

機関番号：82118

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20612021

研究課題名 (和文) 低出力インピーダンス高調波空洞による空間電荷力の緩和実験

研究課題名 (英文) Experiment on the mitigation of space charge force by using the low output impedance higher-harmonic cavity.

研究代表者

入江 吉郎 (IRIE YOSHIRO)

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：00124173

研究成果の概要 (和文)：本研究で開発した低出力インピーダンス高調波空洞装置を英国のISIS 陽子シンクロトロンに実装し、空間電荷力の緩和に関する最初のビーム実験を行った。本装置が大きなビーム負荷の状況下でも安定に動作することを確認し、ビーム誘起電圧の測定から出力インピーダンスを導出した。得られたインピーダンス (35オーム) は設計値とほぼ合致し、またネットワークアナライザを用いた低レベル測定結果とも良く一致している。今後、本装置を空間電荷力にかんするビーム物理の更なる研究に活用していきたい。

研究成果の概要 (英文)：First experiment on the mitigation of space charge force was carried out at the ISIS proton synchrotron, UK using the low output impedance harmonic cavity system, which was developed in this research programme. It was identified that the system is stable under the heavy beam loading, and the output impedance was derived from the measurement of the beam induced voltage. The obtained impedance (35 ohm) almost coincides with the design value, and also agrees well with the low-level measurement by the network analyzer. It is then expected to utilize the system for further study of the beam physics on the space charge force.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：加速器科学

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：(1) 大強度陽子加速器、(2) ビーム負荷、(3) 低出力インピーダンス、(4) 空間電荷効果、(5) 高調波加速空洞。

1. 研究開始当初の背景

本研究は、平成 17 年度、18 年度科学研究費補助金による基盤研究 (C) 「大強度陽子加速器を用いた高調波空洞によるビーム平坦化の研究」を更に発展させるものである。本研究の中核となる装置は低出力インピーダンス第 2 高調波空洞 (Low Output Impedance

2nd-harmonic Cavity、以下 LOI と略す) である。終段増幅器の陽極・グリッド間にフィードバックループを形成し、出力インピーダンスが 30 オーム以下の第 2 高調波空洞システムを実現することが出来た。この装置を、従来の低出力インピーダンス増幅器として知られるカソードフォロワーと比較した場

合、本装置は広帯域特性に優れ、且つ電圧ゲインが 20 倍以上大きいという特長を有する。

平成 17 年 8 月、ビーム平坦化実験に必要な高周波電圧の安定した発生に成功した。この試験で幾つかの解決すべき問題は残されたが、英国ラザフォードアプトン研究所 (RAL) の ISIS シンクロトロンを用いたビーム実験の為の準備研究はほぼ終了した。

2. 研究の目的

大強度の陽子加速器を実現するには、ビームを縦方向に平坦化し空間電荷力を緩和することは必要不可欠である。平坦化されない高い密度分布を持つビームは、空間電荷効果により横方向に大きなチューンシフトが発生し、共鳴線通過によるビーム損失をもたらす。また、縦方向の運動についても高密度のビームは周りのインピーダンスとの相互作用によって不安定になることが知られている (Keil-Schnell クライテリオン)。平坦化する方法として、陽子シンクロトロンまたは蓄積リングでは、基本波空洞に高調波空洞を重ねたバケットを用いる方法がある。しかし、高調波空洞には高精度の位相制御が要求される。何故なら、基本波空洞に対する高調波空洞の位相に誤差がある場合、ビームの縦方向分布にはむしろ非常に高密度の部分が発生してしまい平坦化とは逆の結果が得られるからである。本研究計画は、高精度の位相制御が可能な低出力インピーダンスの第 2 高調波空洞を用いてビーム平坦化による空間電荷力の緩和に関する実験的研究を行い、もって大強度陽子によるパルス中性子源の高度化に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 第 1 節に述べた LOI に関する「幾つかの問題」のうち最も重要なものは、高周波波形歪みの除去である。

図 1 に見る様に終段グリッド電圧及び空洞入力電流が大きく歪んでいる。この特徴は第 2 高調波空洞の基本波成分 (周波数は $2 \times f_{1/2}$) よりも大きな第 2 サブハーモニック成分

($f_{1/2}$) が存在することである。空洞に高電圧を発生させるには、終段増幅器のグリッド入力電圧と空洞電圧の位相差を検出し、これを空洞のフェライトバイアス電源にフィードバックすることで空洞を共振状態に保つことが必要である。しかし、この様な波形歪みは位相検出に多大な誤差をもたらす、フィードバック制御を困難にする。歪みの原因を先ずシミュレーションで解明し、その解決方法を見出す。

