



JAEA-Technology

2008-027

大強度陽子加速器計画 1MW 核破碎中性子源の 中性子ビームシャッター制御系の設計

Design of Control System of Neutron Beam Shutters for 1MW Spallation Neutron Source at Japan Proton Accelerator Research Complex(J-PARC)

高田 弘 甲斐 哲也 及川 健一 酒井 健二

Hiroshi TAKADA, Tetsuya KAI, Kenichi OIKAWA and Kenji SAKAI

J-PARC センター
物質・生命科学ディビジョン
Materials and Life Science Division
J-PARC Center

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>）
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

大強度陽子加速器計画
1MW 核破碎中性子源の中性子ビームシャッター制御系の設計

日本原子力研究開発機構
J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン
高田 弘、甲斐 哲也、及川 健一、酒井 健二

(2008 年 2 月 12 日受理)

大強度陽子加速器計画 (J-PARC) で物質・生命科学実験施設に設置する 1 MW 核破碎中性子源では、水銀ターゲットへの 3GeV 陽子ビームの入射により発生させた高エネルギー中性子を、周囲に配置した超臨界水素減速材及び反射体で所期の中性子散乱実験に適したエネルギーに減速し、これを中性子ビームラインを通して実験装置位置(分光器室)に導き出す。中性子源には中性子ビームの取り出しと遮断を行うための中性子ビームシャッターを設置する。施設の運転中には実験ホールからユーザーが中性子ビームシャッターの開閉操作を行い、保守時には中性子ビームシャッター近傍で施設側の運転員がシャッターの開閉及び調整操作を行えるように制御系のシステムを構成した。また、分光器室に入室するためにはシャッターが閉じていることを大前提とし、この条件を人的保護系 (PPS) に組み込んでユーザーの安全を確保する設計を施した。さらに、このシステムを信頼度の高いものとするために、リミットスイッチとロータリーエンコーダの二系統によってシャッター閉信号を形成することの採用及びシャッターの電源系を無停電電源に接続し、停電時の信号喪失を防止する機器設計を行った。

**Design of Control System of Neutron Beam Shutters
for 1MW Spallation Neutron Source at Japan Proton Accelerator Research Complex
(J-PARC)**

Hiroshi TAKADA, Tetsuya KAI, Kenichi OIKAWA and Kenji SAKAI

Materials and Life Science Division
J-PARC Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 12, 2008)

The 1-MW spallation neutron source constructed in the Materials & Life Science Experimental Facility under the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) project provides neutrons available for variety of neutron scattering experiments conducted at neutron instruments through neutron beam lines, where neutrons are produced by 3-GeV proton induced spallation reactions in a mercury target followed by moderation through a super-critical hydrogen moderator surrounded by a reflector. Neutron beam shutter systems were installed at the neutron beam line to extract and/or shield neutrons. The shutter control system was designed in order that users were able to open/close shutters at experimental halls during a beam-time and facility's personnel could move shutters for adjustment at vicinity of neutron shutter drive mechanism room in maintenance period. It was also designed to keep the primary condition that personnel was allowed to enter the instrument room when the shutter was closed. This condition was integrated in the Personnel Protection System (PPS) to secure the safety of personnel. Components were designed to enhance reliability of the control system as follows: a shutter close position was detected by two kinds of devices of a mechanical limit switch and a rotary encoder, and the power supply for the shutter system was connected with an uninterruptible power supply (UPS) to prevent loss of signals in case of a power failure.

Keywords: J-PARC, 1-MW Spallation Neutron Source, Neutron Beam Shutter System, Control System Design, Personnel Protection System, Mechanical Limit Switch, Rotary Encoder, UPS

目 次

1.	緒 言	1
2.	中性子ビームシャッター制御系の構成と機能	3
2.1	制御系の構成と配置	3
2.2	制御盤の機能	4
3.	シャッター制御系のインターロック	8
3.1	インターロック構成上の前提条件	8
3.2	シャッター操作及び分光器室入室の手順	8
3.3	SOP (Shutter Open Permission) 信号	9
3.4	PPS 発報事象	10
3.5	シャッター閉信号の多重化	10
3.6	シャッター位置検出用ハードスイッチの設置位置	11
3.7	ビーム停止期間及び保守時の分光器室への入室手順	12
3.8	シャッター保守時の手続き	12
4.	電源系	13
4.1	同時駆動するシャッターの台数	13
4.2	無停電電源との接続	13
5.	シャッター運転の状態遷移とフロー	14
6.	まとめ	15
	謝 辞	16
	参考文献	16

Contents

1.	Introduction	1
2.	Composition and function of shutter control system	3
2.1	Composition and layout of shutter control system	3
2.2	Functions of control panels	4
3.	Interlock of shutter control system	8
3.1	Conditions for interlock system design	8
3.2	Procedures of shutter operation and entrance to instrument rooms	8
3.3	Shutter Open Permission (SOP) signal	9
3.4	PPS Events	10
3.5	Multiple-signals of shutter close state	10
3.6	Layout of mechanical switches detecting shutter close position	11
3.7	Procedure of entrance to instrument rooms at off-beam and maintenance period	12
3.8	Procedures at shutter maintenance work	12
4.	Power supply system	13
4.1	Number of movable shutters at the same timing	13
4.2	UPS and its connection	13
5.	State transition and flow diagrams of various shutter operation modes	14
6.	Summary	15
	Acknowledgements	16
	References	16

1. 緒 言

大強度陽子加速器計画（J-PARC）¹⁾では物質・生命科学実験施設に 1MW 核破碎パルス中性子源を建設する。この中性子源では、3GeV、333 μA、繰り返し 25Hz のパルス状の陽子ビームを水銀ターゲットに入射し、核破碎反応で発生した高エネルギー中性子を超臨界水素減速材で減速して実験に用いる中性子を生成する。超臨界水素減速材は 3 基設置し、各々の表と裏を中性子取り出し面とする。これら 6 箇所の始点から合計 23 本の中性子ビームラインを中性子源の外側 10~100m の実験装置（試料）位置まで設置する仕様である。²⁾ Fig. 1 に中性子源とこれに接続する中性子ビームライン及び分光器室の概要図を示す。

核破碎パルス中性子源では、パルスの発生を起点として中性子の飛行時間からエネルギー(波長)を選択する使い方がなされるので、減速材から試料まで直線上に配置するのが一般的である。また、高強度の中性子や γ 線がビームラインを飛行し、試料及び周辺装置で散乱するので、周囲は重厚な遮蔽構造となり、入退室用扉からのアクセスを要する。これに対して、JRR-3 のような原子炉中性子源では、即発 γ 線測定や中性子ラジオグラフィー装置を除くと、分光用のモノクロメータで一旦中性子を散乱させて実験に使う波長を選択するので、線源から試料の間は屈曲した配置となる。また、高エネルギー中性子が含まれないために周囲を比較的簡単な構造物とし、分光器室を設けないビームラインが多い。

今回建設する核破碎パルス中性子源では、23 本の中性子ビームラインで独立に実験できるよう、ビームを取り出し又は遮断する機能を有する中性子ビームシャッター（以下、「シャッター」と記す。）を設置する。シャッターは鉄鋼製で板状構造であり、中性子ビームを取り出す貫通孔を設け、これをビームライン高さに合わせてビームを取り出し、高さを違えてビームを遮断する。遮蔽計算^{3,4)}と構造設計により、シャッター寸法は、中性子ビーム方向に対して長さ 2m、高さ 3.87m であり、幅（厚さ）は中性子源上流側 1m が 20cm、残りを 30cm とした。重量は約 15 トンであり、電動モータで鉛直方向に駆動する方式を選定した。開閉間の距離は 400mm とした。Fig. 2 に中性子源ステーションの断面概念図を示す。No.16 の中性子ビームラインは、実験上の要求から、水平面に対して 2.2° と 5.17° 下向きに傾斜させて配置する計画としたが、これに対しても鉛直方向 400mm のストロークで開閉状態を形成できる。

シャッターの制御系には、使い勝手の観点から、ユーザーがシャッターの開閉操作を行う機能が求められる。また、施設の作業員による保守作業ではシャッターを開及び閉位置に動作させるだけでなく、着座など任意の位置に停止させる操作ができることも必要である。さらに、加速器の運転中のみならず、運転停止中でも高度に放射化した減速材近傍の機器からの γ 線強度が非常に高いため、運転中のシャッター開状態と運転停止中(保守時)のシャッター開（取りはずしも含む）状態では分光器室への入室を禁止し、安全を確保するシステム構成としなければならない。

分光器室を設け、ユーザーがシャッターの開閉操作を行うことは英国の ISIS、米国 SNS 等、他の核破碎中性子源施設でも実践されている。しかし、高エネルギー加速器研究機構の KENS では、分光器室をつけたビームラインは一部しか採用されていなかったため、この制御システムをそのまま本設計に適用することはできなかった。そこで、本施設のシャッター操作・保守に係る全ての考えられる事象を考慮し、安全の確保を最重要な要件としてシャッター制御系の設計を行った。

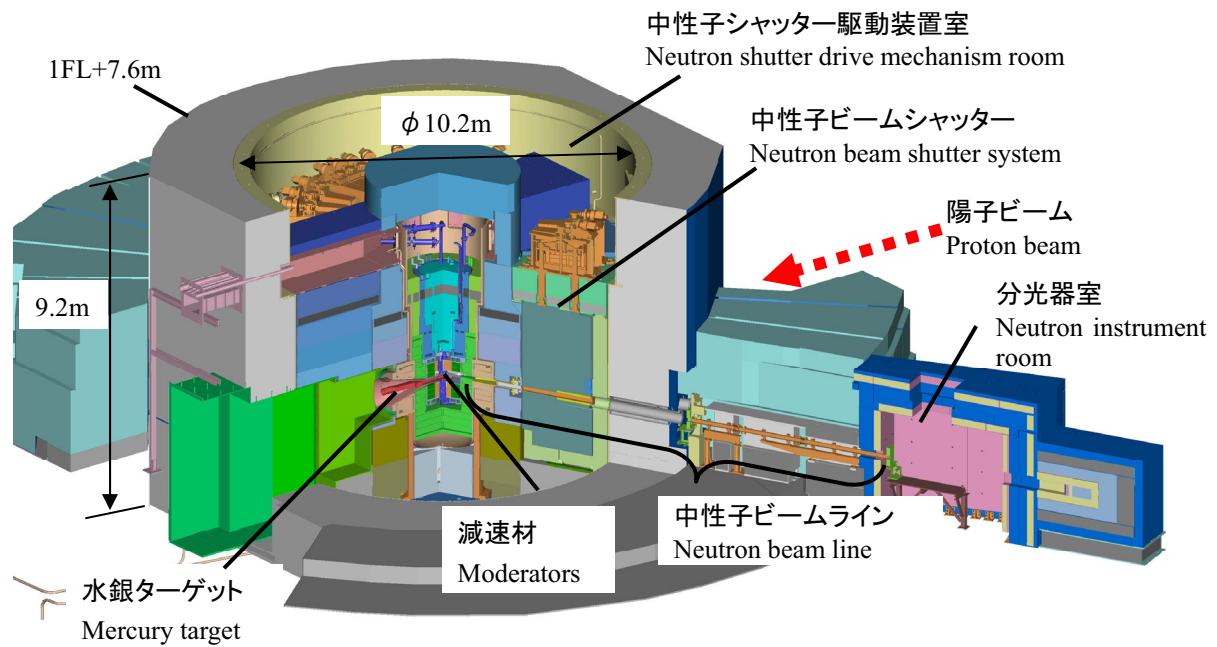


Fig. 1 Three-dimensional view of neutron source station and a neutron instrument room.

Proton beam is transported through a beam-line and injected horizontally on the mercury target at the center of neutron source station.

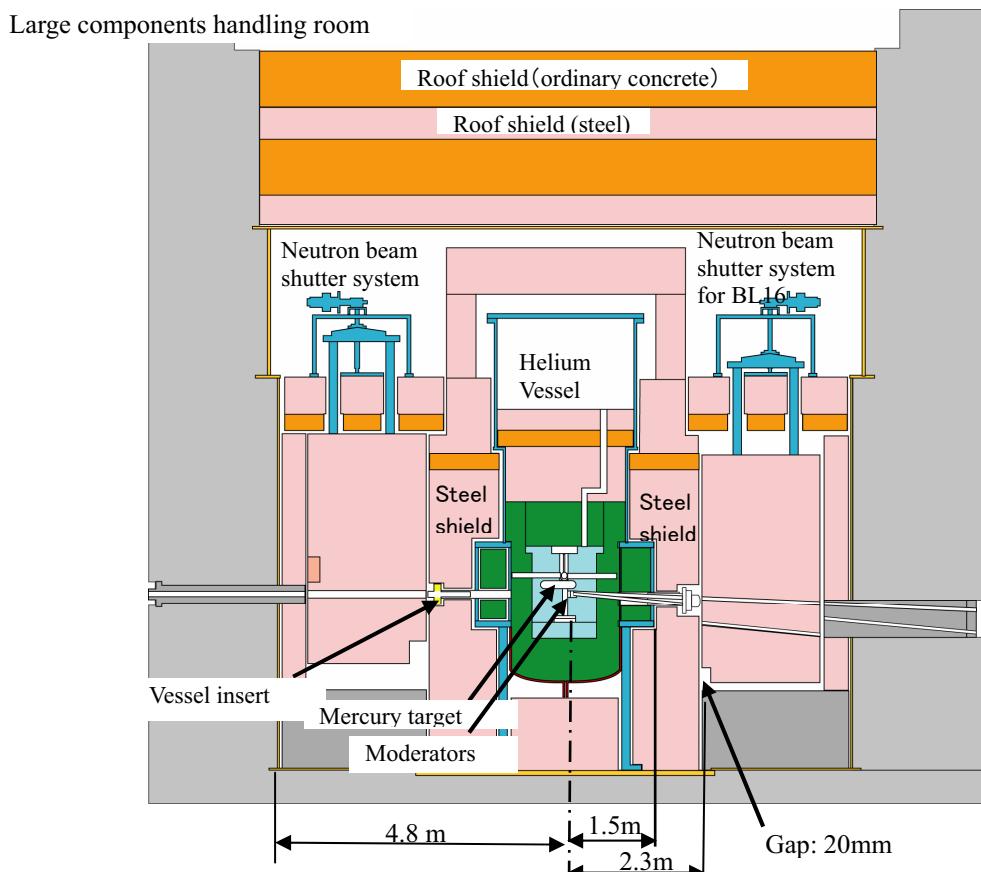


Fig. 2 Cross sectional view of neutron source station.

