

平成 28 年度
卒業論文

ALICE 前方ミュオン粒子飛跡検出器の導入 に向けた安全連動装置の考察

広島大学理学部物理科学科
クォーク物理学研究室
学籍番号 B136250

新郷 裕太

指導教官 杉立 徹 教授
主査 志垣 賢太 准教授
副査 川端 弘治 准教授

平成 29 年 2 月 22 日

概要

ヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) によって建設された、LHC 加速器は高エネルギー物理実験を目的に 2009 年から稼働している。2019 年から 2020 年の間に LHC 加速器ではルミノシティ向上のために長期シャットダウンを予定しており、LHC 加速器の主要な検出器のうちのひとつである ALICE 検出器では検出器のアップグレード計画のひとつとして、前方ミュオン粒子飛跡検出器であるミュオン・フォワード・トラッカー (MFT) の導入が決定している。

異常な状況によって MFT が深刻なダメージを受け火災などが発生してしまった場合、人身事故や他の検出器に被害を与えてしまう可能性がある。従って MFT が異常を示した瞬間に電源を全て落とすインターロックのシステムを導入しなければならない。そのため、本研究では安全に ALICE 実験を行うためにインターロックについての考察を行なった。

Excessive Temperature		
Detector	Interlock	A Serious temperature abnormality Some temperature abnormalities
	FSM	A temperature abnormality
Cooling Failure		
Cooling Plant	Interlock	Big water leaks Failure of cooling system
		alarm

目次

1	序論	7
1.1	原子核物理	7
1.1.1	標準模型	7
1.1.2	クォークとレプトン	7
1.1.3	4つの相互作用	8
1.2	クォークグルーオンプラズマ相	8
1.2.1	クォークのカラー自由度	8
1.2.2	クォークの閉じ込め	9
1.2.3	クォークグルーオンプラズマ	9
1.2.4	クォークグルーオンプラズマ相の生成方法	10
1.3	ミューオン	10
1.3.1	ミューオンの性質	10
1.3.2	ミューオンの測定	11
1.4	実験施設	11
1.4.1	LHC 加速器	11
1.4.2	ALICE 実験	12
1.5	アップグレード計画	12
1.5.1	LHC アップグレード計画	12
1.5.2	ALICE アップグレード計画	13
2	Muon Forward Tracker	14
2.1	MFT 概要	14
2.2	MFT の構造	14
2.3	MFT Disks	14
2.4	MFT Disk の構造	17
3	インターロック	19
3.1	インターロックとは [9]	19
3.2	MFT のインターロック	19
3.3	安全装置	20
3.3.1	検出器制御機構	20
3.3.2	有限オートマトン	20
3.3.3	PLC	21
3.3.4	実装方法	21
3.3.5	冷却システム	21
3.4	異常状態	23
3.4.1	温度異常	23
3.4.2	冷却ミス	25

3.5	トラブルシナリオ	26
4	結論	27
5	謝辞	28

目 次

1	標準模型 [2]	7
2	現象論的クォークの閉じ込めポテンシャル	9
3	超高温エネルギー重イオン反応	10
4	LHC 加速器 [4]	12
5	ALICE 検出器 [5]	13
6	MFT concept1[6]	15
7	MFT concept2[6]	15
8	MFT Disks[1]	16
9	Ladder[1]	16
10	Half Disk[1]	18
11	MFT 周りの検出器 [1]	19
12	FSM 概念図 [10]	20
13	PLC Cycle	21
14	冷却システム MFT[11]	23
15	冷却システム RU[11]	23

表目次

1	クォークとレプトン	8
2	4つの相互作用	8
3	ミューオンの性質	11
4	Number of ALPIDE , ladder , DC-DC-Converter , GBT-SCA	17
5	冷却システムに導入されるセンサー	22
6	温度異常とそれに対する対応策	24
7	冷却ミスとそれに対する対応策	26

1 序論

1.1 原子核物理

1.1.1 標準模型

標準模型とは素粒子物理学の中で、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用の三つの基本的な相互作用を記述するための理論の一つである。標準模型の中には物質を作る粒子であるクォークとレプトンがそれぞれ6種類と素粒子間に働く相互作用を伝える粒子であるゲージボゾンが4種類、対称性を破るヒッグス粒子の計17種類の素粒子からなる。また、素粒子は現在の実験的事実から内部構造を持たないとされている。

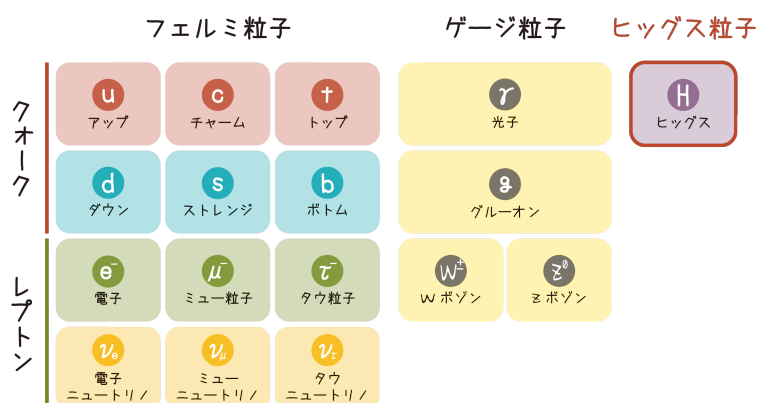


図 1: 標準模型 [2]

1.1.2 クォークとレプトン

クォークはクォーク同士が結合してハドロンと呼ばれる複合粒子を形成する。最も安定なハドロンは原子核の構成要素である陽子と中性子である。クォークは6種類のフレーバーを持ち、3つの世代を形成する。第一世代のアップ、ダウン、第二世代のチャーム、ストレンジ、第三世代のトップ、ボトムである。世代が上がるごとにクォークの質量は増加するため、崩壊しやすくなる。レプトンは強い相互作用をしない粒子をさし、電子、ミューオン、タウオンとそれぞれに対応するニュートリノの6種類がある。レプトンもクォークと同様に3世代に分けられている。

表 1: クォークとレプトン

	クォーク		レプトン	
第一世代	アップ u	ダウン d	電子 e	電子ニュートリノ ν_e
第二世代	チャーム c	ストレンジ s	ミューオン μ	ミューニュートリノ ν_μ
第三世代	トップ t	ボトム b	タウオン	タウニュートリノ
電荷	+2/3	-1/3	-1	0
スピン	1/2	1/2	1/2	1/2

