

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2008～2013

課題番号：20226003

研究課題名(和文) 等時性電子周回リングを用いた超短パルスコヒーレントテラヘルツ光源の開発研究

研究課題名(英文) Study and Development of Extremely Short Pulse Coherent Terahertz Light Source Employing an Electron Isochronous Ring

研究代表者

濱 広幸 (Hama, Hiroyuki)

東北大学・電子光理学研究センター・教授

研究者番号：70198795

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 159,300,000円、(間接経費) 47,790,000円

研究成果の概要(和文)：独自の考案で設計・製作した独立2空洞型熱陰極高周波電子銃から引き出された電子ビームの縦方向位相空間分布を操作して、進行波加速構造を用いる速度圧縮法に最適な分布に整形し、100フェムト秒あるいはそれ以下の超短パルス電子ビームを生成する技術をほぼ確立した。加えて加速器システムを構築し、50MeVまでの電子ビーム加速に成功したことから、偏向磁石あるいはアンジュレータを用いてコヒーレントなテラヘルツ放射を発生できる光源加速器が完成され、法令が規定する放射線管理区域に適合した加速器研究施設を開設することができた。

研究成果の概要(英文)：Production method for short-pulse electron beam with its bunch length around 100 fs or less has been mostly established. The method employs the velocity bunching mechanism in a traveling-wave accelerating structure and an original electron gun. The gun is composed of two independent cavity cells so as to manipulate and optimize the longitudinal phase space electron distribution for the velocity bunching scheme. The accelerator system was completed, after which the electron beam was successfully accelerated up to 50 MeV, thereby it might be possible to produce coherent terahertz (THz) radiation using bending magnets and/or undulators. It can be concluded that a light source accelerator facility for THz science, in which radiation safety program was accurately approved by the national regulation, is established.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物理学一般

キーワード：コヒーレント放射 テラヘルツ光 アイソクロナスリング 熱陰極高周波電子銃 空間電荷効果 時間領域差分法

1. 研究開始当初の背景

(1) 電子バンチ長より十分長い波長域で発生するコヒーレントな放射光が1989年に発見されたが、2000年代に入って光陰極高周波電子銃からの電子ビームを、磁気圧縮法によるサブピコ秒バンチの生成技術が進展し、コヒーレント放射光はテラヘルツ (THz) 周波数域まで到達した (1 THz の電磁波サイクル周期は1ピコ秒)。

(2) 我々は簡便で安価な熱陰極高周波電子銃を改良して、引き出される電子の位相空間分布を操作できる独立2空洞型電子銃を考案した。この電子銃からのビームと加速構造中の速度圧縮法を組み合わせることにより、バンチ長が100フェムト秒以下の超短パルス多バンチビームを、比較的単純な加速器構成で生成できる可能性を見いだした。この多バンチビームが偏向磁石やアンジュレータを通過する際に放出されるコヒーレント放射はピーク出力のみならず非常に高い平均出力でもあるため、広く利用され始めたレーザー・半導体を用いた実験室レベルのテラヘルツ光源を遥かに凌ぐと予想される。このような高強度テラヘルツ光は、新しい化学反応経路の導線になるなど、様々な応用研究の開拓が期待できる。

(3) 通常はビーム輸送によって電子バンチが変形してバンチ長が伸長するため、何度もコヒーレント放射光を生成できない。そこでバンチ形状を保存する特殊なビーム光学に基づく等時性 (アイソクロナス) 輸送路を導入することによって、複数の光源ポートを有したユーザー実験のためのコンパクトな光源加速器施設が実現可能であると提案した。等時性ビーム輸送については、運動量依存の行路長偏差の非線形成分の効果が極めて重要であることは、代表者のリング型加速器の研究によって初めて指摘されたものであり、この効果の抑制についても詳細な検討が可能になっている。

2. 研究の目的

(1) 本研究においては、安価で単純な熱陰極高周波電子銃を用いながらも、コンパクトで先端的な線形加速器システムを開発する。独自に考案した独立2空洞電子銃からの電子ビームについて、運動量と縦方向位置の位相空間を理想的な線形の関係にする可能性を探り、超短バンチ電子ビームを安定に生成する技術を確立することを当初目標の一つとする。

(2) 超短パルス電子ビームを用いてテラヘルツ域のコヒーレント放射光を効率的かつ持続的に発生するための、完全な等時性を持つビーム周回リングについて、基本的なビーム光学のみならず非線形ダイナミクスの検討および構成要素のテスト機器の開発を行