2. 中性子ビームシャッター制御系の構成と機能

2.1 制御系の構成と配置

シャッター制御系の設計では、以下の2つの事項を満足することが求められる。

- ・ シャッターの操作はユーザーによるものと施設側の保守によるものがある。
- ・ シャッターを開けた状態で、分光器室内は相当量の線量率となることが想定されるため、適切な安全対策を施す。

このため、以下に示す3項目を基本的な設計方針とした。

- 1) シャッター保守時には、シャッターの近くで作業員が開閉操作を行う。
- 2) シャッター制御系は人的安全保護システム(PPS)に接続し、作業者が致死的な放射線被ばくを受けないように保護する。
- 3) シャッター開閉状態は制御室で常時監視する。

この設計方針に基づき、シャッターの制御系は、「シャッター操作盤」、「ローカル制御盤」、及びPPS制御盤(PPSモニター装置を含む)によって構成することとした。

「シャッター操作盤」とは、ユーザーがシャッターの開閉操作を行う盤であって、これは実験ホールの各中性子ビームラインの分光器室近くに設置する。ここで、ユーザーがシャッター操作盤を操作することができる運転状態を「リモートモード」と定義する。

「ローカル制御盤」とは、主にシャッター保守時に施設側の運転員が操作する盤であって、シャッター駆動室最寄の大型機器取扱室に設置する。ローカル制御盤は中性子源ステーション東側(第1実験ホール)の12本のビームライン用と西側(第2実験ホール)の11本のビームライン用の2面を用意する。ここで、シャッター保守時にローカル制御盤により保守・調整を行う時の運転状態を「ローカルモード」と定義する。大型機器取扱室におけるローカル制御盤の位置関係をPhoto 1及び2に示す。

「PPSモニター装置」とは、シャッターの開閉状態を監視するための端末であって、物質・生命科学実験施設全体の監視／制御を目的とした制御設備が設置される制御室に配置する。

これらの盤の接続構成図をFig. 3に示す。シャッターの状態監視系とは別に、作業者の安全確保を目的としたインターロック系は3階制御室に設置されるPPS制御盤にて構成される。シャッターの制御系はJ-PARCにおけるPPSの対象の1つとして扱われる。シャッター操作盤及びローカル制御盤からPPS制御盤に対するインターロックの信号伝達には信頼性の確保のため、ハードワイヤーケーブルを使用する。

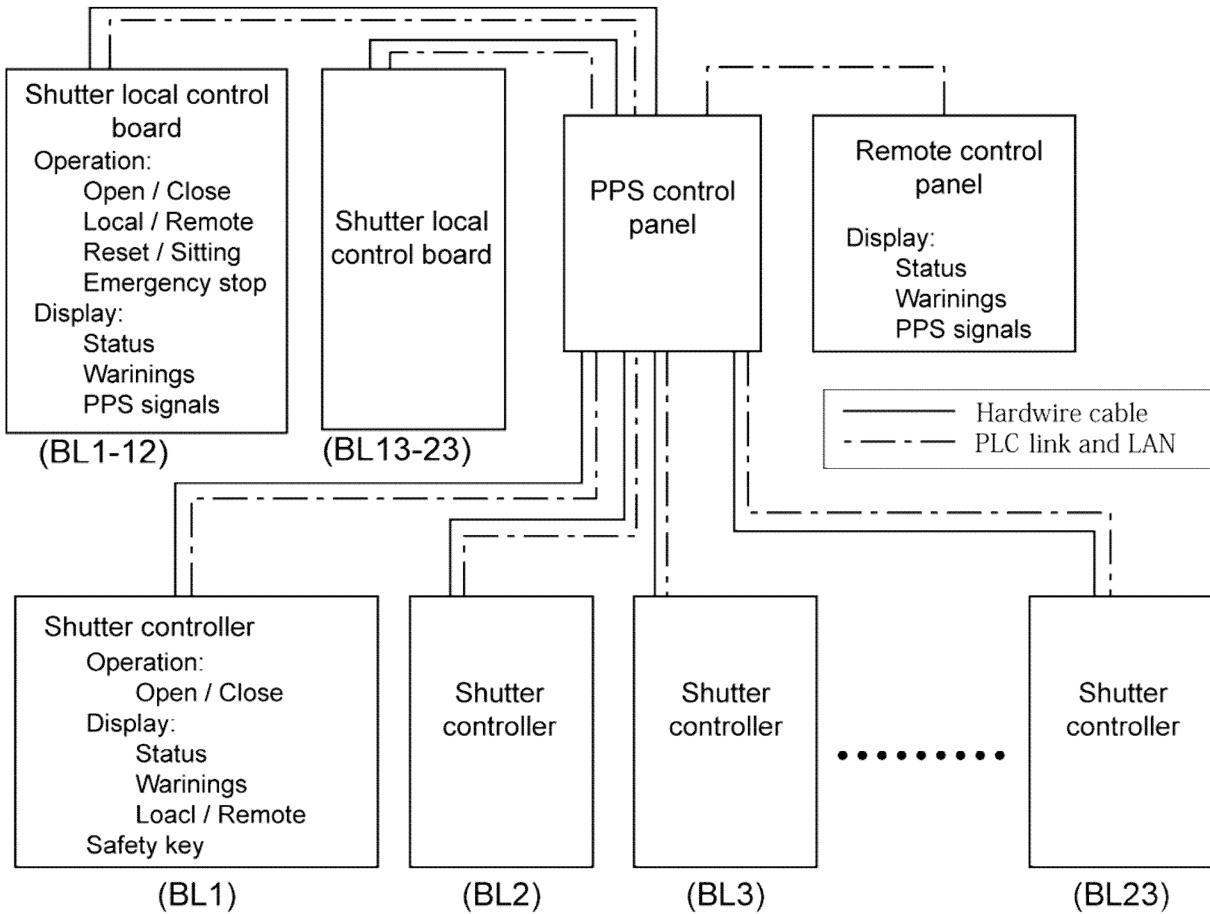


Fig. 3 Concept of shutter control system.

ここで、物質・生命科学実験施設建家内における中性子シャッター駆動装置室、大型機器取扱室、分光器室及び制御室の配置を説明する。Fig. 4 に物質・生命科学実験施設建家平面図（3 F レベル）を示す。シャッターを装備した中性子源ステーションは建家中央部に位置する。Fig. 1 では1つの中性子ビームラインを例として中性子源（減速材）との位置関係を図示したが、全体としては、23本の中性子ビームラインが放射状に伸び、分光器室は第1実験ホール及び第2実験ホールの床上($FL \pm 0$) レベルに設置される。実例として、平成19年11月現在の第1実験ホールの状況を Photo 3 に示す。シャッターが設置されている場所（大型機器取扱室）と実験ホールとは壁で区画されており、行き来することはできない。区画する壁は Photo 3 の画面右端に見える。また、制御室は建家南側3階($FL+14,000$)に位置し、これも大型機器取扱室とは区画されている。

2.2 制御盤の機能

ローカル制御盤、シャッター操作盤及びPPSモニター装置の主な機能を Table 1 に示す。以下に各機能を選定した根拠を列挙する。

Table 1 Function of shutter local board, shutter controller and PPS control panel.

機 器	機 能		備 考
	操作に関するこ	状態表示に関するこ	
ローカル操作盤	<ul style="list-style-type: none"> ・ローカル／リモートの切替 ・シャッターの開／閉位置を含む任意位置への動作 ・原点復帰／着座 ・非常停止 	<ul style="list-style-type: none"> ・シャッターの位置 ・各種警報 ・PPS インターロック信号 	Photo 4～6。 非常停止は各シャッター共通、その他は各シャッター独立に対応。
シャッター操作盤	<ul style="list-style-type: none"> ・実験装置安全キーの ON/OFF ・シャッター開閉 	<ul style="list-style-type: none"> ・シャッターの開閉 ・ローカル／リモート ・各種警報 	Photo 7～10
PPS モニター装置	(操作機能なし)	<ul style="list-style-type: none"> ・シャッターの開閉 ・各種警報 	Photo 11～12

1) ローカル制御盤

- ① ユーザーがシャッター操作盤を操作できる「リモート」状態とすることは、施設側の責任において行う行為であるから、「ローカル／リモート」の切替機能は施設側の運転員のみが操作するローカル制御盤に置く。
- ② シャッターの保守、調整では、必ずしも所定の 400mm ストロークの開閉動作とは限らず、任意の位置で停止させることもあるので、任意位置の設定・動作機能を持つ。
- ③ シャッターを取り外す保守を行う場合や長期間使用しないときは、駆動空間の底面位置にシャッターを着座させる動作が必要となる。
- ④ 保守・点検時に動作を緊急に停止させる必要に備えて、非常停止機能を有する。

ここで、ローカル／リモート切替ボタンを 1 つだけ装備して第 1 実験ホール側 12 台もしくは第 2 実験側 11 台の中性子ビームラインを包括的に制御すると、保守をしたい分光器室と保守作業中のシャッターがあるビームラインとが別であっても、シャッターの保守作業が終わるまで待たなければならない。このため、保守時間の効率化を考慮し、シャッター 1 台毎にローカル／リモート切替ボタンを設け、個別の保守が可能な構成とした。

2) シャッター操作盤

- ① シャッター操作盤は不特定多数のユーザーが触ることになる。したがって、誤操作による異常の発生を防止するため、ユーザーには必要最小限の機能としてシャッターを開位置または閉位置に移動する操作のみを許容することとした。
- ② シャッターが開または閉状態にあることと、分光器の入室・退室状態とは互いに安全確保のためのインターロックを形成する。この状態検知には、実験装置安全キーの ON/OFF

信号を用いる。詳細は次章に記述する。

- ③ ユーザーがシャッター操作盤を操作するときに、それが操作可能な「リモート」状態に許可されているかどうか知ることが必要である。このため、操作盤が置かれている状態（モード）を表示できる機能を持つ。

3) PPS モニター装置

- ① PPS は、検出した信号が正常な論理条件を満足できなかったときに、陽子ビームの供給を断つために加速器を停止させる信号を発信するものであって、人の操作は必要としない。制御室でシャッター動作を監視する機能のみを持つ。

なお、制御室でもローカル／リモートの切替操作を行う必要があるか検討したが、a) 制御室と大型機器取扱室は隔離されていること、b) 2箇所で同じ機能を有しても誤操作するリスクのみが生じ、2箇所に分ける必然性がない、という理由により、操作はシャッターに最も近い場所で行うべきと判断し、制御室では、状態を確認するモニター機能を持たせることにした。ここで、3.8節に記述するように、シャッター保守作業時に実験ホールからのシャッター開信号を無効とする「シャッターリモート開禁止」機能だけ働かせることができるようにした。

