

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740221

研究課題名(和文)超伝導空洞精密位置測定装置を用いた大電流 ERL ビーム不安定性の基礎研究

研究課題名(英文)Basic research of beam instability with high current ERL beam by newly developed position monitor of superconducting cavities precisely

研究代表者

阪井 寛志 (Sakai, Hiroshi)

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・准教授

研究者番号：50345229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000 円、(間接経費) 1,110,000 円

研究成果の概要(和文)：エネルギー回収型ライナック(ERL)などの次世代型加速器では超伝導空洞がビーム性能を決めるが、ビームライン中の空洞はHe液体温度に保つため、断熱槽に覆われ、空洞の設置精度が外部から正確に測定できない。特にビームの高品質化に伴い、空洞の設置精度への要求が高まる中、極低温への冷却時の空洞変形を極低温下で常時測定することが重要な課題であった。本研究にて、極低温下での空洞変位を白色干渉の原理に基づき、非接触に±5μmの精度で常時測定する装置を新たに開発し、変位の精密測定のため、ERLテスト加速器にて、設置精度に対するビームへの影響の有無を調べ、最終的に6μAのCWビームのエネルギー回収を実現した。

研究成果の概要(英文)：Alignment of superconducting cavities is one of the important issues for next generation accelerator like energy recovery linac (ERL). To measure the cavity displacement under cooling to liquid He temperature more precisely, we newly developed the position monitor by using white light interferometer. This monitor is based on the measurement of the interference of light between the measurement target and the reference point. It can measure the position from the outside of the cryomodule. We applied this monitor to the main linac cryomodule at ERL test facility and successfully measured the displacement during 2K cooling with the resolution of ±5μm. And by monitoring these displacements in detail, we achieved the energy recovery with 6μA CW beam.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器 ビーム物理 超伝導空洞 CWライナック 超精密測定 エネルギー回収 極低温 モニター

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は次世代放射光源であるエネルギー回収型ライナック(ERL)の実現に必要な不可欠な周波数 1.3GHz の 9 セル空洞の超伝導空洞の設計開発を進めており、開発を行っている。特に大電流(100mA 以上)ビーム実現のため、具体的には超伝導空洞に励起する高次モード(HOM)によるビーム不安定性を抑制する独自の空洞の設計、製作を行い、He 液中での性能測定実験にて 25MV/m の加速勾配まで実験的に検証し、ERL 実現への一步を踏み出したとともに、加速器および超伝導空洞分野で世界的に注目されることとなった。

申請時の次の課題はビーム運転用のクライオモジュールの設計、開発であった。超伝導空洞をビーム運転中、常時極低温環境を維持するため、超伝導空洞は 2K 温度の He 液体を保持した容器内に内装(ジャケット化)されるが、容器の温度を極低温に保つため、ジャケット化された超伝導空洞への常温からの入熱を防ぐための大きな断熱槽によっておおわれている。これらを称してクライオモジュールと呼んでいる。次世代加速器である ERL では高品質ビームの安定化のため、空洞のビームラインへの設置精度は 1mm 以下とされており、その精度を保つよう空洞をアラインメントする必要があった。但し、超伝導空洞は室温でアラインメントされ、室温時には数 100 μ m 以下の精度でアラインメントが可能であるが、冷却時には熱収縮の影響を受け、空洞の位置は変化する。その変化は機器の大きさにもより、おおよそ数 100 μ m ~ 1cm 程度と場所によりばらばらであり、2K への冷却時への空洞の変化を随時モニターする必要がある。

申請当時に冷却中の空洞の変位測定として検討されていたモニターは 1)ワイヤーポジションモニターと 2)三角測量型レーザー変位計の 2 つであったが、1)に関してはワイヤーの収縮により、ワイヤーが冷却中に切れるなどの問題が多発している。また測定箇所が空洞と異なり、正確な変位を測定に疑問が残っていた。また 2)に関しては、レーザー光の測定面からの乱反射の情報を用いた三角測量を基本としたものである。光の受光散乱角度が大きく必要であり、原理的に角度が 45 度に近い散乱角度にて分解能が上がるため、輻射熱を避けるために 500mm ほど先に小さく設けられたモジュール外部の狭い真空窓からの測定では 10 μ m の分解能を有する測定は不可能であった。

これらを背景として、2010 年に研究代表者は新たに白色干渉を用いた超伝導空洞精密位置測定装置を提案した。特に近年の周波数安定な光コムによるモード同期レーザーを用い、申請時には不可能であった長距