1.1.3 4つの相互作用

自然界には4つの相互作用が確認されている。4つの相互作用とは、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用、重力相互作用である。それぞれの相互作用に応じて力を媒介するゲージボゾンと呼ばれる粒子が存在する。このゲージボゾンそれぞれグルーオン、フォトン、W、Z、グラビトンと呼ばれている。

表 2: 4つの相互作用

	強い相互作用	電磁相互作用	弱い相互作用	重力相互作用
影響を受ける粒子	クォーク ハドロン	荷電粒子	クォーク レプトン	全ての粒子
到達距離	$10^{-15}m$	∞	$10^{-17}m$	∞
典型的な寿命	$10^{-23}s$	$10^{-20} \sim 10^{-16}s$	10^{-11}	
媒介する粒子	グルーオン	フォトン	W,Z	(グラビトン)

1.2 クォークグルーオンプラズマ相

1.2.1 クォークのカラー自由度

クォークはスピンが1/2のフェルミ粒子である。そのため、クォーク3つから成るハドロンと呼ばれる物質のスピンが1/2もしくは3/2の二つの値を取ることができる。3個のuクォークが全て上向きのスピンを持つ物質が存在する。これは3個のuクォークは全く同じ状態に入っているためパウリの排他律に矛盾する。この矛盾を解消するためこの3個のuクォークは異なる状態にあると考えられる。この状態の自由度をカラー自由度と呼ばれている。このカラー自由度が色を打ち消しあうように強い力が働く。そのため、ハドロンは全体として見れば無色であるが、その内部に入れば有

色のクォークから成り立っている。[3]

1.2.2 クォークの閉じ込め

低温、低密度状態ではクォークはハドロン中に閉じ込められている。クォークと反クォークの相互作用のポテンシャルをグラフにした。r はクォークと反クォークの距離である。このポテンシャルは近距離であれば $1/r$ に比例したような形をとっているが、それに kr という強い相互作用が重なり合った形になる。この時のポテンシャルは

$$V = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s(r)\hbar c}{r} + kr$$

になる。これによるとクォーク反クォーク対が遠ざかればポテンシャルが高くなっていくため距離が遠いところには行けなくなる。この距離を $10^{-13}cm$ 程度としたのがこの現象論的相互作用でありクォークの閉じ込めである。

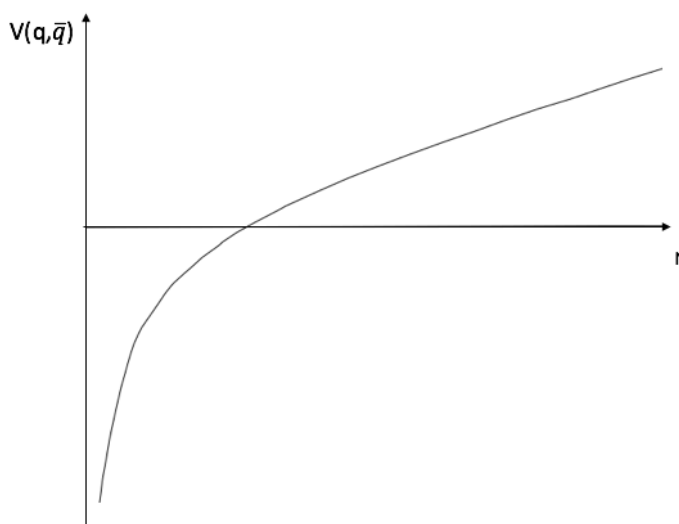


図 2: 現象論的クォークの閉じ込めポテンシャル

1.2.3 クォークグルーオンプラズマ

スーパーコンピューターを用いた「格子量子色力学」によると真空の温度を高温にするとある温度以上になるとクォークの閉じ込め現象が消失する。この時の温度はクォーク反クォーク、グルーオンが大量に存在する多体型になるためクォークグルーオンプラズマと呼ばれている。このような高温の状態は宇宙の初期、ビッグバンから約 $10^{-5}s$ ぐらいたって時に実現したものと

考えられている。この結果、宇宙は QGP からハドロン相に相転移したと考えられている。

1.2.4 クォークグルーオンプラズマ相の生成方法

このクォークグルーオンプラズマ相を生成するための方法としてもっとも有力視されているのは高エネルギーでの重イオン反応である。核子あたりのエネルギーが 100GeV といった非常に高エネルギーの衝突が起きた時にこのクォークグルーオンプラズマが生成される。超高エネルギーで原子核が運動しているとローレンツ収縮を起こし、円盤のような状態になる。この二つの円盤状の原子核が正面衝突すると原子核内部の核子やそれを構成するクォーク同士は何度も散乱するが、衝突原子核のエネルギーが非常に高いため、衝突核子同士は突き抜けるような形になる。衝突後熱エネルギーだけは後ろに残されるため非常に高温の真空相を作ることになる。この高温の真空層がクォークグルーオンプラズマと呼ばれている。

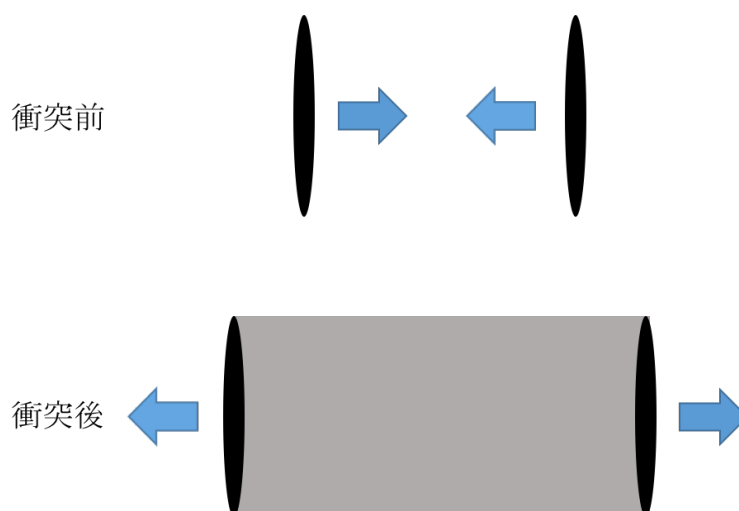


図 3: 超高温エネルギー重イオン反応

1.3 ミューオン

1.3.1 ミューオンの性質

レプトンの第二世代にミューオンと呼ばれる素粒子が存在する。ミューオンは 1936 年に宇宙船の中から観測された。

宇宙線とは宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線のことである。地球上に入射する宇宙線は第一宇宙線と呼ばれほとんどが陽子をはじめとする荷電

