

## 誘導加速シンクロトロン用 1MHz 誘導加速空洞の開発

鳥飼幸太、下崎義人、小関国夫、中村英滋、外山毅、荒木田是夫、佐藤皓、白形政司、  
五十嵐進、和氣正芳、木代純逸、高山健

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

### 概要

KEK12GeV PS を用いた誘導加速シンクロトロンの実証試験ステップ1では既存 RF で捕捉した 1 ブースターバンチを 4 連の誘導加速空洞(合計出力電圧: 10kV=2.5kV×4、パルス長 250nsec)だけを使って 8GeV まで加速する事が計画されている。本計画で用いる誘導加速空洞は陽子の周回周波数に等しい約 1MHz で電圧パルスを発生させねばならない。論文では誘導加速空洞の機械・電気設計の要点: 除熱、負荷インピーダンス、フラットトップ平坦度、カップリングインピーダンスの理論的な計算と製作後の測定結果およびその解析について述べる。

### 1 高繰り返し誘導加速シンクロトロン

既存 RF シンクロトロンにおける大強度化の試みでは、限られた加速領域にどれだけの粒子を詰め込めるかに主眼が置かれてきた。これに対し誘導加速装置に発生させるステップ電圧を加速電圧として用いるシンクロトロン[1]が建設できれば RF が持つ加速領域の限界を打破することができる。この特長を活かし、加速器周方向に長大なバンチ(スーパーバンチ)を加速することが計画されている[2]。しかしながら、誘導加速器がこれまでシンクロトロンに採用出来なかったのは誘導加速装置の運転繰り返し周波数の上限が~kHz オーダーに限られていたからである。この原因は主として、MHz オーダーの繰り返しで動作する高圧パルスモジュレータ[3]が実現していなかった事による。そのため負荷に当たる誘導加速空洞も高負荷運転での知見が得られていない。

誘導加速装置をシンクロトロンに適用する際に解決されなければならない問題として、まず加速空洞の繰り返しに伴う発熱が挙げられる。発熱量は運転周波数の約 2 乗と磁束振幅の約 2 乗に依存するため、長いフラットトップを発生させるシンクロトロン運転では高負荷になる。次にモジュレータと加速空洞は伝送線路で接続されるためインピーダンス値の整合が必要になる。さらに電力損失を抑えるため、できる限り高いインピーダンスで電力輸送を行う必要がある。加速空洞はビームにとっては主加速装置であるが、様々な周波数域では一般に摂動として働く。従って、カップリングインピーダンスに対する考慮が必要となる。誘導加速シンクロトロンの実証試験で使用される誘導加速空洞の設計の概略と、製作した空洞の特性の測定結果を報告する。

### 2 誘導加速空洞の設計

#### 2.1 熱負荷に対する設計

KEK12GeV-PS ではバンチの周回周波数  $f$  は 667kHz から 882kHz まで変化する。誘導加速空洞が発生する発熱  $W$  は磁性体コアの繰り返し励磁によるヒステリシス損とわず電流損に起因するもので、周波数依存性  $f$  と振幅依存性  $B$  を持ち

$$W \propto k_1(f, B) f B^2 + k_2(f, B) f^2 B^2$$

と表される[4]。ここで  $k_1$  と  $k_2$  はヒステリシス損および電流損の定数である。

誘導電圧の  $V \times t$  積から磁束の振幅が決定する。一般にコア発熱量の  $B$  依存性は 2 乗より大きいため、冷却の観点からは磁束振幅を低減するために、コア体積を増加させることが望まれる。12GeV-PS のビームラインに設置する装置に許されるスペースはビーム軸方向に 1m 程度と短いので、トロイダルコアの外径を大きくする事によって、インダクタンスを増やす。

誘導加速装置の負荷としては加速空洞の他にマッチング抵抗がある。マッチング抵抗に比べて加速空洞のインピーダンスの差が十分大きい場合、マッチング抵抗のみで数十 kW の熱負荷を全て受け持つことになり負荷設計の観点からは好ましくない。

加速空洞の磁性体には純鉄ベースの微細結晶合金(ファインメット)を使用する。この磁性体の冷却には誘電率の低いシリコン油 ( $\epsilon=2.2$ ) を使用する。水冷と違い腐食を防止出来る。流れ場が層流である場合の一般的な熱伝達率  $h$  はブラジウスの式

$$h = 0.664 \lambda^{1/2} \left( \frac{\rho v}{D} \right)^{1/2} c_p^{-1} \mu^{-1/4} \text{ [J/sec} \cdot \text{m}^2 \text{]}$$

で表される。ここで冷媒の熱伝導率  $\lambda$ 、密度  $\rho$ 、代表流速  $v$ 、代表長さ  $D$ 、比熱  $c_p$ 、粘度  $\mu$  を用いた。連続運転時におけるトロイダルコアの表面温度を 80℃ とし、ダミー負荷による温度測定と ANSYS による解析[5]の結果より代表長さ  $D=0.03$  [m] を求め、加速空洞を冷却するシリコン油の流量、流路設計に適用した。