離(1m 以上)での干渉測定により、10 μ m 以下の精度で長期的に空洞位置測定が可能であることを提唱し、本研究開発の動機となった。(図 1 参照。)

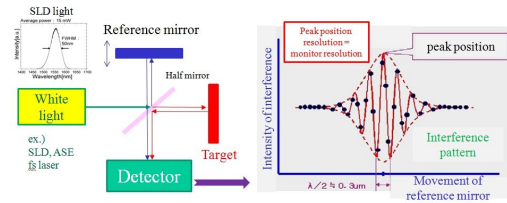


図 1: 白色干渉による位置測定の原理

2. 研究の目的

本研究の目的は超伝導空洞をモジュール外部から入熱を抑え、非接触に空洞の位置を直接精密測定するモニターの開発であり、ビームへの影響を詳細に調べることにある。特に重要なことは空洞を 2K に保つために、モジュール外部からは非接触で、なおかつ外部からの輻射熱の影響を最小に抑えて、空洞の変位を測定することである。位置測定精度は数 100 μ m の冷却中の変化などを追跡可能とするため、1 桁下の 10 μ m の分解能を持つことが条件である。特に長期的にも 10 μ m の精度で安定であることも位置測定に対する要求である。具体的な研究の目的は以下の 2 つである。

- (1)白色干渉の原理に基づき 10 μ m の精度の超伝導空洞非接触位置モニターの開発。
- (2)超伝導空洞の変位の精密測定から、高品質大電流ビームへの影響を詳細に調べる。

3. 研究の方法

最終目的は位置測定装置を用いたビーム不安定性の詳細研究であるが、その空洞位置測定装置の開発が本研究の要となる部分である。申請者は以下の順で研究を行う。

- (1)白色干渉を用いた位置測定装置のテストベンチでの性能評価:

光コムによる周波数安定化実験は計測分野を問わず近年急速に進められているが、主に短期的な測定精度の測定を念頭においたものである。我々の測定は加速器の運転中を通じた非常に長い時間での測定を行うことを念頭におく。白色周波数安定化レーザー(光コムモードロックレーザー)または安定な白色光源から出てくる光をファイバーに通し、ハーフミラーにて 2 つに分け、測定対象物と参照面の 2 つの光路から反射された光を一つにまとめて強度の干渉を見る。参照面側の光路をリアガイドにて調整し、強度のピークをモニターし、本モニターの位置測定精度の測定を行う。具体的な性能評価試験としては、位置測定精度の評価を行い、特に測定対象面の傾きの誤

差評価などを行う。測定対象物の材質、表面精度の変化によるモニター性能評価測定を行い、最後に長距離での長期安定化の測定にて安定化の評価を行い、10 μm 程度の安定化測定を行えるかの成否を問い、実機設計に反映する。

(2) ERL 超伝導空洞のクライオモジュールの設計、実機位置測定装置の設計：

位置測定装置の評価と平行して、ERL 用の超伝導空洞のクライオモジュールの詳細設計を進める。特に空洞を支える機械設計、熱設計、磁気シールド設計がメインとなるが、それら設計と干渉しないよう位置測定装置の配置を行う。具体的に空洞側面の水平方向、及び垂直方向の位置をモニターするよう設計を行うが、測定場所の妥当性、ビームに対する評価を行うための設計、手法などの検討を行う。

(3) 実機クライオモジュールでの白色干渉位置測定装置の実証実験：

テストベンチでの評価をもとに具体的な配置が決まり、実機の位置測定モニターのモジュールを用いた位置測定を行う。特にモジュールの 2K He 温度冷却中の変位を追っていく。この変位が正しいかどうかは他モニターとの相関を取り評価する。

(4) 位置測定装置を用いたビーム実験による ERL のビーム不安定性の詳細研究：

位置測定装置の実機での一通りでの性能評価が終わった時点でビーム実験の開始となる。ERL 試験加速器であるコンパクト ERL 加速器内に超伝導空洞を設置後、ビームを用いて、空洞の位置に対するビーム不安定性の評価及び不安定性が大きい場合などは空洞位置を変位させ、ビームに対する応答から何によるビーム不安定性なのか詳細な解析を行う。

