

## 〔研究〕

# トモグラフィ用超伝導ウィグラー

## Superconducting Wiggler for Tomography System

三角 智久      杉山 卓      大垣 英明  
T. MIKADO      S. SUGIYAMA      H. OHGAKI  
山崎 鉄夫      富増 多喜夫  
T. YAMAZAKI      T. TOMIMASU

A compact superconducting wiggler was constructed and installed at the electron storage ring TERAS of the Electrotechnical Laboratory. The wiggler was intended originally to generate high-intensity x rays of the energy above 10 keV with TERAS storing 800-MeV electrons. The wiggler has been operated up to 5 T with 750-MeV electrons. The experimental results show that the stored electron beam is affected considerably by the nonlinear components of the magnetic field of the wiggler.

### §1 はじめに

電子技術総合研究所では、従来から超伝導ウィグラーや偏光可変アンジュレータなど、特色ある放射光を発生させることの可能な、電子蓄積リングへの挿入光源装置の開発や高度利用の研究などを行ってきた。その実績を踏まえて当所は、平成6年度からの原子力基盤クロスオーバー研究「放射線ビーム利用先端計測・分析技術研究 - 高輝度放射光の先端利用のための基盤技術の研究開発」において、

- (a) ウィグラー放射光を利用するトモグラフィに必要な要素技術の確立
- (b) アンジュレータ放射光による発光分光分析法の高度化
- (c) 蛍光X線の高感度計測用超高効率X線検出器の開発

などを担当してきた。

電総研の電子リニアック(TELL)およびその関連実験施設を図示すると図1に示すとおりである。リング室に設置されている蓄積リング TERAS の直線部には

超伝導ウィグラーが挿入されていて、(a)はそれによる放射光(通常の「光」よりエネルギーが高い、すなわち波長の短いものも含まれるが、本稿では「放射光」と総称する。)の利用研究の一環と位置づけられている。また、中エネルギー実験室に設置されている小型リングNIJI-IIの直線部には実用規模の偏光可変アンジュレータが挿入されていて、それによる準単色放射光を照射したときの各種材料による発光現象を利用して(b)の研究、つまり、材料の不純物や欠陥を高感度で分析する手法を確立するための研究を行ってきた。一方(c)は、SPRing-8などの第3世代蓄積リングによる高輝度放射光を光源とする超高感度・時間分解X線吸収スペクトル測定技術の確立に寄与することを念頭において、特定原子が励起された結果生ずる蛍光X線を高感度且つ高速で計測することの可能な超高効率X線検出器を開発することを目標として研究を行ってきている。

本稿は、この中の(a)について、研究の背景や、これまでに調べてきたウィグラーの特性などを報告するものである。

KEY WORDS : 放射光, 超伝導ウィグラー, トモグラフィ

§2 ウィグラー放射光トモグラフィシステム

2.1 トモグラフィ

シンクロトロン放射光が有する、指向性が高く、高強度であるという性質を活かして、各種材料の内部構造を非破壊で調べたり、組成分析を行う手法にトポグラフィ（結晶性の高い物質に適用）や、トモグラフィ（非晶質物質，混晶物質，生体物質などに適用）がある<sup>1)</sup>。特に後者の手法を心臓疾患の診断に応用する“アンジオグラフィ”は、患者に与える苦痛が極めて低く、しかも心臓の搏動状態をそのまま観測することが可能な、優れたものであると期待されており、放射光施設に関連する多くの研究機関において精力的な開発研究が進められている。

このような手法を実現するためには、数 keV 以上のエネルギーを有する放射光を発生させることが必要であり、例えばアンジオグラフィでは、沃素の K 吸収端である 33.17 keV を超えるエネルギーで十分な強度を有する X 線が必要である。これは、沃素の X 線吸収係数は図 2（文献 2 から引用）に示すように、33.17 keV を境として大きく変化しているのに対し、骨や筋肉などでは変化が滑らかであるため、(33.17 keV + keV) および (33.17 keV - keV) の 2 種類のエネルギー

を有する X 線を用いて心臓部の透過像を撮り、両者の差分を求めることによって沃素が含まれている部位、つまり血管系の情報を得ることができるからである。トモグラフィによって各種物質の内部構造を観測したり組成分析を行う場合も事情は殆ど同じである。