粒子である。この高エネルギーの宇宙線が大気に入射すると大気中の原子核と相互作用し大量の 2 次粒子が発生する空気シャワーと呼ばれる現象が起きる。原子核との相互作用により大量の π 中間子が発生する。ミュオンは π 中間子の崩壊によって生成される。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

表 3: ミュオンの性質

記号	μ^-
反粒子	μ^+
電荷	-1
質量	$105MeV/c^2$
平均寿命	2.2×10^{-6}
スピン	1/2
崩壊モード	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

1.3.2 ミュオンの測定

ミュオン粒子は透過力が強く寿命が他の粒子と比べても長いため、遮蔽物の後ろなどではほとんどがミュオンである。また、ミュオン粒子は物質の密度や透過距離に応じて一部が吸収されるため、観測されるミュオン粒子の分布は内部構造を反映したものになる。そのため、ミュオン粒子は比較的粒子の識別が簡単であり、内部構造が観測されるのでミュオン粒子を測定することは大きな意義がある。

1.4 実験施設

1.4.1 LHC 加速器

LHC 加速器とは世界最大の衝突型円型加速器であり、高エネルギー物理実験を目的に欧州原子核研究機構 (CERN) によってフランスとスイスの国境に建設され、2008 年 9 月に稼働を開始した。LHC は途中で粒子のエネルギーを高めるために多数の加速機構を備えた全長約 27km の超電導磁石によって構成されている。また、LHC には ATLAS, ALICE, LHC-b, CMS, LHCf, TOTEM の 6 つの実験グループが存在している。

加速器の中には二本の超高真空に保たれているチューブがあり、それぞれ逆方向に光速に近い高エネルギー粒子ビームが走っている。これらは超電導電磁石により加速器リングの中を回り続ける。

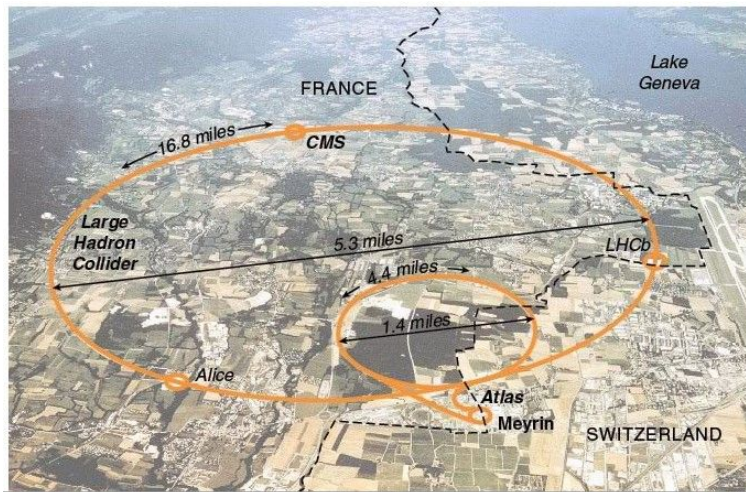


図 4: LHC 加速器 [4]

1.4.2 ALICE 実験

ALICE(A Large Ion Collider Experiment) とは LHC 加速器内にある実験グループのうちの一つである。この実験は LHC 加速器を用いて重イオンを加速させ、ビッグバン直後の宇宙初期に存在されていたとされる物質相クォークグルーオンプラズマ相を生成し、その性質の解明を目的とした実験で高エネルギー重イオン衝突に特化した実験グループである。

また、ALICEには ITS(Inner Tracking System), TPC(Time Projection Chamber), TOF(Time-of-Flight), TRD(Transition Radiation Detector), PHOS(PHOnon Spectrometer), EMCal(Electro Magnetic Calorimeter)[5] などの様々な検出器がある。

1.5 アップグレード計画

1.5.1 LHC アップグレード計画

CERN の LHC 加速器は 2019 年から 2020 年の二年間、二度目のロングシャットダウン (LS2) をする予定である。LS2 での間 LHC のアップグレードは陽子と陽子の衝突や鉛と鉛の衝突のルミノシティの増加を目指している。

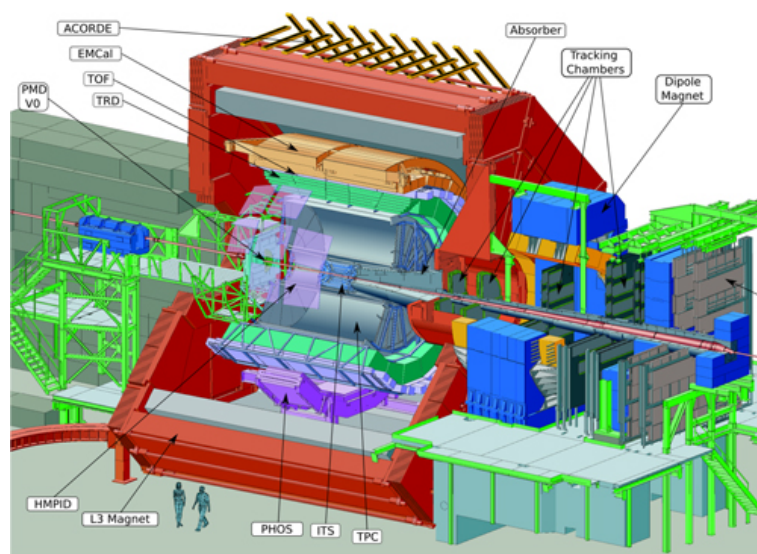


図 5: ALICE 検出器 [5]

1.5.2 ALICE アップグレード計画

LHC のアップグレードに伴い ALICE 検出器のアップグレード計画を予定している。予定されている計画としては DCA 分解能やトラッキング効率、 p_T 分解能の向上を目的とした ITS (Inner Tracking System)、ミュオンのトラックのポインティング精度の向上を目的とした MFT (Muon Forward Tracker)、読み出し速度の高速化を目的とした TPC (Time Projection Chamber) などがある。

2 Muon Forward Tracker

2.1 MFT 概要

2009 年から稼働が開始された ALICE 実験では前方方向のミュオンを測定するためにミュオンアームと呼ばれる検出器を用いて測定している。ミュオンアームはハドロンアブソーバーの後方に設置してある。しかし現在のミュオンアームでは図 5 のようにアブソーバー内で多重散乱が起きてしまい、パイオンからミュオンに崩壊した点の測定精度が悪い。したがって、ALICE は次のアップグレード次に前方ミュオン粒子飛跡検出器である MFT(Muon Forward Tracker) の導入が予定している。ハドロンアブソーバーの前方、衝突点に近い位置に設置されることによってアブソーバー内で起こる多重散乱の影響を受けることなくミュオンの飛跡検出器の精度向上を期待している。

