

KEK Internal 2004-3

July 2004

A/H/M/R/D

J-PARC

大強度陽子加速器施設

原子核素粒子実験施設建設グループ

ハドロンビームラインサブグループ

第2次中間報告書

田中万博、里嘉典、青木香苗、上利恵三、家入正治、今里純、加藤洋二、
神田征夫、澤田真也、鈴木善尋、高橋仁、高橋一智、高崎稔、豊田晃久、
野海博之、広瀬恵理奈、三浦太一、皆川道文、山田善一、山野井豊



High Energy Accelerator Research Organization

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2004

KEK Reports are available from:

Science Information and Library Services Division
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi
Ibaraki-ken, 305-0801
JAPAN

Phone: +81-29-864-5137
Fax: +81-29-864-4604
E-mail: irdpub@mail.kek.jp
Internet: <http://www.kek.jp>

目 次

1. 全体デザイン	1
1.1 施設概要	1
1.2 施設の簡単な紹介	2
2. 一次ビームライン	7
2.1 ビーム光学	7
2.2 放射線遮蔽	15
2.2.1 取り出し部	15
2.2.1.1 計算の動機	15
2.2.1.3 加速器計算コード(MAD)とMARSの軌道計算比較	16
2.2.1.4 遅い取り出しビームラインのMARSモデリング	17
2.2.1.5 分岐部遮蔽体のMARSモデリング	18
2.2.1.6 計算結果	19
2.2.1.7 まとめ	22
2.2.2 SM1付近	23
2.2.3 T1付近	28
2.2.4 HD-hall	30
2.2.5 ビームダンプ	41
2.3 電磁石とメンテナンス	47
2.3.1 スイッチヤードメンテナンス	47
2.3.1.1 概要	47
2.3.1.2 機器アライメントの方式	48
2.3.1.3 自動玉掛け装置(ツイストロック)	51
2.3.1.4 冷却コネクタ開発状況	52
2.3.2 ハドロン実験施設メンテナンス	59
2.3.2.1 概要	59
2.3.2.2 敷板	61
2.3.2.3 電磁石延長タワー(チムニー)	62
2.3.2.4 ツイストロックを用いたチムニー付磁石の吊り下げ試験	66
2.3.2.5 シールド積載	68
2.4 気密構造	71
2.5 電力貫通バスダクト	75
2.5.1 電力貫通バスダクトの概要と仕様	75
2.5.2 有機絶縁(ポリイミド樹脂)	75
2.5.4 無機絶縁サンプルテスト	81
2.6 信号貫通バスダクト	85
3. T1標的とその周辺	91
3.1 T1標的	91
3.1.1 概要	91
3.1.1 熱計算と構造	93
3.1.3 メンテナンス	101

3.2	真空箱	103
3.2.1	T1下流のレイアウト	103
3.2.2	構造	106
3.2.3	真空中での電磁石励磁試験	111
3.3	コリメータ	115
4.	真空と膜	121
4.1	真空膜	121
4.1.1	スイッチヤード真空膜	121
4.1.2	T1標準前後の真空膜	124
4.1.3	T1上流膜	127
4.1.4	T1下流膜	132
4.1.5	ダンプ膜	134
4.1.6	今後の開発項目	137
4.2	ビームダクト	139
5.	ビームダンプ	141
5.1	熱応力計算	141
5.2	ビームダンプの構造	145
5.2.1	構造	145
5.2.2	冷却装置	145
5.2.2.1	容射方式	146
5.2.2.2	FSW方式	146
5.2.2.3	BTA方式	147
5.2.3	容射方式の試験	147
5.2.3.1	実験結果	149
5.2.3.2	容射断面の切断	151
5.2.4	FSWとBTA式冷却装置の試験	151
5.2.4.1	試験装置	151
5.2.4.2	試験結果と考察	153
5.3	ビームダンプの残留放射線量見積もり	159
5.4	ビームダンプ前部遮蔽体の最適化	161
5.5	移設装置の設計	173
5.5.1	概要	173
5.5.2	構造と移設装置の条件	173
5.5.3	移設スキーム	174
5.5.4	移設装置の選定	175
5.5.4.1	荷重支持装置	175
5.5.4.2	揚重装置	176
5.5.4.3	走行動力装置	176
5.5.5	移設方法の確立	176
6.	設備関係	177
6.1	ビームライン電磁石の消費電力と冷却水負荷の見積もり	177
6.2	空調負荷の見積もり	182

6.3	電力負荷、冷却負荷、空調負荷のまとめ	182
7.	制御とモニタ	185
7.1	ローカル制御システム	185
7.1.1	制御システム概要	185
7.1.2	計測ステーションとネットワーク	185
7.1.3	EPICSチャンネルアクセスと命名法	186
7.1.4	データベースとWebシステム	186
7.1.5	インターロックシステム	186
7.2	ビームモニタ	189
7.2.1	遅い取り出しビームモニタ概要	189
7.2.2	遅い取り出しビームモニタ要求仕様	190
7.2.3	残留ガスを用いたビームプロファイルモニタ (RGBPM)	190
7.2.4	ビームロスモニタ (BLM)	192
7.2.5	モニタ配置	196
7.2.6	まとめ	197
7.3	温度モニタ	199
7.4	電磁石電源制御システム	203
7.4.1	システム概要	203
7.4.2	電源制御システム	205
7.4.3	電磁石電源の操作(電流の設定)について	206
7.4.4	電磁石電源の運転状態	206
7.4.5	MySQLデータベースの使用	207
8.	放射線安全	209
8.1	2002年HNO ₃ および ³ H生成実験報告	209
8.1.1	動機	209
8.1.2	実験セットアップ	209
8.1.3	ビーム照射量測定	210
8.1.4	ガラス瓶内のNO _x 、HNO ₃ 濃度測定	210
8.1.5	放射化箔による陽子、中性子フルエンス率測定	211
8.1.6	硝酸の分析	211
8.1.7	データ解析	211
8.1.8	測定結果のまとめ	213
8.1.9	MARSとの比較	213
8.1.10	まとめ	214
8.2	T1標的内の硝酸、トリチウムm水素生成量見積もり	215
8.3	コリメータおよびビームライン電磁石でのトリチウム、 水素生成量見積もり	215
8.4	ビームダンプでのトリチウム生成量見積もり	
9.	二次ビームラインと実験室	221
9.1	二次ビームライン光学	221
9.1.1	概要	221
9.2	K1.8ビームライン	221

9.3	K1.8BRビームライン	225
9.4	K1.1/0.8ビームライン	228
9.2	静電気型粒子分離装置(ESセパレータ)	231
9.2.1	ESセパレータ概要	231
9.2.2	真空容器について	231
9.2.3	電極について	232
9.2.3.1	真空洋基本体の大きさの変更に伴う電解の試算	232
9.2.3.2	陽電極の厚さ	233
9.2.3.3	連結方法	234
9.2.3.4	電極支持部について	235
9.2.4	高電圧発生装置について	236
9.2.5	今後	237
9.3	実験室概要	239
Appendix		245
1.	建設スケジュール	245
2.	施設設計目標値	251
2.1	遮蔽設計の法的要請	251
2.2	液体廃棄物に係わる設計目標値	251
2.3	気体廃棄物に係わる設計目標値	251
参考文献		253

1. 全体デザイン

1.1 施設概要

J-PARC の主加速器である 50GeV-PS からの遅い取り出しビーム実験施設であるハドロン実験施設は、世界で最初の **Kaon Factory** を目指して建設される。本実験施設では、加速器から供給される 750kW (50GeV-15 μ A) という未曾有の大強度陽子ビームを標的に照射し、核反応によってK中間子をはじめとする多様な短寿命粒子を莫大に生成する。これらを用いて、原子核、素粒子物理を画期的に推進する事が、本実験施設の目的である。しかしながら、核反応によって粒子生成をおこなうのであるから、本実験施設においては、標的部におけるビーム損失を、原理的に避けることができない。未曾有の大強度ビームはまた、標的におけるビーム損失に伴う強烈な放射線の発生と、標的周辺機器への莫大なエネルギー付与、すなわち猛烈な温度上昇を引き起こす。これらの点が、原理的にビーム損失をいくらでも軽減可能な加速器本体と大きく異なるところである。

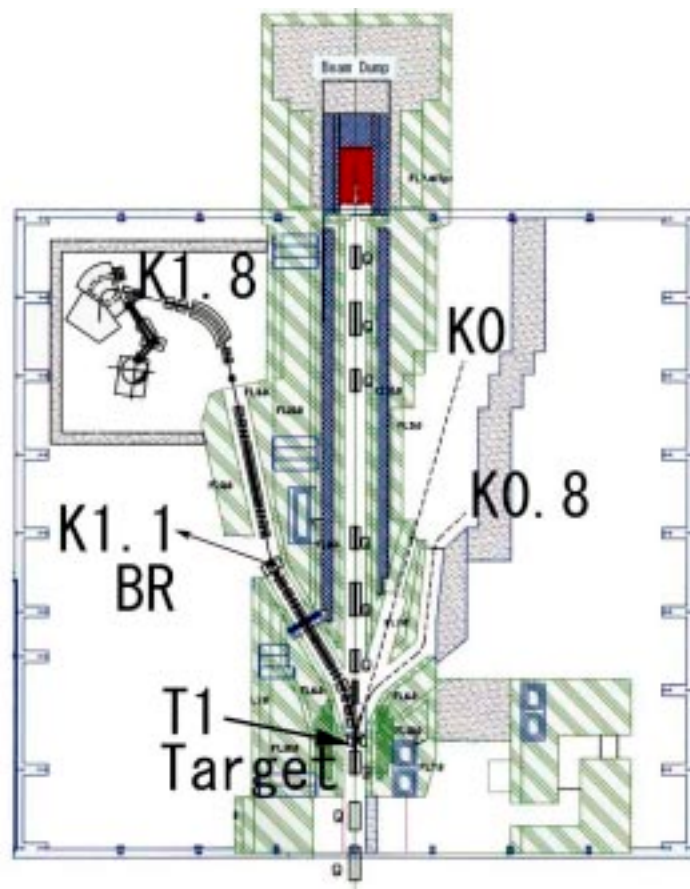


図1 Kaon Factory として建設されるハドロン実験施設の平面図。
標的とダンプで大量のビーム損失が生じる。

1.2 施設の簡単な紹介

標的を通過したビームは、建設第一期においては、直ちにビームダンプに導かれ、そこで吸収される（図1）。第二期においては、陽子ビームは再び収集され第二、第三の標的を串刺しに照射した後に、ビームダンプに導かれる。いずれの場合でもビームダンプは加速器が供給する全ビームを受け止め、吸収する能力を有しなくてはならない。ビームダンプにおいては、文字通り100%のビーム損失が発生する。750kWのビームを受け止めるため、ビームダンプのコア部分は数百トンの純銅で作られる。銅の熱伝導度が良好であるため、このコア部のほぼ1-1.5m外周部分を水冷することにより、十分な除熱が可能である。銅コアの直近ではなく、少し離れた外周部を水冷するのは放射線による冷却水中のトリチウム生成量を一定以下におさえるためである。このとき銅コアの中心部分は約300℃に達している。このことからビームダンプが標的装置と並び、本実験施設において最も重要かつ困難な「実験装置」であることが理解出来る。

標的、ビームダンプ以外の無数のビームライン要素もまた、熱の問題、放射線の問題から逃れる事は出来ない。すべての装置は完璧な耐熱性、耐放射線性を有しながら、莫大な残留放射能の中で安全に修理、交換されなくてはならない。それゆえ、全ての要素は設計当初から、その「メンテナンスシナリオ」が考えられていなくてはならないのである。

耐熱性

耐放射線性

メンテナンスシナリオ

この三者は、本実験施設を設計してゆく上での根本である。我々は、これらを満たすために熱解析をおこない、運転時そして休止時の放射線レベルを評価し、そして具体的なモックアップを建設してメンテナンスシナリオを「実証」してきた。標的本体の残留放射線レベルが1年運転すれば、半年冷却の後でさえ、1000Sv/hrであること、人の致死吸収線量がわずか10Svの程度であることを知れば、この作業の困難さの一端が理解出来る。いずれにせよ、我々が実験施設を建設し、開拓しようとしている「新世界」は、このような世界なのである。

1.2 施設の簡単な紹介

加速器から遅い取り出し装置によって取り出された50GeV（第一期においては30GeV）ビームは最上流部のマッチングセクション（整合部）において下流部の光学に適合するように位相空間中で整形される。整合部でビームは左右にそれぞれ3.75度の偏向をうけ、主リングから距離的に十分に離れた後、スイッチヤード部（SY部）に導かれる。SY部ではまずビームは80m走る間に2.9m振り上げられる。これは実験室の床面高さが、周辺土壌面に対してあまりに深くなりすぎず、かつ二次ビームラインのダンプとして周辺土壌を利用し得る程度に適当な深さを保つためである。SY部の後半において、ビームは再び水平に振り戻される（図2）。

1. 全体デザイン

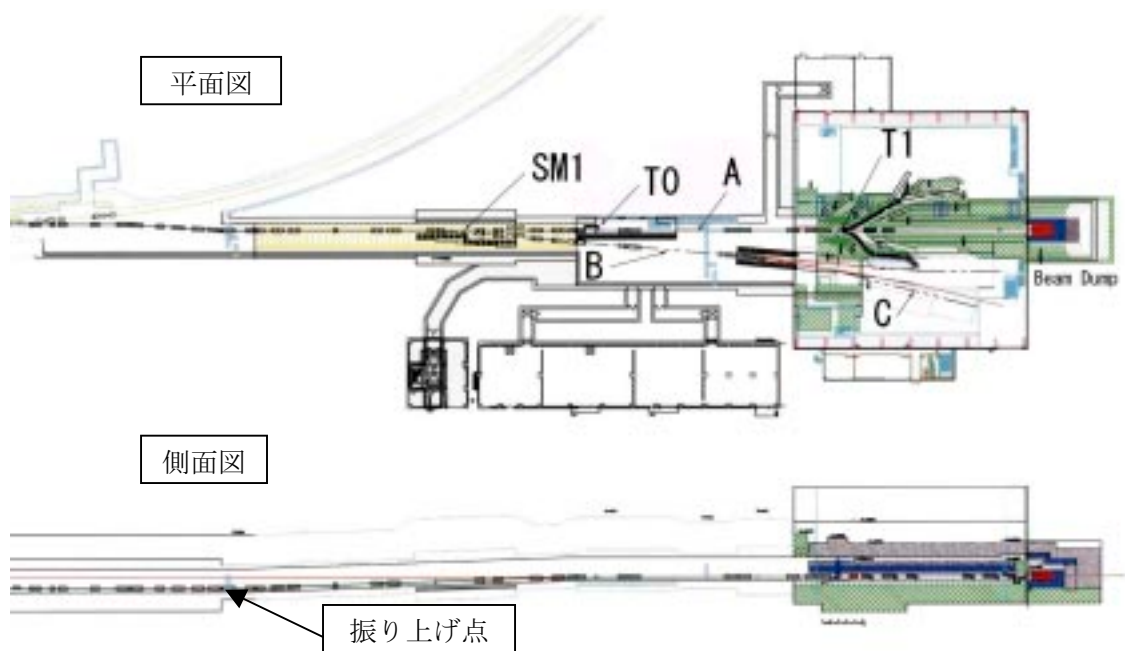


図2 ハドロン実験施設までビームを導く遅い取り出しビームライン。
最上流部が整合部となり、振り上げ点付近よりスイッチヤード部となる。

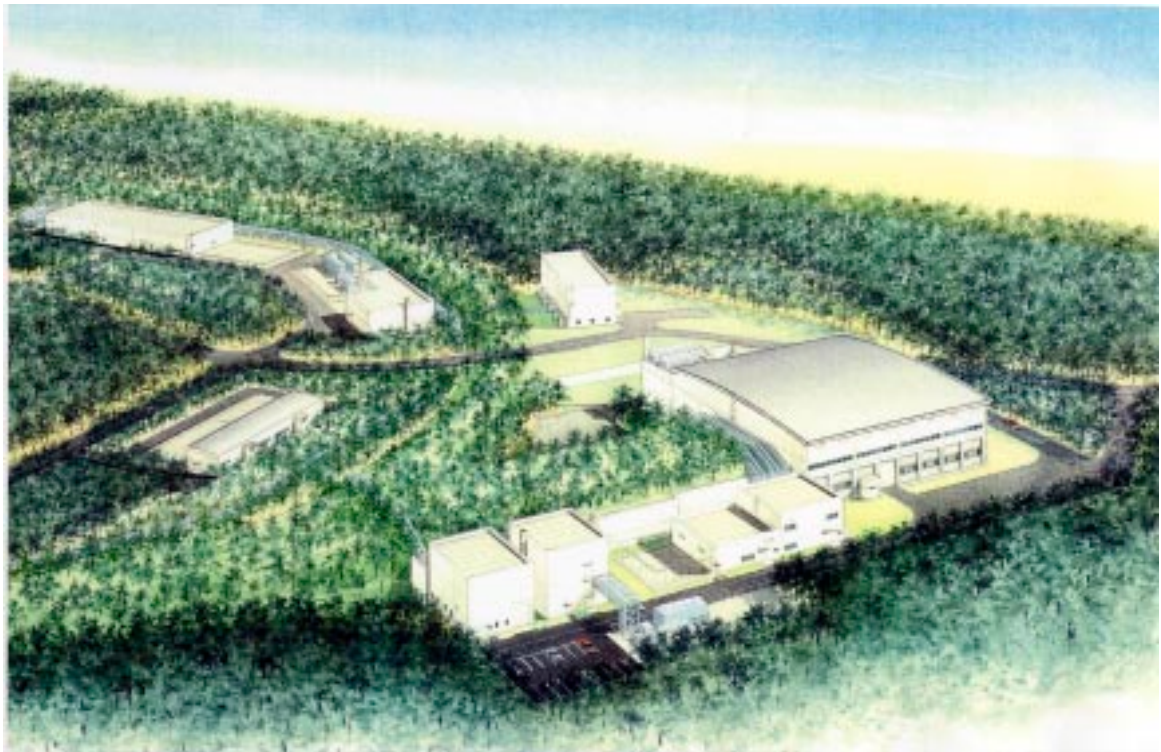


図3 ハドロン実験施設の外観図。自然環境を回復させるために、工事終了後は付近一帯に植林が行われ、緑に囲まれた実験室となる。

1.2 施設の簡単な紹介

S Y部の最大の役割は、将来の拡張時に、第二、第三の一次陽子ビームラインを分岐させることである。分岐時には2%程度のビームロスが予想されるが、将来の分岐部とその周辺部には、この程度のビーム損失を許容するだけの十分な厚みのコンクリート遮蔽体が、すでに最初の施工時から打ち込まれている。またS Y部の下流部分ではトンネル横幅を上流部分の倍の16mに広げ、将来、第二、第三ビームラインを容易に実験室へ導き出せる構造となっている。S Y下流部にはまた、将来0.5%程度のビーム損失を伴う小標的が設置され、S Y部脇に建設される「テストビームライン室」へ二次ビームを供給する。

遅い取り出しビームラインの最上流部である整合部の真空は、加速器本体と共通の高真空仕様である。しかし数億回ビームが周回する加速器と異なり、ビームが1回しか通過しないビームライン部では、加速器ほどの良好な真空を要しない。そこで整合部とS Y部の間に真空遮断膜を導入し、その下流部では真空としてロータリポンプ程度の低真空仕様となっている。真空遮断膜は大強度ビームに直接さらされることとなるが、両面が真空であることから、周辺を十分に冷却したアルミニウムの板で対応できる。膜におけるビーム損失は最大0.1%の程度と予想されており、発生する放射線に関してはその周辺に十分な厚みのコンクリート遮蔽体が設置されている。このような膜は、生成標的の前後やビームダンプの入り口などにも必然的に設置されねばならない。しかしこれらの場所では幕の片面が空気（大気圧）であるため、腐食などの観点からアルミニウムを用いる事はできない。現在の所、ステンレスの二重膜を採用し、その間をヘリウムで強制空冷することにより、現実的な膜が形成できる事がわかっている。しかしより薄く、より強い膜を形成するために、チタン、炭素繊維強化ステンレスなどの新素材に関しても研究中である。

このようにして標的部まで導かれた大強度ビームは、数枚のニッケル回転円板によって構成されるT1標的を照射する。ニッケル円盤は直接水冷されており、ビームによる温度上昇は高々数十度程度である。標的を通過したビームはその直下流において三連の四極磁石により収集され、ほぼ平行ビームとなってビームダンプに導かれる。T1標的で失われるビームは全体の30%である。その結果発生する約250kWのエネルギーは、その大部分が標的下流のコリメータ並びに電磁石群に吸収される。それゆえコリメータ並びにその直近の電磁石ヨークは水冷されなくてはならない。技術的に最も困難な問題は、真空ダクトの冷却である。ビームラインに最も近く、かつ冷却が最も困難な部位である。そこで我々は発想を転換し、巨大な真空チェンバーの内部で電磁石を運転することとした。つまり真空ダクトを完全に廃することとしたのである。この試みの成否は、真空中で電磁石が安定に運転可能かどうかにかかっている。完全に無機物で構成された電磁石は、このような特殊な用途に関しても有利である。

二次ビームラインの設計、全体の制御、安全のためのインターロックなど、新たに開発されまた設計が進んできた部分はハドロンビーム中でも実に多様で広範囲な広がりをもっている。本書は、一昨年にまとめた中間報告書[1]に継ぐ第二回目の技術報告書である。特に第一回まとめから今日までの進歩について重点的に取り上げている。それゆえ、第一回目の中間報告書を参照しつつ本書をご覧いただければ、我々の開発の現状とそこに至った

1. 全体デザイン

経緯、背景などがより詳しく理解いただける。

本書をご覧いただき我々の努力の一端をご理解いただくとともに、我々の考え落として
いる部分、誤っている部分に対しては、どうか忌憚のないご批判、指摘をお願いしたい。
なお、図3に示される通り、完成後のハドロン実験施設は、緑に囲まれた閑静な実験室と
なる。ここにおいて、おおいに物理の歓声をわき上がらせてゆきたいものである。

1.2 施設の簡単な紹介

2. 一次ビームライン

2.1 ビーム光学

取り出しビームの詳細な計算によると、50GeV-PS からの遅い取り出しビームは、加速器の周回軌道（ここでは遅い取り出しの直線部）に対して4.45度(77.7mrad)の角度で取り出される。前回の中間報告書[1]の段階では、この角度は4.80度(83.8 mrad)とされていたので、取り出しビームラインの軌道は修正された。つまり、最下流の取り出しセプタム出口から 77.7mrad の傾きをもって加速器側に直線を引いて、7.04m さかのぼったところで加速器の周回軌道と交わる。この交点を仮想取り出し点と再定義し、これを遅い取り出しビームライン建設のための起点と定め直した。

当初、遅い取り出しビームラインは30GeVで運転される予定である。しかしながら、将来、受電空調冷却水設備等の増設を待って 50GeV ビームの輸送ができるように、ビームラインの設計がなされた。

この節では、遅い取り出しビームラインのレイアウトとそのビーム光学について述べる。ビーム光学は、プログラムコード **TRANSPORT**[2]および **TURTLE**[3]を用いて設計された。光学計算の初期値となるべきビームパラメータは、最下流の取り出しセプタム電磁石の出口において加速器グループによって与えられた値を用いた。与えられた 30 GeV 陽子ビームの取り出しビームパラメータを表1に示す。運動量分散については与えられていないので、表では速い取り出しのものを用いた。しかしながら、取り出しビームラインにおいては分散の効果は小さくあまり影響しない。

表1 遅い取り出しビームパラメータ (30 GeV)

Slow-extracted beam parameters at 30 GeV (M. Tomizawa, 2-Oct-2002)			
ε_H	$4.4 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$	ε_V	$10.4 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
α_x	-2.21	α_y	1.133
β_x	26.476 m	β_y	16.629 m
η	0.518 m		
η'	0.084		
$\Delta p/p$	0.0031		

これをもとに **TRANSPORT** を用いて計算されたビームのエンベロープを図1に示す。図の実線と点線は、それぞれ鉛直および水平方向についてのビームエンベロープと運動量分散を表す。ビームラインは、光学的役割から次の5区間にわけることができる。

- (1) 整合区間（起点から最初の5.9 m）
- (2) 振り上げ区間上流（次の5.0 m）
- (3) 振り上げ区間下流（次の4.0 m）
- (4) T0-T1区間（次の6.0 m）
- (5) T1-ビームダンプ区間（残りの約5.0 m）

(1) は、加速器から取り出されたビームを位相空間上で回転させて下流のビームラインのアクセプタンスに整合させるために必要な区間である。ここで、5つの収束電磁石（Q）を用いて区間終

2.1 ビーム光学

点(MP)で waist ビーム像を実現している。次の区間のために像は縦長にされている。2つの水平偏向電磁石を用いて、取り出しビームの軌道を調整している。とくに、2つめの偏向電磁石は、50-GeV 加速器リングの主偏向電磁石のプロトタイプを再利用して用いる。この電磁石は、偏向角 3.75 度のセクター型電磁石なので、1つめの偏向角も 3.75 度になるように、取り出しビームの軌道も調整された。取り出し部分の電磁石の並びを図2に示す。

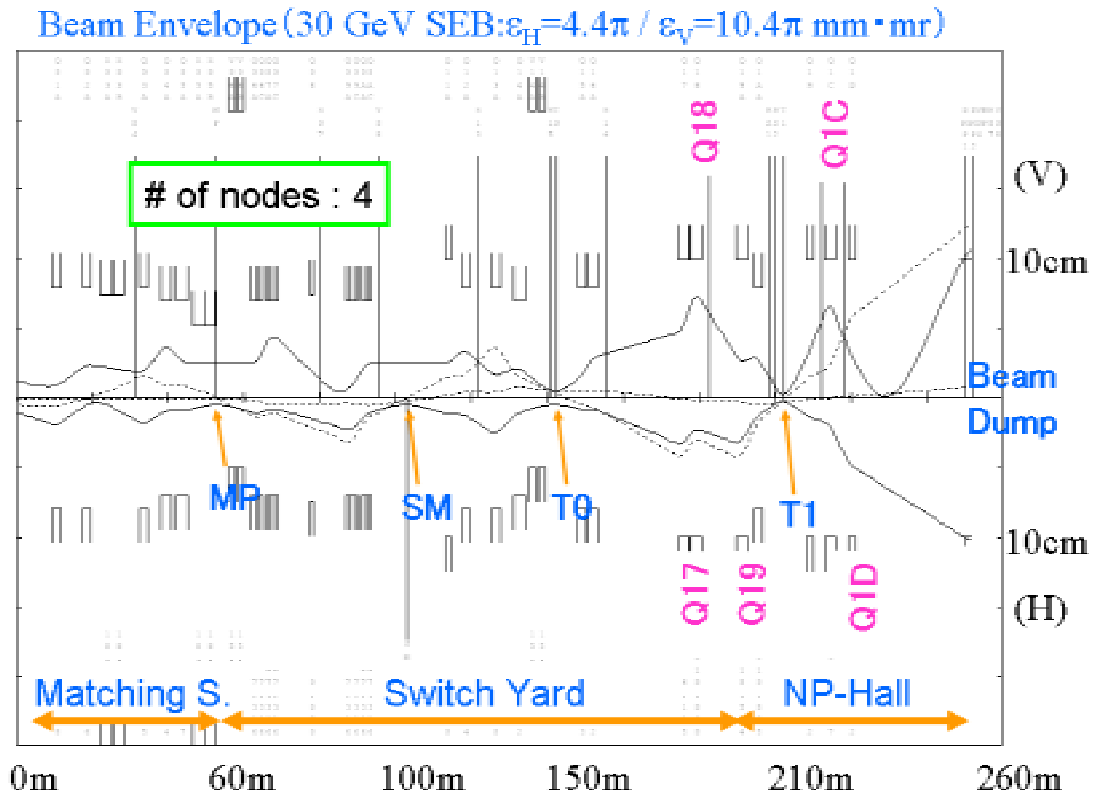


図1 30 GeV 遅い取り出しビームのビームエンベロープ (実線)。点線は運動量分散を表す。ただし、分散に対しては縦軸の目盛の 10 cm を 10 cm/%と読み替える。

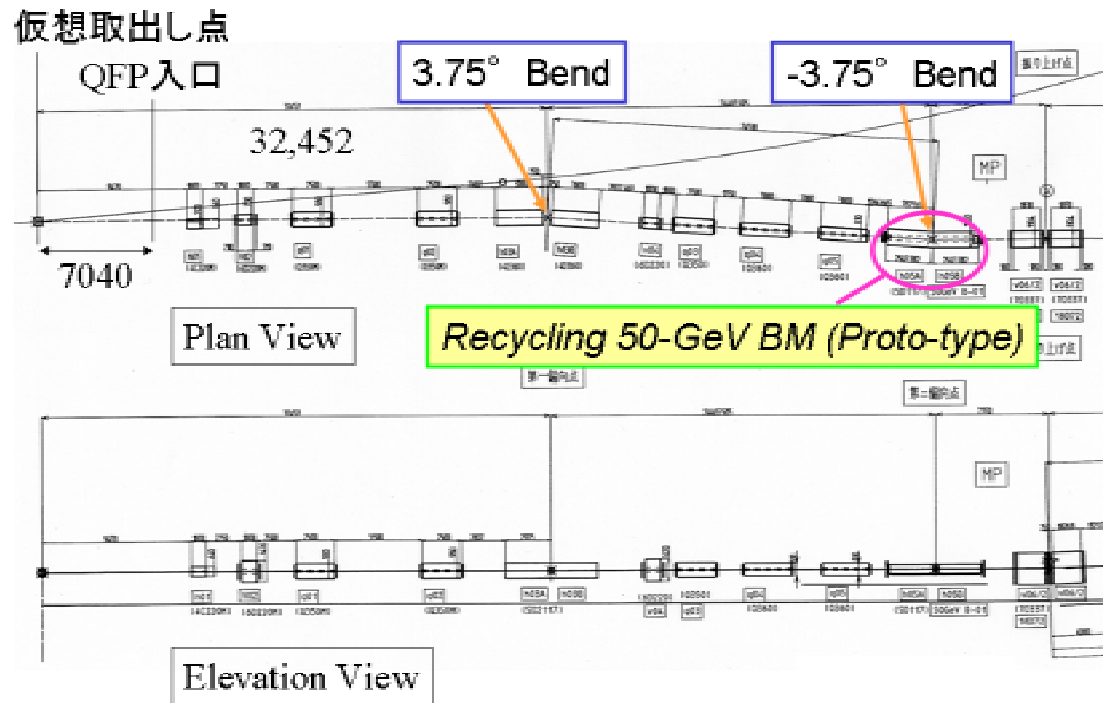


図2 遅い取り出しビームラインの最上流部

(2) は、ビームラインのレベルを 2.9 m 振り上げるための区間の前半部分である。この区間は、2 組の対称 Q ダブレットを用いて輸送行列として $-I$ (I は単位行列) を実現している。つまり、区間始点の像と同じ大きさの倒立像が区間終点に現れる。この区間の終点には、将来のオプションとしてビーム振り分け電磁石(SM)がおかれるかもしれない。このとき、縦長ビームであるほうがビームロスを少なくできる。SM でのビームサイズを制御するために別の Q が用意されている。

(3) は、振り上げの区間の後半である。区間の終点 (T0) には、将来、薄い標的がおかれ、テストビームラインが接続される予定である。この区間では 4 つの Q を用いて点・点結像させている。

(4) は T0 の像を T1 に結像させる区間である。6 つの Q を用いて waist-waist 輸送行列、かつ、像倍率 -0.5 を実現し、T1 でビームをより小さく絞る。T1 には 30% 相互作用長相当の厚みを持つ標的が置かれ、これを起点とする 2 次ビームラインが接続される。TURTLE で計算された T1 標的におけるビームプロファイルを図 3 に示す。

(5) は、T1 を通過したビームを安全にビームダンプに輸送する区間である。ビームダンプにビームを吸収させる際ビームパワーの集中が起こらないように、対称 Q トリプレットを用いてビームを広げている。将来、ハドロン実験施設を下流に拡張することが計画されている (第 2 期計画)。拡張後、T1 の下流 50 m の地点に第 2 の標的 (T2) が設けられるため、ビームダンプは下流に移動できるように設計されている。このとき、対称 Q トリプレットの downstream に同じトリプレットを追加することによって、T1 のビーム像を T2 に反転して写す $-I$ 輸送光学系 (I は単位行列) を構築する。

ビームエネルギーが 50 GeV に上がった場合、エミッタンスは運動量に反比例して小さくなる。図 4 に 50 GeV ビームの場合に計算されたビームエンベロープを示す。

2.1 ビーム光学

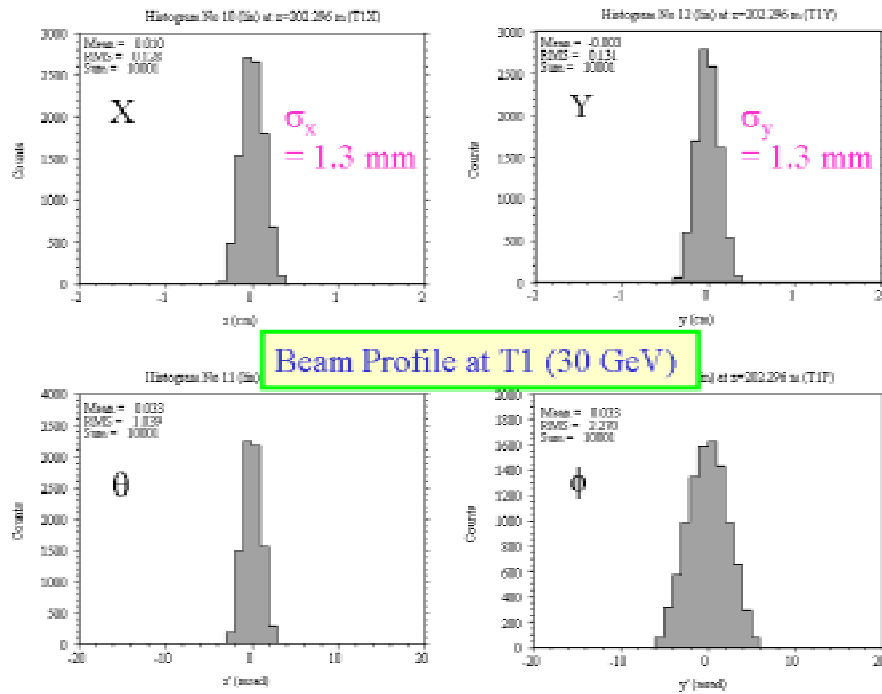


図3 T1 標的での1次ビームプロファイル (30GeV)

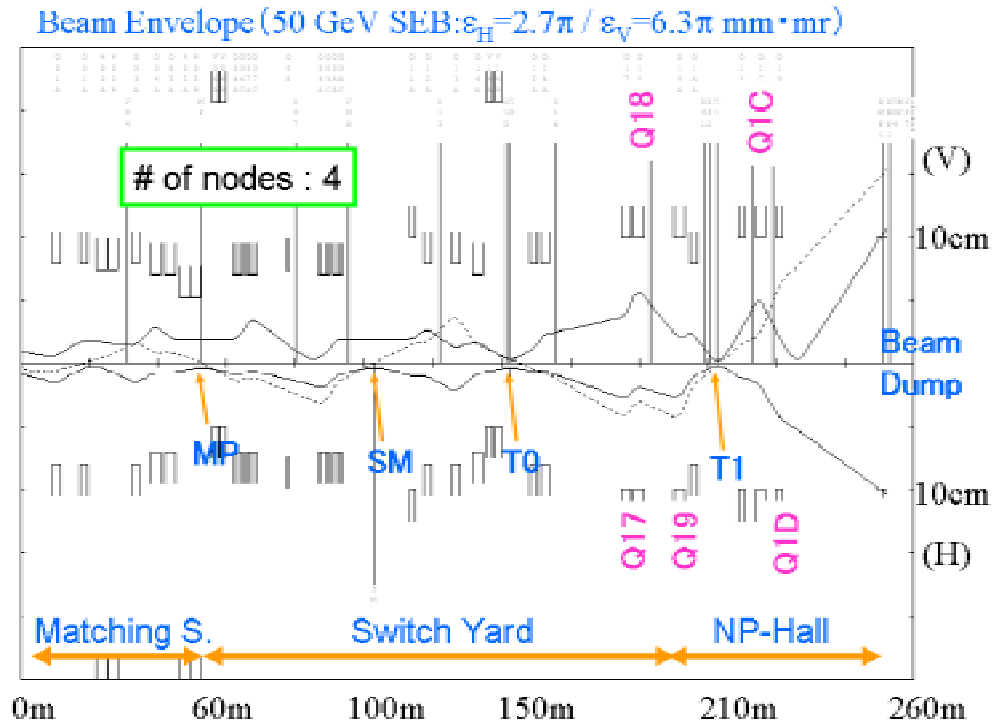


図4 50 GeV 遅い取り出しビームのビームエンベロープ (実線)。点線は運動量分散を表す。ただし、分散に対しては縦軸の目盛の 10 cm を 10 cm/%と読み替える。

エネルギーが上がりエミッタンスが小さくなると、その分 T1 標的での像は小さくなる。図5に 50 GeV の場合に TURTLE で計算された T1 標的におけるビームプロファイルを示す。一方、ビームダンプでのビームサイズが小さくなるのは熱的に好ましくないので、対称 Q トリプレットの磁場を調整してビームサイズを保つようにすることができる。

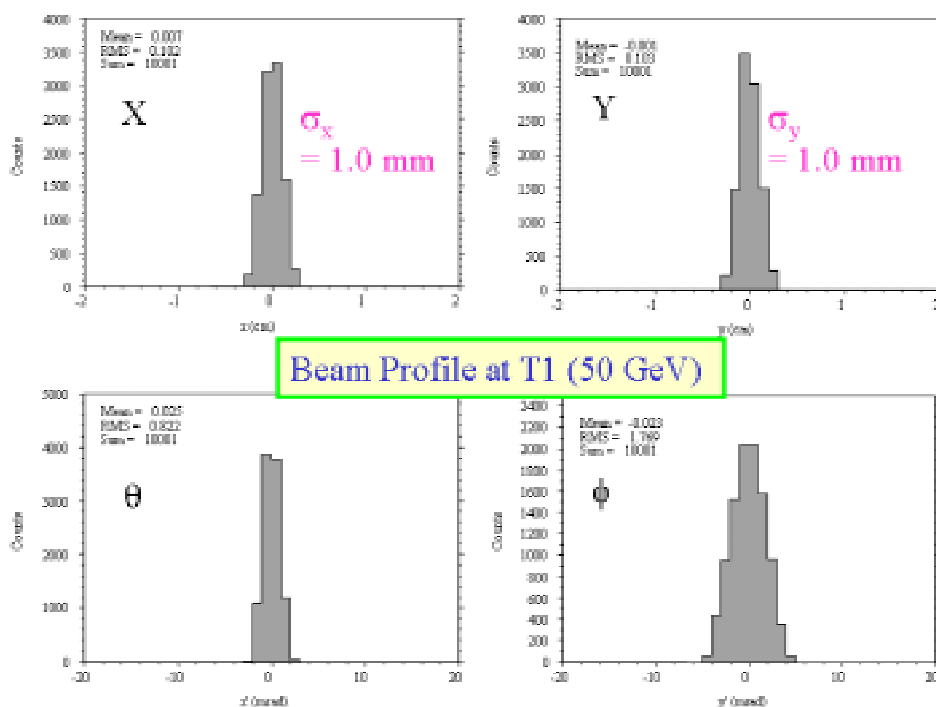


図5 T1 標的での1次ビームプロファイル (50GeV)

大強度ビーム輸送の際のビームロス強い放射線場と高温場を誘起する。J-PARC においてはたとえ1%のロスであってもビームライン機器の著しい放射化を招き、放射線遮蔽や保守のために払われる人的時間的経済的経費はかなり大きい。輸送ビームが不要な場所でロスを起こさないようにビームライン電磁石の口径はビームサイズに対して十分な余裕を持たなければならない。図6に水平および鉛直方向のエミッタンスがそれぞれ $10.3\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ および $24.4\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ のときのビームエンベロープを示す。このとき、ビームエンベロープが q18 の付近で電磁石の口径と同程度になっていることがわかる。つまり、このビームラインは 30 GeV (50 GeV) ビームに対して約 2.3 (4) 倍のエミッタンスを持つビームを通すことができるように設計されている。

1次ビームライン (A ライン) 電磁石の大きさと運転磁場については、表2にまとめた。

2.1 ビーム光学

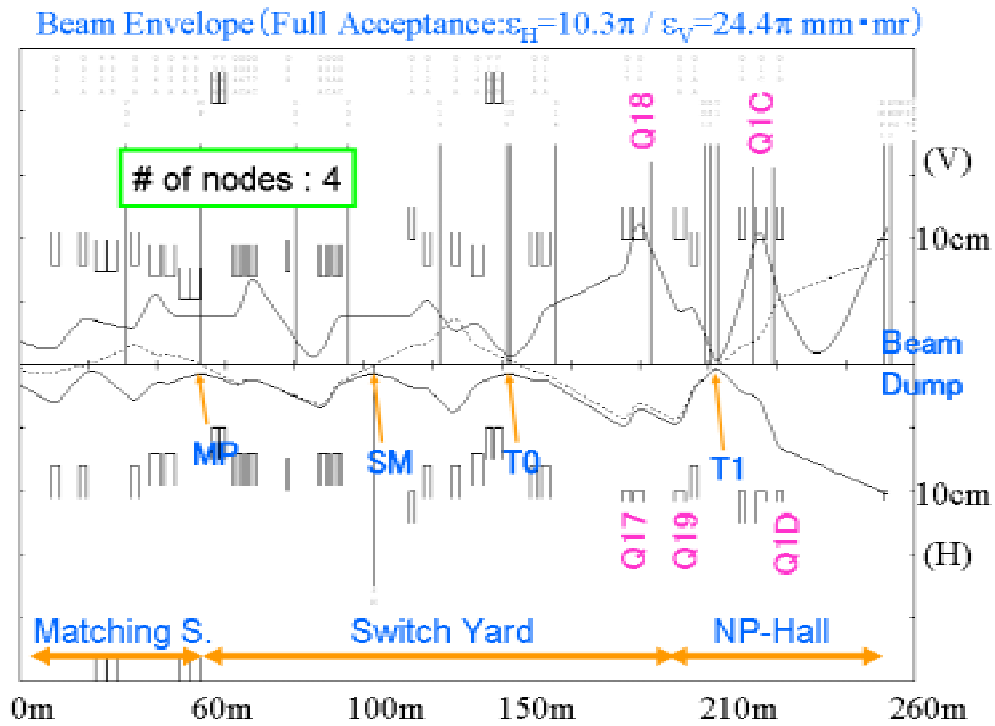


図6 エミッタンスが 10.3π mm·mrad (水平) および 24.4π mm·mrad (垂直) のときのビームエンベロープ。このとき、ビームエンベロープが q18 のボアと同程度の大きさになる。

表2 1次ビームライン (Aライン) の電磁石と運転磁場。ビーム光学パラメータの変更や既存電磁石の改造 (特に MIC の実装) に伴って運転磁場や消費電力等は予告なく変更される。

磁石名(形式)	新・既	電力 50GeV (kW)	電流・電圧 50GeV (A/V)	運転磁場 50GeV (kG)	定格電力(流・圧) kW (A・V)
h01(4C220M)	旧 T2 改	0		<15.23	45(1000・45)
v02(6D220M)	vd1 改	0		<20.1	200(1700・118)
q01(Q350M)	QC2 改	42.1	1045.7/40.3	8.32800	119(1700・70)
q02(Q350M)	QC2 改	20.8	734.4/28.3	-5.80600	119(1700・70)
h03(4D360x2)	新規(注)	300		18.55340	
v04(6D220)	vd2	100		<20.1	200(1700・118)
q03(QC2)	QC2	62	1268.7/48.9	9.92500	119(1700・70)
q04(Q360)	QC1	30	879.9/34.1	-7.06400	119(1700・70)
q05(Q360)	QC1	12.2	535.1/22.7	4.23700	119(1700・70)
h05(5D2117)	R&D-BM2	405	3000/135	18.75700	
v06(18D72x2)	ANL	307.1	1821/84.3	16.80000	399(3000・133)
q06(Q360)	QC1	33.1	910.2/36.4	7.31563	119(1700・70)
q07(Q360)	QC1	33.1	910.2/36.4	-7.31563	119(1700・70)
q08(Q410)	q45	55			85(1850・46)
h07(4D220)	b01	0		<14.56	104(1200・87)
q09(Q360)	QC1	33.1	910.2/36.4	7.31563	119(1700・70)
q0A(Q360)	QC1	33.1	910.2/36.4	-7.31563	119(1700・70)
v08(7D220)	vd3	0		<19.6	213(1700・125)
v09(7D220)	vd4(予)				
sm11		0			
sm12		0			
v11					
v12					
q11(Q430)	q44	53.2	988.4/53.3	8.34000	160(2000・80)
q12(Q350)	QC2	32.1	903.2/35.5	-7.17400	119(1700・70)
h13(4D220)	bs1	100		<14.56	104(1200・87)
q13(Q350)	QC2	61.4	1244.8/49.3	9.77000	119(1700・70)
q14(Q360)	QC1	23.5	765.9/30.7	-6.12200	119(1700・70)
v14A(8D240)	π 2D5 改	82.8	1134 /73	15.40560	175(1650・106.2)
v14B(8D240)	EP1b22 改	82.8	1134 /73	15.40560	175(1650・106.2)
h15(4D214)	b48	0		<10	53(500・106)
T0					
q15(Q350)	QC2	30.2	876.6/34.4	6.84300	119(1700・70)
q16(Q350)	QC2	38.6	717.6/53.8	-6.81200	300(2000・150)
h16(4D416)	v39 改			<20	280(2000・140)
q17(Q460)	q68	48.8	806.7/60.5	8.11500	300(2000・150)

2.1 ビーム光学

q18(Q460) SY内合計	q69	85.5 2105.5	1067.8/80.1	-10.04000	300(2000・150)
v17(5D520)	新規	0			
q19(Q460)	q70	102.3	1167.4/87.6	10.58377	300(2000・150)
q1a(Q350M)	QC2 改	79.5	1416.1/56.1	-10.82546	119(1700・70)
bs1(18D36M)	bs4 改	156.1	1290./121	18.80000	240(1600・150)
bs2(8D320M) T1	π 2D3 改	0			
q1b(Q440M)	新規	63.9	889.8/71.8	6.81200	
h18(4D420M)	新規	150			
q1c(Q460M)	新規	120		-12.58700	
v19(5D520M)	新規	0			
q1d(Q440M)	新規	63.9	889.8/71.8	6.81200	
CH内合計		735.7			
一次ビーム合計		2841.2	一期A		

2.2 放射線遮蔽

2.2.1 取り出し部

2.2.1.1 計算の動機

遅い取り出しビームライン最上流部は、加速器から取り出されたビームを受け取り我々のビームライン光学に乘せるためのマッチングセクションと呼ばれている。マッチングセクション外側の放射線遮蔽は、以前出版した報告[1]では次のように述べられている。

SY 上流(ライン 1)は、遅い取り出し部付近のビーム損失が未確定のため、
取りあえずライン 2 と同じ壁厚とする。

ここで仮定されていたビームロス損失点を 5 と仮定して 2.3W/m であった。

その後、加速器グループで取り出し部のシミュレーション計算に進展があり、以下の報告があった。

1. 遅い取り出し直線部でのビームロス

(ア) 静電セパレータ (ESS) 周り	1kW
(イ) ESS 下流コリメータ	(0.6 + 0.3)kW
(ウ) セプタム電磁石 SM1-1	0.3kW
(エ) セプタム電磁石 SM2-1	0.2kW
(オ) ビームダクト	< 30W(数箇所)
2. ESS ワイヤで散乱された粒子によるロスが発生する。
 - (ア) 取り出しビーム側に散乱されて出てくるもの。
 - (イ) 周回側に散乱し、リングを回って再び取り出しビーム側に出てくるもの。

ここでいうビームロスの基準は物質に当たって消滅した粒子数をパワー損失に換算した数字である。

50GeV の陽子ビームが物質に衝突すると中性子等大量の二次粒子が発生し、その影響がビームライン下流におよんでくることは以前から行っている MARS[4]計算で明らかである。従って、加速器で生じたビームロスが我々のビームライン遮蔽体に与える影響を考えるためには、加速器の取り出し部と我々のビームラインを両方組み込んでシミュレーションを行う必要がある。以下に計算の概要と結果を述べる。

2.2.1.2 遅い取り出し部の MARS モデリング

図 1 に 50GeV 主リングの遅い取り出し部を MARS でモデリングしたジオメトリを示す。Electrostatic Separator(ESS)は直径 80 μ m のタングステンワイヤー1200 本がビーム軸方向に 1.5m にわたって鉛直方向に張られている。多数のワイヤーをモデリングするのは困難なため、MARS では 1200 本のタングステンワイヤーを長さ 1.5m、幅 80 μ m の直方体で近似した。また陽子のタングステンでの反応長(Interaction length)が 185g/cm²なので、直方体で近似した場合の陽子の反応率が等しくなるようにタングステンの密度を 1.235g/cm³に調整した。

遅い取り出し部に設置される ESS、四重極電磁石、セプタム電磁石の配置は加速器グループが設計したパラメータに基づいて配置した。現段階ではこの配置は最終的なものではないが、放射線遮蔽計算には十分である。図 1 には 50GeV の陽子ビームが ESS に入射した場合の軌道が描かれている。ESS でリング内側にキックされた粒子が遅い取り出しビームとして取り出され、キックを受け

2.2 放射線遮蔽

なかった粒子は周回軌道に戻っていく様子がはっきりわかる。ビームの一部はセプタム電磁石のカレントシートで反応し、二次粒子を発生させている。

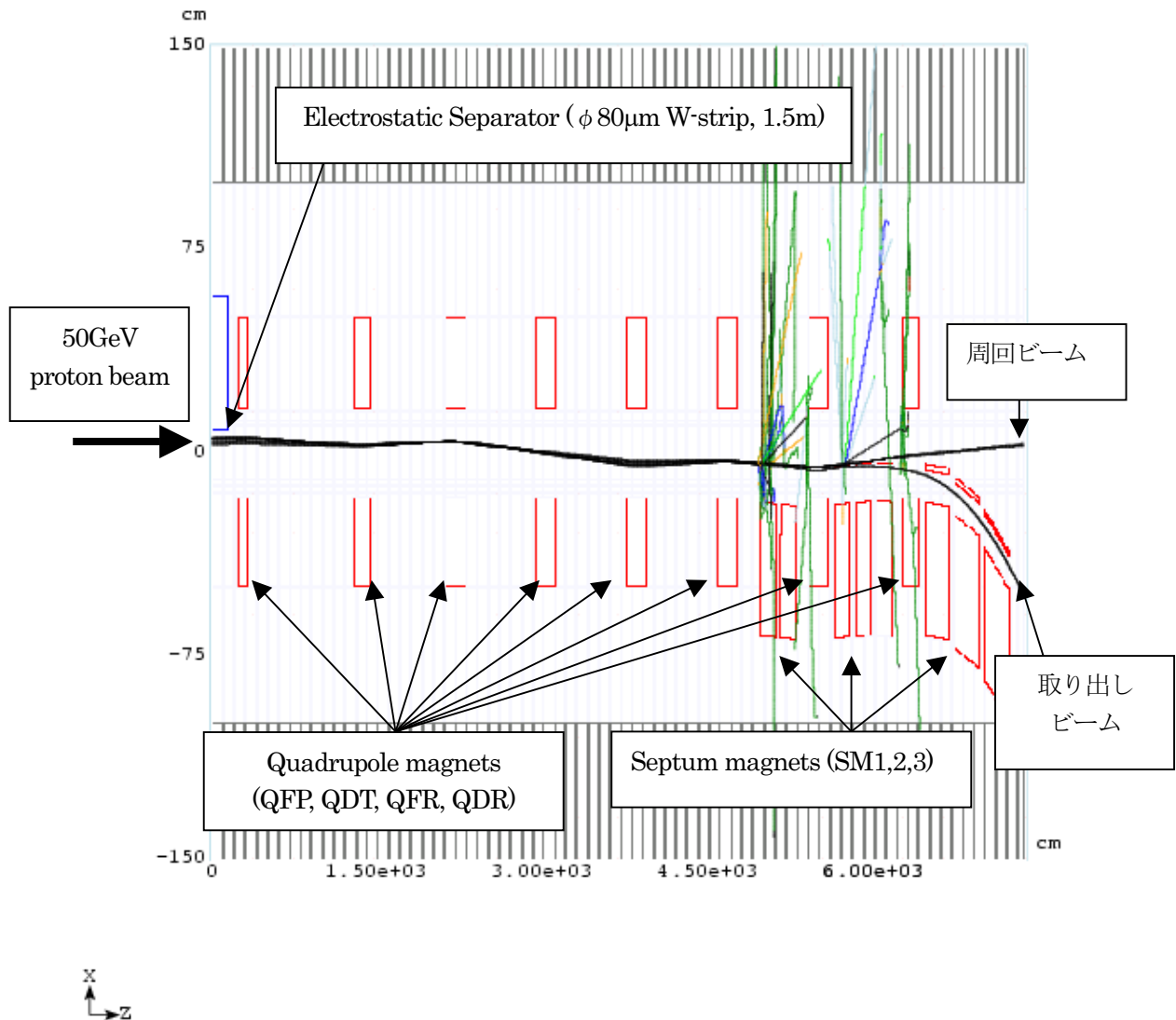


図1 50GeV MR 遅い取り出し部の MARS モデリング。
赤色は電磁石ヨーク(鉄)、青色は静電セプタム(アルミニウム)を示す。

2.2.1.3 加速器計算コード(MAD)と MARS の軌道計算比較

図1に描かれているように、MARS コードを使って遅い取り出しビームの軌道を計算することが出来た。MARS で計算されたビーム軌道と、加速器 G がデザインに使用している MAD(Methodological Accelerator Design)コード[5]で計算された軌道を比較した結果を図2に示す。一見して MAD と MARS の軌道計算結果はかなりよく一致している。加速器との分岐部である QFP 入口($Z = 73.715 \text{ m}$)での水平位置(X)と傾き(X')を比較すると位置のずれは 6 mm 、傾きのずれは 0.6 mrad 程度である。現在の目的である放射線計算には十分な精度であると考えられる。このジオメトリを用いて加速器との分岐部に出てきた一次および二次粒子を蓄積し、次で述べる遅い取り出しビームラインのつなぎ計算の入力として使用した。

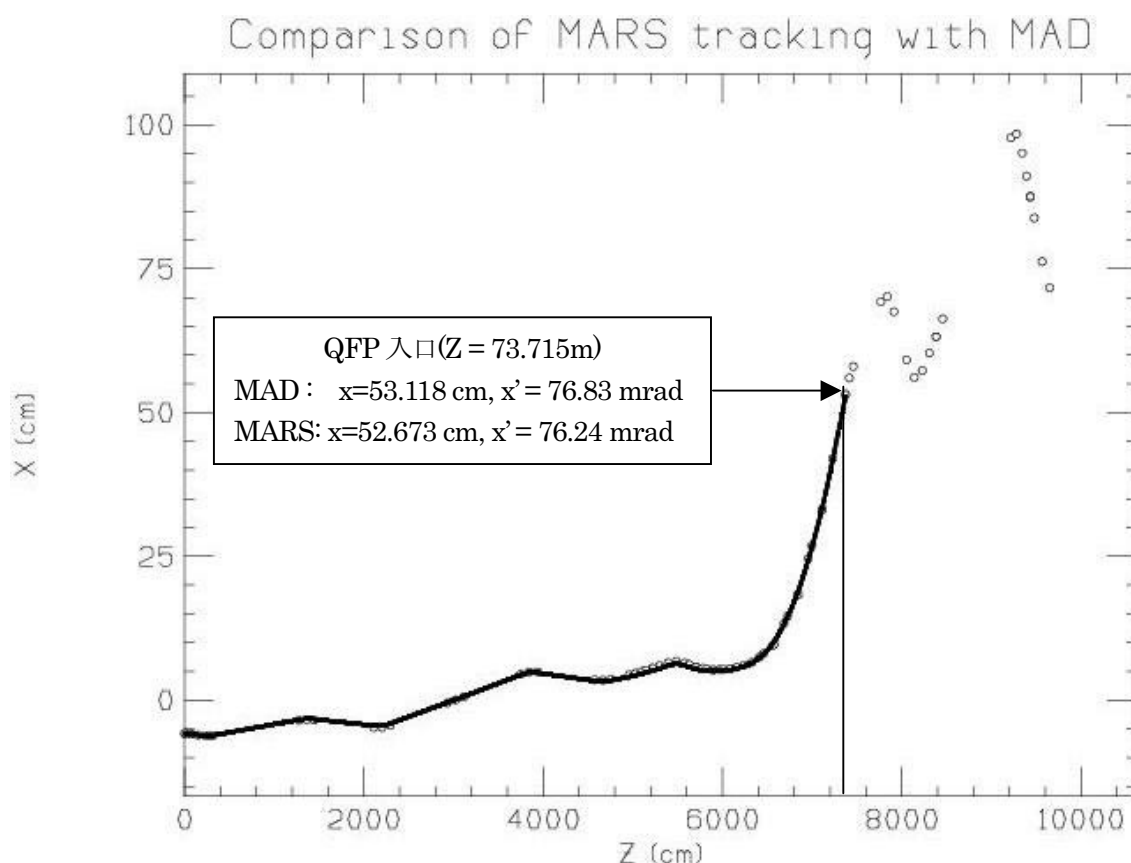


図2 MAD と MARS による陽子の軌道計算結果。白丸はMAD による各エレメントの入口出口での水平位置。黒線はMARS による計算値。

2.2.1.4 遅い取り出しビームラインの MARS モデリング

図3に遅い取り出しビームラインおよび加速器リングの MARS モデリングを示す。加速器の遅い取り出し部から出てきたビームを我々の光学に合わせるため、取り出し点でビームエンベロープを回転させている。遅い取り出しビームラインは2.1節で述べられている光学設計に従って機器を配置した。(ただし、この計算は水平面の曲げ角度が4度の場合を仮定) 途中から電磁石が見えなくなっているのはビームが鉛直方向に振り上げられているからである。

この計算ではビームライン電磁石しかモデリングしておらず、遮蔽計算を行うためにはビームラインから外れたところを飛んでいく二次粒子をあつめてつなぎ計算をする必要がある。そのため、ビームラインの外側にブラックホール領域を設定し、その領域に到達した粒子は次の遮蔽計算用に保存される。また、50GeV リングの周回側に戻っていく粒子が分岐部の遮蔽計算に及ぼす悪影響を防ぐため、周回ビームを分岐部から十分遠ざけなければならない。そのため、加速器Gからもらった50GeV リングの周回部の機器配置パラメータを使って偏向電磁石等を配置した。図3には周回軌道を輸送される陽子ビームと、取り出しビームラインによって輸送される陽子ビームが描かれている。これからわかるように、周回側に輸送される陽子ビームが分岐部遮蔽体から十分離れていることがわかる。

遅い取り出しビームラインでは、加速器との真空を分けるためにアルミニウム100 μm 相当の膜を設置する。図3に設置予定位置を示す。取り出しビームが膜を通過した場合の影響も調べる。

2.2 放射線遮蔽

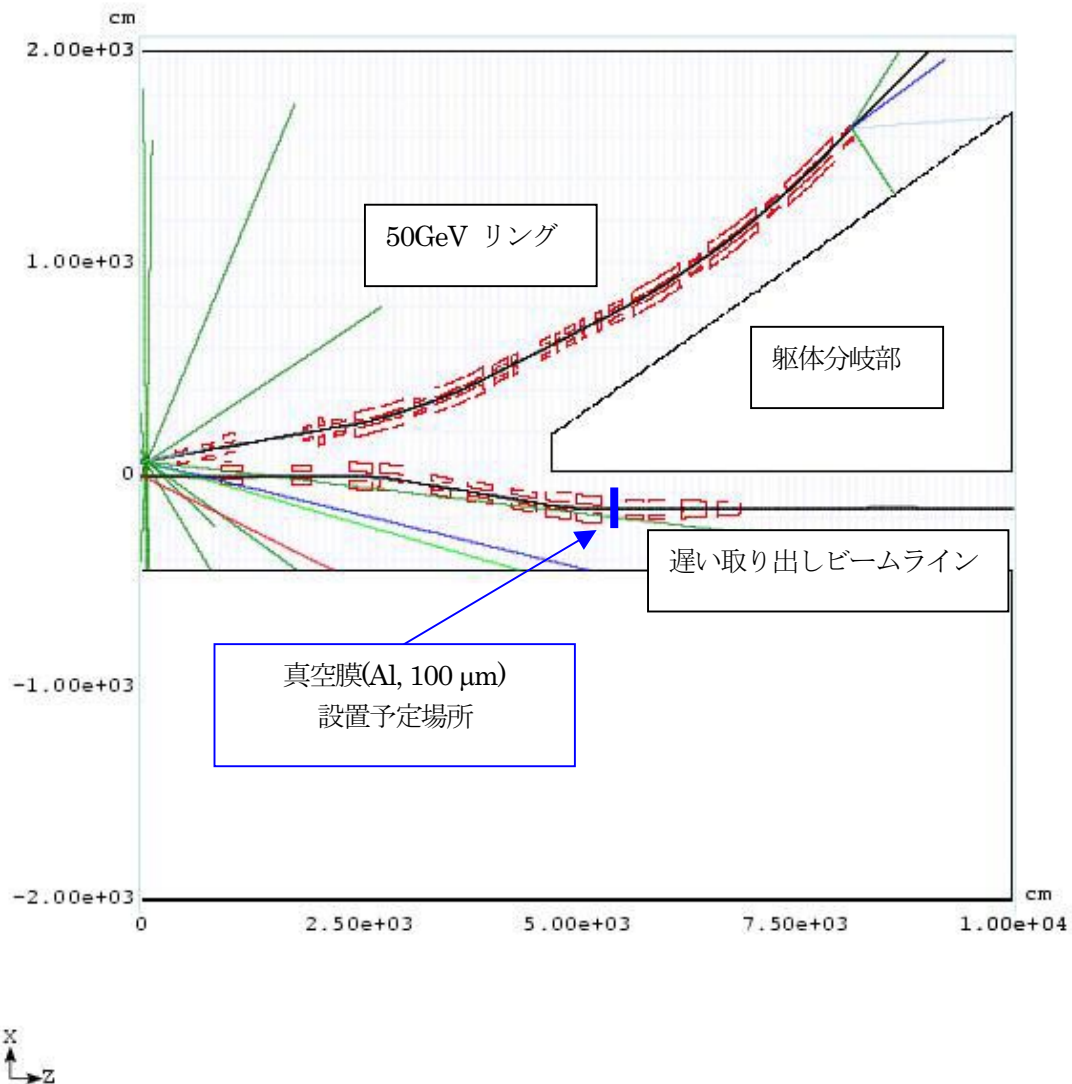


図3 遅い取り出しビームラインと 50GeV リングの MARS モデリング

2.2.1.5 分岐部遮蔽体の MARS モデリング

図4に分岐部遮蔽体構造の MARS モデリングを示す。ビームライントンネルおよびコンクリート遮蔽体の構造は施設部の設計図面を参考にした。コンクリート遮蔽体の外部は土壌になっている。ここで、コンクリート遮蔽体のすぐ外側の土壌放射化を見積もるため、土壌 1m^3 の評価領域を設定した。この領域内の線量を評価し、基準値である 11 mSv/hr を満たしているかどうかを確認する。

入力データは前節の計算で得られたビームラインを外れて出てくる二次粒子を使用し、MARS でつなぎ計算を実行した。

の結果である。第2コリメータを設置することで下流側の線量を低く抑えられることが分かる。

残留放射能

電磁石やモニター、コリメータ等のビームライン機器の運転、保守にあたっては、機器及び周囲の残留放射能の強度を知り、適切なメンテナンス・シナリオを策定することが、作業時の放射線被曝を減らすために非常に重要である。そこで、SM1 における 2 % のビームロスによって周囲がどの程度放射化するか、MARS で計算した。特にコンクリートの放射化に対して低エネルギーの中性子の寄与が非常に大きいため、残留放射能の評価においては 20 MeV のカットを入れずに計算を行った。また、床や壁などは表面の深さ 20 cm 分、電磁石とコリメータについても側面の 20 cm 分の領域の平均で評価した。

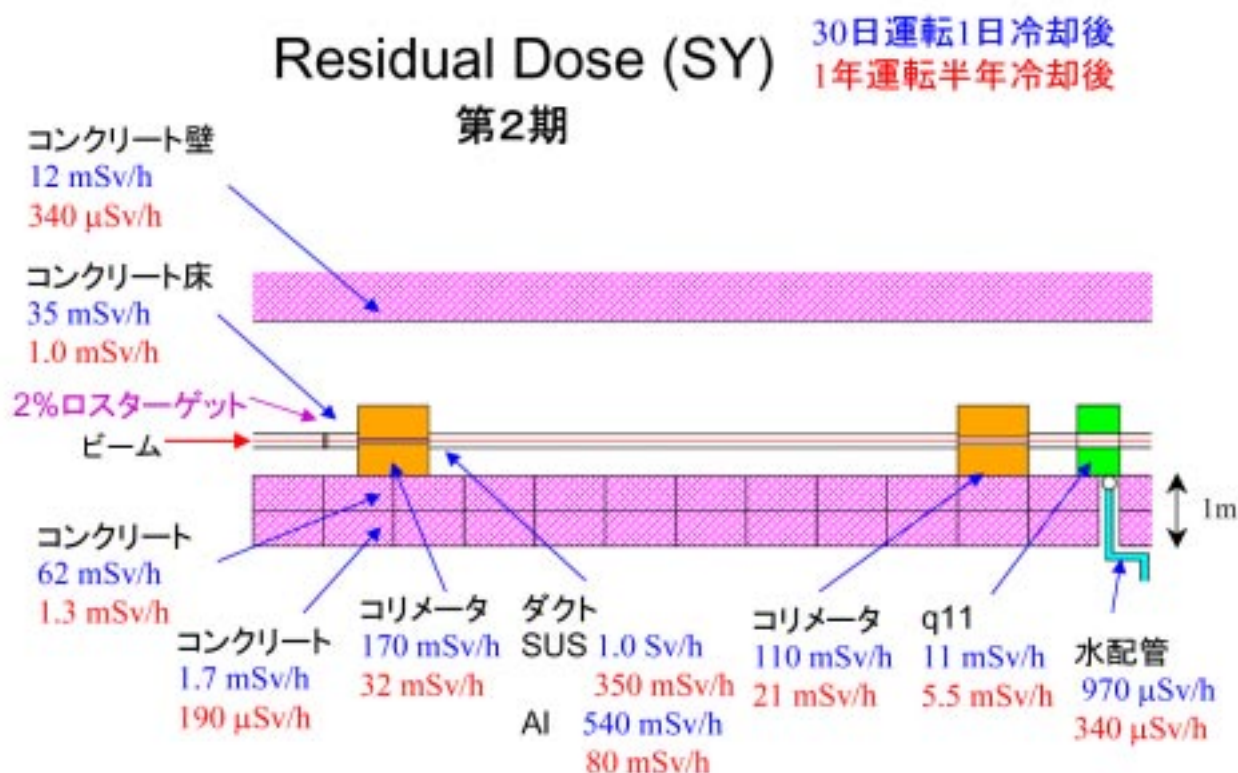


図 3: 第2期で 50 GeV、750 kW 運転後の SM1 周辺における残留放射能。図は SM1 周辺を上から見た模式図で、それぞれの矢印の箇所について、上の値が 30 日運転 1 日冷却後、下の値が 1 年運転半年冷却後の残留放射能を示す。

SM1 周囲の代表的な機器について、30 日運転 1 日冷却後と 1 年運転半年冷却後の残留放射能をまとめたのが図 3 である。ここでは、安全ファクターは何も入れていない。ビームダクトに関しては、材質を SUS にした場合とアルミにした場合の両方を載せている。この結果を見る

2.2 放射線遮蔽

と、ロスポイントの近くではビームライン機器と通路との間に遮蔽ブロックが必須であることが良く分かる。

さらに、このような放射化した機器から出る γ 線により、スイッチヤード内の空間線量がどの程度になるのかを MCNP コードを用いて計算した。今回は、SM1 直後の第1コリメータを想定し、 ^{60}Co からの 1.173 MeV と 1.333 MeV の γ 線を1 m 立方の鉄内で発生させ、それによる周囲の空間線量を計算した。計算モデルは、スイッチヤードの SM1 周辺のトンネル構造で、ビームダクトと通路の間には厚さ 1 m のコンクリートブロックが積み、ビームダクトと天井の間には、SM1 の上流 5 m から下流 20 m まで鉄とコンクリートのブロックが 50 cm ずつ積み込まれている。それらのブロックのうち、第1コリメータの交換のために、その真上と真横の長さ 1 m 分の遮蔽ブロックだけ開放した状態、天井の遮蔽ブロックを全て取り除いた状態、そして第1コリメータを通路側に運び出した状態の3つを評価した。評価の対象としては、ビームダクトの横の 1 m 厚コンクリートブロックのすぐ外側の、幅 1 m、高さ 2 m の領域をビーム軸方向に 1 m ずつ区切って、その平均線量率を計算した。発生源の鉄の表面に厚さ 1 cm の評価領域を設け、その空間線量が1年運転半年冷却後の第1コリメータの表面線量 32 mSv/h になるように、全体の線量の数値をスケールした。

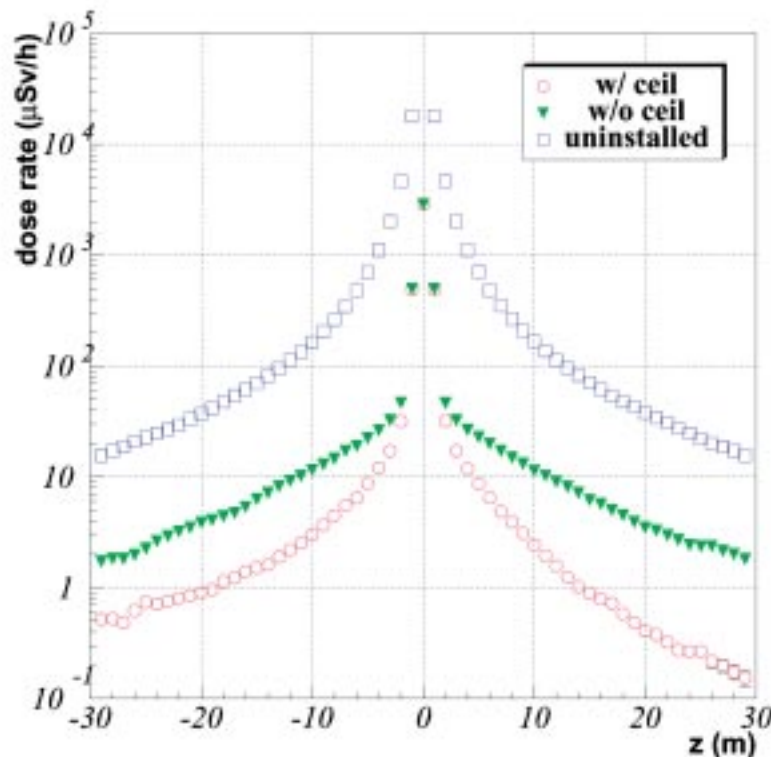


図 4: 32 mSv/h に放射化した SM1 第1コリメータからの γ 線による周囲の空間線量。3つのデータの計算条件については本文を参照。

横軸に評価領域のビーム軸方向の位置を取って線量のグラフにしたのが図 4 である。線量の値には安全ファクター 2 が含まれている。“w/ ceil” は天井の鉄とコンクリートの遮蔽ブロックがある場合、“w/o ceil” はそれを全て撤去した場合、“uninstalled” は第1コリメータを通路側に運び出した場合を示している。天井のブロックがある場合に上流と下流で非対称になっているのは、ブロックが下流側には 5 m までしか積み込まれていないためである。コリメータを通

路側に運び出した途端に、通路の離れたところまで空間線量の桁が上がっている。さらに、32 mSv/h という値はコリメータの側面の表面線量であり、散乱粒子の当たる正面側の放射化レベルはさらに高くなることを考えると、クレーン作業を全て遠隔操作で行うなど、リモートハンドリングの技術の確立がこのような機器のメンテナンスには欠かせないことが分かる。

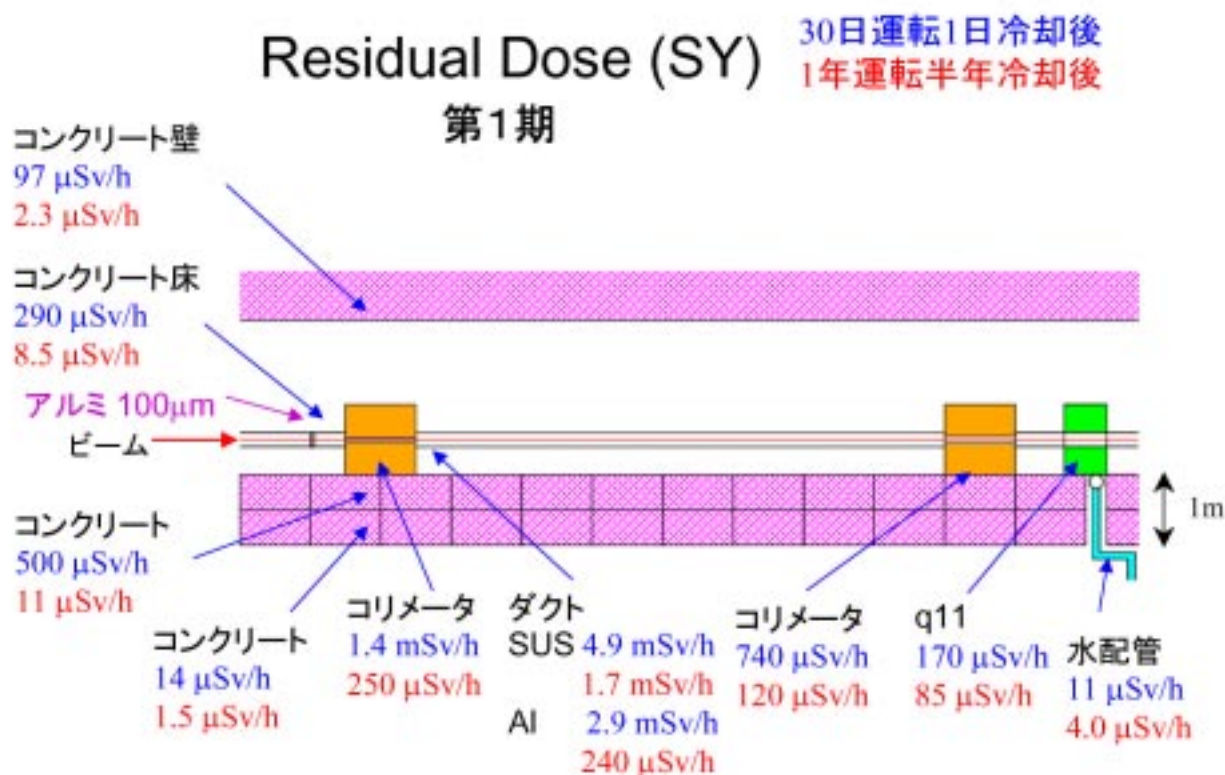


図 5: 第1期で 30 GeV、450 kW 運転後の SM1 周辺における残留放射能。図は SM1 周辺を上から見た模式図で、それぞれの矢印の箇所について、上の値が 30 日運転 1 日冷却後、下の値が 1 年運転半年冷却後の残留放射能を示す。

第1期には、スイッチヤードにターゲットが置かれなかったため、第1期での残留放射能レベルの評価として、SM1 にアルミ 100 μm 厚の真空膜を置いて 30 GeV、15 μA で運転した時の、周辺の残留放射能を計算した。ターゲット以外は第2期の評価の時と全く同じモデルを使って計算した。図 5 がその結果である。2 % ロスターゲットを置いた時と比べると、約 2 桁小さい値になっている。この程度であれば、コンクリートの遮蔽ブロックの厚さを減らす、あるいは比較的ロスの大い箇所を除いてブロックを積まないことも可能だと思われる。

2.2 放射線遮蔽

2.2.3 T0 付近

T0 での 0.5% ビームロスによる放射線量

ハドロン実験施設の第2期では、スイッチヤードの途中に 0.5 % ロスターゲット T0 を置き、そこからの二次粒子を用いるテストビームラインを建設する計画になっている。この T0 でのロスによる周囲の放射線量を見積もるため、厚さ 0.8 mm のニッケルを 0.5 % ロスターゲットとして置いて、MARS でシミュレーション計算を行った。

表 2: T0 周辺における、ビームから壁までの距離と壁厚。カッコ内は内部遮蔽体としてビームから 1 m 離れたところに設置するブロックの厚さを示す。

	z [m]	壁までの距離	遮蔽 (ブロック)
上	-10 ~ -5	500 cm	コンクリート 360 cm
	-5 ~ 20	500 cm	コンクリート 360 cm (コンクリート 50 cm + 鉄 50 cm)
	20 ~ 40	500 cm	コンクリート 360 cm
	40 ~ 42	500 cm	コンクリート 530 cm
	42 ~ 45	600 cm	コンクリート 430 cm
	45 ~ 50	500 cm	コンクリート 530 cm
下	-10 ~ 35	100 cm	コンクリート 350 cm
	35 ~ 50	100 cm	コンクリート 550 cm
左	-10 ~ 0	175 cm	コンクリート 480 cm
	0 ~ 12	355 cm	コンクリート 300 cm
	12 ~ 15	175 cm	コンクリート 480 cm
	15 ~ 22	175 cm	コンクリート 180 cm
	22 ~ 40	175 cm	コンクリート 480 cm
	40 ~ 42	175 cm	コンクリート 1100 cm
	42 ~ 47	915 cm	コンクリート 360 cm
	47 ~ 50	475 cm	コンクリート 800 cm
右	-10 ~ -5	1425 cm	コンクリート 240 cm
	-5 ~ 20	1425 cm	コンクリート 240 cm (コンクリート 50 cm + 鉄 50 cm)
	20 ~ 40	1425 cm	コンクリート 240 cm
	40 ~ 42	1425 cm	コンクリート 440 cm
	42 ~ 45	1525 cm	コンクリート 340 cm
	45 ~ 50	1425 cm	コンクリート 440 cm

ここでも、計算時間の短縮のため、ビームダクト周辺のためのリアリスティックな形状と磁場を入れた計算と周囲の遮蔽体を入れた計算との2段階に分けてシミュレーションをした。テスト実験室ができるため左側の土の放射化に対する評価は省略し、上下及び右側の壁の外の土 1 m 分の空間線量を計算した。モデルに入れた遮蔽体の厚さは表 2 の通りである。ここでは、 z の原点を T0 ターゲットの位置に取っており、 $z = 50$ m が HD-hall の入口にあたる。また、コリメータとして、ターゲットの下流 50 cm のところに厚さ 1 m、穴の大きさ $\phi 40$ mm の銅を

設置している。

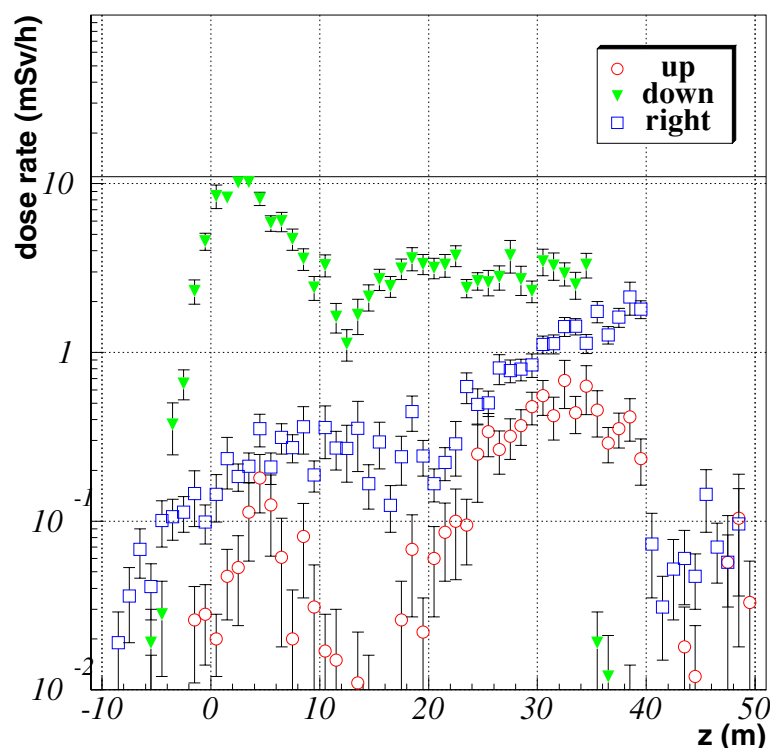


図 6: 50 GeV、750 kW 運転時の T0 周辺における上下及び右の壁の外の放射線量。ターゲットから 50 cm 下流にコリメータを設置してある。

計算結果を図 6 に示す。20 MeV カットを入れて計算したので、安全ファクターと合わせて結果は 4 倍にしてある。下側だけ線量が大きいのに見えるが、これは、T0 の周囲はトンネルの幅が 16 m に広がっており、天井を支える強度上の問題で天井や左右の壁が放射線遮蔽が必要とされる以上に厚くなっているためであり、下についても基準の 11 mSv/h 以下は満たしている。

第 1 期での放射線量

第 2 期にテスト実験室を建設するためにはその周囲の土を掘りおこす必要があるため、そのような場所の線量基準は他よりも厳しく 0.5 mSv/h となっている。従って、テスト実験室建設時に掘りおこす必要のある、T0 の上と左の壁の外の土については、第 1 期運転時の線量がある基準をクリアしていなければならない。それを確認するため、ターゲットなしで 30 GeV の陽子を通したときの線量を MARS で評価した。ビーム中心から壁までの距離と壁の厚さは表 2 と同じであるが、上側の遮蔽については、コンクリート 50 cm + 鉄 50 cm の内部遮蔽ブロックは含まないモデルで計算した。

計算結果は図 7 のようになった。T1 ターゲットでビームを収束させるために、その手前で一度大きくビームを膨らませているので、 $z = 30$ m から 40 m 辺りでビームの一部がダクトや磁石に当たってロスが生じている。しかしそれでも、基準を十分に下回る線量となっている。

2.2 放射線遮蔽

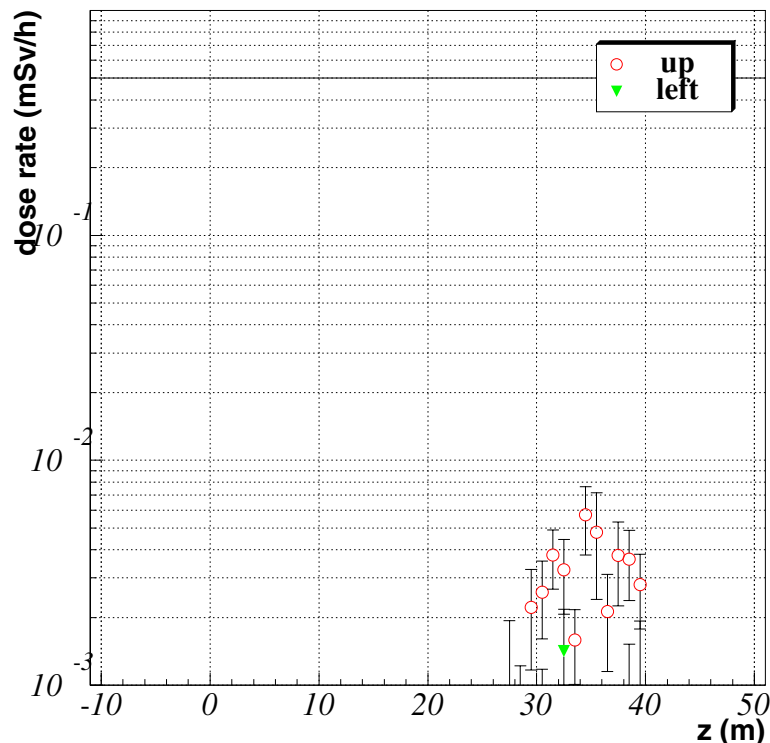


図 7: 第 1 期で T0 ターゲットを置かずに 30 GeV、450 kW のビームを通した時の T0 周辺における上と左の壁の外の放射線量。ターゲットから 50 cm 下流にコリメータを設置してある。

2.2.4 HD-hall

T1 での 30% ビームロスによる放射線量

ハドロン実験施設の第 1 期では、30 % ロスの二次粒子生成標的として T1 の 1 台のみが置かれる。第 1 期の T1 下流の 1 次ビームラインには、3 台の四極磁石 (q1B、q1C、q1D) が置かれて陽子ビームをダンプまで輸送する。第 2 期になると、ダンプは下流に移動し、元々ダンプが位置していた場所 (T1 から 50 m 下流) に 2 台目の生成標的 T2 が置かれ、その T2 にビームを収束させるための 3 台の四極磁石 (q1E、q1F、q1G) が T2 の手前に設置される。T1 による HD-hall の床の下と実験室内の放射線量の評価として、今回 T1 から 50 m 下流までを MARS で計算したが、第 1 期の評価として四極磁石 3 台のビームラインに 30 GeV、15 μ A の陽子ビームを通した場合と、第 2 期の評価として四極磁石 6 台のビームラインに 50 GeV、15 μ A の陽子ビームを通した場合の両方を計算した。

スイッチヤードでの計算と同様、計算時間の短縮のため、ビームダクト周辺の磁石やコリメータの具体的な形状と磁場を入れた計算と、周囲の遮蔽体を入れた計算との 2 段階に分けてシミュレーションをした。特に上と左側の実験室内の空間線量の評価にあたっては、遮蔽体が厚く計算に膨大な時間がかかるために、遮蔽体を入れた計算をさらに 2 段階に分けて、合計 3 段階の計算を行った。右側については、二次ビームラインのレイアウトがまだ決まっていないため、今回の計算では省略した。T1 として厚さ 60 mm のニッケルを置き、表 3 にある厚さの遮蔽体をモデルに入れた。 z の原点は T1 ターゲットの位置で、 $z = 50$ m がビームダンプもしくは T2 ターゲットにあたる。コリメータは、3.3 節で詳しく述べるように、2 台がそれぞれター

表 3: HD-hall 内における、ビームから壁までの距離と壁厚。

	z [m]	壁までの距離	遮蔽 (ブロック)
上	-10 ~ -5	500 cm	コンクリート 600 cm
	-5 ~ -7	100 cm	鉄 200 cm + コンクリート 450 cm
	-7 ~ 3	100 cm	鉄 200 cm + コンクリート 600 cm
	3 ~ 50	100 cm	鉄 200 cm + コンクリート 450 cm
下	-10 ~ -5	200 cm	コンクリート 500 cm
	-5 ~ 20	200 cm	コンクリート 700 cm
	20 ~ 50	200 cm	コンクリート 500 cm
左	-10 ~ -5	475 cm	コンクリート 600 cm
	-5 ~ -4	100 cm	コンクリート 920 cm
	-4 ~ 30	100 cm	鉄 100 cm + コンクリート 820 cm
	30 ~ 50	100 cm	鉄 100 cm + コンクリート 700 cm

ゲットの downstream 50 cm と 4.5 m のところに置かれるが、今回の計算では、第 1 コリメータの位置は T1 から 40 cm downstream に置いたモデルで評価した。

まず、床の下の方の放射化に対する線量評価の結果を図 8 に示す。20 MeV カットの分と安全率と合わせて結果を 4 倍にしてある。第 1 期の 30 GeV 運転時は、T1 downstream の 3 台の四極磁石を励磁しないと downstream でビームが広がり過ぎてロスが増えてしまうが、磁石を励磁してビームがちょうどダンプの口に入る大きさになるように調整してやれば問題ないことが分かった。また、第 2 期の 50 GeV 運転時も、十分基準を下回っている。