う。加えて等時性を持つビーム輸送路の偏向磁石中で電子が放射する電磁波についての理論的考察を詳細に行ない、到達可能な光源性能を明らかにする。

(3) (1)及び(2)の一連の光源加速器システム開発を経て、ユーザー利用実験に光を供給することが可能な加速器施設を構築することを最終目標とする。

3. 研究の方法

(1) 高周波電子銃および進行波型加速構造へ高周波パワーを供給するための、50MW クライストロンと320kV高周波変調器を主要機器とするSバンド高周波システムの構築。これにより電子ビームの引き出し実験および速度圧縮実験を可能にする (図1)。

(2) 独立2空洞型高周波電子銃の詳細設計と実機の製作 (図2)。先だって3次元ビームシミュレーション計算コードの独自開発し、引き出される電子ビームの特性調査とバンチ圧縮のための最適化パラメータの探索を行なう。

(3) 短パルス電子ビームからの放射光発生についての理論的調査。コヒーレント放射の波長範囲および出力、時間構造等の特性を数値的に求め、既存のテラヘルツ光源との比較などから、応用研究への特徴的な有利点等を

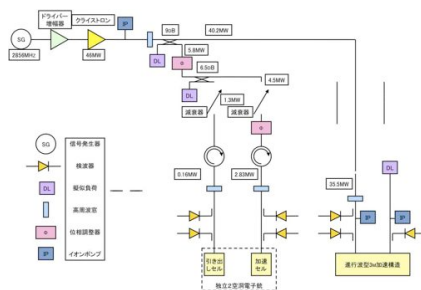


図1 高周波システムのブロック図

1台のクライストロンで高周波電子銃の2セル及び加速構造を動作させる。最大加速ビームエネルギーは50MeV。

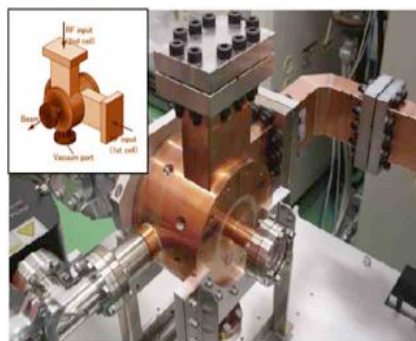


図2 独立2空洞型熱陰極高周波電子銃

2つの空洞セルを有し、それぞれ独立に高周波パワーを投入できる機構になっており、引き出される電子ビームの縦方向位相空間を意図的に制御することができる。

明らかにする。

(4) 等時性ビーム輸送・周回装置のラティス構造をエネルギー分散の高次効果も考慮した設計および主要電磁石の製作。必要とする電磁石の性能評価を行ない、粒子シミュレーションから輸送路におけるビームの安定性および電子パンチ形状保存の限界周回数を明らかにし、偏向磁石を通過する電子パンチから得られる広帯域コヒーレントテラヘルツ光の平均パワーを評価する。

(5) アンジュレータからの狭帯域コヒーレントテラヘルツ放射の特性調査。アンジュレータを通過する際に電子ビームが受ける横方向の強い収束力がテラヘルツ光発生に及ぼす効果を精密に評価し、光源としての性能を検討する。

(6) (1)-(5)を踏まえたビーム性能を満たす加速器システムの構築と法規に従って十分な放射線遮蔽を施した管理区域研究施設の確立。

4. 研究成果

(1) 独立2空洞型熱陰極高周波電子銃の開発と特性評価

近年世界各国で注目されて開発が進んだ光陰極のその影に忘れ去られた感があるが、本研究では熱陰極高周波電子銃の潜在的な優れた能力を明らかにし、最新の加速器システムにも良く適合させることを目標に研究開発を行った。また本研究で設計・製作した電子銃は独立に高周波を投入できる2つの空洞を持つ特殊なデザインであり、2つの空洞の運転条件を変えることにより、引き出される電子ビームの縦方向位相空間を意図的に操作できる構造とした。

①高周波特性評価と改良

第1段階として試作機を製作し、低レベル高周波の投入によって2つの空洞の高周波特性を調べた結果、空洞外部から陰極を差し込む孔の大きさによって共振周波数が大きく変化すること、また陰極装着のために脱着可能な端板の接触面の電気伝導性が著しく乏しく、安定な高周波電場が空洞内に成長しないことが分かった。また2つの空洞の共振周波数差を100~200kHz程度離すことにより両者の結合度をほぼ0にできることが分かった。これらの新たな知見に基づき実機(1号機)を製作した。