現在、MFT の開発にあたって主に広島大学は検出器制御機構の開発に寄与している。

2.2 MFT の構造

MFT は二つの half-MFT コーンから成り立っている。二つのコーンはイントラクションポイントからビーム軸に沿って-460,-493,-687,-768mm の所に 5 枚の half-Disk からなる。イントラクションポイントから一番近いところから Disk-0,Disk-1,Disk-2,Disk-3,Disk-4 と名付けられている。Disk-0 と Disk-1 は全く同じ構造をしており他の 3 枚は違う構造をしている。

2.3 MFT Disks

・ Pixel Sensor 原子核同士の衝突によって生成される高多重度環境における高分解能トラック再構成の要件を満たすために、新しいピクセル検出器が MFT の基本的な検出要素として選択されている。検出効率及びトラックの再構成性能はセンサーの空間分解能、ノイズによって誘発されるフェイクヒットレート率、センサー内の電荷蓄積レベルに依存する。したがって、MFT が動作する高多重度かつ限定された環境では、検出器の内部及び外部の熱放散を制限するために、センサーが放射と電力に耐性があることが必要になる。そのため現在 ALPIDE(ALICE Pixel Sensor) と呼ばれるピクセルセンサーの開発が進められている。

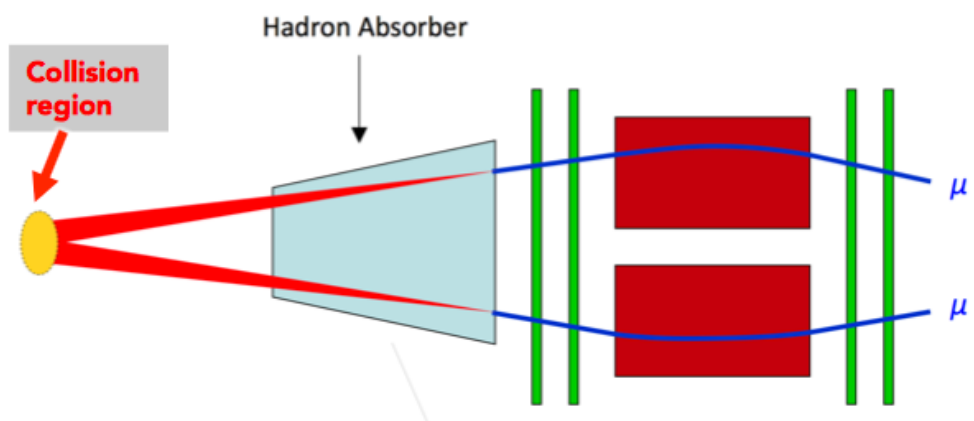


图 6: MFT concept1[6]

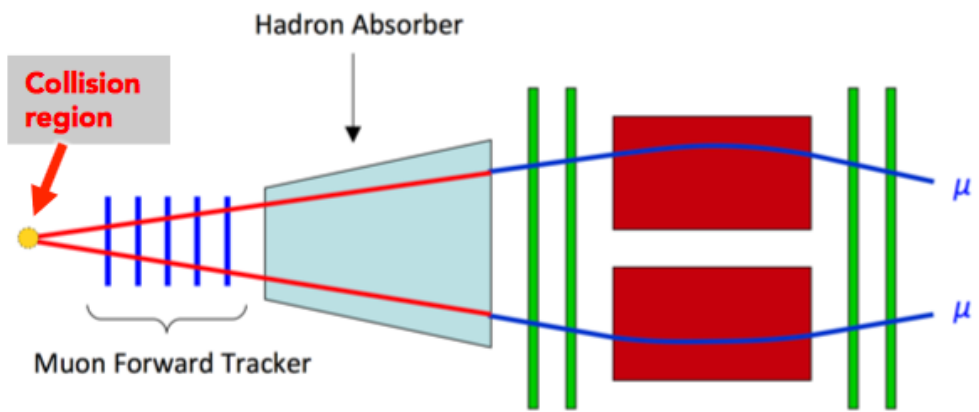


图 7: MFT concept2[6]

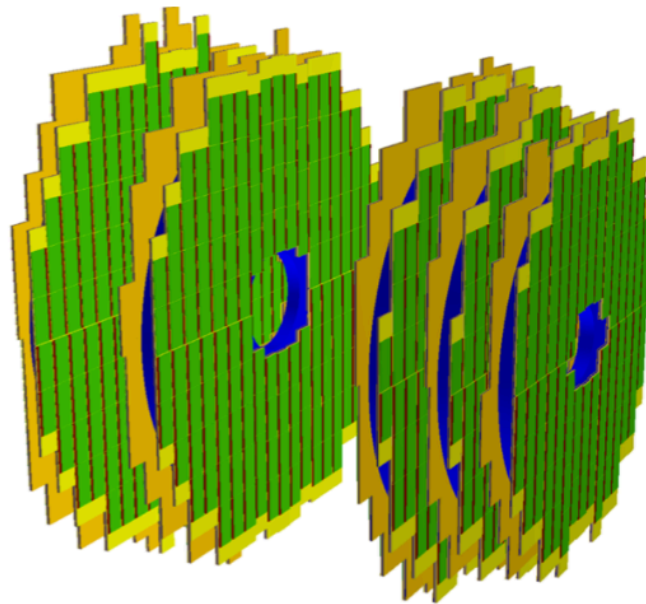


図 8: MFT Disks[1]

・ Ladder

ALPIDE は MFT を構成する 5 枚のディスクに組み立てられたメカニカルラダー構造に組み込まれている。ラダーは ALPIDE が組み込まれた薄い構造要素であり、センサーと読み出し回路と電氣的にリンクしている。ラダーには 15 枚の ALPIDE が組み込まれて、様々な長さのラダーが存在する。

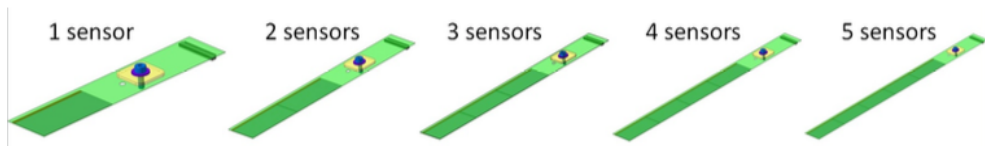


図 9: Ladder[1]

