

RF 周波数を変更した蓄積リング運転パターンの確立

岩崎 能尊

九州シンクロトロン光研究センター

SAGA-LS 電子蓄積リングでは近年、水平方向のビーム軌道歪み (Closed Orbit Distortion : COD) 補正に必要なステアリング電磁石の強度が徐々に増加した。2 台の超伝導ウィグラーの励磁に伴い COD 補正に必要なステアリング強度は更に増加したため、COD 補正に用いるステアリング電磁石電源の一部が定格を超える状況となった。その結果、水平方向の COD は規定値を超える状況が生じた。水平方向 COD の逸脱量はユーザー運転に支障のない範囲内ではあるものの、今後 COD は更に増加する可能性があった。リング RF 周波数を約 22.1 kHz 下げると水平方向 COD 補正に必要なステアリング電磁石強度は最適化され、COD 補正に必要なステアリング電磁石強度は大幅に削減される。しかしながら、RF 周波数を 22.1 kHz 下げた蓄積リングの運転においてはビーム加速時のロス量が多く、蓄積ビーム電流 300 mA のユーザー運転は困難であった。加速時におけるビームロスメカニズムについては不明な点が多い。しかし、ビームロスの主要因は加速途中におけるベータートロンチェーンの変化であると仮定しマシンスタディを遂行した。マシンスタディにおいては従来の RF 周波数における加速途中のベータートロンチェーンを計測し、その動作点を通過するように RF 周波数を変更した状態でのランプアップパターン (リング電磁石電源励磁パターン) を再構築した。更にその動作点近傍でランプアップパターンを最適化した。その結果、安定して 300 mA 以上の蓄積ビームを加速するランプアップパターンが見つかった。RF 周波数を変更した蓄積リングの運転パターンを確立した。

RF周波数を変更した蓄積リング運転パターンの確立

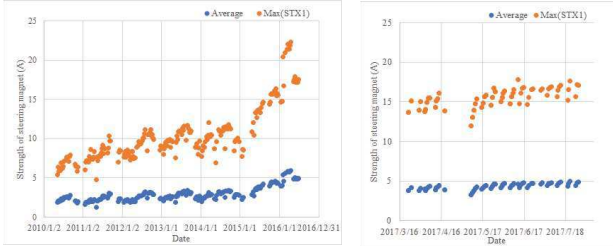
岩崎 能尊, 高林 雄一, 金安 達夫, 江田 茂

九州シンクロトロン光研究センター

SAGA Light Source (SAGA-LS)電子蓄積リングにはリニアックよりエネルギー255 MeVまで加速された電子が入射される。約300 mA蓄積後、リング内で1.4 GeVまで4分間でエネルギーランプアップする。閉軌道歪み(COD)補正は、1.4 GeV到達時および、超伝導ウィグラーの励磁後に行っている。ここ数年、水平方向COD補正に必要なステアリング電磁石の強度が大幅に上昇し、一部のステアリング電磁石電源は定格に達するようになった。その結果、水平方向のCODは規定値を満たさない状況となった。リングRF周波数を約22.1 kHz下げた結果、水平方向ステアリング強度は大幅に削減された。しかしながら、RF周波数を22.1 kHz下げたリングの運転では、ランプアップ時に頻繁にビームの全ロスを生じた。問題を解決すべく、マシンスタディーを行った。

水平方向ステアリング強度の経年変化

超伝導ウィグラー励磁前に行う水平方向COD補正に必要なステアリング電磁石強度変化

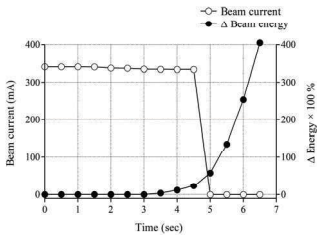


経年変化 (金曜日のユーザー運転時)

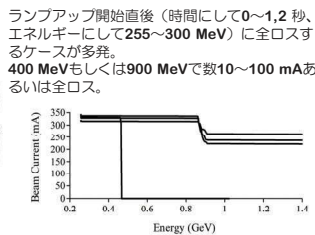
最近の様子 (日々の変動)

COD補正に必要な水平方向ステアリング強度が年々上昇した。特に2015年から2016年にかけての上昇が著しかった。季節変動としては夏場に上昇し、越冬にかけては週末にかけて上昇する傾向がある。

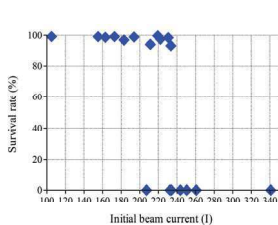
RF周波数を変更したランプアップ時のビームロス状況



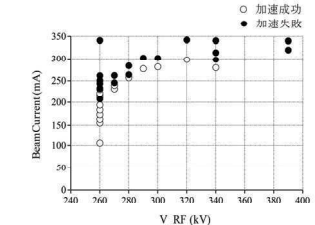
a) 加速直後に瞬間的なビーム全ロス



b) 高エネルギーでもビームロス



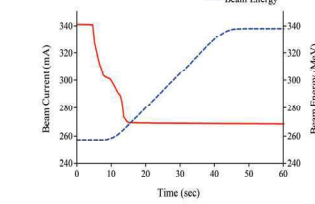
c) 加速開始時のビーム電流量依存性



d) RF電圧依存性

| ランプアップ速度 (MeV/s) | E = 338 MeVまでの生存率 (%) |
|------------------|-----------------------|
| 1.1 (300) | 91.7 |
| 2.3 (150) | 65.0 |
| 4.5 (75) | 73.3 |
| 8.5 (40) | 77.3 |
| 67.6 (5) *通常速度 | 0.0 |

e) ランプアップ速度と生存率の関係

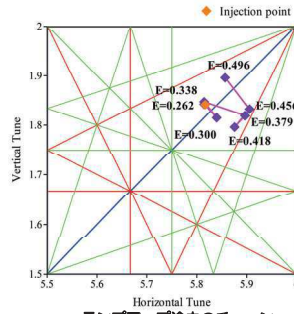


f) ゆっくりとしたランプアップでもビームロス (8.5 MeV/s)