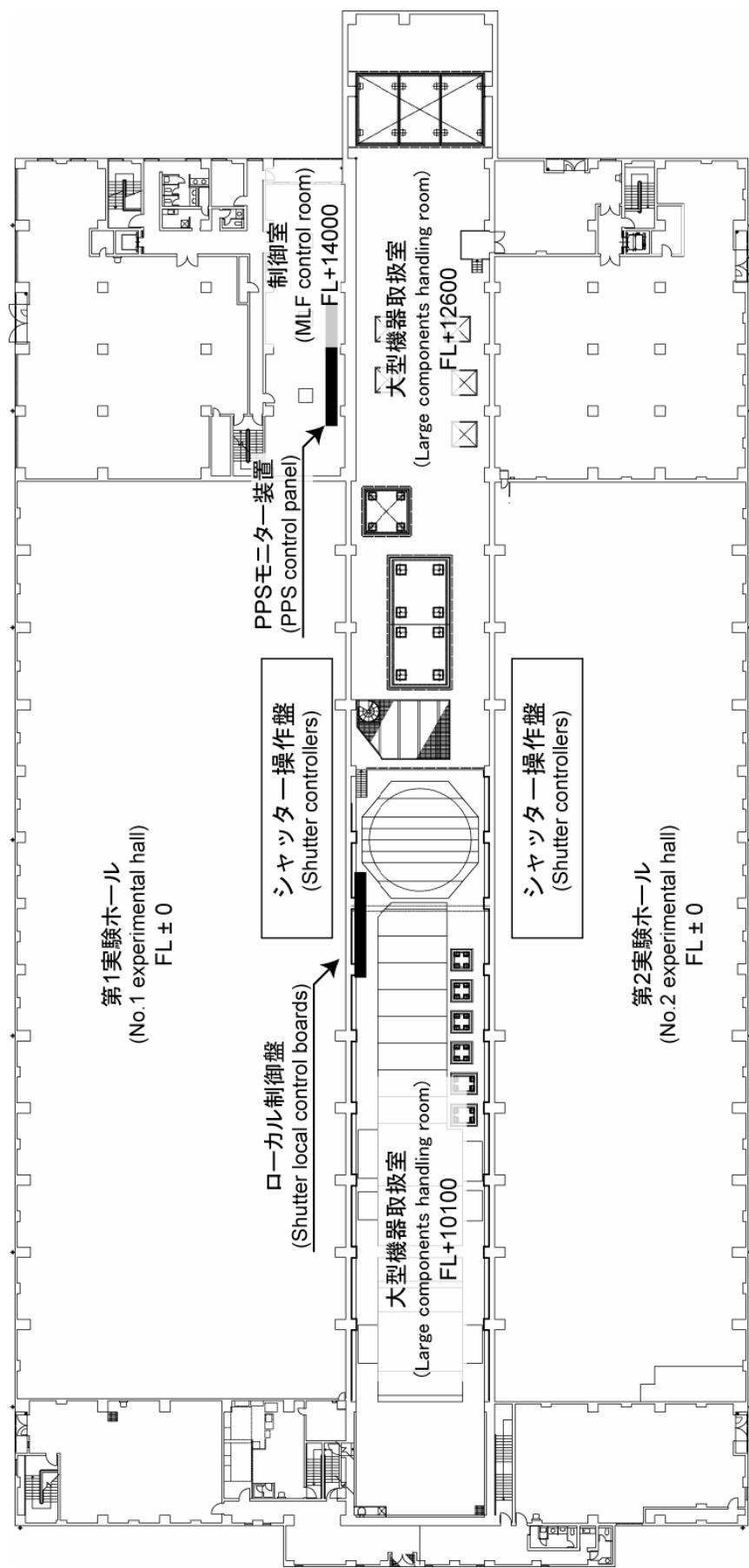


Fig. 4 Plan view of Materials and Life Science Experimental Facility building at 3 rd floor.

3. シャッター制御系のインターロック

3.1 インターロック構成上の前提条件

シャッターが開状態の場合、分光器室内の中性子ビームラインとその近傍は非常に高い線量率になるため、ユーザー等の作業者が分光器室に立ち入り、これを直視する状況が起こることは安全上避けなければならない。したがって、インターロックの主目的は、シャッターが開いている状態と分光器室に人が存在する状態を同時に満足させないことである。そこで、効果的かつ簡潔なPPSを構成するために前提とした条件を以下に列挙する。

- 1) シャッター個別（23台）に構成する。
- 2) シャッター保守時（ローカルモード）は、保守対象のシャッターを用いる分光器室への入室を不可とする。
- 3) ローカル／リモート切替はシャッターが「閉」であり、且つ切替条件が成立しているときだけ可能とする。

3.2 シャッター操作及び分光器室入室の手順

ユーザーは、リモートモードのときにシャッターを開操作することができ、中性子ビームを受け入れることができる。シャッター操作及び分光器室への入室にはビームライン毎に独立のシャッター操作盤を使用する。**Fig. 5**にシャッター操作盤と分光器室扉との構成概念図を実験装置安全キーを含めて示し、**Photo 8-10**に各々の製作品の写真を示す。分光器室に入室するためには、シャッター操作盤のキーをOFF側に切り替え、これを引き抜いて、そのキーで分光器室の扉を解錠する。ここで、キーはシャッター「閉」でなければOFF側に切り替えることができず、引き抜けない機構とした。一方、シャッターの開操作を行うためにはキーが全数返却されていることを前提とした。以下にユーザーの開操作及び入室手順を示す。

1) シャッター開操作の手順

a) 分光器室からの退避確認

分光器室を最後に退室する者は、室内に残留者がいないことを確認し、室内の「退避確認ボタン」(Search button)を押す。**(Photo 8 参照)**

b) シャッター操作盤へのキーの返却

分光器室の入口扉を閉め、施錠した後、扉操作器(Door controller, **Photo 9 参照**)のキーを引き抜き、キーをシャッター操作盤(**Photo 10 参照**)に返却・挿入し、ON側に切り替える。このとき、キーはロックされ、OFF側に切り替えて引き抜くことはできない。

c) シャッター開操作

シャッター開ボタンを押す。

2) 分光器室への入室手順

a) シャッター操作盤からのキー引き抜き

シャッター操作盤のディスプレイにある「Key Release」ボタンを押し、キーをOFF側に

切り替えた後、キーを引き抜く。この操作はシャッターが閉じているときのみ可能である。

シャッターが開いている時は「Key Release」ボタンが反応しない。

b) 分光器室への入室

シャッター操作盤から引き抜いたキーを分光器室の扉操作器に挿入し、電気錠を開錠し、入室する。扉操作器に挿入したキーをONにした後、キーはロックされ、1)-a)項に記述した退避確認を行わなければ、キーをOFFにして引抜くことができない。

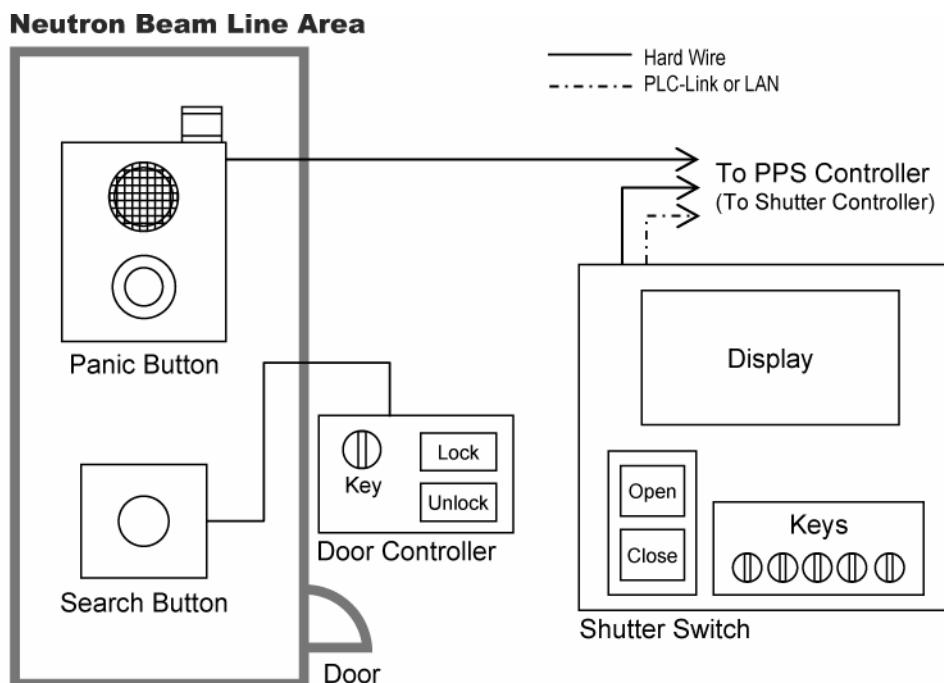


Fig. 5 Illustration of layout of a shutter switch and an evacuation certification buttons.

3.3 SOP (Shutter Open Permission) 信号

1) SOP 信号の目的

シャッター制御と PPS インターロックの検討において最も重要なことは、「どの状態でシャッターが開いてはいけないか」という事象を効果的に抽出することである。人的安全が損なわれる恐れがある場合には、分光器室に入室する手続きを禁じなければならない。そこで、その状態を把握することを目的としたインターロック信号を導入することとし、これを SOP(Shutter Open Permission) と定義する。

2) SOP 信号の機能

SOP は文字どおり、「シャッターの開操作を許可する（逆に言えば、分光器室への入室を禁止する）」状態か否かを表す 2 値の信号 (make/break) で定義される。ここで、make=許可、break=禁止である。SOP はシャッター毎（中性子ビームライン毎）に処理される。

3) SOP 信号の発生方法

SOP はシャッター操作盤に設置されるキーの状態で変化する。キーはユーザーの操作で「ON」と「OFF」が切り替えられるが、ON 側での状態保持のためロック機能を設ける。ロック機能はシャッターが閉であるときユーザーの操作で解除できる。詳細は 3.2 項の操作手順を参照のこと。

- a) SOP=make … キーが全て ON 側でロックの状態
- b) SOP=break … キーが上記以外の状態 (1 本以上が OFF またはアンロック)

3.4 PPS 発報事象

中性子ビームシャッターシステムについては予め定めた手続きに従った操作を行えば、インターロックシステムにより人的安全が確保される。しかしながら、何らかの原因で以下の 2 通りの状態が成立した場合には、PPS 発報事象として陽子ビームの入射が停止される。

- 1) 「シャッターが閉でない」、且つ、「SOP=break」
- 2) 「シャッターが閉でない」、且つ、「分光器室扉が開いている」

PPS とシャッター制御に関するインターロックを **Table 2** に示す。ここで、「Prohibition」とはキーがシャッター操作盤に装着されて、かつ分光器室扉が閉の状態であり、「Permission」とはキーがシャッター操作盤から抜かれた状態であり、分光器室扉の開閉には関わらない。

Table 2 PPS インターロック対応表

Name	Interlock		
SOP	make	↓ Interlock →	break
Shutter	not close	↔ ↔	close
Entrance to instrument room	prohibition	↓ Interlock →	permission

3.5 シャッター閉信号の多重化

3.1 項から 3.4 項に記述したように、「シャッター閉」であることが分光器室への入室を許可する判断基準となることから、その信号には高い信頼性が要求される。このため、シャッター閉信号を PPS 制御盤に移報する系統は検出器から全て多重化（二重化）し、両方の状態信号が合致することを条件とした。主な仕様を以下に示す。

- 1) 閉位置検出にはリミットスイッチとロータリーエンコーダの信号を利用
- 2) ローカル制御盤内の出力端の二重化
- 3) ローカル制御盤から PPS 制御盤までの信号ケーブルの二重化
- 4) 上記、二種類の信号を検知すること (AND 回路)により「閉」とする。

3.6 シャッター位置検出用ハードスイッチの設置位置

シャッターは据付や取り外しの場合、シャッター間構造体で形成される溝状の駆動空間の底に接地（着座）する。運転時には、シャッターは着座位置より 50mm 高い位置を閉位置とし、閉位置より 400 mm 高い位置を開位置とする 400mm の範囲を昇降する。ここで、開位置では中性子ビームの出力を確認するために±5 mm の調整幅を置くこととした。また、構造上、機械的に最も高い位置は着座位置より 500 mm（閉位置より 450 mm）である。なお、中性子ビームライン No. 16 に関して、ストローク範囲は同様に 400 mm であるが、上下の 2 本のビームラインを取り出すために閉位置は着座位置より 250 mm の高さである。

シャッター位置検出のためのハード（リミット）スイッチは 3.5 項に示した「閉（＝原点）」位置の他、「上限」と「着座（＝下限）」の合計 3 点に設置する。これらの設定位置概念図を Fig. 6 に示す。ハードスイッチは制御上最低限の個数とし、それ以外の位置決めはサーボ付属のロータリエンコーダによる。ハードスイッチ数を 3 点とした理由は以下による。

- ・上下限（異常検出）は信頼性を考慮し、ハードスイッチとする。
- ・閉位置は PPS インターロックからの要求によりハードスイッチとする。
- ・着座は通常の運転範囲外の最も低い位置であるので、下限位置と共に用する。
- ・サーボの原点を閉位置と共に用する。

実際に製作したシャッターにおけるスイッチ位置について、BL16 以外の配置を Photo 13 に、BL16 用の配置を Photo 14 に各々示す。

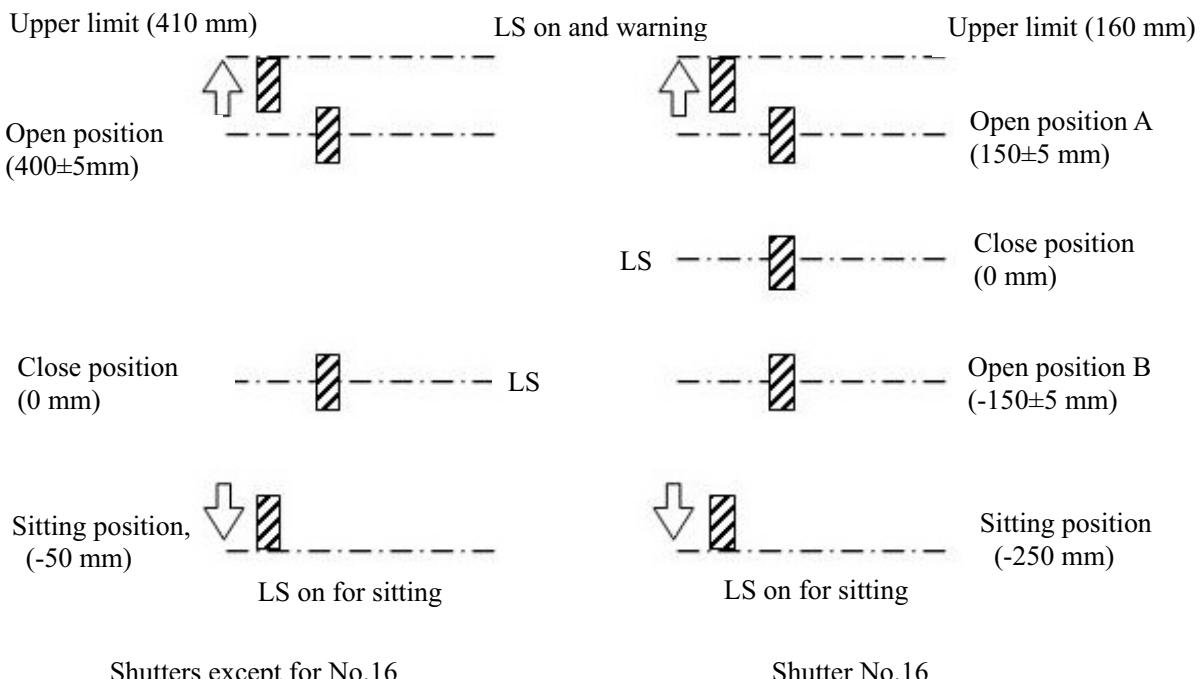


Fig. 6 Illustration of limit switch layout for detecting shutter positions.

