

## 若狭湾エネルギー研究センター シンクロトロン の現状

### THE STATUS OF THE SYNCHROTRON OF THE WAKASA WAN ENERGY RESEARCH CENTER

栗田哲郎 \*A)、羽鳥聡 \*A)、林豊 \*A)、長崎真也 \*A)、廣戸慎 \*A)、小田桐哲也 \*A)、山田裕章 \*A)、山田和彦 \*A)、  
山口文良 \*A)、淀瀬雅夫 \*A)、清水雅也 \*A)、辻宏和 \*A)

Tetsuro Kurita\*<sup>A)</sup>, Satoshi Hatori<sup>A)</sup>, Yutaka Hayashi<sup>A)</sup>, Shinya Nagasaki<sup>A)</sup>, Shin Hiroro<sup>A)</sup>, Tetsuya Odagiri<sup>A)</sup>

Hiroaki Yamada<sup>A)</sup>, Kazuhiko Yamada<sup>A)</sup>, Fumiyoshi Yamaguchi<sup>A)</sup>, Masao Yodose<sup>A)</sup>, Masaya Shimizu<sup>A)</sup>

Hirokazu Tsuji<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>The Wakasa Wan Energy Research Center

#### Abstract

The accelerator complex at the Wakasa Wan Energy Research Center (WERC) consists of a 5 MV Schenckel type tandem accelerator and a 200 MeV proton synchrotron. Using this system, the element analysis, medical, biological and material sciences are performed. In 2013, experimental time amounted 1888 hours. The percentage of experiment time using the synchrotron was 49%. Also we report the correction of the vertical closed orbit distortion generated by alignment errors of bending magnets.

#### 1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設 (W-MAST) は、タンデム加速器および、それを入射器としたシンクロトロンによって、広範囲のエネルギーのイオンビーム (陽子: 数 MeV-200 MeV; He, C: 数 MeV/u-55 MeV/u) を様々な実験に供給している [1]。シンクロトロンからのビームは、がん治療の基礎研究および材料/生物/細胞への照射実験に利用されている。

2013 年は、大きなトラブルも無く実験時間も 1888 時間であった。シンクロトロンの使用率は例年通り全体の半分程度である。

さらに、シンクロトロンの垂直方向の閉軌道の歪み (COD) が以前と変化している事が発見された。偏向電磁石のアライメントエラーの変化し、垂直方向のキックが変化した事が原因と推測される。新たなキック源の推定と、補正結果を報告する。

#### 2. 運転状況

図 1 に近年のビーム別の実験時間 (加速器の調整/コンディショニングなどの時間を含めず、実験にビームを供給した時間) の推移を示す。

2008 年から、シンクロトロンの入射器であるタンデム加速器の耐電圧性能が劣化し、トラブル対応や修繕作業のために多くの時間が割かれ、実験時間が減る傾向にあった。2011 年 1 月から 2012 年 6 月まで、タンデム加速器の耐電圧を回復させるため、絶縁コラムの交換作業が行われ、長期間の運転の中断が発生した。運転は 2012 年度は 7 月から再開始された。2013 年は 3 月から運転を開始し、2014 年 1 月まで大きなトラブルがなく予定されたすべての実験にビームを供給できた。

実験時間はタンデム加速器の耐電圧性能の劣化が顕在化する前の 2007 年と同程度まで復活し、1888 時間であった。シンクロトロンを用いた実験の割合は 49% で、例年とほぼ同じ割合である。

図 2 に近年のシンクロトロンが使われた実験テーマ別の実験時間の推移を示す。

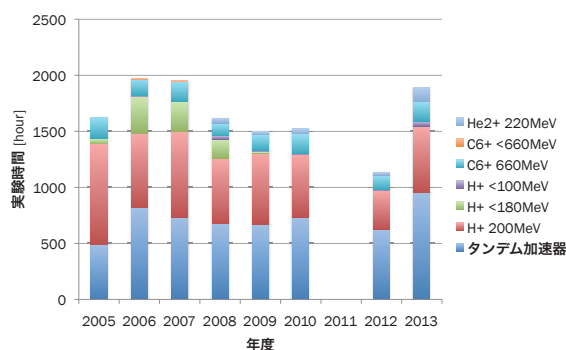


Figure 1: Trend of beam time categorized by ion and energy.