これらはすべて当時建設中である ERL の試験加速器(Compact ERL)で行われる。

4. 研究成果

ここまで行ってきた研究成果を以下にまとめる。

(1) 白色干渉を用いた位置測定装置のテストベンチでの性能評価：

テストベンチにて、白色干渉を用いた非接触計測による位置測定精度評価試験を行った。図 2 がその setup である。

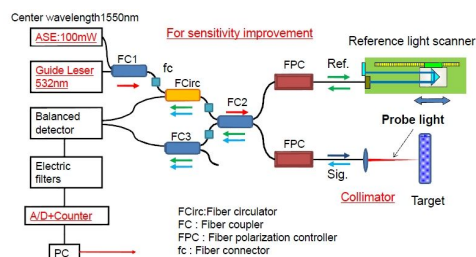


図 2：テストベンチでの setup。

光プラーにて分岐した測定対象物と参照ターゲットからの白色レーザーの反射光の干渉強度を参照ターゲットの距離の関数として、随時モニターすることで、性能評価を行う。まず既存の半導体レーザー光である SLD 白色光源(20mW)を用い評価を行った結果、測定精度には現状、スペクトラムの形よりも強度が重要であるとの結論を得たため、研究代表者は光コム光源より安価の白色光源で強度が既存の5倍以上を確保できる ASE 光源を購入した。この高強度白色光源を用いて、まずはテストベンチにて、測定対象物の表面粗さと測定可能な傾きを調べた。

表 1：各測定対象物の表面粗さに対する測定可能な干渉強度の範囲

表面粗さ (Ra)	測定可能な角度
20.95 μm	0 度 ~ 30 度
4.38 μm	0 度 ~ 30 度
0.23 μm	0 度 ~ 20 度

表 1 が測定可能な干渉強度が得られた範囲である。粗さが 0.23 ~ 20 μm の広範囲でなおかつ測定対象が垂直から 20 度ずれた場合でも十分な干渉強度が得られることがテストベンチの結果から分かった。この結果を反映し、1000mm 離れた表面粗さ Ra4.4 μm の測定対象物に対し、長期間での測定精度の測定を行った。

図 3 が測定器の温度、湿度、気圧の変化に対する測定位置の長期安定性の結果である。12 時間の測定で、温度変化が ±0.3 度の環境下にて、±5 μm 以下で安定であった。特にレーザー光は 30mm のパイプとガラスの viewport を通じて行った断熱槽外部からの測定を模擬しており、測定精度、長期安定性に対し、位置モニターとして、十分な性能が確保できた。

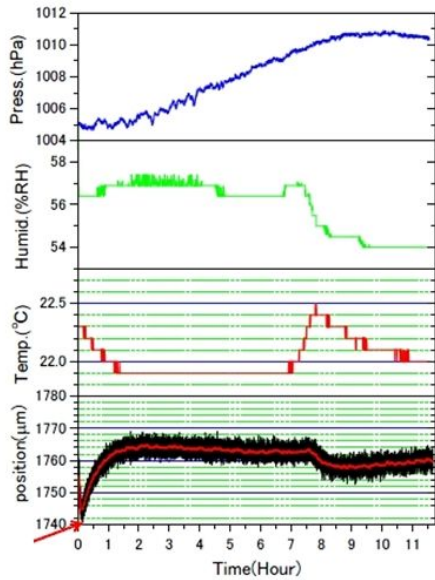


図3：テストベンチでの長期安定性測定

(2) ERL超伝導空洞のクライオモジュールの設計、実機位置測定装置の設計：

テストベンチでの性能評価と平行に、クライオモジュールの設計を進め、熱シールドなどとの干渉なしで、本レーザー位置モニターで測定するターゲットの場所と設計を進めた。

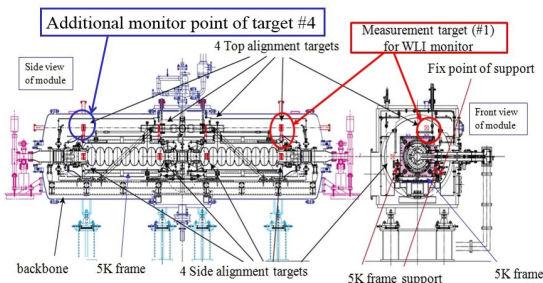


図4：Compact ERL 用主加速部超伝導空洞クライオモジュールとターゲットの配置。

図4がCompact ERLの主加速部に設計した9セル空洞を2つ収める超伝導空洞クライオモジュールである。空洞は2Kに冷やされるがそれらのアライメントなどを確保しやすくするために5Kフレームと呼ばれる空洞固定用のサポートを空洞回りに設置。またそれらはクライオモジュール内の5Kフレーム下部の常温部に置かれたバックボーンと呼ばれる堅牢なサポートによって、支えられている構造とした。特にバックボーンから5Kフレームに対しての支え(5Kサポート)は合計8か所で支えており、室温から2Kへの冷却の際、5Kフレームの位置が極力変化しないような熱収縮をキャンセルする構造としている。5Kフレームおよび、5Kサポートを通じ、空洞への熱侵入を防ぐとともにアライメントを確保する設計とした。特に収縮時の空洞変位のための

