

3 GeV 次世代放射光施設の加速器インターロックシステム

ACCELERATOR INTERLOCK SYSTEM FOR 3 GeV SYNCHROTRON LIGHT SOURCE

保坂勇志^{#,A)}, 安積隆夫^{A)}, 西森信行^{A)}, 糸賀俊朗^{B,C,A)}, 大石真也^{B,C,A)}, 大島隆^{B,C,A)}, 近藤力^{B,C,A)}, 櫻井辰幸^{B,C,A)}, 小路正純^{B,C,A)}, 田村和宏^{B,C,A)}, 深見健司^{B,C,A)}, 渡部貴宏^{B,C,A)}, 青木毅^{B,A)}, 佐治超爾^{B,A)}, 高野史郎^{B,A)}, 谷内友希子^{B,A)}, 増田剛正^{B,A)}, 稲垣隆宏^{C,B)}, 高橋直^{C,B)}, 前坂比呂和^{C,B)}, 福井達^{C)}, 田中均^{C)}
 Yuji Hosaka^{#,A)}, Takao Asaka^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Toshiro Itoga^{B,C,A)}, Masaya Oishi^{B,C,A)}, Takashi Ohshima^{B,C,A)}, Chikara Kondo^{B,C,A)}, Tatsuyuki Sakurai^{B,C,A)}, Masazumi Shoji^{B,C,A)}, Kazuhiro Tamura^{B,C,A)}, Kenji Fukami^{B,C,A)}, Takahiro Watanabe^{B,C,A)}, Tsuyoshi Aoki^{B,A)}, Choji Saji^{B,A)}, Shiro Takano^{B,A)}, Yukiko Taniuchi^{B,A)}, Takemasa Masuda^{B,A)}, Takahiro Inagaki^{C,B)}, Sunao Takahashi^{C,B)}, Hirokazu Maesaka^{C,B)}, Toru Fukui^{C)}, Hitoshi Tanaka^{C)}

^{A)} National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{C)} RIKEN

Abstract

A new 3 GeV synchrotron light source facility “NanoTerasu” is being constructed by QST and Photon Science Innovation Center in Aobayama New Campus of Tohoku University. This facility consists of a low emittance 3 GeV electron storage ring and a full energy injector linac, and will provide highly coherent and brilliant synchrotron radiation in the soft and tender X-ray region from the storage ring. In order to ensure safe and reliable operation of the synchrotron facility for 6000 hours per year, two interlock systems, safety interlock and device interlock have been constructed. The device interlock system consists of several individual interlock subsystems, such as vacuum interlock, magnet interlock, and RF interlock. The overall accelerator interlock system operates properly by exchanging the alert and status signals among the interlock subsystems. In this paper, the scheme of the accelerator interlock system is introduced.

1. はじめに

東北大学青葉山新キャンパスにて次世代放射光施設 NanoTerasu (ナノテラス) の建設が進んでいる[1-3]。日本では 1997 年に世界最高レベルの硬 X 線領域の放射光を生成可能な大型放射光施設 SPring-8 が供用開始されて以降、軟 X 線領域に強みを持つ大規模な放射光施設の建設がなく、海外の放射光施設との差をつけられていた。NanoTerasu はエネルギー 3 GeV、蓄積電流 400 mA の電子ビームを用いて軟 X 線・テンダー X 線領域の高コヒーレンス・高輝度の放射光を提供し、日本の軟 X

線・テンダー X 線放射光を用いた研究開発を促進させる。ユーザー利用運転の開始は 2024 年 4 月を見込んでいる。

機器の保護及び人の安全を担保した運転を行うため、加速器構成機器の状態を監視するインターロックシステムが必要である。システムの具体的な監視対象は、真空容器内の圧力や温度、電磁石電源の状態、高周波加速空洞の状態、冷却水の流量、放射線安全など多岐にわたる。これらの機器の状態に基づき、施設のインターロック制御を行う。

