

## §2. 加 速 器

### 2-1. 超高輝度放射光源への改造プラン

鎌田 進

高エネルギー物理学研究所放射光実験施設  
MR 超高輝度放射光計画推進室\*

#### Conversion Plan of TRISTAN MR towards a Super Bright Light Source

Susumu KAMADA

National Laboratory for High Energy Physics (KEK)

TRISTAN MR was converted to a light source of high brightness for the light source experiments conducted in the last quarter of 1995. Here explained are considerations to choose beam parameters for the MR light source experiment and the plan for converting TRISTAN MR to a light source of high brightness. Efforts were concentrated on lowering emittance and increasing current of beam. Also some cares were taken for smooth start-up and good stability of beam.

ここでは MR 放射光ビーム試験におけるビームパラメータ選択の考え方やそれを実現するための加速器改造プランについて説明する<sup>1)</sup>。

放射光光源の性能は究極的には光の輝度で評価される。輝度を一言でいえば6次元位相空間内の光子数密度であり、従って高輝度光発生のためには低エミッタンス電子ビーム、大電流ビームそして周期数の多いアンジュレータと言う3要素が基本的に重要である。

高エネルギー物理実験用加速器トリスタン主リングにマンパワー的にも予算的にも必要最小限の改造を施して高輝度放射光加速器に改造するに際して、まずビームエネルギー10 GeV、自然エミッタンス5 nmの低エミッタンスビームを目標と

した。表1に、このMR放射光ビーム試験の電子ビームパラメータの設計値を示す。実際にビーム運転が行われた時点では少なからず異なったパラメータが使用されることもあった。

#### 1. ラティスの改造と電子ビームの低エミッタンス化

(a) アンジュレータ設置場所及び光ビームライン建設用空間の確保

長いアンジュレータ設置に最適化した場所として、運動量分散関数を消去した全長約6mのフリーな直線部を筑波衝突点の上流約100m地点に用意した。そしてここで発生したシンクロトロン放射光を約90m下流の実験室に導く光ビーム

\* 高エネルギー物理学研究所放射光実験施設 MR 超高輝度放射光計画推進室 〒305 つくば市大穂 1-1  
TEL 0298-64-5682 FAX 0298-64-7529 e-mail Susumu.Kamada@KEK.jp

Table 1. Major beam parameters for the MR light source experiment

Damping wiggler field	0	1.2	T
Nominal beam energy	10		GeV
Nominal beam current	10		mA
Number of bunches	1~8		
Circumference	3018		m
Cell phase advance (horizontal/vertical)	90°/90°		
Momentum compaction	0.00073		
Betatron tune (horizontal/vertical)	48.20/41.15		
Natural chromaticity (horizontal/vertical)	-65/-57		
RF voltage	90		MV
Synchrotron tune	0.073		
Radiated energy in a turn	3.75	6.53	MeV
Radiation damping time			
Transverse	53	30	msec
Longitudinal	27	15	msec
Relative energy spread	$5.96 \times 10^{-4}$	$1.14 \times 10^{-3}$	
Natural bunch length	0.28	0.53	cm
Natural emittance	6.85	4.96	nm

ライン建設のための空間を確保する。このために加速器ラティスを構成する磁石について、偏向磁石（長さ5.86 m）を短い偏向磁石（長さ1.5 m）で置換えることを始め、移動および配置の左右反転など図1に示される一連の作業が行われる。

(b) 電子ビームの低エミッタンス化のために<sup>2)</sup>

低エミッタンス化の第一歩は、最高ビームエネルギー32 GeV、周長3 Kmの大型加速器を8ないし10 GeVという低エネルギー運転をしシンクロトロン放射の低減を図ることである。

さらなる低エミッタンス化のために、電子ビームの水平方向収束系の強化をおこないシンクロトロン放射の量子的効果のビームへの影響を低減させる。具体的には、FODOタイプの基本ビーム収束構造毎の水平/垂直ベータトロン位相進行を、高エネルギー物理実験の60°/60°から90°/90°に増やす。これは電子ビームエネルギーが低い場合ハードウェアの変更無しに行える。低エミッタンス化に寄与しない垂直方向のベータトロン位相進行も90°に増やすのは後に述べる新しいクロマティシティ補正方式採用のためである。