・ GBT-SCA

GBT(Giga-Bit Transceiver) は高エネルギー実験で必要とされる読み出しデータ、タイミングとトリガーの情報、検出器制御とモニタリングの情報を同時に伝えるための独自の光リンクを提供する目的で開発されたシステムである。GBT-SCA(Giga-Bit Transceiver - Slow Control Adapter) は市販の 130nm-CMOS テクノロジーに組み込まれた集積回路で制御信号と監視信号をフロントエンドに分配し、検出器に埋め込まれた電子機器である。

一つの Half Plane につき一つの GBT-SCA がある。

・ DC-DC Converter

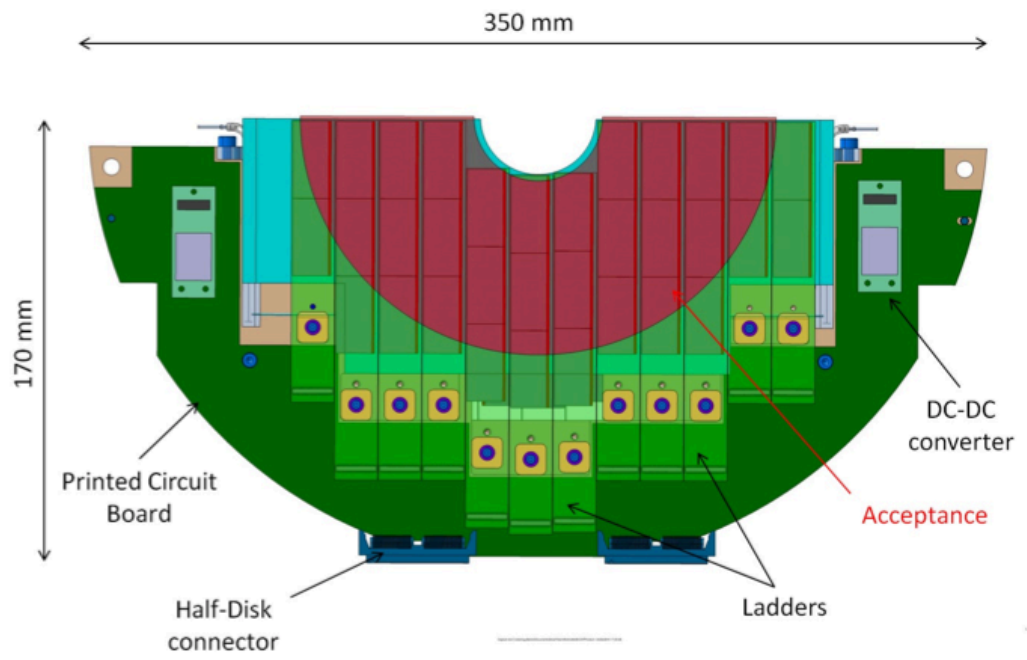
DC-DC Converter は Half Plane の上に二つ乗っている。この DC-DC Converter から一つ一つの Pixel Sensor に電源を供給している。

2.4 MFT Disk の構造

Disk-0, Disk-1, Disk-2, Disk-3, Disk-4 はそれぞれ上下の Half-Disk となり、Half-Disk は ALPIDE, Ladder, DC-DC Converter, GBT-SCA, Print Circuit Board, heat exchanger, Disk support などからなっている。

表 4: Number of ALPIDE , ladder , DC-DC-Converter , GBT-SCA

Disk No.	0	1	2	3	4	SUM
ALPIDE	128	128	152	224	264	896
ladder	48	48	52	64	68	280
DC-DC Converter	8	8	8	12	12	48
GBT-SCA	4	4	4	4	4	20



☒ 10: Half Disk[1]

3 インターロック

3.1 インターロックとは [9]

インターロック機構とは、緊急の際に機械や人命にダメージを与えないようにする機構のことである。インターロックの目的としては、

- ・異常を検知し、自動的に動作をするもの
- ・操作者が異常を感じた時に動作するもの
- ・不意な動作によって事故が起きないようにあらかじめ機械の動作を不能な状態に固定するもの

がある。インターロックが使用されている例としては、すべての扉が閉まっていないとエレベーターが動作できなくする、などがある。

3.2 MFT のインターロック

地下約 70m のところにある ALICE 検出器では実験期間中に MFT が熱などの異常な状態になってしまい検出器がダメージを受けてしまった場合、簡単には取り替えることはできない。また図 11 のように MFT の周りには ITS (Inner Tracker System)、FIT (高速相互作用トリガーディテクター) や Beam-pipe が設置してある。そのため MFT がダメージを受け火災などが発生して周りの検出器に被害を与えないと ALICE 実験が、Beam-pipe が傷ついてしまえば LHC 全体の実験が止まってしまう。

そのため、検出器への被害と周りへの被害を抑制するためにインターロック

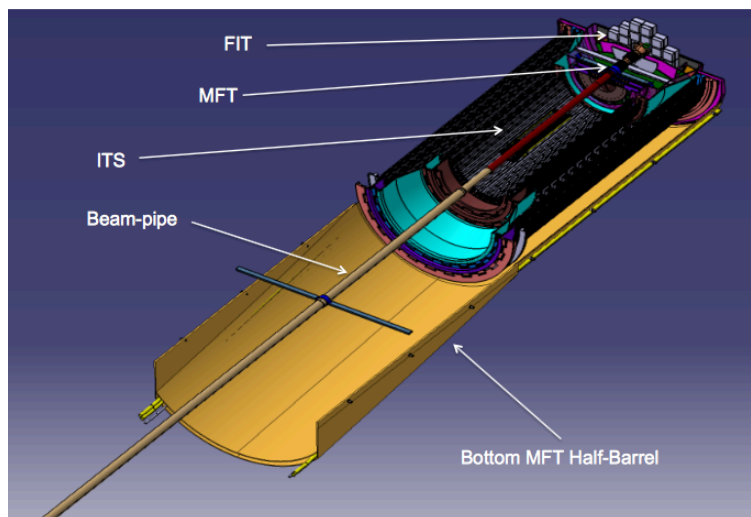


図 11: MFT 周りの検出器 [1]