(2) ビーム試験では、LOI の安定性の確認、ビーム誘起電圧から導かれる出力インピーダンスの測定、及び加速試験を行う。

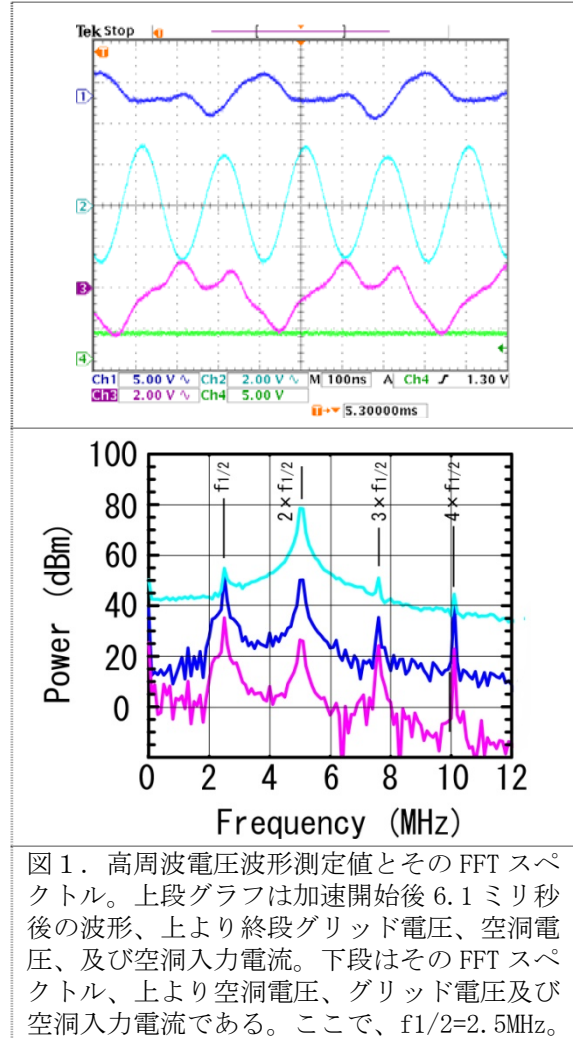


図 1. 高周波電圧波形測定値とその FFT スペクトル。上段グラフは加速開始後 6.1 ミリ秒後の波形、上より終段グリッド電圧、空洞電圧、及び空洞入力電流。下段はその FFT スペクトル、上より空洞電圧、グリッド電圧及び空洞入力電流である。ここで、 $f_{1/2} = 2.5 \text{ MHz}$ 。

4. 研究成果

(1) 波形歪みのシミュレーション解析

波形歪み解決の為 LOI 装置パラメータを色々測定し、歪み発生メカニズムを様々な角度から検討したが原因を特定できなかった。そこで、ISIS 制御室のマスターオシレータ出力に元々その様な成分が含まれると仮定し、回路シミュレーションを行った。結果が図 2 である。波形の歪み具合及び FFT スペクトル共に図 1 を概ね再現している。 $f_{1/2}$ 成分がマスターオシレータに含まれる割合は僅か 3%程度であるが、終段グリッド電圧の段階では基本周波数成分 ($2 \times f_{1/2}$) とほぼ同程度の大きさにまで増幅されることが特徴である。これは LOI 負荷が高 Q 値の共振型空洞であること、及び基本周波数に対して終段 3 極管グリッドのミラー効果が強く影響してグリッド入力インピーダンスを大幅に低下させる為に起こる現象である (図 3)。その結果、 $f_{1/2}$ 及び $3 \times f_{1/2}$ の各ハーモニック電流成分は小さな値でも、誘起される電圧は大きな値となる。これが終段グリッド電圧波形歪みの原因である。そして実際、マスターオシレータ出力の中に $f_{1/2}$ 成分が 3%存在