そのうえでシンクロトロン放射を逆手に取る低エミッタンス化として、既存ウィグラー磁石を設置場所の運動量分散関数を消去することで、エミッタンス減少用ウィグラー（ダンピングウィグラー）として機能させる。高エネルギー物理実験ではこのウィグラー磁石は、ビーム入射時の電子・陽電子ビームのビーム間相互作用を軽減するために、エミッタンス増加に使われていた。総延長16 m、使用磁場1.2~1.4 Tのダンピングウィグラーの使用は低エミッタンス化に寄与する以上に放射減衰時間を短縮し電子ビーム不安定現象の抑制に役立つ事が期待された。このダンピングウィグラー部オプティクスを図2にMR放射光ビーム試験用の全周オプティクスを図3に示す。

(c) 大きなダイナミックアパーチャを持つクロマティシティ補正方式

電子ビームに広い安定振動領域を確保することは、ビームの入射効率や寿命、オプティクス動作点選択の幅広い可能性のために特に望ましいことである。低エミッタンス化のため収束を強化した事で増大するクロマティシティのため、そしてア

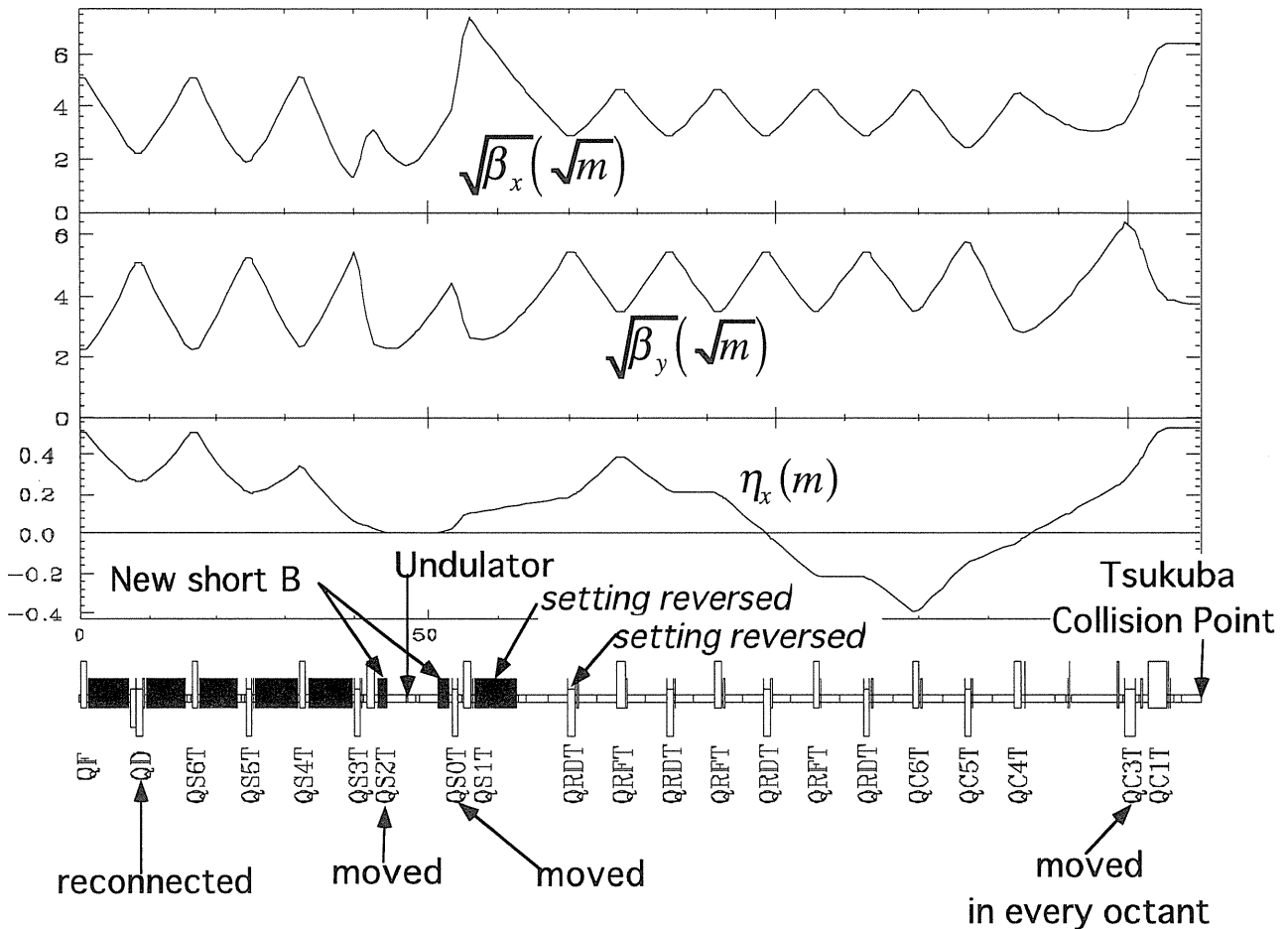


Figure 1. Beam optics for the undulator together with the related lattice conversion.

