

The Status of the Synchrotron of the Wakasa-wan Energy Research Center

Tetsuro Kurita[#], Satoshi Hatori, Sadayoshi Fumumoto, Yutaka Hayashi, Hironari Kagawa, Shinya Nagasaki, Yoshinori Nakata, Tetsuya Odagiri, Mark Shimada, Hiroaki Yamada, Fumiishi Yamaguchi, Masao Yodose, Eisuke Minehara
 The Wakasa-wan Energy Research Center
 64-52-1, Nagatani, Tsuruga, Fukui, 914-0135 JAPAN

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, clinical trial of cancer therapy and bio and material sciences are performed. We report the operation status and the development activity of the synchrotron of the accelerator system.

若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロンの現状

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構成されている。シンクロトロンからは、Proton で 200MeV、重イオンで 55MeV/u までの広範囲のエネルギーのイオンビームを、様々な実験に供給している^[1]。

昨年度まで、シンクロトロンを用いた主要実験課題は陽子線がん治療の臨床研究であった。その任は福井県福井市に建設される専用施設に引き継がれた。若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンは引き続き、材料/生物/細胞への Proton/He/炭素イオンの照射に活発に利用されている。

2. 2009 年度の運転状況

2009 年度は、タンデム加速器の整備に例年より時間を費やし、4 月末から 11 月までのおよそ 7 ヶ月間の実験にビームを供給した。

実験時間の統計を図 1 に示す。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総運転時間は約 1500 時間であった。整備の為にビームを供給できた期間は短かったが、週休 2 日で、夜間は加速器の調整/コンディショニングを行う体制のもと、7 ヶ月間ほぼフル稼働したことになる。そのうち、シンクロトロンからビームが供給された割合は 55%であった。

シンクロトロンからのビームのテーマ別の統計(図 2)では、医療に関連した実験の割合が最も多い。陽子線がん治療の臨床研究に用いられた割合は 36%であった。単独の実験課題としてはもっとも多い。しかし、一日に複数の実験を行うスケジューリングにより、臨床研究以外のビーム利用も多く行われている。

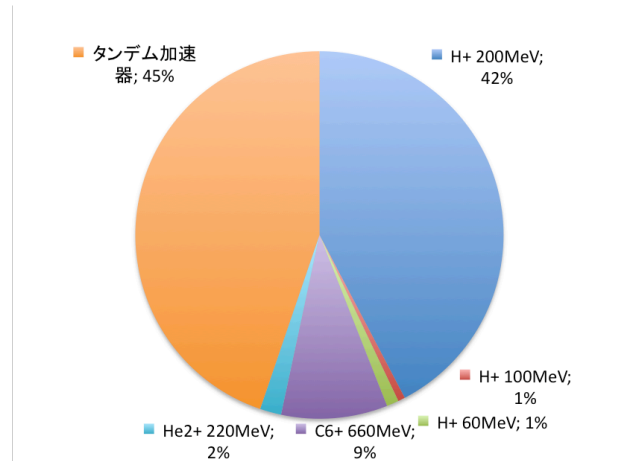


図 1: 加速器施設全体のビーム種別ごとの実験時間の統計

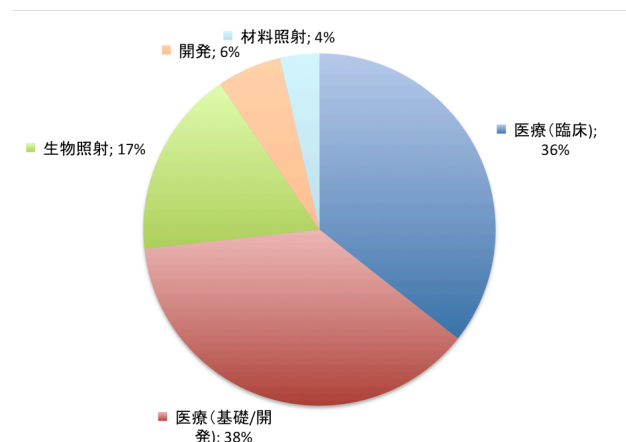


図 2: シンクロトロンのテーマ別の実験時間の統計

[#] tkurita@werc.or.jp

3. 真空系の改善

シンクロトロン内の真空系は、建設当初より 11 台のイオンポンプ(140L/min)と 2 台のターボ分子ポンプ(700L/min)によって構成されており、平均真空度は、 8.6×10^{-6} Pa 程度であった。炭素イオンの加速の際には真空度が十分ではなく、残留ガスとの衝突による荷電交換が、ビームロスの原因になっていると考えている。

図 3 に C^{6+} を 25MeV から 660MeV まで加速したときの、リング内の電荷の変化を示す。加速初期で大きくビームをロスしている。真空のビームへの影響を評価する為に、荷電変換によって決まるビームのライフタイム τ を表す次の経験式^[2]を用いた。

$$\tau = \frac{1.04 \times 10^{-27}}{(\sigma_c + \sigma_L)\beta P} \quad [\text{sec}]$$

$$\sigma_c = 6.55 \times 10^{-28} q^3 \beta^{-6} \quad [\text{cm}^2]$$

$$\sigma_L = 5.22 \times 10^{-23} (Z - q)\beta^{-2} (3.13 \times 10^5 q^2 - \beta^2) \quad [\text{cm}^2]$$

