

機関番号：82118

研究種目：基板研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340066

研究課題名 (和文) エネルギー回収型リニアックのための超伝導空洞の基礎研究

研究課題名 (英文) Fundamental Research of a superconducting RF cavity for an energy recovery linac

研究代表者

古屋 貴章 (FURUYA TAKAAKI)

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

研究者番号：70156975

研究成果の概要 (和文)：物質、生命科学探究のための次世代放射光光源や小型高輝度 X 線源として有望なエネルギー回収型リニアック(ERL)の基幹技術である超伝導高周波加速空洞に関する基礎研究を行った。新設計の9連型超伝導空洞の性能を調査するとともに周辺機器についても最適設計とその性能試験を行い、それらを収容し極低温での運転を可能にする専用の低温容器構造の概念設計も行った。

研究成果の概要 (英文)：Fundamental study of a new 9-cell superconducting cavity was carried out for an Energy Recovery Linac (ERL) which is expected in the field of material and life science as the next generation light source or a compact high brightness X-ray source. Not only the superconducting cavity but the major components are developed as well as the concept design of a cryo-module.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：加速器科学

科研費の分科・細目：(分科) 物理学 (細目) 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器

1. 研究開始当初の背景

ERL(Energy Recovery Linac:エネルギー回収型リニアック)は高いエネルギー効率で極低エミッタンスビームが実現できる手段として注目され、米国ではHEPL(Stanford大学)やJLab(ジェファソン研究所)が、また日本ではJAEAが基礎実験を行っていた。その後近年の超伝導高周波技術の発展とともにその本格的な応用計画が次世代放射光光源を中心に検討され、米国ではCornell大学、JLabが、またヨーロッパでは英国やドイツの研究機関が中心となって数GeV、数100mA級を目指した

具体的な開発研究が開始された。また米国BNLの陽子加速器(RHIC)では電子冷却のための1アンペア級低エミッタンス電子ビームを得る手段として700MHz空洞開発を進めるなど、ERL技術は次世代の「質の高い大電流ビーム」を得る手段として世界的な開発競争が始まった。

一旦加速したビームを逆位相で加速管に戻して減速・終端することによってその運動エネルギーを電磁場エネルギーとして回収し、それを新鮮な入射ビームの加速に使う原理は、素粒子の衝突実験のために1965年にM.

Tignerによって提案された。これにより蓄積リングに匹敵するエネルギー効率の良さ、蓄積リング方式では到達できない極低エミッタンスの大電流ビームが期待できるが、加速空洞自体のジュール損失がビーム電力に比べて無視できるほど小さい超伝導空洞でのみ成立するものであり、そのための超伝導空洞開発がERL実現への鍵である。1965年当時の超伝導空洞に対する理解と製作技術は低く、とてもERLに適用できるものではなかったが、リニアコライダーに向けた1.3GHz超伝導空洞の開発が進展した近年では、その技術を基にERL特有の大電流ビームに向けて有害高調波対策を強化した高電界空洞の開発が可能になった。

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は粒子加速器の性能を飛躍的に向上させる手段として早くから超伝導加速空洞の優れた特性に着目しその技術開発と応用研究を続けてきた。その結果 1988 年にはトリスタン加速器で世界初の本格的な実用化を果たし、さらに 1998 年から稼動を開始した KEKB 加速器では徹底した高調波対策と独自に開発したフェライト製高調波減衰器を装備した超伝導空洞を導入し、超伝導空洞としては世界で初めて 1 A を超える蓄積電流を達成するなど、絶えずこの分野をリードしてきた。

これらを背景として 2006 年に研究代表者らは ERL 用 1.3 GHz、9 セル型超伝導空洞の基本形状を提案した。それは 15~20MV/m の CW 加速電場と、100mA の加速ビームにその回収ビームを合わせた 200mA のビーム運転を可能にするものであり、KEKB 空洞と同様な高調波吸収を採用するとともに、これまで手段が見つからなかった 4 極モード対策として新たに考案したモード変換方式を装備するものであった。この方式はセル数を減らすことなく高調波対策が強化できるものとして、ERL 空洞開発の分野で注目されることになった。

