費については、「⑯物品費の支出明細」欄に記入してください）。
- ・交付申請書に記載した分担金の配分予定について変更があった場合は、その理由。

平成 17 年度、軸外し放物面反射ミラーを購入してレーザー収束系の試験を行った。そして Off-Axis Parabolic 反射ミラーの高反射率化技術について詳細な調査を実施した。その結果、現実的な予算で 99.9%以上の反射率を実現できる Off-Axis Parabolic 反射ミラー製作は無理であると結論した。勿論、予算があれば製造できる企業は存在する。そこで代替方式の検討を開始した。その間、単純な 42cm Super Optical Cavity を 2 式製作して、一式は共振器増幅率を上げるためのフェードバック制御技術の問題点追求実験用として、現在 X 線生成小型電子加速器(43MeV)に設置している。この場合、低エネルギー電子ビームの収束サイズは $50\mu\text{m}$ 程度であるので、レーザー絞込みサイズは $40\mu\text{m}$ 程度まで許容した。この実験ではレーザー絞込みサイズを大きくして、実用上の開発装置の総合試験（電子ビームとパルスレーザーの衝突実験及び逆コンプトン散乱光子検出）を優先した。他の一式は、世界最小低エミッタンス高エネルギー電子ビームを生成できる 1.3GeV ATF Damping Ring に設置するので十分にレーザー絞込み可能な光共振器である。これは平成 19 年度中に設置する。このように本研究課題に参加する学生やポストクが予想以上に増えたことを考慮して、研究開発効率を上げる方針に変更した。ただし、Off-Axis Parabolic 反射ミラーの代替方式が決定するまでに色々な議論とシミュレーションによる検討が必要であったので、平成 18 年度 10 月まで、コの字型光共振器の製作を中止する結論を延期していた。Optical path length 168cm(=4x42cm)の Four mirrors cavity は 2 枚の高反射率平面ミラーと 2 枚の高反射率球面ミラーで構成でき、レーザーパワー増倍率が 10 万倍以上で容易に $5\mu\text{m}$ 以下にレーザーを絞り込めることが明らかになった。ただし、以下の図に示すような構造になるので、詳細な機械設計を行う必要がある。この基本的な構想はフランスのレーザー光学の専門家の提案であり、我々は彼らと国際協力研究を開始することになった。フランス LAL は独自にレーザー光共振器製作を開始している。彼らの目的は高輝度円偏光ガンマ線生成実験を行い、ILC 用偏極陽電子生成に逆コンプトン散乱方式が使えることを示すことである。このようなレーザー光共振器製作は我々のレーザーワイヤ開発と目的は違うが、研究開発技術は一致するので平成 18 年度に協力協定を締結した。平成 17 年度および平成 18 年度で Off-Axis Parabolic 反射ミラー製作とコの字型光共振器の製作に計上した予算は単純な 42cm Super Optical Cavity 製作およびそれらを加速器内に設置する予算に振り替えた。

一方、英国 Oxford Group は ATF 取り出しラインにて、50mJ/100psec グリーンレーザーパルスを短焦点レンズで絞込み、 $6\mu\text{m}$ のレーザーウェストサイズを電子ビーム（電子ビームは $2\mu\text{m}$ 程度になっている）で測定することに成功している。平成 19 年 5 月にレーザーウェストサイズを $1\mu\text{m}$ 以下になるようにレンズ系の改良を終了して、電子ビームサイズの測定を成功させる予定である。本国際協力に必要な光学台、レーザー調整費等に本科学研究費を使った。衝突チェンバーは英国負担である。

