

§2. 加 速 器

2-2. 放射光運転のためのトリスタン
主リング改造作業金澤 健一, 江川 一美, 久保 忠
菅原 龍平, 水野 元

高エネルギー物理学研究所*

**Modification Work of the TRISTAN Main Ring
for Synchrotron Light Use****Ken-ichi KANAZAWA, Kazumi EGAWA, Tadashi KUBO,
Ryuhei SUGAHARA and Hajime MIZUNO***National Laboratory for High Energy Physics*

The modification of the TRISTAN main ring was performed during the summer shutdown of 1995, from June 15 to September 15. At the same time the disassembling of the main ring to construct KEK B-factory (TRISTAN II) was started.

32 units of normal conducting cavities were removed leaving 20 units in the Oho straight section, which reduced the impedance of the ring while keeping sufficient RF power for operation. Also 16 superconducting cavities are removed according to the shutdown of the cryogenic system. Four bending magnets of the main ring were replaced with short bending magnets to make space for an insertion device. Eight laminated steering magnets were added around the insertion device to correct orbit distortion quickly. Cabling of sextupole magnets was changed to apply non-interleaved chromaticity correction scheme. At four collision points quadrupole magnets were moved to compensate the shutdown of superconducting quadrupole magnets. About 24% of the ring was exposed to air and 10% of the ring was replaced with new vacuum chambers. To reduce the outgassing from the new chambers due to synchrotron radiation during commissioning, chemically cleaned chambers were installed where the intensity of synchrotron radiation is higher.

MR 放射光利用実験のための MR 改造は、95 年の 6 月 15 日から 9 月 15 日の間に行われた。並行して KEK-B ファクトリーに向けての機器撤去が開始された。筑波及び富士直線部の (常温) 高周波空洞の撤去は、MR 放射光への対応である

と同時に KEK-B ファクトリーに向けての機器撤去であり、それに加えて、超伝導機器の運転停止に伴う衝突点の電磁石の再配列と超伝導空洞のラインオフが行われた。

高周波空洞については、冷凍機の運転停止とい

* 高エネルギー物理学研究所 〒305 つくば市大穂 1-1
TEL 0298-64-5227 FAX 0298-64-3182 e-mail kanazawa@kekvox.kek.jp

う事情もあり、トリスタン運転で十分な実績をもつ常伝導空洞が使用されることになった。ただし、トリスタンにおいては、合計52ユニットのAPS空洞を使用しており、今回の放射光実験に必要とされる台数をはるかに越えている。ビームエネルギー10 GeVを主たる運転モードとし、更に12 GeV程度の運転を実行する目的においては、加速空洞20ユニット(クライストロン10本)を有する大穂直線部(D4, D5)だけで十分である。また、蓄積されるビーム強度の点からは、空洞台数が少ないほうが有利であることは当然である。従って、大穂直線部のAPS空洞を利用することとし、筑波直線部の20ユニット、富士直線部の11ユニット(1ユニットはこのMR放射光実験以前に撤去、ダミー真空配管に交換されていた)、合計31ユニットのAPS空洞を撤去、ダミー真空配管に交換することとした。ダミー真空配管は真空グループにおいて準備されたものを使用し、空洞グループは該当直線部の空洞撤去作業を主として担当しダミー真空配管系による復元は真空グループの担当するところとなった。撤去及び復元作業は順調に進行し、予定通り完了することを得た。

加速空洞のトリスタン加速空洞としての定格電圧及び関連するパラメーターを表1にまとめておく。大穂直線部の20ユニットでAPS 9セル空洞当りの定格出力150 kW運転時に約118 MVの高周波加速電圧を供給しうる。必要な高周波加速電圧は当然目的とするビームエネルギー、ビーム強度、更にバンチ長などによって大きく変動するが、ここに示した値は十分な余裕をもってMR放射光実験の運転条件の変化に対応できる。リングの加速空洞部分は以上の作業によってMR放射光実験に対応することとし、空洞制御系、クライストロン、及び導波管系などはトリスタン主リングのものをそのまま使用することとした。

トリスタン実験のために据え付けられた電磁石の配置は、MR放射光利用実験のため筑波実験室

Table 1. Parameters of TRISTAN APS Cavity

形式、及び総数	APS (Alternating Periodic Structure) 型 9セル, 104台 (2台を1ユニットとしている)
周波数	508.58 MHz
Shunt Impedance	26.7 M Ω (計算値), 21.7 M Ω (実測値)
Q-値	42400 (計算値), 実測値は約90%
空洞内壁損失及び加速電圧	常用150 kW (9セルあたり), 2.938 MV (9セルあたり)
材質	主要構造材 低炭素鋼 (S25C), 銅メッキ (25 μ m)
主真空ポンプ	300 l/s イオンポンプ 4台 (1ユニット)
常用真空度	10 ⁻⁹ Torr 台