次に、トンネルの上と左の遮蔽の外の実験室内空間線量の計算結果をそれぞれ図 9 と図 10 に示す。床の下の方の線量計算で、第 1 期の 30 GeV 運転時と第 2 期の 50 GeV 運転時でほとんど差が無いことが分かったので、ここでは第 2 期の 50 GeV 運転の場合のみ評価している。現在の HD-hall の図面では、表 3 にある通り、トンネルとサービススペースとの間の遮蔽ブロックが鉄 2 m + コンクリート 1 m で、また左右の躯体コンクリートの中に厚さ 1 m の鉄を埋め込んでいるが、今回の結果を見ると、T1 の周辺を除いて鉄の量を減らすことが可能であると思われる。ただし、横方向の遮蔽については、今回の計算では 2 次ビームラインが設置される場所も壁としているため、今後さらに詳細な計算が必要である。

SM1 からの二次粒子による放射線量

第 2 期計画では、スイッチャードの途中に 2 % ロスの SM1 が設置されることになっているが、この SM1 が上りのスロープに位置しているため、そこで発生した μ 等の粒子が HD-hall の実験室内の空間線量率を上げてしまうことが懸念される。そこで、SM1 の 2 % ロスターゲットに 50 GeV、15 μ A のビームを当てた時に HD-hall 内の放射線量がどの程度になるのか、MARS で評価した。

計算は 3 段階に分けて行った。まず、SM1 からスロープの終わりまでをビーム軸中心の円柱対称モデルで計算し、downstream に出た粒子のうち π 、 K 、 μ のみを集めてスロープの角度分だけ方

2.2 放射線遮蔽

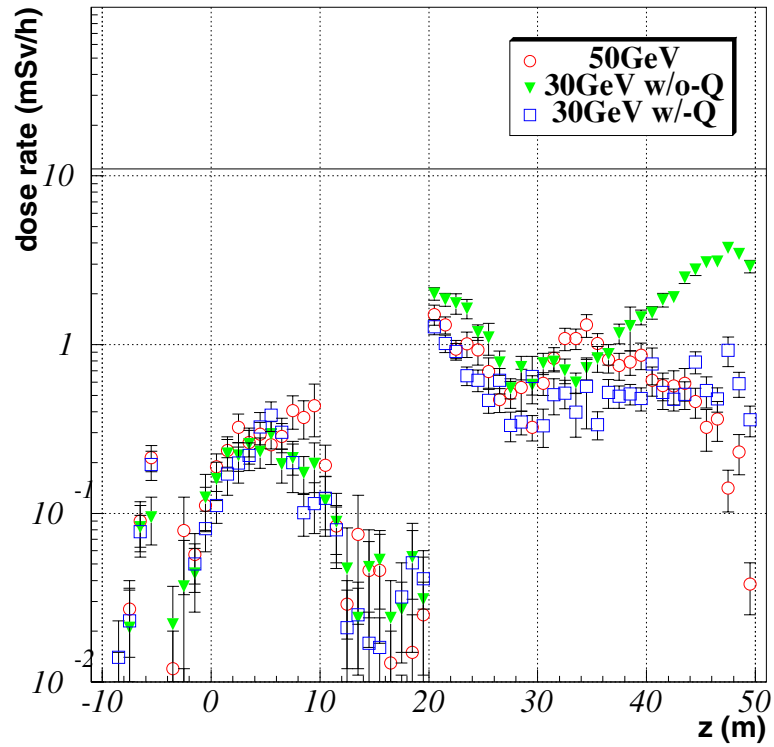


図 8: 30 GeV、450 kW 運転時及び 50 GeV、750 kW 運転時の T1 周辺における床の下の放射線量。“w/o-Q”、“w/-Q” はそれぞれ、T1 下流の 3 台の四極磁石 (q1B、q1C、q1D) を励磁しないときと励磁した時の結果である。

表 4: SM1 からの二次粒子による放射線量の評価地点の HD-hall の床からの高さ。

z [m]	床からの高さ
-10 ~ -5	13 m
-5 ~ 5	12 m
5 ~ 45	10.5 m
45 ~ 55	12 m
55 ~ 90	10.5 m

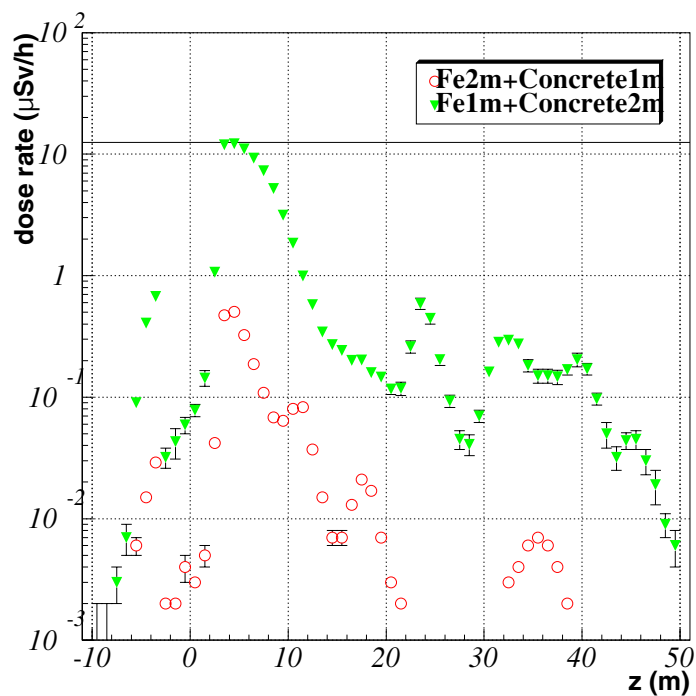


図 9: 50 GeV、750 kW 運転時の T1 周辺における上の遮蔽の外の放射線量。トンネルとサービスペース間の遮蔽ブロックが鉄 2 m + コンクリート 1 m の時と鉄 1 m + コンクリート 2 m の時の結果を示している。

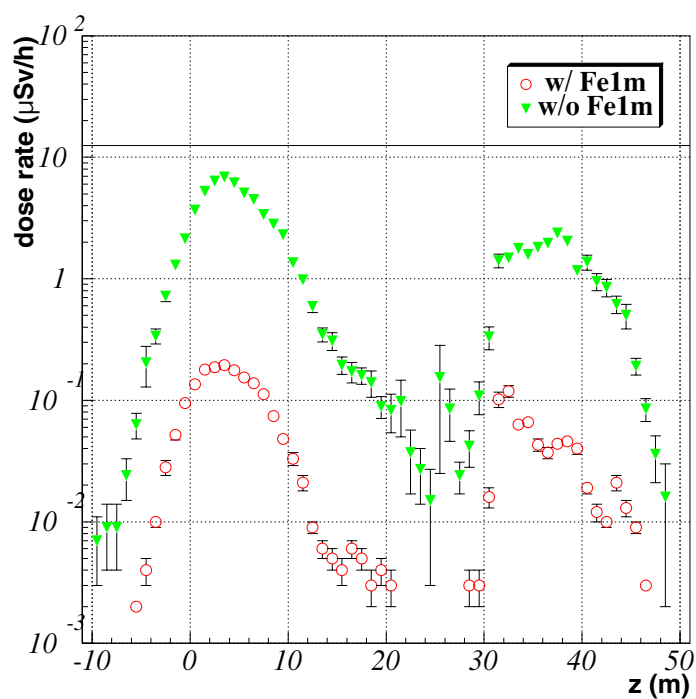


図 10: 50 GeV、750 kW 運転時の T1 周辺における左の壁の外の放射線量。“w/ Fe1m”、“w/o Fe1m” はそれぞれ躯体コンクリート内に厚さ 1 m の鉄を埋め込んだ時と埋め込まない時の結果である。

2.2 放射線遮蔽

向を曲げた。次に、スロープの終わりから HD-hall の入口までのビーム軸中心の円柱対称モデルでそれらの粒子をシミュレートし、最後に、HD-hall の遮蔽構造を入れた非対称モデルで遮蔽の上の空間線量を計算した。HD-hall のモデルとしては第2期を想定してビーム軸方向に 100 m の長さまで入れた。評価地点の HD-hall の床からの高さは表 4 の通りで、そこから幅 2 m、高さ 1 m の空間を奥行き方向に 1 m ずつに区切って線量の平均を評価した。T1 の放射線計算の時と同じく、T1 の位置を横軸 z の原点にしてあり、 $z = -10$ m が HD-hall の入口、 $z = 50$ m が T2 ターゲットの位置に当たる。

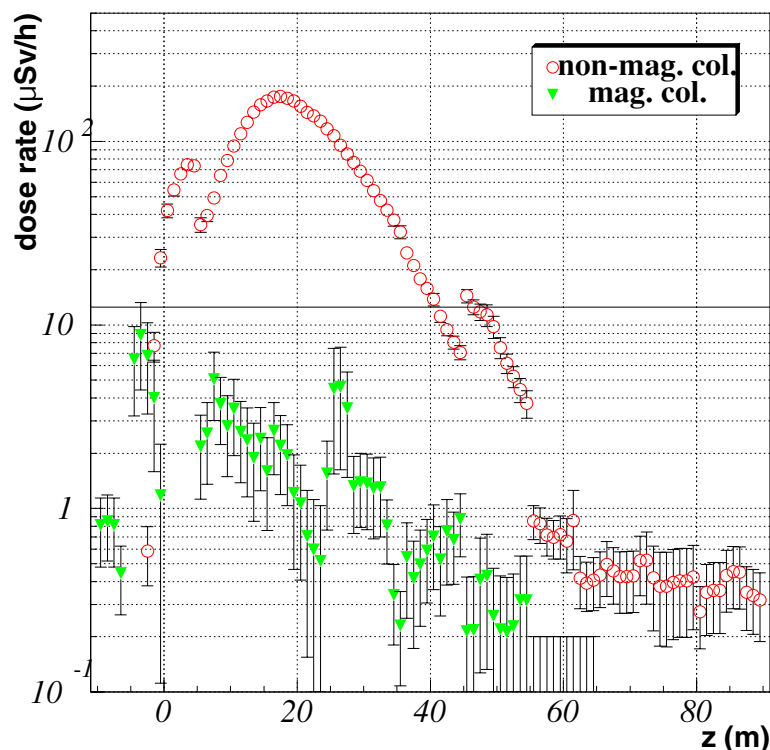


図 11: 50 GeV、750 kW 運転時の SM1 で発生した二次粒子による、HD-hall の遮蔽の上の放射線量。スイッチヤードのスロープの終わりにある偏向磁石 v14 の出口に鉄のコリメータを置いている。“non-mag. col.”、“mag. col.” はそれぞれ、コリメータに磁場をかけない場合とかけた場合の結果である。

図 11 が計算の結果である。20 MeV カットの分と安全率と合わせて結果は 4 倍にしてある。単に、厚さ 1 m、穴の大きさ ϕ 200 mm の鉄のコリメータをスロープの終わりに設置しただけでは、実験室内の線量が基準の $12.5 \mu\text{Sv/h}$ を 1 桁以上上回ってしまった。

図 12 は SM1 で発生した 10 GeV 以上の μ 粒子の HD-hall 入口での高さの分布をプロットしたものであるが、これを見ると、スロープの終わりで陽子ビームを下向きに曲げている偏向磁石 v14 の磁場によって、 μ^- が逆に上方向に蹴り上げられているのが分かる。計算の途中で粒子を選別してみたところ、線量のほとんどがこの μ^- によるものであることが分かった。

そこで、この μ^- の向きを下方向へ曲げるため、スロープの終わりのコリメータ内に 2 T のソレノイド磁場を発生させてみた。その結果が、図 11 の緑三角印のプロットである。磁場によって μ^- が下に曲げられたおかげで、実験室内の線量が大幅に下がっている。しかし、まだ計算の統計が足りずエラーバーが大きいので、今後統計を増やして信頼性を高めると共に、コ

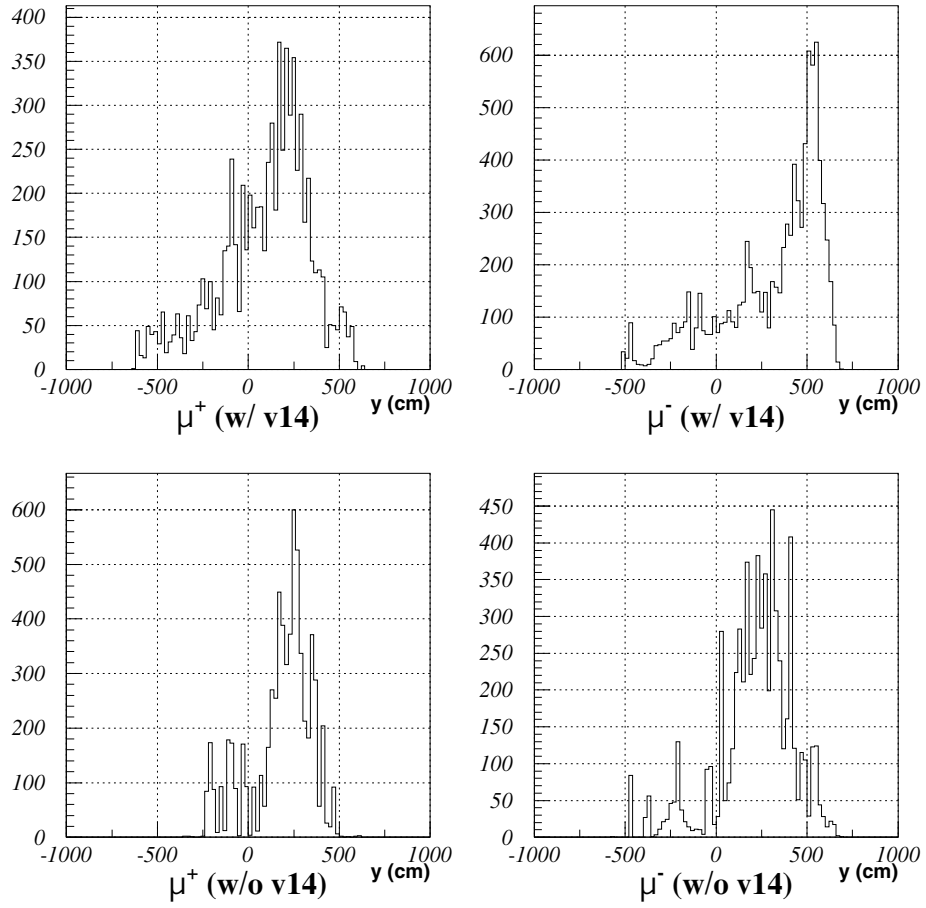


図 12: SM1 で発生した高エネルギーの μ の HD-hall 入口での高さ分布。上がスロープの終わりの偏向磁石 v14 の磁場を入れた場合で、下が磁場を入れない場合。

2.2 放射線遮蔽

リメータの大きさや磁場強度の最適化を進める必要がある。

残留放射能

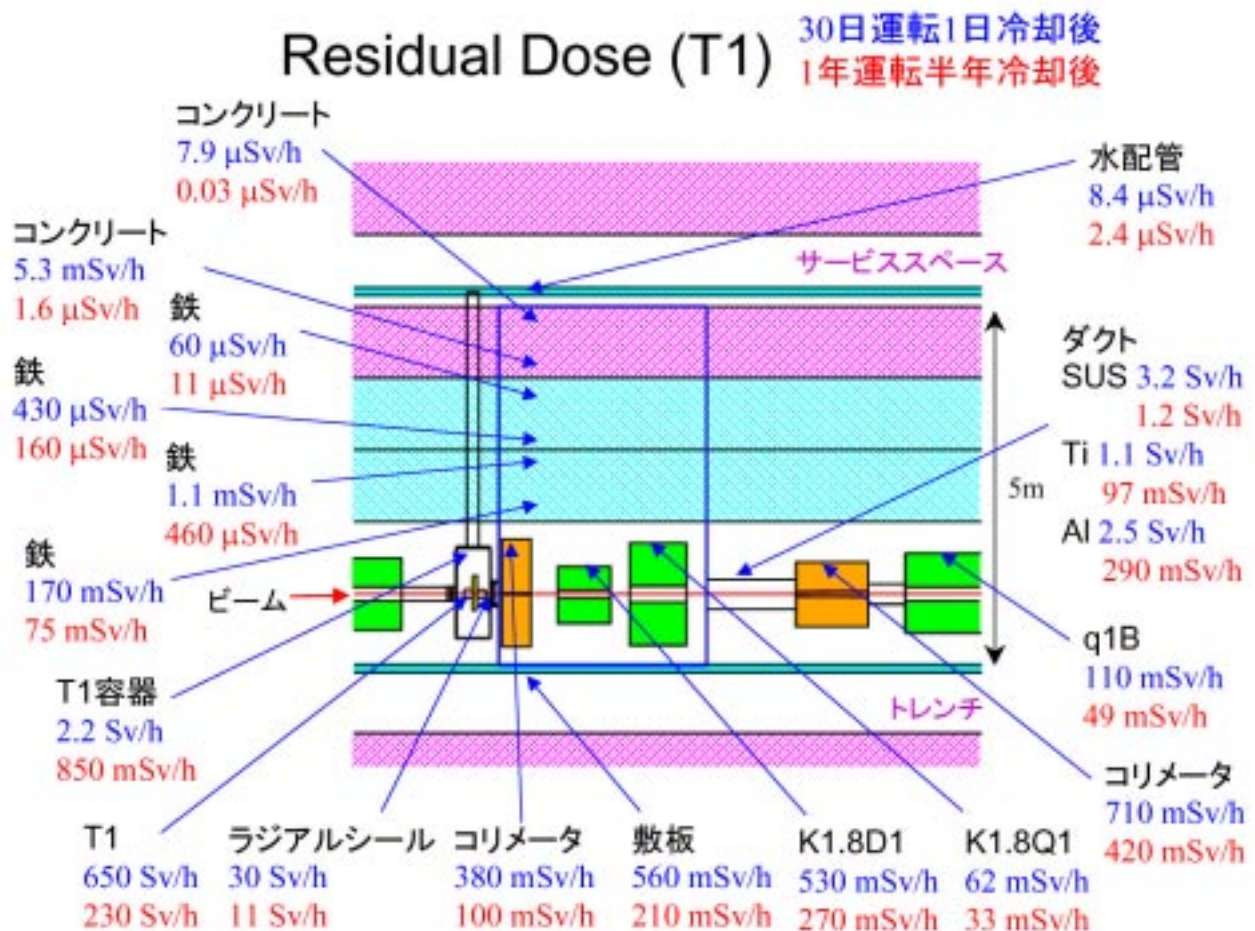


図 13: 50 GeV、750 kW 運転後の T1 周辺における残留放射能。図は T1 周辺を横から見た模式図で、それぞれの矢印の箇所について、上の値が30日運転1日冷却後、下の値が1年運転半年冷却後の残留放射能を示す。

30日運転1日冷却後及び1年運転半年冷却後のT1周辺の残留放射能の計算結果を図13にまとめた。スイッチヤードの場合と同様、残留放射能の計算においては20 MeVのカットを入れず、また結果にも安全ファクターを乗じていない。100 Sv/h 以上にもなるT1本体を始め、ビームライン機器が極度に放射化するため、吊り上げる場合にはキャスクの中に入れる等、特別な措置を講じなければならない。一方、サービススペースでは残留放射能は低く抑えられているので、そこで人が作業することが可能である。ただし、図中の30日運転1日冷却後の数値で、コンクリートブロックの下面の線量(5.3 mSv/h)がその下の鉄(60 μSv/h)より2桁多くなっているのは、12 GeV PSでの測定結果と合わない。MARSの計算で、コンクリートの放射化を過大評価しているか、鉄の放射化を過小評価しているか、あるいはその両方である可能性が高い。現在、K2Kのターゲットステーションの残留放射能をMCNP-XやMARSで再現

できるかどうか、計算中である。

ビームライン機器のメンテナンス時の、このような残留放射能による HD-hall 内の空間線量を MCNP で計算した。まず、サービススペースの上の遮蔽ブロックを全て撤去し、その下にビームラインレベルまで 1 m 四方の穴を開けた場合を計算した。HD-hall の屋根は簡単に厚さ 1 mm の鉄とした。評価したのは、実験室の床から 10 m の高さの躯体の上の高さ 1 m、幅 4 m の領域と、6 m の高さのサービススペースレベルの高さ 1 m、幅 1 m の領域で、穴の真上からビーム軸方向に 30 m 下流までを 1 m ずつ区切って平均を取った。発生させる γ 線のエネルギーや線量のスケールの方等はスイッチヤードの時と同じである。線量のスケールは、敷板の表面線量 210 mSv/h に合わせた。

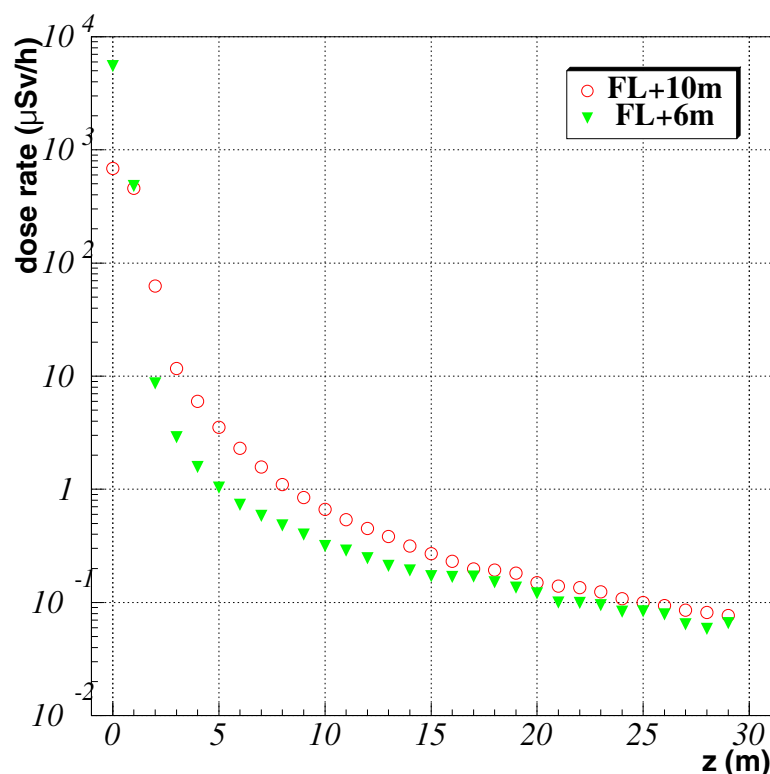


図 14: 210 mSv/h に放射化した敷板からの γ 線による HD-hall 内の空間線量。“FL+10m”は躯体の上、“FL+6m”はサービススペースレベルでの線量。

図 14 がその結果である。線量の値には安全ファクター 2 を乗じてある。ただサービススペースの下で遮蔽を開けるだけでも、直接穴の下が見えるような位置には近づけない。穴から 15 m より離れてもほとんど線量が減らなくなるのは、 γ 線が屋根で反射しているためと思われる。

次に、コリメータや磁石等をサービススペースまで吊り上げた場合を想定して、サービススペースまで吊り上げた 1 m 立方の鉄からの γ 線による HD-hall 内の空間線量を計算した。先の敷板の場合と比較しやすいように、放射化した鉄の表面線量を同じ 210 mSv/h でスケールした。結果が図 15 である。先と同様に安全ファクター 2 がかけてある。サービススペースの上の遮蔽は全て撤去していて、躯体の上でもサービススペースレベルでも放射化鉄が直接見える状態にあるため、穴の下にあった時よりも約 3 桁も空間線量が増えている。

最後に、先の 2 つの場合における HD-hall の外の空間線量を計算した結果を、図 16 に示す。プロットしているのは、地面の上の高さ 1 m、幅 4 m の空間を HD-hall の壁から 2 m おきに

2.2 放射線遮蔽

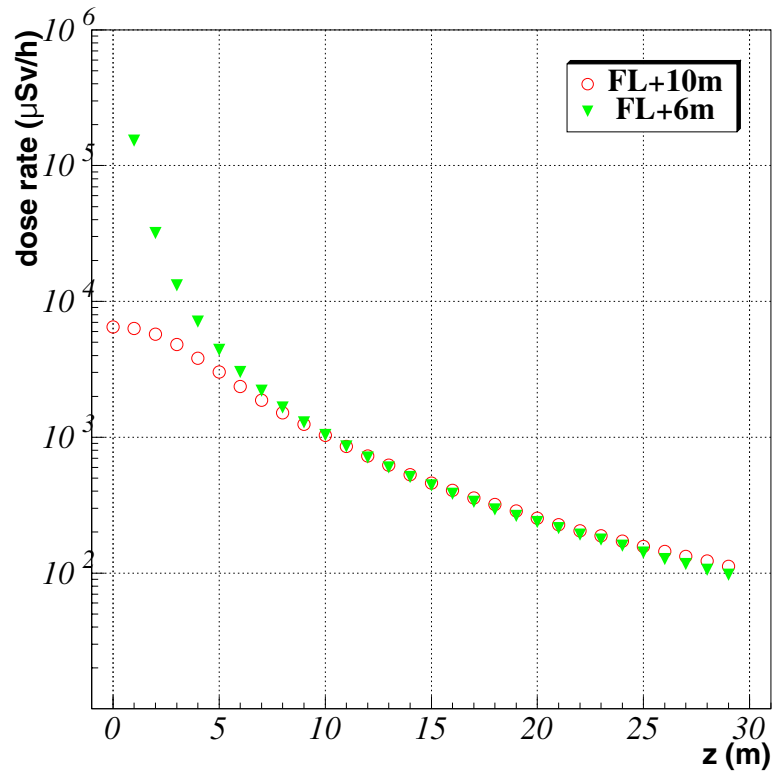


図 15: 210 mSv/h に放射化した 1 m 立方の鉄をサービススペースまで吊り上げた時の HD-hall 内の空間線量。“FL+10m” は躯体の上、“FL+6m” はサービススペースレベルでの線量。

区切った領域の平均線量 (安全ファクター 2 含む) で、 $z = 0$ m が HD-hall の壁である。

今後、各々の機器について、これらの計算結果を基に、作業者の被曝量や敷地境界の線量の制限と照らし合わせて、作業できる時間の長さ、人が近づける距離等を求め、メンテナンス・シナリオを策定する必要がある。

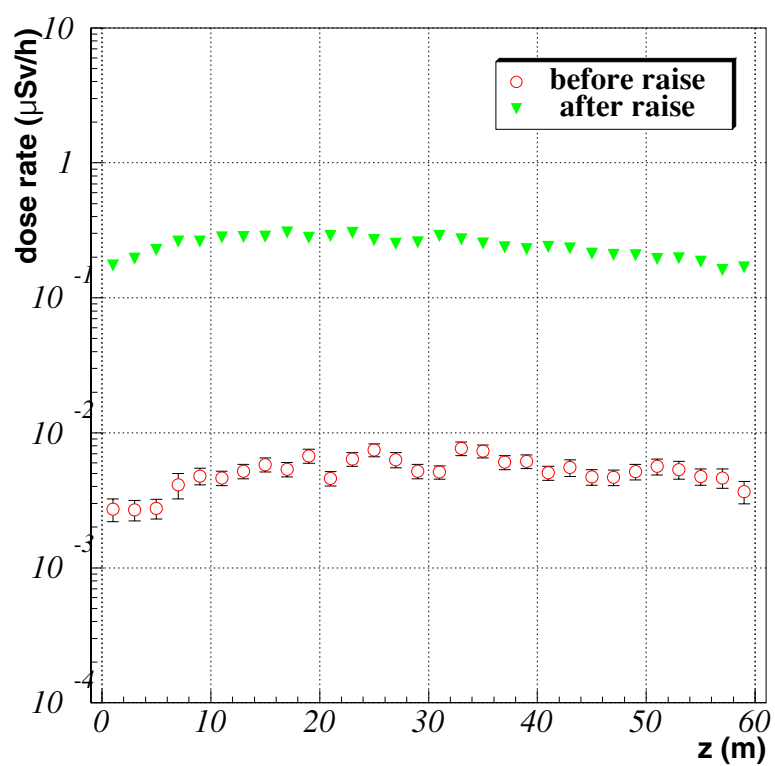


図 16: 210 mSv/h に放射化した鉄による HD-hall の外の空間線量。“before raise” は吊り上げる前、“after raise” はサービススペースまで吊り上げた時の線量。

2.2 放射線遮蔽

2.2.5 ビームダンプ

図1にビームダンプとその遮蔽体構造を示す。ビームダンプのコアは銅できており、その周囲は鉄遮蔽体とコンクリートに囲われており、放射線量を低減させる。一部のコンクリートは将来ハドロン実験施設の拡張が行われる際にビームダンプとともに移設される。

ビームダンプの放射線遮蔽設計を行うための基準値は以下の通りである。

1. ビームダンプ左右および下の土壌の放射線量は 11mSv/h 以下であること
2. ビームダンプ下流の土壌は拡張工事の際に掘り返すため、放射線量は 0.5mSv/h 以下であること。
3. ビームダンプ上部の大気領域では放射線量が $12.5\mu\text{Sv/h}$ 以下であること。

この基準を満たすように MARS を用いて必要な遮蔽厚を計算した。

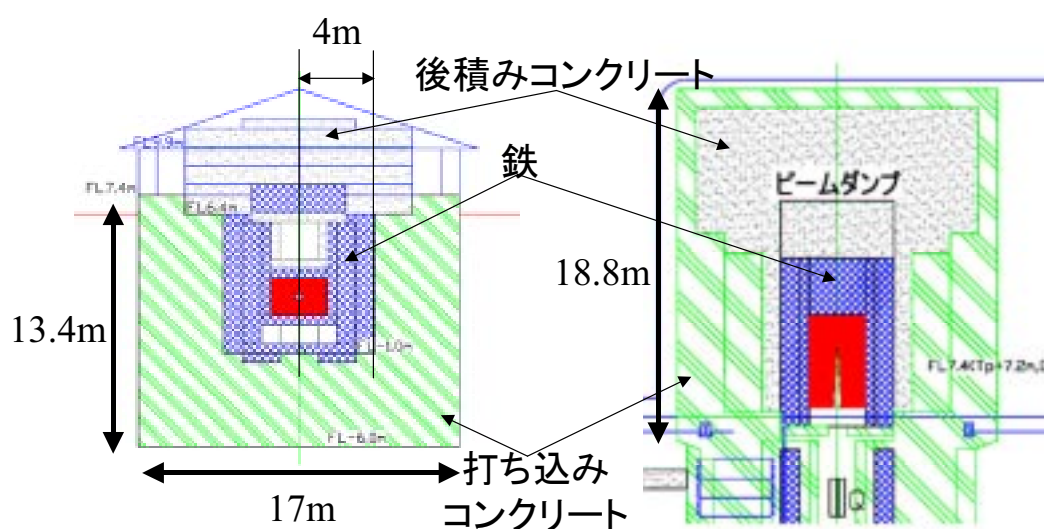


図1 ビームダンプとその遮蔽体構造

図2aにビームダンプ下部の MARS モデリングを示す。ダンプの下側は銅コア1m、鉄0.5m、さらにコンクリート3mの遮蔽体を設置して線量を評価した。ダンプの銅コア下流は鉄3m、コンクリート3mで評価した。図2bに30GeV、 $15\mu\text{A}$ の陽子ビームがダンプに入射した場合の土壌領域での線量分布を示す。結果は基準値である 11mSv/hr をクリアしていることがわかる。図2cにビームダンプ下流の土壌領域での放射線量を示す。結果は 0.5mSv/h の基準値をクリアしている。実際にはミュオン遮蔽のためコンクリート遮蔽が厚くなるので、線量は十分基準をクリアすることがわかる。

図3aにビームダンプ上部の MARS でモデリングを示す。ダンプの銅及び鉄遮蔽体厚は合計3m、コンクリート厚は合計2mになるようにモデリングしている。図3bに30GeV、 $15\mu\text{A}$ の陽子ビームがダンプに入射した場合の計算結果を示す。この結果を見ると基準値の $12.5\mu\text{Sv/h}$ はほぼクリアしていることがわかる。実際のコンクリート遮蔽厚は4.5mあるので十分基準値はクリアできることがわかる。

2.2 放射線遮蔽

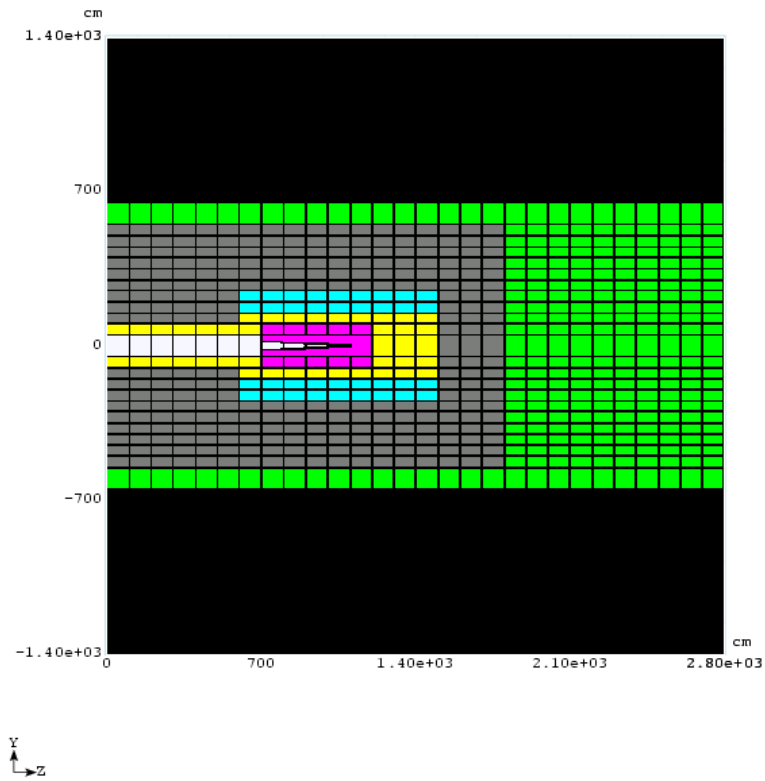


図2a ビームダンプ下部のMARSモデリング。
ピンク色は銅コア、水色は空気、黄色は鉄、灰色はコンクリート、緑色は土壌を示す。

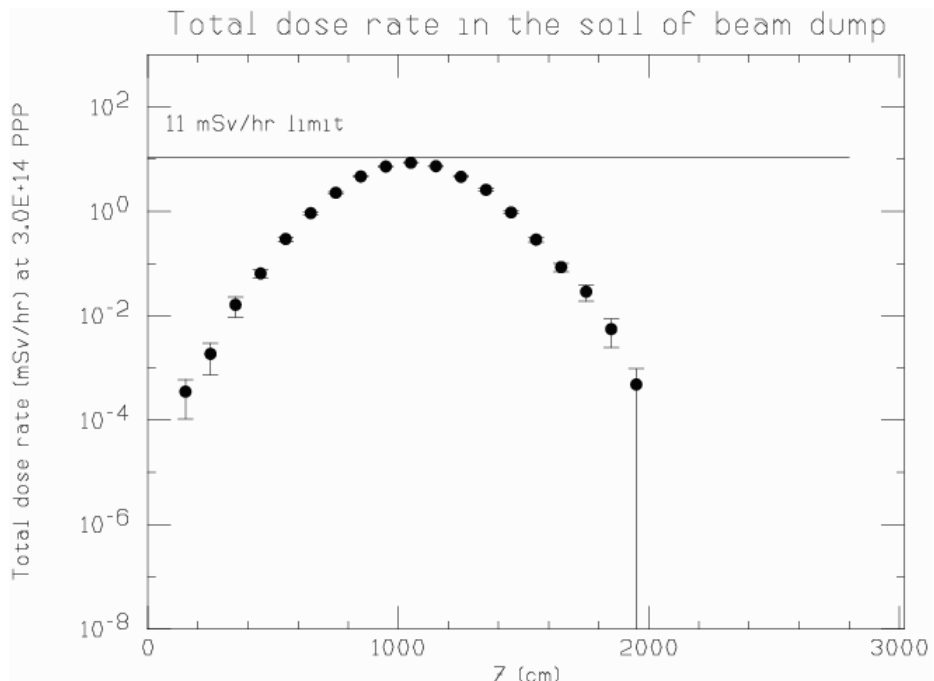


図2b 30GeV, 15 μ A の陽子ビームがダンプに入射した場合の
ビームダンプ下部の土壌の放射線量(安全係数4を含む)

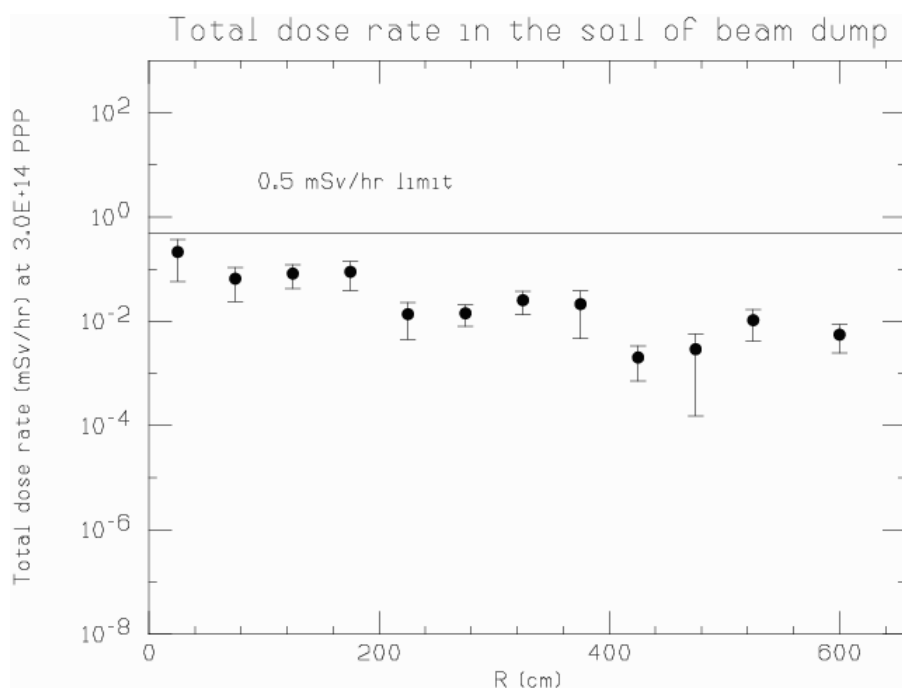


図2 c 30GeV、15 μ A の陽子ビームがダンプに入射した場合の
ビームダンプ下流の土壌領域での放射線量(安全因子4を含む)

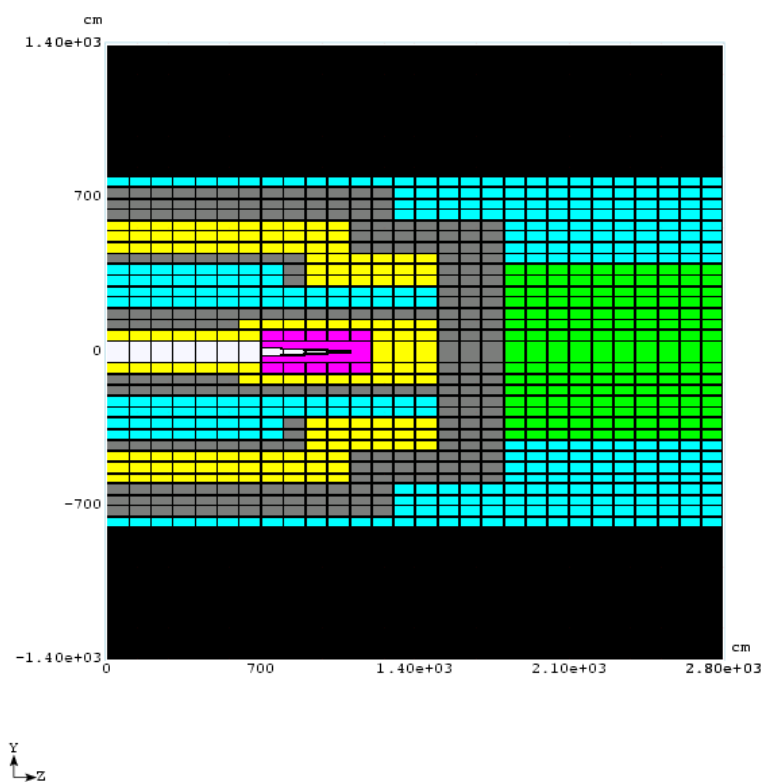


図3a ビームダンプ上部のMARSモデリング。円柱対照モデルで計算した。
水色は大気、黄色は鉄、灰色はコンクリート、緑色は土壌、ピンクはビームダンプコアを示す。

2.2 放射線遮蔽

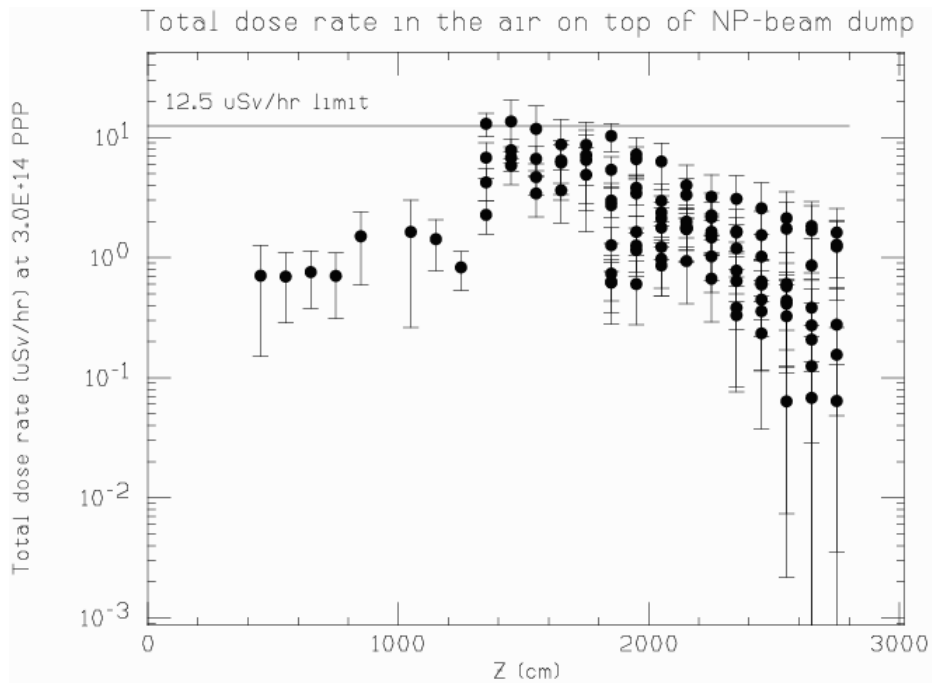


図3 b 30GeV、15 μ A の陽子ビームが入射した場合にビームダンプ上部の空気領域での放射線量分布(安全因子4を含む)

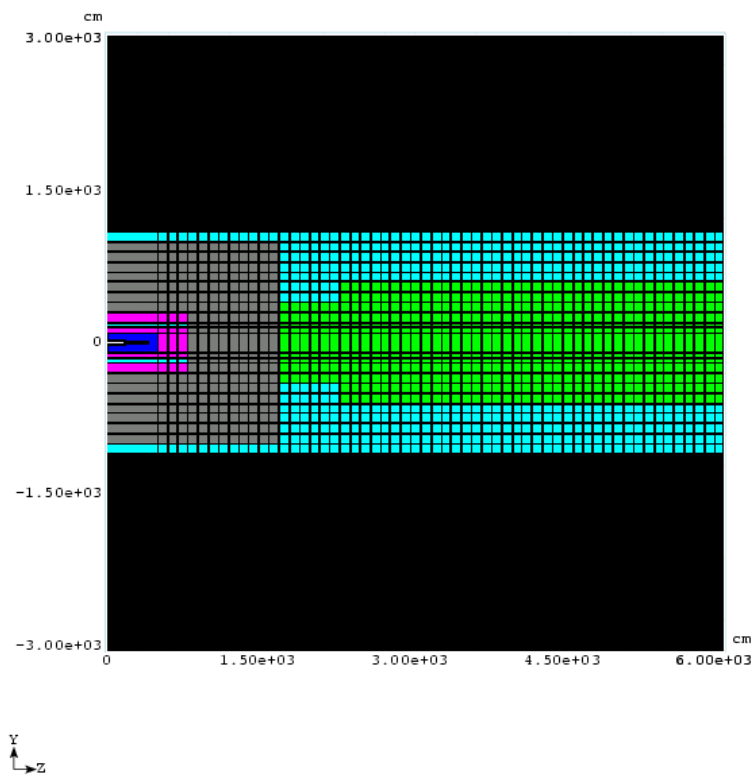


図4a 土壌表面の空気領域でのミュオン線量を評価するためのMARSモデリング。
青色は銅コア、ピンクは鉄、灰色はコンクリート、水色は空気、緑色は土壌

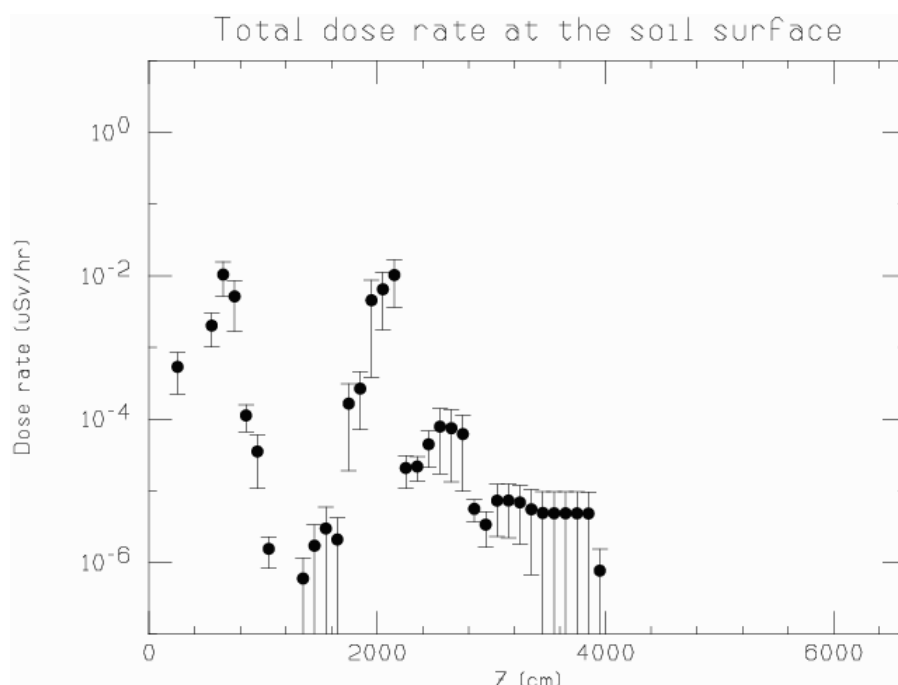


図4 b 30GeV、15 μ A の陽子ビームがダンプに入射した場合の
土壌表面の空気領域でのミュオン線量(安全係数4を含む)

図4aにダンプ下流のミュオン線量を評価するためのMARSモデリングを示す。この場合には下流の鉄遮蔽体3mとコンクリート遮蔽体9mを正しくモデリングしている。計算は2段階に分かれて行った。まず陽子ビームが銅コアに入射した時にコアの下流で生じるミュオンをつなぎ計算用に蓄積した。次にミュオンを銅コアのすぐ下流から発生させ、土壌表面の空気領域での放射線量を求めた。図3bに結果を示す。土壌表面の空間線量は事業所一般区域の基準値 $0.25 \mu\text{Sv/h}$ を下回っていることがわかる。この計算は銅コアで発生したミュオン分布のすそがどのように分布しているかによるので、今後統計精度を上げるなどして再度確認する必要がある。

2.2 放射線遮蔽

2.3 電磁石とメンテナンス

2.3.1 スイッチャードメンテナンス

2.3.1.1 概要

磁石及び、コリメータなどの機器のメンテナンス方針は、軽微な水漏れのような数分で直せる程度の軽故障の場合は修理、コイルの地絡など重故障の場合は機器ごと交換を行うという方針とする。スイッチャードのイメージ図を図 1 に示す。機器へのアクセスは通路側のみとするため、通路側に端末部を集中させる。メンテナンスする人の被曝を軽減するため、通路側には、ガンマ線を遮蔽する高さ 2 m、厚さ 50 cm 以上のコンクリート遮蔽を設ける。機器ごとに交換するときのため、冷却水・電気・信号を手動で速脱着できる構造とし、着脱する機器横のシールドを除去し、クレーンを用いて遠隔で機器を脱着、アラインメントできる構造とする。クレーンは、吊り上げ荷重 20 トンクレーンを 2 基連動させて使用する。機器のクレーンへの玉掛けは電動玉掛け装置を使用する。真空ダクトは機器に機械的に固定し、機器間の真空接続はラジアルシール及びピローシールが検討されている。以上のメンテナンスシナリオを確立するため、東カウンターホールにおいてモックアップを建設し、検証を行っている。(図 2) ここではクイック脱着の要素である機器アラインメントガイド、吊り具、冷却水コネクタの進捗状況について説明する。

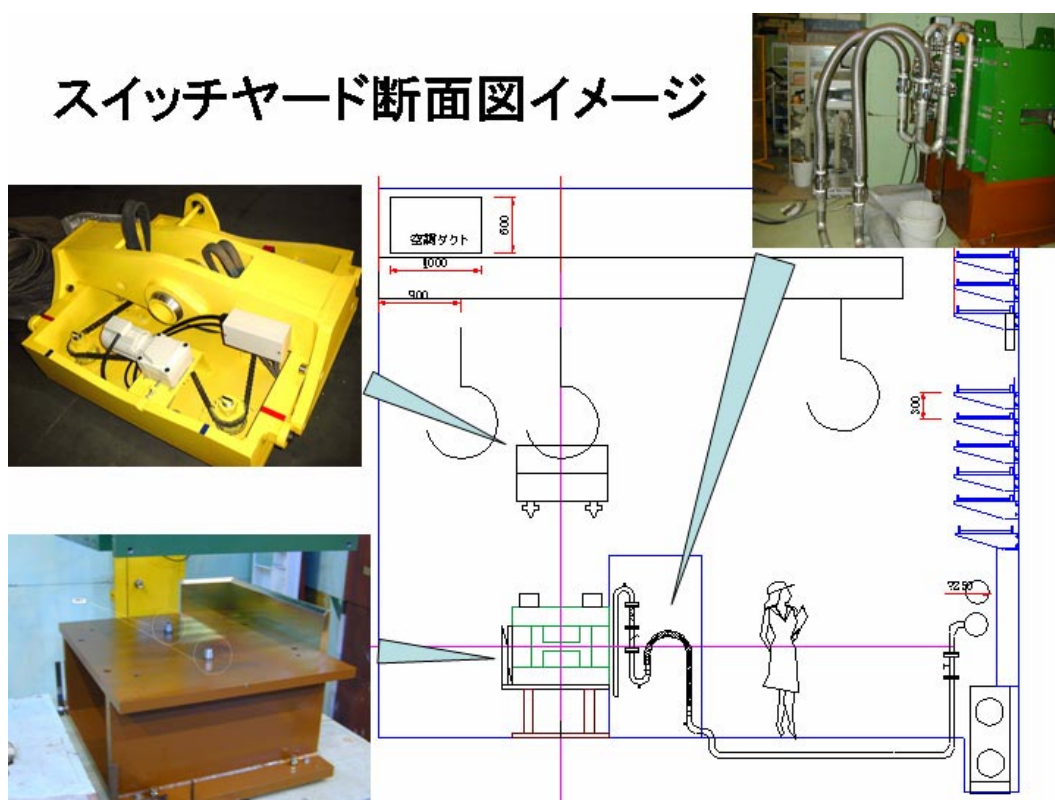


図 1 SY 断面図イメージ

2.3 電磁石とメンテナンス

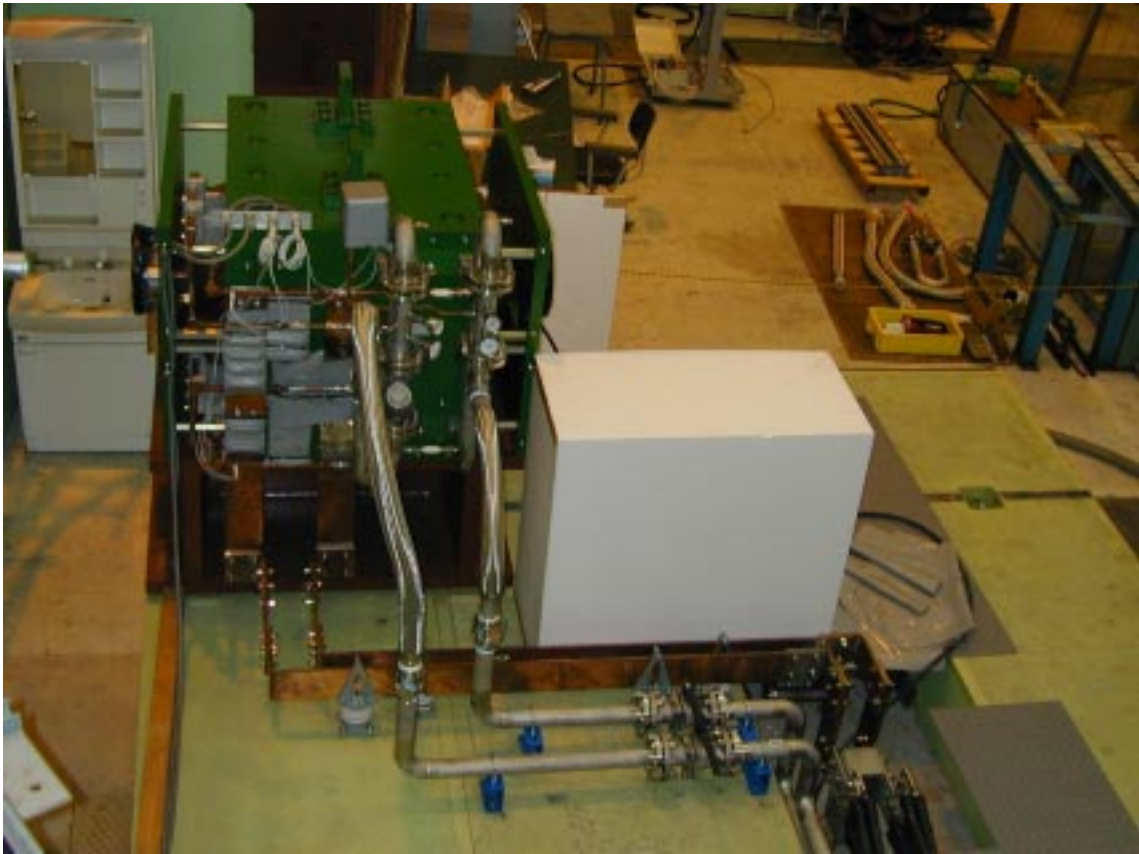


図 2 SY モックアップ全体写真

2.3.2.2 機器アラインメント方式

前回の中間報告書[1]にも述べたとおり、ハドロン実験施設におけるアラインメント方式のテストは既に行った。今度はスイッチヤードにおいて、横からアクセスするタイプのアラインメント方式についてテストを行った。

架台は床固定とし、この架台は予め 0.1 mm の精度でアラインメントする。機器と架台間にピボットを設け、ピボットを勘合させることにより、架台と機器の位置精度 0.1 mm を保証する。このピボットは、 $\pm 7\text{ mm}$ の許容差があるので、遠隔のクレーン操作により機器をこの許容差内に誘導する必要がある。スイッチヤードでは、通路側からアクセスし、ビームラインを見ずにピボットの許容差内に誘導する方法を検討している。今回はガイド付き架台を検討した。図 3 右下写真のように、架台に高さ 20 cm の厚み 4 cm のくさび型の板を奥側と、ビーム軸下流側に立てた架台を製作した。また、図 3 右上写真のように、磁石側には、くさび型の棒を奥側に 2 カ所、ビーム軸下流側に 1 カ所設置した。これを用いた設置方法を以下に説明する。

1. 機器と通路の間のシールドを除去する。
2. 高さ調整：予め、ピボットの高さと、架台+ 20 cm 高さの間くらいのところを、壁

にマーキングしておく。被曝の少ない遠いところで、このマーキングの高さに、機器をクレーンで吊り上げる。

3. ビーム方向の誘導：クレーンの走行により、設置位置の許容差 $\pm 5 \text{ cm}$ まで機器を誘導する。これは、クレーンガータや壁などに設置位置をマーキングすることにより誘導可能であろう。
4. 横方向移動：クレーンの横行により、設置位置の許容差 $\pm 5 \text{ cm}$ まで機器を誘導する。
5. ゆっくり横行移動し（図 3①）、くさびを架台板に当てる（図 3②）。2カ所のくさびにより、機器のビーム軸と垂直方向の位置が決まり（図 3③）、ビーム軸に対する直線性を補正する。同様に下流方向にゆっくりと移動し、1カ所のくさびを板に当てる（図 3④）ことで、機器の位置が決まる。
6. くさびに沿って滑らせながら下に降ろす（図 4⑤）ことで、 $\pm 7 \text{ mm}$ の許容差内に収まる。図 4 右上に勘合後のくさび拡大図を示す。
7. 下にはピボットが待っていて、ピボット勘合が成立（図 4⑥）し、最終的に 0.1 mm の精度で設置できる。（図 4 右下）

この方式を、モックアップでテストした。その結果と問題点は以下のようなになる。

- よく誘導され、ピボット勘合した。
- 機器が架台に当たるときに、不動としている架台が動く可能性があったが隙間ゲージで測定した結果、10トンの磁石では、架台は 0.1 mm も動かないということが分かった。40トンの磁石での検証が必要である。
- 架台の当て板は広くとる必要がある。
- 両隣の機器の真空接続装置に当たらないようにするには、もう少し上の段階で磁石の位置を決める必要がある。
- 電力、冷却水のコネクタをつけてテストをする必要がある。

クイックアラインメントガイド (架台あて板方式)

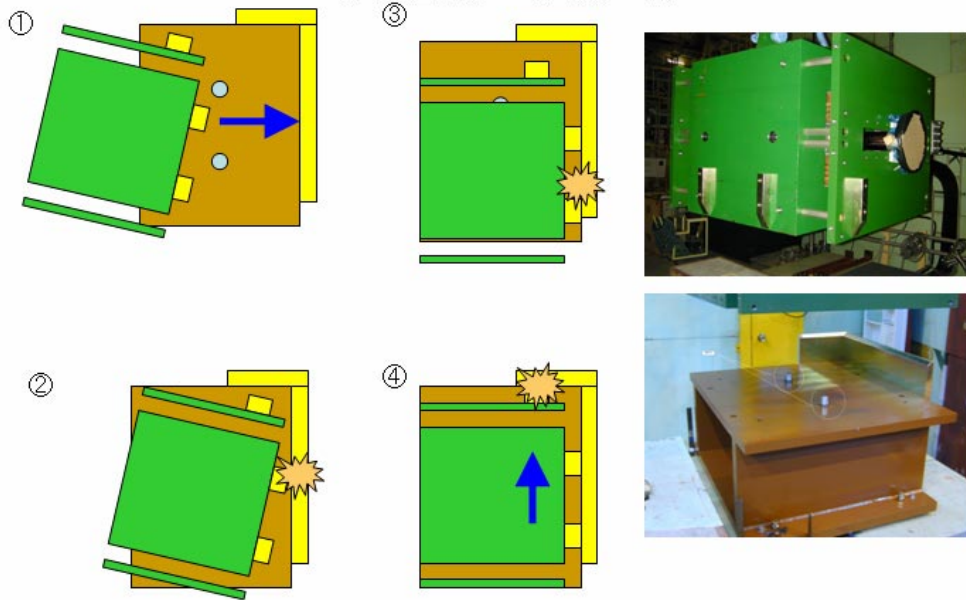


図 3 アラインメント架台ービーム方向および横行方向調整

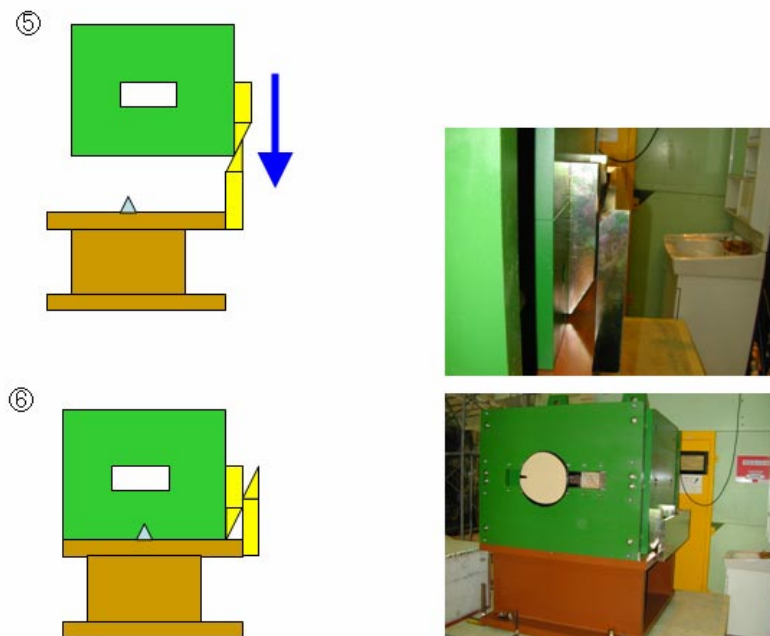


図 4 アラインメント架台ーくさびガイドおよびピボット

2.3.2.3 自動玉掛け装置（ツイストロック）

自動玉掛け装置の満たすべき仕様は、

- 最大40トン
- 最大4点吊り
- 吊り具の高さ1m以内
- 吊り点間～70cm
- 遠隔で玉掛け
- 電動駆動
- バランスが取れる機構があると望ましい。
- 吊り具がかかっているかどうかのインターロック機能

図5は、自動玉掛け装置の試作器である。この自動玉掛け装置を、クレーンに取り付け、磁石側に、図5左下に見られるスミ金具を予め磁石に取り付けておく。このスミ金具の小判型の穴に、図5左上のハンマー状のツイストロックが着座する。着座すると、図5左上のインターロックスイッチが作動し、着座信号がリモートコントローラーに送られる。4カ所のツイストロックが着座した信号を受けると初めてツイストロックを90度回転させることができる。操作者が図5右下のペンダントスイッチより、90度回転する信号を出し、4つのツイストロックがチェーン駆動で連動して同時に回転する。回転することで、ツイストロックが、スミ金具に引っかかり、吊り上げることができる。揚程を失わないように、クレーンのフックが装置の中に埋まるような設計にした。また、次節で詳述するが、ハドロン実験施設側の磁石は、チムニーと呼ばれる端末箱を設置するため、ビーム方向の磁極中心位置にスミ金具を置くことが出来ず、バランスが取れない。そこで、ビーム軸方向に±5cmずつ重心移動可能なバランス装置、つまり、クレーンのリフティングポイントを調整できるようにした。また、装置脇にガイド機構を設けた。

実際にモックアップを使って試験を行った。

- スムーズに遠隔吊り上げ、吊り下げを行えた。
- バランス機構を使用したとき、ツイストロック全体が傾き、スミ金具の端にぶつかり、楕円穴に入っていないということが分かった。これについては、次節にて詳述する。

2.3 電磁石とメンテナンス

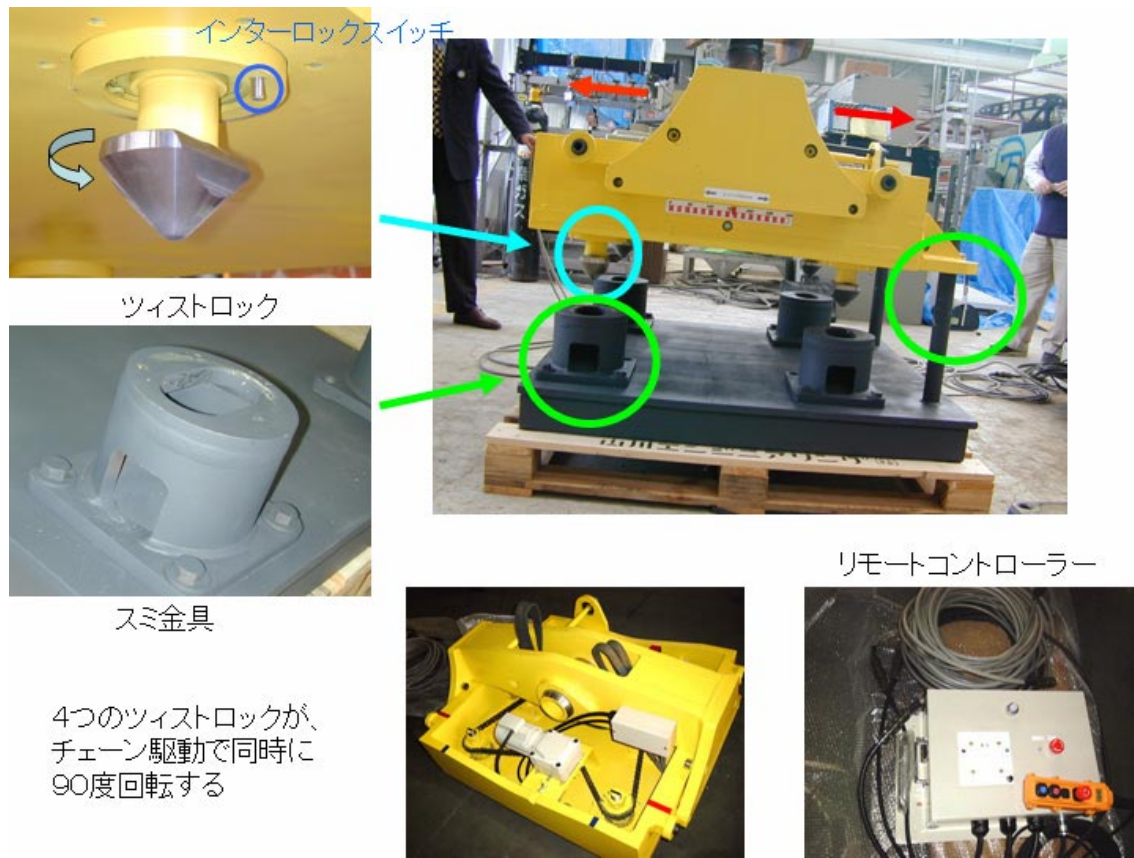


図 5 ツイストロック全体写真

2.3.2.4 冷却水コネクタ開発状況

これまでの様々なコネクタについては、前回の中間報告書[1]を参照してほしい。ここでは、最近開発しているカプラ型、スウェジロック型コネクタについて報告する。

冷却水コネクタの満たすべき仕様は、

- 常用圧 2 MPa
- 口径 2 インチ
- メタルガasket
- クイックディスコネクタ時の漏れ量は、1 回当たり 1 0 0 m l 程度
- 結合、解除時間は 1 回路当たり 3 0 秒程度

冷却水の場合、1つのコネクタに、止水と着脱という2機能を持たせなければならず、それが困難であった。そこで、この2機能を別々の機器に分離して開発を進めることにした。具体的には、

止水機能は、全メタルのボールバルブで行う。

着脱機能は、メタルシールのレバーカプラ型を開発する。またはスウェジロック型コネクタを使用する。

というアイデアである。

1. 止水機能

通常我々が使用しているボールバルブは、構造上テフロンのがasketを何枚も使用しており、それを全て無機材質に置き換えるというのは、大変困難なことである。しかし、最近、高温流体、粘性流体などの配管に使用されるボールバルブが、全て無機材質のシールを用いており、市販品を見つけることができた。3社の高温用ボールバルブについて分解を行った。その中で、1社については、ボールにグリースが大量に塗られており、グリースにより止水するタイプであったので、純水の汚れ、グリースなしの場合の止水に懸念があり使用を中止した。他の2社のボールバルブについては、パッキン部のテフロンの代わりに、メタルシート、グラファイトシート、石綿シートを用い、完全無機であることを確認した。図8左下のボールバルブについて、通水、2MPa 封じ込めテスト、ウォーターハンマーテストなどを行い、使用可能であることを確認した。また、パッキンが固いメタルやグラファイトになるため、止水のときの操作性に懸念があったが、図8左下に見えるロングツールにより、簡単に開閉することができた。現在、K2K ビームラインの電磁石に使用し、耐久テストを行っている。

2. コネクタ

2-1. メタルシールカプラ型

日東工器のカプラに代表されるコネクタが知られている。市販されているものは、シール部がゴムの O-リングである。これをメタルシールに交換することを考えた。メタルシールは、市販品で、直径2インチ、締め付け力が小さい中空 O-リング、C-リング、E-リングを候補に選んだ。試作品を図6に示す。肉厚、銀メッキありなし、カプラーのレバー数などを変え、窒素と水とでリーク開始圧力の測定結果を表1にまとめた。

2.3 電磁石とメンテナンス

表 1 中空 O-リング、C-リング、E-リングに対するリークテスト結果

	肉厚 [mm]	高さ [mm]	締付力 [kN/m]	つぶし 量[mm]	材質	銀 被 覆	レバ ー数	窒素リーク 開始圧力 [MPa]	水リーク開始 圧力[MPa]
中空 O リ ン グ	0.15	2.4	20	0.4	SUS 321		2	1.2	-
	0.15	2.4	20	0.4		○	2	2.0	-
	0.25	2.4	65	0.4			2	2.8	-
	0.25	2.4	65	0.4		○	2	3.0 以上	3.0 以上
	0.25	2.4	65	0.4		○	4	3.0 以上	3.0 以上
	0.35	2.4	130	0.4			2	4.0 以上	-
C リ ン グ	0.25	2.4		0.4	イン コネ ル X750		2	3.0 (少量)	3.0 (少量)
	0.25	2.4		0.4		○	2	3.0 以上	3.0 以上
	0.25	2.4		0.4			4	3.0 (少量)	3.0 以上
	0.25	2.4		0.4		○	4	3.0 以上	3.0 以上
E リ ン グ		2.6	20-30	0.4	イン コネ ル 718		4	0.6	2.0 (少量)
	-	2.6	20-30	0.4		○	4	3.0 以上	3.0 以上

ゴムシールをメタルシールにするときの改良点を以下に列挙する。

- レバー 2 本だと、メタルシール全体がシールされず、漏れが確認された。そこでレバーを 4 本に増やすことで、漏れはなくなった。
- 締め付け力が大きいので、短いレバーでは締まらず、長いレバーを設けることとした。ただ、レバーが長いと広いスペースが必要になるので、図 6 のようにレバーを取り外し可能にした。
- メタルシールを交換するときに、見やすいように左側の雄にシールを装着し、右側雌のコネクタを被せる形にした。これは雌コネクタに複雑な調整機構がついているので、壊れたときに交換可能にしておけるというメリットもある。

表 1 で分かる通り、窒素・冷却水の静圧 3.0MPa に耐えられるものは、線径 2.4 銀メッキありの O リング、銀メッキありの C リング、銀メッキありの E リングであるということが分かった。これらを用いて、実際の電磁石に冷却水コネクタを実装し、テストを行った。



図 6 カプラー型冷却水コネクタ

2-2. 冷却水コネクタの実装

スイッチヤードのような横からアクセスする場合のコネクタ配置を考えた。軽微な水漏れの修理を簡便に行うため、マニホールドは、通路側に縦に配置する。磁石側のボールバルブをなくす。バルブを差圧スイッチより磁石側に置いてはならない。冷却水コネクタは縦に抜く構造である。以上のことを踏まえると、図 7 左図のような複雑な経路となる。図 7 右図は、冷却水コネクタを外し、磁石を 20 cm 持ち上げた図である。これを実際にモックアップ電磁石に装着し、テストを行った。実際には、図 7 の計画図の通り（排水トラップタイプ）のものと、図 8 で、コネクタを 1 つ減らし、象の鼻のような形の冷却水コネクタを試作した。それぞれの特徴は同図にコメントしてある。このタイプについて、1. で述べた 3 種類のメタルシールを装着し、水圧テスト（動圧）、ウォーターハンマー、通電テスト（熱サイクル）試験を行った。

2.3 電磁石とメンテナンス

- Cリングは、動圧でのテストで水漏れを起こし、また、現場において、静圧でのテストを行っても、3MPaの耐水圧を再現できなかった。
- Oリングは、1.7MPaの通水試験、20回以上のウォーターハンマーテストでも問題はなかった。しかし、3500Aの通電を行い、冷却水出水温度64度を越える熱をかけた後、水漏れを起こすようになった。Oリングはバネ定数が小さいので、カプラ本体とOリングとの熱膨張の違いにより、水を止めている部分が、100ミクロン程度の間隙が空いてしまい、Oリングがその動きに追従できなかったのではないかと考えられる。Oリングでの解決方法としては、線径を太くし、熱膨張の力以上の締め付けを行うことが考えられ、現在線径3.2mmのOリングを手配し、それに伴い、カプラ本体の強度を強化する設計を行っている。
- Eリングは、1.7MPaの通水試験、100回以上のウォーターハンマーテストでも問題はなかった。また、厳しい熱サイクル試験として、3500Aの通電+ウォーターハンマー10回を、5セット行っても水漏れを起こしていない。今後は、これについて、K2Kビームラインにこの冷却水コネクタをインストールし、耐久テストを行う予定としている。

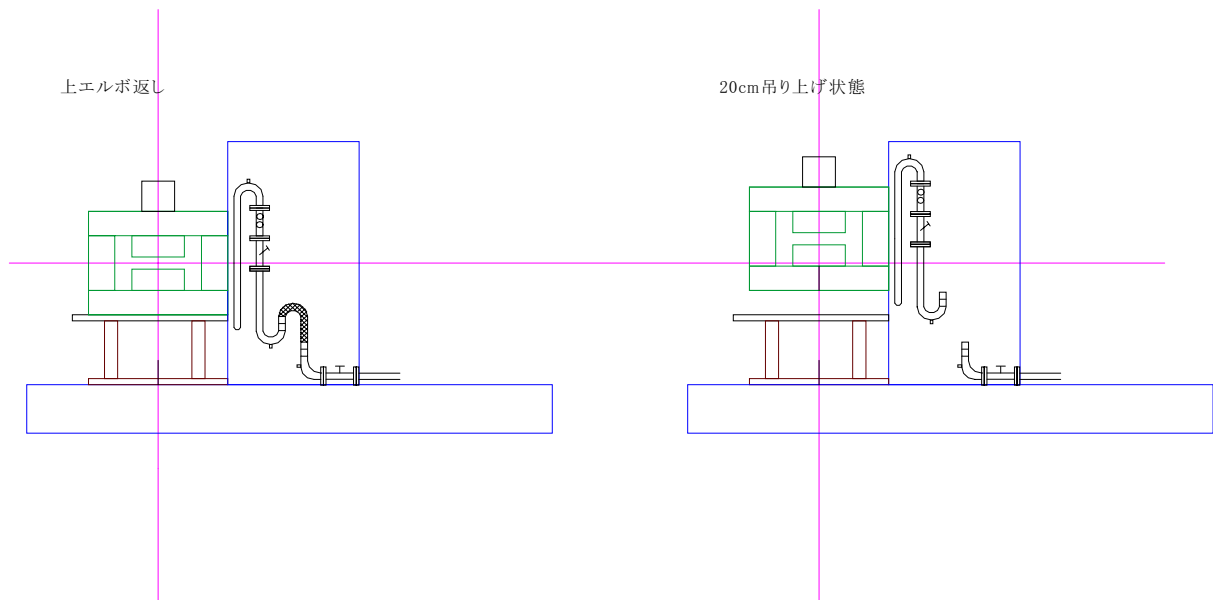


図 7 冷却水コネクタ装着イメージ

- 排水トラップタイプ
 - － 長所:コネクタが壊れても交換可能
 - － 短所:経路が複雑、スペースを取る、コネクタは2つ、磁石側のコネクタの操作性が悪い
- 象の鼻タイプ
 - － 長所:コンパクト、コネクタは1つ
 - － 短所:コネクタが壊れたら交換不可能、フレキシブルのスペースが必要
- 1.7MPaにて通水:異常なし
- K2Kビームラインにて連続運転を予定している



止水:キッツ オール
メタルボールバルブ



図 8 冷却水コネクタモックアップ装着写真

2-3. スウェジロック型コネクタ

コネクタのもう一つの候補として、2 インチスウェジロックがあげられる。スウェジロックはフロントフェルール、バックフェルール、ナットにより構成され、フェルールの面当たりで止水している。(図 9 左上) これから分かる通り、スウェジロックは完全無機のコネクタであり、何ら開発せずとも耐放射線コネクタである。また市販されているため、品質管理されており、低価格である。通常このスウェジロックを締める作業はナットを回転させ、止まったところで、レンチなどを用い、180度回転させる。ただ、図 9 左下で分かる通り、2 インチともなると、レンチでフェルールを加締めるということは不可能である。そこで、同社で市販されている、油圧の予備加締め機を用い、予め、ある程度フェルールをチューブに圧着する必要がある。図 9 右上にこの予備加締めの様子を示す。これにより、レンチで180度回転させること（本加締めと呼ぶことにする）が可能となる。しかし結局のところ、図 9 右下のように、本加締めをするには大変力が要り、1.3 mのレンチを使う必要があった。

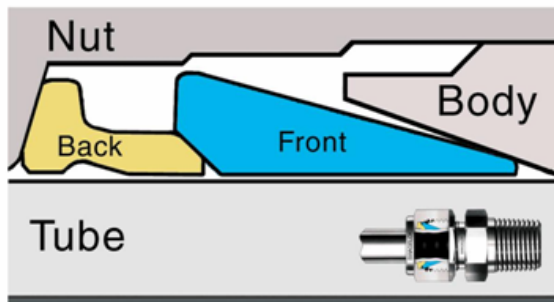
2.3 電磁石とメンテナンス

考察

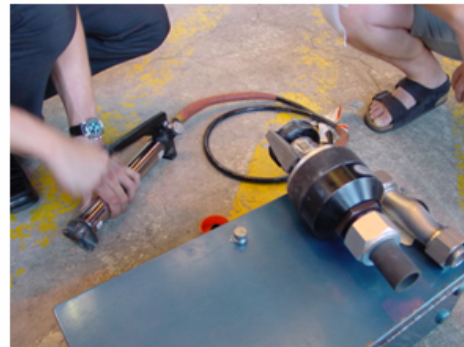
長所：完全無機なので開発要素がない。品質管理がされている。低価格。

短所：1. 3 m レンチの回転半径分スペースが必要。着脱に時間がかかる。着脱に力が必要。

今後は、電動もしくは油圧のオープンレンチの工具を開発することが必要である。



スウェジロックの原理



油圧予備加締め機



2インチスウェジロック



本加締め

図9 スウェジロック加締め

2.3.2 ハドロン実験施設メンテナンス

2.3.2.1 概要

ハドロン実験施設のメンテナンスシナリオに関しては、ほとんどを前回の中間報告書[1]に記述しており、また、モックアップを用いてのアライメントに関して報告済みなので割愛し、その後の進展を報告する。前回中間報告書で述べた第一次モックアップは終了し、より現実に近い高さのモックアップを建設した。シールド構造は、図 1 のようになっている。モックアップの電磁石は、8D240 電磁石を用いた。主なスペックは表 1 の通りである。前回の中間報告書にあるような電磁石とシールド一体型では、クレーンの最大荷重を越えてしまうので、この 8D240 電磁石を用いて、端末からマニフォールドの部分のみシールド一体型の電磁石を製作した。

この新しいモックアップでの進捗について、アライメントの基準となる敷板、電磁石マニフォールドをサービススペースまで立ち上げる方法、及びビームライン室からサービススペースまでのシールド積載の方法について進捗状況を報告する。

表 1 8D240 電磁石の主なスペック

Gap[mm]	100
Gap 幅[mm]	410
長さ[mm]	2000
定格[A,V]	1900A,100V
外形[mm]	1220×680×2000
ホロコン断面[mm]	16×16-φ10
水路数[本]	行き帰り 20 本
総重量[トン]	約 20 トン

2.3 電磁石とメンテナンス

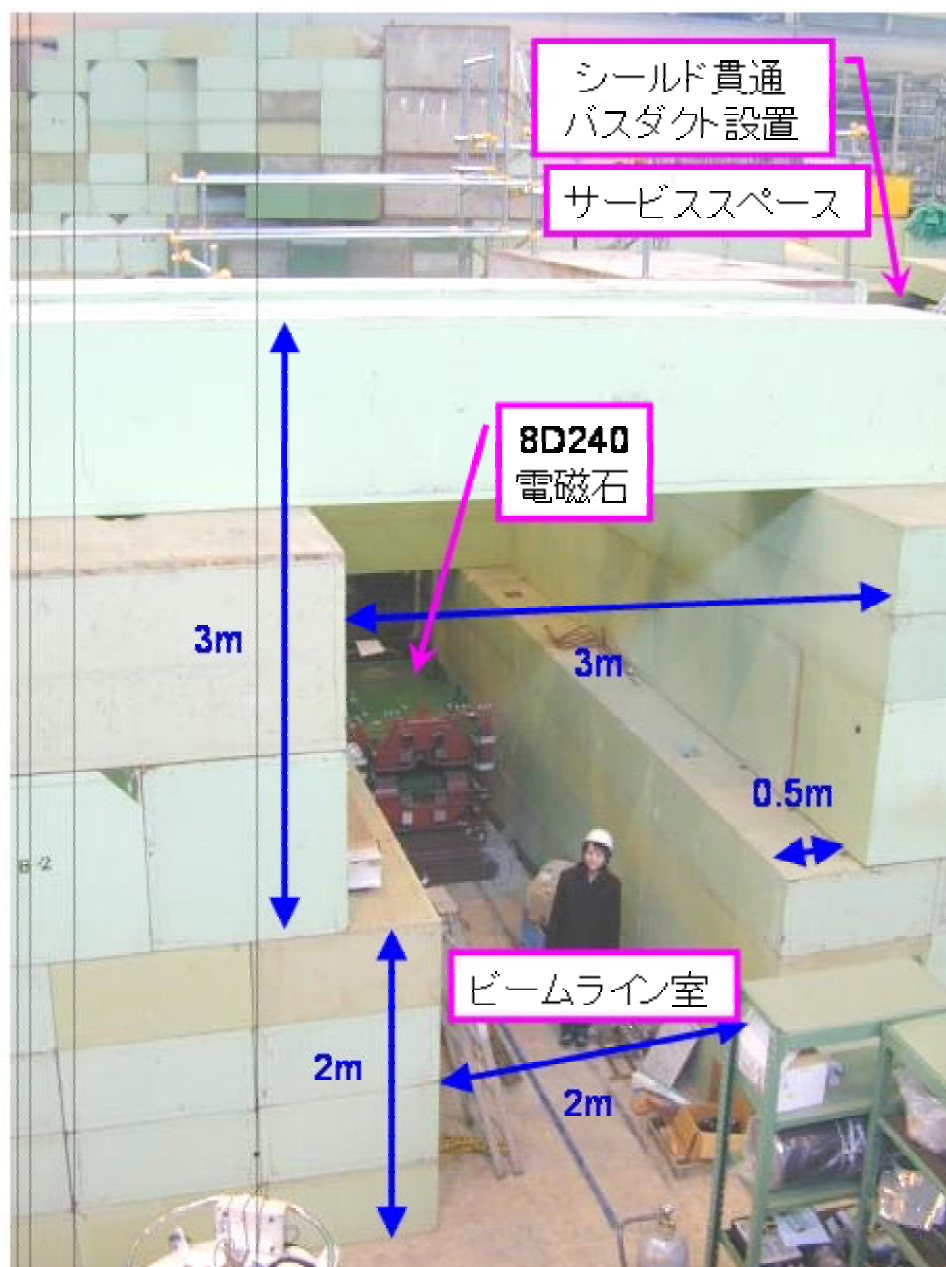


図 1 新しく建設したモックアップのシールド構造

2.3.2.2 敷板

ハドロン実験施設においては、将来の要請により、電磁石配置や大きさが当初と異なってくる可能性がある。また、最下部に空調のためのトレンチがある。そこで、機器のアライメントの基準として、敷板を用いた設置を採用した。500mm 置きにピボットがついている鉄板を、ビームラインに敷きつめ、このピボットを基準として、機器を置いていくという方法である。この敷板を、表 2 に示す 3 種類について試作し、モックアップにおいて実際に電磁石を設置した。図 2 に示す。ハドロン実験施設における最終的な枚数とハンドリングするための重量を考えると、ピボット数 4 の板が現実的と思われる。

表 2 敷板のピボット数に対する大きさと重量

ピボット数[個]	ビーム方向長さ[mm]	重量[kg]
2	900	755
3	1400	1170
4	1900	1585



図 2 敷板設置写真

2.3 電磁石とメンテナンス

2.3.2.3 電磁石延長タワー（チムニー）

電磁石のマニフォールドは、サービススペースに置かれるので、ビームライン室の電磁石から、水路数分のホローコンダクター（ホロコン）あるいは MIC (Mineral Insulation Cable) を、3.5 m 上に立ち上げる必要がある。このサービススペースまで延長する配管の集まりを煙突に見立て、チムニーと呼ぶことにする。行き帰り最大 40 本分の水路数を考えると、配置が難しく費用も高くなる。そこで、電力は行き帰りの 2 本のホロコンあるいは MIC により供給し、その他の水路については銅配管のみで延長することにした。ホロコン・銅配管のロー付け、MIC の内部導体とシースの絶縁はビームライン室の中に置く。

冷却水と銅配管とのセラミック絶縁部は、水漏れの恐れがあるので、サービススペースに置く。チムニーは、銅配管の絶縁を確保しつつ、3 m 部分をコンクリートなどで遮蔽する必要がある。仕様は後に述べる電力貫通バスダクトとほぼ同じである。ただし電力貫通バスダクトはサービススペースから一般区域に通じるが、チムニーの場合はビームライン室からサービススペースなので、遮蔽上は電力貫通バスダクトより制限がゆるい。長さは 3.5 m 程度で比較的短い、行き帰り 40 本程度の配管なので絶縁する部分の体積が大きいのが難点である。

チムニー内部銅配管の仕様

最大電流：3500A

最大電圧：200V

最大長さ：3.5m

絶縁材：完全無機

絶縁：水浸で絶縁抵抗 2000MΩ 以上

空隙：なしが望ましいが、1 mm 以内も許される

クランク：ありが望ましい。

以下に述べる二つの方法について検討している。

○碁子ブロックによる絶縁

銅配管の周りだけを碁子のブロックで埋めるという方法である。値段との兼ね合いもあり、碁子の適当な大きさは、50×50×200mm 程度である。銅配管部の周りだけを覆うとしても、体積 200×1200×3000mm となるので、碁子ブロックの数は、1440 個となる。図 3 と図 4 に、碁子ブロックを木材で代用し実際に製作したチムニーを示す。碁子の固定は工夫次第でもう少しは楽になるだろうが、結局手作業となるため途方もない時間と労力がかかる。また、碁子を焼くときの型にコストがかかっており何種類も型を作ると費用がかかるので、ブロックの形を統一しなければならない。磁石によって銅配管の経路が違ってくるので、少なくとも 3, 4 種類の型を用意しなければならないであろう。