#### 負荷インピーダンス

トロイダルコアが持つインダクタンスは一般に  $L = \mu / 2\pi \ln(D_o / D_i)$

で表される。ここで外径  $D_o$ 、内径  $D_i$  を用いた。誘導加速空洞は LCR 並列回路として表現される。伝送路の特性インピーダンスを  $Z_0$ 、マッチング抵抗を  $R_0$  とすると、ステップ電圧入力に対する誘導電圧  $V(t)$  は

$$V(t) = \frac{LV_0}{Z_c} \exp(-\xi\alpha t) \sinh(\sqrt{\xi^2 - 1}\alpha t)$$

と表される。ここで非共振固有角振動数  $\omega = 1/\sqrt{LC}$ 、減衰係数  $\xi = \sqrt{L/C}/2Z_0$  を用いた。この誘導電圧は時間的に減少する関数となるが、基準加速電圧に対して数%の電圧降下が生じると、スーパーバンチを分裂させる影響があることが多粒子シミュレーションによって明らかになっている[6]。この電圧降下の時定数はインダクタンスに比例するため、加速空洞が持つインダクタンスは大きい事が望まれる。

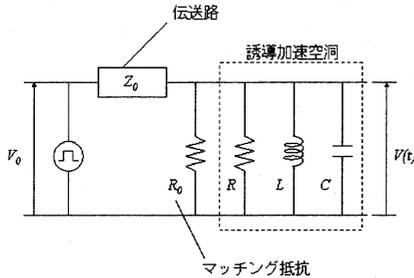


図1 誘導加速装置等価回路

加速空洞がリング内に配置されるのに対し、放射線耐性の弱い半導体素子を用いたモジュレータはリング外に設置される。数十 ns で立ち上がる高圧パルスを経距離伝送するため伝送線が使用される。パルスは連続で印加されるため反射電圧が生じないように負荷整合を行う必要がある。本実証実験では特性インピーダンス  $Z_c=125\Omega$  の伝送線が用いられる。整合条件は

$$Z_c = 1 / \sqrt{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2 + (\omega C)^2}$$

であり、マッチング抵抗値  $R_0$  は常識を満足する様に選ばれる。

ステップ電圧は繰り返し周波数の奇数倍の高調波を持つため、モジュレータから見た加速空洞のインピーダンスはバンチの周回周波数での値を代表値として用いる。ネットワークアナライザによって測定を行った結果を図2に示す。この結果より、 $R=300\Omega$ 、 $L=116\mu\text{H}$ 、 $C=50\text{pF}$  が求められた。

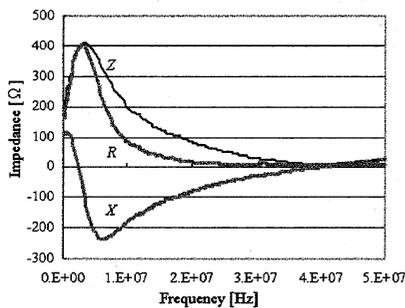


図2 モジュレータからみたインピーダンス

クロスチェックとして SPICE によるシミュレーションと 500V-300ns パルス印加に対する応答の測定を行った。シミュレーションに用いた等価回路 (図1)、および測定結果を図3に示す。両結果共に立ち上がり 40ns、ドループ 10%、立ち下がり 40ns で共によい一致となった。

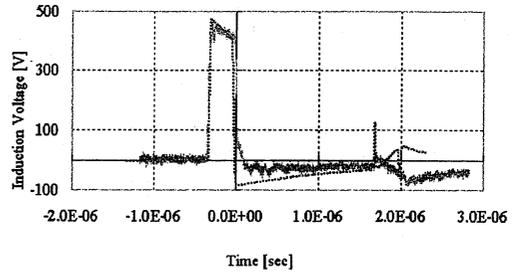


図3 パルス応答に対する測定とシミュレーション

### 3 カップリングインピーダンス

加速器リング内に設置する装置はビーム不安定性を誘起する電磁場のモードの振幅が大きくなるような設計が求められる。誘導加速空洞は形状が複雑であるが非共振型の運転を行うため共振の Q 値は小さいと考えられる。カップリングインピーダンスの測定は Caspers らのワイヤ法[7]を用いた。図に測定のセットアップを示す。測定は被測定物の両端に直管を取り付けビーム軸中心にワイヤを通して行われる。この状態で被測定物は 2 ポートの伝送系として扱うことができる。まず加速空洞と同じ長さのダミー管を測定し透過係数  $S_{21}(\text{pipe})$  を求める。次に加速空洞によって同様の測定を行い  $S_{21}(\text{cavity})$  を求める。この結果よりカップリングインピーダンス  $Z_{\text{coupling}}$  への変換は集中回路近似において

$$Z_{\text{coupling}} = 2Z_c \frac{S_{\text{pipe}} - S_{\text{cavity}}}{S_{\text{cavity}}}$$

