

CONSTRUCTION AND OPERATION OF S-BAND APS-TYPE CAVITY FOR LOW EMITTANCE BUNCHER IN SCSS

Takahiro Inagaki^{1,A)}, Tsumoru Shintake^{A)}, Katsutoshi Shirasawa^{A)}, Hisaharu Sakae^{C)}, Kenichi Matsuo^{C)},
and SCSS group^{A,B)}

^{A)} RIKEN / SPring-8 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Hyogo, 679-5148

^{B)} JASRI / SPring-8 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Hyogo, 679-5198

^{C)} IHI 1, Shin-nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama, 235-8501

Abstract

S-band (2856 MHz) APS-type accelerating structure is used to compress the electron bunch length by the velocity bunching scheme in SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) prototype accelerator. The accelerating structure was constructed and tested with low power rf at IHI. After installation to the SCSS prototype accelerator, the APS cavity shows expected performance with high power rf up to 14 MeV energy gain. In FEL lasing experiment APS cavity has been stably operated as a buncher preserving low emittance.

SCSS試験加速器での SバンドAPS型加速管の製作と運転

1. APS型加速管の働き

SCSS試験加速器^[1]では、SASEレーザー発振に必要な電子ビーム強度を得るために1000倍ほどのパンチ圧縮を行う。SバンドAPS型加速管は上流より3番目の加速空洞で、約1 MeVの電子ビームを約15 MeVまで加速しながら、RFのパンチング位相に乗せて速度差によるパンチ圧縮を行う。このパンチ圧縮により、1.5倍ほどピーク強度を稼ぐことができる^[2]。入射電子ビームのエネルギーが高くないので、もし進行波型加速管を用いると、カップラー部の非対称性によりエミッタンスを悪化させる恐れがある。従って、本加速器では上流側が軸対称であるAPS定在波型加速管を採用した。

図1に加速管の写真と構造図を示す。陪周期構造(Alternating Periodic Structure)により、加速セルとカップリングセルがビーム軸に沿って交互に並んでいる。2つの空洞での位相差は $\pi/2$ で、中央のカップラーセルを含めて11個の加速セルが52.48 mm間隔で並び励振される。

RF源はSバンド50 MWクライストロン(東芝E3730A)を用いる。ハイブリッドカップラーによりパワーを1:4の割合で分割し、APS型加速管と下流の進行波型2m加速管に同時供給している。2つの加速管でのRFの位相を独立に制御できるように、APS型加速管の手前に導波管型位相器を入れ、低電力RFの位相変調(1/Q変調)と組み合わせて制御している。

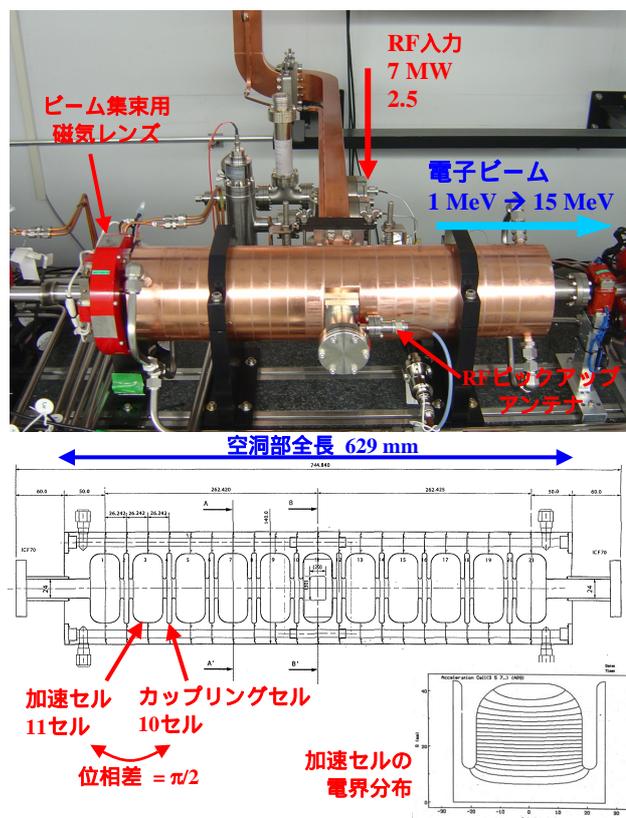


図 1: APS型加速管の写真(上図)と内部構造(下図)。加速セルでの電界分布(EMSYSシミュレーションにて)を右下に示す。

¹ E-mail: inagaki@spring8.or.jp

2. 加速管の製作

加速管は、IHI（石川島播磨重工業株式会社）にて、下記の手順にて製作した。

(1) セルの粗加工

無酸素銅の母材よりセルを切り出し、通常旋盤にて粗加工をした。

(2) 仕上げ加工

超精密旋盤により、セル内面および端面の鏡面加工をした。仮組み時のRF測定の精度を上げるため、セル同士が内側当たりになるよう、端面のロウ溝から外側を5 μm ほど逃がしてさらった。