ンジュレータ設置部の導入に伴うオプティクス周期性の喪失のために、クロマチシティ補正用6極磁石から生じる非線形効果の処理法が重要な課題となった。この問題には、KEKBに向けて開発され既に1993年のビーム実験<sup>3)</sup>でも実証済みの非入れ子型6極磁石配置方式 (Non-Interleaved Sextupole Arrangement)<sup>4)</sup>の採用によって答えることにした。この方法は、一对の同一強度6極磁石が水平・垂直ベータトロン位相進行で $180^\circ$ 離され、その間に他の非線形要素が入れ子になっていなければ、これら6極磁石から発生するビーム運動に対する非線形効果は互いに完全に打ち消し合う事を利用したクロマチシティ補正方式である。これは従来のクロマチシティ補正方式に比べて特にベータトロン振動のダイナミックアパーチャを飛躍的に大きくできるという特

長を持っている。

## 2. 電子ビーム不安定現象の抑制

高エネルギー物理実験のための運転では、電子ビームおよび陽電子ビームは各々2バンチで運転されたが、単一バンチに蓄積可能な最大電流値は4 mA程度であった。この単バンチ電流制限の原因は、主に高周波加速空洞中に励起される電磁場とビーム運動とが相互作用して生じる不安定現象である。しかしバンチ数を増やしてもバンチ結合型ビーム不安定現象が発生して、蓄積電流値を2バンチ運転時より増すことは困難であった。これは、できるだけ高いビームエネルギーを実現するために、高周波加速空洞の総延長が300 mを越える事、さらには放射光専用リングや建設中のパーティクルファクトリーなどに用いられる多バ