の導入を決定した。

3.3 安全装置

3.3.1 検出器制御機構

ALICEの検出器は地下約70mのところであり実験中は放射能などで危険なため、人間がこの場所に立ち入り検出器のon/offなどの作業をすることはできない。したがってALICEは検出器の制御・監視を地上から行う。そのため、検出器の制御・監視を行うために検出器制御機構としてDCS(Detector Control system)を導入する。DCSは検出器の温度上昇によって熱ノイズが増え、適正な実験が行えなくならないように検出器にかかるLVやHVを適正な値に調整するような機能が備わっている。また、検出器が制御不能な状況になった時に電源供給を切るようなインターロックと呼ばれるシステムを導入する必要がある。

3.3.2 有限オートマトン

有限オートマトン(FSM)は有限個の状態と遷移と動作の組み合わせからなる数学的に抽象化された振る舞いのモデルで、デジタル回路やプログラムの設計で使われることがある。そしてある一連の状態をとった時どのように論理が流れるかを調べることができ、有限個の状態のうち一つの状態を取ることができる。ある時点、ある箇所では一つの状態しか取ることができず、その時点を現在状態と呼ぶことがある。何かしらの事象によってある状態から、別の状態に遷移する。それぞれの現在状態から遷移しうる状態と、遷移のきっかけとなる条件を列挙することで定義される。MFT DCSのFSMでは状態を監視し、DCSが損害を防止するためのアクションを起こす。

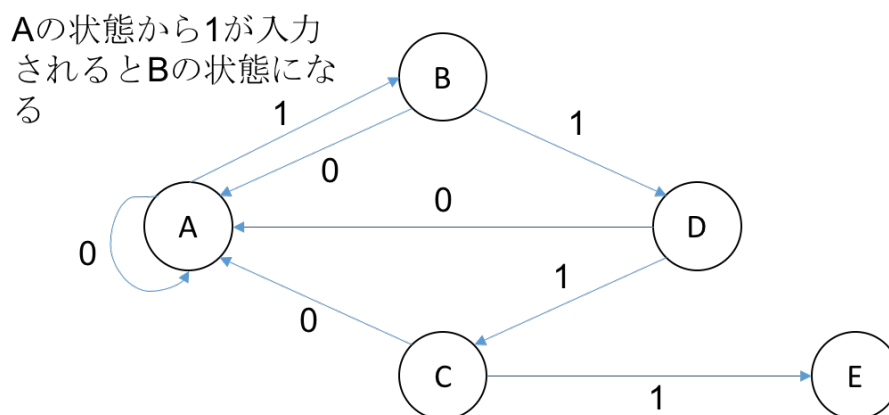


図 12: FSM 概念図 [10]

3.3.3 PLC

PLC(Programmable logic controller) と呼ばれる制御装置の中に検出器を守るためのシステムが導入されている。PLC は常に検出器の温度や冷却機構の流量などを常に監視している。あらかじめ設定された閾値を超えた場合、すぐさま制御室に知らせるためにアラームを鳴らす必要がある。また検出器に重大な被害を与える可能性がある場合は自動的に電源供給を切ることもある。PLC は DSS(Detector Safety System) と呼ばれる検出器を守るためのシステムに乗っている。

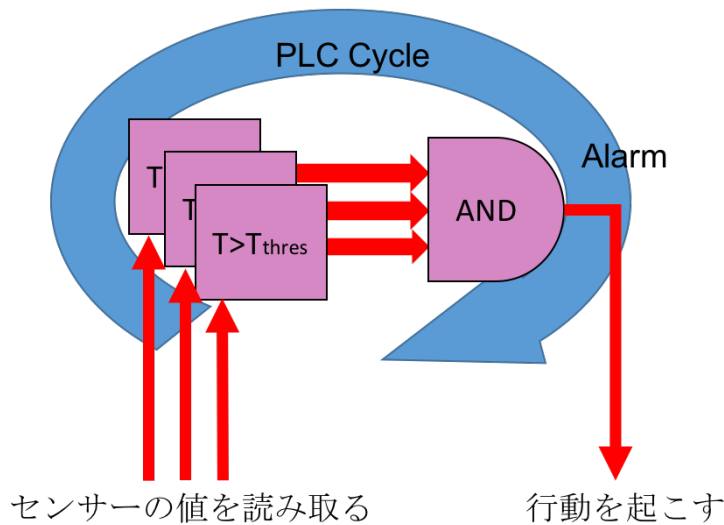


図 13: PLC Cycle

3.3.4 実装方法

LHC 実験の制御システムは、世界中の開発者が共同で開発している。そのため最終的な制御システムを形成するために統合させなければならない。これを解決するために CERN と LHC 実験は共同研究として確立された JCOP(Join Controls Project) と呼ばれるツールを用いることにした。JCOP を用いることによって PLC や DCS を導入できる。インターロックを導入するためにはこの JCOP と呼ばれるシステムを用いて実装する。

3.3.5 冷却システム

MFT は温度が上昇し故障が起きる可能性があるため、MFT を守るために冷却システムが必要となる。現在 MFT で採用する予定の冷却システムは冷

却プラントは水冷プラントと空冷プラントの二種類がある。MFT の熱解析では一つのラダー内での温度勾配を 5 以下、温度を 30 以下に保つことができる冷却システムを設計することを目的としている。その結果、MFT では水冷による冷却法が MFT にとって堅牢な解決策であることが示された。そして空冷による解決策をバックアップとして検討されている。

水冷プラントのパイプ内を流れる水の水压はパイプの外の大気圧よりも低く設定してある。したがって、パイプに小さな穴が一つ空いてしまったとしても外部の空気がパイプ内に吸い込まれるため水が漏れない。そのような部分をリークレスゾーンと呼ぶ。Half MFT あたり到一个の入り口パイプと一つの出口パイプの計 4 つの 5mm の内径の 4 本のパイプを必要としている。故障の場合に冗長性を持たせるために 8 本のパイプを利用する必要がある。

この冷却システムは MFT の温度異常を起こさないためのシステムであるため、この冷却システムが故障した場合 MFT を冷やすことができないので故障を検知した場合はすぐさま MFT への電源供給をカットするために PLC で監視してある。そのため、冷却システムには異常を素早く検知するためにいくつかのセンサーが導入されている。

表 5: 冷却システムに導入されるセンサー

Sensor	number
Tank Pressure	1
Pump Pressure	1
Chilled Water Flow Temp	1
Heater Temp	1
Input Water Temp	1
Water Flow	12+1
Input Water Pressure	12+1
Output Water Temp	12+5
Air Flow	0-1
Air Temp	0-6