の両側, D1 及び D2 の直線部から曲線部にかけて図1から図2のように変更された。図で見ると分かるように改造前と後では電磁石の配置が大きく変更になっていることが分かる。また、D2側についてもアンジュレーターを据え付けることを除き同じような改造を行った。以下MR放射光利用実験のための改造項目についてその要点を述べることにする。

1) X線ビームラインを通すためD1側の弱偏向電磁石の開口部をリング外側に向けるため反転した。

2) D1, D2両側のQSD 7電磁石をアーク部のQD電磁石と直列になるよう配線替えする。配線は1350 Aの電流を流すので650 mm²ケーブルをダブルで使用した。

3) D1, D2両側のQSF 2およびQSF 4電磁石を図2のように移動する。QSF 4電磁石は2)項で切り離れたQSD 7電源で励磁する。ケーブルは2)項と同様である。

4) D1, D2両側のB1, B2偏向電磁石を撤去し短偏向電磁石に置き換える。これら4台の電磁石を使用していないQC 2電源で励磁するよう配線替えする。

5) リング一周にある240台の六極電磁石を80台しか使用しない非交錯方式によるクロマティシ

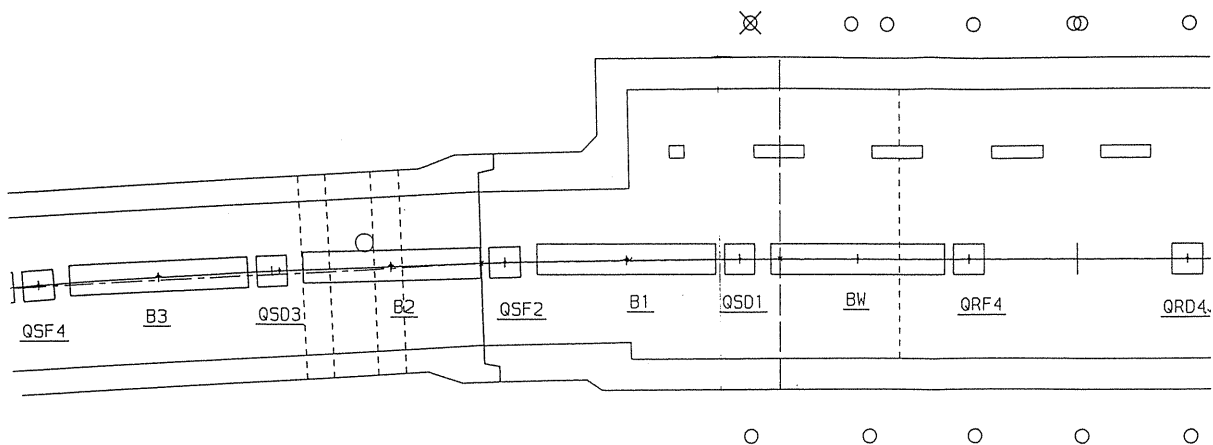


Figure 1. The layout of magnets from D1 straight to the arc; before modification.

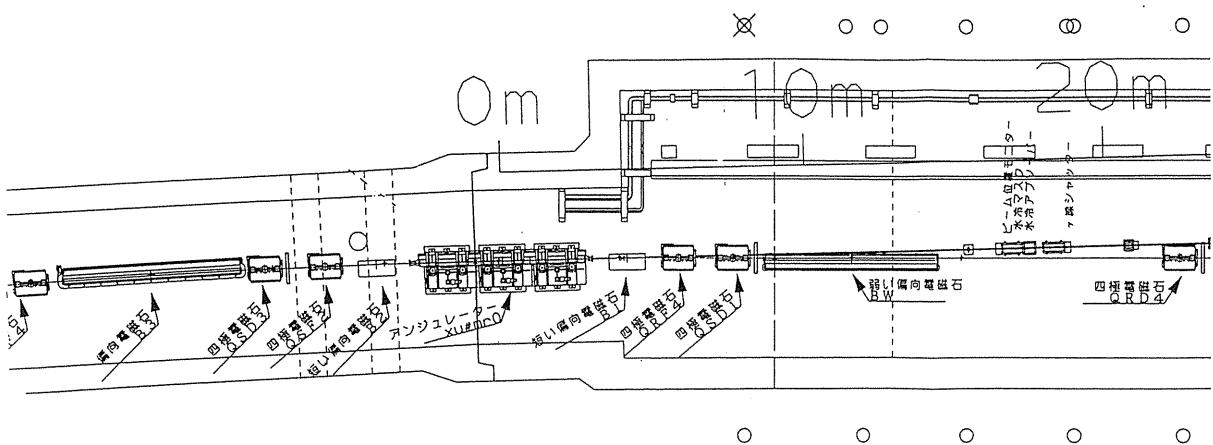


Figure 2. The layout of magnets from D1 straight to the arc; after modification.