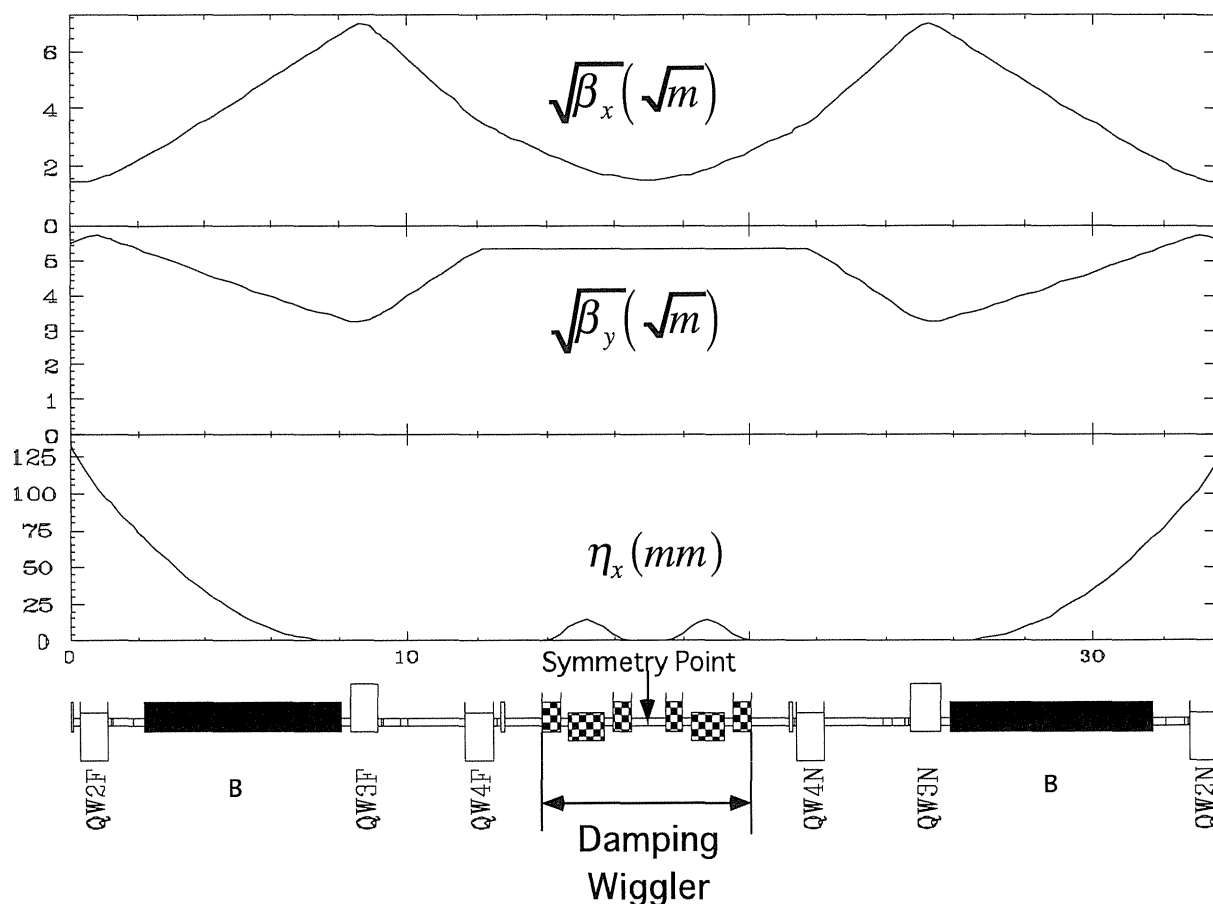


Figure 2. Beam optics for the damping wigglers.

ンチ運転に最適化された加速空洞構造ではない事が影響していると考えられる。

設計のビーム電流値10 mAはこのような事情を背景に決めたものであるが、この値を実現しさらに高いビーム電流を追求するため以下に述べる手段を講じる。

(a) 不安定現象の元を絶つ

図3に見るように筑波直線部ではアンジュレータ設置場所を除いて運動量分散関数が消去されていない。このため加速空洞によるシンクロトロン共鳴の発生を押さえるため筑波直線部からは全加速空洞を撤去する。またリング全体からも、必要とされる加速電圧を供給できる範囲で、加速空洞を極力減らしバンチ結合型ビーム不安定現象の抑制を図る。ここで必要な加速電圧とは高エネルギー物理実験ビーム入射時の経験的最適電

圧90 MV以上とした。これはエネルギー10 GeVのビームに十分な量子寿命を保証する電圧より遙かに大きい。このため大穂直線部の常伝導加速空洞を全数使用することとし、富士直線部の常伝導加速空洞及び日光直線部の超伝導加速空洞を全数撤去する。ビーム不安定現象抑制という点から見れば、超伝導加速空洞を使用すべきかもしれないが、MR放射光ビーム試験期間の短さと一旦超伝導加速空洞で故障が生じた場合の時間損失を考え、常伝導空洞を選択した。

(b) シンクロトロン放射で不安定現象を抑制

先に述べたように、全長16 m、磁場1.2~1.4 Tのダンピングウィグラーの使用により、電子ビームのコヒーレント振動の減衰時間は縦横両方向共にほぼ半分短縮され不安定現象に対するビームの安定性が強化される。