3.7 ビーム停止期間及び保守時の分光器室への入室手順

施設が運転を停止し保守期間にある場合でも、分光器室に入室するためには、当該シャッターを「リモート」モードに切り替えることが前提となる。その後の手続きは 3.2-2) 項に示す手順による。

3.8 シャッター保守時の手続き

施設が運転を停止した保守期間に施設側の運転員によるシャッター保守作業を行う場合の手続きについて記述する。シャッターの保守は 3 階の大型機器取扱室から中性子シャッター駆動装置室に入室して行う。保守作業には、シャッター駆動機構等の機器の分解作業を伴わないような点検、調整、部品交換といった軽微な作業と、シャッターの内装物交換等のためにシャッターの取り外し伴う大規模な作業がある。これら 2 通りの作業時の手続きを以下に示す。

1) 軽微な保守作業時の手続き

中性子シャッター駆動装置室は別途 PPS による入室管理がなされており、ビーム受入時は入室ができない。ビームが停止しているときに駆動装置廻りの保守を行う場合、対象になるシャッターは「ローカル」に切り替えることを前提とする。一方、分光器室内の保守ができる条件は「リモート」状態とすることである。なお、シャッター制御系ではシャッター毎にローカル／リモートの切り替えをできるようシステムを構成しているので、保守を行うシャッターを用いる分光器室を除けば、他の分光器室についてはリモートモードにおいて入室し、その保守を行うことも可能である。

ただし、リモートモードではビーム運転中と同様に実験ホールからのシャッター開閉操作も可能である。そこで、保守対象以外のシャッターがシャッター操作盤からの開閉動作指令によって動作し、これが原因で事故（例えば、中性子シャッター駆動装置室の保守員などが機械に挟まれること）が発生することを防ぐため、制御室の PPS モニター装置に「シャッターリモート開禁止」スイッチを設けることとした。このスイッチを ON にすると、実験ホールのシャッター操作盤からの開操作が無効になる。保守時にはシャッター開動作が不要、即ち実験を行わないことから、このスイッチを加えて実験ユーザーの支障にならないと判断した。

2) 規模の大きな保守作業時の手続き

シャッターブロックを取り外すような規模の大きい保守をする場合にも、「ローカル」に切り替えることを前提とする。このときに制御系の構成上留意することは、ビーム停止時でも PPS を有効とする前提条件を適用することである。シャッターブロックの取り外しに伴い、閉信号の検出器であるリミットスイッチやエンコーダは取り外される。このとき、当該シャッターは「ローカル」であるため、PPS インターロック変数 SOP は make である。したがって、分光器室への入室は無条件に禁止されており、モデレータからの放射線による被曝なども含めユーザーの安全は確保される。

4. 電源系

4.1 同時駆動するシャッターの台数

シャッターの動力制御盤（ローカル制御盤）は、東側第1実験ホール12台と西側第2実験ホール11台のそれぞれ1面ずつで構成される。シャッター駆動用サーボは単体で5kVAの容量のものを選定した。12台または11台全てのシャッターの同時駆動を前提に設備を構成した場合、制御盤だけでなく上位の電気設備（遮断器、ケーブル、トランスなど）が大きなものになるので、同時駆動数を各々3台（計6台）に制限し、設備の合理化を行った。同時駆動数の制限はソフトウェアで行う。

4.2 無停電電源との接続

施設稼動中にシャッター駆動系に供給される電源が遮断（停電／瞬停）した場合、想定される事象に対して安全且つ適切に対応ができるように電源系を構成した。以下に、想定事象と設計思想を示す。

- 1) 停電中は停電前の状態を保持し、復電後の自動起動は行わない。
- 2) シャッターシステムに限定した停電で陽子ビームを止めない。
- 3) シャッター1台毎に独立したロジックとする。
- 4) 停電時もPPSに対するシャッター位置信号出力は継続する。

上記した第1項及び第4項に対応するため、制御電源を無停電電源(UPS)系に接続する。このUPSはPPS機器が接続されるものを使用することとし、電源の信頼性をPPS機器と同等のものとした。**Fig. 7**に電源の構成を示す。特に第4項に関して、シャッター閉時に電源喪失により閉信号出力を喪失すると、PPS側では安全設計（フェールセーフ）のため「閉でない」と判断する。仮に、分光器室に人が入っている時にこの事象が起こると、PPSが発報する。（Table 1.参照）この場合は実態的には“誤報”である。誤報でPPSを作動させる不手際を防止する上でも、制御電源をUPS電源系へ接続することは設計上重要な視点である。

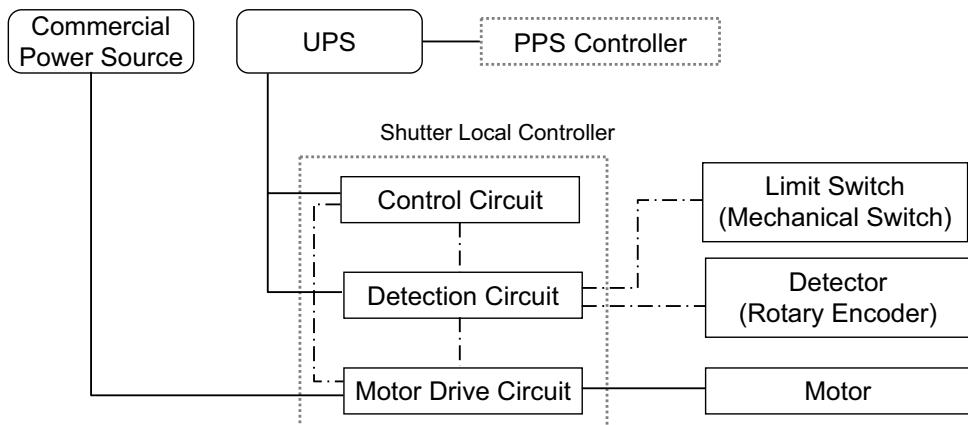


Fig. 7 Composition of power supply

5. シャッター運転の状態遷移とフロー

前章までに記述した制御の設計要素・条件を包含し、シャッターが閉状態でユーザーの利用に供する状態（「リモート」、Key:On）を初期状態 “State 1” として、ユーザーによる開閉操作、分光器室への入・退室、保守（「ローカル」）状態における運転に関して、全ての考えられる事象と対応するモード（ローカル／リモート）、SOP 信号の状態、キーの状態について Fig. 8 にまとめた。この際、動作中に停電が発生した場合と警報により停止した場合の状態も検討し、状態遷移図に含めた。また、モード切替時の全ての機器の状態を含めたフローを Fig. 9 及び 10 に示す。

1) 保守時（施設側）の操作に対する状態遷移とフロー

施設側が実施する保守・調整運転時の状態の遷移は、モードを「ローカル」に切り替えた後、閉位置（State-3）を起点とすると、開位置（State-5）または任意位置への操作（State-13）並びに着座（State-11）の 3 通りがある。各状態で停電が生じた場合の状態を各々、State-3a 及び State-5a で示す。また、シャッター開閉操作時、任意位置への操作等について、全ての機器の状態を含めたフローを Fig. 11～15 に示す。

2) ユーザーによる開閉操作に対する状態遷移とフロー

ユーザーによる開閉操作に対する状態の遷移は、シャッター閉位置（State-1）から開動作に移行する状態（State-2）を経て、シャッター開状態（State-6）の順序に従う。各々の状態で、停電が発生した場合（State-1a, 2a 及び 6a）は直前の状態を保持する原則を示している。また、何らかの理由で警報が発報した場合は、一旦、「ローカル」モードに切替え、原因が取り除かれるまでは施設側に運転の権限が委ねられることを意味している。ユーザーがシャッター開操作を行う場合の全ての機器の状態を含めたフローを Fig. 16 に示す。

3) 分光器への入退室プロセスに対する状態遷移とフロー

ユーザー等が分光器に入退室する際のプロセスを（State-1）から State-7, 8, 9 に示す。「リモート」モードであって、SOP=Break となる。分光器室への入退室に関する全ての機器の状態を含めたフロー図を Fig. 17 及び 18 に示す。

6. まとめ

物質・生命科学実験施設の 1MW 核破碎中性子源に設置する 23 台の中性子ビームシャッターの制御系について、ローカル制御盤、シャッター操作盤及び PPS モニター装置で構成するシステムを構築した。本制御系の特徴は、以下のとおりである。

- ユーザーが実験中にシャッター操作盤でシャッターの開閉操作を行うことができるよう有利便性を図った。
- 人的保護系(PPS)を連動させ安全を確保するために、分光器室からユーザーが退避することをシャッター開操作の前提条件と設定した。
- 分光器室の状態を検知するための SOP 信号を導入した。ここで、SOP の信号は分光器室への入・退室に用いるキーの挿入・操作により発生させる。

また、シャッター閉信号は PPS インターロックの構成要素となるので、リミットスイッチとロータリーエンコーダによる二系統で「閉」信号を発生させ、各々に伝送線を敷設し、両者の信号を検知することで信頼度を高めた。さらに、停電になったときに PPS に対する閉信号の信号を消失させて誤報を生じないように、制御電源を無停電電源に接続して電源機能を維持する構成とした。

尚、機器の製作においては、中性子シャッタービームシステムとしてシャッター機器からローカル制御盤までの範囲の製作を行い、PPS システム及びシャッター操作盤は物質・生命科学実験施設の制御システム全体の一環として整備した。これまでに、これら個別に製作した制御系機器を接続し、全系統の伝送試験を行った。その結果、設計どおりの制御動作ができること、PPS 信号が受け渡しされ、正常な状態と警報発報がモニター画面に表示されることを確認した。

謝 辞

今回のシャッター制御系の設計にあたり、制御構成の全般に関して有益な助言を頂いた古坂道弘客員研究員（現・北海道大学）、渡辺昇名誉教授、及び池田裕二郎物質・生命科学ディビジョン長に謝意を表します。また、状態遷移及びフローの検討に協力して頂き、制御盤仕様の作成に関わって頂きました大橋裕則氏（現・株関電工）に深く感謝します。さらに、設計の内容についてレビューし、見識に富んだ助言を頂いた、J-PARC の核破碎中性子源施設に関する技術助言委員会（Neutron Source Technical Advisory Committee: N-TAC）の委員である、G.Bauer, T.Bloome, J.Carpenter, H.Heyck, T.McManamy, 栗下裕明の各氏に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構共同推進チーム、「大強度陽子加速器計画」、JAERI-Tech 2000-003 (2000).
- 2) 物質・生命科学実験施設建設チーム、「大強度陽子加速器プロジェクト 物質・生命科学実験施設機器技術設計書」、JAERI-Tech 2004-001 (2004).
- 3) 前川藤夫、勅使河原誠、高田弘、古坂道弘、渡辺昇、「大強度陽子加速器計画における核破碎中性子源のバルク遮蔽に関する検討」、JAERI-Tech 2002-035 (2002).
- 4) 田村昌也、前川藤夫、「大強度陽子加速器計画における核破碎中性子源の3次元遮蔽設計」、JAERI-Tech 2003-010 (2003).