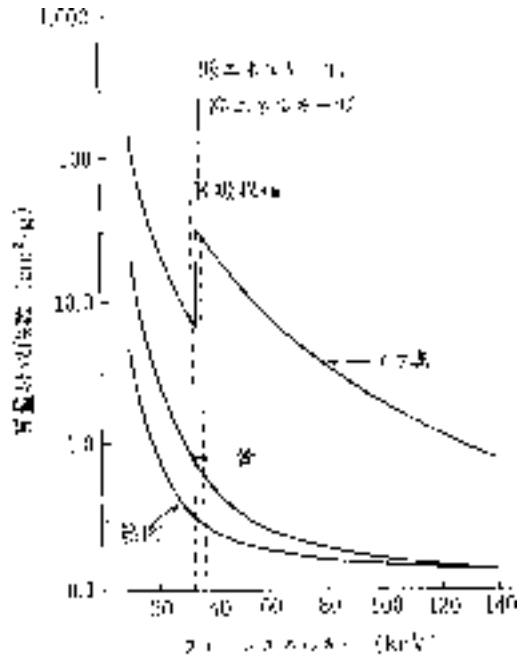


図 2 物質による X 線吸収係数の変化 (参考文献 2) から引用)

*ETL Electron Accelerator Facility*

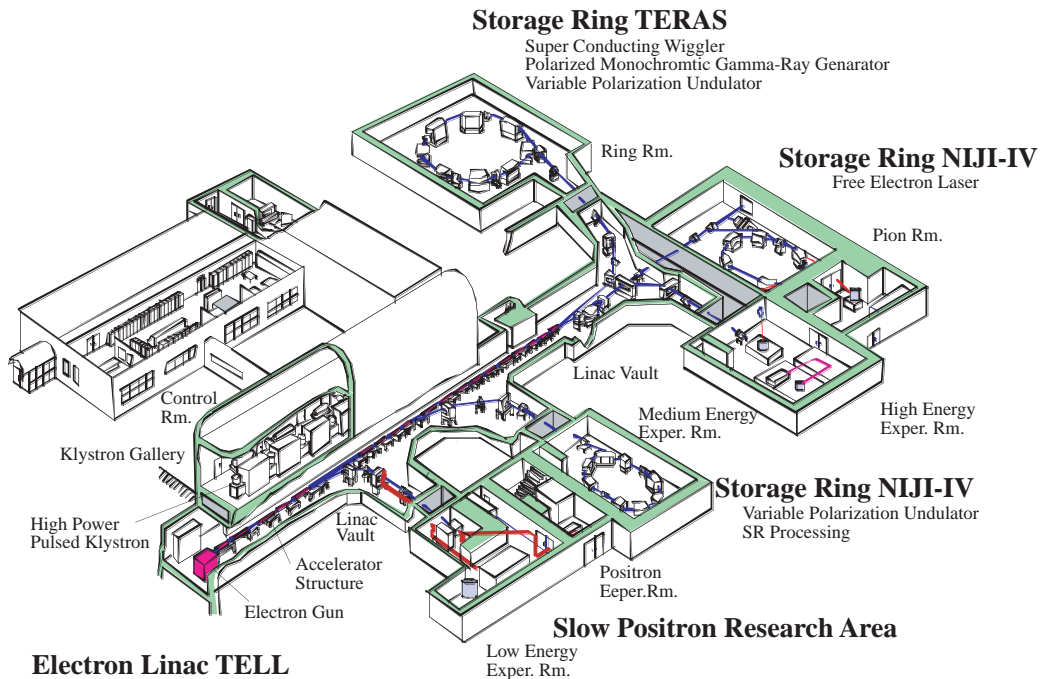


図 1 電総研電子リニアックおよび研究施設の配置

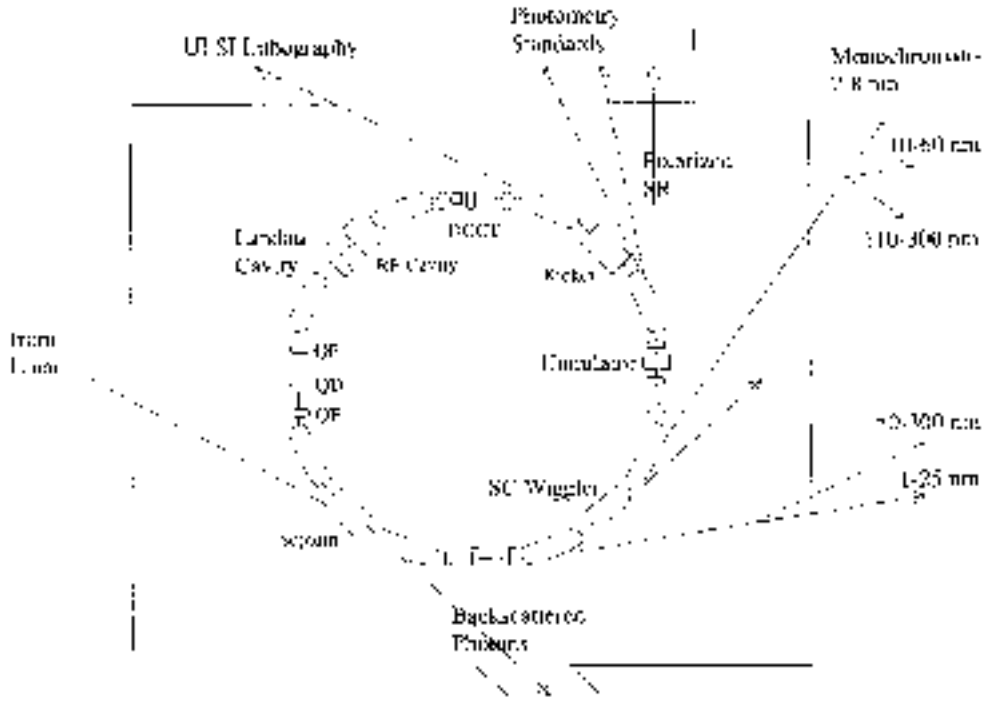


図3 電総研電子蓄積リングTERASの平面図とビームラインの配置

2.2 超伝導ウイグラ

放射光は、そのエネルギースペクトルが広い範囲に亘る白色光であるが、全放射パワーを2等分するものとして特性エネルギー（又は臨界エネルギー） $E_c$ が定義される。この $E_c$  (keV) は、近似的に  $0.665BE^2$  で表される。ここで  $E$  は GeV 単位で表示した電子（陽電子の場合もあるが、本稿では「電子」と総称する）のエネルギー、 $B$  は電子を偏向させる磁場の強度で T 単位で表示する。これで明らかなように、 $E_c$  は  $B, E^2$  に比例するので、エネルギーの高い放射光を得るためには、できるだけエネルギーの高い電子をできるだけ強い磁場で偏向させることが必要である。しかし、建設費だけでも優に数百億円を超える、高エネルギーで大型の放射光施設を多数建設して、医療診断や材料分析に供するという事は極めて非現実的な考え方である。そこで実際的には、小規模の蓄積リングを建設し、その直線部にウイグラを挿入することによって  $E_c$  の高い放射光を発生させることが重要な技術課題となる。