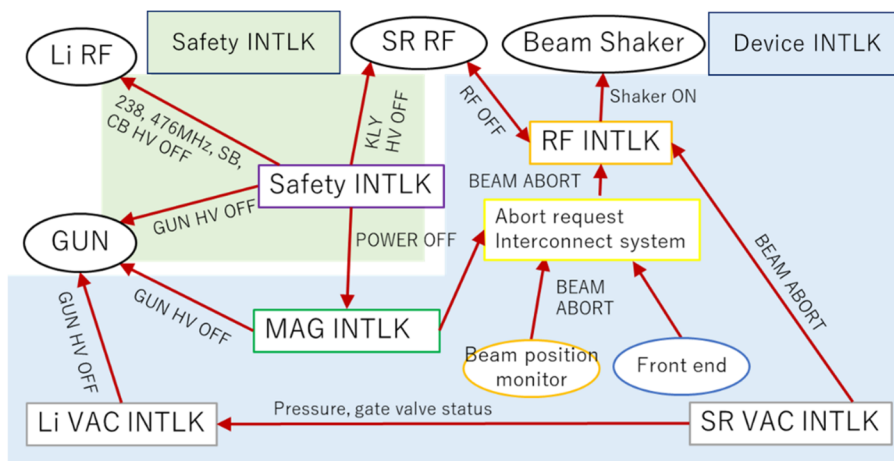


Figure 1: Schematic block diagram of NanoTerasu accelerator interlock system.

[#] hosaka.yuji@qst.go.jp

2. NanoTerasu インターロックシステム概略

NanoTerasu のインターロック(INTLK)システムは、人的安全を担う安全インターロック(Safety INTLK)系と、加速器機器を損傷から守る機器保護インターロック(Device INTLK)系に大きく分けられる。Figure 1 に NanoTerasu 加速器インターロックシステムの概略を示す。

機器保護インターロックでは以下の 3 つのインターロックサブシステムを設け、各システム間で信号を取り合うことで加速器全体の機器保護を実現する。

- RF インターロック
- 真空(VAC)インターロック
- 電磁石(MAG)インターロック

機器の状態を常に監視し、条件に応じて電子銃(GUN)やクライストロン(KLY)の高電圧(HV) OFF、蓄積ビーム廃棄(BEAM ABORT)、電磁石電源停止などの安全操作を行う。

NanoTerasu の加速器インターロックシステムの特徴としては、400 mA の大電流蓄積ビームを高速で安全に廃棄するためビーム廃棄要求伝達システム(ARIS: Abort Request Interconnect System)の導入、リング型二重ループの光ケーブル通信による冗長性と、予備光ケーブル敷設による速やかな復旧手段の確保などが挙げられる。

3. 安全インターロック

安全インターロックは漏洩放射線モニタ、トンネル遮蔽扉、非常停止ボタンなどの状態を監視し、人的安全の確保のため異常時には電子ビームや電磁石通電の停止を行う。NanoTerasu の加速器は、3 GeV 線型加速器(Li: Linac)と、蓄積リング(SR: Storage Ring)から構成される。Li トンネルと SR トンネルはコンクリート壁で分かれており、別の放射線装置室となる。2 つの放射線装置室に対しエリアごとにプログラマブルロジックコントローラ(PLC)を搭載した制御盤を設置し、機器の状態を監視する。安全インターロックシステムのインターロック動作を Table 1 に、概略ブロック図を Fig. 2 に示す。

放射線モニタで規定以上の漏洩放射線を検知した時や、電子ビーム電荷積算計で規定以上の電荷が入射された時には GUN HV OFF 指令を出し電子ビームの入射を停止する。加速器トンネル遮蔽扉が開状態の時や、入退室パーソナルキーが不足の時には GUN HV OFF に加えてそのエリアの KLY や高周波増幅器の HV OFF し

高周波空洞への高周波入力を停止する。非常停止ボタン押下時には上記の GUN HV OFF、KLY HV OFF に加えてエリア別に全ての電磁石の通電を停止する。中央制御室の全停止ボタン押下時には、Li と SR 両エリアの上記機器を全て停止する。

その他、SR では実験ホールビームラインの放射線安全のため、ビームラインハッチからの非常停止信号や放射光のビームシャッター状態を取得し、ビームシャッター開閉の許可/不許可を与える。

放射線安全管理室に安全インターロック盤を置き、ここにそれぞれ GUN, Li, SR の放射線管理を担う PLC 3 台を設置する。安全インターロック盤にはこれとは別にデータ収集用 PLC が設置され、EtherCAT [4]通信により PC サーバー(上位系)へデータを送信する。Li, SR の各所の状態収集とインターロック出力のため、Li クライストロンギャラリに 2 台、SR 内周通路に 2 台、合計で 4 台の PLC を設置する。これらの PLC はそれぞれが信号処理を行い安全インターロック盤の PLC に情報を伝送する。この伝送には長距離伝送に向く光ファイバーを用いた CC-Link IE Control [5]を用いる。リング型二重ループ接続の CC-Link IE Control は、接続が 1 箇所切断されても通信が続くため冗長性が高いことが特徴である。