2. 研究の目的

本研究課題は、ERL 加速器の中心をなす超伝導加速空洞モジュールに要求される機能とそれを実現するための要素技術を抽出・検証しながら、それらを統合し最適化した空洞モジュールの設計を進めるものである。

空洞は上述の 1.3 GHz、9 セル型空洞に対して、

- (1) 超伝導空洞本体開発：加速性能を計測しその性能限界の原因を調査し、空洞形状の最適化を目指す。
- (2) 高調波減衰器開発：200 mA ビームが励起する高調波を評価し、減衰させるための高調波減衰器モデルを設計・試作する。
- (3) 入力結合器開発：20 kW 級入力結合器を設計・試作し、その特性を評価する。
- (4) クライオスタット設計：要素開発で得た

計測結果に基づき、クライオスタットの概念設計を進める。

これらを進めることによって、ERL 用に開発した 9 セル構造の超伝導空洞製作の形状の評価および実用のための基礎技術を獲得する。

3. 研究の方法

上記の各要素について以下の開発研究を行う。

(1) 超伝導空洞本体：

ニオブ製試験空洞を用いて室温での周波数、空洞内電場分布の調整、低温での加速性能などを計測、また空洞の表面処理条件と性能との関連を調べることにより、設計性能を実現するための技術的な手法を確立する。

低温での高周波特性計測だけでなく、多数の温度センサーや放射線センサー等を配置し、極低温下で空洞内に発生する超伝導破壊や放電、電子放出などの諸現象を観察し現象の診断と解析を試みることで、超伝導空洞診断技術を確立する。

(2) 高調波減衰器開発

ERL で考えられているビームバンチは 40 GHz に達する高調波を励起する。この広帯域の高調波を液体窒素温度でも効率良く吸収できる吸収体材料を決定することが必須であり、種々の吸収材料の低温特性比較試験とともにその取付け位置と大きさの最適化を行う。また吸収体製作手法を確立する。

(3) 入力結合器開発

20 kW の CW 電力投入を目標にして、そのための同軸構造設計、セラミック窓の材質と形状の評価、内外導体の冷却方法の検証を行う。また、断熱容器を製作して実用環境を再現して電力試験を行う。

(4) クライオスタット概念設計

決定された構成要素の技術データに基づき、それらを収容するクライオスタットを設計する。このため極低温で使用するセンサーや継ぎ手構造、磁気シールド材料の選択などの要素技術の検討を行う。

4. 研究成果

ここまですべての研究成果を以下にまとめる。

(1) 超伝導空洞開発

① 空洞形状

5GeV、100mA の ERL に向けて図 1 の空洞形状を設計した。9 セル構造は高電界運転には有利な構造であるが、ビーム電流が励起する有害高調波も大きくなる。100 mA の大電流ビームが励起する高調波を取り出すために 80 mm という大きな iris 口径を採用するとともに、空洞両端には 100 mm、120 mm の大口径ビームパイプを取り付けて高調波をビームダクト方向へ伝播させる。取り出した高調波は隣接するビームパイプ内面に貼った電波吸収体で吸収する。5 GHz までの高次モードを丹

念に調べ、周波数が 1.3 GHz の高調波に一致しないようにセル形状を定めた。また、ビームパイプには新しいアイデアによるモード変換部 (EFB) が取り付けられた。これまで取り出し手段が無かった 4 極モードを 2 極モードに変換して取り出すことができる (図 2)。空洞の形状パラメーターを表 1 に示す。



図 1 ERL 用 9 連空洞形状。全長 1348 mm、両端にフェライト吸収体を取り付けられる。

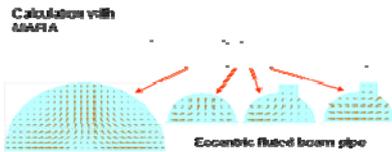


図 2 モード変換による 4 極モードの取り出し。ビームパイプに取り付けた偏心溝により、4 極モードは 2 極モードとなって伝播する。

表 1 ERL 用 9 連空洞形状パラメーター

加速周波数	1.3GHz	Q0	1E+10
加速電場	15 - 20 MV/m	R/Q	897 ohm
最大電流	100 mA	coupling	3.8 %
Esp/Eacc	3.0	Hsp/Eacc	42.5 0e/MV/m