このような技術開発を行うために当所では、小型の電子蓄積リング TERAS の直線部に挿入する 10 T 超伝導ウイグラを試作し<sup>3)</sup>、その放射光を利用して材料の組成分析、マイクロマシンの動特性評価などを

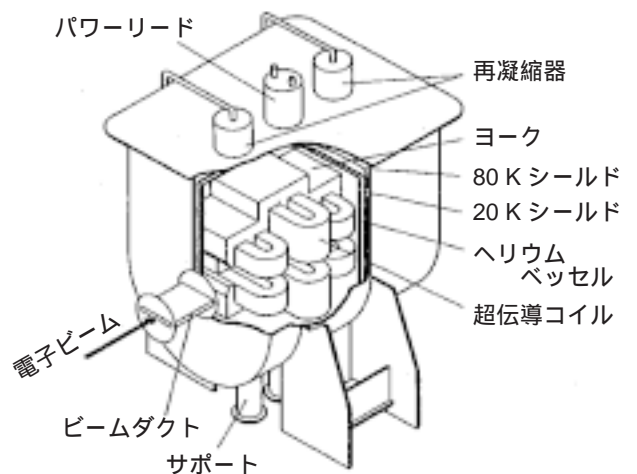


図4 10 T 超伝導ウイグラの構造模式図

行うトモグラフィシステムの構築を目指している。当所が開発したウイグラは図3に示してあるように、TERAS の狭い直線部に挿入する必要があるため、図4および図5に示すような構造の「3極ウイグラ」で、

電子ビーム方向の長さは 80 cm 程度に抑えてある。コイルの線材としては、 $Nb_3Sn$  および  $NbTi$  のハイブリッドを使用し、主コイルでは 10 T、両側の補助コイルでは 5.5 T を発生するように設計されている<sup>4)</sup>。その外観写真を図 6 に、得られる放射光のエネルギースペクトル（計算値）を図 7 に示す。

制御が単純化されているため設定精度の向上が期待できる。図 9 に示すように、第一結晶に放射光が入射する角度によって分光エネルギー（分光波長）が決められる。本研究では 2.5 - 35 keV という広い領域の放射光を取り出すことを目標としているので、結晶面

2.3 電総研が想定するトモグラフィシステム

本研究は、ウィグラ放射光を分光して試料に照射し、透過 X 線を二次元的に捉えてその信号を高速で処理して種々の物質の内部構造観測を行うトモグラフィシステムの要素技術を確立しようとするもので、想定しているシステム全体の構成は図 8 に示すようなものである。連続スペクトルを有するウィグラ放射光から所要の波長域の放射光を取り出すためのモノクロメータ「2 結晶型分光器」は“ゴルパチェンコ型”と呼ばれる 2 結晶リンクタイプで、結晶の位置