ここで、 σ_c および σ_L は、electron capture および electron loss の断面積である。P[Torr]は真空度である。

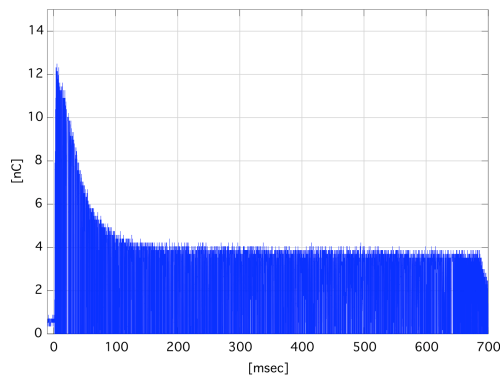


図 3 : C^{6+} 25MeV を 660MeV まで加速したときのリング内の電荷

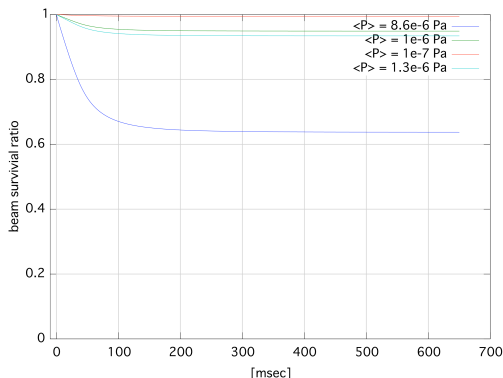


図 4 : C^{6+} 25MeV を 660MeV まで加速した時の、残留ガスとの荷電変換によるビームロスのシミュレーション

この式を使い、いくつかの真空度に対して加速に従って生き残るビームの割合のシミュレーションをおこなった(図 4)。現状の真空度 8.6×10^{-6} Pa の場合は 65%程度までビームをロスする結果になった。したがって、真空度が炭素ビームの加速初期のビームロスの大きな原因になっていると考えられる。そこで、 1×10^{-6} Pa 程度を目標に、真空度を向上させる対策を行った。

図 5 に対策前後の真空度分布を示す。4 つのイオンゲージの測定値とイオンポンプの電流量より評価された真空度をプロットした。

ビームの入出射部分(ESI/ESD チャンバー)には、700L/min のターボ分子ポンプで排気が行われているにも関わらず、もっとも真空度が悪い。全体の真空度悪化の原因になっていると考えられる。ESI/ESD チャンバーは静電セプトム電極およびそれに関連した機器のため内面積が大きい。また、O-ring として耐放射線性は高いが、アウトガスの多いニトリルゴムが使用されていた。

そこで、真空度向上の為に以下の対策を行った。

- O-ring 材質の変更
ニトリルゴムから耐放射線性の高いバイトンである日本バルカーD0675^[3]に変更した。
- ポンプの増強
ESI/ESD チャンバーに設置されているイオンポンプ (140L/min) を、クライオポンプ (1400L/min)に置き換えた。
- ESI/ESD チャンバーのベーク
O-ring シールなので 110°C程度であるが、ベークを行った。

以上の処置の結果、シンクロトロン内の平均真空度は 8.2×10^{-7} Pa まで向上した。しかし、ビームラインに接続すると、ビームラインの真空度の影響で 1.3×10^{-6} Pa まで悪化する。この真空度で、シミュレーション(図 4)によれば真空度に起因するビームロスは 95%程度まで改善される。

今年度は、炭素イオンの加速は 9 月末から予定されており、真空度向上のビーム電流への評価が待たれている。

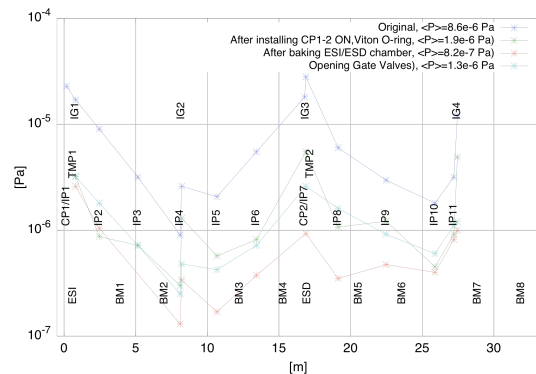


図 5 : シンクロトロン内の真空度分布

4. カレントモニタの開発

若狭湾エネルギー研究センターでは、負性抵抗回路を用いたカレントモニタの開発を行ってきた^[4,5]。これは、オペアンプを用いた負性抵抗回路によって、Current Transformer (CT)の低域カットオフ周波数を0Hzまで下げ、ビームの直流成分の測定が可能にするものである。

