

The Stretcher-Booster Ring and The Future Plans

M. Oyamada, B. Feng, F. Hinode, T. Inoue, O. Konno, A. Kurihara, M. Mutoh, T. Nakazato, M. Nanao, Y. Shibasaki, M. Sugawara, S. Takahashi, T. Tamae, T. Terasawa, S. Urasawa, and T. Yamakawa

Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University

1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai 982

S. Sato, and S. Suzuki

Physics Department, Faculty of Science, Tohoku University

Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-77

M. Watanabe

Research Institute for Scientific Measurement, Tohoku University

2-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-77

M. Kato

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba 305

Abstract

The Tohoku University Stretcher-Booster Ring(STB) was approved in 1995 and will be completed this year. This ring plays three roles: the pulse beam stretcher, the booster and the storage ring for the internal target experiments. It has four 3.1 m long straight sections and its circumference is 50 m. The maximum energy is 300 MeV as the stretcher and 1.2 GeV as the booster.

This paper describes the 1.5 GeV Storage Ring project and also the 500 MeV New Linac plan.

ストレッチャー・ブースタリングの建設と将来計画

1. はじめに

東北大学原子核理学研究施設の 300 MeV 電子リニアックは 1967 年 5 月 24 日に最初のビーム加速に成功してから今日まで 30 年間、原子核物理を始めとして色々な分野で利用され多大な成果を上げてきた。この間、加速器についてなされた大きな改良を挙げると、1976 年にはエネルギー圧縮装置を建設し、電子ビームのエネルギー幅を 1/10 に改善し、電子散乱実験に大いに貢献した。¹⁾ その後、原子核の実験が精密化され、同時計数実験が必須となり、ビームのデューティーサイクルを上げるために 1982 年に世界で初めてのストレッチャーリングを完成し、その有用性を実証した。²⁾ このコンセプトに基づいた核理研の将来計画は新しい 1.5 GeV のリニアックとストレッチャーの組み合わせであったが、概算要求はその予算規模のため受け入れられなかった。³⁾ その後幾多の変遷を経て現在の

リニアックを入射器とする 1.2 GeV ストレッチャーブースタ(STB)および 1.5 GeV 放射光リング計画に収斂した。⁴⁾ 幸いにもこの計画の一部である STB の予算が認められ、1995 年に建設を開始し、今年完成にこぎ着けた。今回は STB の建設と次に控える放射光リング計画およびリニアックのエネルギー増強計画について報告する。

2. STB の概要

建設予算を極力節減するため既設のリニアックおよび建屋を最大限に活用し、STB は東西 16 m 南北 34 m の第 2 実験室内に設置した。そのためリングの周長は 50 m とし、4ヶ所に入射、取り出し、RF 加速および内部標的実験のための直線部をとるため偏向電磁石の軌道半径は 3 m と短く、リングの最高エネルギーは 1.2 GeV に制限せざるを得なかった。Fig. 1 に STB の構成を示す。ラティスは 4 回

対称の DBA である。リングを構成する偏向電磁石、四極電磁石はブースタ運転のため 0.5 mm 厚の珪素鋼板を使用した。入射ライン、取り出しラインおよびビーム輸送系の偏向電磁石は、先に述べた先代のストレッチャー(SSTR)の偏向電磁石の磁極を改造して活用した。

STB への入射は 3 台のキッカー電磁石と直流およびパルスセプトム電磁石を用いた 3 回転入射方式を採用している。ストレッチャーモードでの遅い取り出しは静電セプトムと取り出し用セプトム電磁石を用い、3 分整数共鳴を利用したモノクロマティック取り出しによる。繰り返し数は毎秒 300 回である。放射光リングへの入射時はキッカー電磁石を用いた早い取り出しを行なう。Table 1 と Table 2 にリングのパラメータを示す。

Table 1. Parameters of the STB.

