JAERI-Tech
2004-001(第2分冊)

JP0450382

大強度陽子加速器プロジェクト

物質・生命科学実験施設機器技術設計書

2004年3月

物質・生命科学実験施設建設チーム

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは，日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは，日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195　茨城県那珂郡東海村）あて，お申し越しください。なお，このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195　茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行　　日本原子力研究所

目　次

初めに …… 1

1. 物質・生命科学実験施設全体概要 …… 3
1.1 大強度陽子加速器プロジェクト J-PARC 概要 …… 3
1.2 物質・生命科学実験施設の目指すサイエンス …… 3
1.3 物質・生命科学実験施設建設の目的・目標 …… 4
1.4 施設の構成と主要パラメータ …… 4
1.5 中性子源設計と技術課題 …… 4
1.6 陽子ビーム輸送系 …… 7
1.7 ミュオン科学実験施設 …… 8
1.8 建家、施設 …… 8
1.9 分光器、中性子実験装置 …… 8
1.10 建設スケジュール …… 9
1.11 予算計画 …… 9
1.12 体制 …… 10
1.13 安全概念 …… 10
1.14 おわりに …… 11

2. 中性子源 …… 34
2.1 水銀ターゲット …… 34
2.1.1 概要 …… 34
2.1.2 水銀ターゲットの設計条件 …… 38
2.1.3 ターゲット容器の構造設計及び製作指針 …… 40
2.1.4 水銀容器の動的応力解析評価 …… 48
2.1.5 ターゲット容器の静的応力解析評価 …… 63
2.1.6 ターゲット容器の熱流動解析評価 …… 83
2.1.7 ターゲット容器の製作及び課題 …… 93
2.1.8 ターゲット台車の概要と設計条件他 …… 96
2.1.9 ターゲット台車の機器仕様 …… 103
2.1.10 水銀循環設備 …… 183
2.1.11 特許 …… 206
2.2 モデレータ・反射体 …… 208
2.2.1 モデレータ・反射体・反射体プラグの構造 …… 208
2.2.2 結合型モデレータのニュートロニクス設計 …… 223
2.2.3 非結合型モデレータのニュートロニクス設計 …… 236
2.2.4 モデレータ容器の構造強度解析 …… 257

2.2.5 モデレータの熱流動解析 …… 266
2.2.6 反射体容器の構造強度解析 …… 326
2.2.7 反射体の熱流動解析 …… 343
2.2.8 中性子吸収材 …… 360
2.3 極低温水素循環システム …… 369
2.3.1 基本構成 …… 369
2.3.2 全体基本設計 …… 374
2.3.3 主要機器設計 …… 411
2.3.4 非定常時の検討 …… 433
2.3.5 安全設計の考え方 …… 465
2.3.6 今後の検討事項 …… 468
2.4 ターゲットステーション構成機器 …… 472
2.4.1 全体基本概念 …… 472
2.4.2 設計指針及び設計基準 …… 483
2.4.3 構成機器各論 …… 489
2.4.4 機器据付手順と据付精度 …… 679
2.5 陽子ビーム窓 …… 685
2.5.1 陽子ビーム窓の構造概念及び仕様 …… 685
2.5.2 陽子ビームモニター及びアセンブリー …… 713
2.5.3 メインテナンスシナリオ …… 718
2.5.4 今後の課題 …… 719
2.6 リモートハンドリング設備 …… 720
2.6.1 設備の概要 …… 720
2.6.2 ホットセルの概要 …… 720
2.6.3 リモートハンドリング設備取扱対象機器 …… 722
2.6.4 パワーマニピュレータに関する基本仕様 …… 728
2.6.5 マスタースレーブマニピュレータ …… 742
2.6.6 反射体等遠隔操作機器 …… 753
2.7 放射化機器保管設備 …… 760
2.7.1 設計方針 …… 760
2.7.2 保管対象機器の取扱フローダイヤグラム …… 764
2.7.3 水銀ターゲット容器保管設備 …… 768
2.7.4 減速材容器保管設備 …… 776
2.7.5 陽子ビーム窓保管設備 …… 783
2.7.6 反射体保管設備 …… 789
2.7.7 ミュオンターゲット保管設備 …… 796
2.7.8 使用済減速材容器等切断装置 …… 802
2.7.9 ターゲット容器搬出キャスク …… 808

2.7.10 汎用放射化機器保管設備 …… 811
2.7.11 使用済水銀ターゲット容器保管容器 …… 812
2.7.12 ターゲット容器交換台車 …… 818
2.8 放射性排気、排水処理設備 …… 828
2.8.1 放射性気体、放射性液体の生成量評価 …… 828
2.8.2 放射性排気処理設備と排気シナリオ …… 828
2.8.3 放射性排水処理設備と排水シナリオ …… 828
2.8.4 今後の課題 …… 829
2.9 制御系機器 …… 838
2.9.1 基本事項 …… 838
2.9.2 機器仕様 …… 839
2.9.3 今後の課題 …… 842

3. 3GeV 陽子ビーム輸送系施設 …… 849
3.1 施設概要 …… 849
3.2 ビームオプティクス …… 852
3.2.1 設計条件 …… 852
3.2.2 ビームオプティクスの設計 …… 852
3.2.3 ビーム軌道の歪み …… 856
3.2.4 M2 トンネルにおけるビームロス …… 859
3.2.5 機器の配置 …… 861
3.3 電磁石 …… 863
3.3.1 概要 …… 863
3.3.2 磁場の均一度 …… 863
3.3.3 電源の安定性 …… 866
3.3.4 アライメント …… 866
3.4 ビームライン真空 …… 868
3.4.1 真空設計評価 …… 868
3.4.2 3NBT の真空系の設計 …… 871
3.4.3 真空仕切り薄膜 …… 873
3.5 ビームダンプ …… 878
3.5.1 概要 …… 878
3.5.2 設計条件 …… 878
3.5.3 解析計算 …… 879

4. 中性子利用実験装置 …… 883
4.1 プロジェクト提案装置 …… 883
4.1.1 はじめに …… 883

4.1.2 装置群の概要 …… 883
4.1.3 プロジェクト提案装置 …… 884
4.1.4 装置検討の経緯 …… 884
4.2 生体関連物質結晶構造解析用中性子回折計(BIX-P1) …… 892
4.2.1 全体概要 …… 892
4.2.2 研究概要 …… 892
4.2.3 仕様概略 …… 893
4.2.4 装置模式図 …… 894
4.3 多目的高分解能粉末中性子回折装置(Super Sirius Diffractometer) …… 895
4.3.1 全体概要 …… 895
4.3.2 研究内容 …… 895
4.3.3 建設する実験装置の概要 …… 896
4.4 超高分解能粉末中性子回折装置(Super High Resolution Powder Diffractometer) …… 898
4.4.1 全体概要 …… 898
4.4.2 研究内容 …… 898
4.4.3 建設する実験装置の概要 …… 899
4.5 残留応力解析用パルス中性子回折装置 …… 901
4.5.1 全体概要 …… 901
4.5.2 研究内容の概要 …… 901
4.5.3 建設する装置の主な仕様 …… 902
4.6 高強度汎用全散乱装置 …… 905
4.6.1 全体概要 …… 905
4.6.2 研究内容の概要 …… 905
4.6.3 建設する装置の概要 …… 906
4.6.4 建設する実験装置の主な仕様 …… 907
4.7 大強度型中性子小角散乱装置(HI-SANS) …… 908
4.7.1 全体概要 …… 908
4.7.2 研究内容の概要 …… 908
4.7.3 建設する実験装置の主な仕様 …… 910
4.8 高性能試料水平型中性子反射率計 …… 911
4.8.1 全体概要 …… 911
4.8.2 研究概観 …… 911
4.8.3 高性能試料水平型中性子反射率計のスペック …… 913
4.8.4 概念図 …… 913
4.9 高分解能型チョッパー分光器 …… 914
4.9.1 全体概要 …… 914
4.9.2 研究内容の概要 …… 914
4.9.3 建設する実験装置の性能 …… 914

4.9.4 概念図 …… 916
4.10 冷中性子ダブルチョッパー型分光器 …… 917
4.10.1 全体概要 …… 917
4.10.2 研究内容の概要 …… 917
4.10.3 スペック …… 919
4.10.4 概念図 …… 920
4.11 生物用非弾性装置 DYANA(protein DYnamics ANAlysis instrument) …… 921
4.11.1 全体概要 …… 921
4.11.2 研究内容の概要 …… 921
4.11.3 建設する実験装置の概要 …… 922
4.11.4 建設する実験装置の主な仕様 …… 923

5. ミュオン科学実験施設 …… 925
5.1 全体概要 …… 925
5.2 ミュオン標的 …… 927
5.3 ミュオン周辺建家構造・遮蔽体構造 …… 937
5.3.1 ミュオン周辺建家概要 …… 937
5.3.2 M1トンネルとM2トンネル …… 937
5.3.3 実験エリア …… 938
5.4 2次ビームライン …… 940
5.4.1 2次ビームラインオプティクス …… 940
5.4.2 Muon Experimental Port …… 956
5.5 NMライン空冷装置 …… 961
5.5.1 空冷装置 …… 961
5.5.2 電磁石の気中発熱 …… 965
5.6 真空・ピローシール …… 969
5.6.1 基本概要 …… 969
5.6.2 設計方針 …… 969
5.6.3 今後の問題点と課題 …… 975
5.7 制御 …… 976
5.7.1 人への安全系インターロック …… 976
5.7.2 装置等への安全系インターロック …… 977
5.7.3 タイミング信号 …… 978
5.7.4 ネットワーク …… 979
5.8 保守 …… 980

6. 安全性 …… 982
6.1 安全設計指針と設計方針 …… 982

6.2 安全設計評価 …… 982
6.2.1 異常事象の選定 …… 982
6.2.2 異常事象の評価 …… 984
6.3 今後の課題 …… 987

7. 建設工程 …… 990
7.1 概要 …… 990
7.2 建設工程の検討 …… 990
7.3 搬入方法の検討 …… 991
7.4 今後の課題 …… 994

8. 解析評価 …… 1020
8.1 ニュートロニクス（ニュートロニクス、核発熱、放射線損傷） …… 1020
8.1.1 ニュートロニクス計算における加速法 …… 1020
8.1.2 核発熱計算の概要と計算方法、計算条件 …… 1021
8.1.3 核発熱計算 …… 1022
8.1.4 放射線損傷 …… 1032
8.1.5 まとめと今後 …… 1034
8.2 施設遮蔽設計 …… 1035
8.2.1 設計目標線量 …… 1035
8.2.2 3GeV 陽子ビーム輸送ラインに関わる遮蔽設計 …… 1035
8.2.3 ミュオン実験施設の遮蔽設計 …… 1043
8.2.4 中性子実験施設の遮蔽設計 …… 1050
8.2.5 物質・生命科学実験施設建家壁の遮蔽設計 …… 1080
8.2.6 事業所境界での線量評価 …… 1087

9. R＆D …… 1089
9.1 水銀ピッティング …… 1089
9.1.1 はじめに …… 1089
9.1.2 Off-line 実験 …… 1089
9.1.3 On-beam 実験 …… 1100
9.1.4 今後の計画 …… 1101
9.2 水銀流動試験 …… 1110
9.2.1 水銀流動基礎実験装置の概要 …… 1110
9.2.2 管摩擦係数測定試験 …… 1112
9.2.3 熱伝達試験 …… 1114
9.2.4 エロージョン試験及び残留水銀量測定 …… 1126
9.2.5 ギアポンプ特性試験 …… 1144

9.2.6　水銀流動試験まとめ …… 1154

Appendix A 各部の入熱量検討 …… 1155
Appendix B 等温圧力係数と体積膨張係数の変数変換について …… 1169
Appendix C 定常流における低速流の1次元圧縮性流体に関する方程式の開発 …… 1170

Contents

Preface 1

1. Overview of Materials and Life Science Experimental Facility 3
1.1 Overview of High Intensity Proton Accelerator Project J-PARC 3
1.2 Science at Materials and Life Science Experimental Facility 3
1.3 Objects of Construction of Materials and Life Science Experimental Facility 4
1.4 Components and Main Parameter of Materials and Life Science Experimental Facility 4
1.5 Neutron Source Design and its Technical Issues 4
1.6 Proton Beam Transport Line 7
1.7 Muon Experimental Facility 8
1.8 Building 8
1.9 Spectrometers, Neutron Experiment Instruments 8
1.10 Construction Schedule 9
1.11 Budget Plan 9
1.12 Structure 10
1.13 Safety Concept 10
1.14 Summary 11

2. Neutron Source 34
2.1 Mercury Target 34
2.1.1 Outline of the Mercury Target 34
2.1.2 Design Conditions of the Mercury Target 38
2.1.3 Guidelines for Structural Design and Fabrication of the Target Vessel 40
2.1.4 Dynamic Stress Analyses and Evaluations of the Mercury Vessel 48
2.1.5 Static Stress Analyses and Evaluations of the Target Vessel 63
2.1.6 Thermal Hydraulic Analyses and Evaluations of the Target Vessel 83
2.1.7 Fabrication of the Target Vessel and Some Problems 93
2.1.8 Outline of the Target Trolley and Design Conditions 96
2.1.9 Specification of the Target Trolley 103
2.1.10 Mercury Circulation System 183
2.1.11 Patents 206
2.2 Moderator and Reflector 208
2.2.1 Structure of Moderator, Reflector and Reflector Plug 208
2.2.2 Neutronics Design on Coupled Moderator 223
2.2.3 Neutronics Design on Decoupled Moderator 236
2.2.4 Structural Strength Analysis for Moderator Vessel 257

2.2.5 Thermal-hydraulic Analyses of Moderator ····· 266
2.2.6 Structural Strength Analysis for Reflector ····· 326
2.2.7 Thermal-hydraulic Analysis of Reflector ····· 343
2.2.8 Neutron Absorption Materials ····· 360
2.3 Cryogenic Hydrogen Circulation System ····· 369
2.3.1 Outline of the System ····· 369
2.3.2 Preliminary Design ····· 374
2.3.3 Design of Main Components ····· 411
2.3.4 Study of Unsteady Conditions ····· 433
2.3.5 Safety Design Concept ····· 465
2.3.6 Future Investigations ····· 468
2.4 Target Station ····· 472
2.4.1 Concept ····· 472
2.4.2 Design Philosophy and Design Values ····· 483
2.4.3 Components of Target Station ····· 489
2.4.4 Procedure and Design Accuracy with respect to Component Installation ····· 679
2.5 Proton Beam Window ····· 685
2.5.1 Conceptual Design and Specification of Proton Beam Window ····· 685
2.5.2 Proton Beam Monitor and Assembly ····· 713
2.5.3 Maintenance Scenario ····· 718
2.5.4 Future Tasks ····· 719
2.6 Remote Handling System ····· 720
2.6.1 Outline of Remote Handling System ····· 720
2.6.2 Outline of Hot-Cell ····· 720
2.6.3 Components Maintained by Remote Handling ····· 722
2.6.4 Power Manipulator System ····· 728
2.6.5 Master-Slave (M-S) Manipulator ····· 742
2.6.6 Remote Handling in Connection with Moderator-reflector Maintenance ····· 753
2.7 Irradiated Components Storage and Handling Facility ····· 760
2.7.1 Design Principles ····· 760
2.7.2 Storage Components Handling Flow-diagram ····· 764
2.7.3 Mercury Target Vessel Storage Facility ····· 768
2.7.4 Moderator Vessel Storage Facility ····· 776
2.7.5 Proton Beam Window Storage Facility ····· 783
2.7.6 Reflector Assembly Storage Facility ····· 789
2.7.7 Muon Target Storage Facility ····· 796
2.7.8 Spent Moderator Vessel etc. Pipe Cutting Device ····· 802
2.7.9 Mercury Target Vessel Transportation Cask ····· 808

2.7.10 General-purpose Irradiated Components Storage Facility ····· 811
2.7.11 Spent Mercury Target Vessel Storage Container ····· 812
2.7.12 Mercury Target Vessel Exchange Truck ····· 818
2.8 Exhaust System for Radioactive Air and Drain System for Radioactive Water ····· 828
2.8.1 Radioactive Production Estimation in Air and Water ····· 828
2.8.2 Exhaust System for Radioactive Air and Exhaust Scenario ····· 828
2.8.3 Drain System for Radioactive Water and Drain Scenario ····· 828
2.8.4 Remaining Issues ····· 829
2.9 Control System Components ····· 838
2.9.1 Fundamental Condition ····· 838
2.9.2 Specifications ····· 839
2.9.3 Forward Task ····· 842

3. 3-Gev Proton Beam Transport Facility ····· 849
3.1 Outline of Facility ····· 849
3.2 Beam Optics ····· 852
3.2.1 Design Criteria ····· 852
3.2.2 Design of Beam Optics ····· 852
3.2.3 Distortion of Beam Orbit ····· 856
3.2.4 Beam Loss in M2 Tunnel ····· 859
3.2.5 Arrangement of Beam Line Elements ····· 861
3.3 Magnets ····· 863
3.3.1 Outline ····· 863
3.3.2 Uniformity of Magnetic Field ····· 863
3.3.3 Stability of Power Supplies ····· 866
3.3.4 Alignment of Beam Line Elements ····· 866
3.4 Vacuum System of Beam Line ····· 868
3.4.1 Evaluation Method of Vacuum System ····· 868
3.4.2 Design of Vacuum System ····· 871
3.4.3 Thin Film for Separating Vacuum Sections ····· 873
3.5 Beam Dump ····· 878
3.5.1 Outline ····· 878
3.5.2 Design Criteria ····· 878
3.5.3 Numerical Analysis ····· 879

4. Neutron Science Instruments ····· 883
4.1 Instruments Proposed by Project Team ····· 883
4.1.1 Introduction ····· 883

4.1.2 Outline of Instruments ····· 883
4.1.3 10 Instruments Proposed by Project Team ····· 884
4.1.4 Process of Instrument Consideration ····· 884
4.2 Single Crystal Pulsed Neutron Diffractometer
for Biologically Important Materials No.1 (BIX-P1) ····· 892
4.2.1 Outline ····· 892
4.2.2 Contents of Research ····· 892
4.2.3 Specification ····· 893
4.2.4 Schematic Layout of Instrument ····· 894
4.3 Super Sirius Diffractometer ····· 895
4.3.1 Outline ····· 895
4.3.2 Contents of Research ····· 895
4.3.3 Design of Instrument ····· 896
4.4 Super-high-resolution Powder Diffractometer ····· 898
4.4.1 Outline ····· 898
4.4.2 Contents of Research ····· 898
4.4.3 Design of Instrument ····· 899
4.5 Engineering Diffractometer ····· 901
4.5.1 Outline ····· 901
4.5.2 Contents of Research ····· 901
4.5.3 Design of Instrument ····· 902
4.6 High Intensity Total Scattering Diffractometer ····· 905
4.6.1 Outline ····· 905
4.6.2 Contents of Research ····· 905
4.6.3 Design of Instrument ····· 906
4.6.4 Specification ····· 907
4.7 Hi-Intensity SANS (HI-SANS) ····· 908
4.7.1 Outline ····· 908
4.7.2 Contents of Research ····· 908
4.7.3 Design of Instrument ····· 910
4.8 High-performance Neutron Reflectometer with Horizontal Sample Geometry ····· 911
4.8.1 Outline ····· 911
4.8.2 Contents of Research ····· 911
4.8.3 Specification ····· 913
4.8.4 Schematic Layout of Instrument ····· 913
4.9 High resolution Chopper Spectrometer ····· 914
4.9.1 Outline ····· 914
4.9.2 Contents of Research ····· 914

4.9.3 Specification ····· 914
4.9.4 Schematic Layout of Instrument ····· 916
4.10 Cold Neutron Disk-chopper Spectrometer ····· 917
4.10.1 Outline ····· 917
4.10.2 Contents of Research ····· 917
4.10.3 Specification ····· 919
4.10.4 Schematic Layout of Instrument ····· 920
4.11 Protein Dynamics Analysis Instrument: DYANA ····· 921
4.11.1 Outline ····· 921
4.11.2 Contents of Research ····· 921
4.11.3 Design of Instrument ····· 922
4.11.4 Specification ····· 923

5. Muon Science Experiment Facility ····· 925
5.1 General ····· 925
5.2 Muon Production Target ····· 927
5.3 Design of the Building and the Shield around the Muon Facility ····· 937
5.3.1 Overview of the Building around the Muon Facility ····· 937
5.3.2 M1 Tunnel and M2 Tunnel ····· 937
5.3.3 Experimental Area ····· 938
5.4 Secondary Muon Beam Line ····· 940
5.4.1 Beam Optics of the Secondary Line ····· 940
5.4.2 Muon Experimental Port ····· 956
5.5 Air circulation System for the NM Line ····· 961
5.5.1 Design of the Air Circulation System ····· 961
5.5.2 Heat Production in the Air due to Electromagnet ····· 965
5.6 Vacuum and Pillow Seal ····· 969
5.6.1 Outline ····· 969
5.6.2 Design Policy ····· 969
5.6.3 Remaining Issues ····· 975
5.7 Control ····· 976
5.7.1 Safety Interlock for Person ····· 976
5.7.2 Safety Interlock for Machines ····· 977
5.7.3 Timing Signal ····· 978
5.7.4 Network ····· 979
5.8 Maintenance ····· 980

6. Safety ····· 982
6.1 Safety Design Guideline and Design Policy ····· 982
6.2 Safety Design Evaluation ····· 982
6.2.1 Selection of Off-normal Events ····· 982
6.2.2 Evaluation for Off-normal Events ····· 984
6.3 Remaining Issues ····· 987

7. Master plaN of Building Construction and Installation of Target Station Components ····· 990
7.1 Overview ····· 990
7.2 Study for Plan of Building Construction ····· 990
7.3 Study For Install Methods of Components ····· 991
7.4 Remaining Issues ····· 994

8. Neutronics Analyses ····· 1020
8.1 Neutronics Calculation (Neutronics, Nuclear Heating and Radiation Damage) ····· 1020
8.1.1 Acceleration Method for Neutronics Calculation ····· 1020
8.1.2 Outline, Calculation Method and Conditions for Nuclear Heating ····· 1021
8.1.3 Nuclear Heating Calculation ····· 1022
8.1.4 Radiation Damage ····· 1032
8.1.5 Summary and Perspectives ····· 1034
8.2 Shielding Design of Facilities ····· 1035
8.2.1 Policy of Target Design Dose ····· 1035
8.2.2 Shielding Design for 3 GeV Proton Beam Transport Line ····· 1035
8.2.3 Shielding Design for Muon Experiment Facility ····· 1043
8.2.4 Shielding Design for Neutron Experiment Facility ····· 1050
8.2.5 Shield Design of MLF Building ····· 1080
8.2.6 Radiation Dose Evaluation at Site Boundaries ····· 1087

9. R&D ····· 1089
9.1 Pitting Damage in Mercury Target ····· 1089
9.1.1 Introduction ····· 1089
9.1.2 Off-line Tests ····· 1089
9.1.3 On-beam Tests ····· 1100
9.1.4 Summary & Future Plan ····· 1101
9.2 Mercury Circulation Experiments ····· 1110
9.2.1 Outline of Mercury Experimental Facility ····· 1110
9.2.2 Friction Factor Measurement Tests ····· 1112
9.2.3 Heat Transfer Experiments ····· 1114

9.2.4 Erosion Experiments and Remaining Mercury Measurements ····· 1126
9.2.5 Gear Pump Performance Tests ····· 1144
9.2.6 Concluding Remarks ····· 1154

Appendix A Estimation of Heat Input for the Components ····· 1155
Appendix B Parameter Transformation
on the Isothermal Compressibility and the Volume Expansivity ····· 1169
Appendix C Development of One Dimensional Compressible Flow Equation
under a Slow and Steady Flow ····· 1170

著者リスト

1. 物質・生命科学実験施設全体概要	池田　裕二郎
2. 中性子源	
2.1 水銀ターゲット	日野　竜太郎、神永　雅紀、羽賀　勝洋、木下　秀孝、粉川　広行、石倉　修一
2.2 モデレータ・反射体	
2.2.1　モデレータ・反射体・反射体プラグの構造	勅使河原　誠
2.2.2　結合型モデレータのニュートロニクス設計	甲斐　哲也
2.2.3　非結合型モデレータのニュートロニクス設計	原田　正英
2.2.4　モデレータ容器の構造強度解析	粉川　広行
2.2.5　モデレータの熱流動解析	麻生　智一、佐藤　博
2.2.6　反射体容器の構造強度解析	寺奥　拓司、粉川　広行
2.2.7　反射体の熱流動解析	佐藤　博、寺田　敦彦
2.2.8　中性子吸収材	原田　正英
2.3 極低温水素循環システム	
2.3.1　基本構成	麻生　智一
2.3.2　全体基本設計	
2.3.2.1 全体系統図	麻生　智一
2.3.2.2 冷却フロー（PFD）	牛島　勇
2.3.2.3 系統圧力損失	高橋　才雄
2.3.2.4 系統熱負荷	高橋　才雄
2.3.2.5 系統インベントリ	高橋　才雄
2.3.2.6 流量分配	高橋　才雄
2.3.3　主要機器設計	
2.3.3.1 オルソ・パラ変換器	牛島　勇
2.3.3.2 液体水素循環ポンプ	加藤　崇
2.3.3.3 ヘリウム冷凍機	牛島　勇
2.3.3.4 ヘリウム／水素熱交換器	牛島　勇
2.3.4　非定常時の検討	
2.3.4.1 陽子ビーム　オン／オフ時の変動と制御	加藤　崇
2.3.4.2 陽子ビームパルス欠損による温度応答	高橋　才雄
2.3.5　安全設計の考え方	加藤　崇
2.3.6　今後の検討事項	加藤　崇

2.4 ターゲットステーション構造機器
2.4.1 全体基本概念 高田 弘
2.4.2 設計指針及び設計基準 高田 弘、前川 藤夫
2.4.3 構成機器各論
2.4.3.1 ヘリウムベッセル
2.4.3.1.1 機能 本村 士郎
2.4.3.1.2 設計の基本方針 本村 士郎
2.4.3.1.3 設計条件 本村 士郎
2.4.3.1.4 ヘリウムベッセルの構造 寺奥 拓史
2.4.3.1.5 構造検討、強度設計 本村 士郎
2.4.3.1.6 今後の課題 本村 士郎
2.4.3.2 水冷遮蔽体
2.4.3.2.1 機能目的 甲斐 哲也
2.4.3.2.2 仕様 甲斐 哲也
2.4.3.2.3 設計条件 甲斐 哲也
2.4.3.2.4 水冷遮蔽体容器の構造・強度検討 寺奥 拓史
2.4.3.2.5 課題 甲斐 哲也
2.4.3.3 ベッセル窓遠隔操作機器
2.4.3.3.1 機能及び目的 高田 弘
2.4.3.3.2 設計の基本方針 高田 弘
2.4.3.3.3 設計条件 高田 弘
2.4.3.3.4 構造の概念検討 高田 弘、古坂、道弘
2.4.3.3.5 ヘリウムベッセル枝管と角形ダクトのシール性の検討 寺奥 拓史
2.4.3.3.6 今後の課題 高田 弘
2.4.3.4 ヘリウムベッセルサポートシリンダー 吉田 勝彦
2.4.3.5 ライナー機器
2.4.3.5.1 ベースプレート/ボトムライナー 吉田 勝彦
2.4.3.5.2 アウターライナー/中性子ビームダクト 高田 弘、寺奥 拓史
2.4.3.5.3 陽子ビーム入射部ライナー 寺奥 拓史
2.4.3.5.4 ターゲット台車挿入部ライナー 吉田 勝彦
2.4.3.5.5 配管樋 本村 士郎
2.4.3.6 中性子源ステーション遮蔽体
2.4.3.6.1 はじめに 前川 藤夫
2.4.3.6.2 ブロック分割 前川 藤夫、吉田 勝彦
2.4.3.6.3 圧縮量の算出 吉田 勝彦
2.4.3.6.4 地震時における転倒モーメントの検 吉田 勝彦

	討	
2.4.3.6.5	地震時における水平力の検討	吉田　勝彦
2.4.3.6.6	天井遮蔽体の強度検討	吉田　勝彦
2.4.3.7 中性子ビームシャッター		
2.4.3.7.1	シャッター駆動装置選定・架台構造	吉田　勝彦
2.4.3.7.2	シャッター上部遮蔽ブロック	吉田　勝彦、春日井　好巳
2.4.3.7.3	シャッターブロック/ブロック内挿入ダクト	高田　弘、古坂　道弘
2.4.3.7.4	中性子ビームシャッターの制御系概念	高田　弘、古坂　道弘
2.4.3.7.5	配線経路	大橋　祐則
2.4.3.7.6	シャッターキャスク	高田　弘、前川　藤夫
2.4.3.8 空気循環系		
2.4.3.8.1	ステーション内の温度分布評価	寺奥　拓史
2.4.3.8.2	空気循環系ダクト	大竹　秀範
2.4.4	機器据付手順と据付精度	高田　弘
2.5 陽子ビーム窓		明午　伸一郎
2.5.1	陽子ビーム窓の構造概念及び仕様	寺奥　拓司
2.5.2	陽子ビームモニター及びアセンブリー	明午　伸一郎
2.5.3	メインテナンスシナリオ	明午　伸一郎
2.5.4	今後の課題	明午　伸一郎
2.6 リモートハンドリング設備		
2.6.1	設備の概要	木下　秀孝
2.6.2	ホットセルの概要	木下　秀孝
2.6.3	リモートハンドリング設備取扱対象機器	木下　秀孝
2.6.4	パワーマニピュレータに関する基本仕様	木下　秀孝
2.6.5	マスタースレーブマニピュレータ	木下　秀孝
2.6.6	反射体等遠隔操作機器	勅使河原　誠
2.7 放射化機器保管設備		神永　雅紀
2.8 放射性排気、排水処理設備		今野　力
2.9 制御系機器		木下　秀孝
3. 3GeV 陽子ビーム輸送系施設		
3.1 施設概要		坂元　眞一
3.2 ビームオプティクス		明午　伸一郎
3.3 電磁石		藤森　寛、明午　伸一郎、金子　直勝、坂元　眞一
3.4 ビームライン真空		藤森　寛、明午　伸一郎、坂元　眞一

3.5 ビームダンプ	春日井　好巳
4. 中性子利用実験装置	
4.1 プロジェクト提案装置	新井　正敏
4.2 生体関連物質結晶構造解析用中性子回折計(BIX-P1)	田中　伊知朗
4.3 多目的高分解能粉末中性子回折装置(Super Sirius Diffractometer)	神山　崇
4.4 超高分解能粉末中性子回折装置(Super High Resolution Powder Diffractometer)	神山　崇
4.5 残留応力解析用パルス中性子回折装置	盛合　敦
4.6 高強度汎用全散乱装置	大友　李哉
4.7 大強度型中性子小角散乱装置(HI-SANS)	相澤　一也
4.8 高性能試料水平型中性子反射率計	鳥飼　直也
4.9 高分解能型チョッパー分光器	伊藤　晋一
4.10 冷中性子ダブルチョッパー型分光器	中島健次
4.11 生物用非弾性装置 DYANA(protein DYnamics ANAlysis insturument)	柴田薫
5. ミュオン科学実験施設	
5.1 全体概要	三宅　康博
5.2 ミュオン標的	牧村　俊助、三宅　康博
5.3 ミュオン周辺建家構造・遮蔽体構造	西山　樟生、福地　光一、三宅　康博
5.4 2次ビームライン	
5.4.1 2次ビームラインオプティクス	下村　浩一郎
5.4.2 Muon Experimental Port	髭本　亘
5.5 NM ライン空冷装置	
5.5.1 空冷装置	大竹　秀範、明午　伸一郎、三宅　康博
5.5.2 電磁石の気中発熱	明午　伸一郎
5.6 真空・ピローシール	牧村　俊助、佐藤　伸彦、三宅　康博
5.7 制御	髭本　亘
5.8 保守	三宅　康博、牧村　俊助
6. 安全性	今野　力、小林　薫
7. 全体建設工程	高田　弘
8. 解析評価	
8.1 ニュートロニクス（ニュートロニクス、核発熱、放射線損傷）	原田　正英
8.2 施設遮蔽設計	

8.2.1 設計目標線量 今野 力
8.2.2 3GeV陽子ビーム輸送ラインに関わる遮蔽設計 今野 力
8.2.3 ミュオン実験施設の遮蔽設計 河村 成肇
8.2.4 中性子実験施設の遮蔽設計 前川 藤夫、田村 昌也
8.2.5 物質・生命科学実験施設建家壁の遮蔽設計 甲斐 哲也
8.2.6 事業所境界での線量評価 今野 力
9. R&D
9.1 水銀ピッティング 二川 正敏
9.2 水銀流動試験 木下 秀孝
Appendix A 各部の入熱量検討 高橋 才雄
Appendix B 等温圧力係数と体積膨張係数の変数変換について 加藤 崇
Appendix C 定常流における低速流の1次元圧縮性流体に関する方程式の開発 加藤 崇

This is a blank page.

２．５　陽子ビーム窓

陽子ビームラインとヘリウムベッセルとの境界を成立させるために、陽子ビーム窓を設置する。陽子ビーム窓は、陽子ビーム窓本体のみならず陽子ビームモニターを設置するアッセンブリー構造とする。

２．５．１　陽子ビーム窓の構造概念及び仕様

陽子ビーム窓の構造概念を Fig.2.5.1-1 に示す。陽子ビーム窓部は２枚の金属板から成り、陽子ビームライン（真空）及びヘリウムベッセル（ヘリウム雰囲気）との耐圧境界を形成する。このとき、陽子ビームにより金属板に発生する熱を除去するために金属板の間には軽水を流して冷却する。冷却水には系統の圧力損失を考慮した圧力を負荷するため、陽子ビーム窓部の金属板はその圧力に耐え得る厚さを確保する必要がある。しかし、陽子ビームにより金属板が発熱して板厚に比例した熱応力が発生することから、熱応力を低減する観点からは板厚を極力薄くする必要がある。以下にその設計条件を示す。

①陽子ビーム

・出力　　：1 MW

②冷却水

・入口圧力　　：最高 1 MPa
・入口流速　　：最高 3 m/sec
・入口温度　　：313K　(40℃)
・最大温度　　：冷却水沸点以下　(0.5 MPa で約 158℃)

③陽子ビーム窓

・候補材　　：インコネル 718、アルミニウム合金など
・使用温度　　：クリープ温度以下
・窓部板厚　　：3 mm 以下（目標値）
・窓部冷却流路幅　　：5 mm 以下（目標値）
・窓部冷却水流速　　：最大 10 m/s

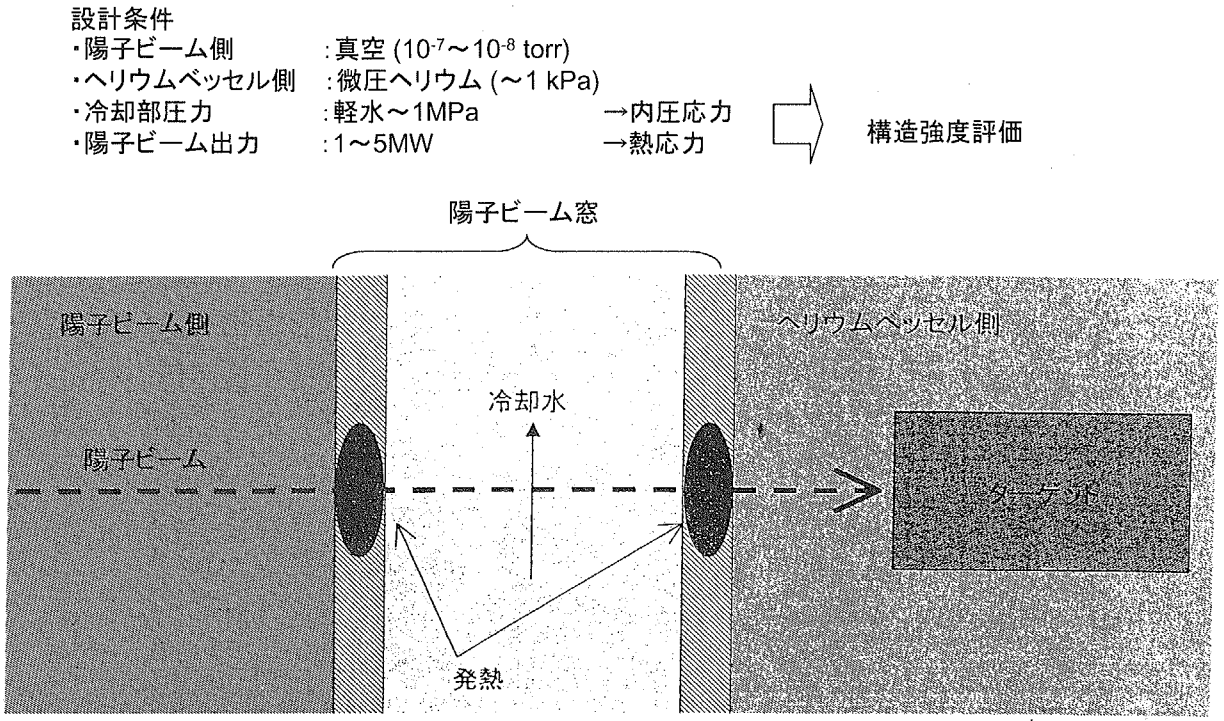


Fig.2.5.1-1 Conceptual design of proton beam window

(1) 構造強度評価基準

陽子ビーム窓で発生する応力と比較する構造強度評価基準は、参考として通産省告示 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」[1]を用いることとする。（添付資料 1-1,2 参照）

内圧による一次応力の評価基準は、以下となる。

(a) $Pm < Sm$

(b) $PL + Pb < 1.5Sm$

ここで、Pm：一次一般膜応力

Sm：設計許容応力

PL：一次局部膜応力

Pb：一次曲げ応力

また、熱膨張による二次応力の評価基準は、以下となる。

$$PL + Pb + Q < 3Sm$$

ここで、Q：二次応力

設計許容応力 Sm をインコネル 718 で 560 MPa [2] (at 425℃)、SUS316 で 115 MPa[1] (at 150℃) 及びアルミニウム合金 5083-O で 91MPa[3] (at 100℃) とし、対象となる応力の種類によって、許容応力を Sm、1.5Sm あるいは 3Sm とする。

(2) 陽子ビーム窓部発熱分布

核発熱密度計算結果[4]を基に、解析で用いる発熱分布の近似式を求める。窓部は材質をインコネル 718 とし、板厚を 1.5 mm とする。陽子ビームを考慮する範囲は、水平方向 300 mm、垂

直方向 120 mm とする。

陽子ビーム分布は現在のところ不明である。そこで、陽子ビームの位相空間上で一様な分布(Uniform 分布)となる場合と、ガウス分布(Gaussian 分布)となる場合の二つのケースを代表して、陽子ビーム窓の発熱分布の計算を NMTC/JAM で行った。RCS に入射するビームは一様に位相空間上にペインティングを行うために、実際の発熱分布は Uniform 分布に近いものとなることが予想される。

Fig.2.5.1-2 に Uniform 分布の水平及び垂直方向の計算値と近似曲線を、Fig.2.5.1-3 に Gaussian 分布の水平及び垂直方向の計算値と近似曲線を比較したものを示す。近似式は核計算値のピーク値を抱絡するように係数を設定した。更に、総発熱量が 1.26 kW （核計算による総発熱量 1.2 kW/908.3 kW*の 1.1 倍）となるように近似式にマージンを加えた。

*) 陽子ビーム出力 1 MW よりも小さい理由は添付資料に示すとおりミュオンターゲットによる減衰を考慮したためである。以下に、その近似式を示し、Fig.2.5.1-4 に分布を示す。

①Uniform 分布

$Q1(x,y)=C1\cdot\{9^3-abs(A1\cdot x^3)-abs(B1\cdot y^3)\}^{15}$　(窓中心(x,y)=(0,0)、単位 W/m^3)

A1=4.3E+5,B1=5.5E+6,C1=3.13E-35

ここで、Q1(x,y)：点(x,y)での Uniform 発熱密度とする。

(最大 270 W/cm^3、総発熱量 1.26 kW/1.5mm、範囲：幅 300 mm×高さ 120 mm)

②Gaussian 分布

$Q2(x,y)=C2\cdot EXP-\{(x/A2)^2+(y/B2)^2\}$　(窓中心(x,y)=(0,0)、単位 W/m^3)

A2=3.99E-2,B2=1.55E-2,C2=4.3016E+8

ここで、Q2(x,y)：点(x,y)での Gaussian 発熱密度とする。

(最大 430W/cm^3、総発熱量 1.26kW/1.5mm、範囲：幅 300 mm×高さ 120 mm)

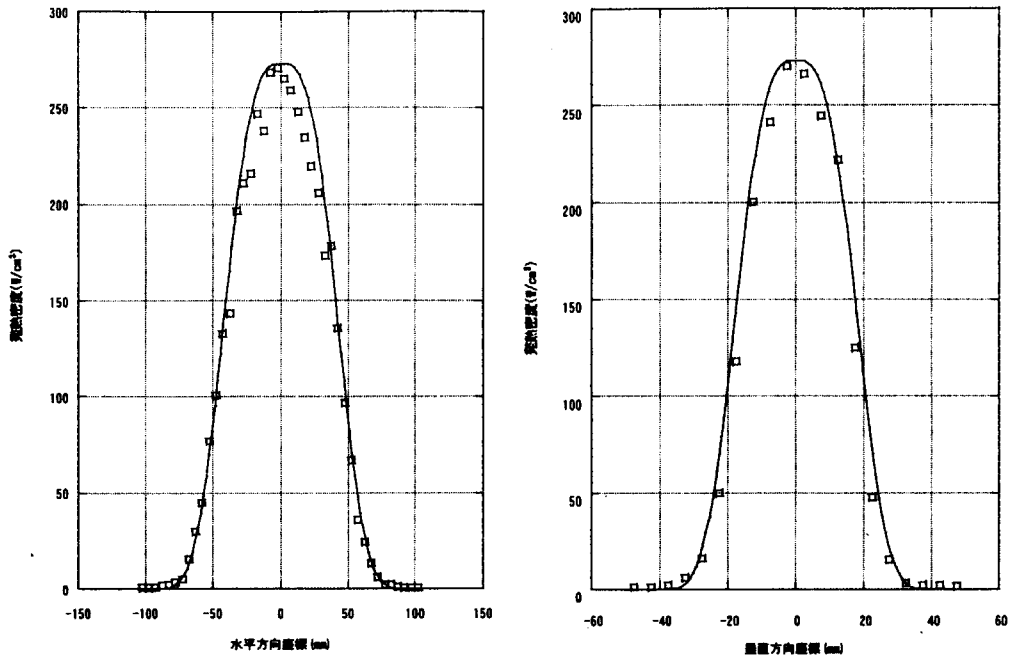


Fig.2.5.1-2 Heat density of PBW (Uniform distribution,Inconel-718,1.5mm thickness)

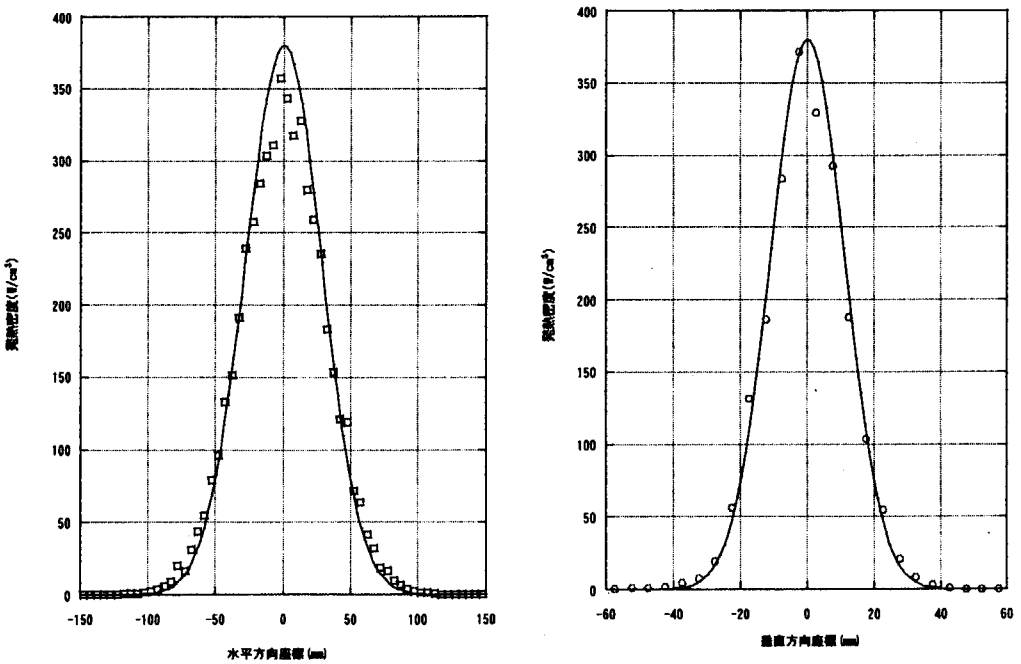


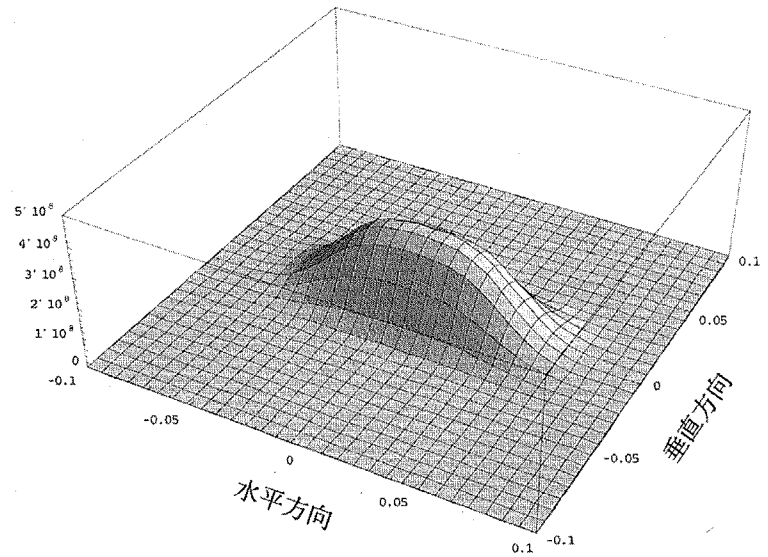
Fig.2.5.1-3 Heat density of PBW (Gaussian distribution,Inconel-718,1.5mm thickness)

・Uniform分布

$Q1(x,y)=C1\cdot\{9^3-abs(A1\cdot x^3)-abs(B1\cdot y^3)\}^{15}$

(窓中心(x,y)=(0,0)、単位W/m³)

A1=4.3E+5,B1=5.5E+6,C1=3.13E-35



・Gaussian分布

$Q2(x,y)=C2\cdot EXP-\{(x/A2)^2+(y/B2)^2\}$

(窓中心(x,y)=(0,0)、単位W/m³)

A2=3.99E-2,B2=1.55E-2,C2=4.3016E+8

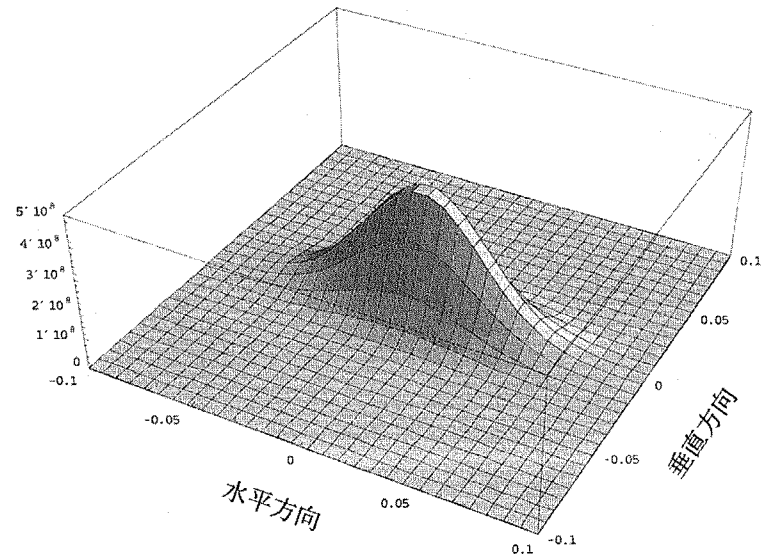


Fig.2.5.1-4 Heat density by proton beam

(3) 窓部形状の検討

陽子ビーム窓形状を平板型構造とした場合、窓部板厚を 1.5 mm、冷却水圧力を 0.6 MPa とした結果から発生応力は許容応力値を超えると考えられため、平板型構造では強度的に成立が困難である。そこで、変位量及び応力的に有利である曲面型に対して検討を行った。軽水により冷却する場合の陽子ビーム窓の最小板厚を評価し、構造強度的に成立する陽子ビーム窓構造を検討した。

(a) 冷却水圧力による応力評価

陽子ビーム窓の形状は、幅 360 mm×高さ 220 mm とし、曲率 R150 の円筒形とする。Fig.2.5.1-5 に示す 3 次元ソリッドモデル（要素数：5.7 万メッシュ）により窓部板厚及び圧力をパラメータとして発生応力を計算し、陽子ビーム窓の候補材であるインコネル 718、SUS316 及びアルミ合金 A5083-O の許容応力値と比較する。板厚を 1.5 mm、圧力を 1 MPa とした場合の変位量及び発生応力をターゲット側から見たもの及びビームライン側から見たものを各々Fig.2.5.1-6, 7 に示す。最大変位はターゲット側窓部中央で生じ 0.23 mm となっている。最大発生応力はビームライン側の窓部とプレナム部の付け根部で生じ 109 MPa となり、窓中央部では 101 MPa となっている。窓周辺部ではR加工により応力集中が緩和されるため、窓中央部の膜応力の方が許容応力値に対して裕度が小さくなっている。このことから中央部の膜応力に注目して強度的に満足する窓部の最小板厚を評価する。Fig.2.5.1-7 に窓部板厚の冷却水圧力に対する Mises 相当応力を示す。冷却水圧力を 1 MPa とした場合、インコネル 718 では板厚 0.3 mm で成立し、SUS316 では 1.5 mm、アルミニウム合金では 3 mm とすることによって成立すると考えられる。陽子ビーム損失の観点から板厚を最も薄くできるインコネル 718 が有力候補材となるが、一般的な加工精度を考慮すると窓部板厚を 1.5 mm とする必要がある。実際に PSI の SINQ ではアルミニウム合金をビーム窓に用いており、長期間問題なく運転した実績があるので、アルミニウム合金を窓に用いる場合の検討を行うことは十分に値する。

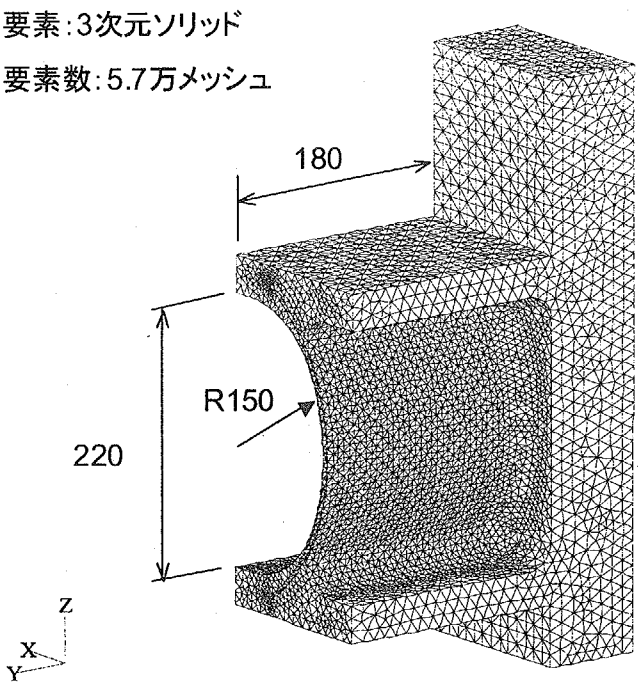


Fig.2.5.1-5 Analytical model of PBW for internal pressure

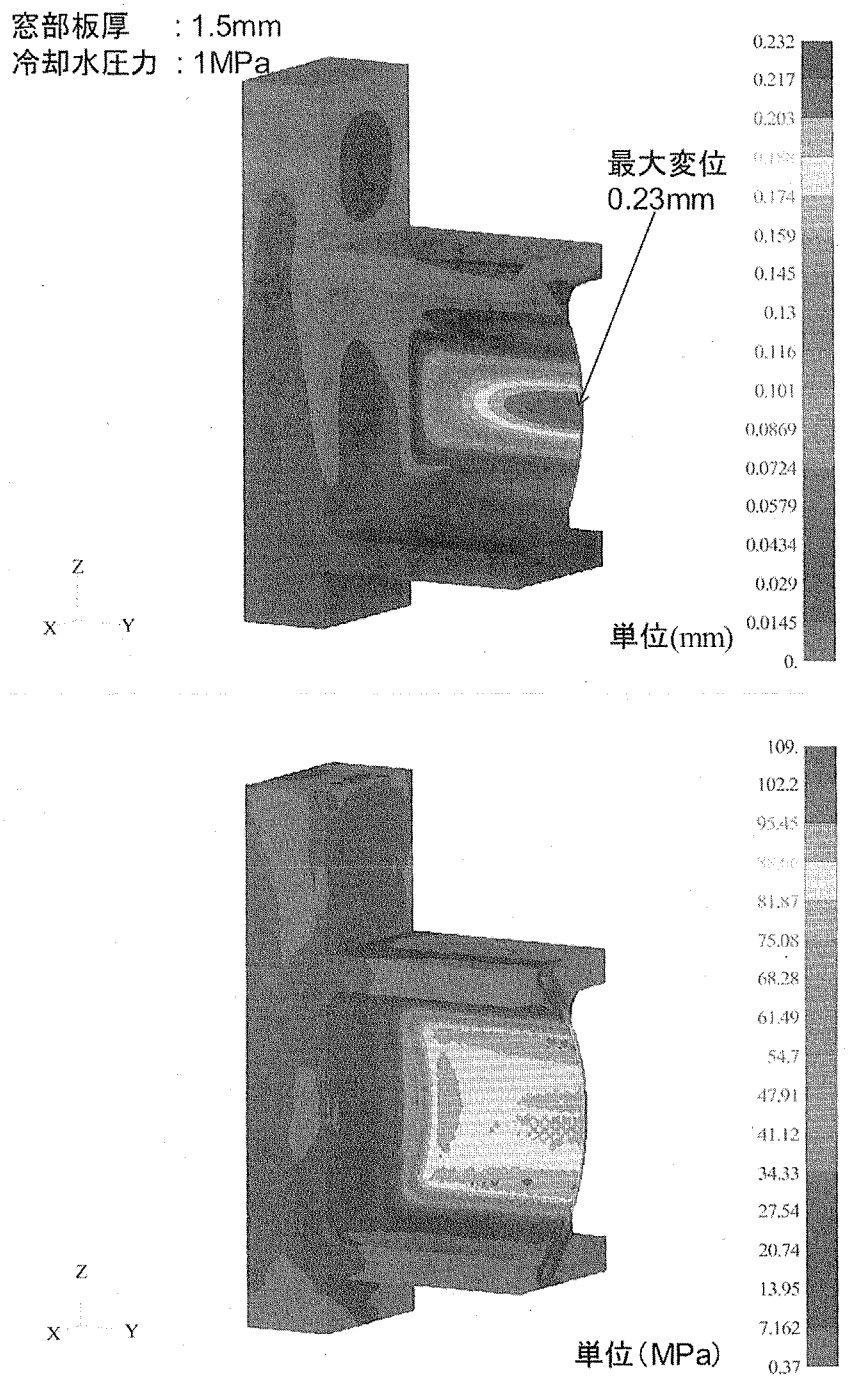


Fig.2.5.1-6 Analytical results of displacement and stress distribution (View from target)

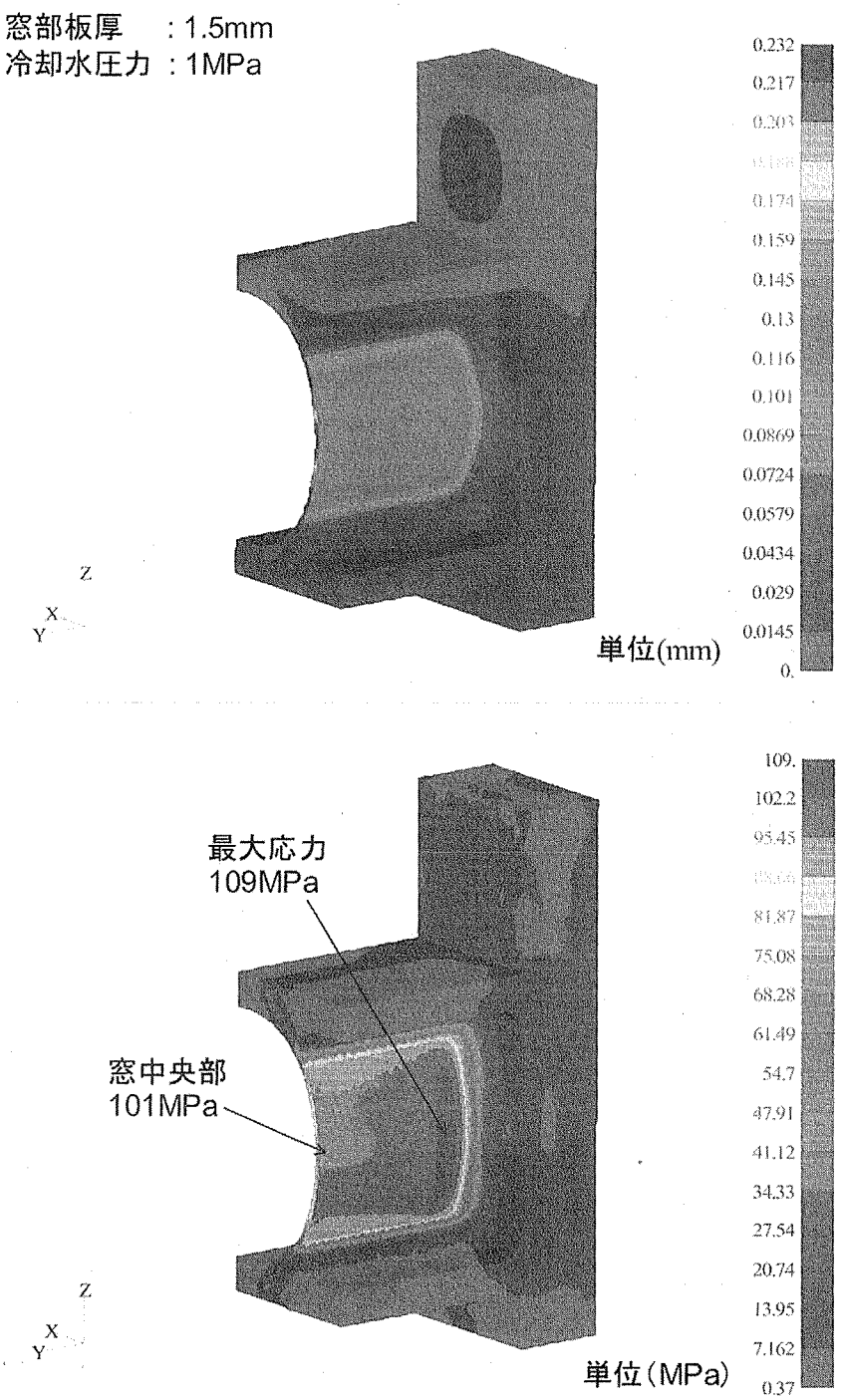


Fig.2.5.1-7 Analytical results of displacement and stress distribution (View from upstream)

(b) 熱応力の予備解析

次項では熱流動解析で得られた窓部での水側熱伝達率を用いて温度分布を求め、熱応力解析を実施するが、ここではその予備解析として、手計算による水側熱伝達率を用いて、陽子ビーム発熱を考慮した温度分布解析及び熱応力解析を実施する。冷却水の窓部流速を 1m/sec とした場合の水側熱伝達率を Dittus-Boelter の式で求めた値 2×10^4 W/m^{2}K とし、陽子ビーム出力 1MW の窓部発熱密度を矩形一様分布（210 W/cm^3）、Gaussian 分布及び Uniform 分布として温度分布及び熱応力解析を実施した。

Fig.2.5.1-8 に発熱分布を Uniform 分布とした場合の温度分布を示し、Fig.2.5.1-9 にその時の熱応力を示す。この結果から最高温度は 86℃となり、最大熱応力は 57 MPa となっている。Fig.2.5.1-10 に発熱分布を Gaussian 分布とした場合の温度分布を示し、Fig.2.5.1-11 にその時の熱応力を示す。この結果から最高温度は同様の個所で 108℃となり、最大熱応力は 80 MPa となっている。

以上より、熱応力的に厳しいのは発熱密度を Gaussian 分布とした場合であるが、窓部発熱による最大熱応力は 100 MPa 以下であり、許容応力値 1680 MPa（3Sm）を十分満足することがわかった。

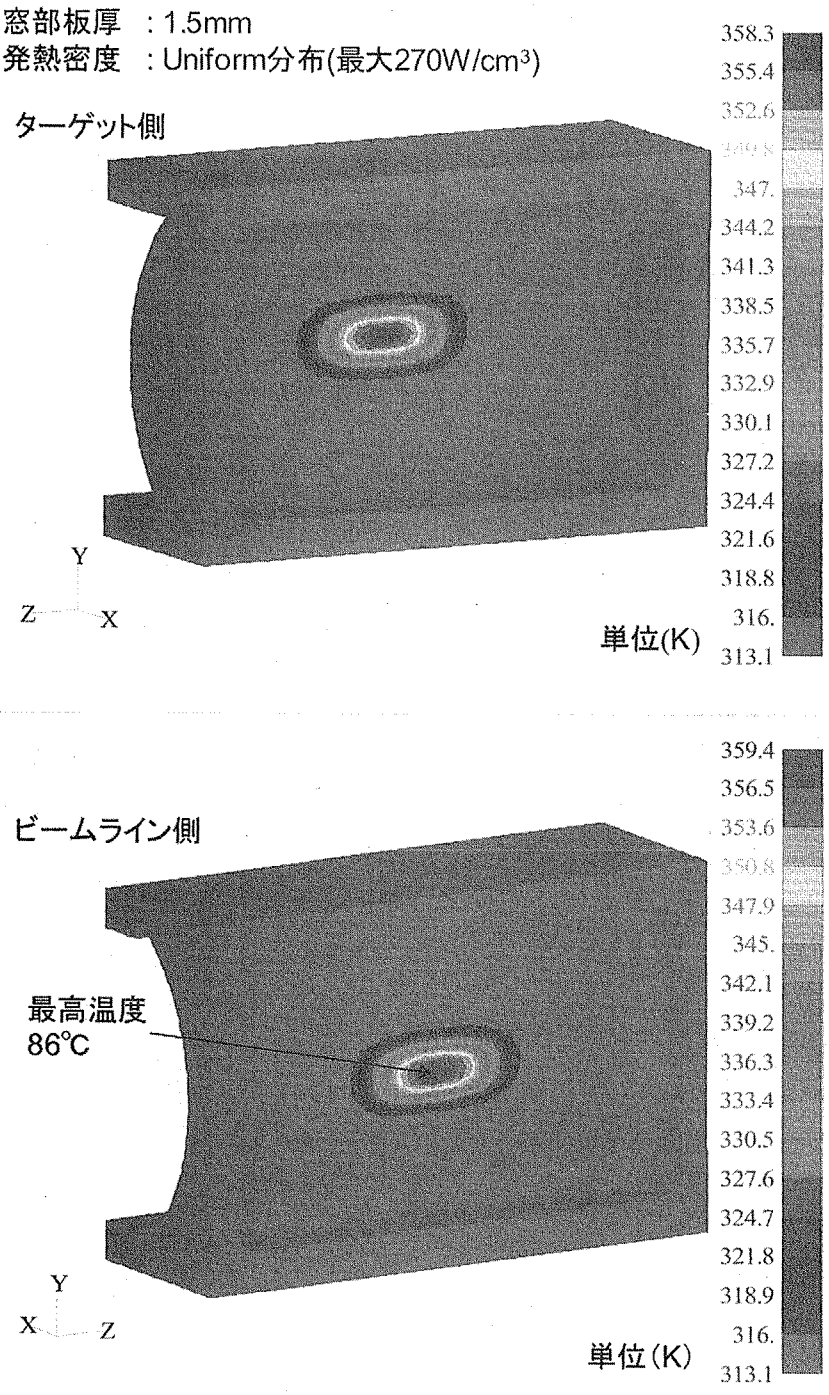


Fig.2.5.1-8 Analytical results of temperature distribution (Uniform distribution in phase space)

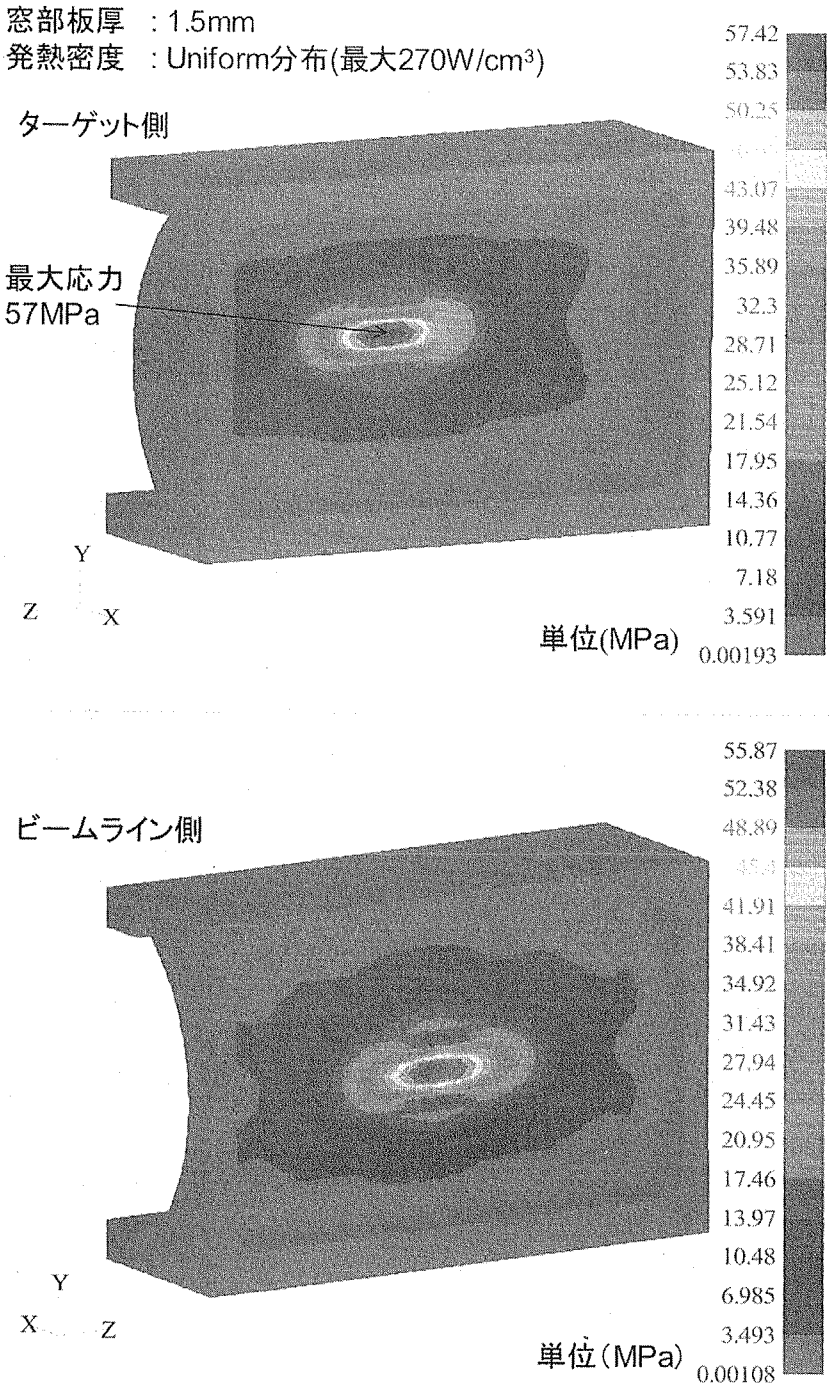


Fig.2.5.1-9 Analytical results of thermal stress distribution (Uniform distribution in phase space)

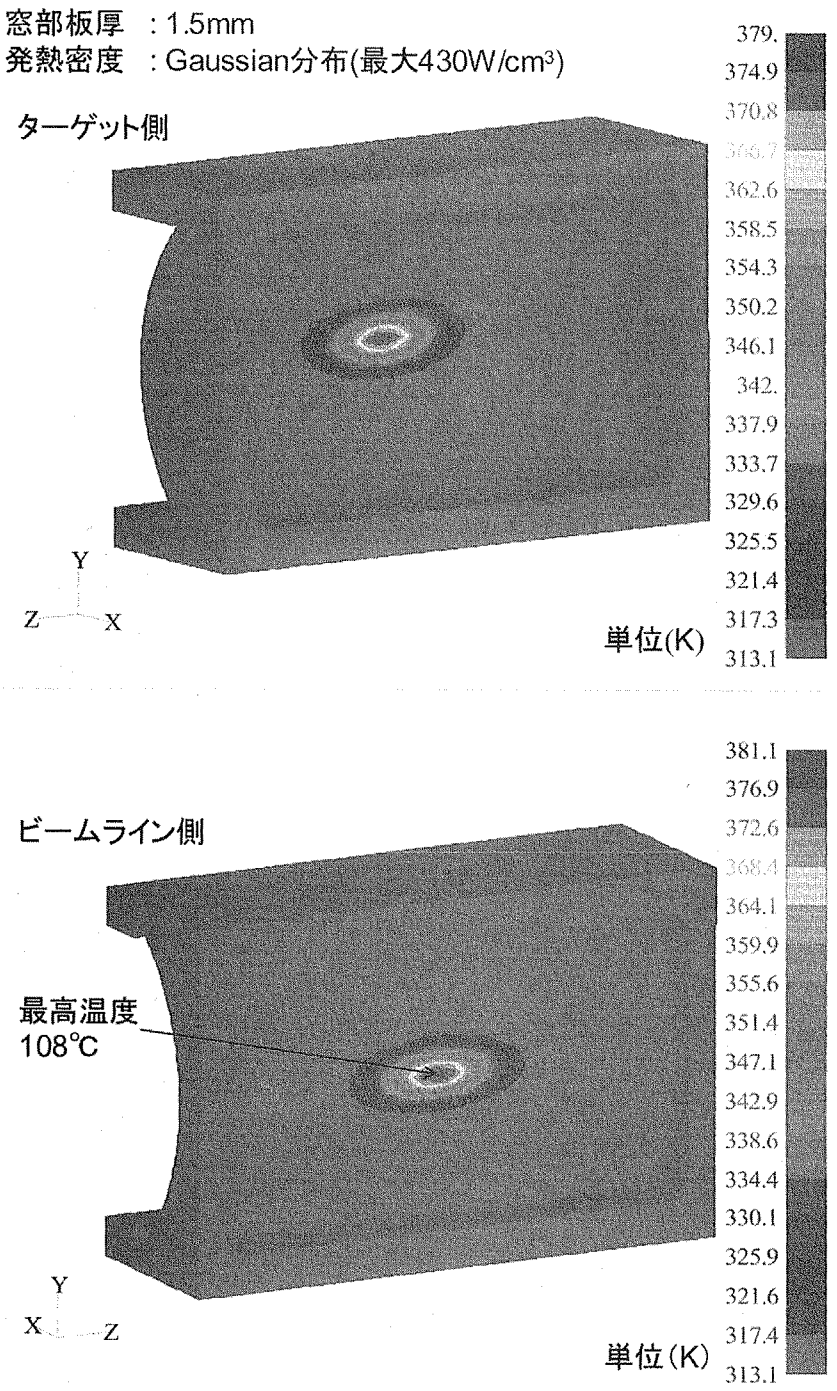


Fig.2.5.1-10 Analytical results of temperature distribution (Gaussian distribution in phase space)