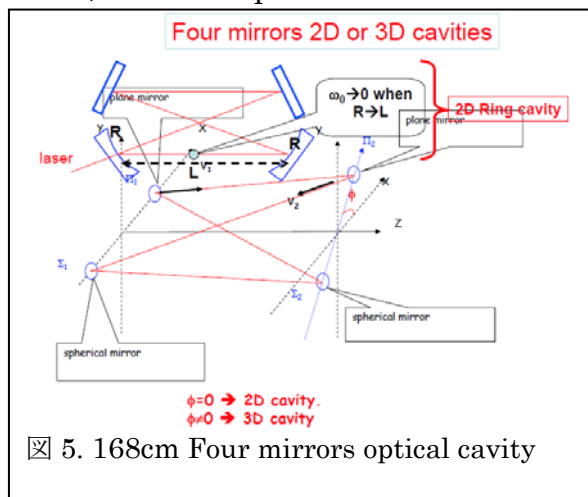


図 5. 168cm Four mirrors optical cavity

⑩物品費の支出明細

以下の物品について記入してください。

・単価50万円以上の物品。

・単価50万円未満であっても、同様の物品を多数、多量に購入した場合。また、その理由を下段に記述してください。

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価(円)	金額(円)	設置(使用)研究機関
H17	レーザー遮光ウィンドウ	図面による発注	20枚	58,800	1,176,000	KEK アセンブリホール
	高反射率ミラー	平板、反射率 99.9%以上	10個	139,650	1,396,500	KEK アセンブリホール
	光学架台	防振光学台	1台	1,426,009	1,426,009	KEK アセンブリホール
	レーザーチェンバー用架台	図面による発注	1個	504,000	504,000	KEK アセンブリホール
	半導体励起モードロックピコ秒レーザー	GE-100-VAN-714MHz (CLX-1100)	一式	12,706,522	12,706,522	KEK アセンブリホール
	レーザー用クリーンハット	図面による発注	一式	997,500	997,500	KEK アセンブリホール
	光学架台	カタログ製品	1台	1,533,840	1,533,840	KEK アセンブリホール
	ファラデーアイソレーター	カタログ製品	2台	441,000	882,000	KEK アセンブリホール
	カラー・デジタル・フォスファ・オシロスコープ	カタログ製品	1台	1,162,654	1,162,654	KEK アセンブリホール
	ネットワーク・クレートコントローラ	カタログ製品	1台	602,700	602,700	KEK アセンブリホール
	音響光学素子周波数シフター	カタログ製品	1台	1,207,500	1,207,500	KEK アセンブリホール
	レーザービーム診断システム	仕様書による発注	一式	1,039,500	1,039,500	KEK アセンブリホール
	軸外し放物面鏡	カタログ製品	1枚	2,520,000	2,520,000	KEK アセンブリホール
	OEM用 IR 単一周波数 DPSS レーザー	カタログ製品	1式	2,970,870	2,970,870	KEK アセンブリホール
	共振器ミラー	球面、反射率 99%	10個	172,200	1,722,000	KEK アセンブリホール
	ムーバー架台	図面による発注	1台	2,845,500	2,845,500	KEK アセンブリホール
	イオンポンプ	カタログ製品	2台	672,000	1,344,000	KEK アセンブリホール
	ソフトウェア	カタログ製品	1個	643,125	643,125	ATF コンテナ PC 内
	ファラデーアイソレーター	カタログ製品	2個	426,090	852,180	KEK アセンブリホール
	クサビ台	図面による発注	3台	535,500	1,606,500	KEK アセンブリホール
	ビームプロファイラ	仕様書による発注	一式	819,000	819,000	KEK アセンブリホール
H18	レーザー蓄積キャビティ	図面による発注	一式	687,750	687,750	KEK アセンブリホール
	レーザー蓄積装置開発用クリーンハット	図面による発注	一式	2,940,000	2,940,000	KEK アセンブリホール
	共振器ミラー	球面、反射率 99.9%	10個	225,750	2,257,500	KEK アセンブリホール
	ハイパワーモードロックピコ秒レーザー	COUGAR-HRR-SC-CLX	一式	17,997,000	17,997,000	KEK アセンブリホール
	φ24 コンタクト付ベローズチェンバー	図面による発注	10台	262,500	2,625,000	KEK アセンブリホール
	SMA 端子	図面による発注	80個	33,075	2,646,000	KEK アセンブリホール
	レーザーインターロック制御盤	仕様書による発注	一式	840,000	840,000	KEK アセンブリホール
	無酸素銅材	φ150-250、Class-1	一式	1,360,800	1,360,800	KEK 工作センター
	クリーンブース	図面による発注	1台	508,725	508,725	KEK アセンブリホール
	ディテクターモジュール	仕様書による発注	2台	1,050,000	2,100,000	KEK アセンブリホール