Machine Parameters

Circumference	49.7512 m.
Lattice	DBA
Super Period	4
Betatron Tune	$\nu_x = 3.300$ $\nu_y = 1.200$
Momentum Compaction Factor	$\alpha = 0.037767$
Chromaticity	$\xi_x = -5.7861$ $\xi_y = -4.9791$
RF Frequency	500.1/2856.24 MHz

Beam Parameters

Stretcher mode

Energy	300 MeV
Energy loss per Rev.	$U_0 = 2.39 \times 10^{-4}$ MeV
Energy Width	$\Delta E/E = 1.209 \times 10^{-4}$
Damping Time	$\tau_x = 7.921 \times 10^{-1}$ sec $\tau_y = 7.921 \times 10^{-1}$ sec $\tau_s = 7.921 \times 10^{-1}$ sec
Emittance	$\epsilon_x = 8.585 \times 10^{-9}$ m · rad

Booster mode

Energy	1.2 GeV
Energy loss per Rev.	$U_0 = 6.11 \times 10^{-2}$ MeV
Energy Width	$\Delta E/E = 5.8 \times 10^{-4}$
Damping Time	$\tau_x = 7.23 \times 10^{-4}$ sec $\tau_y = 6.51 \times 10^{-4}$ sec $\tau_s = 3.10 \times 10^{-4}$ sec
Emittance	$\epsilon_x = 1.717 \times 10^{-7}$ m · rad

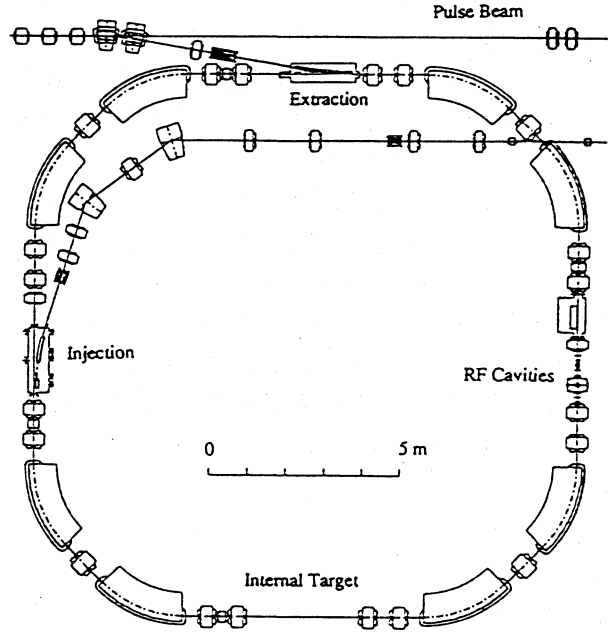


Figure 1. The layout of the STB.

Table 2. A quarter lattice of the STB.

Configuration

$O_1 - QF - O_2 - QD - O_2 - BM - O_2 - QC$
 $- O_2 - BM - O_2 - QD - O_2 - QF - O_1$

Drift space

O_1	1.5625 m
O_2	0.50 m

Bending Magnet BM

Bending Angle	45°
Bending Radius	3 m
Length	2.355 m
Edge Angle	0°

Quadrupole Magnet QM

Length	QF = QD = 0.3 m QC = 0.4 m
Bore Radius	$R = 0.05$ m
Focus(horizontal)	QF $k = 2.0617$ m ⁻² QC $k = 2.737$ m ⁻²
Defocus(horizontal)	QD $k = -2.2287$ m ⁻²

Modulated Quadrupole Magnet PQM

Length	0.1 m
Bore Radius	0.05 m
	$k = 0.2$ m ⁻²

Modulated Sextupole Magnet PSX

Length	0.1 m
Bore Radius	0.06 m
	$k = 10$ m ⁻³

3. 真空系

真空ダクトの材質は基本的にはリングには SUS 304、入射、取り出し系およびビーム輸送系にはアルミ合金を用いた。リング偏向ダクトの外周部は放射光による局部加熱を避けるために銅クラッド板を用いた。シンクロトロン加速時の磁場の変化による渦電流の影響は計算上小さいことを確かめた。リング内の真空度の分布は、セプタム電磁石・電極の入っている大型真空槽が 10^{-7} Torr 位の良いところ、その他のダクトは 10^{-9} Torr 台半ばである。真空系の詳しいことは本研究会での今野の報告 (pp-32) を参照いただきたい。

4. ビームモニター

ビームを遮らないボタンモニターをリングに沿って9台配置した。さらにリング内のビームのサイズ、形状、位置を観測するためのワイヤースキャナーを5台要所に配置し、場合によってはヘッド部をスクリーンと交換することも可能である。入射系およびビーム輸送系にはそれぞれ5台のエアシリンダー駆動のスクリーンモニターがある。スクリーンのスポットは CCD カメラで撮影し、画像処理装置へ送られる。モニター系については柴崎の報告 (pp-38) がある。