図 3 碍子絶縁のチムニー拡大写真

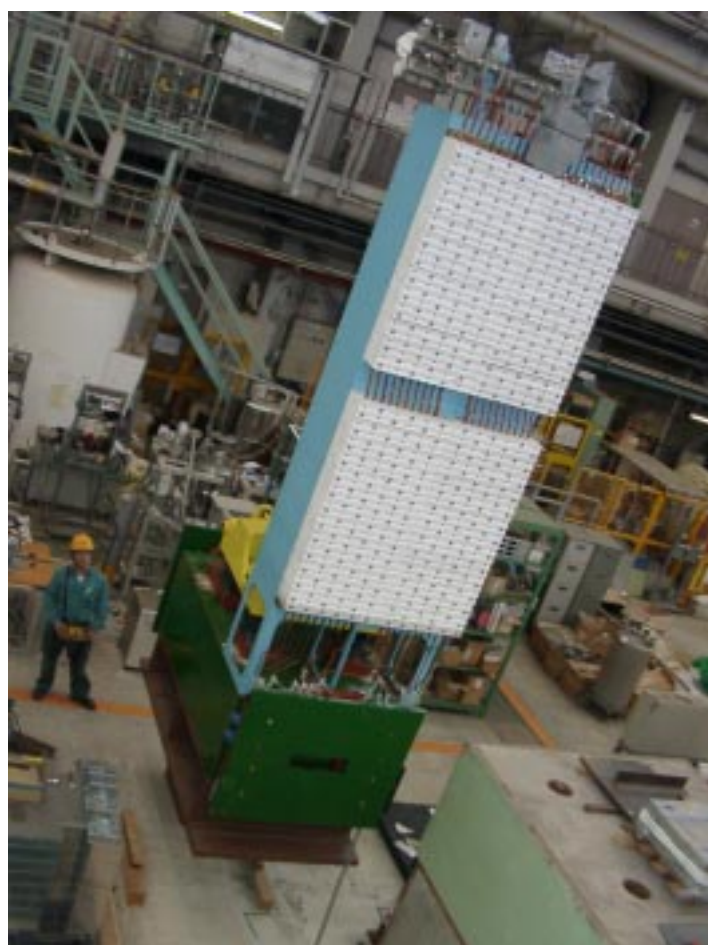


図 4 碍子絶縁のチムニー全体写真

2.3 電磁石とメンテナンス

○溶射による絶縁+コンクリート

冷却水配管にアルミナ溶射シリカ封孔処理を施した上でチムニー箱に配管を配列し、中にコンクリートを流し込む方法である。図 5 にイメージ図を示す。2.5 節の電力貫通バスダクトで詳述するが、このアルミナ溶射シリカ封孔処理のサンプルテストでは銅配管の周りに厚み 0.5mm 程度溶射すれば、水浸させても 2000M Ω 以上の絶縁性能があることが確認されている。ただし、コンクリートのアルカリに弱いため、このままコンクリートに埋めることはできない。そこでアルカリから守るために、コンクリートが覆われる部分に市販のステンレスチューブをかぶせることにした。銅配管に、0.5mm の溶射をし、その後銅配管の外径+2mm の内径のステンレス管を通す。チムニーの形の鉄箱（これでチムニーの強度も持たせる）を作り、溶射しステンレス管を通した銅配管を水路の分だけ配置し、コンクリートを流し込む。溶射した銅配管と被覆ステンレス管との隙間は、水路一本に対し 1mm となるので遮蔽上も許される範囲であると考えられる。この方法を採用すれば労力と時間の短縮、配管経路の制約がなくなるなどのメリットがある。溶射銅配管を製作しモックアップに取り付け、テストを行う予定である。

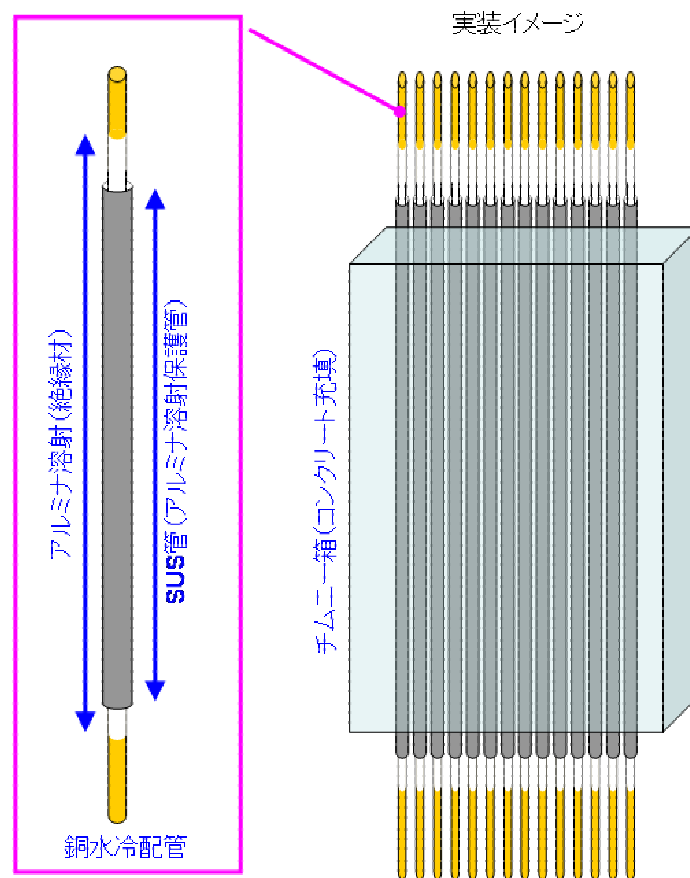


図 5 溶射絶縁のチムニーイメージ図

次にチムニーの鉄箱について説明する。大きい電磁石の場合、重量がクレーンの最大荷重に近いため、チムニーの重量は極力減らす努力をし、3 m上に延長して壊れないようにチムニーに剛性を持たせる必要がある。図7のように、また表3や図6のE型のような寸法のチムニーを試作し、クレーンでの吊り上げに成功した。次に、このE型を基準とし、チムニーの重量が碍子 or コンクリート充填分2.1トンを含め3トン程度ということに注意し、表に示す形に対してほぼ同じ強度の大きさとその重量を表3に示した。T型、中実長方形については、強度を増やすためには鉄の厚さを増やさなければならず、重量オーバーであった。また、T型はツイストロックでの吊り上げが不可能となる。E型については強度がC型と変わらないので、周りのシールドの積み方を考えるとC型の方が有利である。次節で述べるシールドとの兼ね合いもあり、また前に述べたように溶射絶縁のチムニーを作ることを考えても口型またはC型を採用することを検討している。

表 3 チムニーの形の検討：E型と同じ剛性を持たせたときのチムニー箱寸法と鉄の重量

	ビーム方向長さ[mm]	厚み[mm]	鉄の重量[ton]
E 型	500	12	1
T 型	1200	24	1.8
中実長方形	40(+チムニー分 200)	40	1.5
H 型 C 型	500	12	0.8
口型	300	12	1.1

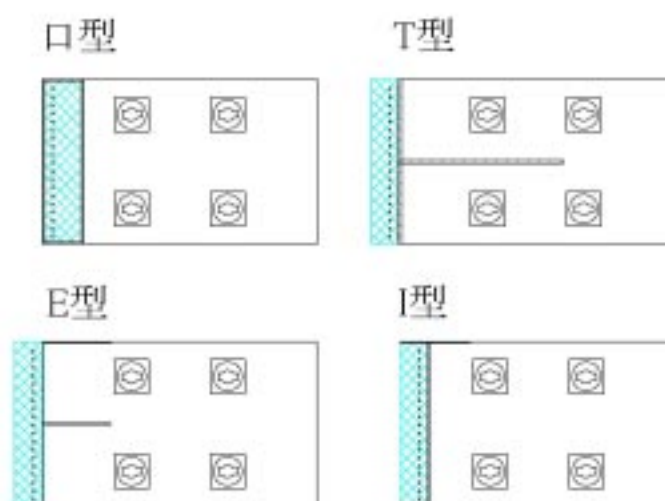


図 6 チムニーの型模式図(水色ハッチがコンクリート充填部を表す)

2.3 電磁石とメンテナンス

2.3.2.4 ツイストロックを用いたチムニー付き磁石の吊り上げ試験

E 型のチムニーをつけた後、前節で述べた 40 トン仕様のツイストロックを用いて荷重が偏っている磁石の吊り上げ試験、およびツイストロックのリフティングポイントを移動する機構を用いた吊り上げ試験を行った。(図 7) チムニーの重量が 1 トン程度だとすると、重心は磁極中心よりチムニー側に 5 c m ほど寄ったところにある。まず始めに重心ポイントを磁石中心に置いて吊り上げを行ったところ、ピボットがひっかかって抜けず、吊り上げ出来なかった。そこでリフティングポイントをチムニー側に 5 c m 移動して吊り上げると成功した。しかしリフティングポイントを移動した場合、ツイストロックピンが抜けなくなってしまった。この原因としては、リフティングポイントを移動させるとツイストロック自体が傾き、スミ金具の楕円穴にピンが入らなかったと考えられる。この傾いた場合のツイストロックピンと、スミ金具の位置関係を図 8 に示す。そこで図 9 のように、スミ金具の長穴方向に穴をのぼし、加えてチムニー側は下に掘り下げた。以上の改造を施したことで、チムニー付き磁石の吊り上げ試験に成功した。今後は主にシールド用、比較的軽い電磁石用の 2 点吊り、モニターなど小さい機器用の 1 点吊りを試作していく予定である。



図 7 E 型チムニー付き磁石の吊り上げ試験

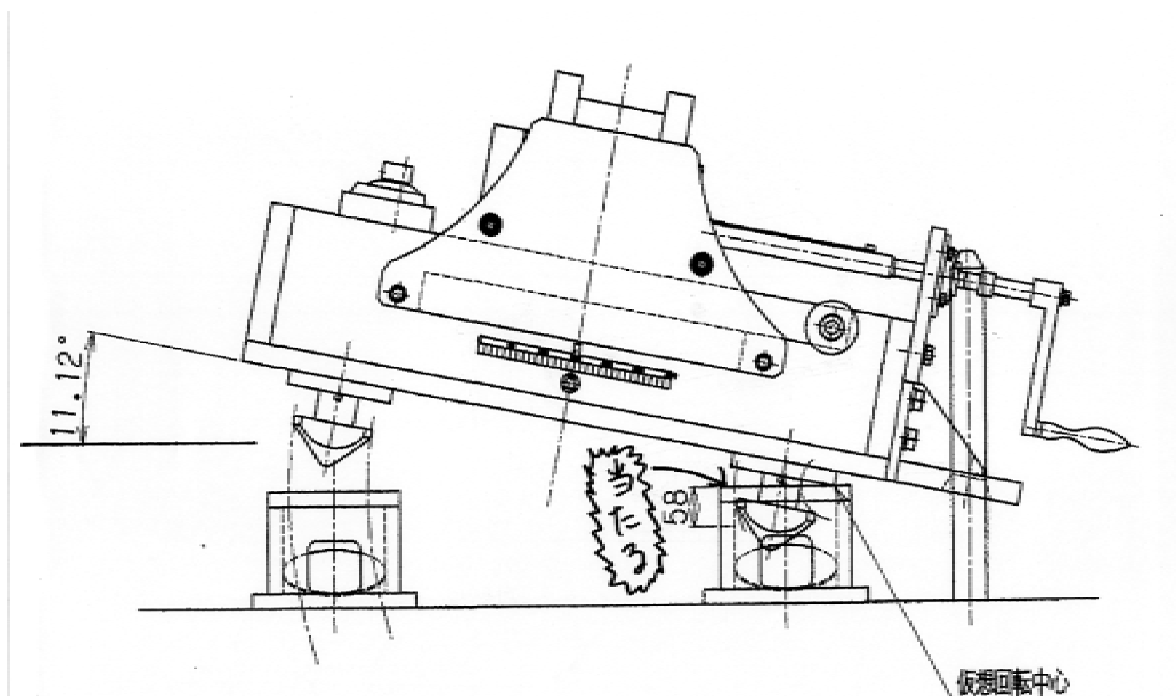


図 8 傾いたツイストロックとスミ金具との位置関係



図 8 スミ金具改造後

2.3 電磁石とメンテナンス

2.3.2.5 シールド積載

ビームライン室の上部のシールドは電磁石、ラジアルシール、モニター等の端末を避けつつ、隙間無く埋めなければならない。磁石のチムニー部分の両側などを埋めるためにビームライン室に積載シールドを積むための支持機構が必要であり、チムニー部の形が単純な長方形に制限されるなどの問題があった。そこでビーム方向長さ1 m×幅3 m×厚さ20 cmの鉄をビームライン室天井に敷きつめるという方法を検討している。これをフロア鉄と呼ぶことにする。そのイメージ図を図10に示す。表4に2 mの鉄+1 mコンクリートシールドを等分布荷重で積載したとき、両端単純支持での中心での板のたわみの計算結果とその重量を示す。この程度の重さであれば、クレーンを使わず後付けのマグネットリフティングで吊り上げることが可能である。また、20 cm程度ならば市販の溶断機である程度自由な形に切ることができるため、チムニー等の機器の付属物を避けるように切り取ることが容易である。(例えば図10右上の鉄の絵)一旦ビームライン室の天井にこのような鉄20 cmのフロアが出来上がれば、その上に工作精度の悪いデュラテックの鉄でも積むことができる。またこの方法だとシールドを除去する際に最後の一枚があるので、ビームライン室を直接見ずに済むという利点もある。今後はマグネットリフティングの安全性・位置再現性・小型磁性体への影響等を調査し、着脱の確実なものを採用する。また、溶断機で切れる厚み、精度、取り扱いなどの調査を行っていく予定である。

表 4 フロア鉄の大きさと上部にシールドを積載したときの中心でのたわみ

鉄板の大きさ (長さ×幅×厚み) [m]	中心でのたわみ[mm]	重量[ton]
1×3×0.2	0.03	4.7
1×3×0.4	0.004	9.4
2×3×0.2	0.3	9.4
2×3×0.4	0.04	18.8
3×3×0.2	0.8	14.1

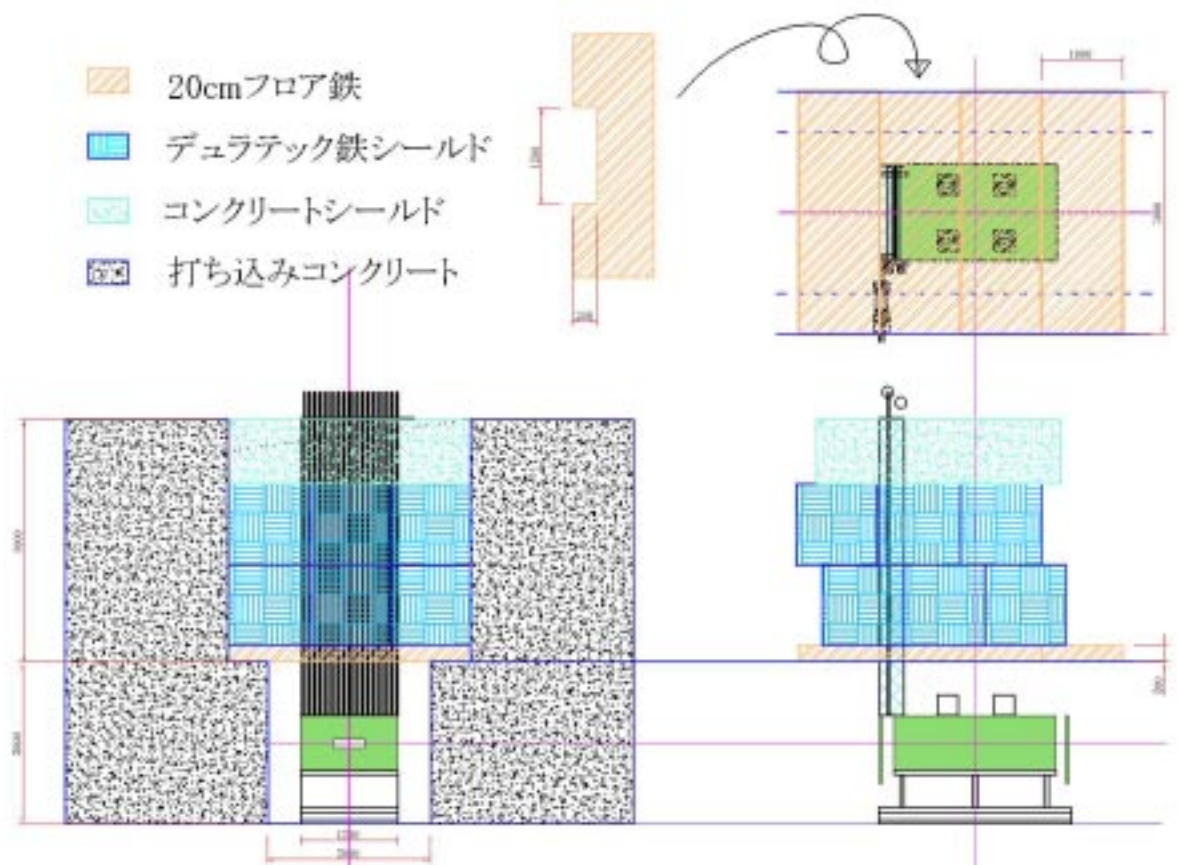


図 10 シールド積載イメージ図

2.3 電磁石とメンテナンス

2.4 気密構造

第1種管理区域である一次ビームライン室内の空気は加速器運転中放射化するため、外部環境への放出を防ぐ必要がある。そのため同室の空調は加速器運転中循環運転を行い、運転停止後放射化した空気が入室可能なレベルになるまで室内空気を閉じ込める必要がある。これを担保するため一次ビームライン室と接続する開口部から一次ビームライン室内の放射化した空気を漏らさないという意味の気密化を行う。

ハドロンビームラインで気密が必要な部分は、スイッチヤードでは第1機械棟、50 GeVリングとの隔壁、搬入棟、電源棟の各サブトンネルおよびGPS用貫通口であり、ハドロン実験施設では第2機械棟、サービススペース、ビームダンプ、非常口、および将来拡張予定のBライン、Cライン用開口部である。50 GeVリングとの隔壁は、この壁により隔てられる空間がどちらも第1種管理区域であるので厳密な気密は必要ない。ただし天井クレーンの走行に伴い隔壁を開放できる構造とする必要もあるので空気の移動を大幅に制限するものが必要である。この隔壁の目的は6章の設備関係で述べているように空調範囲を定めること、一時立入時の排気量低減、50 GeVリング単独運転またはニュートリノビームラインの運転時に50 GeVリング側からハドロン実験施設への放射化空気の流入を制限することにある。このため隔てられる空間の空調を連携制御して温度、圧力の差を利用することが効果的であると考えられる。

構造は比較的大面積の隔壁の閉鎖と開放が必要であり、かつ短時間にその作業が完了する必要があるので、ある程度分割した構造とし必要な範囲のみを作業に応じて開放するようにすることが考えられる。具体化はこれからの作業となるが一つの案として図1のようにクレーンのレールを利用した走行梁が出されている。走行梁に気密のための機構を装備し定位置で気密機構を拡張することでレール部分を含むトンネル上部のほとんどをカバーすることが可能になる。電力はクレーン用トロリから供給でき操作も専用ペンダントが使用できる。

搬入棟のサブトンネルは搬入棟地下に設けるセミエアタイトドアおよび地上部搬入口のシールドブロック部分の隙間を塞ぐ事、及び人員の通行径路にあたる汚染検査室内を常時排気することにより気密を確保する。排出空気は機械室に導かれプレフィルター、HEPAフィルターを経由し排気される。

2.4 気密構造

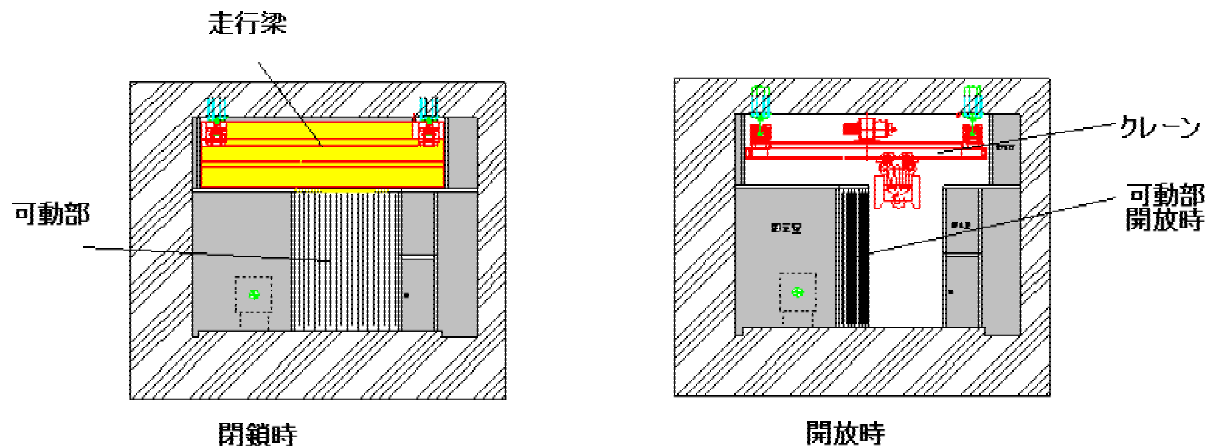


図1 50GeV リングとの隔壁となるトンネル内走行梁

電源棟のサブトンネルは主に電磁石電源用電力ケーブルの経路として使用するが、この部分の気密は二重ドアを設け、その区域内の空気を常時排気することにより行う。ただしこの閉じた空間も電力ケーブルからの発熱を除熱しなければならないので専用の空調を設ける。また、電力ケーブルが隔壁部分を貫通する部分で気密構造を保つために考慮が必要であり、その構造は以下のことを条件とする。

1. 多数の本数のケーブルをトンネル内に引き込む際に工事の能率を低下させない
2. 強度がケーブルを支えるに十分な強度であること、またトンネル内と外部の気圧差に耐える
3. ケーブルの通線作業終了後に、容易に隔壁部分で気密を得られる構造、作業内容である
4. ケーブルの放熱を妨げない構造、材質

以上を考慮し、図2のような横一列に並ぶケーブルを上下から挟むアルミ製の板（AとB）を使用すべく検討中である。図に示すようにアルミ板（ブロック）には、ケーブルを挟んだ時にケーブルの周りに、気密を得るために充填するパテが圧入し易い構造、テーパ状の穴になっている。このアルミ板でケーブルを挟み、気密隔壁の枠にアルミ板を固定する。その後に、このテーパ状の穴（C）にパテを圧入する。反対側からパテが均等に押し出された時をもって圧入の完了とする。パテの圧入は木槌などで容易に行える。アルミ板と気密壁の枠の部分の気密を得るために、その部分はゴム系の接着材を塗布する。実際の施工前に模型により気密の評価を行う予定で現在準備中である。

G P S用貫通口は数ヶ所設けられるが、使用頻度は年に2回程度で比較的少ないのでフランジ等を用いた密閉構造とし排気はしない。

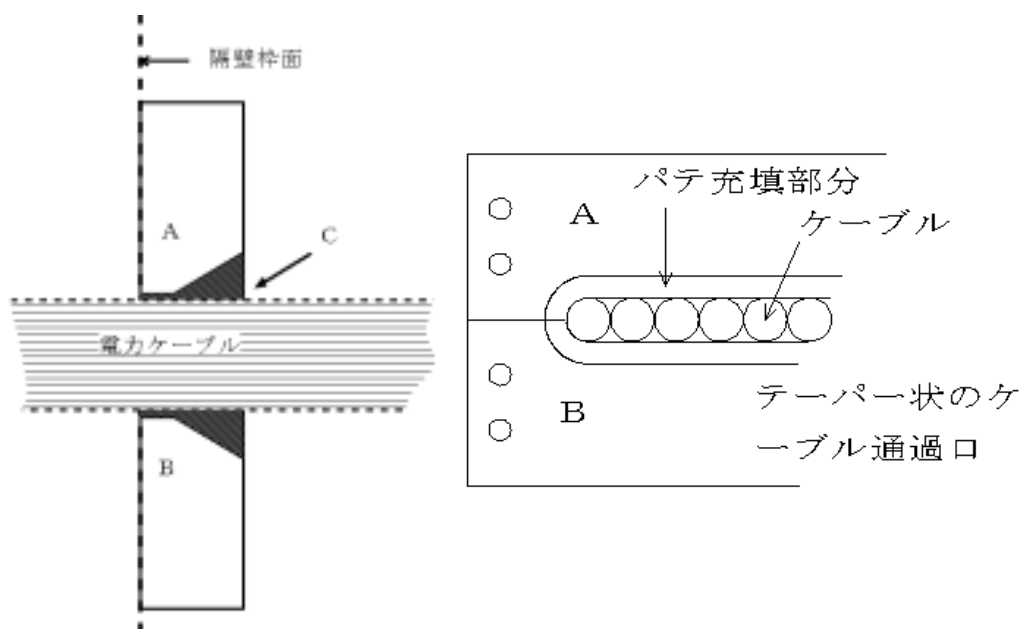


図2 電源用ケーブル気密構造

サービススペースはシールドブロックにより閉鎖される空間になるが、内部の環境は通常ハドロン実験施設室内より温度、圧力ともに高くなる。そのためシールドブロックの隙間を全てふさぐことが求められる。また、運転停止時に開放する可能性もあるので、容易にそのシールを取り除く必要もあり、その両立を図ることが求められる。今までにゴム等のシート状のもので被う方法や下層を何らかの方法でシールし、上層をシートで被い中間を二重ドアと同様に排気する等の案があるが、接着が必要であり、かつ価格も割高になり採用には至らなかった。現在はコンクリート面または塗装面に対して安定したシールと容易な剥離を可能とするべくコーキングとテープの両方で最適なものを探している。

ビームダンプについてはサービススペースと同等の気密が求められるが開放の頻度は少ないと予想されるのでコーキングによりシールドブロックの隙間を塞ぎ気密を確保する。多層のシールドブロックの隙間をシールするが、温度差による結露や雨水の浸入に対しても安定した気密を確保する必要がある。また、将来中間部分の排気が必要になっても対応可能な構造としておく。

非常口用サブトンネルの気密は二重ドアを設け、その区域内的の空気を常時排気することにより行う。熱源はないので独立した空調は設けない。排出空気は機械室に導かれプレフィルター、HEPA フィルターを経由し排気される。

Bライン、Cライン用開口部は防火区画壁によりスイッチヤードとハドロン実験施設側の空間が隔てられる。気密はこの壁により確保される。

第1、第2機械室は一次ビームライン室用の空調と別系統の給排気設備を保守の期間以外は常時運転することにより気密を確保する。

2.4 気密構造

2.5 電力貫通バスダクト

2.5.1 電力貫通バスダクトの概要と仕様

ハドロン実験施設において、電磁石の電力は十分に絶縁された水冷バスダクトを用いた貫通機構により、打ち込み遮蔽体を貫通してサービススペース内に供給するという方法が採用されている。

仕様

- ・ 最大電流：直流 3500A
- ・ 最大電圧：200V
- ・ 完全無機
- ・ 水冷…オーム発熱によりコンクリートに熱がたまっていくのを防ぐため
- ・ 絶縁性能
 - 水浸状態で 2000M Ω 以上
 - コンクリートの pH11 から 12 程度のアルカリ溶液に浸した状態で、2000M Ω 以上
- ・ 長さ：最大 8 m
- ・ コンクリートとの空隙なし
- ・ クランク構造の検討
- ・ 打ち込みコンクリートに埋め込むため交換不可。もしくはバスダクトを抜き差しできるような構造

2.5.2 有機絶縁（ポリイミド樹脂）

ポリイミド樹脂は電磁石の絶縁体として実績があり、耐放射線性も 10⁸Gy と非常に優れている。また、水浸絶縁抵抗は 2000M Ω 以上である。図 1 のように、コンクリートで固めたサンプルにおいても絶縁抵抗は 2000M Ω 以上である。ホローコンダクター（ホロコン）の状態でも自由に曲げることができるため、放射線ストリーミングの問題も解決できる。また、直接コンクリートに埋めることができるので、空隙を完全になくすることができる。

図 2 のように 50 cm \times 50 cm \times 2 m のシールド貫通バスダクトを試作した。図 2 a) がポリイミド樹脂絶縁の水冷バスダクトである。断面図イメージを同図右側に示す。断面積が大きく、水路の狭いホロコン 13 \times 54- ϕ 8mm を選び、縦に並べて点付けし、陽電極あるいは負電極の内部で水が行って帰ってくるように端末処理をした。その上で、電磁石と同様にポリイミド含浸プリプレグテープを巻き、キュアした。このように細いバー状のバスダクトでは、コンクリートを流し込むときにゆがむためしっかり固定することと、コンクリートから出た絶縁部分は長めにとり縁面放電を防ぐことに注意する。この試作したポリイミド樹脂絶縁のシールド貫通バスダクト試作品を用いて電流 2400A、冷却水の差圧を 1MPa にして通電試験を行った。この際、図 3 に示すように各点での温度を測定した。バスダクトのオーム発熱は約 165W である。グラフから分かるように、バスダクト本体の温度と、ポリイミド表面での温度はほとんど冷却水の温度と同等で、温度上昇は 1 $^{\circ}$ C 程度である。ちなみにこの周期的な変動は冷却水チラーの空冷ファンによるもので、前回の中間報告書[1]の 7.2.4 にある通りである。コンクリートの温度も 2 $^{\circ}$ C 程度の温度上昇であった。

今後は実機の長さである 8 m の時にポリイミド樹脂のバスダクトが製作可能か、また同断面積で 8 m になった場合にオーム発熱は 660W 程度となるがコンクリートの温度上昇は許容範囲か、などを検討していく。

2.5 電力貫通バスダクト



図 1 ポリイミド絶縁サンプルテスト

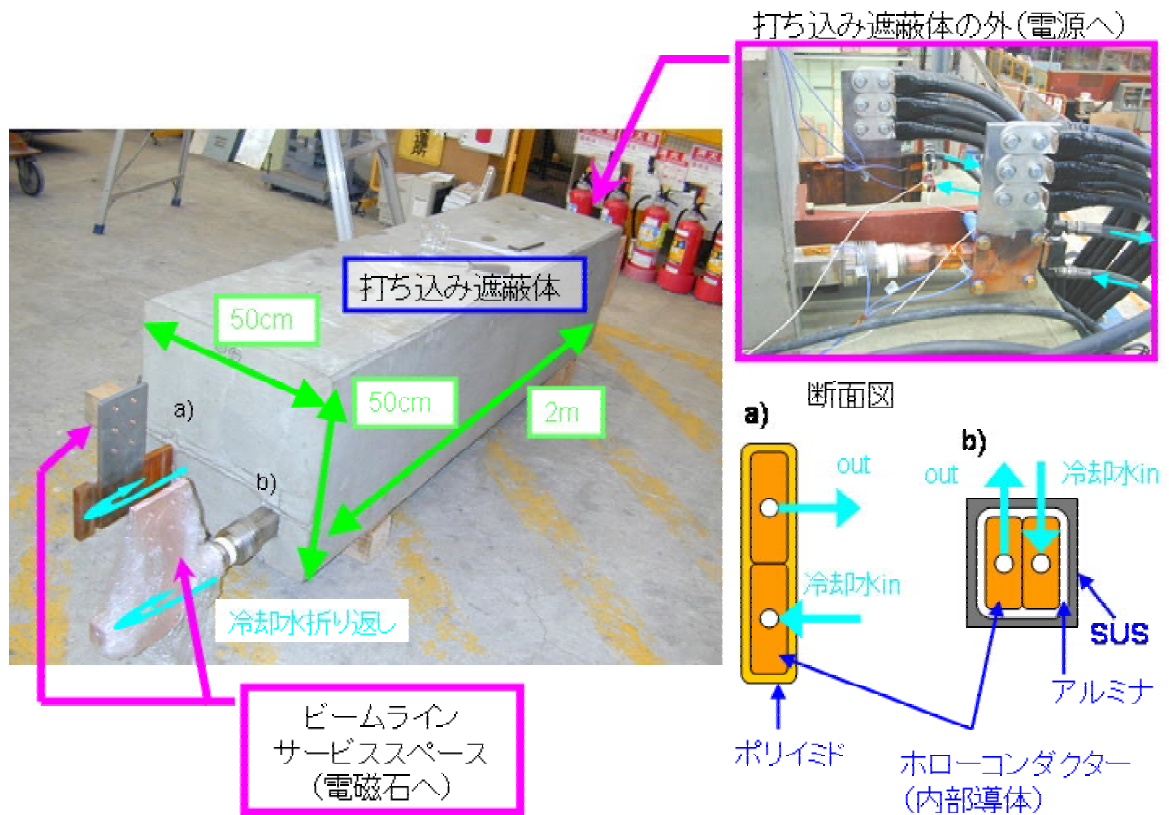


図 2 電力貫通バスダクト試作品---a) : ポリイミド絶縁、b) : 大電流シースタイプ

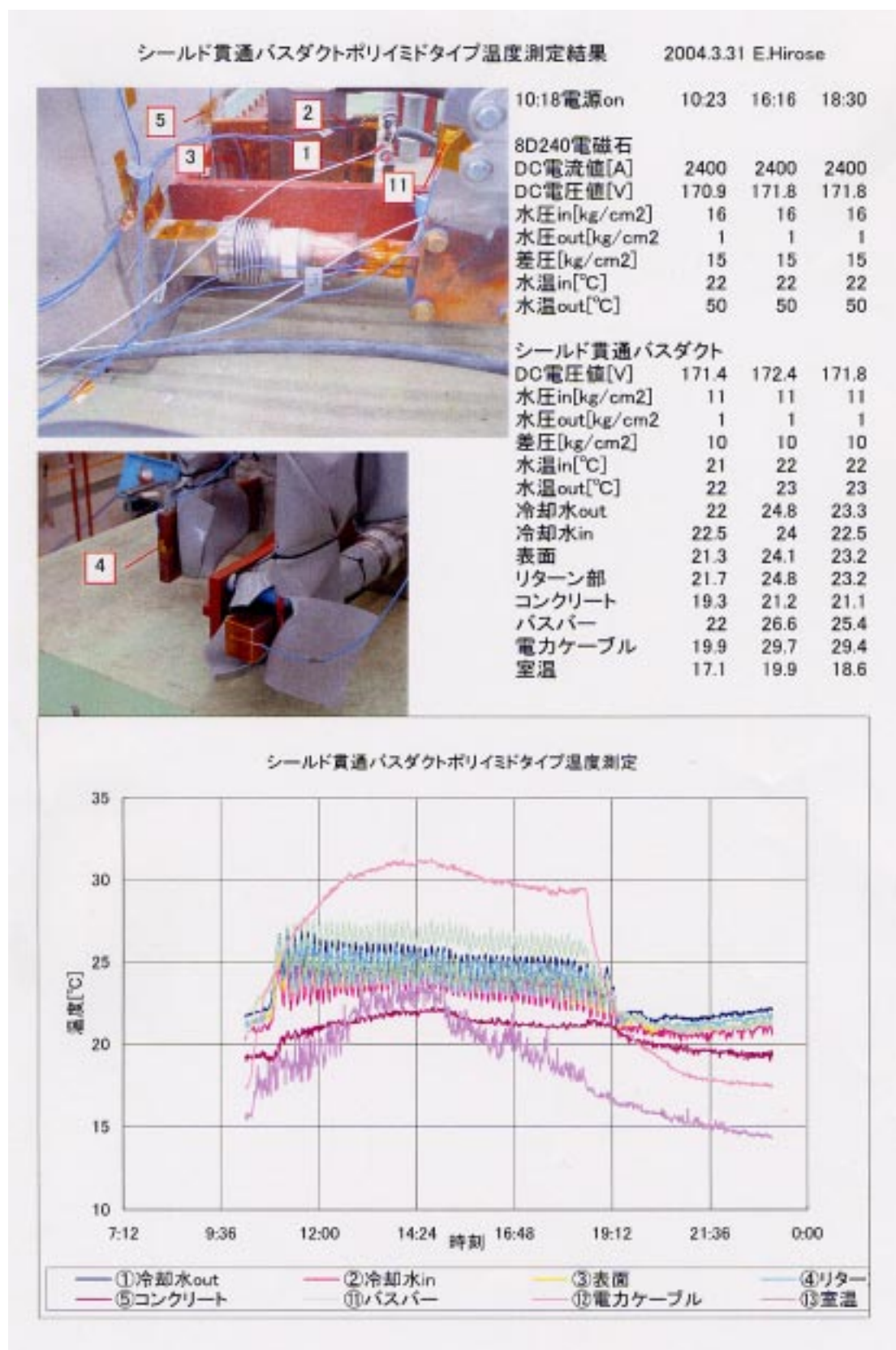


図 3 ポリイミドバスダクト温度測定結果

2.5 電力貫通バスダクト

2.5.3 無機絶縁シースタイプ（大電流ステンレスシースタイプ）

10⁸Gy 以上の放射線にさらされるようなところでは、ポリイミド樹脂であろうと有機絶縁は使えない。しかし、次の節で述べるが無機絶縁材のみで仕様を満たすものは見つからなかった。そこで断面積の大きい MIC のようなものを作ることを考えた。これが図 2 b)に見える大電流ステンレスシースタイプバスダクトである。

このバスダクトの製作方法を述べる。

1. 16×34×t5[mm]のホローコンダクター 2 本にロウ付けを行う。
2. その上に S ガラスにアルミナ接着剤（無機絶縁材）を浸したテープを巻き、キュアする。
3. その上に 1 mm 厚のコの字型ステンレスを向かい合わせに被せ、長さ分溶接し、角パイプとする。図 2 の右側に断面図を示す。
4. 角ステンレスパイプ端末にベローズを溶接する。
5. ベローズに極太セラミック絶縁パイプを溶接する。
6. 絶縁パイプと内部導体をロウ付けし、アルミナ接着剤は、湿度を吸うと絶縁が落ちるため、湿度を追いだし封止する。
7. バスバー、冷却水取り出し口、冷却水リターン部品をロウ付けする。

ベローズを入れた理由について以下に説明する。最初に試作したときに、コンクリートに埋めた後、すぐに地絡していることが分かった。原因を追求すると、端末の極太セラミック絶縁パイプのセラミック部分に亀裂が入り、絶縁材であるアルミナ接着剤が吸湿し絶縁が落ちていた。この亀裂の原因は、外シースの SUS304 と内部導体の熱膨張の差により応力がかかったと考えられる。

表 1 ステンレス鋼（SUS304）と銅の線膨張係数、ヤング率、断面積

	線膨張係数 α [$\times 10^{-6}$]	ヤング率 E [$\times 10^{10}$ Pa]	断面積 A [mm ²]
ステンレス鋼(SUS304)	17.3	19.7	600
銅	16.8	12.98	800

端末のセラミック部にかかる応力は、組み合わせ円筒と考えられ、熱膨張の差により、セラミックパイプは、SUS から λ_s だけ圧縮され、銅から λ_c だけ引っ張られるので、

$$\lambda_s + \lambda_c = -\alpha_s l \Delta t_s + \alpha_c d \Delta t_c$$

また、ステンレスが λ_s だけ圧縮される力 W と、銅が λ_c だけ引っ張られる力 W とは釣り合うことから、

$$\begin{aligned} W &= \sigma_c A_c = (E_c \lambda_c / l) A_c \text{ より } \lambda_c = W / A_c E_c \\ W &= \sigma_s A_s = (E_s \lambda_s / l) A_s \text{ より } \lambda_s = W / A_s E_s \\ W l (1/A_c E_c + 1/A_s E_s) &= \alpha_s l \Delta t_s - \alpha_c d \Delta t_c \end{aligned}$$

ここで、 σ : 応力 Δt : 温度差である。

仮にステンレスの温度が 20 度上昇、銅の温度が 5 度上昇したとすると、

$$0.01814W = 17.3 \times \Delta t_s - 16.8 \times \Delta t_c$$

$$W = 14443[\text{N}]$$

の力がセラミックパイプにかかるという計算になる。

このセラミックパイプの引っ張り試験を行ったところ、10500N の荷重でクラックが入ることを確認した。ステンレスと銅の線膨張係数が同じくらいなので、簡単のために

$$0.01814W = 16.8 \times (\text{両者の温度差})$$

とし、破断する力 $W:10500\text{N}$ を代入すると、両者の温度差が 11 度程度あればクラックが入ることがわかる。

このバスダクトに実際 1000A の電流を流してみると、温度飽和状態で、内部導体の銅は約 40 度、外部シースは約 30 度となった。両者の間で 10 度程度の温度差が生じているが、アルミナ絶縁層によってよく断熱されていることが分かった。コンクリートを固めるための温度は 60 度程度に上昇していること、冬場の室温状態であることを考えると、内部導体は熱伝導がよいためこの程度の温度差が生じてもおかしくない。実際電磁石の給電に使うときにも温度差が生じると予想できるため、セラミック部にかかる応力緩和のため端末にベローズを入れることにした。

図 4 に示すように、このバスダクトに対しても前節と同様に電流 2400A、冷却水差圧 1MPa で各点での温度測定を行った。バスダクトのオーム発熱は 190kW であった。グラフから分かる通り、ポリイミドバスダクトと同様、バスダクト自体の温度はほとんど冷却水の温度であり、1℃程度の温度上昇である。表面温度はステンレスシースの温度で、バスダクトというよりはコンクリートの温度にひっぱられて冷たくなっている。コンクリートの温度上昇も 2℃程度であった。

大電流 SUS シースタイプバスダクトは部品点数も多く、端末処理が難しいステンレス溶接に時間がかかり、結果的に工程数が多くなってしまった。結論として絶縁は確実であるがコストがかかるということが分かった。

2.5 電力貫通バスダクト

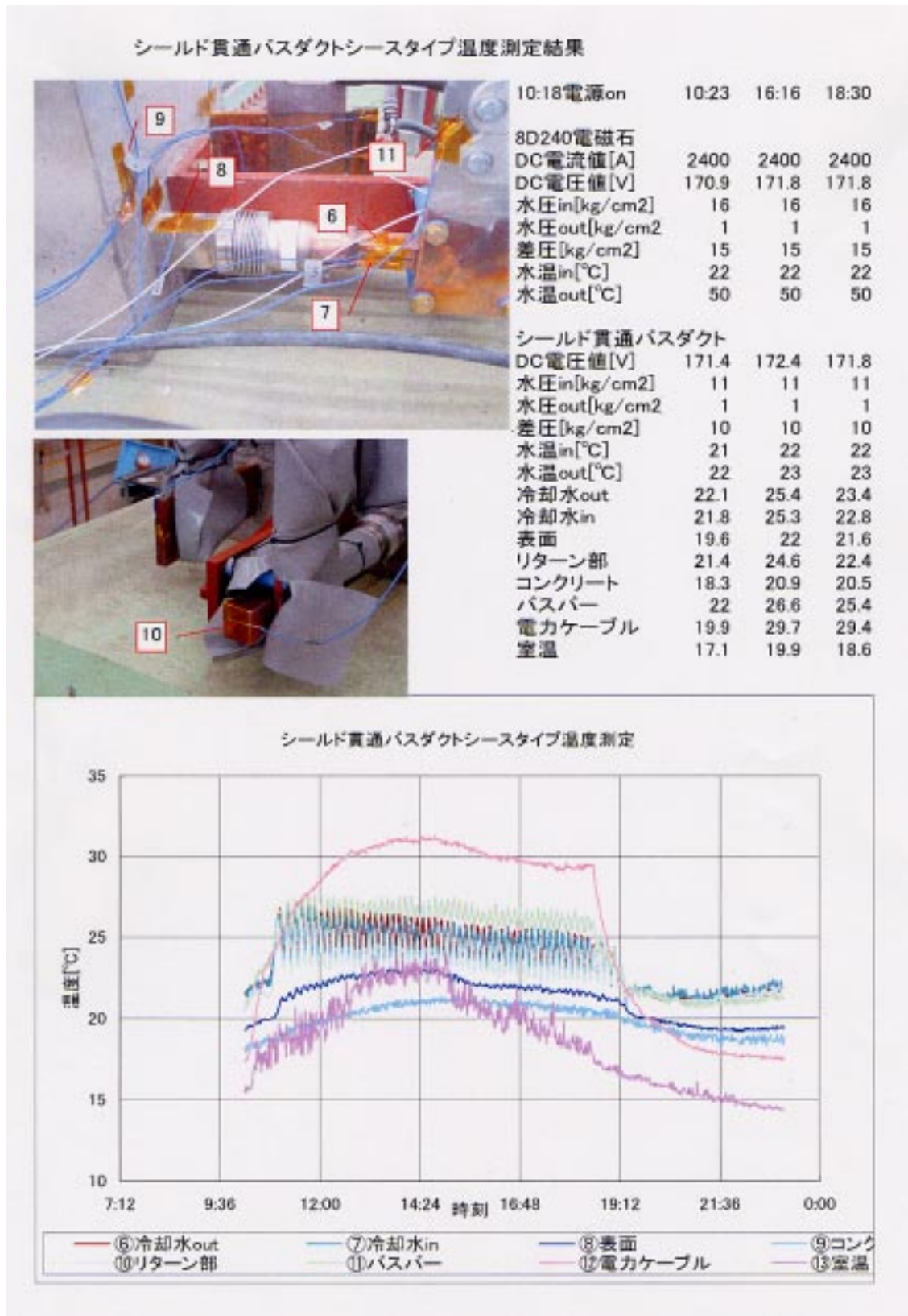


図 4 シースタイプバスダクト温度測定結果

2.5.4 無機絶縁サンプルテスト

前節で、シースを被せるやり方は端末処理が難しく、手間がかかるということを述べてきた。そこで、無機材質のみで仕様を満たすような絶縁材料を現在検討している。しかし、無機材質では水に浸した状態での絶縁性能を求めるだけでも難しい上に、コンクリートに埋めるということは pH12 のアルカリ溶液の中に浸すということなので、さらに難しい。以下に様々な無機絶縁材をサンプルテストした結果をまとめた。この中で T 社の高純度アルミナ溶射+シリカ封孔処理したものだけが耐水性があることが分かった。しかし、溶射の場合は多孔質なので封孔処理が必要であるが、シリカはもともとアルカリに弱いためコンクリートに埋めた途端地絡してしまった。現在アルカリに対して強くするため、チタンを数%混ぜた封孔材を使用したものと、アルミナ溶射のサンプルに常温硬化ガラスコーティング厚塗り用を塗ったものを試験している。また、常温硬化ガラスコーティングサンプルはビームラインに置き、放射線による劣化のテストを行っている。

表 2 無機絶縁材サンプル試験結果まとめ

	絶縁材料	水浸絶縁抵抗[MΩ]	コンクリート浸絶縁抵抗
1	シース密封(MIC)	>2000	2000>
2	S ガラス+アルミナ接着剤	0.1(20 分後)	-
3	S ガラス+アルミナ接着剤+シリカレジン	4.5(4 時間後)	-
4	S ガラス+アロンセラミックス接着剤	0.1(2 時間後)	-
5	スリーボンド 3732 耐熱性無機接着剤	0	-
6	スミセラム	0	-
7	高純度アルミナ溶射+シリカ封孔処理(T 社)	>2000	地絡 (乾けば徐々に回復 60MΩ)
8	緻密化アルミナ溶射+シリカ封孔処理(T 社)	>2000	地絡
9	高純度アルミナ溶射+シリカ+数%Ti 封孔処理	>2000	
10	セラミックコーティング+水ガラス封孔処理(N 社)	20	地絡
11	常温硬化ガラスコーティング標準品 (黒)	0.3(6 日後)	地絡
12	常温硬化ガラスコーティング防錆用 (緑)	1(3 時間後)	地絡
13	常温硬化ガラスコーティング厚塗り用 (灰色)	0.3(10 日後)	0.5
14	S ガラス+常温硬化ガラスコーティング厚塗り用	0	-
15	高純度アルミナ溶射+シリカ封孔処理+常温硬化ガラスコーティング厚塗り用	>2000	

2.5 電力貫通バスダクト

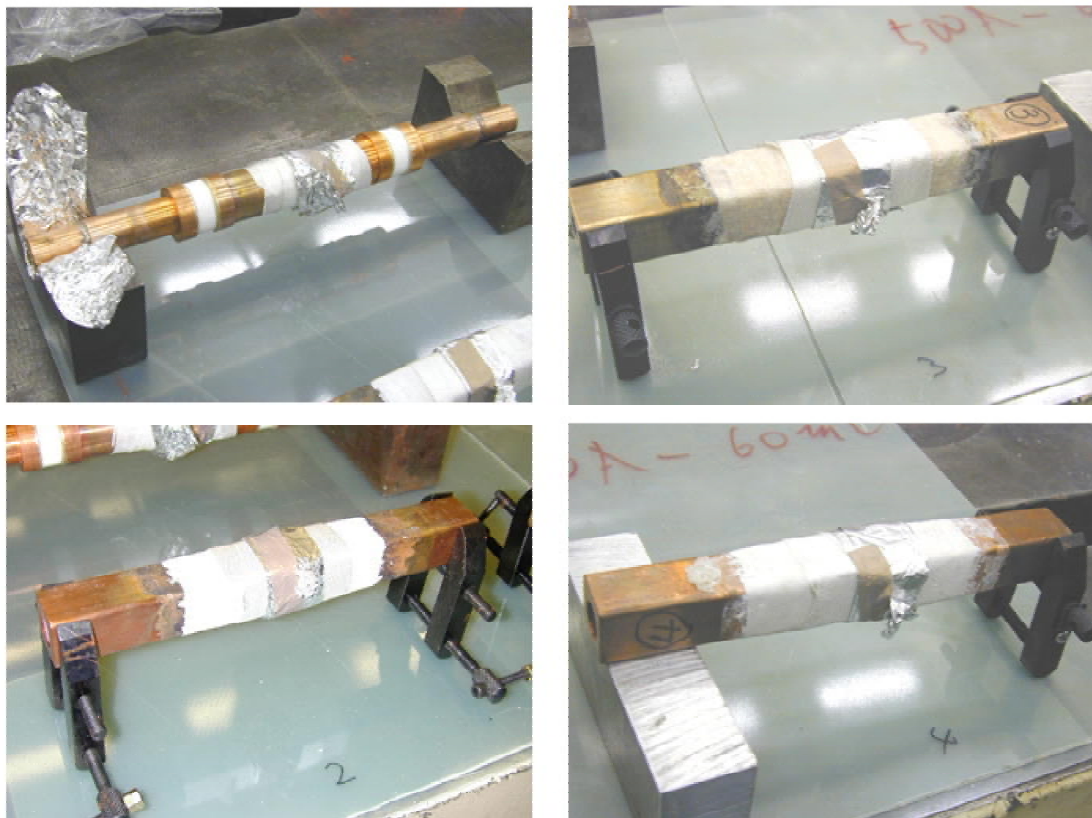


図 5 左上：シース密封品(1)、左下：Sガラス+アルミナ接着剤(2)、右上：Sガラス+アルミナ接着剤+シリカレジン(3)、Sガラス+アロンセラミックス(4)



スリーボンド **3732**



スミセラム **S208B**

図 6 上：スリーボンド 3732 耐熱性無機接着剤(5)、下：スミセラム(6)



図 7左：高純度アルミナ溶射+シリカ封孔処理(7)、右：セラミックコーティング+水ガラス封孔処理(10)

2.5 電力貫通バスダクト

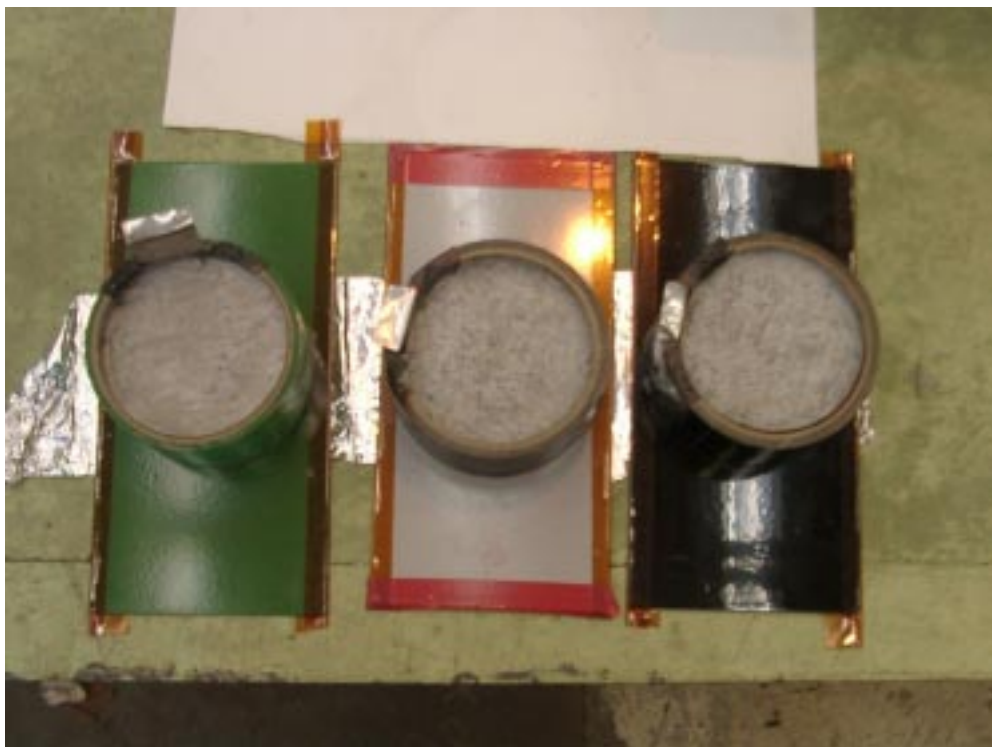


図 8 常温硬化ガラスコーティングサンプル（緑：防錆用(12)、灰色：厚塗り用(13)、黒：標準品(11)）



図 9 上：高純度アルミナ溶射＋シリカ＋数%Ti 封孔処理(9)、中：緻密化アルミナ溶射＋シリカ封孔処理(8)、下：高純度アルミナ溶射＋シリカ封孔処理＋常温硬化ガラスコーティング厚塗り用(15)

2. 6 信号貫通バスダクト

ハドロン実験施設の一次ビームラインは気密性が高く、放射線遮蔽壁の壁も今までに比べ厚いものになっている。そのためビームラインに設置されるモニタ、真空ポンプ、コンプレッサ、電動モータなどへの電力供給については、その電力・信号ケーブル自身の絶縁被覆の耐放射線性が求められるばかりでなく、そのケーブルをどのような経路で敷設するかを考慮しなければならない。この信号貫通バスダクトは、信号線を放射線損傷から守り、電力供給のための熱をトンネル内に発散することを小さくし、トンネル内の配線を簡単にする目的のために試作したものである。

さらにこの方法では、建設工事中に通常ケーブルトレイに敷設することから発生する信号線と先端コネクタの破損を防止するだけでなく、導入ケーブルの本数が不足した際には、貫通バスダクトをユニットごと新規増設、または交換することで貫通線の本数の増減、組合せを変えることが出来る機能を持つ。

原子力発電関連の施設では同様の装置は既に使用されており、一般的には生体遮蔽壁用ケーブルペネと呼ばれている。これらのケーブルペネはコンクリートを貫くことによって高放射線場と作業者の計測・保守サービス空間とを隔てている。

ここで想定した信号線・動力線は前節に書かれている電磁石用バスダクトのような大電流あるいは高電圧といった特殊な用途のものでないために、ケーブル自体の電気絶縁などは既存の無機絶縁（MI）ケーブルなどを用いて製作することが出来た。

ここでサービススペースに設置される機器として次のようなものを想定した。

1) 真空ビームパイプ用の真空ポンプ

250 l/min のもので単相 100V、0.4 kW 10 m 置きに設置

500 l/min のもので三相 200V、0.6 kW

2) ピローシールのためのターボ分子ポンプ

3) コンプレッサ

4) 動力モータ 三相 200V 0.75 kW

5) 信号線としては、50 Ω 同軸ケーブル、モニタで使用するバイアス高圧ケーブル、熱電対補償線など。

本試作に当っては、実験施設と既存原子力施設との相違を考慮して次のような基本構造を検討した。

遮蔽壁の厚さとしては、2 m、4 m、6 m の用途がある。このなかで 6 m のものと考えるとその設置に際して天井クレーンにて設置作業をする場合、十分な直線的な構造強度を持つと同時に、ハンドリングし易い重量であることが望ましい。そのため信号線・動力線のノイズが相互干渉しない程度のスペースをとり、図 3 のような外形サイズのものを設計

2.6 信号貫通バスダクト

した。試作機では①ストリーミング防止構造の確認と②本体の剛性、③コンクールの流し込み作業性の確認などを目的に全長を2 mとした。全体の外観図ようすを図1、2に示す。

埋め込み MI ケーブルの種類

① 動力用

寸法 $\phi 10.6$

材質 シース SUS316、絶縁材 MgO、芯線 Cu (22mm²)

本数 9本

② 信号(1)用

寸法 $\phi 12$ ($\phi 3.2$ 一芯 MI ケーブルを3本内挿)

材質 シース SUS316、絶縁材 MgO、芯線 $\phi 3.2$ MI ケーブル

本数 3本

③ 信号(2)用

寸法 $\phi 12$ ($\phi 3.2$ ニ芯ツイスト MI ケーブルを3本内挿)

材質 シース SUS316、絶縁材 MgO、芯線 $\phi 3.2$ MI ケーブル

本数 3本

④ ダミー

サイズ $\phi 12$ パイプ

材質 SUS304P

本数 21本

各線の配置は図3の断面図の通りである。

発熱量、信号線のノイズなどを確認するために以下に示す試験を実施した。

1) 絶縁抵抗試験（動力用、信号用の全 MI ケーブルを対象）

動力用 MI ケーブル : DC500V メガ

信号用 MI ケーブル : DC100V メガ

2) 導通抵抗測定（動力用、信号用の全 MI ケーブルを対象）

抵抗値の記録

3) 片側にヒーターを設置し、この貫通バスダクトを通して、10Aの電流を流し、MI ケーブル表面につけた熱電対の温度を連続測定する。

4) 上記のヒーター通電時に各信号線の誘導ノイズをオシロスコープなどで観察する。

5) ヒーターに20A（30A、40A、50A）まで順次電流を流し、発熱と誘導ノイズを確認する。

試験の基本構成図は図2に示す通りとした。

試験結果は十分に目的を達成する性能は満たしていることが分かった。

今後の検討課題として、

1) 端末端子の形状と配置

製作形状として次のような提案があった。

- ・ 片側端末に二股コンセント、反対側にブレーカーを付ける。
- ・ 端子台で内外機器への配線を行う。
- ・ 熱電対用の補償ケーブルコネクタを付ける。
- ・ 信号線に関しては、実験室で使われる BNC などのパネル設置用を並べる。

2) バスダクトの断面形状

6mの長ものを製作するにあたって、充填コンクリートを均一に短期間に製作するために、四角柱が提案された。コンクリートを流す際には、円柱よりも水平にして流し込んだ方が容易に製作できる。諸外国の電柱は製造方法の安易さから四角柱が一般的であり、丸木からの伝統を引き継ぐ円柱こだわる必要はない。

3) 6m長もののクレーンによる設置シナリオ

などが挙げられる。

2.6 信号貫通バスダクト



図 1 全体図

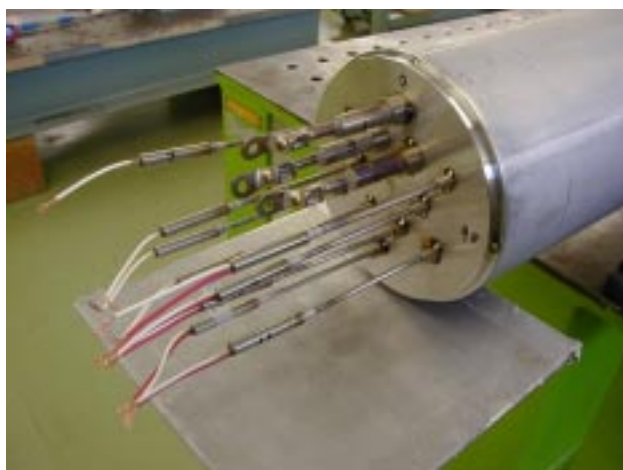


図 2 片側端子部

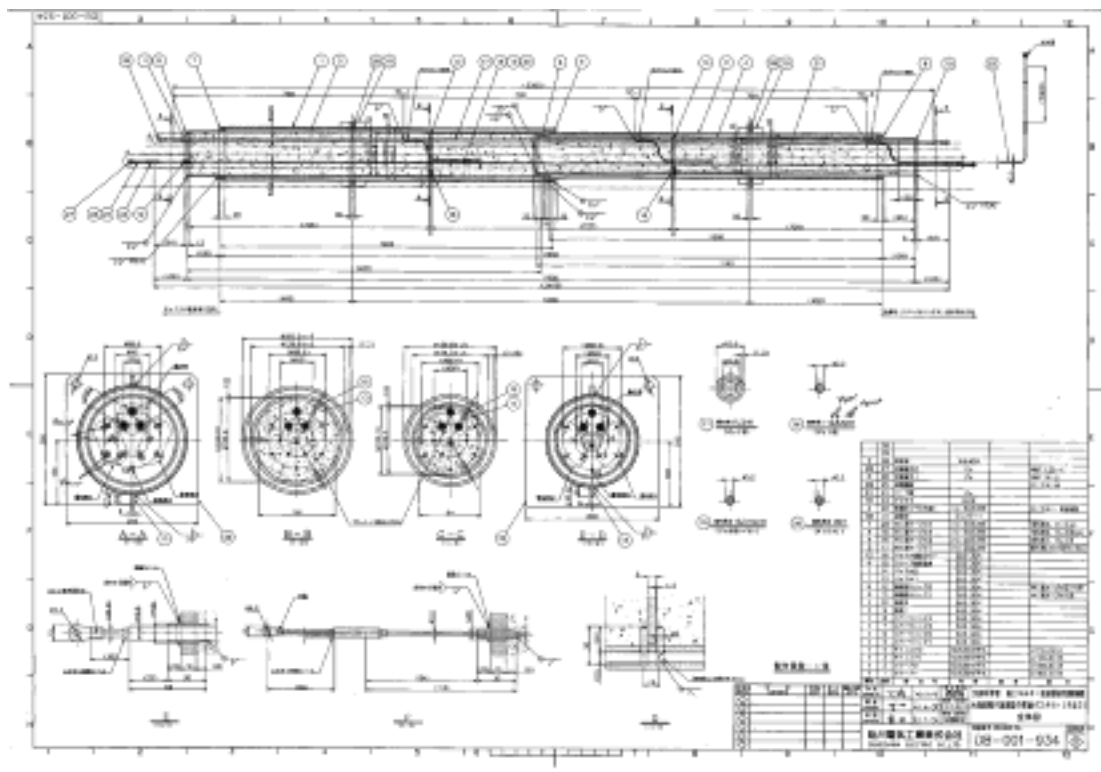


図 3 全体構造図

2. 一次ビームライン

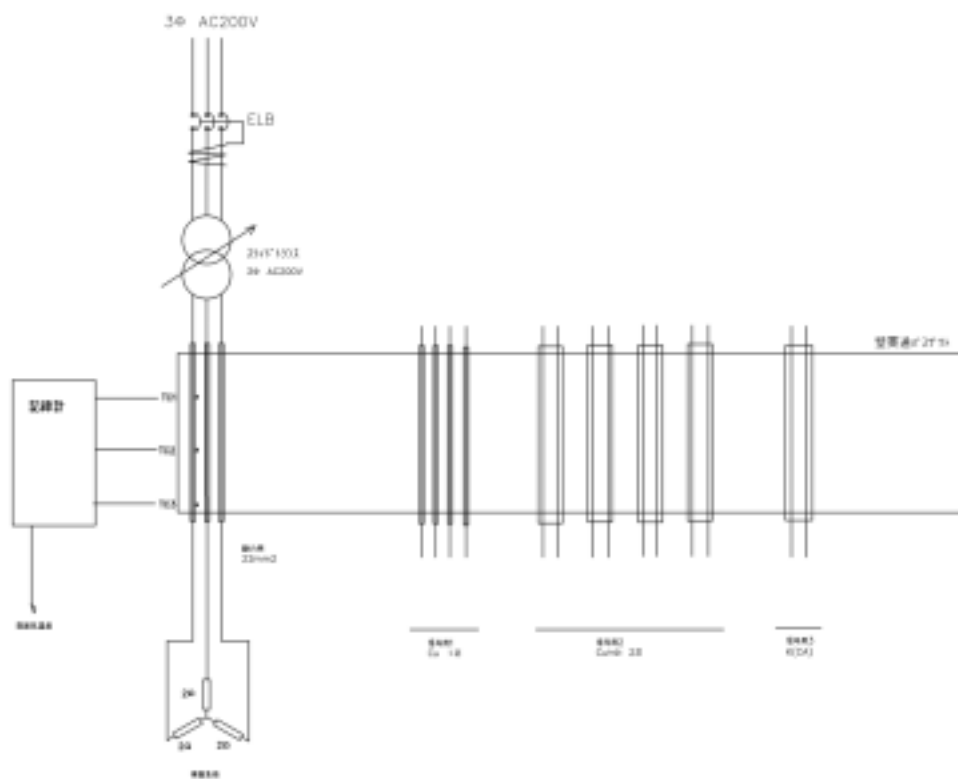


図4 通電発熱試験構造図

2.6 信号貫通バスダクト

3. T1 標的とその周辺

3.1 T1 標的

3.1.1 概要

T1 標的は、ハドロン実験施設に最初に建設される二次粒子生成標的である。このT1 標的は、図1のハドロン実験室平面図に示す場所に設置される。HD ホールは天井クレーンとして40トンと20トンを持ち、ターゲットを含む高レベル放射化物は、このクレーンを用いて設置、撤去を行うことが出来る施設である。また、放射線防護の観点から、一般区域境界で線量率を $0.25 \mu\text{Sv/h}$ 以下とし、また、土の放射化に対する線量率は 5mSv/h 以下となるようにコンクリート、鉄遮蔽体の厚さを求めている。

このように標的の設計のためには、実験で使用する二次粒子が最大限得られるようにするだけでなく、実験施設の機能や標的のメンテナンス、実験施設周辺に対する放射線環境管理などが、その設計の重要な検討要素となる。

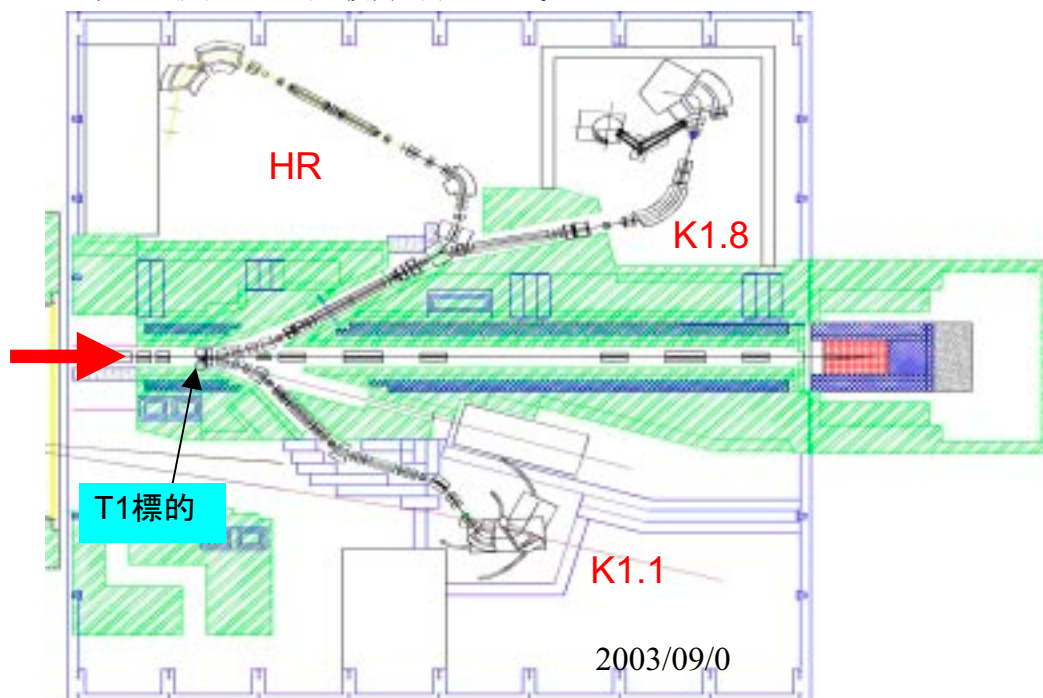


図1. ハドロン実験施設平面図

3.1 T1標的

標的形狀を具体的に設計するために次のような入射条件で行った。

- | | |
|-------------------|--|
| (1) 一次ビームの線質 | 陽子 |
| (2) 運動エネルギー | 5 0 G e V |
| (3) 個数 (電流値換算) | 3×10^{14} p p p (1 5 μ A) |
| (4) 入射してくる周期 | 3. 4 秒 |
| (5) パルス幅 | 0. 7 秒 |
| (6) 標的部におけるビームサイズ | $\sigma = 3$ mm |

標的本体の設計にあつては、A G Sにおける1995年以降のC、C'、D水冷固体ターゲットやG-2実験における回転ターゲットなどを参考に本体材質の選択や全体機構の検討を行った。次に示す本体に関する仕様は(1)の放射線管理上からくる制限以外をこの中間まとめに記述する。

仕様

- (1) 放射線管理上、T1標的でのビーム損失量(一次ビームと標的物質の相互作用量)は、最大30%とすること。
 - (2) 二次粒子収量、耐熱性、耐腐食性、コストを考慮して、標的物質はニッケル合金を使用する。
 - (3) 従って、この密度では標的のビーム軸方向の長さを約54mmとする。
 - (4) また、取り出し角度 5° 前方(K1.8ビームライン)の二次ビームラインから見て出来るだけ点状線源に見えるサイズ、形状であることが重要である。
 - (5) 熱収支の計算の結果、除熱のためには標的物質は回転しながら直接その表面から熱を取り去る方式を採用する。
 - (6) 回転速度は、入射ビームのパルス幅0.7秒であることから、毎分85回転前後(=1/0.7*60)で回転させ、発熱を周長に均等に分散させること。
 - (7) ビーム停止直後は、非常に高い放射線環境であるため(標的部の残留放射能は予想値で約650Sv/hr)、標的部周辺に近寄ることは不可能である。そのため夏期長期停止期間を利用するなどの交換サイクルのメンテナンスを考えると、標的の運転時間は最低1年間以上あることが必須の条件である。現在、計画されている実験利用時間はslowとfast合わせて、最大4000時間/年(=1.3x10²¹ protons)である。また、実験で使用せず標的部を通過するだけのダンプモード(target off)でも約1000時間/年を計画している。
 - (8) 全構造に渡って、設置、撤去、一時退避が遠隔、短時間で出来ること。
- などがあげられる。次小節にそれぞれ検討された結果を示す。

3. 1. 1 熱計算と構造

熱解析フローを図2a、図2bのように定め、標的円盤の形状を決定した。

[解析1コードの適用性確認]

まず始めにここで重要なのが実際に起きる流れとどのような解析方法が適当であるかを定めることである。そのために図3に示すようにPIV (Particle Image Velocimetry) による流速測定を行った。測定対象は実機サイズの円盤3枚を用意し、円盤間隙を変えることが出来る構造とし、可視光による測定方法であることから両側2面をアクリル円盤とした。左手前から扇型にレーザー光を照射する。水中には1ミクロン程度のテフロン反射体を溶かしこんでいる。レーザー光はカメラと同期してパルス状に発振され、超高速度CCDカメラによって水中を浮遊する反射体の位置変化を撮影記録する。結果の一例を図4に示す。

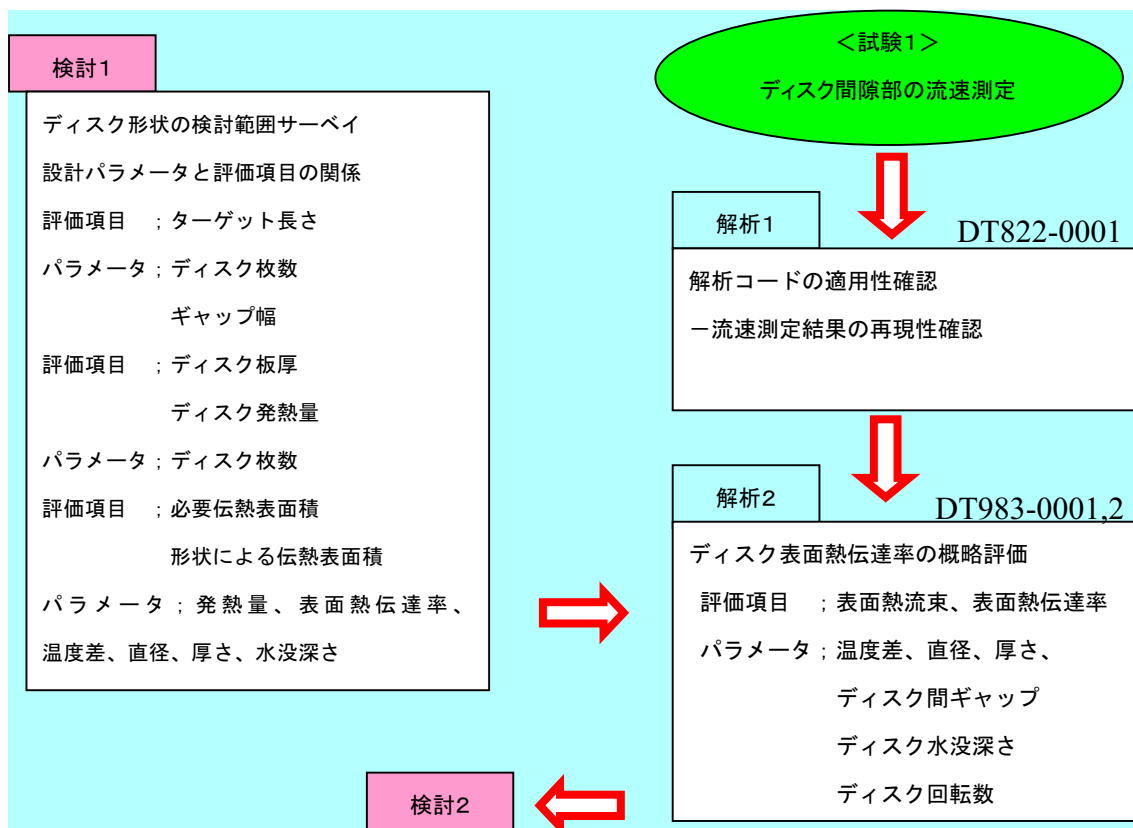


図2a 実測と計算モデルの選定、平均熱伝達率の実験式の導出

この測定結果は円盤間ギャップ 3mm、水没深さ 40mm、回転数 85rpm における実測データ（左）と層流、乱流をそれぞれ仮定したときの計算結果（右）である。この回転速度におけるレイノルズ数の値 3192 からは、水槽内は層流か乱流かの判定境界であるが、実測値と比較した結果、このような条件下ではほぼ乱流として扱ってよいことがわかる。

3.1 T1標的

[解析2 円盤表面熱伝達率の概略評価]

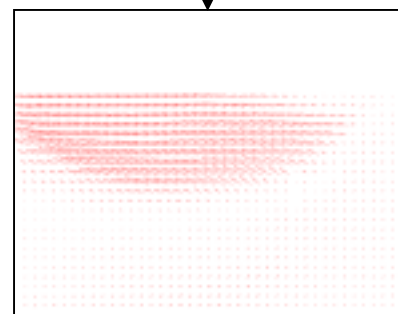
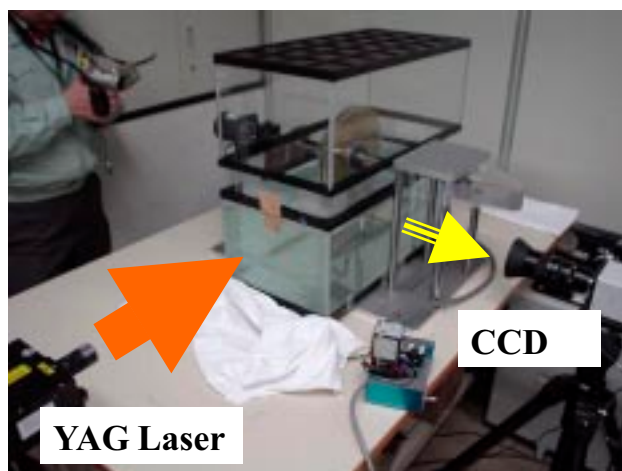
これらのテストのあと、計算モデルに非圧縮性流体の $k-\epsilon$ モデルを用い、パラメーターとして円盤の直径、厚さ、回転数、水没する深さを変えたときの円盤から冷却水への熱伝達効率を求めた（図4）。そのときに使用した条件は以下の通りである。

解析コード：	流体解析プログラム STAR-LT 2001
使用要素タイプ：	6 面体要素
境界条件：	全て標的ディスク壁面を 60℃固定
流体モデル：	非圧縮性流体、乱流モデル→ $k-\epsilon$ モデル

また、ディスク径、水没深さ、回転速度を変化させたデータから、次の近似式を作った。

平均熱伝達効率 $K = \{3423 - 0.6908 \times (d - d_0) - 7.206 \times (h - h_0)\} \times \{(0.7895 \times v + 0.1573)\}$

K : 平均熱伝達率 (W/m^2K) d : ディスク径 (mm)、 h : 水没深さ (mm)、 v : 外周速度 (m/s)、基準設計値 $d_0=360mm$ 、 $h_0=40mm$ 、 $v_0=1.07m/s$



測定対象: $\phi 240mm$ 、 $t6mm$ 、

構成: アクリル、間隙、金属円盤、間隙、アクリル

YAGレーザー: ビーム径 $3mm \phi$ 、 $7ns$ 、発振 $30Hz$ 、シート状に振動

CCDカメラ: 1008×1018 ピクセル、ピクセル $9 \mu m$ 、 $1/10000s$

図3 流速測定実験のセットアップ

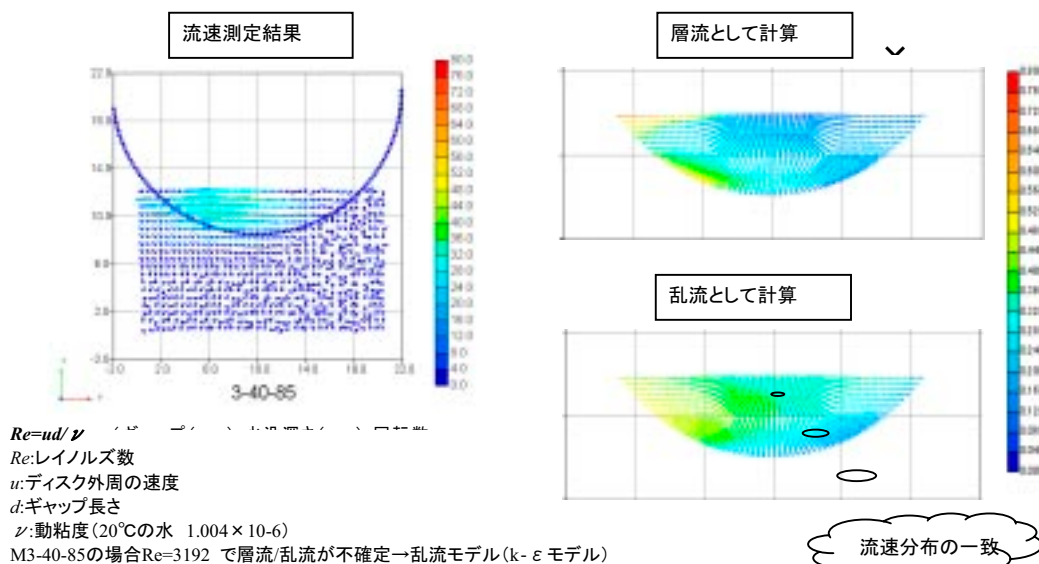


図4 流速測定結果と異なる計算モデルとの比較

この実験式を用いて奥行き方向への発熱密度を一定かつ除熱可能な板厚と直径を求めた。分割枚数例とそれぞれの発熱量を表1に示す。分割枚数が増えるとそれに比例してギャップ厚さも増える。一方で分割数は円盤が自立出来て、必要な冷却表面積が得られれば良いと考えるならば、5分割、全長66mmとなる組み合わせで十分である。

表2 ターゲット分割数と均等発熱量となる厚さ

No.	ターゲット分割数		1枚の最大発熱 (J/パルス)	ディスクの厚さ及び発熱量									
				合計	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目	5枚目	6枚目	7枚目	8枚目	9枚目
1	9	厚さ均等	6448	板厚(cm)	5.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
				発熱(J)	31726	1059	1561	2112	2713	3362	4060	4807	5603
2	9	発熱均等	3525	板厚(cm)	5.40	1.48	0.84	0.64	0.53	0.46	0.41	0.37	0.34
				発熱(J)	31726	3525	3525	3525	3525	3525	3525	3525	3525
3	8	発熱均等	3966	板厚(cm)	5.40	1.60	0.89	0.68	0.56	0.49	0.43	0.39	0.36
				発熱(J)	31726	3966	3966	3966	3966	3966	3966	3966	—
4	7	発熱均等	4532	板厚(cm)	5.40	1.75	0.95	0.72	0.59	0.51	0.46	0.41	—
				発熱(J)	31726	4532	4532	4532	4532	4532	4532	—	—
5	6	発熱均等	5288	板厚(cm)	5.40	1.93	1.03	0.77	0.63	0.55	0.49	—	—
				発熱(J)	31726	5288	5288	5288	5288	5288	—	—	—
6	5	発熱均等	6345	板厚(cm)	5.40	2.17	1.12	0.83	0.68	0.59	—	—	—
				発熱(J)	31726	6345	6345	6345	6345	—	—	—	—
7	4	発熱均等	7932	板厚(cm)	5.40	2.49	1.24	0.92	0.75	—	—	—	—
				発熱(J)	31726	7932	7932	7932	—	—	—	—	—

回転数と直径（水没深さ）については、回転に伴って空気を巻き込まない周速度として1.5m/s以下と定め、後からの設計となる回転軸受けの大きさを考慮した水深深さを求めた。参考にした数値は以下の表2である。

3.1 T1標的

表 2 標的直径と回転数、水没深さの必要条件

パルス	0.70sec	45323 W						
時間平均	3.42sec	9277 W						
パルス枚数		9	8	7	6	5	4	
パルス発熱(時間平均)		1091 W	1160 W	1325 W	1546 W	1855 W	2319 W	
板厚最小	mm	3.2	3.6	4.1	4.9	5.9	7.5	
板厚最大	mm	14.8	16.0	17.5	19.3	21.7	24.9	
ΔT	℃	30	30	30	30	30	30	

ΔT	30.0℃										
安全率	1.20										
周速度 (m/s)	パルス直径 D(mm)	H: 水没深さ(mm)									
		放熱量(W)									
		H= 40	H= 45	H= 50	H= 55	H= 60	H= 65	H= 70	H= 75	H= 80	
0.89	200	762.78	883.44	1004.10	1130.22	1255.00	1378.80	1504.41	1632.24	1750.38	
0.98	220	864.47	1004.97	1144.98	1290.48	1430.61	1574.52	1722.64	1861.51	2000.57	
1.07	240	971.87	1134.87	1284.87	1439.45	1598.15	1760.39	1926.67	2096.77	2265.19	
1.16	260	1084.23	1258.30	1426.11	1616.72	1799.66	1986.39	2177.20	2351.37	2534.74	
1.25	280	1197.89	1390.84	1586.12	1789.25	1991.61	2196.19	2404.50	2606.91	2811.78	
1.34	300	1314.51	1526.82	1744.02	1965.14	2189.03	2414.83	2641.74	2869.99	3095.69	
1.42	320	1433.92	1666.05	1903.74	2145.71	2391.07	2638.66	2887.66	3137.25	3388.45	
1.51	340	1555.86	1810.35	2066.82	2330.71	2587.55	2847.38	3110.84	3371.34	3633.77	
1.60	360	1680.50	1969.65	2239.42	2518.73	2808.21	3100.74	3395.30	3690.94	3986.81	
1.69	380	1807.08	2134.95	2426.08	2710.63	3002.83	3308.47	3625.44	3975.75	4285.46	
1.78	400	1936.33	2306.95	2623.71	2905.89	3241.20	3580.32	3922.10	4265.47	4609.43	
1.87	420	2067.81	2485.08	2751.15	3104.33	3463.10	3826.09	4192.04	4559.83	4928.40	
1.96	440	2201.08	2660.43	2829.26	3305.78	3688.35	4075.54	4465.02	4858.57	5252.09	
2.05	460	2336.25	2717.99	3109.90	3510.06	3916.77	4328.48	4743.81	5161.45	5580.24	
2.14	480	2473.22	2877.65	3282.82	3717.03	4148.18	4584.72	5025.19	5468.23	5912.60	
2.23	500	2611.90	3039.28	3478.20	3926.55	4382.41	4844.07	5309.97	5778.69	6248.90	
2.31	520	2752.19	3202.78	3695.62	4138.46	4619.30	5106.34	5597.95	6082.61	6588.83	

D=280mm、H=65mm

- 1) まず、軸受けが水に浸からないためには緑線以下であること（直径の1／4が浸かるライン）
- 2) 空気が巻き込まない条件は、青線より上の遅い速度であること。周速度が1．5 m／s 以下。
- 3) 最後に発熱を十分に除去できる効率を求めると赤線以下であることが必要となる。

この3つの条件で囲まれる領域の中で装置の保守作業を考えて、一番円盤直径の小さいケース（直径 280mm 水没深さ 65mm 回転数 85rpm）を選択した。

ここまでで決定した形状は次の通りである。

- 直径 280mm
- 物質全長 54mm
- 分割数 5枚、ギャップ 3mm
- それぞれの厚さ 21.7mm、11.2mm、8.3mm、6.8mm、5.9mm
- 回転数 85rpm

図 2 b に上記の形状でビームを入射させたときの熱分布を解析するフローを示す。

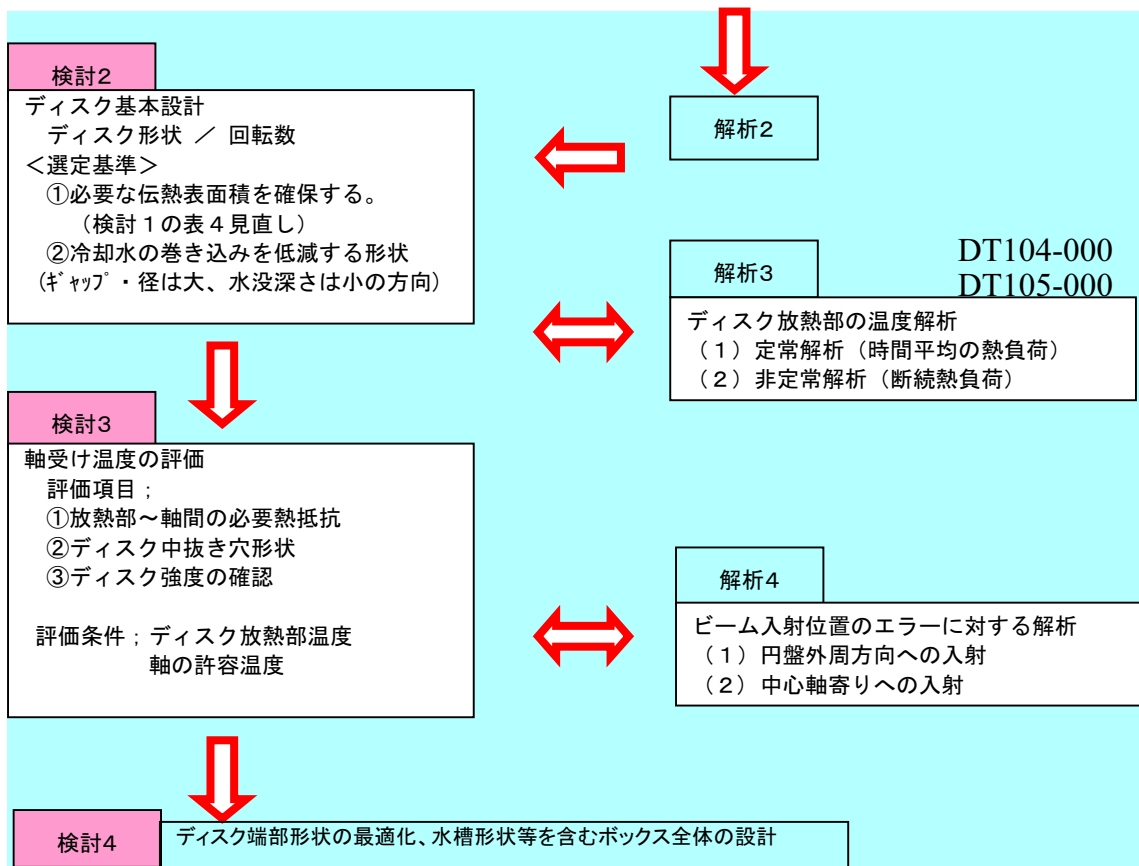
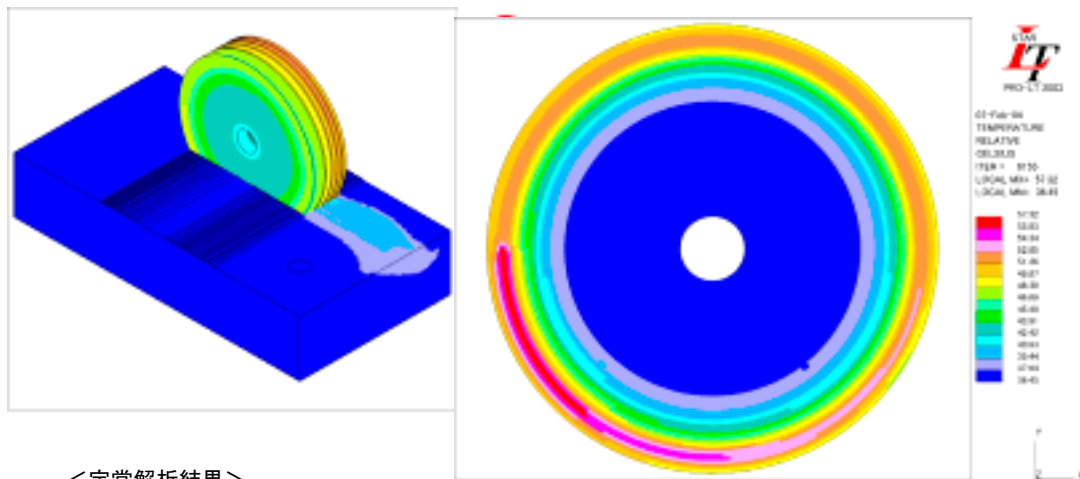