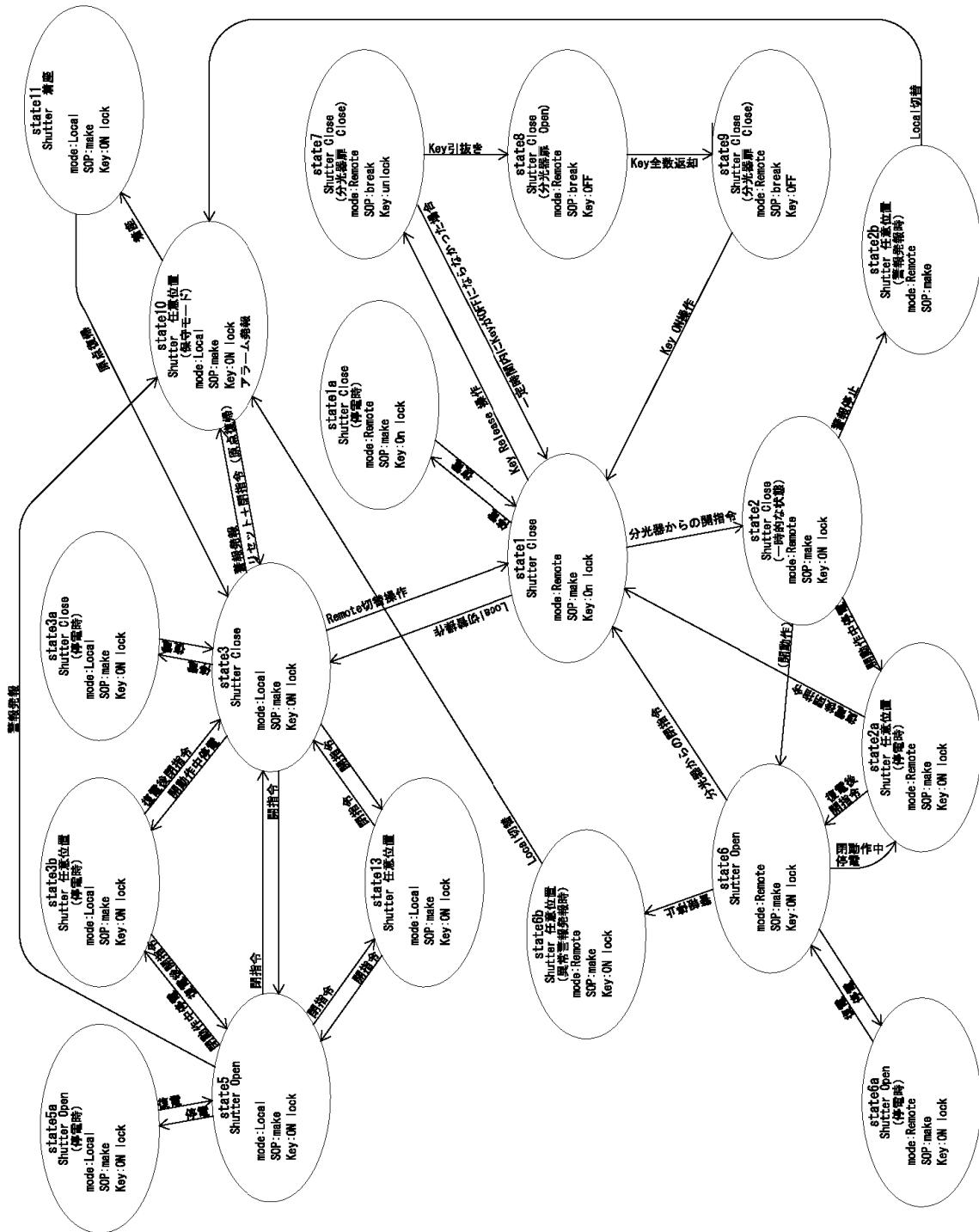


Fig. 8 State flow diagram of neutron beam shutter system

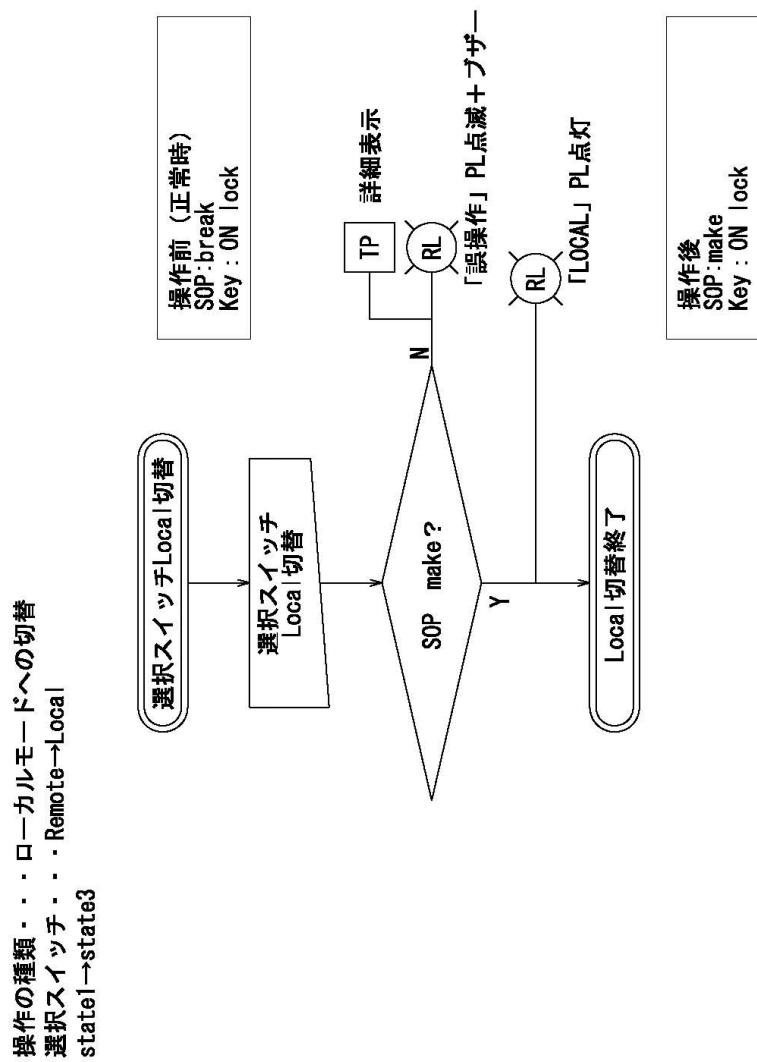


Fig. 9 Flow diagram for changing from remote to local mode

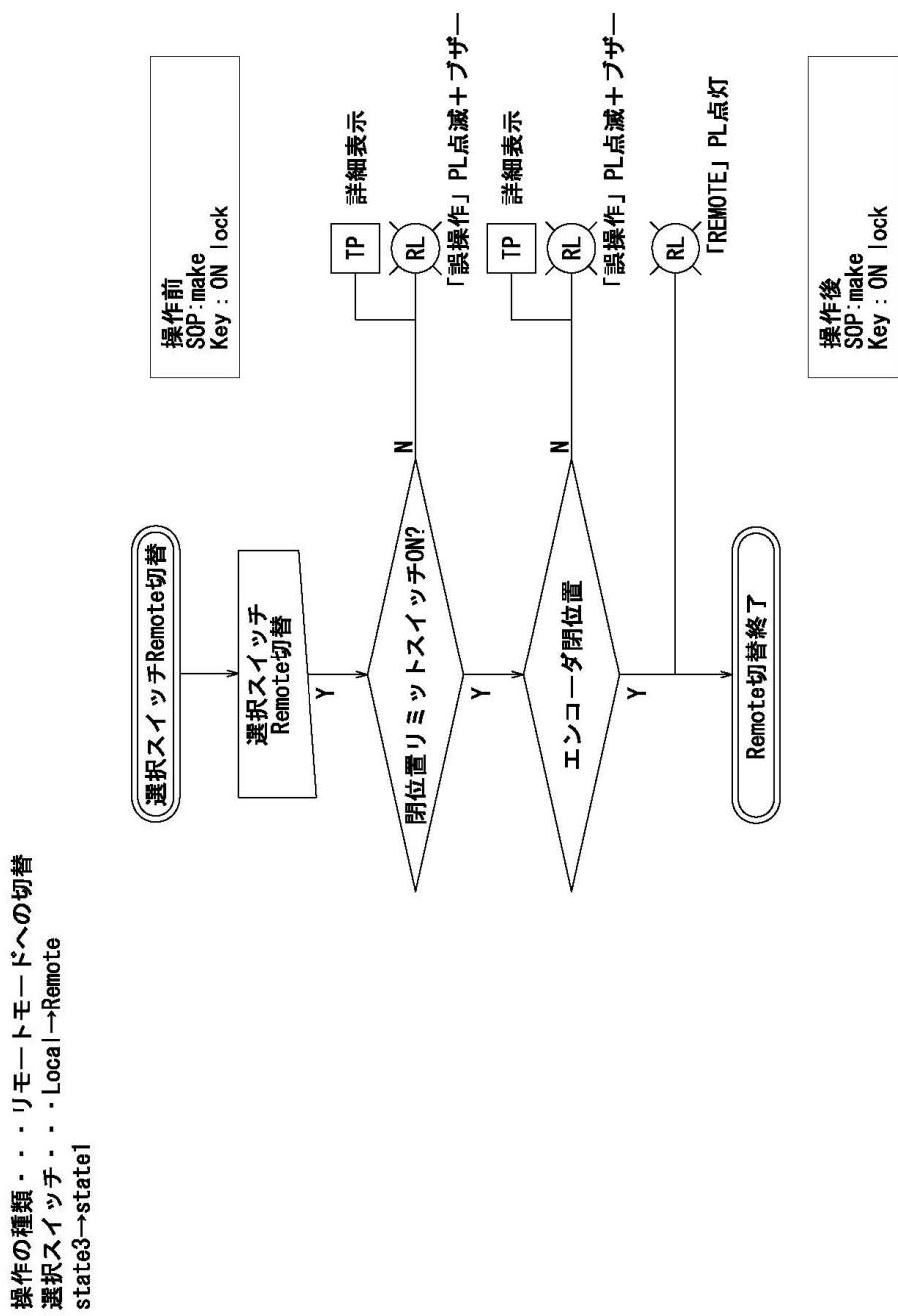


Fig. 10 Flow diagram for changing from local to remote mode.

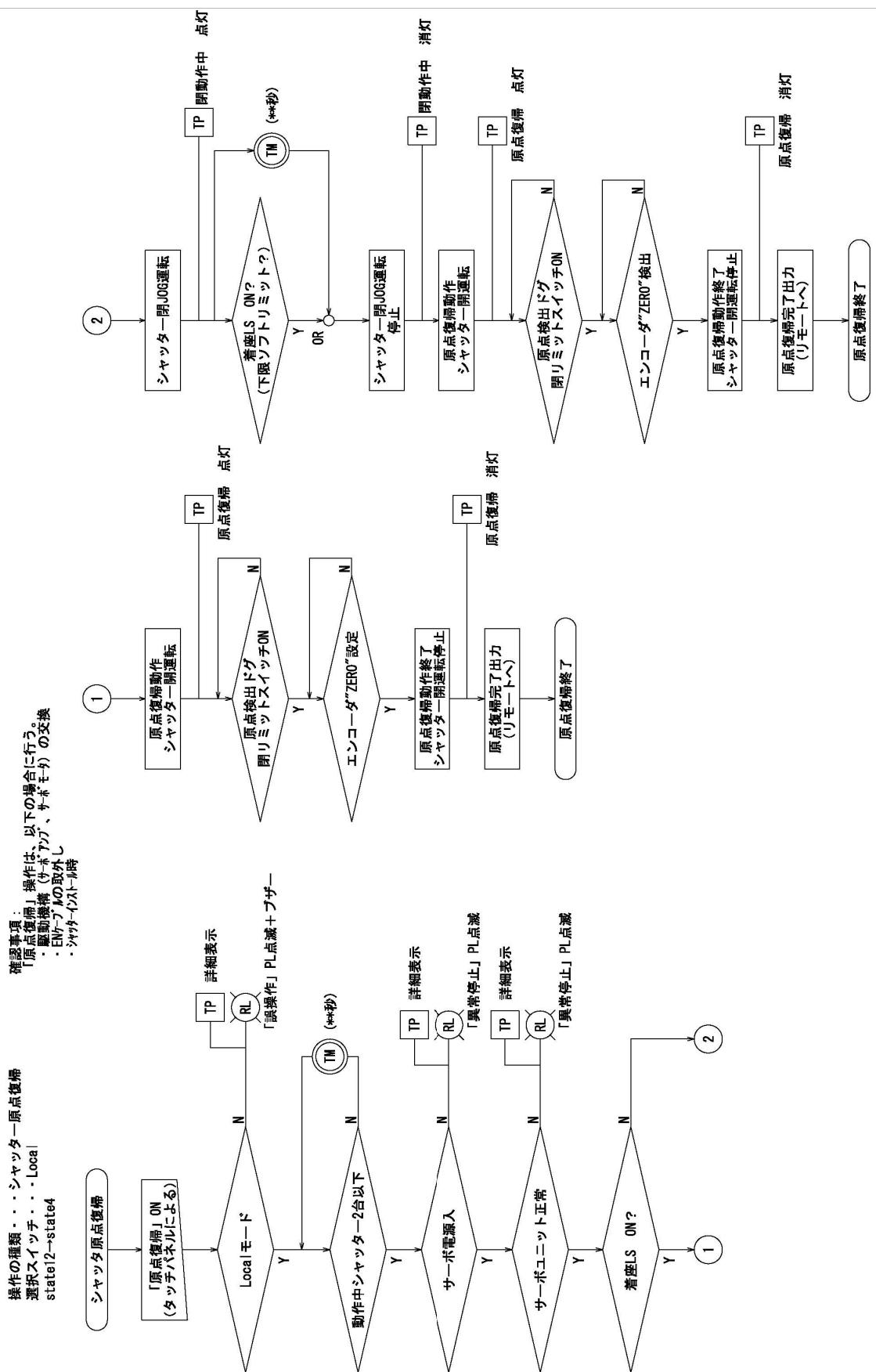


Fig. 11 Flow diagram for reset to initial position.

