

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17997

研究課題名（和文）次世代光源で極低エミッタンス実現に必要なバンチ伸長時の過渡的ビーム負荷補償の実現

研究課題名（英文）Realization of the ideal bunch lengthening by compensating for transient beam loading in the next-generation light sources.

研究代表者

内藤 大地 (Naito, Daichi)

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・助教

研究者番号：30788237

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：次世代光源での極低エミッタンス実現に必要なバンチ伸長時の過渡的ビーム負荷補償には、RF空洞に発生する過渡的電圧を補償可能な広帯域空洞が必須となる。そこで申請者は電磁場シミュレーションを用いて空洞形状の最適化を行い、世界で初めて空洞の具体的なデザインを提唱した。そしてこの補償空洞の性能実証のため、低電力モデルの設計と製作を行ない、その性能評価を行なった。RF特性の性能評価ではデザインした空洞が過渡的電圧変動を補償するのに十分な応答速度を持つ事を実証した。また空洞に発生する高次の寄生モードが十分に小さい事を実測し、申請者が設計した補償空洞が実際に次世代光源で使用可能である事を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

過渡的電圧補償が重要である事は世界の共通認識であったが、実際に次世代光源の建設計画がある施設では建設に追われており、我々の研究グループ以外に具体的な検討を進めているグループはあまり無かった。現在は次世代光源の建設が終わり、過渡的電圧補償の具体的な検討を始めた施設が出てきている。このような状況で申請者が過渡的電圧補償が可能なハードウェアを提唱した意義は非常に大きく、これらの施設で申請者が考案した補償空洞が採用される可能性がある。また申請者は具体的なデザイン決定のプロセスを国際学会で発表しており、この成果はこれから各施設が検討を進める上で大きな助けとなる。

研究成果の概要（英文）：In the next generation of synchrotron light sources, bunch lengthening is essential to achieve ultra-low-emittance and the transient beam-loading effect should be compensated by the wide-band kicker cavity.

We optimized and proposed the design of the kicker cavity using 3D electromagnetic simulation at first in the world. To confirm the performance of the kicker cavity, we manufactured the low-power model of the cavity and evaluated its performance. By measuring the RF properties, we confirmed that the bandwidth of the kicker cavity met the requirement. We also confirmed that high order mods were sufficiently damped by the RF absorber. From above results, we successfully established the design of the wide-band kicker cavity.

研究分野：加速器、加速空洞、LLRF、電源

キーワード：極低エミッタンス光源 過渡的電圧変動 広帯域空洞

### 1. 研究開始当初の背景

リング型放射光源で極低エミッタンスを実現する事はX線科学の発展に必要不可欠であり、世界各地で次世代光源の建設及び運転調整が進んでいる。次世代光源での極低エミッタンス達成には周回する電子群(バンチ)内での電子同士の散乱を抑制してエミッタンス増大を防ぐ必要がある。散乱抑制のために従来は図1のように主加速空洞RFに高調波空洞RFを加えてバンチ伸長してきた。しかし蓄積ビームの一部にバンチを入れない部分(バンチギャップ)が存在すると、空洞内電圧が過渡的に変動してバンチ伸長が抑制される(図2、3)。次世代光源で必要なバンチ伸長の実現には上記の過渡的電圧変動を補償せねばならない。最も簡単な補償方法は、高調波空洞自身に過渡的電圧を打ち消すように電圧を追加する方法である。しかし過渡的電圧は空洞の時間応答よりも速く変化するため、本来のバンチ伸長に必要な入力電力よりも一桁多い入力電力が必要になり、非現実的である事がLBNLのByrdらにより指摘されている。Byrdらはバンチ毎の電子数を変化させる事で過渡的電圧変動を抑制する手法を提唱したが、理想的なバンチ伸長は実現できていない。