図 2 b 温度上昇の解析フロー



＜定常解析結果＞

ディスク最高温度

ディスク1； 48. 9℃
ディスク2； 52. 9℃
ディスク3； 55. 1℃
ディスク4； 57. 2℃
ディスク5； 57. 3℃

- 1) 定常解析の目標温度 60℃以下を満足
- 2) 発熱密度の高い方が、温度が高い傾向が見られる。
- 3) 非定常結果の予想； 75℃程度
 - ・6300J／パルスが、R=125～135mmのリング上の領域に入射した場合、断熱を仮定した温度上昇は約33℃(5枚目のディスク)
 - ・ディスク5の最大温度推定 75℃程度(～57+33／2)

図 5 平均化した発熱による温度解析

3.1 T1標的

はじめに入射ビームを平均化した発熱の定常解析と実際のビーム入射を想定した非定常解析の結果を示す。図5では最も温度が高くなると予想される最後部5枚目の円盤の温度分布を示している。

図中の左9時の位置にビームが照射されているが、ここでは0.7秒のパルスを3.42秒に平均化して連続入射としている。円盤自体が反時計回りに回しているために熱分布は9時から6時の方向に向かって尾を引いている。入射位置9時ではおよそ57.3℃と予想される。

次に0.7秒間入射し2.72秒間冷却時間をおいた繰り返しを行った結果を示す。

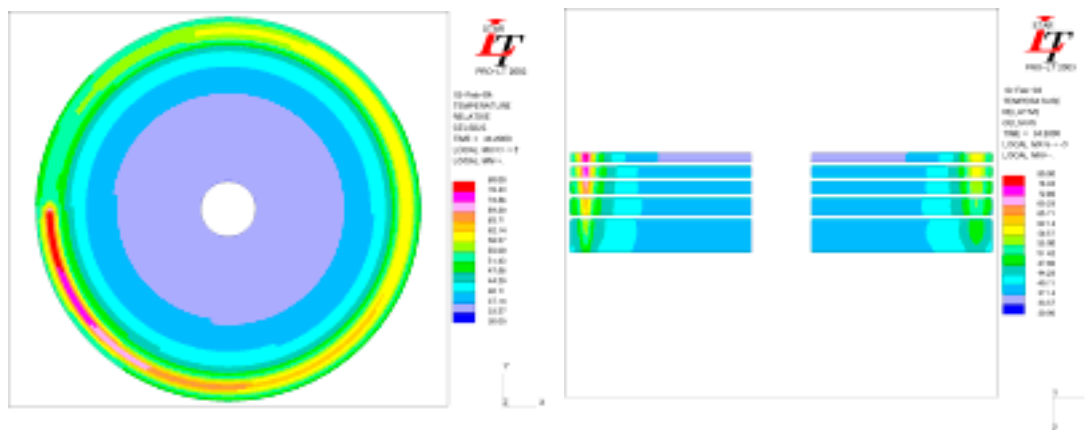
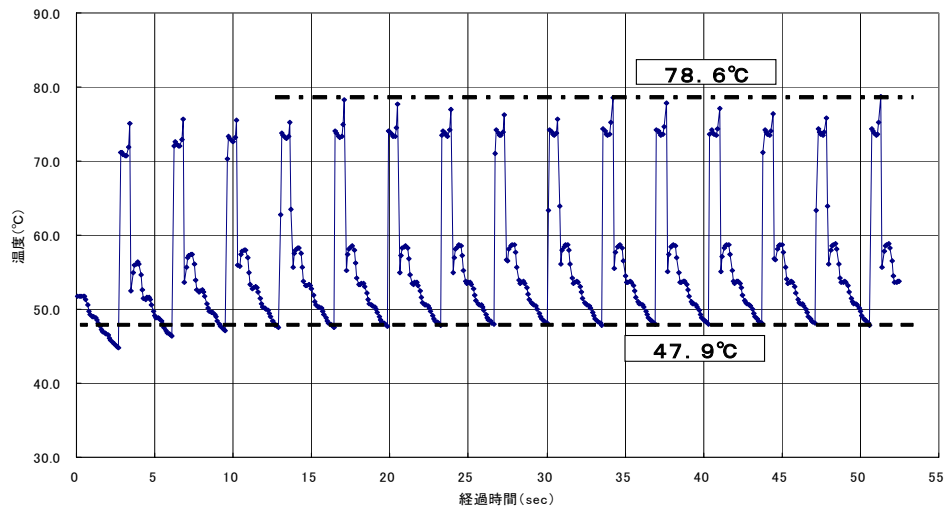


図6 パルス入射させたときの発熱分布

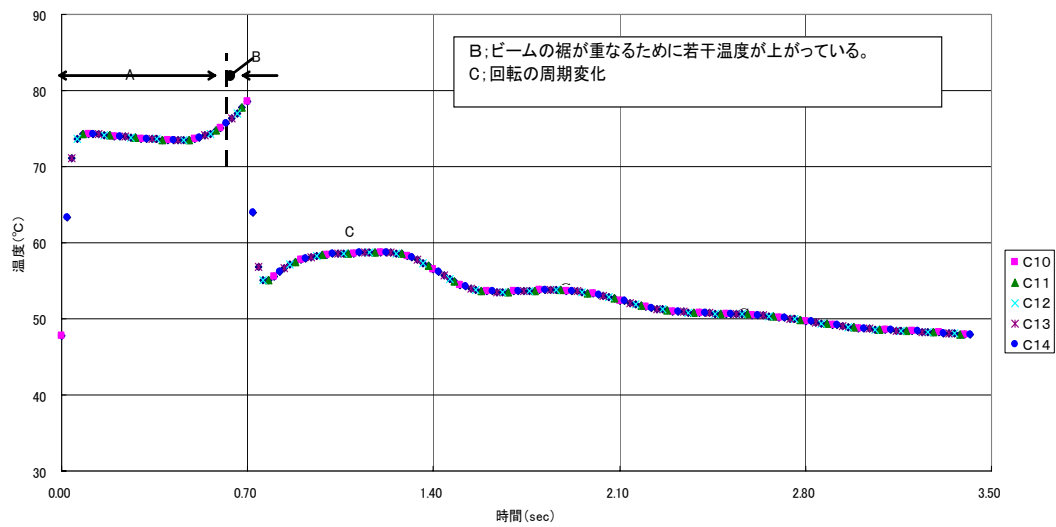
左が5枚目の円盤を正面から捕らえた様子で9時にあたる部分の温度は、最高で78.6℃と予想している。右は5枚の円盤の3時—9時のラインでの断面図である。図中でビームは左半分の下から上に抜けている。図7は経時変化を予想した図である。最高温度はビーム入射終了時に発生している、また、残りの2.7秒間で47.9℃まで冷却することが出来る。図8は、47.9℃—78.6℃の繰り返しが定常状態になったところで1周期分を重ね合わせた様子である。図中の領域Bの区間が温度上昇しているのは、入射始めのビームの8時方向への広がりが入射終了間近の9時位置での発熱と重なることから発生していると考えられる。

3. T1標的とその周辺



標的円盤ビームスポット近傍温度(5枚目)の時間変化

図7 ビームスポット近傍の温度変化



標的円盤ビームスポット近傍温度の時間変化(1サイクル分)すべてを重ねて表示

図8 1周期分の温度変化

3.1 T1標的

一連の解析において今後以下の問題に取り掛かる予定である。

- 入射ビームが所定の位置からはずれた場合
 - － 円盤端側に入射したケース
 - － 中心寄り（乾燥部分）への入射のケース
- ディスク端部形状の最適化
 - － 空気層を巻き込まない端部、PIV による試験
- 水槽形状等を含むボックス全体の設計
 - － 水槽内の淀み／流れ

3. 1. 2 T1 標的に関する一次冷却水の処理方法

T1 標的用の一次冷却水に発生するトリチウム濃度は、MARSによると 24kBq/cc/1 month（リザーバータンク 80ℓとして）に達すると見ている。これは標的装置の下部に設置している冷却水のリザーバータンクの水を 80L とし、メンテナンスサイクルを 1 ヶ月と仮定している。一方で現在稼働中の K2K 電磁ホーン一次冷却水からの類推によると、約 15.5 kBq/cc/14day と予想され、1 ヶ月換算にしてみるとほぼ同じ程度の経験値と予想値であるといえる。

このトリチウム水はイオン交換樹脂によっても完全に除去不能であるため、処理シナリオとして次の二通りが考えられている。

○ 3 週間毎に 0.7 m³の水で希釈して廃棄物処理

→この方式で 10 m³タンクに最大 8t（10 回）まで貯蔵可能

△ 3 週間毎に 30 m³の水で希釈して排水する。

その他の放射性生成物については、装置内の空気から生成される硝酸 21g/day（260ppm／貯水量 80ℓ/day）と水素ガス 4.7ℓ/day が主に考えられる。構造材、ボルト、ニッケル合金円盤などの金属から溶け出す放射性同位元素はほとんどイオン交換樹脂による除去が可能である。しかし、交換樹脂タンク自身が高い放射線源となる問題と設置場所の利便性から、固体廃棄物（2 m³/年）としていかにカセット化するかが今後の課題である。また、水素ガスについては、プラチナ触媒を利用して冷却水として戻す方法を検討している。

3. 1. 3 メンテナンス

故障時の交換と設置クレーンの最大積載能力を考慮して、T1 標的装置は三分割される。

図9に分集機構の概略を示す。

- 1) 回転駆動機構と上部遮蔽体
- 2) 回転円盤本体
- 3) 冷却水リザーバタンクおよび入出射窓、フランジ機構

残留放射線量は2) → 3) → 1) の順で強い。そのため交換時には実験施設内の放射線レベルを制御するために、それぞれの部品は鉄遮蔽体で出来たキャスク容器に入れられ移送される。

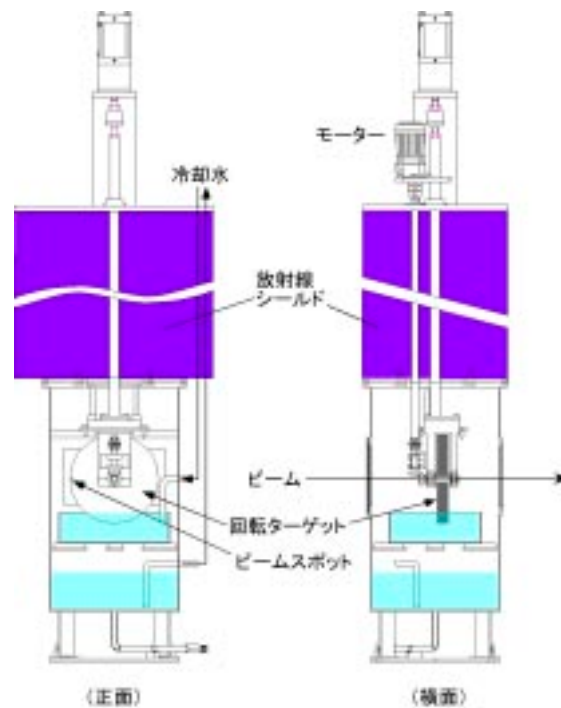


図9 T1 分集機構概略図

回転部の交換手順のシナリオを示す。

1. 遮蔽体の開放し、T1 水抜きと配管配線の分離
2. T1 下部（回転部）を分離し、上部のみ撤去
3. 下部をキャスクで被い遮蔽
4. キャスクを吊り上げ、一旦 SS に移動
5. 開口部に鉄蓋をし、 γ 線を遮蔽
6. キャスクを放射化物保管場所へ移動
7. 新しい回転部を用意し、鉄蓋を撤去
8. 回転部を設置し、続いて上部を設置・接続
9. T1 配管配線接続、試運転の後、遮蔽体の閉鎖

3.1 真空箱

3. 1. 4 標的モックアップ

標的本体の設計、メンテナンスシナリオに基づき標的装置のプロトタイプ的设计が行われている。図10はその外観図である。製作後、東カウンターホールモックアップ設備にてメンテナンスなどの実証実験をおこなう。

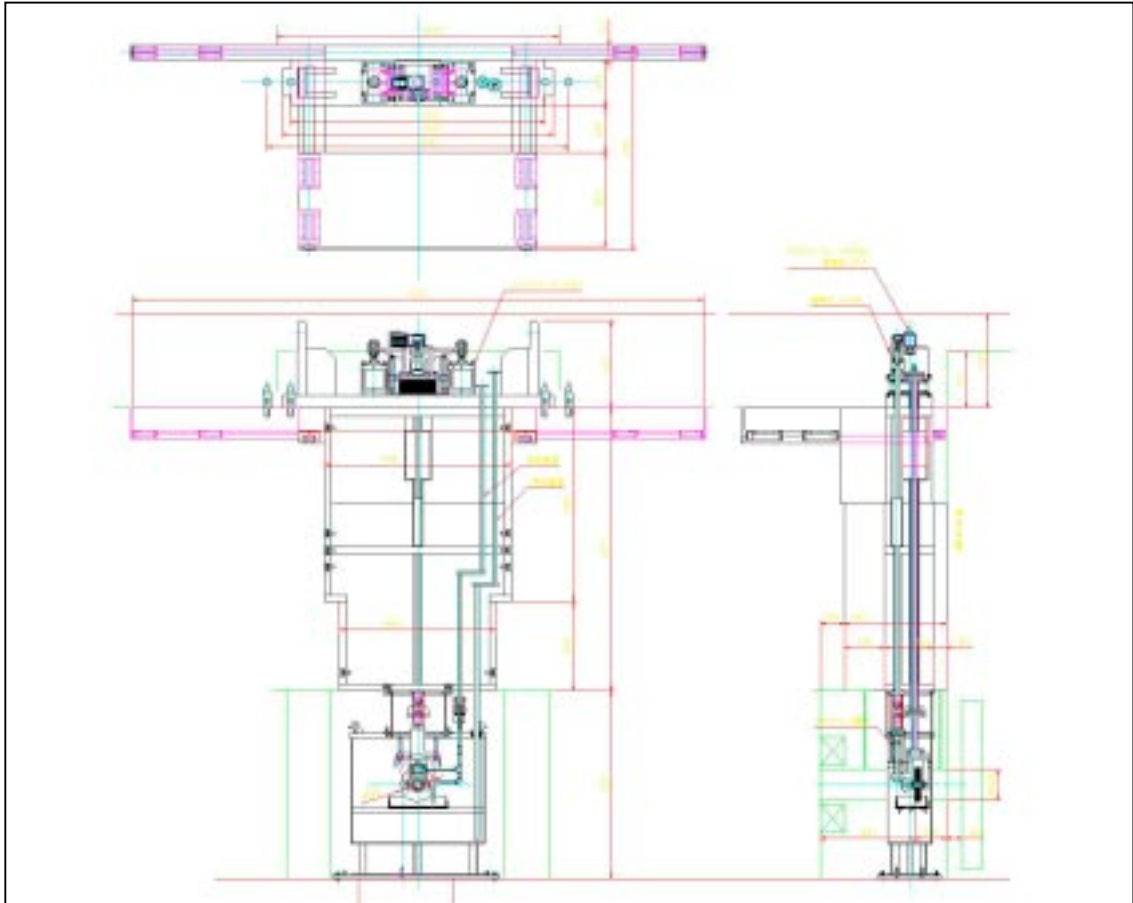


図10 プロトタイプ外観図

3.2 真空箱

3.2.1 T1下流のレイアウト

ハドロン実験施設にはまず最初に二次粒子生成標的が1台置かれ、50 GeV、750 kW の大強度陽子ビームから生成された二次ビームを用いて様々な原子核素粒子実験が行われる予定である。この二次粒子生成標的 T1 の下流の機器は、T1 によって開放された 200 kW 以上もの膨大な熱と放射線に晒されるため、熱除去の措置を講じない場合、標的下流の電磁石の鉄芯は、温度がキュリー温度を越え、磁石としての機能を失ってしまう。生成標的で開放される莫大なビームパワーに耐えるには、磁石自身を水冷するだけでは足りず、熱伝導率の良い銅で作られたコリメータを磁石の上流に設置する必要がある。このコリメータについては次節で詳しく述べる。

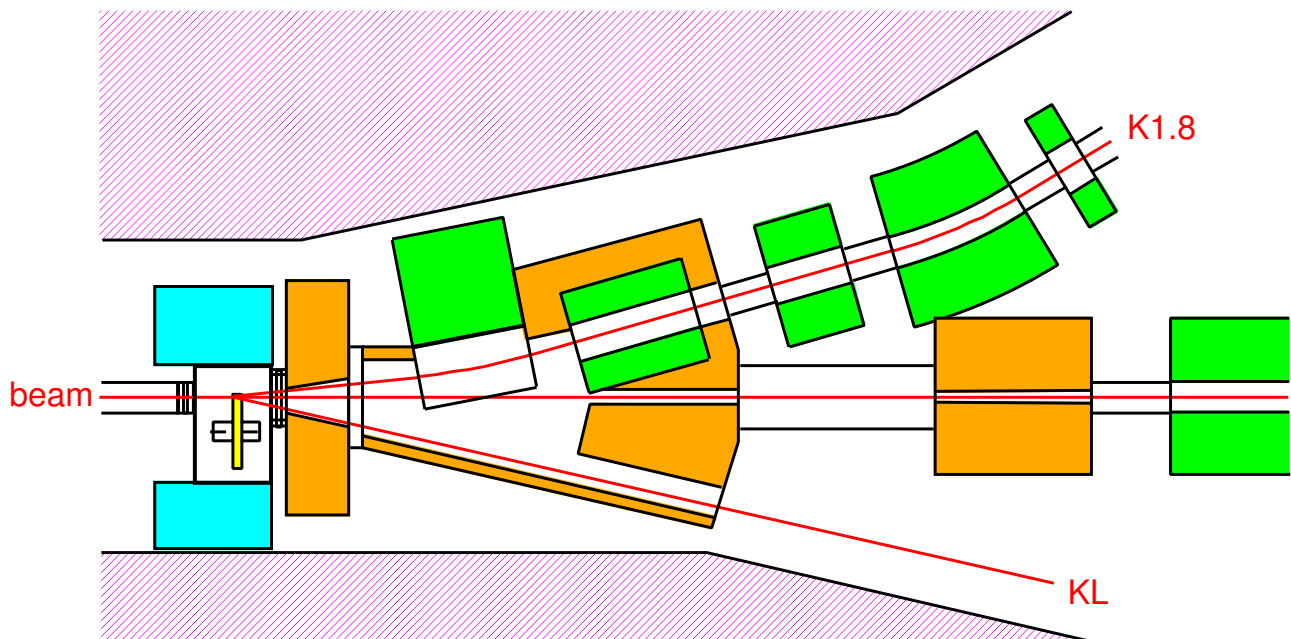


図 1: T1 下流のレイアウト案 1 (銅ダクト方式)。

磁極よりもビームに近い真空ビームダクトでは、ビームによる発熱で高温になると大気圧に耐えるだけの強度が維持できなくなるため、熱の問題がさらに深刻となる。トリチウム生成量を抑えるために水冷面はなるべくビームから遠ざけたいところだが、電磁石があるために除熱のための空間的な余裕が小さく、特に D1 磁石のところで除熱が追い付かなくなる。そこで、図 1 のように、D1 と Q1 の間で切らずに一つのダクトにし、さらに、図 2 にあるように、磁石のすき間を全て銅で埋めて熱の通り道を確保し、周囲を水で冷却する。

このような銅ダクトの温度分布を計算すると図 3 のようになる。これは、MARS で計算した各部の発熱量を使って ANSYS で温度計算をしたものである。上下対称のため上半分のモデルのみで計算してある。内側には 1 次ビームライン、K1.8 と KL の 2 次ビームラインの穴があり、外側は K1.8 の D1、Q1 磁石の磁極形状とコイル位置に合わせた形になっている。中心の最高温度が 120 °C、水冷面の温度も 100 °C を下回っており、これはこれでダクトの熱問題の解

3.1 真空箱

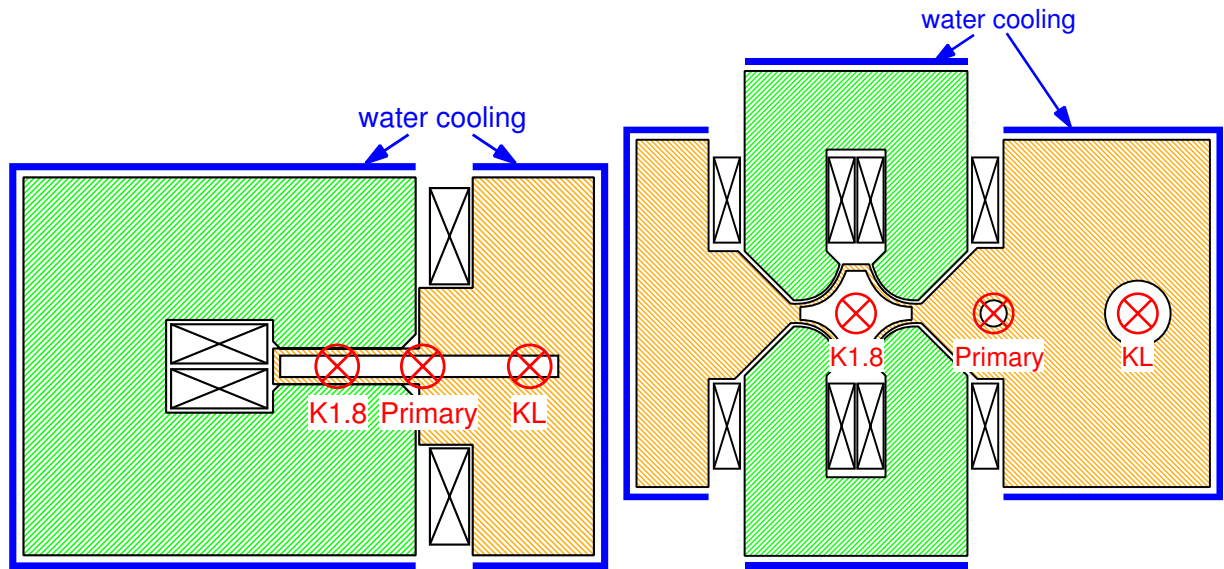


図 2: K1.8D1 / Q1 一体型銅ダクトの断面図。

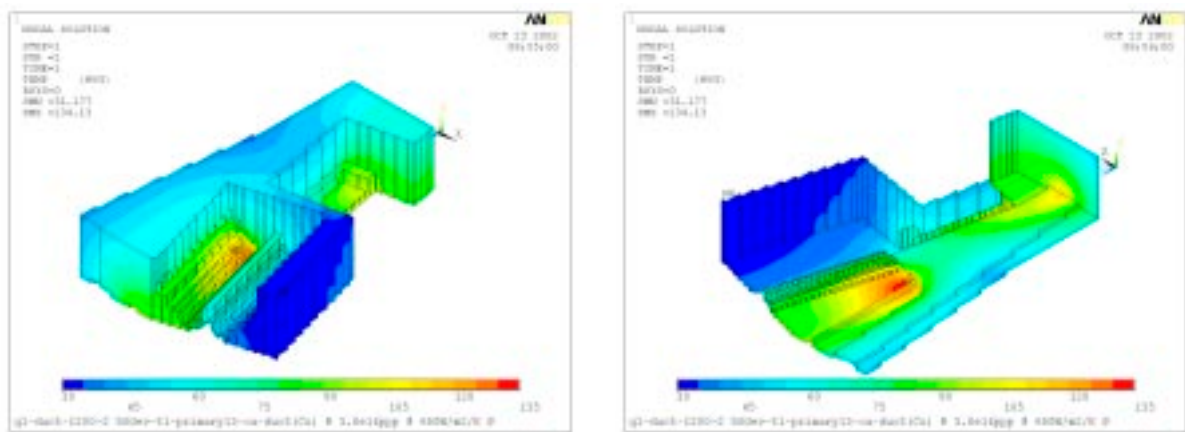


図 3: 銅ダクトの温度分布。

決案の一つになると思われる。

しかし、実際に製作し設置することを考えると、一塊で手に入る銅の大きさにも限度がある上、天井クレーンで一度に吊れる重量の制限もあるため、この巨大なダクトと電磁石を複数のパーツに分ける必要がある。しかし、中を真空に引くためには単にブロックを積み重ねるだけでは無理であり、また継目があるとそこの熱伝播が悪くなるため、分割したダクトの製作、設置は非常に難しく、手間がかかる。さらにこの方式には、冷却面積を確保するために、片側にしか荷電2次ビームラインを作ることができない、という大きな欠点がある。

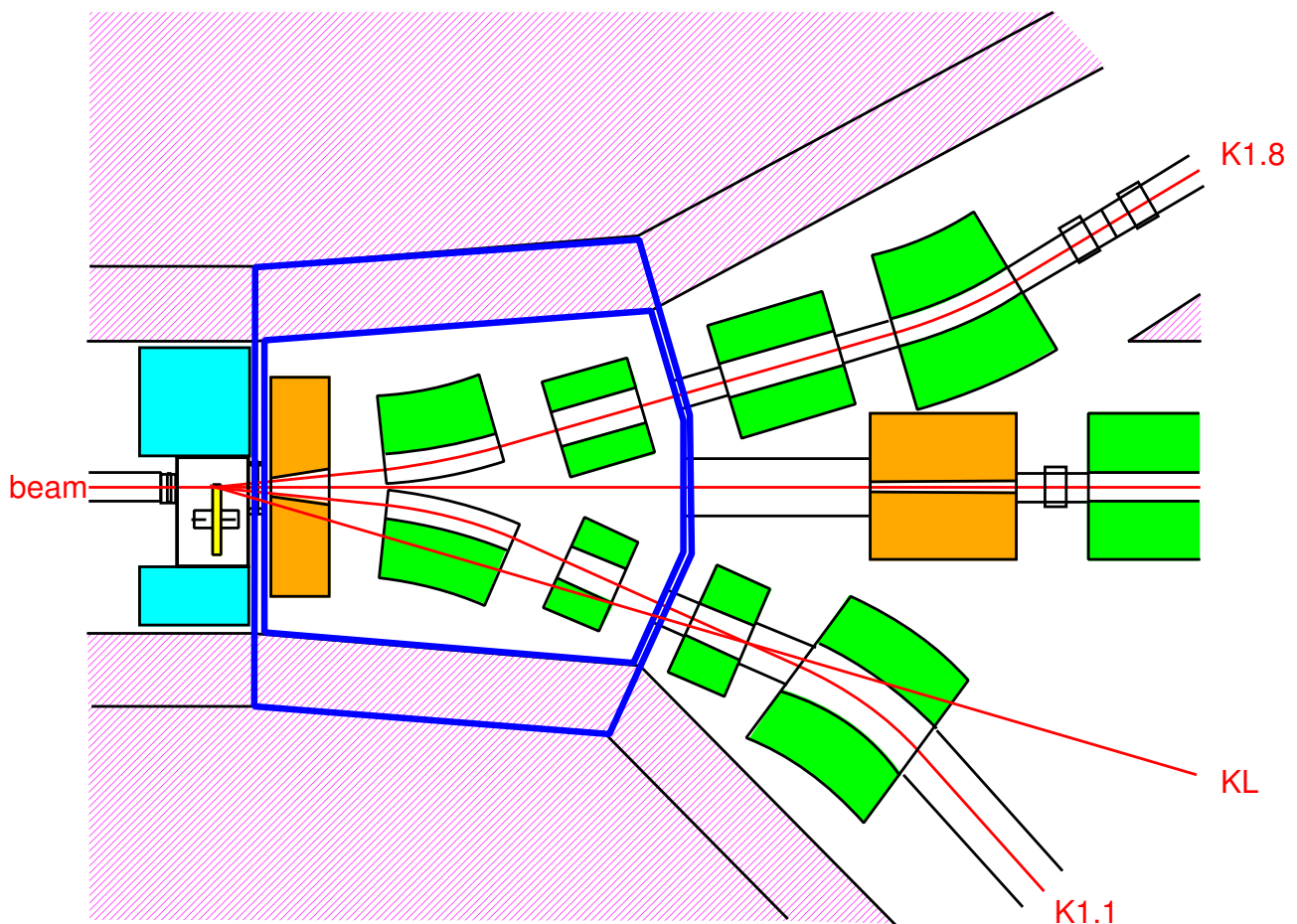


図 4: T1 下流のレイアウト案 2 (真空箱方式)。

そこで我々は、磁極のすき間からビームダクトを冷やすという考え方を転換し、一つの巨大な真空容器の中に電磁石を入れることを考案した(図 4)。これは、磁石の内側に真空ビームダクトを通すという従来のビームラインの形を逆転させたものである。水冷銅ダクトが不要になるため、左右2本の荷電2次ビームラインを作ることができ、内部に配置されるコリメータと計4個の電磁石はそれぞれ単独で設置したり取り出したりすることができる。

これら2つの方式について比較すると、以下のようになる。まず、銅ダクト方式のメリット／デメリットをまとめると、

3.1 真空箱

- メリット:

- － 比較的真空度が良い。
- － ダクト自体がコリメータの役目も果たすので熱や放射線を局所化できる。

- デメリット:

- － K1.8D1、Q1 と一体のため交換に手間がかかる。
- － 中心部が高温になるコリメータとの真空のつながりが難しい。
- － ダクトの冷却面積を確保するために大きくなり、荷電 2 次ビームラインが 1 本しか作れない。

一方、真空箱方式のメリット／デメリットをまとめると、

- メリット:

- － 複雑なダクトが不要で、真空シールの数も減る。
- － コリメータや磁石を個別に交換することが可能。
- － 荷電 2 次ビームラインを 2 本作ることが可能。

- デメリット:

- － 巨大な真空容器の中に多くの物を入れるので真空度が悪くなる。
- － 空冷がないので熱の問題が厳しくなる。
- － 下流への熱や放射線が増える。
- － 大電流の電磁石を真空中で運転する必要がある。

特に、1 台しかない 2 次ビーム生成標的をなるべく有効活用したい第 1 期では、設置可能な 2 次ビームラインの本数の違いが最も大きな問題になるだろう。

以上のような比較検討をした結果、T1 ターゲット下流のビームダクトの熱問題の解決策として、我々は真空箱方式を採用することにした。

3.2.2 構造

真空箱でまず考慮しなければならないのが、蓋の構造と位置である。3 m 四方ほどの大きさの蓋で真空をシールしなければならないこと、電力や冷却水の導入端子が並び、ケーブルや配管類の脱着が多く必要であることを考えると、蓋を遮蔽ブロックの下に置くことは出来ない。メンテナンス時の作業者の被曝量を減らすため、ケーブルや水配管のつながりは全てサービススペースで行うようにし、ビームラインとそのサービススペースとの間の遮蔽ブロックも真空容器の中に入れる。交換時の工程数を減らすため、磁石／コリメータとその上の遮蔽ブロックとはできる限り一体のユニットにし、一緒にクレーンで吊り上げられるようにする。

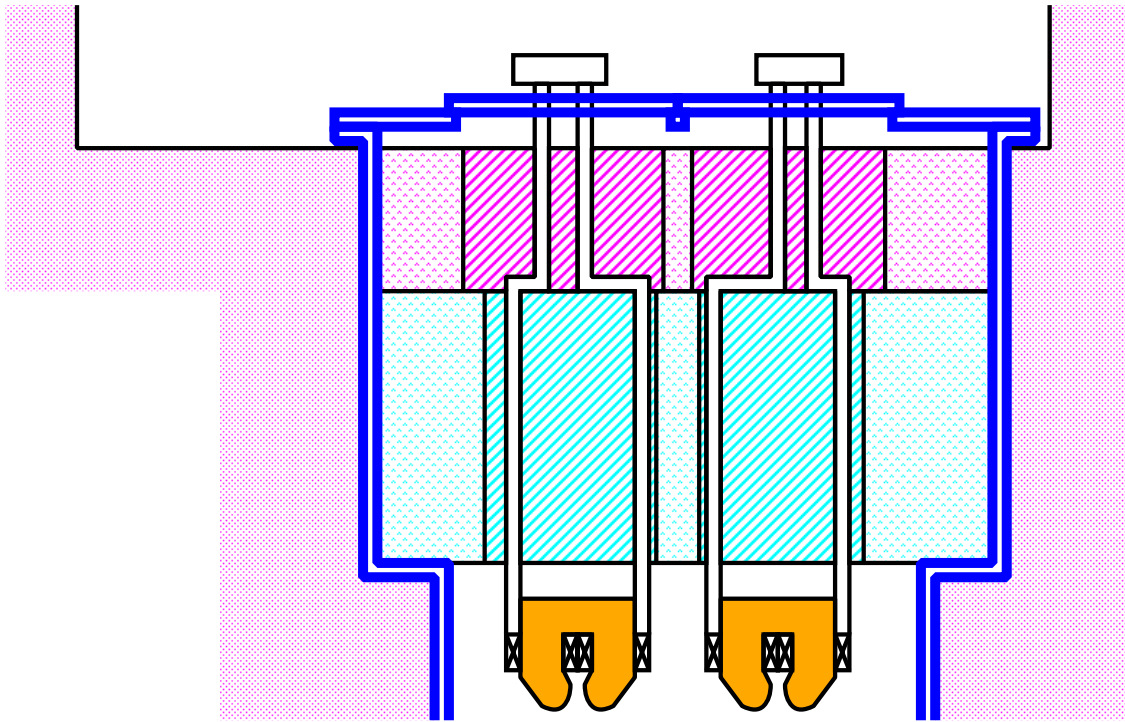


図 5: 「外小蓋方式」の模式図。

蓋の構造については、まず、図 5 のように、全体の大蓋の上に磁石／コリメータ毎の小蓋をのせ、その小蓋に電力や水の真空導入端子を付ける方式が考えられる。この「外小蓋方式」ならば、磁石／コリメータから遮蔽ブロック、導入端子付きの蓋までが全て一体のユニットになるので、交換作業の手順が最も少なくなる。しかし、中性子ストリーミング対策で遮蔽ブロックに迷路構造を作るためには、この方式だと上のブロックを必ず下よりも大きくする必要がある上、小蓋の真空シールしろが必要になるため、どうしても磁石と磁石の間隔が大きくなってしまう。従って、2 次ビームラインの光学から要求される磁石配置を取ることは非常に困難である。

そこで、図 6 のように、いっそのこと小蓋を無くして大蓋だけにし、電力や水は横の壁から入れる方式が考えられた。この「無小蓋方式」では、交換時には最初にまず大蓋が開けられるので、外小蓋方式の場合とは逆に上のブロックを小さくして、その間に別のブロックを積んで迷路構造を作ることができる。そのため、磁石間の間隔を狭くすることが可能である。しかし、水配管のマニホールドやコネクタが真空中に入るため、水漏れや真空度悪化の危険性が高くなってしまう。

これら 2 方式のメリットを併せ持つように考案されたのが、図 7 のような「内小蓋方式」である。小蓋の上に大蓋をのせる形にするため、交換時には最初に大蓋が開けられる。従って、無小蓋方式と同様に遮蔽ブロックの置き方の自由度が高く、狭い間隔で磁石を配置することが可能である。磁石／コリメータと一体になる小蓋に導入端子が付くので、水配管のマニホールドやコネクタも真空の外に出せる。しかし、欠点として、1 台の交換のために全ての小蓋の真

3.1 真空箱

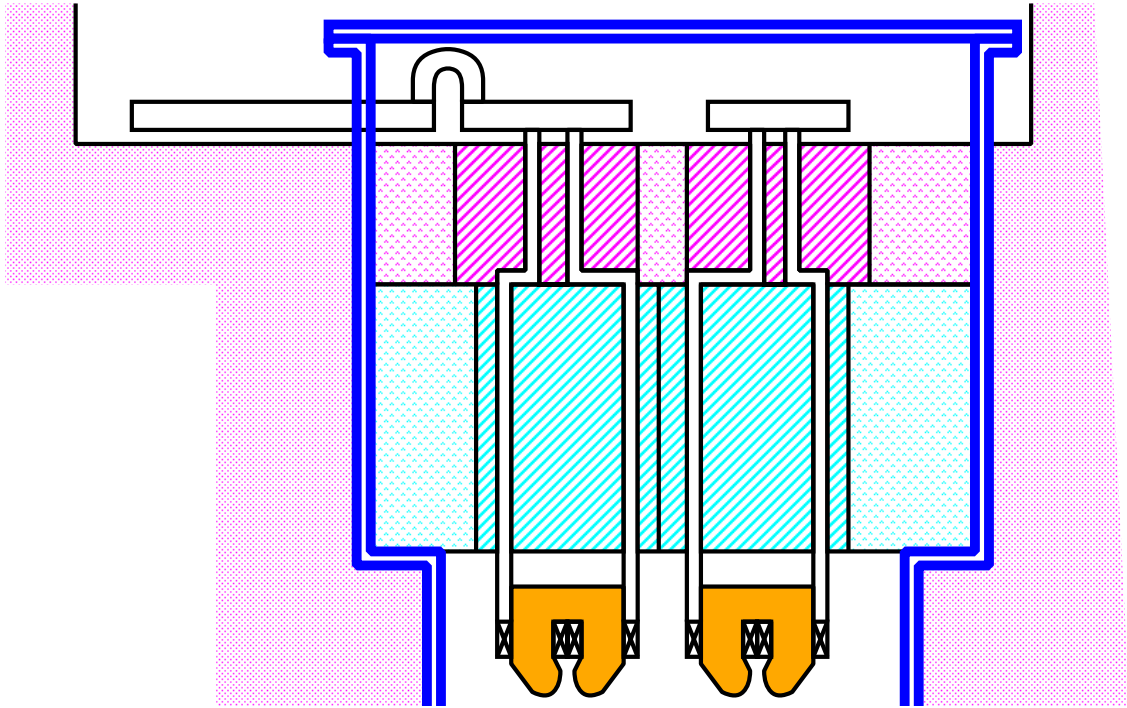


図 6: 「無小蓋方式」の模式図。

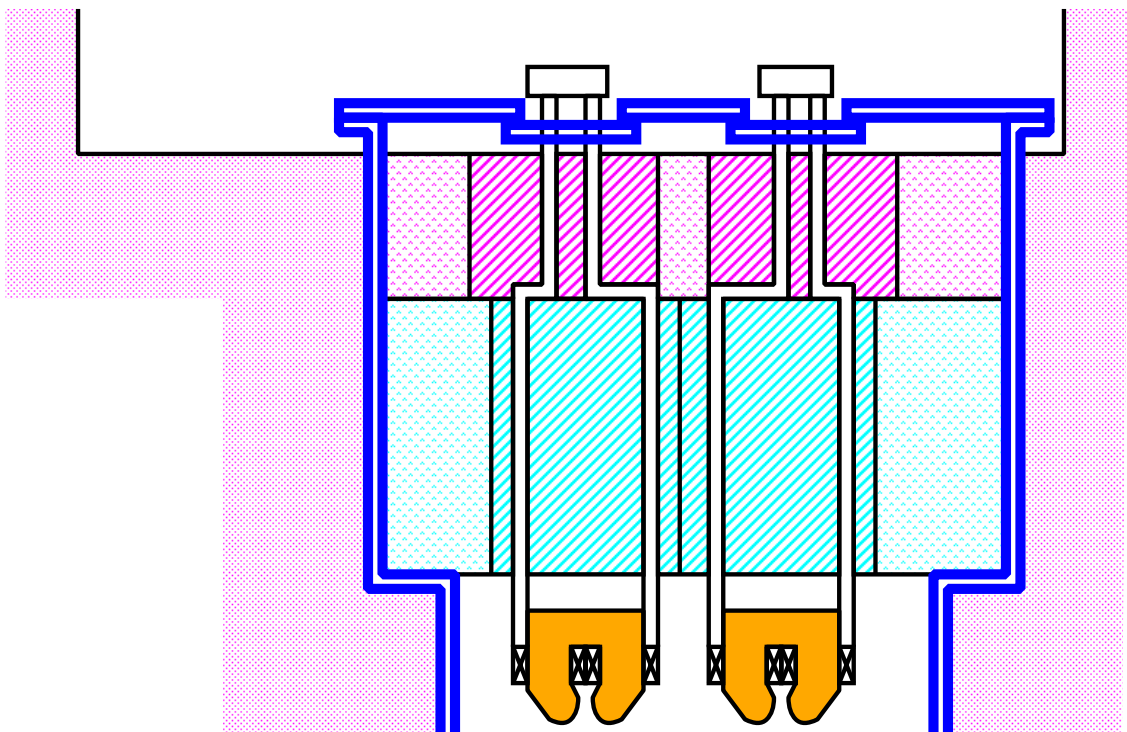


図 7: 「内小蓋方式」の模式図。

空シールを外さなければならなくなるが、外小蓋方式と違って小蓋を小さくできるので、その手間の増え方はそれほど大きくないと思われる。

以上のような真空箱の全体構造を3次元で模式的に表したのが図8である。高さ約5.6 m、1次ビームライン軸方向の長さ約3 m、上流側のビームラインレベルでの幅が約2 mで下流に行くにつれて広がる形をしている。容器内には、コリメータ1台と、4台の2次ビームライン電磁石(K1.8D1、K1.8Q1、K1.1D1、K1.1Q1)が置かれ、それぞれ、その上の高さ3 mの遮蔽ブロックと一体のユニットとなっている。各小蓋と大蓋の高さを合わせるために、小蓋と大蓋の間にはベローズが入る。遮蔽ブロックは下側2 mが鉄で、上1 mがコンクリートである。トンネル内からサービススペースまで放射線が直達しないように、冷却水配管やケーブル、遮蔽体の間のすき間は全て迷路構造を取った。この図では、真空箱の上流側正面の壁が迷路の無い平面になっているが、この箇所は、T1ターゲットとの間の狭いすき間に真空膜一体型ラジアルシールを出し入れするためのガイドレールを作る必要があるため、今後、T1本体、ラジアルシールの開発と合わせて検討していく必要がある。

遮蔽体上部のコンクリートブロックについては、放出ガスを減らすため、アルミ容器の中にコンクリートを詰めた物にする。ただし、コンクリートがアルカリ性であるため、アルミと反応して水素が発生するのを防ぐ必要があり、アルミ容器の内面に適当な処理を施さなければならない。簡単のためにコンクリートではなくアルミブロックにすることも考えられるが、そうするとコンクリートブロックの場合よりも真空箱の蓋やサービススペース内の水配管等の放射化が2桁高くなってしまうので、遮蔽体としてはコンクリートの方が適している。

真空箱本体の壁の材質は、今のところ、耐食性や加工性、コストの点からSUSを考えている。この壁自体もビームによって発熱するため、ビーム軸と交わる面はなるべく薄くし、リブを付けて強度を持たせる構造にした上で、少なくともビームラインレベルの面は水冷する必要がある。

ポンプはスクロールポンプとメカニカルブースターポンプの2段構造を用い、真空度は1 Pa以下にする。真空槽内にヘリウムを充填することも検討したが、次のような理由により、我々の用途には適さないと判断した。まず、ヘリウムを充填した場合のデメリットとして、以下の点が挙げられる。

- 1次ビームライン側の出口に膜が必要になる。
- トリチウムが生成される。
- 2次ビームの K/π 比の悪化を防ぐため、ヘリウムでも 10^2 Pa 以下にする必要がある。
- 上記のトリチウムと圧力の問題から、真空に引くための装置とヘリウムの循環制御装置の両方が必要になる。
- 低真空領域では空気よりもヘリウムの方が放電開始電圧が低くなる。

一方、ヘリウムを充填するメリットとしては内容物の冷却が考えられるが、これも圧力を 10^2 Pa 以下に下げなければならないとなるとほとんど期待できなくなる。したがって、ヘリウムで満たすメリットよりもデメリットの方が多く、真空のままで運転した方が良い。

3.1 真空箱

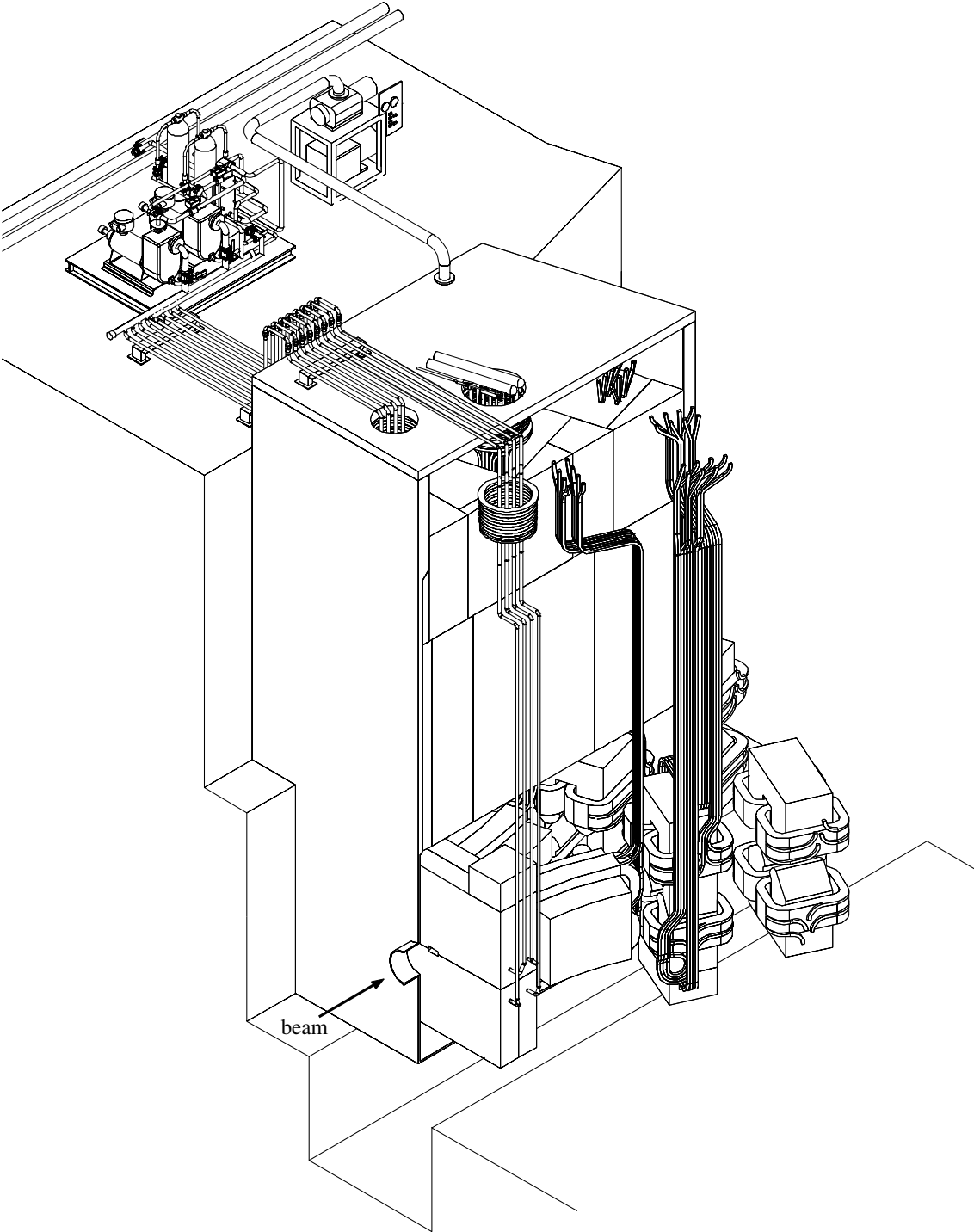


图 8: 真空容器内部鸟瞰图。

この真空箱については、まだ概念設計の段階であり、今後、内部に収容する磁石、コリメータの具体的な設計と合わせて、箱の壁や蓋の構造の詳細設計、強度計算や熱計算をしていかななくてはならない。また、それと共に、東カウンターホール内に真空箱と内部収容物のモックアップを作り、各部の構造や設置方法、メンテナンス性などの試験も行う必要がある。

3.2.3 真空中での電磁石励磁試験

真空箱方式の最大のポイントは磁石を全て真空中に入れることであるが、2000 ～ 3000 A クラスの大電流を流す電磁石を真空中で安定に動作させることができるかどうか、実際に励磁試験を行った。

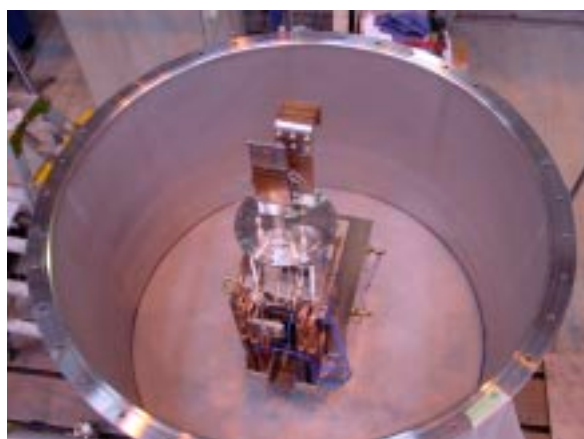


図 9: 真空容器内部。



図 10: 真空容器全体。



図 11: 真空容器の蓋。



図 12: 導入端子付き小蓋。

実験に使用したのは、直径 2 m、高さ 1.2 m の真空容器と 4D212MIC 磁石である。磁石の鉄芯には防錆塗料が塗られていたが、真空中に入れるために塗料を全てはがし、代わりに化学ニッケルメッキをした。実機の真空箱と同じように内小蓋方式を採用し、小蓋には電力、水、

3.1 真空箱

信号の導入端子を2個ずつ付けた。この電力と水の導入端子は、12 GeV PS K5 ビームラインのQ1磁石のコンクリート絶縁コイルに使われたものである[6]。図9から図12が、実験機材の写真である。容器の蓋を閉めて、ロータリーポンプとメカニカルブースターポンプで真空に引き、その中で磁石を励磁して磁場と各部の温度を測定した。また、真空をリークして大気圧に戻した状態で同じ測定を行い、結果を比較した。

磁石とその周囲には全部で13個のK型熱電対を取り付け、温度を測定した。その内の代表的な箇所として、以下の点の温度の測定結果を図13、14に示す。

bus bar	: 左右のコイルのつながりのブスバー
HC in	: 水入口側のコイル端末部ホロコン
HC out	: 水出口側のコイル端末部ホロコン
pole piece	: ポールピース
air in	: 真空容器内 (小蓋と磁石の間) の気温
air out	: 真空容器外の気温

真空中で運転した場合は大気中で運転した場合よりも各部の温度が上昇したが、3000 A 流した時のブスバーの温度でも約 3 °C 高い程度であった。なお、今回は熱電対用の真空導入端子は使わずに手元にあったシグナル線用の導入端子を用いたが、そのコネクタを介したものと介さないものとの同じ点を同時に測定した結果、最大でも 1 °C 程度の違いしかなかった。今回の実験にはこの程度ならば実用上問題ないと判断したが、コネクタ部の温度によって結果が変わり得るので、実機で温度をモニターするには熱電対用の真空導入端子を用いた方が良いと思われる。

真空度は約 4×10^{-1} Pa で、通電すると一時悪くなったが、そのまま引き続けるとまた回復した。これは、コイル温度の上昇によりガス放出が増えたためと思われる。

表 1: 大気中と真空中での磁場測定結果。

雰囲気	大気			真空		
設定電流 (A)	3000	2000	1000	3000	2000	1000
コイル電圧 (V)	31.02	19.92	9.70	31.11	20.01	9.72
ホール電圧 (mV)	1271	1016	621	1260	1008	616

大気中運転、真空中運転共に、一度 3000 A まで電流を上げた後、電流を下げながら、ポール表面の磁場をホール素子で測定した。表1がその結果である。ホール電圧 1 mV が約 1 mT である。コイル電圧は、蓋の導入端子のところで測定した。大気中よりも真空中で励磁した方が 1 % 程度、ホール素子の出力電圧が低かった。これは定電流モードでの結果であるが、電源を定電圧モードに切替えて運転しても、同様に 1 % ほど真空中の方がホール電圧が低い結果が得られた。真空中でグロー放電等を起こして、コイル以外の電流経路ができたりしていないか調べるために、コイル端末部のブスバー間にアクリルの板をはさんだり、ホロコンをカプトンシートで包んだりしてみたが、結果は変わらなかった。また、導入端子のところだけでな

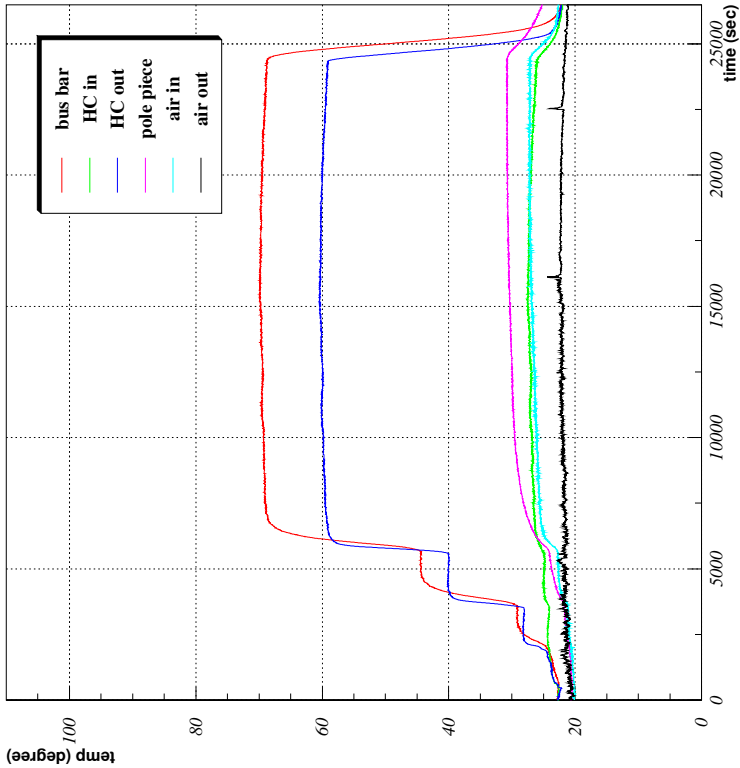


図 14: 真空中で運転したときの各部の温度。

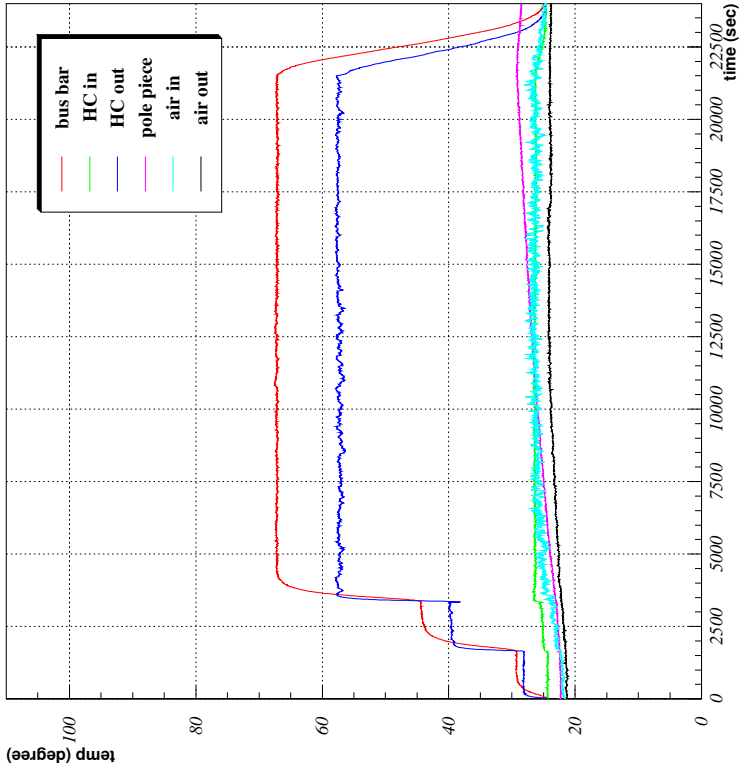


図 13: 大気中で運転した時の各部の温度。

3.1 真空箱

く、真空中のコイルの端末のところでも両端の電圧を測ってみたが、大気中と真空中とでコイル両端の電圧は 0.1 % の精度で一致するにも関わらず、やはりホール電圧だけは真空中の方が低かった。

以上のことから、一番疑われるのがホール素子による磁場の測定方法の問題である。実際、永久磁石の磁場を大気中と真空中とで測定した場合も、同様に真空中の方がホール電圧が低いという結果が得られた。空気への放熱がない真空中では、測定中電流が流れ続けるホール素子の温度が上がっている可能性が高い。電磁石の磁場測定と同時にホール素子の温度も測定したところ、3000 A 通電時に真空中の方がホール素子の温度が約 7 °C 高かった。カタログによれば、使用したホール素子の温度特性は最大 $-0.06 \text{ \%}/\text{K}$ なので、これだけでは 1 % までの違いが説明できないが、ホール素子をマイラーテープで張り付けた上に熱電対を当てていたので、ホール素子は実際には測定値以上に熱くなっていた可能性もある。さらにホール素子だけでなく、それにつながっている導線や真空導入端子の抵抗の温度依存性も関係しているかもしれない。

そこで我々は現在、常に同じ条件で磁場を測定できるように、磁極の内側にアルミの箱を入れ、その中をフレキシブル配管等で真空容器の外とつなげることで、磁石のコイルは真空中でも磁場を測るところは大気のままにする、という測定方法の準備を進めているところである。この方法ならば、ホール素子だけでなく NMR での測定も可能になるので、本当に真空中の方が磁場強度が小さいのか、あるいはこれまでの測定の仕方の問題なのか、決着を付けることができるだろう。

3.3 コリメータ

コリメータの役割は、単にビームライン機器を熱と放射線から守るだけでなく、放射線発生源を局所化させ、下流の放射線遮蔽が少なく済むようにする役目もある。コリメータに十分な厚さを持たせないと、コリメータが遮る放射線量よりもコリメータ自身が散乱体となってそこから生じる放射線量の方が多くなってしまい、後者の役割を果たせなくなる。また熱的にも、冷却面積が大きく取れる分、厚みのある方が有利である。しかし、2次ビームラインのアクセプタンスを稼ぐために、T1 ターゲットと2次ビームライン最初の電磁石との間の距離は出来る限り (1.2 m 以下) 近づける必要があり、その間に設置されるコリメータはあまり厚く出来ない。そこで、T1 下流に設置するコリメータは、2次ビームライン磁石 (K1.8D1 及び K1.1D1) の前に置かれる第1コリメータと、1次ビームラインでT1直後の磁石 (q1B) の前に置かれる第2コリメータの2台にし、第1コリメータは主に2次ビームライン磁石を熱と放射線から守り、第2コリメータは主にそれより下流の放射線量を減らす、というように機能を分散させることにした。

第1コリメータは、T1の下流 50 cm に置かれ、全体の高さ 150 cm、幅 150 cm、厚さ 40 cm の大きさを持つ。トリチウム生成の問題から冷却水をビームから遠ざける必要があるので、離れたところからでも中心付近の除熱を十分にできるように、熱伝導の良い無酸素銅を用いる。第5章のビームダンプのところで詳しく述べるが、入手できる銅ブロックの最大寸法に限りがあるので、現在のところ、150 cm × 75 cm × 20 cm の銅ブロックを上下もしくは左右に2枚、ビーム軸方向に2層の、計4枚組み合わせることを考えている。中央には、1次陽子ビームと、K1.8とK1.1の2次荷電ビームが通る穴を空ける。2本の荷電2次ビームラインの取り出し角は共に 6° で、アクセプタンスは水平方向に ± 50 mrad、垂直方向に ± 10 mrad であるので、1次陽子ビームのサイズも考慮すると、コリメータの穴の大きさは上流側で水平 160 mm、垂直 17 mm、下流側で水平 290 mm、垂直 25 mm 必要である。しかし、これだけの狭い穴だと、コリメータの中心部の最大温度が 400 °C 近くになり、熱応力により破壊が起きる恐れがあるので、水平方向の穴の幅は上記の通りだが、垂直方向を上流側で 32 mm、下流側で 44 mm と、必要なアクセプタンスの約倍まで広げた。また、これとは別に、KL ビームライン用に、16° の取り出し方向に $\phi 10$ mm の穴も空ける。

この第1コリメータの温度と熱応力を評価するため、MARS と ANSYS を用いた計算を行った。まず、MARS で散乱粒子によってコリメータに落ちる熱量を計算し、そのデータを用いて ANSYS による有限要素法解析により温度と変位、熱応力を求めた。冷却は、周囲を 1000 W/m²K で水冷している。真空中に置いているため、それ以外の面での熱伝達は無いが、輻射率を 0.85 として輻射による熱伝播も計算に入れた。

MARS シミュレーションの結果、50 GeV、15 μ A 運転時には、第1コリメータ全体で 64 kW ものビーム発熱が起ることが分かった。ここで得られた発熱分布と先に述べた冷却条件を用いて ANSYS で熱計算をした結果が図 1 である。対称性から上半分のみ図示しており、それを斜め下から見上げた図になっている。側面を 1000 W/m²K で水冷することで、中心部の最高温度を 300 °C 以下、冷却面の表面温度を 100 °C 以下にすることが出来ている。

次に、このような温度分布になったときの、熱膨張による変位の分布を示したのが図 2 である。ここで、ブロックは上下に二分割してある。中心部が高温になって膨張するため、上下の

3.3 コリメータ

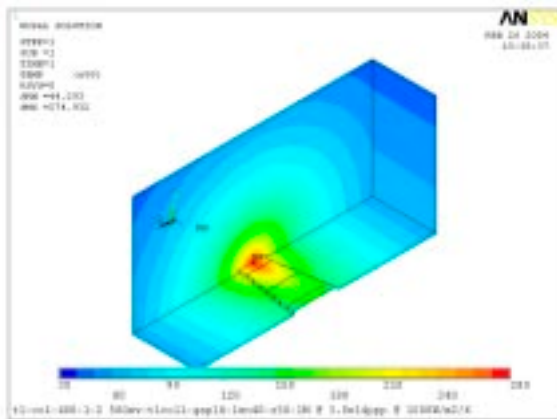


図 1: T1 第1 コリメータの温度分布。

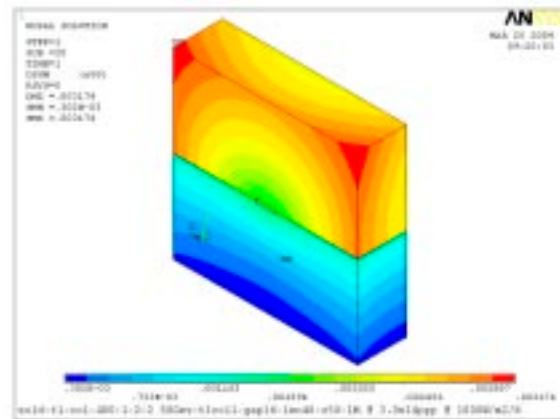


図 2: T1 第1 コリメータの変位量分布。

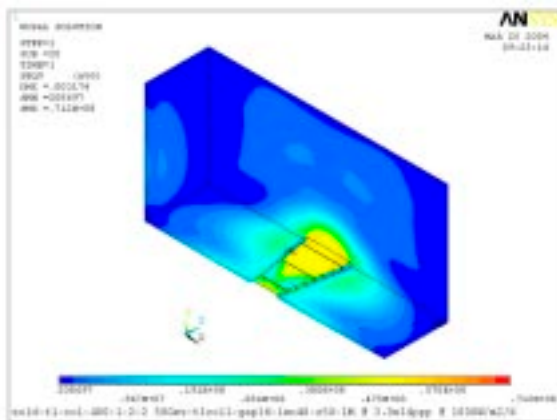


図 3: T1 第1 コリメータの上半分の熱応力分布。

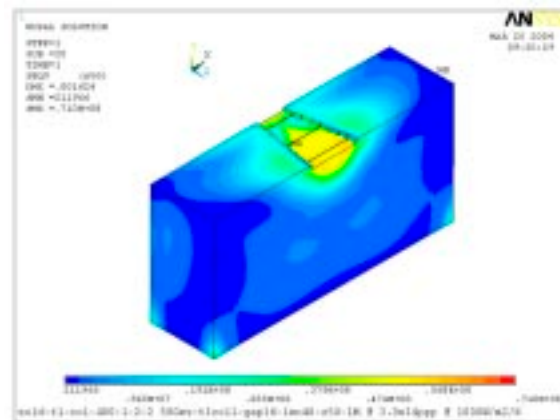


図 4: T1 第1 コリメータの下半分の熱応力分布。

ブロックが反るように変形している。このときの熱応力を計算すると、図 3、図 4 のようになった。計算モデルのメッシュの角のところで最大 70 MPa にまでなっているが、これは実際には R を付けることで、局所的に応力が集中するのを避けることが出来ると思われる。しかし、そのような角の部分を除いたとしても、中心部で 60 MPa 弱と、300 °C における無酸素銅の耐力 50 MPa を越えてしまっている。この最大応力の値は、周囲の冷却の熱伝達係数を倍の 2000 W/m²K にしたり、コリメータの寸法を小さくして中心部から冷却面までを近づけたりして中心の最高温度を下げても、ほとんど変わらなかった。今後、ブロックの分割方法を工夫して熱応力を小さくするか、あるいは材質を強度の高い銅合金に変えて熱応力に耐えられるようにしなければならない。

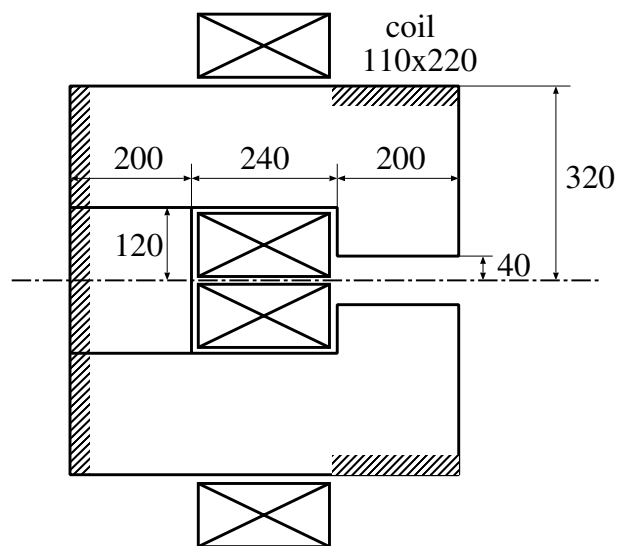


図 5: K1.8D1 磁石の模式図。斜線部は水冷する面。

この第 1 コリメータによって守られる 2 次ビームライン磁石の温度も同時に評価した。K1.8 ビームラインの最上流磁石 D1 は図 5 のような C 型偏向磁石である。磁極の細かい形状等は今後磁場計算をしながら設計する必要があるが、今回はこのような簡単なモデルで熱計算を行った。図のようなコイルの巻き方になっているのは、K1.1D1 磁石と並んで設置されるために横方向のスペースが非常に限られているからである。コリメータに守られているとは言え、この K1.8D1 には全体で 3 kW 以上の熱が落ちるので、磁石の鉄自体も水冷する必要がある。トリチウム生成の問題でビームに近いところは水冷できないため、図 5 に斜線で示したように、リターンヨークの側面や磁極の真上／真下の面を水冷する。最も高温になるのは一番ビームに近い上流側の磁極の角なので、そこから冷却面までは継目の無いような構造にしなければならない。

実際は、コリメータは 1 次ビームラインに対して垂直に置かれ、K1.8D1 は 2 次ビームの取り出し方向に対して垂直に置かれるが、今回の計算では、簡単のため、両者とも K1.8 ビームラインの取り出し方向に対して垂直に置き、逆に 1 次陽子ビームを 6° 傾けて入射させるようにした。ANSYS による計算結果を図 6 に示す。対称性から上半分のみのモデルとなっている。100 °C 程度の温度では輻射の影響はほとんど無いので、この計算では輻射は考慮に入れていない。

3.3 コリメータ

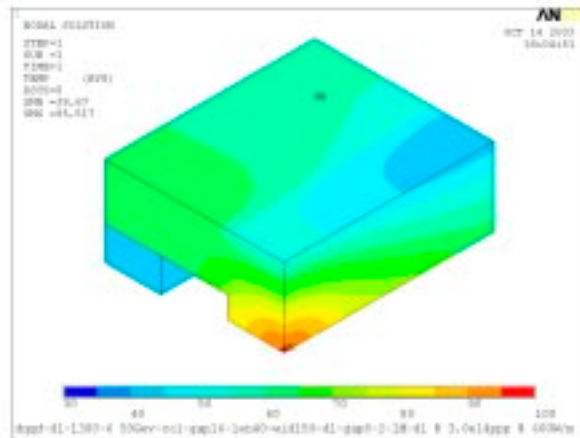


図 6: K1.8D1 磁石の温度分布。対称性から上半分だけのモデルとなっている。磁極の真上とリターンヨークの側面のみ $600 \text{ W/m}^2\text{K}$ で水冷した場合。

コリメータで散乱粒子を遮断したおかげで、鉄芯の温度が最高でも 100°C 以下に抑えられており、これならば安定した運転が可能であると思われる。

第2コリメータは、T1 から 4.5 m 下流に 1 m の厚さで置かれる。高さと幅の外形寸法は、2次ビームラインの磁石との位置関係を考慮に入れて決めなければならないが、今回の計算では、簡単のため $\phi 80 \text{ cm}$ の円柱形としている。穴の大きさは、1次陽子ビームの形状に合わせて上流側で $\phi 70 \text{ mm}$ 、下流側で $\phi 82 \text{ mm}$ のテーパ型になっている。第2コリメータにも全体で 70 kW の熱が落ちるので、熱伝導の良い銅を用い、周囲を水冷する必要がある。

第2コリメータの ANSYS での温度評価では、ビームダクトや真空箱の下流側の面も同時に計算した。真空箱の壁は厚さ 6 mm の SUS、ビームダクトは厚さ 5 mm のアルミで、真空箱と第2コリメータ間は $\phi 40 \text{ cm}$ 、第2コリメータの下流は $\phi 20 \text{ cm}$ の径にしている。また、真空箱とダクト、第2コリメータとダクトの間には、真空シールのフランジを想定して、厚さ 2 cm の肉厚の箇所を設けた。フランジとフランジとは、実際にはシール材のわずかな接触面積でのみ熱伝達が起こるため、熱の伝わり方は悪いはずであるが、今回の計算では、とりあえず厚さの 0.5 mm の部分だけ接するようにして、比較的熱伝播が小さいようなモデルにした。真空箱の外面のビーム軸より 60 cm 以上離れた部分と第2コリメータの側面は $600 \text{ W/m}^2\text{K}$ で水冷し、それ以外の外面は $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ で空冷したという条件で計算した。

その結果が図 7 である。円柱対称モデルで計算したので、 $1/4$ のモデルのみ図示している。第2コリメータの中心部の最高温度は約 150°C で水冷面も 100°C 以下なので、コリメータ自体の温度としては問題ないと思われるが、フランジが最高 150°C に達しているのは、ダクトやシール材の強度に問題が出る可能性がある。ビームダクトについては詳しくは 4.2 節で述べるが、さらに径を大きくして温度を下げることは可能か、あるいはフランジを水冷した場合のトリチウム生成量はどのくらいか等、今後さらに検討をする必要がある。

3. T1標的とその周辺

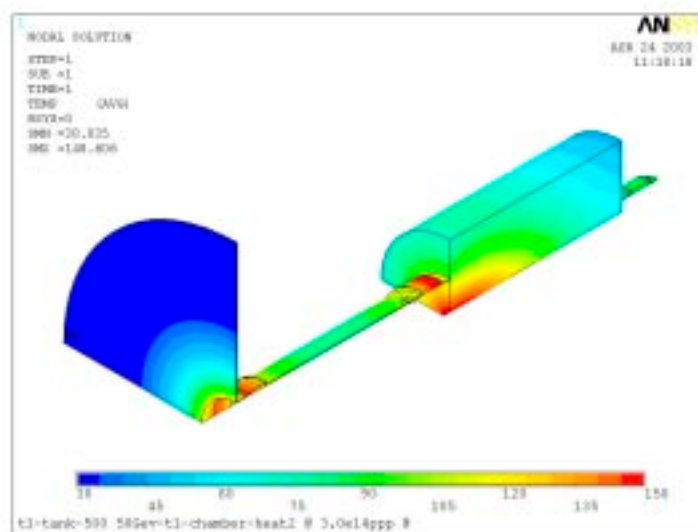


図 7: 真空箱の下流側の壁から T1 第 2 コリメータまでの温度分布。

3.3 コリメータ

4. 真空と膜

4.1. 真空膜

4.1.1. スイッチヤード真空膜

遅い取り出しビームラインの真空系では、ビームが一過性であること、放射化によるメンテナンスの難しさなどを考慮して、おおむね 1 Pa 程度の真空レベルが想定されている。それに対して、J-PARC の 50 GeV 陽子シンクロトロンリングでは、 10^{-6} Pa の真空レベルが想定されているので、図 1 に示すように、ビームの取り出し点からおよそ 40 m 進んだところに、薄い金属性の真空膜 (SY 真空膜) を置くことで、リングと取り出しビームラインの異なる真空レベルを共存させる。SY 真空膜の下流では、ロータリーポンプにより 1 Pa 程度の真空レベルが保たれるのに対して、SY 真空膜の上流では、ターボ及びイオンポンプを用いて、膜から取り出し点まで、 10^{-4} Pa から 10^{-6} Pa の真空レベルの勾配をつけて、リングに接続する。これらの区間では、真空チェンバーは、アルミもしくはチタンもしくは SUS 製の内径 20 cm のものが使用され、それらの接続には、ピローシールやラジアルシールなどの、リモートで交換可能なシール機構が採用される予定である。また、万が一に SY 真空膜が破れた場合に対処するため、SY 真空膜の上流 30 m 付近に、反応時間が 40 ms 程度の緊急遮断バルブを置き、膜から音速 ($350\text{ m/s}\sim 570\text{ m/s}$) で到達するガス分子を遮断できるようにする。

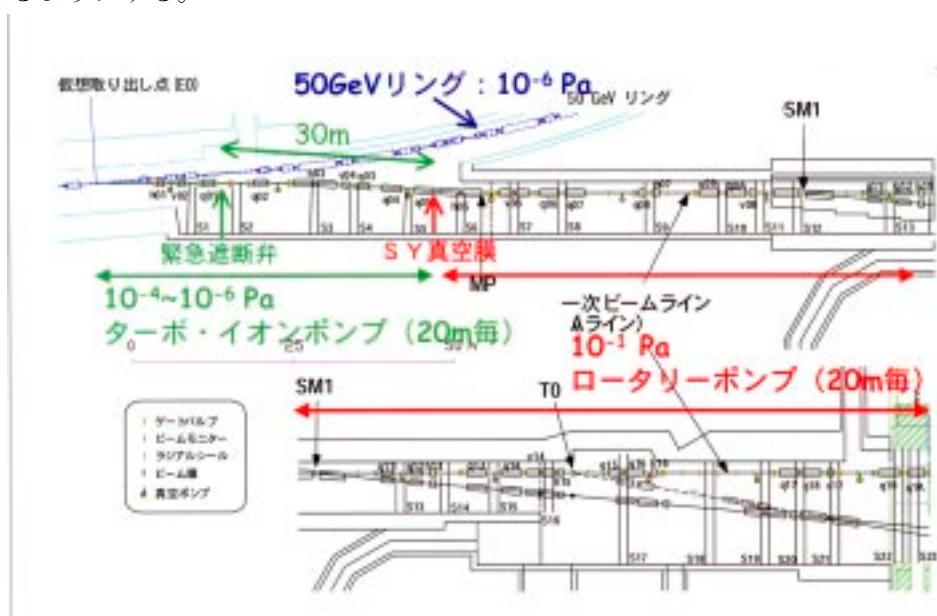


図 1 スイッチヤード内のビームラインとその真空

4.1 真空膜

SY 真空膜では、そこでのビームロスを最小に押さえるため、その両側に大きな圧力差がかからないことを保障しつつ非常に薄い金属膜を採用する必要がある。現時点では、100ミクロン厚、直径20cmのアルミ合金製の膜を考えている。この膜におけるビームの大きさは、 σ が約1cm程度で、落ちる全エネルギーは、MARSによると1スプル（3.4秒）あたり3.5J程度であり、外周部を水冷または空冷することで温度を固定すると、中心部の平均温度上昇は16度程度となり、十分低い。同じ厚みのSUSの場合は480度の温度上昇となる。図2-(A)に、アルミ膜に落ちるエネルギーの半径方向の分布を、図2-(B)に、MARSによる温度上昇の二次元分布を示す。

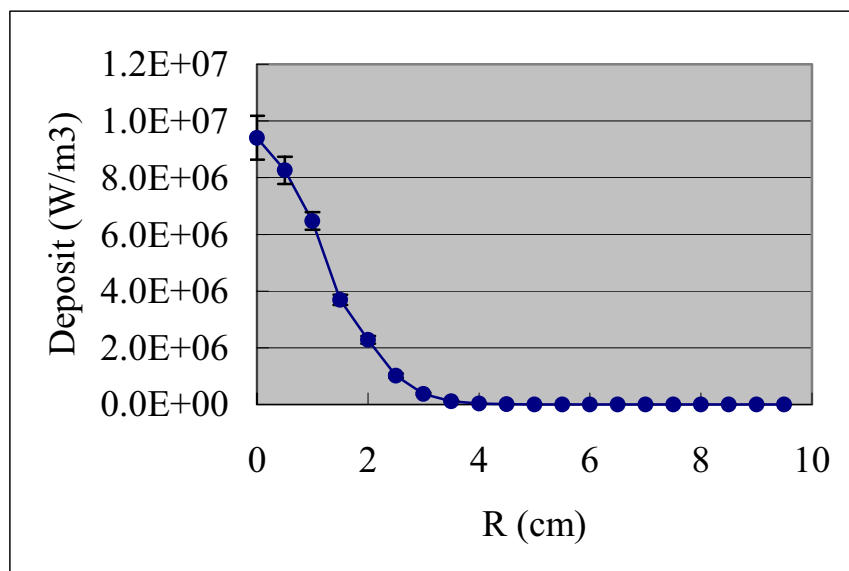


図2-(A) SY 真空膜（アルミ）に落ちるエネルギー分布

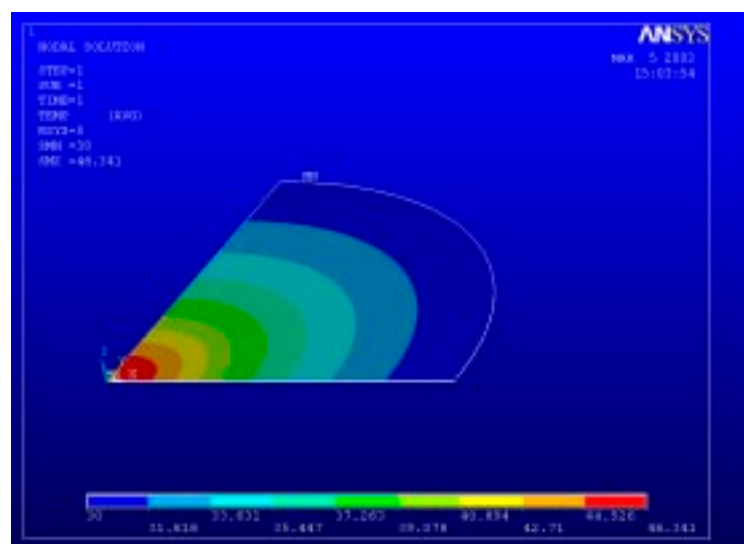


図2-(B) SY 真空膜（アルミ）の温度上昇の二次元分布

4. 真空と膜

実際には、3.4秒のスパイル間隔のうち、ビームが通過する約0.7秒は過熱され、残りの2.7秒の間に冷却されるという温度サイクルを繰り返すことになる。図3-(A)にアルミ膜の、図3-(B)にSUS膜の中心部温度の時間変化を示す。アルミ膜の場合は、約1分後に平均的には16度上昇の状態に落ち着き、その場合の温度サイクルは±4度程度である。それに対して、SUS膜の場合は、約20分後に平均480度上昇の状態に落ち着き、その場合の温度サイクルは±10度程度である。

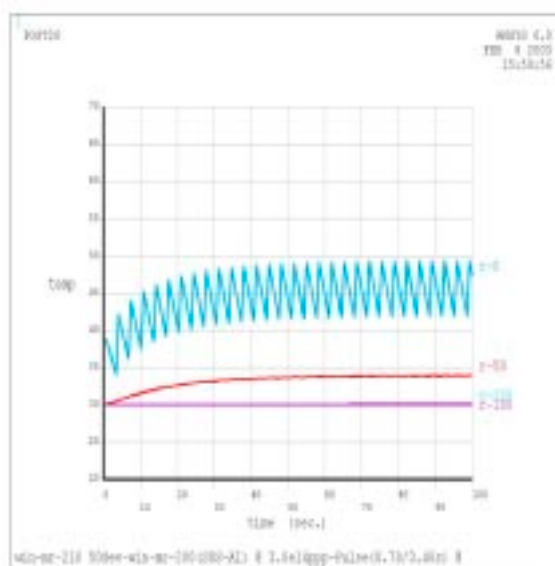


図3-(A) SY 真空膜（アルミ）の中心部温度の時間変化

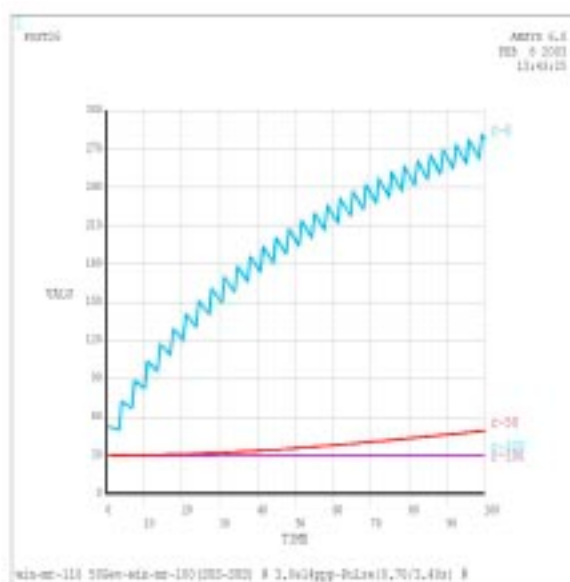


図3-(B) SY 真空膜（SUS）の中心部温度の時間変化

4.1 真空膜

4. 1. 2 T1 標的前後の真空膜

スイッチヤードからハドロン実験施設への遅い取り出しビームラインは、図4-(A)、図4-(B)、図5に示すように、T1 と呼ばれる標的の収納容器に接続されるが、その容器内は1気圧の空気が充填される。また、T1 標的容器の後方には、コリメータと二次ビームラインへの振り分け電磁石 (D1 及び Q1) が収納される真空箱が接続され、その内部は1Pa程度の真空中に保持される。したがって、T1 標的容器の前後にそれぞれ、真空と1気圧の空気とを遮断する膜、T1 上流膜と T1 下流膜が必要になる。また、K1.8 と呼ばれる二次ビームラインの真空が 10^{-4} Pa 程度なので真空箱と K1.8 ビームラインの間に真空レベルの差を共存させるための薄い金属膜 (K1.8 真空膜) が必要となる。また、ビームダンプ手前ではダンプが低圧空気雰囲気であることを考えると、大気圧に耐える金属膜 (ダンプライン真空膜) が必要となる。これらの点は、現在検討中である。

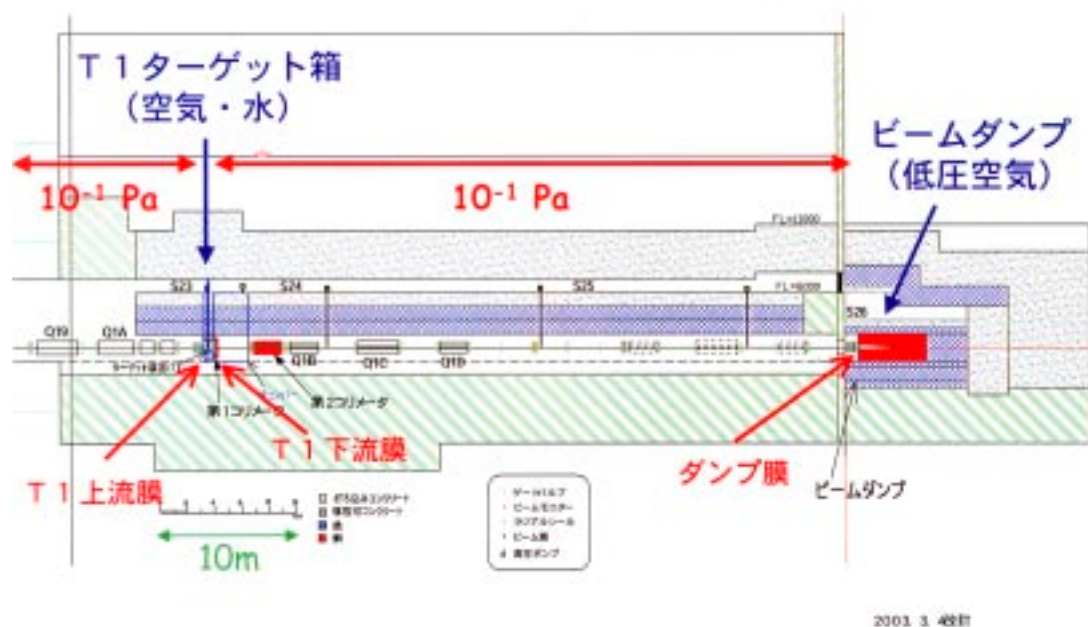


図4-(A) K ホール内のビームラインとその真空

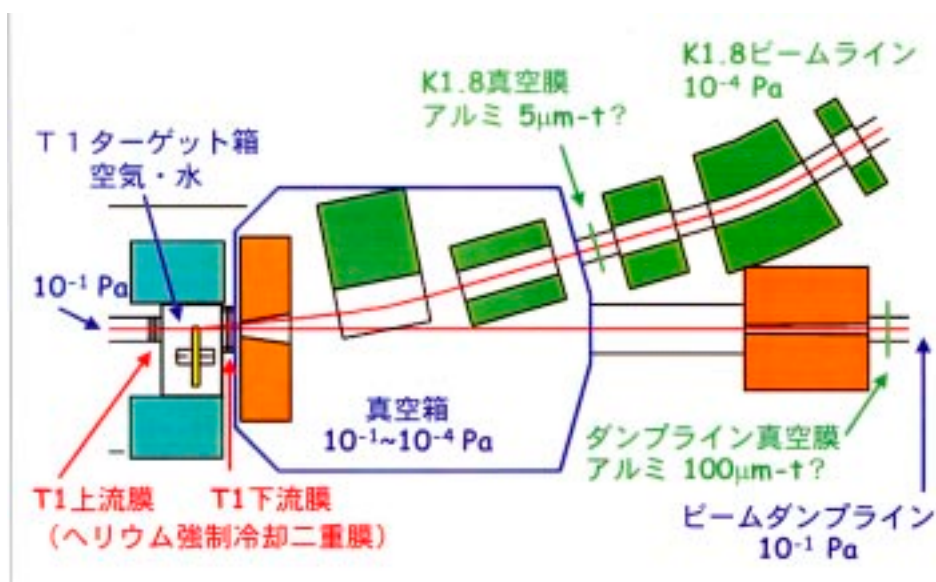


図4-(B) T1 標的容器、真空箱と真空膜

T1 標的は、高速に回転する円盤が想定されており、図5に示すように、下部が水によって冷却される。円盤の回転にともなって、冷却水が跳ね上げられるので、T1 上流膜や T1 下流膜にはその水が降りかかるが、その水には、空気の放射化により発生する NO_x に起因する硝酸が含まれていることが考えられるので、膜の材質は、腐食に強い物質でなければならない。現時点では、その材質として SUS が想定されている。