で与えられる[8]。

下図に測定結果を示す。測定周波数帯は 300kHz から 1GHz までとした。3MHz から 260MHz にかけて共振が現れているが、Q 値は 40 程度を上限とする低い値に留まっている。

表1: longitudinal impedance 測定結果

高圧側開放		
$f_0$ [MHz]	$Z[\Omega]$	$Q$
2.80	447	1.12
140	26.4	22.9
148	36.1	24.3
249	28.9	22.9
高圧側短絡		
$f_0$ [MHz]	$Z[\Omega]$	$Q$
28.0	543	9.14
192	49.4	39.2
257	23	23.5

### 4 4 連加速空洞の製作

。図5にコアの概観を示す。加速空洞には 667kHz で 300  $\Omega$  のインピーダンスとするためコアは外径 500mm、内径 225mm、厚み 15mm とし 6 枚を装荷した。浮遊容量の低減のため加速ギャップは長さ 50mm のセラミックを採用した。

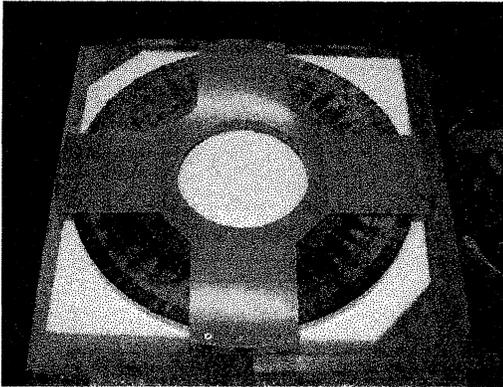


図5 誘導加速空洞用磁性体コア

完成した誘導加速空洞のパラメータおよび運転仕様を表に示す。

表2: 4連誘導加速空洞仕様

誘導電圧	2.5kV×4
繰り返し周波数	667kHz-882kHz CW
コア1枚の抵抗R	46Ω
コア1枚のインダクタンスL	20uH
コア枚数	6
空洞インピーダンス	267Ω/667kHz
マッチング抵抗	215Ω
伝送線インピーダンス	125Ω
コアロス(50%Duty)	11.4kW
マッチング抵抗消費電力(50%Duty)	14.5kW
全電力(50%Duty)	25.9kW

運転に伴う発熱は 20kW、コア表面での温度上昇を  $\Delta T=35^{\circ}\text{C}$  と設計すると(2)式より油流量は 78L/min と求められた。保守・点検時の便を考え空洞は 2.5kV ユニットの4台連結した構造とした。これにより 10kV/m の加速勾配が実現出来る。設計した4連加速空洞を図6に、完成した誘導加速空洞を図7に示す。外径は最大 660mm、パイプ径は 150mm、1ユニットあたりの厚み 230mm である。

## 参考文献

- [1] Ken Takayama and Junichi Kishiro, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 45, 304 (2000)
- [2] Ken Takayama et al., Phys. Rev. Lett., 88, 14 (2002)
- [3] 小関国夫, 本プロシーディング
- [4] "電気工学ハンドブック", 電気学会
- [5] 鳥飼幸太, KEK-PS ASN-447
- [6] Yoshito Shimozaki et al., Physical Review Special Topics - Accelerators and beams, to be published.
- [7] "Handbook of Accelerator Physics and Engineering", edited by Alexander W. Chao and Maury Tigner, World Scientific Pub., p570-572 (1999)
- [8] H. Hahn, Physical Review Special Topics - Accelerators and beams, vol. 3, 122001 (2000)

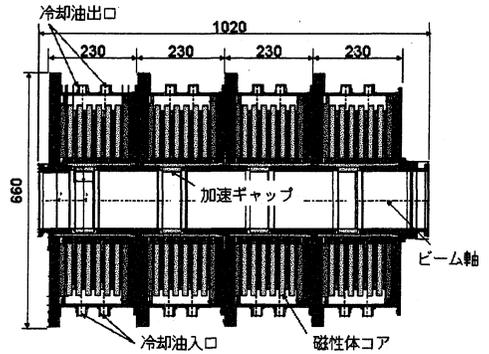


図6 4連加速空洞概観図



図7 誘導加速空洞(1ユニット)

## 5 今後の予定

今年度秋からの予定として、4連加速空洞を高繰り返しモジュレータに接続しての連続運転を行い、冷却能力、誘導電圧波形を設計値と比較する。その後年末のPSシャットダウンに合わせて加速空洞をリング内に設置し誘導加速シンクロトロンの実証試験を開始する。

## 謝辞

一連の研究は、平成14年度から科学研究費「特定領域研究: 140646221」と平成15年度からは学術創成研究費(15GS0217)によって支援されている。