②空洞性能計測

純ニオブ板から成形、電子ビーム溶接で作られた空洞には、電解研磨、750℃のアニール、超純水の高圧水洗工程などにより、加工中に受けた空洞内表面の加工歪や傷、汚染物質を完全に除去した上で、空洞単体の性能試験を行なう。図 3 にその 1 例を示す。最大電場 28 MV/m が得られているが、その後の RF プロセスで 20 MV/m へ劣化、室温へ昇温後の再測定で 24 MV/m への回復が見られた。

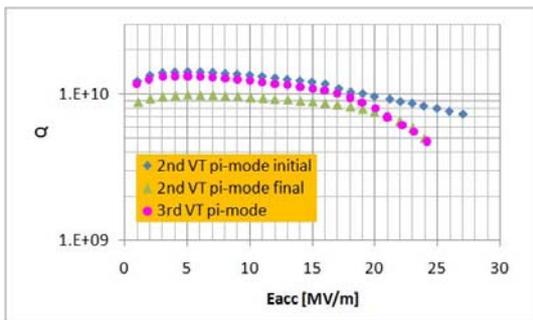


図 3 空洞性能試験結果

② 空洞診断技術と検証

空洞内の現象を解明するため、温度センサーおよびフォトダイオードを並べたセンサー

アームを空洞外表面に沿って回転させるマッピング装置を開発し (図 4)、低温計測中の空洞を診断した。図 5 には 9 個のセルで検出された放射線の強度分布が横軸を 360 度までの回転角度として示されている。

当初は無かった電子源が RF プロセス中に発生した強い放電によって内表面に複数個生成され、そこからの放出電子が空洞内を子午線に沿って加速され再び表面に衝突していると理解できる。電子放出源の位置の特定のために電子の運動解析を交えた解析が現在も続けられている。

③ 空洞開発のまとめ

高調波に関しては本空洞形状はシミュレーションで予想した減衰を示した。iris 部の高い表面電場による放電と電界放出電子が性能制限として懸念されたが、表面処理により ERL の実用加速電場 15MV/m は確保され、そのときの空洞損失は 23 W であった。さらに高い電界で確認された電子放出は、その位置と成因に関してさらに実験的検証と解析を進める必要がある。

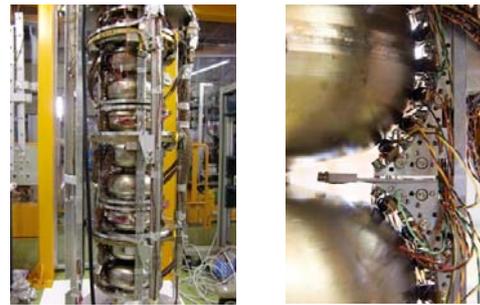


図 4 空洞診断装置

pi-mode (2nd) 20MV/m Q0=7.0*10⁹ (no iris)

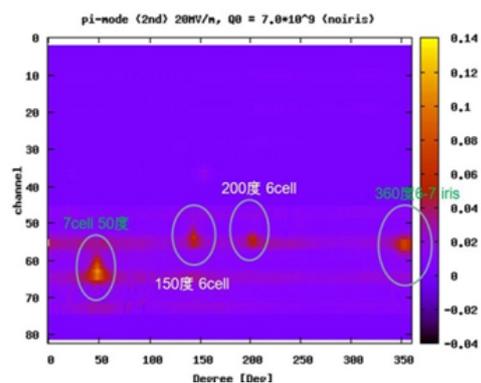


図 5 計測された放射線分布

(2) 高調波減衰器開発

①吸収体の低温特性試験

電荷 77 pC、長さ 1 mm、繰り返しが 2.6 GHz のビームバンチが空洞を通過すると、励起される高調波成分は 40 GHz に達し、電力は

150 W になる。これを減衰するには液体窒素温度に冷却された高調波吸収体を用い、2K 空洞への入熱を防ぐためにベローズ構造にする。

吸収体としてはフェライトや SiC などの抵抗体が考えられるが、9 種類のサンプルについて 80K 付近での広帯域吸収特性を計測した (図 6)。その結果を図 7 に示す。これから KEKB 空洞での実績がある TDK 社 IB004 を採用した。