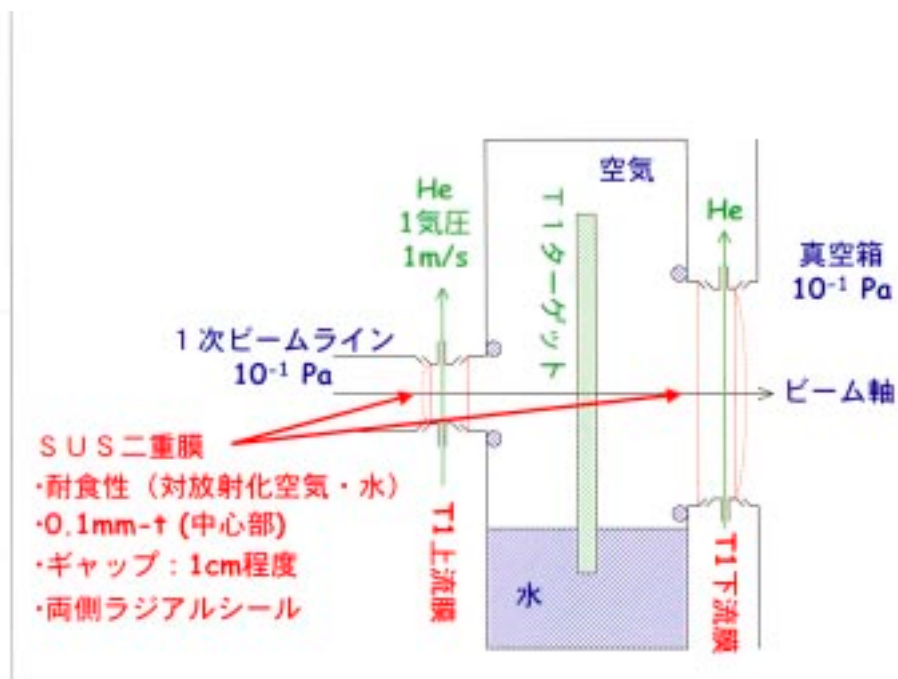


図5 T1 標的容器と T1 上流膜、T1 下流膜

4.1 真空膜

一方、標的の前後に厚い物質を入れると、後方の二次ビームラインから見て標的が点光源として扱えなくなり、実験の性能を落とすことになり、望ましくない。したがって、T1上流膜や T1 下流膜は、可能な限り薄いことが望ましいが、現実的な厚みとしては 0.1 mm 程度である。

4. 1. 3 T1 上流膜

T1 標的の位置では、ビームは σ が数 mm に絞られており、T1 上流膜の大きさは直径 10 cm が想定される。厚さ 0.1 mm の SUS を仮定すると、落ちる全エネルギーは、MARS によると 1 スピルあたり 9.2 J 程度であるが、外周部を水冷または空冷することで温度を固定しても、熱抵抗により、中心部の平均温度上昇は 500 度以上にも達し、耐えられない温度となる。したがって、膜の外周部だけでなく、何らかの方法で側面を冷却する必要がある。すなわち、膜を二重化し、その間にガスや液体を流すことで膜を冷却することが考えられる。液体を使用すると、ビームが貫通するため、放射化の問題が発生するので、密度が低いガスが望ましい。ガスの中では、比熱が大きく、冷却能力の高いヘリウムが最も適している。そこで、図 5 に示したように、間隔が 1 cm 程度の SUS の二重膜を構成し、その間にヘリウムガスを流すことで膜を冷却するが、二重膜の内、上流側の膜では、上流側は真空、下流側には 1 気圧程度のヘリウムガスが流れており、差圧 1 気圧が膜にかかることになる。直径 10 cm の場合、厚さが 0.1 mm で均一で平板な膜を想定すると、その差圧 1 気圧により、中心部は上流側に 2.1 mm 変形し、そこでの応力は 310 MPa、端部では 1000 MPa に達するので、SUS の引っ張り強さ 500 MPa を超え、破壊されてしまう。それに対して、ビームが貫通する中心部は 0.1 mm のままであるが、周辺部に行くに従って、徐々に厚くなる膜を用いれば、変形や応力を小さくすることができる。図 6-(A) に、想定される T1 上流膜の厚みの半径依存性を、図 6-(B) に、その膜に落ちるエネルギー分布を示す。又、図 6-(C) に、アルミニウムを用いた T1 上流膜の試作品の写真を示す。

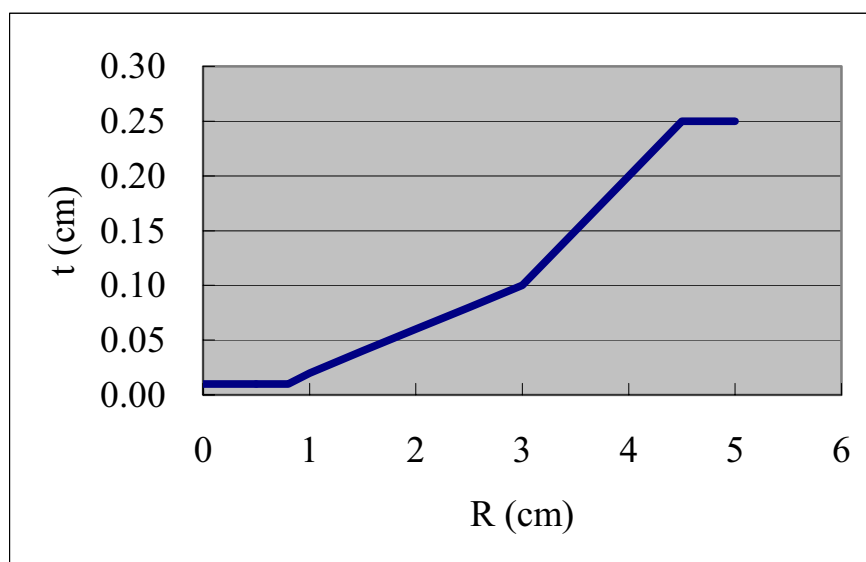


図 6-(A) T1 上流膜の厚みの半径依存性

4.1 真空膜

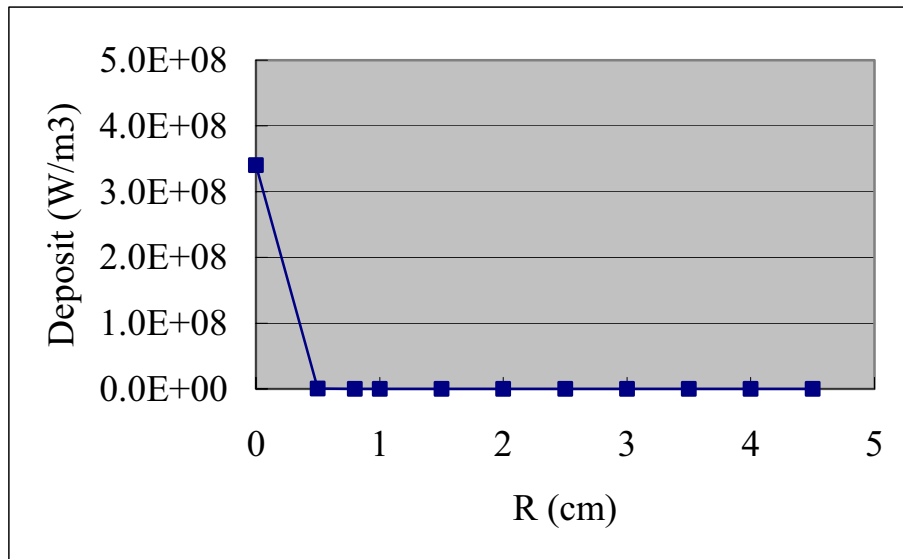


図 6 -(B) T1 上流膜に落ちるエネルギー

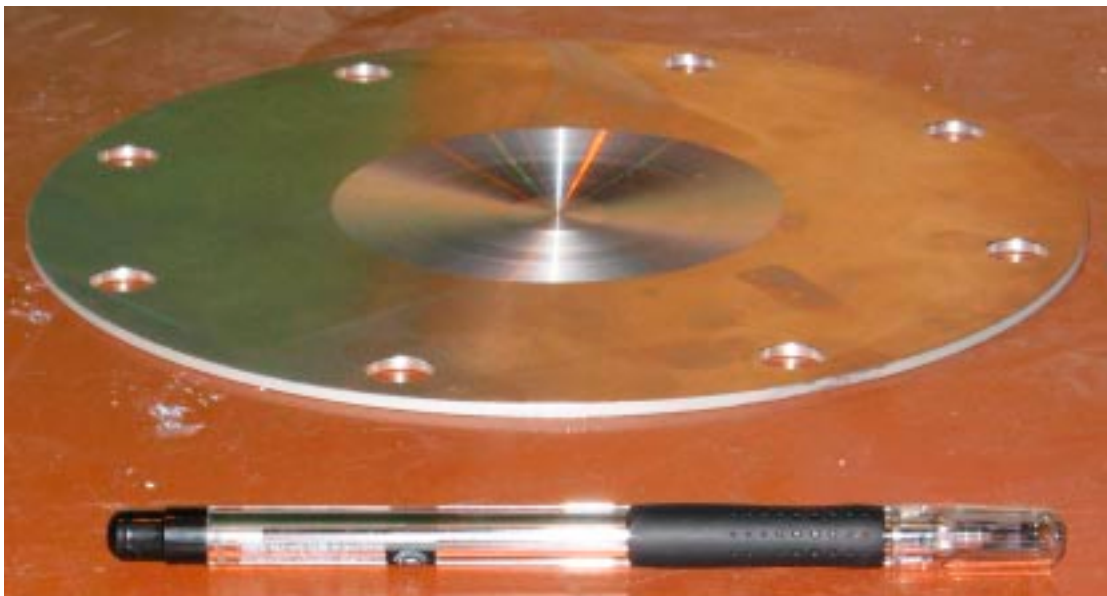


図 6 -(C) アルミニウムを用いた T1 上流膜の試作品

また、図 7 -(A)と図 7 -(B)に示すように、この膜の差圧 1 気圧による変形は 0.7 mm 程度、最大応力は中心部で発生し、200 MPa 程度に抑えられている。

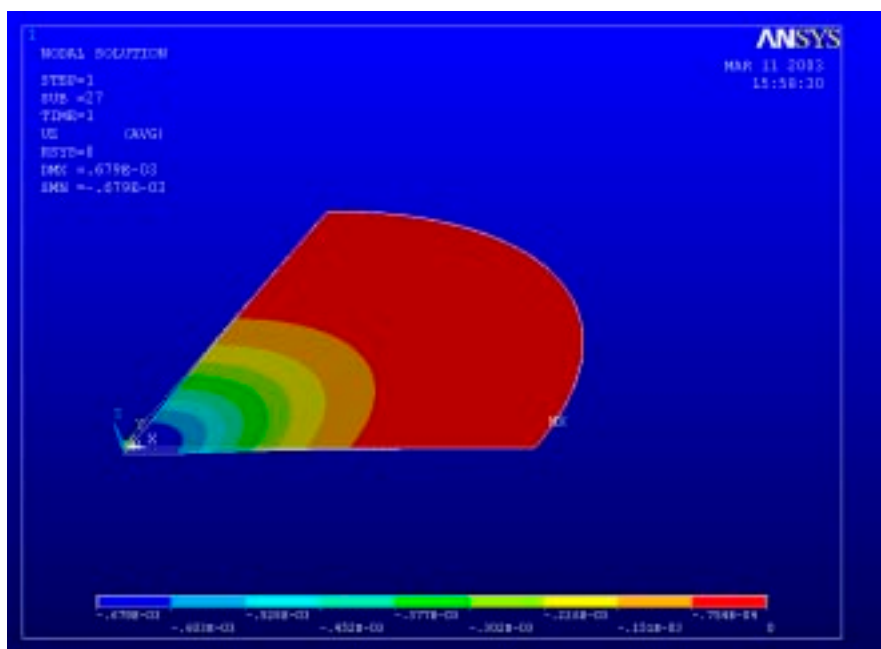


図 7-(A) T1 上流膜の気圧差による変形

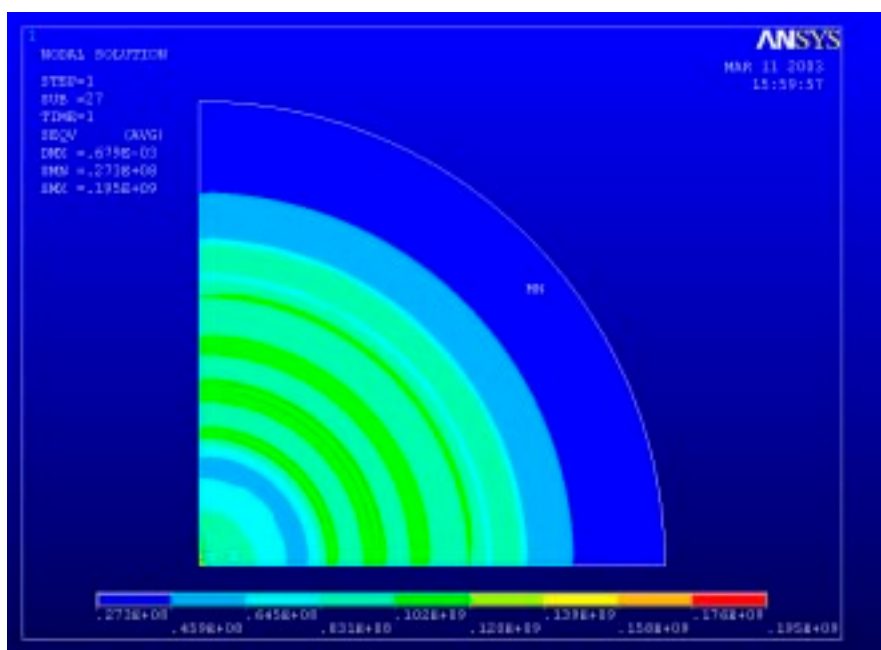


図 7-(B) T1 上流膜の気圧差による応力

二重膜の間にヘリウムガスを流す場合、その速度により、膜とヘリウムの間の熱伝達率が変わってくる。非常に低速な場合（自然対流）は $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 程度であるのに対して、毎秒 1 m 程度の流れ（強制対流）があれば、 $100 \text{ W/m}^2\text{K}$ 程度が達成できることが知られて

4.1 真空膜

いる。図8-(A)に示すように、片面を熱伝達率 $10\text{ W/m}^2\text{K}$ で自然対流冷却した場合、膜の中心部の温度上昇は 320 度であるのに対して、図8-(B)に示すように、片面を熱伝達率 $100\text{ W/m}^2\text{K}$ で強制対流冷却した場合、膜の中心部の温度上昇は約半分の 160 度に抑えることができる。

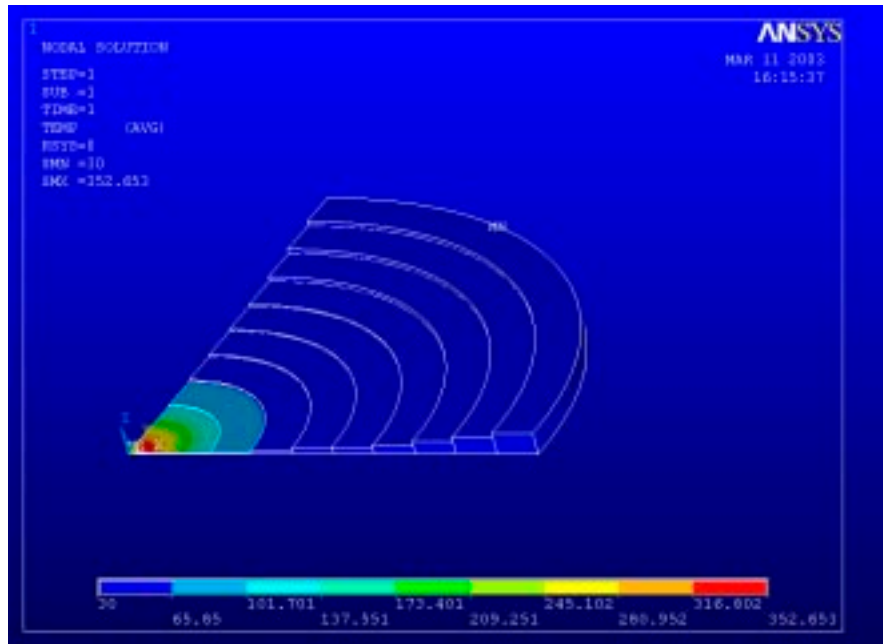


図8-(A) 片側自然対流冷却の場合の T1 上流膜の温度分布

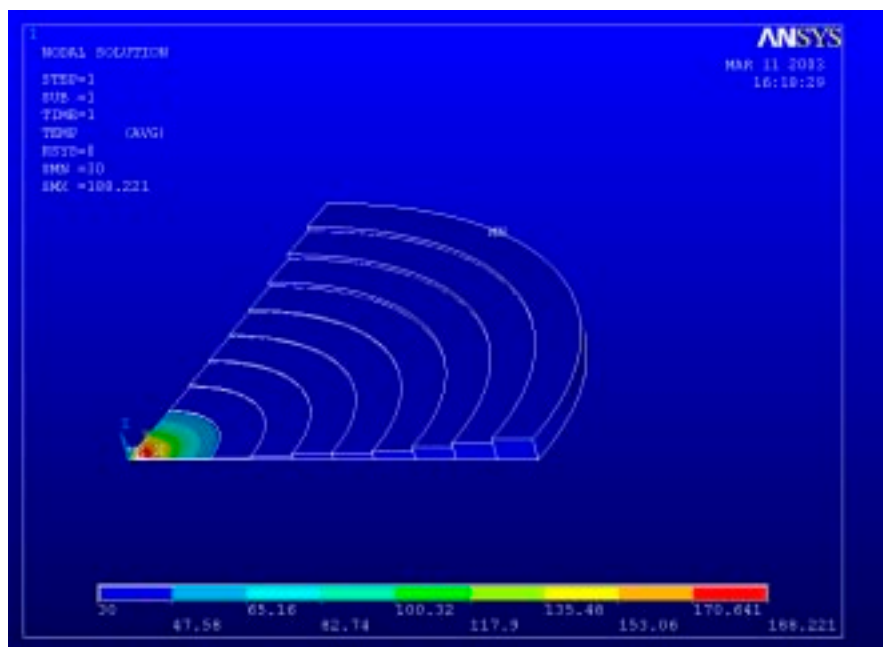


図8-(B) 片側強制対流冷却の場合の T1 上流膜の温度分布

ヘリウムの循環装置の例として、図9に、KEKB 加速器における衝突点真空チャンバー冷却用のヘリウム循環装置のダイアグラムと写真を示す。

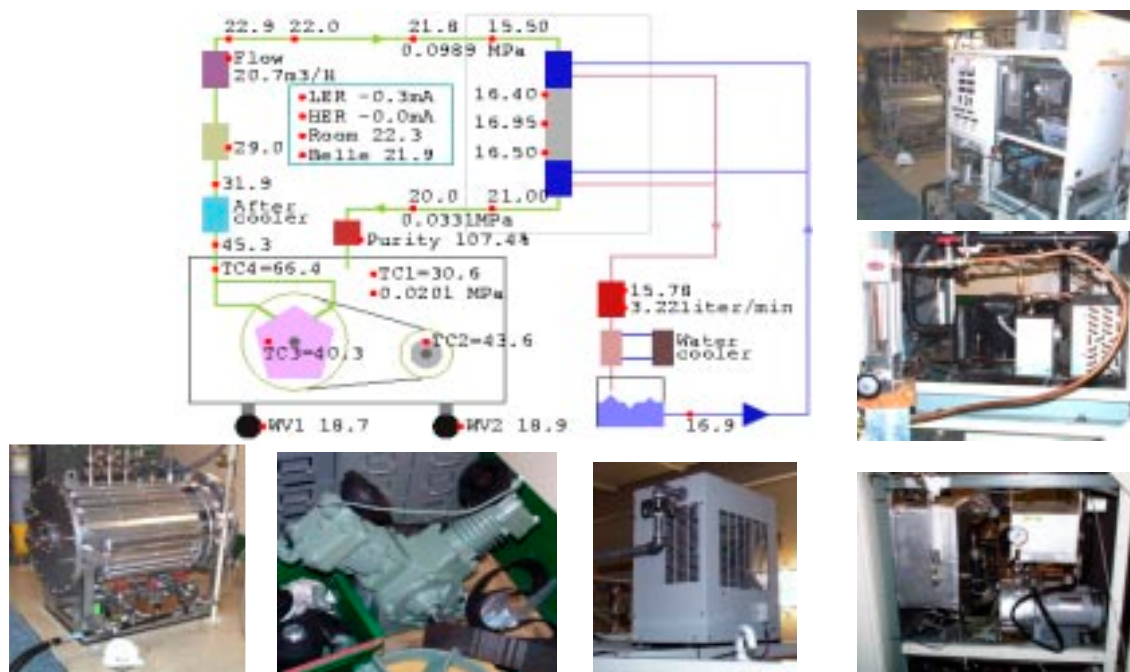


図9 KEBK 加速器における衝突点真空チャンバー冷却用のヘリウム循環装置

4.1 真空膜

4. 1. 4 T1 下流膜

図5に示したように、T1 標的の下流に位置する T1 下流膜においても、T1 上流膜と同様の理由で、SUS の二重膜をヘリウムで冷却することが想定される。T1 標的に陽子ビームが衝突すると、そこで二次粒子が多量に発生し、T1 下流膜を通過するため、膜に落ちる熱量は、上流側の10倍程度に達し、厚さ0.1mmのSUS膜の場合、1スピルあたり115Jにもなる。さらに、発生する二次粒子はある程度の拡がりを持つため、T1 下流膜では、通過する二次粒子を妨げないように、膜の直径を30cm程度まで拡げなければならない。そのため、気圧差による発生応力や冷却の条件はT1 上流膜よりも厳しくなる。図10-(A)に、想定される T1 下流膜の厚みの半径依存性を、図10-(B)に、その膜に落ちるエネルギー分布を示す。又、図10-(C)に、アルミニウムを用いた膜の試作品の写真を示す。

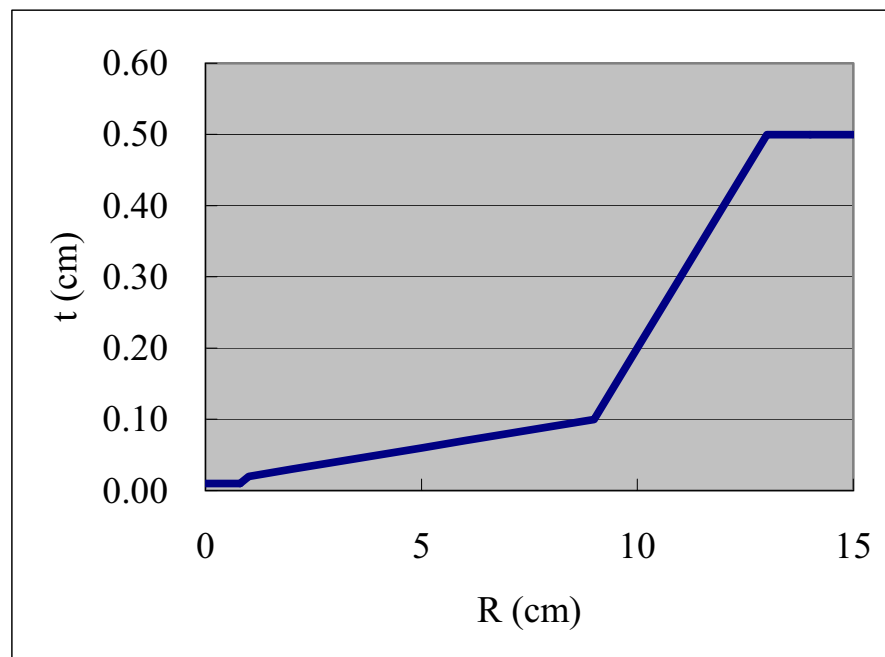


図10-(A) T1 下流膜の厚みの半径依存性

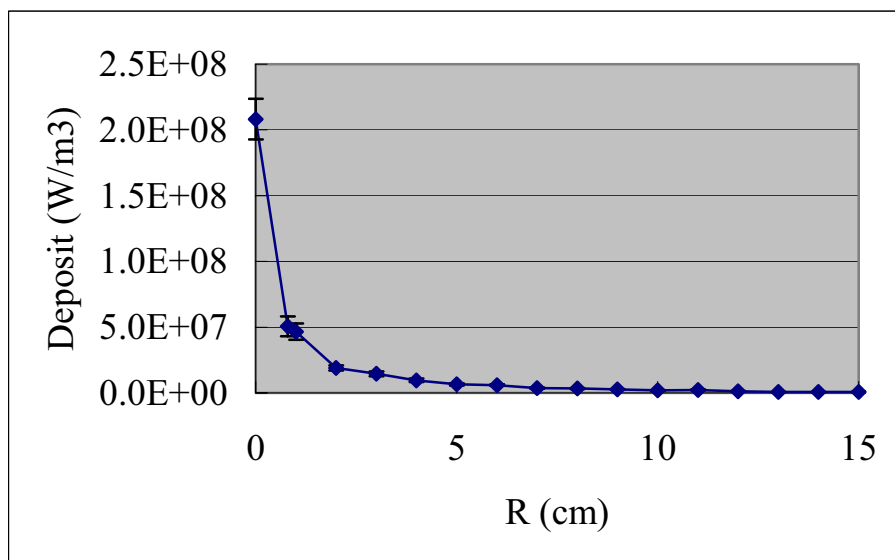


図 10-(B) T1 下流膜に落ちるエネルギー

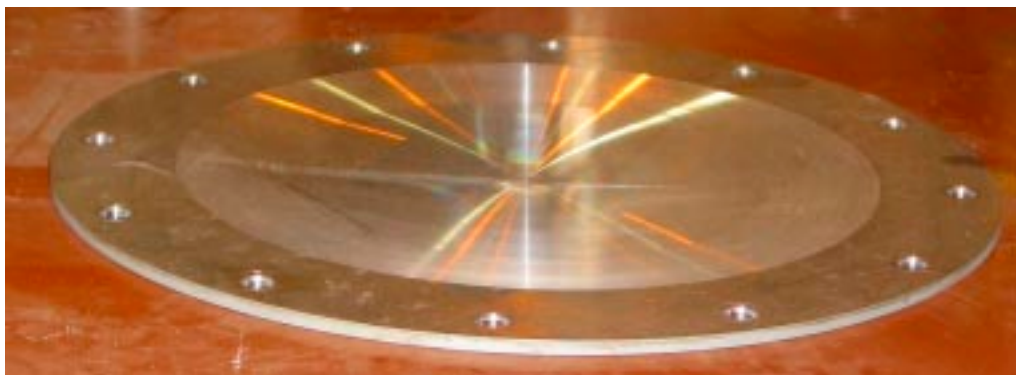


図 10-(C) アルミニウムを用いた T1 下流膜の試作品

図 11-(A)に示すように、この膜の差圧 1 気圧による変形は 3.3 mm 程度、最大応力は中心部で発生し、450 MPa 程度に抑えられている。この応力は、SUS の引っ張り強度 500 MPa より小さいが、安全率が小さすぎるので、より膜厚形状の最適化が必要である。また、この膜厚分布では、膜に落ちる総熱量は 1 スピルあたり 1060 J に増加している。図 11-(B)に示すように、この膜の片面を熱伝達率 100 W/m²K で強制対流冷却した場合、膜の中心部の温度上昇は 170 度に抑えることができる。それに対して、熱伝達率 10 W/m²K で自然対流冷却した場合の温度上昇は 810 度に達する。

4.1 真空膜

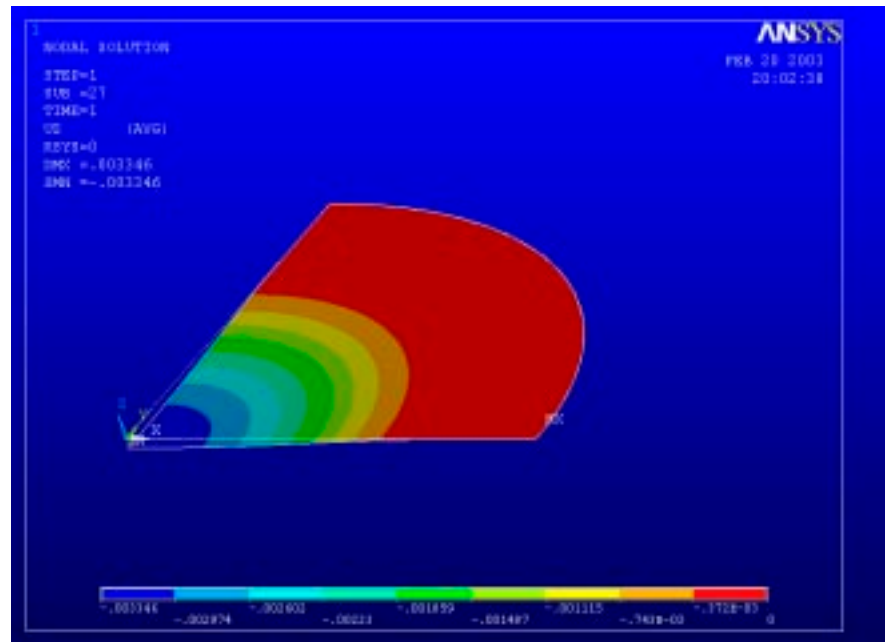


図 1 1 -(A) T1 下流膜の気圧差による変形

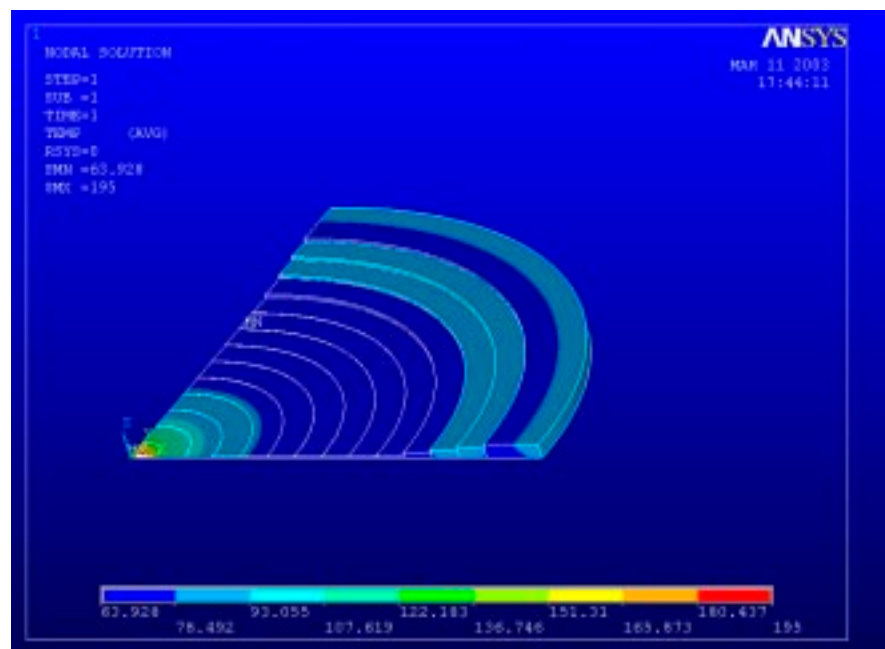


図 1 1 -(B) 片側強制対流冷却の場合の T1 下流膜の温度分布

4. 1. 5 ダンプ膜

T1 標的とビームダンプを結ぶビームダンプラインは、1Pa 程度の真空度が想定されるが、その下流に位置するビームダンプの内部は、1 気圧もしくは低圧の空気が想定されている。

従って、ビームダンプラインとビームダンプを仕切る真空膜がやはり必要になるが、ビームダンプに落ちる熱を分散させるために、ビームのサイズを大きくする必要があるので、膜の直径は50 cm程度になる。1 mm厚の均一な平板の SUS 膜を想定した場合、膜に落ちるエネルギーは、1 スピルあたり 98 J 程度であるが、気圧差に耐えるためには、やはり中心が薄く、端部が厚い膜が必要となる。図 1 2 -(A)に、想定されるダンプ膜の厚みの半径依存性を、図 1 2 -(B)に、その膜に落ちるエネルギー分布を示す。

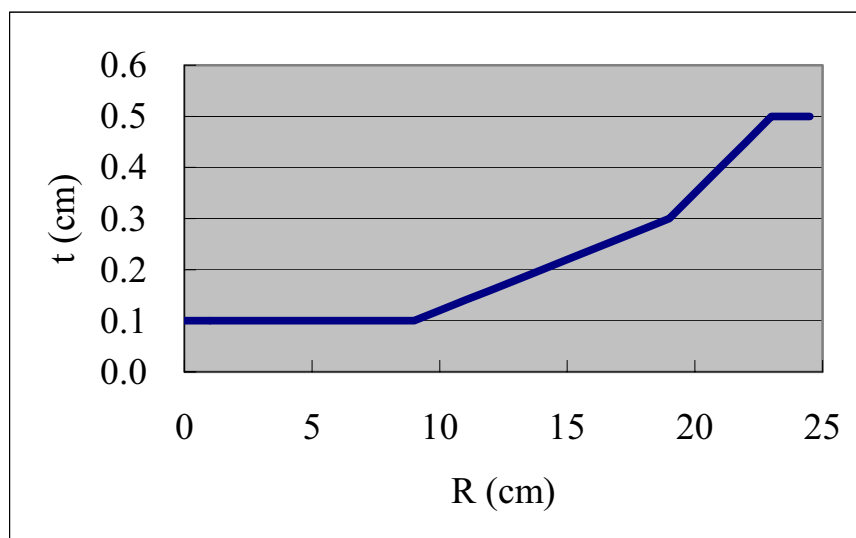


図 1 2 -(A) ダンプ膜の厚みの半径依存性

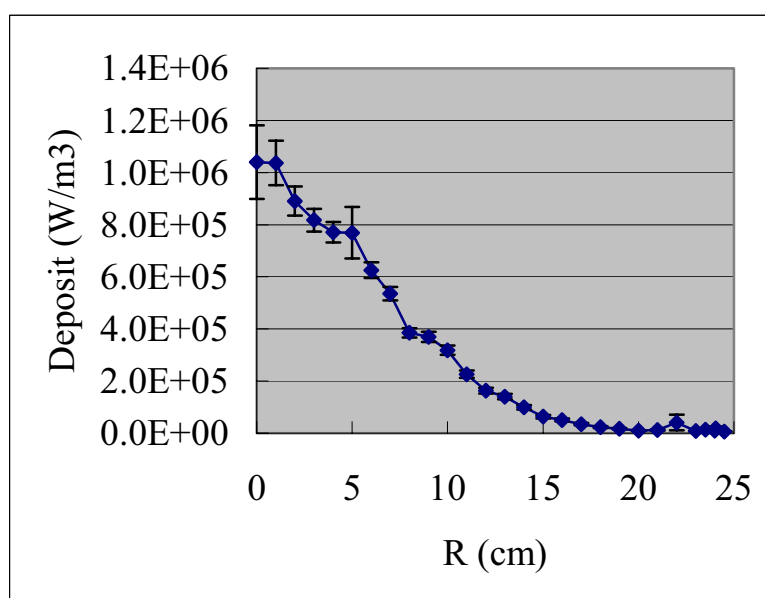


図 1 2 -(B) ダンプ膜に落ちるエネルギー

4.1 真空膜

図 1 3 -(A)に示すように、この膜の差圧 1 気圧による変形は 5.7 mm 程度、最大応力は端部で発生し、200 MPa 程度に抑えられている。この応力は、SUS の引っ張り強度 500 MPa より十分小さい。図 1 3 -(B)に示すように、この膜の片面を熱伝達率 10 W/m²K で自然対流冷却した場合、膜の中心部の温度上昇は 6.4 度程度であり、熱伝達率 100 W/m²K で強制対流冷却した場合の温度上昇は 8 度程度である。従って、ダンプ膜としては、空気側を自然冷却した単独の膜、もしくはヘリウム冷却した二重膜が想定される。

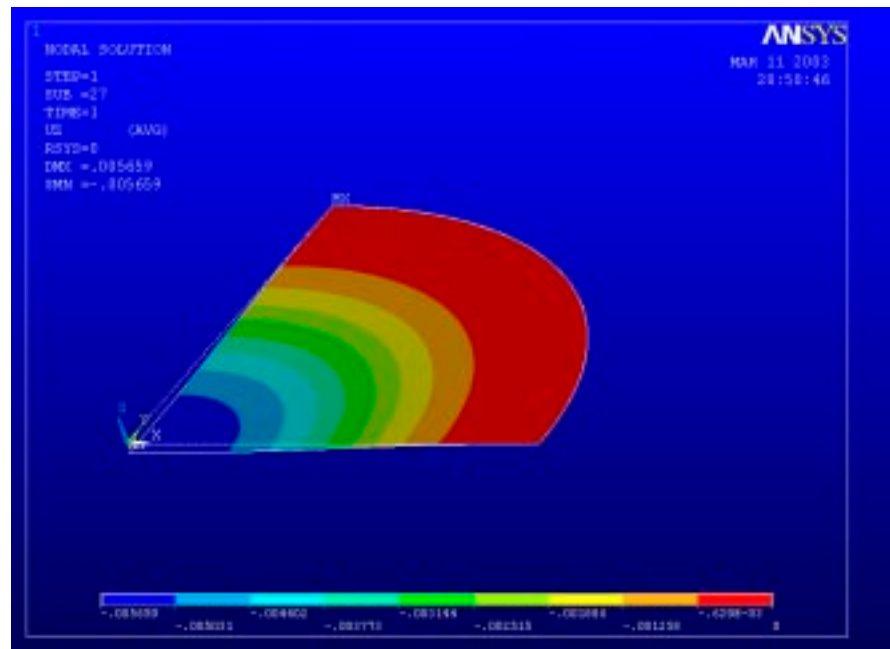


図 1 3 -(A) ダンプ膜の気圧差による変形

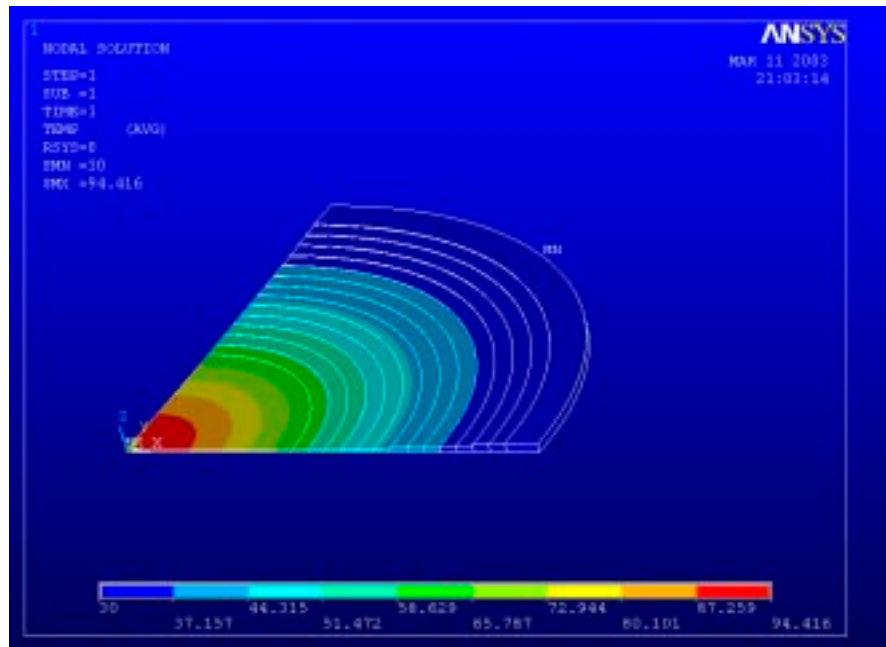


図 1 3 -(B) 片側自然対流冷却の場合のダンプ膜の温度分布

4. 1. 6 今後の開発項目

実機の真空膜の製作に向けて、今後の開発項目として、以下のようなものがある。

- ・ 熱応力・熱衝撃の評価
- ・ 厚み等の形状の最適化
- ・ 膜の材質の検討
- ・ 膜の試作と変形の測定
- ・ 二重膜＋真空シールシステムの設計・試作
- ・ ヘリウム循環装置の開発
- ・ ヘリウムの熱伝達率の測定

4.1 真空膜

4.2 ビームダクト

現在の 12 GeV PS のカウンターホール及びニュートリノビームラインでは、重さ、残留放射能、コスト等の面から、主にアルミ製のビームダクトが使われて来た。J-PARC ハドロン実験施設においても、基本的にはアルミダクトを用いて良いと考える。

しかし、特に T1 の下流など、ビームによる発熱で高温になる箇所においては、アルミ製では大気圧に耐えるだけの強度が保証できなくなる。例えば、3.3 節の図 7 にあるように、T1 真空箱と第 2 コリメータとの間のダクトは、内径 $\phi 400$ mm もの大きな径を使用してもフランジの部分で最高 150 °C にまで達しており、SUS やチタン製のダクトを採用することを検討しなければならない。

一方、残留放射能で見ると、2.2.4 節の図 13 で示されているように、SUS は放射化レベルが高く、ダクトそれ自体はもちろん、その周囲の機器のメンテナンスの時にも問題となる。それに対して、チタンの場合は SUS に比べて残留放射能が低く、半年間冷却した後はアルミよりも低くなっている。さらに、重さの面でもチタンは SUS より有利である。しかし、値段は高くなるので、T1 下流、あるいは第 2 期でスイッチヤードにターゲットを置いたときのその下流など、特に熱と放射線が問題になる箇所に限定してチタンダクトを採用するのが良いと思われる。

ダクトの径については、1 次あるいは 2 次粒子があたることによるダクト自身の発熱と周囲の放射線量を考慮して決める必要がある。第 1 期の SY においては、最上流部の真空仕切り膜以外にロスポイントがないので、基本的には $\phi 200$ mm 程度の小さな内径でも問題ない(第 2.2 節の放射線計算でも内径 $\phi 200$ mm のダクトを計算モデルに入れてある)。ただし、注意が必要なのは T0 からハドロン実験施設に入ってすぐの q1A 磁石までの区間で、将来テスト実験室を建設するのに土を掘り起こすため、土の放射化に対する線量の上限が 0.5 mSv/h と他よりも厳しい。さらに T1 で収束させるために手前でビームを広げるので、SY の中でこの区間に限っては、内径 $\phi 400$ mm 程度の大きなダクトを使わなければならない。当然、Q 磁石の内側は花形のダクトにして出来る限りビームロスを減らすようにしなければならないが、磁石の内側でロスする分については磁石自身が遮蔽体にもなるため、周囲の線量を低く抑えるには磁石間のダクトはそれ以上に径を広げておく必要がある。ハドロン実験施設においては、T1 標的で発生する 2 次粒子を避けるために、真空箱から第 2 コリメータまでは先に述べたような大きな径を用いた方が良い。さらに、ダンプの入口で直径 400 mm までビームを広げるので、ダンプの手前ではそれよりも大きい $\phi 500$ mm 程度の内径のビームダクトが必要である。

以上をまとめると、表 1 のようになる。ダクトやフランジの互換性を考えると、径の種類はできるだけ少なくした方が良いので、ダンプの手前以外は、内径 $\phi 300$ mm 程度のダクトで統一することも検討すべきであろうと思われる。

4.2 ビームダクト

表 1: 各区間におけるビームダクトの内径。

区間	ダクト内径
SY (T0 ~ q1A 区間を除く)	$\phi 200$ mm 以上
q1A ~ T1	
T1 第 2 コリメータ ~ q1D	
T0 ~ q1A	約 $\phi 400$ mm
T1 真空箱 ~ T1 第 2 コリメータ	
q1D ~ ダンプ	約 $\phi 500$ mm

5. ビームダンプ

5.1 熱応力計算

ハドロン実験施設のビームダンプは大強度陽子ビームの持つ **750kW** の全パワーを安全に吸収することが要求される。ダンプのコア部分の設計には **MARS** で計算されたエネルギー損失分布を入力として、有限要素法プログラム **ANSYS** を用いて定常解析を行い、最高温度や応力分布を計算した。得られた結果をコアの材質と形状を最適化していく。以下にデザインの現状を述べる。

ビームダンプコアに入射するビームの面密度をできるだけ下げるため、ビームは $\phi 40\text{ cm}$ 程度の大きさに広げられる。図1にビーム光学から計算された **50GeV** の陽子を輸送した場合のダンプ入口でのプロファイル分布を示す。熱計算の入力としてこの入力分布で得られたビーム幅の値を用いた。

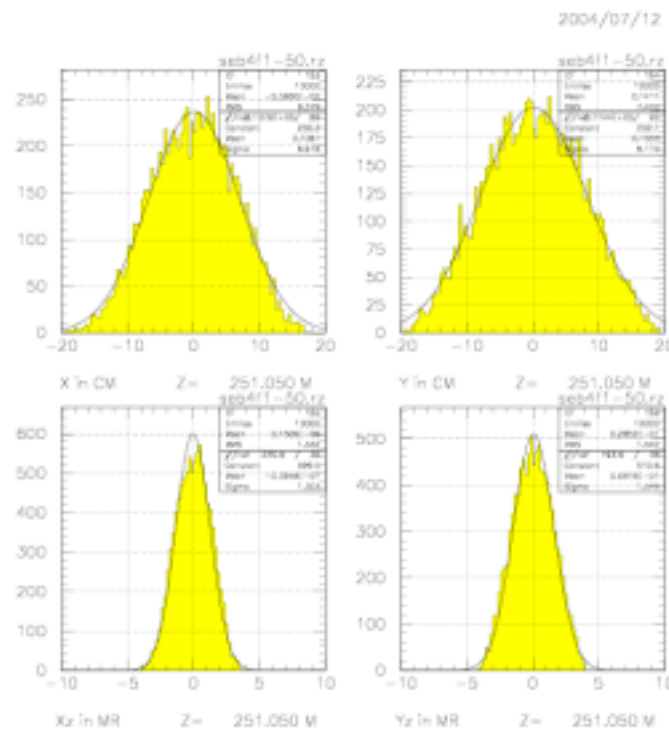


図1 50GeV の陽子を輸送した場合のビームダンプ入口でのプロファイル分布

ビームダンプのコア材料としては熱伝導率や耐放射線性がよく、また遮蔽体としても鉄と同程度の密度を持つ金属である銅が最も適していると思われる。また、それほど熱入力が大きくないコア下流部には鉄を用いる。この両者は表面を水冷し、ビームパワーを吸収する。金属は密度が高いため、ただ銅板を連ねると局所的に熱が集中してしまう。これを避けるため、入口側から奥に向か

5.1 熱応力計算

って狭くなるテーパ上の穴をあけ、ビームを徐々に削って熱入力をビーム軸方向に均一化しなければならない。

図2に熱解析結果の一例を示す。この場合入口の直径は40 cm、奥行き4 mのテーパ穴をあけ、50GeV、15 μ A の陽子ビームが入射した場合を想定して計算を行った。銅と鉄の表面を600W/m²K の熱伝達率で冷却すると仮定している。結果は入口から3 mのあたりで最高温度 350 度になっている。表面温度は100 度前後となっている。銅の軟化温度が 200 度程度であることを考えると、この結果はあまり満足のいくものとはいえない。

図3に入口直径30 cm、奥行き5 mのテーパ形状にした場合の計算結果を示す。テーパの角度を浅くしたため、熱が全体にいきわたるようになった。しかし最高温度は230 度であり、200 度にするためにはテーパをさらに浅くするか、傾きを直線ではなく曲線にして熱を一様に分散させる必要がある。

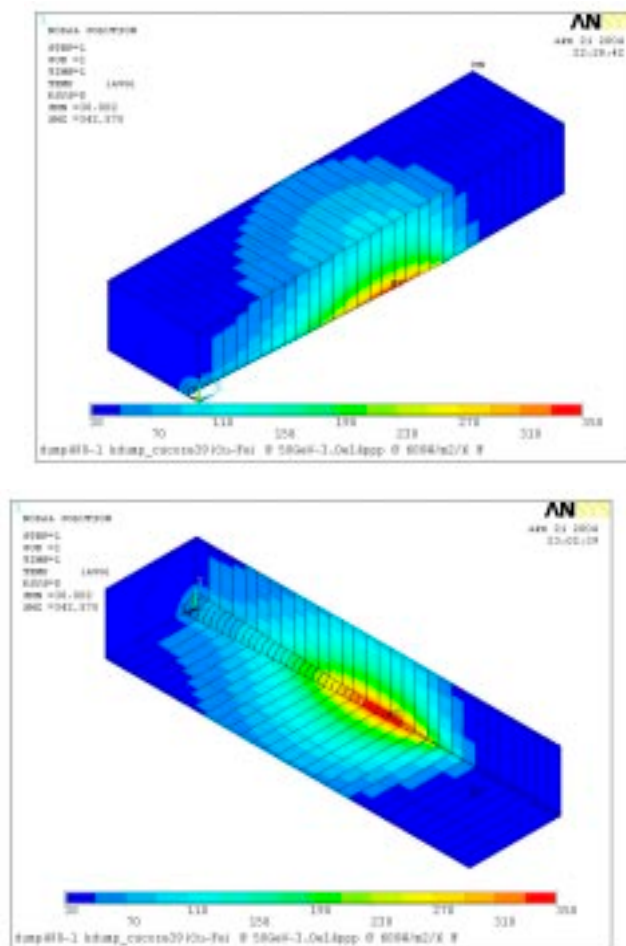


図2 50GeV、15 μ A の陽子ビームが入射した場合のビームダンプコアの熱解析結果。ANSYS の 1/4 モデルで計算された。銅および鉄は幅3 m、高さ2 m、奥行き20 cmで、銅5 mと鉄2 mの全長7 m。コアに ϕ 40 cm、奥行き4 mのテーパ穴をあけた。

5. ビームダンプ

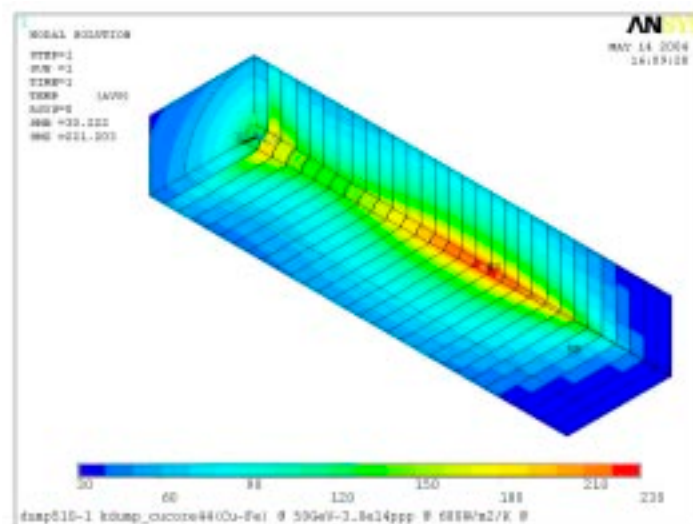


図3 50GeV、 $15\mu\text{A}$ の陽子ビームが入射した場合のビームダンプコアの熱解析結果。ANSYS の1/4モデルで計算された。銅及び鉄は幅3m、高さ2m、奥行き20cmで、銅6mと鉄2mの全長7m。コアに $\phi 30\text{cm}$ 、奥行き5mのテーパ穴をあけた。

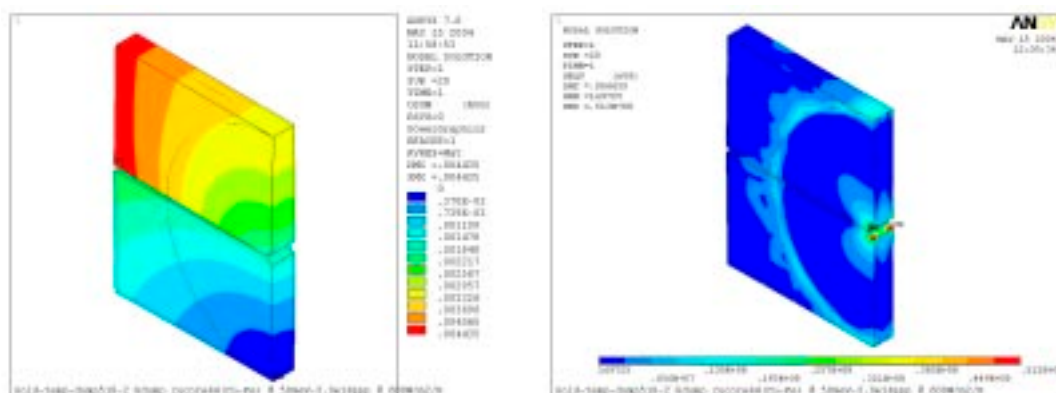


図4 50GeV、 $15\mu\text{A}$ の陽子ビームが入射した場合の最高発熱点での応力解析結果。ANSYS の1/2モデル(左右対称)で計算された。左側は変位の絶対値、右側は応力の絶対値を表す。

図4に最高発熱点での応力解析結果を示す。応力計算では床面を固定とし、自重を考慮した左右対称モデルで計算された。最大変位は銅の側面で約4mm、応力の最大値はテーパ穴で約50MPaとなった。

今後熱分布がさらに均一になるよう形状を最適化し、ビームが偏芯した場合等についてもケーススタディを行っていく。

5.1 熱応力計算

5.2 ビームダンプの構造

5.2.1 構造

ハドロン実験施設のビームライン構成要素の中でも特にビームダンプは最終的に全ビームエネルギーを吸収する部分であり、放射線的にもまた熱的にも最も過酷な条件下で運転される。ビームシミュレーションコードと有限要素法を用いた熱解析においてビームダンプの設計を行った（前回中間報告書[1]や 5.1 を参照）が、その結果、表面が水冷された銅塊数百トンの中心部分でビーム方向にテーパ状の穴をうち、その内部でビームを徐々に吸収してゆくことにより、放射線的にも熱的にも現実的なビームダンプを建設する可能性があることが判っている。図 1 にビームダンプ部の構造を示す。厚さ 20cm 程度の無酸素銅板 $3.0 \times 1.0\text{m}^2$ を上下 1 枚ずつ用いて約 $3.0 \times 2.0\text{m}^2$ としたものを、25 枚ビーム方向に重ねてビームダンプを形成することになり、この銅塊はエネルギー寄与からの発熱を吸収するとともに、放射線を遮蔽する役割を持つ。この周りには厚さ 500mm からなる遮蔽用鉄が存在し、この 2 つの部分をもとめてコア部とする。このコア部の上部にはサービススペースが用意され、ここで冷却水、温度モニター用熱電対、排気用ファン、ダンプ前部のダクトシールなどが管理され、運転時にはこの周辺にも鉄、コンクリートが配置される。また建設工事は 2 期に分かれており、第 1 期実験終了後はこのビームダンプを下流 50m に移設しなければならないため、コアパート下部には移設装置用の空洞がある。この移動装置については 5.5 で述べる。

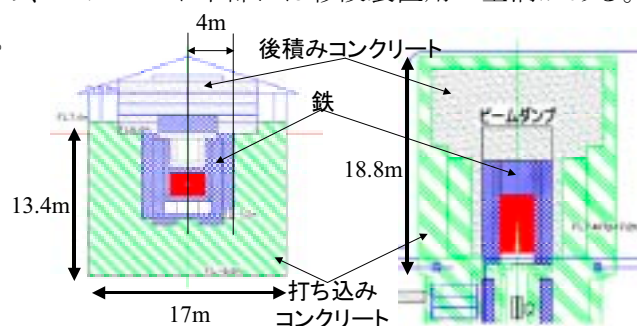


図 1 ビームダンプの構造

5.2.2 冷却装置

このビームダンプは無酸素銅板 50 枚に総量 750kW のビームエネルギーが寄与し、1 枚 ($3.0 \times 1.0 \times 0.2\text{m}^3$) あたり最大で約 25kW の発熱がビームシミュレーションから確認されているため、以下の試験ではこの数値の冷却を目標とする。

冷却装置の候補として様々な工法を用いた装置の比較・検討を行い、その中でも現在では溶射・FSW・BTA 方式が最有力候補になっている。今回は 3 つの冷却装置について説明、試験結果を示し、またそれぞれの長所、短所を表 1 に示す。

5.2 ビームダンプの構造

表 1 冷却装置の比較

	溶射	FSW	BTA
長所	<input type="checkbox"/> シームレスな配管 <input type="checkbox"/> SUS 管で腐食潰食を防ぐ	<input type="checkbox"/> 耐圧性能が良い <input type="checkbox"/> 直接冷却	<input type="checkbox"/> 構造が簡単 <input type="checkbox"/> 直接冷却
短所	<input type="checkbox"/> 間接冷却のため熱伝達が低下する	<input type="checkbox"/> 形状が大きすぎると加工できない <input type="checkbox"/> 腐食潰食	<input type="checkbox"/> 溶接箇所が多い <input type="checkbox"/> 腐食潰食

5.2.2.1 溶射方式

溶射方式は銅表面に溝を彫り、それに沿って SUS 管を配置し、その上から溶射することにより銅と SUS 管の熱伝達を向上させると同時に接着させるのが目的である。溶射の代表的な画像を図 2 に示す。今回の試験では肉盛溶射が可能なアルミニウムのワイヤー溶射を用いている。

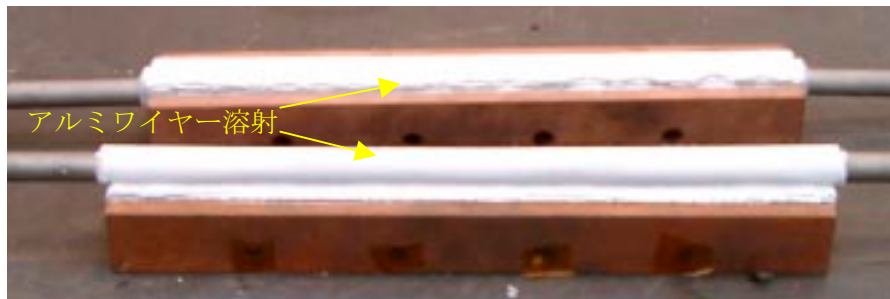


図 2 溶射例

5.2.2.2 FSW 方式

FSW とは Friction Stir Welding の略であり、文字通り摩擦熱により材料を柔らかくし、攪拌させ、接合する技術である。この種の技術は英国 TWI により開発されたものであり、低温で接合するためひずみ・そりが小さく、接合強度を高くできる特徴をもつ。今回は銅表面に水路とする溝を切削し、それに蓋をし、その縁を摩擦攪拌接合することによって熱を冷却する装置を製作した。図 3 に FSW の加工例を示す。



図 3 FSW 加工例

5.2.2.3 BTA 方式

BTA (Boring and Trepanning Association) 加工はガンドリルと比べ径の大きな深穴加工に用いられ、今回は銅表面に沿って BTA 加工を行い、それらを繋げ、それを水路とした冷却装置 (図 4) を製作した。



図 4 BTA 加工例

5.2.3 溶射方式の試験

今回用いた装置は図 5 に示すような $50 \times 300 \times 30 \text{ mm}^3$ の無酸素銅 (JIS C 1020) にヒータを挿入し、SUS 管、1/2"肉厚 1mm に冷却水を流し、試験を行った。

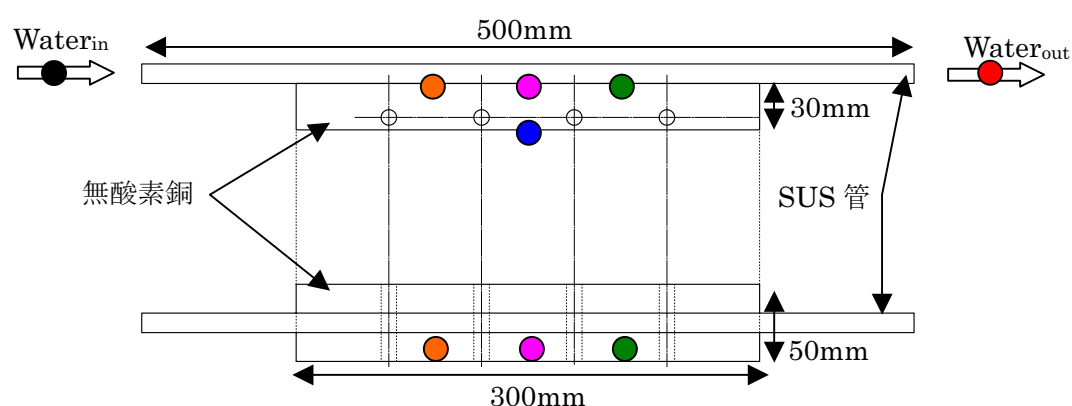


図 5 温度測定点

熱入力は円柱型のヒータ $200\text{W} \times 4$ 個 $= 800\text{W}$ を用いた。これはダンプ無酸素銅板一枚 ($3000 \times 1000 \times 200 \text{ mm}^3$) に 25kW のエネルギー寄与があるとすれば、今回の試験の冷却面 ($50 \times 300 \text{ mm}^2$) で 375W を冷却する負担を持ち、今回は最大で 800W 入力可能なため、約 2.1 倍の熱を入力できる。

またそれぞれの流量時の流速、レイノルズ数 Re は以下の表 2 のようになる。

5.2 ビームダンプの構造

表 2 流体条件

流量[l/min]	流速[m/s]	Re
5	0.93	9920
10	1.85	19842
15	2.75	29762

このレイノルズ数で流れが十分発達するまでの助走距離はいろいろな式で与えられるが、ここでは **Latzko** の式を用いることにし、次に示す。

$$L = 0.693 \text{Re}^{\frac{1}{4}} \cdot d = 87 \text{mm}$$

ここで、**d**:管内径で、上式のようになり **SUS** 管の助走距離を **100mm** とした。

熱伝達するには溝形状が重要となってくるため、今回は幾何学的に簡単な溝加工なし、**U** 溝、**V** 溝加工の 3 種類で試験を行った。また溝形状を図 6 にそれぞれ示す。

温度測定は、下図のように銅上面の上流・中流・下流、底面、水の入口、出口、気温の計 7 点を取り、**K** 型熱電対により測定を行った。

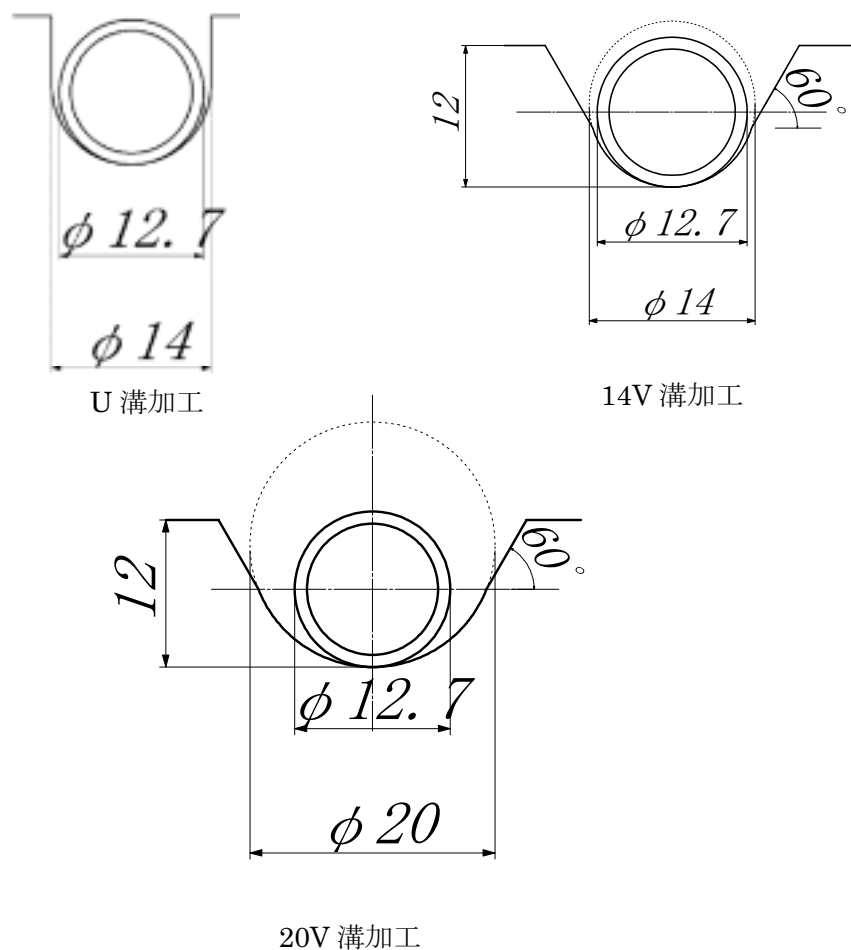


図 6 溝形状

5.2.3.1 実験結果

温度測定の結果を図7に示す。ここでは代表的な 15l/min、800W のときのみ示している。

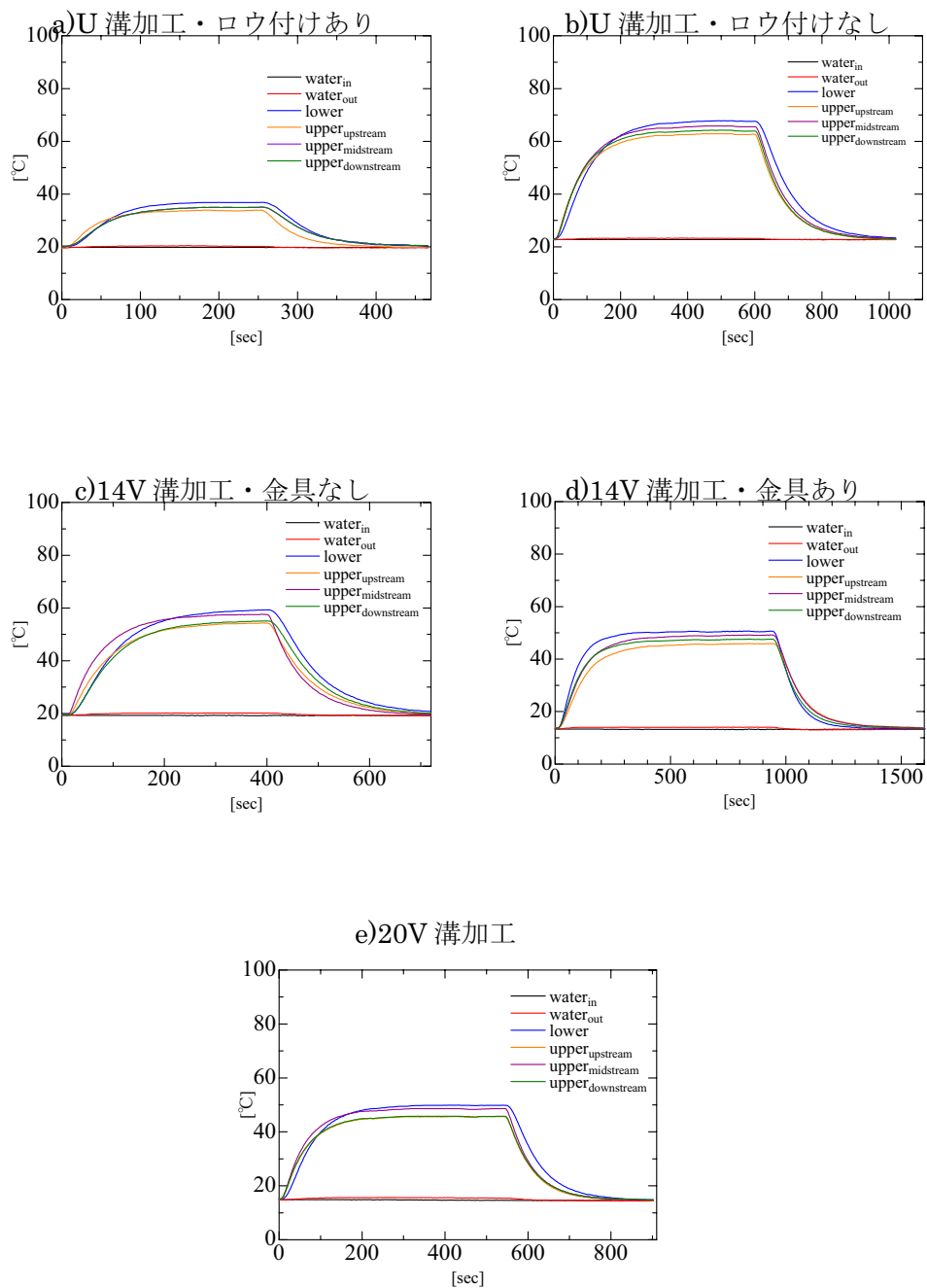


図7 測定結果

5.2 ビームダンプの構造

熱伝達係数 α は、入力電力を 800 [W]、銅上面中流温度 T_{copper} と水出入口温度差、面積を銅表面 $0.05 \times 0.30 [\text{m}^2]$ とした次式である。

$$\alpha = \frac{Q}{(T_{\text{copper}} - T_{\text{water}_{\text{out}}}) \times A}$$

T_{copper} は通常、熱伝達する境界面の温度を採るが、今回は溶射材が中間にあるため、熱電対を設置することが難しい。そのため銅上面中流温度を採用したが、これは熱伝達係数では安全側の値をとることが式からもわかり、また無酸素銅は熱伝導係数が高いため銅表面と同等な値を示すと思われる。この式を用い、熱伝達係数を求めた。

縦軸熱伝達係数 $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ 、横軸冷却水流量 $[\text{l}/\text{min}]$ のグラフを図 8 に示す。この図から、流量が高くなるにつれ、熱伝達係数が向上することがわかる。これらを比較するとロウ付けすることにより 2~3 倍熱伝達係数が高くなっていることがわかる。また溝を 14V、20V と広げることにより、溶射が隙間に入り熱伝達はわずかだが上昇している。管と銅を密着させるため取り付けした金具も熱伝達係数を増加させることもわかった。

ビームダンプの温度低下が必要ならば、ロウ付けは実機で用いることが好まれるが、コスト増、素材が銅のため真空ロウ付けを使用しなければいけないなどの影響により今後は溶射のみで溝を広げ、金具を取り付けた装置の開発を行っていく。

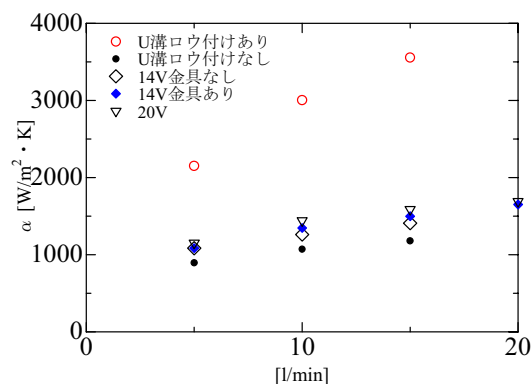


図 8 熱伝達係数の評価

5.2.3.2 溶射断面の切断

試験終了後、全モデルをそれぞれ流れ方向へ垂直に切断し、内部構造を観察した。画像を図9に示す。

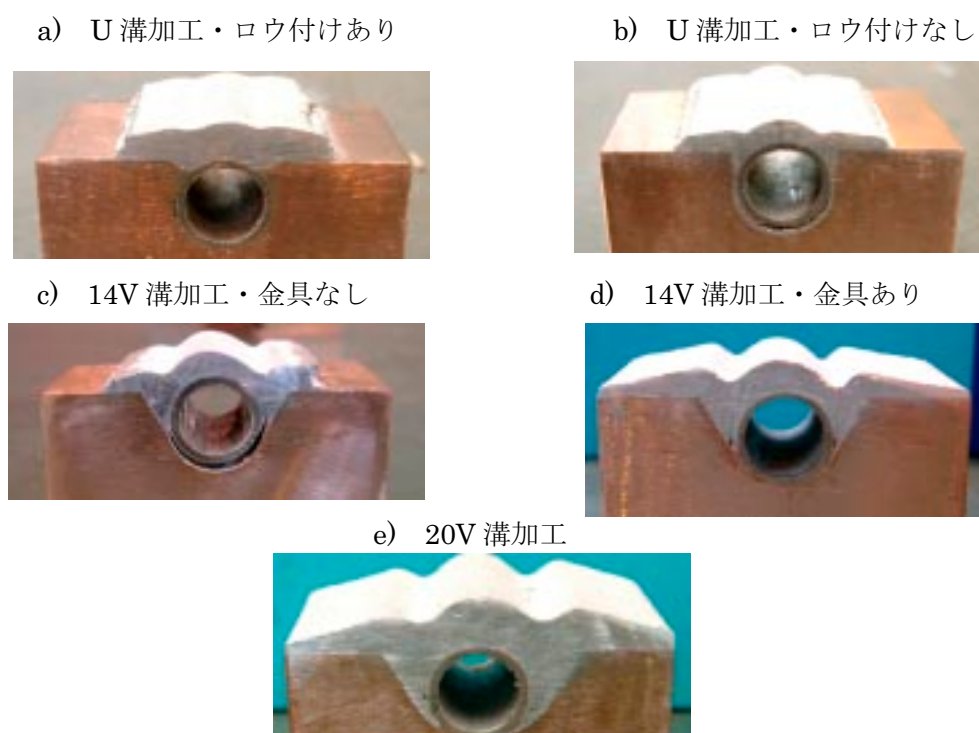


図9 溶射形状

上図より、a)は溶射以前にロウ付けを行ったため、管と銅の間が密着しているため熱伝達係数が増加したと思われるが、b),c)は明らかに溶射が不十分であり、管と溝の間に十分溶射材が入り込まず空隙ができ、熱伝達係数が低くなったと思われる。この原因としては管と銅の溶射の入り込む隙間が小さい、銅に高速でアルミが溶射されるため溶射時に管が動くなどが考えられ、この改善策としてそれぞれ溶射する隙間を広げたモデル e)、溶射する時に治具で固定したモデル d)の画像を見ると空隙が減少し熱伝達係数も増加していることがわかる。

5.2.4 FSW と BTA 式冷却装置の試験

5.2.4.1 試験装置

今回試験を行った冷却装置を図10に示す。これは無酸素銅板に冷却水路となる溝を削りその上から蓋をし、その縁を摩擦攪拌接合（FSW）した装置である。この装置は水路断面 $9 \times 10 \text{ mm}^2$ の3往復する水路を持ち、流体の条件は表3に示した通りである。

5.2 ビームダンプの構造

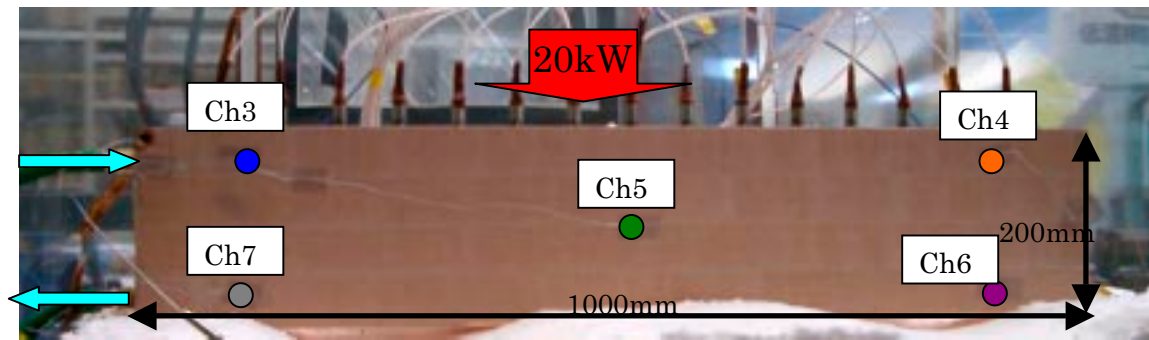


図 1 0 FSW 型冷却装置

表 3 FSW 流体条件

流量 [l/min]	流速 [m/s]	レイノルズ数
5	0.93	8772
10	1.85	17544
15	2.78	26316

また深孔（BTA）加工を行い、配管で孔を繋げそれを水路とした装置を図 1 1 に示す。

これらの装置には入力される熱は~20kW まで設定できるが、実際のビームダンプでこの面積では約 5kW の冷却の負担を持つ。また温度測定には K 型熱電対は、図の丸印のように配置され、BTA に関しては冷却水が流れた順序にしたがって番号が付けられている。放射温度計で測定するため、あらかじめ放射率がわかっているテープを銅表面に貼付した。試験条件は流体に水道水を用い流量を変化させた。



図 1 1 BTA 方式冷却装置

表 4 BTA 流体条件

流量[l/min]	流速[m/s]	レイノルズ数
10	0.66	11795
15	0.98	17692
23	1.51	27129

2.3.4.2 試験結果と考察

下記の条件で試験を行い、その結果を図12に示す。

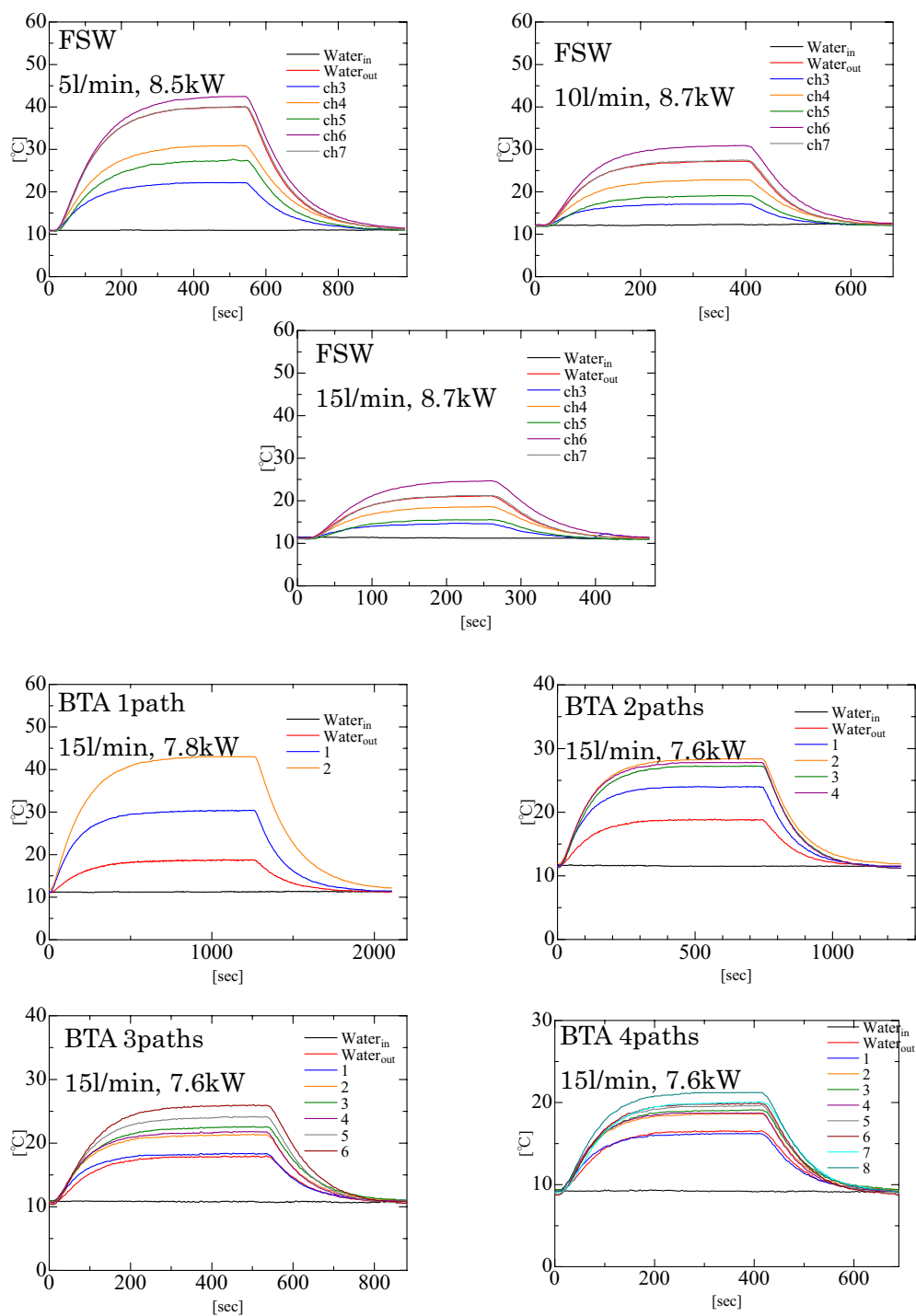


図12 BTA 試験結果

- 放射温度計による無酸素銅表面温度の測定

無酸素銅表面にあらかじめ放射率が分かっている黒体テープを貼り、放射温度計により

5.2 ビームダンプの構造

銅表面温度分布の測定を行った。条件は図 1 3 の左側に、色に対する温度表示は画像右側に示されている。

図より、FSW 方式では水路が中心に密集しているため中心がよく冷却され、外側にいくにつれ温度が上昇しているのがわかる。また水路入口付近では冷却水温度が低いため銅表面温度が低くなった。反対に出口付近や図 1 0 の銅下部は冷却水温が高いため、銅表面温度が高くなった。

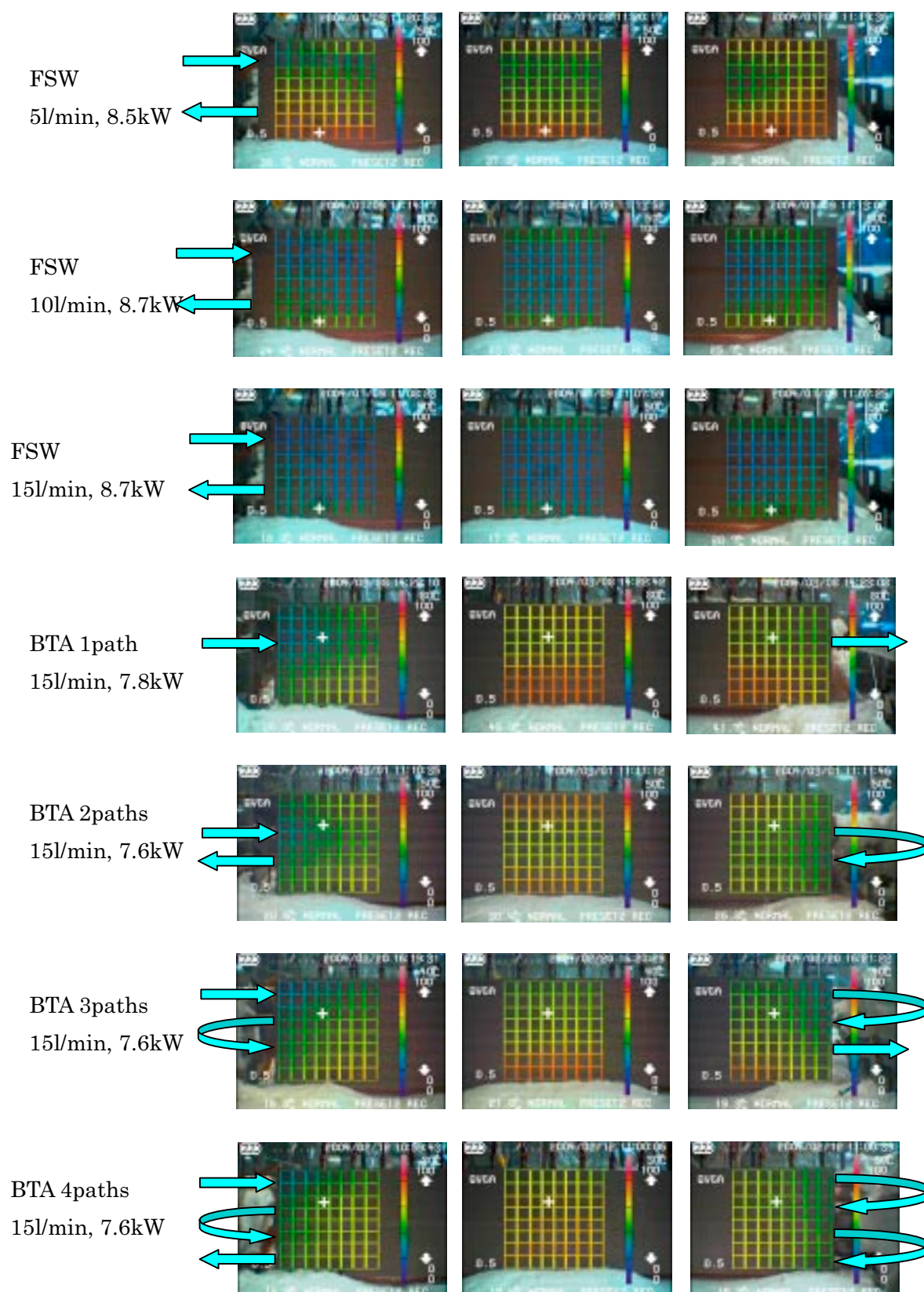


図 1 3 FSWおよびBTA表面温度分布

5.2 ビームダンプの構造

- 熱伝達係数の予測

熱の入出力による状態方程式により熱伝達係数が予測され、次式で表される。

$$Q_{in} - Q_{out} = k \frac{dT}{dt}$$
$$k = C\rho V$$

ここで Q_{in} :入力熱量[W]、 Q_{out} :出力熱量[W]、 C :比熱、 ρ :密度、 V :体積で表される。今回は電源をオフしたときのみ考えると、 $Q_{in}=0$ 、 $Q_{out}=A\alpha_{fit}(T_c-T_w)$ となる。ここで α_{fit} :ある系全体で積分された熱伝達係数[W/m²K]、 T_c :銅表面温度、 T_w :冷却水温である。 t の関数は T_c 、 T_w だが、 T_w を入り口付近の温度とすれば供給される冷却水温度は常に一定とみなされるため、 T_c のみ t の関数となり、境界条件を与え、微分方程式を解くことにより T_c は次式のように表される。

$$T_c = \Delta T \exp\left(-\frac{A\alpha_{fit}}{k}t\right) + \frac{T_w}{A\alpha_{fit}/k}$$

ここで $A=0.2 \times 1.0$ [m²]、熱伝達係数: α_{fit} [W/m²K]。銅温度時間変化のフィッティングによって得られた係数 Z と上式を比較すれば次式のように α_{fit} が得られる。

$$\alpha_{fit} = -\frac{k \times Z}{A}$$

次に流量、熱伝達係数の関係を図 1 4 に示す。通常流量ではなく同じレイノルズ数で比較するが、今回は装置への入力値は流量で行うためここでは流量で比較した。図より、熱伝達係数は与えた熱には依存しないことがわかる。また熱解析に使用した熱伝達係数 600W/m²K よりも高い値をとり、熱解析が安全側で行われていることがわかる。