②逆流電子による陰極過剰加熱現象の解明

熱陰極電子銃の最大の問題は、陰極から引き出された電子が電子銃出口に到達する前に高周波位相が反転して、逆方向に加速され陰極に衝突することで、陰極が過剰加熱され、ビーム電流が急激に増大し、条件によっては熱暴走して電子ビーム放出量が制御不可になるような現象である(Back-bombardment現象)。

Back-bombardmentによる陰極が過剰加熱を定量的に評価する為に、時間領域差分法によって空間電荷効果も取込んだ3次元粒子運動計算コードでビームの陰極衝突量を求め、陰極へ付与する熱エネルギーを熱拡散方程式で数値的に解き、陰極表面の温度上昇および電子放出量の変化を評価したところ、実験データと非常に良い一致を見た。これらの数値的理論計算を多様な条件下で行なったところ、Back-bombardmentのパワー密度は陰極サイズを大きくすることで抑制できるが、電子の横方向位相空間分布(エミッタンス)が大きくなりビーム輝度が低下することから、最適な陰極径を探索した結果、直径3mm程度(従来は1.9mm)が、ビーム性能を損なわず陰極過剰加熱をある程度軽減できることが分かった。この知見を元に3mm径陰極を装着できるように陰極近傍のデザインを変更し、電子銃の2号機を製作した。

③縦方向位相空間分布操作の実証

高分解能のエネルギー分析路を設置し、電子銃から引き出される電子ビームの縦方向位相空間分布が高周波入力条件に応じて変化することを測定した。2空洞へ供給するパワーおよび両者の間の位相差を変えてエネルギースペクトルを測定し、3次元粒子運動追尾計算コードのシミュレーション結果と比較した。高周波位相差が僅か1°変化するだけで電子のエネルギー分布が変化するため、投入パワーのみならず位相の絶対値の較正にやや曖昧さが残ったが、概ね予期していた位相空間分布の操作が実現していることを実証した(図3)。これの実証実験によって、速度圧縮法を用いる超短パルス電子ビーム生成のために、電子銃からの引き出しビームの縦方向位相空間分布を最適化する手法を確立した。

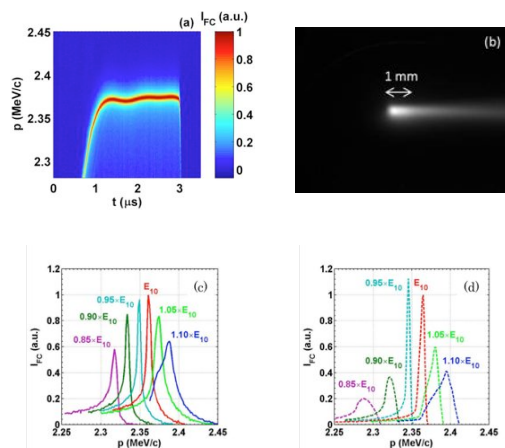


図3 開発した独立2空洞型電子銃からの電子ビーム
(a)エネルギー分析路によって測定された電子ビーム運動量の時間依存性を示す2次元スペクトル。(b)蛍光板を用いて撮像した電子ビームプロファイル。中央の明るい部分がビームの核。(c)2空洞の位相差を変えて測定した運動量スペクトル。(d)(c)と同じ高周波条件でのシミュレーション計算によるスペクトル。

(2) 速度圧縮法の理論的評価

進行波加速構造中での電子バンチの圧縮法は、光陰極電子銃を用いるX線自由電子レーザーのために考案された短パルス生成手法であるが、比較的低エネルギーである熱陰極高周波電子銃からの電子ビームの方が効率的に圧縮できることを、ハミルトニアンを用いたビーム動力学の理論的考察から見いだした。とりわけ本研究で開発した独立2空洞型電子銃は縦方向位相空間を速度圧縮に最適化する操作が意図的に行なえるため、3mの加速構造を用いて、100フェムト秒以下から、最短で60フェムト秒に圧縮できることが分かった。このときの到達エネルギーは約25MeVであり、周期長10cmのアンジュレータを通過させて1THzの強力なコヒーレントなアンジュレータ放射(超放射: Super-radiant)が生成可能である。

(3) 等時性リングのビーム光学

本研究では速度圧縮で生成した50フェムト秒の短パルス電子ビームのバンチ形状を保存したまま周回させて、コヒーレント放射光を連続的に発生させる新奇な光等時性(アイソクロナス)リングを提案した。電子を逆方向に偏向する磁石を導入してリングの1次の運動収縮因子を0にし、エネルギー偏差のある電子の行路長差を抑制した。また横方向の振動(ベータトロン振動)から生じる行路長差を1/4周毎にキャンセルするようにベータトロン振動の位相進みを調整したラティス関数のリング設計を行なった(図4)。