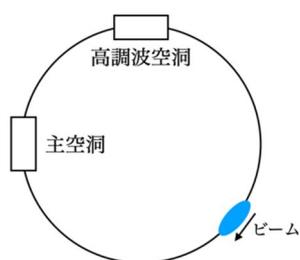


図1: バンチ伸長システム。

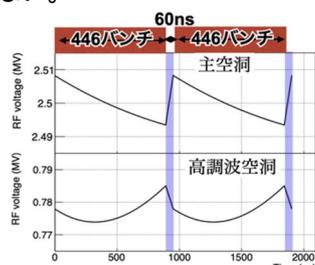


図2: 過渡的電圧変動

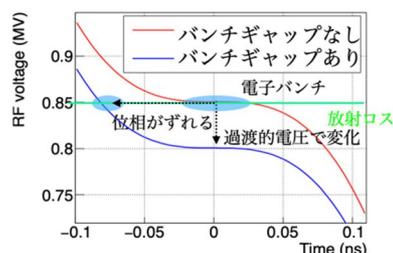


図3: 電圧変動の影響

このような状況で申請者の所属するグループは世界で初めて広帯域RF空洞を用いた過渡的電圧変動の補償システムを提案した。そして申請者はKEK-PFの次期計画として検討されていたKEK-LSでの使用を仮定し、空洞に最適なパラメータの検討を行った。また電磁場シミュレーション(CST)を使って最適なパラメータを満たす空洞の具体的な設計を行い、世界で初めて具体的なデザインを提唱した(図4)。補償空洞はTM010モードを利用した常電導空洞で、空洞本体とRFを空洞に供給するため上下に取り付けた導波管、高次の共振モードを減衰させるためのRF吸収体、ビームダクトにより構成される。

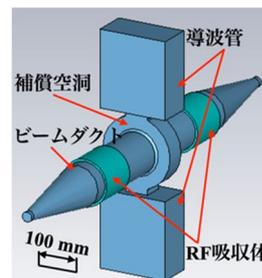


図4: 補償空洞概略図

空洞の代表的なパラメータを表1に示す。補償空洞のデザインで重要な事は(1)過渡的電圧補償が可能な応答速度を有している事、(2)補償空洞内に発生する高次の寄生共振モードが全て減衰されている事の2項目であった。

表1: 補償空洞のパラメータ

パラメータ	値
共振周波数	1.5 GHz
R/Q	60.38
無負荷Q値	18000
負荷Q値	292
ジェネレーター電圧	53 kV

補償空洞が達成すべき応答速度はバンド幅で表すと5MHzとなる。このバンド幅はTM010モードの共振周波数と負荷Q値の比で決まるため、速い

応答速度の達成には小さな負荷Q値の実現が必須である。そこで図4中のように導波管を上下2ヶ所に設置し、さらに空洞と大きな穴で接続する事で小さな負荷Q値を達成している。

寄生モードが存在するとビームの運動が不安定になって、加速器の運転に支障をきたしてしまう。よって寄生モードは十分に小さくしなければならない。補償空洞では空洞の形状にシングルモード空洞形状を採用して対応している。この空洞形状では大きなビームホールから寄生モードがビームパイプに漏れ出すので、これをRF吸収体で吸収する事により減衰できる。また大きなビームホールを持つ形状により小さなR/Qが達成でき、補償空洞自身に生じる過渡的電圧変動を小さく抑える事にも成功している。

### 2. 研究の目的

申請者が提唱した広帯域補償空洞の性能を実証し、バンチギャップによる過渡的電圧変動の補償システムのハードウェアを確立する。

### 3. 研究の方法

広帯域補償空洞の性能を実証するには実機の試作が確実である。しかし実機の補償空洞は銅製で、各部品は口付けにより結合されるため、その試作は非常に高価となる。そこでアルミ製の低電力モデルを設計/製作して性能評価を行い、実機で得られる性能を推定する事で性能実証を行う。性能実証では前述した応答速度の評価と寄生モードの減衰の確認が重要となる。