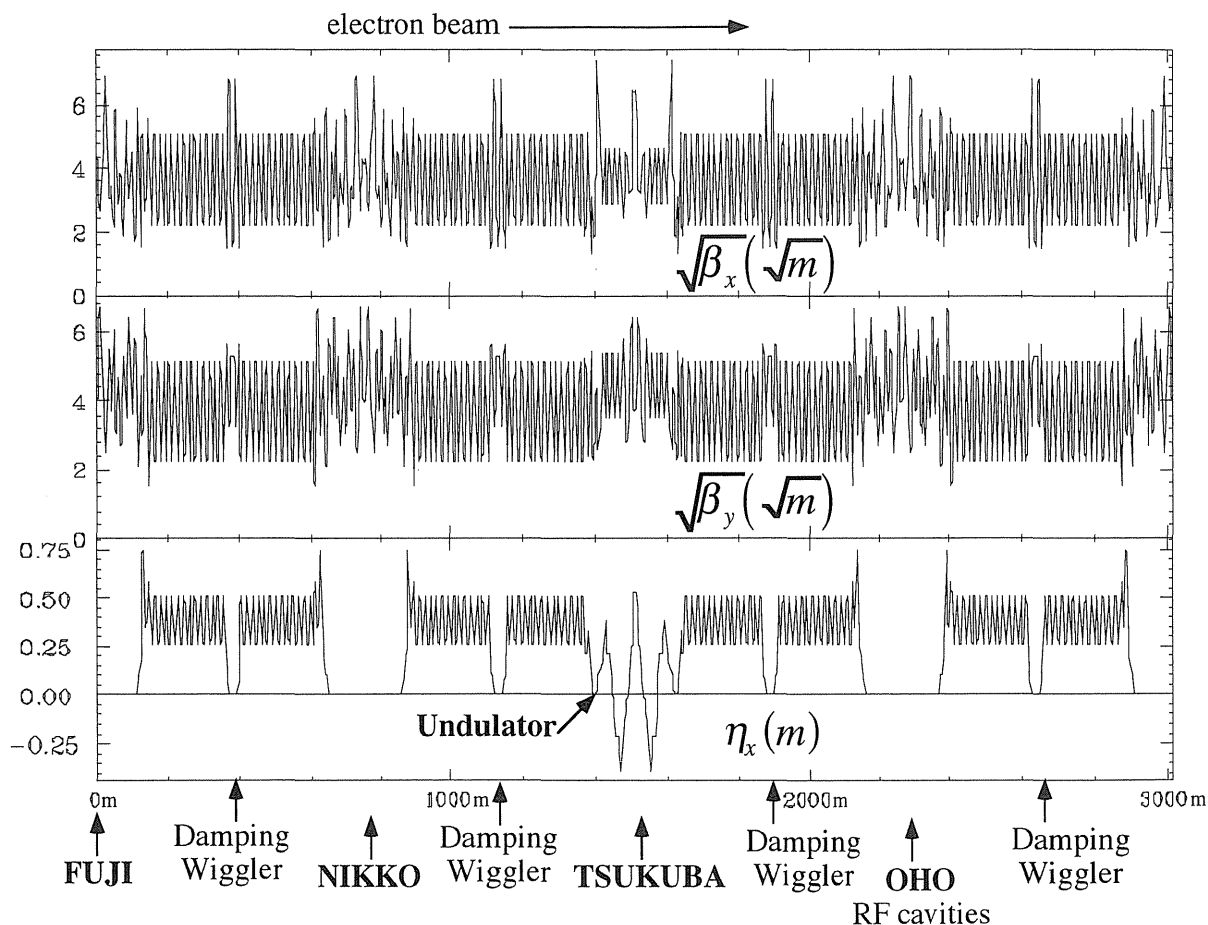


Figure 3. Beam optics for the MR light source experiment.

## (c) 不安定現象を逆手に取る

残留加速空洞により励起されるバンチ結合型ビーム不安定現象の成長率を、設計ビーム電流値 10 mA, 入射ビームエネルギー 8 GeV について推定した。これをエネルギー 8 GeV の放射減衰によるベータatron振動減衰率と比較してみると、設計ビーム電流値を達成出来る保証はなかった。より一層ベータatron振動の減衰率を増やすため、次に述べるようにヘッドテイルダンピングを利用する。

単バンチビーム不安定現象の一種ヘッドテイル効果の基本モードとは単バンチビームのコヒーレント双極振動をクロマチシティ, バンチ電流, 横方向インピーダンスの積に比例して励起ないし減衰させる現象である。クロマチシティ補正を行う主な理由は、無補正時には負のクロマチシ