操作の種類 . . . シャッター開 (J06運転) → LS1による位置制御
選択スイッチ . . . Local
state6→state13
state6→state13
state13→state5
state13→state5
state13→state13
state14→state11
state14→state11
state14→state14

動作中は、タッチパネルで現在位置表示を行う。

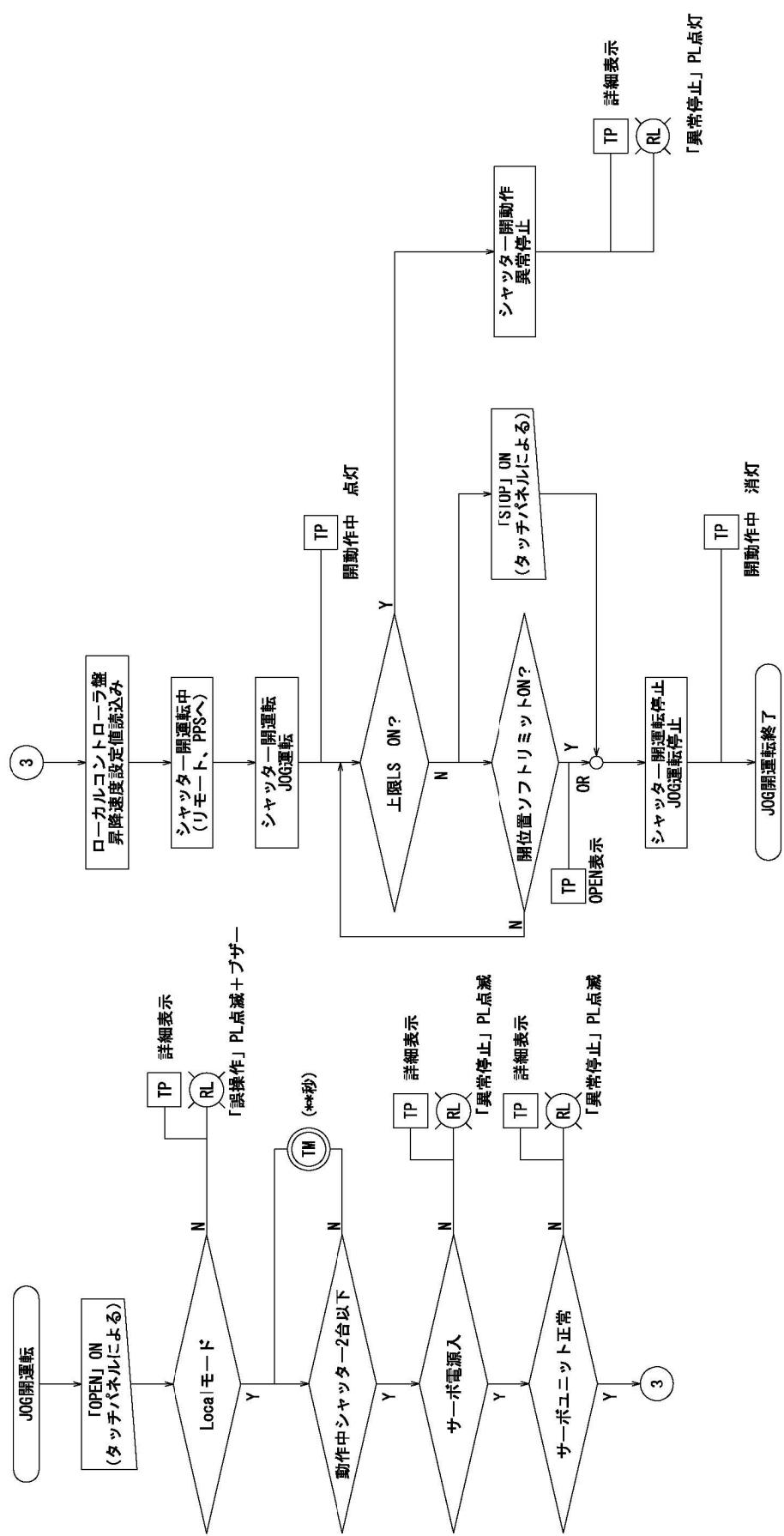


Fig. 12 Flow diagram of shutter open operation.

動作中は、タッチパネルで現在位置表示を行う。

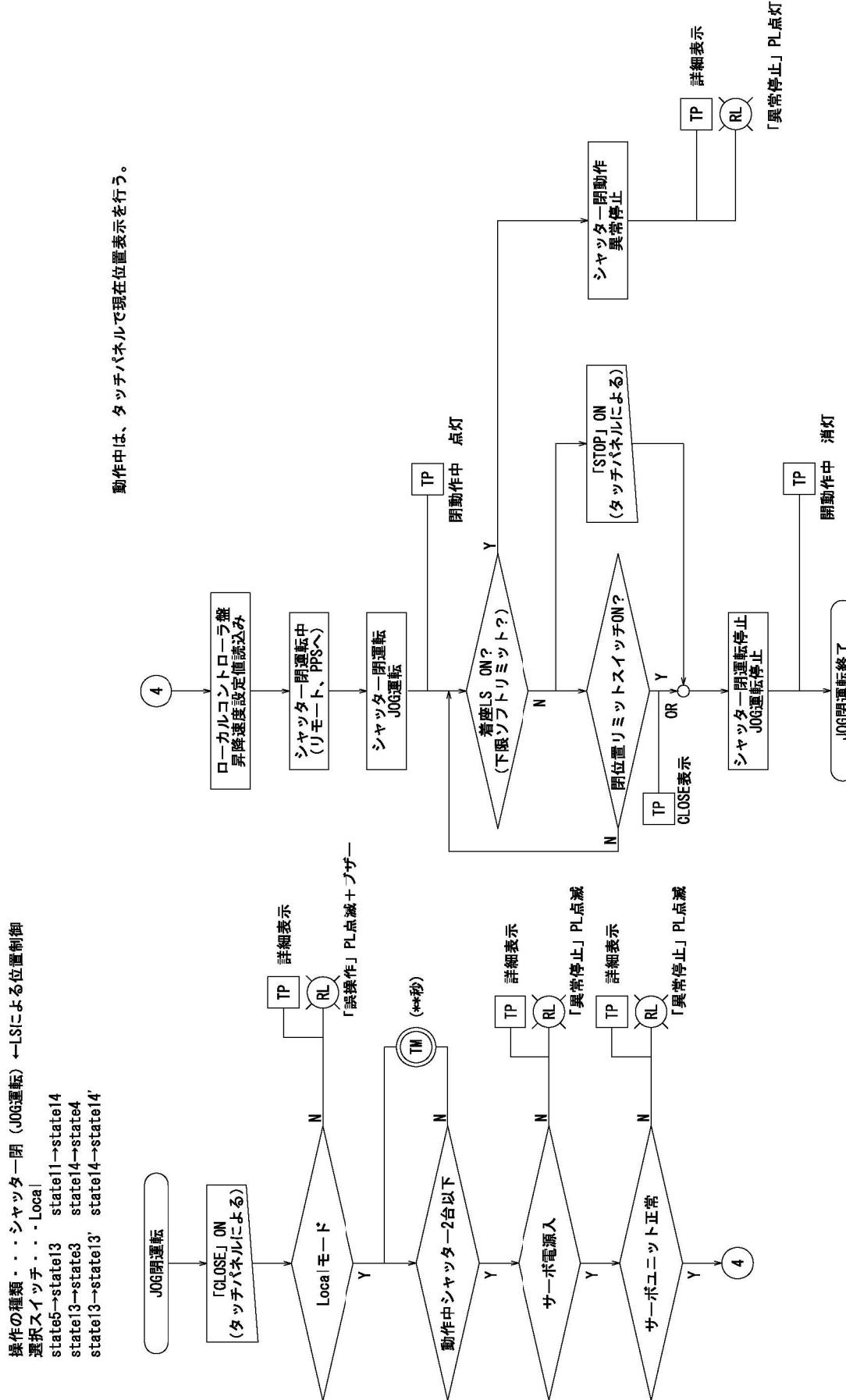


Fig. 13 Flow diagram of shutter close operation.

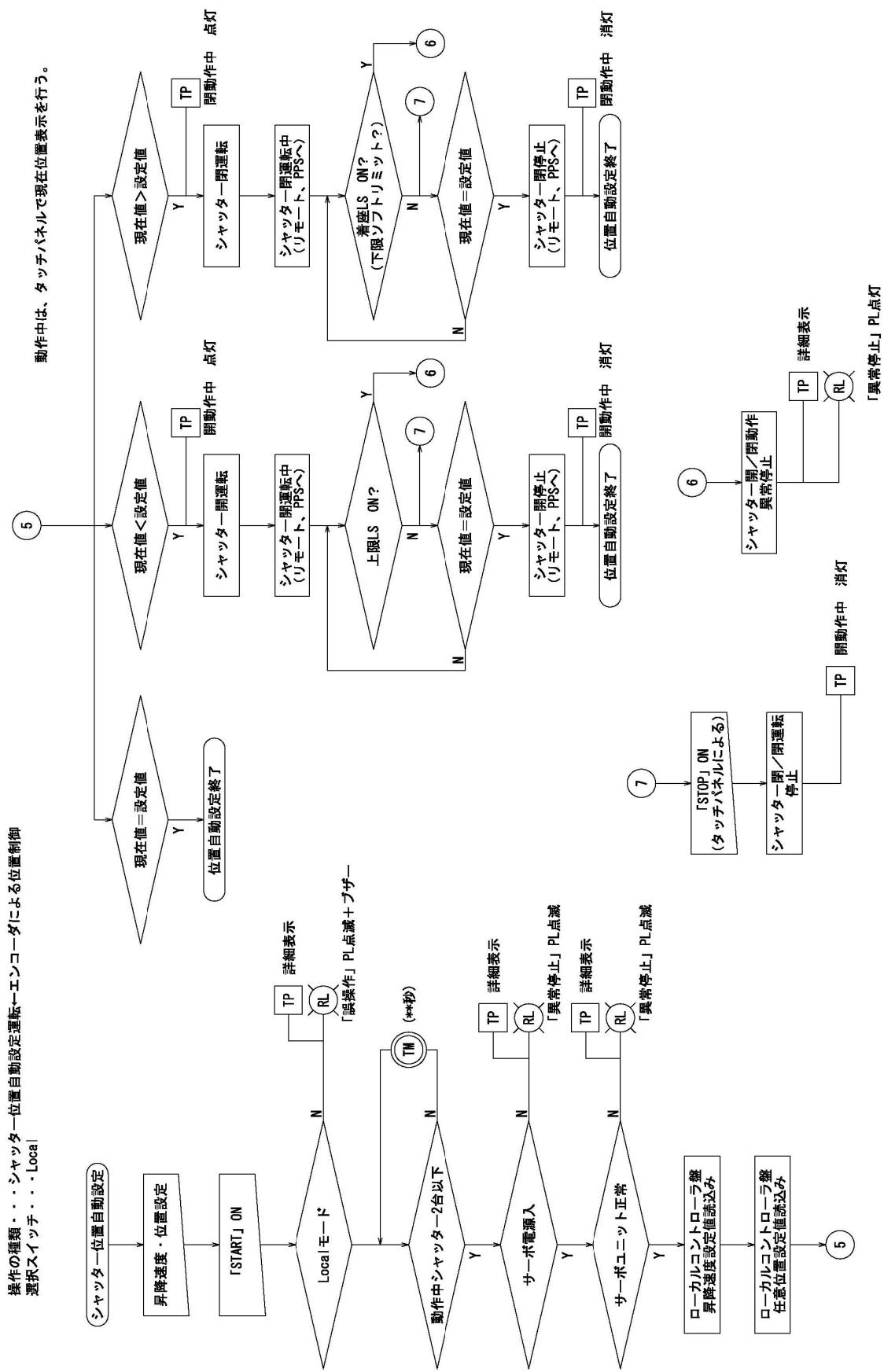


Fig. 14 Flow diagram for shutter operation to optional position.