5. リング電磁石電源

ブースターモード加速においては磁場を急激に上げ下げするが、電磁石のインダクタンスに抗して電流を上げ下げするので大きな電力を消費する。さらに外部にフリッカーを撒き散らさないように大がかりなフィルターを用意しなければならない。今回の STB の場合には受電トランスの容量も厳しいことからエネルギー回収方式を採用した。⁵⁾ すなわち磁石に蓄えられたエネルギーを一時的にコンデンサーに回収して次回の電流増大時に備える方式である。電流制御のスイッチング素子には IGBT を採用した。この方式の大容量の電源は他に類を見ない。

電源盤への給電は、偏向電磁石電源は 6.6 kV で、四極電磁石電源へは 420 V で行なっている。性能試験は現在電磁石に冷却水が供給出来ないので、疑似負荷で行なっており、エネルギー回収運転試験は電磁石に接続後に行なう。

6. リング電磁石のアライメント

アライメントは特に円形加速器の場合には非常

に重要である。電磁石のアライメントはライカ社製セオドライト T2002 2台を用いた三次元測量法で行なった。各偏向電磁石には3ヵ所にアライメント用標的を取り付ける基準面と基準穴を準備した。四極電磁石には各々2ヵ所である。基準の位置精度は $50 \mu\text{m}$ 以内におさめた。測量標的を納めた球状ホルダーを乗せる円錐状カップを20台製作し電磁石の基準穴に取り付けた。カップの製作精度は $10 \mu\text{m}$ 以内であった。予備的アライメント作業時に不具合の見つかった電磁石は工場に持ち帰り手直しを行なった。本番のアライメントはわずか1ヵ月半で行なった。3回繰り返した最終結果を Fig. 2 に示す。鉛直方向の誤差の平均値が目標とした値に比べて $50 \mu\text{m}$ 低い方へずれているのでその位置を新たに軌道面と見なすことにした。その結果、図から分かるように軌道(s)方向を除き最初に定めた許容設置誤差 $100 \mu\text{m}$ 以内に数点を除いておさめることが出来た。⁶⁾

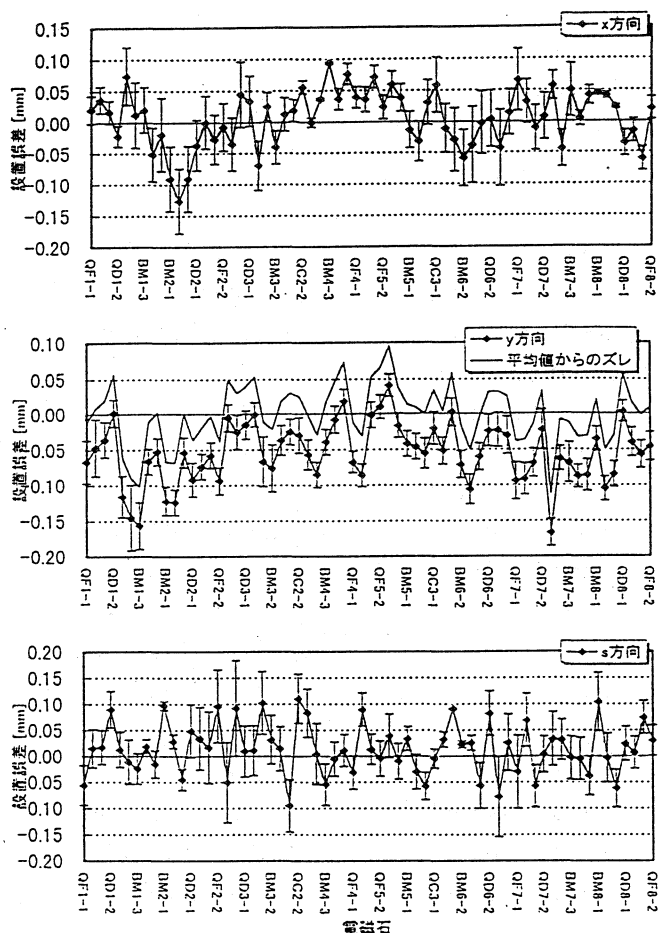


Figure 2. Alignment errors of the STB Magnets.