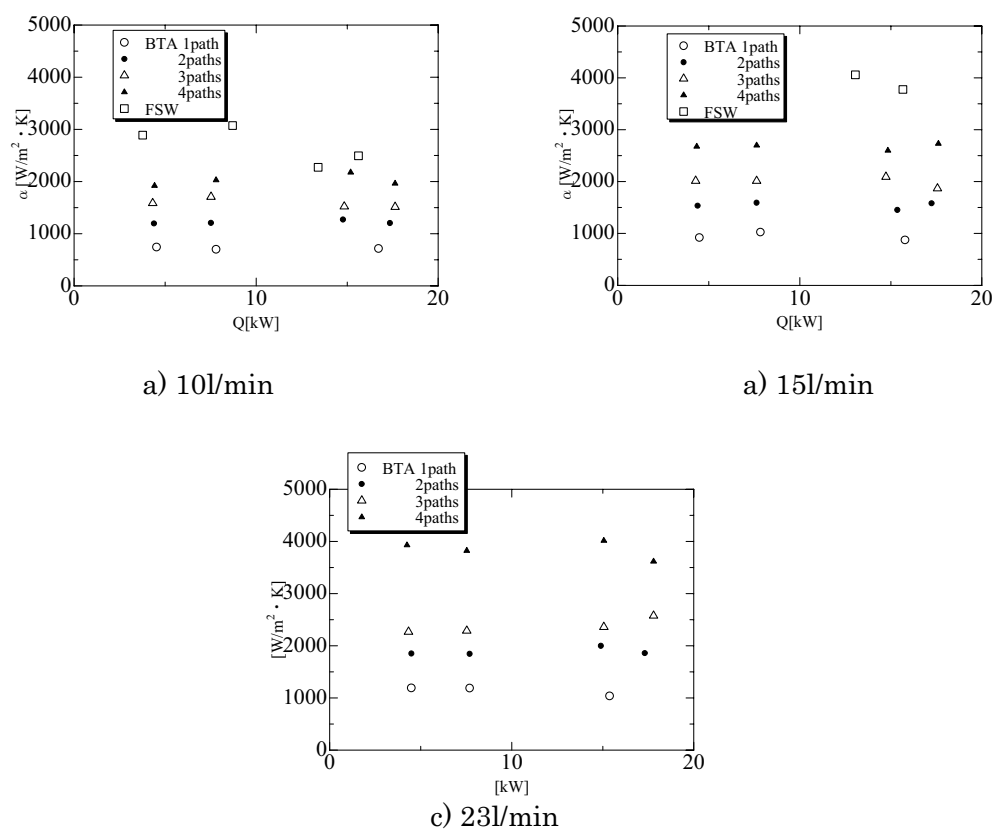


図 1 4 流量、熱伝達係数の関係

5.2 ビームダンプの構造

5.3 ビームダンプの残留放射線量見積もり

ビームダンプの残留放射線を MARS で計算した。図1にダンプコアのモデリングと計算結果を示す。銅のコアは幅3m、高さ2m、奥行き5m、鉄は奥行き3mとした。

一年運転半年冷却の場合計算結果は銅の上部で2.5mSv/h程度、側面で最大330 μ Sv/hとなった。実際にはコアの外側を厚さ50cmの鉄遮蔽体で覆い、上部のサービススペースにはさらに厚さ50cmのコンクリート面を作るので、表面での残留放射線量これよりもかなり低くなり、ビームダンプのメンテナンスや移設作業を行う際に十分作業可能なレベルになる。

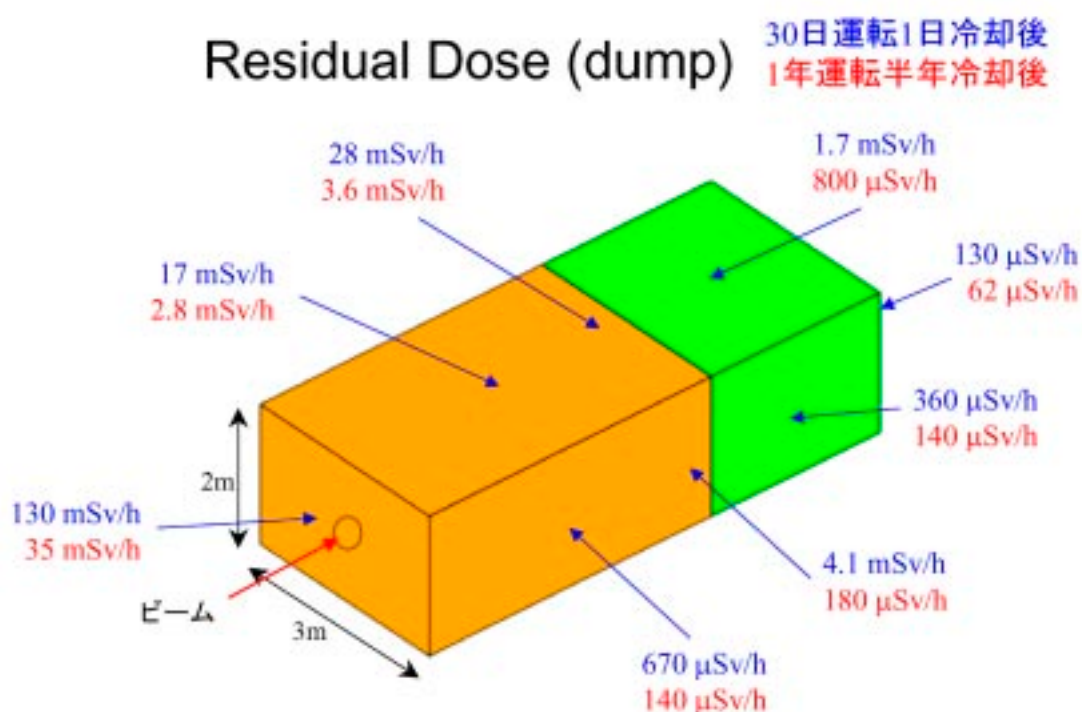


図1 ビームダンプコアの残留放射線量モデルと MARS による計算結果。

5.3 ビームダンプの残留放射線量見積もり

5.4 ビームダンプ前部遮蔽体の最適化

ビームダンプ周辺に設置された機器のメンテナンスや、ビームダンプ自身の移設のための準備作業を行う際には、放射化したビームダンプからの残留放射能が問題になる。MARS を用いたモンテカルロシミュレーションを行った結果、30 GeV、 1×10^{14} ppp ($5 \mu\text{A}$) の陽子ビームをビームダンプに30日照射した後1日冷却した場合で、もっとも放射化した位置で約300 Sv/h もの線量レベルになることが判明した(図8参照)。よって、作業前にダンプ前方に遮蔽体を設置する必要がある。この前部遮蔽体の形状を、MCNP(version 4c2)を用いたモンテカルロシミュレーションによって最適化した。

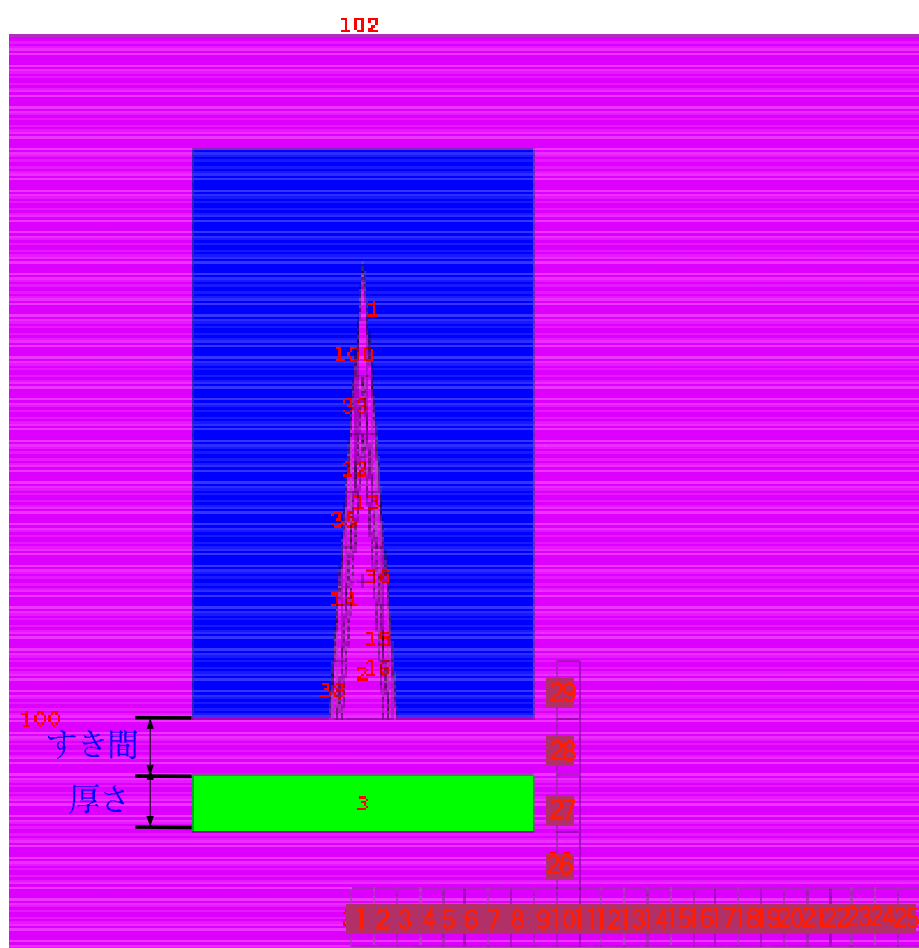


図 1: 遮蔽体最適化のための MCNP 計算において用いられたビームダンプ周辺の配置 (ZX 面)。下方向から Z 軸にそってビームが入射する。青色の部分がビームダンプ(銅)、緑色の部分が鉄遮蔽体、紫色の部分が空気である。評価領域は直方体の形状をしており、ビームダンプ前面から 150 cm 離れた位置に、 $(X,Y,Z)=(20 \text{ cm}, 20 \text{ cm}, 50 \text{ cm})$ の大きさのもの (ID 1 番から 25 番まで) をビームダンプ前方に設置し、ビームダンプ側面から 20 cm 離れた位置に、同じ大きさの評価領域をビームダンプ側方 (ID 26 番から 29 番まで) に設置した。評価領域の高さは一番線量が強くなる、ビームラインの高さに設定した。

まず、前部遮蔽体の形状を最適化するために、単純化されたモデルでの評価を行った。図 1 に、この MCNP 計算で用いられた Geometry を示す。ビーム軸方向を Z 軸、上方を Y 軸、ビー

5.4 ビームダンプ前部遮蔽体の最適化

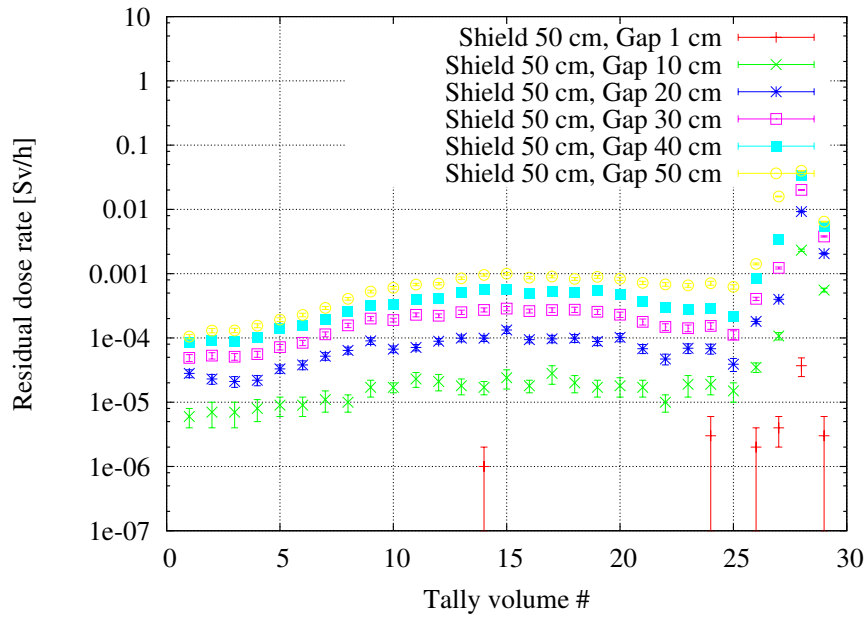


図 2: MCNP 計算による各々の評価領域に対する、線量当量のビームダンプと前部遮蔽体の間のすき間に関する依存性を示す。赤点はすき間が 1 cm の場合で、緑点はすき間が 10 cm の場合、青点はすき間が 20 cm の場合で、紫点はすき間が 30 cm の場合、シアン点はすき間が 40 cm の場合で、黄点はすき間が 50 cm の場合である。

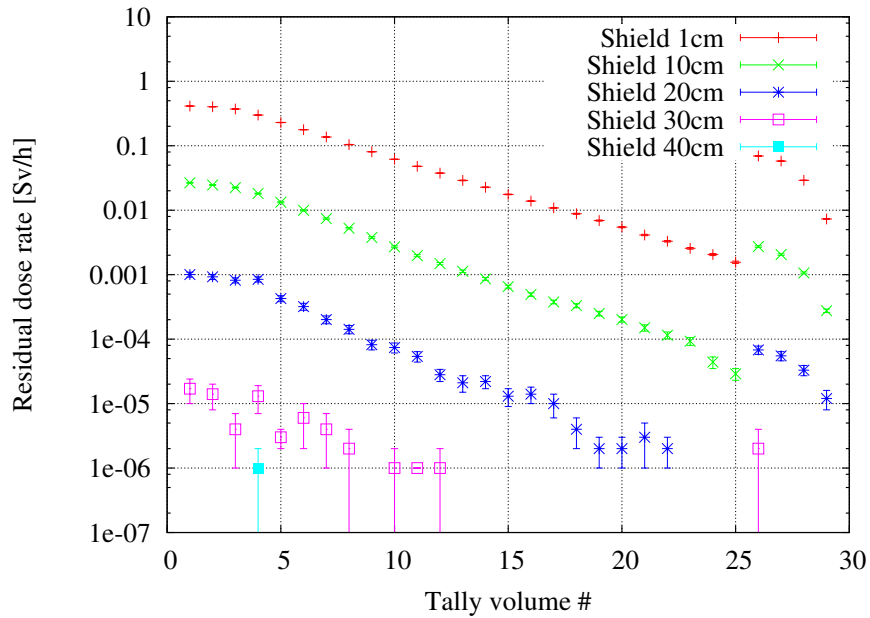


図 3: MCNP 計算による各々の評価領域に対する、線量当量の前部遮蔽体の厚さに関する依存性を示す。赤点は遮蔽厚が 1 cm の場合で、緑点は遮蔽厚が 10 cm の場合、青点は遮蔽厚が 20 cm の場合で、紫点は遮蔽厚が 30 cm の場合、シアン点は遮蔽厚が 40 cm の場合である。

ム上流から見て左側を X 軸としている。ビームダンプとしては、奥行き 5 m、半径 1 m の円筒形の銅とし、ビームダンプ内部のコーン状の穴は、奥行きを 4 m、開口部の直径を 40 cm と定義した。

線源としては、MARS 計算によって得られた線量分布をもとにして、 ^{60}Co 線源からの 2γ を発生させている。MARS 計算では、30 GeV、 1×10^{14} ppp (5 μA) の陽子ビームをビームダンプに 30 日照射した後 1 日冷却した場合の線量を採用している。

前部遮蔽体としては、横幅 2 m、高さ 1 m の鉄をビームダンプ正面に設置した。前部遮蔽体とビームダンプとのすき間、および遮蔽体自身の厚みを変化させながら MCNP によって線量当量分布を計算した。図 1 に示すように、線量当量分布を求めるための線量評価領域を ID 1 番から 29 番まで 29 箇所設置した。

以上の条件で、まず前部遮蔽体とビームダンプとのすき間を変化させながら、評価領域での線量当量分布がどう変化するかを調べたのが、図 2 である。前部遮蔽体の厚さは 50 cm に設定した。この図によると、線量当量は、すき間の大きさによらず、ビーム中心から動径方向に離れる程大きくなる分布をしていることが分かる。また、すき間が 1 cm の場合は前部遮蔽体より前方 (ビームが来る方向) ではほとんど線量がないことも分かる。よって、前部遮蔽体の厚さが十分に厚いことにより、線量当量はほとんど全てすき間から洩れて来た放射線によるものであると考えられる。また、ちょうどすき間の真横に存在する評価領域 28 番の線量当量によれば、すき間が 1 cm の場合は 37 $\mu\text{Sv/h}$ と比較的低い放射線レベルであるが、すき間が 10 cm またはそれ以上になると 1 mSv/h 以上と高い線量レベルになることも分かる。よって、遮蔽体などの表面精度や設置精度は、クランク等を設けない場合大体 1 cm のレベルに抑える必要があることが分かる。

つづいて、前部遮蔽体とビームダンプの間にすき間がない理想的な場合に、前部遮蔽体の厚みを変えていった場合の線量当量分布の変化をプロットしたのが、図 3 である。どの厚みの場合でも、完全にすき間がないことにより、線量当量はビーム軸に近い程高く、遠ざかる程低くなる傾向があることが分かる。また、前部遮蔽体の厚さとしては、30 cm ぐらいあれば、ビーム軸位置でも 10 $\mu\text{Sv/h}$ 程度と十分に低い放射線レベルであることが分かる。これにより、前部遮蔽体の厚さを 30 cm と最適化することができた。

ここまでの前部遮蔽体の評価では、ビームダンプが現実とはことなる円筒形をしており、また周辺に存在する鉄遮蔽体やコンクリート土台、壁などが考慮に入られていない。さらに、線源としてコーン内の線量しか考慮に入られていない。その上、壁による反射の影響も考えられるので、より現実的な Geometry および線源分布を採用して、実際にどのような線量当量分布になるのかを評価した。この MCNP 計算において使用したビームダンプおよびその周辺の遮蔽体の形状は、図 4、5、6 に示した通りである。ビーム軸方向を Z 軸、上方を Y 軸、ビーム上流から見て左側を X 軸と定義した。ビームダンプとしては、奥行き 5 m、横 2 m、高さ 1 m の銅とし、その後方には奥行き 3 m、横 2 m、高さ 1 m の鉄を設置した。また、ビームダンプ内部のコーン状の穴の形状は、奥行きを 4 m、開口部の直径を 40 cm と定義した。

線源としては、MARS 計算によって得られた線量分布をもとにして、 ^{60}Co 線源からの 2γ を発生させている。MARS 計算では、30 GeV、 1×10^{14} ppp (5 μA) の陽子ビームをビームダンプに 30 日照射した後 1 日冷却した場合の線量を採用している。線源は、ダンプ底面および後面を除いた全ての面 (コーン内部、前面、側面、上面) から発生させている。それぞれの面における線源領域の区分を示したのが、図 7、9、11、13 である。それぞれの面における線源領域の線

5.4 ビームダンプ前部遮蔽体の最適化

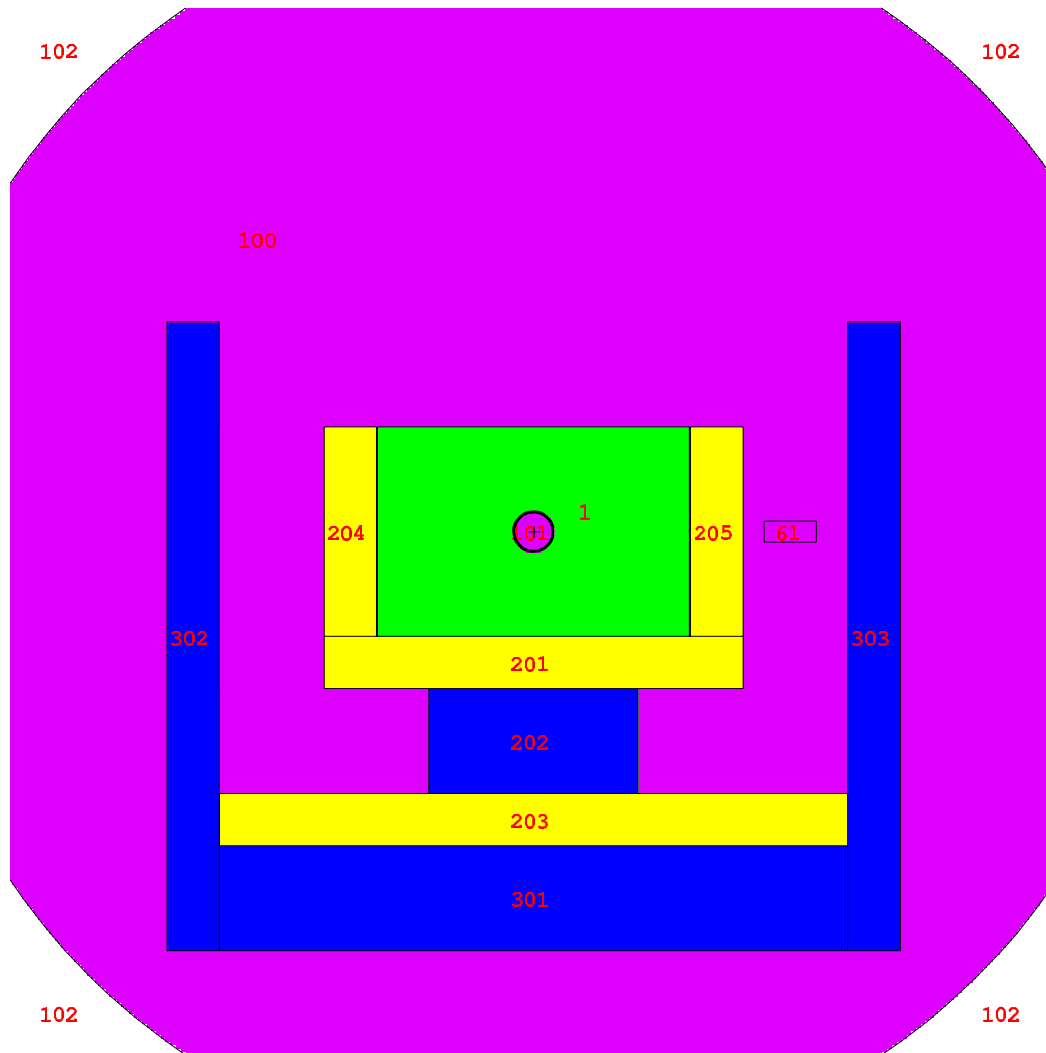


図 4: MCNP 計算で用いたビームダンプ周辺の配置 (ビーム軸方向から見た場合)。緑色の部分がビームダンプ (銅)、黄色の部分が鉄遮蔽体、紫色の部分が空気、青色の部分がコンクリートとなっている。

量当量分布を示したのが、図 8、10、12、14 である。これらの線量当量分布を元にして、線源を発生させた。

前部遮蔽体としては、遮蔽体厚を変化させて MCNP 計算で評価した結果 (図 3) を用いて厚さ 30 cm の鉄とした。よって、高さ 1 m、幅 2 m、厚さ 30 cm の鉄遮蔽体を設置した。実際には、排気用のダクトなどがビームダンプ入口部に存在するために、前部遮蔽体形状は、図 4,5,6 における、4、5、6、7 番のオブジェクトのように、ダクト類をかわす形状になっている。また、実際に設置する場合に、設置精度および遮蔽体自体の工作精度からすき間ができることを考慮に入れて、前部遮蔽体どうしの間、およびビームダンプ側方の鉄遮蔽体と前部遮蔽体との間に 1 cm のすき間を設定した。

線量当量を評価するための評価領域は、図 6 に示すように設置した。およそ人間の大きさになるように大きさを設定しており、X 軸方向が 20 cm、Y 軸方向が 20 cm、Z 軸方向が 50 cm の直方体の形状をしている。評価領域の高さは、一番線量が強くなるビームライン高さ (ビーム

5.4 ビームダンプ前部遮蔽体の最適化

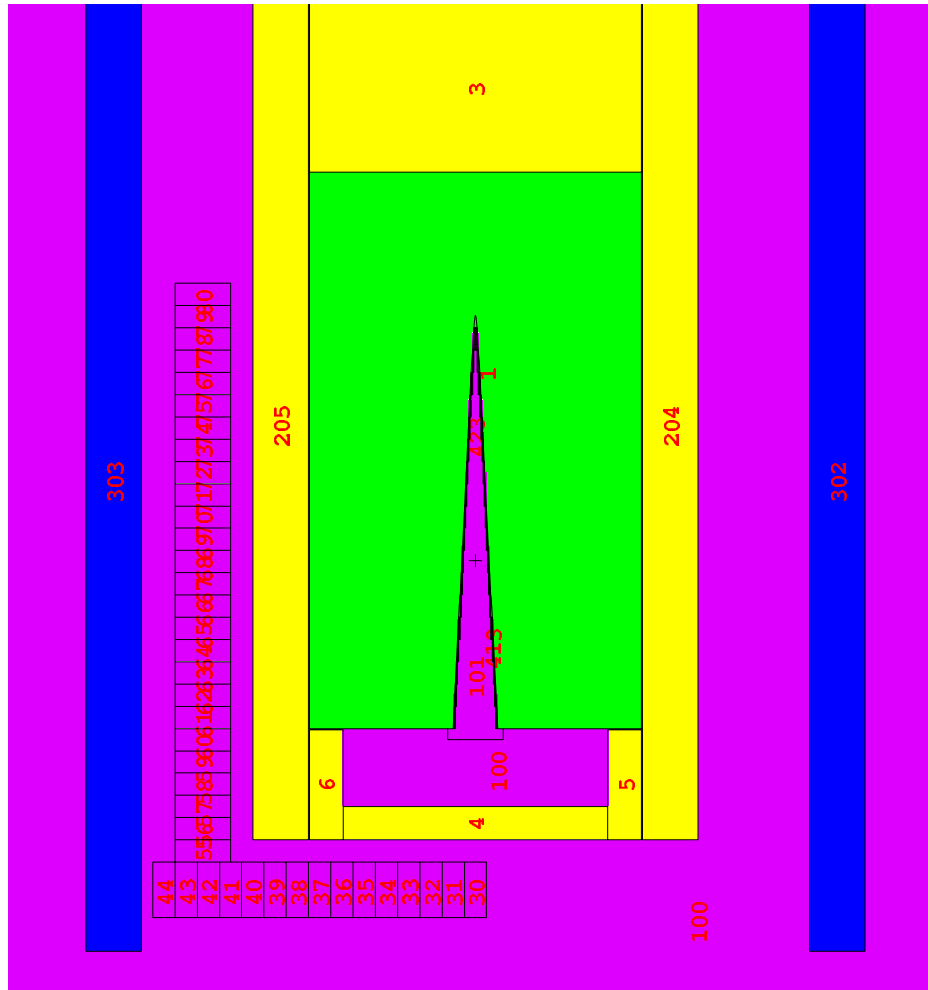


図 6: MCNP 計算で用いたビームダンプ周辺の配置 (ZX 面)。下方向から Z 軸にそってビームが入射する。緑色の部分がビームダンプ (銅)、黄色の部分が鉄遮蔽体、紫色の部分が空気、青色の部分がコンクリートとなっている。評価領域は直方体の形状をしており、ビームダンプから 10 cm 離れた位置に、(X,Y,Z)=(20 cm,20 cm,50 cm) の大きさのものをビームダンプ前方 (図の下方向) に、(X,Y,Z)=(50 cm,20 cm,20 cm) の大きさのものをビームダンプ側方 (図の左方向) に設置した。評価領域の高さは一歩線量が強くなる、ビームラインの高さに設定した。また、前部遮蔽体は ID 4、5、6 の物体に対応する。

りビーム下流の評価領域 (ID 62 から 80) においても、急激に線量当量が低くならないのは空気による散乱の効果によると考えられる。ビームダンプ側面の線源からの線量当量は、ビームダンプ前面の線源からの線量当量分布とちょうど逆の傾向を示す。ビームダンプ上面の線源からの線量当量分布は、あまり場所によらない平坦な分布となっている。

総線量当量を見ると、ビームダンプ上面からの線量当量が最も強いため、その傾向を受け継いで、動径方向、ビーム軸方向ともに比較的平坦な分布になっていることが分かる。最大線量当量は約 $34 \mu\text{Sv/h}$ であり、十分に低いことが分かる。また、最大値をとる場所もビームダンプ側面後方となっており、前部遮蔽体の形状は、ビームダンプ前面およびコーン内からの放射線を遮蔽する目的にかなっていることがわかる。よって、今回の計算で仮定したような前部遮蔽体を設置すれば、ビームダンプ周辺における作業が可能になることが分かる。

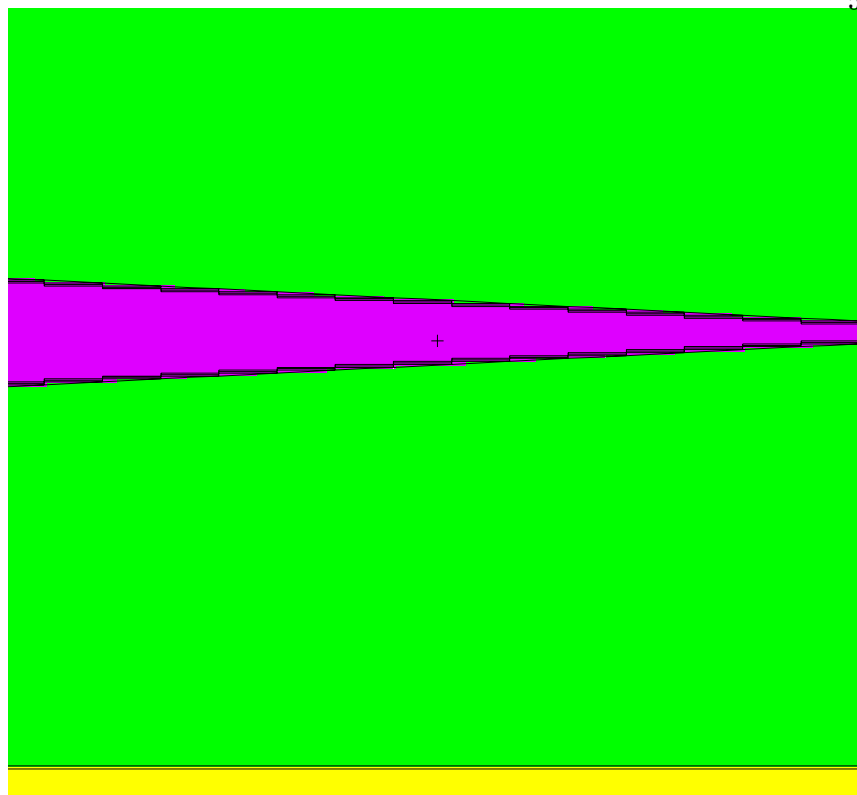


図 7: ビームダンプコーン内の線源領域の区割り (図中の青枠の長方形)。コーン内面に沿うように厚さ 0.5 cm、長さ 20 cm の中空円筒状の線源領域が 19 箇所設置されている。

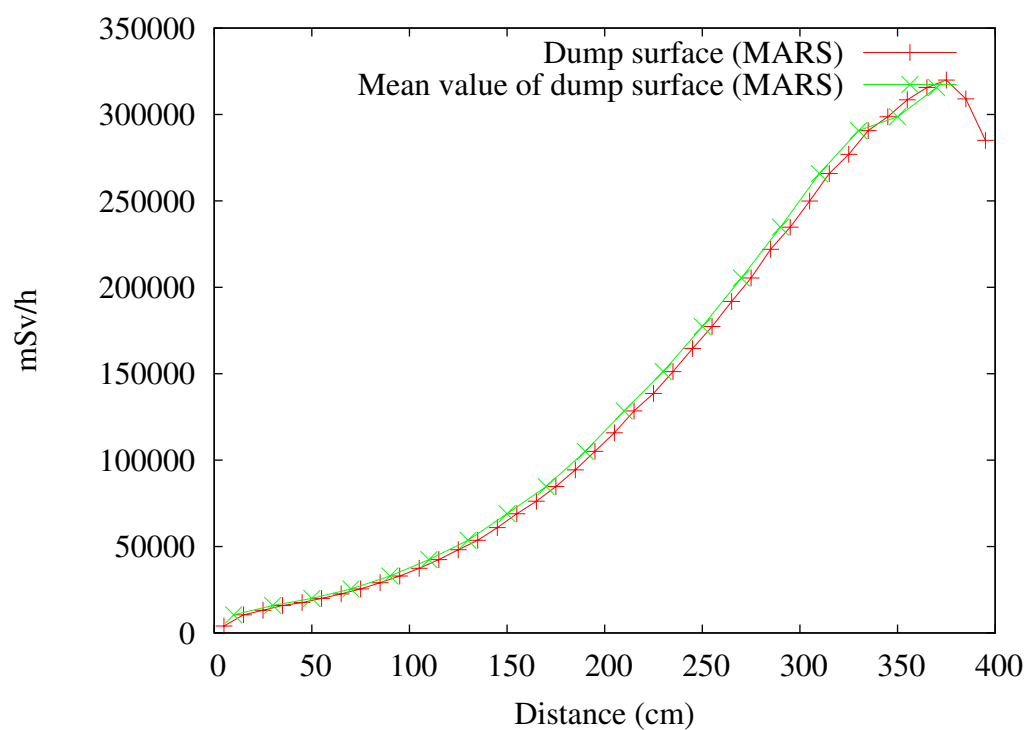


図 8: MARS 計算によるビームダンプコーン内の線量当量のビーム軸方向の分布。ビームダンプ前面を $Z = 0$ とし、ビームの進む方向を $+Z$ 方向にしている。コーン先端が 400 cm になる。赤線が MARS による計算値、緑点が実際に入力として使用した値である。

5.4 ビームダンプ前部遮蔽体の最適化

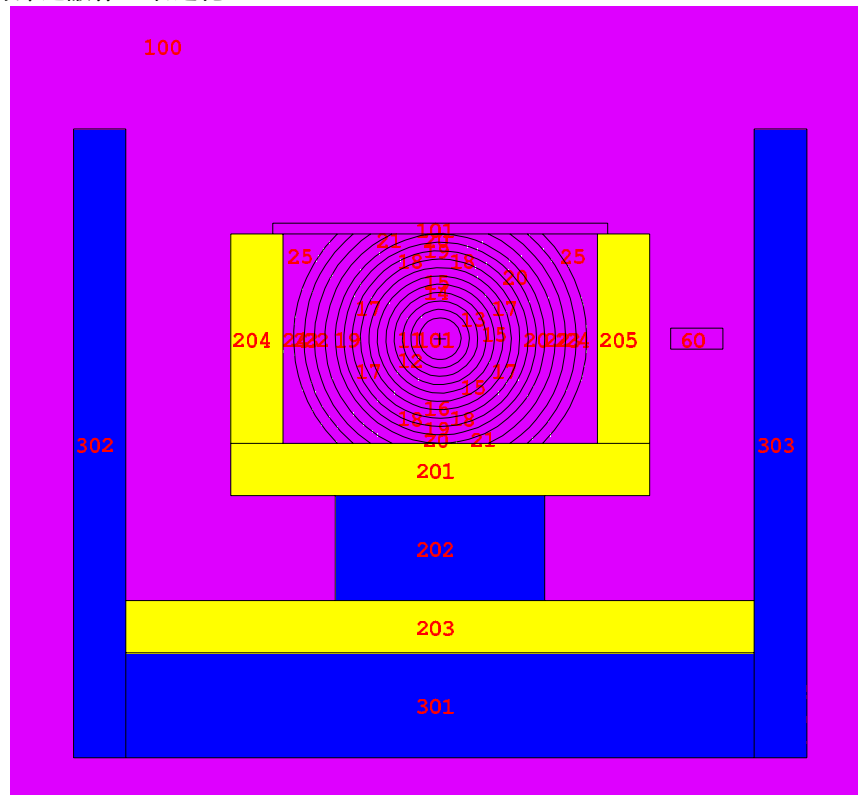


図 9: ビームダンプ前面の線源領域の区割りを示す。左方向が X 軸方向、上方向が Y 軸方向である。Z 軸方向厚さ 0.5 cm、半径方向の ΔR 10 cm の中空円筒状の線源領域が 15 箇所設置されている。

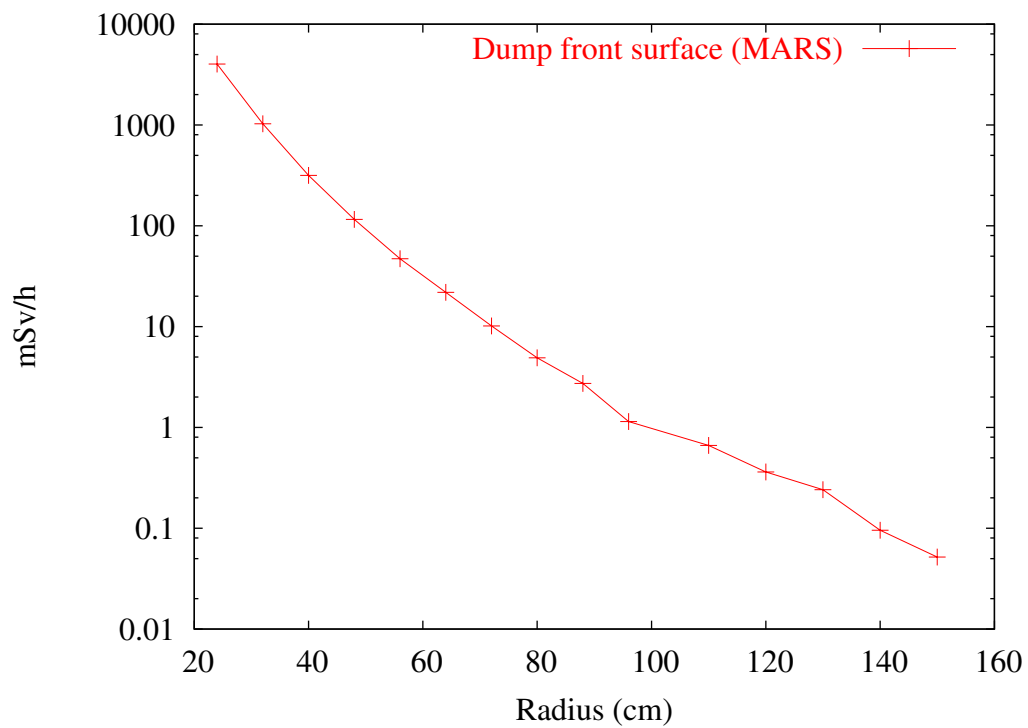


図 10: MARS 計算によるビームダンプ前面の線量当量の半径方向の分布。この値をそのまま入力として用いている。

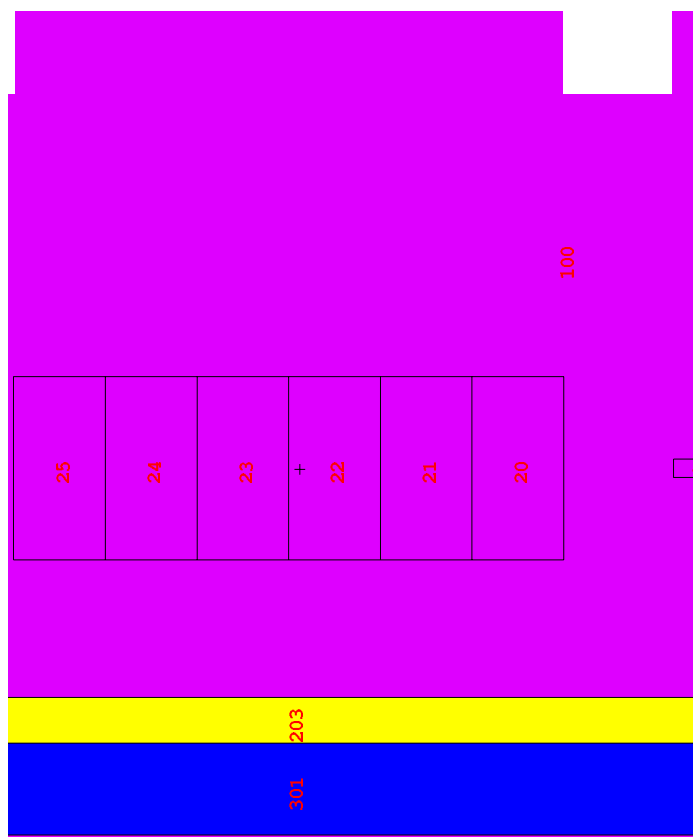


図 11: ビームダンプ側面の線源 (ID 20 から 25) の区割りを示す。図の左方向が Z 軸方向、図の上方向が Y 軸方向である。厚さ 0.5 cm、Z 軸方向長さが 100 cm、Y 軸方向長さが 200 cm の直方体状の線源領域が 6 箇所設置されている。

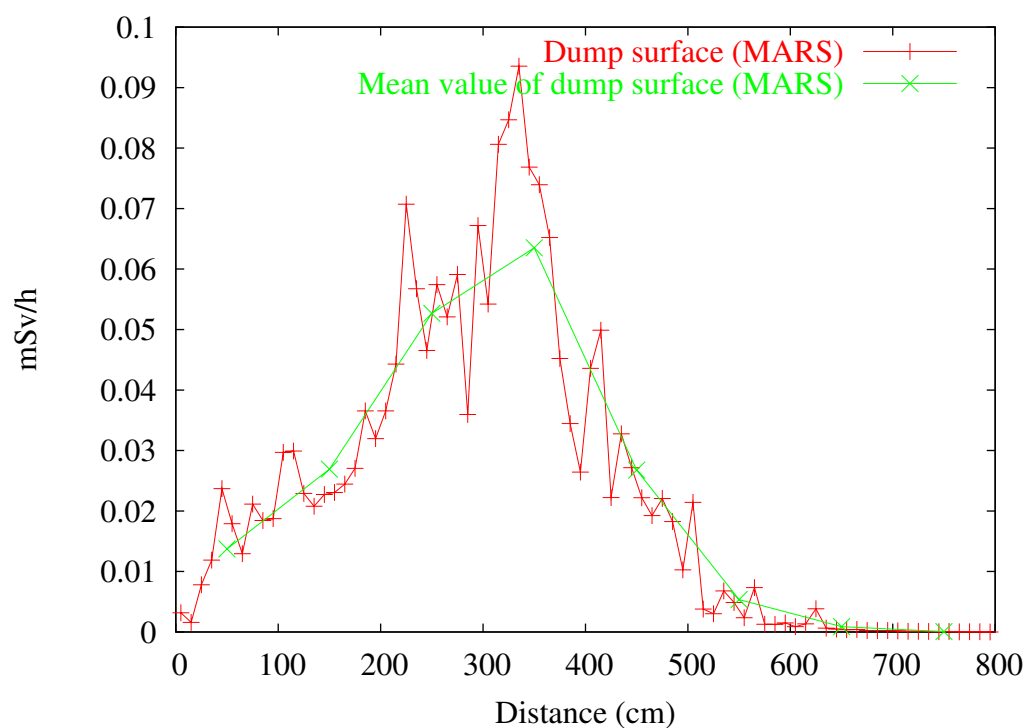


図 12: MARS 計算によるビームダンプ側面の線量当量の Z 軸方向の分布 (赤線)。横軸はビームダンプ前面からのビーム軸方向への距離を示す。緑点は実際に計算で用いた値。

5.4 ビームダンプ前面遮蔽体の最適化

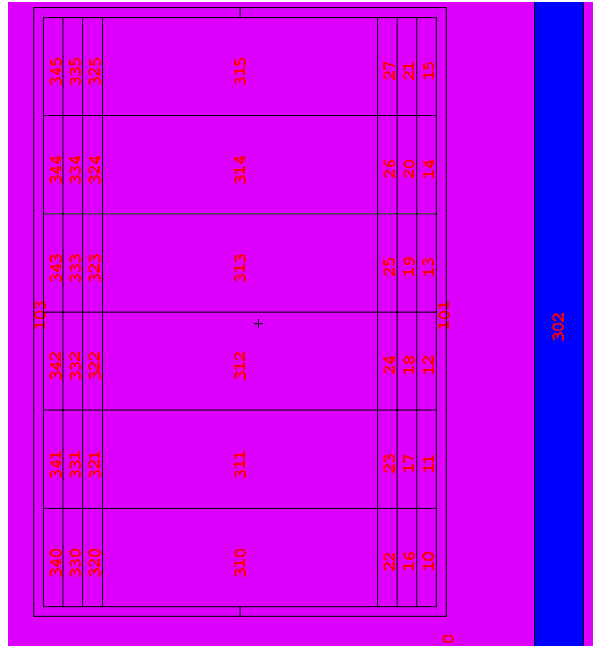


図 13: ダンプ上面の線源領域の区割りを示す。左方向が X 軸方向、上方向が Z 軸方向である。厚さが 0.5 cm、X 軸方向長さが 280 cm もしくは 20 cm、Z 軸方向長さが 100 cm の直方体状の線源領域が 42 箇所設置されている。

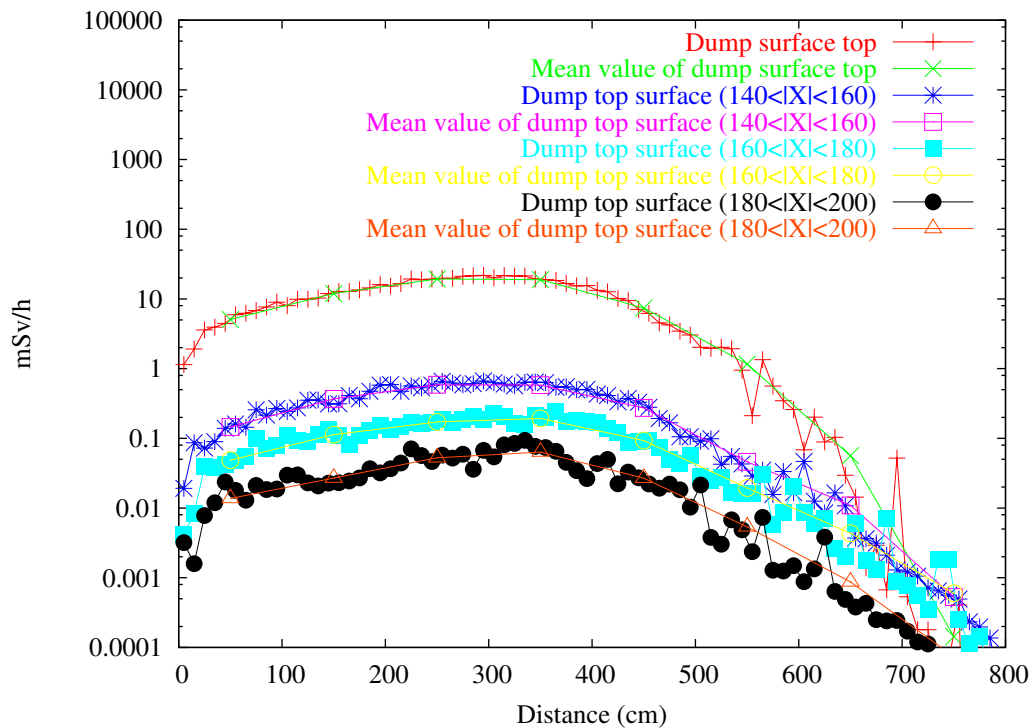


図 14: MARS 計算によるビームダンプ上面の線量当量の Z 軸方向の分布の X 軸方向依存性。ZX 平面の原点は、ビームダンプ前面がビームと交差する位置である。赤線は $|X|$ が 140 cm 以内の場合で、緑点は実際に計算で用いた値。青線は $|X|$ が 140 cm から 160 cm までの間の場合で、紫点は実際に計算で用いた値。シアン線は $|X|$ が 160 cm から 180 cm までの間の場合で、黄点は実際に計算で用いた値。黒線は $|X|$ が 180 cm から 200 cm までの間の場合で、オレンジ点は実際に計算で用いた値。

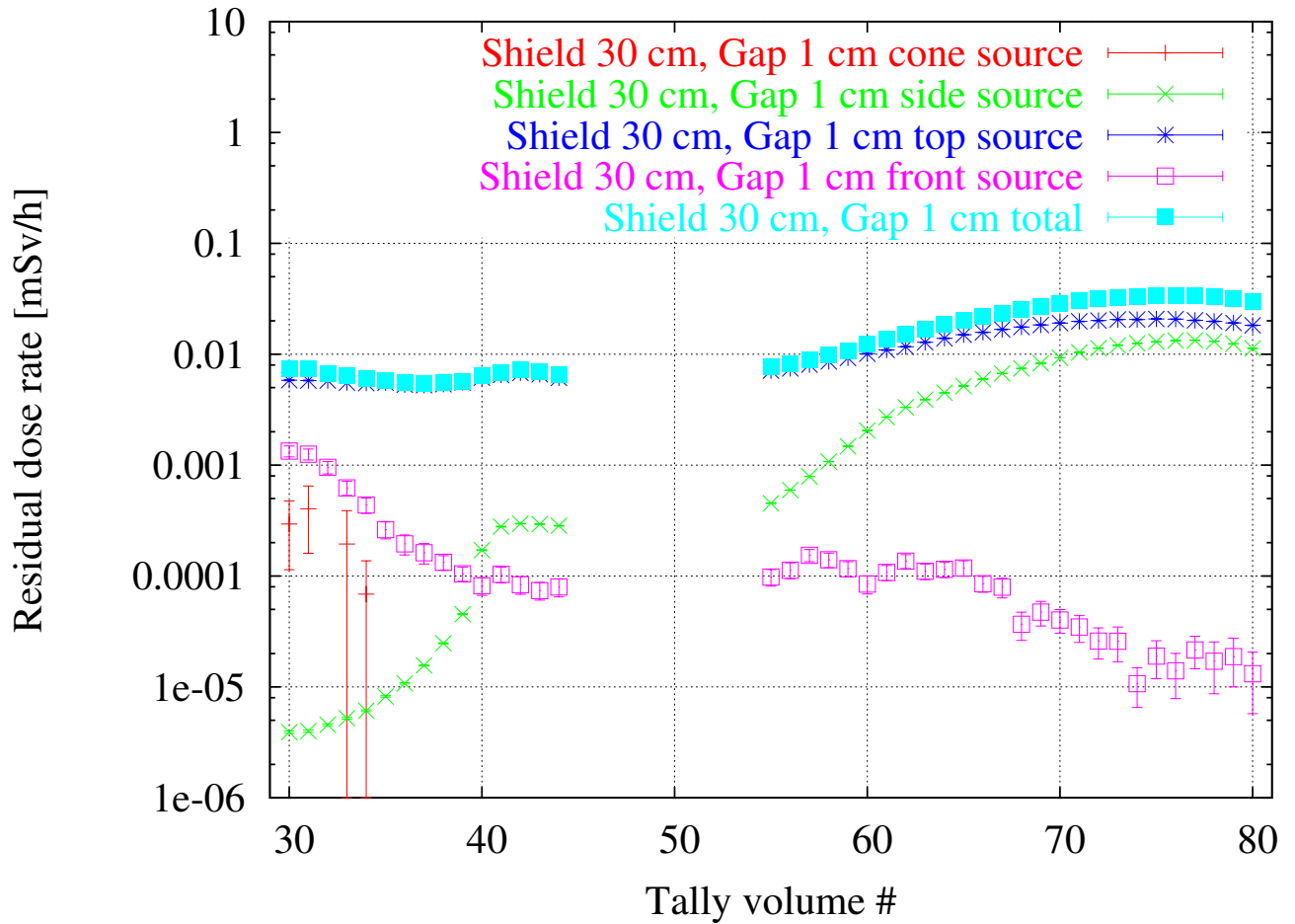


図 15: MCNP 計算の結果を示す。横軸は本文中の説明の通り、図 6 に示されている 評価領域の ID 番号を表す。赤点は、ビームダンプコーン内部に設置された全ての線源領域からの残留放射能の寄与の和である。紫点は、ビームダンプ前面に設置された全ての線源領域からの残留放射能の寄与の和である。緑点は、ビームダンプ側面に設置された全ての線源領域からの残留放射能の寄与の和である。青点は、ビームダンプ上面に設置された全ての線源領域からの残留放射能の寄与の和である。シアン点は、上記全ての線源領域からの総残留放射能を示す。

5.4 ビームダンプ前部遮蔽体の最適化

5.5 移設装置の設計

5.5.1 概要

J-PARC は 2 期に分かれて計画され、ハドロン実験室では第 1 期で建設される T1 ターゲットより下流に T2 ターゲットなどの建設が第 2 期に予定され、そのため約 50m 延長工事を行わなければいけない。ビームダンプも第 1 期と第 2 期では配置場所が異なるため、移設させる、新しく製作するなどの案があったが、低コストであるため移設させることとなった。本章では移設装置についてあらゆる装置を比較・検討している。

5.5.2 構造と移設装置の条件

移設させる構造・装置は移設荷重、速度、耐放射線性などの要因から決定される。シミュレーションを行い、検討した結果、図 1 のような構造となった。この構造はコア部の無酸素銅の周りに鉄 500mm を配置したものとなっていて、移設時にはコア前部に遮蔽用の鉄が配置される。またコア部の下部には移設装置設置用の空洞が左右 2 つあり、あらかじめレールを設置することになる。

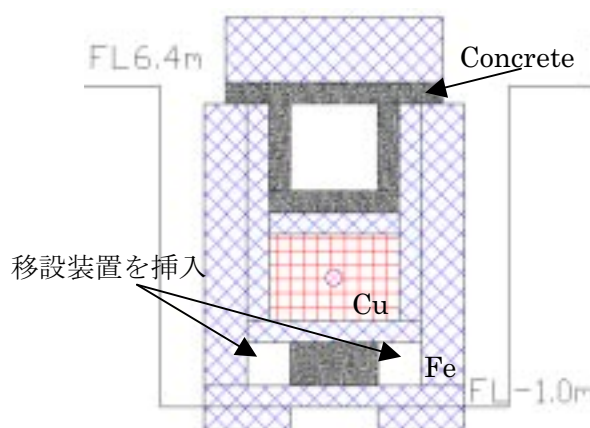


図 1 移設装置の設置場所

またこれらの重量を簡単に計算すれば、

$$\text{Cu} : 3.0 \times 2.0 \times 5.0 [\text{m}^3] \times 8900 [\text{kg/m}^3] = 267 [\text{ton}]$$

$$\text{Fe} : 3.0 \times 2.0 \times 3.0 [\text{m}^3] \times 7800 [\text{kg/m}^3] = 140 [\text{ton}]$$

$$(4.0 \times 3.0 \times 8.0 - 3.0 \times 2.0 \times 8.0) \times 7800 [\text{kg/m}^3] = 374 [\text{ton}]$$

$$\text{前部遮蔽体} : 3.0 \times 2.0 \times 0.3 [\text{m}^3] \times 7800 [\text{kg/m}^3] = 14 [\text{ton}]$$

$$\text{Concrete} : 3.5 \times 0.5 \times 8.0 [\text{m}^3] \times 2200 [\text{kg/m}^3] = 31 [\text{ton}]$$

$$\text{合計} : 267 + 140 + 374 + 14 + 31 = 826 [\text{ton}]$$

5.5 移設装置の設計

となり、これにサービススペースに配置される冷却装置・配管・ポンプ、移設時の前部遮蔽体などを加えるため、設計目標荷重を 1000ton とした。搬送距離は約 50m でこれを 1 日の仕事時間（8 時間）で移設するなら、搬送速度は $6.25[\text{m/hour}]=0.1[\text{m/min}]$ となる。

5.5.3 移設スキーム

今回の移設は放射線場で行われるため、少人数、短時間という制限があり、これを満たすような移設工法を考慮に入れると次のようになる（図 2）。1 期実験終了後は半年～1 年ぐらい冷却期間をおき、その間実験ホールの拡張工事を行う。この延長されたホールにも 40ton クレーンは設備されており、コア部以外はクレーンによって運ばれる。次に周辺装置の養生を行い、移設装置を設置し、ダンプの搬送、遮蔽体や周辺装置の再設置、2 期実験開始という順序で行われる予定である。

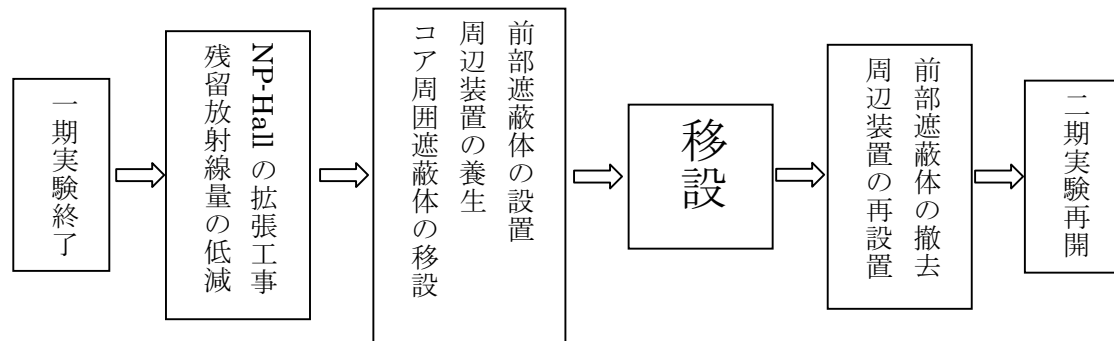


図 2 移設スキーム

移設装置の設置方法の概念図を図 3 に示す。まずダンプから離れた場所で移設装置を組み上げ、走行動力により所定位置まで移動させ、揚重装置により持ち上げ、移設を開始する。装置の組み上げや走行動力はなるべく遠隔から操縦できるものを選定することにより無益な被曝を避けることができる。

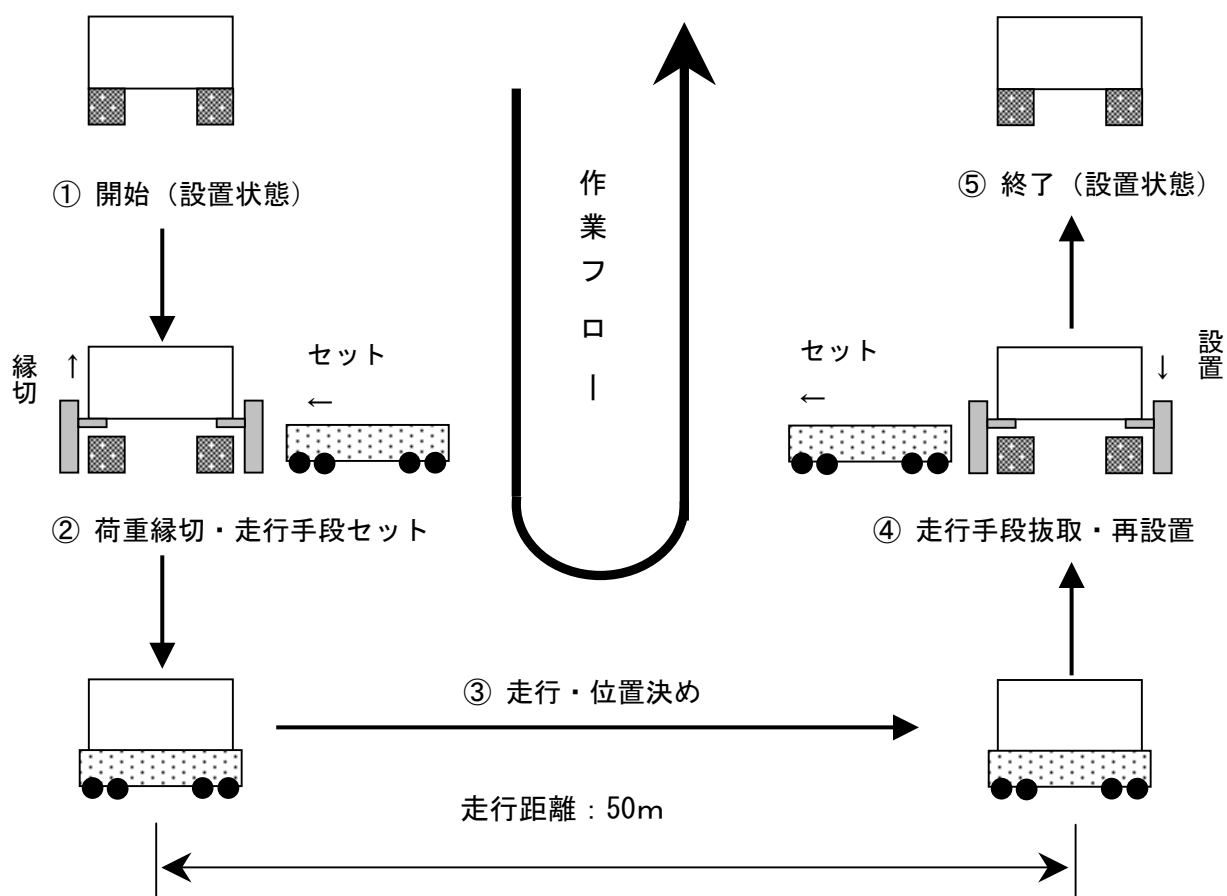


図3 移設工法のイメージ

5.5.4 移設装置の選定

本装置は耐放射線性、移設荷重、設置の容易性、低コストなどから選定されなければならない。ここでは荷重支持、揚重、走行動力に分け比較・検討を行った。

5.5.4.1 荷重支持装置

走行装置としてはクレーン、コロ、リニアガイド、エアベアリング、チルトタンクなどが考えられるが、1000ton という荷重・作業性・省スペースのためスライドジャッキなどが最適だと思われる。スライドジャッキは油圧ジャッキにすべり材が設置したもので、1つで荷重支持と揚重の2つの働きをする。これらを1000tonの耐えうる台数を並べ1組に連結することにより支持し移設可能となる。

5.5 移設装置の設計

5.5.4.2 揚重装置

5.5.4.1 節でスライドジャッキを選択することにより、揚重可能となる。

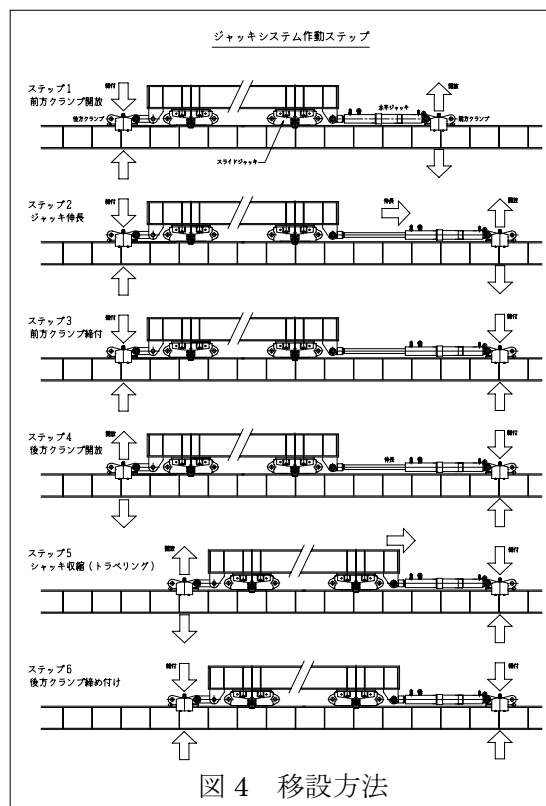
5.5.4.3 走行動力装置

牽引式ジャッキ・ウィンチ・自走台車などが候補に挙げられるが、1000ton もの大きい荷重・コストのため、牽引式ジャッキが最適だと思われる。この装置の長所は設置精度が優れ、後進が可能なことである。これは油圧を動力源とし、走行レール上で伸縮型油圧ジャッキ先端部に反力を取り牽引する。

5.5.5 移設方法の確立

5.5.4 で選択された装置を用い、移設方法を確立する。概念図を図 4 に示す。牽引式ジャッキ、スライドジャッキを図のように配置し、ダンプ前後方向にそれぞれ牽引反力と反力盛替え用にクランプを設置する。このクランプは軌条を直接つかみ、移設時にはどちらか一方が軌条をつかんでいることにより逸走防止にもなっている。

移設サイクルとしては、ステップ 1.走行方向前方クランプ開放、2.ジャッキ伸長、3.前方クランプ締付、4.後方クランプ開放、5.ジャッキ収縮、6.後方クランプ締付を繰り返すことにより、50m 移設可能となる。1 サイクルで 1m 移動する所要時間は約 3 分なので、50m では約 150 分（2 時間 30 分）となり、1 日の労働時間で移設可能である。



6 設備関係

前回の中間報告書[1]発行以降、施設部設備課による電気、冷却水、空調等の設備に関する実施設計が本格化した。設計業務は（株）ピーエーシーに発注して行われた。前回中間報告書の設備関係の章では、既存の遮蔽体の再利用、遮蔽体と気密構造、クレーン、電気室と受電設備、熱発生と冷却水・空気調和の設計、および制御について節を設け説明を行った。今回の中間報告書では、施設部による実施設計の進んだ電気設備、冷却水設備、空調設備について、前回からの進展を中心として述べる。

ビームライン要素による電力消費量およびそれによって発生する熱の除去に必要な冷却水設備、空調設備に関する基本的な考え方と具体的な値については前回中間報告書の 6.5 節に詳しく説明されている。基本的な考え方は前回以降変わっていない。ここでは、ビームライン要素の見直しなどによって前回以降変更のあった具体的な値について列挙する。

6.1 ビームライン電磁石の消費電力と冷却水負荷の見積もり

一次ビームラインや二次ビームラインの一部電磁石のコイルをMICで製造することなどを考慮して、ビームライン電磁石の消費電力に関して新たな見積もりが行われた。前回中間報告書の表 6.4 に対応する新電力見積もりを表 1 および表 2 として示す。表中実線の枠で囲まれた部分が第一期当初に対応すべき電力負荷である。

この見積もりから、第一期当初（30GeV ビーム+K1.8）の電力負荷は次のようになる。

- 一次ビームSY部：1.86 MW
- 一次ビーム実験室部：1.186 + 0.6（K1.8 最上流部）= 1.79 MW
- 二次ビーム：2.2 + 0.5（磁場測定）= 2.7 MW

この電力負荷に加えてビームダンプでのビームの全量損失による発熱を考慮して、次の発生熱量を冷却水で除去することが必要となる。

- 一次ビームSY部：1.86 MW
- 一次ビーム実験室部：1.186 + 0.6（K1.8 最上流部）+ 0.45（ビーム）= 2.24 MW
- 二次ビーム：2.2 + 0.5（磁場測定）= 2.7 MW

この値は、前回の中間報告書中の「表 6.7：電力見積もり（修正版）」にすでに反映されている。

一方、冷却水主配管等は、二期までも含めた最終形を想定して準備しておく。そのため、最終形（当然 50GeV）での冷却水流量の算定が必要となる。表 3、4 に磁石毎の流量を示す。

6.1 ビームライン電磁石の消費電力と冷却水負荷の見積もり

表1 電力見積もり（一次ビームライン）

一次陽子ビームラインA			一次陽子ビームラインB			一次陽子ビームラインC			ブリッジビームライン		
磁石名	電力		磁石名	電力		磁石名	電力		磁石名	電力	
	50GeV	30GeV		50GeV			50GeV			50GeV	
	(kW)	(kW)		(kW)			(kW)			(kW)	
H01	0	0.0									
V02	0	0.0									
Q01	82	30.3									
Q02	85	31.4									
H03A	500	184.7									
H03B	500	184.7									
V04	117	43.2									
Q03	44	16.3									
Q04	104	38.4									
Q05	101	37.3									
H05A	500	184.7									
H05B	500	184.7									
V06A	204	75.4									
V06B	152	56.2									
Q06	79	29.2									
Q07	79	29.2									
Q08	53	19.6									
Q09	141	52.1									
Q0A	141	52.1									
V07	0	0.0									
H08	0	0.0									
SM11	0	0.0	SM11	550							
SM12	0	0.0	SM12	550							
Q11	20	7.4	Q21	20							
Q12	77	28.4	Q22	77							
Q13	171	63.2	Q23	171							
Q14	100	36.9	Q24	100					BRQ1	100	
H11	117	43.2	H21	117					BRQ2	120	
V12A	306	113.1	V22A	306					BRB1	550	
V12B	165	61.0	V22B	165					BRB2	550	
T0									BRQ3	45	
Q15	70	25.9	Q25	70					BRQ4	80	
Q16	70	25.9	Q26	70					BRQ5	45	
Q17	49	18.1	Q27	49							
Q18	158	58.4	Q28	158		SY内合計	0		SY内合計	1490	
V13	0	0.0									
Q19	188	69.5				SM21	550				
Q1A	161	59.5				SM22	550				
SY内合計	5034	1859.9	SY内合計	2403		V31	0		BRV1	0	
						Q31	45		BRB3	550	
						Q32	40		BRB4	550	
						Q33	45		BRQ6	100	
						Q34	80		BRQ7	120	
BS1	250	250.0	V23	0							
BS2	325	325.0	Q29	188		CH内一次	1310		CH内合計	1320	
T1			Q2A	161							
BS3	250	250.0	B21	550		B31	550		BR合計	2810	二期
V14	117	43.2	B22	550		B32	550				
Q1B	175	64.7	TX			Q35	45				
Q1C	255	94.2				Q36	40				
Q1D	255	94.2	CH内合計	1449		Q37	45				
Q1E	175	64.7				Q38	80				
CH内合計	1802	1186.0	B合計	3852	二期	B33	550				
一次ビーム	6836	3045.9				B34	550				
			KLビーム	500	二期	Q39	45				
						Q3A	40				
			一期A			Q3B	45				
						Q3C	80				
						CH内二次	2620	二期			
						C合計	3930				
						スペクトロメ	1000	二期			

表2 電力見積もり（二次ビームライン）

K1. 8ビームライン				K1. 1ビームライン		
磁石名	電力			磁石名	電力	
	1. 8GeV/C				1. 1GeV/C	
	(kW)				(kW)	
D1	360			Q0	300	新規追加
Q1	120			D1	0	K1. 8と共通
Q2	120			Q1	150	
				Q2	150	
一次扱い合計	600			一次扱い合計	600	
CM1	25			CM1	30	
DC-SEP1	0			DC-SEP1	0	
CM2	25			Q3	120	
Q3	60			Q4	200	
Q4	100			Q5	200	
D2	200			Q6	120	
Q5	100			CM2	30	
Q6	60			DC-SEP2	0	
CM3	25			Q7	120	
DC-SEP2	0			Q8	200	
CM4	25			Q9	60	
Q7	60			D2	500	
Q8	100			Q10	100	
Q9	100			Q11	200	
Q10	60			Q12	120	
D3	1000					
Q11	60			二次扱い合計	2000	
Q12	100					
Q13	100			K1. 1合計	2600	一期B
二次扱い合計	2200			スペクトロメータ	2500	一期B
K1. 8合計	2800	一期A				
スペクトロメータ	1500	一期B				

6.1 ビームライン電磁石の消費電力と冷却水負荷の見積もり

表3 磁石ごとの冷却水流量

2012年

一次

冷却水の配管とポンプの流量 (1ヶ月前)
 ポンプは全2台

(万)

一次電子ビームラインA

磁石名	電力 50GeV (kW)	冷却水 (L/m)
H01	0	110
V02	0	110
Q01	82	70
Q02	85	80
H03A	500	470
H03B	500	470
V04	117	110
Q03	44	50
Q04	104	90
Q05	90	90
H05A	500	470
H05B	500	470
V06A	204	190
V06B	152	140
Q06	79	80
Q07	79	80
Q08	53	50
Q09	141	130
Q0A	141	130
V07	0	110
H08	0	110
SM11	0	0
SM12	0	0
Q11	20	20
Q12	77	70
Q13	171	160
Q14	100	90
H11	117	110
V12A	306	290
V12B	155	150
Q15	70	60
Q16	70	60
Q17	49	50
Q18	158	150
V13	0	110
Q19	188	170
Q1A	161	150

SY内合計 5034 5250

BS1	250	230
BS2	350	330
BS3	250	230
V14	117	110
Q1B	175	160
Q1C	255	240
Q1D	255	240
Q1E	175	160

CH内合計 1827 1700

一次ビー、 6851 6950 一期A

一次電子ビームラインB

磁石名	電力 50GeV (kW)	冷却水 (L/m)
SM11	550	520
SM12	550	520
Q21	20	20
Q22	77	70
Q23	171	160
Q24	100	90
H21	117	110
V22A	306	290
V22B	155	150
Q25	70	60
Q26	70	60
Q27	49	50
Q28	158	150

SY内合計 2403 2250

V23	0	110
Q29	186	170
Q2A	161	150
B21	550	520
B22	550	520
TX		

CH内合計 1449 1470

B合計 3852 3720 二期

KLビーム 500 500 二期

一次電子ビームラインC

磁石名	電力 50GeV (kW)	冷却水 (L/m)
SM21	550	520
SM22	550	520
V31	0	110
Q31	45	45
Q32	40	40
Q33	45	45
Q34	80	80

CH内一、 1310 1360

B31	550	550
B32	550	550
Q35	45	45
Q36	40	40
Q37	45	45
Q38	80	80
B33	550	550
B34	550	550
Q39	45	45
Q3A	40	40
Q3B	45	45
Q3C	80	80

CH内二、 2620 2620 二期

C合計 3930 3980

スペクトロ 1000 1000 二期

ブリッジビームライン

磁石名	電力 50GeV (kW)	冷却水 (L/m)
BRQ1	100	90
BRQ2	120	110
BRB1	550	520
BRB2	550	520
BRQ3	45	45
BRQ4	80	70
BRQ5	45	45

SY内合計 1490 1400

BRV1	0	110
BRB3	550	520
BRB4	550	520
BRQ6	100	100
BRQ7	120	110

CH内合計 1320 1360

BR合計 2810 2760 二期

2/9/2004

1期計画2期

PACの決定基礎

資料

表4 磁石毎の冷却水流量と純水系統毎のまとめ

K1. 8ビームライン			K1. 1ビームライン			その他		
磁石名	電力 1. 8GeV/C (kW)	冷却水 (L/m)	磁石名	電力 1. 1GeV/C (kW)	冷却水 (L/m)	項目	電力 (kW)	冷却水 (L/m)
D1	360	360	Q0	300	300	新規追加		
Q1	120	120	D1	0	0	K1. 8と共通		
Q2	120	120	Q1	150	150			
			Q2	150	150			
一次扱い	800	800	一次扱い	600	600	TS1(π2)	1000	1000
CM1	25	25	CM1	30	30	TS2(T1)	200	200
DC-SEI	0	0	DC-SEI	0	0	TSスペクト	400	400
CM2	25	25	Q3	120	120			
Q3	80	80	Q4	200	200	SY内部	600	600
Q4	100	100	Q5	200	200	SY外部	1000	1000
D2	200	200	Q6	120	120	TS合計	1600	1600
Q5	100	100	CM2	30	30			
Q6	80	80	DC-SEI	0	0	πμ一次	120	120
CM3	25	25	Q7	120	120	πμ二次	300	300
DC-SEI	0	0	Q8	200	200			
CM4	25	25	Q9	60	60	πμ	420	420
Q7	60	60	D2	500	500			
Q8	100	100	Q10	100	100			
Q9	100	100	Q11	200	200			
Q10	60	60	Q12	120	120			
D3	1000	1000	二次扱い	2000	2000			
Q11	60	60	K1. 1含	2600	2600	一期A		
Q12	100	100	スペクトロ	2500	2500	一期B		
Q13	100	100						
二次扱い	2200	2200						
K1. 8含	2800	2800						
スペクトロ	1500	1500						

(注)水1 (SY-12) 9500 L/min
 A 5250
 B 2250
 C 0
 DR 1400
 TS 600
 9500

(注)水3 (KH 1/2 + E-1) 8500 L/min
 A 1700
 B 1470
 KL 500
 C 1360
 BR 1360
 KH8 600
 KH1 600
 πμ 120
 7710 L/min

(注)水4 (KH 3/2)
 1362 L/min
 C 2620
 C2A 1000
 KH8 2200
 KH820 1500
 KH1 2000
 KH12A 2500
 (1/2) 500
 TS 1000
 πμ + 300
 13620

6.2 空調負荷の見積もり

6.2 空調負荷の見積もり

空調負荷の算定にあたっては、負荷の要因としてケーブルのオーム発熱（電力負荷の2.4%）と冷却水配管等のその他の発熱（電力負荷の1.6%）を考えてきた。水冷貫通バスダクトの開発が進んできたので、水冷貫通バスダクトを採用できる箇所についてはケーブルのオーム発熱を考慮せずその他（1.6%）のみを考慮することにする。ビームダンプ発熱の空調負荷は4%とする。この結果、前回中間報告書作成時にくらべて実験ホール内での空調負荷が減少し、次のようになった。（）内の数値は前回中間報告時の値である。

- 第一期当初（30GeV ビーム+K1.8）実験ホール内：50kW（89kW）
- 第二期完成時実験ホール内：263kW（338kW）

なお、空調設備についても、ダクト主配管等は第二期完成時の風量をまかなえるものを設置することとしている。

6.3 電力負荷、冷却水負荷、空調負荷のまとめ

表 6.5 に電力負荷、空調負荷、冷却水負荷に関する要求のまとめを示す。第一期では表中の「30GeV 新」の欄にある負荷をまかなえるよう設備を準備するが、冷却水主配管、空調ダクト主配管等は「50GeV 最終形」をまかなえるように準備する。これを受けて、設備関係の実施設計を行う（株）ピーエーシーがまとめた「要求事項のまとめ」が表 6.6 および 6.7 である。

表 5 電力負荷、空調負荷、冷却水負荷のまとめ

冷却水熱負荷 (MW)		30GeV 新		50GeV 新		50GeV 最終形	
一次圧、温度上昇		K1.8		K1.8+K1.1			
		MW	L/min	MW	L/min	MW	L/min
純水1(SY-一次)	20気圧、20度	1.86	1860	5.03	5300	9.52	9500
純水3(KH-一次+ビーム)	20気圧、20度	2.24	2240	3.75	3750	8.45	8500
純水4(KH-二次)	20気圧、20度	2.7	2700	4.7	4700	13.62	13620
純水2(電源熱)	10気圧、10度	0.7	1400	1.3	2600	1.3	2600
純水2(実験装置)	10気圧、10度	0.3	600	0.3	600	0.3	600
未処理水(圧縮機)	10気圧、10度	0.5	1000 SKS	0.9	1800 SKS+TR+α	0.9	1800 SKS+TR+α
空調熱負荷 (kW)		30GeV 新		50GeV 新		50GeV 最終形	
空調温度、許容温度		K1.8		K1.8+K1.1			
		kW		kW		kW	
SY(第一機械室、純水1の4%)	33度、40度	75		200		380	
KH(第二機械室、純水3の4%)	33度、40度	89		150		338	
KH(第二機械室、水冷BD使用時)	33度、40度	50		80		263	
電力負荷 (MW)		30GeV 新		50GeV 新		50GeV 最終形	
		K1.8		K1.8+K1.1			
		MW		MW		MW	
SY-一次		1.86		5.03		9.52	
KH-一次		1.79		3		7.7	
KH-二次		2.7		4.7		13.62	
実験装置		1		1.6		2.3	
総計		7.35		14.33		33.14	

表6 (株)ピーエーシーによる要求事項のまとめ(1)

原子核・素粒子実験棟 要求事項のまとめ-1

1. 空調機設備

空調・換気補元		空調方式	空調容量	換気方式	換気量	人員	温度		湿度	発熱量
室名							夏	冬		
							℃	℃	%	%
スイッチヤード	実験中	C/C+E	冷房計算	給排気ファン	OCMH		30	30	成り行き	別表
	実験終了	C/C+E		給排気ファン	1回/H(※1 外気処理温度15℃)		15℃ ※2	15℃ ※2	成り行き	
Kホールビームライ	実験中	C/C+E	冷房計算	給排気ファン	OCMH		30	30	成り行き	別表
	実験終了	C/C+E		給排気ファン	1回/H(一期2000CMH、二期2500CMH)		15℃ ※2	15℃ ※2	成り行き	
Kホール実験ホール	X			給排気ファン	1回/H 外乱負荷の除去		50以下		成り行き	
電源室サブトンネル	PAC	ケーブル発熱分		給排気ファン	1回/H		成り行き		成り行き	別表
電源棟 電源室	PAC	装置発熱分(※1)		給排気ファン	1回/H		成り行き		成り行き	別表
電源棟 制御室	PAC	空調計算		空調換気扇	換気回数と発熱量による。0.2人/m ²	0.2人/m ²	26	22	成り行き	別表
電気室	PAC	装置発熱分(※1)		給排気ファン	1回/H		成り行き		成り行き	別表
第1機械棟 機械室	PAC	装置発熱分(※1)		給排気ファン	発熱量による。		成り行き		成り行き	別表
第1機械棟 汚染管理室	X						成り行き		成り行き	別表
第2機械棟 機械室	PAC	装置発熱分(※1)		給排気ファン	発熱量による。		成り行き		成り行き	別表
第2機械棟 汚染管理室	X						成り行き		成り行き	別表
He-3機械室				給排気ファン	発熱量による。		40		成り行き	30hwくらい
搬入棟 汚染管理室	PAC	空調計算		給排気ファン	人員による。排気はHEPAによる。0.2人/m ²	0.2人/m ²	26	22	成り行き	
搬入棟 出入管理室	PAC	空調計算		給排気ファン	人員による。0.2人/m ²	0.2人/m ²	26	22	成り行き	
搬入棟 便所	X				10回/H		成り行き		成り行き	
搬入棟 保管庫	X				5回/H		成り行き		成り行き	

※1 室内条件40℃として算定

※2 条件付き

空調方式 C/C+E 冷却コイル+電気ヒータ / PAC 空冷ヒートポンプパッケージ空調機

■発熱条件

系統	単位	KW	1期30GeV	2期	備考
スイッチヤード	第1機械室	75	380	?	上流・下流の発熱比
Kホール	第2機械室	50	263	?	ダクト損失
電源室サブトンネル		12	37		最終確認2002.10.8
電源棟電源室		159	360		KVAの1.5%でよい
電源棟制御室		?	?		