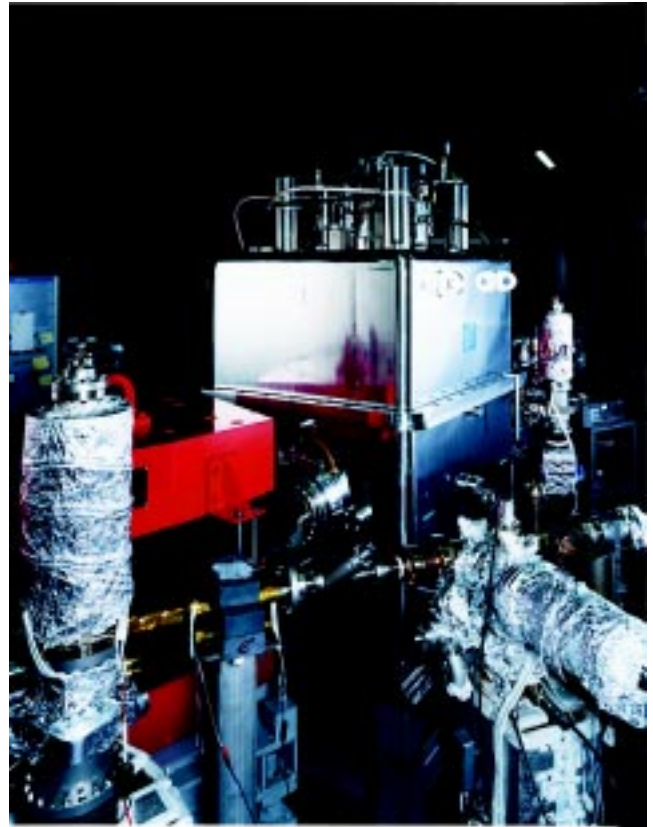
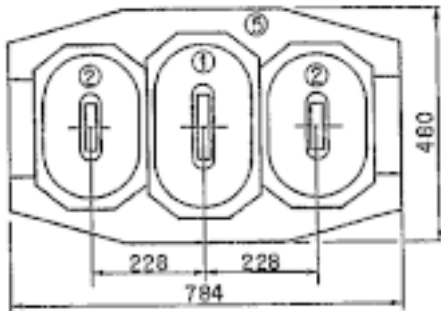
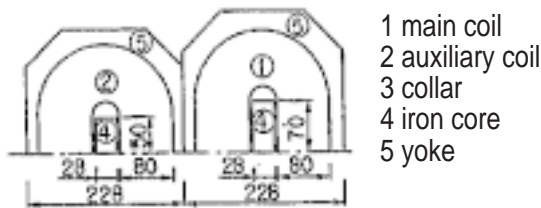
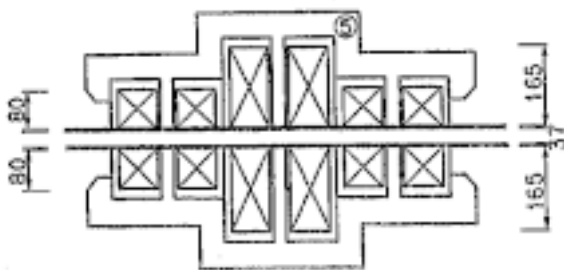


図 6 10 T 超伝導ウィグラの外観



(b) Cross-sectional top view



(a) Cross-sectional side view

図 5 10 T 超伝導ウィグラの断面図

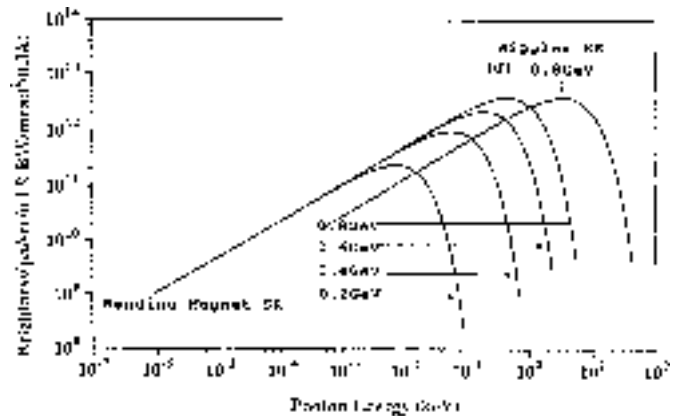


図 7 TERA の偏向電磁石部から得られる放射光のスペクトルとウィグラから得られる放射光のスペクトル

は Si(111), Si(311), Si(422) の 3 種類から選択できるようにし、一次放射光の入射角も  $4^\circ - 50^\circ$  という広範囲での調整を可能にしている。