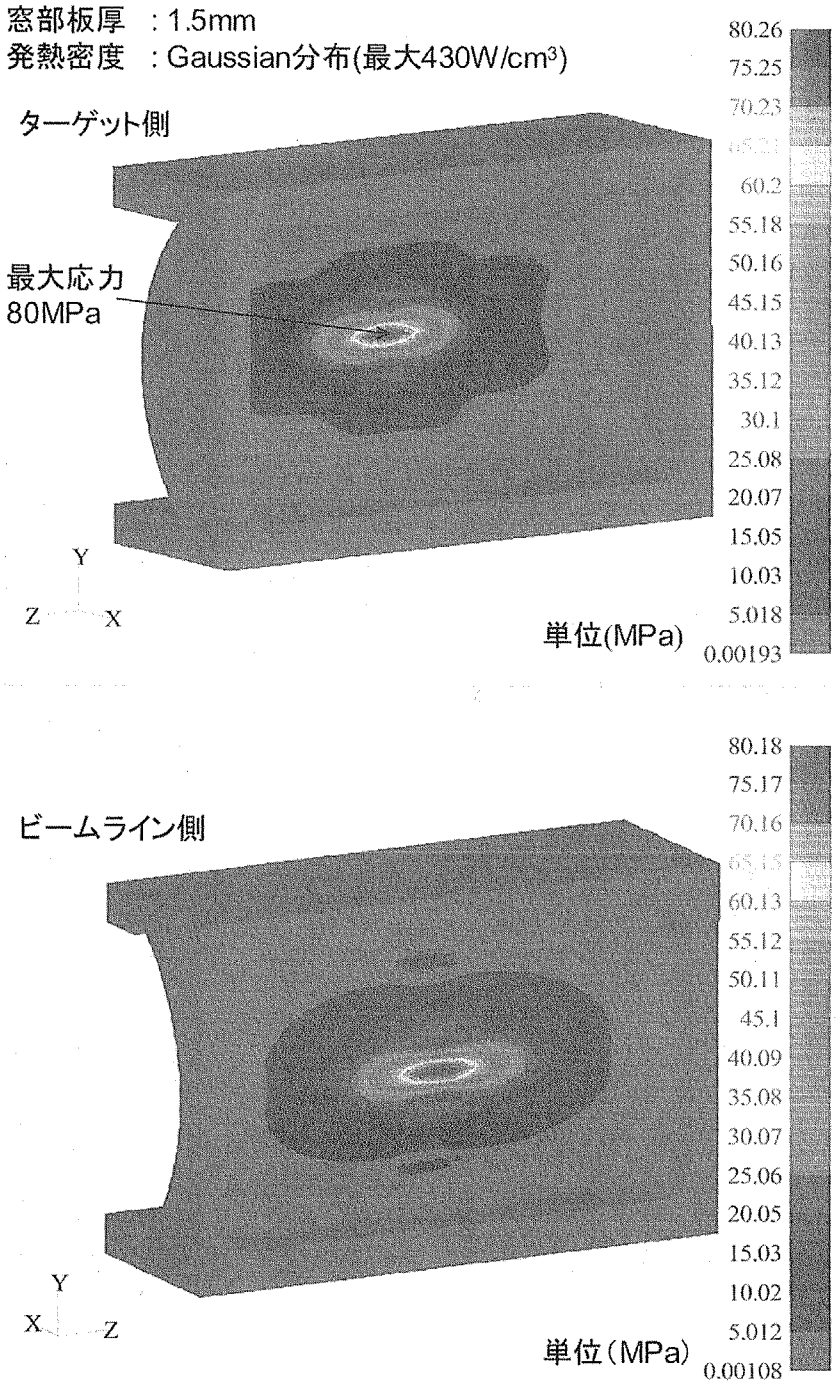


Fig.2.5.1-11 Analytical results of thermal stress distribution (Gaussian distribution in phase space)

(c) 熱流動及び熱応力評価

窓部板厚を1.5 mm、流路幅を3 mm、ビーム窓の大きさを幅360 mm×高さ220 mm、曲率をR150 mmとし、陽子ビーム発熱分布をUniform及びGaussian分布とした場合の熱流動解析を実施する。解析コードはSTAR-CDを用い、陽子ビーム窓を3次元ソリッド要素（要素数：74万メッシュ）でモデル化した。冷却材を軽水とし、入口配管流速1.0 m/sec (4.8 m^3/h)、入口温度40℃とする。容器外側の境界条件は断熱、乱流モデルは標準k-εモデルである。計算に用いたモデルをFig.2.5.1-12に示す。ビームをUniform分布とした場合の速度分布及び温度分布の解析結果をFig.2.5.1-13及び14にそれぞれ示す。ビーム窓部で約1.2 m/secの流速となり、流量配分の偏差はほぼ無く、均一な速度分布が得られている。また、ビーム窓部の冷却水に接する壁面の最高温度が94℃であり、冷却水圧力0.5 MPaでの沸点150℃よりも十分低く沸騰することなく窓部を均一に冷却できると考えられる。Fig.2.5.1-15に示すように、最大熱応力はターゲット側の陽子ビーム窓中央部で発生し、Uniform分布で107 MPa、Gaussian分布で153 MPaとなった。この熱応力は許容応力値1680 MPa（3Sm）を十分満足している。

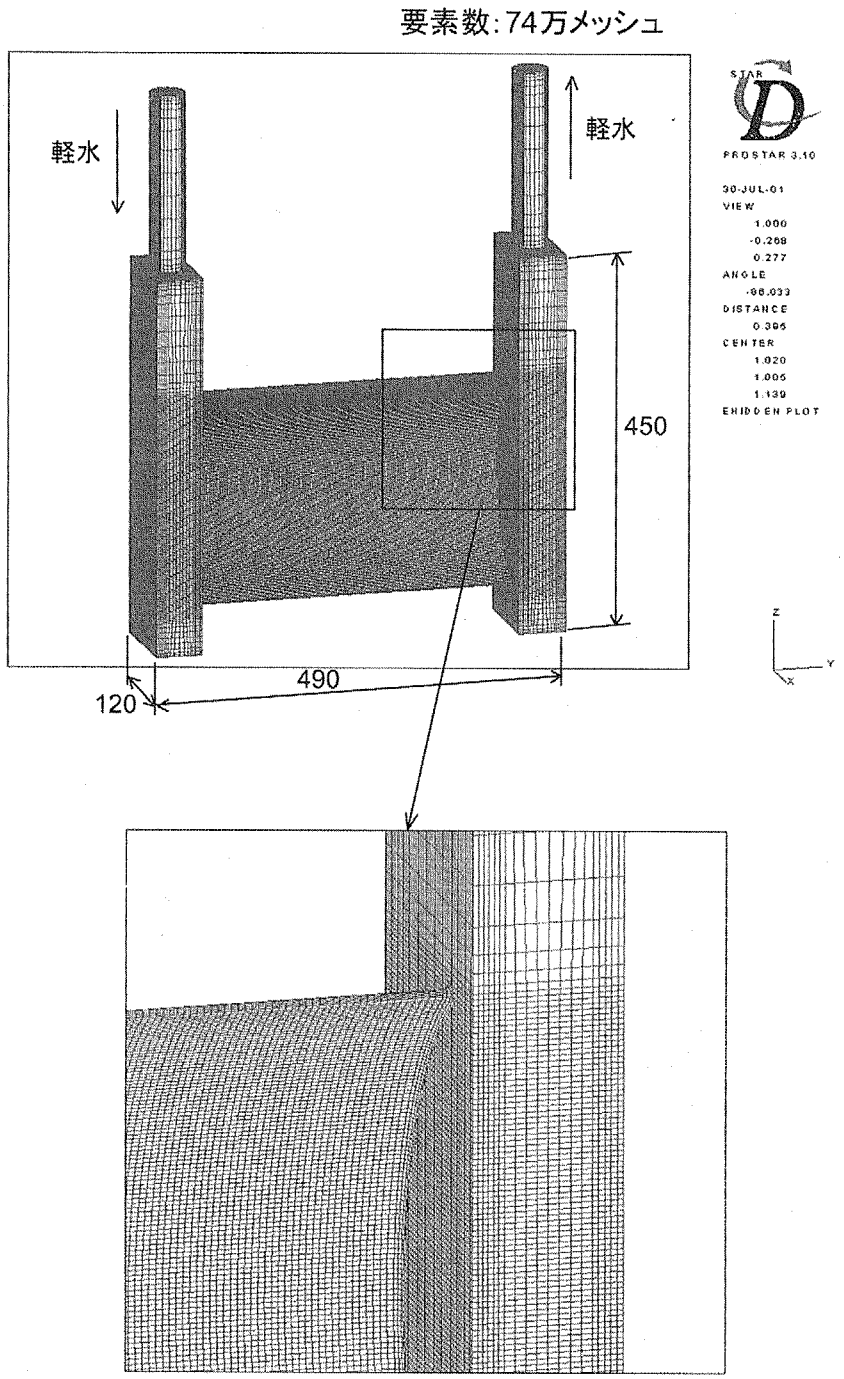


Fig.2.5.1-12　3 dimensional model for thermal-hydraulic analyses

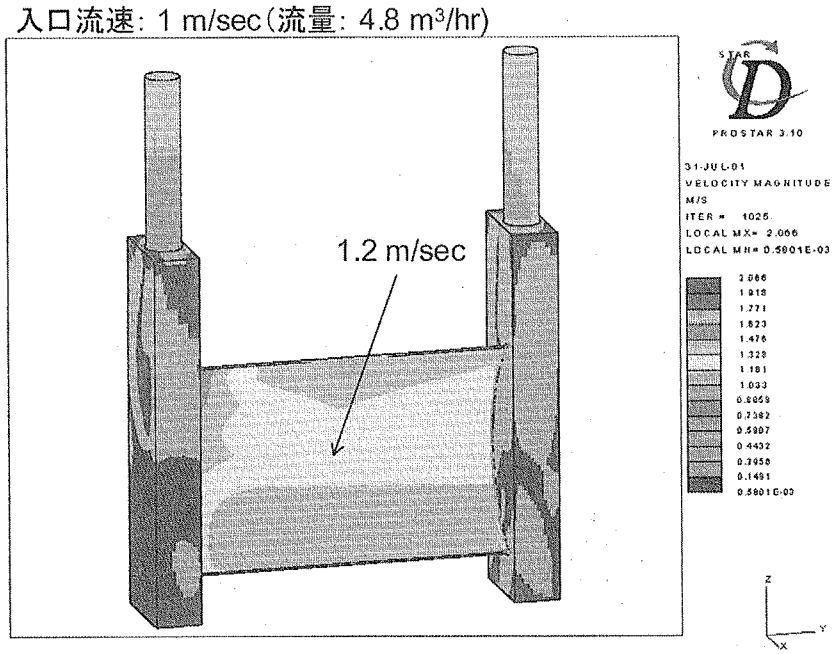
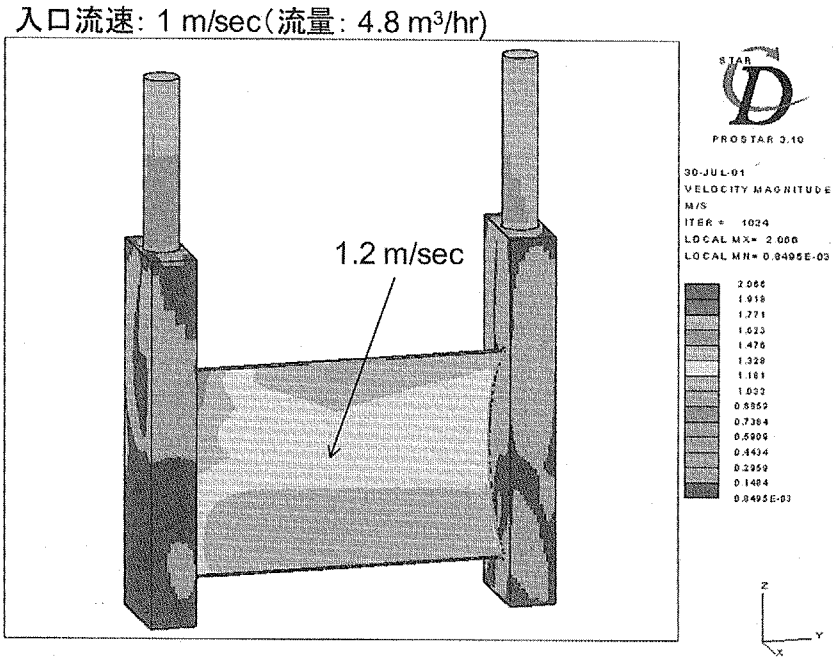
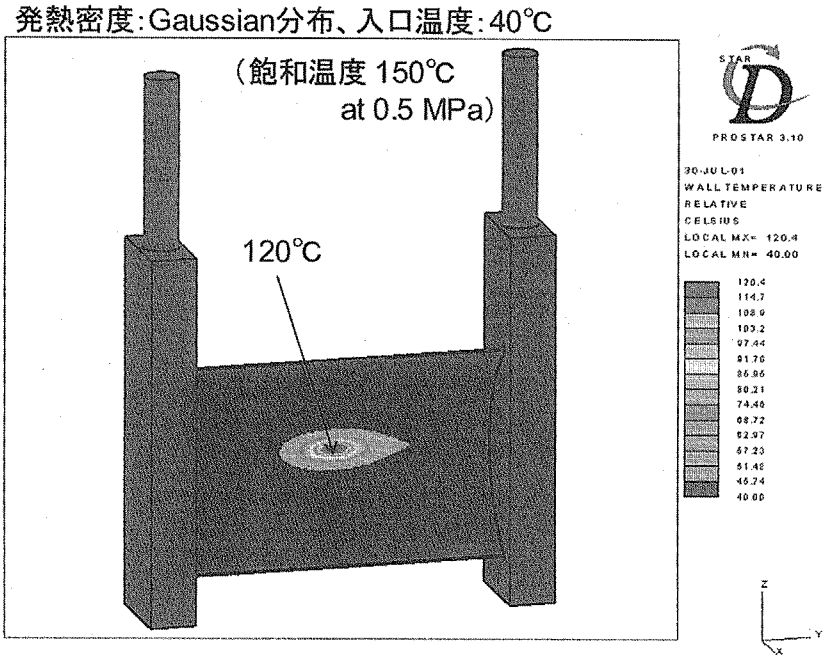


Fig.2.5.1-13 Thermal-hydraulic analytical results of velocity and temperature distribution (Uniform distribution in phase space)



曲面型モデル流速分布(流路幅3mm)



曲面型モデル壁温分布(流路幅3mm)

Fig.2.5.1-14 Thermal-hydraulic analytical results of velocity and temperature distribution (Gaussian distribution in phase space)

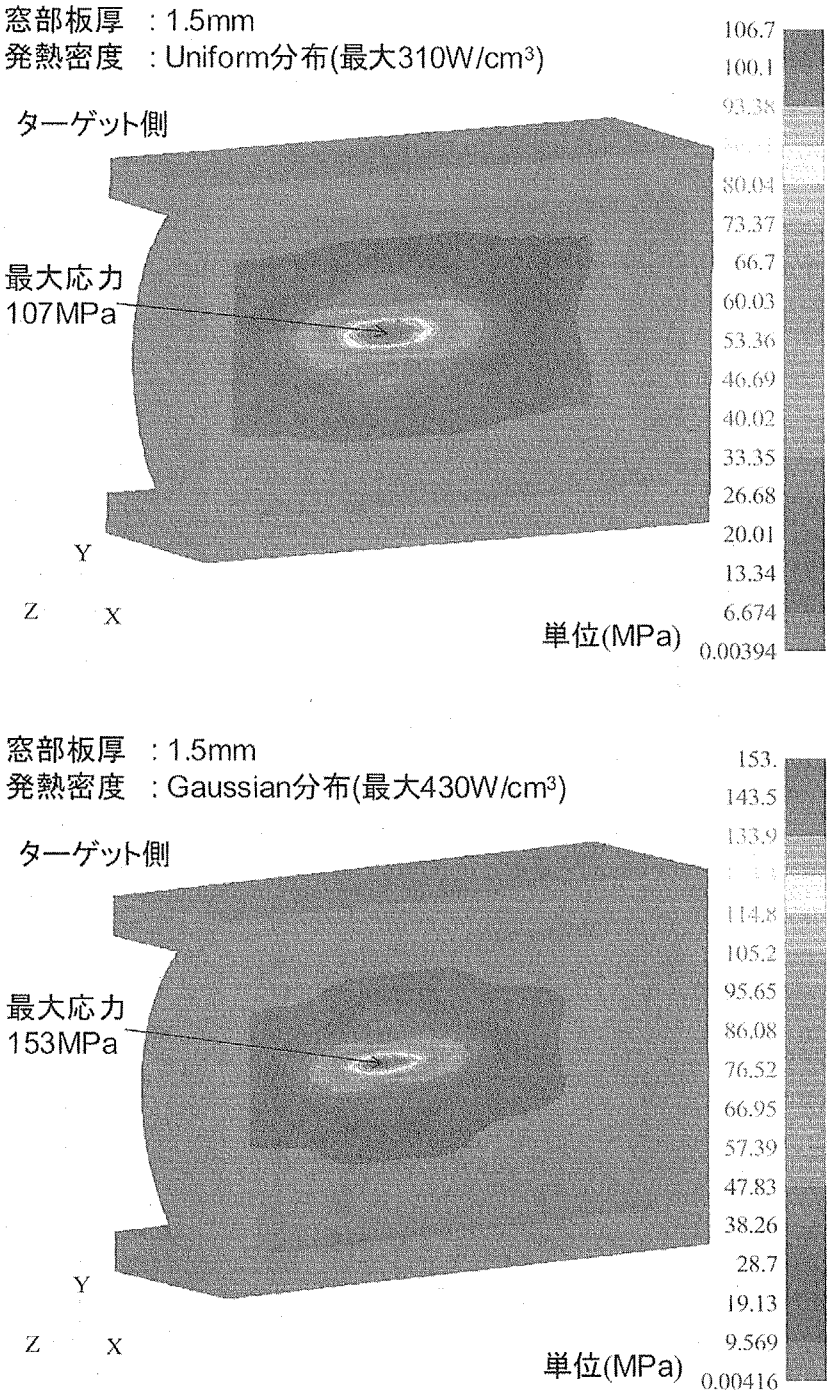


Fig.2.5.1-15 Analytical results of thermal stress (above: Uniform, below: Gaussian distribution)

(d) まとめ

以上より、3 次元熱流動解析結果から、陽子ビーム窓部では均一な流動が得られ、冷却水が沸騰せずに冷却することが可能であることを確認した。また、熱応力解析結果から、構造強度的にも問題ないことが分かった。

(4) 冷却系圧力損失の評価

陽子ビーム窓冷却系全体の圧力損失を計算する。圧力損失は冷却系配管部、陽子ビーム窓本体部及びポンプと本体のヘッド差圧の合計とする。計算結果を Table 2.5.1-1 に示す。配管径を 41.2 mm（1.5B×Sch40 内径）、配管長さを 200 m とし、ポンプと本体のヘッド差を 30 m、エルボの数を 50 個としエルボ部の形状損失係数を安全側に 1.0 とした。ケース 1 では、配管内流速を 1 m/sec とし、ケース 2 では 2 m/s とする。圧力損失は流速が 2 m/s でも 0.6 MPa 程度であることから、陽子ビーム窓の冷却水圧力を 1 MPa と設定する。

Table 2.5.1-1 Pressure drop of PBW

			case01 注3	case02
軽水物性値				
密度	ρ	kg/m^3	996.5	996.5
粘性係数	μ	Ns/m^2	8.65E-04	8.65E-04
動粘性係数	$\nu(=\mu/\rho)$	m^2/s	8.68E-07	8.68E-07
重力加速度	g	m/s^2	9.80665	9.80665
入力値				
配管径(1.5BXSch40)	Di	m	4.12E-02	4.12E-02
管内流速	v	m/s	1	2
配管長さ	L	m	200	200
エルボの数 注1	n	-	50	50
急縮小の数	n1	-	3	3
急拡大の数	n2	-	3	3
圧力損失係数の計算				
n1*0.5			1.5	1.5
n2*1.0			3	3
n*1.0			50	50
形状損失係数(n1*0.5+n2*1.0+n*1.0)			54.5	54.5
Re(=vDi/ν)			4.75E+04	9.49E+04
λ(Re<10^5 or Re>10^5) 注2			0.0214	0.0180
摩擦損失係数(λL/Di)			104.06	87.50
係数合計			158.56	142.00
$\rho v^2/2g$		kg/m^2	50.81	203.23
冷却系配管部圧力損失		MPa	0.079	0.283
陽子ビーム窓本体部圧力損失		MPa	0.010	0.010
ポンプと本体のヘッド差圧		MPa	0.300	0.300
圧力損失合計		MPa	0.389	0.593

注1)エルボ部の形状損失係数は安全側に1.0(/1ヶ所)とした。

注2)管摩擦係数λの算出式は以下とした。

Re<10^5 $\lambda=0.3164/Re^{1/4}$ (ブラジウスの式)

Re>10^5 $\lambda=0.0032+0.221Re^{-0.237}$ (ニクラッチェの式)

注3)計算内容は、case01をリファレンスとし、case02で黒枠の数値を変えた。

(5) 曲率と板厚の関係

陽子ビーム窓部を円筒形とする場合、陽子ビームにより照射される窓部は中心部と周辺部では板厚が異なるため、この板厚の差を計算した。Fig.2.5.1-16 に、板厚を 1.5 mm、曲率を 150 mm、200 mm 及び 250 mm とした場合の板厚変化を示す。曲率を 150 mm とすると、中心部板厚との差は、陽子ビーム中心から 25 mm のところで 2%、55 mm のところで 8%程度である。陽子ビーム損失の観点から、板厚の違いが 10%程度であれば影響は少ないと考えられ、陽子ビーム窓の曲率は R150 mm とする。

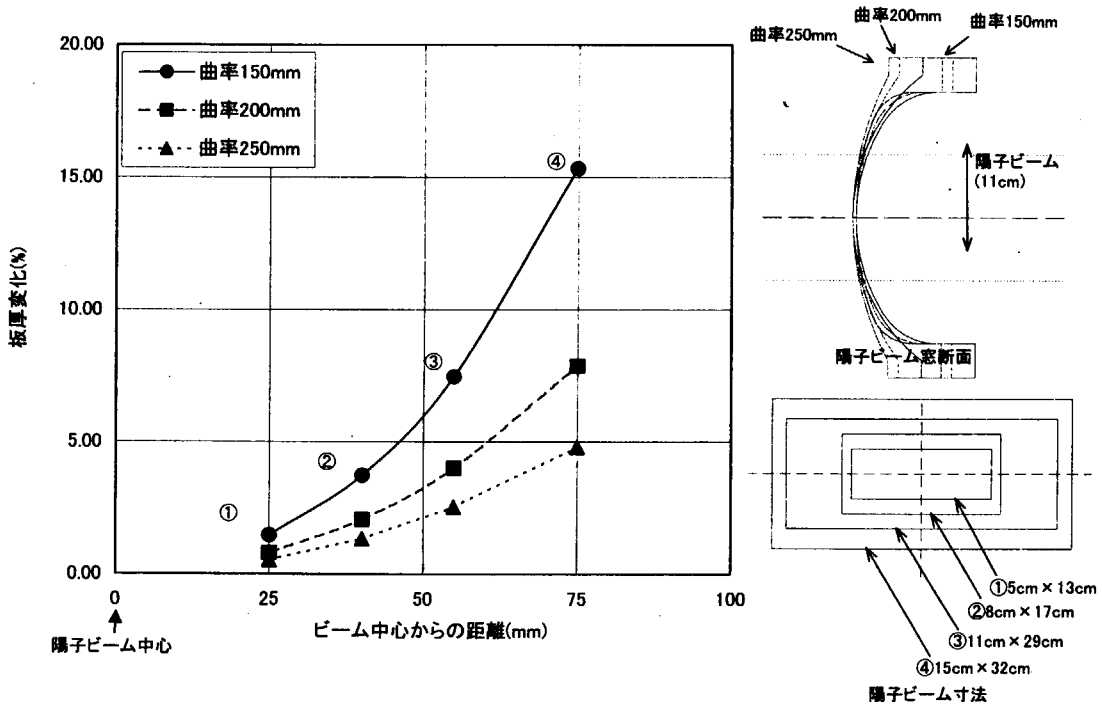


Fig.2.5.1-16 Relationship between curvature and thickness (for thickness 1.5 mm at center)

(6) 陽子ビーム窓本体及び交換プラグの温度分布解析

陽子ビーム窓本体及び交換プラグ部の発熱による温度分布を解析により求めた。Fig.2.5.1-17 に陽子ビーム窓機器全体構造概念図を示す。陽子ビーム窓本体及び交換プラグの解析モデルを Fig.2.5.1-18 に示す。解析条件を以下に示す。

(a)解析モデル（3 次元ソリッド要素）

1)陽子ビーム窓本体

窓、プレナム及びピローシールダクトをモデル化

2)交換プラグ

上部フランジ、鉄遮蔽体、本体サポート、

陽子ビーム窓アッセンブリー受台及びラフガイドをモデル化

(b)固定方法

・プレナム側面の本体固定ピンを固定

・上部フランジ下面 4 点及び受台付根部を完全固定

(c)解析条件

1)発熱密度

a. 窓、プレナム　・・・・・・　0.3 W/cc 一定

b. 上流側ダクト　・・・・・・　0.02～0.06 W/cc

c. 下流側ダクト　・・・・・・　0.06～0.14 W/cc

d. 交換プラグ　・・・・・　0.0001～0.01 W/cc

e. 受台、ラフガイド　・・・・・・・　0.002～0.01 W/cc

2)熱伝達

a. 水冷部熱伝達率（流体温度 40℃）

窓部 9000 W/m^{2}K、プレナム部 1000 W/m^{2}K

b. 空気雰囲気（自然対流熱伝達）

ダクト、交換プラグ及び受台の外表面

5 W/m^{2}K、流体温度 40℃

c. 真空雰囲気

窓部外表面及びダクト内表面を断熱とする。

（下流側も安全側に断熱とする。）

本結果を Fig.2.5.1-19 に示す。陽子ビーム窓本体では、真空側のフランジ下部が最高温度 185℃、交換プラグでは、下部遮蔽体部が最高温度 68℃となり、材料の使用温度としては問題ないと考えられる。

実際には、解析に反映していない空冷による熱除去効果が期待できるので、本結果は非常に保守的な値と言える。

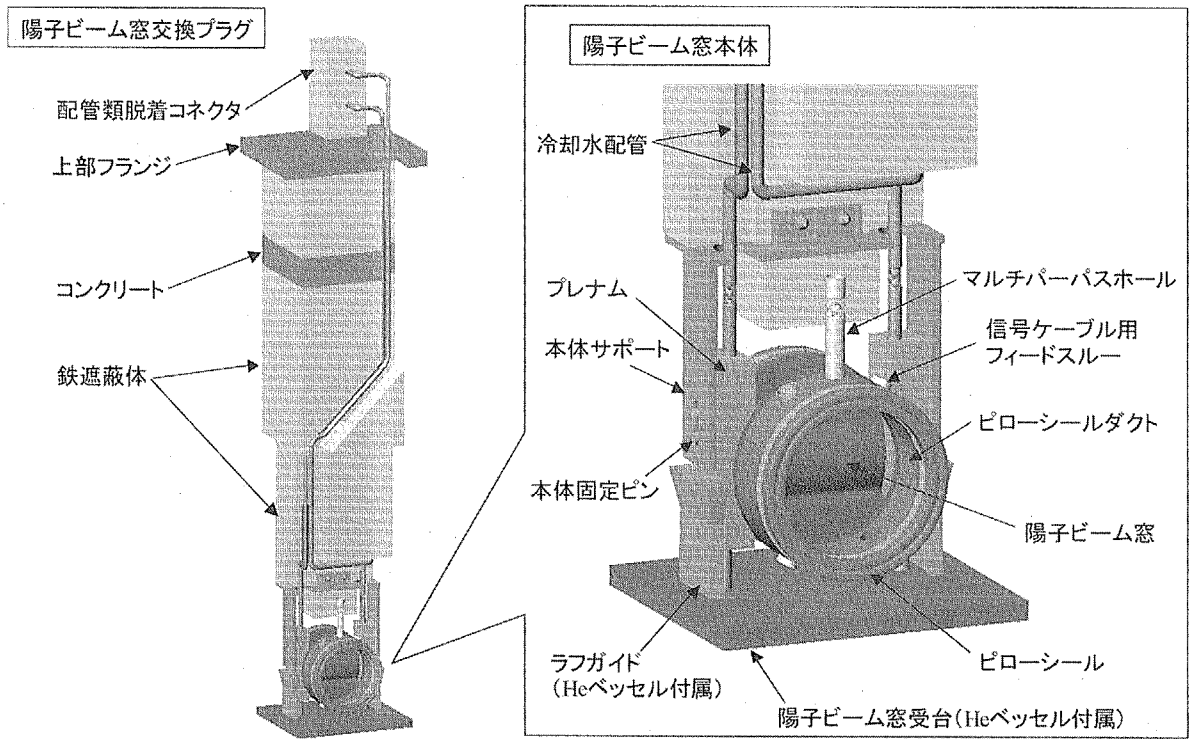


Fig.2.5.1-17 Conceptual design of proton beam window

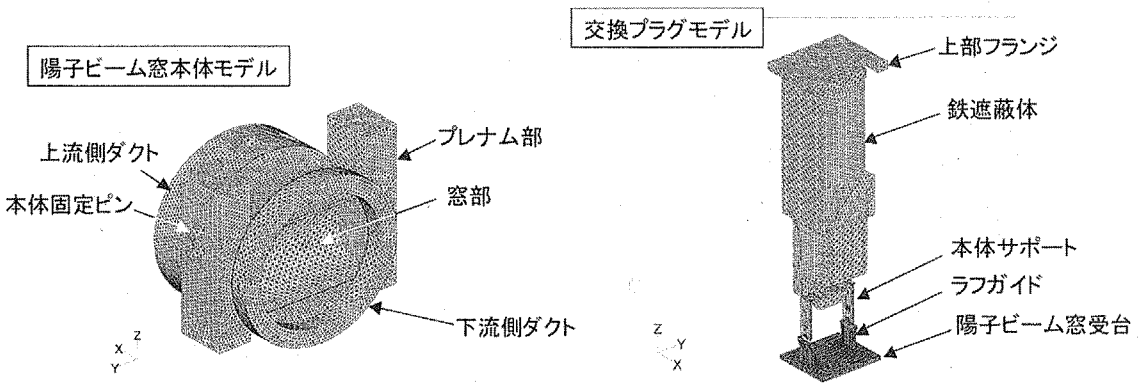


Fig.2.5.1-18 Analytical model of duct around at proton beam window and exchanging plug

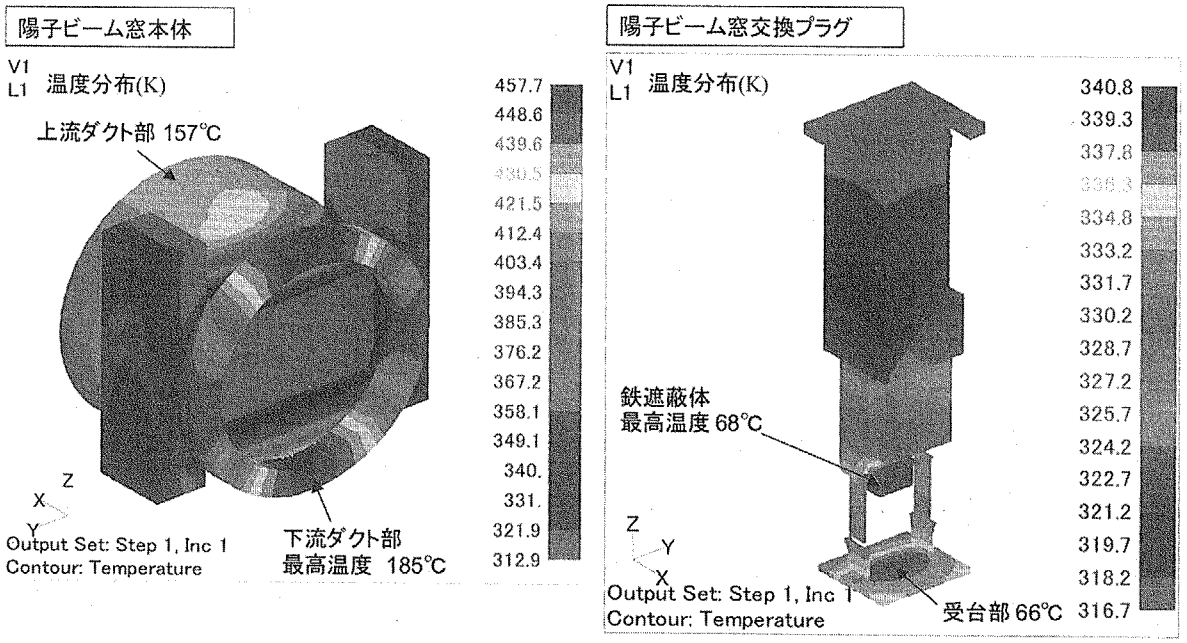


Fig.2.5.1-19 Analytical results of thermal distribution for duct around at proton beam window and exchanging plug

(7) 陽子ビーム窓交換プラグの耐震解析

陽子ビーム窓交換プラグを三次元シェル要素でモデル化し、内部の鉄遮蔽体を考慮した耐震解析を実施した。解析モデル及び解析結果を Fig.2.5.1-20 に示す。Case 1 では、自重による応力、Case 2 では、自重＋水平荷重（0.4G）による応力を求めた。最大変位量は 0.4 mm、Mises 相当応力は最大 35 MPa となり、構造強度的に問題ないことを確認した。

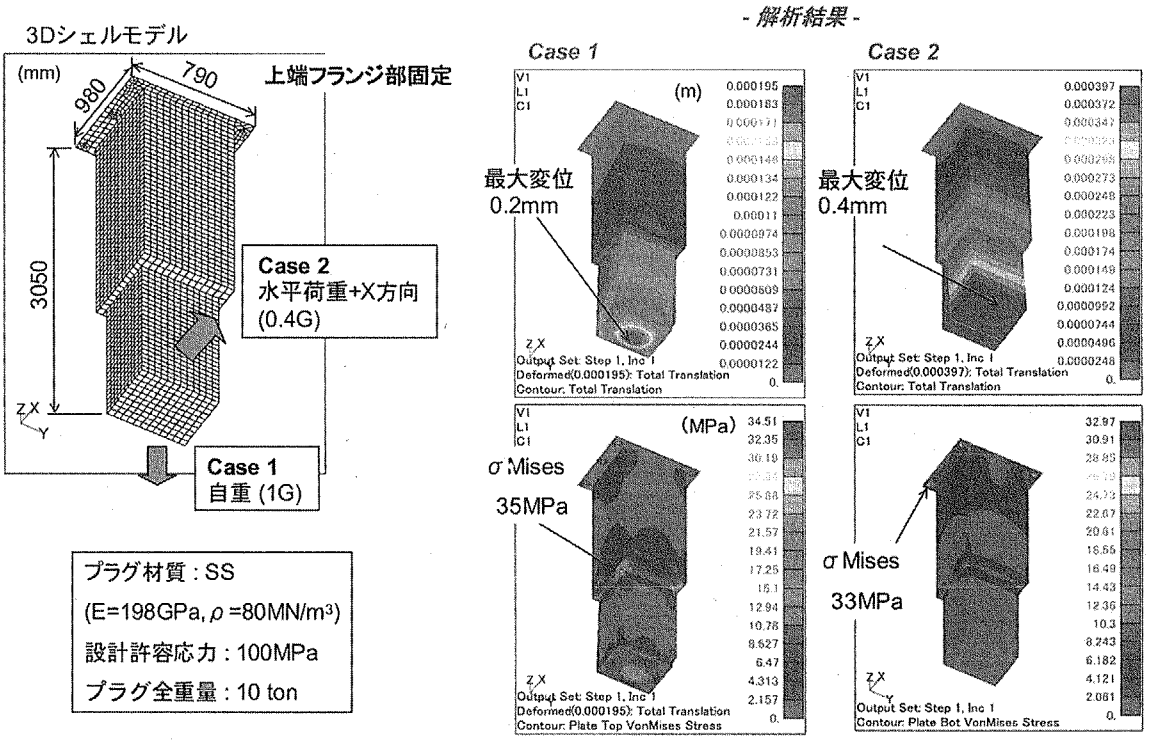


Fig.2.5.1-20 Earthquake resistance analyses of exchanging plug

(8) SNS 陽子ビーム窓との比較

Fig.2.5.1-21 に SNS の陽子ビーム窓構造図、Fig.2.5.1-22 に本計画と SNS との陽子ビーム窓構造の比較を示す。SNS のビーム窓部は本デザインのものに比べ小さいことがわかる。そのため、周辺部遮蔽体が水冷構造となっていると考えられる。

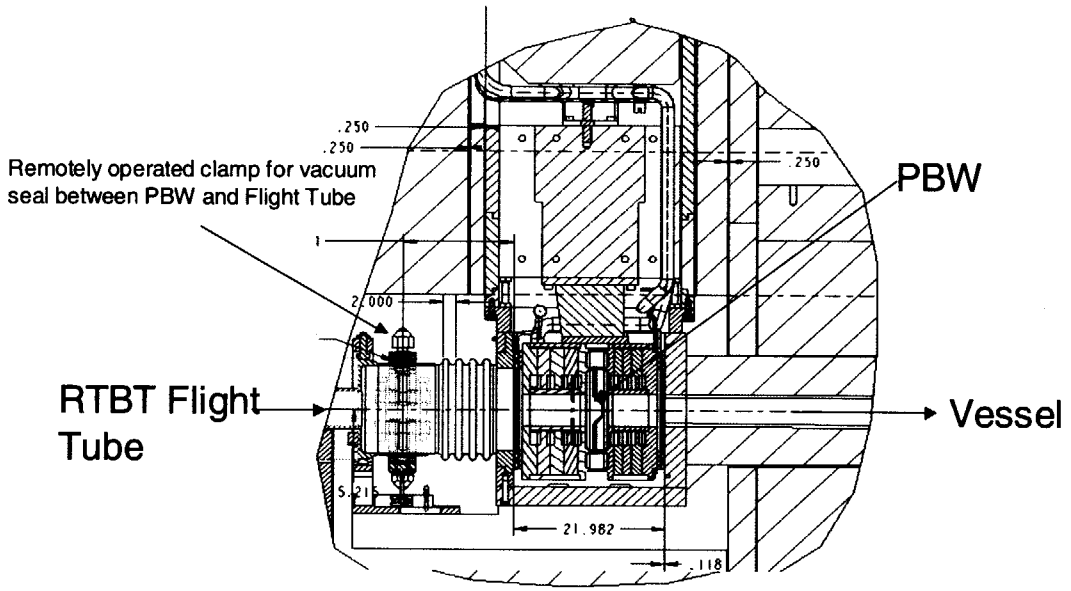


Fig.2.5.1-21 Proton beam windows used in SNS

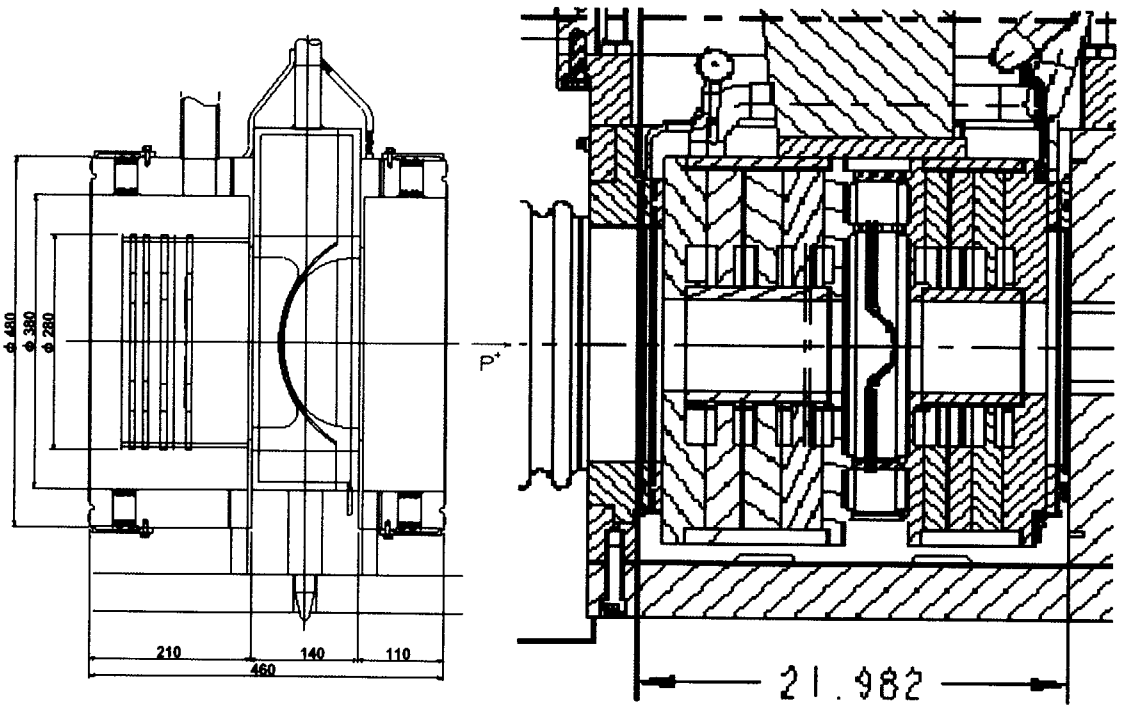


Fig.2.5.1-22 Comparison of proton beam window between JSNS and SNS

(9) 陽子ビーム窓のまとめ

陽子ビーム窓構造の構造強度及び熱流動に関する解析評価を実施した。その結果、軽水による内圧応力や発熱による熱応力に対して構造強度的に十分成立する見通しを得た。

また、窓部ではほぼ均一な流量配分が実現でき、冷却性能に問題のないことを明らかにした。陽子ビーム仕様及び検討結果をまとめると、以下のとおりとなる。今後は陽子ビーム窓を PSI で実績のあるアルミ合金を用いる場合について検討する。

・陽子ビーム仕様

出力：1 MW(3 GeV リング出射時)、908.3 kW(陽子ビーム窓入射時)

陽子ビーム窓部発熱密度分布：

① Uniform 分布

(最大 270 W/cm^3、総発熱量 1.26 kW/1.5 mm、範囲：幅 300 mm×高さ 120 mm)

② Gaussian 分布

(最大 430 W/cm^3、総発熱量 1.26 kW/1.5 mm、範囲：幅 300 mm×高さ 120 mm)

・冷却水仕様

冷却材：軽水

窓部流路幅：3 mm

圧力：最大 1 MPa

配管入口温度：40℃

配管入口流速：最大 1 m/sec(4.8 m^3/hr)

・陽子ビーム窓仕様

板厚：1.5 mm×2 枚

形状：幅 360 mm×高さ 220 mm、曲率 150 mm の半円筒形

材質：インコネル 718

２．５．２　陽子ビームモニター及びアッセンブリー

核破砕中性子源を安定して運転するためには、ターゲット直前の陽子ビームを常に監視することが重要である。ここでは、陽子ビームモニターに関する設計及び指針について述べる。また、メンテナンスを行う上でのアッセンブリーの検討を行う。

(1) モニターの設計条件

KENS, ISIS 等の運転実績によると、初期の加速器コミッショニングにおいて出力は非常に微弱な電流を得ることしかできない。これら施設では運転開始から 10 年以上経過して当初の目標を達した。これから類推して、J-PARC においても初期のビームは非常に微弱になることが予測される。モニターはこのような微弱な出力においても測定可能にしなければならないので、モニターには微弱電流から大電流までに測定する必要が生ずる。即ち、モニターには3桁程度(60 dB)の大きなダイナミックレンジを持つ必要がある。

一般的にこのような大きなダイナミックレンジを１つのモニターに持たせるのは不可能である。そこで、２台のモニターを用いダイナミックレンジの拡大を行う。

また、モニターの交換は容易に行うことができない。モニター自体の多少の損傷ならば、そのまま運転することが予想されるが、全くビームが測定できない事態になるのであればモニターを交換するために、中性子源の運転を停止させる必要性が生じる。そこで、このような事態を避けるために、同じ機能を持つ検出器を多重化することが重要と考えられる。以上のように本モニターは２台同じ機能を持つモニターを設置する。

(2) ハローモニター

陽子ビームのほとんどは RCS において断熱減衰のために 81π mm mrad 以下のエミッタンスとなるが、空間電荷効果によるエミッタンス増加があるために、わずかのビームは 81π mm mrad 以上のエミッタンスを持つ。RCS では、これを抑えるためにスクレーパーを設置し、これにより全てのビームは 324π mm mrad 以下のエミッタンスとなる。ここで、81～324π mm mrad のエミッタンスを持つものを、ハローと定義する。現在ではハローが定量的にどの程度存在するかは断定できない。

中性子反射体及び遮蔽体はこのような大きなアクセプタンスを持たすことは、ボイド空間を大きく開ける必要があるために核設計上望ましくない。一方、ハローはこれらのバルクに入射し、バルクに熱を付与する。遮蔽体には冷却水路がないために、温度が非常に高く上昇する恐れがある。これを防ぐために、常にハローの強度を監視するモニターをターゲット直前に設置する必要がある。

また機器の健全性を守るために、ハローが著しく高い出力を持つ場合には機器の健全性を守るためにビームを停止させる機能が必要となる。このため、ハローモニターは MPS と接続する必要がある。

ハローモニターには二次電子及び温度測定法の下記の二種類を用いることとした。両者ともアルミナのプレートに取り付けられる。

(a) 二次電子測定

二次電子を用いてハローを測定する。１個の一次陽子入射する場合に、二次電子は数十個放出されるので、低電流のハロービームでも測定することが可能である。ハローモニターとビーム窓にはほとんど距離が無いため、ビーム窓で生成した二次電子がモニターに入射する可能性がある。これを防ぐために、電極を設け負の電圧を印加することにより二次電子の入射を防ぐことを可能としている。二次電子測定では時間応答が極めて速いために、１パルスでビームハローの異常出力を検出することが可能である。

(b) 熱測定

発熱用のプレートを設置しプレートの温度を熱電対により測定することでハローを検出する。熱伝導を良くして、時間特性を向上させるためにプレートには銅を用いる。ただし、時間応答時間応答を良くするためには熱電対のシースを非常に薄くする必要があるが、シースを薄くすることにより熱電対の寿命は短くなるため、熱電対時間特性と寿命を両立させることは困難である。そこで、時間特性を良くすることを諦め寿命を長くすることを選択した。これにより、応答時間の遅れは 50 ms 程度となる。これにより、最悪の場合には３パルス程度のビームがバルクに入射する可能性があり、120 kJ のエネルギーを持つビームが入射する。このエネルギーは、RCS 出射部に設置されるビームダンプが 30 秒間に照射されるのに相当する。ビームダンプは冷却装置が一切無い状態で 6 時間照射されても健全性を保つことができるので、このような時間特性であっても特に問題ないと思われる。

(3) プロファイルモニター

中性子源を安定して運転するためには、ビームの中心位置がどこにあるのか、ピーク電流密度はどの程度になるのかを知る必要がある。このため、プロファイルモニターをターゲット直前に設置することが必要である。プロファイルモニターには場所の制限から、ビームに常に照射されることを防ぐ可動型とすることは不可能である。そこで、1 MW の大強度陽子ビームに対して長寿命のモニターが必要となる。そこで、耐放射線性が著しく高い SiC をワイヤーに用いることとした。SiC ワイヤーについては ISIS で実績があり，SiC プレートは KEK PS 北カウンターホールで使用された実績を有する。しかしながら、SiC ワイヤーは陽子ビーム輸送ラインのモニターで記載するように、原研・KEK で使用された実績はない。

初期のプロファイルモニターの場合には、ビーム強度が十分に強くないことが予想されるため、熱で読み出す方法には困難が予想される。しかしながら、ビーム強度が十分に強くなると SiC ワイヤーの寿命が十分長くないことが想定される。その場合には、熱電対を陽子ビームに取り付け測定するのが望ましいと思われる。ただし、陽子ビーム窓に溶接などで取り付けることは、健全性を保つ上で望ましくないため取り付け方法には今後の検討を要する。

(4) ビーム強度モニター

ビーム強度はビーム窓直前とミュオン生成ターゲットの下流側に位置する M2 トンネルにおいて、ほぼ同一であると考えられる。また、ビーム強度モニターの信号から実験ユーザーにビーム

が到達する時間信号を供給することも考えられるが、中性子ターゲットから上流側に設置してもほとんど時間特性には影響を与えないと考えられる。さらに、強度モニターは他のモニターに比べて高価であり、ビーム窓の寿命等により比較的短い周期で交換することは、ランニングコストを大きく向上させることとなる。
以上の理由で陽子ビーム強度モニターはビーム窓の直ぐ上流側に設置しないこととした。

(5) 発熱密度計算

ビームに起因するモニター上での発熱密度を NMTC/JAM を用いて計算した。計算は位相空間において Gaussian 分布を持つケースのみに対して行った。ハローモニターにおける発熱密度を Fig.2.5.2-1 に示す。ハローモニターでは、10 W/cc 程度の発熱密度となるため、1 MW の出力があれば十分に温度を測定することは可能である。なおビームが 1 cm 程度水平方向に変位するある場合には、密度が２倍上昇するために、異常を容易に検出できると考えられる。

一方、プロファイルモニターにおける発熱を Fig.2.5.2-2 に示す。プロファイルモニターにおける密度は 0.01～0.1 W/cc 程度であり、ハローモニターに比べて十分に小さいことがわかる。これは、プロファイルモニターのアクセプタンスが 324π mm mrad 以上となるのに対して、ハローモニターのアクセプタンスは 81π mm mrad となっているためである。

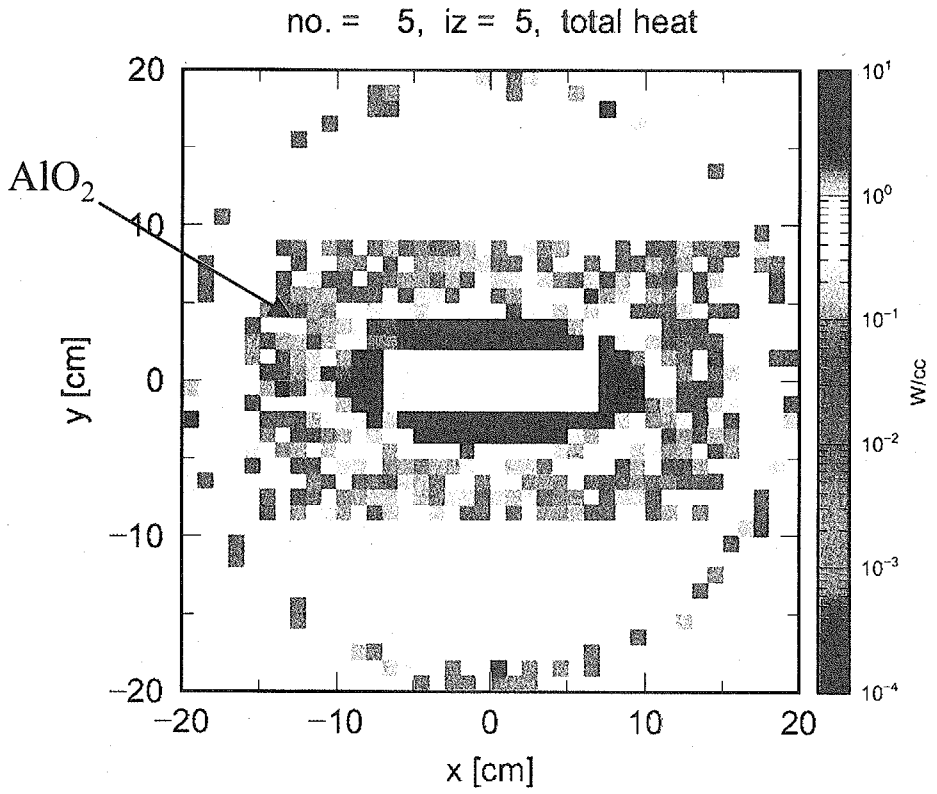


Fig.2.5.2-1 Heat deposition on halo beam monitor

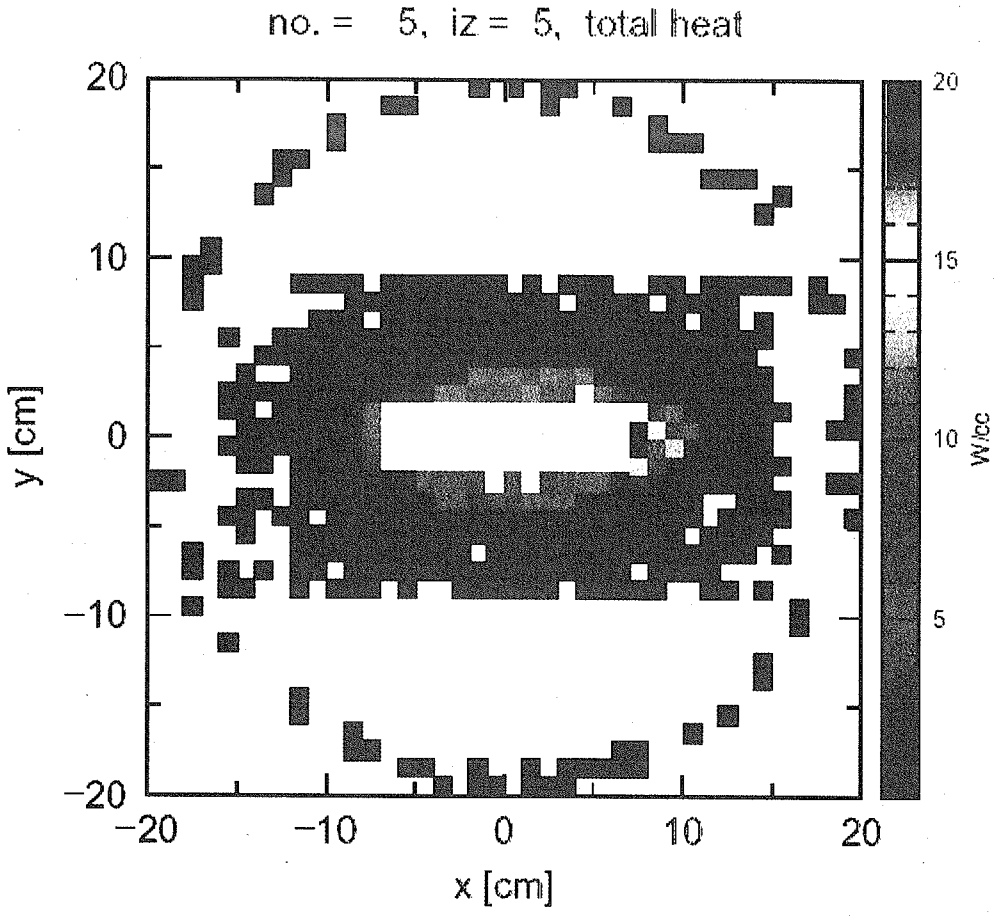


Fig.2.5.2-2 Due to central orbit of beam distorted 1 cm in horizontal direction, heat deposition on halo monitor

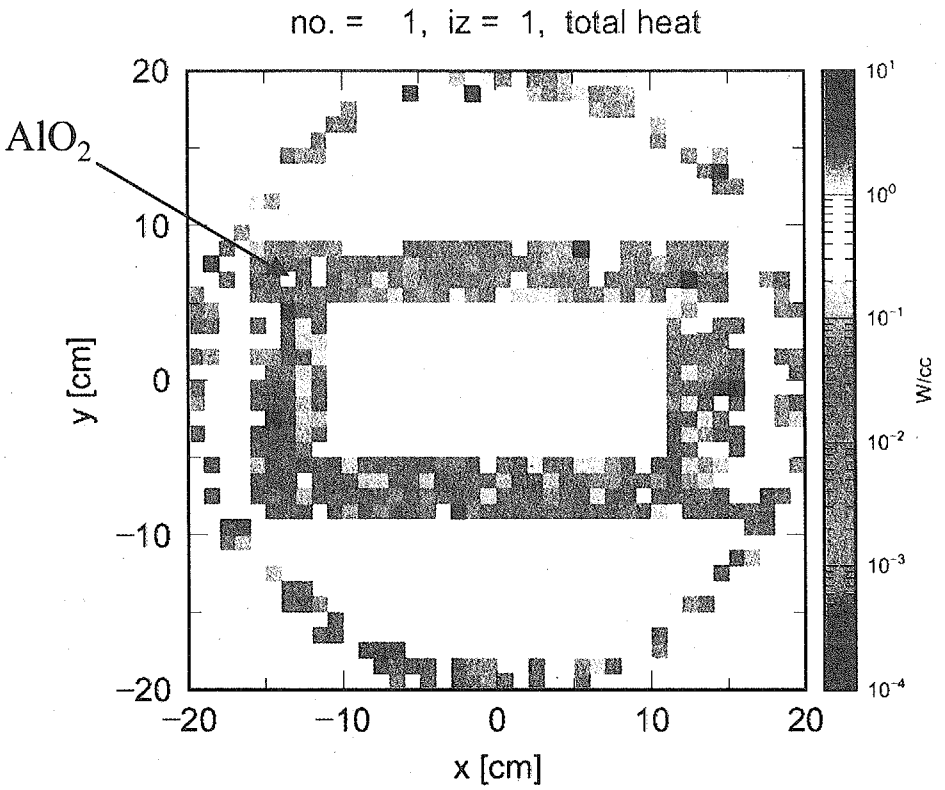


Fig.2.5.2-3 Heat deposition on plate for beam profile monitor having larger aperture than the halo monitor.

(6) モニター周辺の信号ケーブル

陽子ビーム窓周辺の線量は 0.1 MGy/h となる。ポリイミド絶縁材の寿命は 400 MGy 程度あるが、１年間の寿命を持たすことができない。このために、モニター周りのケーブルには、MgO を用いた MI ケーブルを採用する必要がある。MI ケーブルはポリイミド絶縁等のケーブルに比べて非常に高価である。将来においてはビーム出力も上がり、またモニターの寿命の精度が向上するために、現在考えている多重系は必要なくなる。これによりケーブル本数を削減することにより、ランニングコストを低減することは可能である。

(7) マルチパーパスホール

陽子ビーム窓の寿命を予測することは 1 MW の大強度陽子加速器を実際に用いないことには不可能である。しかしながら、直接目視でビーム窓を観察することは容易にできない。そこで、陽子ビーム窓の健全性を容易に観測できるように陽子ビーム窓アッセンブリーにマルチパーパスホールを設け、この孔を通じてファイバースコープ等により目視による確認を可能としている。この孔はアッセンブリーの真空側と通じさせ、ビーム窓及びモニターの状態を確認できるようにする。なお、光ファイバー自体の耐放射線性は優れていないために、光ファイバーは常設することが難しく、目視を行う度に設置する必要がある。このために、真空ビームラインは目視確認を行うたびに大気曝露される必要が生じる。

マルチパーパスホールを設けることにより目視確認以外に下記のことを可能としている。

a) ファーストクロージングバルブ用のトリガーセンサーの設置

万が一にも陽子ビーム窓が破損した場合には、陽子ビームラインおよび RCS, MR に対する影響をできるだけ最小に抑えるために、ファーストクロージングバルブを陽子ビームラインでは設置する。この時間応答を向上させるために、トリガーとなる真空計をマルチパーパスホールに設置する。なお真空計で真空異常を検出してから、バルブが閉じるまでの時間は 40 ms である。

b) 真空引き用の補助ライン

M2 トンネルのビームダクトの接合にはピローシールが用いられるが、このシール性能が十分でないことが想定される。さらに、M2 トンネルには遮蔽が必要なために、真空引きラインを入れることは非常に困難である。そこで、マルチパーパスホールを用いて真空の粗排気等を行うことが可能としている。

２．５．３　メンテナンスシナリオ

(1) 寿命

ビーム窓の寿命は、照射試験を行った後でないと判断することは非常に難しい。陽子ビーム窓に用いられるインコネル 718 は年間あたり 5 DPA の損傷を受ける。また、インコネル 718 は少なくとも 5 DPA 程度の損傷には耐えると考えられるので、1 年間程度の寿命を要すると考えられる。

なお、照射試験は現在 PSI で行われているおり、この結果により陽子ビーム窓の寿命を詳細に決定されると思われる。

(2) 交換方法

下記の方法により交換すると考えられる。

(a) 長期シャットダウン中に交換を行う。初めに短寿命核種の崩壊を待つために冷却水の回収を行った後に、数日間待機する。

(b) キャスクを陽子ビームアッセンブリー上部に移動し、キャスク中にアッセンブリーを納める。次にキャスクを地下の貯蔵エリアまで搬送し、使用済みアッセンブリーを貯蔵する。なお、アッセンブリーの遮蔽プラグは長期の冷却後再利用可能としている。

(c) 新規アッセンブリーを据え付ける。据え付ける手順は以下の手順で進める。

1) 新規アッセンブリーを陽子ビームアッセンブリー用の孔に挿入する。孔によって、20mm 程度の精度で位置出しが可能となる。

2) 孔に挿入すると、ラフガイドにより位置が 5 mm 程度の精度で決定される。

3) ガイドピンにより 1 mm 程度の精度で位置が決まり、最終的に据え付けられる。

(3) 陽子ビーム窓破断時の対応

窓が破損した場合には、大量の冷却水が真空の上流側に流れ込むことが予想される。ファーストクロージングバルブが閉じる場合には、インターロック信号によりビームは直ちに停止される。

その後、短寿命核種が十分崩壊するのは待って、ビームダクト内の水抜き作業が必要となる。ビーム窓の冷却水のトリチウム濃度はかなり高くなることが予想されるために、水を回収する作業において作業者の被爆をできるだけ低く抑えることと放射性物質が拡散するのをできるだけ防ぐことが重要となる。このため水抜き及び回収作業には、真空ダクトを加圧及び吸入するプッシュ・プル方式を用いるのが良いと思われる。これは、マルチパーパスホール及び上流側のビームダクトのリークポートなどから行うことが可能である。回収した水は、廃棄することが難しいことが想定されるために、貯蔵管などに保管することが必要になる。水がある程度回収され、トリチウム濃度が作業者に内部被爆を与えない程度になった後に、ビームダクトを取り外し洗浄およびベーキングの作業が必要となる。

これらの作業は非常に時間が係るために、破損時が起きた場合には施設は数年停止させるぐらいの覚悟を要する。このためにも、保守的なビーム窓の寿命の評価が重要となる。また、貯蔵庫の容量が許す限り、冷却水のトリチウムが高濃度になった場合に長期間の保管を行い新規の水に交換し、たとえ陽子ビーム窓が破断しても高濃度のトリチウムの拡散を抑える姿勢は重要であると考えられる。

２．５．４　今後の課題

陽子ビーム窓の構造強度の設計が妥当なものかどうか確認するために、可能な限り運転中の温度などのデータを収集することは望ましい。このため熱電対をダクトなどに設置する。これらによって得られたデータは次期の陽子ビーム窓アッセンブリー設計の最適化などに大いに役に立つと考えられる。また、使用済みのビーム窓の材料試験を行うことも、設計にフィードバックをかけることができるので非常に重要である。今後はこれらの方法について詳細に検討を行っていく必要がある。

参考文献

[1] 平成７年通商産業省告示 501 号、”発電用原子力設備に関する構造等の技術基準”

[2] 核燃料サイクル開発機構、”別冊　ｲﾝｺﾈﾙ材料強度基準（暫定）”

[3] 住友金属（株）、”アルミニウムハンドブック”

[4] 勅使河原、他、”ターゲット内核発熱評価”：私信

２．６　リモートハンドリング設備

２．６．１　設備の概要

中性子散乱施設は、大強度陽子加速器からの陽子ビーム（1MW：3GeV、0.333mA、25Hz）を水銀ターゲットに入射させ、核破砕反応により発生する中性子ビームを用いて各種実験を行うことを目的とした放射線取扱施設である。施設の概要を Fig.2.6-1 に示す。本施設は、年間 5000 時間の運転を計画しており、水銀ターゲット容器は過酷な核・熱負荷により 2500 時間毎（放射線損傷の目安として 5 dpa）に交換する予定である。このときターゲット容器は高度に放射化（最大表面線量率約 1000Sv/h）しているため、その交換は遠隔操作（リモートハンドリング）で行う。交換に当たっては、水銀ターゲット配管接続部からの水銀飛散・水銀蒸気拡散防止等に配慮した構造とする必要がある。

物質・生命科学実験施設の建屋設計検討、特に、ターゲット容器の交換を行うホットセルについて、水銀ターゲット以外に放射化した減速材容器、反射体、ミュオン科学実験施設（M アレナ）用ターゲット等も取り扱えるように、セル内でのクレーン及び天井走行型パワーマニピュレータ等の寄りつき等に重点を置いて、クレーン及び天井走行型パワーマニピュレータ、及びその他ホットセル内機器との整合性を配慮した設計としている。このとき、パワーマニピュレータに関しては、使用済ターゲット容器の取扱いに重点を置いて設計を行い、ホットセル内での交換作業を見直して、附帯するハンドリング機器の具体化を行った。

２．６．２　ホットセルの概要

リモートハンドリング設備が動作する部屋は上述したように気密性を考慮したホットセルであり、ハンドリング作業の種類及び対象に準じて、ターゲット取扱室、ターゲット台車取扱室及び反射体取扱室の３種に分類される。

水銀ターゲット及び水銀循環系を取り扱うターゲット取扱室及びターゲット台車取扱室は床面をステンレスライニング張りとし、水銀が漏洩した場合の腐食防止と閉じ込め、加えて除染性を考慮した設計としている。それ以外の部分に関しては鋼板のライニングを施す設計としている。これら３室の上部は空間的につながっているため、給排気は一括して行う。ターゲット台車取扱室に設置する排気ダクトにはインセルフィルターを設置して水銀蒸気等を除去してから建家排気系へ排出する。

その他、床面には冷却水漏洩時のための排水ピットや水銀漏洩時のための捕集ピットを設け、万一の場合の除染性を確保している。水銀用捕集ピットは、地下のダンプタンクと配管で接続され、バルブの遠隔開閉でダンプタンクへ水銀を容易に排出できるよう設計する。

また、ホットセルの壁面には天井走行型パワーマニピュレータによる作業等を効率よく支援するためにマスタースレーブマニピュレータ（MS マニピュレータ）を設置する。

メンテナンス等に関しては、水銀がドレンタンクに収納されている場合には、短期間に限り空気呼吸器等の防護対策を施して作業員の入室（立ち入り）が可能な設計とする。このため、パワーマニピュレータ等のメンテナンス時には作業員の手により部品交換等が行えるものとする。また、減速材容器、反射体等については、ホットセルの天井に大型のハッチを設けて反射体取扱室に大型クレーン(130ton)で専用のキャスクに収納して移送し、機器をホットセル内に搬入する。

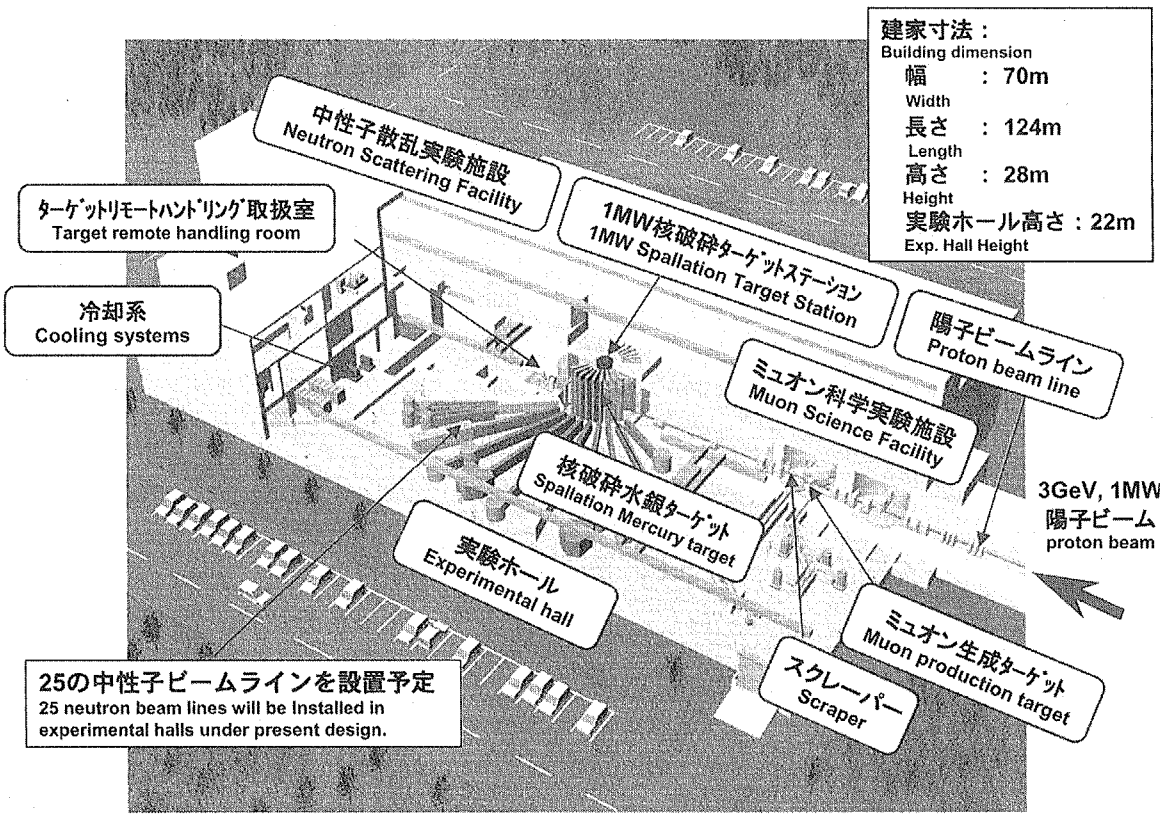


Fig.2.6-1 Outline of Materials and Life Science Facility

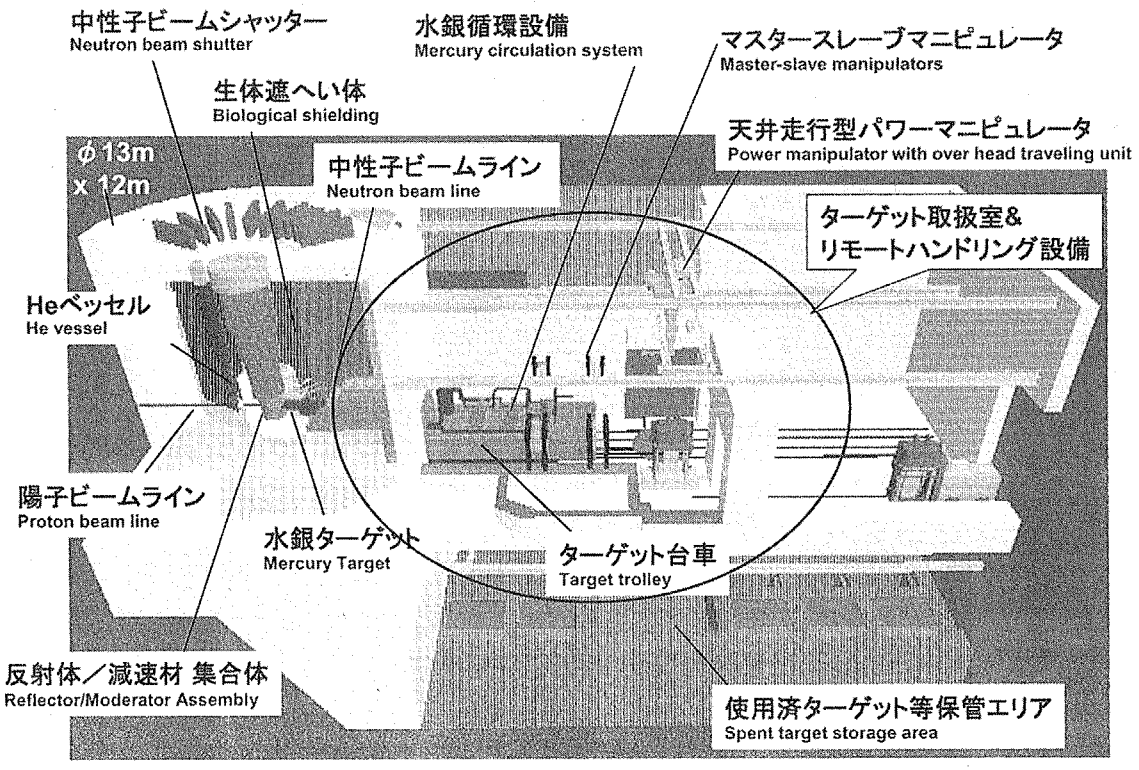


Fig.2.6-2 Target Station of Neutron Scattering Facility

２．６．３　リモートハンドリング設備取扱対象機器

２．６．３．１　取扱対象機器

・取扱対象機器は、放射化レベルが高く人間が直接取り扱うことの不可能な機器、放射化水銀に汚染されている機器等とする。

・本設備（ホットセル内）［Fig.2.6-2参照］で取扱対象とする機器は、次の通りとする。

a. 使用済水銀ターゲット容器（セーフティーハル一体型、保管容器を含む）
b. 減速材容器
c. 陽子ビーム窓
d. 反射体
e. 反射体プラグ
f. 水銀循環系ポンプ、水銀熱交換器、他水銀循環系で使用し水銀に汚染されている機器・部品類
g. 中性子シャッター
h. ミュオンターゲット、スクレーパー、電磁石等

・放射化物の取扱は「東海研究所放射線安全取扱手引」に従って合理的に管理する。

２．６．３．２　取扱対象物の代表寸法

代表的な取扱対象物を Fig.2.6-3～6 に、対象物の代表寸法を Table2.6-1 に示す。

(1) ターゲット

水銀ターゲット

寸法：　1150mm(W) x 1300mm(H) x 2,200mm(L)

重量：　約 700kg（容器のみ、水銀ドレン後、セーフティーハル含む）

(2) 減速材容器、陽子ビーム窓

概略寸法：　最大 860mm(W) x 980mm(L) x 4510mm(H)（遮へいプラグ一体）、

(3) 反射体

概略寸法：　Φ1900mm x 4700 mm(H)

重量：　約 20000kg（反射体外側プラグの重量含む、反射体単体では約 5000kg）

(4) その他

水銀循環系機器（水銀汚染機器等）

陽子ビーム窓

ミュオンターゲット関連機器

Table2.6-1 Components maintained by Remote Handling System

取扱対象機器	本体外形寸法・重量 (取扱容器寸法･重量) (mm), (t)
A. 使用済水銀ターゲット(セーフティーハルと一体構造) ターゲット保管容器	1150×1300×2200･0.7t (2100×1820×3200H・0.5t)
b.減速材容器 （水素輸送管と一体構造）	1400×850×4400H・ 0.25t
c.陽子ﾋﾞｰﾑ窓 （遮蔽プラグと一体）	860×980□×4510H･ 約 10t
d.反射体 （反射体プラグとﾞ一体）	1900Φ×4700H･20t
e.反射体プラグ （反射体と一体）	
f.水銀汚染機器・部品類	
g.中性子シャッター	
h.ミュオンターゲット、スクレーパー、電磁石等	