電源棟 電源室発熱算定					負荷容量KVA												発熱量KW 角形・1.5%		換気量CMH	カリ m ²
線路号	25	26	27	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	合計						
30GeV	1979.2	1953.8	1976.7	0	0	2686.8	2000.11	0	0	0	0	0	0	10576.7	159	68.831	4			
50GeV	1841.9	1979.7	1958.7	1878	1878	2686.8	2000.11	1554.9	2525.6	1841.4	1591.4	1571.4	2128	25816	388	167.865	44			

電源棟での発熱量は、負荷容量の1.5%とする。

電源棟 電気室発熱算定		負荷容量	発熱量KW	換気量	カリ m ²
		KVA	KW	CMH	
今回		300	6.31	2732	0.7
将来		600	12.09	5234	1.4

表7 (株)ピーエーシーによる要求事項のまとめ(2)

原子核・素粒子実験棟 要求事項のまとめ-2

2. 冷却水設備

系統	1期30GeV	2期		温度℃	圧力MPa	備考			
		流量 l/min	流量 l/min						
熱水1	スイチヤード二次電磁石	1.86	1880	8.52	32.00	52.00	15.00	最終確認2002.10.8	
熱水2	Kホール二次土ボトム電磁石	2.24	2740	8.45	8500	32.00	52.00	15.00	最終確認2002.10.8
熱水3	Kホール二次	2.70	2700	13.05	13650	32.00	52.00	15.00	最終確認2002.10.8
熱水4	電源棟冷却	1.00	2000	4.30	4600	32.00	42.00	7.00	最終確認2002.10.8
未使用	地圧換熱		1000	1800	32.00	42.00	7.00	最終確認2002.10.8	

50GeVとの比較

電磁石	機器圧力損失	7 kg/m	14.129	
冷却水温度	32℃～	47℃	40GeVまで対応 受槽オーダ番14.11頃	
	32℃～	50℃	受槽フロア-14.2～14.4	
	25℃～	℃～	32℃	50GeVまで対応 受槽フロア-14.2～14.4
電磁石	機器入口圧力	5 kg/m	kg/m	2002.5.17メーカ打合せ
冷却水温度	32℃～	42℃	40GeVまで対応	

2003.1.29
原子核・素粒子実験棟2/3

初期
冷却水 10分ほど
590 g/min 26.2 計
2003.10.28 佐藤先生確認

6.2 空調負荷の見積もり

7 制御とモニタ

7.1 ローカル制御システム

7.1.1 制御システム概要

ハドロン実験施設制御システム設計の基本方針は以下の通りである。遅い取り出しビームラインの制御概念図（案）を図1に示す。

1. ビームラインを設計、製作、管理するグループが制御も担当すべきである。
2. 加速器中央制御との情報交換は積極的に行う。具体的には EPICS(Experimental Physics and Industry Control System: <http://www.aps.anl.gov/epics/>)を使って情報のやり取りを行う。
3. 多種多様な機器がそれぞれ独立にデータを取ることも出来るようにし、制御システムが動かなければ各自の仕事が出来ないという状態を避ける。
4. ビームライン運転に必要な操作画面を用意し、担当者が操作する。測定データはバックアップ可能な記録システムに保存される。各種データベース及びドキュメントを整備する。

ビームライン制御に必要な要素は以下の通りである。

- ◆ 電磁石インターロック（温度スイッチ、冷却水差圧スイッチ等）
- ◆ 電磁石電源（電流・電圧設定、電磁石・電源ステータス等）
- ◆ 二次粒子生成標的（回転速度、標的溫度、冷却水状態、上下駆動装置等）
- ◆ 真空膜と冷却装置（圧力、流量、温度等）
- ◆ ビームモニタ（強度、プロファイル、ビームロス）
- ◆ 真空度モニタ（真空度、ゲートバルブ、高速遮断装置）
- ◆ 温度モニタ（コリメータ、ビームダンプ、大型真空槽）
- ◆ 二次ビームラインスリット（駆動装置、設定位置）
- ◆ PPS(Personnel Protection System)関係機器（トンネルドア、パーソナルキー、空調状態、ビームプラグ、緊急停止装置、偏向電磁石等）

7.1.2 計測ステーションとネットワーク

ハドロン実験施設（HD ホール）の二次粒子生成標的付近とビームダンプ付近は多くの信号線を取り扱わなければならないが、これら全てをローカル制御室（以後制御室）まで配線するのは現実的ではない。従って信号処理系を搬入棟、制御室、HD ホール電源ステージ、ビームダンプの4箇所に分散させ、取得したデータのみを制御用ネットワーク経由で制御室に送信する。図2に計測ステーション配置図を示す。

計測ステーションでは IOC(Input Output Controller)と呼ばれる VME のオンボードコンピュータを用いてデータ収集や機器制御を行う。ビームモニタのデータ収集には中央制御棟から

7.1 ローカル制御システム

送信されてくる加速器運転サイクルに同期した信号を用いる。

ローカル制御ネットワークは原則として一般のビームラインユーザーが使用するネットワーク（以下、一般ネット）からはアクセス不可とする。中央制御のネットワークとどのように接続するかは今後決定する。

7.1.3 EPICS チャンネルアクセスと命名法

EPICS では CA(Channel Access)プロトコルを通じてコントロール対象（チャンネル）にアクセスする。従ってコントロールされる対象は一意に区別できる 28 文字以内の名前を持たなければならない。J-PARC では様々な加速器施設で使用する多様な機器を EPICS で統一的に管理するため、決まった命名法に従って各チャンネルに名前をつけることになっている。原子核素粒子実験施設では、頭文字が HD で始まり、コロン（:）で区切られる以下のような命名法を用いる。

HD [ビームライン名（3 文字以内）]:[機器略称（6 文字以内）]:[場所（6 文字以内）]:[機能略称（8 文字以内）]

ビームライン名は一次ビームライン（A、B、C ライン）や二次ビームライン（K1.8、K1.1 等）の略称、機器略称とは電磁石電源や生成標的、コリメータ等のビームライン機器、機能略称とは個々の機器に特有の機能名称である。また、チャンネル名は全て大文字でなければならない。

各チャンネルにつけられた名前はいくまで EPICS システム内部で一意性を保障していることが重要であり、表示画面上は便宜上わかりやすい名称を使用してよい。ただし、略称とチャンネル名の対応はきちんとつけておかなければならない。

7.1.4 データベースと Web システム

ビームライン機器から得られたデータは運転記録と共に保存、または Web を使って表示されることが望ましい。また、ケーブルの配線記録や物品管理等を円滑に行うためにも、データベースを有効に活用したい。近年 RDBS(Relational Data-Base System)が発達し、WWW 上でも PHP に代表されるようにデータベースと容易に連携可能な仕組みが存在するので、これを活用して各種情報を集約し、作業者の便宜を図る。

7.1.5 インターロックシステム

インターロックシステムは機器の異常を感知して加速器の運転を停止し、事故の防止やビームライン機器異常の早期検出という重要な役割を担っている。J-PARC では、運転モードの変更やエリアへの入退出等作業安全に関わるインターロックとして PPS(Personnel Protection System)、ビームライン機器の故障を最小限に抑えるためのインターロックとして MPS(Machine Protection System)の二種類のインターロック系統が定められている。インターロック信号の大部分は接点信号の組み合わせで構成され、ローカル制御で信号をまとめた後に中央制御棟に送られる。PPS についての詳細は前回の報告[1]にまとめられている。MPS は原則として PPS 以外の全てのビームライン機器が対象となる。

インターロックシステムの実装としては PLC(Programmable Logic Controller)が用いられるが、EPICS との整合性をとるために PLC のネットワークモジュールを使用してネットワーク経由でデータをやりとりする。操作画面上には現在のインターロック状態が一目でわかるように表示する。

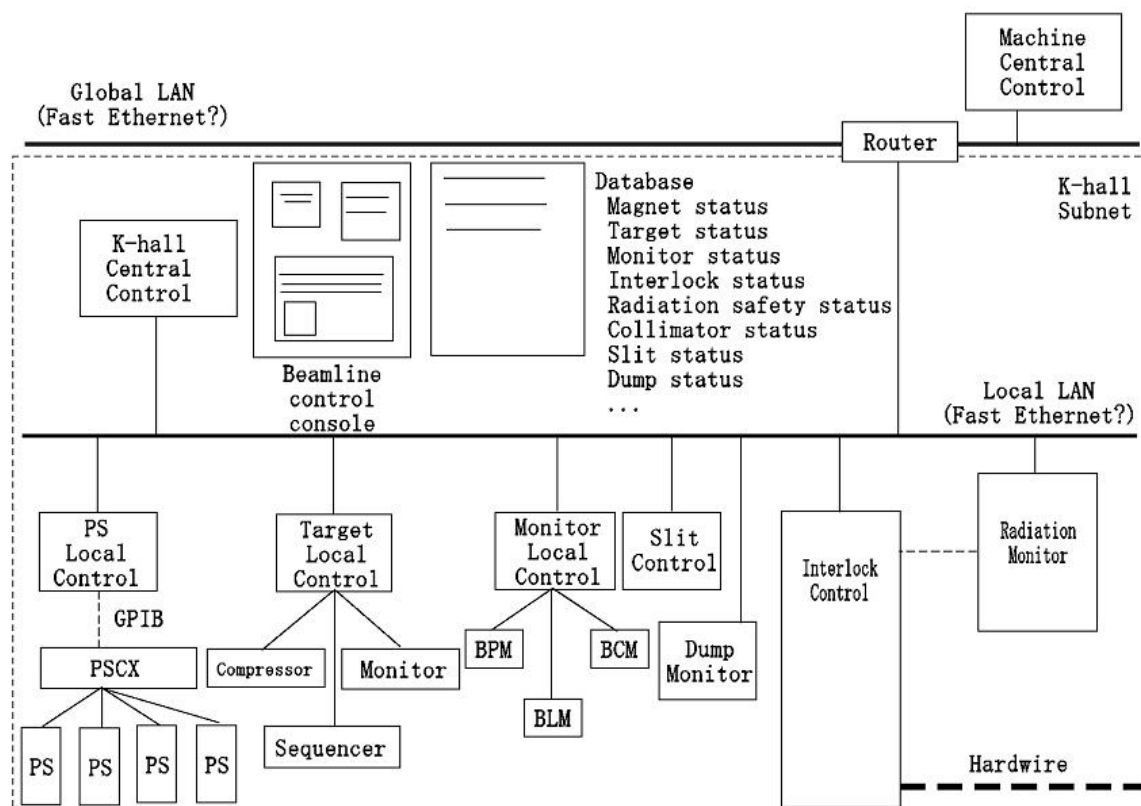


図1 遅い取り出しビームライン制御概念図 (案)

7.1 ローカル制御システム

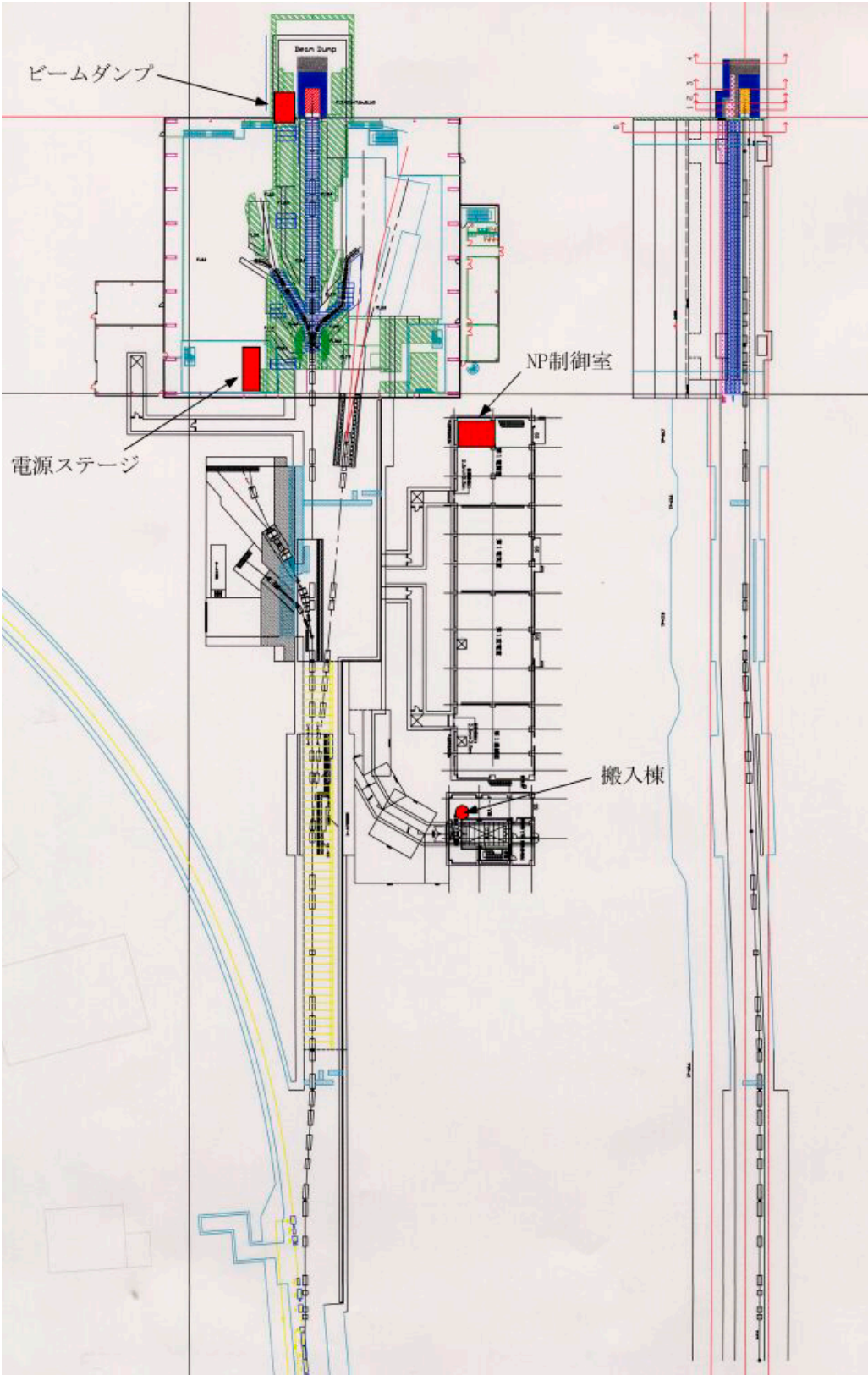


図2 計測ステーション配置図 (案)

7.2 ビームモニタ

7.2.1 遅い取り出しビームモニタ概要

現在の 12GeV-PS 遅い取り出しビームラインでは、以下のビームモニタを使用してビームチューニングを行っている。

1. ビーム強度モニタ
 - (ア) SEC (Secondary Emission Chamber) ----- 遅い取り出しビーム(参考文献7)
 - ① ビームが Al 膜を通過して出る二次電子を測定
 - ② Al フォイルの放射化法で絶対値校正
 - (イ) CT (Current Transformer) ----- 速い取り出しビーム
 - ① 速い取り出しビームの作る磁場をコアでピックアップして測定
2. ビームプロファイルモニタ
 - (ア) 蛍光スクリーン+撮像管カメラ
 - ① 蛍光スクリーンにビームが当たって出る光を撮像管カメラで観測
 - (イ) SPIC (Segmented Plate Ionization Chamber) (参考文献8)
 - ① 大気圧の He または Ar ガスを用いた多チャンネル電離箱
 - ② ビームがガスをイオン化して出来る電子をストリップ型電極で収集
 - ③ モニタの膜が焼損したら交換

図1にニュートリノビームラインの標的直前に設置されたモニタを示す。CTを除く強度モニタ、プロファイルモニタ共にビームを遮断して測定を行うタイプのモニタである。これらはビーム強度、プロファイルを確実に測定するのに長年にわたって非常に有効に使用されてきた。

大強度陽子ビームの強度と空間分布を正確に測定することはビームを安全に標的やダンプに輸送するために極めて重要である。また、大強度ビームが軌道からずれた場合にはビームライン機器に深刻な損傷を与えるので、そのような場合にはすみやかにビーム取り出しを停止しなければならない。

さらにメンテナンスや放射線遮蔽の観点から、ビームモニタで生じるビーム損失を最小限に抑えなければならない。現在の EP1 では、400m のビームラインで約 10% のビーム損失があり、ビームパワーが約 6 kW であることを考えると、平均のビーム損失は 1.3 W/m となる。この程度の損失をオンハンドでメンテナンスできるレベルの限界とすると、J-PARC ではビームパワーが 750kW なので、例えば 75W のビームロス、つまり反応率で 10^{-5} レベルのビームロスが要求される。これは大気圧の空気では 7.5mm、1Pa の空気では 570m、Al で 4 μ m、Ti で 2.8 μ m、鉄で 1.7 μ m となり、ビームを遮断する場合には極めて薄い物質しか許されることがわかる。

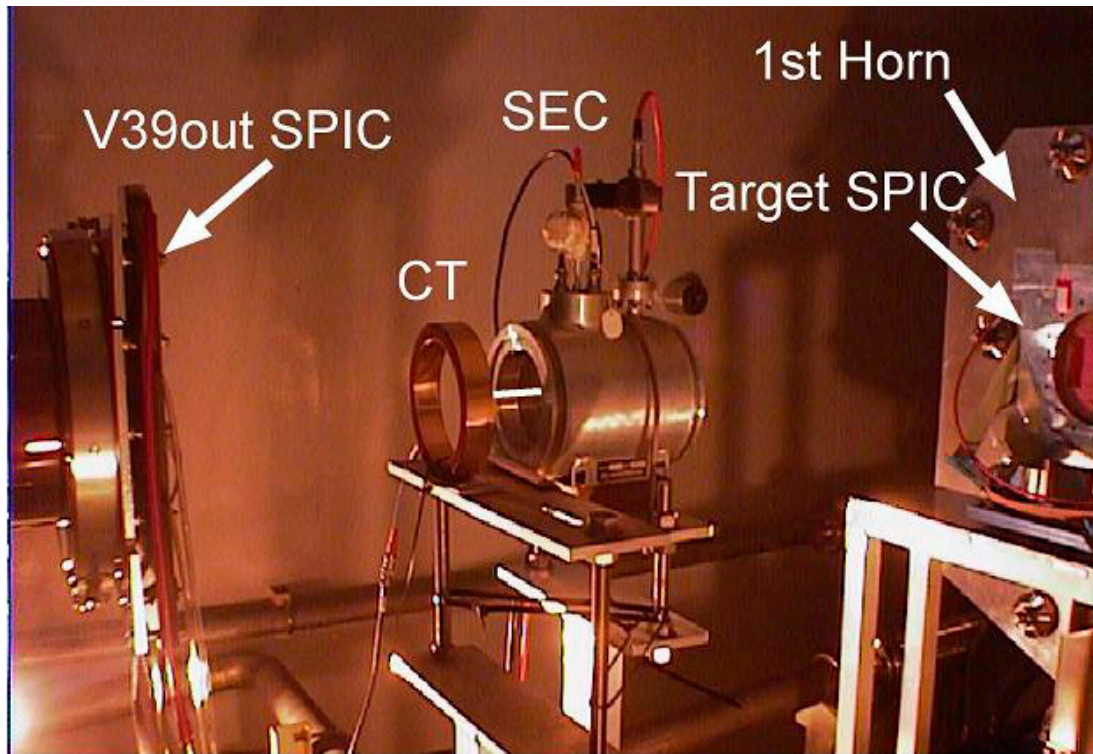


図1 12GeV-PS ニュートリノビームライン標的直前に設置されたビームモニタ

7.2.2 遅い取り出しビームモニタ要求仕様

遅い取り出しビームの仕様と、モニタへの要求は以下のようなものである。

1. 遅い取り出しビーム
 - (ア) エネルギー30～50GeV、強度 $10^{12} \sim 3 \times 10^{14}$ proton/pulse、DC ビーム
 - (イ) 加速器運転サイクル 3.4 秒、取り出し時間 0.7 秒
2. モニタ要求仕様
 - (ア) 空間分解能：約 1mm
 - (イ) ビーム強度：強度 $10^{12} \sim 3 \times 10^{14}$ proton/pulse、測定精度 1%
 - (ウ) 残留放射能が低いこと
 - (エ) ビームロスの発生を 1W/m 程度に抑えること
 - (オ) 寿命が長く、安定に運転できること
 - (カ) 耐熱、耐放射線性を持つこと
 - (キ) 設置、交換が容易に出来ること
 - (ク) 低コスト

以上の要求を満たすビームモニタとして、以下で述べるようなビームモニタが考えられる。

7.2.3 残留ガスを用いたビームプロファイルモニタ(RGBPM)

RGBPM とは、陽子ビームがダクト中の残留ガスをイオン化して発生する電子・陽イオン対を電磁場で電極に収集し、信号として観測する。このモニタの特徴はビームを遮断する物質が無く、ビームロスを発生させないことである。さらに、電離箱方式のモニタは原理がシンプルで、確実に動

作すると期待される。

参考文献9にあるように、12GeV-PS 加速器でもこの方式のモニタを使用しているが、加速器の真空度では生成イオン対の数が非常に少ないため、MCP(Micro Channel Plate)を使って信号を増幅している。ただ、MCPは1C程度の電荷入力があるとゲインが低下し、交換するか定期的にゲインを校正する必要がある。また、大強度ビーム環境下での放射線損傷も懸念される。さらに、パルスビームでは瞬間的なビーム強度(パンチ長 50nsec 程度)が強いいため、ビーム自身の作る電磁場の影響が無視できず、生成された電子・陽イオンがビームの作る電場で散乱されてしまう。これを防ぐためにはビームの電場に打ち勝つ程強い電場をかける必要があり、12GeV-PS 加速器のモニタは10-15kV/10cm という強い電場をかけている。ビームの電場強度はビーム電流に比例するため、現在の100倍のビーム強度ではこのモニタを使用するのは困難である。電荷を収集する方向に磁場をかけ、磁場に巻きつけて散乱の影響を抑える方法も考えられるが、装置が大掛かりになりあまり現実的とはいえない。

しかしながら、遅い取り出しビームでは上記の状況は一変する。ビームラインの真空度は1Pa程度であり、増幅器を用いなくても観測に十分な信号強度が期待できる。そのため、増幅器自身の劣化やゲイン校正の問題が発生しない。また、取り出し時間が1秒程度になるので、ビームの作る電磁場の影響は現在の100倍のビーム強度でも無視できる。以上のように、RGBPMは遅い取り出しビームのプロファイルモニタとして望ましい特性を備えている。

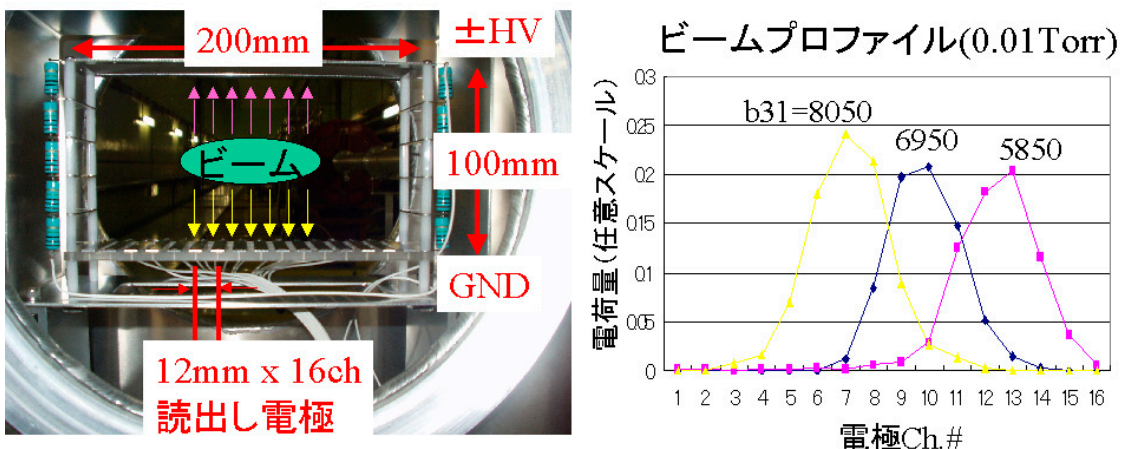


図2 残留ガスビームプロファイルモニタの電極構造(左)と真空度が0.01Torrの場合に陽イオンを収集して観測されたビームプロファイル分布(右)。

図2に12GeV-PSのニュートリノビームラインに設置されたRGBPMの電極構造を示す。電極の上部に電圧を印加し、下部にあるパッドで集めた信号を読み出す。左右には電場整形用に抵抗分割された電極および抵抗(10MΩ)がある。

図2右にEP2のCラインで測定された遅い取り出しビームのプロファイルを示す。上流の偏向電磁石B31の値を変えてビーム位置を左右に動かすと、プロファイルもそれによって位置が変化する。これより、低真空度での残留ガスモニタの動作原理が実証された。

図3は1Torrで陽イオンを収集した場合の測定をすぐ下流のSPICで測定したビームプロファイルと比較したものである。これを見ると0.01Torrの陽イオン収集の場合よりも幅が狭くなっているが、SPICで測定されたビーム幅よりも広いことがわかる。プロファイルが広がって見える原因としては陽イオンが電極に到達するまでにガス分子と衝突、拡散が起こっている、または反対方向に飛んでいく電子がガスをイオン化して偽の信号が見えている、等色々考えられる。

7.2 ビームモニタ

解決策としては電場に平行に弱い磁場をかけ、電子とイオンの横方向への拡散を抑制することが有効ではないかと考えられる。今後もテストを継続していく。また、残留ガスモニタは相対的なビーム強度にもよい直線性を持つと考えられるので、この点についても今後試験を行いたい。

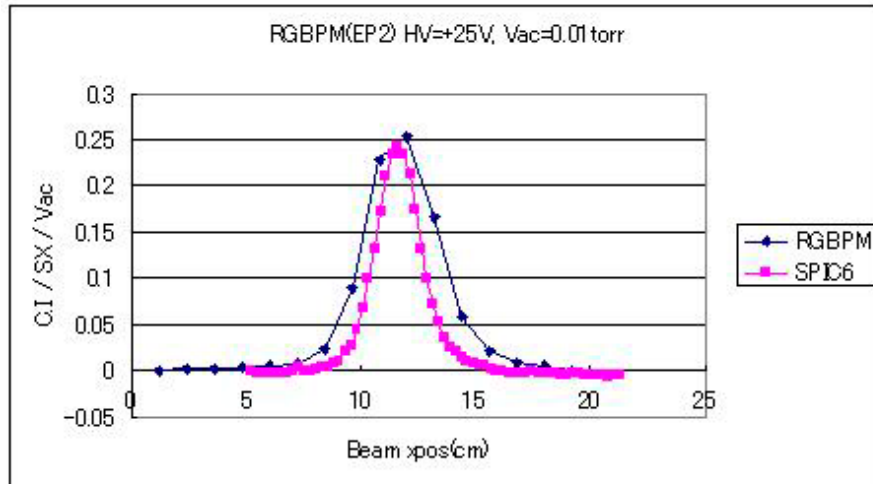


図3 1Torr、陽イオン収集モードの RGBPM のプロファイルと、
下流の SPIC で測定されたビームプロファイル

7.2.4 ビームロスモニタ(BLM)

大強度陽子ビームでは、ビームの軌道がそれて大きなビームロスが発生すると、ビームライン機器が深刻な損傷を受け、復旧には多大な時間と手間がかかることが予想される。これを防ぐためにはビームロスを検出して想定外のロスが発生した場合にはすみやかに加速器運転を停止しなければならない。ビームロスモニタ(BLM)はそのために必要である。

ビームロス信号のダイナミックレンジ、価格、耐放射線性等を考慮すると、12GeV-PSの主リングで用いられている空気電離箱型のビームロスモニタがもっとも適当ではないかと思われる。このモニタについては参考文献10が詳しい。

図4に HF 同軸ケーブルを加工して製作したビームロスモニタの試作機を示す。HF ケーブルは誘電体に空気を用いた、放送局等で使用されている低損失の同軸ケーブルである。その両端に高圧端子と信号端子を取り付け、電離箱として使用する。スペーサとして、ポリエチレン製の紐がスパイラル状に巻き付いている。

遅い取り出しビームで信号試験を行うため、12GeV-PSのEP2ビームライントンネルに設置し、信号を測定した。図5に K2 標的近傍の床に設置したビームロスモニタの写真と、MARS モデリングを示す。同様に K0 標的付近にも設置し、遅い取り出しビームでの信号を観測した。

図6に遅い取り出しビームで測定した K0BLM の信号波形とプラトー曲線を示す。信号波形は遅い取り出しビームの時間構造が非常にきれいに観測された。K0BLM は300V、K2BLM は50V付近でプラトーに入っている。プラトーに入る電圧が異なるのは K0BLM では大きいロス入力で再結合の影響を受けるためと考えられる。

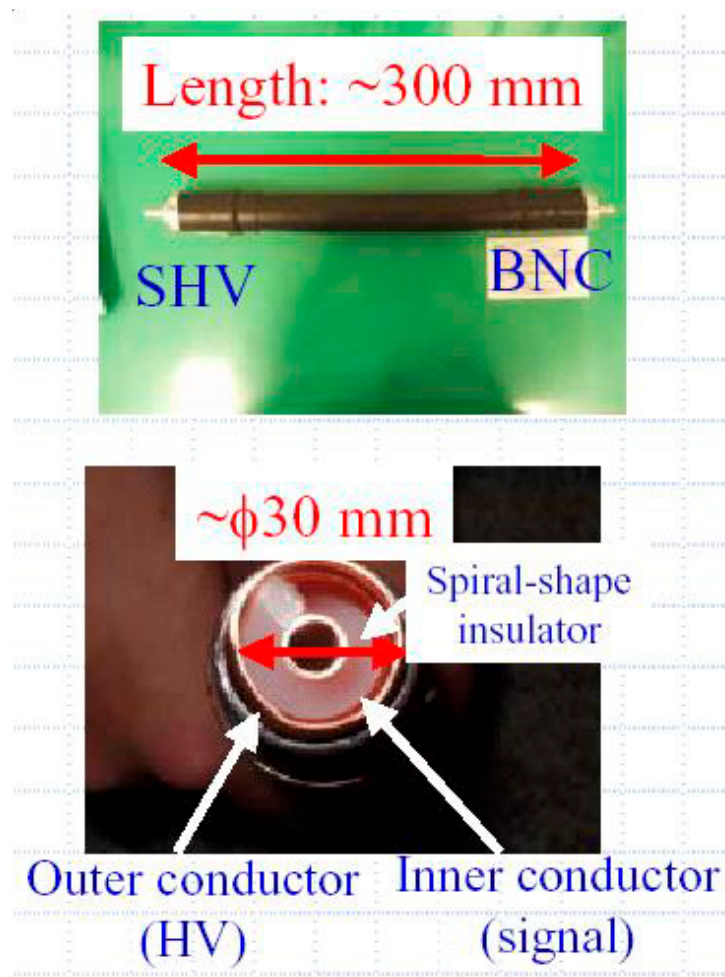


図4 HF同軸ケーブルを用いたビームロスモニタ

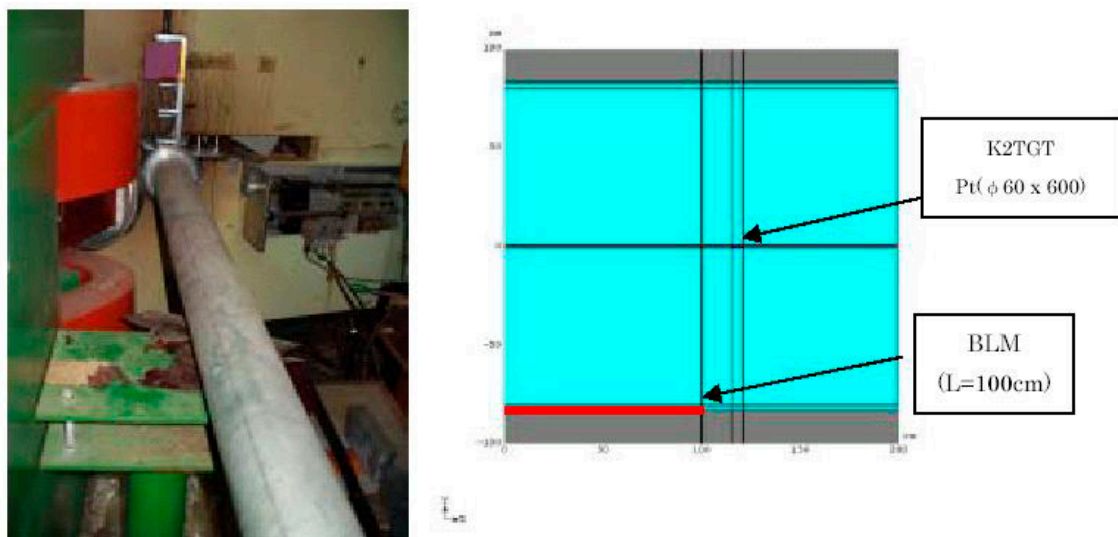


図5 K2標的付近に設置されたビームロスモニタ(左)と、MARSモデリング(右)

7.2 ビームモニタ

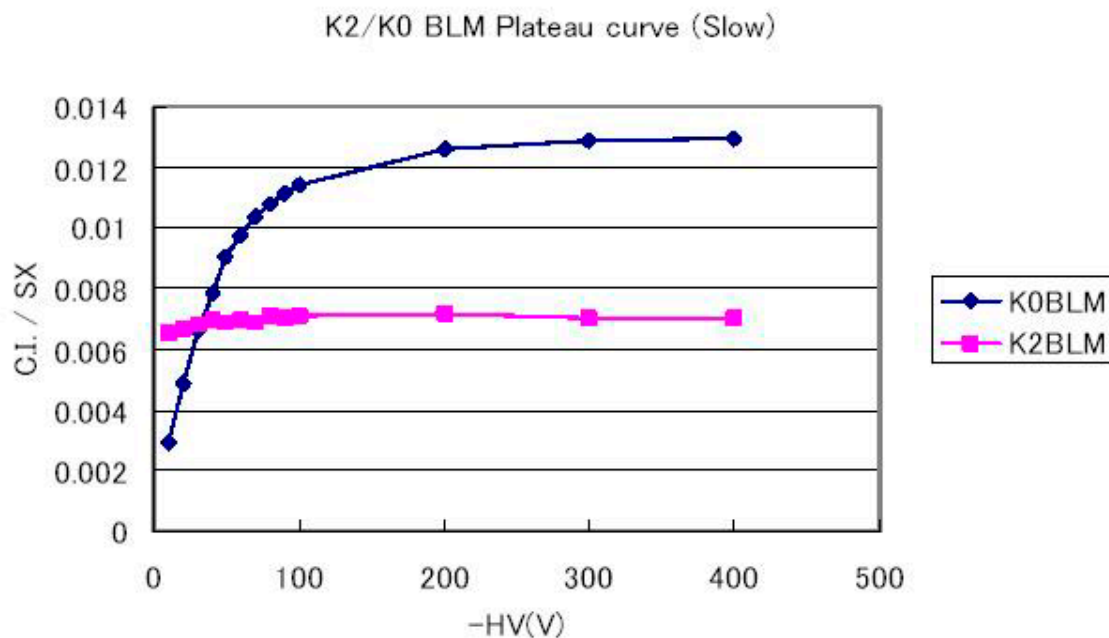
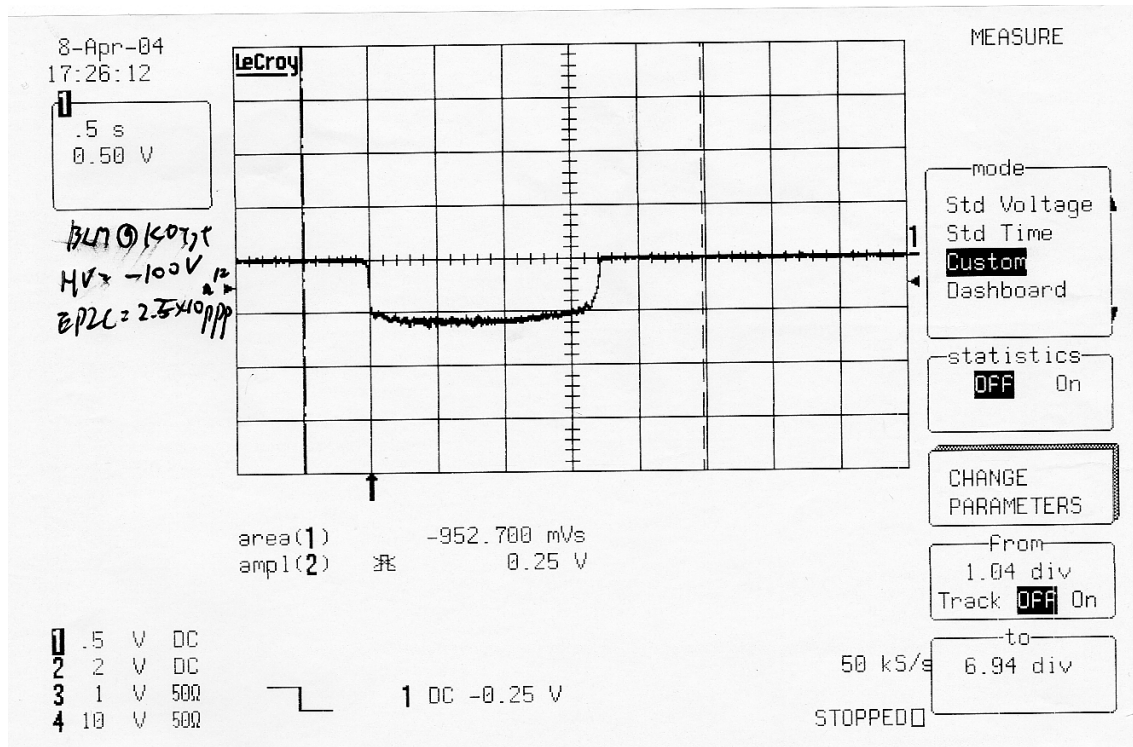


図6 遅い取り出しビームで測定された K0BLM の信号波形(上)とビームロスモニタのプラトー曲線(下)。K2 標的には 2.5×10^{10} proton / pulse、K0 標的には 2.2×10^{12} proton / pulse のビームが照射されている。グラフの縦軸はカレントインテグレータ(C.I.)を取り出しビーム強度で normalize した値。K2BLM の測定値は 0.1nC/count、K0BLM は 10nC/count のレンジで測定された。

MARS コードを用いて BLM に期待される信号強度を解析した。図5の K2BLM 領域（空気）のエネルギー損失を MARS で計算し、実際に観測された信号強度と比較する。

条件：

- Beam Energy: 12 GeV proton
- Beam size on target: 0.1cm x 0.1cm 矩形平行ビーム
- Beam intensity: $2.5E+10$ ppp
- Energy cut: 無し(default)
- BLM volume: $1.54E+6$ cm³
- BLM effective volume: $4.1E+2$ cm³

MARS で得られたエネルギー損失は $(2.22 \pm 0.31)E-7$ GeV/g/p なので、BLM の信号強度は

$$2.22E-7 \text{ GeV/g/p} \times 1.21E-3 \text{ g/cm}^3 \times 1.54E+6 \text{ cm}^3 \times 2.5E+10 / 35 \text{ eV/pair} \\ = 2.96E+14 \text{ pair/pulse}$$

$$2.96E+14 \text{ pair/pulse} \times 1.6E-19 \text{ C/pair} \times 4.1E+2 / 1.54E+6 = \underline{12.60 \text{ nC / pulse}}$$

一方、実際に Current Integrator で測定された値は 6.54 nC / pulse であり、ファクター2程度で一致した。

この結果を用いると、J-PARC のビームラインでのロスモニタ信号強度が計算できる。図7に計算結果を示す。点ロスと線ロスではロスの分布が多少異なるが、信号強度のダイナミックレンジは 1nC 程度から 100nC の範囲に収まっている。設置場所が変わると当然信号強度も変わってくるが、1W/m を担保するためには空気電離箱型 BLM で十分と思われる。

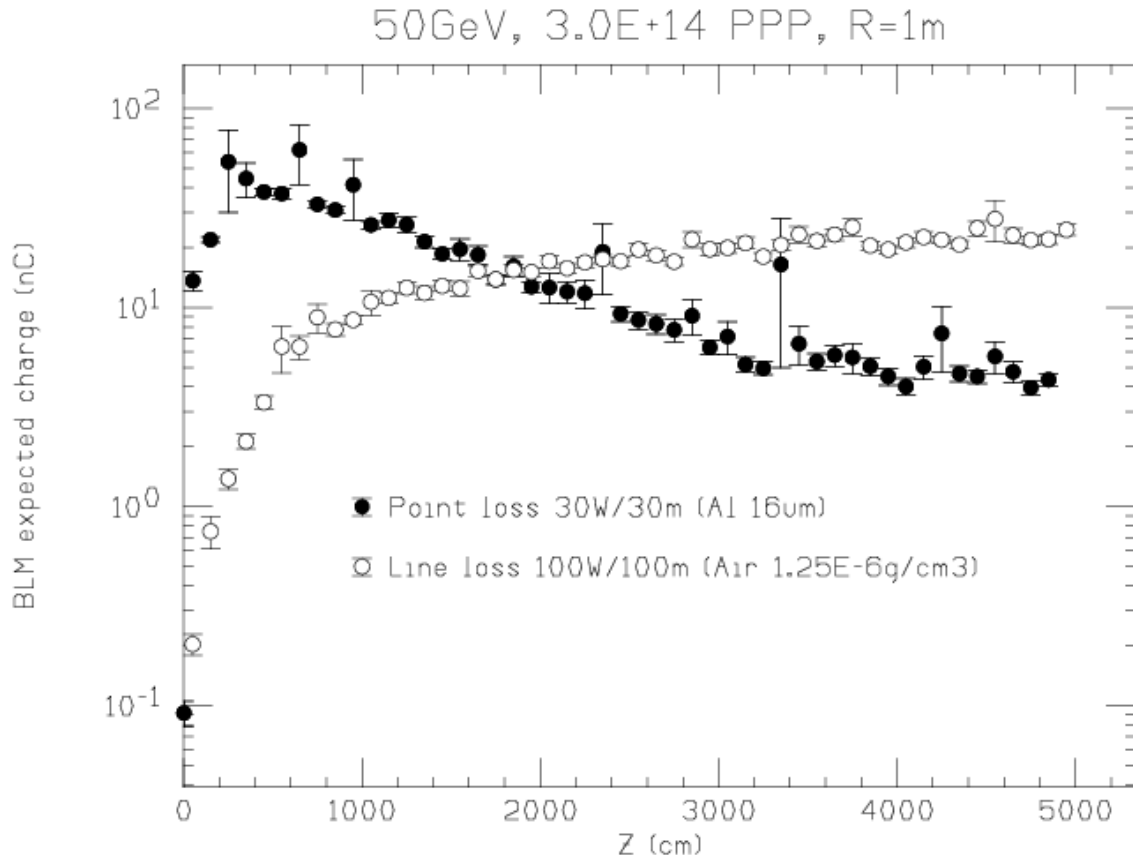


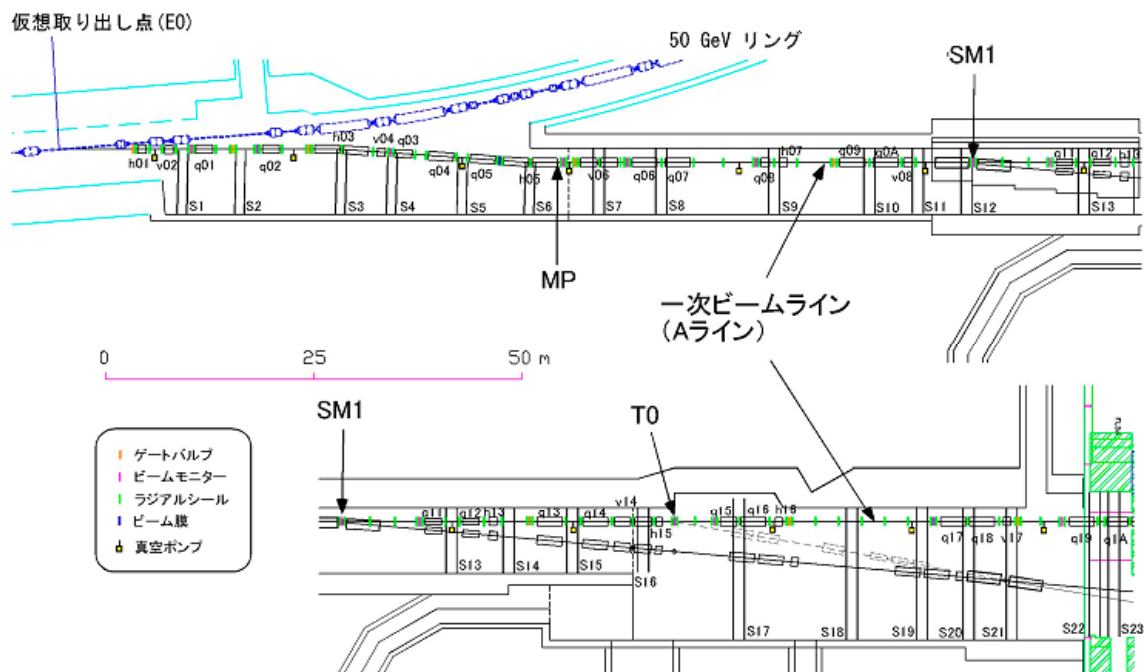
図7 J-PARC 陽子ビームラインビーム中心から1mのところにBLMを設置した場合に期待される信号強度。黒丸はAl 16 μ mの膜で点ロスを起こした場合。白丸はダクト中の空気の密度を変化させ、100W/100mに調整して線ロスを起こした場合。

7.2.5 モニタ配置

図8a にスイッチヤード(SY)とハドロン実験施設(HD)のビームライン機器配置図を示す。SYでは加速器から取り出されたビームを水平方向に4度曲げ、4度戻した後、マッチングポイント(MP)から約2度上方に振り上げられる。その後将来拡張が予定されている一次ビームライン分岐部(SM1)と、テストビームライン用標的(T0)を通過してHDホールに導かれる。

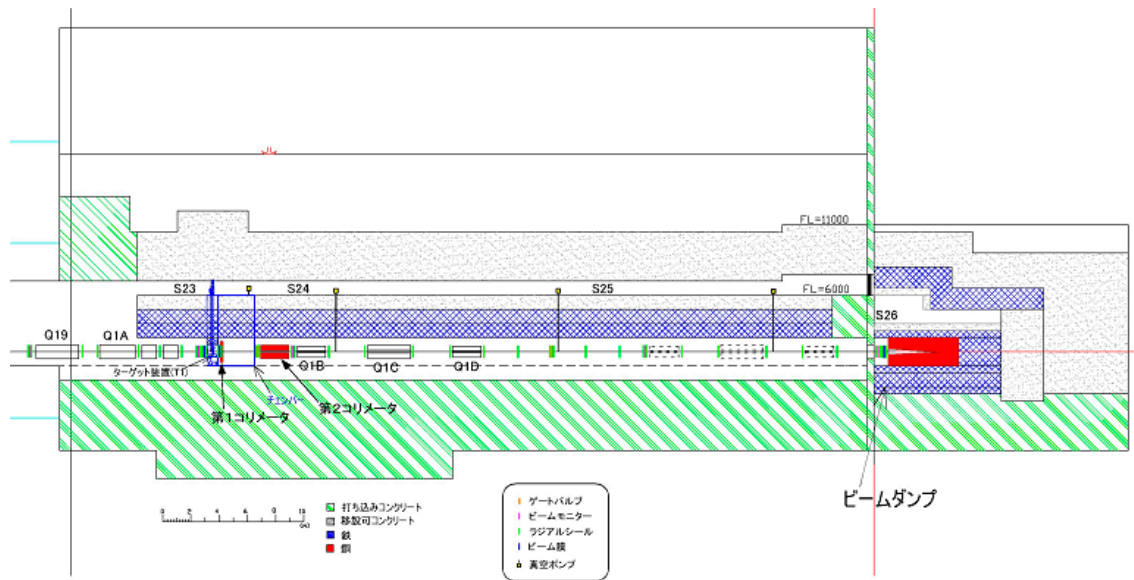
MPまでは加速器と真空がつながっており、この領域は 10^{-6} Paの高真空である。この区間は加速器から取り出されたビームを光学に乗せるための調整が施される。MPには真空遮断膜が設置され、1Pa程度である下流の真空を切る役目がある。それ以降T1標的にいたるまでは真空は繋がっている。

図8bにHDホール内のビームライン機器配置を示す。HDホールには30%ロス相当のT1標的がある。T1標的にきちんとビームが照射されていることをモニタすることは極めて重要である。T1標的を通過したビームは大型真空槽内のコリメータを通過し、さらに第2コリメータを通過してビームダンプへと導かれる。特にコリメータ通過後のビームプロファイルをモニタし、ビームダンプへ正確に打ち込むことはダンプを安定に運転するうえで重要である。また、T1標的より下流は極めて強い放射線場になるので、モニタ自身の耐放射線性はもちろんのこと、交換やメンテナンスのシナリオが極めて重要である。



2003.3.3改訂

図8a スwitchヤードのモニタ配置図



2003. 3. 4改訂

図8 b ハドロン実験施設 (HD) 内のビームモニタ配置図

7.2.6 まとめ

ビームモニタは電磁石と並んで施設を安定に運転するための重要な要素である。また、ビームを使って動作試験や動作環境を確認するのは現行の12GeV-PS加速器が稼動している間に行う必要がある。今後も限られた貴重なビームタイムを有効に活用し、大強度陽子ビームを安全に取り扱うことのできるよいビームモニタを開発していく。特にDCビームの強度の絶対値を非接触で測定するいい方法がまだ見つかっていないので、これについても検討を続けたい。

7.2 ビームモニタ

7.3 温度モニタ

大強度ビームを扱う施設においては、そのビームパワーによって各機器が高温になる可能性がある。機器の故障を未然に防ぐには、常時各部の温度をモニターし、万が一異常な温度上昇が認められた場合には、すぐに加速器の運転を停止する必要がある。

表 1: 熱電対の本数。かつこの中はスイッチヤードの電磁石の分も入れた場合の本数。

SY	整合区間 (E0 ～ MP)	ラジアルシール	27 台 × 4 本	130 (370)
		ゲートバルブ	3 台 × 4 本	
		膜	1 台 × 10 本	
		(電磁石)	12 台 × 20 本	
	振り上げ区間上流 (MP ～ SM1)	ラジアルシール	18 台 × 4 本	80 (260)
		ゲートバルブ	2 台 × 4 本	
		(電磁石)	9 台 × 20 本	
	振り上げ区間下流 (SM1 ～ T0)	ラジアルシール	17 台 × 4 本	72 (232)
		ゲートバルブ	1 台 × 4 本	
		(電磁石)	8 台 × 20 本	
	T0-T1 区間 (T0 ～ T1)	ラジアルシール	29 台 × 4 本	120 (300)
		ゲートバルブ	1 台 × 4 本	
(電磁石)		9 台 × 20 本		
HD-hall	ラジアルシール	23 台 × 4 本	360	
	ゲートバルブ	2 台 × 4 本		
	膜	2 台 × 10 本		
	T1	1 台 × 20 本		
	コリメータ	2 台 × 20 本		
	真空箱	1 台 × 20 本		
	K1.8D1	1 台 × 20 本		
	1 次ライン電磁石	7 台 × 20 本		
ビームダンプ	ラジアルシール	2 台 × 4 本	218	
	膜	1 台 × 10 本		
	ダンプコア	25 台 × 8 本		

J-PARC ハドロン実験施設では、長さ 200 m のスイッチヤード、30 % ロスターゲット T1 のあるハドロン実験室、そしてビームを全て受け止めるビームダンプと、温度をモニターすべき点数は膨大な数に上る。表 1 に各区間で使用する熱電対の本数をまとめた。第 1 期のスイッチヤードには基本的に膜以外のロスポイントがないので、スイッチヤードの電磁石はモニターの対象から外したとしても、1000 本もの熱電対の測定が必要になる。幸い、我々の施設は遅い取り出しビームを用いるので、1 spill 中の温度上昇が小さく、同時に全てのチャンネルを測定する必要性はほとんどない。そのため、スキャンユニットでチャンネルを切替えながら測定する

方式を取ることで、安価な多チャンネルの温度測定システムを構築することが出来る。具体的なシステムとしては、GPIB 接続の可能なデータロガーを GPIB-Ethernet Gateway を通して (LAN 接続可能なデータロガーなら直接) Ethernet 経由で Linux PC から制御とデータの読み出しを行い、その Linux PC で EPICS ioc を立ち上げて他の端末とのやりとりを行う、というシステムを現在構築中である。もし、同時に複数の点を測定する必要がある場合には、それらの箇所だけ別のシステムにすれば良い。

しかし、熱電対から測定装置までの温度補償導線については、熱電対と同じ数だけ必要になる。場所によっては第1電源棟の制御室まで数百 m も距離があり、全ての機器から制御室まで張るのでは補償導線のコストも相当高額になってしまう。そこで、制御室まで全部の補償導線を張るのではなしに、図 1 のように、

1. 第1電源棟の制御室
2. HD-hall 北西部の電源ステージ
3. ビームダンプ室入口の隣

の3箇所にローカル・コントロール・ボックスを置き、熱電対の出力の読み取りとインターロック信号の取りまとめを行うことにする。3つのローカル・コントロール・ボックスは、それぞれ主にスイッチヤード、HD-hall、ビームダンプ室内の機器からの信号を処理する。各々の Linux PC で読み込んだ熱電対の値は、EPICS によってどの端末からも見るようにする。インターロック信号については、データロガーで設定した閾値を越えたらアラーム信号を出すようにする他、特に必要な箇所にはバイメタルの温度スイッチを併用することも考える。その際には、何箇所かをシリーズに繋げることで、トンネル内からローカル・コントロール・ボックスまで通すケーブルの数を減らすことが出来る。このインターロック信号は、ローカル・コントロール・ボックスから一度第1電源棟制御室に全て集められた後、MPS インターロック信号としてまとめられた1本だけが中央制御へ送られる。

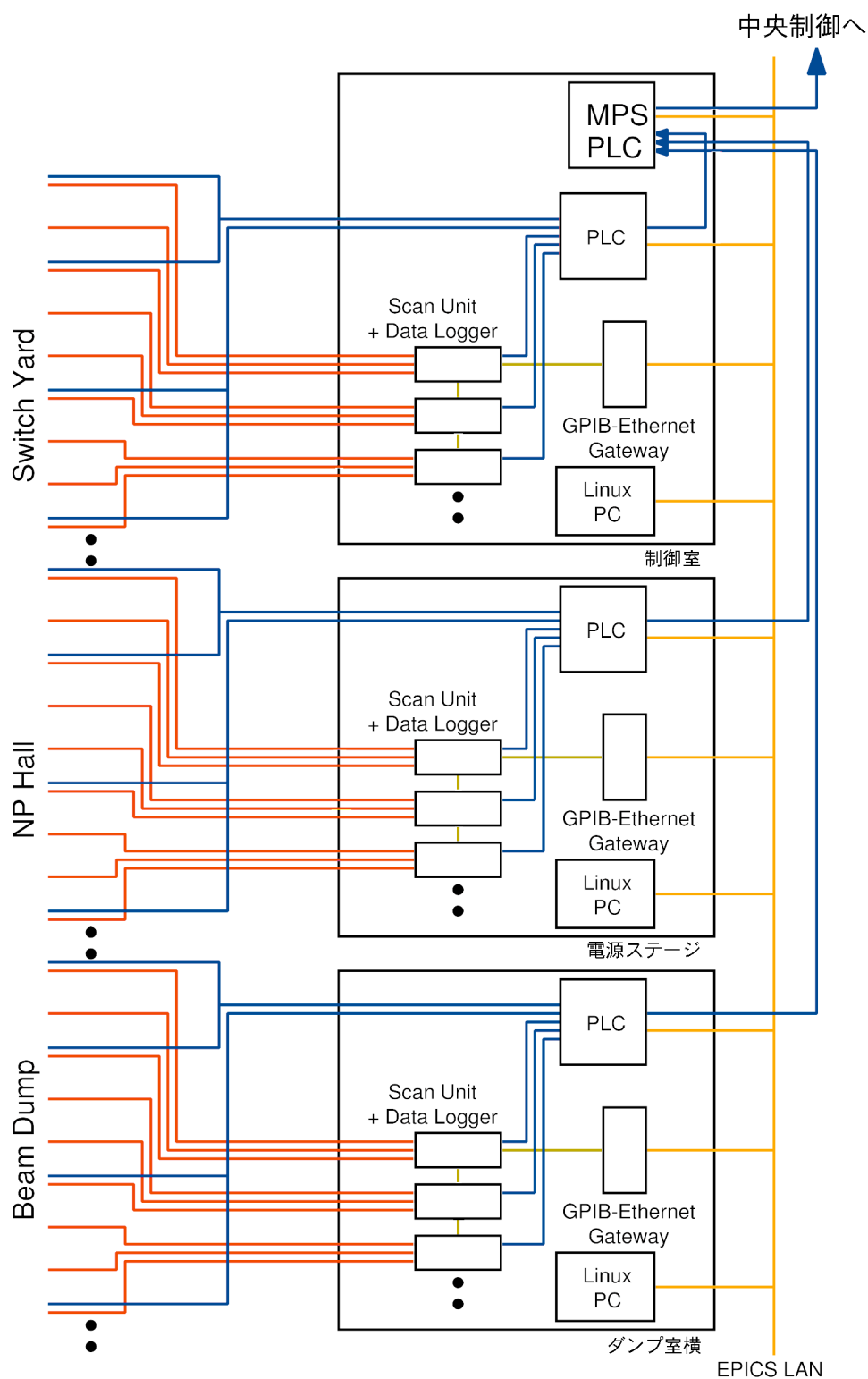


図 1: 温度モニタ制御システムの概要図。

7.3 温度モニタ

7.4 電磁石電源制御システム

7.4.1 システム概要

ハドロン実験施設のビームラインでは、現在 KEK-PS のビームラインで使用されている電磁石および電源をそのまま新しい施設に移設する。そのため、電源制御システムを新規に開発するよりは、実績のある既存のシステムをそのまま使用することができる。ただし、J-PARC では EPICS を用いて機器を制御することになっているため、既存のシステムとの整合性を取らなければならない。

EPICS では CA(channel access)というプロトコルを用いて機器を制御する。また、既存の電源制御システムは Windows サーバ上で稼動している。(詳細は前回の中間報告書[1]を参照のこと)

建設当初、電源制御システムはローカル制御と切り離して独立に電源を整備・運転する必要がある。これらの事情を考慮すると、CA プロトコルが直接 Windows サーバにアクセスするよりは、中間にデータベースサーバを立て、そこを通じて EPICS とやり取りする方法が望ましい。システムの概要を図1に示す。

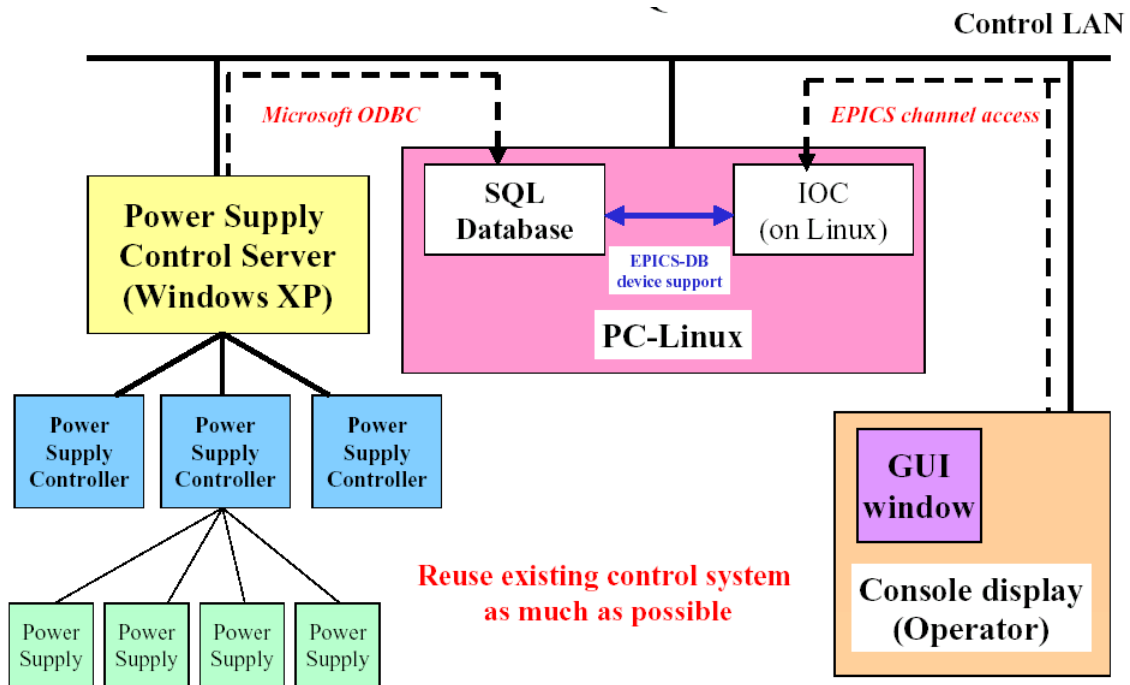


図1 データベースを用いた電磁石電源制御システム概念図

具体的には、PC-Linux 上で MySQL 等のデータベースサーバを稼動させ、電源制御システムからは Microsoft ODBC (Open Data-Base Connectivity)を用いてデータベースに電源の状態を定期的書き込み、設定値を読み込んで電磁石に流す電流を制御する。EPICS のチャンネルアクセスサーバからは EPICS-DB デバイスサポートを用いてデータベースサーバとチャンネルアクセスプロトコルの橋渡しを行う。EPICS-DB デバイスサポートについては非常に簡易なテストが行われ、EPICS からデータベースにアクセス可能であることがわかった。今後電源制御システムと連携したテストを行い、信頼性を調査する必要がある。

7.4 電磁石電源制御システム

7.4.2 電源制御システム

電磁石電源の制御、特にリモート操作、運転に関わる部分について報告する。電磁石電源はビームライン内の電磁石に大電流を効率良く送るために、ビームラインのトンネル外部に隣接した建物内部に配置される。電磁石電源の単体の大きさは約幅 1.2m、奥行き 1.2m、高さ 1.8m である。ハドロン実験施設においてその電磁石電源の総数は数十台以上となり、何カ所かに分散配置され、ある部分では 4 階建ての架台上に配置される。従って、これらの電磁石電源をコントロール室等の任意の場所から能率良く運転操作可能とすることは大変重要である。

前回の中間報告書[1]で紹介した電磁石電源コントローラ（PSCx8）は、電磁石電源の運転操作を自立して行うようにプログラムされている。このコントローラ 1 台は電磁石電源 8 台を運転操作・監視できるので、ハドロン実験施設内に数台配置されることになる（図 1 参照）。そしてそれら全体を構成する PC（電源コントローラ）が配置される。

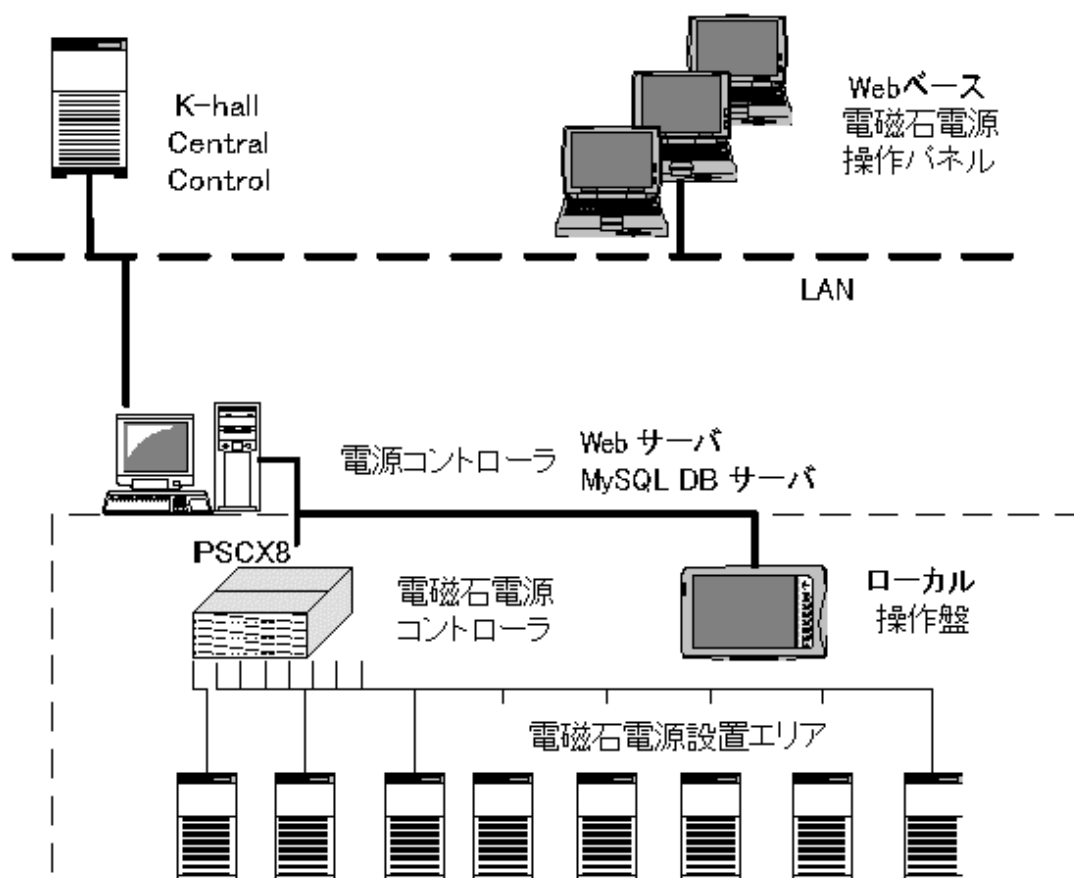


図 1 電源制御システムダイアグラム

PC はローカルでの運転操作のためのヒューマンインターフェース(電磁石電源操作パネル)の提供と、外部から LAN を通しての運転操作用のデータベース・サーバー(MySQL)を

7.4 電磁石電源制御システム

持っている。通常のビームラインの運転はこのデータベースを操作することになる。電磁石電源の維持管理作業においては、Web ベースの操作画面をも用意し、使用する。

7.4.3 電磁石電源の操作（電流の設定）について

電磁石電源は電磁石電源コントローラ（PSCx8）と一体となり動作する。この装置に対しての指示は、電流値あるいは電圧値の数値のみです。この値がゼロかプラスかあるいはマイナスであるか、そして現在の電磁石電源の運転状態と比較し動作を開始します。

その点において、上位のコントローラは電磁石電源の運転操作の手順をプログラムする必要があります。最下層での電磁石電源の運転操作は以下の手順を踏みます。

1. 設定したい電流値（電圧値）はプラスかマイナスか？電源の極性の切り替え操作が必要か？
2. リモート運転ができる状態か？リモート操作が可能状態であれば以下の操作を行う
3. 極性の切り替えが必要な場合で電源が運転中の場合は電源の停止を行う
4. 電源の停止を確認し、転極操作を行う
5. 電電の運転可能（インターロックの解除と確認）かどうかを調べる
6. 極性の一致を確認する
7. 電源の運転を開始する（主変圧器へパワー供給・ON）、状態確認
8. インターロック系の異常を監視しながら電流値を徐々に上昇する
9. 電流の設定が完了すれば、状態の監視状態となる
10. 異常の発生の場合は上位コントローラへ停止の割り込み SRQ 信号を送る
11. 設置値ゼロを受けた場合は電流値を徐々に下げ、電源を停止(OFF)とする

PSCx8 の特長は、現場電源の歴史的な操作手順である、リセット、オン、オフ、極性の切り替えの操作を隠し、見えなくするところにあります。

7.4.4 電磁石電源の運転状態

ハドロン実験施設の電磁石で使用される電磁石電源はおおよそ 30 年前に製造されたもの、あるいは最近製造されたものと種々雑多である。リモートコントロールの面では最低限の互換性を持たせてある。その共通部分は以下の通りである。

論理信号（1・0）として

1. 運転操作の位置（リモート／ローカル）
2. 運転可能状態（異常箇所無し：レディー）
3. 運転状態（メインコンタクター ON／OFF）
4. 出力極性（プラス：＋／マイナス：－）

その他：共通でないあるいは読み出せない信号として

1. 電磁石異常（温度／冷却水）
2. 電源異常（パワーヒューズ／オーバーカレント／地絡／冷却水漏れ）

等がある。

アナログ信号としては2点、電流値と電圧値である。

7.4.5 MySQL データベースの使用

電磁石電源の操作については上記のような状況であり、MySQLでのデータの受け渡しを行うために3つのテーブルを用意する。

	テーブル名	内容
1	name	ビームラインで使用されている磁石・電源の名前
2	ps	電磁石電源の運転状況
3	setd	電磁石電源の電流設定値の受け取り用

Name テーブルについて

Field	Type	Null	Key	Default
Id	Int(5)		PRI	0
Name	Char(5)	Yes		Null

Ps テーブル

Field	Type	Null	Key	Default
Id	Int(5)		PRI	0
St	Tinyint(3) unsigned			0
Opd	Float			0
Cmon	Float			0
vmon	Float			0

Setd テーブル

Field	Type	Null	Key	Default
Id	Int(5)		PRI	0
time	Timestamp(12)	YES		NULL
Setd	Float			0

以上のテーブルを通して、ビームラインユーザは独自の電磁石電源の操作画面を作ることができる。

7.4 電磁石電源制御システム

8 放射線安全

加速器施設では、陽子ビームまたは中性子等の二次粒子が冷却水を放射化して様々な放射性同位体を生成する。その中でも半減期が12.3年と長いトリチウム (^3H) が冷却水の処理上問題となる。また、陽子ビームや二次粒子がガスや冷却水を放射線分解して生じる硝酸 (HNO_3) や水素 (H_2) が機器にダメージを与えるのではないかと懸念がある。以下では、ビームの直接照射や間接照射によって生じる硝酸やトリチウムの生成実験とその結果について述べ、議論を定量的にする。

また、上記の試験で得られた結果を元に、T1 標的や電磁石冷却水で生成する硝酸、トリチウム、水素生成量見積もりと、その対策についても述べる。

8.1 2002 年 HNO_3 および ^3H 生成実験報告

8.1.1 動機

空気の放射化で問題となるのは、酸素分子や窒素分子の放射線分解によって生成するオゾンや窒素の酸化物 (NO_x) と窒素の酸素酸 ($\text{HNO}_2, \text{HNO}_3$) である。なかでも硝酸 (HNO_3) が大量に生成された場合、ビームライントネル内の各種機器表面等に付着する硝酸の量によっては表面の腐食や、ひいては機器の故障につながる懸念されている。

冷却水の放射化では、酸素原子核の spallation 反応によって生成される ^3H の半減期が12.3年と長いため、冷却水中のトリチウム濃度の上昇が問題となる。冷却水を排水する際には放射能濃度を 30 Bq/cc 以下にするという基準があるため、ビームライン電磁石やターゲット冷却水でトリチウムがどのくらい生成されるかを定量的に見積っておくことは冷却水の循環・排水設備や施設の運転シナリオ等にも関わってくる重要な問題である。

上記の問題について定量的な知見を得るため、我々は2001年にKEK-PSのEP1ビームラインで最初の HNO_3 および ^3H 生成実験を行った。[1] この実験はK5標的周辺での間接照射と、EP1ダンプ手前での直接照射の2種類の実験を行った。結果は直接照射の場合はおおむね予想値と合っていたが、間接照射の HNO_3 生成量が予測値よりも2桁程少ないという問題があった。この時の測定では間接照射の場合はテドラバックというテフロン製の袋を使い、直接照射の場合は内側がアルミラミネートコーティングされたファイバードラムを用いた。このため、2つの異なる採取方法による系統的な測定誤差が生じているのではという指摘があった。

2002年秋のEP1遅い取り出しビームの時期を利用し、サンプル採取に同一の容器を用いて再度 HNO_3 および ^3H 生成実験を行った。この報告では今回行った実験の方法、測定結果およびデータ解析について述べる。

8.1.2 実験セットアップ

(間接照射実験)

間接照射実験ではEP1-K5標的の標的設置架台脇の床面に採取用のガラス瓶を設置した。ガラス瓶の大きさは一回目の測定がφ70、二回目の測定がφ65で、容積はそれぞれ500cc及び1000cc

8.1 2002年HNO₃および³H生成実験報告

であった。K5 ターゲットからの距離はおよそ 130 cm であった。ガラス瓶には Al および Cu のフォイルが取り付けられ、放射化法によって中性子フルエンス率を実測した。

(直接照射実験)

直接照射実験は EP1-dump 手前の直線部に図 1 に示すようなセットアップを組み、間接照射実験と同じガラス瓶を設置した。

図 1: 直接照射実験セットアップ@EP1-Dump 左: 第一回測定 (500 cc 瓶) 右: 第二回測定 (1000 cc 瓶)



8.1.3 ビーム照射量測定

実験期間中に照射された陽子数を表 1 に示す。陽子数はビームライン上に設置されているビーム強度モニタの SEC (Secondary Emission Chamber) で測定された。K5 の SEC が故障していたため、解析には上流の EP1 入口での陽子数を用いた。この間のビームトランスミッションは通常 90% 以上であり、解析で使用する上で問題とはならない。

8.1.4 ガラス瓶内の NO_x、HNO₃ 濃度測定

瓶内の濃度測定は 2 段階で行った。最初に瓶内の空気を NO_x 計で直接測定し、次に瓶内壁に付着した硝酸を、純水を注入して溶出・回収し、測定した。照射実験に用いたガラス瓶は 500 cc のものと 1000 cc のものがあるが、500 cc のものは開口部が大きく、測定時に不便であったため、あらかじめ蓋に小さな穴をあけておきビニールテープで塞いでおいた。空気中の各々の濃度については 500cc のものは注射器を用いて測定器へ、1000cc のものは開口部を直接接続した。NO_x+HNO₃ の測定値は、間接照射で約 0.7 ppm、直接照射で約 10 ppm であった。この値は後述する壁に付着した硝酸量に比べて充分小さく無視できる。壁に付着した硝酸は 10 cc の純水を瓶に注入し、そこへ溶出させた。当初、水への回収率が不明であったため、純水と 0.1 M の水酸化ナトリウム溶液を用意して回収率を比較したが、有意な差はなかった。また、硝酸を溶出した後の瓶に再度純水を注入し、瓶内に残った硝酸の量を調べたが、最初の試料の 1% 程度の濃度であり、1 回目の抽出で硝酸はほぼ 100 % 純水に回収されていた。

表 1: EP1-Entrance 及び EP1-Dump での陽子数

照射期間	EP1-Entrance	EP1-Dump
第一回 (直間) 2002/ 9/ 3 - 9/17	4.9×10^{17}	8.8×10^{16}
第二回 (直) 2002/ 9/17 - 10/ 7	9.3×10^{17}	1.3×10^{17}
第二回 (間) 2002/ 9/30 - 10/ 7	3.9×10^{17}	5.1×10^{16}

8.1.5 放射化箔による陽子、中性子フルエンス率測定

試料瓶に貼り付けた Al 箔から、試料に照射された陽子数、中性子数を求めた。測定は Ge 半導体検出器を用いて行い、標準線源との比較から生成放射能を算出した。Al(p or n,sp)²²Na 反応の断面積を 10 mb として Al 箔に生成した ²²Na の量から陽子数と中性子数を推定した。

8.1.6 硝酸の分析

硝酸イオンのヒドラジン-アスコルビン酸還元で生成する NO を気 - 液分離コイルで気相へ分離し、化学発光式 NO_x 計で検出するフローインジェクション法により硝酸を定量した。空気のイオン化によるオゾン分子一個当たりの生成に必要なエネルギー (G-value) は KEK-PS および TRISTAN 加速器で神田らが測定した結果を用いた [11]。

8.1.7 データ解析

直接照射の場合に HNO₃ 生成量を求める際には以下の仮定をした。

- 12 GeV 陽子ビームの空気中のエネルギー損失は 1.85 MeV/g/cm²/proton とする。
- 酸素分子からイオン化によってオゾンが生成される割合 (G-value) は 6.4 molecule/100 eV である。
- オゾンから HNO₃ が作られる相対収率は 0.19 である。
- SEC で記録される陽子が全て反応に寄与した

第一回測定での HNO₃ 生成量は

$$(8.8 \times 10^{16} \text{ p}) \times (1.85 \text{ MeV/g/cm}^2/\text{p}) \times (1.21 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3) \times (\phi 7.0 \text{ cm}) \times (6.4 \text{ molecule/100 eV}) \times (0.19 \text{ HNO}_3/\text{molecule}) = 1.7 \times 10^{19} \text{ HNO}_3$$

500 cc 瓶の分子数は

$$\frac{0.5}{22.4} \times (6.02 \times 10^{23}) = 1.3 \times 10^{22}$$

8.1 2002年HNO₃および³H生成実験報告

より、HNO₃ 濃度は

$$\begin{aligned}\frac{1.7 \times 10^{19}}{1.3 \times 10^{22}} &= 1.3 \times 10^{-3} \\ &= 1300 \text{ ppm}\end{aligned}$$

NO_x 計による濃度測定によって得られた HNO₃ の実測値は 1400 ppm であった。

第二回測定での HNO₃ 生成量も同様に計算すると 880 ppm となり、実測値は 925 ppm であった。

直接照射の ³H 生成量を求める際には以下の仮定をした。

- 陽子ビームの EP1-Dump での有効断面積は 25 cm² である。
- 酸素原子核からの ³H 生成断面積は 30 mb である。
- 水の分子量は 18 である。
- ³H の崩壊率は 1.8×10^{-9} dps (decay per second) である。

第一回照射の ³H 生成量は

$$\begin{aligned}(8.8 \times 10^{16} \text{ p}) / (25 \text{ cm}^2) \times (30 \times 10^{-27} \text{ cm}^2/\text{p}) \times \frac{1}{18} \times (6.02 \times 10^{23}) \times (1.8 \times 10^{-9}) \\ = 6400 \text{ Bq/cc}\end{aligned}$$

実測値は 7453 Bq/cc であった。

第二回照射についても同様に計算すると 9400 Bq/cc となり、実測値は 15784 Bq/cc であった。
間接照射の場合に HNO₃ 生成量を求める際には以下の仮定をした。

- 測定用容器での単位質量あたりのエネルギー損失は MARS による計算結果である ($5.0 \times 10^{-8} \text{ GeV/g/proton}$) を用いた。
- 酸素分子からイオン化によってオゾンが生成される割合 (G-value) は 6.4 molecule/100 eV である。
- オゾンから HNO₃ が作られる割合は 0.19 である。
- SEC で記録される陽子が全て反応に寄与した

第一回測定での HNO₃ 生成量は

$$\begin{aligned}(4.9 \times 10^{17} \text{ p}) \times (5.0 \times 10^{-8} \text{ GeV/g/p}) \times (1.21 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3) \times (500 \text{ cm}^3) \times \\ (6.4 \text{ molecule/100 eV}) \times (0.19 \text{ HNO}_3/\text{molecule}) = 1.8 \times 10^{17} \text{ HNO}_3\end{aligned}$$

500 cc 瓶の分子数は

$$\frac{0.5}{22.4} \times (6.02 \times 10^{23}) = 1.3 \times 10^{22}$$

より、 HNO_3 濃度は

$$\begin{aligned}\frac{1.8 \times 10^{17}}{1.3 \times 10^{22}} &= 1.4 \times 10^{-5} \\ &= 14 \text{ ppm}\end{aligned}$$

NO_x 計による濃度測定によって得られた HNO_3 濃度の実測値は 34 ppm であった。

第二回照射についても同様に計算すると 11 ppm となり、実測値は 48 ppm であった。

間接照射の ^3H 生成量を求める際には以下の仮定をした。

- 中性子フルエンス率は実測値である $3.2 \times 10^{-5} \text{ n/cm}^2/\text{p}$ (第一回) 及び $4.7 \times 10^{-5} \text{ n/cm}^2/\text{p}$ (第二回) を用いた。
- 陽子ビームの EP1-Dump での有効断面積は 25 cm^2 である。
- 酸素原子核からの ^3H 生成断面積は 30 mb である。
- 水の分子量は 18 である。
- ^3H の崩壊率は $1.8 \times 10^{-9} \text{ dps}$ (decay per second) である。

第一回照射の ^3H 生成量は

$$\begin{aligned}(4.9 \times 10^{17} \text{ p}) \times (3.2 \times 10^{-5} \text{ n/cm}^2/\text{p}) \times (30 \times 10^{-27} \text{ cm}^2/\text{p}) \times \frac{1}{18} \times \\ (6.02 \times 10^{23}) \times (1.8 \times 10^{-9}) = 28 \text{ Bq/cc}\end{aligned}$$

実測値は 14.9 Bq/cc であった。

第二回照射についても同様に計算すると 33 Bq/cc となり、実測値は 15.5 Bq/cc であった。

8.1.8 測定結果まとめ

実験結果と計算値を表 2 にまとめる。

8.1.9 MARS との比較

MARS コードを用いて間接照射の場合の中性子フルエンス率および単位質量あたりのエネルギー損失を計算し、実測値と比較した。計算コードで用いた仮定は以下の通りである。

- 陽子エネルギー: 12 GeV
- ビームサイズ: $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 並行ビーム
- ターゲット: $\phi 5 \text{ mm} \times 6 \text{ cm}$ Pt(密度 21.45 g/cm^3) 丸棒
- エネルギーカット: 無し (MARS のデフォルト状態) または 20 MeV

8.1 2002年HNO₃および³H生成実験報告

表 2: 測定結果のまとめ

第一回測定 (500 cc ビン)					
	実測値		計算値		陽子数
	HNO ₃	³ H	HNO ₃	³ H	
9/3～9/17 (直)	1400 ppm	7453 Bq/cc	1300 ppm	6400 Bq/cc	8.8×10^{16}
9/3～9/17 (間)	34 ppm	14.9 Bq/cc	14 ppm	28 Bq/cc	4.9×10^{17}
(但し ³ H の値は B.G 値 0.22 Bq/cc を含む)					
第二回測定 (1000 cc ビン)					
	実測値		計算値		陽子数
	HNO ₃	³ H	HNO ₃	³ H	
9/17～10/9 (直)	925 ppm	15784 Bq/cc	880 ppm	9400 Bq/cc	1.3×10^{17}
9/30～10/9 (間)	48 ppm	15.5 Bq/cc	11 ppm	33 Bq/cc	3.9×10^{17}
(但し ³ H の値は B.G 値 0.17 Bq/cc を含む)					

表 3: MARS による K5 標的でのエネルギー損失及び中性子フルエンス率

	MARS		実測値
	エネルギー損失率	中性子フルエンス率	中性子フルエンス率
	(GeV/g/p)	(n/cm ² /p)	(n/cm ² /p)
Ecut 無し (デフォルト)	5.0×10^{-8}	9.1×10^{-6}	3.2×10^{-5} (第一回)
Ecut=20 MeV	2.0×10^{-8}	6.0×10^{-6}	4.7×10^{-5} (第二回)

- R=130-140 cm, dz=6 cm の領域でのエネルギー損失 (Direct energy deposit) 及び 14.5 MeV 以上の中性子フラックス (neutron fluence at $E_n > 14.5$ MeV) の値を参照
- 100k イベント生成

この時の計算結果を表 3 に示す。

8.1.10 まとめ

今回の測定では直接照射と間接照射で採取するサンプルの容器を同じにして、系統的な測定誤差を減らすことを目標にして測定を行った。表 2 に示す通り、直接照射では HNO₃ 濃度、³H 濃度共に計算結果はファクター 2 程度で一致している。間接照射では HNO₃ 濃度の測定値が計算結果よりも最大 4 倍程度のずれ、³H 濃度では 2 倍程度のずれがある。これはエネルギー損失の計算に不定性があるのかもしれない。また、前回の測定では間接照射での HNO₃ 濃度計算値が実測値よりも 2 桁近く過大評価していたのが、今回の測定では実測値が計算値よりも大きくなっているが、一応ファクター程度のずれに収まっていることがわかる。

今後さらに計算結果との整合性を追求するためには中性子フルエンス率とエネルギー損失を同時に測定することが必要であると思われる。

8.2 T1 標的内の硝酸、トリチウム、水素生成量見積もり

T1 標的内には空気中を回転するニッケル標的と、直接冷却用の冷却水がターゲットチェンバ内に収まっている。30%ロス相当の標的に陽子ビームが照射されると、空気の放射化による硝酸の生成が起こり、冷却水の放射化によってトリチウムと水素ガスが発生する。前節の測定結果に基づいて、標的内で発生する硝酸、トリチウム、水素ガスの生成量を MARS で評価した。

図 2 は T1 標的の MARS モデリングである。ニッケル標的に 50GeV, 15 μ A のビームを照射し、冷却水や空気の領域での中性子フルエンスとエネルギー損失を MARS で計算した。空気中の硝酸生成量と冷却水中のトリチウム生成量については前節の計算方法に従った。冷却水の放射化で生成する水素ガスの G 値は 2 molecule/100 eV を用いて硝酸生成量と同様に計算した。

結果を表 4 に示す。冷却水は 80l として計算している。標的チェンバ内のトリチウム濃度は非常に高く、冷却水の排水には特別な措置が必要である。また、空気中にできた硝酸はすぐに冷却水中にとけて硝酸水ができる。この影響を低減するためには冷却水循環系のイオン交換樹脂の能力を高める必要がある。また、膜やシール材に水蒸気がつかないように工夫を今後検討する必要がある。

水の放射線分解で生成した水素及び酸素は、ターゲット冷却水系の空気中に蓄積する。冷却水系は閉鎖系であるため、水素濃度は運転時間とともに上昇し、1 サイクル終了後には空気中の水素燃焼範囲（約 4 – 7.4 %）に達すると予想される。冷却水系には発生する水素に対し大量の空気が存在するため、爆鳴気の可能性はないと思われるが、水素爆発の危険性をさけるため、系内の空気を原子力触媒（白金アルミナ球）に通し、発生した水素と酸素を再結合させる。（触媒の量や通過させる空気の流量については検討中である。）

表 4: T1 標的中のトリチウム、硝酸、水素ガス生成量見積もり。冷却水は 80l とした場合の計算結果。

冷却水中のトリチウム生成量 (Bq/cc/day)	大気中の HNO ₃ 生成量 (g/day)	水素ガス生成量 (l/day)
800	21	0.7

8.3 コリメータおよびビームライン電磁石でのトリチウム、水素生成量見積もり

コリメータや磁石を冷却するために水が使われるため、そこで生成されるトリチウムの量が問題となる。廃棄基準である 30 Bq/cc 以下の濃度になるかどうか、50 GeV, 15 μ A で 30 日

8.3 コリメータおよびビームライン電磁石でのトリチウム、水素生成量見積もり

図 2: T1 標的の MARS モデリング。図中の青色はニッケル円板 (厚さ 6mm)、黄色は標的冷却水、青色は空気、紫色は SUS のチェンバを表す。

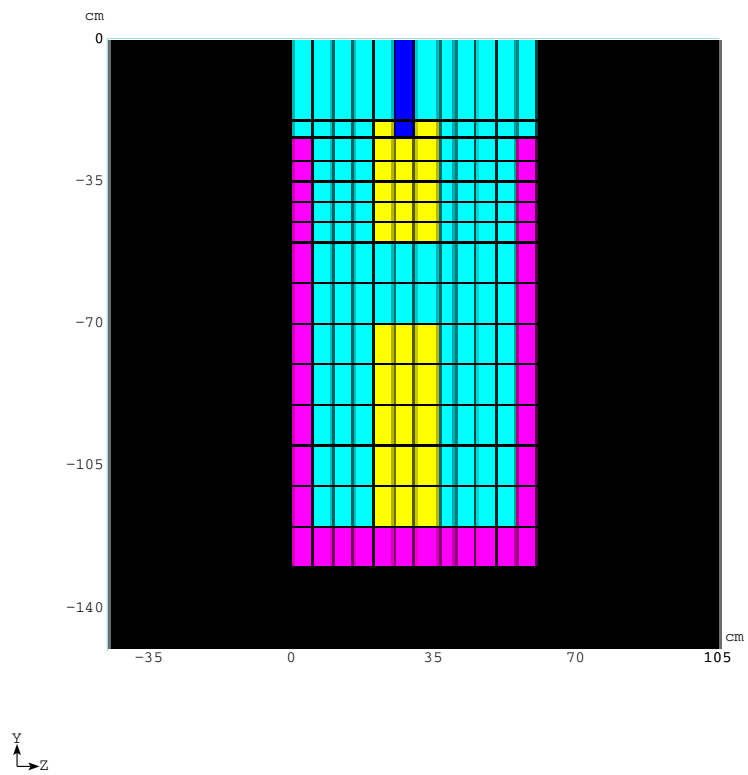


表 5: コリメータ、K1.8D1 の冷却水からのトリチウム生成量。

	第 1 期 (Bq/cc)	第 2 期 (Bq/cc)
第 1 コリメータ	1.0	1.3
第 2 コリメータ	11	16
K1.8D1 コイル	7.9	11
K1.8D1 鉄芯	2.1	2.5

表 6: 電磁石のコイル冷却水からのトリチウム生成量。鉄芯を通る中性子フラックスから計算した。

	第 1 期 (Bq/cc)	第 2 期 (Bq/cc)
K1.8D1	7.2	9.8
K1.8Q1	2.6	3.6
q1B	11	19
q1C	2.6	4.6
q1D	10	8.6
q1E	-	11
q1F	-	3.8
q1G	-	1.4

間運転した場合を計算した。磁石コイルの冷却水は、コイルを通過する 20 MeV 以上の中性子の平均フラックスを MARS で計算し、コイルの断面積の 1/10 を冷却水が占めているとしてコイル中の水量を見積もって、水 30 t で薄めた場合のトリチウムの濃度を算出した。その他の冷却水については、冷却面の半分に深さ 1 cm の冷却水のパスが通っているとして、ビームに晒される水量を見積もった。トリチウムの生成断面積は 30 mb として計算した。

計算結果を表 5 にまとめた。ただし、今回コイル中の水の容積を 1/10 としたが、これは、間接水冷式 MIC コイルの仕様によって変わり、トリチウム生成量が増える可能性がある。例えば、直接水冷式 MIC コイルではコイルに対する水の容積が約 1/5 であるので、水容積の比率がそれと同程度になった場合には、トリチウム生成量は表の値の約 2 倍となる。

また、NP-hall 内のその他の磁石についてコイル冷却水からのトリチウム生成量をまとめると、表 6 のようになる。ここでは、簡単のために、鉄芯を通るフラックスの値を用いて計算した。K1.8D1 の値が表 5 中の値とほとんど同じなので、他の磁石についても、現実的なコイル形状をモデルに入れた場合とオーダー的には変わらないと思われる。q1D 磁石からの生成量が多いのは、他はビームパワーの上がる第 2 期の方が生成量が増えるのに q1D だけ減ることや、第 1 期で q1B から q1D の磁場をかけない場合に q1D の生成量が 27 Bq/cc にまで上昇することから、ダンプに向けてビームを広げているせいだと考えられる。表 5 と表 6 にある値を合計す

8.3 コリメータおよびビームライン電磁石でのトリチウム、水素生成量見積もり

表 7: コリメータ、K1.8D1 の冷却水からの水素生成量。

	第 1 期 (l/day)	第 2 期 (l/day)
第 1 コリメータ	0.57	0.78
第 2 コリメータ	6.3	9.9
K1.8D1 コイル	8.0	11
K1.8D1 鉄芯	1.4	1.9

表 8: 磁石のコイル冷却水からの水素生成量。鉄芯への energy deposit を密度と体積でスケールして計算した。

	第 1 期 (l/day)	第 2 期 (l/day)
K1.8D1	4.7	6.9
K1.8Q1	2.6	3.9
q1B	7.3	13
q1C	2.6	5.3
q1D	12	12
q1E	-	15
q1F	-	4.9
q1G	-	1.7

ると、第 1 期で約 50 Bq/cc、第 2 期で約 80 Bq/cc となり、排水基準の 25 Bq/cc をオーバーする。第 1 期でも 50 t の DP タンクが 3 台設置されるので、ビームダンプやスイッチヤード磁石からの生成成分を合わせても運転可能であると思われるが、今後、第 2 コリメータの厚さを厚くするなど、生成量を出来るだけ減らすようにデザインの最適化を進めなければならない。

また、水の放射線分解によって発生する水素についても、水素の G 値を 2 molecule/100eV として、MARS の結果を基に生成量を計算した。結果を表 7 と表 8 に載せる。トリチウムの場合と同様、表 7 ではコイル形状を入れたリアリストティックなモデルで計算し、表 8 では鉄芯への energy deposit から密度と体積でスケールして計算した。K1.8D1 のコイルの場合で両者の結果にファクター 2 弱の違いが見られるが、オーダーの見積もりにはなるだろうと思われる。表 7 と表 8 にある値を合計すると、第 1 期で約 45 l/day、第 2 期で約 80 l/day になる。この値そのものは特に大きいものではなく、十分に広い空間で大気開放すれば問題ない範囲の量であるが、機械室などでガスが溜ってしまうと引火、爆発する危険があるので、注意が必要である。

8.4 ビームダンプでのトリチウム生成量見積もり

ビームダンプでは銅製コアの表面を水冷する。冷却水はビームライン電磁石と同じ系統を使用する。ここで発生するトリチウム濃度を MARS で評価した。計算では以下を仮定した。

- ダンプコアのサイズ $2\text{m} \times 3\text{m} \times 8\text{m}$
- 表面に厚さ 1 cm の水の層

このモデルで計算すると、ダンプ冷却水中に発生するトリチウム濃度は 30 日間で 54.5 Bq/cc となった。

さらに、水の面積は銅の表面積の半分で、かつ冷却水 30 t で薄めるとすると、30 日後のトリチウム濃度は 0.7 Bq/cc となった。

銅コアの大きさが $2\text{m} \times 2\text{m}$ の場合は、薄める前 91.4 Bq/cc/30days、薄めた後 1.0 Bq/cc/30days となる。結果的に、ビームライン電磁石と同じ冷却水系統を使用するならば、ビームダンプでのトリチウム生成量は基準値の 30Bq/cc よりも十分小さい値となる。

8.4 ビームダンプでのトリチウム生成量見積もり

9. 二次ビームラインと実験室

9.1 二次ビームライン光学

9.1.1 概要

第1期当初、2次ビーム生成標的として唯一 T1 が設置される。T1 には 30%相互作用長相当の標的がおかれ、大強度の K 中間子やその他の 2 次粒子が生成される。これらの 2 次粒子を有効に利用するため、T1 には3つの K 中間子ビームラインが接続できるよう HD ホールのデザインがなされた。図1に HD ホールのレイアウト案を示す。これは、2003 年 6 月の原子核素粒子実験施設委員会 (NPFC) において第1期で実施すべきとされた実験プログラム案 (LOI) について実施可能な案として原子核素粒子実験施設建設グループより提示したものである。T1 から下流に向かって左手に K1.8 ビームラインが配置される。K1.8 は、最大 2 GeV/c の K 中間子ビームを高強度かつ高純度で提供する。ここでは、負電荷 K 中間子を用いた Ξ ハイパー核分光をはじめとするストレンジネス核物理の実験研究が展開される。

T1 から下流に向かって右手には 2 本の K 中間子ビームラインが配置される。1 つは K1.1/0.8 ビームラインであり、1.1GeV/c までの荷電 K 中間子を高強度かつ高純度で提供する。負電荷 K 中間子は精密ハイパー核 γ 線分光実験や K 中間子原子核実験への利用が期待される。また、正電荷 K 中間子は $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊分岐比の測定や $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ における μ 偏極度の精密測定実験などに提供される。もうひとつは K0 ビームラインであり、平均 2 GeV/c の中性 K 中間子を提供する。K0 ビームは $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊分岐比の測定実験に利用される。K1.8 と K1.1 は、1 次ビームラインに対してそれぞれ ± 6 度の取り出し角度を有し、それぞれのビームラインの最上流部の電磁石を注意深く配置することにより独立に運転できるようになっている。また、K0 ビームラインの角度は 1 次ビームラインに対して -16 度とされた。K0 は K1.1 の最上流部電磁石のヨーク貫通穴を通すことで K1.1 の運転条件に左右されずに独立に運転できる。