(同様の物品を多数、多量に購入した場合、その理由)

平成17年度：レーザー遮光ウィンドウ 20 枚は、人がレーザー調整作業等を行う場合に安全を確保するため。高反射率（平板）ミラー10 個は、共振器構成中に破損する可能性が高いため。共振器（球面、反射率 99%以上）ミラー10 個は、共振器構成中に破損する可能性が高いため。（共振器当り 2 個使用する。）

平成18年度：共振器（球面、反射率 99.9%以上）ミラー10 個は、共振器構成中に破損する可能性が高いため。φ24 コンタクト付ベローズチェンバー10 台は、電子ビーム軌道を確保する超高真空チェンバーに使用するもので、SMA 端子 80 個は電子ビーム軌道を測定する電極端子に使うものである。これらを使ってレーザーと電子ビーム衝突装置を製作する。（軌道測定装置 1 台当たり 4 端子使用する。）レーザーワイヤと電子ビーム衝突装置は平成19年の夏に電子リングに設置する予定。

⑩研究費の応募・受入等の状況・エフォート

本欄は、研究課題が十分に遂行し得るかどうかを判断する際に参照するところであり、研究代表者及び研究分担者の、現時点における(1)受入中・受入予定の研究費、(2)応募中の研究費、(3)その他の活動について、次の点に留意して記入してください。なお、複数の研究費を記入する場合は、点線を引いて区別してください。

- ・エフォートとは、総合科学技術会議の定義である「研究者の年間の全仕事時間を100%とした場合、そのうち当該研究の実施に必要となる時間の配分率(%)」のことであり、先頭には本研究課題を記入してください。
- ・科学研究費補助金の「特定領域研究」にあつては、「計画研究」「公募研究」の別を記入してください。
- ・所属研究機関内で競争的に配分される研究費についても記入してください。
- ・研究者ごとに「上記以外の研究活動」(記入した研究費以外で職務として行う研究活動)、「教育活動」及び「その他の活動」のエフォートを記入してください。「上記以外の研究活動」、「教育活動」及び「その他の活動」と合わせ、エフォートは100%になります。
- ・研究代表者及び研究分担者ごとに実線を引いて分けて記入してください。

氏名	資金制度・研究費名(研究期間・配分機関等名)	研究課題名(研究代表者氏名)	役割(代表・分担の別)	平成19年度研究経費(期間全体の額)(千円)	受入中、受入予定、応募中の別	エフォート(%)	活動の概要
浦川 順治 (高エネ研機構・加速器・教授)	学術創成研究費(H17～H21)	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究(浦川順治)	代表	64,500 (304,500)	受入中	50	研究総括
	日英共同研究(二国間交流事業)(H19～H20)	レーザーワイヤー電子ビームサイズモニター開発(浦川順治)	代表	2,500 (5,000)	受入中	10	研究総括
	日米科学技術協力事業(H19)	最先端加速器のビーム制御に関する開発(浦川順治)	代表	25,000 (25,000)	受入中	10	研究総括
	上記以外の研究活動					10	電子ビーム生成に関する研究
	教育活動					10	大学院学生教育指導
	その他の活動					10	学会委員、国際諮問委員活動等
早野 仁司 (高エネ研機構・加速器・准教授)	学術創成研究費(H17～H21)	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究(浦川順治)	分担	0 (0)	受入中	10	加速器運転
	その他の活動						
	日英共同研究(二国間交流事業)(H19～H20)	レーザーワイヤー電子ビームサイズモニター開発(浦川順治)	分担	0 (0)	受入中	10	加速器運転
	上記以外の研究活動					50	超伝導電子加速器に関する研究
	教育活動					15	大学院学生教育指導
	その他の活動					15	国際諮問委員活動等
鷲尾 方一 (早大・理工学術院・教授)	学術創成研究費(H17～H21)	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究(浦川順治)	分担	0 (0)	受入中	10	ガンマ線検出法の開発
	その他の活動						
	大学等連携加速器科学支援事業(H19)	RF電子銃を用いたコンパクトな高量子効率の高品質大強度電子ビーム生成(鷲尾方一)	代表	8,000 (8,000)	受入中	30	研究総括
	KEK共同開発研究(H19)	光高周波電子源による高品質・大強度電子ビーム源(鷲尾)	代表	3,800 (3,800)	応募中	10	研究総括
	上記以外の研究活動					10	小型電子加速器の応用に関する研究
	教育活動					30	学部・大学院学生教育指導
	その他の活動					10	学会委員活動等