モノクロメータの第一結晶に入射する放射光の強度が可能な限り強くなるようにするために、放射光ビームラインの長さを、放射光の発光点から第一結晶までの距離が 4 m となるように設計した。このようにすることによって、第一結晶で分光される放射光強度は、電子エネルギー 800 MeV、蓄積電流 300 mA の場合、3.7 keV の  $E_c$  において、 $0.64 \text{ cm}^2$  当り、およ

そ  $10^{10} \text{ photons} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot (0.1\% \text{bw})^{-1}$  である。このように発光点に接近させると、ビームラインの真空が TERAS の真空状況に対して密接に影響を及ぼすため、ビームライン、モノクロメータ等の真空は常に超高真空に維持する必要がある。TERAS を 800 MeV  $\times$  300 mA で運転したときの、発光点から 4 m 離れた結晶面上  $0.16 \text{ mm}^2$  当りの熱負荷の計算値を図 10 のようになる。これによると  $0.64 \text{ cm}^2$  当り  $\sim 1.6 \text{ W}$  の熱負荷が予測されるので、結晶面の温度上昇による歪みを軽減するために第一結晶の水冷機構が必要である。

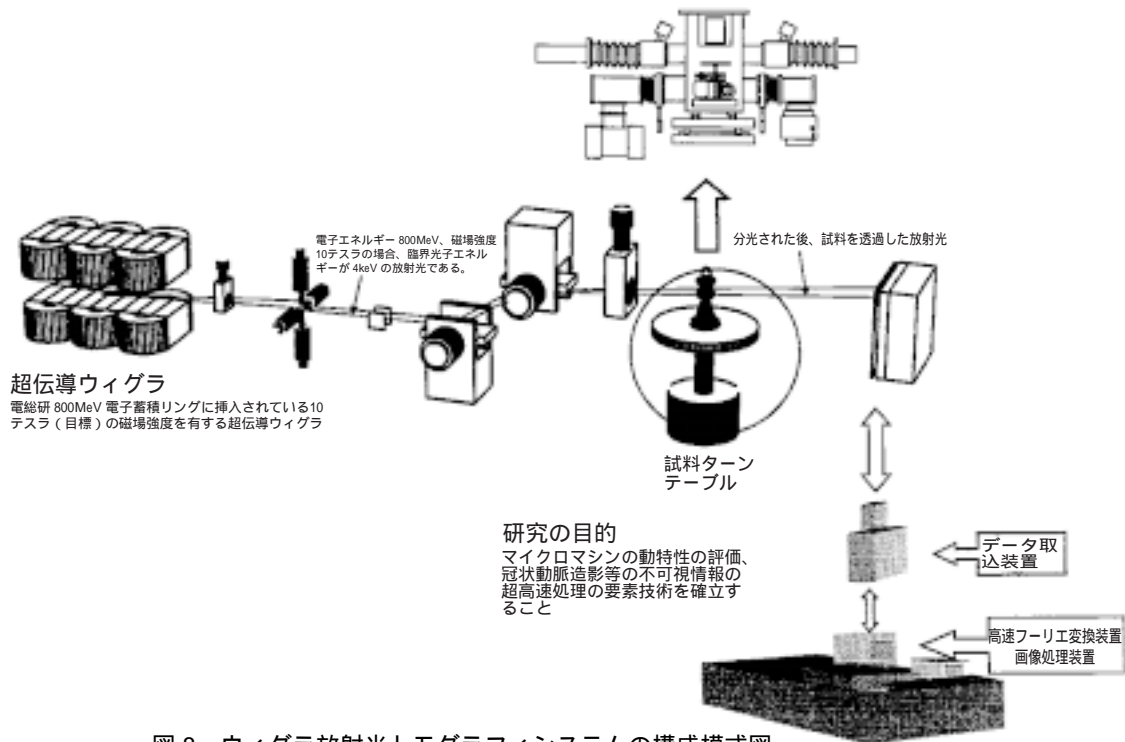


図 8 ウィグラ放射光トモグラフィシステムの構成模式図

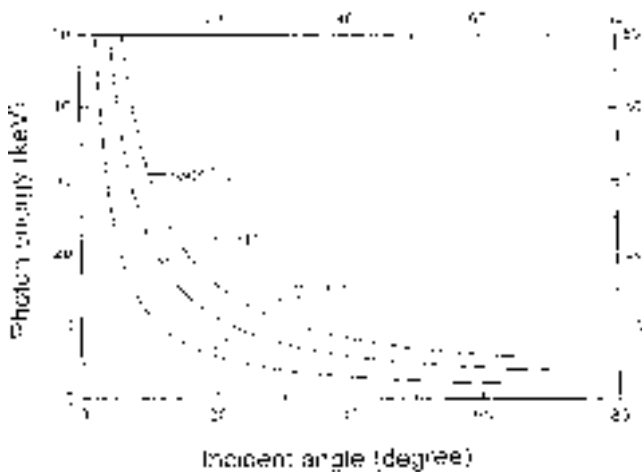


図 9 2 結晶型分光器第一結晶への放射光の入射角と分光波長の関係

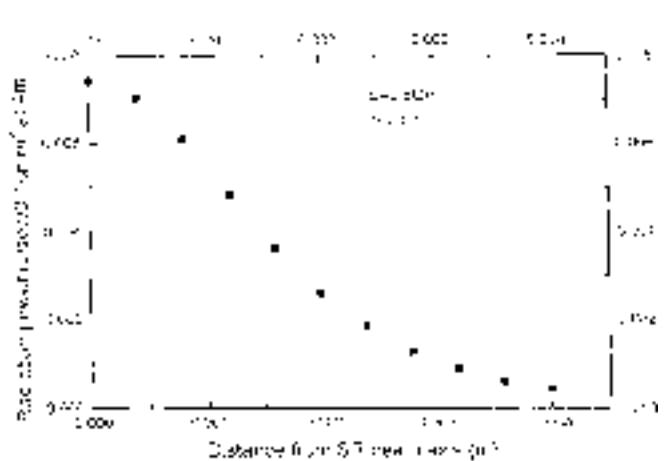


図 10 ウィグラの発光点から 4 m 隔てた位置にある分光器第一結晶の熱負荷

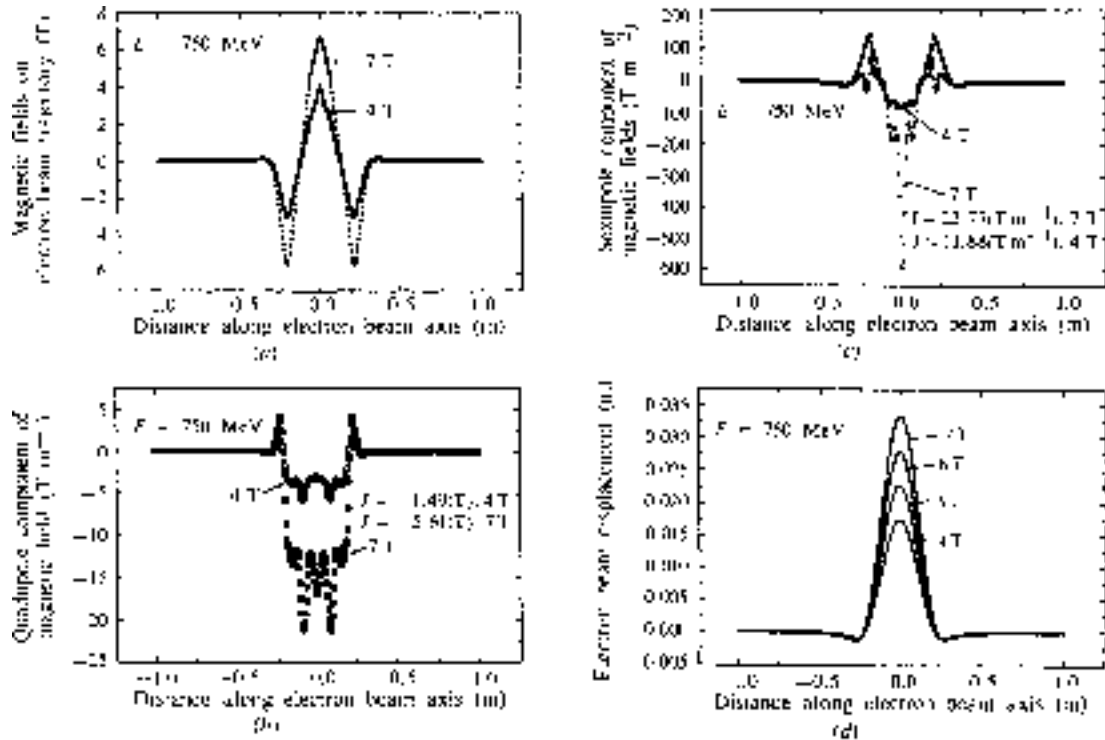