ターゲットは5Kフレームの上部とサイドに合計8つ、空洞の前後に置くことで、空洞の冷却中の変化を追えるような設計を進めた。特にターゲットの中心を目盛を刻んだガラスを用意し、望遠鏡でその中心を読む構造とした。ターゲットの側面(表面粗さRa 1.6 μm)を白色干渉モニターにて、位置測定することで、冷却中の変位を干渉計と望遠鏡(測定精度は0.1mm程度)の両方で測定可能な設計とした。

(3) 実機クライオモジュールでの白色干渉位置測定装置の実証実験：



図5：Compact ERL 内に設置された主加速部超伝導空洞クライオモジュール。

テストベンチでの評価を基にして、実機の白色干渉位置変位計を製作し、製作したERL用クライオモジュール(図5)を用いた2K冷却中の位置測定を行った。まずは空洞の一か所(図4のターゲット#1)のみの垂直、水平の2方向の測定に絞り、実機位置測定装置として製作した。また、ターゲットの中心をLEDで照らし、冷却中の動きに対する光学ターゲットとの相関データを取得した。

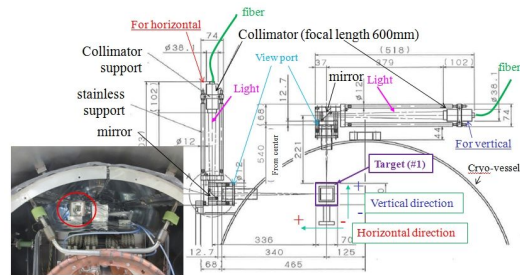


図6：クライオモジュール内ターゲットと実機白色干渉位置測定装置の配置。

2012年秋までにCompact ERL主加速部超伝導空洞クライオモジュールを完成し、2012年11月から本格的な冷却を行った。クライオモジュールの2Kまでの冷却中の測定の詳細を述べる。図6に示すように測定光学ターゲットはセンサーのファイバー出口から600mm離れた断熱真空槽内に置かれ、ビューポートを通して水平方向、垂直方向の変位を冷却中常時測定した。特に加速器室内での温度変化抑制のため、温度安定化ファイバーを用いて測定を行った。室

温から2Kまでの冷却は2週間かけてゆっくり行われ、図7が冷却中の実機白色干渉位置測定装置によるクライオモジュール内のターゲット(#1)の測定位置変位である。常温から2K冷却後の温度変化はモジュール熱設計通りに、水平方向で0.2mm、垂直方向で1.2mmの変位が測定され、空洞中心では0.4mmの変化に留まっていることが測定から判明した。

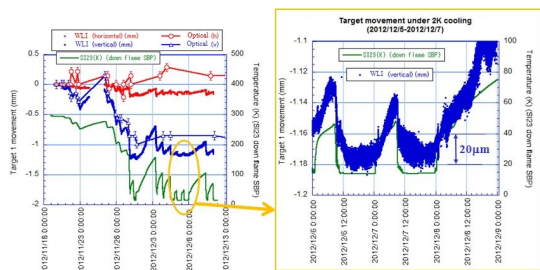


図7: (左図)モジュール内ターゲットの冷却時の水平方向(青)と垂直方向(赤)の変化。赤丸、青丸はターゲットを望遠鏡で覗いた結果であり、赤線、青線が白色干渉位置測定装置による測定結果である。緑線は空洞温度を示す。(右図)左図一部拡大図

図7から得られた本変位計にて達成された結果は、以下である。1)望遠鏡の精度の $\pm 0.1\text{mm}$ 程度で光学ターゲットとの相関が得られたこと、2)特に望遠鏡の精度では見られなかった冷却中の空洞温度との詳細な相関が得られたこと、3)2K到達温度での安定な状態では水平、垂直方向とも変位計の測定値が $\pm 10\ \mu\text{m}$ の精度で12時間安定であったことである。