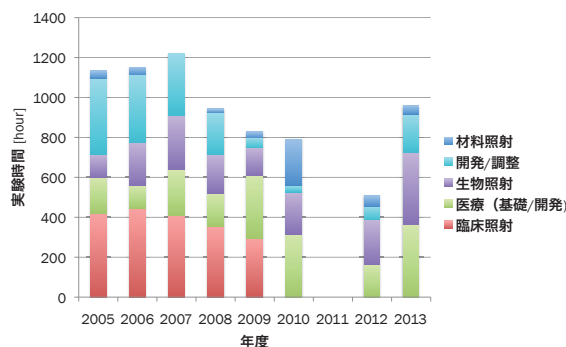


Figure 2: Trend of beam time of the synchrotron categorized by experimental interests.

\* tkurita@werc.or.jp

2009年までは、陽子線がん治療の臨床研究にもっとも多くの時間が使われた。それ以降は、イオンビーム育種を中心とした生物試料への照射やがん治療の基礎研究にビームを供給している。とくにイオンビーム育種への利用は年々増加している。割合としては数%程度であるが、2009年から人工衛星に搭載する機器の放射線環境化での試験に使われるようになってきている。

### 3. 偏向電磁石のアライメントエラーと垂直COD補正

#### 3.1 垂直方向のCODの状況

シンクロトロンの垂直方向の閉軌道の歪み(COD)を発生させるキック源として、出射セプタム電磁石 SM1, SM2 の電流フィードラインが発生させる静磁場と偏向電磁石に比例して変化するエラー磁場があることがわかっている。

これらのエラー磁場による COD を補正する為に、3台のステアラが用意されている。2台 (STV1, QD3V) は、静磁場を発生させる電磁石で、時間変化をしない SM1,2 に起因する COD の補正に用いている。もう一台 (QD2V) は、パターン運転を行える電磁石で、偏向電磁石に比例するエラー磁場による COD の補正に用いている。なお、QD2V と QD3V は四極電磁石 QD2, QD3 のバックレッグコイルとして設置されている。

COD の測定には、垂直方向のビーム位置の測定が行える静電型のビーム位置モニタが2台 (BPM3, BPM6) が用意されている。さらに、フラットベースでの COD の測定には、2台のワイヤー型プロファイルモニタ (PR1, PR2) のマルチターン入射直後の測定値をあわせて用いている。

2013年に、垂直 COD がこれまでと変化している事が発見された。SM1,2 に起因するエラー磁場は変化が無く、偏向電磁石に比例して変化するエラー磁場が変化していた。図3に SM1,2 およびすべての垂直ステアラを OFF にした時の、2006年と2013年のフラットベースの垂直 COD の違いを示す。また、2013年の COD を再現する QD2V のキックを最小自乗法に求めた物を図3の赤線に示す。QD2V では、2013年の COD をうまく再現できないので、QD2V では COD 補正が行えなくなった。

COD が変化した原因として考えられるのは、偏向電磁石のアライメントの変化である。次節で述べるように、偏向電磁石は、s 軸周りおよび x 軸周りの回転が、垂直方向のキックを発生する。

#### 3.2 偏向電磁石のスキュー角と垂直方向のキック角

図4のような、偏向電磁石が s 軸周りにピッチ角  $\theta_p$  および x 軸周りにチルト角  $\theta_t$  の微小な回転角を持って据え付けられていると考える。

このアライメントエラーによって発生する、x 方向の磁場成分は図5より、

$$B_0(\sin \theta_t \cos \phi' + \cos \theta_t \sin \theta_p \sin \phi') \quad (1)$$

となる。

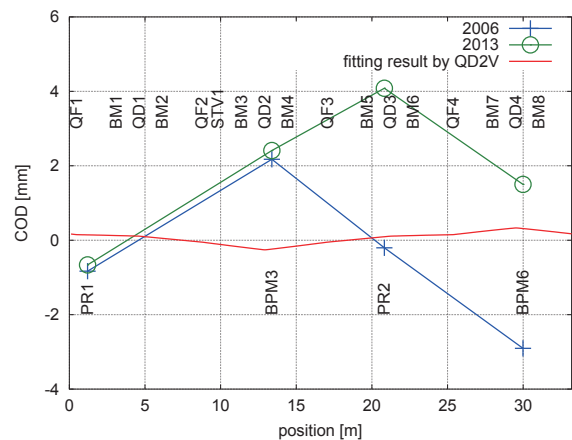


Figure 3: Change of vertical COD between the year of 2006 and 2003 (blue and green), and a fitting result by a kick at QD2V.