図 11 10 T超伝導ウイグラ内部磁場の多極成分およびビーム軌道

2.4 電総研ウイグラの特性評価

運転エネルギーが1 GeV 程度の小型の蓄積リングを利用してできるだけ  $E_0$  の高い放射光を得るためにウイグラの磁場を高くすると、リングを周回する電子は、磁場の影響を強く受けて本来の電子軌道から大きく変位する。ウイグラを稼働させたときにウイグラ部を通過した電子の軌道および方向は、ウイグラを稼働させないときと全く同一であることが理想的であり、上で述べた補助コイルはそのために設置されているものである。しかし現実には多極成分の全く無い(双極)磁場を発生させることは困難で、なんらかの手段で多極成分による電子の変位を抑える必要がある。本研究で使用しているウイグラにおいて、中心軸上の磁場の双極成分、四極成分、および六極成分を軸方向位置の函数として描くと図11(a) - (c)のとおりで、750 MeV電子の軌道は、図11(d)に示してあるようなものになる<sup>5)</sup>。このウイグラにはチューンを維持するため、その前後に横方向集束用四重極電磁石( $Q_{fc}$ )を設置してある。そこで実際に、TERAS に750 MeV 電子を蓄積した状態でウイグラの磁場を変化させたときにチューンを保つために必要な  $Q_{fc}$  の励磁電流を実測したところ、図12に示すような結果を得た。

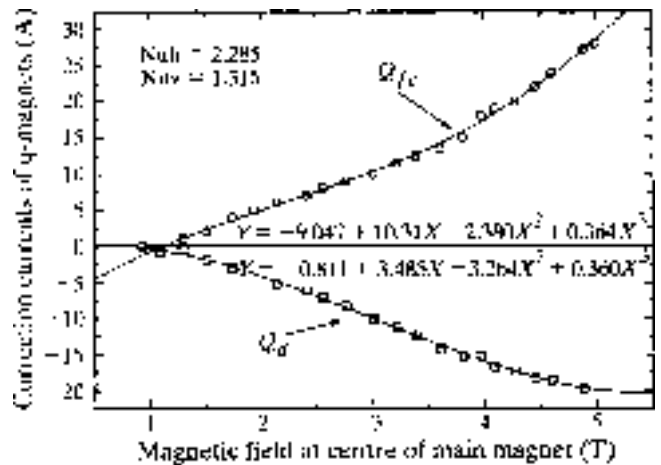


図 12 750 MeV電子を蓄積中のTERASのチューンを一定に保つために必要な補正用四重極電磁石励磁電流の変化

この図の  $Q_{fc}$  は、TERAS 本体に設置されている縦方向集束用四重極電磁石を意味している。

このようにして安定運転の条件を見出した後、750 MeV 電子を蓄積した状態でチューンを一定に保ちながら、ウイグラの磁場を毎分 0.125 T ずつ上昇させていったときのチェンバー内真空圧力、電子ビーム