冷却水が溜められているタンクの圧力、冷却水をパイプの中に通す時に使うポンプの圧力、ポンプの後ろ側にある冷却水の温度を測るための温度計、冷却水の温度を調整するためのヒーターの温度、MFT や RU Crate の中に入る前のパイプ内にある冷却水の温度、MFT の Half Disk10 枚と PSU2 つと RU Crate を冷やすための 12+1 個の流量計、それと同じところにある水压計、MFT や RU Board5 枚を冷やした後の出てきた所の水温計がある。また空冷プラントの方は流量計と温度計が導入される予定である。

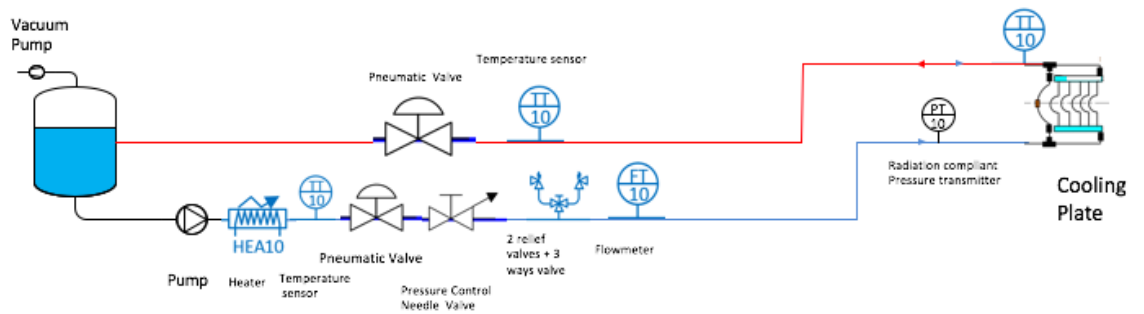


図 14: 冷却システム MFT[11]

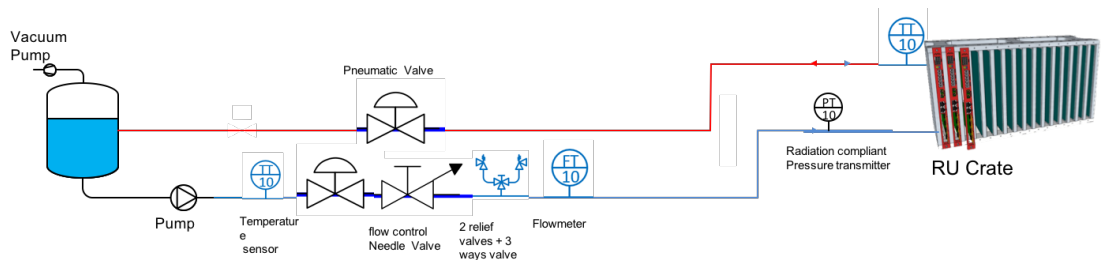


図 15: 冷却システム RU[11]

3.4 異常状態

異常な状態は検出器の運用上常に起こりうる Level1 のエラーと検出器に深刻なダメージを与えその検出器を用いた実験を行えなくなるような Level2 のエラーと検出器だけでなく LHC 加速の全ての実験がストップしてしまうような Level3 のエラーがある。

Level1 のエラーは実験を行う上で常に起こりうるエラーであるが、Level2 と 3 のエラーは起きてしまった場合深刻な状況になってしまうためこれが起こる前に対処しなければならない。そのため PLC がこのような異常を検知またはその可能性が出てきた場合にインターロック信号を送り電源を落とすアクションを起こす必要が出てくる。

3.4.1 温度異常

現在 MFT が起こりうる異常状態によって深刻な状況に陥る要因として考えられているのは温度の上昇による異常である。温度上昇によってもたらされる被害は MFT の故障だけではなく、周りにある ITS や FIT そして Beam-pipe にも被害が及ぶ可能性がある。ITS や FIT だけならば ALICE 実験のみが止まることにもなるが、Beam-pipe が破損してしまうと LHC の全ての実験を

止めざるを得なくなってしまう。したがって周りにある検出器などに被害を出してしまう火災が起きるとい状況は必ず避けなければならない。また、周りに被害が出さずをも MFT に乗っている ALPIDE や DC-DC Converter , GBT-SCA の温度上昇による故障も避けなければならない。

もし、温度上昇による異常状態が検知されてしまった場合、以下のような対応策が考えられる。

ALPIDE , DC-DC Converter , GBT-SCA の温度を常に監視している。ALPIDE 一つの温度があらかじめ設定されているスレッシュホールド温度よりも高くなった場合には監視している PLC がアラームを鳴らす必要がある。

一つの Half Plane 内で複数個温度異常が検知された場合、DCS FSM がその Half Plane に電源を供給している DC-DC Converter の電源を落とす。

DC-DC Converter と GBT-SCA の温度が上がった場合も同じく FSM を用いて温度異常が起きている DC-DC Converter への電源供給を落とす必要がある。

一つの Half Disk だけでなく複数個の Disk に乗っている ALPIDE , DC-DC Converter , GBT-SCA の温度が上がっていったしまった場合、温度上昇の原因の特定が難しく放置しておく確実に火災まで至る可能性が大きくなってくるためインターロックしなければならない。そのためインターロックするために PLC からインターロック信号を送り、MFT 全体の電源供給を落とす必要がある。

また、一つ以上でも深刻な温度異常に至ってしまった場合も火災になってしまう可能性があるためインターロックしなければならない。

表 6: 温度異常とそれに対する対応策

ALPIDE	一つ	アラームを鳴らす
	一つの Half Disk 内	FSM で止める
	深刻な温度異常	インターロック
	複数個が同時に温度上昇	インターロック
DC-DC Converter	一つ	FSM で止める
GBT-SCA	深刻な温度異常	インターロック
	複数の温度異常	インターロック

3.4.2 冷却ミス

・大気の流入

リークレスゾーンで穴が空いてしまった場合、大気中の空気がパイプ内に流入し始める。空気流量が少ない場合はシステムの性能に著しい影響を与えず冷却システムのループを維持することができるが、空気の流入量が多い場合、穴から水が漏れてしまうと検出器の運転に支障がでる可能性がある。そのため、流量が減少方向に向かっていくのを検知した場合まずは制御室に知らせなければならない。