応答速度の実証には負荷Q値を測定しなければならない。負荷Q値は無負荷Q値と外部Q値を使って

$$\text{負荷Q値} = \frac{\text{無負荷Q値} \times \text{外部Q値}}{\text{無負荷Q値} + \text{外部Q値}}$$

と書ける。この時補償空洞では負荷Q値が非常に小さいため、負荷Q値と外部Q値が等しいと近似できる。よって外部Q値を測定する事で実機の負荷Qを推定する事ができる。具体的には図5のようにネットワークアナライザーを低電力モデルに接続し、TM010モードのRF特性を測定する。そしてRF特性から外部Q値を計算する。

高次の寄生モードの減衰に関しては補償空洞にRF吸収体を取り付けた場合と外した場合での寄生モードを測定するとともに、電磁場シミュレーションとの比較を行って寄生モードが十分減衰されている事を実証する。

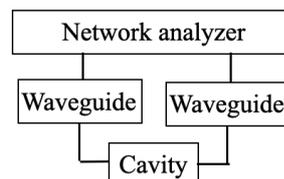


図5：RF測定セットアップ

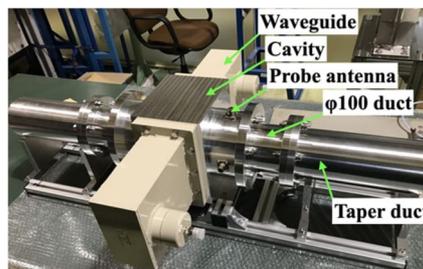


図6：低電力モデルの写真

#### 4. 研究成果

まず最初に補償空洞の低電力モデルを設計し、製作を行った。図6に製作した低電力モデルを示す。空洞形状とビームパイプ形状は実機と同じである。ビームパイプには高次の寄生モードを観測するためのプローブアンテナが取り付け可能なポートを2ヶ所用意した。導波管に関しては実機とは仕様の異なる同軸/導波管変換器を購入して取り付けた。またこの時、RF吸収体は調達できなかったためビームパイプにRF吸収体をつけていない。

低電力モデルを図5のように繋いでTM010モードの反射係数(S11、S22)と透過係数(S21、S12)を測定した。図7に測定結果を示す。黒が実測値で赤が電磁場シミュレーションでの計算結果である。各ピークからパワーが半分になる2点の周波数差が応答速度のバンド幅を示しており、実測値がシミュレーションと同程度のバンド幅を持っている事が分かる。またこのバンド幅とピークの周波数から計算したRFパラメータを表2に示す。無負荷Q値に関してはシミュレーションと実機で値が大きく異なっている。これはシミュレーションで設定した理想的な電気的性質から実機の性質がずれている事に起因している。その他のパラメータに関してはシミュレーションと実測で非常に良く合っている。この時、予想される応答速度のバンド幅は5.05MHzとなり、過渡的な電圧変動を補正するために十分な応答速度を持っている事が実証できた。そしてこの結果を第19回日本加速器学会年会にて発表した。

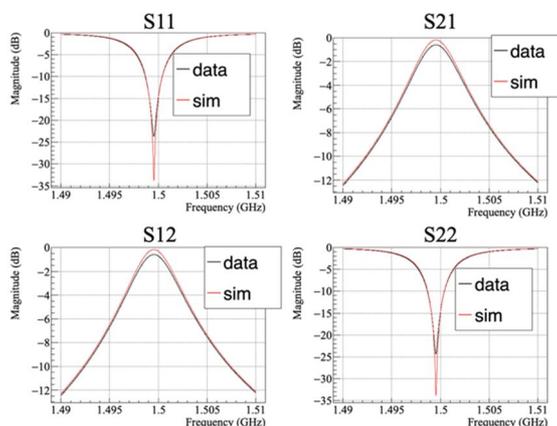


図7：RF特性測定結果

表2：TM010モードのRF特性

パラメータ	シミュレーション	実測
共振周波数 (GHz)	1.49954	1.49955
無負荷Q値	14205	4639
負荷Q値	290	280
外部Q値	297	297