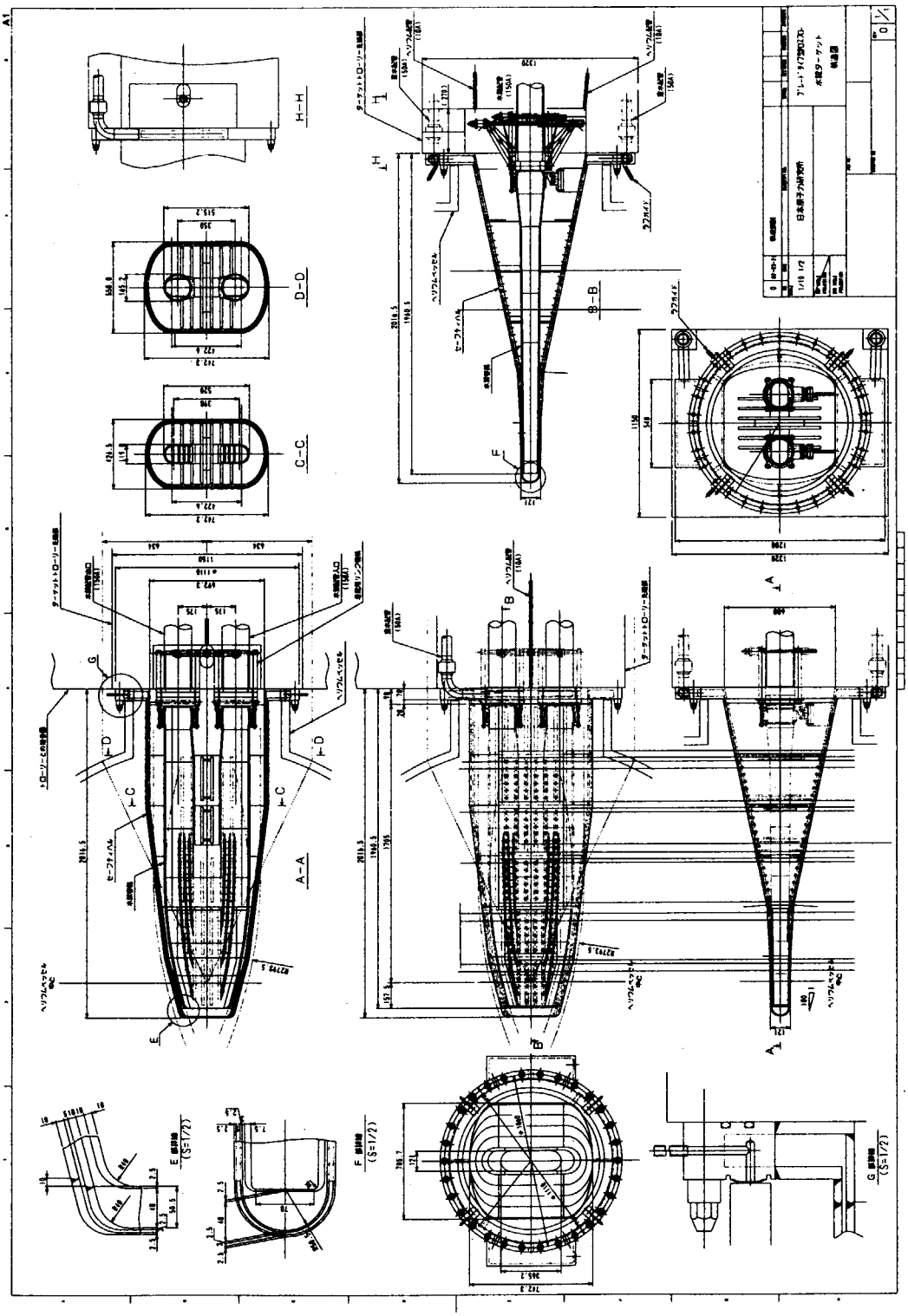
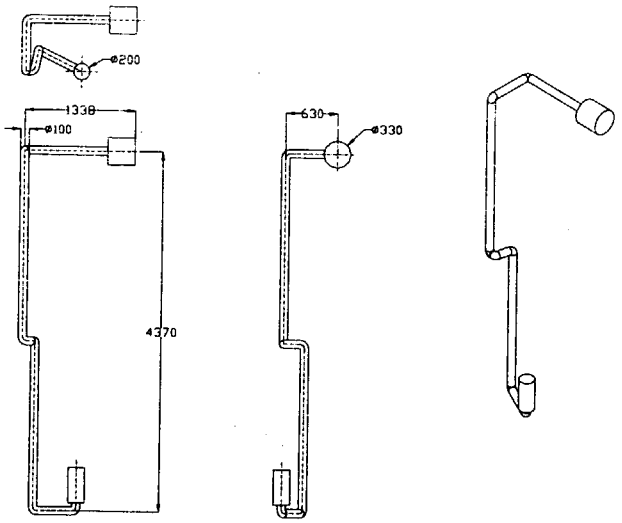
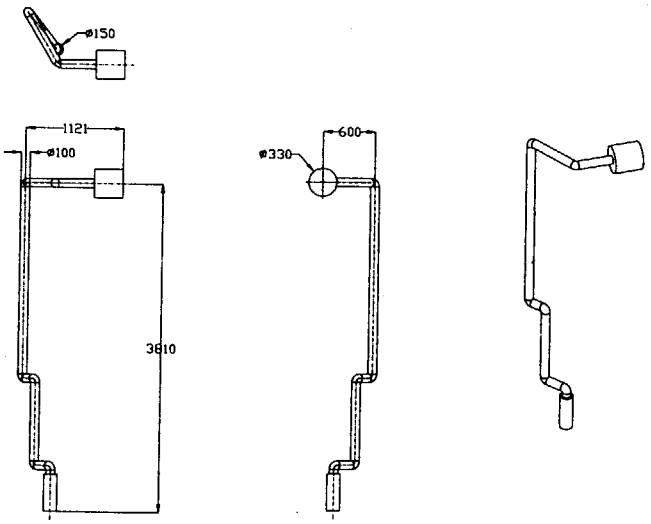


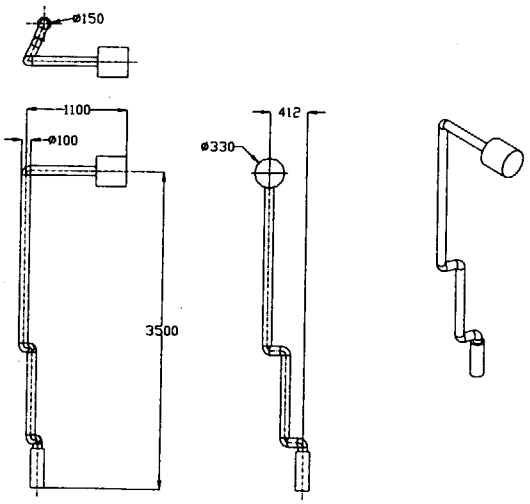
Fig.2.6-3 Unit Structure of Target Container and Safety Hull



結合型モデレータ水素輸送管



非結合型モデレータ水素輸送管



ボイゾン付き非結合型モデレータ水素輸送管

Fig.2.6-4 Moderator and Hydrogen Transportation Piping

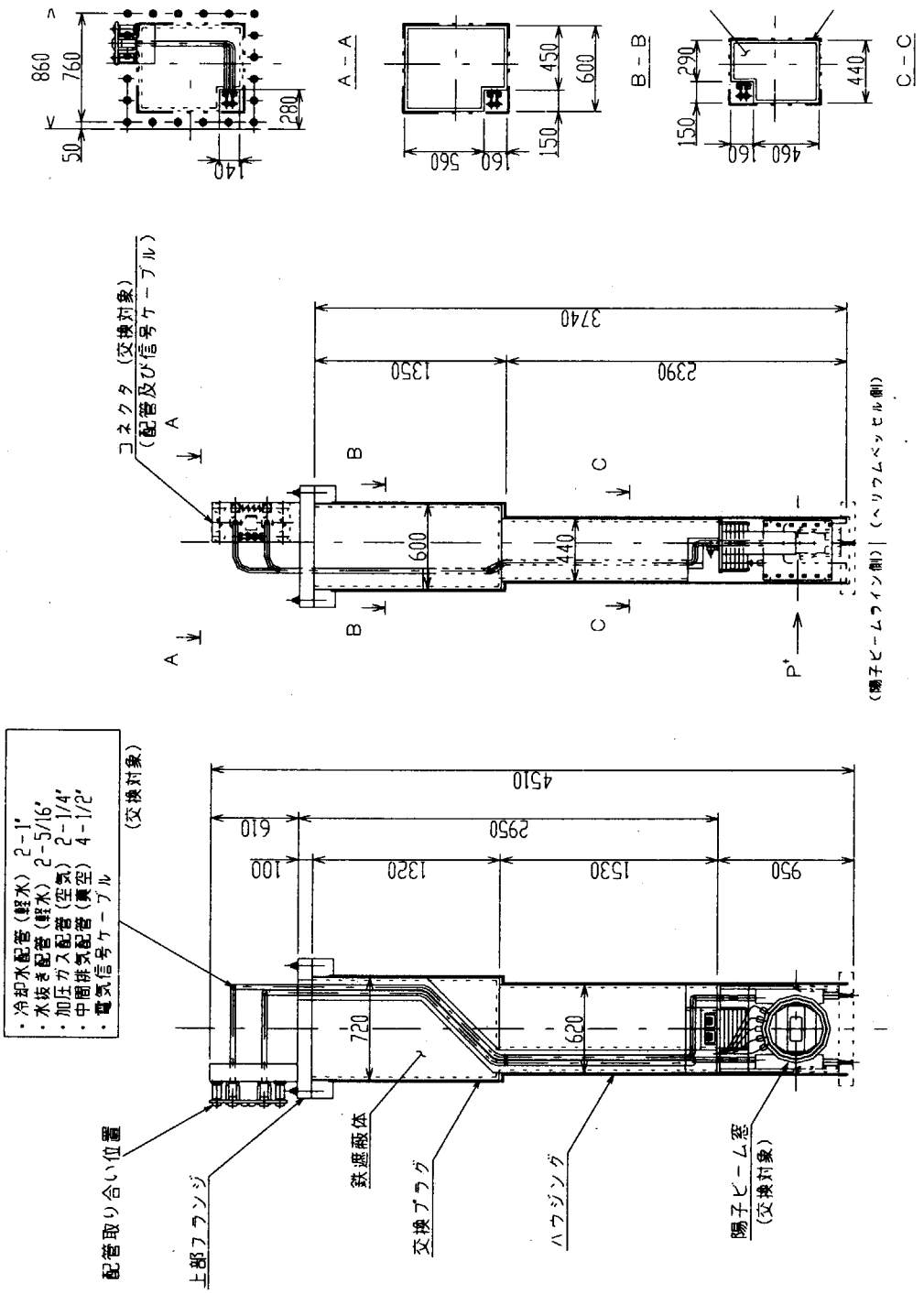


Fig.2.6-5 Proton Beam Window

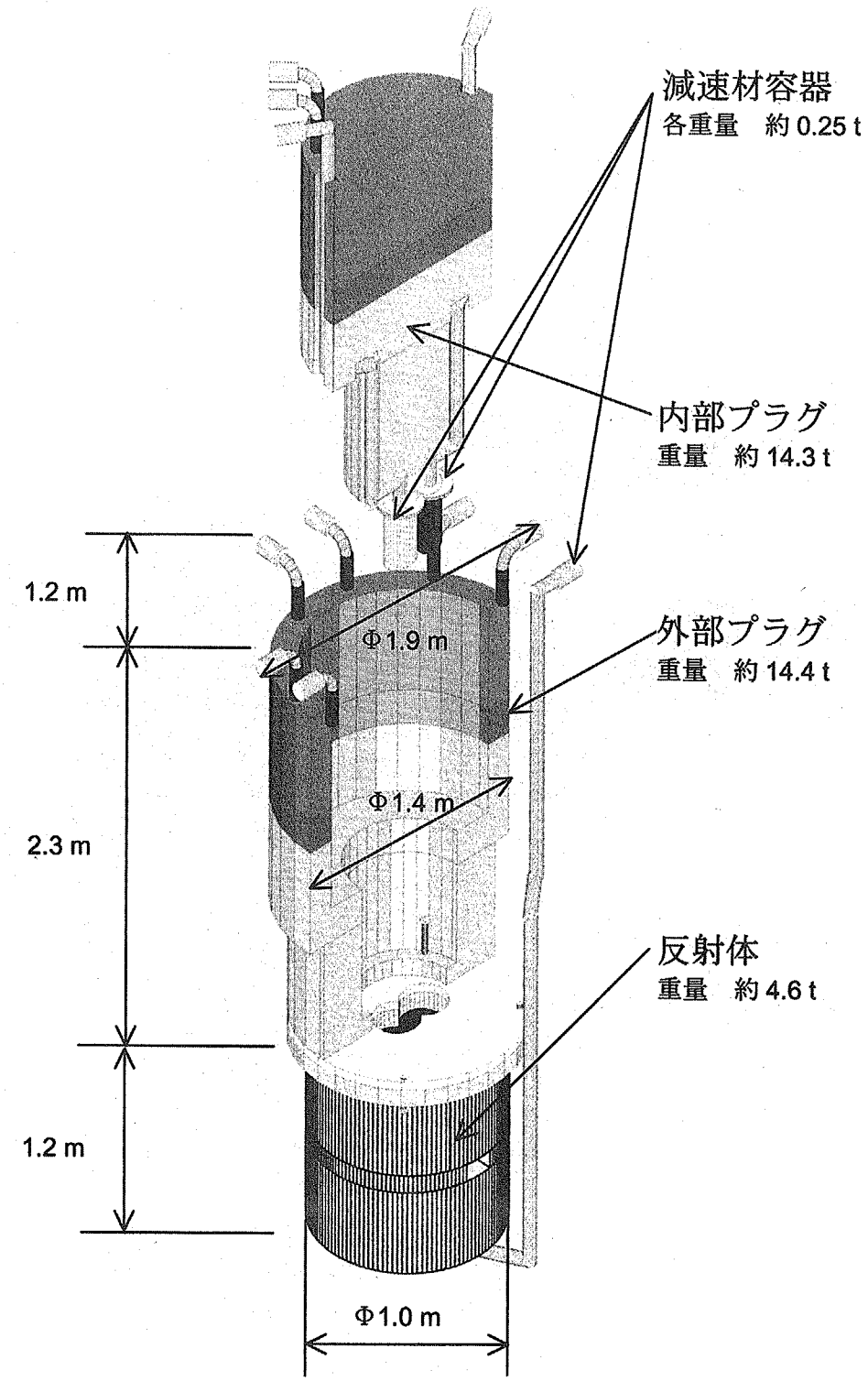


Fig.2.6-6 Reflector and Reflector Plug

２．６．４　パワーマニピュレータに関する基本仕様

ターゲット容器を取扱対象とした場合の天井走行型パワーマニピュレータ及びホットセル内リモートハンドリング機器に関する基本仕様を以下に記す。

２．６．４．１　天井走行型マニピュレータシステムの構成

天井走行型マニピュレータシステムはFig.2.6-7に示すようにターゲット取扱室、ターゲットトローリー取扱室及び反射体取扱室上部を移動できるように設置され、走行レール上を走行する走行台車部分と、走行台車上を横行する横行台車部分から成る。横行台車部分にはパワーマニピュレータを昇降させる昇降機構を搭載する。

天井走行型マニピュレータシステムの上部にはインセルクレーンを設置し、重量物及び吊り上げ揚程が必要な機器等の取扱を行う。天井走行型マニピュレータシステムとインセルクレーンは、相互に干渉しないように設置し、それぞれセル内の上部空間を有効に使用できるように配置する。

パワーマニピュレータは６軸動作が可能で、手首先端において各種作業に用いる工具類を把持する。パワーマニピュレータ肩部には撮像管カメラを搭載し、作業の補助として用いる。主な工具はナットランナーで、M20 と M12 の２種類とする。工具の把持は、マニピュレータの運転員が手動操作にて行う。

運転制御は、専用の制御盤で行う。なお、運転操作は手動を原則とし、あらかじめ決められたルートが確定できるものについては、ターゲット近傍まで自動運転により移動するものとする。ただし、衝突防止用の演算については、上位計算機が処理を行い（他機器との干渉チェック等）、停止信号を上位より受け取り停止するものとする。

２．６．４．２　一般仕様

(1) 天井走行型マニピュレータシステム

①走行・横行台車

・型　　式	：低床式オーバーヘッド型
・員　　数	：１式
・走行方式	：手動及び自動運転
・走行横行昇降位置検出	：耐放射線性ポテンショメータ（10^6Gy） 計測範囲：各動作ストローク以上
・レールスパン	：約 11,000 mm
・ブリッジ構成	：サドル／ガーダ一体型
・トローリー構成	：マニピュレータ昇降機構及び補助ホイスト搭載型
・動作範囲	：X（走行方向）×Y（横行方向）×Z（昇降方向） 約 25,000 mm×約 9,000 mm×約 5,500 mm 注）詳細は、別途打合せの上決定するものとする。
・動作速度	：X（走行）　6m /min ：Y（横行）　4.5 m/min ：Z（昇降）　5 m/min

位置決め精度（天井走行部）：X，Y，Z
±30 mm

・給電方式　：ブリッジ走行用　カーテンケーブル方式
トローリー横行用　ケーブルベア方式

・台車主要材質　：SS400

②パワーマニピュレータ

・自由度　：6軸
・駆動方式　：DCサーボモータ駆動
・動作領域
1) 1軸（肩回転）：±180°
2) 2軸（肩曲げ）：＋45°、－120°
3) 3軸（肘曲げ）：±120°
4) 4軸（手首曲げ）：±130°
5) 5軸（手首回転）：±360°
6) 6軸（ハンド開閉）：0～120mm
・専用工具　：ボルト締緩機能を持つ工具（スクリューマシン）
・アーム長　：約1,500 mm
・可搬質量　：45 kg（エンドエフェクタ含む）
・員　数　：1式
・位置繰り返し精度　：別途協議
・ブレーキ　：1～4軸ブレーキ付
・本体質量　：約600 kg
・電源　：三相AC200/220 V
・電源容量　：10 KVA（ピーク時）、8 KVA（平均）
・操作方式　：有線による遠隔操作
（遠隔操作用カメラ付属）
・搭載センサ　：撮像管カメラ（アーム肩部付）

③補助ホイスト

・横行速度　：2 m/min
・巻上速度　：2 m/min
・揚　程　：20 m
・定格荷重　：2t

(2)自律走行用最適移動経路解析システム及び監視システム

放射化機器リモートハンドリングシステムの全体構成をFig.2.6-8に示す。自律走行用最適移動経路解析システムは、最適移動経路解析用ソフトウェア及び計算機から構成される。

監視システムは、カメラ・切換器制御用計算機、遠隔操作型耐放射線カメラ、デジタル

ビデオ記録装置及びモニタから構成される。

本システムのハードウェア構成を Fig2.6-9 に示す。最適移動経路解析用計算機及びカメラ・切換器制御用計算機は PC/AT 互換パーソナルコンピュータで構成し、17 インチ以上のカラーCRT と磁気ディスク、キーボード等を接続する。最適移動経路解析用計算機と天井自律走行型ロボット操作盤はイーサネットにより接続する。

①最適移動経路解析用ソフトウェア及び計算機

移動領域の地図及び現在位置、目標位置を与えると、現在位置から既知障害物を回避して目標位置に至る最適経路を探索する最適移動経路解析機能を持たせる。地図は、障害物の追加・修正が随時可能なものとする。位置は天井自律走行型作業ロボット台車の位置とする。

a. 最適移動経路解析用ソフトウェア

・主な機能　：最適移動経路解析機能
　地図エディタ機能
　ロボット台車位置モニタリング機能
　センサモニタリング機能
　プロセス管理機能
　ネットワーク通信制御機能
　障害物情報管理機能
　マンマシンインターフェース機能

・探索方式　：温度分布アナロジー及びヒューリスティック分岐探索等

・対象移動領域　：200 m×200 m 以上

・経路解析所要時間　：60 秒以内

b. 最適移動経路解析用計算機

・型　式　：PC/AT 互換パーソナルコンピュータ

・O　S　：Windows XP　または　Linux

・通信方式　：イーサネット

②カメラ・切換器制御用計算機、遠隔操作型耐放射線カメラ、デジタルビデオ記録装置及びモニタ

a. カメラ・切換器制御用計算機

・型　式　：PC/AT 互換パーソナルコンピュータ

・O　S　：Windows XP　または　Linux

・画像処理ボード　：接続映像機器　NTSC 方式
　インターフェース PCI バスまたはコンパクト PCI バス

b. 遠隔操作型耐放射線カメラ、デジタルビデオ記録装置及びモニタ

・カメラ型式　：撮像管方式ビデオカメラ

・信号方式　：NTSC 方式

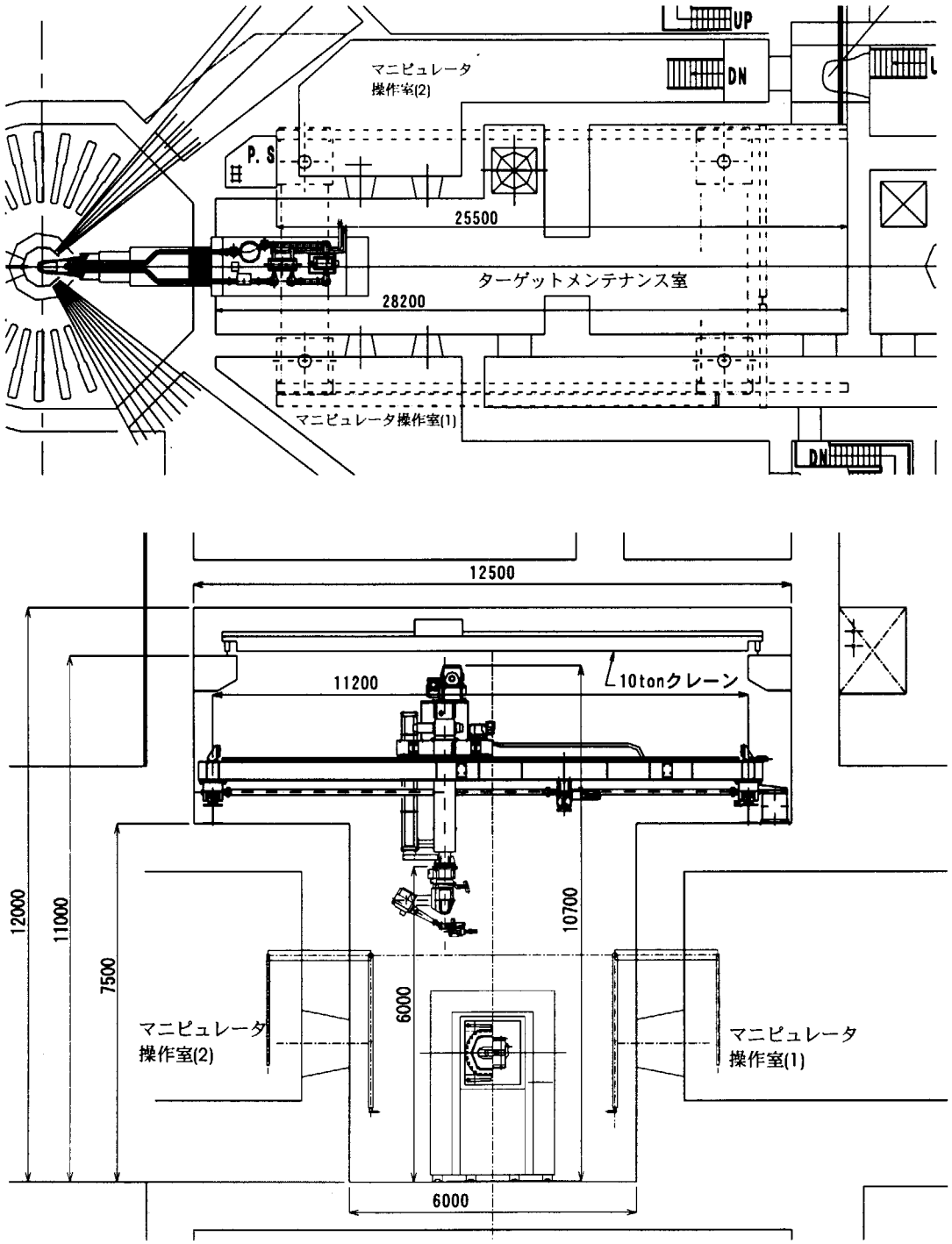
・水平解像度 ：470 本以上
・記録方式　　：デジタルビデオ方式
・付属機能　　：雲台機能
　1)操作方式：遠隔操作
　2)俯仰範囲：－65°～＋65°
　3)旋回範囲：340°
　ズーム機能
　1)操作方式：遠隔操作
　2)倍　　率：6倍ズーム以上
・員　数　　：5 式

(3)インセルクレーン

インセルクレーンは、セル内における重量物及び吊り上げるために揚程が必要な機器等の取扱を行うために設置する。インセルクレーンは、天井走行型マニピュレータシステムと干渉しないように設置し、それぞれセル内の上部空間を有効に使用できるようにする。

・形　　式　　：天井クレーン（クラブ、トローリー式）
・員　　数　　：1 式
・走行方式　　：手動及び自動運転
・走行横行巻上位置検出　：耐放射線性ポテンショメータ（10^6Gy）
　計測範囲：各動作ストローク以上
・レールスパン　：約 11,000 mm
・ブリッジ構成　：サドル／ガーダ一体型
・トローリー構成　：巻上装置（ホイスト）一体型
・動作範囲　：別途検討の上決定する
・動作速度　：X（走行）　6m /min
　：Y（横行）　4.5 m/min
　：Z（巻上）　3 m/min
　位置決め精度（天井走行部）：X，Y，Z
　±30 mm
・給電方式　：ブリッジ走行用　カーテンケーブル方式
　トローリー横行用　ケーブルベア方式
・台車主要材質　：SS400
・巻上装置(ホイスト)定格荷重　：20 t

現状機器で考えているターゲット容器交換作業を Fig.2.6-10(a)(b)に示す。また、現状の建築設計におけるホットセルまわりの図面を Fig.2.6-11～14 に示す。さらに、ターゲット台車構造参考図を Fig.2.6-15 に示す。



正面図

Fig.2.6-7 Schematic Drawing of Power Manipulator Setting

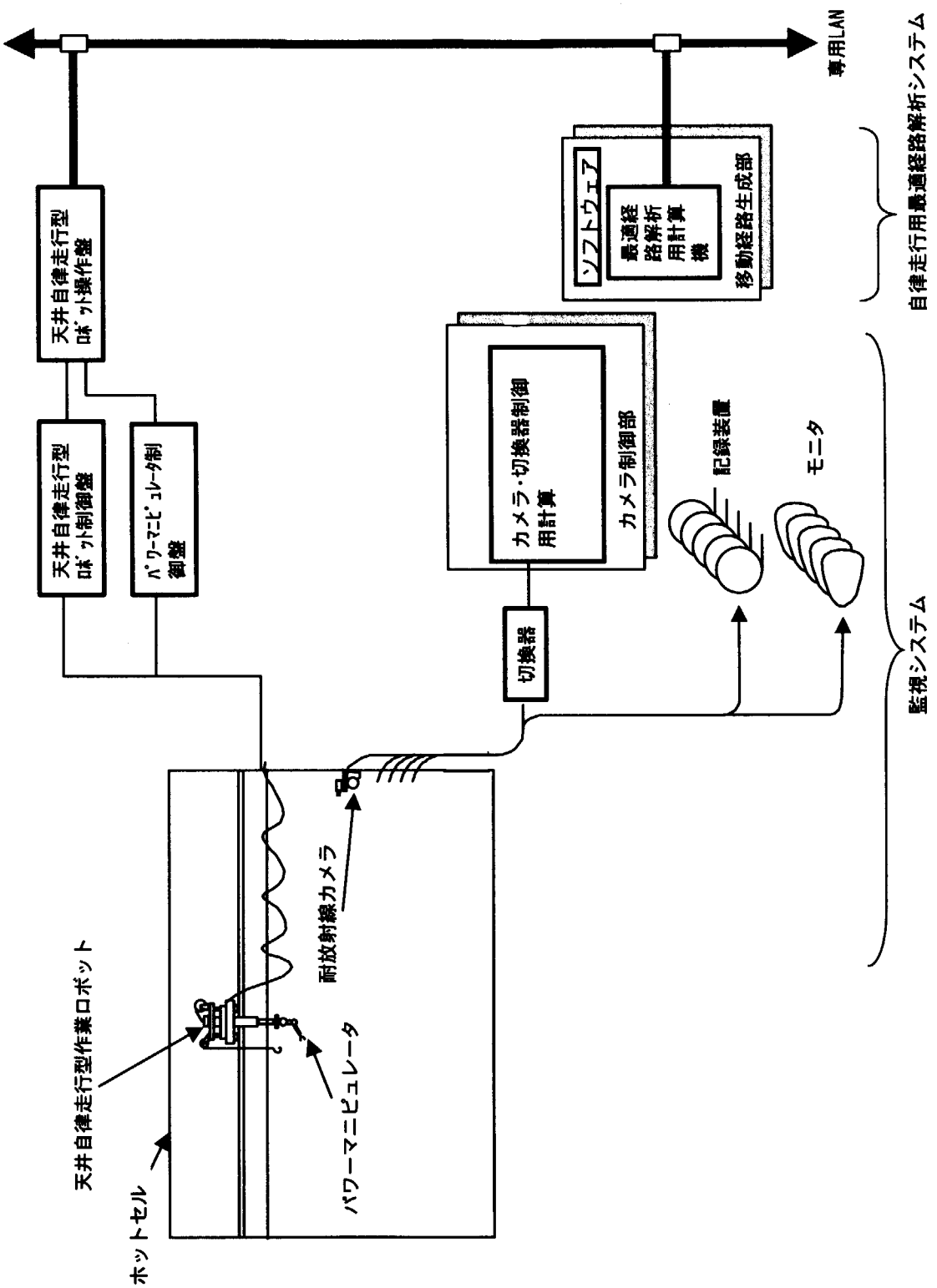
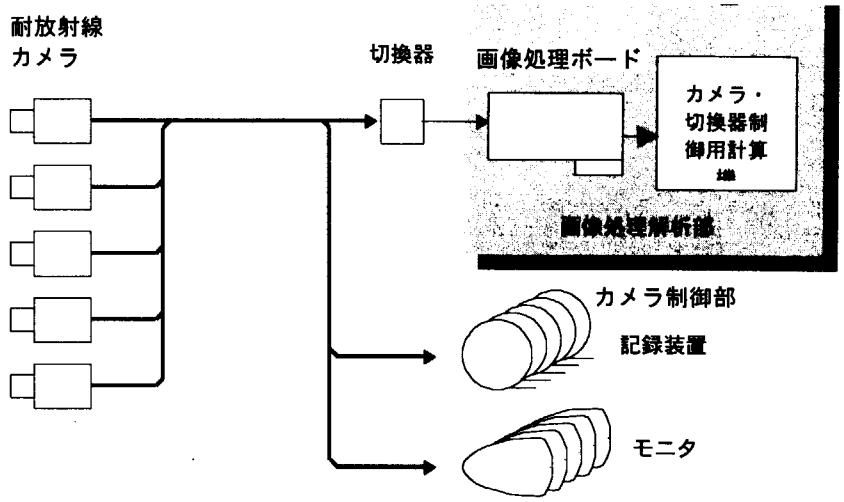


Fig.2.6-8 Configurations of Remote Handling system (Power Manipulator)



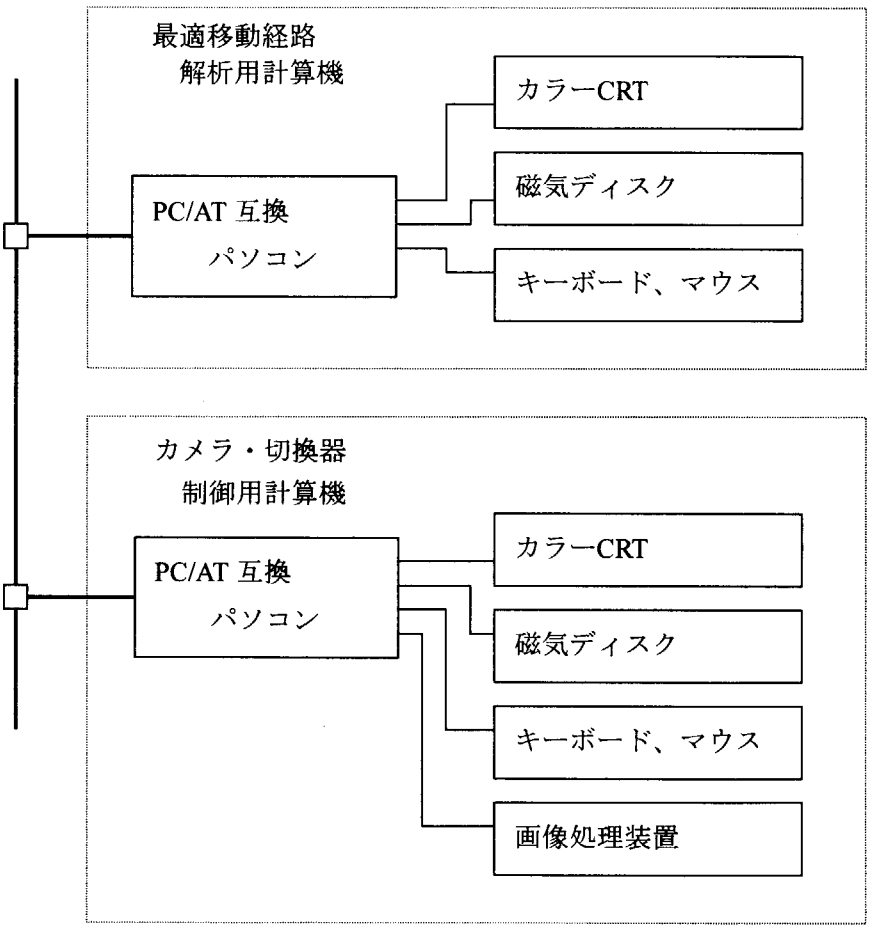
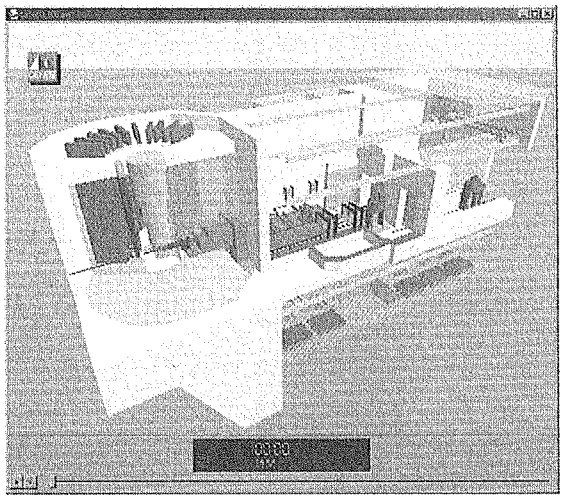
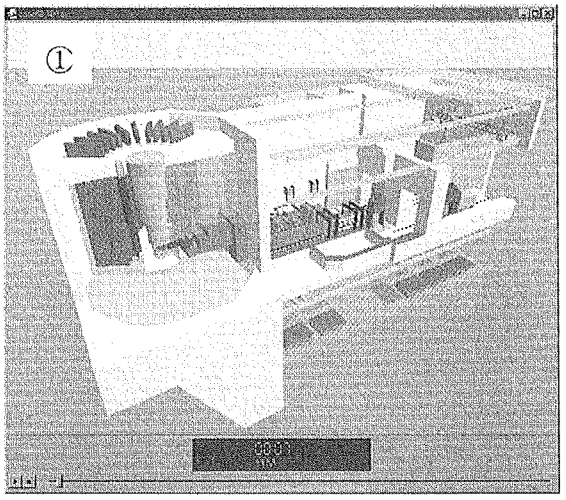


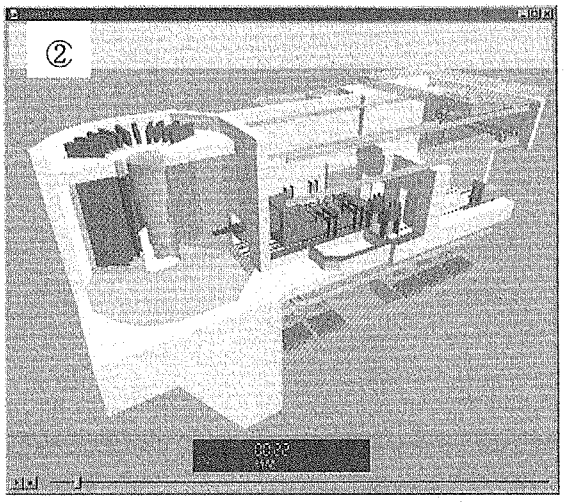
Fig.2.6-9 Configurations of Hardware



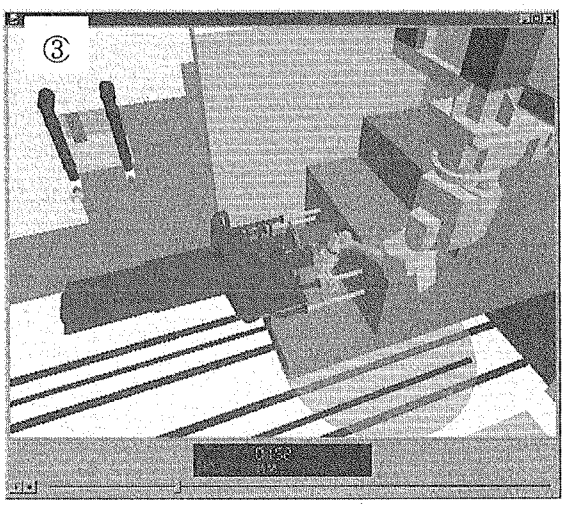
全体構成



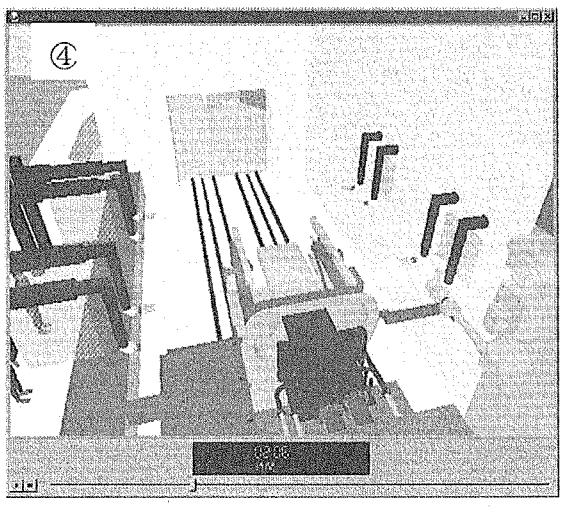
ターゲット交換トラック移動



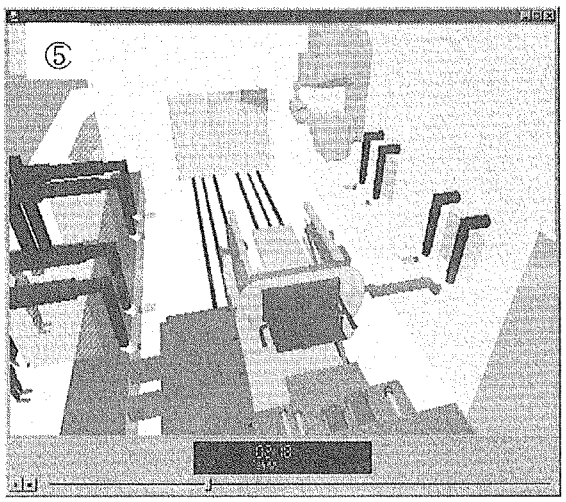
ターゲット台車引抜き



ﾊﾟﾜｰﾏﾆﾋﾟｭﾚｰﾀｰでﾀｰｹﾞｯﾄ取外し

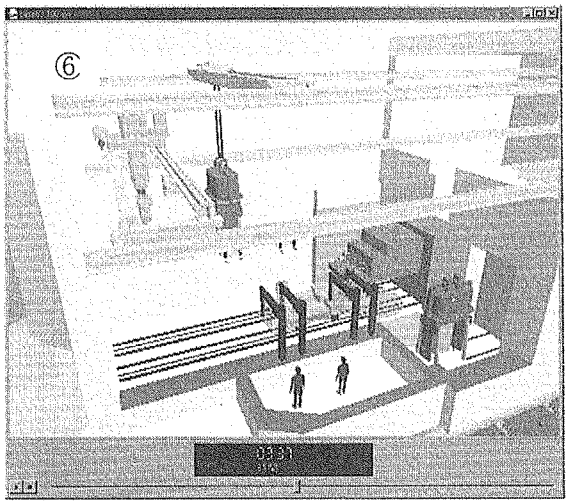


ﾀｰｹﾞｯﾄ保管ｷｬｽｸにﾀｰｹﾞｯﾄ挿入

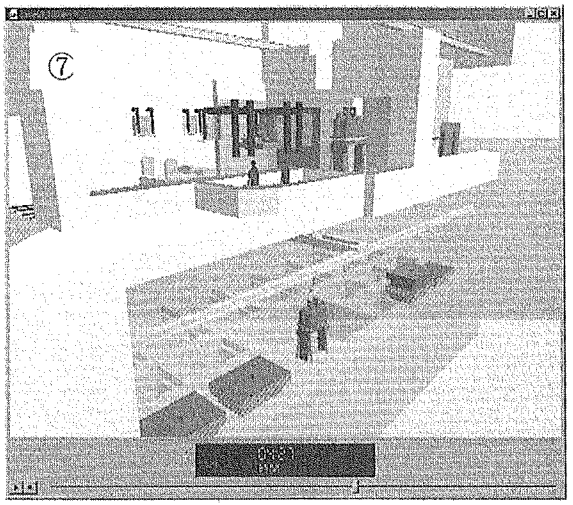


ﾀｰｹﾞｯﾄ保管ｷｬｽｸにﾀｰｹﾞｯﾄ収納

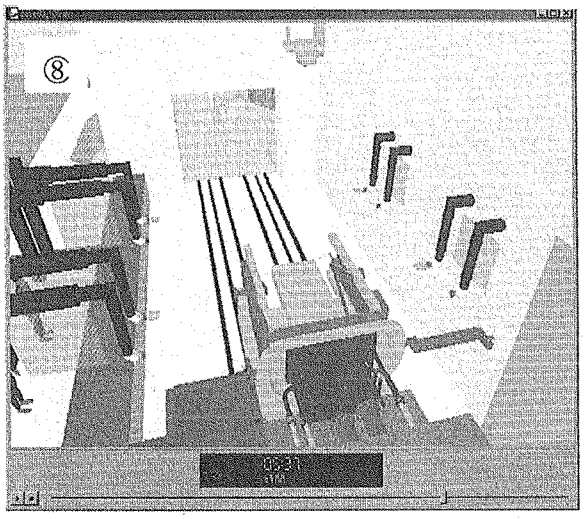
Fig.2.6-10(a)　Target Replacement Scenario



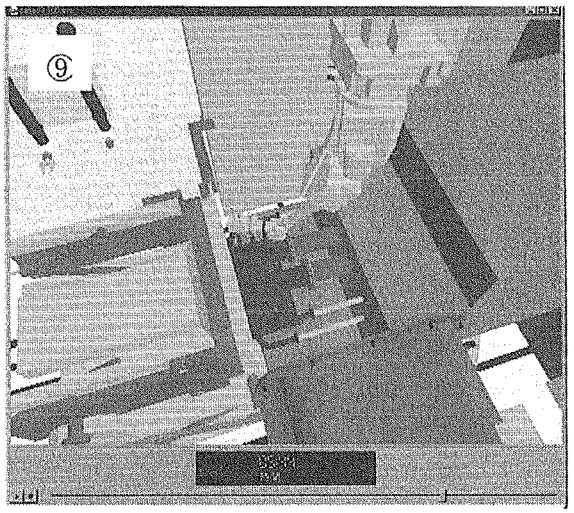
ﾀｰｹﾞｯﾄ保管ｷｬｽｸ移設



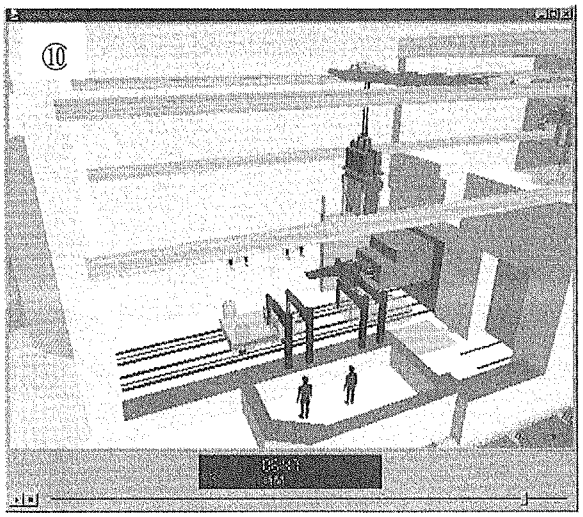
ﾀｰｹﾞｯﾄ保管ｷｬｽｸを保管ﾗｯｸに移設



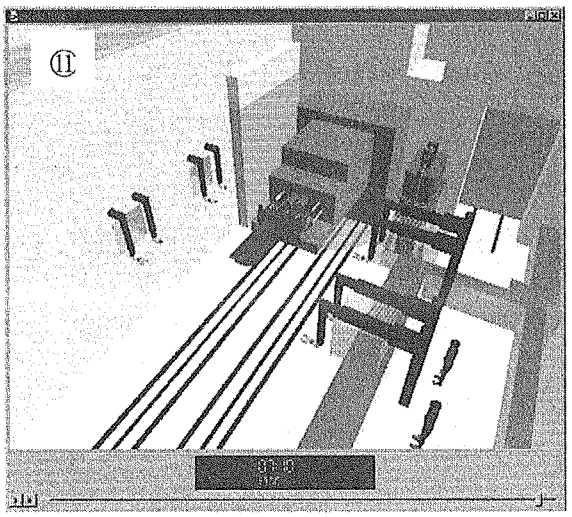
新ﾀｰｹﾞｯﾄ取付け



新ﾀｰｹﾞｯﾄの取付け状況



ﾀｰｹﾞｯﾄ交換トラックの帰還



ﾀｰｹﾞｯﾄ台車を挿入

Fig.2.6-10(b)　Target Replacement Scenario

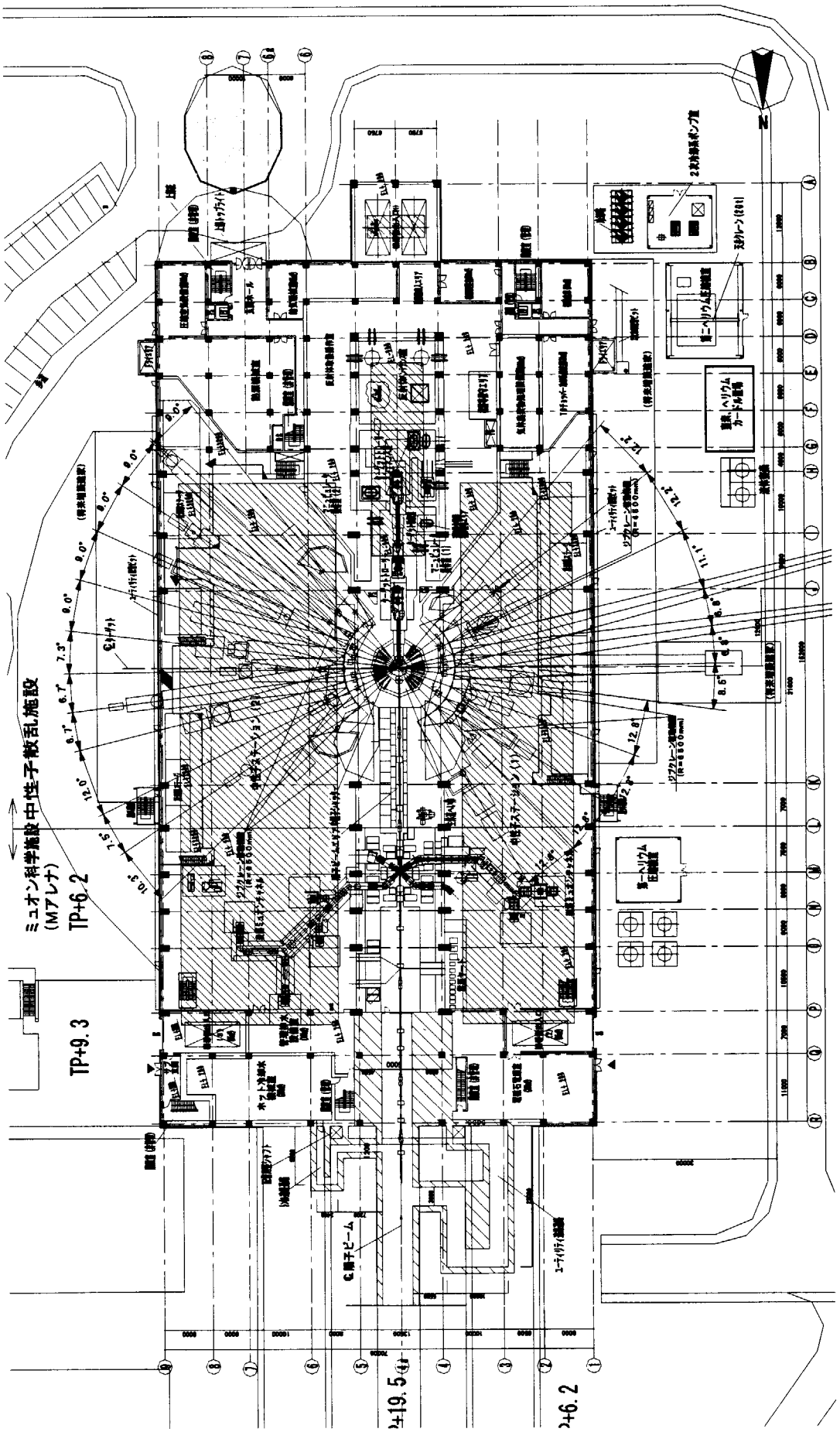


Fig.2.6-11 Plane view of Materials and Life Science Facility

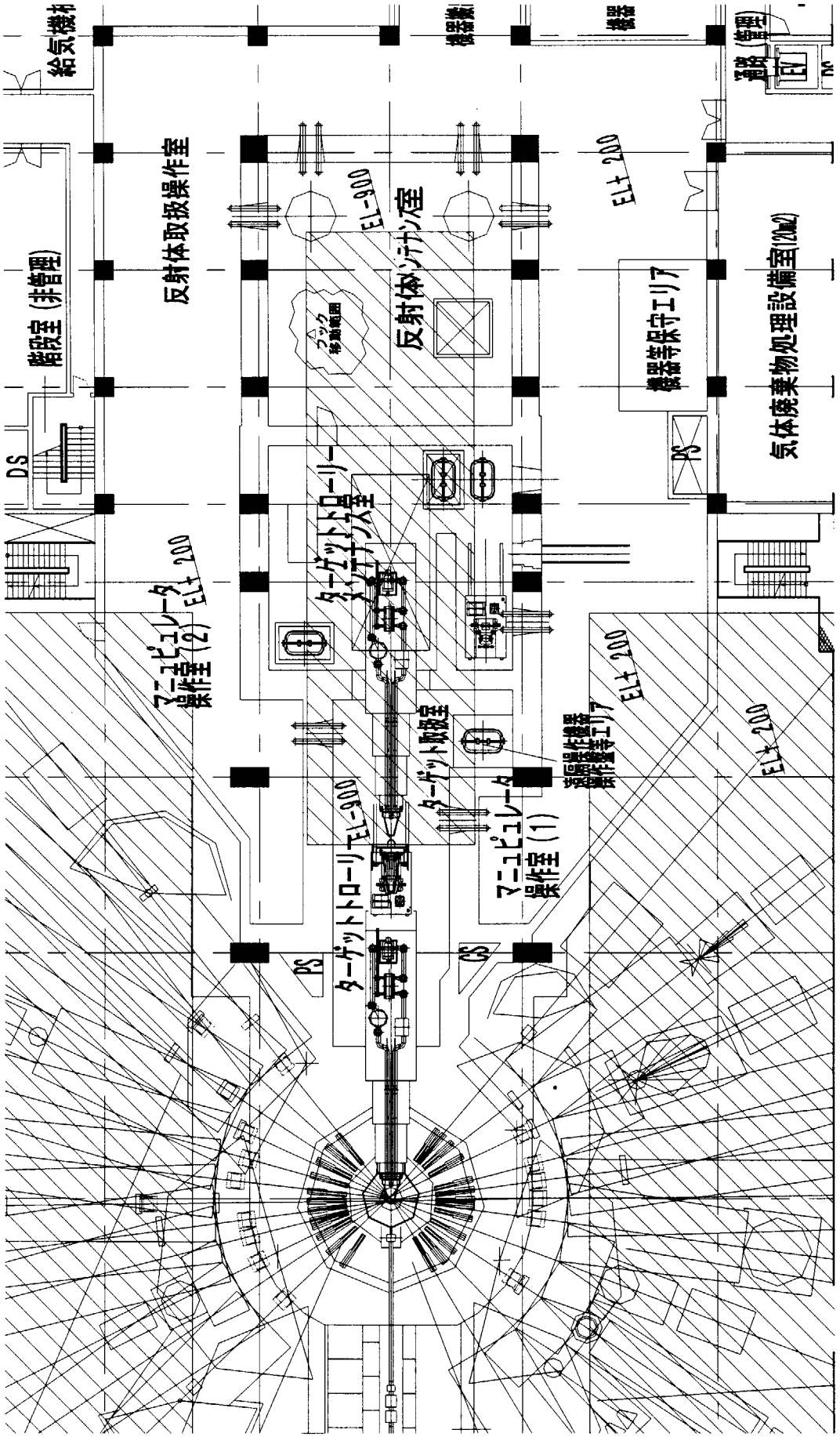
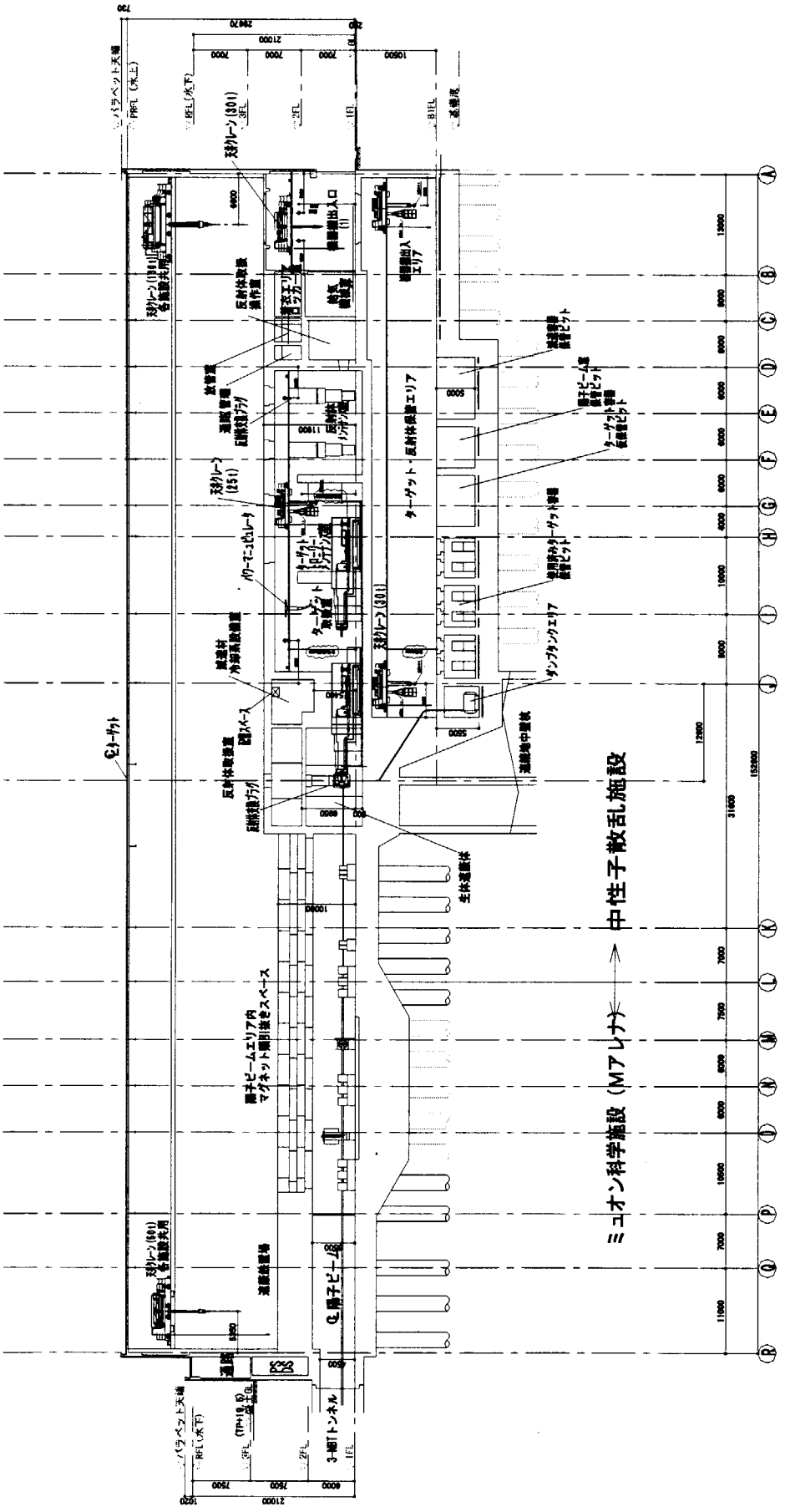


Fig.2.6-12 Plane view of Hot Cell at 1F of Materials and Life Science Facility



④a 通り断面図

Fig.2.6-13 Cross Section of Materials and Life Science Facility

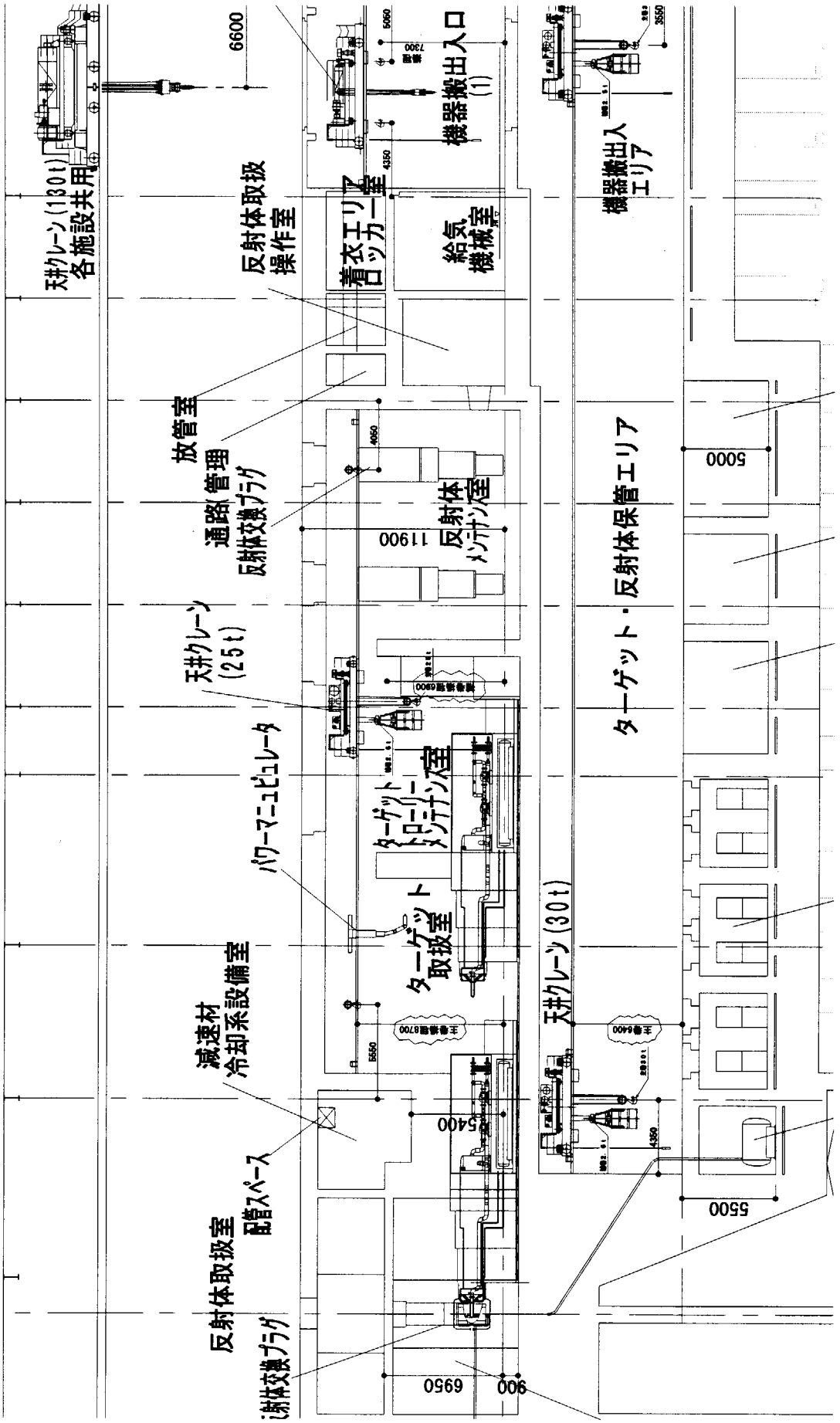


Fig.2.6-14 Cross Section of Hot Cell

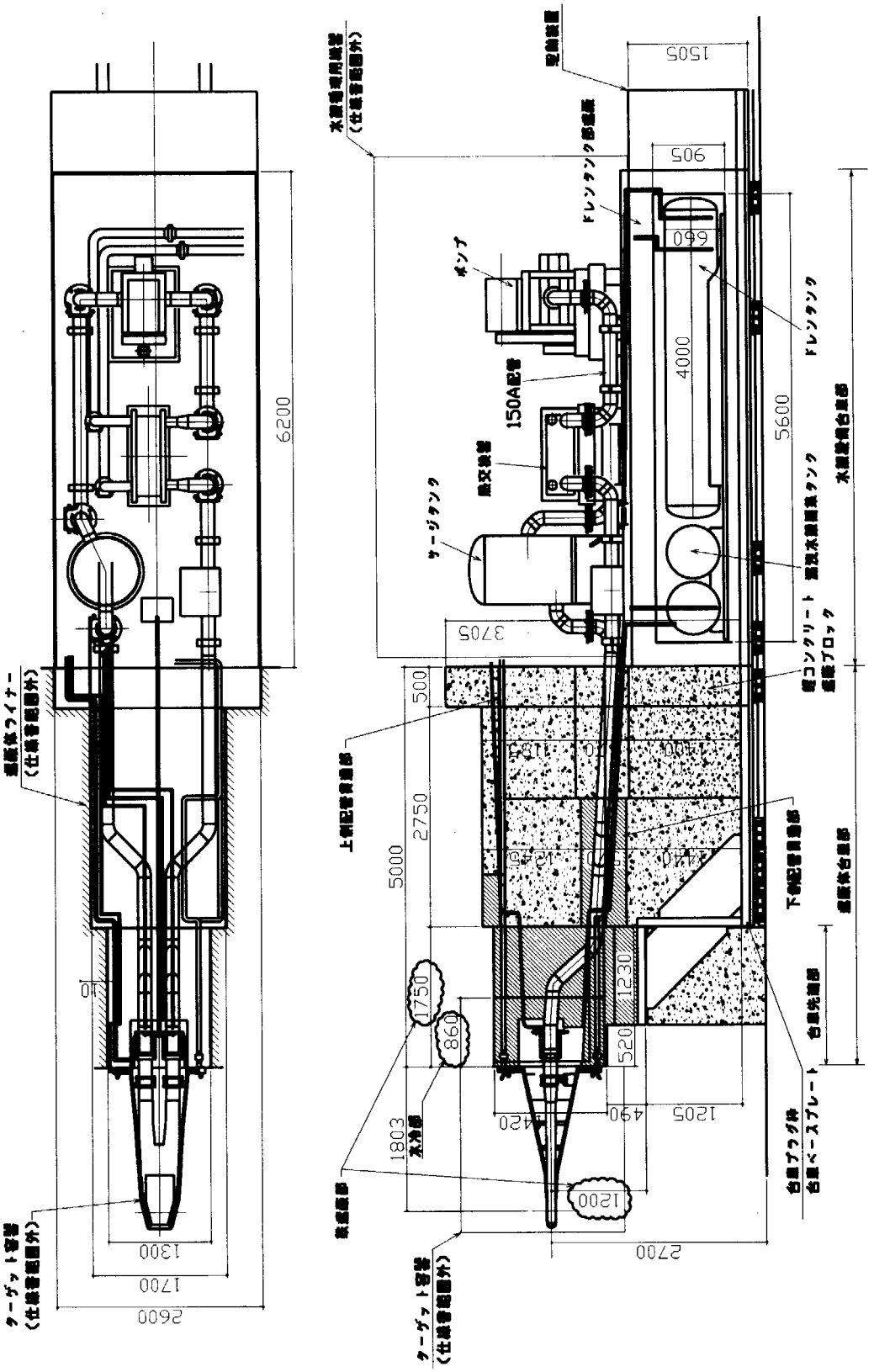


Fig.2.6-15 Outer View of the Target Trolley

２．６．５．マスタースレーブマニピュレータ

２．６．５．１　概要

マスタースレーブマニピュレータ（MS マニピュレータ）は、ターゲット取扱室等において遮蔽窓越しに操作員による遠隔手動操作により各種遠隔ハンドリング作業を行うためのものである。作業は、必要に応じてインセルクレーン、天井走行型パワーマニピュレータと協調して行う。代表的な作業は以下の通りである。

①使用済ターゲット容器保管容器（以下、保管容器と呼ぶ。）蓋のボルト締め、ボルト開放（ターゲット取扱室のみ）

②ターゲットトロリー（以下、トロリーと呼ぶ。）接続配管の取外し、取付け（ターゲット取扱室のみ）

③ターゲット容器交換台車（以下、交換台車と呼ぶ。）搭載機器の取替え（ターゲット取扱室のみ）

④インセルクレーンフック取付け,取外し（共通）

⑤保管容器汚染検査補助（ターゲット取扱室）

⑥配管切断作業補助（放射化機器取扱室　B2F）

⑦モデレータ交換時の固定ボルト締め･緩め作業の補助（反射体取扱室　1F）

Fig.2.6-21に示すようなMSマニピュレータをメンテナンスする際の専用の架台を合わせて製作する。また、設備の設置を行うための貫通スリーブについては、建築時の設置壁コンクリート打設前に設置する。また、設置する際に必要な遮蔽がとれていることを遮蔽計算によって確認する。遮蔽厚さに関しては普通コンクリート換算で貫通部長さ相当とする。

２．６．５．２　機器の仕様

①マニピュレータ本体

(1) 型式　：非気密型 電動駆動付マスタースレーブマニピュレータ
(2) タイプ　：　フルバランスタイプ（３分割タイプ）
(3) エクステンドリーチ：　手動＋電動
(4) 電動操作　：　X、Y、Z　３軸
(5) モーションロック　：　X、Y、Z軸　ワンロック
　　旋回、ねじり、あおり、ハンド開閉動作ロック付き
(6) 主要材質　：　アルミニウム合金
(7) 取扱重量　：　約 20kg
(8) ﾏｽﾀｰﾊﾝﾄﾞﾙ型式　：　ハンドグリップ
(9) 遮蔽厚さ　：　1400mm～1500mm
(10) トング　：　遠隔交換型
(11) ロードフックによる垂直吊上げ荷重：　約 45kg
(12) 動作範囲　：　Fig.2.6-20
　　①アーム左右動作（X）手動：∞

電動：±30°

②アーム前後動作（Y）手動：＋70°

電動＋手動：＋90°、-22°

③アーム上下動作（Z）ﾏｽﾀｰｱｰﾑ側　アーム長：1370mm

手動：　955mm

ｽﾚｰﾌﾞｱｰﾑ側 アーム長：1370mm

手動：　995mm

電動：　988mm

④アーム旋回動作（腕部）　：±176°

⑤あおり動作（手首）　：＋30°、－110°

⑥ねじり動作　：360°以上

⑦指先開閉幅　：最大 90mm

(13) 寸　法　：　Fig2.6-19 参照

(14) 使用環境

雰囲気ガス　：　空気

温度　：　常温

湿度　：　20～80％（結露なきこと）

放射線　：　最大 $1x10^3$Sv/h（使用済ターゲット容器表面）

(15) 保守方法　：　一体引抜及び３分割型引抜き

(16) 数　量（左右１対のマニピュレータで１組とする）：15 組

・ターゲット取扱室（１Ｆ）　：2 組

・ターゲット台車取扱室（１Ｆ）　：2 組

・反射体取扱室（１Ｆ）　：5 組

・放射化機器保管設備室（Ｂ１Ｆ）　：2 組

・放射化機器取扱室（Ｂ２Ｆ）　：2 組

・放射化機器保管設備室（Ｂ２Ｆ）　：1 組

・予備品　：1 組

※1F、B1F 及び B2F の具体的な設置位置をそれぞれ Fig.2.6-16～18 に示す。また、参考として操作用窓の設置位置及び仕様を Table2.6-2 に示す。

②附属品

(1) MS マニピュレータ設置用貫通スリーブ

型　式：　ＭＳマニピュレータ用貫通スリーブ

形　状：　Fig.2.6-20 参照

数　量：　28 台

材　質：　ステンレス鋼

サイズ：　内径 254mm　外形　274mm

（両端に幅約 30mm、厚さ約 10mm のフランジを溶接）

長さ設置部壁厚さに準ずる

（1,500mm:18 ヶ所、　1,400mm：10 ヶ所　）

(2)ブーツ
　型　　式　：　スリーブ部固定気密型
　交換方法　：　操作室側からの遠隔交換
　数　　量　：　３０本
(3)メンテナンス架台
　型　　式　：　ＭＳマニピュレータメンテナンス架台
　形　　状　：　Fig2.6-21 参照
　数　　量　：　３台（各階１台）
　キャスター：　キャスター有り（ストッパー付き）
　材　　質　：　ステンレス鋼もしくは鉄鋼（表面防錆塗装）
(4) マニピュレータ交換架台
　型　　式　：　電動昇降式
　形　　状　：　Fig.2.6-22 参照
　数　　量　：　１台
(5)ブーツ交換治具
　型　　式　：　スリーブ固定型
　数　　量　：　２基（1400mm 用及び 1500mm 用）
(6)トング交換治具
　型　　式　：　トング及び爪 遠隔交換式
　数　　量　：　５台
(7)スレーブアーム固定治具
　型　　式　：　スレーブアーム固定用
　数　　量　：　２台
　用　　途　：　スレーブアームのＹモーション振り上げに使用。
(8)ハンド工具（ドライバー、ニッパー等）
　型　　式　：　トング保持型
　種　　類　：　ドライバー　＋，－　大，中，小　計６個
　　レンチ類　　Ｍ８，M10，M11，M12，M13，M14，M15，M16，M18，M20，M22，M24　計 12 個
　　ナイフ　　１個
　　ニッパー　１個
　　はさみ　　１個
　　ペンチ　大,中,小　計３個
　数　　量　：　５セット
(9)メンテナンス工具
　型　　式　：　マニピュレータ保守用
　数　　量　：　２式

③スペアーパーツ
マニピュレータ総数の 10%の予備品（1 年分）。
※金属ﾃｰﾌﾟ、ｹｰﾌﾞﾙ、ﾌﾟｰﾘ、爪等

Table 2.6-2 Specification and Location of Window for Operation of M-S Manipulators

設置室名	接続するホットセル 及び高レベル区域	室内 位置	数	幅 [m]	高さ [m]	厚さ* [m]	設置高さ (中央位置)	備考
マニピュレータ操作室1F	ターゲット取扱室	東側	1	1.5	1.2	1.5	1F+1.6	M-Sマニピュレータ操作用
マニピュレータ操作室1F	ターゲット取扱室	西側	1	1.5	1.2	1.5	1F+1.6	M-Sマニピュレータ操作用
マニピュレータ操作室1F	ターゲット台車取扱室	東側	1	1.5	1.2	1.5	1F+1.6	M-Sマニピュレータ操作用
マニピュレータ操作室1F	ターゲット台車取扱室	西側	1	1.5	1.2	1.5	1F+1.6	M-Sマニピュレータ操作用
マニピュレータ操作室1F	反射体取扱室	東側	1	1.5	1.2	1.4	1F+2.95	M-Sマニピュレータ操作用
マニピュレータ操作室1F	反射体取扱室	南側	2	1.5	1.2	1.4	1F+0.9	M-Sマニピュレータ操作用
マニピュレータ操作室1F	反射体取扱室	西側	1	1.5	1.2	1.4	1F+1.3	床遮蔽ハッチ部監視用
マニピュレータ操作室1F	反射体取扱室	西側	1	1.5	1.2	1.4	1F+2.95	M-Sマニピュレータ操作用
マニピュレータ操作室B1F	放射化機器保管設備	東側	1	1.5	1.2	1.5	操作室 F+1.5	ターゲット保管容器つり下げ位置 M-Sマニピュレータ操作用
マニピュレータ操作室B1F	放射化機器保管設備	東側	1	1.5	1.2	1.5	操作室 F+1.5	反射体等つり下げ位置 M-Sマニピュレータ操作用
マニピュレータ操作室B2F	放射化機器保管設備	南側	1	1.5	1.2	1.5	操作室 F+1.5	M-Sマニピュレータ操作用
マニピュレータ操作室B2F	切断ワークエリア	北側	2	1.5	1.2	1.5	B2F+1.5	M-Sマニピュレータ操作用