運動量依存や振動振幅依存の高次効果については容易に評価できないため、かねてから開発してきた電磁場中の粒子運動を精密に追尾するシミュレーション計算コードを用いて高次効果を綿密に調査した結果、ベータトロン振動による行路長偏差は6極磁石で良く補正され20周程度ではバンチ長はほぼ保存され、100周程度まではコヒーレントテラヘルツ放射が可能な1ps以下のバンチ長を保つことが分かった。運動量偏差の影響は深刻であり、2次の運動収縮因子は同様に6極磁石によってかなり抑制されているが、3次の効果が非常に強く、前後にテールを引く形状になり、中心部の電子密度が周回とともに急激に低下することが分かった(図5)。これらの研究結果から、エネルギー依存の3次

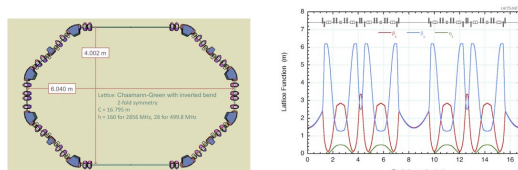


図4 ラティス設計した等時性リング

(左)リング全体の磁石構成。(右)リング一周のラティス関数。90°アークの中央に逆偏向磁石を挿入し、1次の等時性を確保している。

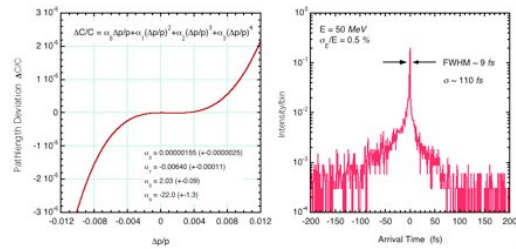


図5 行路差長の運動量依存(左)とバンチ形状変化(右)(左)2次の運動量依存性は6極磁場によってよく補正されているが、3次の効果が強い。(右)0.5%の運動量広がりを持つビームのリング3周後のバンチ形状(初期はデルタ関数)。ビームの中心部の伸長は小さいが、3次効果で裾が大きく広がる。

効果を抑制するには8極磁石の導入が必須であると結論づけられた。しかしながら8極磁石を導入する適切なリング内のスペースがないため、この問題は今後の課題とした。

(4) 50MeV電子光源加速器施設の構築

電子加速器システムの心臓部とされる、高周波電子銃および加速構造の駆動のための高周波増幅供給系の構築を初年度から着手し、3年目終了時(2010年度)に概ね予定通りに機器設置を終えた。しかしながら2011年3月の東日本大震災の巨大地震によって、デリケートな電気・電子回路を内包する高周波増幅器および制御システムの機器に甚大な損傷が発生した。故障復旧に想定外の時間を費やすこととなったうえに、本研究の加速器システムを設置していた東北大学電子物理学研究センターの共同利用電子加速器群も甚大な被害を受けて、長期間の運転停止状態に陥った。本研究で構築してきた加速器システムも研究センター全体の放射線管理に関わる復旧プログラムに従わなくてはならず、最終的には放射線発生装置および管理区域の再承認は2013年12月となった。そのためビーム加速試験は大幅に遅れたが、当初目標の研究活動は十分ではないにせよ比較的適切に遂行され、ビーム利用実験が可能な加速器施設が完成した。本研究で開発した電子加速器ハードウェアは、以下のような主要機器からなる。

① Sバンド高周波システム

560MWのクライストロンとこれを駆動する320KV変調器に加え、高周波パワーを伝送し、一定比率で高周波電子銃および加速構造に分配供給する導波管システムで構成される。