(3) セル単体でのRF測定

2枚一組のセルを、中央にアンテナを設けた端板で挟みボルトで締め付ける。ネットワークアナライザにてS21での共振周波数と Q_0 を測定した。測定は窒素フロー中にて行い真空に換算した。また、セルの温度をなるべく一定にし、温度換算をした。周波数が2856 MHzから大幅にずれていた場合は、修正加工を行った。

(4) 全体仮組み、RF測定

ベンチ上で全セルを仮組みし、ボルトで締め付けた。カプラーからS11での共振周波数と Q_0 を測定した。測定は窒素フロー中にて行い、真空、30 の時の周波数に換算した。そして周波数が2856 MHzに正確に合うように、一部のセルを修正加工し、最終的に2856.021 MHzとした。また、ビーズ法により電界分布を確認した。

(5) 真空ロウ付

セルを整列させボルトを通し、上下に吊るした状態で真空炉に入れてロウ付けを行った。ロウ材は銀ロウを用いた。ロウ付後は、埃が入らないように直ちに密閉してクリーンルームへ運んだ。ヘリウムリーク試験を行い漏れの無いことを確かめた。

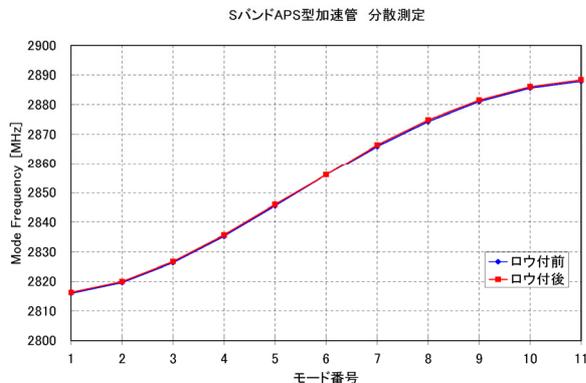


図 2: 測定した周波数分散特性。 $\pi/2$ モード周波数（モード番号6）は、ロウ付け前後で2856.021 MHz \rightarrow 2856.011 MHzと、ほとんど変化しなかった。

(7) 最終RF測定

カプラーからS11での共振周波数と Q_0 を測定した。測定は加速管内を真空引きして行い、物温を測定して30 に温度換算をした。図2に示すように、ロウ付前後での周波数変化はほとんど無く、 $\pi/2$ モードの周波数を2856.011 MHzと、冷却水温による周波数調整範囲内（ ± 100 kHz）におさめることができた。また、ビーズ法により電界分布を測定し確認した。最終的な加速管のパラメータを表 1 に示す。

表 1: 今回製作した加速管のパラメータ

$\pi/2$ モード周波数	2856 MHz (30.2 , 真空)
Q_0	17,700
β	1.55

3. 運転状況

3.1 大電力RFでの運転

加速管を据付後、約3週間（24時間運転 \times 13日）のRFエージング運転を行った。そして、APS型加速管への投入RFパワー7 MW、2.5 μsec 幅、5 ppsにて、安定して運転をすることができた。

典型的なパルス波形を図3に示す。Ch.3にピックアップアンテナからのRF波形を示す。電界のビルドアップの曲線は実測した Q 値と から計算したも

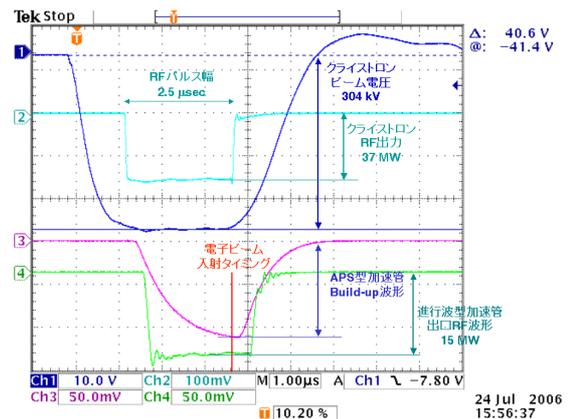


図 3: 運転時のパルス波形。Ch1:クライストロンビーム電圧、PTタンク内の容量性分圧器（CVD）からの信号。Ch2:クライストロンからのRF出力の波形。Ch3:APS型加速管ピックアップアンテナからのRFのビルドアップ波形。Ch3:進行波型加速管の出口でのRF波形。RF波形については、検波器(Agilent 423B)で検波したものの。

のと多少合わない部分もあるが、これはクライストロンのFlat topが平らでないため加速管に入力するRFの位相が一定でないためと考えられる。今後、パルス内でRFの位相を調節して平らにし、試験する予定である。