＊厚さに関しては普通コンクリート相当厚さとする

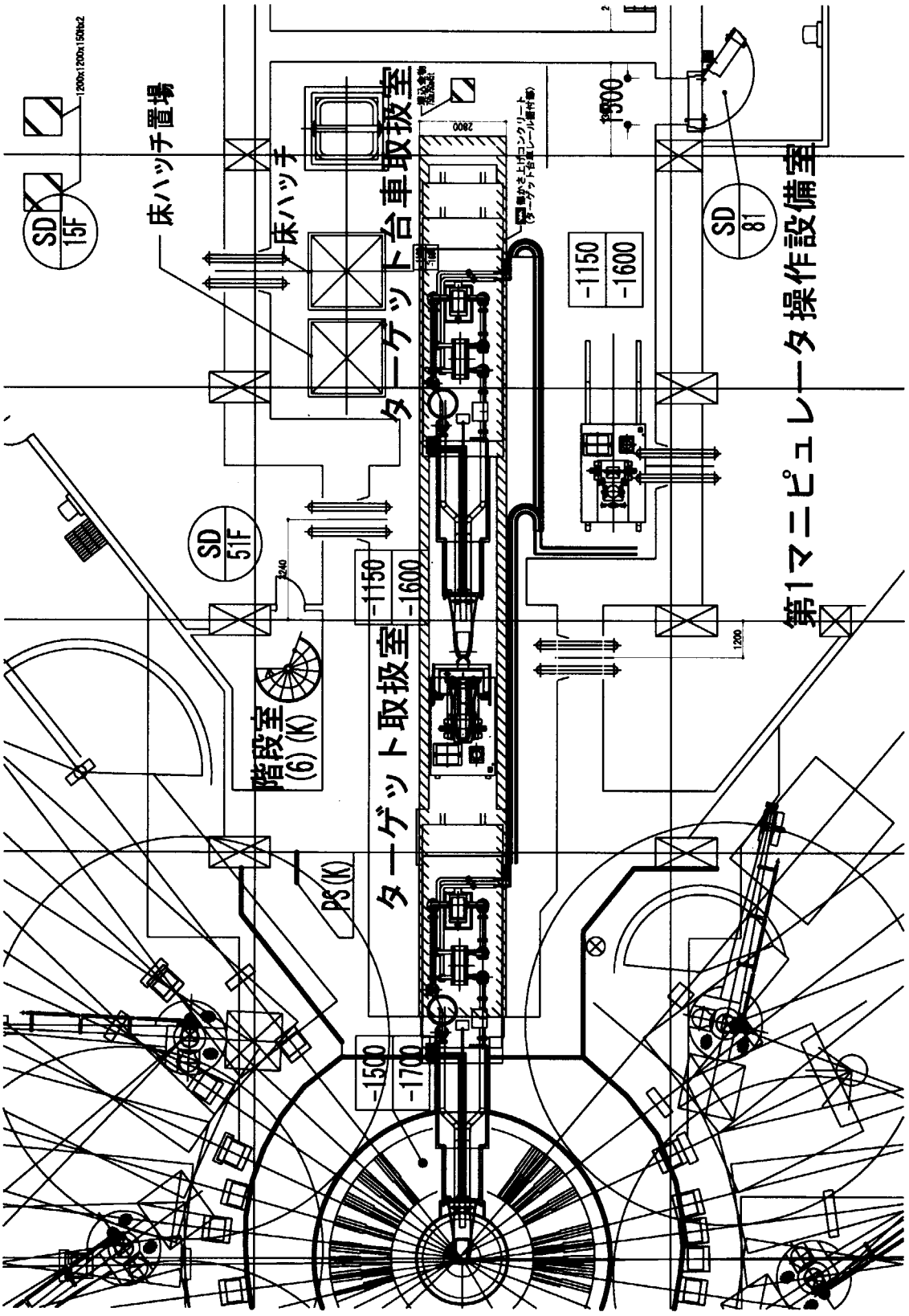


Fig.2.6-16 Location of M-S Manipulators at 1F Hot Cell

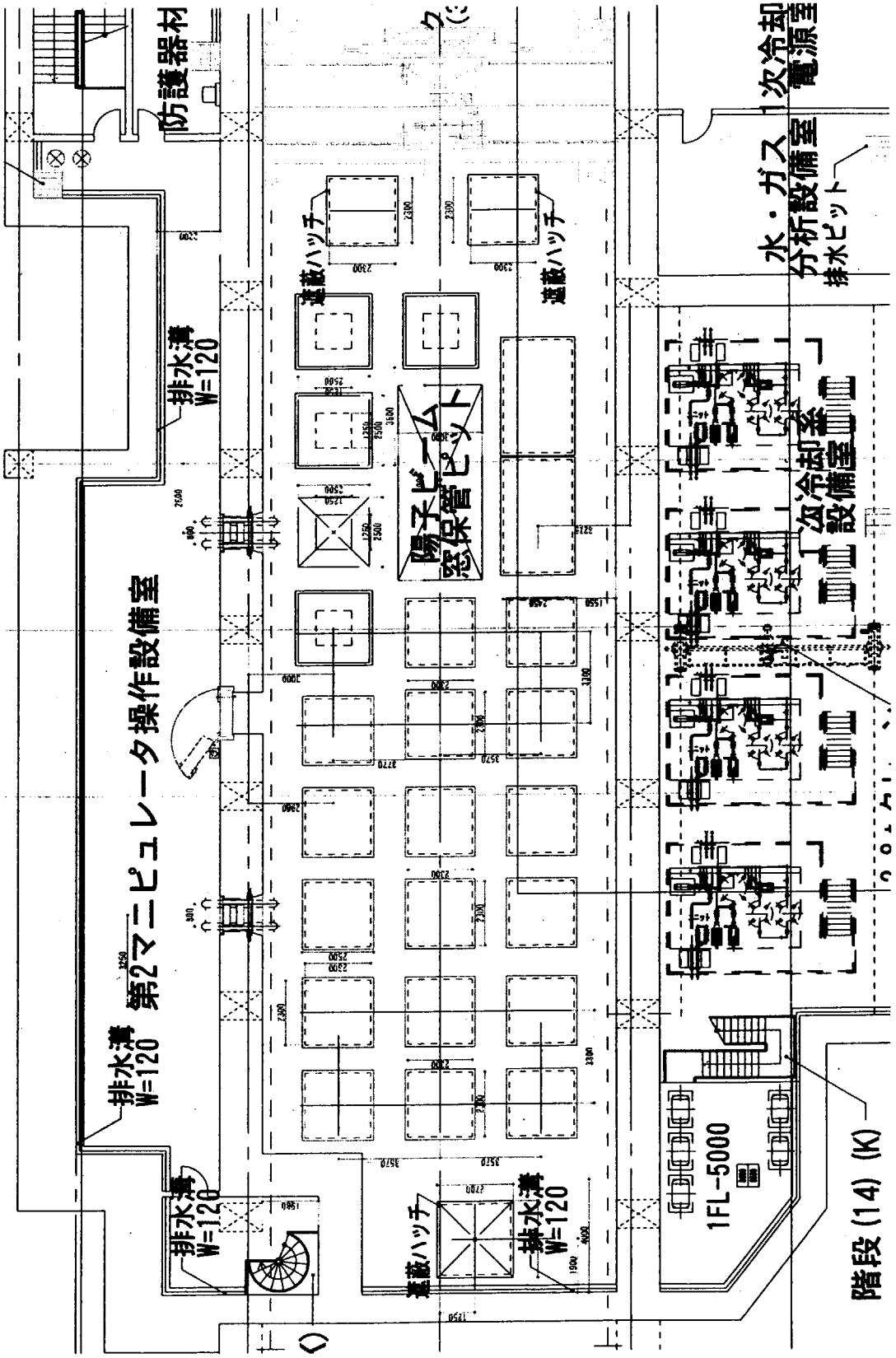


Fig.2.6-17 Location of M-S Manipulators at B1F

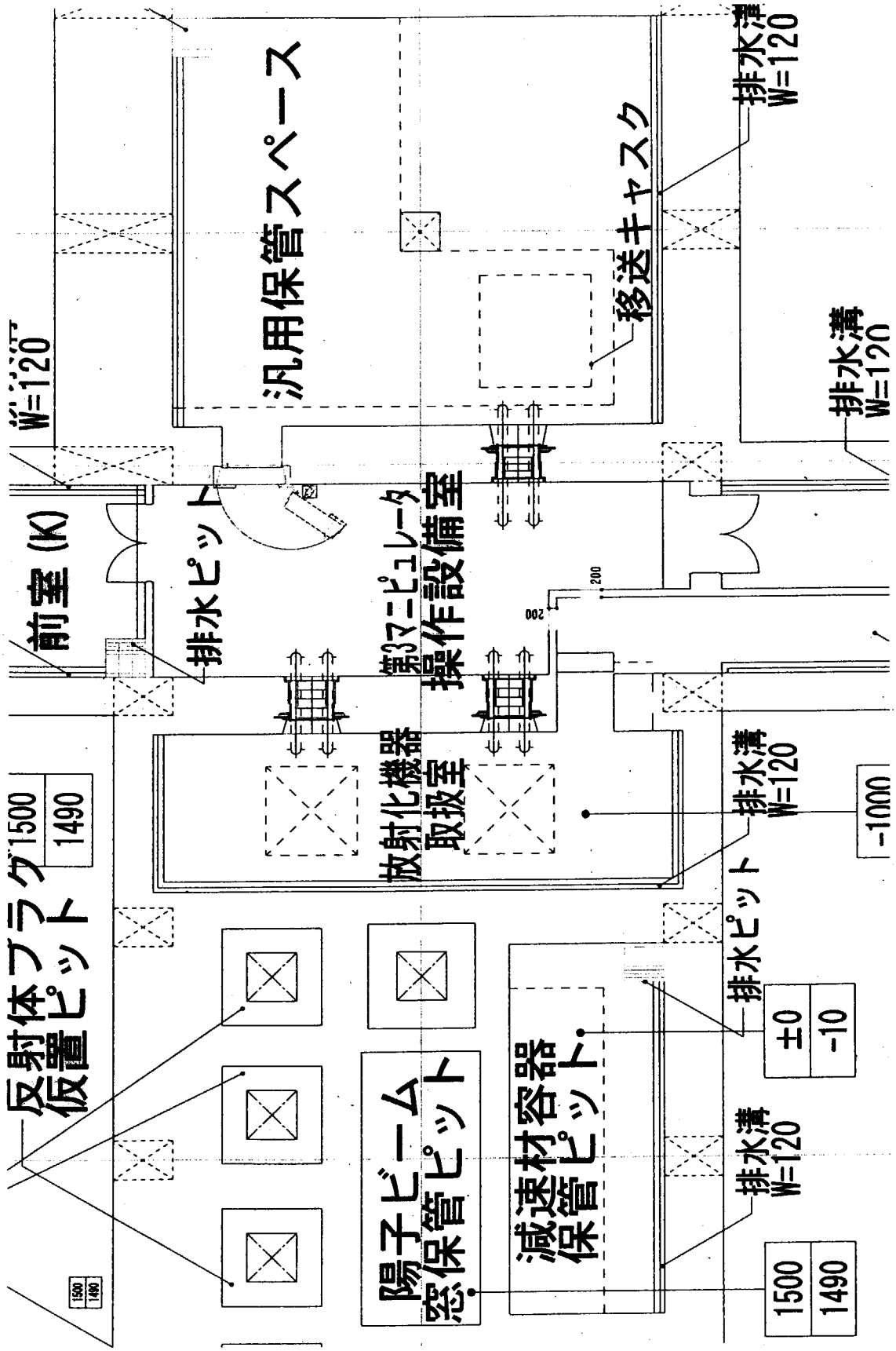
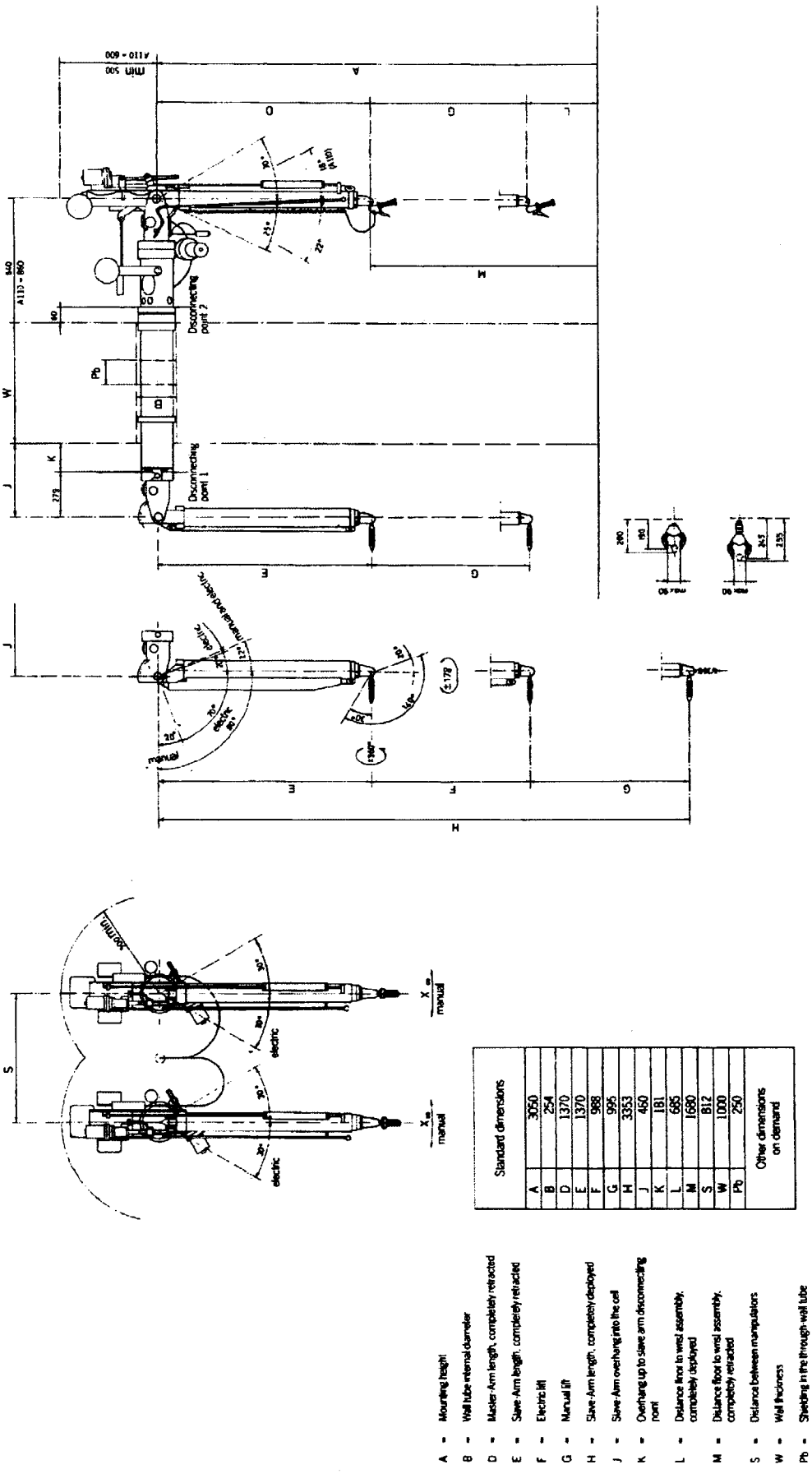


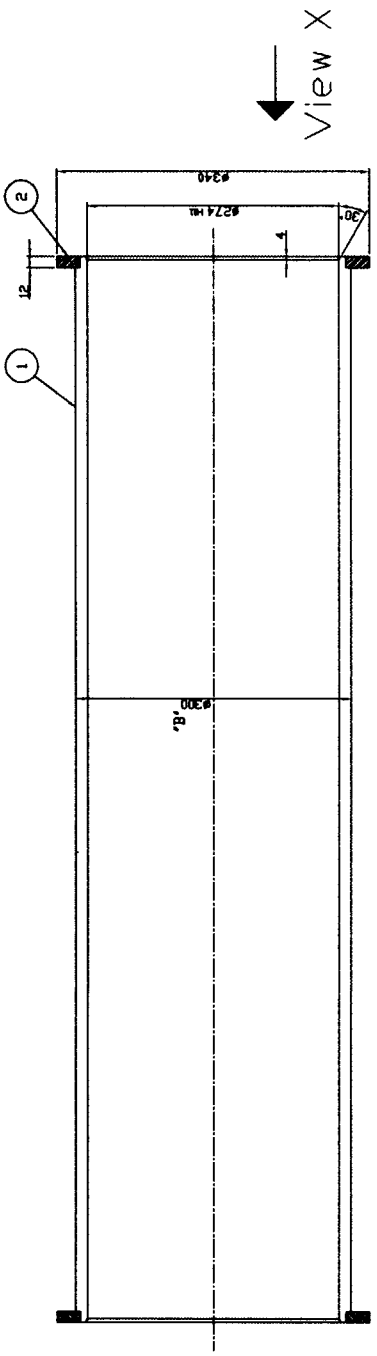
Fig.2.6-18 Location of M-S Manipulators at B2F



Standard dimensions	
A	3050
B	254
D	1370
E	1370
F	988
G	996
H	3353
J	460
K	181
L	685
M	1680
S	812
W	1000
Pb	250
Other dimensions on demand	

A = Mounting height
B = Wall tube internal diameter
D = Master-Arm length, completely retracted
E = Slave-Arm length, completely retracted
F = Electric lift
G = Manual lift
H = Slave-Arm length, completely deployed
J = Slave-Arm overhang into the cell
K = Overhang up to slave arm disconnecting point
L = Distance floor to wrist assembly, completely deployed
M = Distance floor to wrist assembly, completely retracted
S = Distance between manipulators
W = Wall thickness
Pb = Shielding in the through-wall tube

Fig.2.6-19 Size and Operation Region of M-S Manipulator



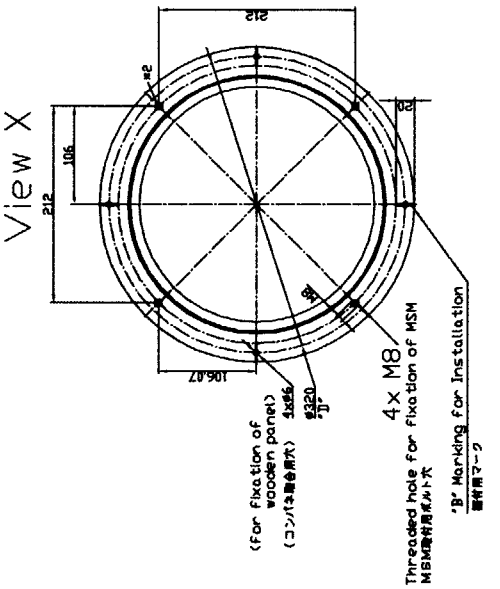


Fig.2.6-20 Penetration Sleeve to set the M-S Manipulator

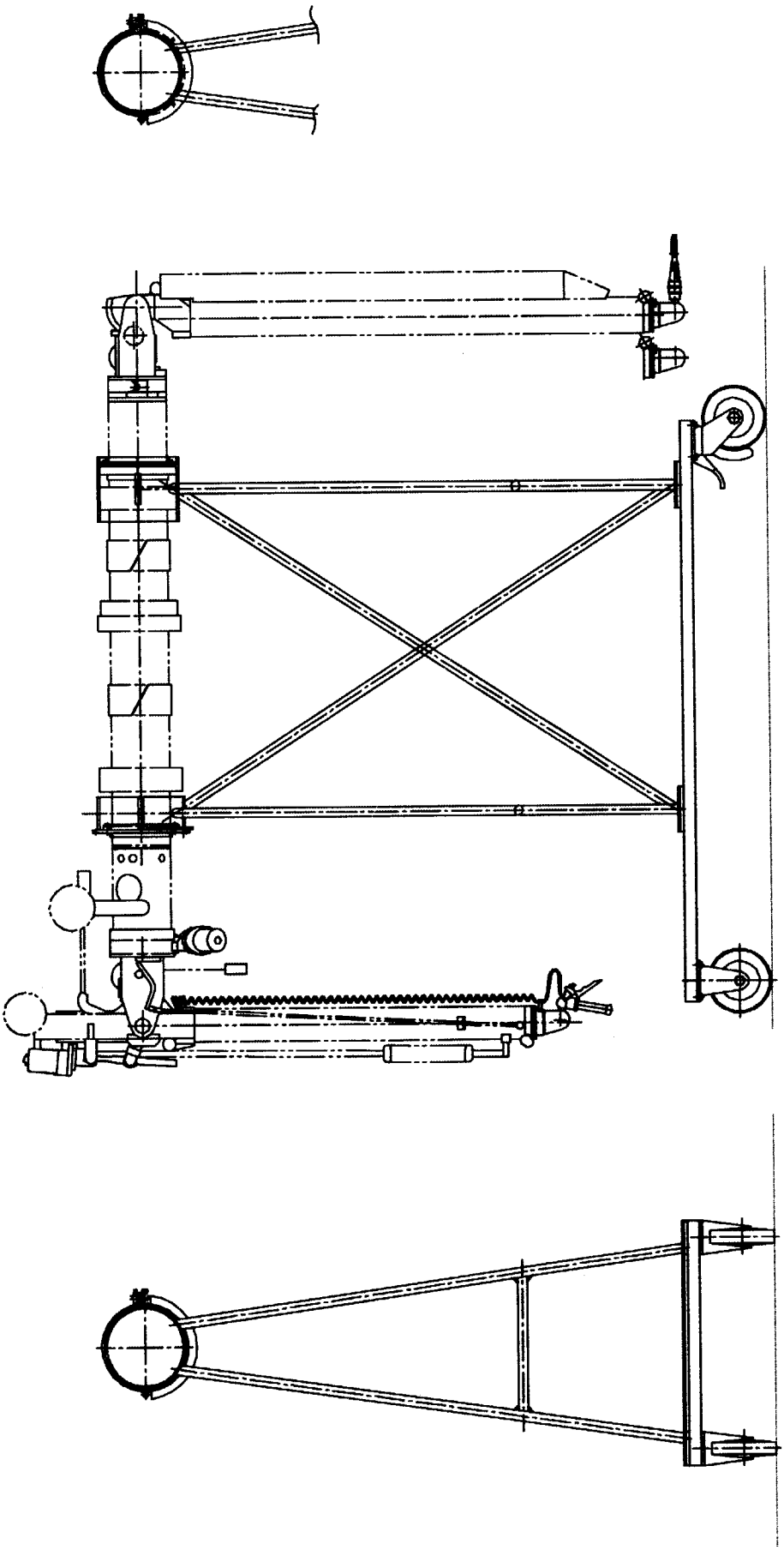


Fig.2.6-21 Maintenance Stand for the M-S Manipulator

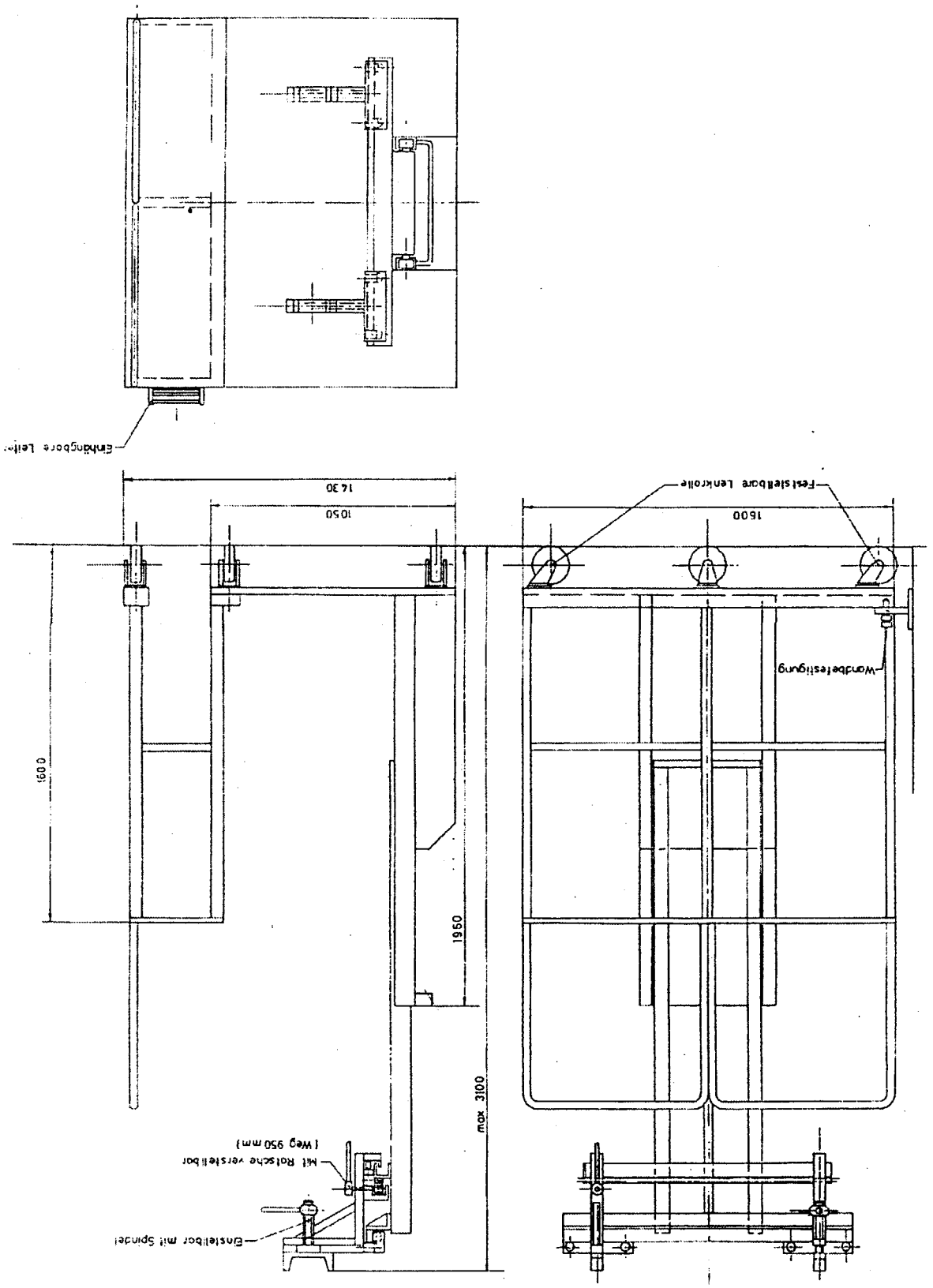


Fig.2.6-22 Replacement Stand for the M-S Manipulator

２．６．６　反射体等遠隔操作機器

２．６．６．１　機器設計における前提条件

反射体等遠隔操作機器で対象となる機器は、反射体、３台の減速材（結合型、非結合型及びポイゾン型）、陽子ビーム窓、ミュオンターゲットである。これら機器の交換作業に関わる前提条件を以下に示す。

（１）対象機器へのアクセス：垂直上方向。

（２）対象機器の水冷配管等の着脱：一部ハンズオンによる作業。

（３）対象機器の取り出し及び搬送：大型機器取扱室で移送キャスクを用いた搬送、搬送には大型機器取扱室内の 130ton クレーンを用いる。

（４）対象機器水冷配管内部乾燥：水冷配管を切断し減容化するために行う作業

（５）対象機器の交換作業：フル遠隔操作による作業。

基本的な交換作業の流れは、交換対象機器を反射体取扱室（ホットセルと呼ぶ）に遮蔽機能を持った移送キャスクを用いて搬送し、ホットセル内で遠隔操作機器を用いて交換作業を行うことである。交換作業に利用する機器を Table 2.6.6.1-1 に示す。配管の着脱装置及び移送キャスクの外部を除いた機器の耐放射線性を 10^5Gy としている。最も高い線量をもたらす減速材や反射体から 1m 離れた場所で約１ヶ月の集積線量に相当する。少なくとも、１ヶ月以内に対象機器のメンテナンス作業を終えなくてはならないことを意味する。必要に応じて大型取扱室内の 130ton クレーンやホットセル内のインセルクレーン（20ton）やマスター・スレーブマニピュレータ及びパワーマニピュレータを用いる。

移送キャスクに格納する前に交換対象機器の接続部の解除を行う必要があるが、機器の運転設置場所へのアクセスは、垂直上方向からのアクセスを前提とする。対象機器を取り出すために、対象機器の水冷配管や熱電対等の計装線、水素輸送配管の着脱をする。特に、水素輸送配管の着脱については、構造上人手による作業が不可欠である。そのため、着脱作業を行う場所の空間線

Table 2.6.6.1-1 Maintenance device of used components

Device	Purpose	Location
Transfer cask	Transfer of components	High bay
Water pipe handling device	Disconnection/connection of water pipe	Hot cell
Whole assembly support device	Supporting of whole assembly (Moderators-reflector-reflector plugs)	Hot cell
Inner assembly support device	Supporting of inner assembly (decoupled and poisoned moderator with inner plug)	Hot cell
Moderator exchange device	Exchange of moderator, proton beam window and muon target	Hot cell
Pipe cutter device	Water pipe cutting of moderator, reflector, proton beam window and muon target	Hot cell
Water dry up device	Drying up of water pipe of used components	Dry up room

量を 100μSv/hr (ベリリウム(^{7}Be)の寄与を除く)としている。空間線量を高くするものとして水冷配管内に蓄積する ^{7}Be による寄与がある。^{7}Be からの線量寄与の見積もりは一般に難しい。配管中に分布する ^{7}Be の予測が困難であるからである。5000 時間の運転で減速材容器の冷却水中に発生する ^{7}Be は約 TBq となる。例えば、その ^{7}Be が 80m の水冷配管中に均一に分布すると仮定し、配管周りの線量評価を行った結果を Fig. 2.6.6.1-1 に示す。この様に配管側の作業では、人は ~mSv/hr 以上の線量を受ける。SNS（米）における配管周りの線量評価でも同様な値を与えている。前述した様に ^{7}Be の配管中の挙動を正確に把握することが困難であり、評価結果の妥当性に問題がある。しかしながら、現状の設計では、現実に高い線量空間となった場合でも対処出来る様、遠隔操作で水冷着脱を行う設計を行っている。

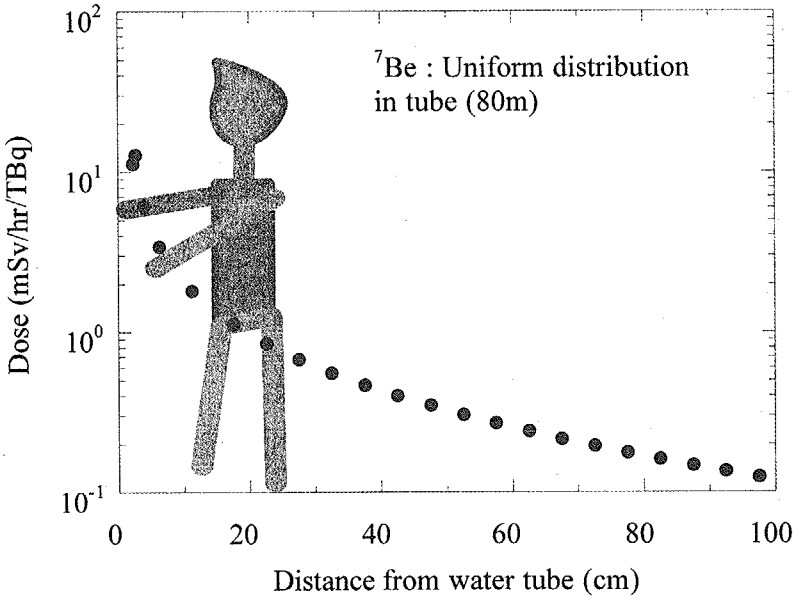


Fig. 2.6.6.1-1 Dose distribution from ^{7}Be around water pipe

２．６．６．２　移送キャスク

対象機器を取り出し反射体取扱室に搬送するために移送キャスクを用いる。移送キャスクの設計に関わる表面線量率は、対象機器を格納した状態で 1mSv/hr 以下としている。移送キャスクの表面線量率を高くする要因は、反射体や非結合型及びポイゾン型減速材でライナーやデカップラとして用いている Ag-In-Cd 合金から発生する ^{110m}Ag である。約 6MeV のγ線を出す核種のためキャスクの Fig. 2.6.6.2-1 に示す最大 30cm の遮蔽厚を必要とし、最も重い重量となる減速材・反射体・反射体プラグを格納した状態でキャスク重量が 120ton を越える。そのため、移送キャスクを搬送するために大型取扱室内に 130ton のクレーンを設置している。

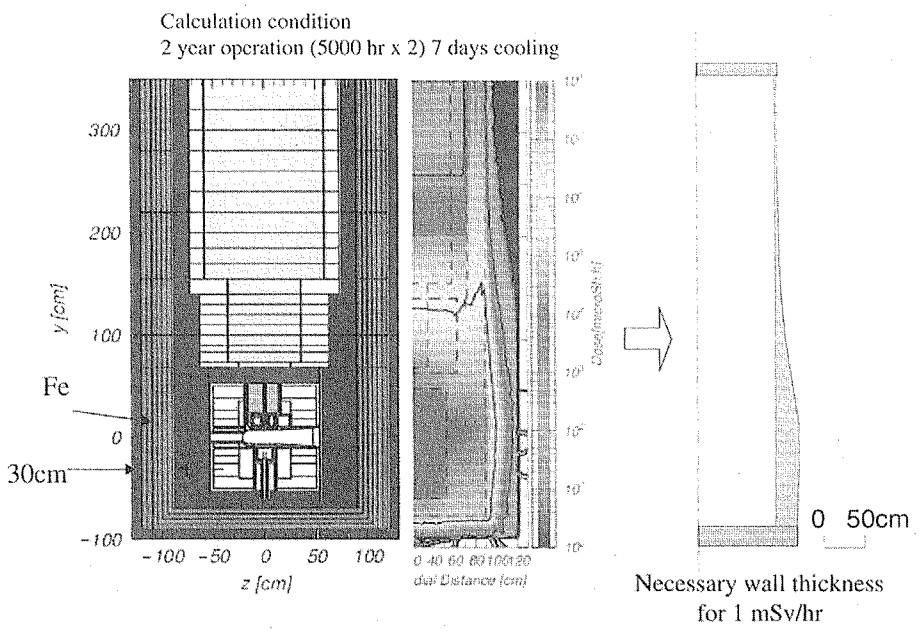


Fig. 2.6.6.2-1 Necessary cask wall thickness for 1 mSv/hr

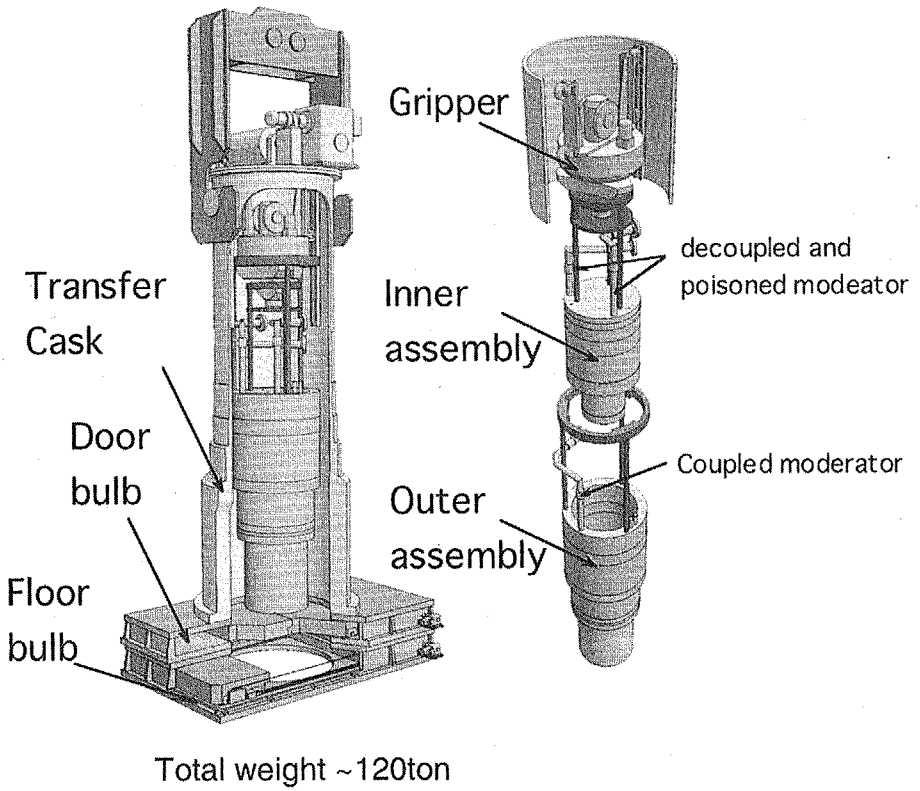


Fig. 2.6.6.2-2 Structure of transfer cask

移送キャスク内への対象機器の格納は遠隔操作で行う。移送キャスクの特長は、Fig. 2.6.6.2-2 に示す非結合型及びポイゾン型減速材の接続した内部プラグを選択的に取り出せるグリッパ方式に

ある。故障率の高いと考えられる減速材を容易に取り出せる構造は、メンテナンスの効率化につながる。キャスクにはドアバルブを設け対象機器搬送時、下部遮蔽の機能を有する。移送キャスクは、床上遮蔽体上に設置する。床上遮蔽体は、移送キャスクの固定と移送キャスクが移動した後の対象機器の設置場所やホットセルからのγ線を遮蔽する機能を持つ。

２．６．６．３　反射体取扱室内遠隔操作機器

反射体取扱室内機器は、外部プラグ及び外部プラグ受け台、減速材交換装置及び配管切断装置からなる。対象機器のメンテナンスはすべて遠隔操作にて行う。交換作業はすべてこれらの機器で行えるわけではない。作業の補助としてパワーマニピュレータやマスター・スレーブマニピュレータ及びインセルクレーンを用いる。それぞれの機器の機能を次に示す。

（１）　外部プラグ受け台

反射体取扱室内に移送された、一体化された減速材-反射体-反射体プラグを支持し、結合型減速材及び反射体の交換を行う装置である。水平面内で回転する機構、反射体交換のためのボルトの着脱、及び切離した反射体を受ける機構を有する。結合型減速材の交換は、減速材等交換装置が外部プラグ受け台に寄付いてきて着脱の作業を行う。

（２）　内部プラグ受け台

専用のアタッチメントを付替えることにより反射体取扱室内に移送された減速材-反射体内部プラグ、陽子ビーム窓またはミュオンターゲットを支持し、非結合型及びポイゾン型減速材、陽子ビーム窓または、ミュオンターゲットの交換作業を行う装置である。水平面内で回転する機構を有する

（３）　減速材等交換装置

取扱い機器に対応した専用の交換用アタッチメントを取付け、減速材、陽子ビーム窓または、ミュオンターゲットの交換及び切断に関わる装置である。取扱機器の把持、上下、左右、回転の機構を有する。

（４）　配管切断装置

減容化を目的として乾燥済み減速材、反射体、陽子ビーム窓及びミュオンターゲット水冷配管の切断を行うもの。切断最大外径として直径約 90mm の多重容器配管を切断するため油圧を用いた切断で設計を行っている。切断は、密閉系ではなく開放形で行う。

ホットセルの中で減速材等交換装置は、外部プラグ受け台及び内部プラグ受け台の間に配置される。Fig. 2.6.6.3-1 に反射体交換に関わるメンテナンス作業中の一例を示す。一体の減速材-反射体-反射体プラグが移送キャスクより外部プラグ受け台に吊り降ろし固定し、それから非結合型及びポイゾン型減速材付きの内部プラグを取り出した後に、外部プラグ受け台から結合型減速材を取り出している図を示す。反射体の交換は、それから反射体を切り離した後、外部プラグを移送キャスク内につり込み。インセルクレーンを用いて新規及び使用済みを入れ替え、その後、逆の手順で行う。配管切断装置の概念を Fig. 2.6.6.3-2 に示す。

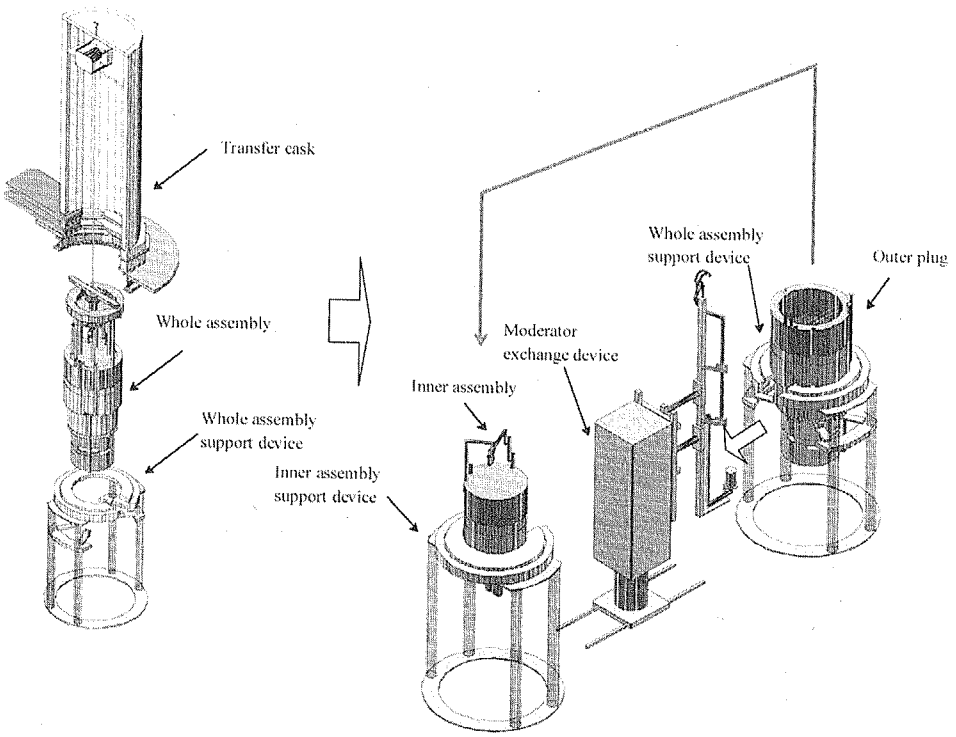


Fig. 2.6.6.3-1 Example of maintenance work in hot cell

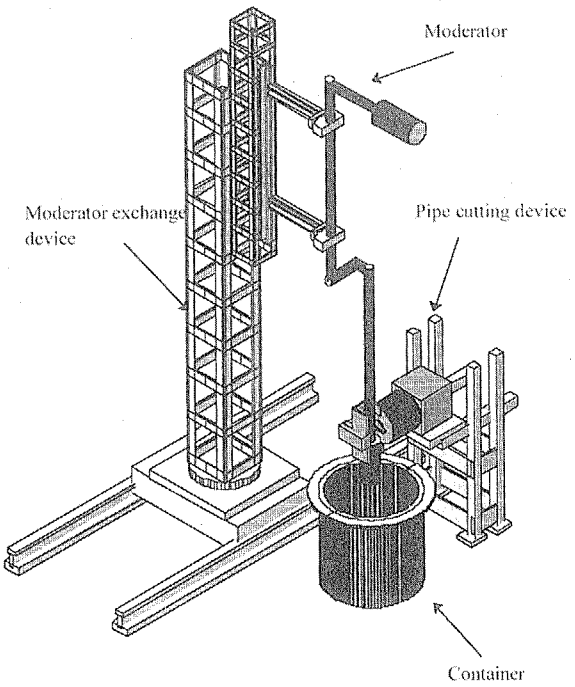
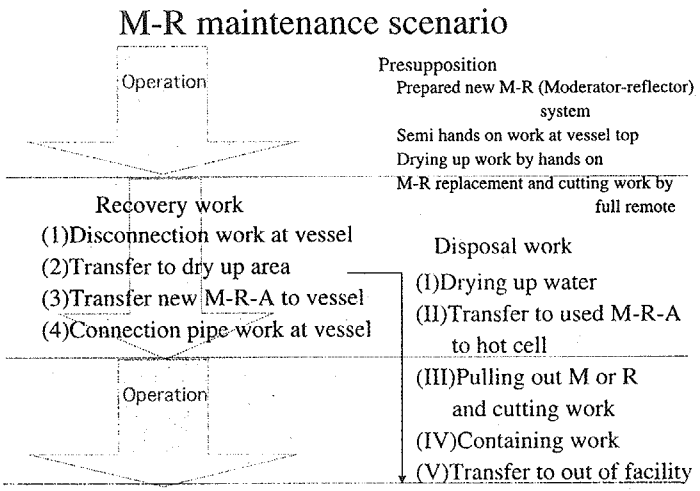


Fig. 2.6.6.3-2 Conception of cutting device

２．６．６．４　反射体遠隔操作シナリオ

前述した機器を用いたメンテナンスシナリオ概念を Fig. 2.6.6.4-1 に示す。どの使用済み機器においてもほぼ同様なメンテナンスシナリオとなる。ここでは減速材の交換シナリオについて記述する。メンテナンスを行う前に、ホットセル内に新しい減速材-反射体-反射体プラグ一式を準備

していることが前提条件である。メンテナンスシナリオは主に、運転復帰に関わるものと使用済み機器の廃棄に関わる作業の２つに分かれる。



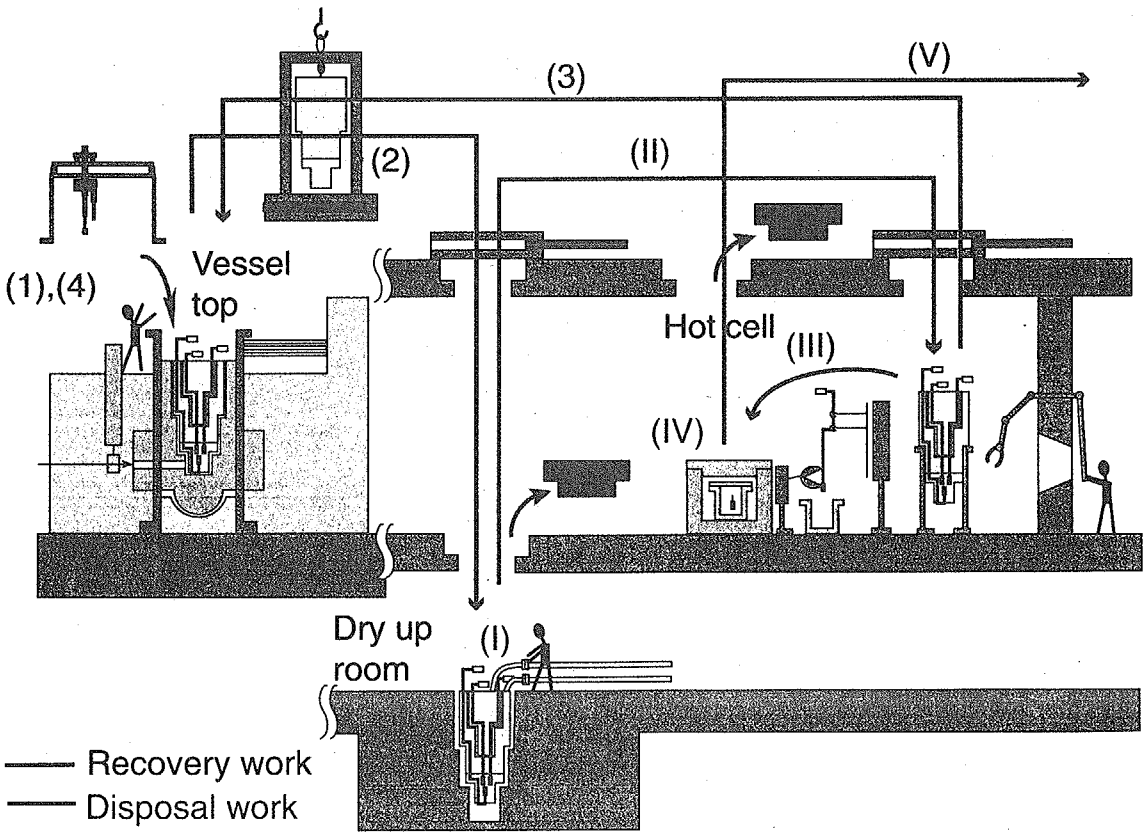


Fig. 2.6.6.4-1 Maintenance scenario of moderator-reflector

運転復帰に関わる作業では、

（１）　減速材-反射体の交換のために必要な水冷配管及び水素輸送配管の着脱作業

（２）　減速材-反射体-反射体プラグを移送キャスクを用いて乾燥室に搬送

（3） 新しい減速材-反射体-反射体プラグを移送キャスクを用いてベッセル上部に搬送

（4） ベッセル上部で水冷配管及び水素輸送配管の着脱作業

の後、接続部の漏洩試験や健全性試験を行い。ベッセル上部の遮蔽を戻し、通常運転に戻る。運転中に、使用済み機器の廃棄作業を行う。

(I) 使用済み機器の水冷配管中の乾燥作業

(II) 移送キャスクをもちいて反射体取扱室に搬送

(III) 減速材等交換装置を用いて減速材を取り出し、切断装置により切断

(IV) 気密容器に封入後キャスクに納め、運転終了後に施設外に搬送

の作業が廃棄作業に関わるシナリオとなる。

現在、これら遠隔操作機器の詳細設計を行っている。

２．７　放射化機器保管設備

２．７．１　設計方針

物質・生命科学実験施設で使用する水銀ターゲット容器を始めとする主要な機器は、高エネルギー陽子／中性子の照射により構造材が損傷を受けるため、それぞれの寿命に達する前に交換する。交換した機器は、高度に放射化しているため直ちに施設外に搬出することは出来ないため、施設内で一時保管する必要がある。放射化機器保管設備は、これら放射化機器の施設内一時保管設備として計画するものである。以下に、本設備の設計方針を示す。

(1) 保管対象機器

保管対象機器は、放射化レベルが高く直ちに施設外へ搬出することが不可能な機器、放射化水銀に汚染されている機器を対象とし、既存の所内廃棄物処理施設で保管廃棄や焼却処分が可能な固体廃棄物については保管対象としない。所内廃棄物処理施設で処分が可能な廃棄物の例としては、「新増設計画書作成に係る物質・生命科学実験施設の放射性廃棄物評価及び処理方法について」で示すようにフィルター、イオン交換樹脂、精製系フィルター等である。

本設備で保管対象とする機器は、次の通りとする。

a. 使用済水銀ターゲット容器
b. 減速材容器
c. 陽子ビーム窓（遮へいプラグと一体）
d. 反射体
e. 反射体プラグ
f. ミュオンターゲット（遮へいプラグと一体）
g. ミュオンスクレーパー
h. ピローシール（ミュオン）
i. 水銀循環系ポンプ、水銀熱交換器、他水銀循環系で使用し水銀に汚染されている機器・部品類
j. 中性子ビーム窓（フランジ付角型アルミ管）
k. シャッター内コリメータ（全長2m）
l. 陽子ビームラインモニタ（NMトンネル内設置のモニタ）外寸500 x 500 x 500mm

本施設内の陽子ビームラインダクトについては保管対象として想定しないが、長さが最大のもので6100mmであり、万一保管が必要な場合には地下の放射化機器保管設備室内に仮置き可能とする。放射化物の取扱は「東海研究所放射線安全取扱手引」に従って合理的に管理する。

(2) 保管対象外機器

本設備で保管対象としない機器は、次の通りとする。

a. 反射体内部プラグ（半永久的に使用することを想定）
b. 電磁石（専用ピットを反射体取扱室内に設けて保管）
c. シャッター（半永久的に使用することを想定）

万一、今後の設計の進捗により保管が必要な事態が生じた場合には、電磁石と同様に専用ピットを反射体取扱室内に設けて保管する。

d. 陽子ビームラインダクト（半永久的に使用することを想定）
性能向上等の理由により、放射化した陽子ビームラインダクトを保管する必要性が生じた場合には、地下の放射化機器保管設備室内に仮置き可能（全長6100mm）である。

(3) 保管設備容量

本設備で保管する機器の設備容量は、原則として約10年間（9～12年程度）に発生する機器を保管可能な容量とし、以下の通りとする。

a. 使用済水銀ターゲット容器 : 16～18体
b. 減速材容器 : 18体（3体 x 6回分）
c. 陽子ビーム窓（遮へいプラグと一体） : 9体
d. 反射体（反射体プラグと一体） : 4～5体
e. 反射体プラグ（反射体と一体） : 4～5体
f. ミュオンターゲット（遮へいプラグと一体） : 6体
g. ミュオンスクレーパー（2種類） : 各1体
h. ピローシール（ミュオン）（2種類） : 各6体
i. 水銀循環系ポンプ、水銀熱交換器、他水銀循環系で使用し水銀に汚染されている機器・部品類 : 一式（数量特定せず）
j. 中性子ビーム窓（フランジ付角型アルミ管） : 数体
k. シャッター内コリメータ（全長2m） : 数体
l. 陽子ビームラインモニタ（NMトンネル内設置のモニタ）外寸500 x 500 x 500mm : 4体

(4) 保管形態

本施設で保管する機器の保管形態は、次の通りとする。

a. 使用済ターゲット
密閉保管容器（遮へい機能無し）に収納して床下収納保管とし、上面には遮へいハッチを設ける。

b. 使用済減速材容器
配管部と一体で気中保管。床下収納とし、汎用の保管スペースにラックを設けて収納し必要に応じて遮へい蓋等を設ける。

c. 陽子ビーム窓
遮へいプラグと一体で保管（ビーム窓をプラグから外さない）。床下収納とし、汎用の保管スペースにラックを設けて収納する。遮へいプラグ付きであるため追加遮へいは原則として設けないが、汎用の保管スペースに保管するため必要があれば、遮へい蓋等を設ける。

d. 反射体及び反射体プラグ
反射体は外側反射体プラグと一体で保管。専用の掘り込みを設けて床下収納とし、

必要な遮へいハッチを設ける。

e. ミュオンターゲット

遮へいプラグと一体で保管。専用の掘り込みを設けて床下収納とする。遮へいプラブと一体のため遮へいハッチは不要であるが、必要に応じてカバー等を設ける。

f. スクレーパー、ピローシール

汎用の保管スペースに専用の遮へい容器を設置して、床下収納とする。必要な遮へいは遮へい容器に持たせるが、必要に応じて上部にカバー等を設ける。

g. 水銀循環系機器

汎用の保管スペースに必要な遮へい及び密閉対策を施して収納する。

h. 中性子ビーム窓、シャッター内コリメータ、陽子ビームラインモニタ

汎用の保管スペースに必要な遮へいを施して収納する。

なお、いずれの床下収納エリアについても結露を防止するために、換気を有するものとする。

(5) 入室制限、遮へい設計及び操作機器設計の考え方

a. 入室制限及び遮へい設計の考え方

機器がそれぞれの収納スペースに収納されている場合（取扱時以外）は、作業員の入室（立ち入り）が可能な遮へい設計とする。さらに、空気汚染の可能性を有する機器については容器に密閉する等の保管方法を取り、入室の際には空気呼吸器等の防護対策無しで入室できるようにする。

短時間の作業のための入室を想定して、入室する際の室内の空間線量率は100 μ Sv/h以下となるように遮へい設計を行う。ただし、実測に基づく遮蔽強化や室内作業の最適化で被曝線量を低く抑えるという対応が可能であることから、特に設計裕度や計算裕度を設けずに、遮蔽蓋の評価を行う。

なお、作業員が入室しない場合の空間線量率については制限を設けない。ただし、室外には作業監視等のための通路を設けているため、その場所における空間線量率が12.5 μ Sv/hを超えない遮へい壁を設ける。

b. 操作機器設計の考え方

室内に人の立ち入りを許す設計とするため、遮へいハッチ等への玉掛け等の作業は作業員が直接行うことを考慮に入れた取扱シナリオを検討する。検討の過程においてリモートハンドリング機器が必要な場合には、リモートハンドリング機器を設置する。

その場合には、低コストのマスタースレーブ（MS）マニピュレータを使用することを前提とし、MSマニピュレータで対応が不可能な場合には対応可能な設備の設置を考える（20トンの遮へいハッチを吊るためのスリング、ワイヤー等の玉掛け用器材がMSマニピュレータで操作可能かの検討要。不可能な場合には専用治具、機器等を用意する）。

以上(1)～(5)に示した設計方針に基づき、次に示す使用済水銀ターゲット容器保管設備を始め

とする主要な保管設備設計を実施した。Table 2.7.1-1 に保管対象放射化機器、交換頻度、保管容量、遮へい要求、機器概略寸法・重量一覧を示す。

① 水銀ターゲット容器保管設備
② 減速材容器保管設備
③ 陽子ビーム窓保管設備
④ 反射体保管設備
⑤ ミュオンターゲット保管設備
⑥ 減速材容器等切断設備
⑦ ターゲット容器搬出キャスク
⑧ 雑固体廃棄物保管設備

Table 2.7.1-1 Major components to be stored in a storage facility in the Materials and Life Science Experimental Facility Building

保管対象放射化機器 Irradiated component considered to be stored	保管容量 Storage capacity	交換頻度 Frequency	遮へい要求 Shielding requirements	寸法、重量（保管容器寸法、重量） Dimension, Weight (Storage container dimension, weight) (mm)、(t)
a. 水銀ターゲット Mercury target vessel	16	2 / year	遮へい蓋、側方普通コンクリート 1.5m 相等	1150 x 1300 x 2200, about 0.7t Storage container (2100 x 1820 x 3200H、0.5t)
b. 減速材容器 Moderator vessel	18	3 / 2year	遮へい蓋、側方普通コンクリート 1m 相等	1400 x 850 x 4400H, 0.25t
c. 陽子ビーム窓 Proton beam window (with shielding plug)	9	1 / year	遮へい蓋、側方普通コンクリート 1m 相等	860 x 980 x 4510H, about 10t
d. 反射体 Reflector (with outer reflector plug)	4	1 / 6year	内部遮へい蓋、側方普通コンクリート 1m 相等	1900ϕ x 4785H, about 20t
e. ミュオンターゲット Muon production target (with shielding plug)	6	1 / year	遮へい蓋、側方普通コンクリート 1m 相等	400 x 3000H, 0.3t (1020 x 1120 x 3200H, about 10t)
f. ミュオンスクレーパー Muon scraper (two types)	1 for each	—	—	950 x 700 x 2700H
g. ピローシール Pillow seal	12	2 / year	2 / year	700 x 80W x 2770H
h. 水銀循環系機器 Mercury cooling system components, sensors	—	—	—	
i. 中性子ビーム窓 Neutron beam window	3～4	—	—	350 x 200 x 700H
j. コリメータ Corremeter	3～4	—	—	100 x 2000H
k. 陽子ビームモニタ Proton beam monitor	4	—	—	500 x 500 H
l. チャコールフィルタ Charcoal filter	30m^3	2m^3 / year	2m^3 / year	600 x 300 H

２．７．２　保管対象機器の取扱フローダイヤグラム

主な保管対象機器について、取扱フローダイヤグラムを作成し整理した。Fig.2.7.2-1 に保管対象機器の取扱フローダイヤグラムを示す。

新ターゲット容器は、施設外で製作したものを第３機器搬出入口から地下１階の放射化機器保管設備室経由でターゲット取扱室に搬入し、使用済ターゲット容器と交換する。使用済ターゲット容器を収納した保管容器は、水銀モニタプローブ等で表面に水銀付着の無いことを確認した後、地下の放射化機器保管設備室の保管ピット内に設置した保管ラックに収納・保管する。使用済ターゲット容器を放射化機器保管設備室から搬出する場合には、放射化機器保管設備室内をクレーンで移送し、遮へい付きキャスクに遠隔で収納した後、大型機器取扱作業室に設置した 130t 天井クレーンにより吊り上げ第３機器搬出入口から施設外に搬出する。

新減速材容器は施設外で製作したものを第３機器搬出入口経由で受け入れ、使用済減速材容器は、反射体メンテナンス室で反射体から取り外し、作業用プラグに取り付けた後、地下の保管エリアで乾燥装置を接続して乾燥した後、再度遠隔操作で反射体メンテナンス室に吊り上げ、保管用フレームに設置したのち、地下に再度吊り降ろして遠隔操作で保管容器ラックに保管する。保管設備（エリア）の有効活用、合理化等のため、 減速待ち保管後、地下 2 階の放射化機器取扱室内に設けた切断装置で切断減容して遮へい容器に詰めて施設外に搬出する。

陽子ビーム窓は、反射体メンテナンス室経由で放射化機器保管設備室に遮へいプラグと一体のまま地下 1 階へ吊り下ろし、乾燥装置を接続して乾燥した後、陽子ビーム窓保管ピット内で保管する。減衰待ち後、１階の反射体メンテナンス室に搬入し、遮へいプラグと陽子ビーム窓を分離し、配管と一体の陽子ビーム窓は地下 2 階の放射化機器取扱室内に設けた切断装置で切断減容して遮へい容器に詰めて施設外に搬出する。

反射体は、反射体メンテナンス室で内側プラグを取り外した後、遮へいプラグと一体で地下に吊り下ろし、地下 1 階の放射化機器保管設備室内に設けた反射体保管設備で保管する。反射体を分離する必要がある場合には、再度反射体メンテナンス室に吊り上げ、反射体メンテナンス室内で遮へいプラグと反射体を分離し、反射体については再度地下の反射体保管設備に吊り降ろして保管する。

ミュオンターゲットは、遮へい体と一体で反射体メンテナンス室経由で地下に吊り下ろし、地下 1 階の放射化機器保管設備室内に設けたミュオンターゲット保管設備で保管する。減衰を待った上で、再度反射体メンテナンス室に吊り上げ、遮へい体とミュオンターゲットを分離し、ミュオンターゲットについてはミュオンターゲット保管キャスクに入れて最終的に保管する。

以上の保管対象機器の取扱フローダイヤグラム及び２．７．１節に示した設計方針に基づき、Fig.2.7.2-2 及び Fig.2.7.2-3 に示すように地下１階に設けた放射化機器保管設備室内にそれぞれの放射化機器の保管設備を配置した。２．７．３節以降にそれぞれの保管設備設計の概要を示す。

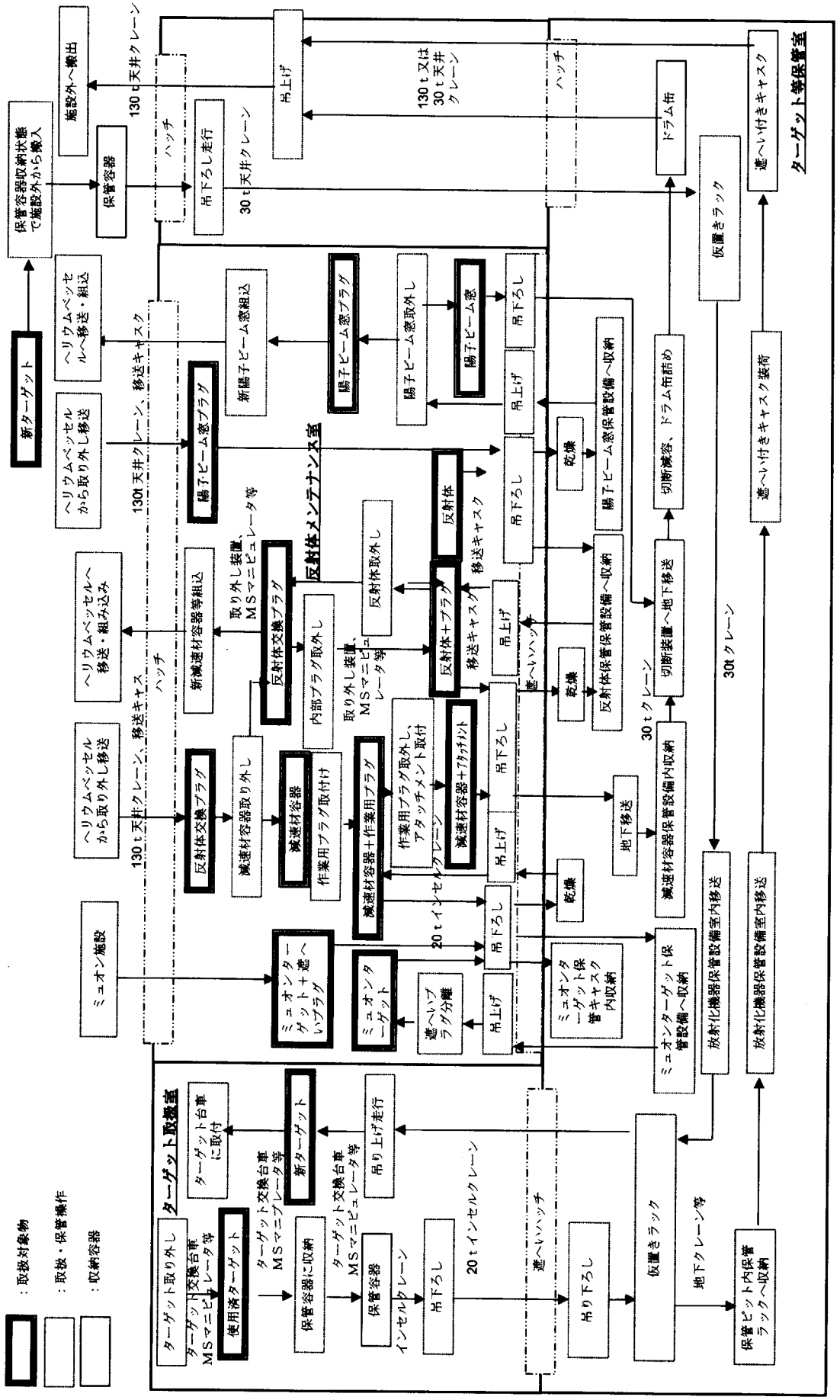


Fig. 2.7.2-1 Handling flow diagram of irradiated components

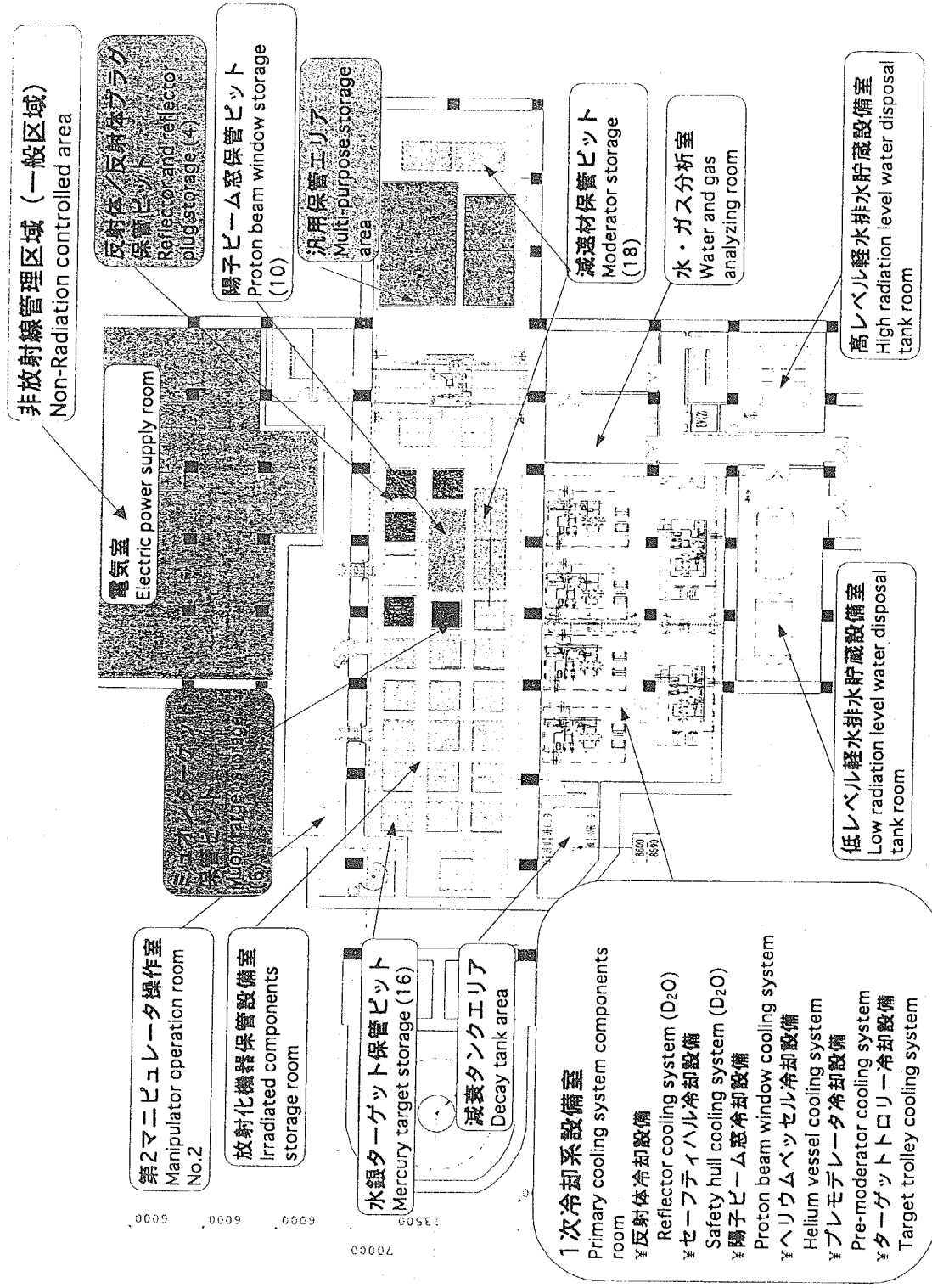


Fig.2.7.2-2 Layout of irradiated components storage facility

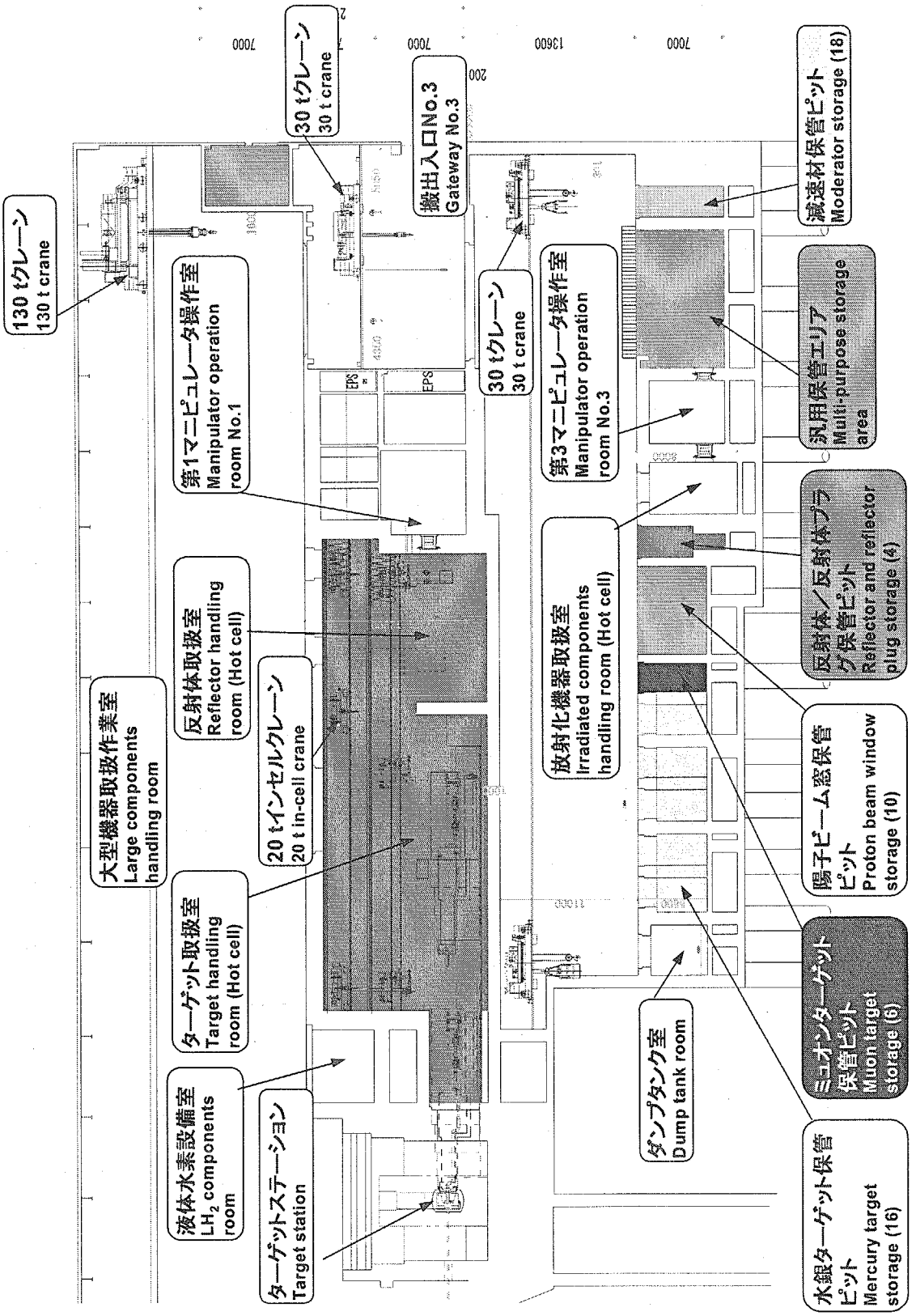


Fig.2.7.2-3 Layout of irradiated components storage facility

２．７．３　水銀ターゲット容器保管設備

(1) 設備の要求機能

水銀ターゲット容器保管設備は、内部に付着した核破砕生成物を含む水銀の外部放出を防止するために、使用済水銀ターゲット容器を保管容器（キャスク）に密閉した状態で保管する設備である。

a. 設備機能要求条件

本設備の要求機能は以下の通りである。

① 16 体の使用済ターゲット容器内包する保管容器を直立状態で保管できること。

② 天井クレーン、M/S マニピュレータで保管場所まで移送できること。

b. 安全設計要求条件及び方針

安全設計上の要求機能は以下の通りである。

① 適切な格納系及び換気系を有すること。

② 使用済ターゲット容器からの放射線防護のための適切な遮へいを有すること。

③ 過度の放射線レベルが検出できるとともに、その事態を適切に従事者に伝えるか、又は自動的に対処できる設計であること。

この要求機能に対して、以下のような方針を立てた。

① 使用済ターゲットを収納する容器は気密性を有する設計とし、使用済ターゲット容器を取扱う部屋の雰囲気の排気は建屋側換気系により換気する。

② 使用済ターゲット容器保管設備の壁面はコンクリート壁により、上部は遮へい蓋により遮へいを確保した設計とする。

③ 過度の放射線レベルを検出できるようにターゲット容器保管領域にエリアモニタを設ける。

(2) 設備・取扱手順の概要

本設備は、保管ラックから構成する。保管ラックは地下 1 階の放射化機器保管設備室の一部を仕切った領域に設置する、換気系は放射化機器保管設備室の換気系と共用する。使用済ターゲット容器の崩壊熱は、1MW 2500 時間運転直後において約 125W であり、容器自身の除熱は使用済ターゲット保管容器壁を通じた放熱により十分な冷却が確保できる。