② 冷却水システム

安定度0.1°の精密温調が可能な熱交換器を持つ冷却水循環システムを構築して、高周波伝送系、電子銃および加速構造を一定温度に保つ機能を実現した。

③ 放射線遮蔽壁とインターロック設備

効率的に放射線を遮蔽する曲面付コンクリートシールドブロックを製作し、加速器本体を囲む遮蔽壁を設置した。γ線のスカイシャインを抑制するために堅牢なプレストレス

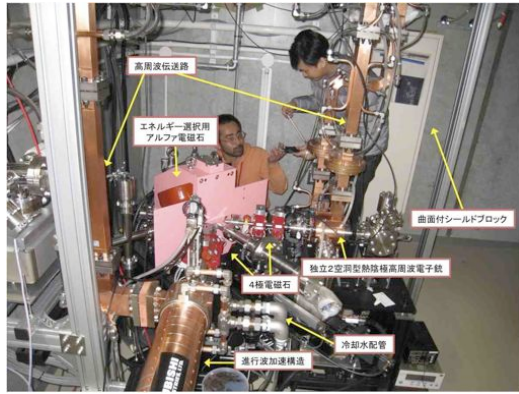


図6 加速器システム(加速器室内)

電子銃と加速構造までのエネルギー選択・輸送路のみを示す。全体は1m厚のコンクリート遮蔽で囲われており、遮蔽壁の外側に高周波システムの本体および冷却水循環装置、計算機制御装置が設置されている。

ト板で天井を覆った。加速器施設棟と加速器室の入室扉、加えてビームエネルギーを50MeVに制限するためにモジュレータ高圧および偏向磁石にインターロックを設置して不測の事態時に瞬時に加速器が停止するようにした。これらの放射線安全対策が有効と認められ、施設検査に合格した。

(5) 総括

フェムト秒電子ビームの生成技術に基づいた強力なコヒーレントテラヘルツ放射光源の開発研究を主題として行なわれた本研究では、特徴ある電子ビーム整形技術を確立し、コヒーレント放射光源の理論的考察を深めた。当初目標であった、放射線発生装置による障害防止に関する法規に則った加速器施設を完成することができ、加速器科学のみならずテラヘルツ科学の応用研究を推進する土壌として今後の研究活動が大いに期待できると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 26 件)

- ① F. Hinode, H. Hama, N. Y. Huang, S. Kashiwagi, M. Kawai, X. Li, T. Muto, I. Nagasawa, K. Nanbu, Y. Shibasaki, K. Takahashi, “Present Status of Thermionic RF-Gun for Terahertz Source Project at Tohoku University”, 査読無し, Proc. International Free Electron Lasers Conference 2012, **1** (2012) 137-139.
- ② N-Y. Huang, H. Hama, M. Kawai, S. Kashiwagi, F. Hinode, K. Nanbu, T. Muto, Y. Shibasaki, I. Nagasawa, K. Takahashi, “Investigation of CSR Effect for Femtosecond Electron Bunches, in an Isochronous Accumulator Ring”, 査読無

し, Proc. International Particle Accelerator Conference 2012, **1** (2012) 589-591.

- ③ H. Hama, M. Kawai, S. Kashiwagi, F. Hinode, F. Miyahara, K. Nanbu, T. Muto, Y. Tanaka, X. Li, N-Y. Huang, “Test-Accelerator as Coherent Terahertz Source Program (t-ACTS) at Tohoku University”, 査読あり, Energy Procedia, **9** (2011) 391-397.
- ④ F. Hinode, M. Kawai, K. Nanbu, F. Miyahara, “Expected Performance of a Planar Undulator Designed for the Terahertz Source Project at Tohoku University”, 査読あり, Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res., **A 637** (2011) S72-S75.
- ⑤ H. Hama, M. Yasuda, M. Kawai, F. Hinode, K. Nanbu, F. Miyahara, “Intense Coherent THz Generation from Accelerator-based Sources”, 査読あり, Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res., **A 637** (2011) S57-S61.
- ⑥ S. Kashiwagi, F. Hinode, M. Kawai, T. Muto, K. Nanbu, Y. Tanaka, X. Li, H. Hama, N-Y. Huang, “Injector System of Test Accelerator as Coherent Terahertz Source”, 査読無し, Proc. International Particle Accelerator Conference 2011, **1** (2011) 2993-2995.
- ⑦ F. Hinode, H. Hama, S. Kashiwagi, M. Kawai, K. Nanbu, F. Miyahara, T. Muto, H. Oohara, Y. Tanaka, “Development of a Thermionic RF Gun for Coherent THz Source t Tohoku University”, 査読無し, Proc. International particle Accelerator Conference 2010, **1** (2010) 1731-1733.
- ⑧ H. Hama, K. Nanbu, M. Kawai, S. Kashiwagi, F. Hinode, T. Muto, F. Miyahara, Y. Tanaka “Cherenkov Ring to Observe Longitudinal Phase Space of a Low Energy Electron Beam Extracted from an RF Gun”, 査読無し, Proc. 14th Beam Instrumentation Workshop, **1** (2010) 79-83.
- ⑨ H. Hama and M. Yasuda, “Consideration on Terahertz FEL Using Pre-bunched Electrons Shorter Than the Wavelength”, 査読無し, Proc. International Free Electron Lasers 2009, **1** (2009) 394-397.
- ⑩ H. Hama, F. Hinode, M. Kawai, K. Nanbu, F. Miyahara, M. Yasuda, “A Far-infrared Undulator for Coherent Synchrotron Radiation and Free Electron Laser at Tohoku University”, 査読有り, AIP Conference Proceedings, **Vol. 1234** (2009) 523-526.
- ⑪ M. Yasuda, H. Hama, F. Hinode, K. Kasamsook, M. Kawai, A. Kurihara, K.