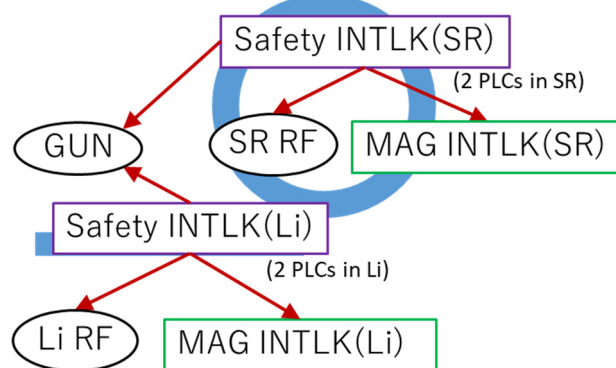


Figure 2: Schematic diagram of safety INTLK system.

4. RF インターロック

RF インターロックは蓄積リングのビーム廃棄要求を一度取りまとめた上で、RF 出力 OFF により蓄積電子ビームを廃棄する。Figure 3 に RF インターロックシステムの概

Table 1: Operation Chart of Safety INTLK

Alert device	Alarm status	GUN	Li RF(KLY)	Li MAG	SR RF(KLY)	SR MAG
Li 放射線モニタ,電荷積算計, Li GUN Alarm ダンプ電磁石		OFF				
Li トンネル扉,入退キー	Li 非常状態	OFF	OFF			
Li 非常停止ボタン	Li 非常停止	OFF	OFF	OFF		
SR 放射線モニタ	SR GUN Alarm	OFF(Li,SR 接続時)				
SR トンネル扉,入退キー	SR 非常状態	OFF(Li,SR 接続時)				OFF
SR 非常停止ボタン	SR 非常停止	OFF(Li,SR 接続時)				OFF
全停止ボタン	全停止	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

略ブロック図を示す。蓄積ビーム廃棄時には電子ビーム及びその放射光により真空チェンバ等が損傷しないように、高速なビーム廃棄処理が必要である。要求されるビーム廃棄までの処理時間を Table 2 に示す。

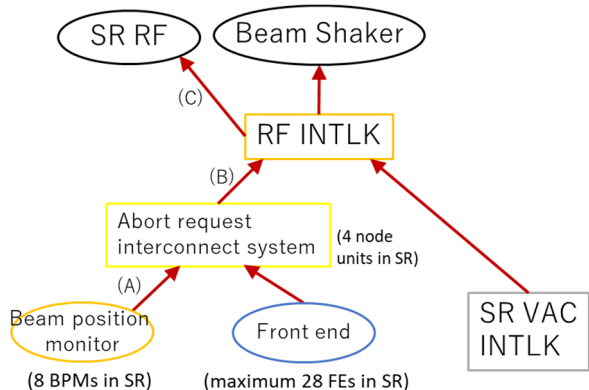


Figure 3: Schematic diagram of RF INTLK system.

ビーム廃棄指令は、Beam position monitor (BPM)で軌道変動を検知した時及び Front-end (FE)で異常を検知した時にも発報する。これらのビーム廃棄要求を中継する ARIS はビーム廃棄要求の高速伝達システムである。BPM 及び FE からのビーム廃棄要求時は放射光による損傷を避けるため 1-2 ms 以内のビーム廃棄が必要であり、かつ、これらの機器は SR の各所に点在している。ARIS は SR 4 箇所内周通路ノードユニットを設置し、BPM 及び FE からのビーム廃棄要求を集約して、光通信トランシーバーを用いて RF インターロックユニットへ高速で伝達する。RF インターロックユニットの直近には各ノードからの光通信を受け取り伝達するための RF ステーションノードユニットを設置する。この ARIS による伝達は、1-2 ms の要求時間に対し十分無視できる速度が必要であるため、10 μ s 以内に行う。

Table 2 に示すように蓄積ビームは RF 出力 OFF から 500 μ s 程度で消滅する。NanoTerasu では消滅時に電子ビームで真空チェンバが損傷しないよう、dispersion の大きな場所に電子ビームアブソーバーを設けている。さらに、電子ビームアブソーバーの損傷を避けるため垂直方向ビームサイズを広げる Beam Shaker を動作させる。[6, 7] RF インターロックシステムは RF 出力 OFF 後 10 μ s 以内に Beam Shaker を駆動させ、ビームサイズを広げビーム密度を下げることで 400 mA の大電流電子ビームを安

Table 2: Required Time to Beam Abort

Transmission path	Required time
(A) 軌道変動から ARIS 入力まで	200 μ s
(B) ARIS 入力から RF INTLK 入力まで	Within 10 μ s
(C) RF INTLK 入力から RF 出力 OFF 及び Beam shaker 駆動まで	Within 10 μ s
RF 出力 OFF から アブソーバー衝突まで	500 μ s