量，およびビーム寿命の変化を測定したところ，図13に示すような結果が得られた<sup>5)</sup>。ウイグラ磁場の増加によってチェンバー内面を照射する放射光のエネルギーが上昇する結果，チェンバー内部の真空が悪化し，それに伴って蓄積ビーム量が減少して寿命が短縮していることが明らかに観測されている。この実験ではウイグラ磁場が5 Tを超えた辺りでウイグラ磁場の多極成分がビームに大きく影響して不安定性が増し，ビーム量の減衰が激しく，試験を続けることは不可能であった。今後，これらを解決して，より高磁場での運転を可能にしていくことが必要である。

2.5 トモグラフィシステムを構築するには

ウイグラを稼働したときに TERAS を周回する電子ビームの特性を調べて，その制御技術の確立を図るとともに，図8に示したトモグラフィシステムの中，分光放射光の2次元強度分布測定を行うための，2次元計数型位置検出器の試作も行った。開発した2次元計数型位置検出器は，PIN構造を有する検出部と増幅部とをインジウムバンプボンディング技術によって結合するものであるが，現時点では，縦0.5 mm，横1.5 mmのピクセルを4行×4列に配置したもので，位置分解能は極めて不十分なものである。そこで本研究では，次善の策として，取り敢えずX線 CCDカメラを用いることとし，この CCDカメラに対応する信

号画像化処理装置としてトモグラフィ制御装置の開発を行った。採用したCCDカメラのピクセルは一辺~21 μmの正方形で，縦8 mm，横12 mmの画面を~22万画素で覆っている。

図8に示してある「トモグラフィ試料解析装置」は観測対象となる試料を載せて回転させるもので，コンピューター制御で試料の位置や姿勢を決定することができる。回転機構や種々の方向への駆動機構を超高真空中に内蔵しなければならず，そのような環境でもスムーズに駆動可能であることが必須の要件である。試作したものは真空磁気シールド構造のもので，回転角の再現性は0.01°以内で，大気中での回転速度は毎秒30回転程度が実現できており，真空中でも毎秒~10回転を目標としている。