Nanbu, Y. Shibasaki, S. Takahashi,
“Development of THz Light Source Using
Pre-bunched FEL”, 査読無し, Proc.
International Free Electron Lasers 2008,
1 (2008) 71-74.

- ⑫ H. Hama, F. Hinode, K. Kasamsook, M. Kawai, K. Nanbu, M. Yasuda, “Space Charge Effect for Short Electron Bunches in an Alpha Magnet”, 査読無し, Proc. International Free Electron Lasers 2008, 1 (2008) 305-308.

[学会発表] (計 20 件)

- ① Hiroyuki Hama, “Development of THz Sources Based on Femtosecond Electron Pulse Train”, Invited at Workshop on Terahertz Sources for Time Resolved Studies of Matter, August 30, 2012, Argonne, IL, USA.
- ② N-Y. Huang, H. Hama, M. Kawai, S. Kashiwagi, F. Hinode, K. Nanbu, T. Muto, F. Miyahara, Y. Tanaka, X. Li, “Coherent Synchrotron Radiation Source Based on an Isochronous Accumulator Ring with Femtosecond Electron Pulses”, International Particle Accelerator Conference 2011, September 7, 2011, San Sebastian, Spain.
- ③ Hiroyuki Hama, “THz Coherent Synchrotron Radiation Project Employing Isochronous Ring with Femtosecond Electron Pulse at Tohoku University”, China-Korea-Japan Joint Workshop on Electron/Photon Sources and Applications, December 2, 2010, Shanghai, China.
- ④ Hiroyuki Hama, “Cherenkov Ring to Observe Longitudinal Phase Space of a Low Energy Electron Beam Extracted from an RF Gun”, Invited at 14th Beam Instrumentation Workshop, May 5, 2010, Santa Fe, NM, USA.
- ⑤ 南部健一、宮原房史、河合正之、且出富士雄、濱広幸、「超短バンチ生成のための独立 2 空洞型高周波電子銃の高周波特性」、第 6 回日本加速器学会年会、2009 年 8 月 6 日、東海村。
- ⑥ 且出富士雄、河合正之、K. Kasamsook、栗原亮、柴崎義信、高橋重伸、南部健一、濱広幸、安田真冬、「フェムト秒コヒーレント THz 光源の開発」、第 5 回日本加速器学会年会、2008 年 8 月 7 日、東広島市。

[その他]

ホームページ等

<http://tansei.lns.tohoku.ac.jp/abpg/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

濱 広幸 (HAMA HIROYUKI)

東北大学・電子光物理学研究センター・教授
研究者番号：70198795

(2) 研究分担者

柏木 茂 (KASHIWAGI SHIGERU)

東北大学・電子光物理学研究センター・准教授
研究者番号：60329133

日出 富士雄 (HINODE FUJIO)

東北大学・電子光物理学研究センター・准教授
研究者番号：60292207

田中 均 (TANAKA HITOSHI)

理化学研究所・XFEL 開発研究部門・部門長
研究者番号：60292207

高橋 俊晴 (TAKAHASHI TOSHIHARU)

京都大学・原子炉実験所・准教授

研究者番号：00273532

鈴木 伸介 (SUZUKI SHINSUKE)

高輝度光科学研究センター・加速器部門・主幹研究員
研究者番号：00273532

河合 正之 (KAWAI MASAYUKI)

東北大学・電子光物理学研究センター・准教授
研究者番号：60374899

宮原 房史 (MIYAHARA FUSASHI)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教
研究者番号：20532691

(3) 連携研究者

南部 健一 (NANBU KEN-ICHI)

東北大学・電子光物理学研究センター・技術専門職員
研究者番号：00422072

武藤 俊哉 (MUTO TOSHIYA)

東北大学・電子光物理学研究センター・助教
研究者番号：10431496