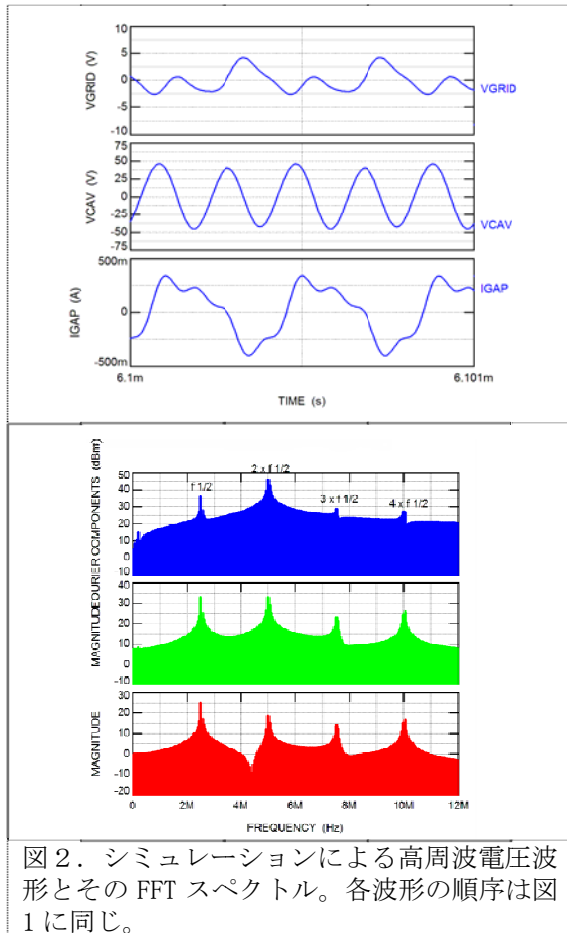


図2. シミュレーションによる高周波電圧波形とそのFFTスペクトル。各波形の順序は図1に同じ。

することが実測された。

故に波形歪み問題の解決は、各ハーモニック成分をマスターオシレータ出力から除去すれば良いことになる。現在、10ミリ秒の加速期間内に、その通過域が時間変化するバンドパスフィルタを用いて除去する方策を考えている(図4)。これによりLOIには基本周波数成分(2×f1/2)のみが供給される。

更に今後、出力電圧が高くなるに従い電力真空管の非線形応答による歪みの発生が考えられる。この効果を抑える為、各アノードチョークに含まれる高調波モード(HOM)を減衰させるダンパーを取り付けた(図5)。

(2) ビーム試験

まず、LOIがISISシンクロトロンの大電流の下で安定であることを確認した。

次に、ビームを用いたLOIの出力インピーダンスの測定を行った(図6)。負荷であるフェライト空洞の共振点を3.4MHzにセットする。これは加速途中f1/2及び3×f1/2のハーモニック電流が誘起電圧を発生し、ビーム加速に悪影響を与えない様にする処置である。

加速開始後2.16ミリ秒後、即ち3.4MHz位置における誘起電圧の大きさは次の式で与えられる。

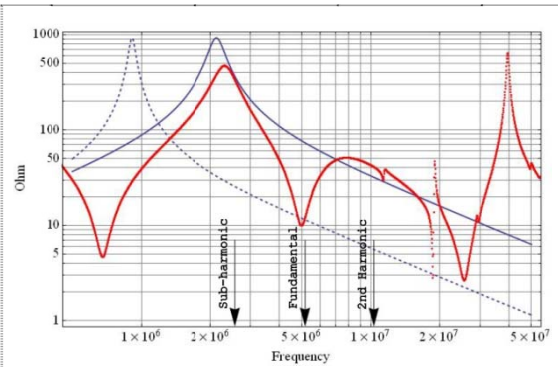


図3. 駆動段から見た終段3極管の入力インピーダンス。基本周波数(fundamental)に対する値は他のハーモニック成分に対する値より大幅に小さい。

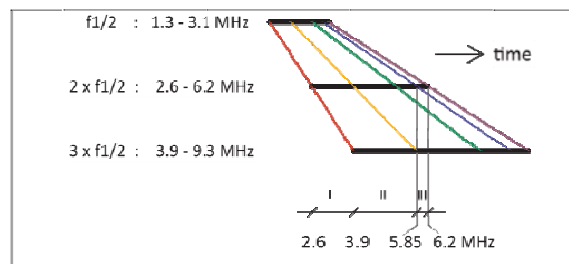


図4. 時間的に変化するバンドパスフィルタ。時間と共に通過域がI→II→IIIと変化する。10ミリ秒の間に、各ハーモニック周波数は上に記した周波数範囲を掃引する。

$$V_b \cong 2I_b \times R/2 \quad (2RF5 \text{ 空洞}) \quad (1)$$

及び、

$$V_b \cong 2I_b \times Z_{out} \quad (LOI) \quad (2)$$

ここで、 I_b は3.4MHzの周回ビーム電流成分、 Z_{out} は出力インピーダンスである。等価回路を図7に示す。ビーム電流は別途測定した(図8)。これから得られるビーム電流成分と(1)、(2)式より、 $Z_{out} = 35.0$ オーム、及び $R/2 = 1.37$ キロオームが導かれる。LOIを接続することで空洞インピーダンスは1/40に低下したことが分かる。この値は、当初目的とした「30オーム以下」には僅かに及ばない。しかし、これは陽極・グリッド間フィードバック回路のパラメータを微調整することで達成できると考えている。また、得られた出力インピーダンスは実験室に於いてネットワークアナライザを用いて測定された値と非常に良く一致した(図9)。