測定原理の実証には速やかに成功したが、実際のインストールおよび運用には多くの障害があった。パターン運転される周囲の電磁石の漏れ磁場が検出されるので、ケイ素鋼板を張り合わせた磁気シールドでピックアップコイルを多い、出力信号に重畳する漏れ磁場信号を減衰させた。さらに、DSPを用い

た信号処理回路で漏れ磁場信号を記録し、ビームが入射している時の信号から差し引く機能を設けた。

また、回路の特性が周囲温度の影響を受けるため、ペDESTALおよび時定数の安定性に問題があった。そこで、三光社製のペルチェ素子を用いたNIM回路モジュール用の恒温槽を導入した。

図6のように負性抵抗回路を恒温槽内に納めることにより、ペDESTAL/時定数の安定化が行えた。図7に恒温槽導入前のテストパルス(1sec幅の矩形波)を測定したときの波形を示す。ペDESTALが不安定である。恒温槽内に負性抵抗回路を納めると、図8のようにペDESTALが安定した事が確認できる。

これにより、測定精度が時定数の調整精度、およそ1~2%程度まで向上した。

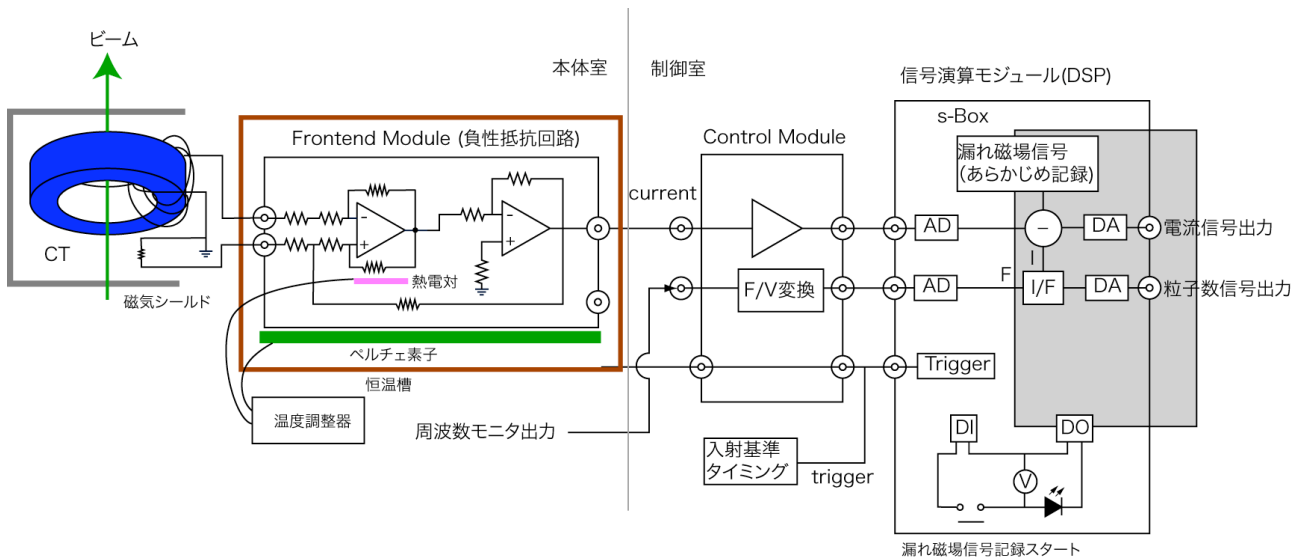


図 6: 負性抵抗回路を用いたカレントモニタ

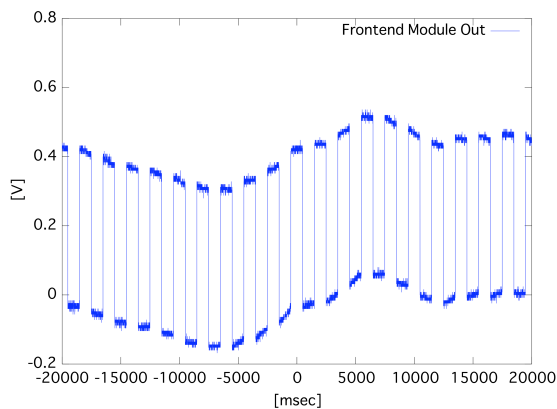


図 7: 恒温槽導入前のテストパルスの測定

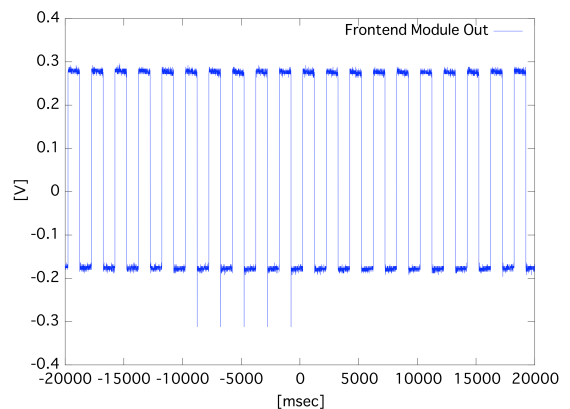


図 8: 恒温槽導入後のテストパルスの測定