操作の種類・・・シャッター着座
選択スイッチ・・・Loca |

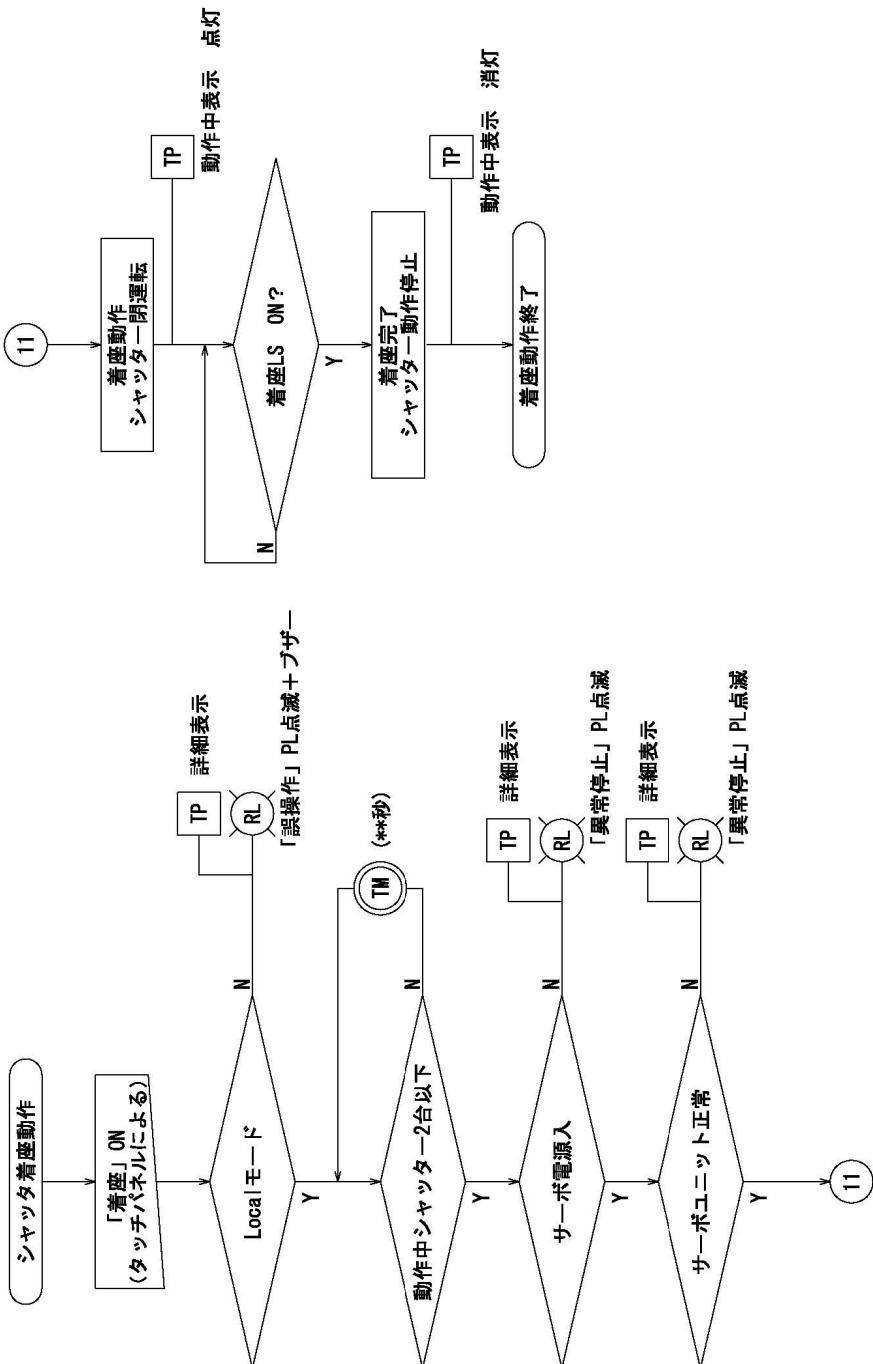


Fig. 15 Flow diagram for shutter operation to sitting position.

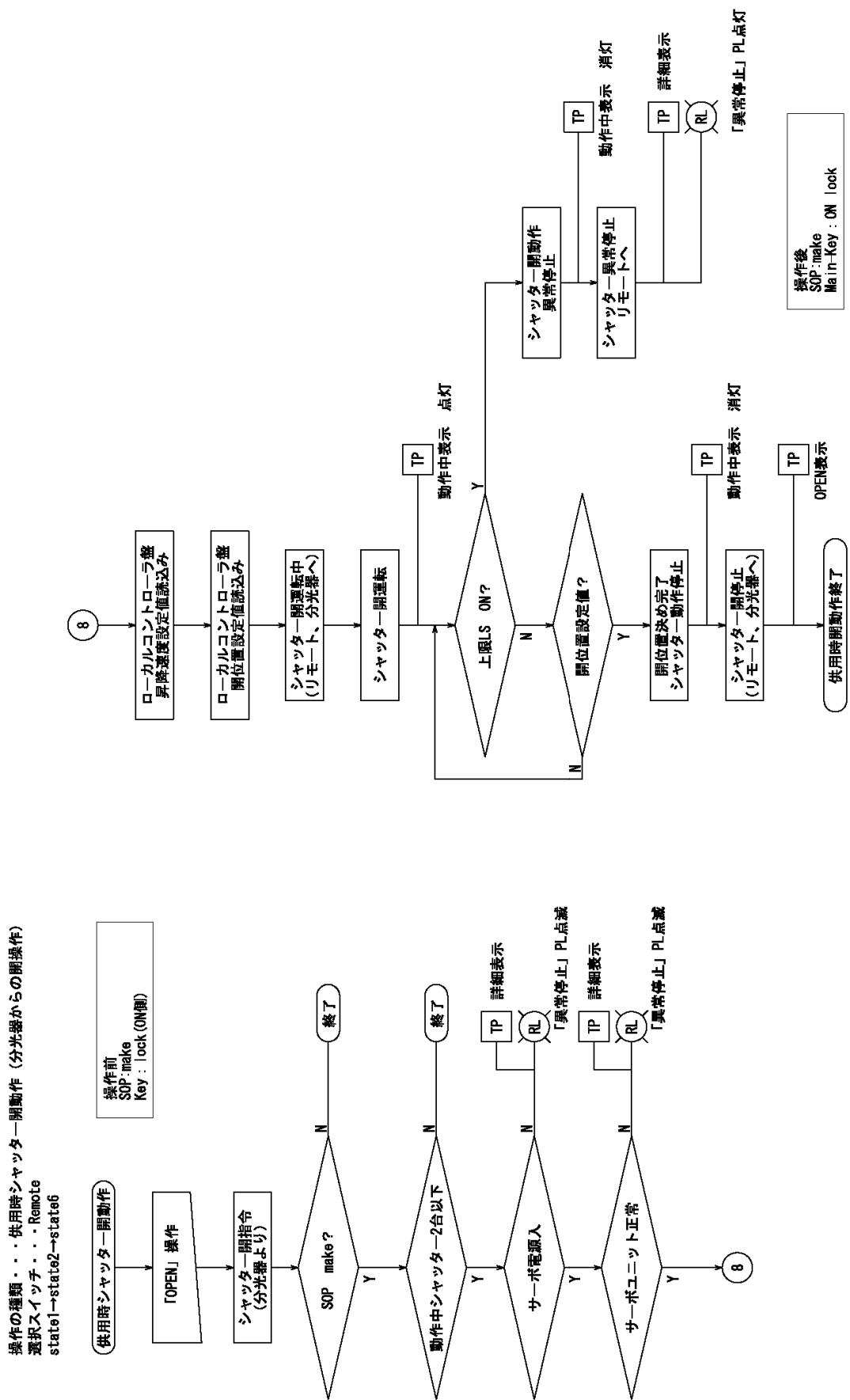


Fig. 16 Flow diagram for shutter open operation from shutter controllers at experimental halls.

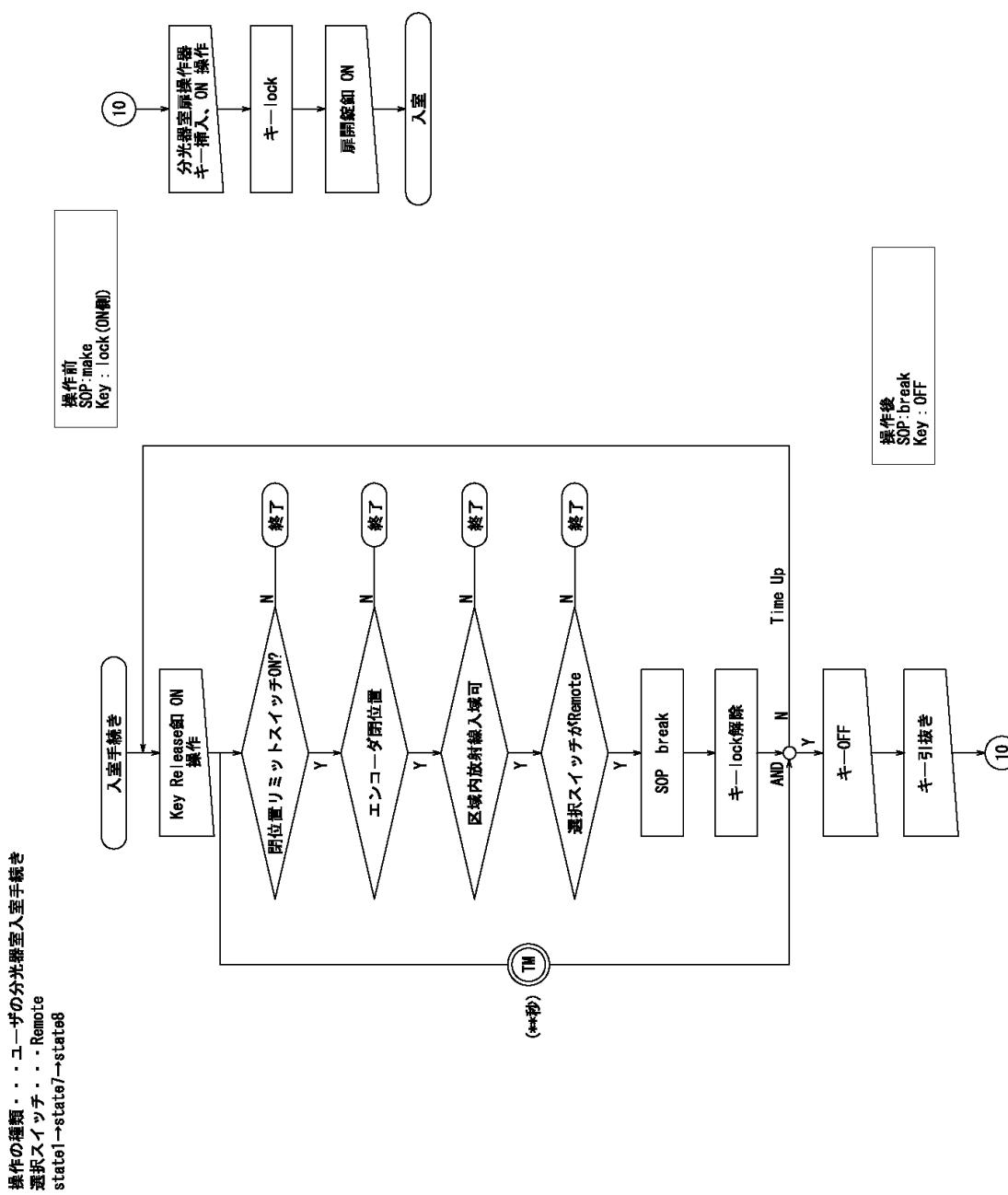


Fig. 17 Flow diagram for entering into a neutron instrument room.

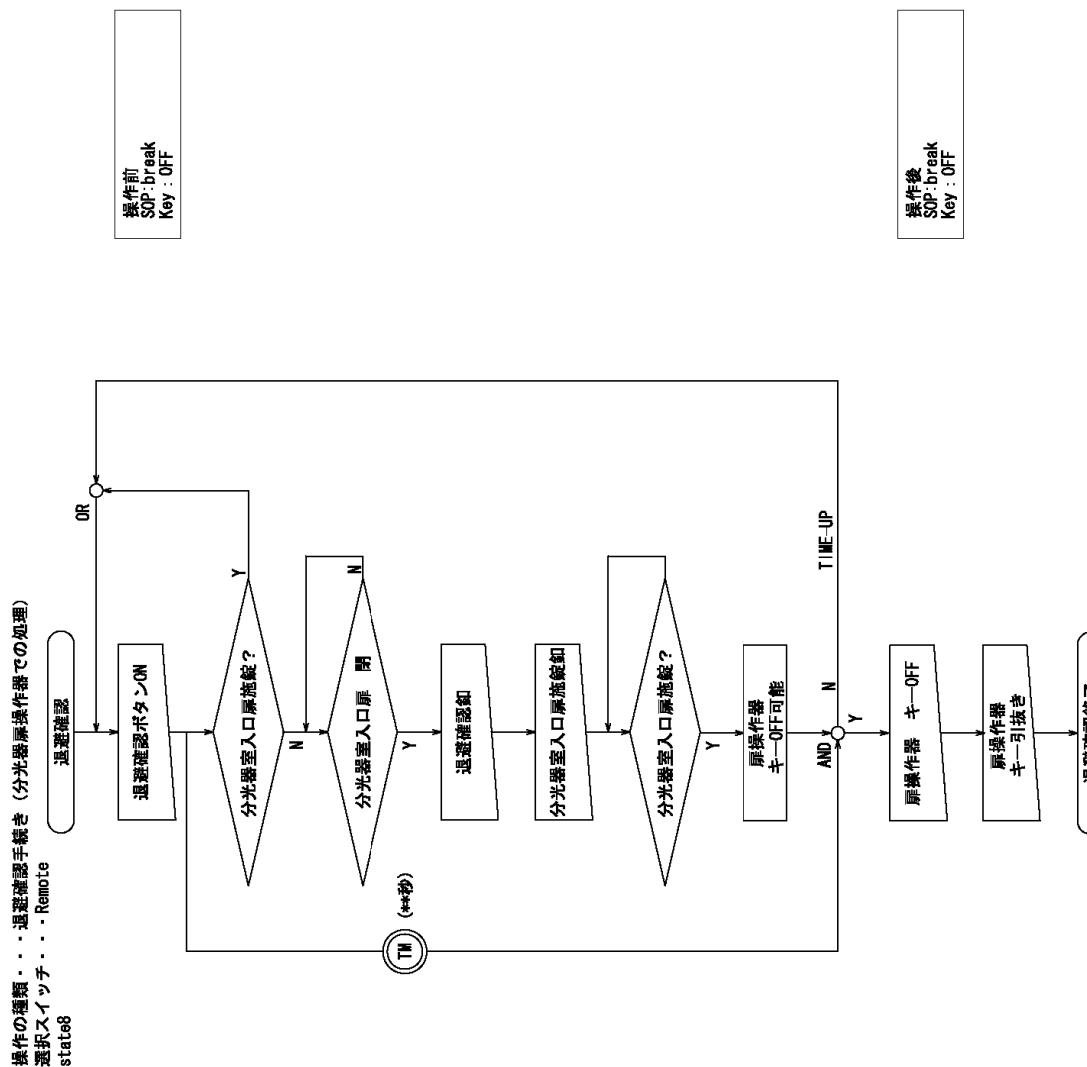


Fig. 18 Flow diagram for exit from a neutron instrument room.