ティを僅かに正となるようにして、ヘッドテイル効果の基本モードを減衰側にすることである。MR放射光ビーム試験ではこの効果をバンチ結合型ビーム不安定現象の抑制に積極的に利用することにした。そのために、クロマチシティ補正を大幅に正数となるように行い、かつ相対的に単バンチ電流を増すため或程度少数バンチで運転する。この方法の有効性を確認するために行ったビーム測定結果を図4に示す。バンチ電流およびクロマチシティ値を変えて観測した垂直方向ベータatron振動の振幅減衰率がバンチ電流とクロマチシティの積に比例していることがはっきり示されている。

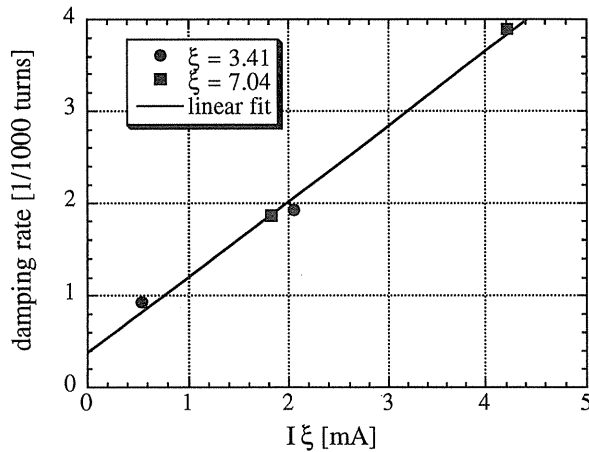


Figure 4. Damping rate of vertical betatron oscillation vs. product of bunch current and chromaticity.

### 3. その他の改造項目

#### (a) 電子軌道位置の安定化

MR 放射光ビーム試験で放射光利用実験を計画している研究者へのアンケートを行い、各々の放射光利用実験が求める電子軌道安定度を調べた。これを満たす安定な電子軌道を実現するため、光ビームの位置変動を数十マイクロン以下、角度変動を5マイクロラジアン以下に押さえる軌道補正フィードバックシステムを導入する。

#### (b) 電子ビームエミッタンスの測定

ビームエミッタンスの確実な測定を行うため、3種類（可視光、X線、ガンマ線）のエミッタンス測定方法を並行して実施する。

可視光による測定：偏向磁石で発生する可視光領域のシンクロトロン放射光を光学系で結像、ビームサイズを測る。

X線による測定：アンジュレータから発生す

るX線の角度分布を測る。

ガンマ線による測定：電子ビームにレーザー光を当て逆Compton散乱により生じるガンマ線の角度分布を測る。

#### (c) 電子ビーム運転の効率良い立ち上がりのために

ワークステーション主体のコントロールがきちんと機能するようにコントロールシステムの若返りを図る。これは特にワークステーション上で動く加速器コードSADを使用して、電子ビームの光学計算、軌道補正計算、光ビームのシュミレーション等を効率的に行うために必要である。

#### (d) 立ち上がりの早い高真空度を目指して

加速空洞の大幅撤去に伴い、シンクロトロン放射光による焼き出しを経ていない真空容器を大量に使用しなければならない。真空焼き出し時間に余裕がないため、真空容器配置の最適化、アルカリ洗浄等によりできるだけ早期に真空度改善が行えるように配慮する。

### 参考文献

- 1) S. Kamada, H. Fukuma, A. Ogata, M. Isawa, N. Nakamura, S. Sakanaka, M. Tobiyama, K. Ohmi, K. Kanazawa, T. Kubo, K. Egawa, T. Mitsuhashi, T. Mimashi, M. Kobayashi and T. Katsura: "Accelerator plan for a light-source study at the TRISTAN MR" Rev. Sci. Instrum. 66(2), February (1995) pp 1913-1915.
- 2) 鎌田 進:「トリスタン主リングにおける低エミッタンスビームの可能性」KEK-Report88-16 (1989).
- 3) Y. Funakoshi: the Proc. of EPAC '94, vol. 2, pp 1045-1047 (World Scientific).
- 4) K. Oide and H. Koiso: Phys. Rev. E47, 2010 (1993).