ティ補正方式の接続に変更する。ケーブル配線は1993年に行っている。

6) アンジュレーターの前後に新たに8台のステアリング電磁石を据え付けた。地上電源室に設置した電源からこれらの電磁石へ配線を行った。

これら改造に加え、衝突点のQCS電磁石の運転を終了したことによりQC3電磁石8台を衝突点側に移動する作業が必要となった。

短偏向電磁石の鉄芯はトリストラン主リング偏向電磁石試作機の鉄芯を4分割し製作し、コイルについては新規製作した。表2に短偏向電磁石の機械的及び電気的パラメーターを示す。鉄芯の再

利用については、切断に際し磁極の変形、端板の再溶接の際の新たな溶接歪み等の問題があり、磁極精度、磁場分布、測量基準面精度等に若干の問題があったが、台数が4台と少数であり運転に際し実害はなかった。追加した8台のステアリング電磁石は光の位置を安定させる目的で早い制御を行うため積層型にした。それらのパラメーターを表3に示す。

電磁石据え付け終了後、1995年9月10日よりアライメント作業を開始した。今回新たに設置された短偏向電磁石4台、移動した4極電磁石4台の他に、近傍の電磁石についても、アライメントを行った。放射光グループの作業は、まず放射

Table 2. TR.PF-Bending Magnet Parameters

(1) Mechanical Parameters	
bending radius	50.421 m
central gap	70 mm
core length	1200 mm (end plate を含む)
end plate	30 mm thick each
core weight	~2600 kg
coil weight	~350 kg
conductor size	28 × 17 mm ²
hydraulic diameter	6 mmφ
coil turns/pole	12
total length	< 1600 mm
(2) Electric Parameters (main coil)	
I _{MAX}	1666.67 A
B _{0MAX}	0.7 T
resistance (at 50°C)	~3.44 mΩ
inductance	~3.34 mH
V _{MAX}	~5.73 V
power _{MAX}	~9.56 kw
(backleg winding)	
I _{MAX}	10 A
turns/mag	80
resistance (at 23°C)	0.68~0.72 Ω
(3) Cooling water	
water flow	7.4 lit./min/mag
temperature rise _{MAX}	~20°C
max. pressure	15 kg/cm ²
regular pressure	10 kg/cm ²
pressure drop _{MAX}	5 kg/cm ²
no. of circuits	2

光取り出しラインの設置が始まり、このレファレンスとして我々の直線ラインを与えた。次にアンジュレーターを設置するためのレファレンスを求められ、アンジュレーターの両側の短偏向電磁石および4極電磁石をアライメントして渡した。ところが、アライメント作業を進めていくうちに、放射光取り出しラインの延長線上に、アンジュレーターが±数ミリメートルの精度で設置されなければならないということが分かり、少々慌てた。それならば、先にアンジュレーターの場所を決めて、そこから直線状に放射光取り出しラインを伸ばすべきであるからである。また、アンジュレーターで生成された放射光は、50 m 先の±5

Table 3. MR.PF Correction Magnet Parameters

	type 1 (STH)	type 2 (STV)	type 3
Mechanical Parameters			
central gap (mm)	105	165	275
lamination length (mm)	200	200	200
end plate (mm)	10	10	10
total length (mm)	< 260	< 300	< 320
total weight (kg)	~110	~115	~145
Electric Parameters			
J _{MAX} (A-turns/pole)	400	1300	2100
B _{0MAX} (Gauss)	90	200	180
I _{MAX} & turns/pole	5A × 80	5A × 260	5A × 420
conductor size (mmφ)	2.0	2.0	2.0
resistance at 60°C (Ω)	0.64	2.14	3.64
inductance (mH)	~26	~223	~498
V _{MAX} (V)	3.2	10.7	18.2
power _{MAX} (W)	16	53.5	91
必要台数	4	3	1

mm 開口のマスクを通過せねばならず、これは角度にすると±0.1 mrad と、通常のアライメント方法では達成が楽でない精度が要求されていることが分かった。要は、適当なビームの調整法を持っていれば良いわけであるが、アライメント作業が大分進んでから、こう言ったことが打ち合わせで話題になってきた。我々の勉強不足と言ってしまえばそれまでであるが、リングのアライメントと、放射光取り出しラインのアライメントとは、随分作業の要点が違うということを思い知らされた。現場の担当者を含めた事前の打ち合わせを、特にビームの調整法についてやっておけば、アライメント作業も効率よく、もっと自信を持ってできたと思う。途中我が方の計算違いなどもあって、関係者に迷惑をかけたりにしながら、なんとか9月中旬までにアライメント作業を終了した。