図1で示したレイアウト案には、ハドロン物理に利用が期待される高運動量ビームラインやテストビームラインについても考慮されているが、説明は割愛する。本章では、K1.8 と K1.1 ビームラインの光学デザインについて述べる。

9.2 K1.8 ビームライン

K1.8 は高強度かつ高純度の負電荷 K 中間子を Ξ ハイパー核分光に利用するために設計された。ビームラインのレイアウトを図2に示す。K1.8 は、上流から順に、1) 最上流部、2) 第1粒子弁別部、3) 第2粒子弁別部、4) 運動量分析部、というふうに光学的役割上4つの区間に分割できる。最上流部は、DQQD という並びの2つの偏向電磁石 (D) と2つの収束電磁石 (Q) からなる。T1 標的で生成された K 中間子は運動量を選別され、中間像 (IF) スリットのところで縦 (Y)

9.1 二次ビームライン光学

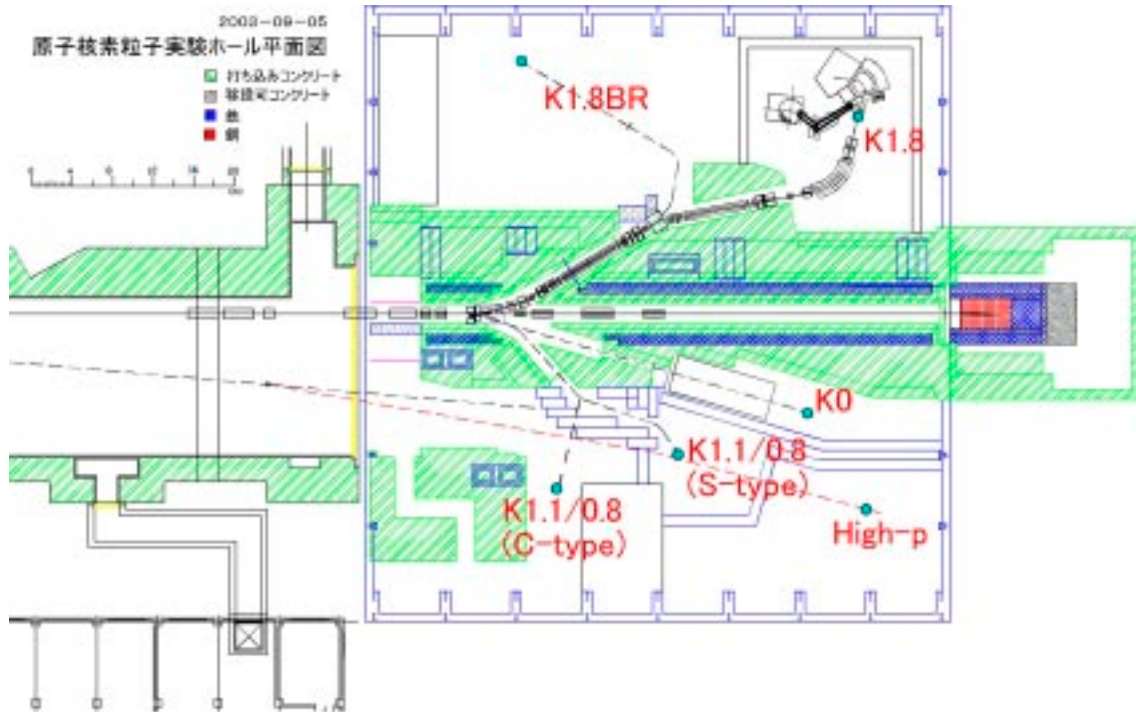


図1 HD ホールレイアウト案

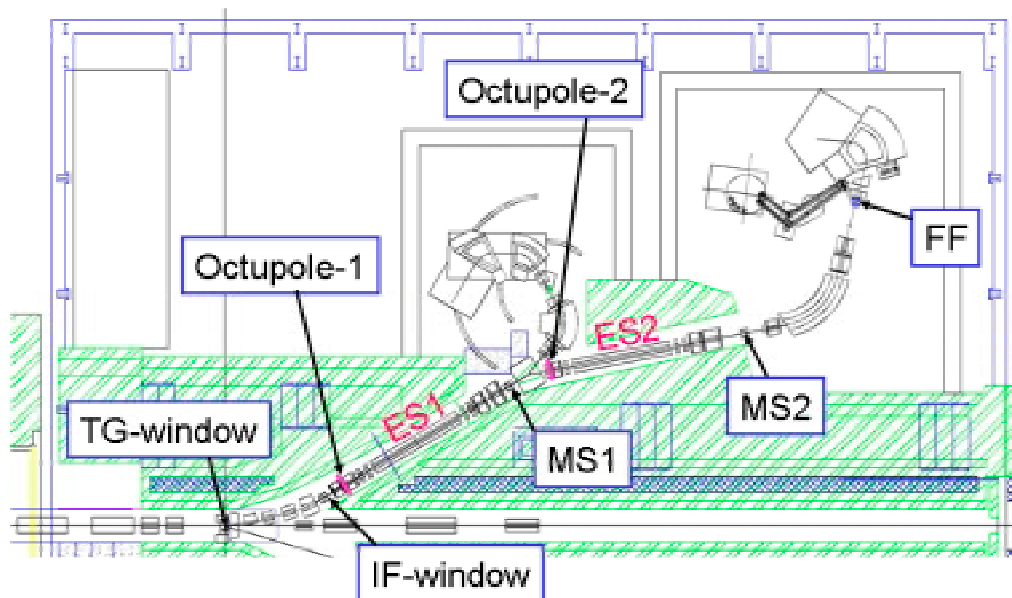


図2 K1.8 ビームラインレイアウト案。MS1 の直下流の偏向電磁石から左手に分岐しているのは後述する K1.8BR ビームラインである。

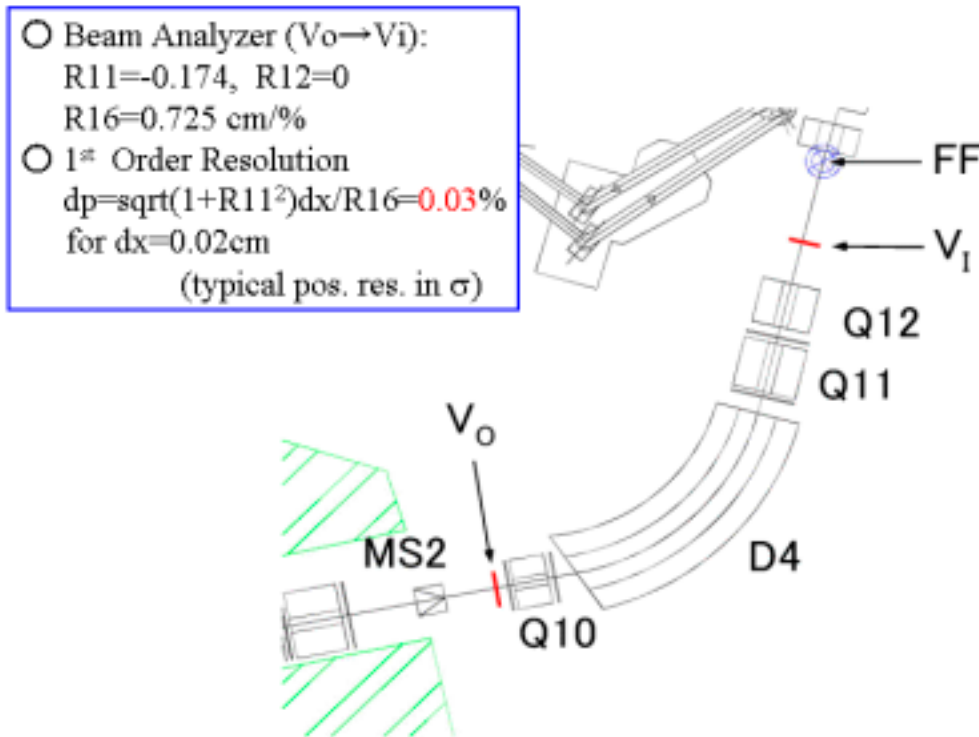


図3 K1.8の運動量分析部

方向に収束される。最上流部はT1で開放されたビームパワー（約225 kW）に直接さらされる所である。下流の電磁石の発熱を抑えるために、T1と最初の偏向電磁石（D1）の間に十分な厚さのコリメータが設置される。最上流部のデザインを進める中で、通常の電磁石磁極間隙に挿入されるような真空ダクトではビームによる発熱を冷却することが極めて困難であることがわかった。さらに真空ダクトの繋ぎ部分の発熱と真空漏れの対策や故障時の保守についての困難が指摘された。これらの困難を解消するため、コリメータと最初の偏向電磁石（D1）と収束電磁石（Q1）を1つの真空槽に入れるという方針が採られた。電磁石の真空中の運転は技術的な挑戦であるが、別の章に詳述されているようにこれまでの試験結果は上々であり、この方針が有望であることを示している。最上流部の真空度は0.1Pa程度の比較的低真空となる。一方、2次ビームライン側、とくに粒子弁別部は静電セパレータを運転するために 10^{-4} Pa程度の真空になる。したがって、この二つの真空度を仕切る膜が必要になる。膜での多重散乱によってK中間子の弁別が影響されないように、膜は（Y方向に収束されている）IFスリットの近傍（IF-window）に置かれる。

K1.8は、高純度のK中間子ビームを提供するために粒子弁別区間が2箇所設けられている。それぞれの区間には、有効電極長6m、電極間隙10cmの静電セパレータ（ES1とES2）が置かれる。それぞれ鉛直方向に収束する点にマススリット（MS1とMS2）が設置されK中間子を他の粒子から分離する。分離部を2段に構えることで、光学的に標的以外から来るK以外の粒子の混入を抑える。MS1およびMS2でKと π の分離をよくするために、それぞれの粒子弁別区間に対して6極電磁石2台と8極電磁石1台を使って主要な2次および3次の収差を補正している。

K1.8の最終区間4)には運動量分析用電磁石群（ビーム分光器）が設置される。ビーム分光器の電磁石配置はQDQQ型で、分光器の前後で水平方向に”point-to-point”光学が実現されている(図3)。同時に、ビームは実験標的に収束される。ここで1次の輸送行列と飛跡検出器の位置分解能（ σ

9.1 二次ビームライン光学

～200 μm) から期待されるビームの運動量分解能は 0.03% (σ) と見積もられた。

K1.8 のビーム光学を図 4 に示す。ビーム光学は TRANSPORT および Decay TURTLE を用い、それぞれ 2 次および 3 次の輸送行列まで考慮された。全長は 45.7m である。50-GeV、15 μA (30-GeV、9 μA) 1 次陽子ビームが 54 mm 長のニッケル標的に照射された場合の K1.8 のビーム強度が、Sanford-Wang の 2 次粒子生成断面積の式を用いて見積もられた。表 1 に主なビームラインパラメータと期待されるビーム強度および K/π 比がまとめられている。

最大運動量	2.0 GeV/c		50-GeV 15 μA	30-GeV 9 μA
全長	45.694 m	K ⁻ 強度		
アクセプタンス	2.0 msr · %	1.8 GeV/c	9.3E+6 ppp	2.0E+6 ppp
像倍率@MS1	0.49	1.1 GeV/c	0.67E+6 ppp	0.14E+6 ppp
像倍率@MS 2	-0.79	K ⁻ / π^-		
横ビーム rms 幅@FF	16 mm	1.8 GeV/c	2.3	2.6
縦ビーム rms 幅@FF	8 mm			

表 1 K1.8 ビームラインパラメータと期待される K^- 強度、 K/π 比。 K^- の生成断面積は Sanford-Wang の式を用いた。強度の単位はパルスあたりの粒子数 (ppp)。1 パルスの間隔は 3.42 秒とした。 K/π 比は、静電セパレータの電界強度が 750kV/10cm として見積もられた。MS1 と MS2 の開度は、それぞれ、4 mm と 6 mm である。また、いわゆる “Cloud π ” の効果は考慮されていない。

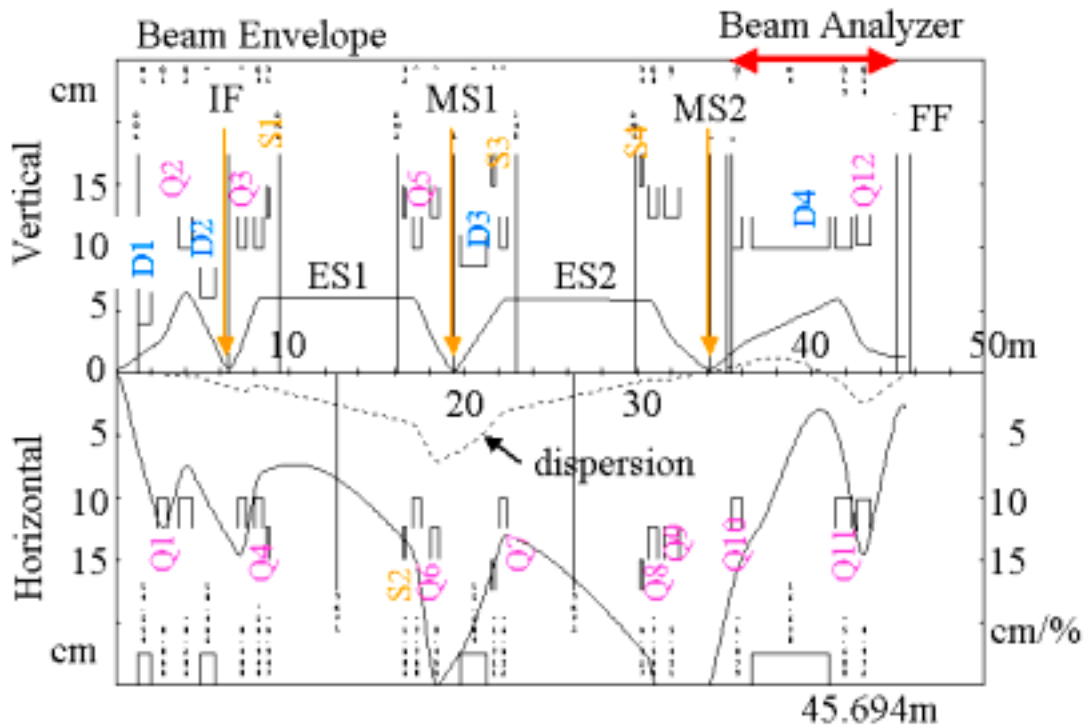


図4 K1.8 のビーム光学 (TRANSPORT 2次)

最大運動量に関するコメント：

最近、主に K1.8 ビームラインを利用するストレンジネス核物理のユーザーから K1.8 をアップグレードして最大運動量をできるだけ高くすべきである、という声が上がっている。最近話題のペンタクォーク状態の研究に対応するためというのが主な理由である。上述の K1.8 は、D1 をはじめ、いくつかの電磁石の磁束密度が飽和するので、最大運動量を 2 GeV/c 以上に対応させるには光学的设计を見直す必要がある。2004 年 5 月 8 日に行われた K1.8 ビームラインに関するワークショップでの議論を受けて、K1.8 で実現していた K 中間子の弁別能や強度を保ちつつ最大運動量を 2.3 GeV/c まで引き上げたビームライン (K2.3) の可能性が建設グループ内で検討され始めた。K1.8 を K2.3 に変更する場合、最上流部における配置の変更に伴う電磁石等の干渉など注意深く設計検討しなければならない。一方、2 次ビームライントンネルを形成する構造体への影響など建設スケジュールに関わる検討などが急がれている。

9.3 K1.8BR ビームライン

K1.8 の第 1 マススリット (MS1) の直下流の偏向電磁石 (D3) で分岐する K1.8BR ビームラインが設置可能である。K1.8 は Ξ ハイパー核の生成に適した運動量 1.8 GeV/c の負電荷 K 中間子ビームについて最適化されたビームラインであるので、ビームライン長が長く、 $S=1$ ハイパー核の生成に適した 1.1 GeV/c より低い運動量の負 K 中間子を利用するには必ずしも効率がよくない。

9.1 二次ビームライン光学

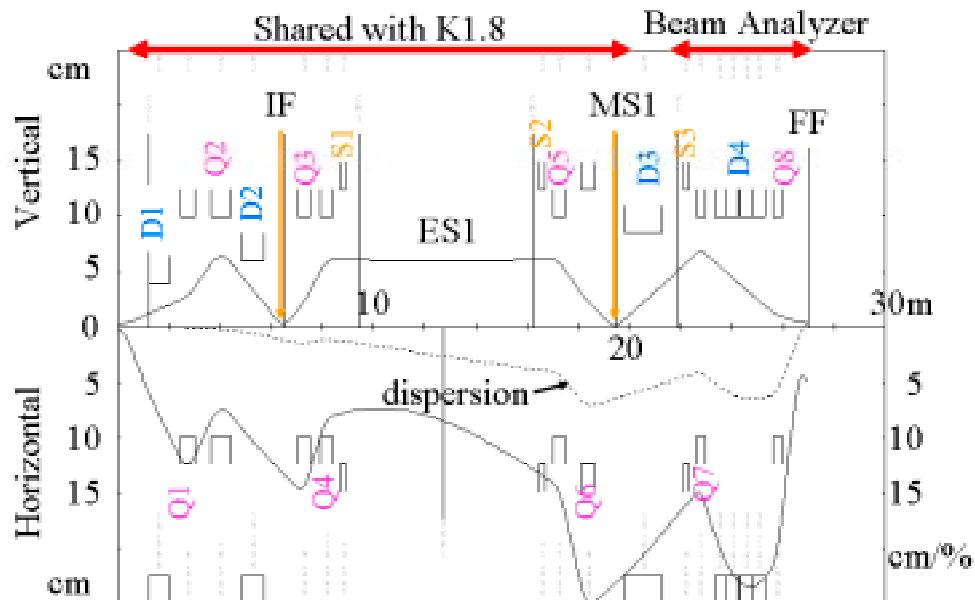


図5 K1.8BR のビーム光学 (TRANSPORT 2次)

K1.8BRは、D3の下流にビーム分光器QDQを配置することでK1.8より20 m近く短い全長約27mのビームラインが実現可能である。レイアウトは図2に K1.8 とともに示した。また、K1.1BR のビーム光学を図5に示す。1.1 GeV/c 負 K 中間子ビームの強度は1次ビームが50 GeV, 750 kW のときパルスあたりおよそ 10^7 個が期待される。これはK1.8で期待される強度のおよそ15倍である。ただし、分離部が1段なのでKビームの純度は劣化する。

K1.8BR と K1.8 の同時運転はできない。しかし、一方が実験中に他方で実験準備あるいは装置の改良ができるという具合に、効率のよい運用で実験プログラムを進めることができると期待される。

HR ビームラインについてのコメント：

J-PARCの50-GeV陽子加速器は高強度のK中間子のみならず超高強度の π 中間子ビームを生成することができる。ふんだんに生成される π 中間子を利用して従来の磁気スペクトロメータを用いたハイパー核分光のエネルギー分解能を飛躍的に向上させる高分解能(HR)ビームラインが提案されている。レイアウトとビーム光学をそれぞれ図6および図7に示す。HRはK1.1BRのビーム分光器を組み替えることで配置可能である。K1.8から分岐したビームはMS-Hにおいて水平鉛直方向ともに無分散収束される。その後、ビームは2組の点対称に配置された縦偏向電磁石を含むビーム分光器で縦方向に振り上げられ水平に振り戻される。このとき、ビームラインの終点(実験標的位置)において鉛直方向の像倍率を小さく保ちつつ($R33=-0.375$)、非常に大きな分散($R36=-10.614$ cm/%)を実現している。これにより、ビームの飛跡を分析しなくても反応点を知ることにより運動量分解能は0.01%以下を達成できると期待される。全長は48 m以上になるが、 π 中間子の利用においてはさほど問題にならない。期待される π 中間子ビームの強度は1.1 GeV/cでパルスあたり 4×10^9 個に達すると見積もられる。

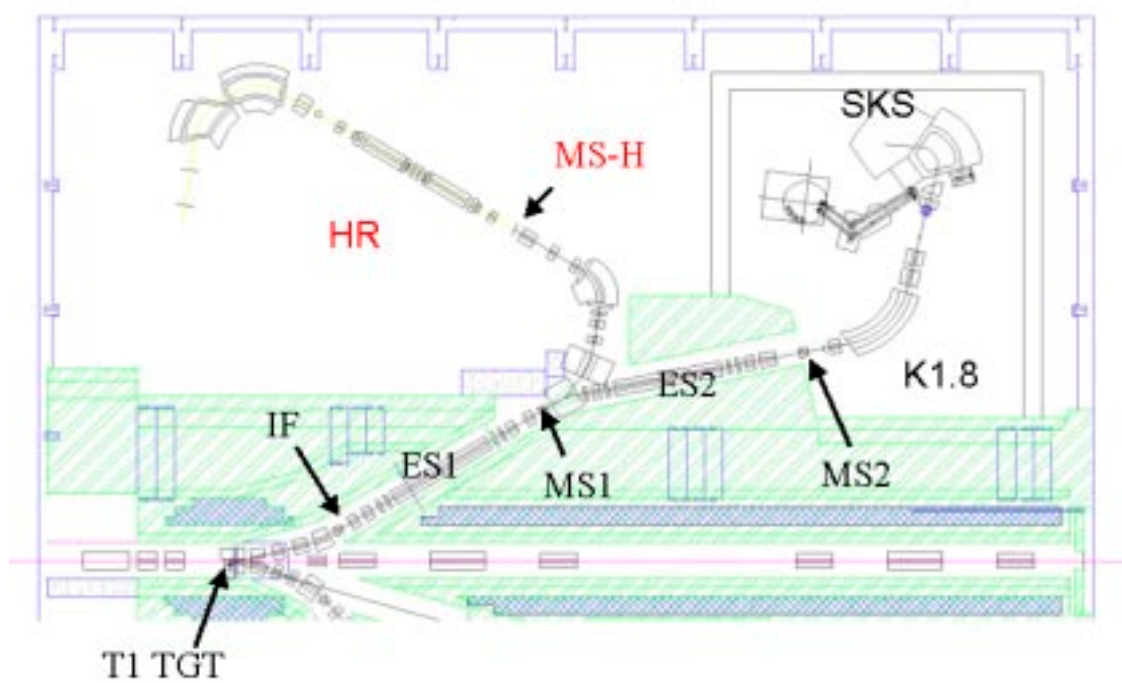


図6 HR ビームラインのレイアウト案

9.1 二次ビームライン光学

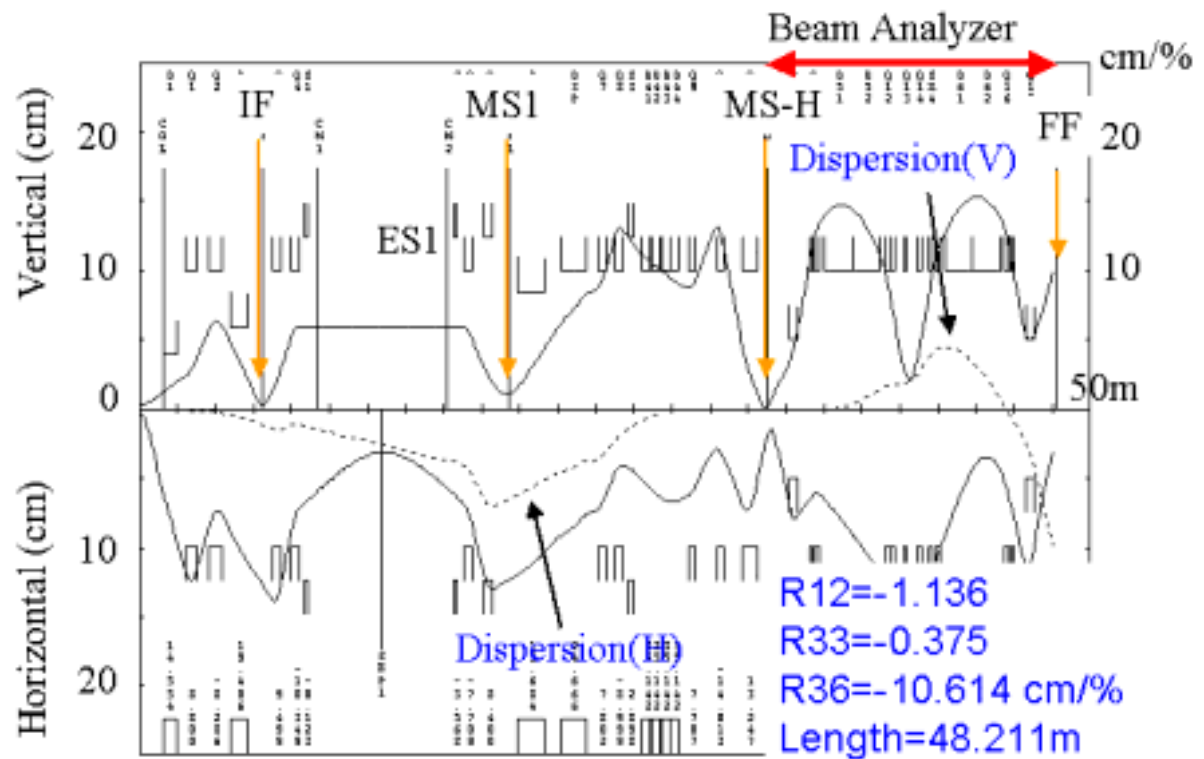


図7 HR のビーム光学

9.4 K1.1/0.8 ビームライン

K1.8 と K1.1/0.8 を独立に運転するためには、T1 下流の電磁石の配置に注意が必要である。2つのビームラインの最上流の電磁石ヨークが干渉しないように C 型電磁石が採用される。当初、2つの C 型電磁石を、1 次ビームラインを軸に対向させるように配置するような配置で K1.8 や K1.1/0.8 の光学的デザインが進められた。しかし、この配置をもとに現実的な磁場計算を進めると、お互いの磁場が強く干渉しあい、独立に運転することが困難になることがわかった。このことを回避する方法として、1) 磁場の干渉がなくなるところまで取り出し角度を後方にとるか、2) 一方の電磁石をより下流にずらすか、が検討された。方法 1) は、取り出し角度を 10 度以上にする必要があり、負電荷 K 中間子の生成断面積において著しい低下をまねく。方法 2) はビームラインが長くなりアクセプタンスも低下するが、その低下の度合いは 1.1GeV/c の K 中間子で 20% 程度であることがわかった。よって方法 2) を採用することが有利と認められたので、図 8 に示すようなレイアウトで

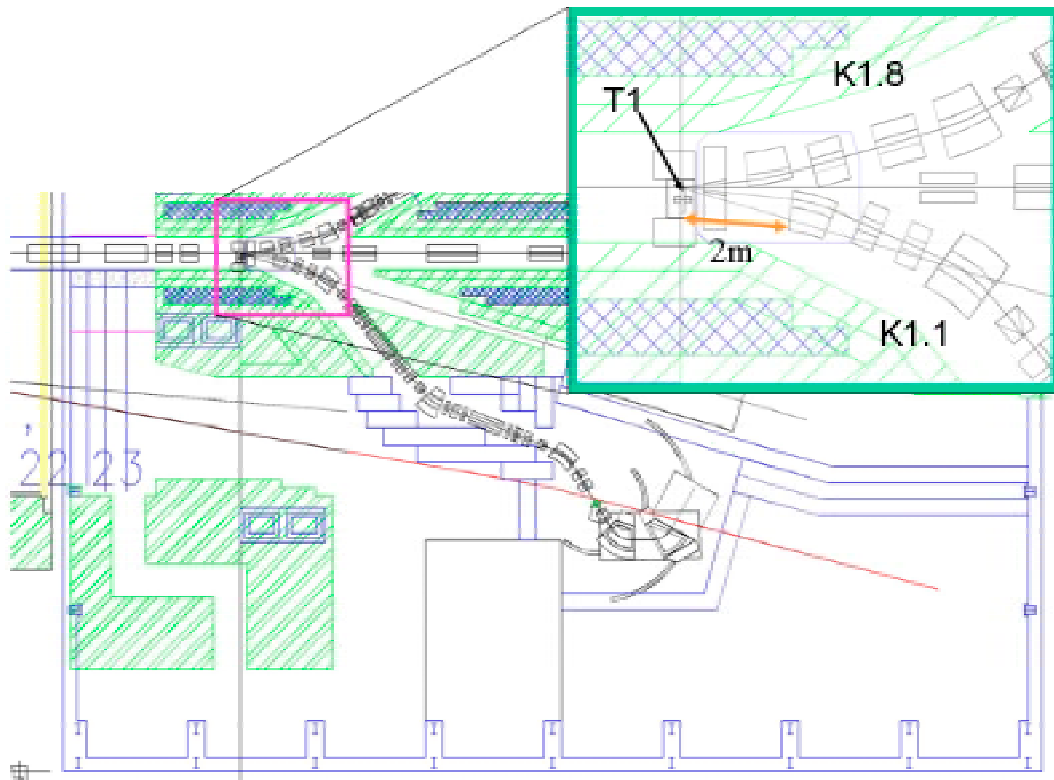


図8 K1.1/0.8 ビームラインのレイアウト案

K1.1/0.8 をデザインしなおした。図でビームライン要素がビームライン構造体と干渉しているように描かれているが、これは、当初のデザインに基づいた構造体に対してどれだけ干渉するかをみるためにそうした。

K1.1/0.8 の光学的構成は K1.8 のそれと多くの点で共通している。K1.1/0.8 は、K1.8 と同様の理由で最上流部と次に続く粒子弁別部の真空度を仕切るために IF 点が設けられている。粒子弁別部は K1.8 と同様に 2 段に構えられ、それぞれの区間で電極長 2 m の直交磁場型静電分離器が設置されている。MS1 および MS2 で K と π の分離をよくするために、それぞれに対して 6 極電磁石 2 台と 8 極電磁石 1 台によって主要な 2 次および 3 次の収差を補正している。第 2 マススリット (MS2) のあと、ビームは偏向電磁石 1 台と収束電磁石 2 台で実験標的に無分散で (アクロマティックに) 収束される。表 2 に主なビームラインパラメータと期待されるビーム強度および K/π 比がまとめられている。また、K1.1/0.8 のビーム光学を図 9 に示す。

K1.1/0.8 C-type ビームラインについてのコメント：

概要で述べたとおり、K1.1/0.8 は、負電荷 K 中間子を利用するストレンジネス核物理分野のユーザーと正電荷 K 中間子を利用する K 稀崩壊物理分野のユーザーが存在する。お互いの実験準備やデータ収集を効率よく進めるために、K1.8 に対する K1.8BR と同様に、K1.1/0.8 の D3 で別のビームラインを分岐させるオプションも検討されている。ビームラインの形状から、図 8 に示したビームラインを K1.1 S-type と呼び、D3 で分岐させたビームラインを C-type と呼称する。C-type は K 稀崩壊物理に必要なより低運動量の正電荷 K 中間子ビームラインに最適化されたデザインが検討されている。また、C-type は、将来の高運動量ビームラインを用いた実験が行われる際、ビームラインや実験エリアの干渉がより少ないと考えられている。

9.2 静電気型粒子分離装置（ESセパレータ）

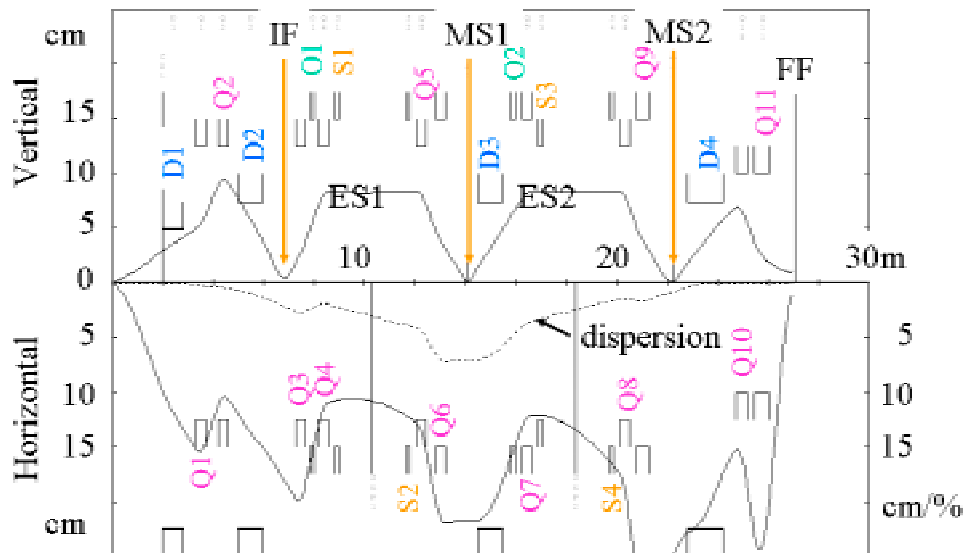


図9 K1.1/0.8 のビーム光学 (TRANSPORT 2次)

最大運動量	1.1 GeV/c		50-GeV 15 μ A	30-GeV 9 μ A
全長	27.058 m	K ⁻ 強度		
アクセプタンス	4.1 msr \cdot %	1.1 GeV/c	9.5E+6 ppp	2.1E+6 ppp
像倍率@MS1	0.43	0.8 GeV/c	2.3E+6 ppp	0.5+6 ppp
像倍率@MS 2	-0.49	K ⁻ / π^-		
横ビーム rms 幅@FF	4.3 mm	1.1 GeV/c	8	8.9
縦ビーム rms 幅@FF	2.5 mm			

表2 K1.1/0.8 ビームラインパラメータと期待される K⁻ 強度、K/ π 比。K⁻ の生成断面積は Sanford-Wang の式を用いた。強度の単位はパルスあたりの粒子数 (ppp)。1 パルスの間隔は 3.42 秒とした。K/ π 比は、静電セパレータの電界強度が 750kV/10cm として見積もられた。

MS1 と MS2 の開度は、それぞれ、2 mm と 4 mm である。

また、いわゆる “Cloud π ” の効果は考慮されていない。

9.2 静電型粒子分離装置 (ES セパレータ)

9.2.1 ES セパレータ概要

静電型粒子分離装置 (ES (Electrostatic) セパレータ) は、一次ビームライン上の生成標的から発生する様々な二次粒子の中から、目的とする数 GeV/c までの荷電粒子を選別し実験エリアに導くために、必須の二次ビームライン要素である。ES セパレータを、50 GeV の大強度陽子ビームの環境下で使用する場合、二次ビームライン要素といえども生成標的に近い場所に設置されるので、耐放射線性は一次ビームライン要素と同等か、あるいは準ずる仕様が要求される。既存のセパレータの設計を元に、次の事柄に留意して設計を見直し、改良型のセパレータの製作を進めている。

- A. 有機材料の使用を避ける。(但し高電圧発生装置内部の材料を除く。)
- B. 放電を抑制する為に内部の電界を緩和する。
- C. 放射線に対する遮蔽性を考慮する。

以下に、セパレータを構成する真空容器・電極・高電圧発生装置の、現時点での設計について述べる。

9.2.2 真空容器について

電極と真空容器本体 (接地電位) 間の距離は、電界強度を考えると平行電極間の距離の半分程度まで小さくできる。また、イオンの衝突電離を抑える観点からも電極から真空容器までの距離を大きくするのは得策ではない。さらに、真空容器の小型化は放射線遮蔽上の観点からも望まれる。J-PARC での新型セパレータは、真空容器の主管を従来の内径 $\phi 800\text{mm}$ から JIS 規格品の中でひとまわり小さい $\phi 695.2\text{mm}$ (外径 $\phi 711.2$ [JIS750]) へと小型化を試みる。(図 1)

真空容器の母管には、高電圧発生装置、電極支持機構、真空排気装置、のぞき窓等などを取り付けるため、図にあるように随所に枝管を取り設ける。既存のセパレータでは、枝管は真空容器母管に穴を開け、その場所でのつきあわせ溶接により接合し、その後に研磨して角を取っている。しかしながら、この方法では接合部分に十分な曲率を取る事が出来ず (R11 程度)、比較的強い電界が生じて、放電を誘発する要因になっていたと考えられている。新型の真空容器では母管に“引っ張り成形”を施して、枝管との接合部を外側へ張り出す様にする。これにより、曲がり部の曲率を大きく取る事が出来 (R30 程度)、母管側より外側の平坦になる部分で溶接を行うことになるので、電界を緩和でき放電要因を大幅に抑制出来ると期待される。また、正負の高電圧発生装置を取り付けるための枝管以外は、同一規格の管として取り付けフランジに互換性を持たせた。

真空容器内面の仕上げにはバフ研磨後に電界研磨を施す。また、放射線性への耐性をあげるために、真空封止にゴム O リングは一切使用せず、全て金属製の O リング (日本バルカー：トライパック) とする。上下流の扉式のフランジは、金属製 O リングの締付けを確実に行為、扉の支点を 2 箇所とし平行に均等に閉められる構造となっている。

J-PARC の 2 次ビームラインでは、生成標的から実験エリアへ至るまでの放射線遮蔽を高めるために密閉性が要求されるので、架台等は用いず直接床置きとし、周囲も出来る限り遮蔽体で囲えるようにする。また、ビームラインでは原則として補修作業などは行わない。基本的にはビームライン要素への電力・水はコンクリートシールドの上側から供給される。セパレータの真空排気系も真空容器の上側に配置する。設置時の高さ調整は真空容器本体の左右に取り付けた位置決め治具を用いて行う。

9.2 静電気型粒子分離装置（ESセパレータ）

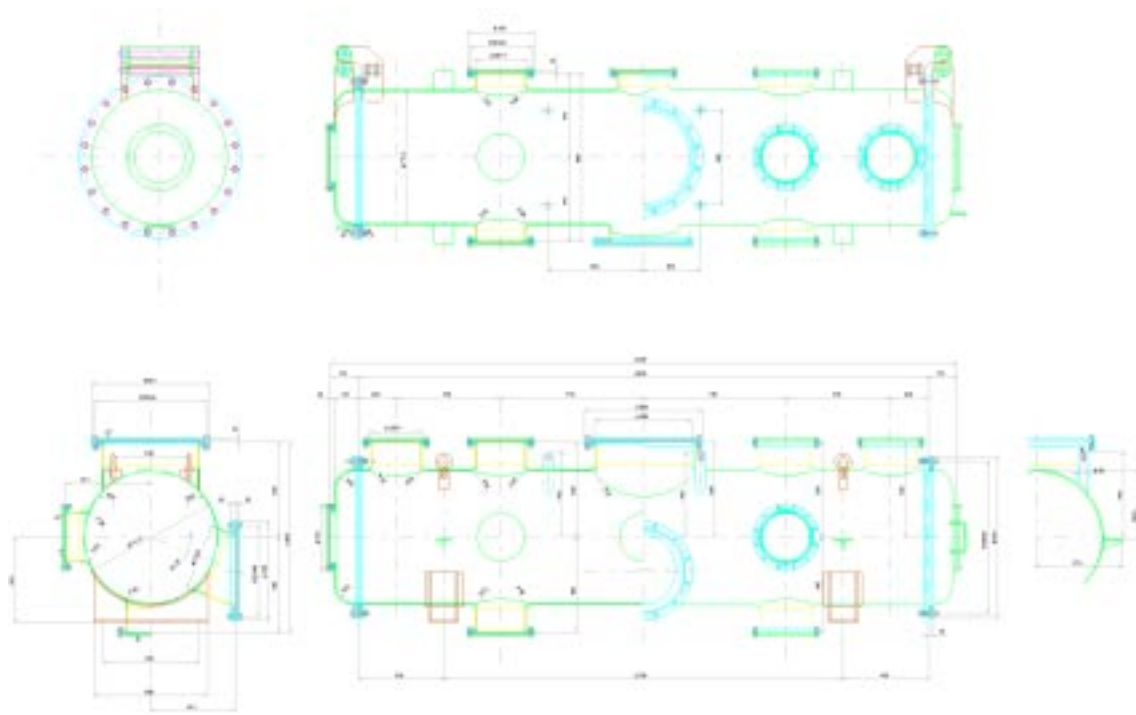


図1 新型セパレータの真空容器

9.2.3 電極について

9.2.3.1 真空容器本体の大きさの変更に伴う電界の試算

真空容器の小型化に伴い、電極を支持するベース碍子の長さは198mmから154mmに変更した。電極部と真空容器の間の距離は、これまでの約115mmから約76mmとなる。この設計の元、既存のセパレータ（図1）とJ-PARC用新型（図2）のもののそれぞれについて電界強度の計算を行った。

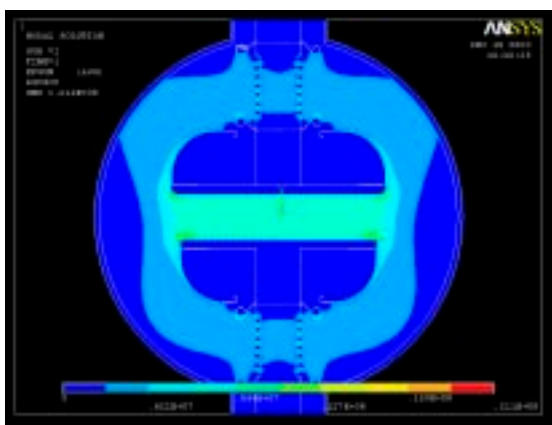


図2 既存のセパレータの断面

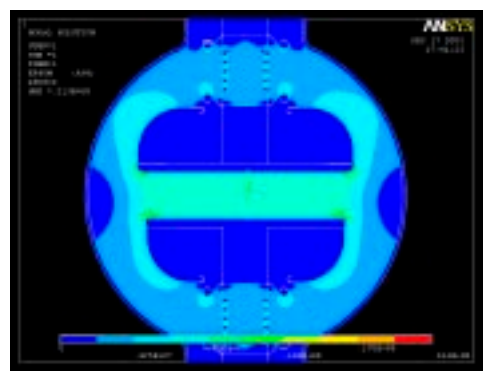


図3 J-PARC用新型の断面

断面中央の下側が陽極（SUS304）、上側が陰極（A1050）で、10cm離れて平行に対向しており、この

間隙を紙面に垂直方向に荷電粒子が通過する。電極の横方向の幅は既存のセパレータから変えていない。それぞれの電極を真空容器から支えているのがベース碍子で、断面では波状の部分である。この小型化による、真空容器内壁や電極、ベース碍子近傍での電界の顕著な変化は認められない。

9.2.3.2 陽電極の厚さ

前節の電界強度の試算結果によると陽電極の縁での電界がもっとも高い事が分かる。この場所での電界を緩和する為に、陽極板となる SUS の板厚を変え、縁の曲率を大きくし電界計算を行なった。(図4)

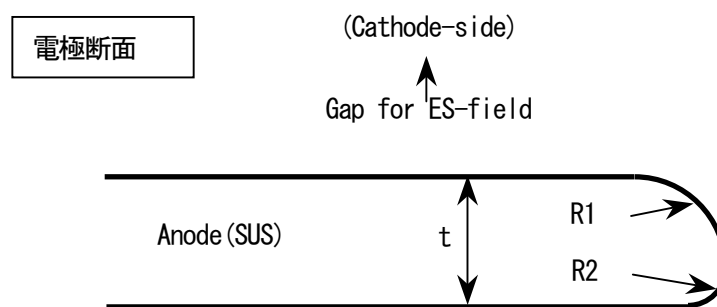
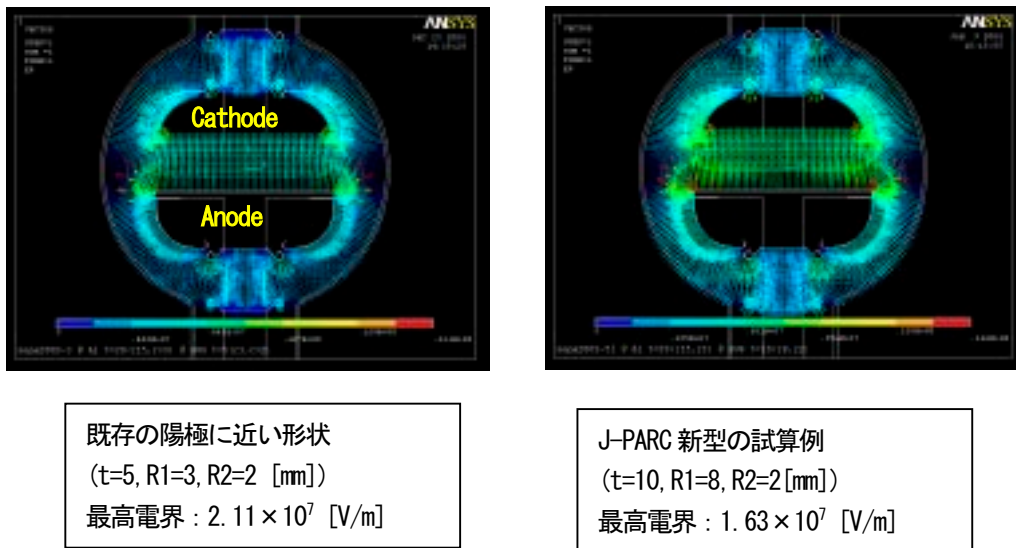


図4 陽電極の厚さと縁の形状を変えた場合の電界の様子

結果を以下の表1に示す。

9.2 静電気型粒子分離装置（ESセパレータ）

表 1 電界計算結果

t [mm]	R1 [mm]	R2 [mm]	Max. E [10 ⁷ V/m]	Weight [kg]
5	3	2	2.11	51
6	3	3	2.05	62
6	4	2	2.03	62
8	4	4	1.98	82
8	6	2	1.79	82
10	5	2	1.93	103
10	8	2	1.63	103
15	8	2	1.68	154
15	10	2	1.57	154
15	12	2	1.45	154
20	15	3	1.40	205

電界強度の低減の度合いと、設置時等の取扱いの簡便さ等を考慮して、 $t=10$ 、 $R1=8$ 、 $R2=2$ を採用する。

9.2.3.3 連結方法

効果的な粒子の分離の為に、セパレータには長さ約 6 m にわたる電極が必要とされる。しかし、電極の支持やたわみ・取り付け方法・材料等の条件から 3 m を基本単位として製作し、2 台を電氣的に連結して使用する方法をとる。現在のセパレータは右の写真（図 5）のように電極の背板の外側にばね機構を有する接触金属を取り付け相手側の同様な部位に押し当てる方法をとっている。外側に突起部分等があるためか、放電の跡が接触部位近辺に局所的に見受けられ、焼け付き黒くなっている箇所も生じた。今回の新型では、接触金属棒を取り付ける場所を電極カバー内とし相手側の押し当て箇所も電極カバー内部として表面には突起物が出ないようにしている。図 6 は、この連結方法による電界の様子である。電極カバーにはビーム軸方向に穴をあける事になる。しかしながら、この形状でも電界への影響は小さい。また、調整段階では単体で試験等を実施する（図 7）。このように単体で連結しない場合でも、電極カバー穴による電界の大きな乱れは見られない。

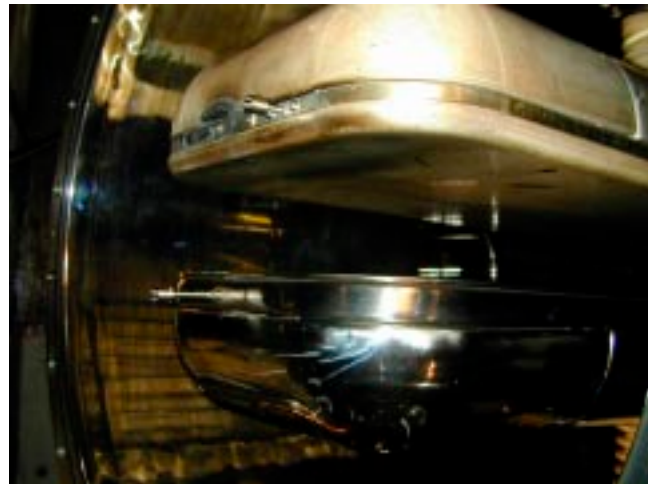


図 5 12GeV PS K2 ビームラインのセパレータの電極と連結部分

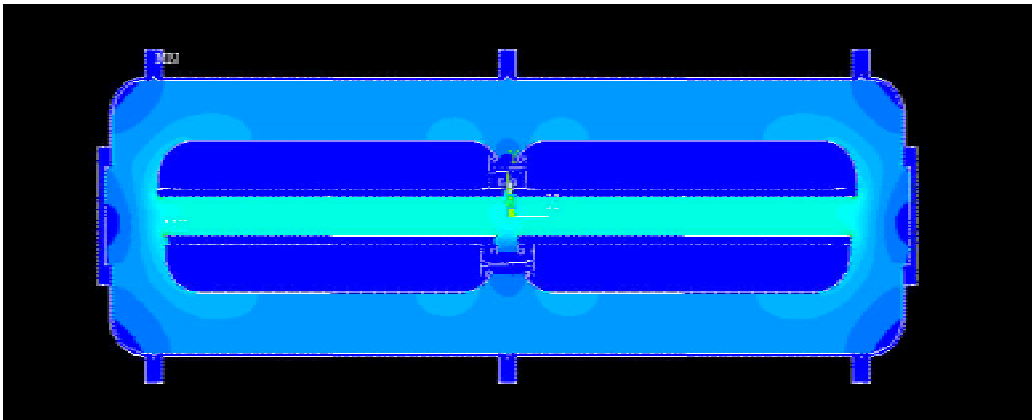


図6 新型セパレータで、電極カバー内側で3mの2枚を電極を連結した場合の電界の様子

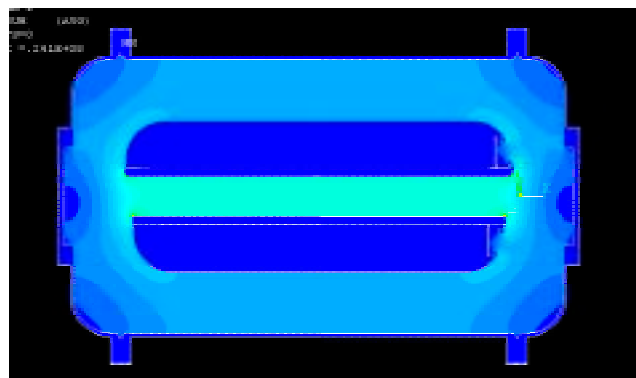


図7 新型セパレータを単体で使用した場合の電極カバー部穴の電界の様子

9.2.3.4 電極支持部について

既存のセパレータでは電極間の距離の調整用に電極の可動範囲を $\pm 50\text{mm}$ と大きく取っている。しかしながら、これまで実用上正負の電極間距離は 100mm と固定して使用している事、可動距離を大きく取ると電極支持部分の真空容器母管の外側への突起部分が長くなり、放射線遮蔽上好ましくない事、等から新型では $\pm 20\text{mm}$ とする。さらに、外側の調整用ハンドルも着脱可能とし突起部分を極力短くした。

今回の試作機までは、真空容器フランジでは重量を支えるのみで、電極間の平行性等の調整は電極支持部が有する可動機構により、電極の容器への取り付け後に行なう。しかしながら、真空容器本体側のフランジは本体への溶接後、最終的には五面加工機により面の仕上げを行なうため、フランジ相互の平行性や面間距離の精度は $\pm 0.5\text{mm}$ 程度となる。次に製作する予定の高電圧発生装置を要しない連結される側の3m長のセパレータでは、電極支持部の可動機構は設けず構造をさらに簡素化し、精度よく加工された真空容器フランジに取り付けるだけで位置出しが可能となるように試みる。

9.2 静電気型粒子分離装置（ESセパレータ）

9.2.4 高電圧発生装置について

コッククロフトウォルトン型の高電圧発生装置は真空容器の外側に直付けされ、電極に直接高電圧を供給する。真空容器の外側の部分については十分な遮蔽を行うことが出来る場合でも、特に平行電極に近い部分は、真空容器内部であり、また、強い電界にも曝されるから遮蔽ができない。既存のセパレータの電圧導入部はプラグ状になっていて FRP（Fiber Reinforced Plastics）で成形されており、真空容器内ではさらにその部分をセラミック容器で囲い絶縁油を充填する。（図8）この部分の絶縁油は放射線に曝される割合も高く、高電圧発生装置を保守する際に、分解や充填に複雑な手順を要する。新型のセパレータでは、FRPの部分自体をセラミックで置き換える事により、高電圧発生装置を真空容器に別の絶縁油を介さずに直接取り付けられるように試みる。現在、セラミック部分の形状や固定方法を決めるために電界計算を進めている。（図9、10）

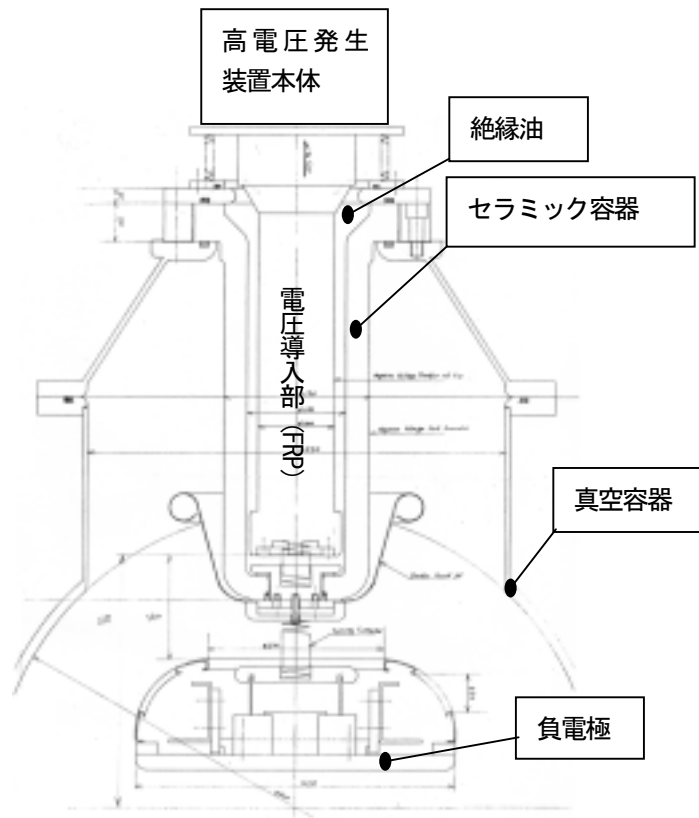


図8 既存のセパレータの電圧供給部の断面

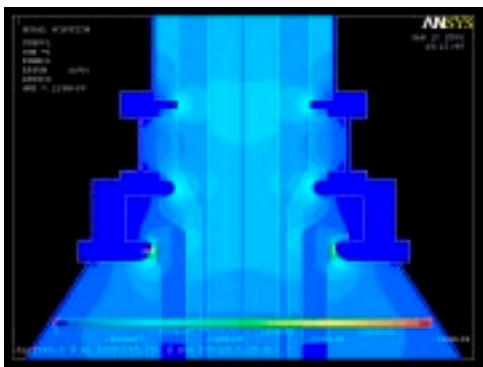


図9 既存のセパレータの電圧供給部の電界

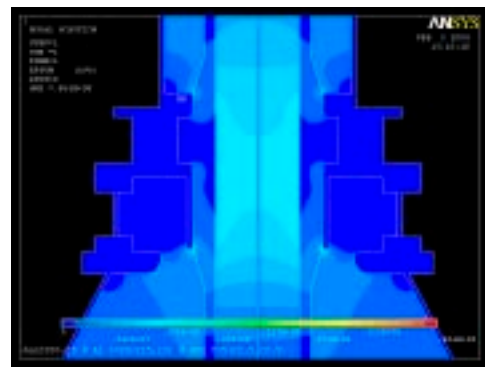


図10 新型セパレータの電圧供給部の電界

9.2.5 今後

いくつかの新機軸を盛り込み、真空容器・電極・高電圧発生装置を設計／製作を行った。設計の指針となったのは以下の観点である。

- 放射線耐性
- 遮蔽性と放電抑制のための真空容器の小型化
- 要所での電界の緩和

今後は、各部の納品後に、組み上げ方法、設置の手順の検討、真空テスト、高電圧テスト等を行いながら、調整と改良を進めていく。さらに、電極のみを内蔵する3 m長のセパレータを製作し、連結して試験を行い実用化に備える。

9.2 静電気型粒子分離装置（ESセパレータ）

9.3 実験室概要

ハドロン実験施設の立地は加速器と同様に地表は砂地であり安定した地盤まで長さ 40m 前後のパイルが埋め込まれ実験ホール床盤の基礎となる。海岸までの距離は保安林をはさみ 300m 程度で実験ホール拡張予定場所周辺には他の建築物はなく、将来の拡張にあたっては燃料輸送道路の付替え、保安林、埋蔵文化財等の懸案事項はあるが拡張が可能な位置となっている。

図 1 に実験ホールの配置案を示す。実験ホールのデザインは、拡張性、多用途性、安全性等を考慮しながら予算を含む数々の制約からそれらを失わないようにしなければならない。実験ホールの広さはビーム進行方向 56m、幅 58m であり、幅の中心線を一次ビームラインとしている。これにより T1 ターゲットからの二次ビームラインとその実験エリアの拡張性が確保され、将来の一次ビームライン増設にも備える。しかしながら一次ビームライン用の遮蔽が厚いことで第一期の建設では十分なフロア面積が確保できるとは言えず、実験準備の一部は当面つくばのファシリティを使うことにならざるを得ない。

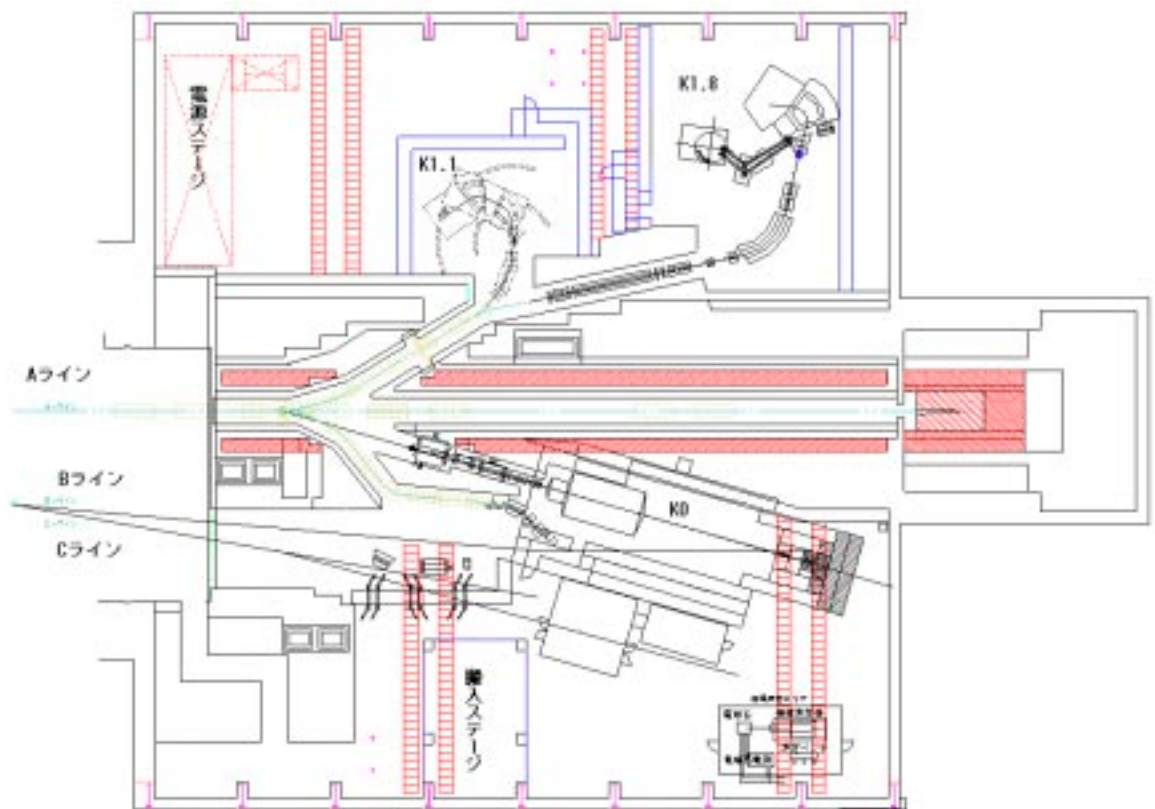


図1 ハドロン実験ホール内実験エリア配置案の一例

実験ホール内のレイアウトについては施設部から示されている建設図面とユーザーコミュニティやハドロンビームライングループから各種二次ビームラインの配置案が示されて

9.3 実験室概要

いる。建設図面からの変更は施工までには何度か要求が出来る機会があるので、可能な限り付属設備が実験の支障とならないようなレイアウトとする必要がある。搬入ヤード、電源ステージ、階段等付属設備の配置を予想される範囲の将来にわたり実験遂行上支障ないように、かつ利便性や安全性を確保しつつ二次ビームラインの変更に対応できるようにしなければならない。

実験データ収集用コンテナについても実験エリア近傍フロアレベルに配置することは困難であることが予想され、初期においてフロアスペースに比較的余裕がある場合でも、多くのコンテナは実験室屋外に配置されるものと思われる。この配置により放射線被曝の低減も期待できる。

実験ホールフロアレベル(FL)はグランドレベル(GL)より－6.4mでありビームレベルはFL2m となる。ビームレベルは北カウンターホールと同じである。これにより大型実験装置を使用した実験が可能であり、現在の設備移設についてもコスト面で有利となる。半地下構造となると KEK の過去の教訓から雨水の浸水対策が必要になるので、搬入口はフロアレベルには設けず、GL+0.2mの FL6.6m に搬入ヤードを設けることでこの対策とする。搬入ヤードの位置は当初、上流から4スパン目の南側案が示されたが、二次ビームラインや実験エリアと干渉するので、2スパン目のコンクリートトーチカ部の一部をブロック構造にし、搬入口とする案も出ている。大型車による搬入に制約が生じる他、トーチカ部分の遮蔽の確保が必要だが、実効的なフロアスペース増加にもなるので有利である。北側には車両用搬入口は無いが、1トン程度の貨物リフターにより GL、FL 間の機器昇降を出来るようにする。空調については、FL から天井下までの高さは約 23mの大空間であるため、現状のカウンターホール同様に実験ホール全体の空調はコスト面で困難となる。南北の側壁上部に設置される給排気用ファンによる換気は可能となるが、空調機による空調は必要な区域のみとなる。

また、可燃性ガス等の滞留に備え局所的なファンにより GL から FL へ向けて換気も行える設備を設けられる構造とする。

実験エリアはビームラインの放射線レベルからエリア全体が遮蔽体によりケイヴ状に囲われることになる。エリア内外を通過する配線配管はクランク状の空間を通すことになるが、将来の実験まで予測してその開口面積を確保することは困難なので、初期の実験において充分と思われる開口を確保する。

二次ビームライン、実験エリア以外のフロアは電磁石電源用ステージの他、磁場測定エリア、放射化物保守エリア、放射化物保管エリア等が必要になる。一次ビームラインから放射化物が保守のため取り出されると、専用の取扱い施設が出来るまでは実験室内で扱うことが避けられず、その面積が増大すればユーザーが使用できるフロアが狭まっていくことになる。そのような事態を避けるため専用の取扱い施設の早期建設が望まれる。

安全監視室、工作室、車庫等は実験ホールと別棟での建設が計画されている。安全監視体制はニュートリノ実験施設側と共通の監視員で行うこととし、よりユーザーの入れ替え

が頻繁と考えられるハドロン実験施設側に常駐することを計画している。また、管理区域への出入管理も安全監視と同じ人員で行う予定である。管理区域への立入はガラスバッチ（GB：個人線量計）にID素子を組み込み非接触でのID識別により行うが、実験エリアへの立入にこれを採用するかは未定である。J-PARCの一部施設ではGBとは別の非接触IDカードによる立入管理を行う。直ちにこれを使用する予定はないが、ハドロン実験室まで拡張可能なシステムとするように要望している。

ハドロン実験施設の冷凍設備について

ハドロン実験施設の冷凍設備とは、超伝導スペクトロメーター及びその冷凍施設を対象としている。

約2T以上の磁場を必要としたスペクトロメーターの場合、常伝導の電磁石に対して超伝導電磁石は設備に掛ける初期投資が大きい、電力代というrunning costが安いというメリットがある。

ハドロン実験施設においては、現在考えられている超伝導スペクトロメーターを使用した実験としては、2003年6月に開かれた第2回の原子核素粒子実験施設委員会でDAY-1実験と位置付けられたL06(New Generation Spectroscopy of Hadron Many-Body Systems with Strangeness $S=-2$ and -1)がある。この計画の一つとして新実験施設のK1.8ビームラインに、現在のKEK 12GeV-PS 北カウンターホール K6 ビームラインにあるSKS(Superconducting Kaon Spectrometer)を移設して実験に使用しようというものがある。これを新たにK1.8冷凍施設と呼ぶ。

また、その他の計画としては同じく現在のKEK 12GeV-PS 北カウンターホール K5 ビームラインにあるトロイダルスペクトロメーターも移設して実験に使用するという案があるが、まだ具体的な移設の概要については決まっていない。

以下の説明では、ハドロン実験施設の冷凍設備としてはK1.8冷凍施設としてのSKS冷凍設備の移設を対象として紹介する。

SKS 冷凍設備の概要

現在の計画では、現KEK 12GeV-PS 北カウンターホール K6 ビームラインにあるSKS冷凍設備はその主要な部分に大きな変更を加えずそのまま移設することを考えている。

(注：実際のところ、K1.8ビームラインでL06実験で使用するには、散乱粒子のモーメントに対してSKS単独が発生できる磁場は必要なものより小さい。そのためターゲット直後に常伝導4極電磁石と双極電磁石を新設して補完することを計画している。)

SKS 冷凍設備は、浸漬冷却法を採用した扇型をした双極超伝導マグネット、シールド冷却用の小型G-M冷凍機、中型の主冷凍機、主冷凍機用の2段スクリュウ圧縮機、ヘリウムバッファタンク2基、初期冷却用の液化窒素貯槽、全自動制御系から成る。また、現在のSKSは主冷凍機コールドボックスから超伝導マグネットへのトランスファーチューブにバイオネットジョイント機構を持ち、超伝導電磁石がターゲットポイントを中心に回転可能となっているが、この回転可能という機能は移設後も維持するものとする。そのため床面

9.3 実験室概要

の摩擦係数を減じるため、回転範囲の床には現在と同じくリノリウム処理を施す。

下表に現 SKS 冷凍設備の主要なパラメーターを示す。

表 1 Parameters of the SKS magnet

Maximum central field	3 T (注)
Maximum field on conductor	4.5 T (注)
Maximum stored energy	11.2 MJ (注)
Pole size	$1.7 \times (1.2 / 2.3) \text{ m}^2$
Magnet gap	0.5 m
Coil configuration	Sector
Coil cross section	$15 \times 12 \text{ cm}^2$
Conductor	NbTi / Cu
Conductor cross section	$0.3 \times 0.2 \text{ cm}^2$
Conductor Cu/SC ration	10
Maximum ampere turns	2.1 MA (注)
Maximum current	498 A (注)
Maximum inductance	90.3 H (注)
Maximum current density	58 A / mm^2 (注)
Yoke type	H
Total weight	280 tons

注：現在クエンチの可能性無く励磁できる Maximum central filed は約 2.7 T。以下、全ての Maximum とつく項目に関係してくる。

表 2 Main parameters of the cryogenic system

Main refrigerator:			
Type of refrigerator			Claude cycle
Cold box:	Refrigeration power		300 W at 4.5 K (using LN ₂)
			180 W at 4.5 K (without LN ₂)
	Liquefaction rate		100 L/h (using LN ₂) 40 L/h (without LN ₂)
Compressor:	Type		Two-stage screw compressor
	Flow rate		1,400 Nm ³ /h
LN2 storage			10,000 L
G-M cooler:			
	Refrigeration power		6 W at 20 K + 60 W at 80 K
Superconducting dipole magnet:			
	Cooling method		Pool boiling
	LHe capacity		156 L
	Cold mass		4.5 ton (SS, Cu)
	Thermal load (not including transfer lines)		4.0 W (from Jul. 1994)
	Precooling time		50 hours

実際の移設にあたっては、経年劣化が考えられる部分は、新設品に交換し、圧縮機等オーバーホール可能なものは行う予定である。また、地理的に海側砂地という条件から外部

配管及び、外部自動弁、手動弁には塩害対策、防砂対策を施す予定である。さらに制御系に関しては経年劣化が著しいので新規更新する予定である。

冷凍保安則の適用

超伝導電磁石の冷凍設備はヘリウムの液化を行う。これは高圧ガス保安法においては、一般則と冷凍則のどちらかの適用が必要とされる。現 **SKS** 冷凍設備はより保安体制がゆるやかな冷凍則の適用を受けてきた。移設後も冷凍則の適用を受けられるかどうかについては、2003 年 7 月に茨城県庁の担当係官と話し合いを行い、移設後も冷凍則の適用を受けられること、移設の手順（建設、申請、完成検査）は冷凍則に則って行われるべきであることを確認した。

SKS 冷凍設備の配置

K1.8 実験エリア内には超伝導マグネット、主冷凍機コールドボックス、そしてそれをつなぐ回転可能なトランスファーチューブが置かれる。放射線の関係から実験エリアはコンクリートシールドで上、左右がすべて覆われる（トーチカ）予定である。そのため、密閉された空間でのヘリウムガス放出を避けるため、超伝導マグネット、主冷凍機コールドボックスの安全弁、破裂板の放出管はすべてトーチカの外部に導き出される予定である。

また、現在コールドボックスに付随しているブルドン管圧力計等のアナログ機器はトーチカの外部から参照可能とするため、コールドボックスから切り離し実験ホール内トーチカ外部に置く予定である。

デジタル機器については、**SSE(Single Event Effect)**等思いの外、半導体機器が放射線の影響を受けるということが現北カウンターホールでの経験より判明したため、まとめてホール外の新設建屋 (**K1.8** 低温制御室－プレハブ建屋を要求中)に設置することになっている。この対象となるデジタル機器は、現在コールドボックスに付随しているコールドボックス制御盤、現在超伝導マグネットヨークに取り付けている小型冷凍機制御盤、現在ヨーク上の小型冷凍機圧縮ユニット、同じく現在ヨーク上の液面計、クエンチディテクター等の機器、超伝導電磁石電源、また、ガス純度分析系、そして新設する全体制御系である。また、このホール外に低温制御室を設置するということは、低温シフトが例えば条件の厳しい女性でもある一定の期間（例えば 1 日 8 時間、月 20 日、年の 1/3）低温制御室に滞在しても放射線管理の側面から問題が無いということも考慮に入れている。

K1.8 実験エリア内からの配管配線は、ホール床に埋め込まれたピットを通してホール北側に設置される圧縮機室、または上に説明した低温制御室に運ばれる。超伝導電磁石電源ケーブル、小型冷凍機配管等を除いたのは、超伝導電磁石の回転に伴いそれらはフレキシブルな形で配線、配管されなければならないからである。

ホール北側の圧縮機室においては、**SKS** 用の圧縮機だけでなくトロイダル用の圧縮機も配置できるようスペースをとってある。

さらにこのホール北側には、搬入に便利のようにヘリウムバッファタンク 2 基（及びト

9.3 実験室概要

ロイダル用1基分のスペース)、液化窒素貯槽、ヘリウムガス補充用の長尺カードルが配置される。

運転・保安体制

運転体制に関しては、現在の実験メンバーが冷凍シフトを兼ねるという体制ではトラブルに十分に対処できないという問題点、そして実験シフト員への負担も大きいという問題点を抱えている。そのため、建設後に実験が開始したら冷凍シフト員（冷凍則上は冷凍の資格は必要とされない。この場合は運転員ともなる。）はニュートリノ施設超伝導ビームライン冷凍設備と一体化して年間契約で外部委託できないかという案が出ている。（冷凍則では冷凍保安責任者等の管理体制は **K1.8** 冷凍施設、ニュートリノ施設超伝導ビームライン冷凍施設というように施設毎に別個になる。）この案については検討段階でまだ、決定しているわけではない。その案に添った検討事項としては、より規模の大きいニュートリノ施設超伝導ビームライン冷凍設備の低温制御室にリモート制御盤を置きリモートでの **K1.8** 冷凍施設の監視と制御が可能とならなくてはならないだろう。また、建設時及びトラブル時の対応のためにはハドロン実験施設北側の **K1.8** 低温制御室でのローカルな監視、制御機能は必須である。そのためには、制御系に関しても別個のものより、機能や操作性に統一されているものの方が良いという条件が出てくることが予想される。また、これらは何より冷凍則の枠内で実現されなければならない。そのためには、もしこの案を採用するとしたら、対応可能な制御系の選定、操作性に富んだ二元管理可能な制御ソフトの設計、そして運転・保安体制のさらなる検討と茨城県庁との折衝が必要となるであろう。

Appendix

1. 建設スケジュール

我々の実験施設の建設は、非常に限られた予算のなかで行われる。それというのも、J-PARC 計画を第一期と第二期に分割した時に、予算規模が限られた第一期においては主に加速器の建設に集中せざるを得ず、実験装置、実験設備の充実に関しては第二期計画に先送りせざるを得なかったからである。そこで我々は、限られた予算を最大限に生かした建設を行うため、現在の 12GeV-PS のビームチャンネルで用いられている電磁石などを出来る限り再利用することとした。当然、コイルなどの耐放射線性などが問題になる部品については、絶縁材を通常のエポキシ含浸のものからポリイミド含浸あるいはMI ケーブルを用いたものに装換するなどの整備を行い、また冷却水や電流などの即着脱システムの取り付けや、遠隔操作可能な自動調心架台の組み付けなどを行うなど、予想される強烈な放射線環境下でも磁石の運転やメンテナンスを行うための処置を施す。もちろん全く新規に製造する場合に比べると、いくつかの点で見劣りする部分が生ずる事は仕方が無い。しかし既存品を最大限に活用することにより、新規製造の場合に比べて半額から約3分の1の費用で、少なくとも当面は大強度ビームの輸送に十分に使用可能な電磁石群を用意する事が出来る。

既存品を活用し、コストをさげようとする場合に、次の二点を見落としはならない。

- 1, 改造する電磁石は、KEK-PS ビームチャンネルで使用済みであるため、その大部分は放射化している。そのため改造作業は管理区域内で行う放射線作業となる。
- 2, 電磁石の製造（改造、整備）と、放射線作業の双方に精通した技術者、作業者の人数はかなり限られている。

すなわち使用済みの大型電磁石の改造作業は、真のエキスパートによってのみ行う事が可能であり、単に人数を集めるとか、お金を積むことによって実施できるような種類の仕事では無いということである。もちろん我々はこれまで、KEK内外で、放射化した電磁石を改造しうる技術を持った研究者、技術者、作業者の養成に努めてきた。しかしながら実はこのような専門家（エキスパート）はJ-PARC プロジェクト全体で強く求められており、我々が養成したエキスパートが、ハドロン実験施設以外のビームラインの設計や設置を担っているという現実がある。これらの専門家を引き上げて我々の建設に集中する事により、我々の建設ペースを改善する事は可能であるが、逆に多くの現場において設置作業が滞る事になる。よって我々は、やはり限られたマンパワーをやりくりして建設を進めなくてはならないのである。

1 建設スケジュール

さてこのように限られたマンパワーで、使用済みの放射化した磁石を改造、整備しつつ行う原子核素粒子実験施設の設備工事は、一次陽子ビームラインに限っただけでも、スイッチヤード（SY）部への入域と設置作業開始から、ほぼ30ヶ月を要するものと見積もられている。設置する電磁石はSY部で約35台、ハドロン実験施設（HD）部で約12台である。すなわちSY部では10日で1台ペース、HD部では20日で1台ペースでの設置である。もちろんこの計算には磁石本体のみならず、それに付随した冷却水、電力の配管、配線、真空チェンバーやビームモニターの設置、制御形、インターロックシステムの準備などが、「磁石1台あたりに規格化」した形で包含されている。HD側では、標的、ビームダンプ、コリメータ、そして膨大な天井遮蔽体の設置が含まれる事を忘れてはならない（図4）。

またこの30ヶ月という期間は、純粋に東海地区の設置に関わる時間であり、あらかじめ磁石等は設置される形に整備されている事が必須である。そこで我々は、SY部への乗り込み開始に先立つ1年（12ヶ月）間、磁石等の整備をつくば地区で行う予定である。そのためにはSY部への乗り込み開始に先立つ1年前にKEK-PSの運転を停止し、外部ビームラインの解体に着手できる必要がある。建設スケジュールでは、我々は平成20年3月末（平成19年度末）にHDに一次ビームを導き入れる予定である。そのためには平成16年10月にはKEK-PSの運転を停止する必要がある。またSY部への乗り込み開始は平成17年10月の予定である。残念ながら

- 1, 施設部担当による土木・建築工事が遅れ、SY部への乗り込み開始は平成18年1月と見積もられている事。
- 2, K2K実験の都合から、KEK-PSの閉鎖が、早くとも平成17年3月末と見積もられている事。

というような事情で、我々の設備スケジュールは短縮して実施せざるを得ない状況である。すなわち、つくば地区における準備作業は平成17年4月から平成17年末までの9ヶ月間、東海地区における設備作業は平成18年1月から平成20年3月までの27ヶ月間である。この様な事情を勘案して作成した設備工事スケジュールを図1-3に示す。設備のための予算のプロファイルから考えても、土木・建築工事のこの程度の遅れが、許容する限度である。現在すでに、なお悪いことに、

- 3, 施設部担当による土木・建築工事がさらに遅れ、SY部への乗り込み開始は、早くとも平成18年4月となる可能性がある事。
- 4, K2K実験の終了後もいくつかの実験を行う都合から、KEK-PSの閉鎖を、平成17年7月まで延期する可能性がある事。

というような状況が出来しつつあり、我々の作業時間は益々切りつめられようとしている。はっきり言って、つくば地区での準備に9ヶ月、現地での設備に27ヶ月はぎりぎりの線であり、これらのさらなる切りつめをもたらす土木・建築工事の遅延は、単にJ-PARCの完成を遅らせるのみである。

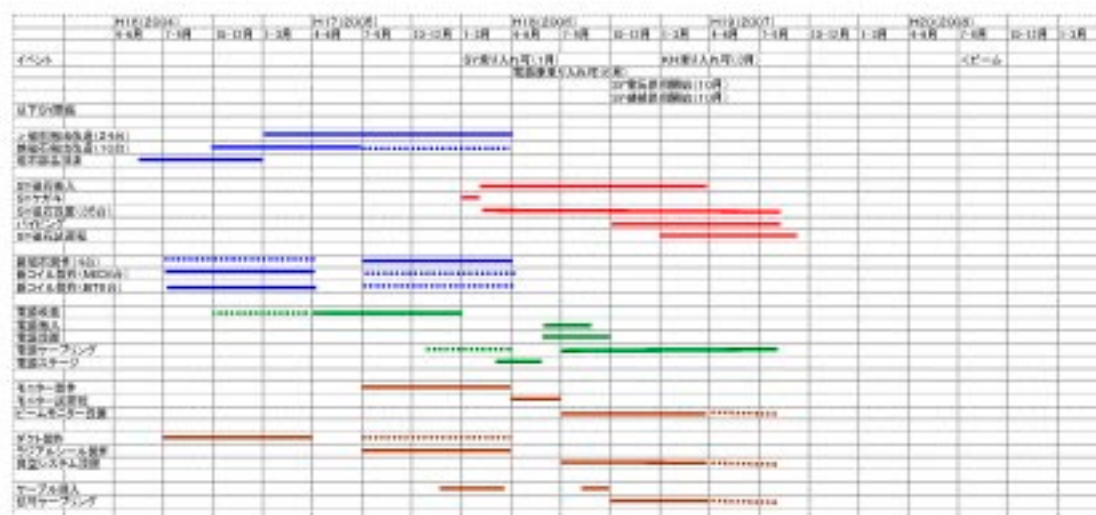


図1 スイッチャード部の機器設置計画

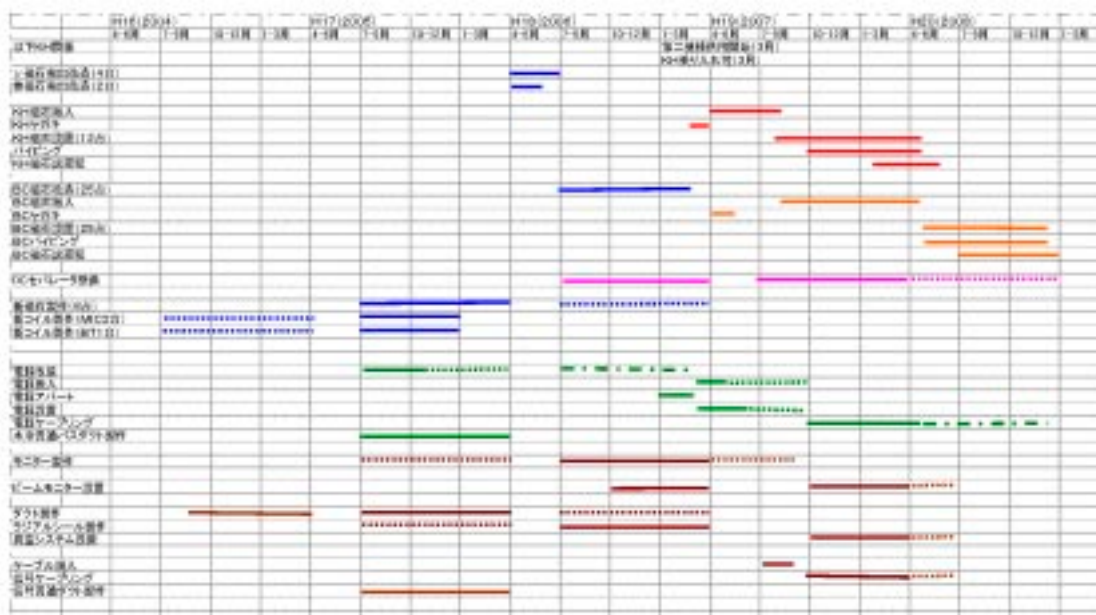


図2 HD ホール部の機器設置計画

1 建設スケジュール



図3 遮蔽体などの設置計画

事前に、新コイル、新架台、真空ダクトなど各パーツは準備できているとして、		
磁石改造項目		
磁石解体	1	
コイル交換または整備	1.5	
真空ダクト交換と固定	1	
温度スイッチ交換と配線	0.5	
鉄芯組立(HV変換を含む)	1	
クレーン吊り具取り付け加工	1	
アライメント板取り付け加工	1	
標準架台上設置	0.5	
冷却水マニホールド位置付け替え	1	
冷却水配管引き回しとクイックコネクター取り付け	1	
電力バスバー引き回しとクイックコネクター取り付け	1	
信号コネクター取り付けと配線	0.5	
試運転(磁場測定含む)	1	
移送準備	1	
つくば地区合計	13	
東海へ輸送	1	
搬入、据り置き	0.5	
架台部設置、アライメント	1	
磁石部設置とアライメント確認	0.5	
水配管と水クイック設置	1	
静水圧試験と水漏れチェック	0.5	
電力配線と電力クイック設置	1	
信号線設置とインターロックボックス設置	0.5	
電源との信号確認と試運転	1	
真空ダクトつなぎ、真空クイック設置、真空試験	1	
周辺遮蔽体設置	1	
ビームモニター組み込みと試験	1	
熱電対モニター設置と試験	1	
東海地区合計	11	
(KHで別途必要な日数)		
チムニー設置と調整	3	
周辺遮蔽体設置	3	
真空ダクトつなぎ、真空クイック設置、真空試験	2	
ビームモニター組み込みと試験	2	
熱電対モニター設置と試験	1	
KH磁石合計	22	

図4 磁石の改造に必要な日数の推定一覧

1 建設スケジュール

2 施設設計目標値

2.1 遮蔽設計の法的要請

大強度陽子加速器施設は、日本原子力研究所東海研究所に建設されるため、施設設計は法及び東海研究所予防規定の値に基づいて行われなければならない、空間線量率等については、東海研予防規定の概ね $1/2$ （事業所境界は $1/20$ ）の値が施設設計目標値として定められている。管理区域等に係る施設設計目標値を表 1 に示す。

本施設の設計においては、法的には管理区域に含まれないが、管理区域に準じて管理する区域（原研では警戒区域、高エネ研では周辺監視区域）を設定することも将来的には可能であるが、遮蔽設計の段階ではそのような区域は設定しないことが申し合わされているため、管理区域境界での設計目標値は、表 1 における事業所内一般区域の設計目標値である $0.25 \mu\text{Sv/h}$ となる。

実際の管理区域境界の線量率評価等においては、Moyer Model、Tesch の式等の簡易計算法を用いるが、 0° 方向等簡易計算法の適応範囲外や、複雑な放射線線源に基づく評価等においては、例えば MAR S コード等のモンテカルロ法を用いることとなっている。

2.2 液体廃棄物に係る設計目標値

各施設として、各施設排水設備出口において法令値（告示第 5 号別表第 1 第六覧にある排液中又は排水中の放射性同位元素毎の 3 ヶ月平均濃度限度）の $1/2$ とする。トリチウムに関しては、 30 Bq/cm^3 である。

2.3 気体廃棄物に係る設計目標値

各施設として、各施設排気口において法令値（告示第 5 号別表第 1 第五覧にある排気中又は空気中の放射性同位元素毎の 3 ヶ月平均濃度限度）の $1/2$ とする。トリチウムに関しては、 $2.5 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^3$ である。

表 1 大強度陽子加速器施設に係る遮蔽設計目標値

区域	設計目標値	法令、予防規定等	備考(KEK名称等)
事業所境界	$50 \mu\text{Sv/年以下}$	$250 \mu\text{Sv/3月以下}$	
事業所内一般区域	$0.25 \mu\text{Sv/h以下}$	$20 \mu\text{Sv/週以下}$	
管理区域境界	$1.3 \mu\text{Sv/h以下}$	1.3mSv/3月	
管理区域Ⅰ	$12.5 \mu\text{Sv/h以下}$	1mSv/週	一般管理区域
管理区域Ⅱ	10mSv/h以下		立入制限管理区域
管理区域Ⅲ	10mSv/h超		立入禁止区域
土壌の放射化	5mSv/h以下		線状損失
	11mSv/以下		点状損失

2 施設設計目標値

参考文献

- [1] 田中万博他、大強度陽子加速器計画ハドロンビームラインサブグループ中間報告書
KEK-Internal 2002-8
- [2] K.L. Brown, D.C. Carey, Ch. Iselin and F. Rothacker: Transport, a Computer
Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems. See yellow
reports CERN 73-16 (1973) & CERN 80-04 (1980).
- [3] K.L. Brown, Ch. Iselin, D.C. Carey: Decay Turtle, CERN 74-2 (1974)
- [4] N.V. Mokhov, 'The Mars Code System User's Guide', Fermilab-FN-628 (1995).
N.V. Mokhov, 'MARS Code Developments, Benchmarking and Applications',
Fermilab-Conf-00-066 (2000).
N.V. Mokhov, S.I. Striganov, A. Van Ginneken, S.G. Mashnik, A.J. Sierk and J.
Ranft 'MARS Code Developments', Fermilab-Conf-98/379 (1998); LANL Report
LA-UR-98-5716 (1998); nucl-th/9812038 v2 16 Dec 1998.
O.E. Krivosheev and N.V. Mokhov, 'A New MARS and its Applications',
Fermilab-Conf-98/43 (1998).
- [5] Methodological Accelerator Design <http://mad.home.cern.ch/mad/>
- [6] "Development of Radiation-Resistant Magnets for High Intensity Beam Lines"
K. H. Tanaka, Y. Yamanoi, M. Takasaki, T. Suzuki and K. Kato KEK Preprint
89-82 (1989).
- [7] 家入正治他 第9回加速器科学研究発表会報告
- [8] 田中万博他 KEK-Preprint 91-27
- [9] 川久保忠道他 KEK Preprint 91-25
- [10] 中川秀利他 Nucl. Inst. Meth. 174 (1980) 401-409
- [11] 神田征夫他 J. Rad. and Nucl. Chem. Vol.247, No 1 (2001) pp.25-31.
神田征夫他 J. Rad. Phys. Chem. Vol.48, No.1, pp.49-54 (1996).