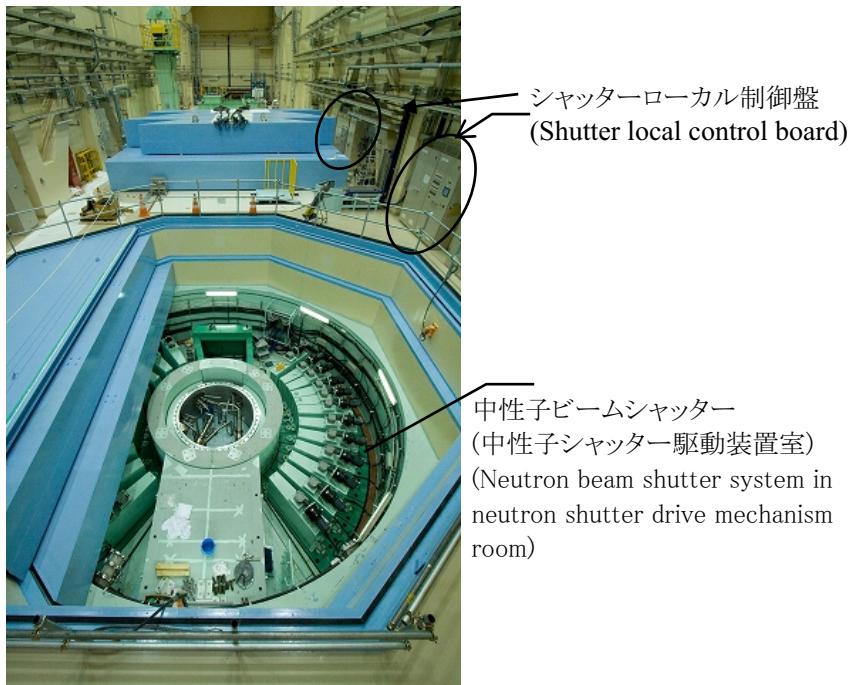


Photo 1 Large components handling room.

Some of shielding blocks is removed, so that neutron shutter drive mechanism room is viewed from upward. Proton beam comes to the target station from upward in the picture.

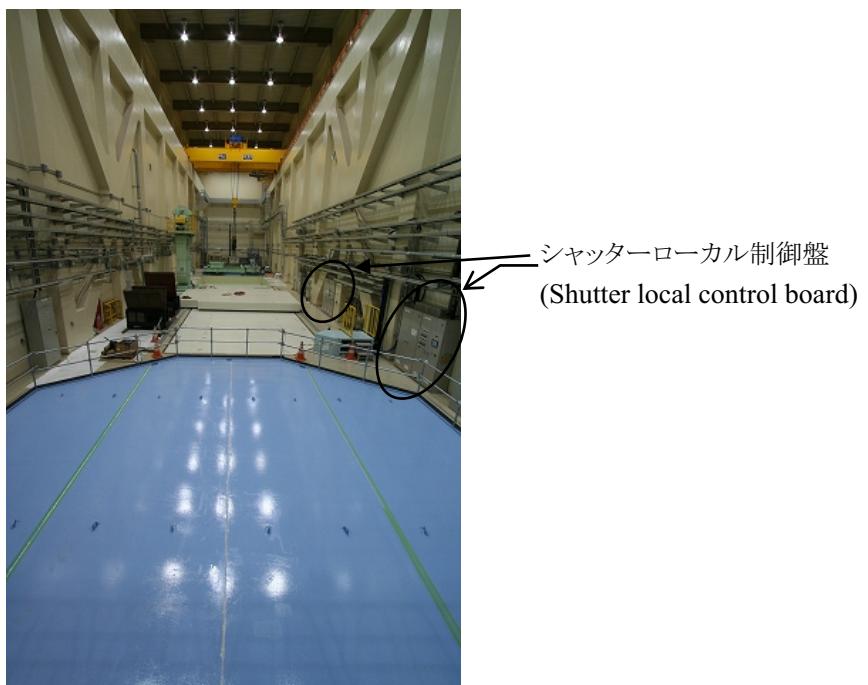


Photo 2 Large components handling room.

All shielding blocks are set over the neutron shutter drive mechanism room.



Photo 3 No.1 experimental hall (As of October, 2007).



Photo 4 Shutter local control board.

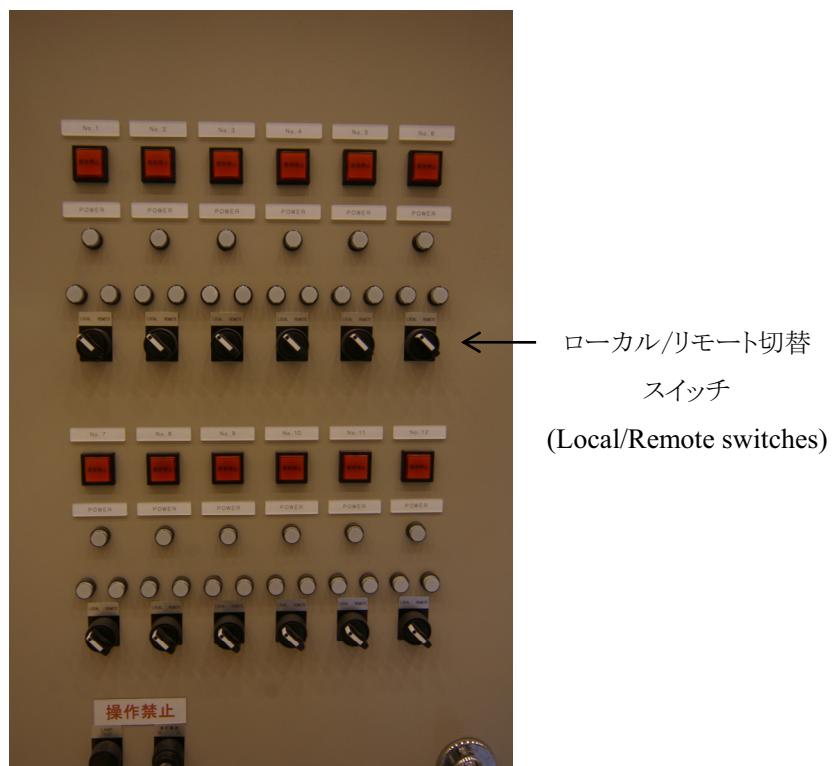


Photo 5 Local/Remote switches on shutter local control board.



Photo 6 Display/Operation panel on shutter local control board.



Photo 7 Entrance of neutron instrument No.10 (as of October, 2007).



Photo 8 Panic and search buttons in neutron instrument room No.10.



Photo 9 Shutter controller.



Photo 10 Door controller.



Photo 11 PPS control unit in MLF control room.



Photo 12 Inside of PPS control panel.

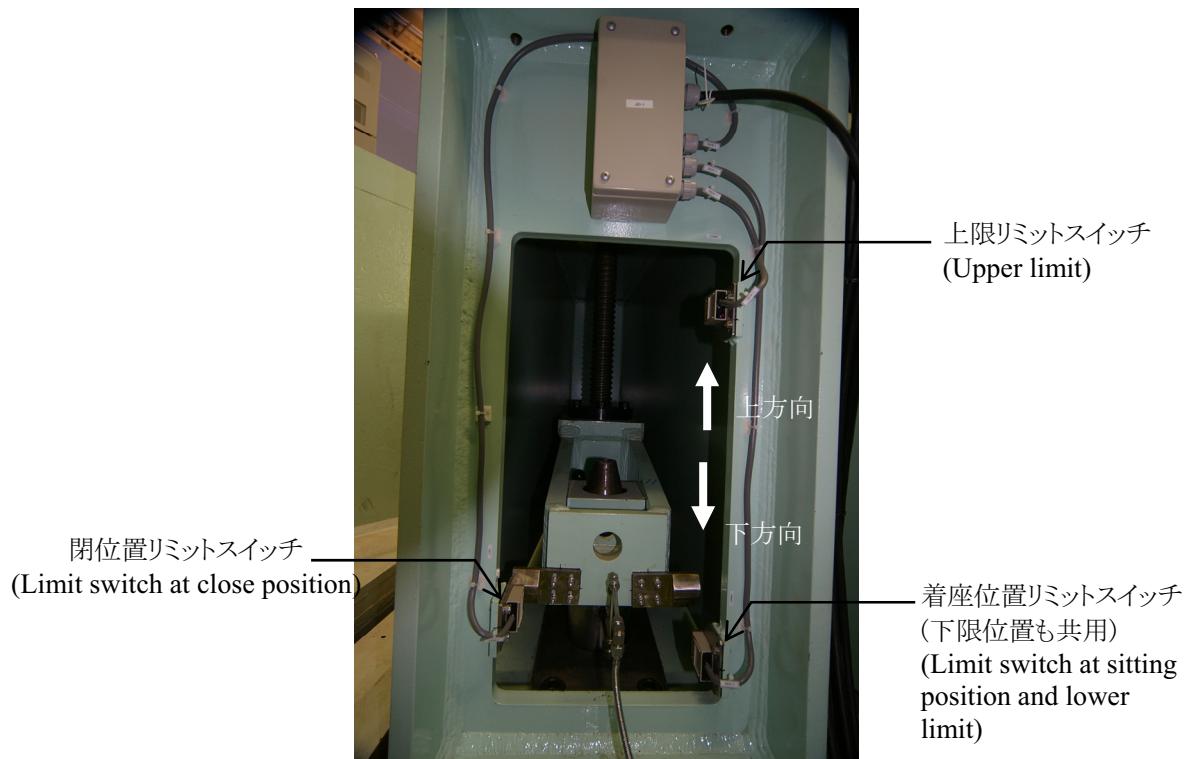


Photo 13 Mechanical limit switch layout at the shutter drive mechanism for beam-line No.1.

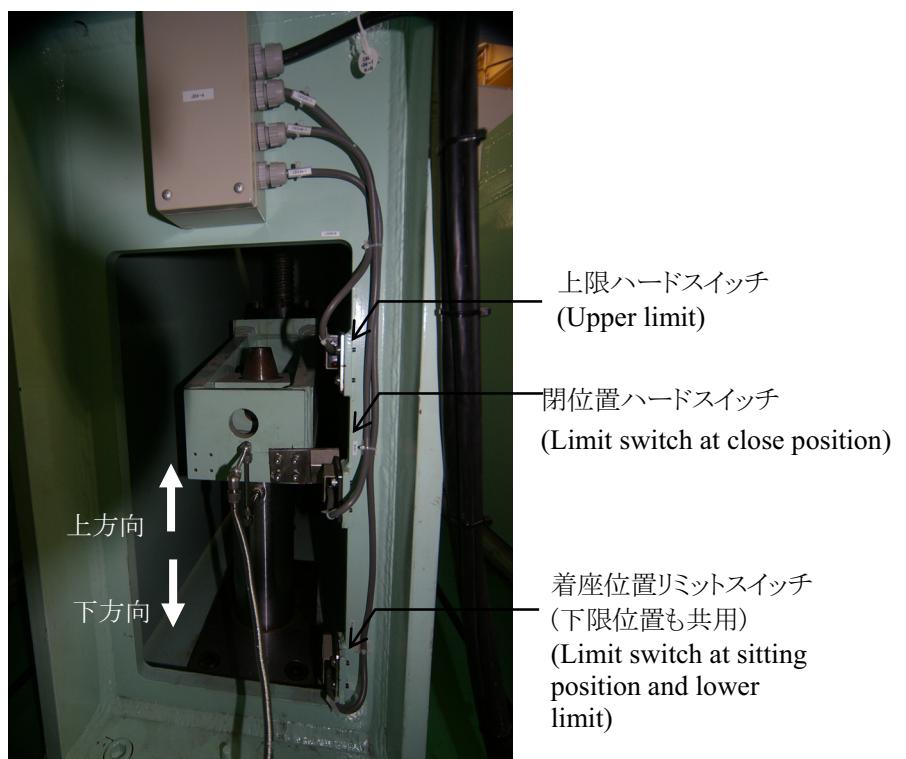


Photo 14 Mechanical limit switch layout at the shutter drive mechanism for beam-line No.16.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル毎秒	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	C/V
静電容量	フアード	F	V/A
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジemens	S	A/V
磁束密度	テスラ	T	$V \cdot s$
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/m^2
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	Wb/A
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	lm/m^2
吸収線量、質量エネルギー一分率	グレイ	Gy	J/kg
線量当量、周辺線量当量	カーマ		$m^2 \cdot s^{-2}$
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ニュートンメートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$m^2 \cdot s^{-2}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$kg \cdot s^{-3}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム		$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每スチラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每スチラジアン	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	°=(π/180) rad
分	'	'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さないSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 dam^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイニン	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m/s$
ガウス	G	$1 G \triangleq 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \triangleq (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx \triangleq 10^{-8} Wb$
スチルブ	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	X unit	$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジヤンスキ	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
カリ	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