・タンク圧の増加

真空ポンプが吸える量よりも大気の流入がとて大きく水漏れが発生してしまった場合、タンクの中の圧力は上昇してしまう。この状況になると冷却水が少なくなっていくため冷却できなくなってしまう。しかし、この状態になってしまった場合穴を塞ぐなどの処置をとることは不可能である。また、水量は各 MFT の Half Disk と RU Crate の部分に分かれているためどの部分で水漏れが発生しているのかがわかる。そのため MFT 側で水漏れが発生してしまった場合は MFT をインターロックしなければならない。RU Crate 側で水漏れが発生した場合は RU Crate への電源供給をきる必要があり、データの読み出しができないため MFT へ供給されている電源の方も落とさないといけないがこちらは緊急ではないため FSM がシャットダウンをする。

・冷却システムが正常に動作していない場合

タンク内にある水の温度が冷却できないためループを続けていると温度が上昇し、検出器をうまく冷却することができなくなってしまう。そのため、緊急ではないが冷却システムの故障を知らせ、冷却水の温度が上昇しすぎたらインターロックする必要がある。

・ヒーターの故障

冷却システムの中にはヒーターを導入している。もし、ヒーターがなかった場合、水温が低くなりすぎて検出器の表面に結露が発生してしまう可能性が生じてしまうので、冷却水は露点である 13 を下回らないように温度を調整してやらなければならない。そのため、ヒーターが故障した場合は知らせ、水温が 13 を下回らないように冷却システムを FSM が制御する必要がある。

・圧力調整器の故障

大気の流入や冷却水の漏れではなく圧力調整器の故障によって水圧 > 大気圧になってしまう場合もある。この場合は大気の流入が起きない場合には深刻な問題にはならないため、故障したことを知らせる必要がある。

・流量計の故障

もし、流量計が故障しデータの送受信ができない場合その付近にある水温計や水圧計から間接的に流量を測定することができるため、FSM や PLC によって監視が可能。そのため流量計の故障が確認された場合は制御室に知らせ間接的に測定した流量の値から異常を読み取るシステムになっている。

表 7: 冷却ミスとそれに対する対応策

ヒーターの故障	アラーム
圧力調整器の故障	アラーム
流量計の故障	アラーム
小さな水漏れ	アラーム
大きな水漏れ	インターロック
冷却システムの故障	インターロック

3.5 トラブルシナリオ

・温度異常

ALPIDE , DC-DC Converter , GBT-SCA に温度異常が検知された場合、ALPIDE 一つだけならばアラームによって知らせる。

一つの Half Disk 内の ALPIDE , DC-DC Converter , GBT-SCA に温度異常が起きた場合、FSM によって DC-DC Converter に供給される電源を切る。

複数の Half Disk 内で ALPIDE , DC-DC Converter , GBT-SCA に温度異常が起きた場合、ALICE , DC-DC Converter , GBT-SCA に深刻な温度異常が一つ以上でもあった場合、PLC によって MFT に供給している電源を落とす。

・冷却ミス

ヒーターの故障、圧力調整器の故障、流量計の故障が起きた場合に制御室に知らせる。

小さな水漏れが起きた場合、アラームを鳴らす。

大きな水漏れが起きた場合、冷却システムが正常に動作しなかった場合、PLC によって MFT に供給している電源を落とす。

4 結論

2019年から2020年の二年のLHCアップグレード計画によるシャットダウンの間に導入が予定されているMFTや周りにある検出器が、異常な状態でダメージを受けないためにインターロックのシステムについて考察を行なった。温度異常になりうる要因とそれによってもたらされる被害を考え対応策をリストアップし、DCSやPLCが起こす事象についてをまとめた。考えられる異常状態として主に温度異常とそれを引き起こす要因である冷却ミスについて考えた。

温度異常としてはALPIDE一つの温度が上昇したらPLCによってアラームを鳴らす。一つのHalf Disk内でALPIDEやDC-DC Converter,GBT-SCAが温度が上がってしまった場合にFSMがそれに対応する電源部を落とす。火災に至るような温度異常が検知された場合にはPLCがインターロック信号を送り、MFTへの電源供給をきるといった行動をとる必要がある。

冷却ミスはヒーターの故障、圧力調整器の故障、流量計の故障が起きた場合に制御室に知らせる。小さな水漏れが起きた場合アラームを鳴らし、制御室に知らせるが、タンク圧が上昇するほどの水漏れまでに発展してしまった場合にはインターロックしなければならない。また、冷却システムが正常に動作せずに水を冷却できなかつた場合も同様にインターロックしなければならない。

今後の展望として、インターロックを実際に導入するために、JCOPなどを用いて実装していく。また、まだ考えられていないトラブルシナリオについても考えそれに対する解決策を考察していく。

5 謝辞

本研究を進めるにおいて常に指導していただいた志垣賢太准教授に感謝いたします。ミーティングにおいて不十分な点を指摘していただいた杉立徹教授、いつも新しい視点から助言していただいた本間輔助助教、三好隆博助教に感謝いたします。研究室のメンバーである大学院の先輩方や他の4年生の皆さんはいつも物理の議論に付き合ってくださいありがとうございます。また、本学川端弘治准教授には、お忙しい中副査として時間を割いていただきました。併せて感謝いたします。

参考文献

- [1] Muon Forward Tracker technical Design Report
<https://cds.cern.ch/record/1981898/files/ALICE-TDR-018.pdf>
- [2] <http://blog.miraikan.jst.go.jp/topics/201310082013-9.html>
- [3] 神吉健 著 , 『クォーク・グルーオン・プラズマ』 , 丸善株式会社 , 1992 年
- [4] LHC 加速器 <https://www.extremetech.com/extreme/210215-extremetech-explains-what-is-the-large-hadron-collider>
- [5] ALICE 検出器 <http://alice-j.org/alice a.html>
- [6] <https://whwww.bnl.gov/aum2014/content/workshops/Workshop/bnldavidsilvermyr.pdf>
- [7] CAEN module <http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?idmod=752 & parent=20>
- [8] CAEN module <http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?idmod=493 & parent=19>
- [9] <http://nasueidensha.com/interlock/>
- [10] Finit state machine <http://www.kogures.com/hitoshi/webtext/hs-joutai-seni/index.html>
- [11] Vladimir Nilulin 2016.08.22.CoolNews.pptx
- [12] <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/2/04/P04008/pdf>
- [13] 永江知文, 永宮正治 共著 , 『原子核物理学』 , 裳華房 2000 年
- [14] 秋葉康之 著 , 『クォーク・グルーオン・プラズマの物理』 , 共立出版 2014 年