(3) ビーム加速試験

図10に示す様に、 2.1×10^{13} 個の大強度陽子ビームが安定に加速出来ることを確認した。このビーム強度は、加速開始時に2.3アンペア、取出し時に5.2アンペアの周回電流に対応する。

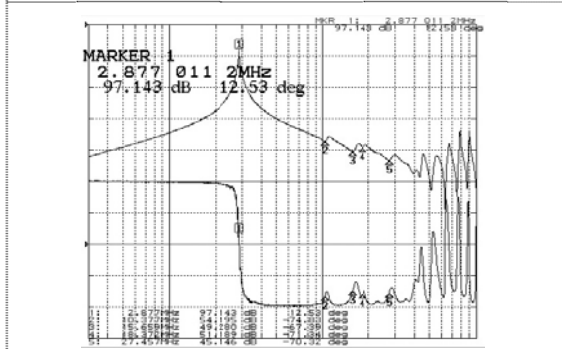
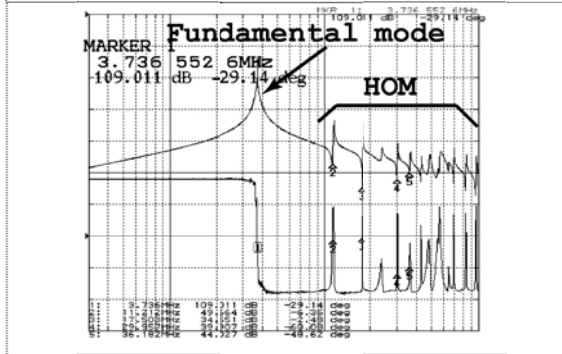
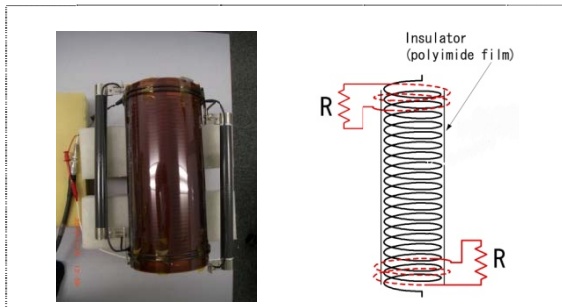


図5. アノードチョーク特性
 上段は高調波ダンパー (R) 付きのアノードチョーク、R=280 オーム。中段はダンパー無しのインピーダンス、最下段はダンパー付きのインピーダンス測定値 (上トレースは振幅、下は位相角)。HOM がダンパー抵抗により大幅に減衰している。

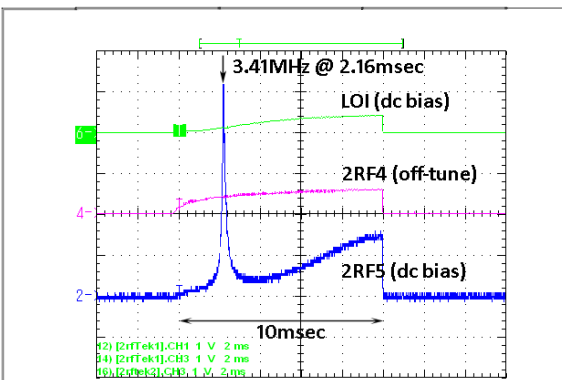


図6. ビーム誘起電圧の測定
 上段より、3.4MHz に共振点を持つようにセットされた LOI 空洞、共振から常に外れる様に保たれた空洞 (2RF4)、及び LOI 同様 3.4MHz に共振点を持つようにセットされた空洞 (2RF5) への各ビーム誘起電圧。