高周波空洞や電磁石などの大きなハードウェアの移動、変更に伴い真空作業も必要となった。主要な作業は高周波空洞の撤去後へのダミー管の敷設、D1 及び D2 の直線部から曲線部にかけての電磁石の移動新設に伴う真空チェンバーの改造及

び新規製作, QC3 電磁石 8 台を衝突点側に移動することに対応する新規チェンバーの製作, である。

真空チェンバーの製作は94年の暮れから行い, トリスタンリングで使用されているチェンバーの改造は95年夏に行った。1991年度途中から真空グループは CAD を導入しており, 特に光取り出し部の設計には役に立った。真空チェンバーはベローズ以外はアルミ合金で製作した。

真空作業により大気開放される区間は一周約 3000 m の内720 m に達し, そのうち約300 m は新規製作あるいは, 初めてリングに使用するか長期間使用されていない真空チェンバーである。このような状況で運転再開時にシンクロトロン放射によるガス放出によってビーム寿命が短くなることをできるだけ押さえるために以下のような工夫を行った。

1) 空洞撤去後の直線部で使用される RF ダミー管 (5365 mm) は必要数48本のうち11本を押し出して新規製作したが, 新規製作分については初期のシンクロトロン放射によるガス放出を低減する目的で表面処理を施し, それらを直線部のビームに関して上流側においた。

2) D1 及び D2 の直線部から曲線部にかけての電磁石の移動新設に伴い新規製作したチェンバーについても同様に表面処理を行った。

定量的に表面処理の効果を確認するための圧力データの収集は B ファクトリーの設計で多忙であったため行わなかったが, ビーム寿命に関して大きな不満がでなかったのは, 我々の処置の効果があつたと考えてよいであろう。

この表面処理は我々の「表面を 1 μm 溶かす」という仕様のもとに石川島播磨重工業(株)と技研工業(株)が協力して適切な条件を見いだして行ったもので, 以下に参考のためその手順を示す。

- 1) 有機溶剤浸漬 (脱脂)
- 2) 酸洗浄
20%硝酸

室温 (25°C) 5 分浸漬

硝酸の被膜形成能を利用し, 表面を (溶解しながら) 平滑化する。

3) 水洗

上水道

室温 1 分浸漬

4) アルカリ洗浄

5%水酸化ナトリウム

室温 5 分浸漬

押し出し時形成された表面の汚染酸化層を溶解する。

5) ケミカル洗浄

20%ターコ#WO (飛行機用アルミ材のクリーニングに使用される商品名)

室温 5 分浸漬

(引き続き酸化層を溶かすが, 4)は粗洗浄, 5)は仕上げ洗浄と推測される)

6) 水洗

上水道

室温 1 分浸漬

7) 20%硝酸

室温 5 分浸漬

表面を一皮溶かし, ケミカル洗浄の残留物を取る

8) 水洗

上水道

室温 2 分浸漬

9) 水洗

純水によるスプレー, 流水洗浄

10) 乾燥

クラス1万のクリーンルーム内で, 乾燥窒素ブロー

真空作業は全て順調であったわけではない。電磁石グループとの確認ミスでステアリングが本来の位置に入らず, 窮余の策としてステアリングの位置を変更してもらったことがあった。また新しい短偏向電磁石のチェンバーのフランジ位置が正規の位置からずれ, ベローズをむりやり変形

させてダクトを接続したこともあった。本来ならばチェンバーの寸法検査をやり直し、必要があれば手直しをするところであるが作業時間の制約のためそのままにした。

このように多くの作業があったが、各グループとも予定通り夏期シャットダウン中に作業を終了し、秋から MR 放射光利用実験を開始した。電子ビームが蓄積され、アンジュレーターが比較的順調に出てきて、作業にかかわった人々は心底安堵したことであった。

ある程度の大きな作業を行うといつも思うことであるが、我々の研究所には各ハードウェアの整合性を総合的な立場から検討監督するエンジニアグループがない。大きな計画を円滑に実行するには個々の機器の性能を高める役割の人々と、全体を広い観点から見る人々と両方の存在が必要であると思う。現在一人でいくつもの役をこなしている ATF の関係者の中から幅広い視野と経験をもつ人達が育つことを期待したい。