Fig.2.7.3-1 にターゲット容器保管設備概念図及び取扱状態のサポート概念を示す。保管ラックは据付時に建屋が完成していること、30ton の天井クレーンを使って据え付けることを考慮して、1 基毎の自立型とし、使用済ターゲット保管容器挿入時には保管ラックの据え付けガイドを保管ピット上部に設置することで地震時の転倒を防止する構造とした。

保管時の取扱手順を Table 2.7.3-1 に示す。使用済ターゲット保管容器を保管する際には、予め遮へい蓋にグリッパ吊り具を取り付けた後、グリッパ掴み機構を先端部に取り付けた放射化機器保管設備室内の 30t 天井クレーンを用いて遮へい蓋を取り外す。遮へい蓋へのグリッパ吊り治具の設置時には、使用済ターゲット容器を収納した保管容器は放射化機器保管設備室内に無いため、作業員が室内で作業することが可能である。遮へい蓋を取り外した後、遮へい蓋取り付けガイドを作業員が設置する。次に、遠隔操作により 20t インセルクレーンを用いてターゲット取扱室か

ら、放射化機器保管設備室内に設置した仮置架台に使用済ターゲットを収納した保管容器降を仮置きする。その後、グリッパ掴み機構を取り付けた 30t 天井クレーンによりグリッパアタッチメントを仮置きした保管容器上部に運び、MS マニピュレータを用いてグリッパアタッチメントを保管容器に取り付ける。以降の取扱は全てグリッパアタッチメントを取り付けた状態で行う。グリッパアタッチメントは保管する保管容器数分準備を要する。グリッパアタッチメントを取り付けた後、クレーンに取り付けたグリッパを使って遠隔操作で保管容器を吊り上げ、移送し、保管ラック所定の位置に ITV とレーザポインタを使って位置決め目標点に合わせ位置決めする。これらの手順を Fig.2.7.3-2 に示す。その上で、保管ラックの方位決め構造に沿わせてラック上に下降させラック内に収納する。収納後は、取り外した遮へい蓋を遠隔操作で元の位置まで移送し、ITV とレーザポインタを使って位置決め目標点に合わせ位置決めする。その上で、遮へい蓋取り付けガイドに沿わせて下降させ、方位決めしつつ遮へい蓋を設置する。遮へい蓋からのグリッパ吊り具の取り外し及び遮へい蓋ガイドの取り外しは運転員が直接作業するする。

使用済ターゲット保管容器を保管設備から取り出す際も同様の操作により 30t 天井クレーンを用いて遮へいキャスクまで遠隔移送する。

(3) 設備の主要仕様

主な機器仕様は以下の通りである。機器概念図を Fig.2.7.3-1 に示す。

a. 保管ラック

・型　　式：自立縦型保管式
・主要寸法：2300mm（長さ）×2300mm（幅）×3950mm（高さ）
・主要材料：SUS304
・数　　量：16 基
・保管容量：16 体

b. 遮へい蓋（建屋側で準備）

・型　　式：コンクリート遮へいプラグ式
・主要寸法：2500mm（長さ）×2500mm（幅）×1500mm（高さ）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装:上面側)、SUS304(下面側)、コンクリート
・数　　量：16 基
・重　　量：25ton/基

c. 30t 天井クレーン用グリッパ（地下の保管設備で共通に使用）

・型　　式：回転ロック式グリッパ
・主要寸法：2000mm（長さ）×1220mm（最大外径）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：１式
・重　　量：約 1 ton

d. グリッパアタッチメント

・型　　式：ラッチロック式
・主要寸法：850mm（長さ）×550mm（外径）
・材　　料：SUS304
・数　　量：16基

e. 遮へい蓋用グリッパ吊り具（減速材容器遮へい蓋と共用）

・型　　式：グリッパ式
・主要寸法：850mm（長さ）×550mm（外径）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：1式

f. 遮へい蓋取り付けガイド（減速材容器遮へい蓋と共用）

・型　　式：フランジ固定式
・主要寸法：2500mm（長さ）×1250mm（幅）×1500mm（高さ）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：1式

g. 仮置き架台

・型　　式：自立縦型可搬式
・主要寸法：2300mm（長さ）×2300mm（幅）×3950mm（高さ）
・主要材料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：1基

e. 位置決め装置（30t天井クレーン設置、放射化機器保管設備共通）

・型　　式：ITV及びレーザポインタ
・数　　量：1式

(4) 他設備との取り合い

他設備との取り合いは以下の通りである。

a. 使用済水銀ターゲット容器

b. 保管容器

グリッパアタッチメントは使用済水銀ターゲット容器保管容器の吊り具に、M/S マニピュレータによる操作で取り付けられる構造であること。使用済水銀ターゲット容器保管容器からの水銀漏洩が無いこと。

b. 建家換気空調系

保管ラックエリア雰囲気は、建家換気空調系により湿度及び雰囲気温度が適切なレベルに維持されること。

c. 建屋

保管ラックエリアの遮へいは建屋壁及び天井、並びに遮へい蓋により、保管時には周辺に作業員が近づくことが可能なレベルまで線量率を低減（100 μ Sv/h）できること。遮へい蓋の貫通孔から保管ラックが搬入できること。

建屋側の取り合い寸法条件は以下の通り（詳細は Fig.2.7.3-1 参照）

・ピット寸法 1 ：6250mm（長さ）×12500mm（幅）×5500mm（高さ）
・ピット寸法 2：5825mm（長さ）×12500mm（幅）×5500mm（高さ）
・ピット寸法 3：5725mm（長さ）×12500mm（幅）×5500mm（高さ）
・ピット開口部最小寸法：2300mm（長さ）×2300mm（幅）×1500mm（天井厚）
・遮へい蓋寸法：(3)b に示す通り。

d. 30t 天井クレーン

グリッパをクレーンフックに取り付けられること。また、グリッパ駆動装置及び位置決め装置（ITV 及びレーザポインタ）をクレーン台車に取り付けられること。

e. MS マニピュレータ（水銀ターゲット容器保管設備位置）

1 F 20t インセルクレーンと連携してクレーンフックの取り外しができること。グリッパアタッチメントを使用済水銀ターゲット容器保管容器に取り付けられること。

Table 2.7.3-1 Spent target vessel handling procedure (1/2)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
1	遮へい蓋取り付けガイド、遮へい蓋吊り治具	遮へい蓋取り付けガイド、遮へい蓋吊り治具設置	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
2	グリッパ	30t 天井クレーンにグリッパの取り付け	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
3	グリッパ吊り具	遮へい蓋へグリッパ吊り具の取り付け	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業（遠隔操作）
4	遮へい蓋	グリッパによる遮へい蓋の掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業（遠隔操作）
5	遮へい蓋	一時置き場（汎用保管エリア）への移送、	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、ITV	遠隔操作
6	遮へい蓋	遮へい蓋からグリッパ取り外し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、ITV	遠隔操作
7	ターゲット容器保管容器	ターゲット取扱室から地下の仮置き位置（架台）への吊り下ろし	1 F20t インセルクレーン	遠隔操作
8	ターゲット容器保管容器	仮置き位置でクレーンフックからの取り外し、取り付け	MS マニピュレータ	遠隔操作
9	グリッパアタッチメント	仮置き位置でグリッパアタッチメントを保管容器の吊り具に取り付け	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、MS マニピュレータ	遠隔操作
10	ターゲット容器保管容器	仮置き位置から保管ラックに移送、位置決め、吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
11	ターゲット容器保管容器	グリッパアタッチメントからの取り外し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、ITV	遠隔操作
12	遮へい蓋	遮へい蓋を一時置き場から元の位置に移動、位置決めして、取り付けガイドに沿って吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、遮へい蓋取り付けガイド、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
13	遮へい蓋	遮へい蓋のグリッパからの取り外し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具	作業員の直接作業（遠隔操作）
14	グリッパ吊り具	遮へい蓋からグリッパ吊り具の取り外し、移送	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ吊り具	作業員の直接作業
15	グリッパ	B1F 30t クレーンからグリッパの取り外し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業
16	遮へい蓋取り付けガイド	遮へい蓋取り付けガイドの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業

Table 2.7.3-1 Spent target vessel handling procedure (2/2)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
	使用済ターゲット容器搬出時			
17	遮へい蓋取り付けガイド	遮へい蓋取り付けガイド設置	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
18	グリッパ	30t 天井クレーンにグリッパの取り付け	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
19	グリッパ吊り具	遮へい蓋へグリッパ吊り具の取り付け	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業（遠隔操作）
20	遮へい蓋	グリッパによる遮へい蓋の掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業（遠隔操作）
21	遮へい蓋	一時置き場（汎用保管エリア）への移送、	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、ITV	遠隔操作
22	遮へい蓋	遮へい蓋からグリッパ取り外し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、ITV	遠隔操作
23	ターゲット容器保管容器	保管位置でグリッパを用いて掴む	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、ITV	遠隔操作
24	ターゲット容器保管容器	保管位置からターゲット容器搬出キャスクに移送、位置決め、吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
25	ターゲット容器保管容器	保管容器のグリッパからの取り外し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	遠隔操作
26	ターゲット容器搬出キャスク	ターゲットキャスクの蓋閉め	B1F 30t 天井クレーン、MS マニピュレータ	遠隔操作
27	遮へい蓋	一時置き場で遮へい蓋へをグリッパで掴む	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具	作業員の直接作業
28	遮へい蓋	遮へい蓋を一時置き場から元の位置に移動、位置決めして、取り付けガイドに沿って吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、遮へい蓋取り付けガイド、ITV、レーザーﾎﾟｲﾝﾀ	遠隔操作
29	遮へい蓋	遮へい蓋のグリッパからの取り外し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具	作業員の直接作業
30	ターゲット容器搬出キャスク	キャスクへの玉掛け、ターゲット容器搬出キャスクの搬出	3F 130t 天井クレーン	作業員の直接作業
31	グリッパ吊り具	遮へい蓋からｸﾞﾘｯﾊﾟ吊り具の取り外し、移送	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
32	地下用グリッパ	30t 天井クレーンからグリッパの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
33	遮へい蓋取り付けガイド	遮へい蓋取り付けガイドの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業

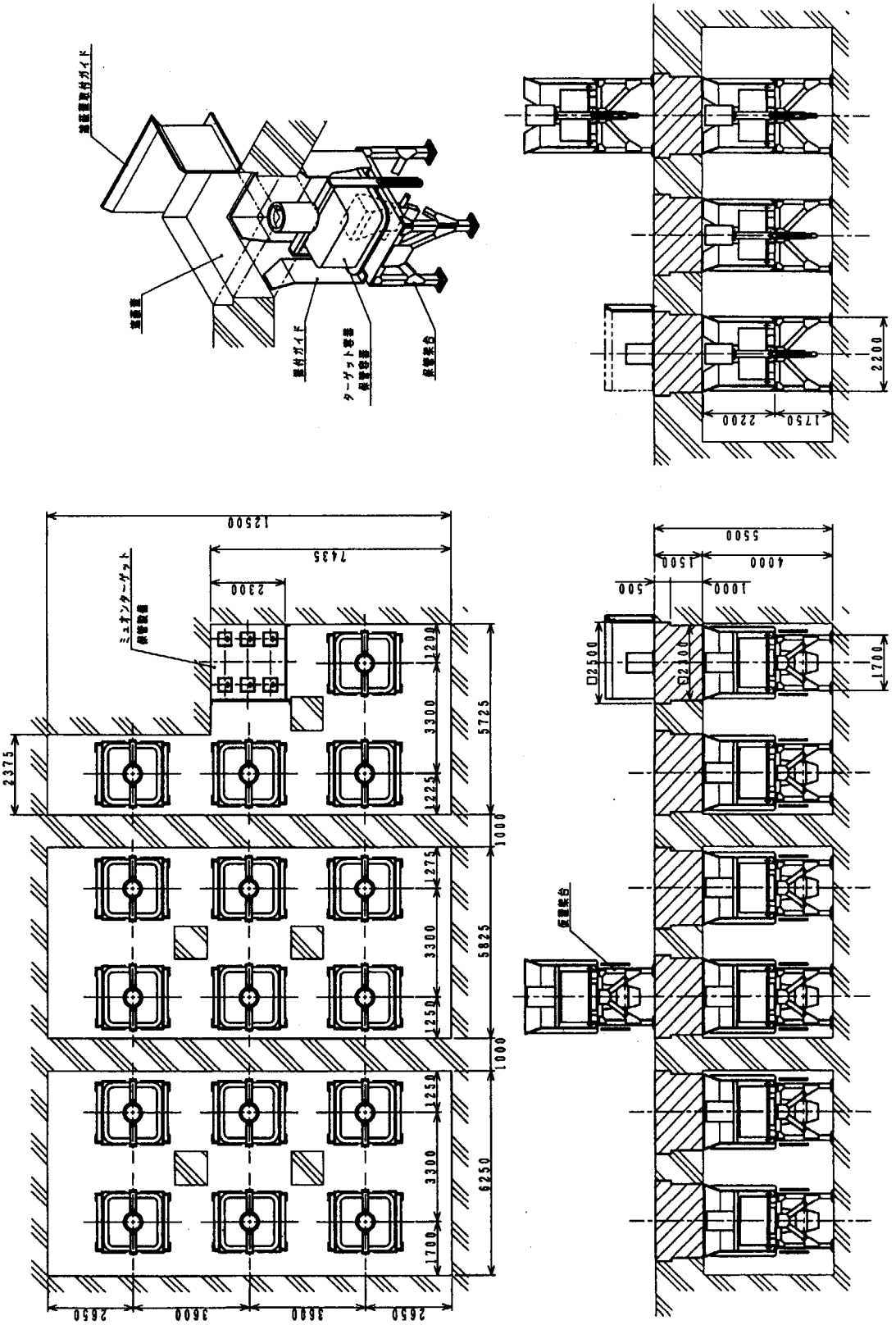


Fig.2.7.3-1 Spent target vessel storage facility

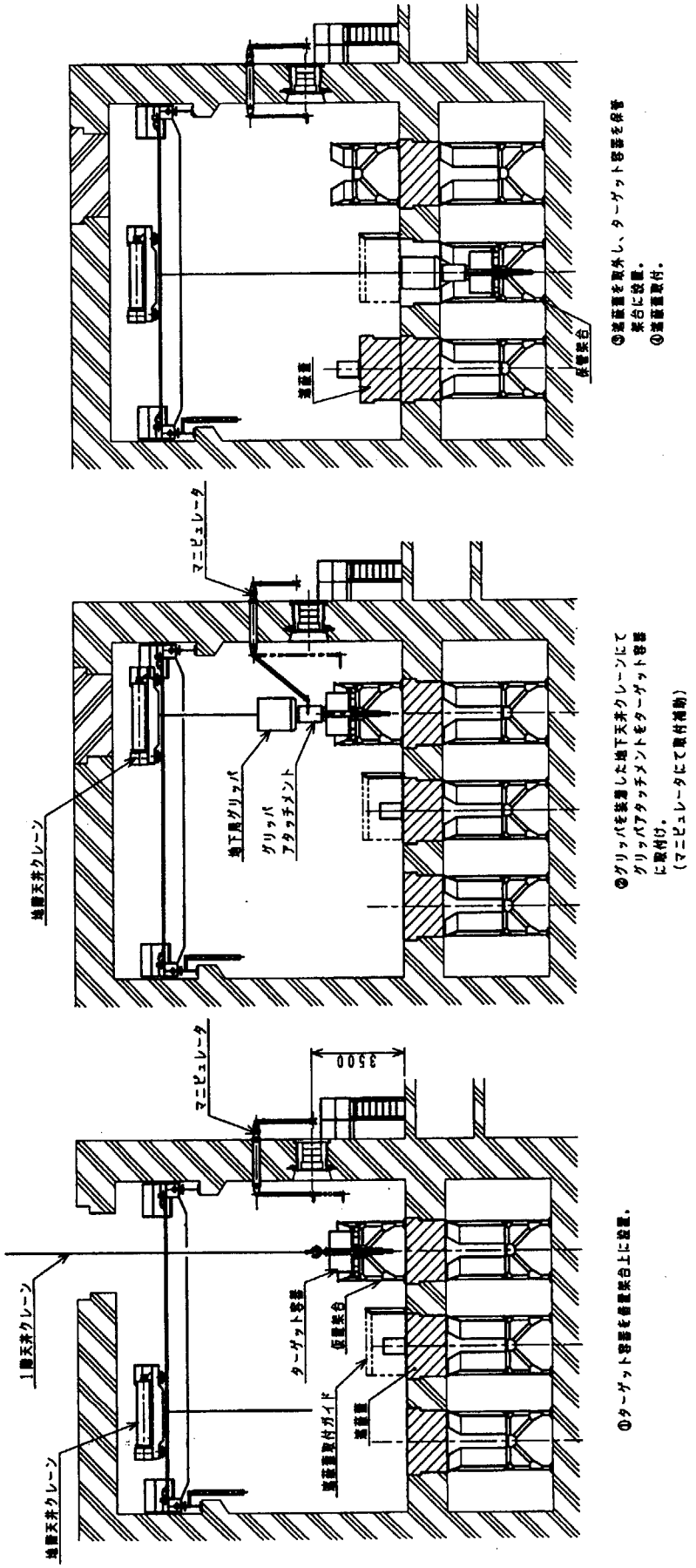


Fig.2.7.3-2 Spent target vessel handling procedure

２．７．４　減速材容器保管設備

(1) 設備の要求機能

減速材容器保管設備は使用済減速材容器を６年間程度減衰待ちのため保管する設備である。保管時には照射停止後１ヶ月以上経過した後保管することとしているいため発熱量は少なく、冷却は不要である。遮へい設計条件から、遮へい蓋及び側方壁でコンクリート１ｍ相当の遮へいが必要である。減速材容器は長尺物であり効率良く保管するために縦型ラック保管とした。減速材容器は放射化機器保管設備室内での遠隔操作を考慮して、保管用アタッチメント（治具）に取り付けた後、専用の保管ラックで保管する。

a. 設備機能要求条件

① 使用済減速材 18 体を直立状態で保管できること。

② 天井クレーンにより保管位置まで移送できること。

b. 安全設計要求条件及び方針

安全設計上の要求機能は以下の通りである。

① 減速材容器からの遮へいを確保できること

この要求機能に対して、以下のような設計方針をとるものとする。

① 減速材容器は専用ラックにより支持するとともに周囲はコンクリート壁及びコンクリートの遮へい蓋による遮へいを施す設計とする。

(2) 設備・取扱手順の概要

減速材容器保管設備は、保管ラック及び遮へい蓋等から構成する。

保管時の取扱手順を Table 2.7.4-1 に示す。はじめに反射体から分離した減速材容器を作業用プラグ（遮へい付き）に取り付け、放射化機器保管設備室の仮置き位置で乾燥装置を接続して内部を乾燥させた後、再度反射体メンテナンス室に吊り上げる。減速材容器は反射体から分離した状態では容器と配管の組合せで保管作業時の強度が十分に確保できないこと、ラックへ保管する際の遠隔操作を容易にするために、1 階の反射体メンテナンス室でグリッパ吊り具付きの保管用アタッチメント（治具）に取り付ける。その上で、反射体移送キャスク（グリッパ付き）を用いて地下 1 階放射化機器保管設備室内の仮置き位置に吊り降ろす。次に 30t 天井クレーンに取り付けたグリッパで掴み、保管ラックまで移送する。保管ラックの遮へい蓋は予め取り外しておく。保管ラック所定の位置に ITV とレーザポインタを使って位置決め目標点に合わせ位置決めする。その上で、保管ラックのガイドに沿って方位決めを行い、保管ラックに吊り降ろす。減速材容器は 1 回の交換で 3 体を取扱うため、上記の手順を 3 回繰り返した後、取り外してあった遮へい蓋を遮へい蓋ガイドに沿って位置決めし、元の位置に設置する。保管ラックは貯蔵スペースの配置上の制約により 2 カ所に 9 体づつ分けて保管する。

6 年程度減衰待ち後の使用済減速材容器は上記と同様に遮へい蓋を取り外した後、遠隔操作により 30t 天井クレーンで切断装置ワークエリアに移送する。切断装置ワークエリアで保管用アタッチメントから取り出し後、切断装置により切断減容し、ドラム缶詰めして搬出する。

(3) 設備の主要仕様

主な機器仕様は以下の通りである。機器概念図を Fig.2.7.3-1 に示す。

a. 保管ラック

・型　　式：縦型ラック保管式
・主要寸法：8200mm（長さ）×700mm（幅）×3900mm（高さ）
・主要材料：SUS304
・数　　量：2 基
・保管容量：9 体

b. 遮へい蓋（建屋側で準備）

・型　　式：コンクリート遮へいプラグ式
・主要寸法：4250mm（長さ）×2650mm（幅）×1000mm（高さ）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装:上面側）、SUS304(下面側)、コンクリート
・数　　量：4 体
・重　　量：約 30ton／体

c.グリッパ（地下の保管設備で共通に使用）

・型　　式：回転ロック式グリッパ
・主要寸法：2000mm（長さ）×1220mm（最大外径）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：１式
・重　　量：約 1 ton

d. グリッパ吊り具（ターゲット容器遮へい蓋と共用）

・型　　式：グリッパ式
・主要寸法：850mm（長さ）×550mm（外径）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：１式

e. 遮へい蓋ガイド（ターゲット容器遮へい蓋と共用）

・型　　式：フランジ固定式
・主要寸法：2500mm（長さ）×1250mm（幅）×1500mm（高さ）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：１式

f. 位置決め装置（天井クレーン設置、地下保管設備共通）

・型　　式：ITV 及びレーザポインタ

・数　　量：１式

g. 保管用アタッチメント

・型　　式：フレーム式

・主要寸法：1000mm（長さ）×200mm（幅）×5700mm（高さ）：結合型減速材用
1000mm（長さ）×200mm（幅）×5320mm（高さ）：比結合型減速材用、
ポイゾン型減速材用

・数　　量：比結合型減速材用６体、ポイゾン型減速材用６体、結合型減速材用６体

h. 仮置きラック

・型　　式：縦型ラック式（仮置き位置設置）

・主要寸法：1250mm（長さ）×1250mm（幅）×3900mm（高さ）

・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）

・数　　量：１基

(4) 他設備との取り合い

他設備との取り合いは以下の通りである。

a. 建家換気空調系

保管ラックエリア雰囲気は換気空調系により湿度及び雰囲気温度が適切なレベルに維持されること。

b. 建屋

保管ラックエリアの遮へいは建屋壁及び天井、並びに遮へい蓋により、保管時には周辺に作業員が近づくことが可能なレベルまで線量率を低減できること。

建屋側の取り合い寸法条件は以下のとおり

・ピット寸法：9500mm（長さ）×4000mm（幅）×7000mm（高さ）

・ピット開口部最小寸法：8350mm（長さ）×2450mm（幅）×1000mm（天井厚）

・遮へい蓋寸法：(2)b の通り

c. 30t 天井クレーン

グリッパをクレーンフックに取り付けられること。また、グリッパ駆動装置及び位置決め装置（ITV 及びレーザポインタ）をクレーン台車に取り付けられること。

Table 2.7.4-1 Spent moderator vessel handling procedure (1/3)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
1	作業用プラグ	減速材容器を作業用プラグ（遮へい付き）に取り付け、反射体メンテナンス室から放射化機器保管設備室の仮置き位置へ吊り下ろし	反射体移送キャスク、 グリッパ吊り具	遠隔操作
2	作業用プラグ	乾燥装置を接続し、軽水の乾燥を実施	乾燥装置	作業員の直接作業
3	作業用プラグ	作業用プラグを反射体メンテナンス室に吊り上げ、作業用プラグから取り外して保管用アタッチメントに取り付け	反射体移送キャスク、 20t インセルクレーン、パワーマニピュレータ、MS マニピュレータ	遠隔操作 （反射体メンテナンス室）
4	遮へい蓋取り付けガイド	遮へい蓋取り付けガイド設置	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
5	地下用グリッパ	30t 天井クレーンに地下用グリッパの取り付け	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
6	グリッパ吊り具	遮へい蓋へグリッパ吊り具取り付け、	B1F 30t 天井クレーン、地下用グリッパ	作業員の直接作業（遠隔操作）
7	遮へい蓋	グリッパによる遮へい蓋の掴み	B1F 30t 天井クレーン、地下用グリッパ	作業員の直接作業（遠隔操作）
8	遮へい蓋	一時置き場（汎用保管エリア）への移送、	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、ITV	遠隔操作
9	遮へい蓋	遮へい蓋をグリッパから取り外し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、ITV	遠隔操作
10	減速材容器（保管用アタッチメント）	反射体メンテナンス室から放射化機器保管設備室の仮置き位置へ吊り下ろし、離し	反射体移送キャスク、ITV	遠隔操作
11	減速材容器（保管用アタッチメント）	仮置き位置でグリッパによる掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	遠隔操作
12	減速材容器（保管用アタッチメント）	仮置き位置から保管ラック（架台）に移送、位置決め、吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
13	減速材容器（保管用アタッチメント）	グリッパの離し	B1F 30t 天井クレーン、ITV	遠隔操作
	上記 10～13 を３体分繰り返し			
14	遮へい蓋	遮へい蓋を一時置き場から元の位置に移動、位置決めして、取り付けガイドに沿って吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、遮へい蓋取り付けガイド、ITV、レーザﾎﾟｲﾝﾀ	遠隔操作

Table 2.7.4-1 Spent moderator vessel handling procedure (2/3)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
15	遮へい蓋	遮へい蓋をグリッパから取り外し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具	作業員の直接作業（遠隔操作）
16	グリッパ吊り具	遮へい蓋からグリッパ吊り具の取り外し、移送	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
17	地下用グリッパ	30t 天井クレーンからグリッパの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
18	遮へい蓋取り付けガイド	遮へい蓋取り付けガイド、遮へい蓋吊り治具取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
	6年程度減衰待ち			
19	遮へい蓋取り付けガイド	遮へい蓋取り付けガイド設置	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
20	地下用グリッパ	30t 天井クレーンにグリッパの取り付け	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
21	グリッパ吊り具	遮へい蓋へグリッパ吊り具取り付け	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業（遠隔操作）
22	遮へい蓋	グリッパによる遮へい蓋の掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業（遠隔操作）
23	遮へい蓋	一時置き場（汎用保管エリア）への移送	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、ITV	遠隔操作
24	遮へい蓋	遮へい蓋をグリッパから取り外し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、ITV	遠隔操作
25	減速材容器（保管用アタッチメント）	保管ラックからグリッパによる掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	遠隔操作
26	減速材容器（保管用アタッチメント）	保管ラック（架台）からに放射化機器取扱室（切断装置エリア）に移送、位置決め、吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
27	減速材容器（保管用アタッチメント）	グリッパの離し	B1F 30t 天井クレーン、ITV	遠隔操作
28	減速材容器	切断、ドラム缶詰、搬出	放射化機器取扱室クレーン、放射化機器取扱室パワーマニピュレータ、MS マニピュレータ、B1F 30t 天井クレーン	遠隔操作
29	遮へい蓋	遮へい蓋を一時置き場から元の位置に移動、位置決めして、取り付けガイドに沿って吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、遮へい蓋取り付けガイド、ITV、レーザポインタ	遠隔操作

Table 2.7.4-1 Spent moderator vessel handling procedure (3/3)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
30	遮へい蓋	遮へい蓋をグリッパから取り外し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具	作業員の直接作業（遠隔操作）
31	グリッパ吊り具	遮へい蓋からグリッパ吊り具の取り外し、移送	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
32	地下用グリッパ	30t 天井クレーンからグリッパの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
33	遮へい蓋取り付けガイド	遮へい蓋取り付けガイド、遮へい蓋吊り治具取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業

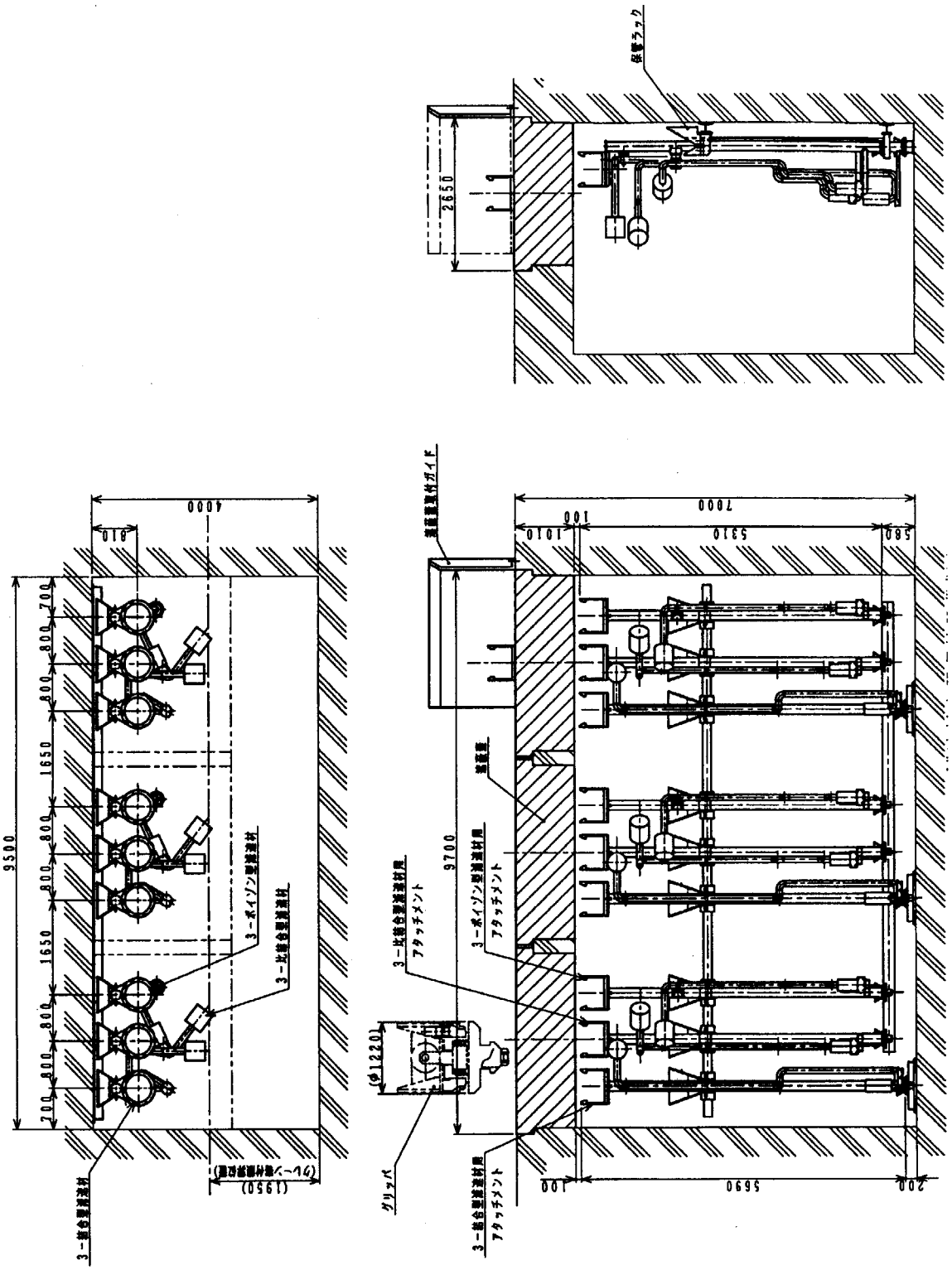


Fig.2.7.4-1 Spent moderator vessel storage facility

２．７．５　陽子ビーム窓保管設備

(1) 設備の要求機能

陽子ビーム窓保管設備は陽子ビーム窓を６年間程度減衰待ちのため保管する設備である。保管時には照射停止後１ヶ月以上経過しているため、発熱量は少なく、冷却は不要である。遮へい設計条件から、側方壁でコンクリート１ｍ相当の遮へいが必要である。なお、陽子ビーム窓は遮へいプラグと一体構造のため、保管時の上部室への遮へいとしてそのまま使用するものとした。また、陽子ビーム窓は長尺物であり配置効率化のため縦型ラックに保管することとした。

a. 設備機能要求条件

① 陽子ビーム窓９体を直立状態で保管できること。

② クレーンにより保管位置まで移送できること。

b. 安全設計要求条件及び方針

安全設計上の要求機能は以下の通りである。

① 陽子ビーム窓からの遮へいを確保できること

この要求機能に対して、以下のような設計方針をとるものとする。

① 陽子ビーム窓保管設備は埋め込み式の案内管により支持するとともに周囲はコンクリートにより埋め込むことで遮へいを施す。上部室への遮へいは陽子ビーム窓の一体プラグにより確保する設計とする。

(2) 設備・取扱手順の概要

陽子ビーム窓保管設備は、保管ラック（案内管）及び仮蓋から構成する。保管時の冷却が必要ないことから案内管は埋込型とする。案内管を設置した後、建屋躯体との空間は装置側で後打ちコンクリートを流し込む。

Table 2.7.5-1 に保管時の取扱手順を示す。使用済の陽子ビーム窓は、取り外し時において反射体移送キャスクグリッパで取り扱うためグリッパ吊り治具が既に取り付けられている。このため、保管時には、反射体メンテナンス室経由で反射体移送キャスクのグリッパを使って放射化機器保管設備室の仮置き位置に吊り下ろす。放射化機器保管設備室の 30t 天井クレーンには反射体移送キャスクグリッパと同等の形状の吊りグリッパを取り付けた上で、仮置き位置の陽子ビーム窓を吊り上げ、保管ラックまで移送する。保管ラック所定の位置に ITV とレーザポインタを使って位置決めする。陽子ビーム窓は保管ラックに予め設置しておいた吊り込みガイドに沿って方位決めを行い、保管ラックに吊り下ろす。保管ラックに設置した後は自身の遮へいプラグにより遮へいが確保されるため、グリッパ吊り具は作業員の直接作業により取り外す。その後、乾燥装置を接続して乾燥した後、仮蓋をする。

６年程度減衰待ちの後、陽子ビーム窓は上記と逆の手順で反射体メンテナンス室に吊り上げ、そこで配管部と遮へいプラグを分離する。配管部は減速材容器と同様のアタッチメントに取り付けて再度放射化機器保管設備室に吊り下ろし、30t 天井クレーンにより放射化機器取扱室（切断装置ワークエリア）に移送する。放射化機器取扱室ではアタッチメント（移送用フレーム）から取り外し、切断装置により切断した後、ドラム缶詰めして搬出する。

(3) 設備の主要仕様

主な機器仕様は以下の通りである。Fig.2.7.5-1 に機器概念図を示す。なお、Fig.2.7.4-1 に示すとおり陽子ビーム窓の設置スペースの制約から短辺方向のラック配列ピッチが小さくなり、遮へい厚として 510mm 程度しか確保できないため、使用済陽子ビーム窓を保管している隣のピットには遮へいプラグを設置することとした。

a. 保管ラック

・型　　式：埋め込み式案内管
・主要寸法：730mm（長さ）×670mm（幅）×3640mm（高さ）
・材　　料：SUS304
・基　　数：18 基
・保管容量：1 体／基

b. 地下用グリッパ（地下の保管設備で共通に使用）

・型　　式：回転ロック式グリッパ
・主要寸法：2000mm（長さ）×1220mm（最大外径）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：１式
・重　　量：約 1 ton

c. 吊り込みガイド

・型　　式：フランジ固定式
・主要寸法：1000mm（長さ）×1000mm（幅）×2800mm（高さ）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：１式

d. グリッパ吊り具

・型　　式：円筒式
・主要寸法：1100mm（長さ）×550mm（最大外径）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：１式

e. 仮蓋

・主要寸法：3000mm（長さ）×2000mm（幅）：２基
　　3000mm（長さ）×1500mm（幅）：２基
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：4 体

f. 仮置きラック

・型　　式：縦型ラック式（仮置き位置設置）
・主要寸法：1250mm（長さ）×1250mm（幅）×3900mm（高さ）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：1基

g. 遮へいプラグ

・型　　式：コンクリートプラグ
・主要寸法：730mm（長さ）×670mm（幅）×3640mm（高さ）
・材　　料：SUS304、コンクリート
・数　　量：1

(4) 他設備との取り合い

他設備との取り合いは以下のとおりである。

a. 建家換気空調系

保管ラックエリア雰囲気は建家換気空調系により湿度及び雰囲気温度が適切なレベルに維持されること。

b. 建屋

保管ラックエリアの遮へいは建屋壁及び天井、並びに遮へい蓋により、保管時には周辺に作業員が近づくことが可能なレベルまで線量率を低減できること。

建屋側の取り合い寸法条件は以下のとおり。（詳細はFig.2.7.5-1参照）

・ピット寸法：7000mm（長さ）×3000mm（幅）×5500mm（高さ）

c. 30t天井クレーン

グリッパをクレーンフックに取り付けられること。また、グリッパ駆動装置及び位置決め装置（ITV及びレーザポインタ）をクレーン台車に取り付けられること。

Table 2.7.5-1 Spent proton beam window handling procedure (1/2)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
1	仮蓋	仮蓋へクレーンフックの取り付け、一時置き場への移送、クレーンフックの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
2	吊り込みガイド	吊り込みガイド設置	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
3	陽子ビーム窓	反射体メンテナンス室から放射化機器保管設備室の仮置き位置へ吊り下ろし	反射体移送キャスク、 グリッパ吊り具	遠隔操作
4	陽子ビーム窓	仮置き位置でクレーンに取り付けたグリッパで掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、MS マニピュレータ、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
5	陽子ビーム窓	仮置き位置から保管ラックに移送、位置決め、吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、吊り込みガイド、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
6	陽子ビーム窓	グリッパの離し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具	遠隔操作
7	グリッパ吊り具	グリッパ吊り具を取り外し、移送、一時置き場に保管	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業
8	吊り込みガイド	吊り込みガイド撤去	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
9	陽子ビーム窓	乾燥装置を接続し、軽水の乾燥を実施	乾燥装置	作業員の直接作業
10	仮蓋	仮蓋へクレーンフックの取り付け、保管ラックへの移送、クレーンフックの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業

Table 2.7.5-1 Spent proton beam window handling procedure (2/2)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
	減衰待ち後			
11	仮蓋	仮蓋へクレーンフックの取り付け、一時置き場への移送、クレーンフックの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
12	グリッパ吊り具	グリッパ吊り具の一時置き場からの保管ラックへの移送、陽子ビーム窓に取り付け	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業
13	陽子ビーム窓	保管ラックでクレーンに取り付けたグリッパで掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業
14	陽子ビーム窓	保管ラックから仮置き位置へ移送、	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具	遠隔操作
15	陽子ビーム窓	仮置き位置から反射体メンテナンス室に吊り上げ、遮へいプラグから取り外して保管用アタッチメントに取り付け	反射体移送キャスク、20t インセルクレーン、パワーマニピュレータ、MS マニピュレータ	遠隔操作
16	陽子ビーム窓	反射体メンテナンス室から仮置き位置に吊り下ろし、グリッパ離し	反射体移送キャスク	遠隔操作
17	陽子ビーム窓（アタッチメント）	グリッパで掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	遠隔操作
18	陽子ビーム窓（アタッチメント）	仮置き位置から放射化機器取扱室に移送、位置決め、吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
19	陽子ビーム窓（保管用アタッチメント）	グリッパの離し	B1F 30t 天井クレーン、ITV	遠隔操作
20	陽子ビーム窓	切断、ドラム缶詰、搬出	放射化機器取扱室クレーン、放射化機器取扱室パワーマニピュレータ、MS マニピュレータ、B1F 30t 天井クレーン	遠隔操作
21	地下用グリッパ	30t 天井クレーンからグリッパの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
22	仮蓋	仮蓋へクレーンフックの取り付け、保管ラックへの移送、クレーンフックの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業

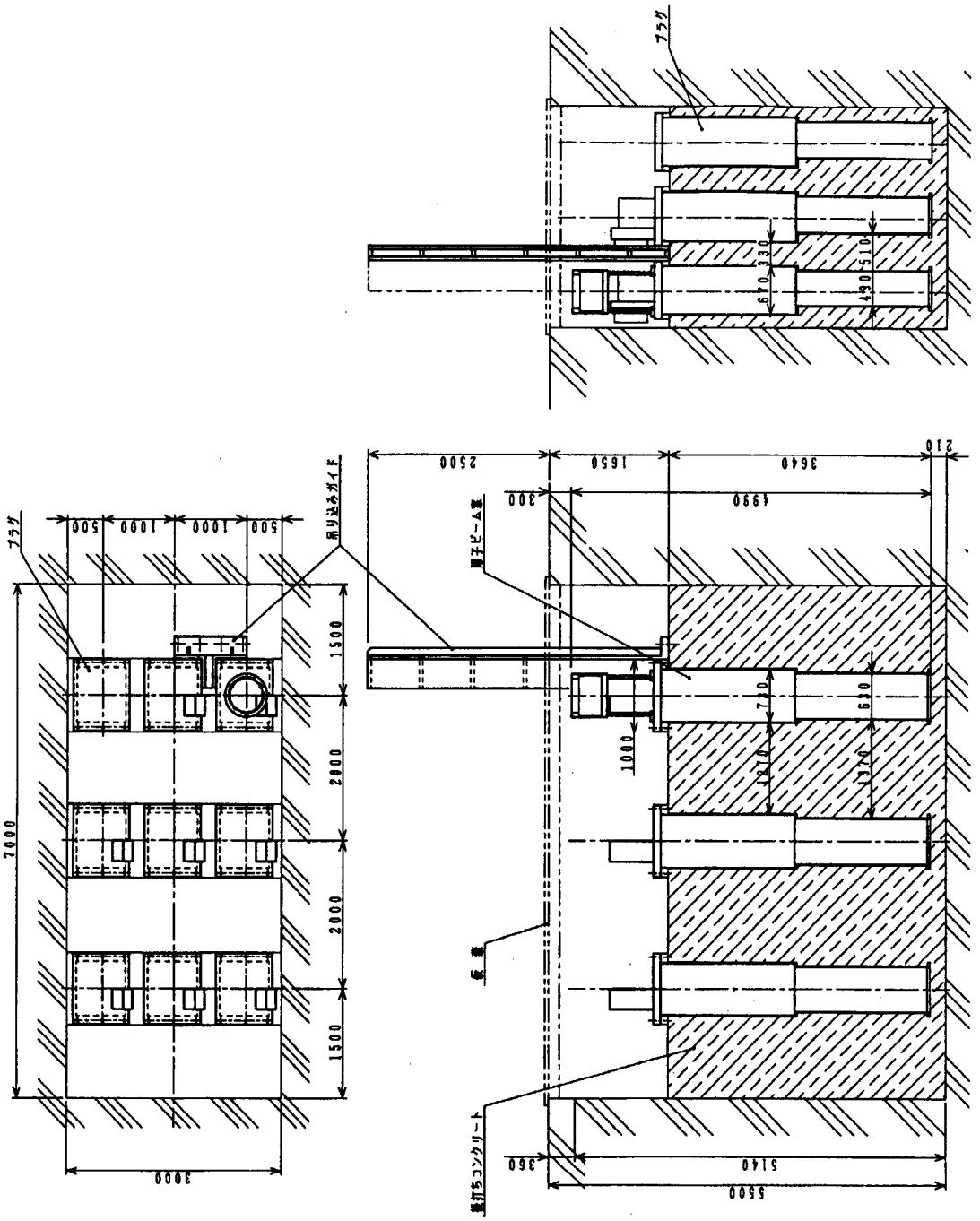


Fig.2.7.5-1 Spent proton beam window storage facility

２．７．６　反射体保管設備

(1) 設備の要求機能

反射体保管設備は 6 年に１回交換する反射体を施設寿命中保管する設備である。崩壊熱は少なく自然空冷が可能な可能性はあるが、崩壊熱については不確定要素が多いことから冷却性の確保の容易な構造とした。また、遮へい条件から側面及び上方はコンクリートで 1m 相当の遮へい厚を確保するものとした。

a. 設備機能要求条件

本設備の要求機能は以下の通りである。

① 反射体４体を反射体プラグと一体で、かつ、直立状態で保管できること。

② 反射体は反射体プラグと分離して単独でも保管できること。

③ クレーンにより保管位置まで移送できること。

b. 安全設計要求条件及び方針

安全設計上の要求機能は以下の通りである。

① 反射体からの遮へいを確保できること

この要求機能に対して、以下のような設計方針をとるものとする。

① 反射体保管設備の周囲はコンクリート壁による遮へいを施すとともに、上部方向は反射体プラグの内部プラグ部分にコンクリートで１ｍの遮へい厚の遮へいを確保する設計とする。

(2) 設備・取扱手順の概要

本設備は、反射体と反射体プラグの一体保管時と反射体単独保管時で構成が異なる。反射体と反射体プラグの一体保管時には追加遮へい付きサポート、保管用内部遮へい体、仮蓋により構成し、反射体単独保管時には追加遮へい付きサポート、反射体遮へい体仮蓋から構成する。反射体及び反射体プラブの取扱にはグリッパを用いる。

反射体の保管は４基であり、サイズが大きいことから、それぞれの反射体を独立したピットに保管することとした。反射体周辺雰囲気の換気は、放射化機器保管設備室の換気空調系により行う。保管ラックの側面に吸気及び排気のダクトを設け、保管エリア（ピット）内での結露を防止する。

保管時の取扱手順を Table 2.7.6-1 に示す。通常は反射体と反射体プラグを一体保管する。その際には、内部プラグは再使用のため取り外し、反射体プラグ上部に反射体移送用吊り具を設置した状態のまま反射体メンテナンス室から反射体移送キャスクのグリッパにより吊り上げ、放射化機器保管設備室の仮置き位置まで直接吊り下ろす。次に、予め反射体移送キャスクに設けたグリッパと同じ機構のグリッパを放射化機器保管設備室の 30t 天井クレーンに取り付けて、反射体移送用吊り具とかみ合わせて吊り上げ、保管ピットまで移送する。保管ピットの所定の位置に ITV とレーザポインタを使って位置決する。その上で、保管ピットの追加遮へい体付き据付ガイドに沿わせることで方位決めしつつ保管ピットに吊り下ろす。グリッパを遠隔で吊り具から外した後、保管用内部遮へい体を一時置き場でクレーンフックに交換して吊り上げ、反射体プラグの中に吊り降ろして上部遮へいを確保する。その上で、クレー

ンフックとグリッパ吊り具を作業員の直接作業により取り外し、仮蓋をする。

反射体を保管後、反射体プラグを再利用する場合には、上記と逆の手順により、再度反射体メンテナンス室に吊り上げ、反射体プラグと反射体を分離する。反射体にグリッパ吊り具及び反射体用遮へい体を取り付けた上で、反射体移送キャスクのグリッパを用いて放射化機器保管設備室の仮置き位置に吊り下ろす。その上で、放射化機器保管設備室の 30t 天井クレーンに取り付けたグリッパでグリッパ吊り具と組み合わせて吊り上げ、保管ピットまで移送する。保管ピットの所定の位置に ITV とレーザポインタを使って位置決めする。保管ピットの追加遮へい体付き据付ガイドに沿わせることで方位決めしつつ保管ピットに吊り下ろす。グリッパをグリッパ吊り具から外した後、グリッパ吊り具を作業員の直接作業により取り外し、仮蓋をする。

(3) 設備の主要仕様

主な機器仕様は以下のとおりである。機器概念図を Fig.2.7.6-1 に示す。

a. 保管ピット（建屋側設備）

・型　　式：角形縦穴
・主要寸法：2500mm（長さ）×2500mm（幅）×5960mm（高さ）
・材　　料：コンクリート
・数　　量：４基
・保管容量：1 体/基

b. 追加遮へい体付き据付ガイド（固定設備）

・型　　式：固定式遮へい付き
・主要寸法：2500mm（長さ）×2500mm（幅）×1600mm（高さ）
・材　　料：SUS304、コンクリート
・数　　量：5 体（うち 1 体は仮置きピットに設置）

c. 保管用内部遮へい体

・型　　式：コンクリート遮へいプラグ式
・主要寸法：1100mm（最大外径）×1300mm（高さ）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）、コンクリート
・数　　量：4 体
・重　　量：約 1.5ｔ／体

d. 仮　　蓋

・主要寸法：2500mm（長さ）×2500mm（幅）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：4 体

e. グリッパ吊り具大（反射体プラグ移送用で新規製作は不要）

・型　　式：スタンドパイプ式
・主要寸法：1500mm（最大外径）×1200mm（高さ）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：1式

f. グリッパ吊り具小

・型　　式：円筒式
・主要寸法：550mm（外径）×1500mm（高さ）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：1式

g. 反射体用遮へい体

・型　　式：円形コンクリートプラグ式
・主要寸法：1400mm（最大外径）×1300mm（高さ）
・材　　料：SUS304、コンクリート
・数　　量：4体（最大）

h. 地下用グリッパ（地下の保管設備で共通に使用）

・型　　式：回転ロック式グリッパ
・主要寸法：2000mm（長さ）×1220mm（最大外径）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：1式

(4) 他設備との取り合い

他設備との取り合いは以下の通りである。

a. 建家換気空調系

反射体エリア雰囲気は、建家換気空調系により湿度及び雰囲気温度が適切なレベルに維持されること。

b. 建屋

反射体エリアの側面の遮へいは建屋壁により、保管時には周辺に作業員が近づくことが可能なレベルまで線量率を低減できていること。

建屋側の取り合い寸法条件は以下のとおり。（詳細はFig.2.7.6-1参照）

・ピット寸法：2500mm（長さ）×2500mm（幅）×5960mm（高さ）×4基

c. 地下天井クレーン

グリッパをクレーンフックに取り付けられること。また、グリッパ駆動装置及び位置決め装置（ITV及びレーザポインタ）をクレーン台車に取り付けられること。

Table 2.7.6-1 Spent reflector handling procedure (1/3)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
1	仮蓋	仮蓋へクレーンフックの取り付け、一時置き場への移送、クレーンフックへの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
2	地下用グリッパ	30t 天井クレーンにグリッパの取り付け	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
3	反射体＋外部プラグ	反射体メンテナンス室から放射化機器保管設備室の仮置き位置へ吊り下ろし、離し	反射体移送キャスク、グリッパ吊り具	遠隔操作
4	反射体＋外部プラグ	仮置き位置でクレーンに取り付けたグリッパで掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具大、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
5	反射体＋外部プラグ	仮置き位置から保管ラックに移送、位置決め、吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具大、遮へい体付き据え付けガイド、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
6	反射体＋外部プラグ	グリッパの離し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具大、ITV	遠隔操作
7	遮へいプラグ	グリッパ吊り具小と一体の遮へいプラグを地下用グリッパで吊り上げ一時置き場から保管ラックへ移送	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具小、ITV	遠隔操作
8	遮へいプラグ	遮へいプラグ一時置き場から保管ラックへ移送、位置決めしつつ、外部プラグ中心部へ据え付け	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具小、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
9	遮へいプラグ	グリッパを遮へいプラグから離し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業（遠隔操作）
10	反射体＋外部プラグ	乾燥装置を接続し、軽水の乾燥を実施	乾燥装置	作業員の直接作業
11	地下用グリッパ	30t 天井クレーンからグリッパの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
12	仮蓋	仮蓋へクレーンフックの取り付け、保管ラックへの移送、クレーンフックへの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業

Table 2.7.6-1 Spent reflector handling procedure (2/3)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
	減衰待ち後			
13	仮蓋	仮蓋へクレーンフックの取り付け、一時置き場への移送、クレーンフックの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
14	地下用グリッパ	30t 天井クレーンにグリッパの取り付け	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
15	反射体＋外部プラグ	保管位置でクレーンに取り付けたグリッパで掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具大、ITV	作業員の直接作業
16	反射体＋外部プラグ	保管ラックから仮置き位置に移送、位置決め、吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具大、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
17	反射体＋外部プラグ	グリッパの離し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具大、ITV	遠隔操作
18	反射体＋外部プラグ	地下の仮置き位置から反射体メンテナンス室へ吊り上げ	反射体移送キャスク、グリッパ吊り具大、ITV	遠隔操作
19	反射体＋外部プラグ	反射体と外部プラグを分離、反射体に反射体用遮へい体、グリッパ吊り具大取り付け	20t インセルクレーン、パワーマニピュレータ、MS マニピュレータ	遠隔操作（1F 反射体メンテナンス室）
20	反射体	反射体メンテナンス室から放射化機器保管設備室の仮置き位置へ吊り下ろし	反射体移送キャスク、反射体用遮へい体、グリッパ吊り具大	遠隔操作
17	反射体	仮置き位置でクレーンに取り付けたグリッパで掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、反射体用遮へい体、グリッパ吊り具大、ITV	遠隔操作
18	反射体	仮置き位置から保管ラックに移送、位置決め、吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、反射体用遮へい体、グリッパ吊り具、遮へい体付き据え付けガイド、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
19	反射体	グリッパの離し	B1F 30t 天井クレーン、反射体用遮へい体、グリッパ、グリッパ吊り具	作業員の直接作業（遠隔操作）
20	地下用グリッパ	天井クレーンからグリッパの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業

Table 2.7.6-1 Spent reflector handling procedure (3/3)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
21	仮蓋	仮蓋へのクレーンフックへの取り付け、保管ラックへの移送、クレーンフックへの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業

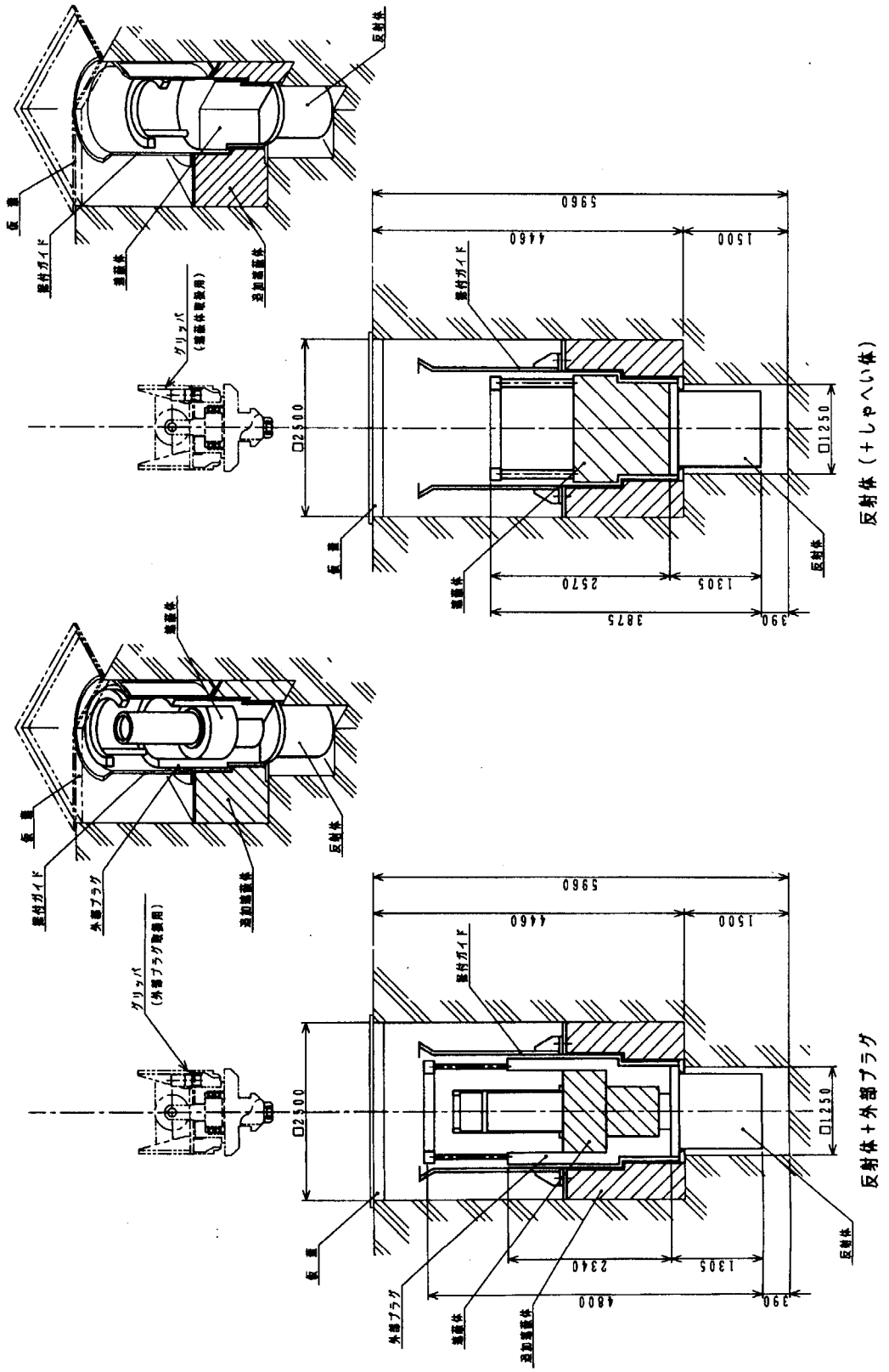


Fig.2.7.6-1 Spent reflector storage facility

２．７．７　ミュオンターゲット保管設備

(1) 設備の要求機能

ミュオンターゲット保管設備はミュオンターゲットを遮へいプラグと一体で保管する設備である。崩壊熱は特に考慮する必要はない。遮へい条件から側面はコンクリートで 1m 相当の遮へい厚を確保するものとした。上部はミュオンターゲット自体の遮へいプラグで確保するものとする。ミュオンターゲットは 6 体の減衰待ち後は共通保管場所に設置したキャスクに移送して保管するものとする。

a. 設備機能要求条件

本設備の要求機能は以下の通りである。

① ミュオンターゲット6体を遮へいプラグと一体で、かつ、直立状態で保管できること。

② 減衰後のミュオンターゲットは遮へいプラグと分離して単独でキャスクに保管できること。

b. 安全設計要求条件及び方針

安全設計上の要求機能は以下の通りである。

① ミュオンターゲットからの遮へいを確保できること

この要求機能に対して、以下のような設計方針をとるものとする。

① ミュオンターゲット保管設備の周囲はコンクリート埋め込みとして遮へいを確保するとともに、上部方向は一体の遮へいプラグの遮へいにより確保する設計とする。なお、減衰後のキャスク保管時にはキャスクにて遮へいを確保する設計とする。

(2) 設備・取扱手順の概要

ミュオンターゲット保管設備は、保管ラック及び仮蓋から構成される。冷却が必要ないことからラックを埋め込み型とする。ミュオンターゲット保管領域は前述の Fig.2.7.3-1 に示す通りターゲット容器保管設備のピットの一角を型枠で仕切り、案内管を設置した後、建屋躯体とお空間には装置側で後打ちコンクリートを流し込む。

保管時の取扱手順を Table 2.7.7-1 に示す。使用済のミュオンターゲットは、取り外し時において反射体移送キャスクグリッパで取り扱うためグリッパ吊り治具が既に取り付けられている。このため、保管時には、反射体メンテナンス室経由で反射体移送キャスクのグリッパを使って放射化機器保管設備室の仮置き位置に吊り下ろす。放射化機器取扱設備室地下の 30t 天井クレーンには反射体移送キャスクグリッパと同等の形状のグリッパを取り付けた上で、仮置き位置のミュオンターゲットを吊り上げ、保管ラックまで移送する。保管ラック所定の位置に ITV とレーザポインタを使って位置決めする。ミュオンターゲットは保管ラックに予め設置しておいた吊り込みガイドに沿って方位決めを行い、保管ラックに吊り下ろす。保管ラックに設置した後は自身の遮へいプラグにより遮へいが確保されているため、グリッパ吊り具は作業員の直接作業により取り外し、仮蓋をする。

減衰待ちの後、ミュオンターゲットは上記と逆の手順で反射体メンテナンス室に吊り上げ、そこでミュオンターゲットと遮へいプラグを分離する。ミュオンターゲット吊り治具を取り付け再度、放射化機器保管設備室に吊り下ろし、30t 天井クレーンにより保管用キャスクに移送

する。遮へいプラグはグリッパ吊り具で放射化機器保管設備室を経由して固体廃棄物として搬出する。

(3) 設備の主要仕様

Fig.2.7.7-1 に機器概念図を示す。なお、Fig.2.7.7-1 に示すとおりミュオンターゲット保管設備の設置スペースの制約から片側のラック配列ピッチが小さくなり、遮へい厚として 425mm 程度しか確保できないため、ミュオンターゲットの設置されている隣のピットには遮へい機能付きのプラグを設置するものとした。

a. 保管ラック

・型　　式：埋め込み式案内管
・主要寸法：336mm（長さ）×275mm（幅）×2600mm（高さ）
・材　　料：SUS304
・基　　数：6 基
・保管容量：1 体／基
・案内管サイズ：□420mm（最大部）

b.地下用グリッパ（地下の保管設備で共通に使用）

・型　　式：回転ロック式グリッパ
・主要寸法：2000mm（長さ）×1220mm（最大外径）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：１式
・重　　量：約 1 ton

c.吊り込みガイド

・型　　式：フランジ固定式
・主要寸法： 600mm（長さ）×600mm（幅）×2100mm（高さ）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：１式

d.グリッパ吊り具（ミュオンターゲット取り外し用治具をそのまま流用）

・型　　式：円筒式
・主要寸法：2600mm（長さ）×550mm（最大外径）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：１式

e.仮蓋

・主要寸法：2300mm（長さ）×2300mm（幅）

・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：1体

f.遮へいプラグ
・型　　式：コンクリートプラグ
・主要寸法：336mm（長さ）×275mm（幅）×1800mm（高さ）
・材　　料：SUS304、コンクリート
・数　　量：1基

g.型枠
・主要寸法：2300mm（長さ）×4000mm（高さ）×40mm（厚さ）×2枚
・材　　料：SUS304
・数　　量：1式

(3) 他設備との取り合い
他設備との取り合いは以下のとおりである。

a. 建家換気空調系
ミュオンターゲット保管エリア雰囲気は建家換気空調系により湿度及び雰囲気温度が適切なレベルに維持されること。

b. 建屋
ミュオンターゲット保管エリアの側面の遮へいは建屋壁により、保管時には周辺に作業員が近づくことが可能なレベルまで線量率を低減できること。
建屋側の取り合い寸法条件は以下のとおり。（詳細はFig.2.7.7-1参照）
・ピット寸法：2300mm（長さ）×2300mm（幅）×5500mm（高さ）
・ピット開口部厚さ：1000mm

c. 地下天井クレーン
グリッパをクレーンフックに取り付けられること。また、グリッパ駆動装置及び位置決め装置（ITV及びレーザポインタ）をクレーン台車に取り付けられること。

Table 2.7.7-1 Spent muon target handling procedure (1/2)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
1	仮蓋	仮蓋へクレーンフックの取り付け、一時置き場への移送、クレーンフックの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
2	吊り込みガイド	吊り込みガイド設置	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
3	ミュオンターゲット	反射体メンテナンス室から放射化機器保管設備室の仮置き位置へ吊り下ろし	反射体移送キャスク、グリッパ吊り具	遠隔操作
4	ミュオンターゲット	仮置き位置でクレーンに取り付けたグリッパで掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具	遠隔操作
5	ミュオンターゲット	仮置き位置から保管ラックに移送、位置決め、吊り下ろし	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、吊り込みガイド、ITV、レーザポインタ	遠隔操作
6	ミュオンターゲット	グリッパの離し	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具	遠隔操作
7	グリッパ吊り具	グリッパ吊り具を取り外し、移送、一時置き場に保管	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業
8	吊り込みガイド	吊り込みガイド撤去	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
9	仮蓋	仮蓋へクレーンフックの取り付け、保管ラックへの移送、クレーンフックへの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業

Table 2.7.7-1 Spent muon target handling procedure (2/2)

	取扱対象	取扱内容	取扱機器・治具	備考
	減衰待ち後			
10	仮蓋	仮蓋へクレーンフックの取り付け、一時置き場への移送、クレーンフックの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業
11	グリッパ吊り具	グリッパ吊り具の一時置き場からの保管ラックへの移送、ミュオンターゲットに取り付け	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業
12	ミュオンターゲット	保管ラックでクレーンに取り付けたグリッパで掴み	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ	作業員の直接作業
13	ミュオンターゲット	保管ラックから仮置き位置へ移送、	B1F 30t 天井クレーン、グリッパ、グリッパ吊り具、MS マニピュレータ	遠隔操作
14	ミュオンターゲット	仮置き位置から反射体メンテナンス室に吊り上げ	反射体移送キャスク、 グリッパ吊り具	遠隔操作
	以下ミュオンターゲットの遮へいプラグからの分離等１Ｆでの作業以降省略			
15	仮蓋	仮蓋へクレーンフックの取り付け、保管ラックへの移送、クレーンフックの取り外し	B1F 30t 天井クレーン	作業員の直接作業

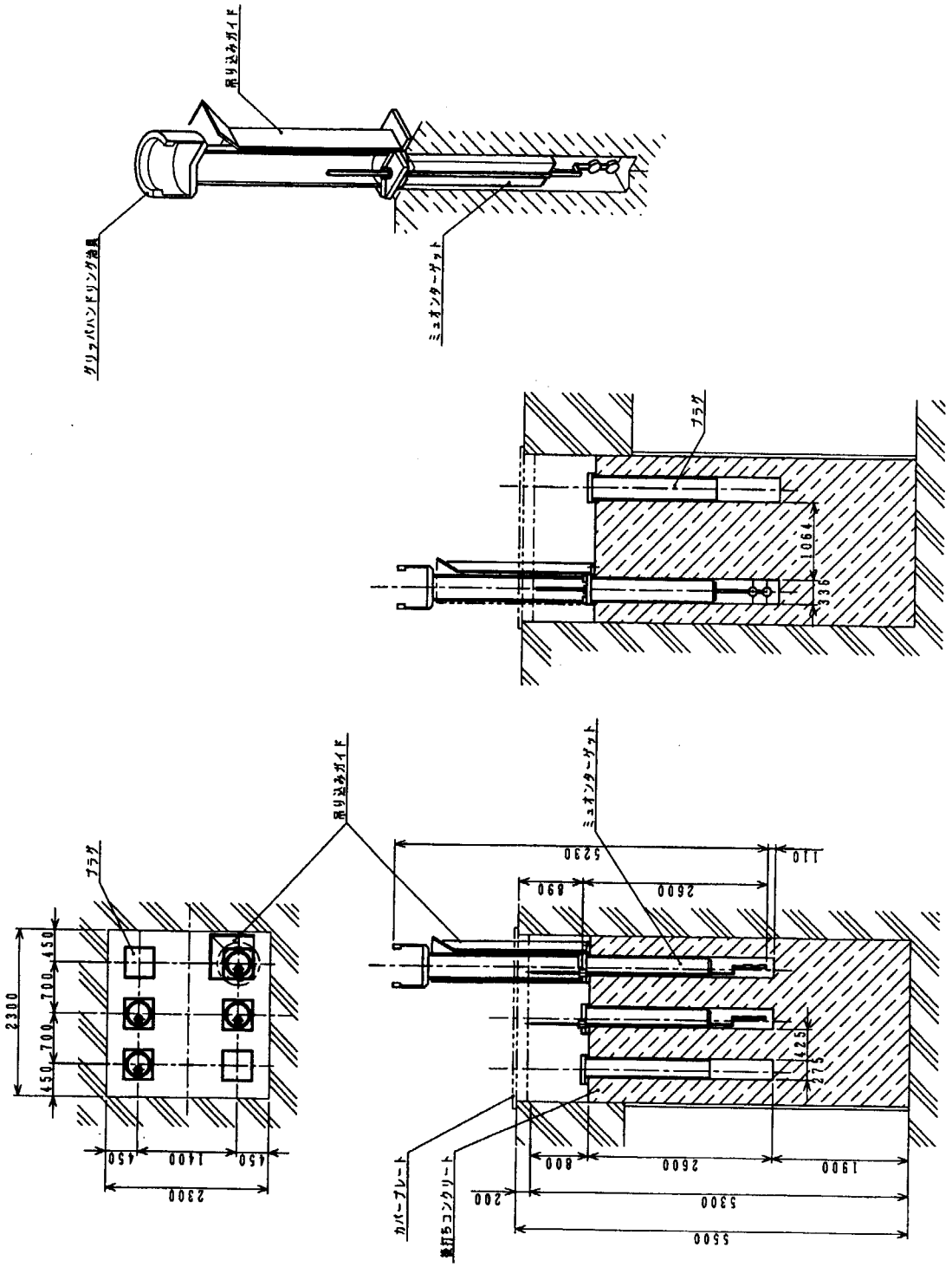


Fig.2.7.7-1 Spent muon target storage facility

２．７．８　使用済減速材容器等切断装置

(1) 設備の要求機能

使用済減速材容器等切断設備は放射化機器保管設備室の有効活用、合理化等のため、減速材容器について減速待ち保管後、放射化機器取扱室の切断装置で切断し、ドラム缶に詰めて長期保管するための設備である。同時に遮へいプラグから分離後の陽子ビーム窓の配管についても切断できる設備とする。また、必要があればさらに高減容するため、高減容処理施設へ搬出して処理する。

a. 設備機能要求条件

本設備の要求機能は以下の通りである。

① 使用済減速材容器及び陽子ビーム窓を保管用フレームから取り出し、切断できること。

② 切断した使用済減速材容器をドラム缶詰めできること。

b. 安全設計要求条件及び方針

安全設計上の要求機能は以下の通りである。本設備は減速材容器を６年程度減衰した後、取り扱うことから、除熱上の要求はないものの、保管時と異なり距離の効果が期待できないことから人間が直接取扱うことは困難なことが予想されるため遮へいの要求がある。

① 使用済減速材容器及び減衰後の陽子ビーム窓、反射体からの遮へいを確保できること

本安全設計要求に対しては以下の設計方針で対応する。

② 使用済減速材容器等切断設備の壁面、底面及び上部はコンクリート壁による遮へいを施し、切断自体は遠隔処理で行うことにより遮へいを確保する設計とする。

(2) 切断方式の検討

切断装置については遮へいを確保しつつ切断処理を行う必要があると考えられることから遠隔処理で切断する方式を選定する必要がある。このため、地下２階に放射化機器取扱室（ホットセル）を設ける。Table 2.7.8-1 に遠隔切断に適用可能な切断方式について摘出し、評価した結果を示す。この表に示す通り、切断面の変形を最小限とできるレーザ切断方式が有望である。なお、設備の簡素化が可能な機械切断を代案とする。

ここでは、本切断設備の概念としてレーザ切断方式を正案として選定し、代案を機械切断方式として評価・検討を行った。

(3) 設備・取扱手順の概要

本設備は、切断装置（レーザ切断ロボット)、保管容器仮置き、受け容器及びその他治具等から構成する。保管容器仮置きは減速材容器を放射化機器取扱室内のクレーンに受け渡すための支持構造物である。減速材容器の放射化機器取扱室までの移送は放射化機器取扱設備室の 30t 天井クレーンにて行う。減速材容器は仮置きに一時設置した後、放射化機器取扱室のクレーンとパワーマニピュレータにより切断装置まで移送し、パワーマニピュレータで支持しながら、切断装置で切断する。切断した減速材容器片は受け容器で受け、クレーン及びパワーマニピュレータを用いてドラム缶に詰める。