図 6 GM 冷凍機を使って種々の吸収体の低温特性を計測。

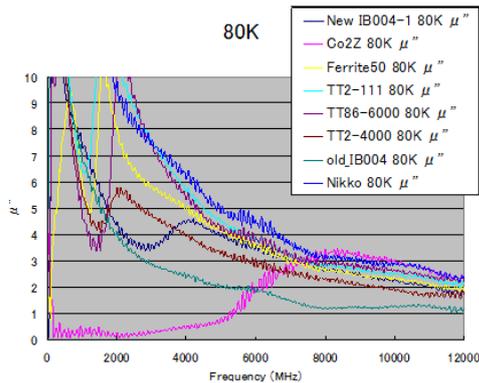


図 7 種々の電波吸収体の 80K での比透磁率比較

②フェライトの HIP 条件試験

特性試験の数値を用いたシミュレーションならびにモデル試験結果からは、厚さ 2 mm、長さ 80 mm のフェライトをビームパイプ内面に接合する必要があることが判った。それを可能にする方法として HIP (hot isostatic pressing) を採用することにし、その焼成条件試験を実施した。粉体のフェライトを銅円筒と一緒に鉄缶に封じ、およそ 900°C、1500 気圧の条件下で焼成する。その温度や圧力条件について幾通りかのパターンでサンプルを作成し、それを超音波探傷で評価することによって焼成最適条件を決定した。

④ ベローズ構造試験

空洞への熱侵入を防ぐために、吸収体は両端フランジとベローズを介して接続される

(図 8)。このベローズ自体での高調波励起を防ぐために、内側にクシ歯型の RF シールド構造を有している。ベローズは空洞とともに断熱真空中に置かれるため、機械的な動作試験とともに、ヒーターによる 80K での冷却効率を試験・検証した。

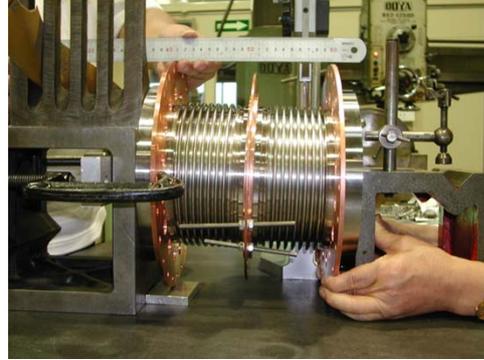


図 8 高調波減衰器の試作機。内部にフェライト吸収体を装着し中央の銅板から液体窒素を使って冷却する。両端の銅板を 5K に冷却して 2K 空洞への入熱を防ぐ。

(3) 入力結合器開発

①基本設計

ERL 主空洞は帰還ビームから電力を回収するため実質的な電力負荷は小さいが、周波数変動に伴う加速電圧の降下を保証するため、5~20 kW の電力を全反射状態で供給する必要がある。この電力を室温部から 2K の空洞まで断熱真空層を経由して供給するには、結合器自身の高周波損失を減らすとともに、室温部からの熱侵入を最小にし、また冷却が容易な構造を採用しなければならない。この種の結合器にはリニアコライダーの脉冲運転仕様のものがあるが、ここでは CW 動作仕様が必要である。

この目的のため、以下の仕様の入力結合器を設計・試験した。

- ・セラミック部の発熱を減らすため、高純度アルミナ (99.7%) を採用する。
- ・外導体の発熱を減らすために特性インピーダンスを 60 Ω にする。
- ・内導体はガスで冷却する。
- ・結合度は可変にする。
- ・入熱を減らすため、5K および 80K の熱アンカーを採用、その位置を最適化する。
- ・空洞真空を保護するために 2 重窓を採用する。