RF周波数を通常使用している499.87060 MHzから499.84849 MHzに変更 ($\Delta RF = 22.1$ kHz) した蓄積リングの運転において、蓄積ビーム電流300 mAではランプアップ時に頻繁にビームロスを生じた。

- ランプアップ直後の瞬間的なビームロス (ほとんどがこのケース)
- ランプアップ開始直後にビーム全ロスを免れても、E= 400 MeV もしくは900 MeV付近でロス
- ランプアップ直後のビーム全ロスには強い蓄積ビーム電流量依存性がある。ビーム電流200 mA程度までは安定して加速できるものの、240 mA以上になるとほとんど成功しない。
- RF電圧にも依存し、空洞電圧を高めると蓄積ビーム電流量の閾値を上げる効果が見られる。
- ランプアップ速度を変えると生存率 (加速後ビーム電流/加速前ビーム電流) が変化する。
- しかし、通常のエネルギー338 MeVまでのランプアップ速度である67.6 MeV/sから8倍遅くした8.5 MeV/sにしてもビームロスを生じる。

ランプアップ途中のチューン



ランプアップ途中のチューン (赤線: 3次, 緑線: 4次の共鳴)

ランプアップを途中で停止し、チューンの計測を行った。

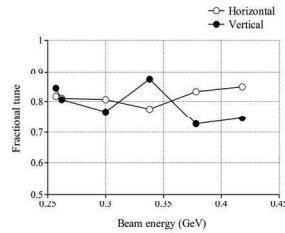
400 MeV、900 MeV付近では3次の共鳴に近い動作点を通過していることが判った。

400 MeV付近と900 MeV付近の動作点を3次の共鳴から遠ざける方向で4極電磁石電源のランプアップパターンを調整したところ、このエネルギーでのビームロスは解決された。

しかし、加速開始直後のチューン変動は僅かであるにも関わらず、ビームの全ロスを生じる。

ランプアップを途中で停止し、チューンが動かないようにランプアップパターンを調整してもランプアップ直後のビーム全ロスは頻発した。

ランプアップパターンの調整



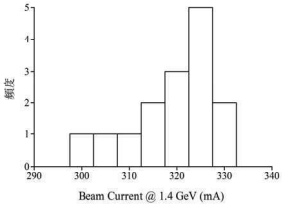
現在のRF周波数でのランプアップ途中のチューン

| エネルギー | 262 MeV | 300 MeV | 338 MeV |
|------------------|---------|---------|---------|
| $\Delta QF1$ (A) | -0.34 | -0.57 | -0.2 |
| $\Delta QD1$ (A) | -0.54 | -0.61 | -0.2 |

調整後のランプアップパターンの差

3つある4極電磁石電源ファミリーのうち、QF1とQD1のランプアップパターン調整前後の差

現在のRF周波数におけるランプアップ途中におけるチューンを計測した。RF周波数を変更した際のランプアップ途中におけるチューンを、現在のRF周波数のチューンに合うように4極電磁石ランプアップパターンを調整した。その結果、加速開始直後のビーム全ロスはなくなった。しかし、ビームのロス量は多かったため、試行錯誤の方法によりランプアップパターンの微調整を繰り返した。



ランプアップパターン調整後の1.4 GeV到達時の蓄積ビーム電流

ランプアップパターンの調整後、試行を繰り返し、ランプアップの成功率調査を行った。(加速開始時のビーム電流は335 mA)

試行回数: 15
平均: 319.4 mA (平均生存率: 95.3%)
最大: 330.5 mA
最小: 297.8 mA

同じランプアップパターンにおいても、試行毎にビームロス量のバラつきがある。その差は最大で30 mA程度。しかし、最低限ユーザー運転で使えるランプアップパターンが見つかった。

まとめと課題

- 年々、水平方向COD補正に必要なステアリング強度が上昇した。特に近年、急激に増加した。その結果、一部のステアリング電源は定格に達し、COD補正の基準値を満たさなくなった。
- RF周波数を22.1 kHz下げたところ、ステアリング強度は大幅に削減された。しかし、RF周波数を下げると、大電流 (300 mA) でのランプアップが困難となった。
- ビームロスは加速直後もしくは、400 MeV、900 MeV付近で生じた。
- ビームロスには、蓄積ビーム電流量依存性、エネルギー依存性、RF電圧依存性がある。
- 入射エネルギーから338 MeVまでのチューンを従来のチューンに合わせたのち、試行錯誤による微調整を行ったところ、加速直後のビーム全ロスはなくなった。400 MeV、900 MeV付近では3次の共鳴から遠ざけることでビームロスが回避された。

課題

- なぜ、加速直後にビームロスが生じるのか、そのメカニズム。
- なぜ、ステアリング強度が上昇したのか、その原因。