切断装置は切断ロボット、レーザ系（トーチ、発振器、電源、冷却装置)、アシストガス系

（ガス供給装置、ボンベ等）、排気系（フード、フィルター、ブロワ）等から構成する。レーザ光はレーザ発振器（ヘッド）から光ファイバ経由でレーザトーチから放出され、アシストガスを流して溶融金属を吹き飛ばしつつ切断する。アシストガスの排気中に含まれるエアロゾルは排気系フィルターでろ過した後、建家排気系系に排出する。また、放射化機器取扱室には切断時のアシスト用の MS マニピュレータと観察用の遮へい窓、天井クレーン及びパワーマニピュレータを設置する。

(4) 設備の主要仕様

主な機器仕様は以下の通りである。機器概念図を Fig.2.7.8-1 に、レーザ切断装置の機器構成を Fig.2.7.8-2 に示す。

a. 切断装置

・型　　式：レーザ切断方式（YAG レーザ）
・取扱対象物数：1 体／処理
・基　　数：1 基
・レーザ 出 力：平均 3kW、ピーク 50kW
・レーザ伝送方式：光ファイバ
・主要構成機器
・切断ロボット：多関節アーム式、アーム旋回半径 1635(最大)、重量 360kg
・レーザ発信器：パルス式、3kW、2500mm（長さ）×500mm（幅）×540mm（高さ）
・レーザ 電 源：75kW/基、2 基、2500mm（長さ）×500mm（幅）×2000mm（高さ）
・冷 却 装 置 ：60kW/基、2 基、1400mm（長さ）×900mm（幅）×500mm（高さ）
・昇圧トランス：75kW/基、2 基、800mm（長さ）×600mm（幅）×1000mm（高さ）
・アシストガス供給装置：酸素ボンベ供給式
・フ ー ド ：1800mm（長さ）×2500mm（幅）×3000mm（高さ）、材質 SUS304、
・フ ィ ル タ：HEPA フィルター、2 基、流量 1000Nm^3/h、
　　500mm（長さ）×600mm（幅）×1500mm（高さ）
・縦置き円筒セラミックフィルタ：1 基、
・ブ ロ ワ：流量 1000Nm^3/h
・レーザ制御盤、ロボット制御盤

b. 保管容器仮置き架台

・型　　式：縦置き方式
・主要寸法：1000mm（長さ）×400mm（幅）×50mm（高さ）
・材　　料：SUS304
・基　　数：1 基

(5) 他設備との取り合い

他設備との取り合いは以下の通りである。

a. 建家換気空調系

放射化機器取扱室雰囲気は建家換気空調系により湿度及び雰囲気温度が適切なレベルに維持されること。また、切断に伴い発生するアシストガスの処理が行えること（ドロスについてはフィルターで除去した後、建家排気系に送る)。

b. 建屋

切断エリアの側面の遮へいは建屋壁により、周辺に作業員が近づくことが可能なレベルまで線量率を低減できること。

建屋側の取り合い寸法条件（放射化機器取扱室）は以下のとおり。

・ピット寸法：13500mm（長さ）×4980mm（幅）×8000mm（高さ）

・ピット開口部最小：2300mm（長さ）×2300mm（幅）×1000mm（高さ）

また、切断装置の制御盤の配置スペース（2000mm×4500mm）を切断装置に近接する領域に確保できること。

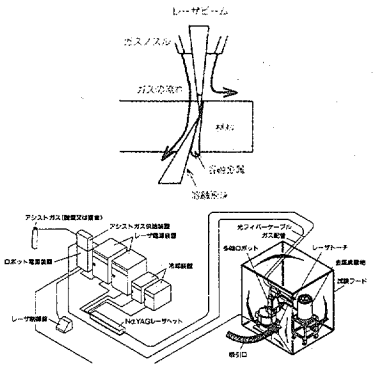
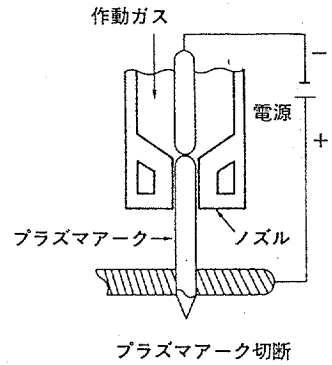
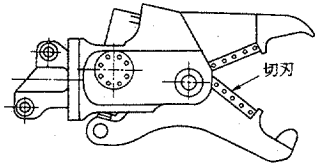
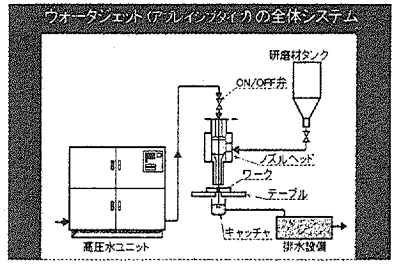
c. 地下天井クレーン

グリッパをクレーンフックに取り付けられること。また、グリッパ駆動装置及び位置決め装置（ITV 及びレーザポインタ）をクレーン台車に取り付けられること。

d. 放射化機器取扱室クレーン、パワーマニピュレータ、MS マニピュレータ

減速材容器等の切断処理のため、放射化機器取扱室にはグリッパ付きクレーン、パワーマニピュレータ、ＭＳマニピュレータの設置が可能なこと。

Table 2.7.8-1　Comparisons of moderator vessel cutting methods

	レーザー切断	プラズマアーク切断	機械切断	ウォータージェット切断
概念		 プラズマアーク切断	 (a) せん断方式	
特徴	高エネルギー密度のレーザビームを切断対象に照射し，母材を溶融させ、アシストガスを流して除去し、切断する。	電極と対象物の間に電圧をかけ、プラズマアークを発生させて、作動ガスにより吹き出させることで母材を溶融、除去し切断する	はさみ状の刃、または平行刃により被切断物にせん断力を与え，破壊切断する。剪断刃の駆動を油圧におり行うことで遠隔での接岸を可能とする。	高圧水を被切断物に吹き付け切断する、または研磨材細粉を混入して被切断物に吹き付け，局部的に減耗させて切断する 切断に際して熱発生がなく、切断面に熱影響や加工歪がほとんど出ない。
切断性能	減速材容器の配管、容器は数 mm であり適用できる。 ・YAG レーザ　SUS25～30mm （・炭酸ガスレーザ SUS300mm）	切断の熱効率が高く 60—80％と高く厚板（SUS304 で 65mm 程度）まで切断が可能で十分適用できる	鉄骨切断機では 50～240mm 程度の切断が可能である。	SUS で 40～50mm 程度の切断は可能であり、十分適用できる。
遠隔操作への適合性	YAG レーザを用いることで光ファイバ伝送が可能であり、レーザ発振器等は管理区域外に設置することで遠隔切断に適合し、複雑な形状にも対応しやすい。（炭酸ガスレーザは発信器を管理区域内に設置が必要で適用しにくい） ノズルと切断対象の距離はビームフォーカスを合わせるため数 mm オーダで位置決めが必要。	電源セル外に設置し、ケーブルで接続できるため、遠隔切断に適合する。薄肉金属の切断にはアークの出力調整が必要となる。 ノズルと切断対象の位置合わせは数 10mm オーダの精度で十分である。	切断時の切断条件の設定が重要となる。また、機械的切断のため、剪断刃の寿命が課題となる。高温ガス炉で使用されている制御棒切断装置では制御棒数体の処理に 1 回、刃の交換が必要となっている。 本装置の場合、切断時以外は装置セルに入室が可能であり、メンテナンスは可能と考えられる。	切断反力が小さいので、ノズルの駆動にロボットを容易に適用できる。ただし、切断に利用した水の回収設備が必要となる。
廃棄物	切断溶融金属がドロス及びエアロゾルとなり、固体廃棄物となるが、レーザ切断では溶融量が少なく 2 次廃棄物発生量は少ない。エアロゾルは雰囲気調整系でフィルタリングする。	切断溶融金属がドロス及びエアロゾルとなり、固体廃棄物となる。レーザ切断に比べ溶融量が多く廃棄物発生量は多い。エアロゾルは雰囲気調整系でフィルタリングする。	剪断刃が固体廃棄物になる。	放射化または放射性物質が付着した容器、配管の切断では、使用した水及びその中に含まれる切断片が廃棄物となるため、専用の水処理設備が必要となる。
構成	ビームノズルの他、以下の設備が必要。 レーザ発信器、レーザ電源、冷却装置、アシストガス供給装置、レーザ制御盤	アークノズルの他、以下の設備が必要。 プラズマ電源、冷却装置、アシストガス供給装置、制御盤	剪断刃及びユニット、油圧装置、制御盤	ノズルヘッドの他、以下の装置が必要となる。 高圧水ユニット、研磨材タンク、キャッチャ、排水設備、制御盤
試料調整への適用性	切断面の変形が少なく、試料調整にも適用可能。	切断面が荒れるため、試料調整には向かない。	切断面が変形することから試料調整には向かない。	切断面の変形は少なく試料調整にも適用可能。
評価	減速材容器は薄肉機器であり、形状変更にも対応容易で、試料調整に適用可能であり、廃棄物の少ない YAG レーザ切断は適用可能。	操作性で優れ、コストも安いが、廃棄物発生量でレーザ切断に劣り、試料調整にも向かない。	剪断刃の寿命が対象物により異なり、交換の容易さ等が課題だが、必要機器数少なくコストは有利で、試料調整を別設備で行う場合には有望。	切断性能は満足するが、使用した水の処理設備が必要であり、不利となる。

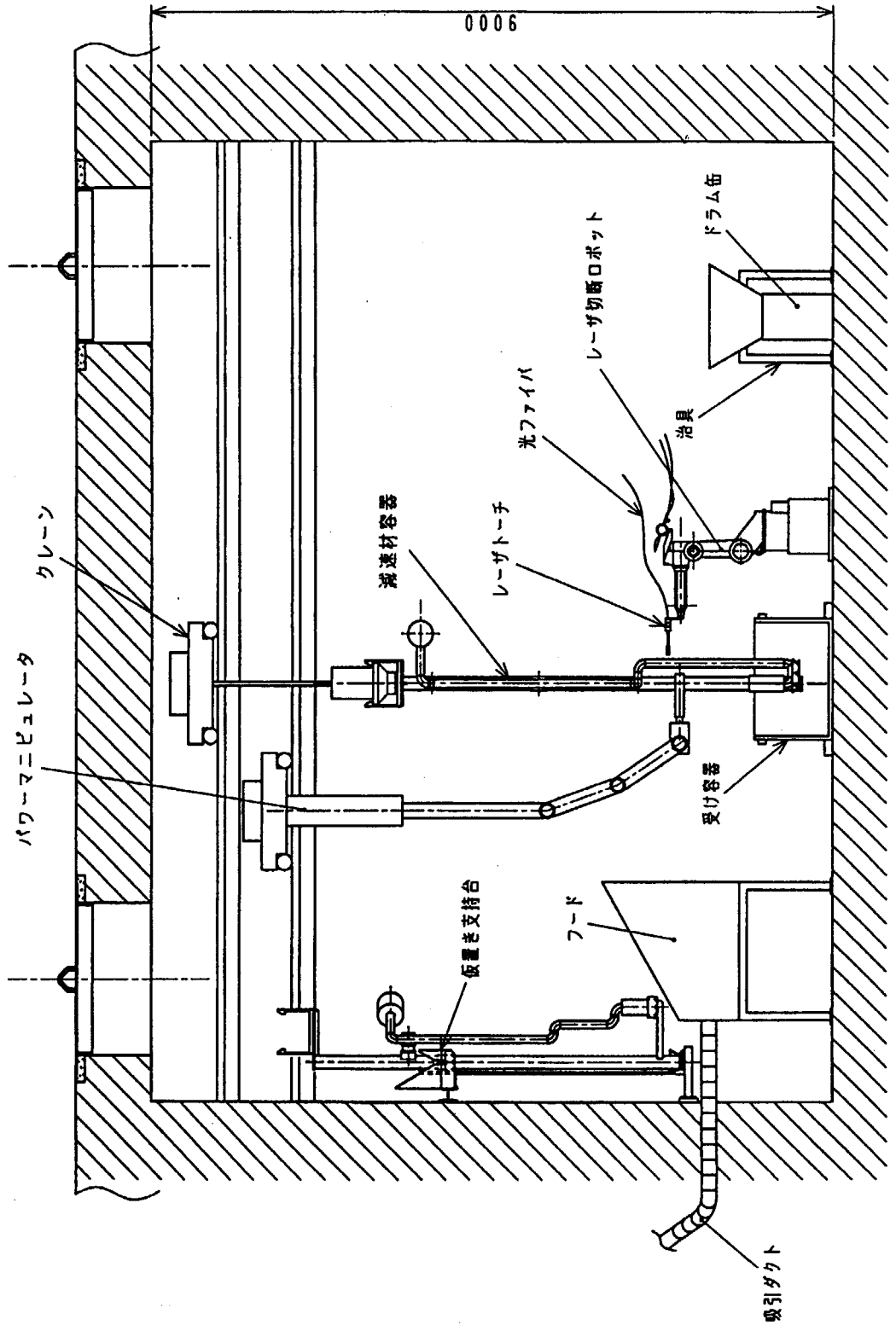


Fig.2.7.8-1 Moderator vessel cutting machine concept

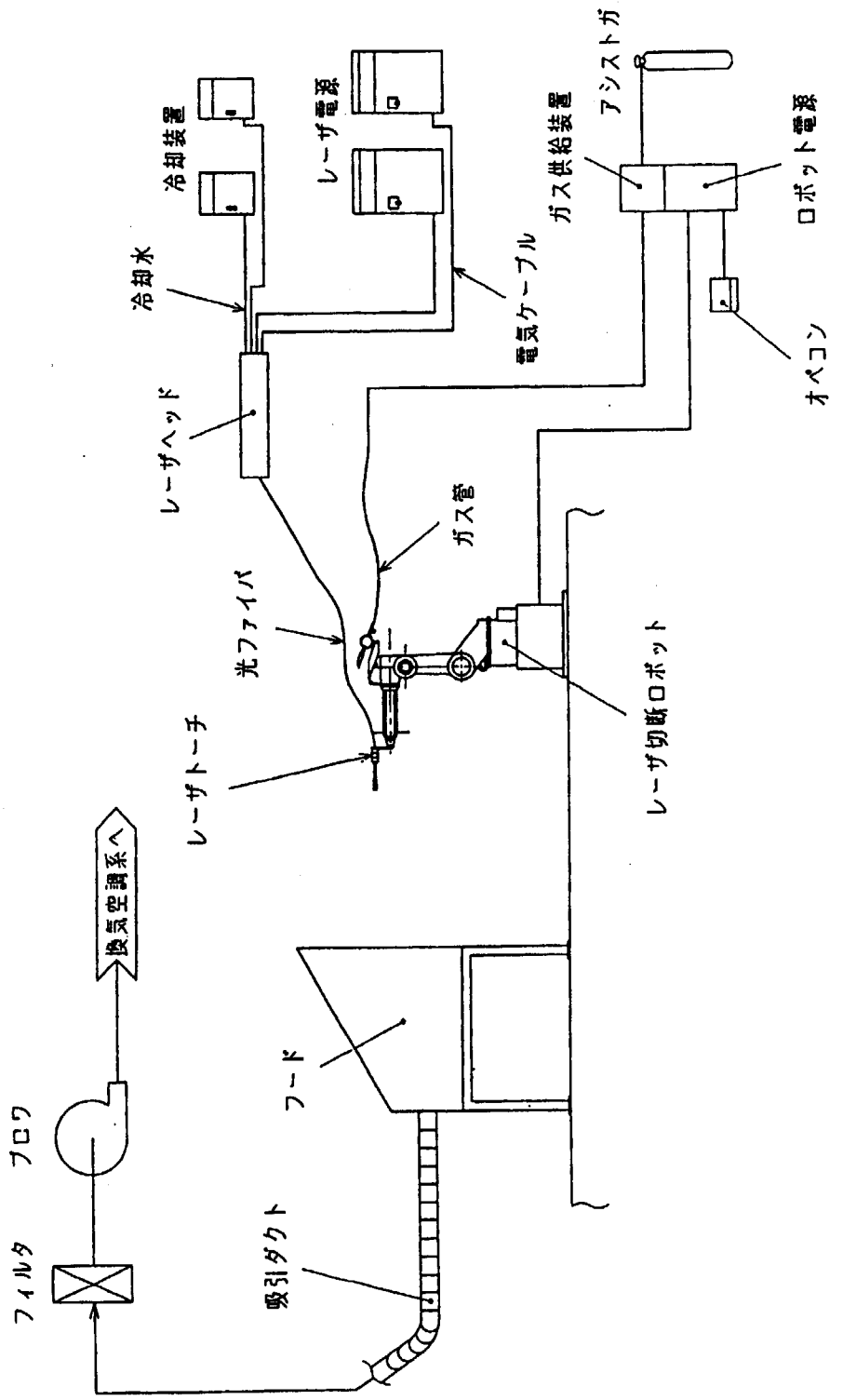


Fig.2.7.8-2 Major components of a cutting machine

２．７．９　ターゲット容器搬出キャスク

(1) 設備の要求機能

ターゲット容器搬出キャスクは、水銀ターゲット容器保管設備で減衰待ち後の水銀ターゲット容器を内包した保管容器を施設外に搬出するための遮へいキャスクである。ターゲット容器の搬出時期は保管容量から早くても 8 年後となるが取扱時期の裕度を確保するため、1 年後には搬出可能なように側面及び底部で 31ｃｍ、上面で 22cm の遮へい厚を確保する設計とした。

a. 設備機能要求条件

本設備の要求機能は以下の通りである。

① 使用済ターゲット容器保管容器を内部に設置して、移送できる状態とすること。

b. 安全設計要求条件及び方針

安全設計上の要求機能は以下の通りである。

① 使用済ターゲット容器からの放射線防護のための適切な遮へいを有すること。

② 管理区域から外を移送することを考慮して、キャスク側に水銀漏洩を防止するためのシール性を持たせること。

この安全設計要求に対しては以下の設計方針で対応するものとする。

① キャスクの周囲には十分な遮へい体を設ける設計とする。

② キャスクの接合部はシール溶接により漏洩を防止するとともに、キャスク蓋は外蓋と内蓋に分離してシール性を確保する設計とする。

(2) 設備・取扱手順の概要

本設備は、遮へいキャスク及び遮へい蓋により構成する。放射化機器保管設備室 30t クレーンと MS マニピュレータにより水銀ターゲット容器保管容器をキャスク内に装荷し、２重蓋を固定する。大型機器取扱作業室の 130t 天井クレーンにより第 3 機器搬出入口に吊り上げ搬出する。遮へいキャスクは製作性を考慮して遮へい体をボルト接合し、接合部をシール溶接して漏洩を防止する構造とする。キャスクの下部には落下時の衝撃を緩和するための緩衝機構を設置することで水銀ターゲット容器保管容器を損傷させない設計とした。

(3) 設備の主要仕様

主な機器仕様は以下の通りである。機器外形図を Fig.2.7.9-1 に示す。

a. 遮へいキャスク

・型　　式：鉄遮へい体キャスク
・主要寸法：2630mm（長さ）×2540mm（幅）×3430mm（高さ）
・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）
・数　　量：１基
・取扱容量：１体
・重　　量：約 90ｔ／基（遮へい蓋重量も含む）
・そ の 他：トラニオン付き

b. 遮へい蓋

・型　　式：二重蓋方式

・主要寸法：2200mm（長さ）×2100mm（幅）×170mm（高さ）内蓋

2500mm（長さ）×2400mm（幅）× 50mm（高さ）外蓋

・材　　料：炭素鋼（防錆塗装）

・数　　量：１基

(5) 他設備との取り合い

他設備との取り合いは以下の通りである。

a. 水銀ターゲット容器保管容器

水銀ターゲット容器保管容器からの水銀漏洩がないこと。

b. 放射化機器保管設備室 30t 天井クレーン

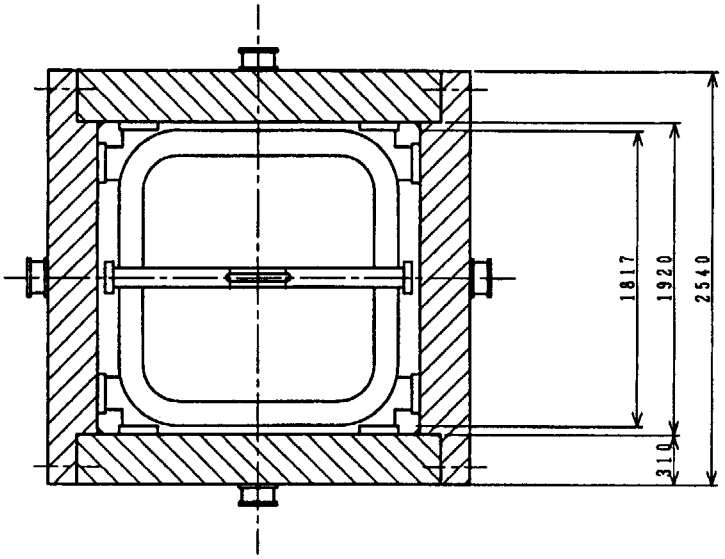
グリッパをクレーンフックに取り付けられること。また、グリッパ駆動装置及び位置決め装置（ITV 及びレーザポインタ）をクレーン台車に取り付けられること。

c.大型機器取扱作業室 130t クレーン

130t クレーンにより、キャスクを第 3 機器搬出入口に吊り上げられること。

d. MS マニピュレータ

ＭＳマニピュレータによりキャスクの蓋締め作業が可能なこと。



断面Ａ－Ａ

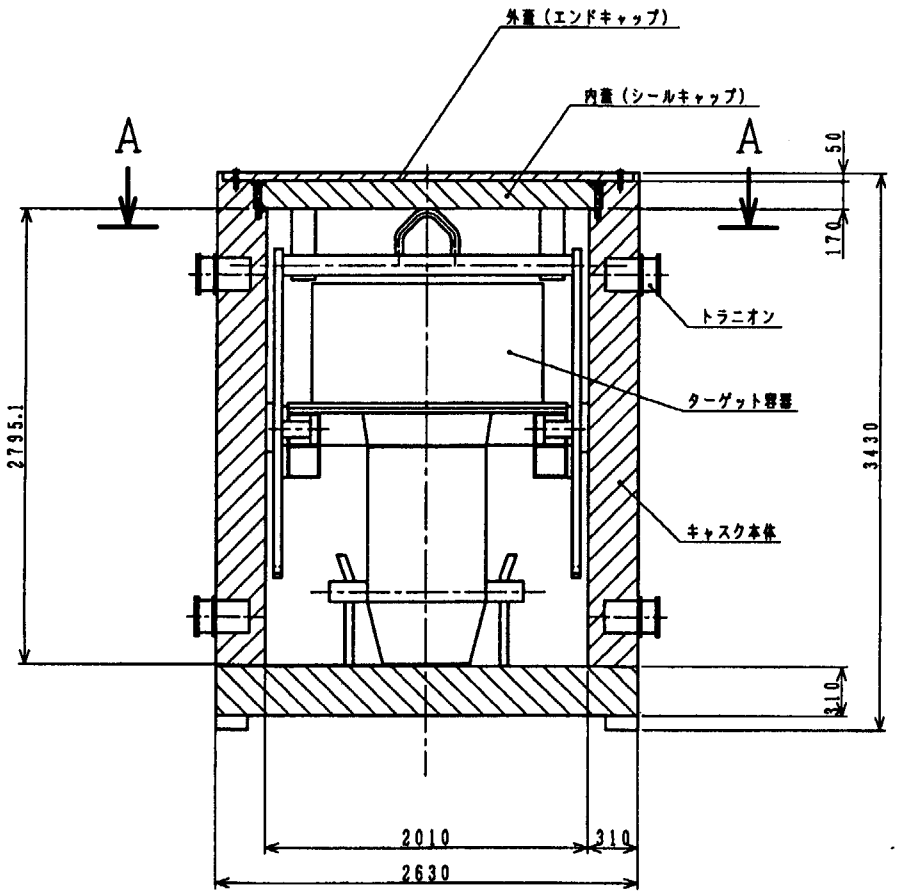


Fig.2.7.9-1 Spent target vessel transportation cask

２．７．１０　汎用放射化機器保管設備

汎用放射化機器保管設備は、物質・生命科学実験施設で発生する各種の不定形の放射化機器を保管する設備である。保管の際には遮へいが必要な保管物についてはキャスクに入れて保管する。本設備は、汎用保管スペースから成る。

(1) 設備の要求機能

a. 系統機能要求

本設備の系統としての要求機能は以下の通りである。

① 放射化機器等を保管できること、

b. 安全設計要求

安全設計上の要求機能は遮へいされたものを取り扱う前提のため特にない。

(2) 設備の概要

保管スペースはFig.2.7.2-2、Fig.2.7.2-3の汎用保管エリアとして示した部分である。

保管対象物は以下の通りである。

① ミュオンスクレーパー（２種類）：各１体

② ピローシール（ミュオン、２種類）：各６体

③ 水銀循環系ポンプ、水銀熱交換器、他水銀循環系で使用し水銀に汚染されている機器、部位品類：１式

④ 中性子ビーム窓（フランジ付き角型アルミ管：数体

⑤ シャッター内コリメータ（全長2m）：数体

⑥ 陽子ビームラインモニタ（NMトン熱内設置のモニタ：500×500×500mm）：4体

⑦ チャコールフィルタ：約30m^3（600×600×300mm×24個／年×12年）

２．７．１１　使用済水銀ターゲット容器保管容器

使用済水銀ターゲット容器保管容器は、核破砕中性子源として使用する水銀ターゲット容器の保管、搬送、ターゲット台車への水銀ターゲット容器取り付け時及び取り外し時に保持・収納するための気密構造の容器である。

(1) 設備の要求機能

水銀ターゲット容器は、Fig.2.7.11-1 に示すハル一体型水銀ターゲット容器を想定する。使用済水銀ターゲット容器保管容器は、ターゲット台車から取り外した使用済水銀ターゲット容器を収納し、保管容器として使用する。また、新ターゲット容器をターゲット台車へ取り付ける際にも保持容器として使用する。

ａ．設備要求機能

使用済水銀ターゲット容器保管容器の要求機能は以下の通りである。

① 水銀ドレン後の使用済水銀ターゲット容器を収納できること。
② 使用済水銀ターゲット容器を収納した状態で搬送できること。
③ 使用済水銀ターゲット容器の保管容器として使用できること。
④ 使用済水銀ターゲット容器保管時の水銀蒸気の漏洩防止ができること。また、必要により保管容器内の温度上昇に伴い発生する容器内圧に対する健全性が確保できる構造とすること。
⑤ ターゲット容器交換台車と協調して水銀ターゲット容器取り付け、取り外し時の位置決めができること。
⑥ ターゲット容器交換台車上に保管容器を横置きして使用済水銀ターゲットを交換する際に、ターゲットが滑落しないようロック機構を有すること。
⑦ 保管容器の材質は使用済水銀ターゲット容器からの放射線を考慮した耐放射線性を有すること。

ｂ．安全設計要求及び設計方針

保管容器については、使用済水銀ターゲット容器を収納した状態においては、遠隔操作で取り扱うため放射線安全上の設計要求は無い。

(2) 設備の構造の概要

使用済水銀ターゲット容器保管容器外形図を Fig.2.7.11-2 に、構造説明を以下に示す。

① 使用済水銀ターゲット容器の崩壊熱除去のためのヘリウムガス封入及び空冷効果を促進するための外面冷却フィン取り付けは行わない。
② 取り扱いの簡素化及び重量低減化のため容器を自立させるための保管用支持脚構造は採用せず、保管は専用のラックで行う。
③ 保管容器の蓋は、特に遠隔取扱等の容易さ等を考慮して保管容器本体と一体とし、また水銀ターゲット容器から後方へ張り出している接続配管や支持部と干渉せずに被せることが出来るように、キャップ状の形状とする。このため、蓋をかぶせる際にこれら張り出し部

と干渉しないように、蓋の保管容器本体の結合ピンとの取り合い部を長穴とする。

④ 本体部には、水銀ターゲット容器収納時の容器支持台および保管容器を交換台車上に設置するためのトラニオンを設ける。

⑤ 蓋部は、本体部とボルト締めによりで取付け、内部を密封する構造とする。また、蓋上部にはインセルクレーンで取扱うためのフックを設ける。蓋部と本体の接続部にはバイトンあるいは金属製のシールパッキンを用い、容器内部の水銀漏洩を防止する。

⑥ 使用済水銀ターゲット容器保管容器を保管するために行う、本体部と蓋部とのボルト締めは、ターゲット取扱室に設ける仮置き架台上で行う。

⑦ 水銀ターゲット容器保管容器は、トラニオンによりターゲット容器交換台車上に位置決めする。

(3) 設備の主要仕様

使用済水銀ターゲット容器保管容器の主要仕様を以下に示す。

・形　　式：鋼製容器（蓋ボルト締め取り付け）
・使用数量：3 個/年
・材　　質：SUS304
・設計温度：200℃
・設計圧力：0.2MPa
・容器内雰囲気：空気
・気 密 性：2×10-1 Pa m^3／sec
・耐放射線性：2×10^6 Gy
・重　　量：約 500 kg
・附 属 品：仮置き架台 2 基（1500mm×1900mm×1800mmH、
　　内 1 基はターゲット容器交換台車上に設置）

(4) 取り合い条件

a. 取り合い場所

使用済水銀ターゲット容器保管容器の取扱・移送経路及び手順は Fig.2.7.2-1 に示す通りである。搬出入に関る取り合い場所は以下の通りである。

① 新ターゲット収納の使用済水銀ターゲット容器保管容器

新しいターゲット・容器は、使用済水銀ターゲット容器保管容器に収納された状態で B1F に搬入され、水銀ターゲット容器保管設備ラックに仮置きされる。

② 空の使用済水銀ターゲット容器保管容器

使用済ターゲット・容器を収納するための、空の使用済水銀ターゲット容器保管容器は、B1F の水銀ターゲット容器保管設備ラックに仮置きされる。初回以降は①の、新ターゲットを装荷して回収された使用済水銀ターゲット容器保管容器が使用可能である。

③ 使用済ターゲット収納の使用済水銀ターゲット容器保管容器

水銀ターゲット容器保管設備ラックに長期保管された、使用済ターゲットを収納している

使用済水銀ターゲット容器保管容器は、保管設備ラックから取出されターゲット容器搬出キャスクに収納され、1Fの天井クレーンによりB1Fから搬出される。

b. 取合い対象

① 水銀ターゲット容器

使用済水銀ターゲット容器保管容器の収納対象機器であり、使用済水銀ターゲット容器保管容器内ではインセルクレーンによる搬送時及び保管時は垂直状態で、ターゲット台車との着脱時には、ターゲット容器交換台車上に搭載されて水平状態で、それぞれ保持可能であること。

② クレーン類

使用済水銀ターゲット容器保管容器の移送には、1 階のターゲット取扱室内では 20t インセルクレーンを、地下 1 階の放射化機器保管設備室内では 30t 天井クレーンを、それぞれ使用する。クレーンフック（又はグリッパ）の着脱は遠隔にて行えるものとし、着脱位置の確認は目視により行う。なお、クレーンと使用済水銀ターゲット容器保管容器の遠隔着脱は、MS マニピュレータを用いて行うものとする。

③ ターゲット容器交換台車

使用済水銀ターゲット容器保管容器は、水銀ターゲット着脱時にはターゲットターゲット容器交換台車に設置したトラニオンにより支持される。ターゲット容器交換台車移動中並びに、水銀ターゲット容器着脱中に使用済水銀ターゲット容器保管容器が台車から脱落しないこと。またターゲット容器交換台車上に、使用済水銀ターゲット容器保管容器用の仮置き架台を 1 ケ所設けること。

④ 仮置き架台（ターゲット取扱室）

ターゲット取扱室内の使用済ターゲット容器保管容器搬送ルート上に仮置き架台を 1 ケ所設けること。仮置き架台にて、使用済ターゲット容器保管容器の蓋のボルト締め及び水銀モニタによる汚染検査が行えること。汚染検査は、フードを仮置き架台に取り付けることにより、外部雰囲気から蓋固定部を隔離した上で検査することを考慮する。

⑤ マニピュレータ及びパワーマニピュレータ

仮置き架台にて、使用済水銀ターゲット容器保管容器の蓋のボルト締めが行えること。また必要により水銀モニタのセンサー類を移動することが出来ること。

⑥ 水銀モニタ

仮置き架台にて、使用済水銀ターゲット容器を収納した使用済水銀ターゲット容器保管容器の蓋をボルト締めした後、表面の水銀汚染の検査が行えること。

⑦ 水銀ターゲット容器保管設備

使用済水銀ターゲット容器を収納した使用済水銀ターゲット容器保管容器を長期保管できること。

⑧ 建家

ターゲット取扱室の 20t インセルクレーンにより吊り上げられた使用済水銀ターゲット容器を、1 階と地下 1 階の間の遮へいハッチを経由して移送可能であること。また、これに関

連して、必要な遮へい壁厚さを確保すること。

⑨　ターゲット容器搬出キャスク

水銀ターゲット容器保管設備で保管され、放射能が減衰した使用済水銀ターゲット容器を使用済水銀ターゲット容器保管に入れたまま、建家外に搬出するために使用する。使用済水銀ターゲット容器保管容器を、放射化機器保管設備室の 30t 天井クレーン及び MS マニピュレータにより収納することが出来ること。

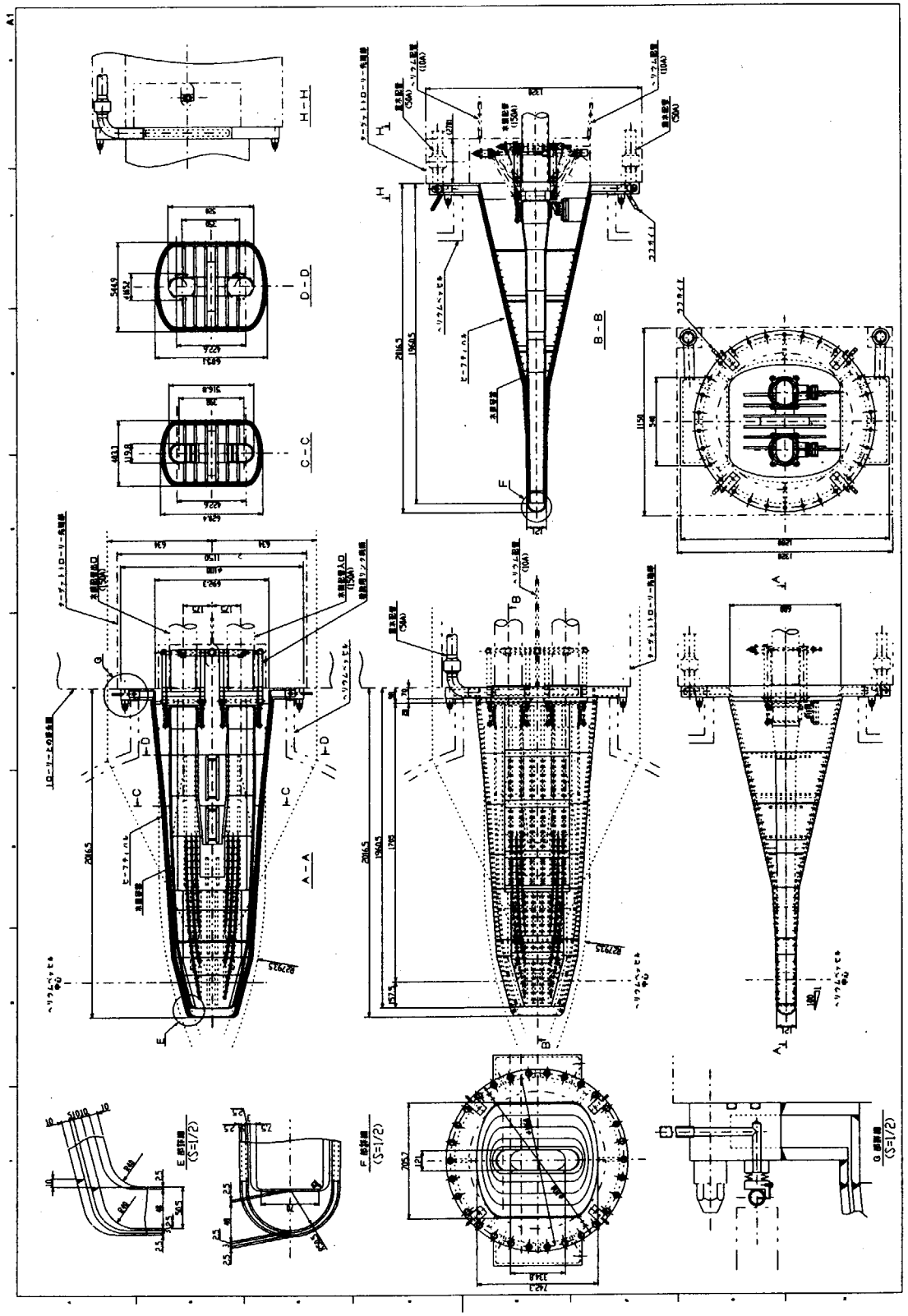


Fig.2.7.11-1 Target vessel with safety hull

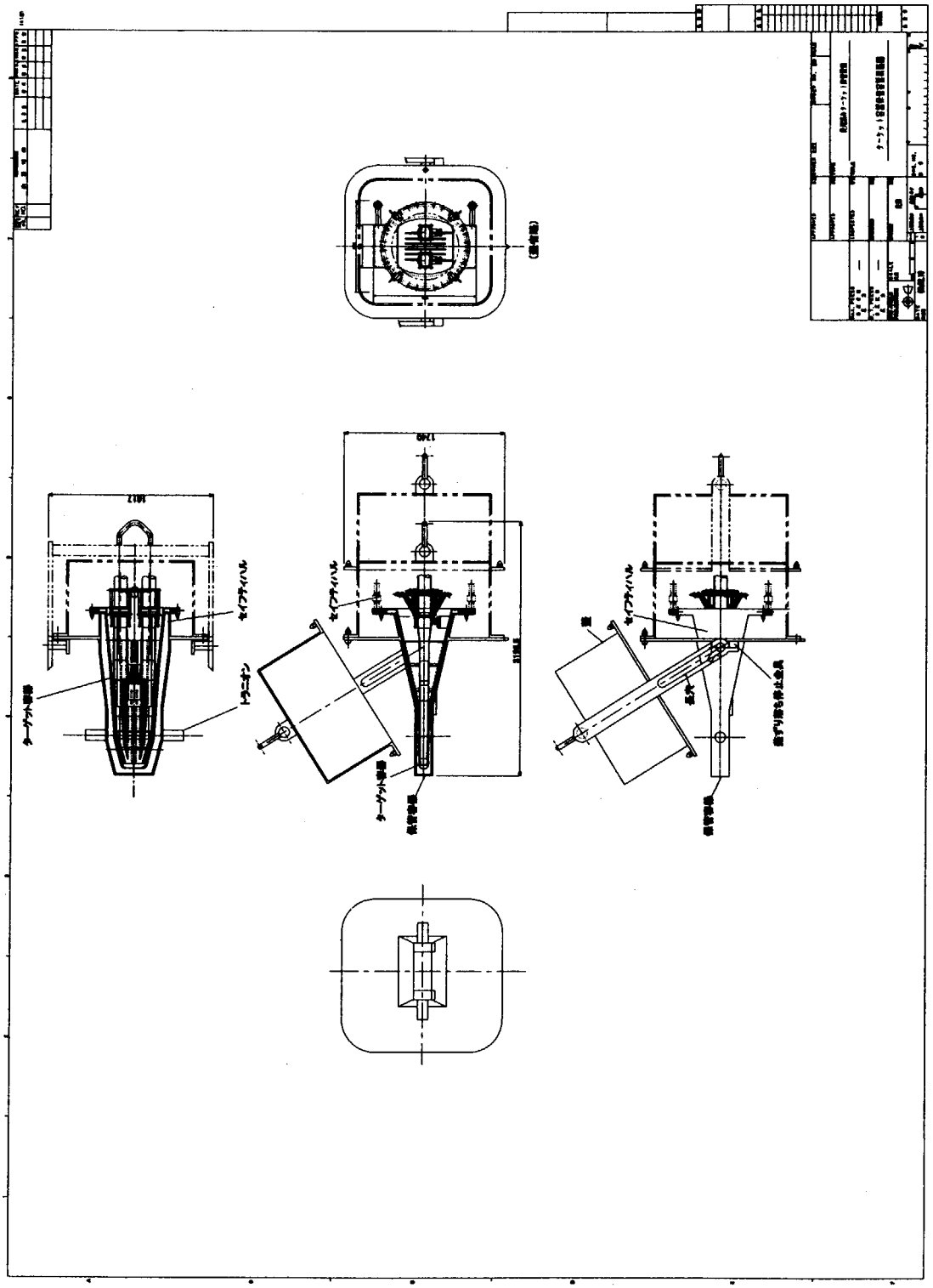


Fig.2.7.11-2 Spent target vessel storage container

２．７．１２　ターゲット容器交換台車

ターゲット容器交換台車は、ターゲット取扱室において使用済水銀ターゲット容器保管容器を搭載し、ターゲット台車まで水銀ターゲット容器の搬送を行うための設備である。水銀ターゲット容器は、突合せ構造によりターゲット台車と結合して固定する。交換台車の設計では、水銀ターゲット容器仮置き架台を交換台車上に設置するものとして、交換台車の構造を検討した。なお、ターゲット容器交換手順から、交換台車上に同時に 2 基の水銀ターゲット容器を搭載した状態で交換台車の走行は無いものとした。

(1) 設備の要求機能

a. 設備要求機能

ターゲット容器交換台車の要求機能は以下の通りである。

① 使用済ターゲット容器保管容器を搭載して、ターゲット台車までの搬送ができること。

② ターゲット台車からの使用済ターゲット容器の取り外し時および新ターゲット容器の取り付け時の位置決めができること。中性子照射等に伴う経年変化も考慮して追従可能であること。

③ ターゲット容器の仮置き架台を有すること。

④ 定期的な交換、ある程度保守頻度を要する部品等については遠隔での取扱が可能な構造であること。

⑤ モータについては遮へい材の使用も含め集積線量：2×10^{6}Gy 以上に耐えられる構造とすること。

b. 安全設計要求及び設計方針

ターゲット容器交換台車については、使用済水銀ターゲット容器を収納した状態においては、遠隔操作で取り扱うため放射線安全上の設計要求は無い。ただし、転倒防止については十分に配慮するものとする。

(2) 設備の構造の概要

ターゲット容器交換台車構造図を Fig.2.7.12-1 に、システム構成を Fig.2.7.12-2 に示す。また、ターゲット台車及び交換台車の建家内配置を Fig.2.7.12-3 及び Fig.2.7.12-4 に、交換台車の据え付け時における位置矯正方法を Fig.2.7.12-5 に示す。構造の概要を以下に示す。

① ターゲット容器交換台車は、インセルクレーンで吊りターゲット台車前方のレール上に搬送､設置する方式とする。なお、今回設計では後述する様に中性子ターゲット側の１F 天井クレーンの寄り付が制限されたこと、交換台車上に仮置き架台が設置されて台車全長が長くなったことにより、ターゲットトロリ退避位置を後退させる必要がある。

② ターゲット容器交換台車駆動源の給電方式としては、従来通りケーブルのハンドリングの煩雑さがないバッテリー給電方式とし、無線により操縦する方式とした。

③ 走行機構には、左右方向のギャップを極小化するために、通常の台車等に使用しているフランジ付の車輪方式でなく、サイドローラを設けた構造とする。

④ ターゲット台車へ向かっての停止位置の確認は、接触式変位（距離）計により行う。また、

交換台車後退ストロークの確認については、交換台車走行レールの近傍にポールを設け、これにリミットスイッチを接触させることにより行う。

⑤ 正確に水銀ターゲット容器をターゲット台車に取り付けるためには、位置決めピンに倣わせて（案内して）嵌め込む等することが必要である。このため、水銀ターゲット容器搭載台には位置決めピンに倣って高さ方向の調整が可能な機構を設ける必要がある。この水銀ターゲット容器搭載台の高さ方向調整機構として、機構の簡素な空気バネ方式を採用とする。

⑥ 本体部には、使用済水銀ターゲット容器保管容器の搭載および交換台車上での位置決めの容易性を考慮して保管容器を受けるトラニオン支持台を設ける。

⑦ 不使用時、ターゲット交換台車を保管、メンテナンスするための場所をターゲット台車メンテナンス室の一区角に設け、短距離の走行用レールを敷設すると共に、覗き窓とＭＳマニピュレータ、パワーマニピュレータで保守作業を行うものとする。

⑧ 上記メンテナンススペースで出来ない保守、補修作業については、ターゲット取扱室の天井ハッチから搬出して対応するものとする。

(3) 運転操作方法

運転操作場所はターゲット取扱室外側の第 1 マニピュレータ操作室に設けた操作パネルより、覗き窓、ITV による画像を介して原則として目視にて運転する。新しい水銀ターゲット容器及び使用済水銀ターゲット容器の交換作業の概略は以下の通りである。

① 水銀ターゲット容器内の水銀、冷却水をドレンした後ターゲット台車を後退させる。次に、水銀ターゲット容器前方にターゲット容器交換台車を 20t インセルクレーンを用いて設置する。

② ターゲット容器交換台車上の仮置き架台に使用済水銀ターゲット容器保管容器を 20t インセルクレーンで搭載する。

③ 使用済水銀ターゲット保管容器の蓋の取り付けボルトを MS マニピュレータ又はパワーマニピュレータを用いて外す。

④ ターゲット容器交換台車上に使用済水銀ターゲット容器保管容器を搭載する。

⑤ 交換台車をターゲット台車に向けて前進させ、水銀ターゲット容器を使用済水銀ターゲット容器保管容器に収納する。その後配管コネクタを解除、ジャンパー管を撤去する。

⑥ その後、ターゲット台車に固定しているボルトを解除し、ターゲット容器交換台車を後退させる。

⑦ 予めターゲット取扱室に搬入、仮置き架台（床上）に設置してある新水銀ターゲットを収納した水銀ターゲット容器保管容器を、ターゲット容器交換台車上の仮置き架台に搭載する。

⑧ 使用済水銀ターゲットが収納された保管容器を、20t インセルクレーンで引き起こしながら吊り上げ、仮置き架台（床上）に移送する。（その後、地下 1 階の放射化機器保管設備室へ移送）

⑨ 新しい水銀ターゲット容器保管容器の蓋の取り付けボルトを外し、交換台車上に搭載する。

⑩ 交換台車をターゲット台車に向けて前進させ、水銀ターゲット容器保管容器をターゲット台車に密着させる。その後配管コネクタを締結、ジャンパー管を設置する。

⑪ その後、ターゲット台車に支持するボルトを締結し、完了後ターゲット容器交換台車上に残った水銀ターゲット容器保管容器ごと交換台車を後退させる。

⑫ 空の保管容器を、20t インセルクレーンで引き起こしながら吊り上げ、仮置き架台（床上）に移送する。

⑬ ターゲット交換台車メンテナンススペースにターゲット容器交換台車を 20t インセルクレーンを用いて移動、保管する。

(4) 設計条件

・使用年数：30 年

設備の運転に際しては必要なメンテナンスを実施することを前提とし、メンテナンスフリーを意味するものではない。

・使用頻度：６往復／年

・設計地震力：水平加振力　0.25G

台車走行時に地震が発生した場合には、速やかに台車を停止するが、走行中の地震によりターゲット容器交換台車の、使用済水銀ターゲット容器保管容器の支持機能が損なわれないこと。

・設置雰囲気：大気圧空気（空調環境）、温度 10～40℃

・放射線環境

① ターゲット運転時／ターゲット容器交換台車待機時（年間 5000 時間）

ターゲット台車近傍　　：約１～10G y /h

ターゲット台車ＬＭガイド部：約１mGy/h

② ターゲット停止時／ターゲット容器交換台車運転時

ターゲット台車水銀設備台車上（表面）　：約１mGy/h

ターゲット台車ＬＭガイド部　　：約１mGy/h

・停止精度：±２mm 以内（ターゲット台車後端での停止精度±５mm に追従する）

・水銀ターゲット容器保管容器支持部倣い量：±３mm（平行移動）

±２度（上下方向）

・動作時間：80 時間以内（待機状態を含む）

(5) 設備の主要仕様

ターゲット容器交換台車の主要仕様を以下に示す。

・形　　式：軌条自走式台車

・数　　量：１　台

・駆動方式：モーター駆動、無線誘導方式

・給電方式：バッテリー方式

・積載容器重量：約 2.5 トン

・主要材質：炭素鋼およびステンレス鋼

・走行速度：～0.1m/s

・動作時間：80時間以内（待機状態を含む）
・付 属 品：原点位置検出用センサー
接触式変位（距離）計
タッチセンサー
走行用モーター
蓄電池・充電装置
操作パネル
制御装置
データ送受信装置
水銀キャッチパン

(6) 取合対象及び取合条件

a. 水銀ターゲット容器保管容器

水銀ターゲット容器保管容器は、水銀ターゲット・容器が収納又は空の状態でターゲット容器交換台車に搭載可能であること。

b. ターゲット台車

ターゲット台車に対しては、所定位置でターゲット容器交換台車が寄り付く事を許容し、パワーマニピュレータ等の遠隔操作機器を使用して、ターゲット台車と取り外し可能な水銀ターゲット容器の配管、ケーブルが遠隔にて着脱が可能であること。流体配管着脱時には外部に漏洩を生じないこと。

水銀ターゲット容器のターゲット台車上の取付精度は、照射による変形等を含めて規定値以下であること。

ターゲット台車は、ターゲット容器交換台車の稼動重複範囲において構造物が干渉しないこと。

・水銀ターゲット・容器位置決め精度：±1mm以内（ターゲット容器位置の再現性）
・ターゲット台車停止位置精度　　：±1mm（前進端）
　　±5mm（後進端）
・水銀ターゲット容器位置調整可能量：±3mm（平行移動）
　　±2度（上下方向）

c. 走行レール及び支持金物

床面には所定の構造のターゲット容器交換台車レールが所定の精度にて設置されること。

ターゲット容器交換台車は使用時にインセルクレーンで吊り上げ、ターゲット台車前方の走行レール上に移送・設置するため、インセルクレーンにより所定の精度に設置できる構造を有すること。

d. インセルクレーン

インセルクレーンは、ターゲット容器交換台車を吊り上げてターゲット容器交換台車メンテナンススペースより設置場所に所定の精度で移送出来る事。同様にメンテナンススペースまで回収のため移送できること。なお、インセルクレーンフックとターゲット容器交換台車の遠隔着脱は、インセルクレーン側にその機能を有するものとする。

・揚程：９ｍ

・吊り上げ荷重：20 トン（主巻き）

e. MS マニピュレータ及びパワーマニピュレータ

ターゲット台車メンテナンススペースのターゲット容器交換台車保管場所において、保守及び修理が可能なように室外から目視にて MS マニピュレータ及びパワーマニピュレータがアクセス可能であること。

f. 建家

水銀ターゲット容器がターゲット台車から遠隔交換される作業スペース及びターゲット容器交換台車のメンテナンス作業スペースが目視にて確認できる遮へい窓を設けること。

ターゲット容器交換台車を保守スペースに設置している時には、必要により遮へいが確保されていること。

ターゲット取扱室内に無線送受信機器が設置できること。

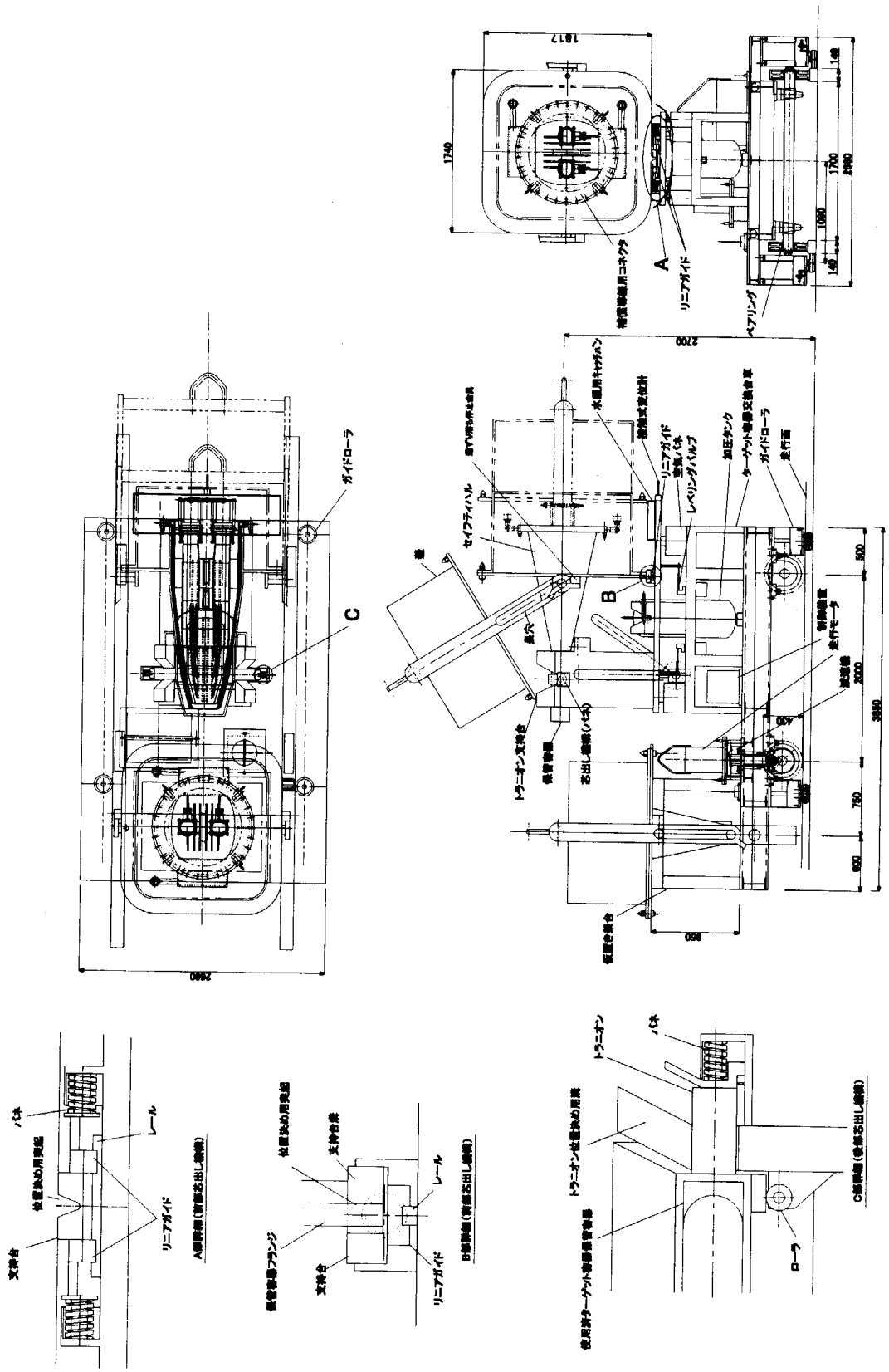
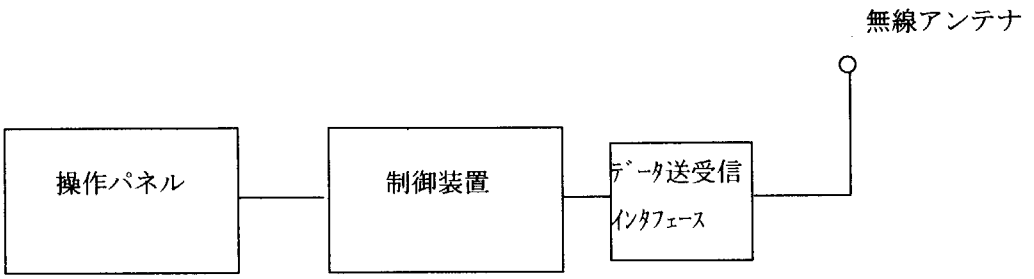


Fig.2.7.12-1 Target vessel exchange truck



地上側

台車側

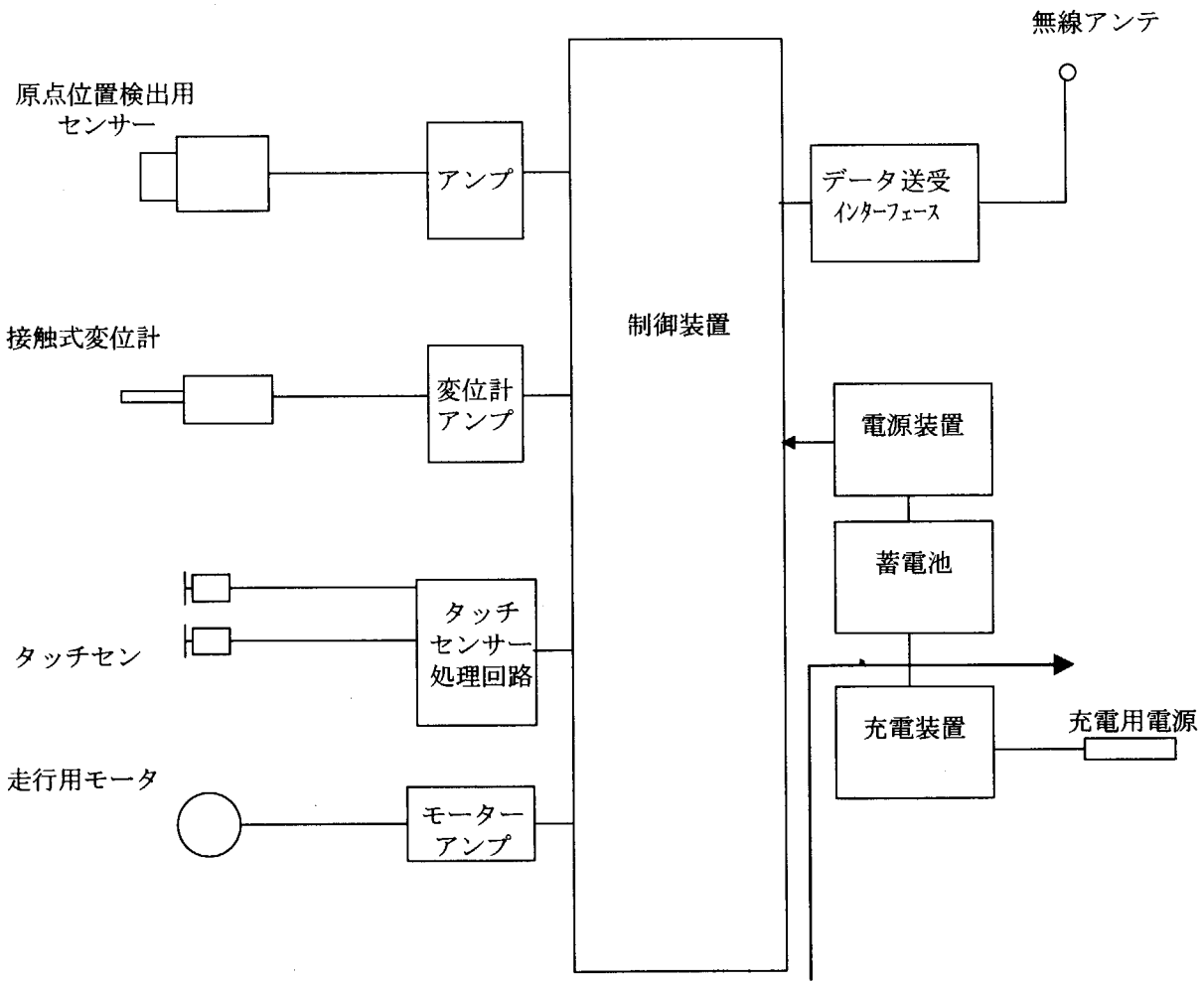


Fig.2.7.12-2 Target vessel exchange truck control system concept

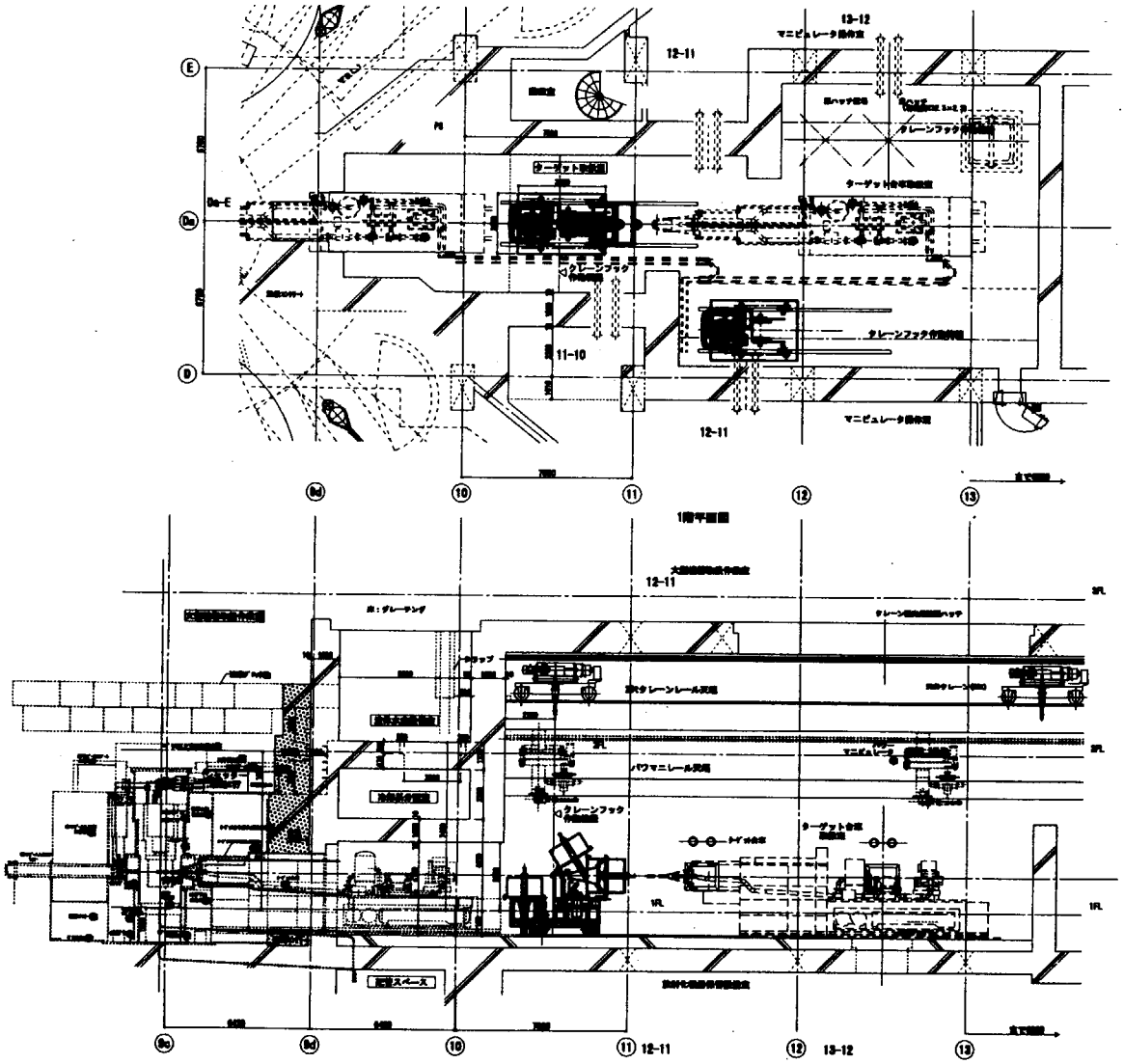


Fig2.7.12-3 Relationship between target vessel exchange truck and target trolley

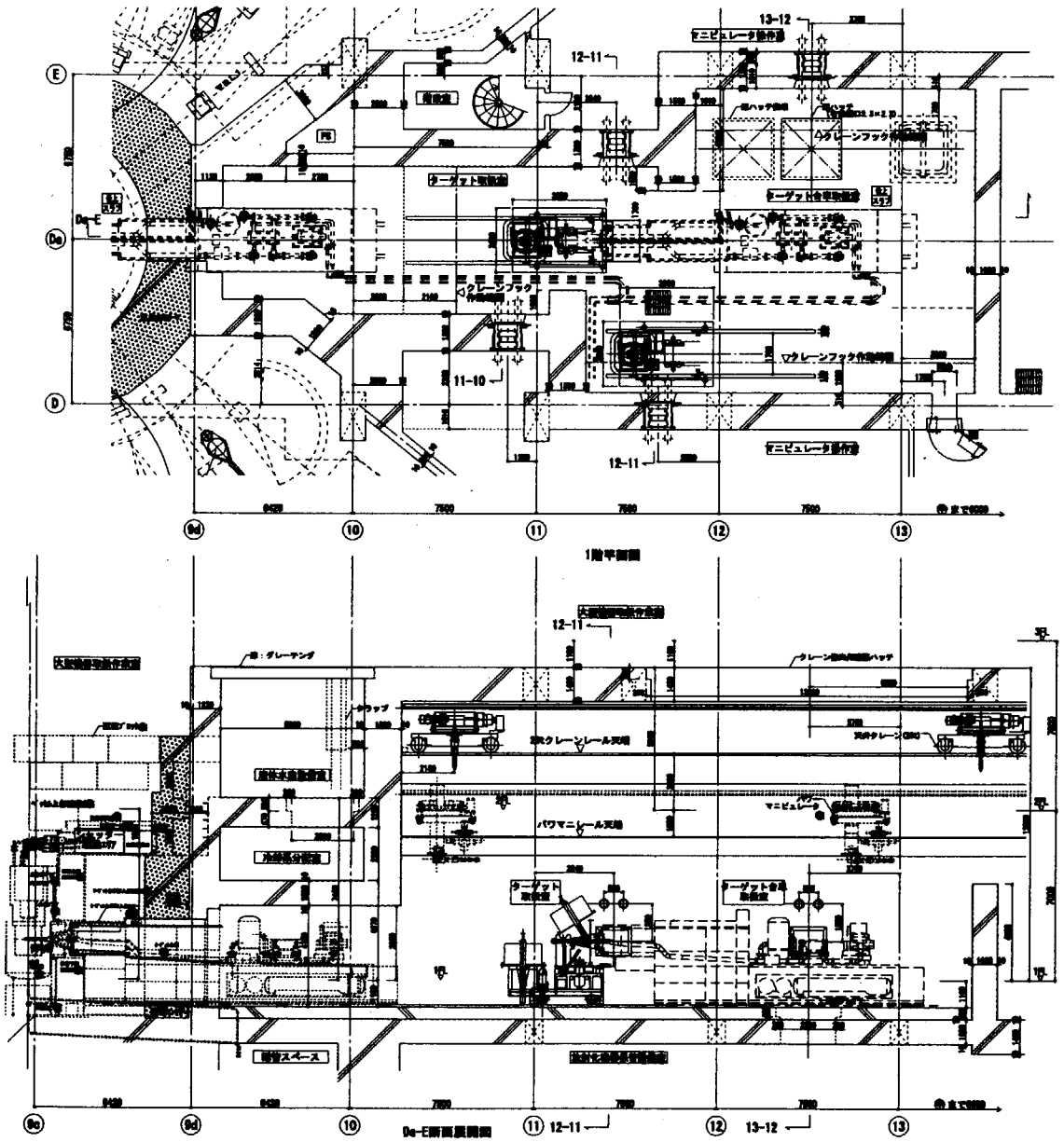
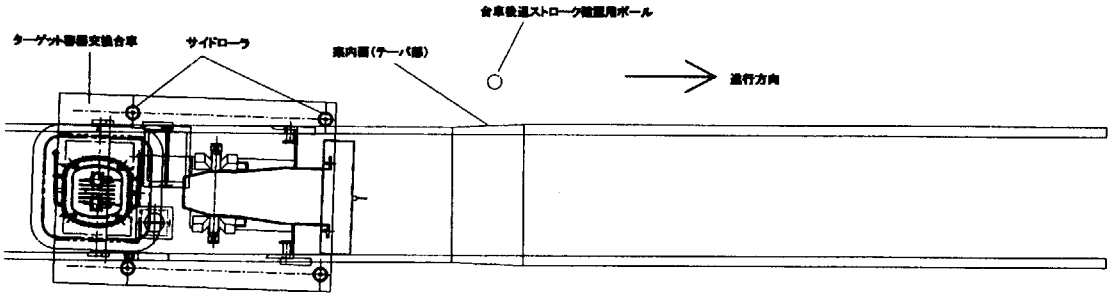
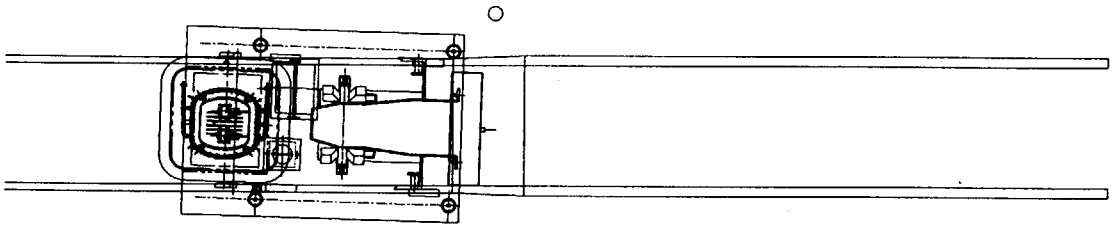


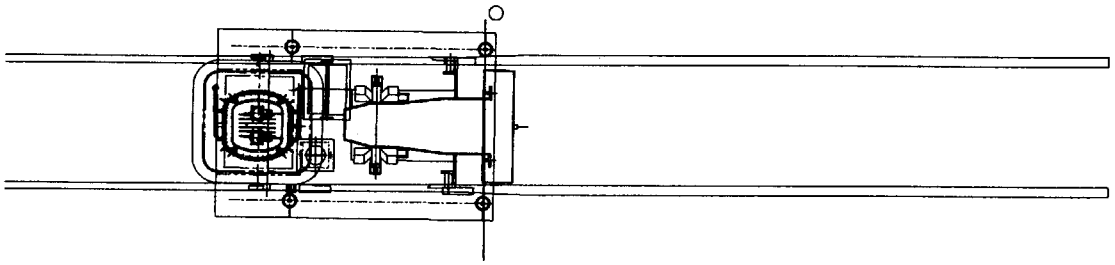
Fig.2.7.12-4 Location of target vessel exchange truck during target exchange



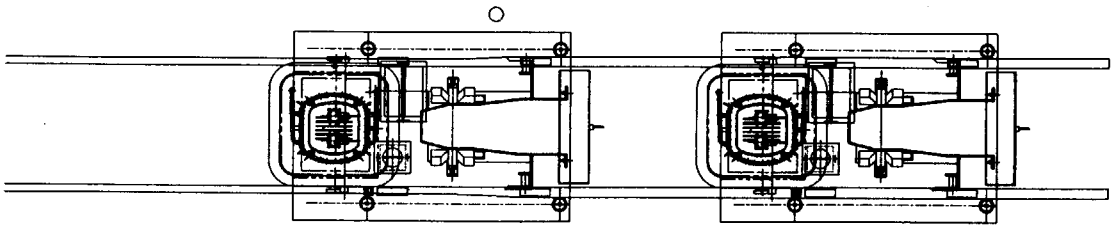
1. 交換台車が傾いて据付けられた状態



2. 案内（ガイド）面のテーパ部入り口部までターゲット交換台車を進行
（車輪は進行方向に対し傾いているが、サイドローラが案内面に拘束されているので、台車は進行方向に進行



3. 左前輪が案内面（テーパ部）に拘束され、案内面に倣う



4. 後輪が案内面（テーパ部）がテーパ部入り口部に接触した後、台車全体の位置ずれ矯正が完了

Fig2.7.12-5 Position adjusting method of target vessel exchange truck

２．８　放射性排気、排水処理設備

２．８．１　放射性気体、放射性液体の生成量評価

1MW の 3GeV 陽子ビームが中性子ターゲット、ミュオンターゲット、スクレーパー、電磁石等でビームロスを起こすことにより様々な物質が放射化する。この中で、放射化した気体及び冷却水は物質・生命科学実験施設からの気体廃棄物、液体廃棄物となる。放射化した気体及び冷却水は定期的に外部に排出する必要があるため、気体及び冷却水による放射性核種の生成量を評価し、排気中の放射性核種の濃度、排水中の放射性核種の濃度を算出し、障害防止法で定められた放出濃度限度以下（設計目標値は法令値の半分）になるように物質・生命科学実験施設からの気体廃棄物、液体廃棄物の排出シナリオをきめる必要がある。気体廃棄物、液体廃棄物となる放射性核種の生成量の評価は NMTC/JAM 及び DCHAIN-SP2001 コードを用いて行った。評価結果を Table 2.8.1-1、2.8.1-2 に示す（年間 5000 時間 1MW の 3GeV 陽子ビーム入射を仮定）。

２．８．２　放射性排気処理設備と排気シナリオ

物質・生命科学実験施設の管理区域は基本的に換気空調が行われ、プレフィルタ及び高性能フィルタ等を用いて濾過した後、スタックから排出される。但し、3GeV ビーム輸送ラインの主トンネル、M1 トンネル、M2 トンネル及び中性子シャッター駆動エリア、鉄遮蔽体内の空気は加速器の運転中は閉じ込めで循環空調を行い、加速器運転停止後、短寿命核種の減衰を待って換気空調系に切り替える。排気系統図を Fig. 2.8.2-1 に示す。スタックから放出される気体の総排気量は年間を通して約 270000m^3/h である。

スタックから排出される対象となる放射性核種の量は Table 2.8.1-1 に記載されているものであるが、これらの放射性核種の量は極めて多く、このままスタックから排出すると障害防止法で定められた放出濃度限度以下（設計目標値は法令の半分）にすることは困難である。Table 2.8.1-1 で放射性核種の量が極めて多いのは水銀ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射性ｶﾞｽで、他の箇所からの量はそれに比べるとかなり小さい。そこで、水銀ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射性ｶﾞｽに関しては、別途、気体廃棄物処理システムで処理した後でスタックへ排出することを検討している。Fig. 2.8.2-2 に気体廃棄物処理システムの概念図を示す。気体廃棄物処理システムでは、トリチウム 1000 、アルゴン 50、クリプトン 100、キセノン 100、ヨウ素 2000、水銀 10000 の除染係数を想定している。この気体廃棄物処理システムを使うことにより、スタックから放出される放射性核種の年平均の濃度は Table 2.8.2-1 に示すようになる。法令では３ヶ月平均の濃度で規制されるため、水銀ターゲットからの放射性ｶﾞｽをいつ放出するかによって、３ヶ月平均の濃度は Table 2.8.2-1 よりも高くなるが、適切な排気シナリオによって法令の放出濃度限度以下、設計目標値以下にすることは可能であろう。

２．８．３　放射性排水処理設備と排水シナリオ

物質・生命科学実験施設には３系統（3GeV 陽子ビームライン系、低レベル系、高レベル系）の排水処理設備室がある。排水系統図を Fig. 2.8.3-1～2.8.3-3 に示す。

３GeV 陽子ビームライン系の排水設備室には 15m^3 の廃液貯槽が２基設置されている。この廃液貯槽は、M2 トンネル内にあるミュオンターゲット、スクレーパ、ミュオン二次ビームライン

電磁石、陽子ビームライン電磁石等の冷却水（総量 6.4m^3）を排水するために主に使われる。排水中に含まれる放射性核種の量は年間トリチウム 4.8×10^9Bq（Table 2.8.1-2 参照）で、年に１度排水すると 15m^3 の廃液貯槽内での濃度は 320Bq/cm^3 となる。この濃度は設計目標値 30Bq/cm^3 を超えているが、年間１２サイクル程度の加速器運転があるとして、そのサイクル毎にミュオンターゲット、スクレーパ、ミュオン二次ビームライン電磁石、陽子ビームライン電磁石等の冷却水を排水することにすれば、排水中のトリチウムの濃度は 27Bq/cm^3 となり、設計目標値 30Bq/cm^3 以下にすることができる。そこで、加速器運転サイクル毎に 15m^3 の廃液を第二排水溝から排水するシナリオにする。

低レベル系の排水設備室には 30m^3 の廃液貯槽が２基設置されている。この廃液貯槽は、汚染検査室での退出時の手洗い等の水を排水するために使われ、排水中の放射性核種の濃度は極めて低い。従って、廃液貯槽が一杯になった時に第二排水溝から排水することができる。

高レベル系の排水設備室には 10m^3 の廃液貯槽が２基設置されている。この廃液貯槽は、中性子ステーション周りの冷却水のうち軽水を用いている陽子ビーム窓冷却水、ヘリウムベッセル冷却水、モデレーター冷却水、ﾀｰｹﾞｯﾄ台車先端遮蔽体冷却水を対象にしているが、1MW の陽子ビームパワーの時には、陽子ビーム窓冷却水、ヘリウムベッセル冷却水、モデレーター冷却水、ﾀｰｹﾞｯﾄ台車先端遮蔽体冷却水のトリチウムの濃度は 5.4×10^4Bq/cm^3（生成されるトリチウムの量は Table 2.8.1-2 から年間 5.4×10^{11}Bq で、冷却水の総量は約 10m^3）と非常に高く、加速器運転サイクル毎の濃度としても 4500Bq/cm^3 で、タンクローリーで処理場に引き渡すことができる濃度 1200 Bq/cm^3 よりも濃いため排水することはできない。従って、陽子ビームのパワーが小さい段階であれば、陽子ビーム窓、ヘリウムベッセル、モデレーター、ﾀｰｹﾞｯﾄ台車先端遮蔽体等の冷却水をこの廃液貯槽を介してタンクローリーで処理場に引き渡すことを行うが、1MW の陽子ビームパワーを達成した後は、陽子ビーム窓、ヘリウムベッセル、モデレーター、ﾀｰｹﾞｯﾄ台車先端遮蔽体等の冷却水は使い続け、この廃液貯槽は漏水時に漏水を溜めてそれを希釈して排水することに使うことになる。

２．８．４　今後の課題

水銀ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射性ｶﾞｽを処理する気体廃棄物処理システムは、運転開始後、陽子ビームパワーの増大に応じて導入を考えている。そのため、気体廃棄物処理システムの検討は先送りになっており、今後、詳細な検討をする必要がある。また、水銀ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射性ｶﾞｽを処理した後のガスをどのようにスタックから排気するかによって、スタックでの放射性核種の濃度は大きく変わる。気体廃棄物処理システムの検討の中で、スタックからの排気シナリオも含めた検討も必要である。

Table 2.8.1-1 Radioactive production estimation in gas.