全に廃棄する。

5. 真空インターロック

真空インターロック(VAC INTLK)システムは、Li VAC INTLK システムと SR VAC INTLK システムの 2 つのシステムに分かれている。VAC INTLK の概略ブロック図を Fig. 4 に示す。

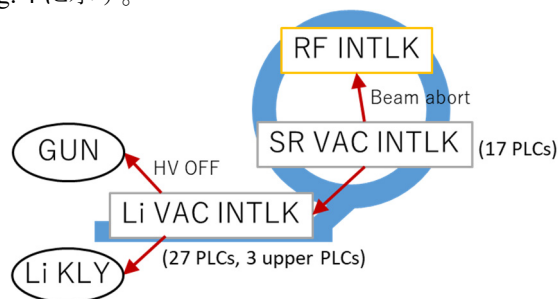


Figure 4: Schematic diagram of VAC INTLK system.

VAC INTLK システムは真空機器の状態を監視し、電子ビームの入射停止や蓄積ビーム廃棄、ゲートバルブの閉止等の指令を出す。具体的な監視対象機器は、真空計、真空ポンプ、ゲートバルブ、冷却水流量計、温度計である。Table 3 に VAC INTLK のインターロック動作を示す。

Table 3: Operation Chart of VAC INTLK

Area	Alert device	Operation
Li	真空計(真空異常)	GUN HV OFF, KLY HV OFF, gate valve close
	イオンポンプ(真空異常)	KLY HV OFF
	冷却水流量低下	KLY HV OFF
SR	ゲートバルブ閉	GUN HV OFF
	真空計、イオンポンプ(真空異常)	BEAM ABORT, gate valve close
	アブソーバー冷却水流量低下	BEAM ABORT
	真空チェンバ温度高	BEAM ABORT
	ゲートバルブ閉	BEAM ABORT

Li VAC INTLK の信号を収集する PLC はクライストロンギャラリに 25 台、内周通路に 2 台、合計 27 台設置される。これらの PLC 間は直接的な通信手段は持たず、異常信号は Li 上位 VAC INTLK PLC に CC-Link[8]により伝達される。Li 上位 VAC INTLK PLC はクライストロンギャラリに 2 台、内周通路に 1 台設置され、光ファイバーを用いた CC-Link IE Control により信号の伝達を行い、GUN HV OFF を行う。この Li 上位 VAC INTLK PLC の CC-Link IE Control 接続は SR VAC INTLK PLC と同ループの接続となっている。

SR VAC INTLK システムの信号を収集する PLC は内周通路に 17 台設置され、これらの PLC が収集した信号

はリング型接続の CC-Link IE Control 通信により伝達される。SR VAC INTLK システムでは予備光ケーブルを敷設しておりパッチケーブルの接続変更のみで復旧が可能である。17 台の PLC のうち、加速空洞が設置される RF 部を監視する PLC が異常信号の取りまとめを行い、条件に従い RF インターロックシステムに対しメタルケーブル接続で蓄積ビーム廃棄要求を行う。

真空異常を検出した際には真空度の悪化が広範囲に影響しないように近傍のゲートバルブを直ちに閉操作する。Li VAC INTLK では他の PLC が制御する近傍ゲートバルブを閉操作する必要があるため、上位 PLC の CC-Link IE Control 通信を介して閉操作する。

ゲートバルブが電子ビームで損傷することを避けるため、Li ゲートバルブが開でない場合は GUN HV OFF を行い、SR ゲートバルブが開でない場合は蓄積ビーム廃棄を行う。SR ゲートバルブが開でない場合は Li からビームを入射できないように、SR のゲートバルブの状態を Li 上位 VAC INTLK PLC へ伝達している。

6. 電磁石インターロック

電磁石インターロック(MAG INTLK)はLiとSRの両方のエリアにまたがり電磁石及び電磁石電源の状態を監視する。MAG INTLK システムの概略ブロック図を Fig. 5 に示す。

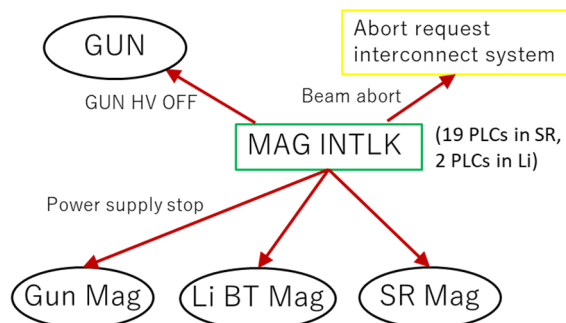


Figure 5: Schematic diagram of MAG INTLK system.