これらを満たすものとして図 9 の結合器を設計した。

②セラミックモードの出現と対処

上記方針により設計した結果、セラミック部に 1.3 GHz の共振モードが出現し、それによりセラミックの局部発熱と割れが発生した。

そのため、セラミック厚を 6.2 mm から 5.8 mm へ減らして周波数を 20 MHz ずらすことにした。

③ベローズのメッキ厚の最適化

熱収縮の吸収と伝導熱を減らす目的で、ステンレス製ベローズが使われるが、その高周波損失を減らすためには、表面に 10 μm 程度の銅メッキ処理を施す必要がある。このため、ベローズ構造のメッキ厚さ分布を試験し、その施工条件を決めた。

④電力試験

図 10 に入力結合器の電力試験状況を示す。組み立てた入力結合器を窒素冷却タンクに装着し RF プロセスをするとともに、ベローズ部の発熱と冷却を計測した。その結果、目標を超える 25 kW を達成、内導体ベローズの温度は 120°C に抑えることができた。

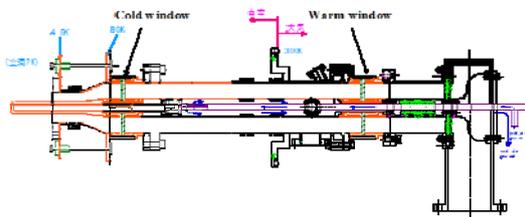


図 9 入力結合器の構成

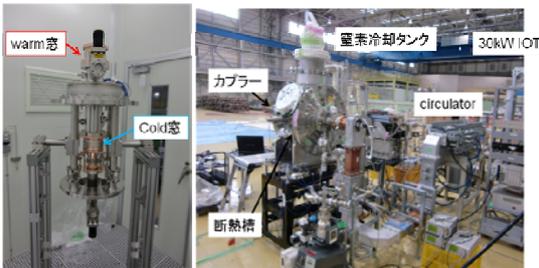


図 10 電力試験セットアップ

(4) モジュール設計

ERL 用に設計された 9 連型空洞 2 台と高調波吸収体、入力結合器などの周辺機器を収容するクライオスタットの構成を図 11 に示す。2 台のニオブ製空洞は熱収縮率が近いチタン製のヘリウム容器に溶接され、間には高調波減衰器が装着されている。

地磁気のトラップによる高周波損失の増加を防ぐため、空洞には磁気遮蔽が必要であるが、極低温での性能が保証されたシールド材料とその処理条件はサンプル試験をして決定された(図 12)。また 2K での接続フランジとそのガスケットなどの技術についても実際に試験をした上で採用した。

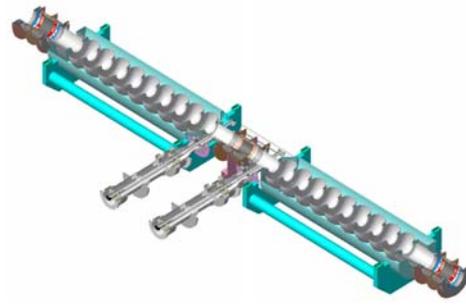


図 11 空洞と HOM 減衰器の接合

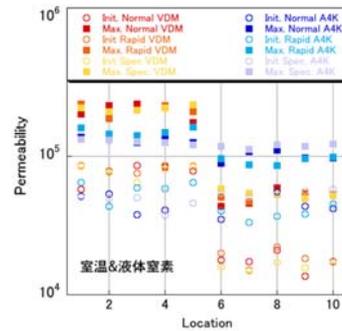


図 12 磁気シールドの低温特性

(5) まとめ

本研究課題は ERL 実現のための要素開発とそれらで構成されるクライオスタットを設計することを目指した。新設計によるニオブ製空洞の低温性能試験では表面処理を繰り返すことで実用電場 15-20 MV/m を達成することができ、高調波対応型 9 連空洞の可能性が示された。その課程で空洞内部の現象を診断するための診断技術を開発し、強い電子放出とその挙動を確認した。この結果は、電子軌道解析による電子源の場所と成因究明に、実験的な検証を与える手段として期待できる。これは今後の ERL 空洞の形状と性能の高度化に貢献するものである。