対象	評価条件	主な生成核種*[Bq/年]
陽子ﾋﾞｰﾑﾗｲﾝ主トンネル空気	1W/m のﾋﾞｰﾑﾛｽ、下流半分	^{3}H : 1.7×10^{7} ^{37}Ar : 3.2×10^{7}
陽子ﾋﾞｰﾑﾗｲﾝ M1、M2 ﾄﾝﾈﾙ空気	M1 ﾄﾝﾈﾙは 1W/m のﾋﾞｰﾑﾛｽ M2 ﾄﾝﾈﾙは約 60kW のﾋﾞｰﾑﾛｽ	^{3}H : 2.5×10^{8} ^{37}Ar : 5.9×10^{7}
ﾐｭｵﾝﾀｰｹﾞｯﾄからの真空排気	41kW のﾋﾞｰﾑﾛｽ	^{3}H : 1.8×10^{10}
中性子ﾀｰｹﾞｯﾄｽﾃｰｼｮﾝのﾍﾘｳﾑﾍﾞｯｾﾙ内のﾍﾘｳﾑ	1MW の中性子ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射線	^{3}H : 7.3×10^{9}
中性子ﾀｰｹﾞｯﾄｽﾃｰｼｮﾝの鉄遮蔽体内の空気	1MW の中性子ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射線	^{3}H : 1.0×10^{6} ^{37}Ar : 5×10^{7}
減速材の液体水素	1MW の中性子ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射線 (微量の重水素によるﾄﾘﾁｳﾑ生成)	^{3}H : 1.6×10^{7}
水銀ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射性ｶﾞｽ	ターゲット容器交換時に水銀循環系のサージタンクから放出される放射性ガス(トリチウムと希ガスは全量放出とした)とその時1/1000 の水銀がこぼれて気化したと仮定。	^{3}H : 9.3×10^{13} ^{37}Ar : 3.7×10^{12} ^{125}I : 1.5×10^{10} ^{127}Xe : 1.3×10^{13} ^{85}Kr : 2.3×10^{10} ^{195}Hg : 2.1×10^{11} ^{197}Hg : 1.8×10^{12} ^{203}Hg : 2.3×10^{12}

*：Be-7 はフィルターで 99%取れ、量が少なくなるので記載せず。

Table 2.8.1-2 Radioactive production estimation in water.

対象	評価条件	主な生成核種*[Bq/年]
陽子ﾋﾞｰﾑﾗｲﾝ M2 ﾄﾝﾈﾙ電磁石冷却水	約 1.6kW のﾋﾞｰﾑﾛｽ	^{3}H : 4.2×10^{8}
ﾐｭｵﾝﾀｰｹﾞｯﾄ冷却水	41kW のﾋﾞｰﾑﾛｽ	^{3}H : 3.4×10^{8}
スクレーパー冷却水	20kW のﾋﾞｰﾑﾛｽ、ﾐｭｵﾝﾀｰｹﾞｯﾄからの放射線	^{3}H : 2.9×10^{9}
ﾐｭｵﾝ二次ﾋﾞｰﾑﾗｲﾝ電磁石冷却水	ﾐｭｵﾝﾀｰｹﾞｯﾄ、ｽｸﾚｰﾊﾟからの放射線	^{3}H : 1.1×10^{9}
陽子ビーム窓冷却水	1MW の中性子ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射線	^{3}H : 3.3×10^{10}
セーフティーハル冷却水	1MW の中性子ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射線	^{3}H : 3.1×10^{11}
反射体冷却水	1MW の中性子ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射線	^{3}H : 3.7×10^{11}
ヘリウムベッセル冷却水	1MW の中性子ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射線	^{3}H : 2.7×10^{11}
モデレーター冷却水	1MW の中性子ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射線	^{3}H : 2.3×10^{11}
ﾀｰｹﾞｯﾄ台車先端遮蔽体冷却水	1MW の中性子ﾀｰｹﾞｯﾄからの放射線	^{3}H : 3.4×10^{9}

*：Be-7 はフィルターで 99%取れ、量が少なくなるので記載せず。

Table 2.8.2-1 Radioactive annual emission and concentration in gas released from stack.

核種	年間放出量 [Bq/y]	年平均放出濃度* [Bq/cm^3]	放出濃度限度 [Bq/cm^3]	放出濃度 / 放出濃度限度
^{3}H	1.2×10^{11}	5.6×10^{-5}	5.0×10^{-3}	0.012
^{37}Ar	7.4×10^{10}	3.5×10^{-5}	7.0×10^{2}	5.0×10^{-8}
^{125}I	7.5×10^{6}	3.5×10^{-9}	1.0×10^{-5}	3.5×10^{-4}
^{127}Xe	1.3×10^{11}	6.1×10^{-5}	3.0×10^{-3}	0.021
^{85}Kr	2.3×10^{8}	1.1×10^{-7}	1.0×10^{-1}	1.1×10^{-6}
^{195}Hg	2.1×10^{7}	9.8×10^{-9}	9.0×10^{-5}	1.1×10^{-4}
^{197}Hg	1.8×10^{8}	8.3×10^{-8}	3.0×10^{-5}	2.8×10^{-3}
^{203}Hg	2.3×10^{8}	1.1×10^{-7}	2.0×10^{-5}	5.5×10^{-3}
合　計				0.042

*：スタックから 2.7×10^{11}[cm^3/h]で年間 8000 時間放出されると仮定。

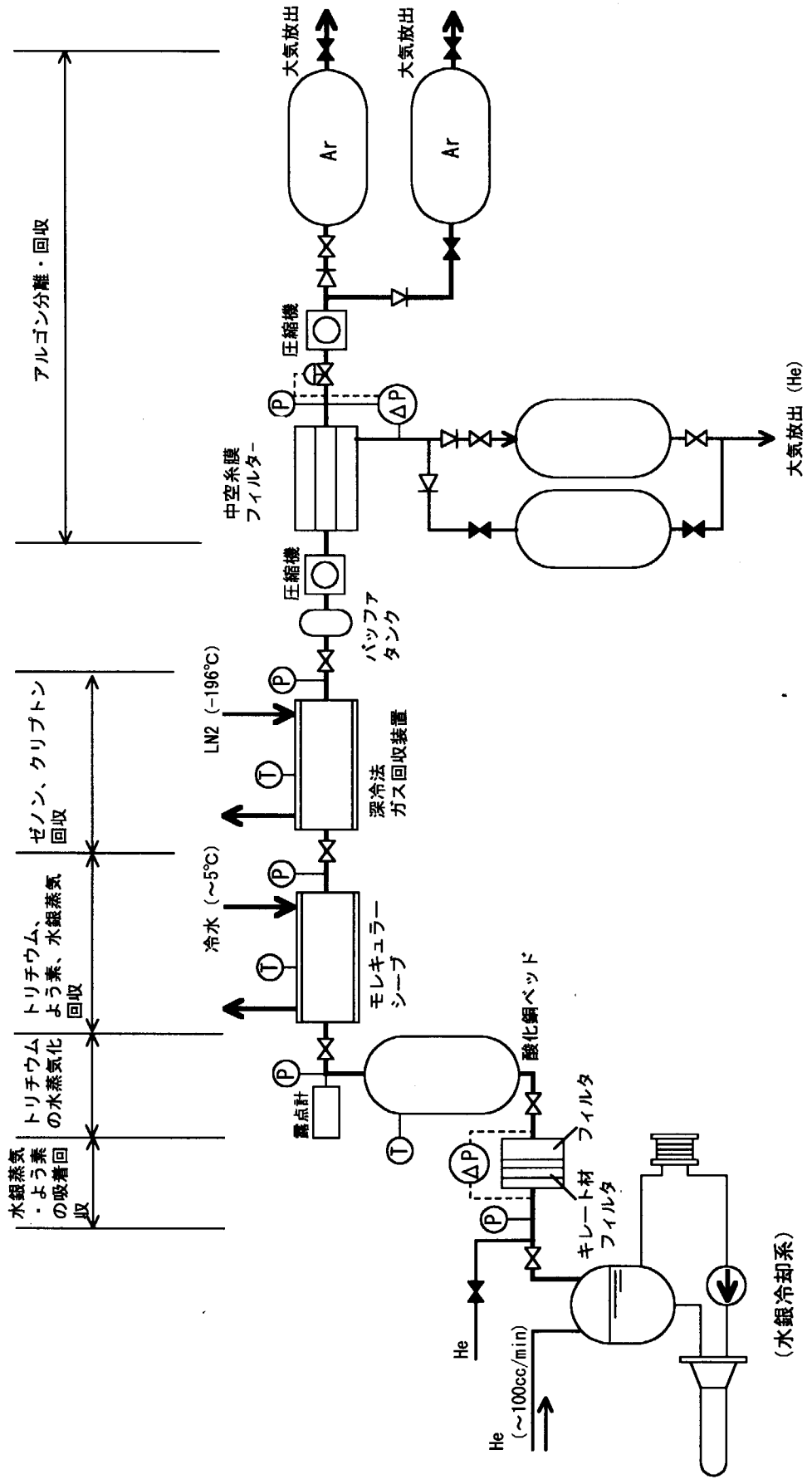


Fig. 2.8.2-1 Concept of off gas process system.

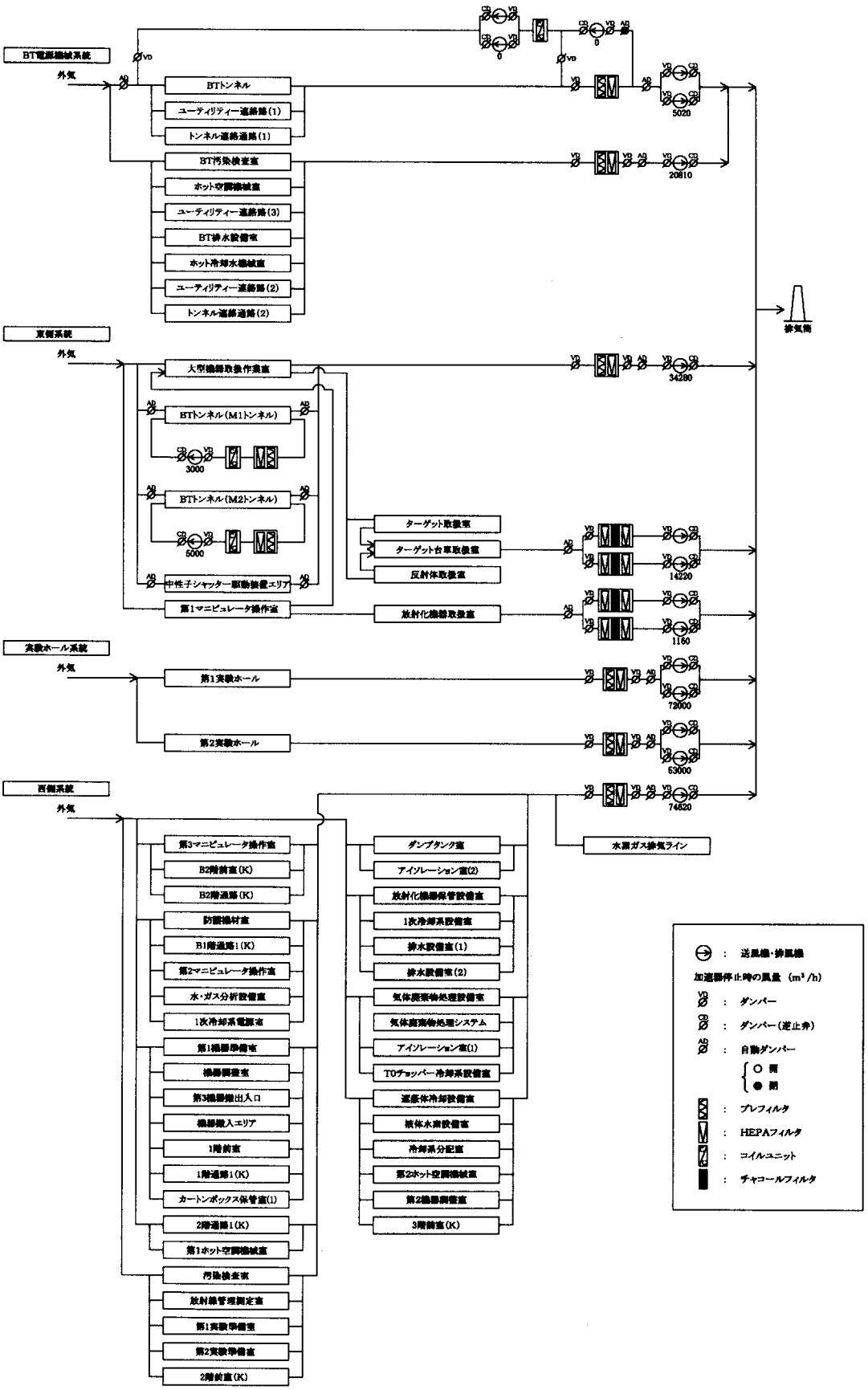


Fig. 2.8.2-2 (a) Gas exhaust system (Accelerator operation mode).

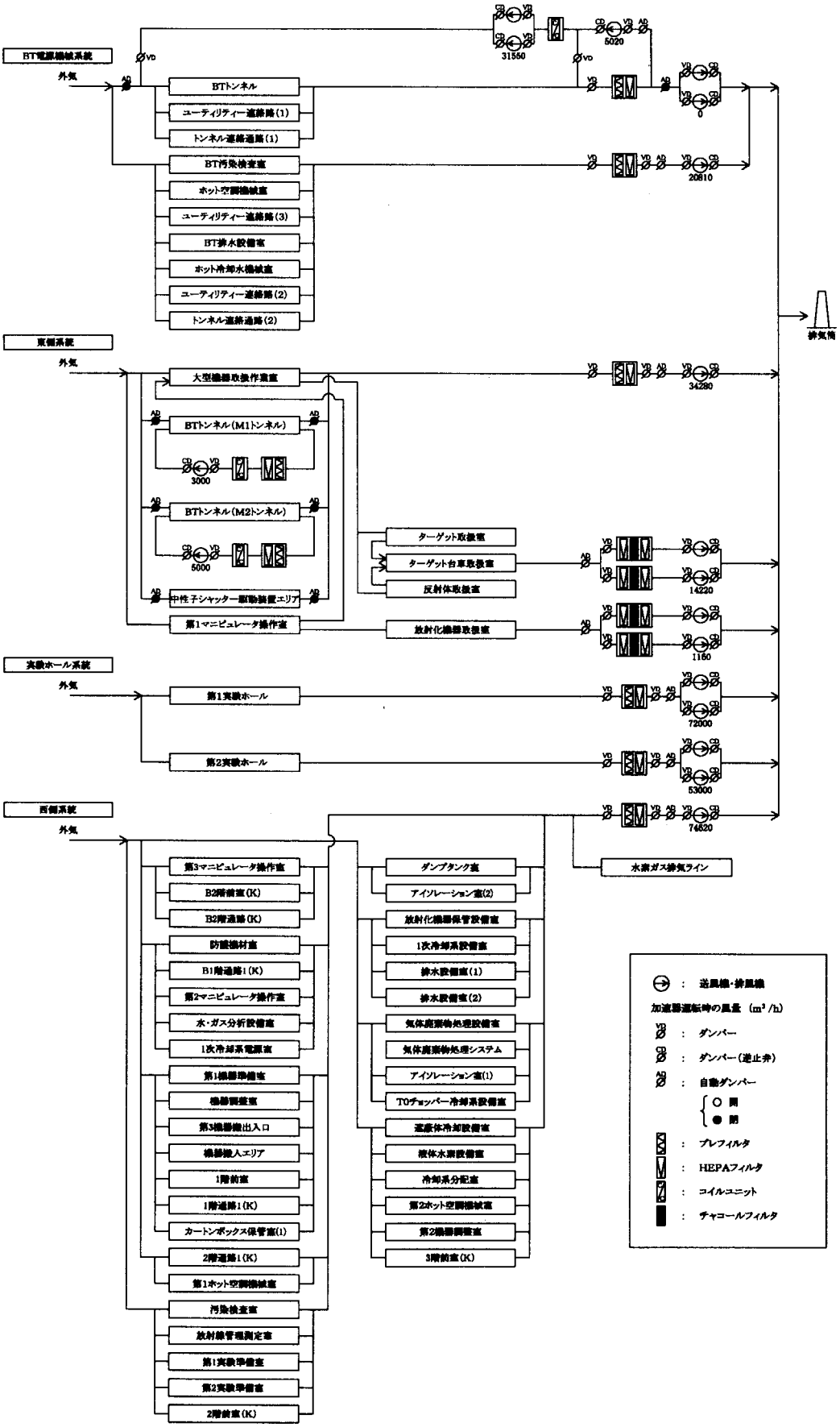


Fig. 2.8.2-2 (b) Gas exhaust system (Accelerator no-operation mode).

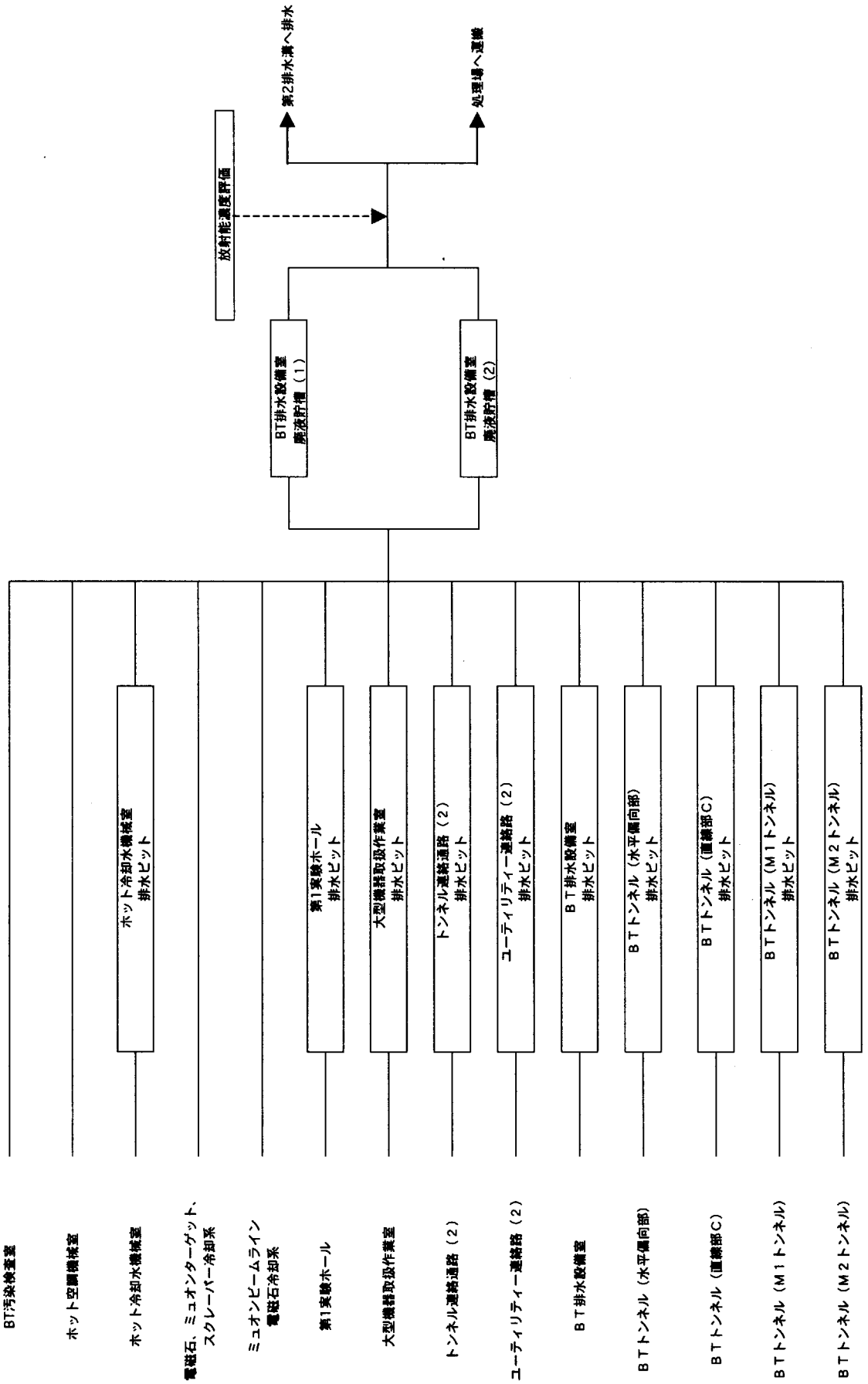


Fig. 2.8.3-1 Water drain system (3GeV proton beam transport).

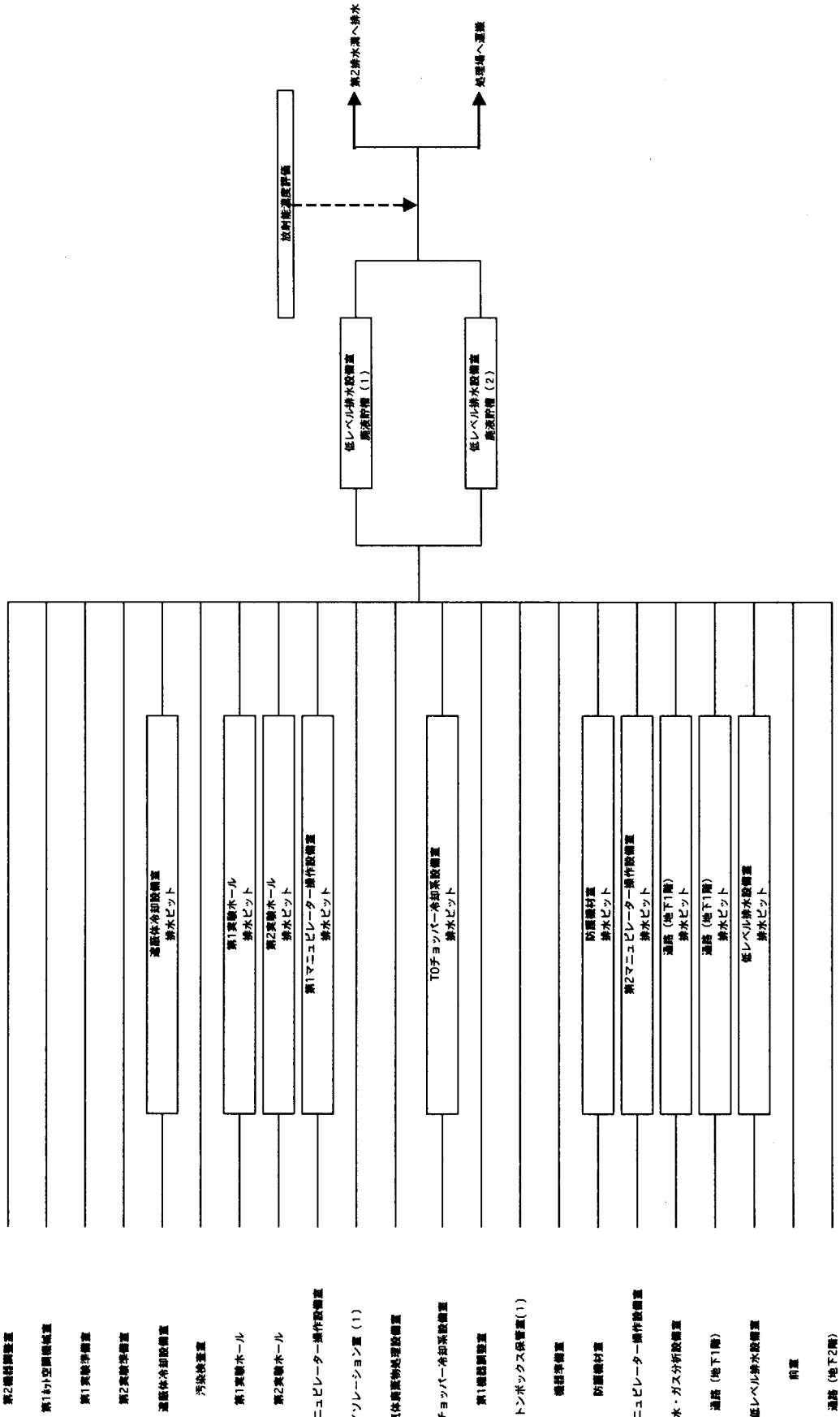


Fig. 2.8.3-2 Water drain system (Low level line).

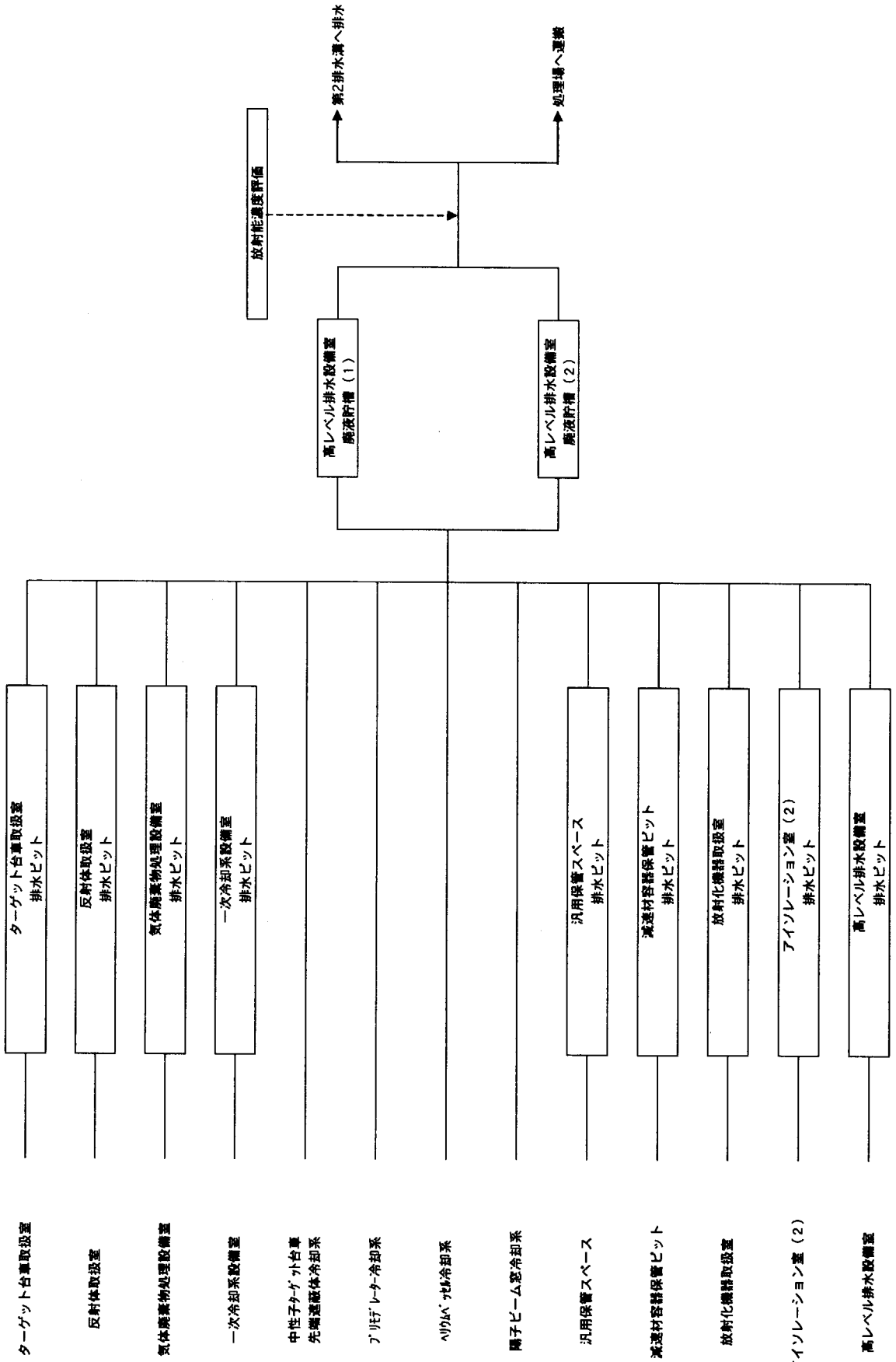


Fig. 2.8.3-3 Water drain system (High level line).

２．９　制御系機器

２．９．１　基本事項

２．９．１．１　概　要

物質・生命科学実験施設（Fig.2.9.1.1-1 参照）において、加速器から入射する陽子ビーム及び核破砕により発生する中性子等を受けて発熱する機器の除熱を行う各種冷却設備（冷却設備には水銀循環設備、冷減速材設備、1 次冷却水設備とそれに付随する 2 次冷却水設備がある）や、減速材からでる中性子を中性子ビームラインへと送る部分の開閉を行う中性子ビームシャッターの操作等は、一括して建家内に設置する制御室において行う。

本制御系では、物質・生命科学実験施設における各種冷却設備、中性子シャッター、リモートハンドリングシステムやターゲット台車等を操作・制御し、また、ホットセル等への入退室等を監視・制御システムで管理する。さらに、加速器中央制御棟に設置される加速器中央制御システムと、運転に必要な情報の送受信を行い、施設全体を運転管理することを目的としている。

２．９．１．２　制御範囲

本制御システムは、物質・生命科学実験施設 3F 制御室に設置する制御系機器・システムと制御用アプリケーションで構成される。主要な制御対象機器・システムは以下の通りである。設計に当たってはこれらの冷却系及び各種システムに関して、操作（流量調節等）、監視、記録、表示（大型モニター、パソコンＣＲＴ、表示灯、等）及び警報を発報できるようにする。

(ａ)水銀循環設備系
(ｂ)液体水素循環設備
(ｃ)ヘリウム冷凍機設備　｝　冷減速材システムとして一括
(ｄ)水素ガス供給・排気設備
(ｅ)1 次冷却系設備（軽水・重水、空気）
　[ｉ] セーフティハル冷却系
　[ii] 反射体冷却系
　[iii] ターゲットトローリー冷却系
　[iv] ヘリウムベッセル冷却系
　[ｖ] 陽子ビーム窓冷却系
　[vi] 軽水プレモデレーター冷却系
　[vii] T0 チョッパー冷却系
　[viii] 中性子ステーション冷却水供給系
　[ix] 生体遮蔽体冷却用空気循環系
(ｆ)2 次冷却系設備
(ｇ)重水受け入れタンク、廃重水貯蔵タンク
(ｈ)ダンプタンク
(ｉ)純水供給設備
(ｊ)ヘリウムガス供給･排気設備

(k)冷却水・カバーガス分析設備
(l)中性子シャッターシステム
(m)分光器インターロック
(n)T0 チョッパー
(o)パワーマニピュレータシステム
(p)ターゲットトローリー
(q)建家内ネットワーク
(r)入退域管理システム
（遮蔽扉、遮蔽ハッチ、線量モニター　等）

制御室に設置する制御系機器は、上述したように各対象機器についての操作・監視・記録及び警報に関する情報を一括して管理することを目的とする。設置位置は、物質･生命科学実験施設 3F 制御室とする。Fig.2.9.1.2-1～2.9.1.2-4 に建家平面図を示す。
各システムは現場盤で全てコントロールできるように設計する予定である。本制御システムは各現場盤からの情報を集約し、一括して監視操作を行う。

また、各設備・システムには以下に示す機器類を含むものとする。

1) 制御系機器
①制御用コンピュータ
②制御系信号入出力装置
③データ出力用プリンター
④データ監視用モニター

2) 制御系アプリケーション
①記録モジュールソフトウェア
②監視モジュールソフトウェア
③操作モジュールソフトウェア
④データ交換モジュールソフトウェア

２．９．２　機器仕様

２．９．２．１　機器操作監視システムに関する機器仕様

(1) 監視操作系の基本概念

(a) 要求機能

・パソコン等の画面上で、ループ系統図を元にした運転の集中コントロールを行う。
・各系統における以下の値を監視、記録する。
温度、圧力、流量、バルブの状態、サージタンク液位、etc
・系統で異常を発生した場合、各種警報の種類及び発生点をパソコン画面上等で確認する。
・各運転モードにおけるパターン設定を行う。
（例　通常運転時、ドレン時、冷却水充填時、等）

上記要求要件を原則として、中性子散乱実験施設の概念検討で行った計測制御設備の基本概念を示す。計測制御システムの構成概念を Fig.2.9.2.1-1 に示す。

1) 試験設備の運転監視操作は、制御室から集中して行えるように計画する。
2) 監視・操作性向上とプロセス機器の追加・変更への柔軟な対応のため、計測制御設備は、パーソナルコンピュータ、シーケンサーで構成するディジタル制御システム（ＤＣＳ）を採用する。
3) パーソナルコンピュータには、プラントパラメータ表示、機器状態表示、警報表示等の監視機能を受け持たせると共に、運転操作機能をマウス操作で行えるようにする。
4) マウス操作は、操作対象機器選択（ポンプ、弁、調節計等）、操作項目選択（起動／停止、開／閉、増／減等）、操作指令により行えるようにする。
5) シーケンサーは、ＰＩＤ制御、設定制御、補機操作シーケンス等の制御ロジック演算処理を行うものとする。
6) 技術開発に必要なデータは、データベースに保存し、任意の場所において参照が可能なようにする。
7) 崩壊熱除去に関わる系統等の計測制御設備は、重要系計測制御設備として位置付けてハードウェア回路で構成し、系統設計上の重要度要求に対応するものとする。
8) ターケット１次冷却系等の常用冷却系運転中に、循環ポンプが何らかの原因で停止した場合には、陽子ビームを停止させるインターロックを設けるものとする。

(b) 動作要件

・パソコンベース(MS-Windows、Linux 等)で動作するソフトによって環境を設定する。

(2) 計測制御設備の機能仕様

(a) 監視操作盤

1) 監視操作盤はデスク形構造とし、付帯設備全体の運転監視操作を行うものとする。
2) 監視操作盤にはパーソナルコンピュータを二重化し、２台１組で相互にバックアップできるようにする。
3) パーソナルコンピュータは監視・操作機能を持たせ、次の画面を提供できるようにする。

a.メニュー画面

b.系統表示画面

・プラントパラメータ監視画面

・機器・計器操作画面

c.トレンド表示画面

d.機器状態表示画面

e.警報表示画面

f.データ表示画面

4) 機器状態表示画面、計器類画面には、操作スイッチ、調節計等をウィンドウ表示することにより運転操作機能を有するように設計する。
5) 制御装置故障の警報は、ハードのアナンシェータに表示し、プロセス等の故障はパーソナルコンピュータに表示する。
6) 監視操作盤には、制御装置故障時等の緊急停止操作用にハードスイッチを設ける。
7) 付属装置

パーソナルコンピュータには付属装置として、プリンター２台を接続する。

(b) プロセス制御盤（現場盤）

1) コントローラは汎用シーケンサーを採用し、経済性の高いシステムとする。
2) シーケンサーはＰＩＤ制御、設定制御、シーケンス制御、警報演算の処理を行う。
3) シーケンサーは原則としてシングル構成とする。
4) 必要に応じ圧力変換器、レベル変換器、温度変換器等を収納する。
5) ローカルとリモートの操作切り替えができるようにする。

(c) 重要系制御盤(PPS、MPS機器に対応)

1) 重要系制御盤は、系統設計上の重要度要求（高耐震性及び多重化）に対応し、ハードウェア回路の２重系で構成する。
2) 重要系制御盤は、運転モード選択により当該運転可能な構成とする。
3) ターゲット1次冷却系等の常用冷却系運転中に、循環ポンプが何らかの原因で停止した場合に、陽子ビームを停止させる為の信号検出を行い、信号を出力する。

(d) プロセス検出器、伝送器

試験設備のプロセス量を計測する検出器、伝送器を設ける。

２．９．２．２　ホットセル等の入退域監視システムに関する機器仕様

物質･生命科学実験施設の入退域監視システムは加速器ビームラインに比べ範囲は狭いものの、ホットセル内の放射線量は加速器ビームラインに比べ大きなものとなる。そのため、ターゲット取扱室、ターゲット台車取扱室、反射体取扱室はホットセルとし、遮蔽扉等を設けて入退域管理を行う。また、放射化した機器を保管する地下の放射化機器保管設備室は、保管される機器を取り扱っている状態では入室できない空間線量となる。このため、高放射化物の取扱や保管を行う各室は出入り管理を実施する必要があり、入退域管理システムを導入する。この入退域管理システムに関しては、現在、管理モードの検討を行っているが、入退域管理システムの器機構成やアプリケーション等の基本設計を行った。設計に当たっては、次の基本モード、

加速器運転中

（通常運転中、調整運転中、等）

加速器停止中

（ターゲット交換中、反射体交換中、地下保管設備機器取り扱い中、等）
に対して、運転員の入退室を管理するシステムを設計した。この際、入退室の不可エリアを設定し、機器操作制御システムと連動して機器運転に関する警報信号等を発信するようにした。詳細については、現在設計を実施中である。

２．９．２．３　外部取り合い（中央制御システムとのデータ通信）

本システムは、大強度陽子加速器の中央制御システムと接続し、本実験施設のデータを中央制御室で監視できるよう外部取り合いを設ける。外部取り合いに関しての詳細は未定であるが、中央制御棟で物質・生命科学実験施設 3F 制御室とほぼ同等の監視状態を確保するため、データのやりとりはシーケンサー等の入出力信号で行う。中央と接続するモジュールに関してはEPICS を基本とし、Ethernet 経由で中央制御室と通信を行う。

上記の外部通信ネットワークは建家内ネットワークと連動して建家内データを制御室へ集約し、外部へとデータ送信を行い、外部より得られたデータを各機器の運転等に用いるため必要に応じて内部ネットワークへと送る。

本施設として現在考えている外部取り合い信号としては以下の通りである。

・操作用信号　　；　中央での操作を行う場合の信号
（物質生命科学実験施設としては建家制御室で監視員が制御を行うため中央からの操作は考えていない。）

・状態信号　　；　制御対象機器の現在の状態に対する信号
運転中、停止中、準備 OK、メンテナンス中、等

・モニター信号　；　各冷却系統の状態のうち代表的なものについての信号
温度、圧力、流量、液位、バルブ開閉、等

・インターロック；　機器から警報による加速器の停止信号
ポンプ停止の警報、冷却水漏洩、温度異常、等

インターロックに関してはハードワイヤーによる接続を基本とし、Ethernet で詳細なデータの交換が行えるようにする。また、外部信号の取り合いについては TCP-IP での通信とする。

２．９．３　今後の課題

・シーケンサー(PLC)及び制御系ソフトウェアの統一を行うための仕様決定。
・ネットワーク機器の仕様決定
・全体機器構成の詳細化

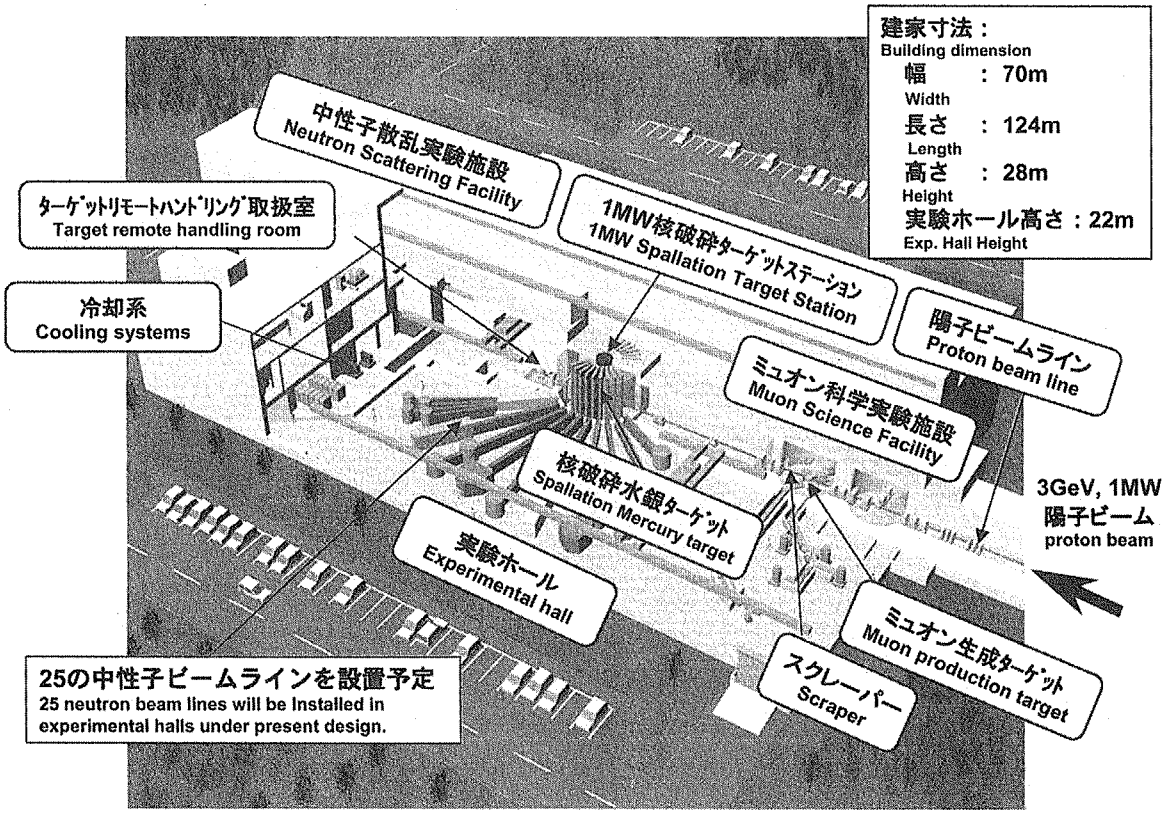


Fig.2.9.1.1-1 Bird Eye View of Materials and Life Science Facility

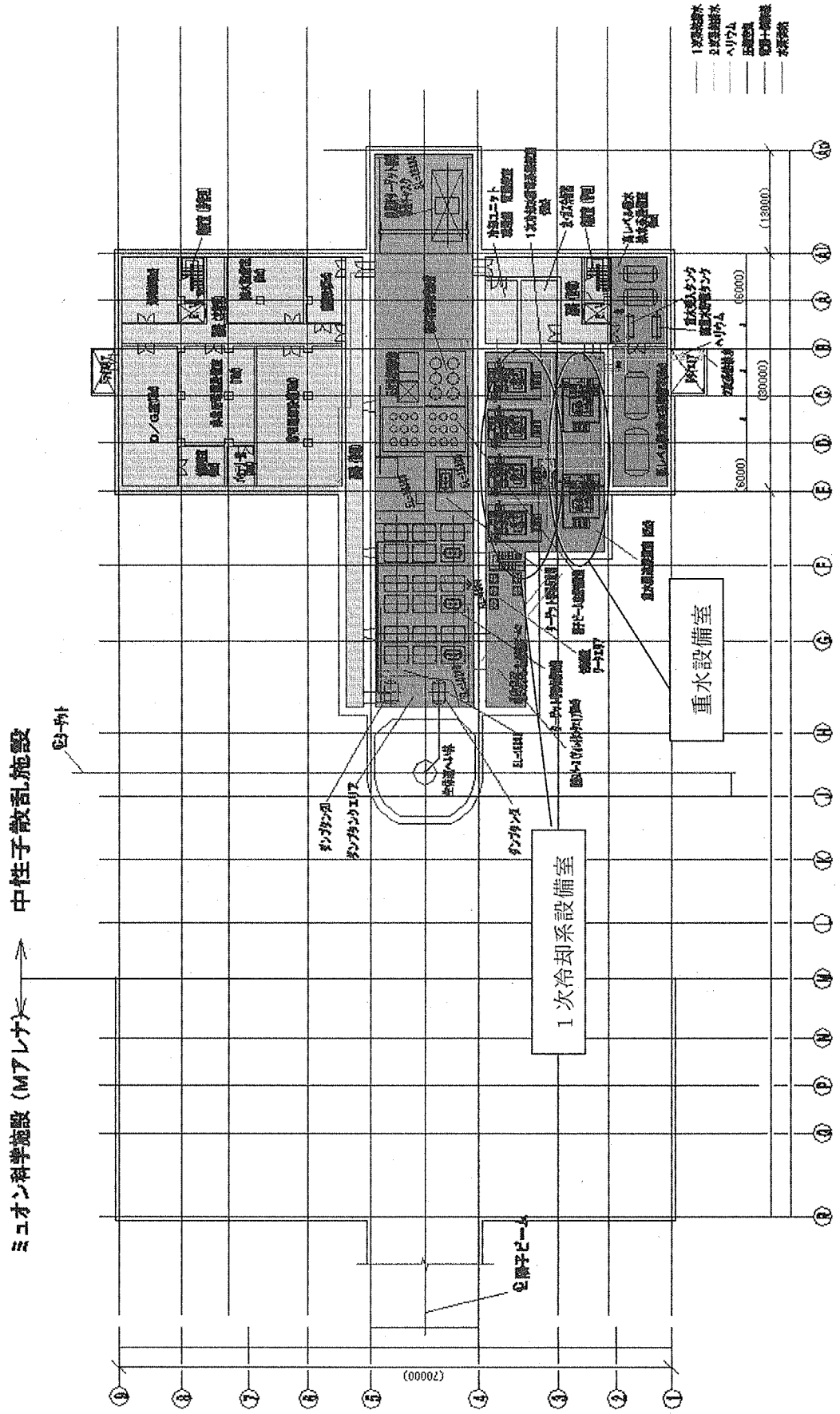


Fig.2.9.1.2-1　Plane View of MLF B1F

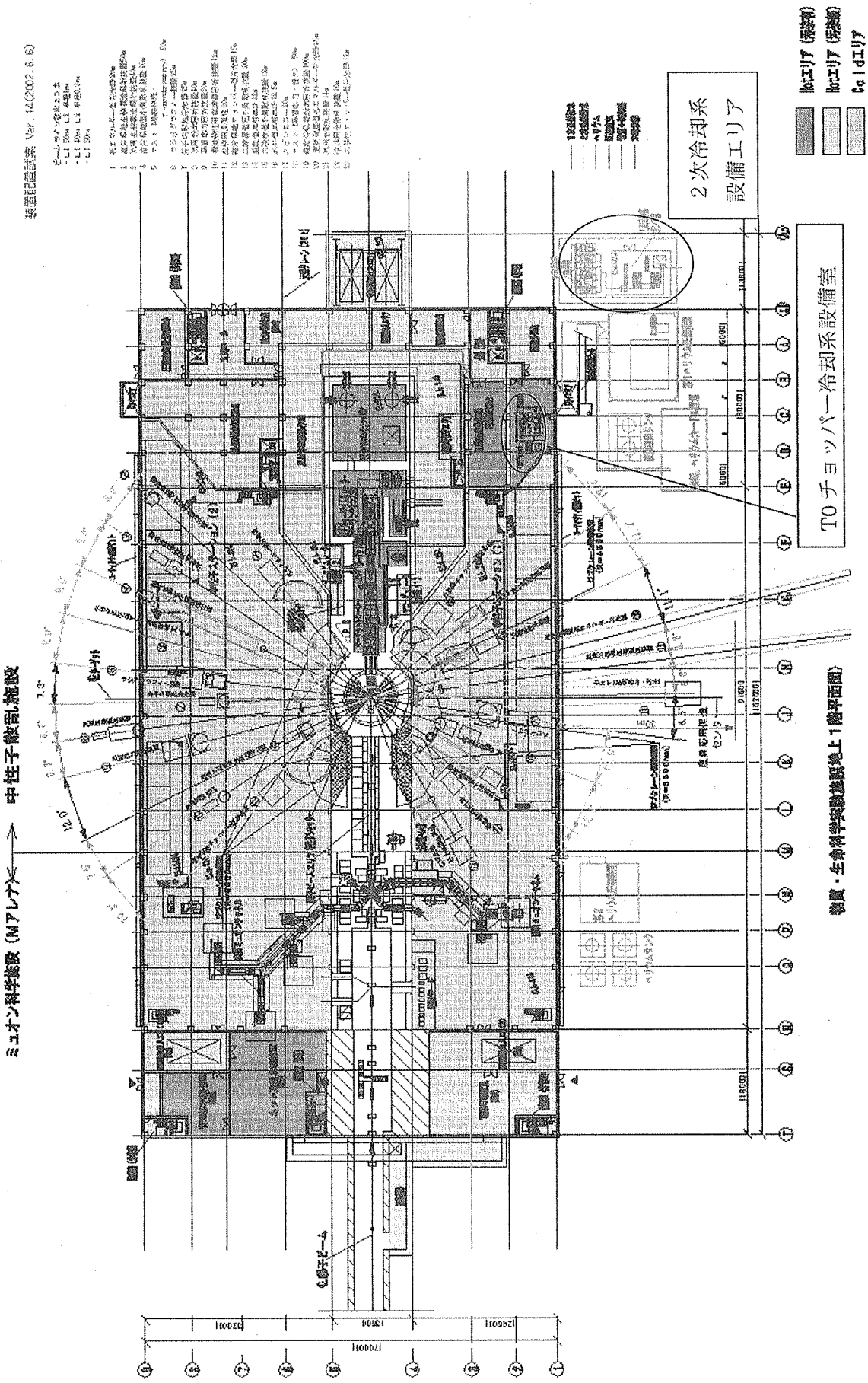


Fig.2.9.1.2-2　Plane View of MLF 1F

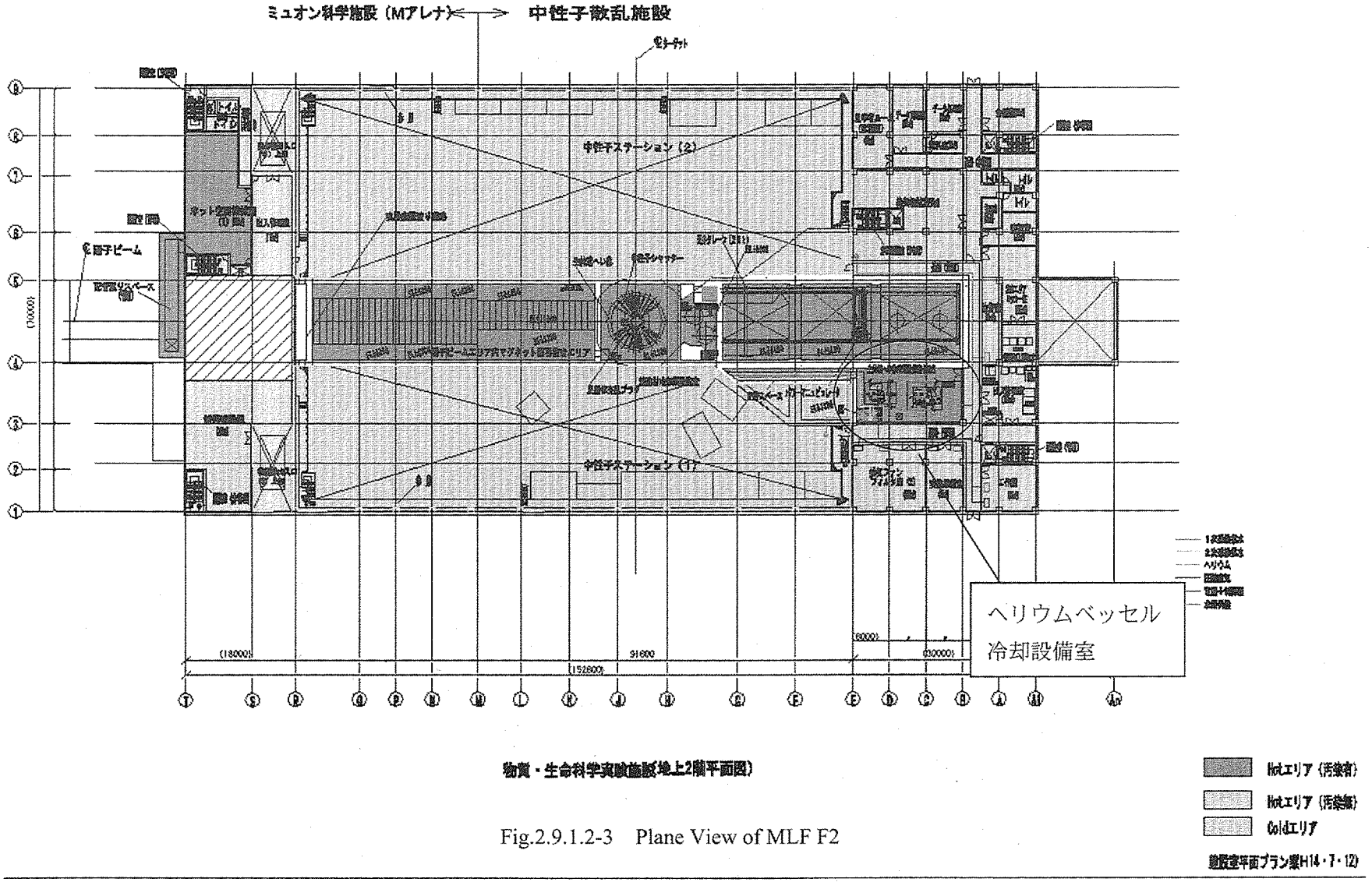


Fig.2.9.1.2-3　Plane View of MLF F2

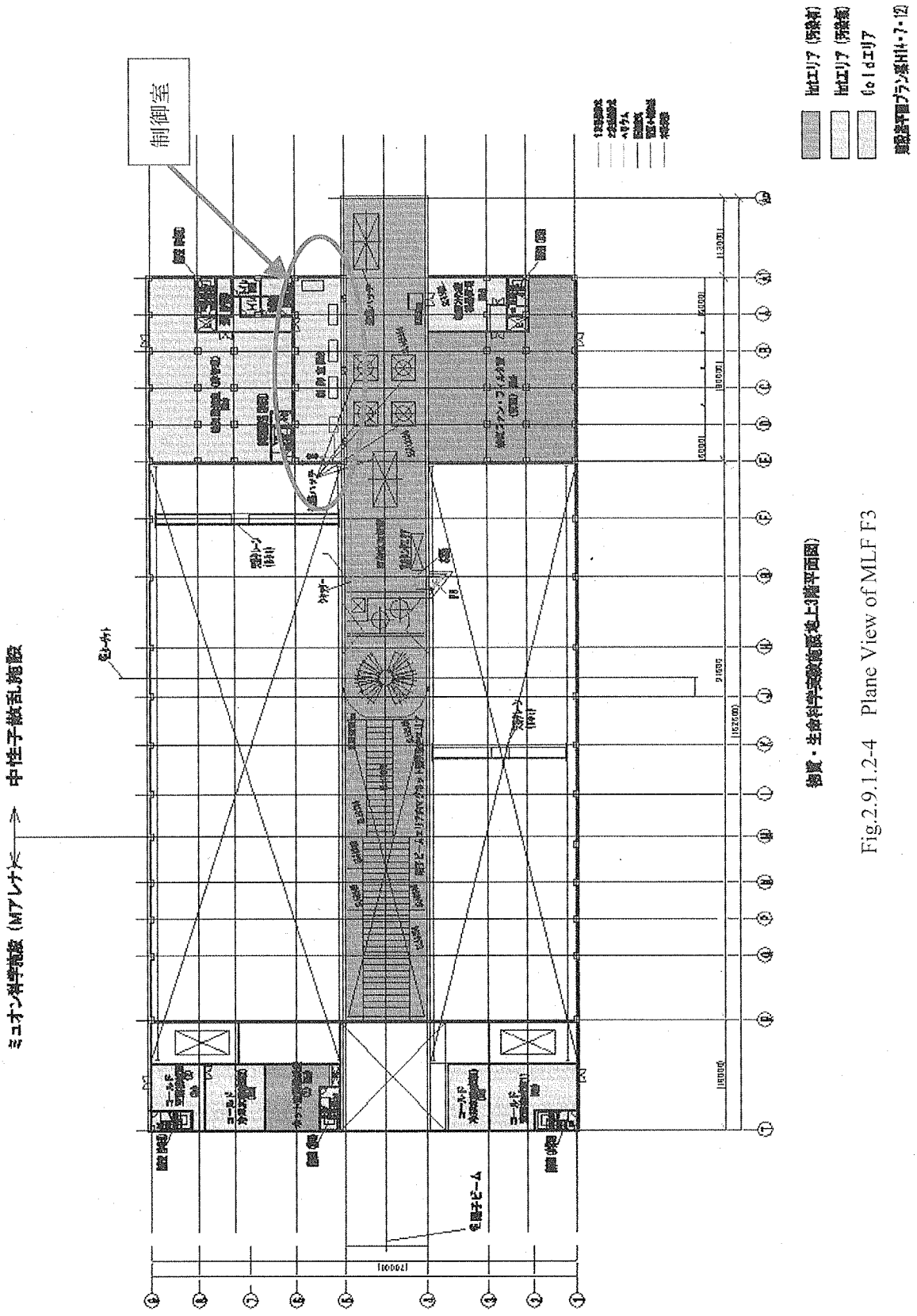


Fig.2.9.1.2-4　Plane View of MLF F3

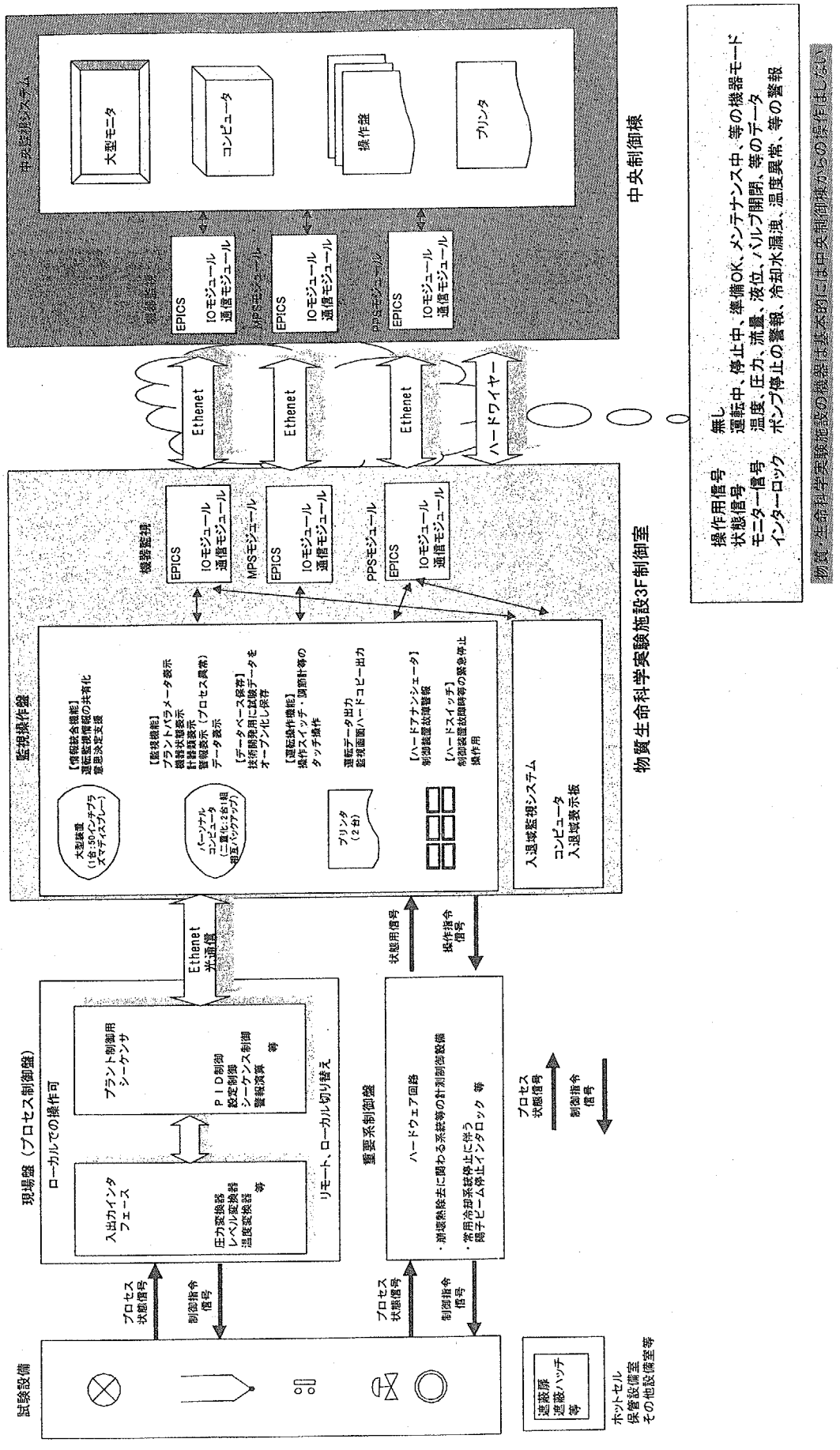


Fig.2.9.2.1-1 Conceptual Diagram of Control System

3．3GeV陽子ビーム輸送系施設

3．1　施設概要

3GeV陽子ビーム輸送施設（3NBT）は、3GeVシンクロトロン（3-GeV Rapid Cycling Synchrotron、RCS）から取り出された大強度の陽子ビーム（Table 3.1-1）を物質・生命科学実験施設（MLF）に設置された核破砕中性子源、およびミュオン源まで輸送する施設である（Fig.3.1-1）。3NBTのビームラインは大きく3つの区域に分類できる。

- 分岐部：50GeVシンクロトロン（50GeV Main Ring、MR）への入射ビーム輸送施設（3-50BT）へパルス偏向電磁石によりビームを振り分ける。また、ビームダンプを有し、3GeV RCSのスタディ、チューニング時に用いられる。
- BTトンネル部：陽子ビームを分岐部から物質・生命科学実験施設入口まで輸送する、長さ約250 mのビームライントンネル。途中、垂直偏向電磁石により4.8 mビームを振り上げ、MRトンネル、およびニュートリノ・ディケイボリュウムを乗り越える。また、水平方向にも30°偏向する。
- NMトンネル部：物質・生命科学実験施設内の陽子ビームライン。中性子生成標的の上流にミュオン生成標的を配置する「串刺し標的システム」[1]を採用する。第1期では、NMトンネル上流半分のM1トンネルには標的は設置されず、下流側のM2トンネルに20mmの厚さのミュオン生成標的が設置される。中性子源の直前には、水冷のインコネル製の陽子ビーム窓があり、中性子生成標的系のヘリウム雰囲気と隔離している。

3NBT施設に係わる主なパラメターをTable 3.1-2に示す。

このビーム輸送施設の最も重要な課題の一つは、いかにしてビームロスを低く抑えることであり、大強度の陽子ビームを輸送し1 MWの中性子実験施設を実現するキーを握っている。ハンズオン・メンテナンスが可能なビームロスは平均1 W/m以下と言われており、そのビームロス量を

Table 3.1-1　Main parameters of the proton beam extracted from 3-GeV RCS

陽子ビームエネルギー（E）	3.00 GeV
平均ビーム電流	333 μA
平均ビーム電力	1 MW
陽子数	8.3×10^{13} ppp
パルス繰り返し	25 Hz
MRへのパルス入射時間	4 / 25 秒
バンチ数	2 / pulse
バンチ間隔	~600 ns
バンチ幅	~140 ns
運動量の広がり（$\Delta p/p$）	±1 %以内

Table 3.1-2 Main parameters of 3-GeV the proton beam transport facility (3NBT)

BT トンネル全長（3GeV RCS 取り出しセプタム電磁石出口から物質・生命施設入口まで、分岐部を含む）	265.9 m
BT トンネル高低差	4.8 m
BT トンネルでの平均ビームロス	1 W/m 以下
NM トンネル全長（中性子生成標的まで）	55.9 m
NM トンネルミューオン標的系でのビームロス	~60 kW
陽子ビーム窓でのビームロス	~20 kW

仮定して、分岐部、BT トンネル部の機器、トンネル構造等を設計している。ビームライン全長にわたる総ビームロス量としては、1 MW の強度の陽子ビームに対し 0.01%程度となる。高エネルギー加速器研究機構（KEK）の既存の陽子ビーム輸送ラインでは、ビームロスがビーム強度の1～2%あるのに対して、その 2 桁も低いビームロス率に抑える必要がある。

一方、NM トンネル部では、M2 トンネルに設置される厚さ 20mm のミュオン生成標的により、その区域には約 60 W のビームロスがある[2]。ビームラインの放射線遮蔽、ビームラインの空気の放射化、放射線による窒素酸化物（NOx）やオゾン（O_3）等の腐食性ガスの生成、放射化した機器の保守等という多岐にわたる課題に対して、対処するシナリオの構築が必要となる[3]。なお、M1 トンネルには、当面ミュオン生成標的系は設置されないので、BT トンネルと同じ方針で設計される。

参考文献

[1] 3GeV BT 検討グループ：3NBT Internal Report 3GeV BT 2000-01、“「串刺し標的システム」と「分岐ビームラインシステム」の比較”（2000）

[2] 明午 伸一郎：JAERI-Tech 2000-088、“大強度陽子加速器計画における NME 施設内 3GeV ビーム輸送ラインに関する検討”（2001）

[3] 坂元 眞一、他 9 名：JAERI-Tech 2001-075、“大強度陽子加速器計画物質・生命科学実験施設内の陽子ビームライントンネル技術課題の検討”（2001）

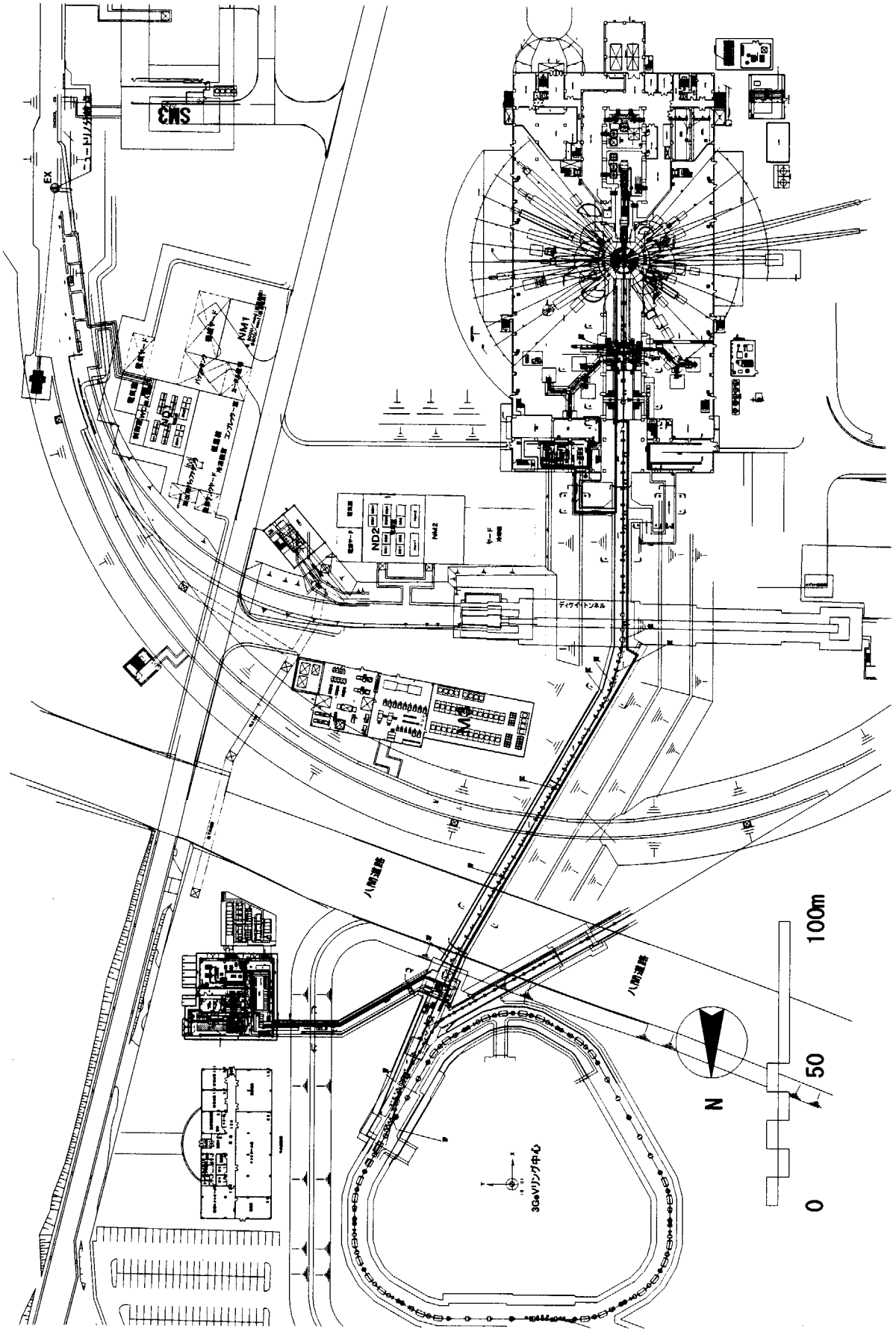


Fig.3.1-1 Plan of 3-GeV the 3-GeV proton beam transport facility (3NBT)

3．2　ビームオプティクス

3．2．1　設計条件

3GeV RCSから取り出された陽子ビームは、ビームコア部と、その周りに様々な理由でできるビームハロー部とからなる。ビームハローの最大エミッタンスは3GeV RCS内部に設置するコリメーターにより決定される。ビーム輸送ラインの設計は、Table 3.2-1に示したようなパラメーターをもつ3GeV RCSから出射されるビームを、ミューオン生成標的上で可能な限りビーム径を絞り、かつ中性子生成標的上でコア部が横幅 130mm× 縦幅 50mmとなるように成形する。

BTトンネルおよびM1トンネルにおける平均のビームロスが1 W/m以下になるようにするために、ビームロスは制御不可能な（uncontrollable）寄与のみとし、制御可能なビーム軌道の歪みによる寄与が出ないようにすることにより実現するものとしている。そのため、3GeV RCS取り出しキッカー電磁石の磁場のふらつきや3NBT電磁石のミスアライメント等の既知の要因によるビーム軌道の歪みが生じても、ハロー成分を含め、ビームを損失させないようにする。

一方、ミューオン生成標的での陽子ビームの散乱、核反応により、そのビームライン下流側には大きなビームロスが生じる[1]。その区域に設置される電磁石の導体には、耐放射線の高いmineral insulation cable （MIC）を使用する。これまで実績から10^{11} Gyという吸収線量を目安に、10年間の使用を想定して、相当するMIC電磁石の核発熱量を1kW以下に抑えることを条件とした[2]。

Table 3.2-1 Properties of the proton beam extracted from 3-GeV RCS. Twiss parameters (α, β, η, η') are described at the exit of the last extraction septum magnet.