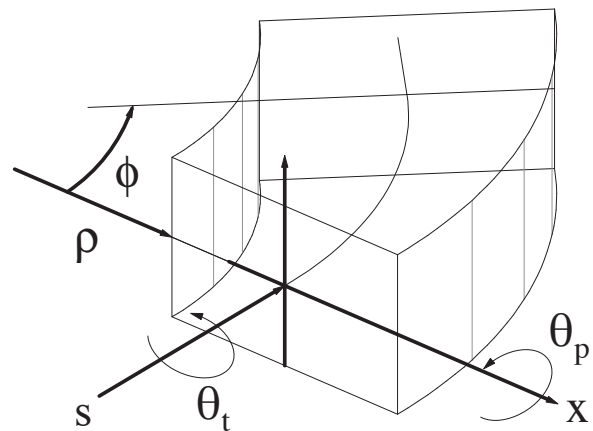


Figure 4: A tilt angle and a pitch angle of a bending magnet.

y 方向の運動方程式は、

$$\frac{d^2y}{ds^2} = -\frac{eB}{p} \quad (2)$$

$$= -\frac{eB_0(\sin \theta_t \cos \phi' + \cos \theta_t \sin \theta_p \sin \phi')}{eB_0\rho} \quad (3)$$

$$= -\frac{(\sin \theta_t \cos \phi' + \cos \theta_t \sin \theta_p \sin \phi')}{\rho} \quad (4)$$

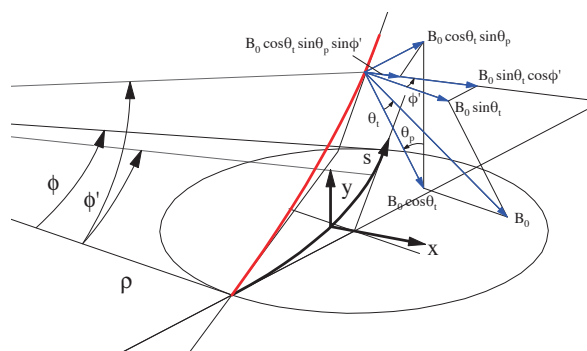


Figure 5: Magnetic field component generated by a tilt angle and a pitch angle of a bending magnet.

となる。

式(4)を0から $\phi\rho$ まで積分することによって、垂直方向のキック角が得られる。

$$\left. \frac{dy}{ds} \right|_{s=\rho\phi} = - \int_0^{\rho\phi} \frac{(\sin\theta_t \cos\phi' + \cos\theta_t \sin\theta_p \sin\phi')}{\rho} ds \quad (5)$$

$$= \cos\theta_t \sin\theta_p (\cos\theta - 1) - \sin\theta_t \sin\phi \quad (6)$$

### 3.3 偏向電磁石のアライメントの変化による COD の変化の再現

偏向電磁石のアライメントエラーが変化している事を確認する為に、偏向電磁石上面に設置されているアライメント用基準板のレベルの差を測定した。基準板はビーム軸に沿って3つ設置されており、3つのレベルの違いから偏向電磁石の回転角を評価できる。測定は、光学マイクロメータ付きオートレベルを用いて行った。

図6に上流の基準板からの中央部、下流部の高さを示す。また、2006年にレーザートラッカーを用いて測定された結果もあわせて示す。

BM1,3,5に大きな変化がみられる。BM1,3,5のキック角の差から得られるCODと、2006年と2013年のCODの差分の比較を図7に示す。BM1,3,5のキック角の変化から、おおよそのCODの変化を再現することができるので、偏向電磁石のアライメントの変化がCODが変化した原因であることを強く示唆している。

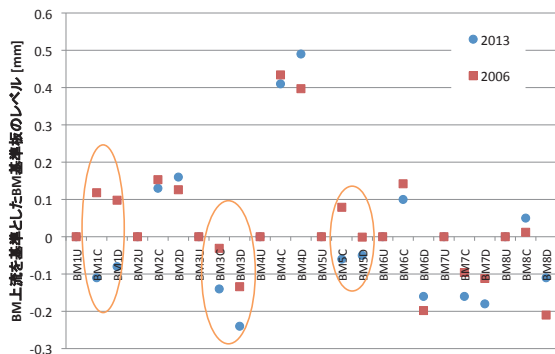


Figure 6: Changes of levels in Bending Magnets between 2006 and 2013.