次にRF吸収体素材の再検討を行なった。研究開始当初はフェライト製の吸収体を使用する予定であったが、入手性が非常に悪くなり、使用が厳しくなってしまった。そこでSiC製の吸収体の使用を電磁場シミュレーションにより検討する事にした。図8と図9に検討結果を示す。どちらの図も横軸は寄生モードの共振周波数を示す。縦軸は結合インピーダンスと呼ばれる、ビーム運動の不安定性を示す指標を示している。緑の線は不安定性が起きる閾値を示しており、結合インピーダンスが閾値を超えると不安定性が起きて加速器の運転に支障をきたす。図8はビームの進行方向の運動に対する評価、図9はビームの横方向の運動に対する評価を示している。また黒色はRF吸収体が無い時のインピーダンス、赤色はフェライト製の吸収体を使った時の結果、青色はSiC製の吸収体を使った時の結果を示す。これらの図からSiC製の吸収体を用いて高次寄生モードを不安定性の閾値よりも十分に減衰できる事を明らかにした。そしてこの結果を同様に第19回日本加速器学会年会にて発表した。

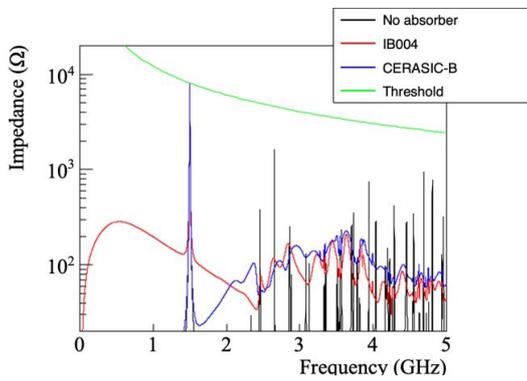


図 8 : 進行方向の結合インピーダンス

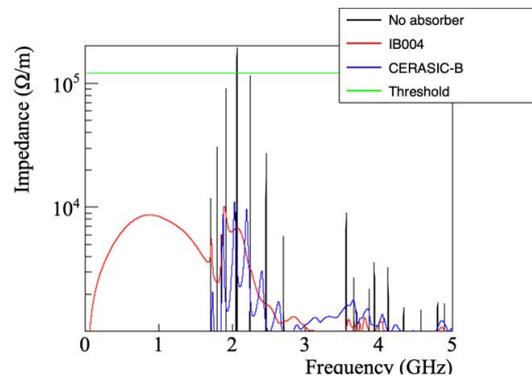


図 9 : 横方向の結合インピーダンス

次に実際に SiC 製の吸収体を製作し、寄生モードが減衰できているかを確認することにした。確認を行うためには実際に寄生モードを測定する必要がある。そこで電磁場シミュレーションを用いて測定に最適なアンテナ形状の検討を行なった。実際に製作したアンテナを図 10 に示す。このアンテナをビームパイプに設けたポートに取り付け、ネットワークアナライザに繋ぎ、吸収体の有無により寄生モードがどう変化するかを測定した。図 11 に測定結果を示す。横軸が寄生モードの共振周波数、縦軸がネットワークアナライザで観測した各寄生モードの透過係数を示す。また黒線は RF 吸収体が無い時の結果、赤が RF 吸収体を取り付けた時の結果を示す。さらに実線が実測値、破線がシミュレーション結果を示す。図 11 では吸収体がない時に観測されていた寄生モードが、吸収体を取り付けることで観測不能なレベルまで減衰している事がわかる。また実測とシミュレーション結果もおおむね一致した。これらの事実から全てのモードが想定通り大きく減衰されていると結論づけた。そしてこの結果を第 19 回日本加速器学会年會にて発表した。