本変位計が冷却下のクライオモジュール内の空洞の変位を $\pm 10\ \mu\text{m}$ の精度で精密に測定可能であることを実証した。

(4)位置測定装置を用いたビーム実験によるERLのビーム不安定性の詳細研究:
 実機変位計にて、2012年11月からのクライオモジュール冷却時の空洞変位はファイバーの温度変動の影響を抑えるため、ファイバー長を3mと短く抑え、温度が ± 0.5 以下に安定な本超伝導空洞モジュールが設置されている加速器室内環境下に測定系を置き、冷却中の変位測定の実証実験を行ったが、その後の2012年12月の空洞加速勾配実現のためのハイパワー試験時には放射線の影響が大きく、加速器内部に設置していた本測定装置を一旦加速器室から出したため、パワー試験時の位置測定は不可能であった。2013年冬に控えたビーム運転時の測定を可能とするために、以下の改良を行った。(a)光路差の温度変動を無くすために、測定対象用ファイバー光路内に参照面を同時に設けた。結果、80mのファイバー長にて、 25 ± 5 の温度環境下、40時間以上で $\pm 3\ \mu\text{m}$ 以下の超高安定位置測定を実現した。(b)空洞1か所の水平、垂直方向(2軸

)の測定から空洞前後の2か所の垂直、水平方向(4軸)に測定点(図4のターゲット#1)を増やし、ビームに対し、2K冷却中のモジュールの位置と角度両情報の測定を可能とした。

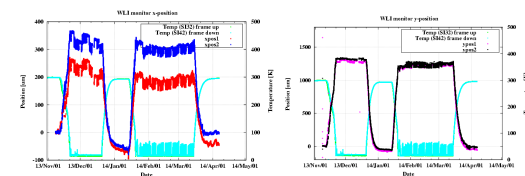


図8: (左図)改良白色干渉位置測定装置による2013年11月から約半年間のターゲット(#1)の水平方向の測定結果(赤、青)、(右図)垂直方向の測定結果(桃、黒)水色、緑は空洞温度。

上記(a),(b)の改良後、PCなど測定機器は加速器室外で制御可能となり、2K冷却後のビーム運転が始まってから2か月の長期に渡り、ビーム運転中の空洞変位を詳細にモニターすることが可能であった。図8はCompact ERLの再冷却およびビーム運転が開始した2013年11月~2014年4月頭まで2回の冷却サイクル過程を経た長期運転時の改良後白色干渉位置測定装置の測定結果である。2K冷却後は水平方向0.2-0.3mm、垂直方向では1.2-1.3mmと2012年の変位をほぼ再現した。運転中も放射線の影響なく、長期的にビーム運転時の2K冷却時には $\pm 5\ \mu\text{m}$ で空洞の安定性を確認する(図9参照)と同時に、ビームに対しても、空洞が要求値である1mm以内に設置されていることを確認した。

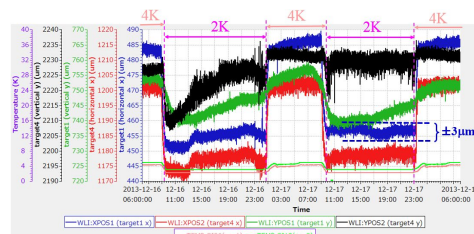


図9: ビーム運転時の空洞位置測定結果。(2日間)

さらに、他ビームモニターと合わせ、データベース化され、空洞位置の詳細測定のもと、ビーム調整がスムーズに行われ、空洞位置によるビーム不安定性も見られず、最終的に、図10に示すように国内初の $6\ \mu\text{A}$ 以上のCWビームで20MeVのエネルギー回収運転を実現した。

(5)まとめ

本研究課題は新しい白色干渉の原理のもと、空洞変位を精密($10\ \mu\text{m}$ 以内)に測定する装置を開発するとともにモジュール内の空洞の変位情報から、ERLに対するビーム不安定性に対する知見を得ることを目指したものである。まず、テストベンチ、実機、

そしてビーム運転時と段階的な試験を踏まえ、白色干渉の原理のもと空洞モジュールの4か所を $\pm 5 \mu\text{m}$ の精度にて約半年の長期間測定を行える位置測定装置を開発した。これは今後の4空洞また8空洞入りのERL空洞モジュールの製作にとどまらず、将来のリニアコライダ、またX線自由電子レーザーなどの超伝導空洞を用いた先端加速器の精密アライメントや位置測定に非常に大きく貢献するものである。また、現装置を用いて空洞がアライメントの範囲内におさまり、 $6 \mu\text{A}$ 以上のCWビームで空洞起因の不安定性もなくエネルギー回収を実現したことで、モジュール製作に対する指標が確立しただけでなく、今後の大電流ERL運転に向けて大きな指標を示すことができたことが本研究の大きな収穫である。