7. RF加速系

250 MeV 以上のストレッチャーモードとブースターモードではRF加速が必要である。ブースターモードでは将来の放射光リングへの入射器となるため周波数に共通性を持たせ 500 MHz 付近を選ぶこととした。一方、ストレッチャーモードではリニアックと同じ周波数かまたはその整数分の1を選ばなければならない。さらにどちらの周波数でも軌道長を同じにするにはストレッチャーモードではリニアックと同じ 2856.24 MHz とし、ハーモニック数を 474 とし、ブースターモードでは 500.143 MHz でハーモニック数を 83 とした。周長は共通の 49.7512 m である。RF系のパラメータを Table 3 にまとめて示した。2856 MHz での加速の予備実験は SSTR で 5 年前に行なって見通しを得た。^{7),8)} 今回は 500 MHz の空洞だけを組み込んだ。この空洞は長い間 KEK の放射光施設で活躍していたものを譲り受けたものである。

500 MHz のクライストロンとして東芝の E3774 を採用し、100 kW で運転するようにした。CW クライストロンの高圧電源には一般に保護装置としてクローバ回路が組み込まれるが、STB では高圧電源をインバータ方式とし、平滑回路のコンデンサーの容量を非常に小さく出来たので、クローバ回路を省略することが出来た。

Table 3. Parameters of the RF system.

Maximum Energy	1.2 GeV	300 MeV
Maximum Current	300 mA	300 mA
RF Frequency	500.143 MHz	2856.24 MHz
Harmonic Number	83	474
Shunt Impedance	5 MΩ	0.25 MΩ
Over-voltage Factor	6.0	12
Acceleration Voltage	367 kV	2.87 kV
Quantum Lifetime	38 hours	
Synchrotron Phase	80.4°	85.2°
Synchrotron Frequency	59.5 kHz	197 kHz
Klystron Output	100 kW	500 W
Wall Loss	27 kW	32.9 W
Number of Cavity	1	1

4. 制御系

加速器の制御系として WS+C AMAC という組み合わせが多く見られる。核理研のリニアックの例

も例外ではない。最近のパソコン (PC) の進歩には驚かされ、かつての WS を凌ぐものも出現している。さらにプログラムの開発環境も PC の方がむしろ使いやすいともいえる。

システムの構築費用、柔軟性、拡張性などを総合的に検討した結果、PC をネットワークで結合した構成を選択した。各機器との接点は PLC を多用し、PLC 群自体が PLC 用ネットワークで結合されている。PC ネットワークは 100 Mbps の Fast Ethernet で、PLC ネットワークとのゲートウェイも PC が司る。全学のネットワーク (TAINS) とは WWW サーバ経由で接続されている。制御系に関する報告は武藤、七尾 (pa-41, pa-40) によってなされる。

8. 放射光リング計画

東北大学は電子加速器の建設に多くの実績を持っている。核物理の研究のため早くも 1954 年に 40 MeV のシンクロトロンを完成し日本で初めて放射光を観測した。放射光の角分布とエネルギー分布を測定し Schwinger の理論と一致することをみいだした。⁹⁾ その上でこの光が物性の研究に強力な手段になることを指摘した。このような経緯から学内で現在のリニアックの完成間近かの 1966 年に放射光リングを要望する動きがあった。¹⁰⁾ 1987 年には原子核の研究と放射光利用を 1 つのリングで行なう「放射光・ストレッチャー共用リング」が提案された。1990 年にビーム寿命やマシンタイムの効率等を検討した結果、ストレッチャー・ブースターリングと放射光リングを分離した案に変更した。1991 年から「東北大学電子線科学研究センター計画」として東北大学の重点項目として概算要求されている。1995 年にストレッチャー・ブースターリングだけが予算化され、残った放射光リングは現在精力的に推進中である。

放射光リングの設計は次の条件の下で行なった。

- ・実験室の広さを 100 m × 90 m 内に収めること。
- ・遠赤外線から X 線領域までカバーすること。
- ・第 3 世代放射光光源に匹敵する低エミッタンス。
- ・挿入型光源のための直線部を多数確保すること。
- ・新世代光源のための長い直線部を有すること。

最終的には周長 189 m で、12 個の DBA セルでリングを構成することで、エミッタンスは 7.3 nm

・rad が達成できる。直線部は 5 m が 10 本で 15 m が 2 本とれ、必然的にレーストラック型となった。Table 4 に放射光リングのパラメータを示す。¹¹⁾

Table 4. Parameters of the Storage Ring.