現状でもパルスの後半ではAPS型加速管の電界が十分にビルドアップするので、RFパルスの立ち上がりから2.3 μ sec後に電子ビームを入射している。

3.2 加速エネルギーの測定

Sバンド部 (APS型加速管 + 進行波型2 m加速管) で加速された電子ビームは、下流のバンチ圧縮部にてシケイン軌道を通る。この時の偏向電磁石の磁場強度から、ビームのエネルギーを求めらる。

まず、進行波型加速管の加速エネルギーを求めた。進行波型加速管の位相を 60° から $+60^\circ$ まで振り、ビームエネルギーの変化をcosine関数でフィットして、35 MeVと決定した。

次に進行波型加速管の位相をクレストにし、APS型加速管の位相を -60° から $+60^\circ$ まで変えた時のビームのエネルギーを測定した。このエネルギーから進行波型加速管での加速エネルギー35 MeVとAPS型加速管への入射エネルギー0.95 MeVを引いたものが、APS型加速管での加速エネルギーとなる。

図4に、測定結果を示す。クレスト時の加速エネルギーは約14 MeVで、これはAPSへの入力RFパワーと実測Q値、から計算される加速電界とほぼ一致する。APS型加速管では電子が光速に達していないため、入口と出口でRFの位相が 10° ほどずれてゆく。そのため、図4に見られるようにクレストの+側と-側でエネルギー変化に差が見られる。この効果は、加速エネルギーを14 MeVとした時のシミュレーション^[2]でもほぼ再現される。

通常運転時はバンチ圧縮をするために、RFの位相をクレストから -18° に設定し、13.8 MeVの加速エネルギーにて運転を行っている。

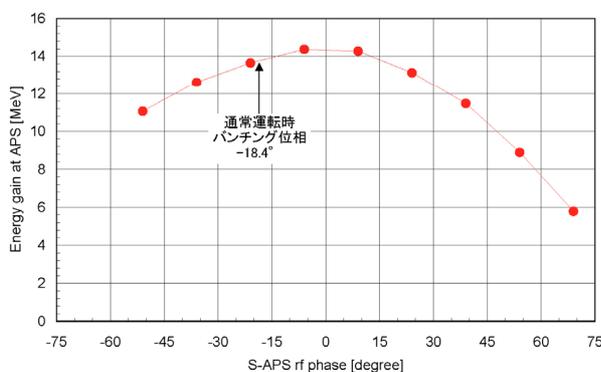


図 4: APS型加速管での加速エネルギーの測定結果。横軸の位相は、クレストを 0° としている。

3.3 ビームエネルギーの安定性

バンチ圧縮部下流にある 45° 偏向電磁石にて曲げられたビームをプロファイルモニタ^[3]で測定する。位置のふらつき幅からショット毎のエネルギー再現性 (ジッタ) を求めた。定常運転時の100ショットの画像を解析し、エネルギージッタが0.2%(p-p)程度であることを確認した。この安定度には、ここまでの加速器での様々な要因によるものが含まれる。Sバンドクライストロン電圧のジッタ0.08%(p-p)に由来するRFパワーと位相のジッタにより、同程度のエネルギージッタが見込まれるので、今後クライストロンの電圧をより安定化することにより、更なる安定化が期待される。ただし、現在の安定度でも、レーザー増幅の確認をするには十分であった。

本加速器は朝9時にクライストロンのヒーターをONして予熱し、9時半頃より運転を開始している。立ち上げから2~3時間は、RF出力の位相が徐々にドリフトする (おおよそ 5° ほど) ため、適宜位相を設定し直している。今後、RFのフィードバックを導入することにより、解消する必要がある。

4. 結論

SバンドAPS型加速管は、所定の性能を発揮し、加速エネルギー14 MeVにて、安定に運転を続けている。加速管を経た電子ビームのエミッタンスが、計算通りの小さな値が得られていること^[1]や、最下流アンジュレータでレーザー増幅を確認できた^[1]ことより、APS型加速管においても、エミッタンスを壊すことなく、期待通りの加速とバンチ圧縮を行っていることがわかる。

謝辞

加速管の製作は、筆者達の他にIHI高エネルギーシステム部の三尾圭吾氏、東修氏、濱中亮氏をはじめ、IHI横浜事業所の方々の尽力によって行われました。JASRIの恵郷博文氏には、本加速管のカブラーのRF設計をしていただきました。加速管の据付作業、エージング、加速器運転の際には、SCSSグループの多くの方々の手伝っていただきました。上記皆様方にたいへん感謝いたします。

参考文献

- [1] SCSS建設グループ同. “SCSS試験加速器の現状、ならびにX線自由電子レーザー計画について”, 本研究会口頭発表; 田中 均, 他. “SCSS試験加速器のビーム性能”, 本研究会口頭発表.
URL: <http://www-xfel.spring8.or.jp>
- [2] 原 徹, 他. “PARMELAによるSCSS試験加速器のビーム設計と実測パラメータの比較”, 本研究会ポスター発表
- [3] 井上 忍, 他. “SCSS試験加速器におけるビームプロファイルモニタ”, 本研究会ポスター発表