MAG INTLK は、電磁石に関しては温度と冷却水流量を監視し、電磁石電源に関しては励磁状態と電源異常を監視する。条件に応じて GUN HV OFF、蓄積ビーム廃棄を行う他、電磁石電源に励磁許可・不許可を伝達

Table 4: Operation Chart of MAG INTLK

Area	Alert device	Operation
Li	水冷電磁石異常	GUN HV OFF, 同一局の全電源停止
	ダンプ電磁石電源異常	GUN HV OFF
	その他電磁石電源異常	異常電源のみ停止
SR	水冷電磁石異常	SR 全電源停止
	水冷電磁石非励磁	GUN HV OFF (Li,SR 接続時), BEAM ABORT
	電磁石電源異常	異常電源のみ停止

する。MAG INTLK のインターロック動作を Table 4 に示す。

信号を収集する PLC は、電磁石電源室に SR 親機が 1 台、SR 内周通路に SR 子機が 18 台、Li クライストロンギャラリに GUN 局、ビーム輸送路(BT)局の 2 台が設置される。長距離通信となる SR 親機、GUN 局、BT 局間の通信は光ファイバーを用いた CC-Link IE Control により行う。SR 親機と SR 子機間の通信はメタルケーブルを用いたリング型接続の CC-Link IE Field [9]により行う。

電磁石の異常時には、冷却水がトンネル内で漏水している可能性があるため、異常が発生したエリアの全ての電磁石の励磁を停止する。電磁石電源の異常時には、異常が発生した電源のみを停止し、他の電源は停止しない。

SR の水冷電磁石が非励磁の場合、蓄積ビーム廃棄を行い、さらに Li の電子ビームが SR に入射される条件を満たす場合は、GUN HV OFF により Li のビームも停止する。ダンプ電磁石前の偏向電磁石電源が非励磁の場合、電子ビームがダンプに落ちず危険のため GUN HV OFF により電子ビームを停止する。

安全インターロックのインターロック動作には Li の電子ビームが SR に入射されるかの判断が必要な部分があり、これには BT 局の偏向電磁石の励磁状態の情報が必要である。MAG INTLK は安全インターロックに BT 局の偏向電磁石 2 台の励磁状態をメタルケーブルで伝達する。

7. まとめ

次世代放射光施設 NanoTerasu の加速器インターロックシステムでは、細分化されたインターロックサブシステムを設け、各システム間で信号を取り合うことで加速器全体の安全な運転を実現する。大きく分けて、人的安全を担保する安全インターロックシステムと、加速器構成機器の保護を目的とする機器保護インターロックシステムから構成される。さらに機器保護インターロックは、RF インターロック・VAC INTLK、MAG INTLK の 3 つのサブシステムから構成される。

加速器インターロックの特徴として、RF インターロックでは、400 mA の大電流蓄積ビームを安全に廃棄するために、ARIS による廃棄指令の伝達及び Beam shaker の駆動を高速で行う。また、リング型二重ループの光通信による冗長化や、VAC INTLK では予備光ケーブル敷設による速やかな復旧手段の確保を行う。

参考文献

- [1] <https://www.nanoterasu.jp/>
- [2] N. Nishimori, "A New Compact 3 GeV Light Source in Japan", in *Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22)*, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, THIXSP1; <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2022/papers/thixsp1.pdf>
- [3] QST, "Accelerator design report for 3-GeV Next-Generation Synchrotron Radiation Facility", 2020; <https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/18596.pdf>
- [4] <https://www.ethercat.org/jp/technology.html>

- [5] https://www.cc-link.org/ja/cclink/cclinkie/cclinkie_c.html
- [6] T. Hiraiwa, K. Soutome, and H. Tanaka, “Forced harmonic oscillator interpreted as diffraction of light”, *Phys. Rev. E*, vol. 102, p. 032211, 2020;
doi:10.1103/PhysRevE.102.032211
- [7] T. Hiraiwa, K. Soutome, and H. Tanaka, “Formulation of electron motion in a storage ring with a betatron tune varying with time and a dipole shaker working at a constant frequency”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 24, p. 114001, 2021;
doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.24.114001
- [8] <https://www.cc-link.org/ja/cclink/cclink/index.html>
- [9] https://www.cc-link.org/ja/cclink/cclinkie/cclinkie_f.html