### 3.4 COD 補正

図3に示した通り、QD2Vでは、現状のCODを補正することができないので、ステアラを新設する必要がある。検討の結果、図9のように四極電磁石QD1の位置でのキックで2013年のCODを再現できる。すなわち、QD1にバックレグコイルを巻いてステアラを新設し(QD1Vとする)、QD2Vに接続している電源をQD1Vに接続することによって、COD補正を行うことにした。次のような手順でCOD補正を行った。

#### 1. SM1,2からの漏れ磁場の補正

- フラットベースでSM1,2をONにした時のCODの変化分を、STV1, QD1V, QD3Vで補正する。

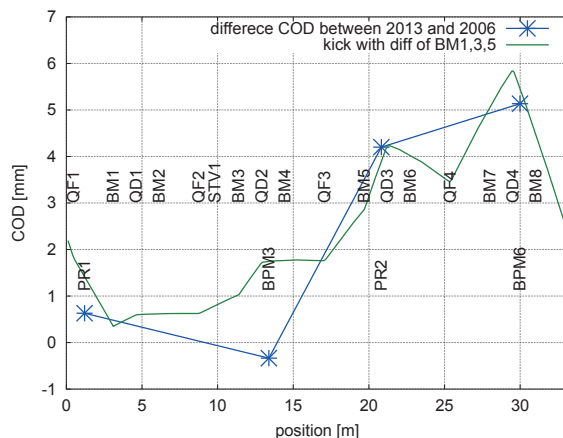


Figure 7: The difference of COD between the year of 2006 and 2013 (blue) and the COD generated by changes of skew of BM1,3,5 (green).

#### 2. 偏向電磁石に比例するエラー磁場の補正

- SM1,2がOFFにして、フラットベースで偏向電磁石と比例するエラー磁場によるCODをQD1Vで補正する。フラットトップでの値は、フラットベースで求めた値を $B\rho$ 比でスケールすることによって得る。

#### 3. 手順2で求めたQD1Vのパターンに手順1で求めたQD1Vのオフセット成分を足し合わせる。

Proton 10MeV入射 200MeV出射におけるCOD補正の結果を示す。まず、SM1,2からのエラー磁場の補正結果を図8に示す。図8の青線に射出セプタム電磁石SM1,2をON/OFFしたときのCOD差分を示す。すなわちSM1,2からのエラー磁場で発生するCOD成分を表す。緑線は最小自乗法によって、SM1,2が発生するCODを再現する垂直ステアラSTV1, QD1V, QD3Vのキック角を求めた物である。赤線はCODの補正をおこなった結果である。

図9は手順1の偏向電磁石に比例するエラー磁場の補正結果である。青線がCODの測定値であり、緑線が最小自乗法によってCODの測定値(青線)をもっとも近いCODを与えるQD1Vのキック角を求めた結果である。この逆極性のキックをQD1Vに与えることによって補正した結果が赤線である。

最終的なCODの補正結果を図10に示す。青線がフラットベースで補正が無い場合のCODである。手順1によるSM1,2にエラー磁場を補正すると、赤線になり、さらに手順2によって偏向電磁石に比例する成分を補正すると水色線になる。CODは約2mm以内に補正することができた。

QD1Vのフラットトップでの値は、手順2で求めた値を $B\rho$ に比でスケールした値に、手順1で求めたSM1,2のエラー磁場を補正するオフセット成分を足し合わせた。図11にBPM3,6の時間変化を示す。加速に従って変化していくことはない、フラットベースからフラットトップにかけて期待通りの補正が行われていることを示している。