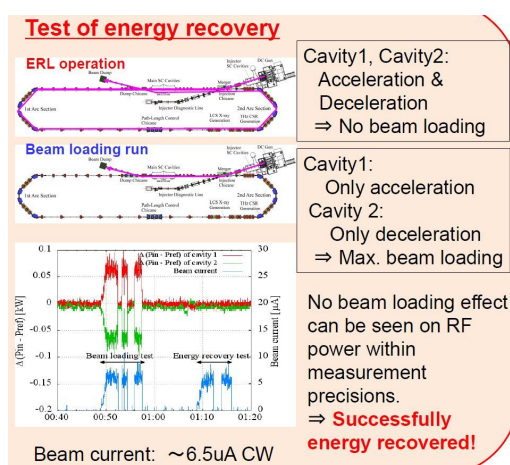


図10: $6.5 \mu\text{A}$ のCWビームによるエネルギー回収実験結果。本来CWビーム加速に使われるエネルギー負荷が回収ビームを主空洞に減速位相でいれることで、減速ビームからエネルギーが供給され、エネルギー回収が達成されている。

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20件)

H. Sakai, T. Aoto, K. Enami, T. Furuya, M. Sato, K. Shinoe, K. Umemori, E. Cenni, M. Sawamura, K. Hayashi, T. Kanzaki, "Precise Measurement of Superconducting Cavity Movement in Cryomodule by the Position Monitor Using White Light Interferometer", Proc. of SRF2013, (Paris, France) p288-293, (2013). (査読無)

E. Cenni, T. Furuya, H. Sakai, K. Umemori, K. Enami, K. Shinoe, M. Sato, M. Sawamura, "Field Emission Measure During cERL Main Linac Cryomodule High Power Test in KEK", Proc. of SRF2013, (Paris, France) p672-676, (2013) (査読無)

K. Umemori, K. Enami, T. Furuya, H. Sakai, M. Sato, K. Shinoe, M. Sawamura, E. Cenni,

"Construction of Main Linac Cryomodule for Compact ERL Project", Proc. of IPAC2013, (Shanghai, China) p2349-2351, (2013) (査読無)

K. Umemori, K. Enami, T. Furuya, H. Sakai, M. Sato, K. Shinoe, M. Sawamura, E. Cenni, "Status of Main Linac Cryomodule for Compact ERL Project", Proc. of IPAC2012, (New Orleans, U.S.A), p67-69, 2012 (査読無)

H. Sakai, T. Furuya, N. Nakamura, K. Umemori, K. Shinoe, M. Sawamura, E. Cenni, "High Power Tests of KEK-ERL Input Coupler for Main Linac under Liquid Nitrogen Condition", Proc. of SRF2011, (Chicago, U.S.A), p356-360, (2011) (査読無)

〔学会発表〕(計23件)

第27回日本放射光学会年会,
阪井寛志, 他86人, 「Compact ERL 周回部の現状 -高品質、大電荷ビームエネルギー回収実現に向けて-」, 広島, 広島, 1月12日, (2014).

SRF2013, 招待講演
H. Sakai, K. Enami, T. Furuya, M. Sato, K. Shinoe, K. Umemori, E. Cenni, M. Sawamura, "High Power CW Tests of cERL Main-Linac Cryomodule", THIOC02, SRF2013, (Paris, France) September 26, (2013).

第10回日本加速器学会年会
阪井寛志, 梅森健成、江並和宏、佐藤昌史、沢村勝、篠江憲治、古屋貴章、Cenni Enrico, 「Comapct ERL 主加速部超伝導空洞クライオモジュールのハイパワーテスト」, MOOT09, 名古屋, 愛知, 8月5日, (2013).

SRF2011, 招待講演
H. Sakai, "Overview of CW Input Coupler for ERL", FRIOA05, SRF2011, (Chicago, U.S.A) July 29, (2011).

SRF2011, 招待講演
K. Umemori, T. Furuya, E. Kako, S. Noguchi, H. Sakai, M. Sato, T. Shishido, K. Watanabe, Y. Yamamoto, K. Shinoe, M. Sawamura, E. Cenni, "Construction of Main Linac Cryomodule for Compact ERL Project", FRIOA06, SRF2011, (Chicago, U.S.A) July 29, (2011).

〔その他〕

ホームページ等

<http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪井 寛志 (SAKAI HIROSHI)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：50345229