入力結合器を始めとする構成要素の開発では、20 MV/m、100 mA 級の ERL 用超伝導空洞に必要な要素技術が確認出来た。これらを収容するクライオスタット設計では、2K の真空シールド技術、磁気シールド材料の低温性能など、今後のモジュール設計に役立つ技術データを提供することが出来た。

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 18 件)

- ① Kensei Umemori, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Masaru Sawamura, Kenji Shinoe, Observation of Resonance Mode in Coaxial-type Input Coupler, Conf. Proc.

C100523:WEPEC031, 2010. 査読無

- ② Kensei Umemori, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Takeshi Takahashi, Masaru Sawamura, Kenji Shinoe, Results of Vertical Tests for KEK-ERL 9-cell Superconducting Cavity, Proc. of IPAC10, C100523:WEPEC030, 2010, 査読無.
- ③ Hiroshi Sakai, Takaaki Furuya, Shogo Sakanaka, Takeshi Takahashi, Kensei Umemori, Atsushi Ishii, Norio Nakamura, Kenji Shinoe, Masaru Sawamura, Power Coupler Development for ERL Main LINAC in Japan, Proc. of IPAC10 C100523:WEPEC029, 2010, 査読無.
- ④ Takaaki Furuya, et al., Development of a Prototype Module for the ERL Superconducting Main Linac at KEK, Proc. of IPAC10 C100523:WEPEC015, 2010, 査読無.
- ⑤ M. Sawamura, T. Furuya, H. Sakai, et al., Eccentric-fluted beam pipes to damp quadrupole higher-order-modes, Phys. Rev. ST-AB, 査読有, 13, 2010, 022003-1-9.

[学会発表] (計 9 件)

- ① 梅森健成、阪井寛志、沢村勝、篠江憲治、古屋貴章、Enrico Cenni, ERL 主加速部クライオモジュールの開発, 第 24 回放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム 2011/1/7-10 つくば国際会議場
- ② 阪井 寛志, 梅森 健成, 高橋 毅, 古屋 貴章, 篠江 憲治, 石井 篤, 沢村 勝, 武藤 俊哉, ERL 超伝導加速空洞での空洞診断装置の開発, 第 7 回日本加速器学会年会, 2010/8/4-6, 姫路市文化センター
- ③ M. Sawamura, T. Furuya, H. Sakai, K. Umemori, K. Shinoe, Cooling test of HOM absorber model for cERL in Japan, International Workshop on Higher Order Mode Damping Superconducting RF cavities, October 11-13, 2010, Cornell Univ.
- ④ K. Umemori, Compact ERL Linac, Int. Workshop on RF Superconductivity, SRF2009, Sept. 20-25, Berlin.
- ⑤ T. Furuya, High Average Current SRF Cavities, LINAC08, Oct.1, 2008, Victoria, Canada, invited.

[図書] (計 1 件)

- ① T. Furuya, World Scientific Publishing Company, Reviews of Accelerator Science and Technology Vol.1, 2008, 211-235.

[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

古屋 貴章 (FURUYA TAKAAKI)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授
研究者番号: 70156975

(2) 研究分担者

梅森 健成 (UMEMORI KENSEI)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・講師
研究者番号: 60353364

飛山 真理 (TOBIYAMA MAKOTO)
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: 60207595

尾崎 俊幸 (OZAKI TOSHIYUKI)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・講師
研究者番号: 60169282

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・助教
研究者番号: 50345229

西脇 みちる (NISHIWAKI MICHIRU)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・特別助教
研究者番号: 70555614

高橋 毅 (TAKAHASHI TAKESHI)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・技師
研究者番号: 90391747

(3) 連携研究者

沢村 勝 (SAWAMURA MASARU)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究
研究副主幹
研究者番号: 30354905