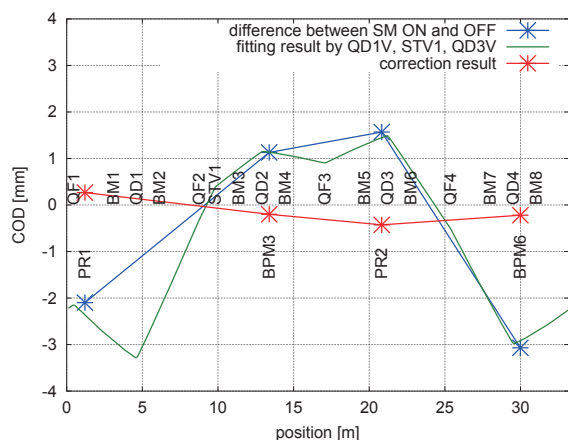


Figure 8: Correction of COD due to the error magnetic field generated by SM1,2.

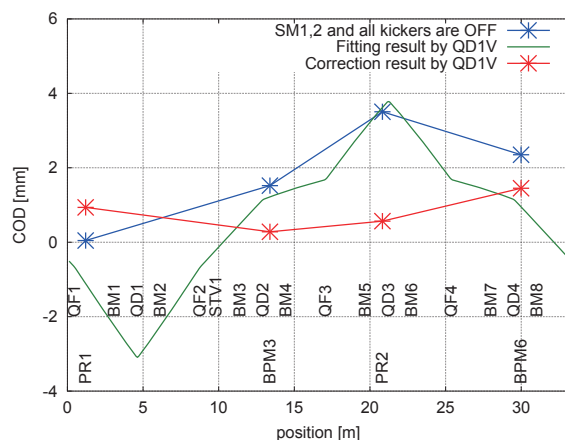


Figure 9: Correction of COD due to the error magnetic field generated by SM1,2 and all kickers are OFF.

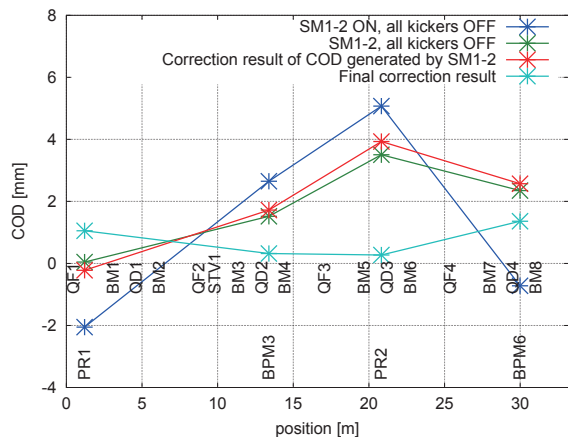


Figure 10: Correction of COD due to the error magnetic field generated from the septum magnet SM1 and SM2.

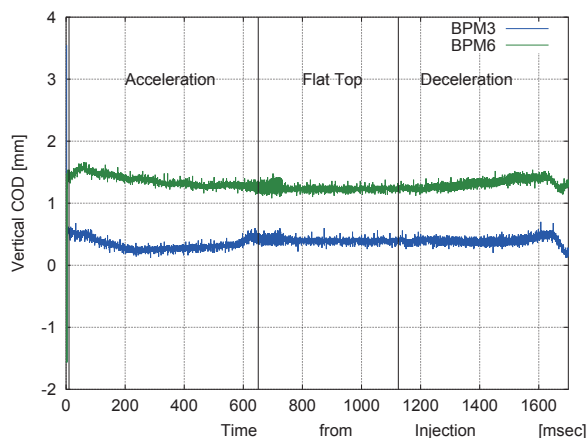


Figure 11: Signals of BPM3 and BPM6 varying in time.

#### 4. まとめ

2013 年は、入射器であるタンデム加速器が定格の 5MV を安定して維持され、大きなトラブルも無く、実験時間は最盛期の 2007 年と同程度まで回復した。偏向電磁石のアライメントが変化し、垂直 COD が変化した。補正を行う為に四極電磁石 QD1V にバックレグコイルを巻いて垂直ステアラを新設した。COD 補正により、COD は 2mm 以内に抑えることができた。

#### 参考文献

- [1] S. Hatori et al, "Developments and applications of accelerator system at The Wakasa Wan Energy Research Center" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B241 (2005) 862.