①研究費の応募・受入等の状況・エフォート（続き）							
氏名	資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役割（代表・分担の別）	平成19年度研究経費（期間全体の額）（千円）	受入中、受入予定、応募中の別	エフォート（%）	活動の概要
阪井寛志 （東大・物性研・助教）	学術創成研究費（H17～H21） その他の活動	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究（浦川順治）	分担	0 (0)	受入中	10	光共振器製作
	上記以外の研究活動					50	電子ビーム生成及び測定装置に関する研究
	教育活動					30	学部・大学院学生教育指導
	その他の活動					10	学会委員活動等
東 保男 （高エネ研機構・共通基盤・准教授）	学術創成研究費（H17～H21） その他の活動	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究（浦川順治）	分担	0 (0)	受入中	10	Parabolic Mirror 製作
	上記以外の研究活動					70	電子ビーム生成及び精密機械加工に関する研究
	教育活動					10	大学院学生教育指導
	その他の活動					10	学会委員、国際諮問委員活動等
谷口 敬 （高エネ研機構・素核研・講師）	学術創成研究費（H17～H21） その他の活動	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究（浦川順治）	分担	0 (0)	受入中	20	ピエゾ制御システム設計
	上記以外の研究活動					50	電子ビーム生成に関する研究・高エネルギー実験
	教育活動					20	大学院学生教育指導
	その他の活動					10	学会・委員会活動等
大森恒彦 （高エネ研機構・素核研・講師）	学術創成研究費（H17～H21） その他の活動	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究（浦川順治）	分担	0 (0)	受入中	20	高反射ミラーシステム製作
	基盤研究(B)（H18～H20）	レーザーパルス蓄積空洞と電子蓄積リングを用いた高効率偏極ガンマ線生成(大森)	代表	6,200 (14,700)	受入中	40	研究総括
	上記以外の研究活動					10	電子ビーム生成に関する研究
	教育活動					10	大学院学生教育指導
	その他の活動					20	国際諮問委員活動等
横谷 馨 （高エネ研機構・加速器・教授）	学術創成研究費（H17～H21） その他の活動	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究（浦川順治）	分担	0 (0)	受入中	10	逆コンプトン散乱に関するシミュレーション
	上記以外の研究活動					10	電子ビーム生成に関する研究
	教育活動					20	大学院学生教育指導
	その他の活動					60	国際諮問委員活動等

⑩研究費の応募・受入等の状況・エフォート（続き）							
氏名	資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役割（代表・分担の別）	平成19年度研究経費（期間全体の額）（千円）	受入中、受入予定、応募中の別	エフォート（%）	活動の概要
照沼信浩 (H18.4～) (高エネ研機構・加速器・助教)	学術創成研究費(H17～H21) その他の活動	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究(浦川順治)	分担	0 (0)	受入中	10	レーザーワイヤー実験装置の製作
	上記以外の研究活動					60	電子ビーム生成に関する研究
	教育活動					20	大学院学生教育指導
	その他の活動					10	国際諮問委員活動等
荒木栄 (H18.4～) (高エネ研機構・加速器・技官)	学術創成研究費(H17～H21) その他の活動	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究(浦川順治)	分担	0 (0)	受入中	10	レーザーワイヤー実験装置の設置
	上記以外の研究活動					80	電子ビーム生成に関する研究
	教育活動					10	大学院学生教育指導
	その他の活動					0	
奥木敏行 (H18.4～) (高エネ研機構・加速器・助教)	学術創成研究費(H17～H21) その他の活動	レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究(浦川順治)	分担	0 (0)	受入中	10	レーザーワイヤー実験装置の製作
	上記以外の研究活動					60	電子ビーム生成に関する研究
	教育活動					20	大学院学生教育指導
	その他の活動					10	委員会活動