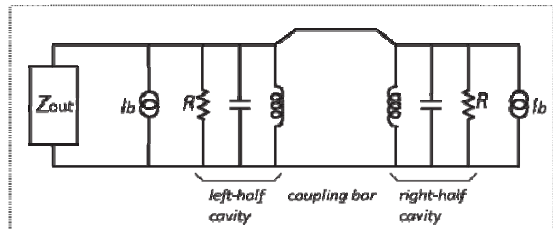


図7. 2ギャップ空洞におけるビーム・空洞相互作用の等価回路

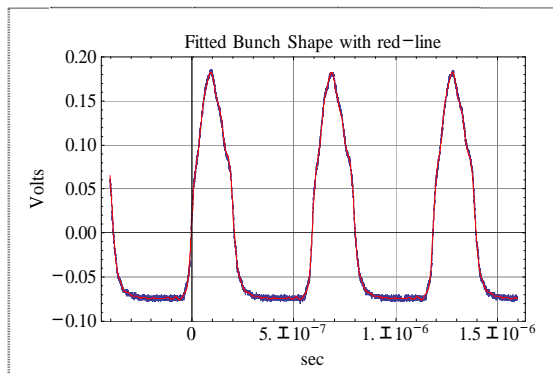


図8. ビーム誘起電圧測定時のビームバンチ波形

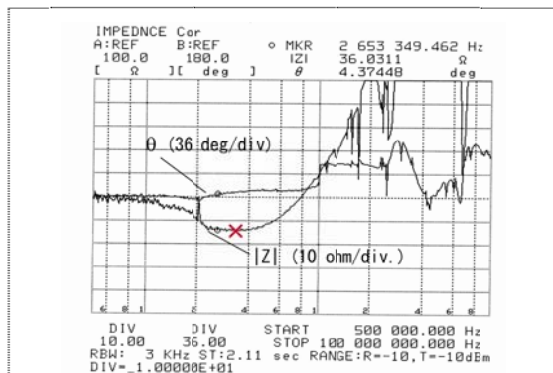


図9. 出力インピーダンスの比較
 実線はネットワークアナライザによる測定値、上より、インピーダンスの大きさ、及び位相角である。赤のクロスは、今回のビーム誘起電圧より得られた値。

(4) 今後の研究方針

終段グリッド電圧波形が歪む原因が解明されたので、改善作業を行う。これにより、空洞を共振状態に保つフィードバック制御が可能となり、加速期間全体を通してより高い高周波電圧(ピークで10キロボルト程度)が発生出来るようになる。そして、最終目標である「ビーム平坦化による空間電荷力の緩和に関する実験的研究」を完結したい。

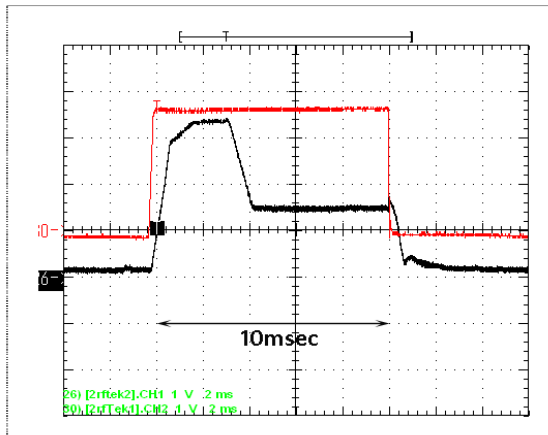


図 10. ビーム加速試験

黒線は LOI 電圧波形（ピーク電圧 4 キロボルト）、及び赤線はシンクロトロン内ビーム強度 (2.1×10^{13} 個の陽子数)。電圧波形が途中減少しているのは、空洞を共振状態に保つフィードバック制御が十分に機能せず、高電圧が発生出来ない為である。

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 2 件)

① Y. Irie, S. Fukumoto, K. Muto, H. Nakanishi et al, “Wideband Low-output Impedance RF System for the ISIS Second Harmonic Cavity”, Proc. International Particle Accelerator Conference IPAC2010, 査読無, 2010, pp.609-611. (<http://cern.ch/AccelConf/IPAC10/papers/mopec063.pdf>)

② Y. Irie, S. Fukumoto, K. Muto, et al, “Low-Output-Impedance RF System for the ISIS Second Harmonic Cavity”, Proc. European Particle Accelerator Conference EPAC 2008, 査読無, 2008, pp.343-345. (<http://epaper.kek.jp/e08/papers/mopc119.pdf>)

[その他]

ホームページ等

http://www-accps.kek.jp/Low-Impedance_Cavity/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

入江 吉郎 (IRIE YOSHIRO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・教授

研究者番号：00124173

(2) 研究分担者

大木 俊征 (OKI TOSHIYUKI)

筑波大学・研究員

研究者番号：60415049

高木 昭 (TAKAGI AKIRA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・講師

研究者番号：10100819

吉井 正人 (YOSHII MASAHITO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・准教授

研究者番号：00200931

武藤 建一 (MUTO KENICHI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・研究支援推進員

研究者番号：30044770

福本 貞義 (FUKUMOTO SADAYOSHI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・名誉教授

研究者番号：90029637

野村 昌弘 (NOMURA MASAHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・副主任研究員

研究者番号：10414608

(3) 連携研究者

山本 昌亘 (YAMAMOTO MASANOBU)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・研究員

研究者番号：30354749