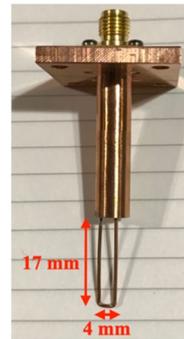


図 10 : アンテナ

これまでの低電力モデルの性能評価より、申請者が提唱した補償空洞が過渡的電圧変動を補償するのに十分な応答速度を持つ事、高次の寄生モードが十分に減衰できている事を実証できた。これらの成果から過渡的電圧変動の補償システムに必要なハードウェアの確立に成功し、当初の研究目標を達成する事ができた。この成果は海外の放射光施設である SOLEILU、ESRF とのコラボレーションミーティングにて報告し、高い関心を得た。また、国際学会である IPAC 23 でもこの成果を発表した。

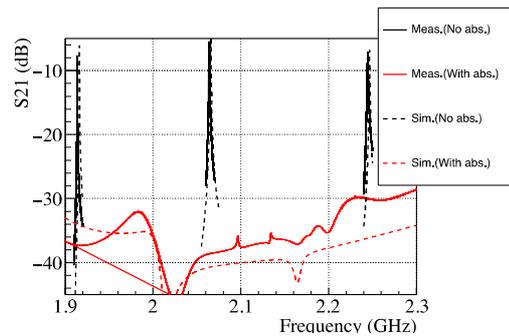


図 11 : 寄生モードの透過係数測定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 内藤 大地, 山本 尚人, 高橋 毅, 山口 孝明, 坂中 章悟	4. 巻 -
2. 論文標題 次世代光源における過渡的電圧補償のための広帯域空洞低電力モデルHOM減衰性能の評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 649-652
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 D. Naito, N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Low-power model tests of the wide-band cavity to compensate the transient beam loading in the next generation light sources	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th International Particle Accelerator Conference	6. 最初と最後の頁 2936-2939
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-IPAC2023-WEPA119	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 内藤大地、山本尚人、高橋毅、山口孝明、坂中章悟	4. 巻 -
2. 論文標題 次世代光源における過渡的電圧補償のための広帯域空洞コールドモデルの性能評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 450-453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 D. Naito, N. Yamamoto, S. Sakanaka, T. Takahashi, T. Yamaguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Design consideration of a longitudinal kicker cavity for compensating transient beam loading effect in synchrotron light sources	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 proceedings of 12th International particle Accelerator conference	6. 最初と最後の頁 1027-1030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB331	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 内藤大地、山本尚人、坂中章悟、高橋毅、山口孝明	4. 巻 -
2. 論文標題 次世代光源における過渡的電圧補償のためのバンチ位相検出法の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 185-189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 内藤 大地, 山本 尚人, 高橋 毅, 山口 孝明, 坂中 章悟
2. 発表標題 次世代光源における過渡的電圧補償のための広帯域空洞低電力モデルHOM減衰性能の評価
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 D. Naito, N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka
2. 発表標題 Low-power model tests of the wide-band cavity to compensate the transient beam loading in the next generation light sources
3. 学会等名 Proceedings of the 14th International Particle Accelerator Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 内藤大地、山本尚人、高橋毅、山口孝明、坂中章悟
2. 発表標題 次世代光源における過渡的電圧補償のための広帯域空洞コールドモデルの性能評価
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 D. Naito, N. Yamamoto, S. Sakanaka, T. Takahashi, T. Yamaguchi
2. 発表標題 Design consideration of a longitudinal kicker cavity for compensating transient beam loading effect in synchrotron light sources
3. 学会等名 12th International particle Accelerator conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内藤大地、山本尚人、坂中章悟、高橋毅、山口孝明
2. 発表標題 次世代光源における過渡的電圧補償のためのバンチ位相検出法の検討
3. 学会等名 第18回日本加速器学会年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関