Machine Parameters

Circumference	188.5 m.
Lattice	DBA
Super Period	12
Betatron Tune	$\nu_x = 12.20$ $\nu_y = 3.15$
Momentum Compaction Factor	$\alpha = 0.00145$
Chromaticity	$\xi_x = -46.8$ $\xi_y = -14.2$
RF Frequency	500.1 Mhz
Harmonic Number	312

Beam Parameters

Energy	1.2 - 1.8 GeV
Energy Width	$\Delta E/E = 6.6 \times 10^{-4}$
Emittance	$\epsilon_x = 7.3 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{rad}$ at 1.5 GeV

9. リニアックエネルギー増強計画

ストレッチャーリングから取り出されるビームのエネルギーはリニアックから入射したエネルギーを越えることは出来ない。今回完成したSTBの取り出し連続電子線の最高エネルギーは現在のリニアックの実力である250 MeVに制限されている。このエネルギーを倍増して魅力あるものにするため、新しい500 MeV リニアックに更新する案を提案したい。設計条件は次の通りである。

- ・得られる最高エネルギーは500 MeV以上。
- ・現在の本体室、クライストロン室に納まること。

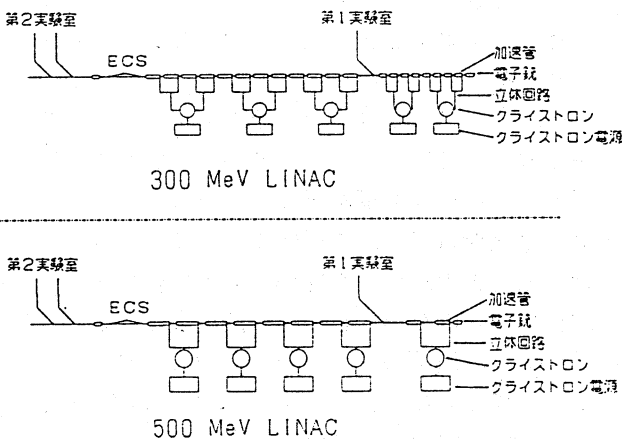


Figure 3. Present 300 MeV Linac and New 500 MeV Linac

・リニアックの必要電力を現在のトランスの容量に抑えること。

・第1実験室に供給するビームのエネルギーも改善すること。

このような条件をクリアするため大電力クライストロン(80 MW 級)を採用し、加速電界を20 MeV/mに上げる。加速管は3 mのものを8本と2 mのものを2本にする。Fig. 3 に現在のリニアックと新しいリニアック構成を示す。最高エネルギーは100 mA 加速時で550 MeV が得られる。建屋に納まるかどうか具体的に検討した結果、十分可能であることを確認済である。

10. おわりに

STB の建設にあたり、KEKの多くの方々よりいただいた物心両面のご協力に深く感謝いたします。また高輝度光科学研究センターの方々にも磁場測定やアラインメントに際し快くご協力をいただきました。

11. 参考文献

- 1) M. Sugawara et al.: Nucl. Instr. & Meth. 153 (1978) 343.
- 2) T. Tamae et al.: Nucl. Instr. & Meth. A 264(1988)173.
- 3) Y. Torizuka: Proc. 2nd Symp. on Acc. Sci. and Tech., Tokyo (1978) 277.
- 4) M. Oyamada et al.: Proc. 10th Symp. on Acc. Sci. and Tech., Hitachinaka (1995) 463.
- 5) 中里俊晴他、第2回「加速器電源シンポジウム」報告集(1996) 98.
- 6) 井上隆、「ストレッチャー・ブースタリングの精密アラインメント」東北大学理学研究科物理学専攻修士論文 平成8年
- 7) 加藤龍好、「パルスビームストレッチャー用加速空洞の研究」東北大学理学研究科原子核理学専攻修士論文 平成元年
- 8) 吉岡正裕、「パルスビームストレッチャーにおけるRF加速の研究」東北大学理学研究科原子核理学専攻修士論文 平成4年
- 9) M. Kimura et al.: The Science Report of the Tohoku University XL (1957) 233.
- 10) 佐藤繁他、SR 科学技術情報 6 No.3 (1966) 35.
- 11) M. Kato et al.: Proc. of the 5th European Particle Accelerator Conf. (1996) 653.