トモグラフィ技術のための重要な要素技術の一つである高速信号画像化処理装置として，当初は高速フーリエ変換のための演算回路をASIC (Application Specific Integrated Circuit) 技術を用いて製作する計画であったが，実際の予算規模ではその実現が不可能であったので，高速性を追求することは断念し，フーリエ変換のためのプログラム，フーリエ変換の演算回路であるCPU等のエレクトロニクス系の構成などの検討を行った。これらの作業は，将来，別の機会に，ASIC技術に適用するための基礎作業であると考えたい。

§3 おわりに

本研究では，トモグラフィシステム要素技術の確立を目指して，光源となる超伝導ウイグラの動作特性を調べるとともに，チューンを維持するための条件を実験的に見出して電子ビームの制御技術を確立した。また，2.5 - 35 keVという広範囲の放射光を取り出すことの可能なゴルバチェンコ型2結晶型分光器や，試料を積載し回転させるためのトモグラフィ試料解析装置などを試作してその整備を行っている。試料透過後の放射光の2次元強度分布測定を行うための2次元計数型位置検出器については，当初計画していたような仕様のもは，現時点では実現が不可能であることが明らかになったため，次善の策としてX線 CCDカメラを用いることとした。本文では触れなかったが，ウイグラ放射光を分光器に導入すると分

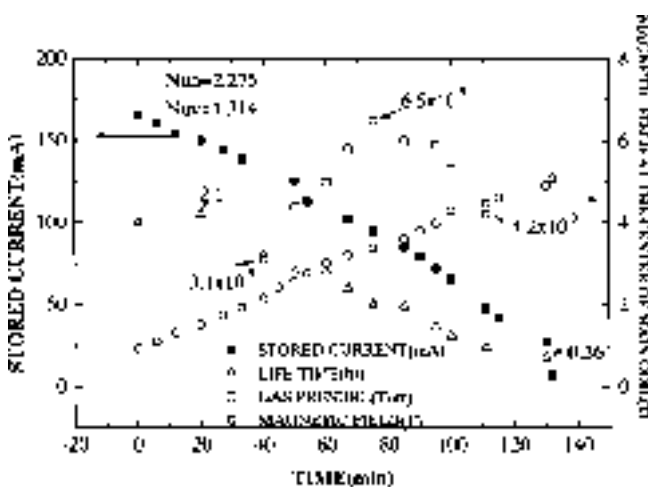


図13 750 MeV電子を蓄積中にウイグラ磁場を上昇させたときのチェンバー内真空圧力，電子ビーム量，ビーム寿命等の変化

光用結晶から多量のガス放出が生ずるため、現状ではリング本体への悪影響を避けるためには、長時間の連続使用は困難な状況である。ウィグラ磁場の増加によるチェンバーやビームライン内部の真空悪化への対策と併せて、分光器についても、真空排気能力の増強を図るとともに、短時間の照射を繰り返すことによって真空的に枯らしていく作業を急ぐ必要があると考えている。

住友電気工業(株)大阪製作所の関係者には、超伝導ウィグラの製作に関するばかりではなく、その運転に関しても多大なご協力を戴いた。また、電総研のリニアックグループには TERAS への電子入射に関して特段のご尽力を戴いた。さらに、TERASの利用者には、ウィグラ特性試験のためのマシンタイム確保にご協力を戴いた。以上の方々に、篤く感謝したい。

#### 参 考 文 献

- 1) 鈴木茂雄：第17章「トポグラフィとトモグラフィ」，シンクロトロン放射技術(富増多喜夫 編著)工業調査会，1990年．
- 2) 武田 徹，秋貞 雅祥：第19章「冠状動脈の差分造影診断法」，同上．
- 3) Sugiyama S., Ohgaki H., Mikado T., Noguchi T., Yamada K., Chiwaki M., Suzuki R., Koike M., Yamazaki T., and Tomimasu T. : Rev. Sci. Instrum. **63**, 313 (1993).
- 4) Sugiyama S., Ohgaki H., Mikado T., Yamada K., Chiwaki M., Suzuki R., Sei N., Ohdaira T., Noguchi T., Yamazaki T., Isojima S., Usami H., Suzawa C., Masuda T., Keishi T., and Hosoda Y. : Rev. Sci. Instrum. **66**, 1960 (1995).
- 5) Sugiyama S., Ohgaki H., Yamada K., Mikado T., Koike M., Yamazaki T., Isojima S., Suzawa C., and Keishi T. : J. Synchrotron Radiat. **5**, 437 (1998).

(1999.11.30受付)