	水平	垂直
ビームコア部エミッタンス（mm·mrad）	81π	81π
ハロー部最大エミッタンス（mm·mrad）	324 π	324 π
α	-1.569	0.322
β (m)	23.040	6.421
η (m)	0.791	0
η'	0.241	0
$\Delta p/p$ (%)	1.0	

3．2．2　ビームオプティクスの設計

3．2．2．1　3GeV RCSから中性子生成標的までのビームオプティクス

3GeV RCSから中性子生成標的までのビームエンベロープをFig.3.2-1に示す。設計計算にはTRANSPORTコード[3]を用いた。3GeV RCSの出射セプタム電磁石出口からビーム進行方向に測った距離（S）をもとにすると、各区域でのオプティクスは異なる特徴を持つ。

3GeV RCSから出射されたビームは大きな分散関数を持っているため、Fig.3.2-1に示したS<60 mの区間において2回の水平偏向により分散関数をゼロとしている（分岐部）。分岐部では

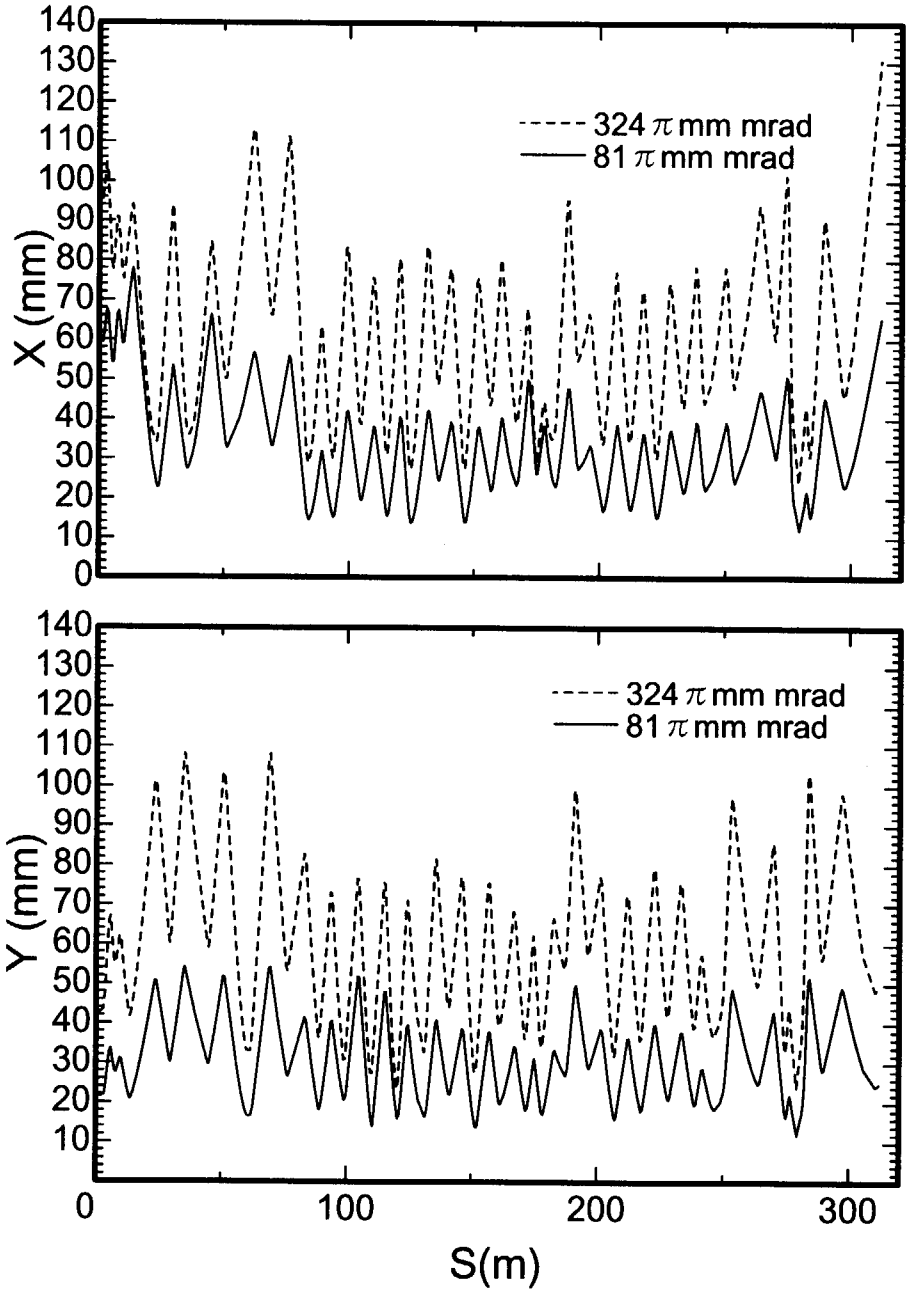


Fig.3.2-1 Beam envelopes of the proton beam core and its halo from 3-GeV RCS extraction point to the neutron production target. The horizontal axis (*S*) is the distance along the proton beam transport line from the exit of the last extraction septum magnet.

パルス偏向電磁石により 50GeV MR にビームを分岐させる。*S*＝70 m 近辺では、垂直に偏向させるためにβ関数のマッチングを行う（直線部 A)。3GeV RCS のチューンの変更等により、分岐部上流に位置する四極電磁石の磁場勾配を変化させる必要が生じる可能性があるが、その場合でも、分岐部下流側および直線部 A の四極電磁石でマッチングを行うことを可能としている。

直線部 A の下流側（*S*=80 m 付近）でビームを 7.5 度振り上げ、50GeV MR トンネルを乗り越える（垂直偏向部)。このために、この区間で垂直方向の分散関数がゼロではなくなるが、アクロマ

ティクなビームラインとしているために、この区間より下流側では再び分散関数はゼロとなる。

S=140 m 付近で水平偏向のためにβ関数のマッチングを行う（直線部 B）。この下流側（*S*=160 m）でビーム進行を水平方向に 30° 偏向する（水平偏向部）。このセクションも同じくアクロマティクにする。その後は直線で物質・生命科学実験室に輸送する（直線部 C）。この区間では位相進行がπ/2 となる FODO のラティスを用いて、電磁石の数量を減らしている。

ミューオン生成標的上でビームを絞るために、標的より上流（*S*=260 m）にあたる M1 トンネルで、いったんβ関数を大きくしビームを広げる必要がある。M1 トンネル内には空冷装置が設置されることもあり、その部分に設置される電磁石の数は最小限にとどめておくことが望ましい。そのため、ミューオン生成標的よりも上流側の電磁石の配置はダブレットの配置とした。それにより、ミューオン生成標的上では直径 24 mm のビーム形状が得られる。

陽子ビームはミューオン生成標的を通過した後に中性子生成標的に到達する。中性子生成標的上におけるコア部のビーム形状が３．２．１節に述べたものを満足させるために、ミューオン生成標的と中性子生成標的との間には 4 台の四極電磁石を配置する。また、これらの電磁石の磁場勾配を調整することにより、ビーム形状はさらに 20 mm 程度は変更することが可能となっている。

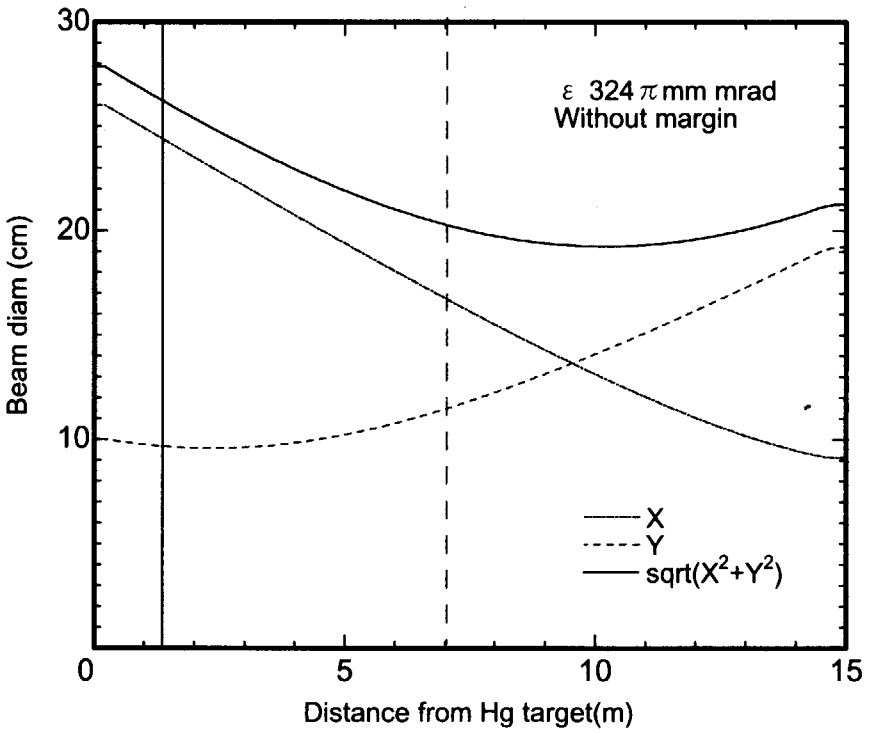


Fig.3.2-2 Beam envelope of the beam halo (ε = 324 π mm·mrad) just before the neutron production target. The horizontal axis is the distance from the center of the target. A proton beam window was located at 1.5 m from the neutron target, following 5.5 m long beam injection hole in radiation shield. The beam profile is assumed rectangular. A dotted-dashed curve is horizontal full width, and a dashed curve vertical full width. A solid curve represents the diameter of the circle that contains the rectangular beam profile fully. The beam injection hole is, therefore, required to be cylindrical (inner diameter of 270 mm), or rectangular (120 mm high wide and 250 mm), when the beam orbit is assumed not to be distorted at all.

中性子生成標的直前のハロー部のエンベロープを Fig.3.2-2 に示す。陽子ビームがコンクリート遮蔽体に入るところから陽子ビーム窓の間は一本の真空ダクトで接合されている。このダクトの形状を円形とする場合には、直径 270 mm を必要とする。中性子生成標的からの放射線が十分に弱い場合には、この円筒形で成立するが、そうでない場合には断面積を小さくした矩形のダクト（横幅 250 mm、高さ 120 mm）を用いる必要がある。ビームの軌道の歪みを考慮すると（３．２．３節）、これよりやや大きなビームダクトが必要となる。

3GeV RCS 出射から中性子生成標的のビームラインでは、偏向電磁石 8 台と四極電磁石 56 台を用いる。その他、補正電磁石、ビームモニターは位相進行がほぼ$\pi/2$になるように配置した。補正電磁石には、水平方向補正用 23 台、垂直方向補正用 23 台を用いる。ビームモニターは補正電磁石と対をなし、23 台を設置する。

３．２．２．２　ダンプラインのオプティクス

ビームダンプは、なるべく 3GeV RCS からビームが取り出された直後に設置されることが望ましいが、施設配置の都合上 3-50BT への振り分けパルス偏向電磁石の下流側にしか設置できない。パルス偏向電磁石の磁極間隔を狭めるために、ビームを垂直方向に絞りこむ。分岐点の下流側では 3NBT のビームラインと 3-50BT とのビームラインのセパレーションを確保するために、電磁石を設置できない長いドリフトスペースが必要となり、パルス電磁石下流側では、逆にビームは垂直方向に広がってしまう。そこで、ビームダンプに向けて水平方向に偏向するためには磁極間

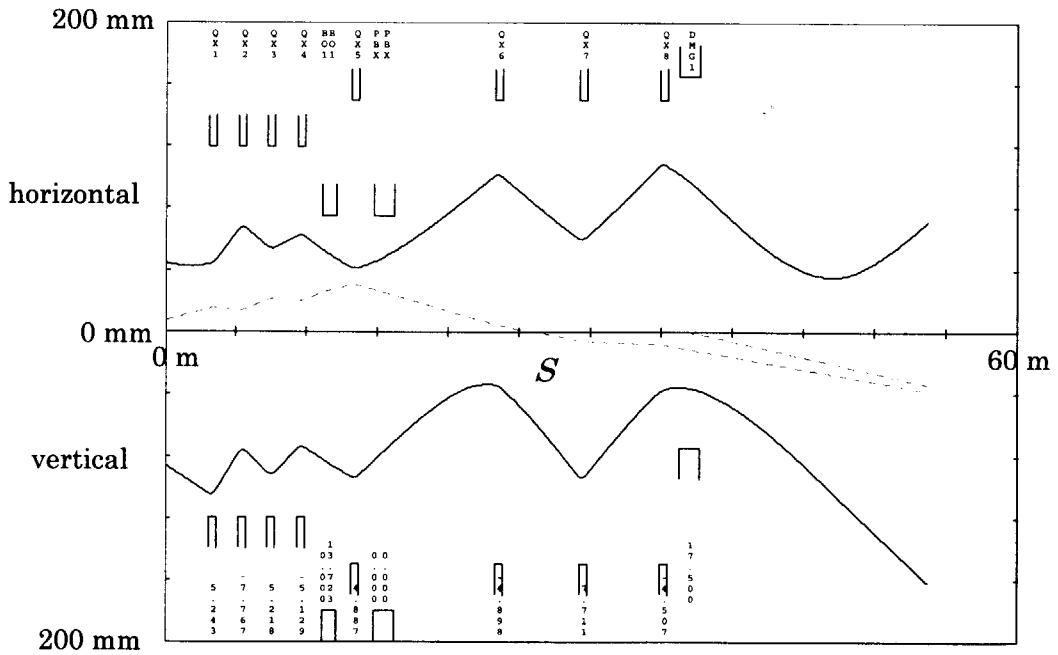


Fig.3.2-3 Beam envelope of the beam dump line. The horizontal axis (*S*) is the distance along the proton beam transport line from the exit of the last extraction septum magnet. Solid curves are beam envelopes of the beam halo and dashed curves beam spread due to a dispersion function when $\Delta p/p$=±1%.

隔の大きな電磁石が必要となる。また、ビームダンプにビームを振り分けた下流側でも、同じく長いドリフトスペースが必要となるため、垂直方向の広がりはさらに大きくなり、水平方向にビームダンプを配置するのは困難である。垂直方向のビームの広がり、電磁石のサイズ等の観点より、ビームを垂直方向に偏向する方が有利であり、下向きにダンプすることとした。これにより、ビームダンプの上側の遮蔽も強化される。

ビームダンプにビームを輸送するダンプラインのビームエンベロープを Fig.3.2-3 に示す。

3．2．3　ビーム軌道の歪み

3GeV RCS の出射系や BT ビームラインにおける様々な要因で、物質・生命実験施設内に設置される中性子生成標的上においてもビーム中心位置にずれやふらつきが生じる。生体遮蔽体コンクリートおよび反射体内の陽子ビームダクトの形状を決定する上で、このふらつきがどの程度あるか検討する必要がある[4]。

3．2．3．1　ビーム軌道の歪みの解析

ビームの軌道の歪みは MAD コード[5]を用いて評価を行った。簡略化のために、水平方向と垂直方向のビーム形状を独立させて議論を進める。厳密には中心軌道のずれと見かけ上のエミッタンスの増大とがあるが、ここでは両者をまとめ、以下の式を用いて各場所における水平方向の軌道の歪み X の最大値を求めた。

$$X = \left|\sqrt{\varepsilon\beta_x'} - \sqrt{\varepsilon\beta_x}\right| + \left|\eta_x' - \eta_x\right|\Delta p/p + \left|COD\right| \qquad (3.2\text{-}1)$$

ここで、β、ηはβ関数、η関数で、「'」の付いたパラメターは各誤差により変動した値を示す。*COD* は center orbit distortion である。誤差が無い場合では標的上などでは分散関数(η)はゼロであるが、誤差によりゼロでなくなるために運動量分散による影響も考慮した。垂直方向にも同じ式を用いた。

3．2．3．2　ビーム軌道の歪みを生じさせる要因

ビーム軌道の歪みを生じさせる要因には以下のものを考慮した。

(a) 3GeV RCS 出射部における出射角の変動

3GeV RCS の出射部にはキッカー電磁石 8 台、セプタム電磁石 4 台を配置し、キッカー電磁石

Table 3.2-2 Accumulated beam distortions at the exit of the last extraction septum magnet S4 due to the errors of extraction devices.

	x [mm]	dx[mm]	x'[mrad]	dx'[mrad]
QDK の誤差を含めた場合	761.135	1.618	244.321	0.329
正の誤差	761.119	1.602	244.319	0.327
負の誤差	757.916	-1.601	243.666	-0.326
誤差無しの場合	759.517	0.0	243.992	0.0

およびセプタム電磁石全体でそれぞれ 19.9 mrad、218 mrad の角度でビームを偏向させ、ビームを取り出す。キッカー電磁石の偏向角の相対誤差を 1/100、セプタム電磁石の偏向角の相対誤差を 2/1000 として評価した。

Table 3.2-2 にキッカー電磁石、セプタム電磁石、およびキッカー電磁石とセプタム電磁石の間の四極電磁石の磁場による軌道計算を行った結果を示す。最下流セプタム電磁石（S4）出口でのビーム中心の位置の歪みと傾きの歪みを示している。出射角度の誤差は±329 μrad、出射位置の誤差は±1.62 mm となる。このずれはビームパルス毎に変化するため、補正電磁石では修正できず、この値を用いてビーム軌道の歪みを評価した。

(b) 3NBT 機器のミスアライメント

3NBT の各電磁石が±1 mm、±1 mrad の精度で設置されるとし、ビームモニターで観測されるビーム軌道が中心になるように補正電磁石を励磁して補正を行えるものとして計算を行った。ビーム軌道の確認はビームモニターの設置位置で行えるものとした。M2 ラインではビームモニター以外にもミューオン生成標的上でもビーム位置が確認できるものとした。

(c) 3NBT 電磁石の磁場および磁場勾配の非均一性

3NBT のビームラインに配置される偏向電磁石、四極電磁石による磁場、磁場勾配は完全には均一でないために、ビームが広がり、見かけ上のエミッタンスを増大させる。これを、式(3.2-1)を用いて歪みとして評価した。磁場、磁場勾配の非均一のビームに対する影響は、磁場や磁場勾配をビーム進行方向に磁極長にわたって積分した B·L 積または G·L 積で評価を行う。

3．2．3．3　全ての影響を含めた軌道の歪み

全ての要因を考慮し、Table 3.2-3 に示す 4 ケースの場合について計算を行った。この結果と 3．2．3．2節で述べた各誤差の寄与は、概ね線形和が成り立っている。ケース 1 の場合、寄与の割合の多いものから順に、出射角による影響 42 %、偏向電磁石の磁場の不均一性による影響 29 %、四極電磁石の磁場の不均一性による影響 26 %、電磁石のミスアライメント 4.0 % となっている。出射角による影響が最も大きくなっており、水平方向の裕度を増すためには出射角の誤差を小さくすることが必要である。ケース 1～3 では、ミューオン生成標的上流に設置する四極電磁石 QM1 においてビーム軌道の歪みの方がマージンを上回るため、QM1 においてビームロスが生じることとなり、設計条件に反する。

Table 3.2-3　Parameters for calculating beam orbit with all the errors included

ケース	出射角(μrad)	出射位置(mm)	偏向電磁石の B·L 積の非均一度	四極電磁石の G·L 積の非均一度
1	±329	±1.62	-1×10^{-3}	-4×10^{-3}
2	±329	±1.62	-5×10^{-4}	-2×10^{-3}
3	±200	±1.62	-1×10^{-3}	-4×10^{-3}
4	±200	±1.62	-5×10^{-4}	-2×10^{-3}

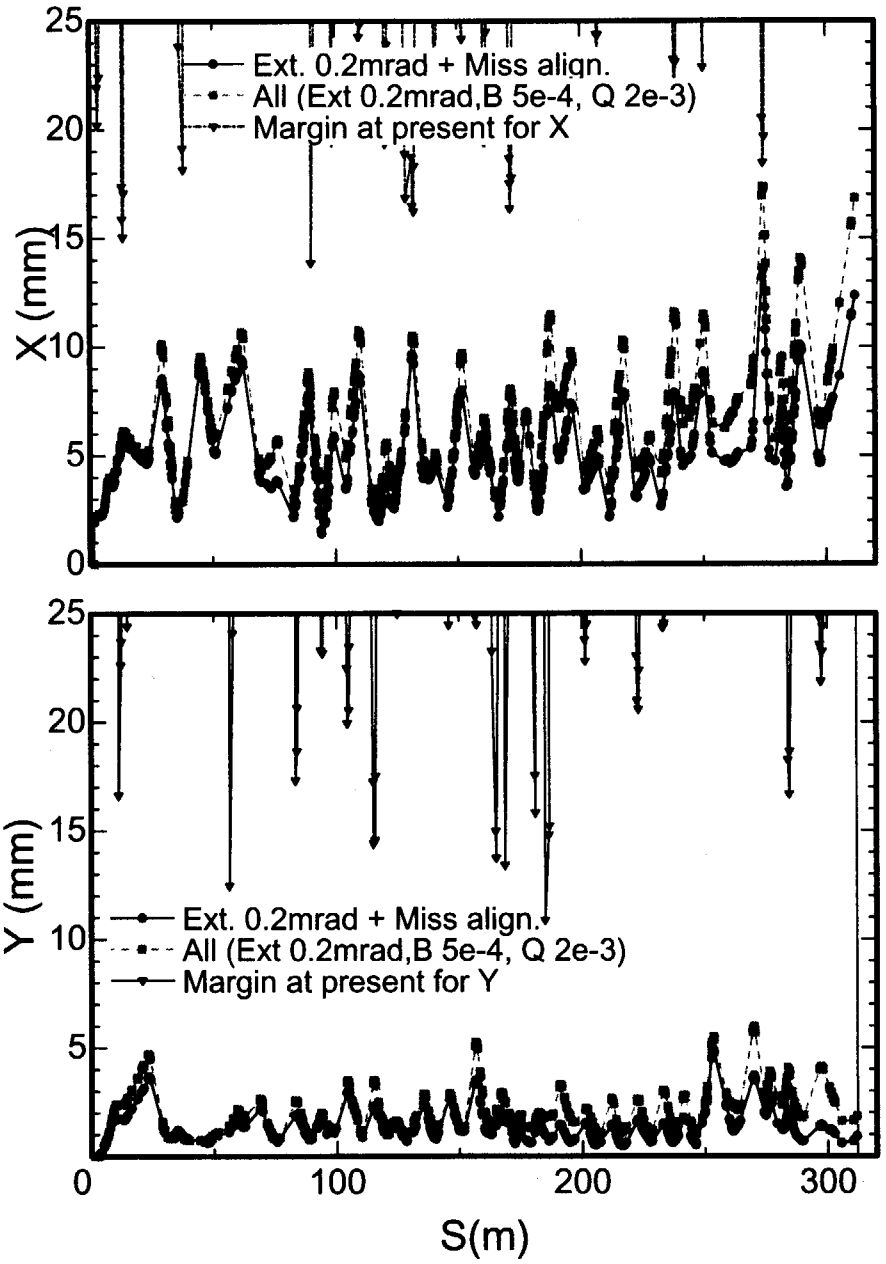


Fig.3.2-4 Distortions of the beam orbit and their margin for the aperture of the magnets from the 3-GeV RCS extraction to the neutron production target. The distortions are estimated with the parameters of the case 4 shown in Table 3.2-3 (error in extraction angle = 200 μrad, non-uniformity in B·L product of 3NBT bending magnets = 5×10^{-4}, non-uniformity in G·L product of 3NBT quadrupole magnets = 2×10^{-3})

ケース 4 におけるビーム軌道の歪とマージンの結果を Fig.3.2-4 に示す。図では比較のために、出射角の誤差とミスアライメントによる軌道の歪みも示している。軌道の歪みがマージンよりも下回るために、設計方針としては出射角の誤差 200 μrad、偏向電磁石の磁場の非均一度 5×10^{-4}、四極電磁石の磁場勾配の非均一度 2×10^{-3} 程度にする必要があると思われる。

ケース４の場合、3GeV RCS の出射角のふらつきによる影響はミューオン生成標的および中性

Table 3.2-4 Beam acceptances of 3NBT beam line in π mm·mrad. The acceptances with the errors of the case 4 are compared with the one without any errors. The switching section is defined as the line from the exit of the last extraction septum magnet to the QA4 quadrupole magnet, the BT tunnel as the one from the switching section to the entrance of the MLF facility building, and the M1 tunnel and the M2 tunnel as the ones in the MLF facility building.

	水平 (誤差無し)	垂直 (誤差無し)	水平 (誤差有り)	垂直 (誤差有り)
分岐部	435.8	473.8	388.5	449.8
BT トンネル(分岐部を除く) M1 トンネル	461.9	473.8	423.4	449.8
M2 トンネル	452.7	437.0	333.1	409.1
全体	435.8	437.0	333.1	409.1

子生成標的において、それぞれ±4.5 mm、±8.0 mm となる。出射角、ミスアライメント、磁場の非均一性による全体の寄与による歪みは、ミューオン生成標的において水平、垂直方向でそれぞれ±5.8 mm、±2.8 mm となる。歪みを入れたビームサイズは直径で 80 mm となる。これに余裕を見込んでオプティクスではミューオン生成標的の直径には 85 mm 必要と思われる。

また、コリメーターにおいて、ビームの歪みは水平方向に±8.8 mm、垂直方向に±2.4 mm ある。コリメーター出口でビーム直径がΦ73 mm となるために、Φ91 mm の孔にする必要がある。さらに中性子生成標的において軌道の歪みは、水平、垂直方向でそれぞれ 17 mm、1.8 mm となる。また、陽子ビーム窓における軌道の歪みは、水平、垂直方向でそれぞれ 16 mm、1.7 mm となる。よってコンクリートにビームが入射する孔は、この余裕を見込んで円筒形の場合には内径Φ309 mm とする必要がある。

Table 3.2-4 にビームラインのアクセプタンスを示す。アクセプタンスは軌道の歪みが無い場合ビームライン全体において、水平、垂直方向においてともに 436π mm·mrad となる。ケース４のビーム軌道の歪みがある場合でも、ビームライン全体で 330π mm·mrad のアクセプタンスを保つことが可能である。ハンズオン・メンテナンスを行う BT トンネル（分岐部も含む）および M1 トンネルではアクセプタンスが 388π mm·mrad 以上を確保することが可能なので、エミッタンスよりも 20%の裕度を得ることができる。

３．２．４　M2 トンネルにおけるビームロス

DECAY-TURTLE コード[6] を用いて M2 トンネルにおけるビームロスを計算した。ここで、ビームロスを一次陽子が何らかの作用でビーム輸送が不可能になることと定義する。計算において、コリメーター孔の内径をΦ88mm とした。ビームロスの計算結果を Fig.3.2-5(a)に示す。この計算の簡略化のためにダクトにビームが触れることによる損失および補正電磁石における損失を無視した。最も大きいビームロスを生じる四極電磁石は QN2 であることがわかる。電磁石における最大の損失は、1 台あたり 1 kW を下回るために目標を達成できることがわかる。

実際には、ビームはダクトと接触することでも損失を生じるため、より現実的なビームロス分

布を計算した。ビームダクトの内径は実際に使用する予定であるΦ240 mm とし、また、この計算では補正電磁石も配置して、補正電磁石による損失も考慮した。この結果をFig.3.2-5(b)に示す。図の縦軸は単位長さ当りのビームロスを示す。ビームロスは四極電磁石の上流側で生じることがわかる。ビームダクトを大きくすると上部に示したものと同等の損失となる。即ち、ビームダクトを大型化すると損失は局所化できることが理解できる。補正電磁石はミューオン生成標的から7m 離れたところに設置したが、損失は四極電磁石で生じるものに比べかなり小さくなることが

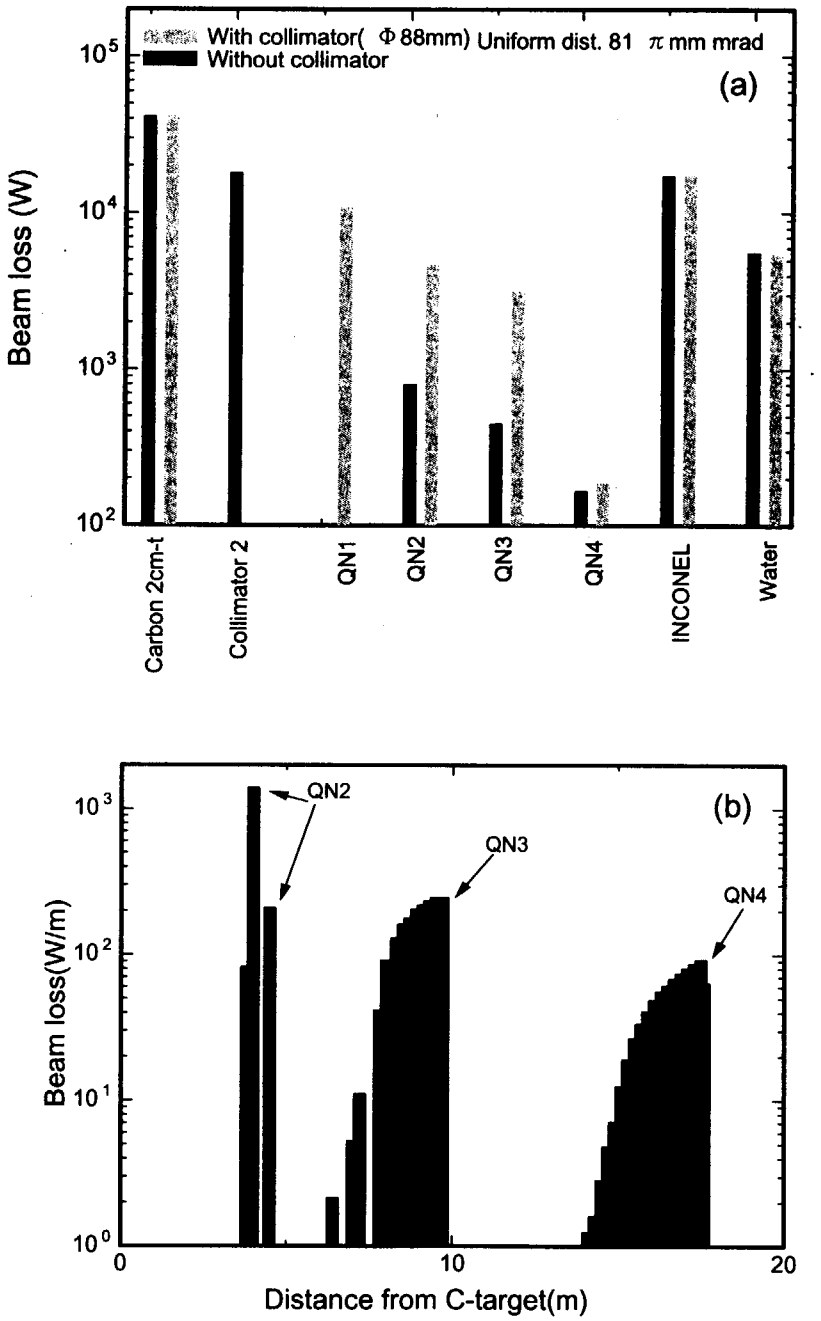


Fig.3.2-5 Beam loss when beam collimators with inner diameter of 88 mm are installed. (a) beam loss at a muon production target, quadrupole magnets and a proton beam window, (b) beam loss distribution when beam loss in beam ducts are included.

わかる。

３．２．５　機器の配置

機器の全体の配置を Fig.3.2-6 に示す。図では、ビーム軌道補正用の補正電磁石（図中の X、Y）、ビームの位置を確認するためのビームモニター（図中の M）も示す。この中で、M2 ラインには MIC 製の補正電磁石を 2 セット(4 台)、ビームモニターを 2 台配置する。

参考文献

[1] 明午　伸一郎：JAERI-Tech 2000-088、“大強度陽子加速器計画における NME 施設内 3GeV ビーム輸送ラインに関する検討”（2001）

[2] 坂元 眞一、他 9 名：JAERI-Tech 2001-075、“大強度陽子加速器計画物質・生命科学実験施設内の陽子ビームライントンネル技術課題の検討”（2001）

[3] Brown K.L. et al. : “TRANSPORT, a computer program for designing charged particle beam transport system”, CERN 80-04 (1973)

[4] 明午 伸一郎、野田 文章：Internal Report 3NBT 2001-11、“3GeV RCS から中性子源までのビームの軌道のずれおよび反射体に入射するビームハローの電流密度の推定”（2001）

[5] Grote H. and Iselin F. C. : “The MAD Program Version 8.16 User’s Reference Manual”, CERN/SL/90-13.

[6] Broun K.L., Iselin Ch., Carey D.C. : “DECAY TURTLE”, CERN 74-02 (1974).

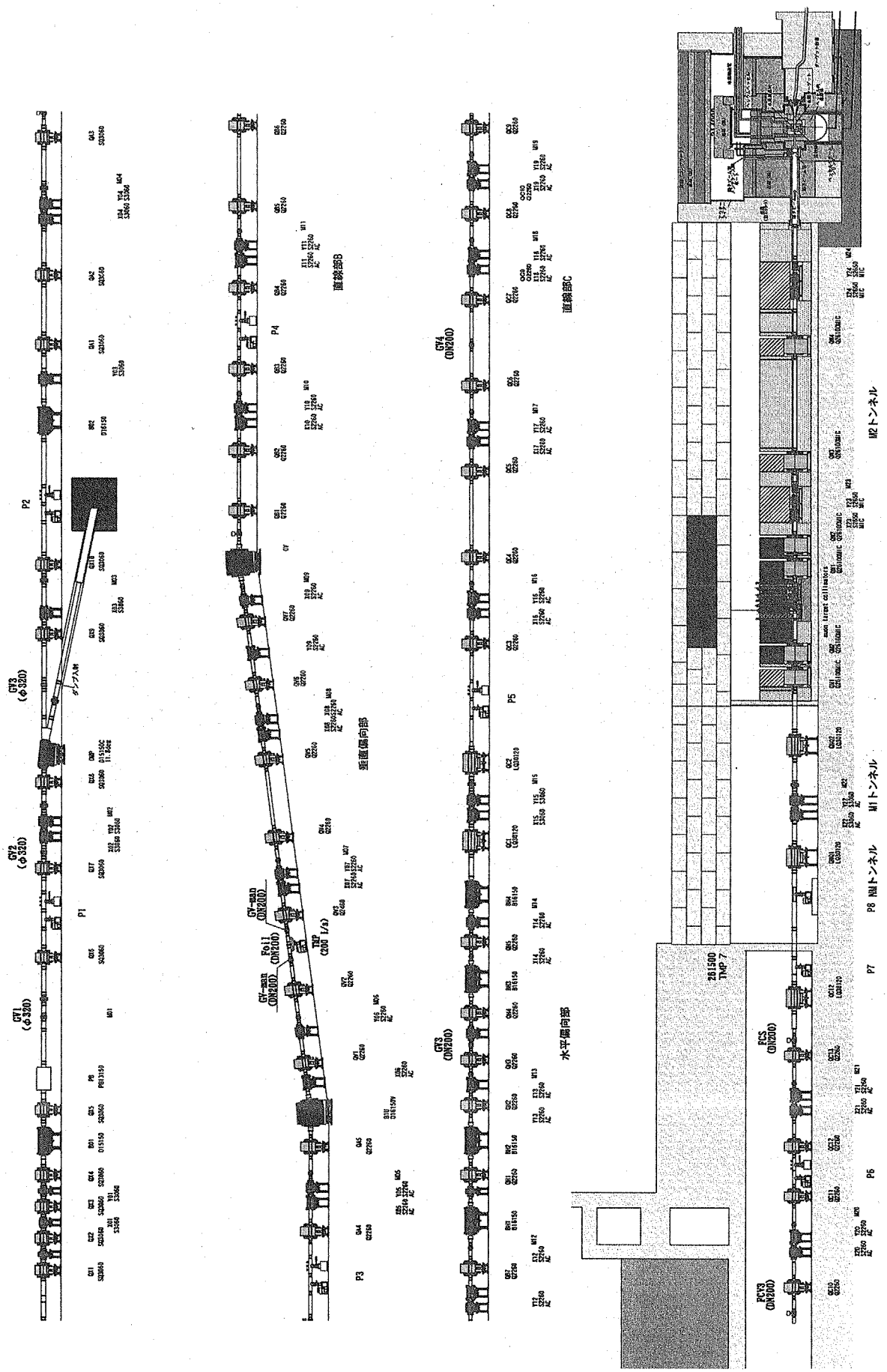


Fig.3.2-6 Layout of beam line elements in 3-GeV beam transport line (3NBT)

３．３　電磁石

大強度陽子ビームの輸送において、ビームロスの低減を図るために広い領域で均一な磁場を実現する電磁石系が必須となる。

３．３．１　概要

陽子ビームラインは、偏向電磁石、四極電磁石、補正電磁石から構成され、すべて直流電流で励磁される。印加電流に対して鉄芯部で磁束密度が飽和すると、磁場の一様性に影響をあたえるため、全ての電磁石の鉄芯には、JIS C2504 に規定される電磁軟鉄板において、1 種（SUYP-1）相当の磁気特性を有する純鉄のブロックが用いられる。陽子ビームライン（3NBT）の電磁石設計例を Fig.3.3-1 に示す。

３．３．２　磁場の均一度

(a) 偏向電磁石

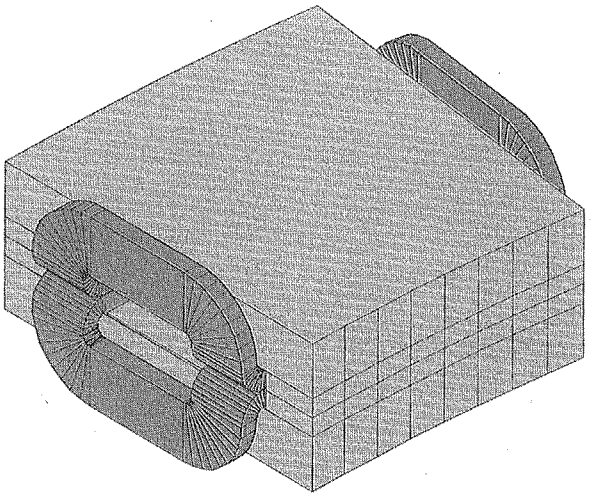
偏向電磁石の場合、電磁石を通過する粒子の偏向角は、ビーム軸に沿って磁束密度を積分した B·L 積に比例するため、その一様性が電磁石の重要なパラメターとなる。3NBT ラインでは、粒子軌道のずれ、プロファイルの広がりに対する許容値の点（３．２節）から、その一様性は、ビーム軌道軸の両側±100 mm 以内の領域で、$|\Delta B\cdot L|/ B\cdot L < 5\times10^{-4}$ が要求されている。このため、比較的広い範囲で一様な磁場が得られるウインドフレーム型の双曲電磁石を採用した。さらに、ビーム軸に沿った磁極端部にシムを設けること、ビームの入出射面にエンドプレート（磁気シールド）を設けることで、良磁場領域（Good Field Region）の拡大、磁場の一様性の向上を図った。Fig.3.3-2 に、D16150 型偏向電磁石に対し、エンドプレートの厚さ、材質を変えた時の B·L 積の分布を示す。この結果より、純鉄製、25 mm の厚さのエンドプレートを採用することとした。

(b) 四極電磁石

四極電磁石では、磁場勾配をビーム軸に沿って積分した G·L 積が一様性を表すパラメターとなり、ビーム軌道軸の左右、上下の±102 mm 以内の領域で、$|\Delta G\cdot L|/ G\cdot L < 3\times10^{-3}$ が要求されている。ただし、ボア径 300 mm の四極電磁石 SQ3060、LQ30120 は、既存の磁極、鉄芯を用いるために、磁場勾配の一様性の向上に限度があり、$|\Delta G\cdot L| / G\cdot L < 8\times10^{-3}$ を目標とした。偏向電磁石と同様、ビーム軸に沿って磁極端部にシムを設けるが、ビーム軸方向の双曲面磁極端部を面取り（カット）することで、磁場勾配の一様性が向上できる。Fig.3.3-3 に、Q2260AC 型四極電磁石に対し、そのカットの大きさを変えた時の G·L 積の分布を示す。この結果より、25 mm、45 度のカットを入れることとした。

(c) 補正電磁石

補正電磁石は、偏向角が小さいため、ビーム軌道軸の両側 100 mm 以内の領域で、$|\Delta B\cdot L|/ B\cdot L < 1\times10^{-3}$ で十分と思われる。磁極はシムをもたない簡単な構造とするため、磁極の形状は偏向電磁石と同様のウインドフレーム型を採用した。さらに、鞍型コイルの立ち上がり（リターン部）の位置をヨーク端部から離し、コイル平坦部の長さを長くすることで磁場の一様性の向上を図った。



D16150H	
偏向角	7.5°
曲率半径	11,494 mm
磁極間隔	160 mm
磁極長	1500 mm
磁極幅	580 mm
磁束密度	1.113 T
$\|\Delta BL/BL\|$ (<±100mm)	$<3\times10^{-4}$
コイル巻数	120回 / 極
電流	591 A
電圧	174 V
電力	103 kW
インダクタンス	~0.51 H
絶縁体	ポリイミド
冷却水流量	~71 ℓ/min
冷却水温度上昇	~21 ℃
磁極重量	~11.4 t
コイル重量	~1.3 t
総重量	~13.7 t

Q2260	
ボア径	220 mm
磁極長	600 mm
磁極幅	240 mm
最大磁場勾配	8.0 T/m
$\|\Delta GL/GL\|$ (<±102mm)	$<1\times10^{-3}$
コイル巻数	84回 / 極
最大電流	458 A
最大電圧	89 V
最大電力	40.7 kW
インダクタンス	~0.18 H
絶縁体	ポリイミド
冷却水流量	~36 ℓ/min
冷却水温度上昇	~16 ℃
磁極重量	~4.0 t
コイル重量	~0.8 t
総重量	~5.1 t

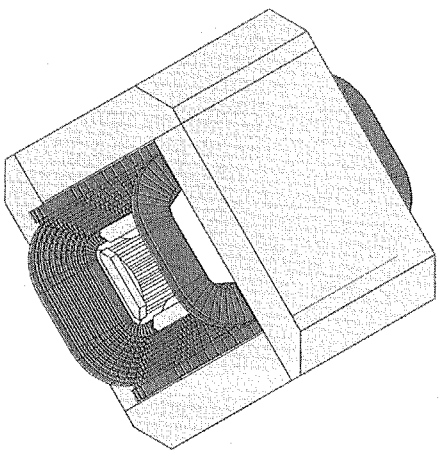


Fig.3.3-1 Parameters of some main magnets

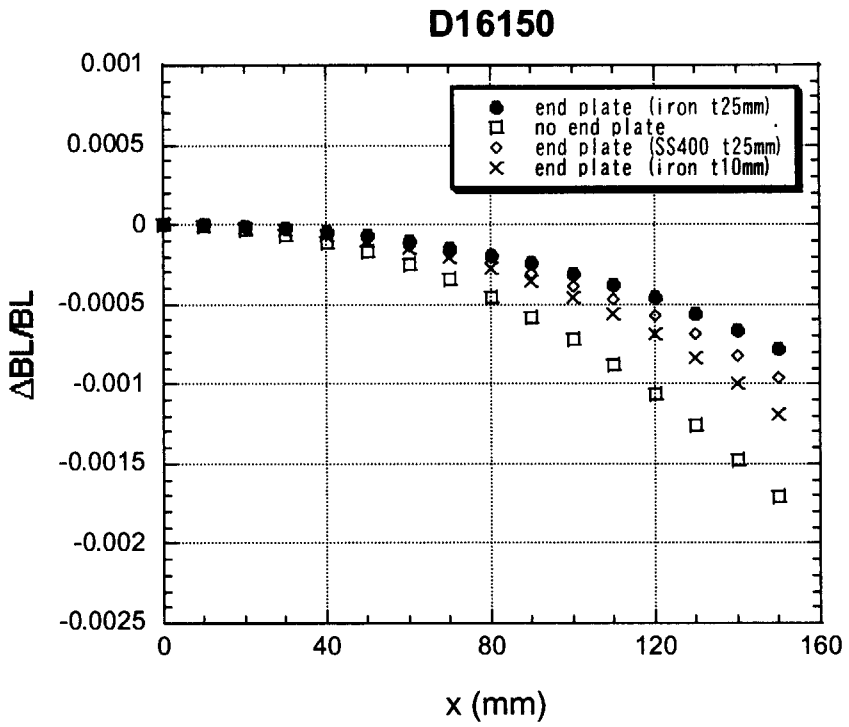


Fig.3.3-2 Relative deviations of B·L products of a bending magnet D16150 with several endplate conditions. The x-axis is the horizontal one perpendicular to the beam direction.

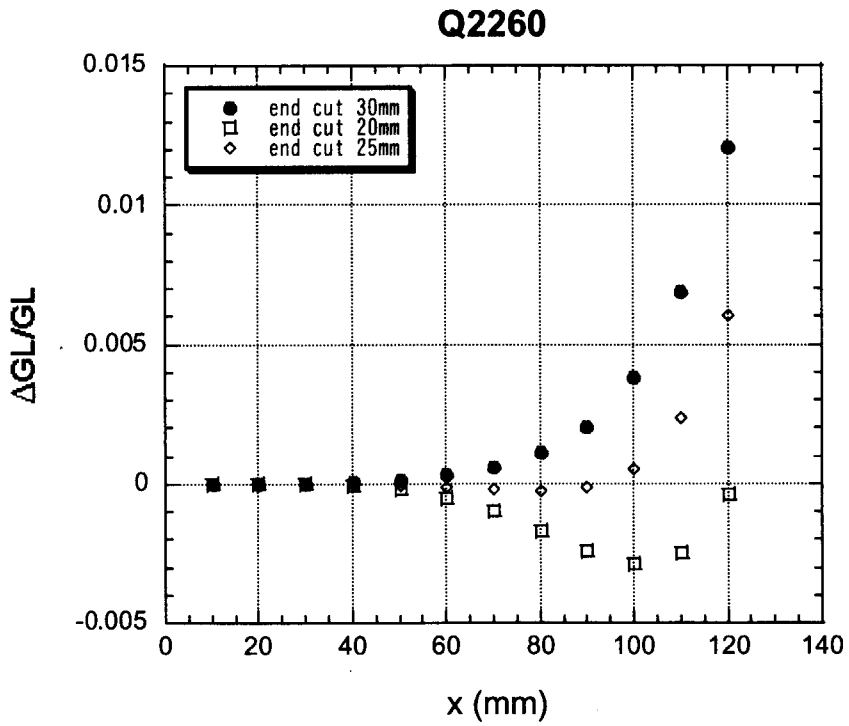


Fig.3.3-3 Relative deviations of G·L products of a quadrupole magnet Q2260 with some end-cut conditions. The x-axis is the horizontal one perpendicular to the beam direction.

３．３．３　電源の安定性

電磁石の磁場の一様性を時間的にも実現するために、電磁石を励磁するための直流電源には、空間的な磁場の一様性（３．３．２節）と同等以上の安定を要求する。電源回路の設計としては、高い磁場の一様性が必要な偏向電磁石用の電源に対して、8時間のドリフトを$\pm10^{-5}$以内、およびリップル電流を$\pm10^{-5}$以内とし、四極電磁石と補正電磁石に対しては、8時間のドリフト、リップル電流ともに$\pm10^{-4}$以内とした。

３．３．４　アライメント

個々の磁場の一様性だけでなく、輸送系全体としての磁場の一様という観点から、電磁石設置のアライメント精度も、同様に高いものが要求される。ビームオプティクスで要求される電磁石のアライメントの精度はTable 3.3-1の通りである（３．２．３．２節参照）。

Table 3.3-1 Accuracies of positions and directions for beam line elements (allowable accuracies to satisfy the required beam loss condition and their possible goals for alignment work)

	機器	許容精度	目標精度
BTトンネル, M1トンネル	電磁石	±0.2～0.5 mm ±0.2～0.5 mrad	±0.1 mm ±0.1 mrad
	ビームダクト	±0.5 mm	±0.2 mm
M2トンネル	電磁石	±1.0 mm ±1.0 mrad	±1.0 mm ±1.0 mrad
	ビームダクト	±2.0 mm	±1.0 mm

下記の手順によって電磁石、ビームダクト、プロファイルモニターなどのアライメントを行う。電磁石に基準座を設けて、この基準座に光学リフレクターおよびプリズムを用いてアライメントを行う計画である。

(1) 墨出し

外部貫通孔から外部基準を落とし込み、トンネル内部の基準座の絶対位置を導出する。次にこの基準座を元に、トンネル内部に基準線の墨出しを行う。工程の都合上、中性子生成標的は3GeV RCS加速器よりも先行して建設するために、物質・生命実験施設が墨出しは最初に行うこととなる。次に3GeV RCS出射部の墨出しを行い、BTトンネル内においてこれを補間するビームラインを構築することとなる。

中性子生成標的および3GeV RCS両者とも、ビームラントンネルや建家のコンクリート躯体の沈降および建築誤差等により位置の相対関係が計画したものから大きく外れる可能性がある。また、経年変化により両者の相対位置関係が外れる可能性が十分にある。特に中性子生成標的は一度据え付けたら再アライメントすることが不可能であるために、3GeV RCSと中性子生成標的の相対位置の狂いは3NBTで吸収する以外に方法はない。

(2) 仮設置

初めに電磁石およびダクトを±1 mm、±1 mrad 程度の精度で仮設置を行う。仮設置に必要な基準線には上述の墨出し線を用いる。機器のアライメントには、トータルステーションまたはセオドライトを用いることにより、±1 mm、±1 mrad の精度は達成することが可能である。

(3) 詳細設置

Table 3.3-1 に示す許容範囲の精度で電磁石等の設置を行う。電磁石の配置には、電磁石ヨークに設置した基準座および光学リフレクターを用いて、高精度トータルステーションを用いて行う。

(4) 再アライメント

Table 3.3-1 に示す目標値は 1 MW の出力が得られる場合に必要なものである。加速器完成初期のコミッショニングでは、ビーム電流が微弱なために必ずしも満足する必要はないと考えられる。一方、トンネル躯体は初期段階では急激に沈下し次第に安定することが想定される。よって、ビームが出てから、ある程度沈下が収まった段階で再アライメントを行う方が望ましい。

3．4　ビームライン真空

陽子ビーム入射系のビームラインは300 m以上の長さをもち、主たる真空ビームダクトは内径200~280 mmと大きく、容積、内表面積も大きい。陽子ビームの残留ガスとの相互作用によるビームロスの観点からは、超高真空は要求されない。しかしながら、陽子ビーム入射系の上流側で接続される3GeV RCSでは、10^{-6} Paより高い真空度が要求されている。

3．4．1　真空設計評価

3NBTに配置する排気装置（ポンプ）を設計するにあたり、到達圧力、到達時間を評価した。実存するビームラインでの実測値と比較することで、その妥当性も確認する。真空領域等の定義、計算式、定数は文献[1]より引用し、計算をできるだけ簡略化するため、ビームライン上のダクトは、一律、同一径の円筒形とした。

3．4．1．1　到達圧力

ある真空系の最終到達圧力p_fは、そのガス放出量Qと真空ポンプ系の排気速度vのバランスにより推定できる。

$$p_f = Q / v$$

真空ビームダクトの場合、ダクトのコンダクタンスを考慮して、ポンプ排気速度vを実効排気速度v_eで置き換える。3 NBTの真空ビームダクトを、ダクト径d= 0.2 m、長さ300 mとし、均等に配置した10台のターボ分子ポンプTMP（排気速度1000 ℓ/s）で排気することを考える。

各ターボ分子ポンプ（TMP）の有効排気速度を、分子流におけるコンダクタンスをもとに評価する（Fig.3.4-1）。C_1、C_2をTMPに接続されたT管の左右のコンダクタンスとすると、各ビームダクトの長さL_1、L_2から、

$$C_1 = 121 \cdot d^3 / L_1 = 121 \cdot (0.2)^3 / 15$$
$$= 6.45 \times 10^{-2}\ \mathrm{m^3/s}$$
$$C_2 = 121 \cdot d^3 / L_2 = 6.45 \times 10^{-2}\ \mathrm{m^3/s}$$

となる。実効排気速度v_eは、

$$v_e = [1/v + 1/(C_1+C_2)]^{-1} = [1 + 7.75\ ]^{-1}$$
$$= 1.14 \times 10^{-1}\ \mathrm{m^3/s}$$

となる。

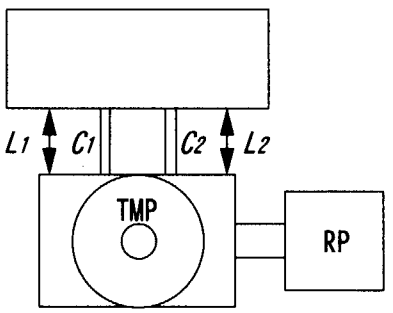


Fig.3.4-1 Model for estimating effective pumping speed.

ガス放出率Rを小さくするため、ダクト内面に表面処理、脱脂＋ベーキングを施すと、ガス放出率Rは、1×10^{-8} Pa-m^3/(s･m^2)程度と考えられる。総ガス放出量Qは、ガス放出率Rに、真空にさらされる全表面積Sを乗ずればよい。よって、コンダクタンスを考慮した到達圧力p_fは、

$$p_f = S \cdot R / v_e = \pi \cdot 0.2 \cdot 30 \cdot 1 \times 10^{-8} / 1.14 \times 10^{-1} = 1.65 \times 10^{-6}\ (\mathrm{Pa})$$

に達する。

同様の評価を、実在する高エネルギー加速器研究機構の中性子中間子実験施設（KEK-NML）の陽子ビーム輸送ラインの実測値と比較してみる。排気速度v= 0.5 m^3/s（500 ℓ/s）をもつターボ

分子ポンプ（TMP1）と内径 d = 0.16 m のビームダクトの系である。両側の真空ダクトの長さは、L_1=6 m、L_2=35 m であるため、それぞれのコンダクタンスは、

$C_1 = 121 \cdot d^3 / L_1 = 121 \cdot (0.16)^3 / 6 = 8.26 \times 10^{-2}$ m^3/s

$C_2 = 121 \cdot d^3 / L_2 = 1.41 \times 10^{-2}$ m^3/s

となる。実効排気速度 v_e は、

$v_e = [1/v + 1/(C_1+C_2)]^{-1} = [1/0.5 + 1/(8.26 \times 10^{-2} + 1.41 \times 10^{-2})]^{-1} = 8.12 \times 10^{-2}$ m^3/s

となる。

KEK-NML ビームラインにおいても初期条件として脱脂＋ベーキングを考え、ガス放出率 R として 1×10^{-7} Pa-m^3/s/m^2 を用いる。到達圧力 p_f は

$p_f = Q / v_e = \pi \cdot 0.16 \cdot (6+35) \cdot 1 \times 10^{-7}$ (Pa·m^3/s) / 8.12×10^{-2} (m^3/s)= 2.5×10^{-5} (Pa)

と評価される。KEK-NML ビームラインにおける TMP1 の実際の到達圧力 1.2 × 10-5 Pa であるので、非常によく一致している。分岐ダクトの部分にもターボ分子ポンプ（TMP2）が設置されており、3 つのコンダクタンスを考慮し、到達圧力は 1.7×10^{-5} Pa と評価される。一方、この TMP2 の実際の到達圧力は 2.6×10^{-5} Pa と測定されおり、これらの良い一致は、この評価モデルの妥当性を示すものである。

3．4．1．2　分子流領域までの到達時間

空気の平均自由行程（λ）とダクト径（d）の関係より、空気の流れの性質は以下の 3 つの領域に分類できる。

大気圧～1 Pa　　：粘性流領域（$d \gg \lambda$）

10 Pa～0.1 Pa　　：遷移流領域（中間領域）

1 Pa 以下　　：分子流領域（$d \ll \lambda$）

ここでは、粘性流領域と分子流領域について、到達時間を評価する。

(a) 粘性流領域

圧力（p）と排気速度（v_e）との間には、

$$V \cdot \frac{dp}{dt} = Q - v_e \cdot p$$

という関係がある。ここで、Vは体積、Qはガス放出量である。この領域は、大気圧～1 Pa の圧力であるため、Q は v_e-p に比べて十分小さく無視できる。すると

$$t = 2.303 \cdot V / v_e \cdot \log_{10}(p_o / p_f)$$

ここで、p_o は $t = 0$ における圧力、p_f は到達圧力である。

36m^3/h の排気速度をもつロータリーポンプ 10 台を用いて、長さ 300 m の真空ビームダクトの排気を考える。粘性流領域では、圧力によりコンダクタンスやロータリーポンプの排気速度が変わるので、大気圧から 1 Pa までに到達時間を、10^5 Pa から 10^3 Pa まで、10^3 Pa から 10^1 Pa まで、10^1 Pa から 10^0 Pa までに分けて評価し、それぞれ、7 分、10 分、7 分となる。

(b) 分子流領域

1 Pa 以下の圧力では空気の流れは分子流として扱うことができる。ガス放出量 Q は、実効排

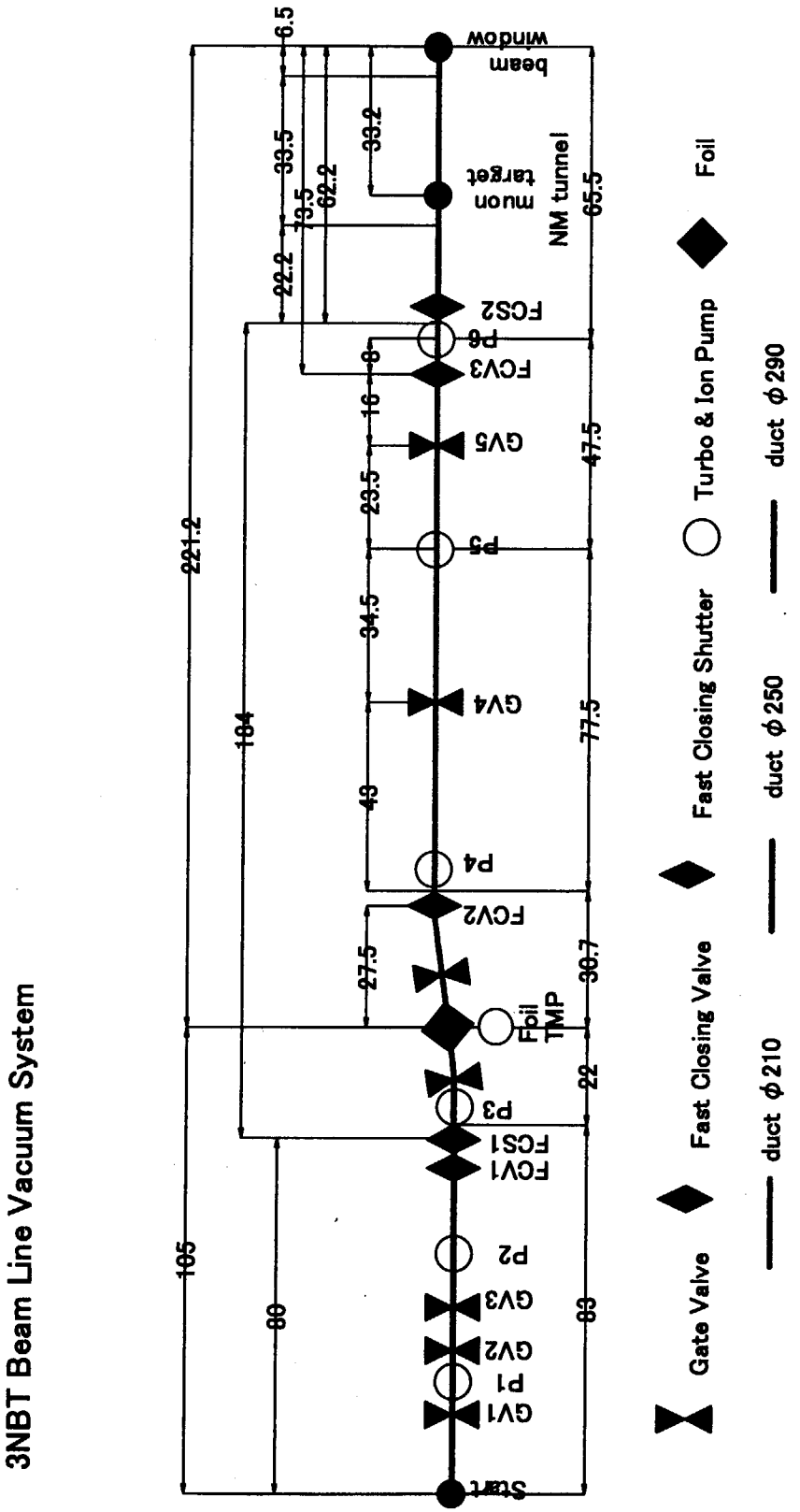


Fig.3.4-2 Vacuum system of 3-GeV beam transport facility (3NBT).

気速度ν_eと到達圧力p_fの積となるので、

$$V \cdot \frac{dp}{dt} = Q - \nu_e \cdot p = -\nu_e (p - p_e)$$

より、圧力pは時間tの関数として

$$p(t) = p_e + (p_o - p_e) \cdot \exp\{-(\nu_e / V) \cdot t\}$$

と表せる。

1 Paから到達圧力の1.1倍の圧力（$1.1 \cdot p_f$）までに到達する時間は、

$$t = V/\nu_e \cdot \log\{(p_o - p_e)/(0.1 \cdot p_e)\}$$

となる。10台のターボ分子ポンプで排気する場合は、5.5分となる。

粘性流領域（大気圧～1 Pa、$d>>\lambda$）での到達時間を、KEK-NMLビームラインのターボ分子ポンプ（TMP1）について、同様の手法で評価する。10^5 Paから10^3 Pa、10^3 Paから10^1 Pa、および10^1 Paから10^0 Paに分けると、到達時間は、それぞれ16分、21分、16分となり、合計53分と推定される。KEK-NMLビームラインにおける粗引き時間は27分であるが、粗引きは大気圧からターボ分子ポンプが回転することを考慮すれば、このコンダクタンス評価は、現実をよく記述しているものと言える。

３．４．２　3NBTの真空系の設計

３．４．２．１　設計条件と機器構成

3NBTのビームダクトは320 mの長さをもち、その内径は204 mm（ISO200）、あるいは282 mm（ISO320）と大きくなる。ミューオン生成標的付近には、内径242 mm（ISO250）のダクトが用いられる。陽子ビームの残留ガスとの相互作用によるビームロスの観点からは、超高真空は要求されないが、必要な真空度に達するまでの時間を考慮すると、ダクト内面からのガス放出率はできるだけ低く抑えたい。さらに、上流3GeV RCS側での高真空（$<10^{-6}$ Pa）に対し、最下流のミューオン生成標的系での大きなガス放出による全体的な真空度の劣化に対応する必要がある。

前節に示した評価にもとづき、320 mの真空ビームダクトを6セットの真空排気ユニットで排気する（Fig.3.4-2）。各ユニットの間には真空ダクトの真空を仕切る真空ゲートバルブを配する。さらに、真空系と直接接している冷却水系をもつ機器、すなわち、陽子ビーム窓、ミューオン生成標的・コリメーター系での破断の際に、上流側の加速器設備を保護する速断バルブ（Fast Closing Valve、FCV）を備える。また、上流3GeV RCS側での高真空と最下流の低真空とを仕切る真空薄膜の設置も検討している。

３．４．２．２　排気装置ユニット

排気装置ユニットは、イオンポンプ、ターボ分子ポンプ、ドライポンプの各1台とゲートバルブから構成される（Fig.3.4-3）。

(a) イオンポンプ

イオンポンプは常時運転され、高真空を維持する。排気速度は1000ℓ/s、窒素ガスに対する飽和排気速度は、圧力10^{-6} Paにおいて0.7 m^3/sが必要となる。また、対放射線性を高めるため、

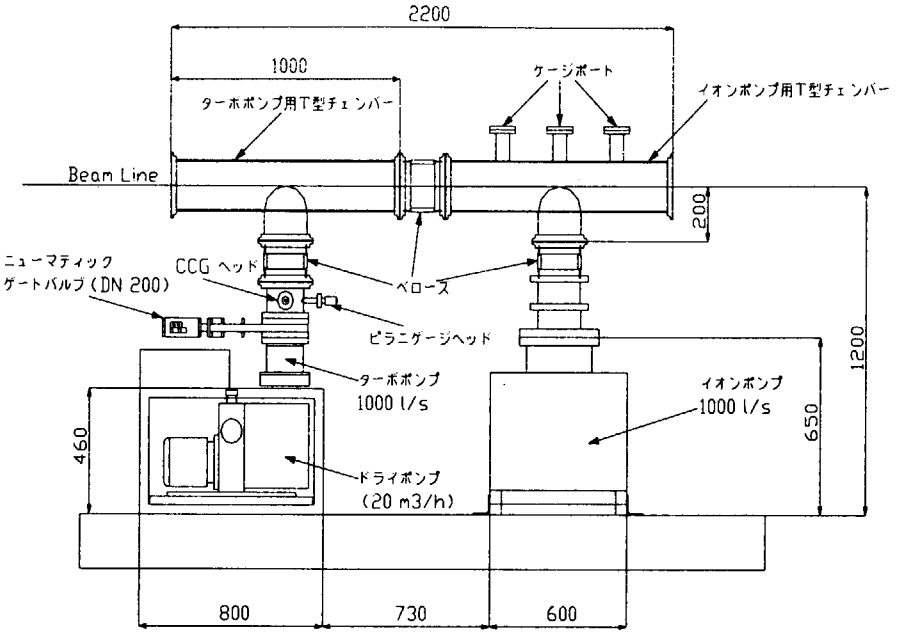


Fig.3.4-3　Vacuum pump unit.

コンベンショナルダイオード型素子を用いる。

(b) ターボ分子ポンプ

ターボ分子ポンプは、イオンポンプが起動できる圧力（10^{-4} Pa）に到達するまで運転し、通常の場合、その後は停止させておく。ただし、真空漏れが僅かにあるような場合には、イオンポンプと連動させて排気を行う。

排気速度は1000 ℓ/s、圧力0.01 Paにおいて窒素ガスに対する排気速度が900 ℓ/s以上であること、また、水素ガスに対して10^6程度の圧縮比を有することが要求されている。耐放射線性の観点から磁気浮上タイプとし、センサーにはホールプローブを用いる。

(c) ドライポンプ

ドライポンプは、ターボ分子ポンプと同様、イオンポンプが起動できる圧力（10^{-4} Pa）に到達するまで運転し、通常の場合、その後は停止させておく。ただし、真空漏れが僅かにあるような場合には、イオンポンプと連動させて排気を行う。

ドライポンプには、20 m^3/hの排気速度が必要となる。

3．4．2．3　真空ビームダクト

材質は純チタン（JIS第2種）を採用し、表面は脱脂処理だけでも十分に低いガス放出率が得られる。さらに、比重はSUSの半分程度、弾性は大きく、残留放射能がSUSより1桁ほど低い。特に、電磁石内に設置するダクトは、電磁石の磁場を乱すことがあってはならない。SUS316Lの比透磁率は低いが、曲げによる歪や溶接部は比透磁率が大きくなる。その影響は磁場の非均一性の許容値を超えるものであり、チタン選択の大きな要因に一つとなった。

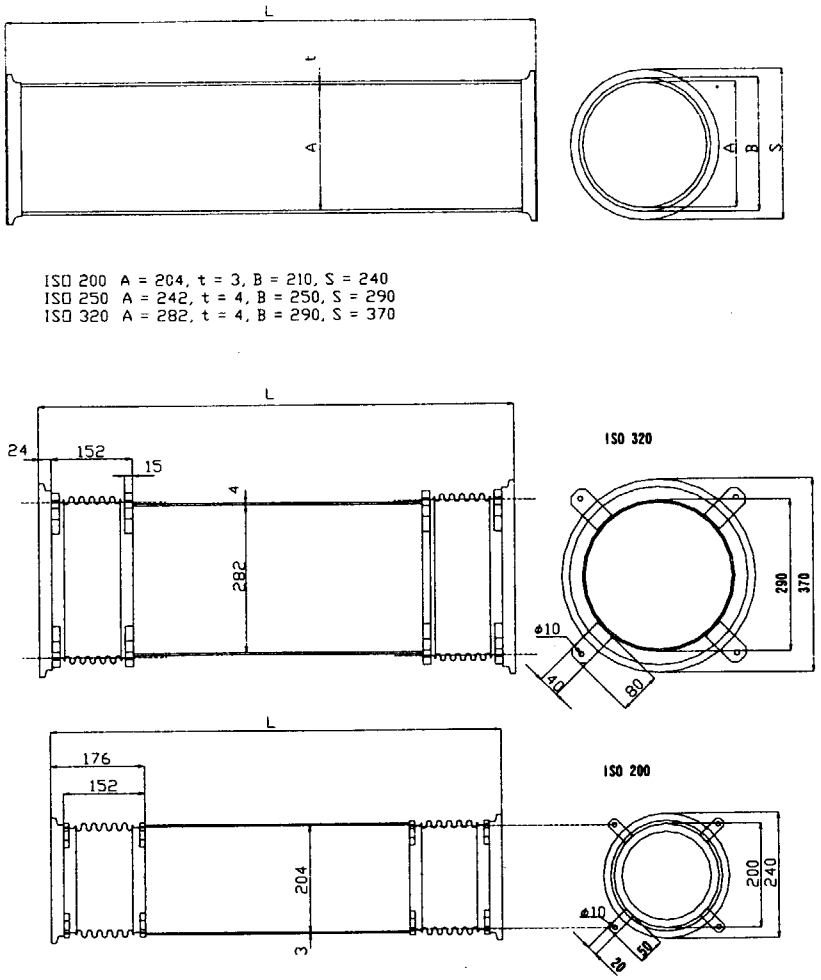


Fig.3.4-4　Straight vacuum beam duct (top) and vacuum beam duct with bellows (bottom).

直線真空ビームダクトは、外径がφ210 mm、φ250 mm、φ290 mm の 3 種類である。両端は、直接フランジが溶接されるか、ベローズを介してフランジに溶接される（Fig.3.4-4）。

3．4．2．4　ゲートバルブ類

ゲートバルブはメタルシールとし、10^6 Gy までの吸収線量まで耐えるものとする。また、速断バルブも設置し、緊急時に備える。もし中性子源の直前に設置される水冷の陽子ビーム窓が破断した場合には、冷却水がビームライン上流側に飛散する。フラップタイプの速断バルブは、バルブが閉まるまでに 27 msec の時間を要する。この間に冷却水は 15 m 程度飛散すると思われるので、陽子ビーム窓の少なくとも 20 m 上流に設置する。さらに、3GeV RCS の近くにも設置し、被害を最小限に食い止める。主な仕様を Table 3.4-1 にまとめる。

3．4．3　真空仕切り薄膜

3GeV RCS 側の超高真空と M2 トンネルの低真空とを仕切るために、薄膜をビームライン途中に設置し、上流側と下流側の真空系統を全く別系統に考える方が望まれる。さらに、万一、最下

Table 3.4-1 Main parameters of vacuum gate valves

	単位	ゲートバルブ		速断バルブ
直径	mm	φ200	φ320	φ200
数量		4	3	2
形式		stretch	stretch	flap
シール材		メタル	メタル	
制御		圧空	圧空	圧空
開閉時間	sec	~15	~20	0.025（閉時）
耐放射線性	Gy	10^6	10^6	10^6
コントローラーまでの最大距離	m	260	260	150
電源	V	100	100	100

流の陽子ビーム窓が破損した場合でも、圧力が低い水蒸気程度なら進入をとめることができる。

一方、陽子ビームが薄膜を通過する時にビームロスが発生し、ビームのエミッタンスも増大する。現在、真空仕切り薄膜には、直径φ300 mm、厚さ5 μmの純アルミニウムを用いる予定である。陽子ビームのエミッタンス増加をできるだけ小さく抑えるために、低Zの材料が望ましく、ベリリウムはこの点で有利であるが、強度および破損時の対応を考慮して、アルミニウムを選定した。

3．4．3．1 膜に係る応力

膜より下流側の到達真空度を0.13 Paとする場合を考察する。真空膜で仕切られる上流はこれよりも無視できる程度の圧力1×10^{-8} Paであり、圧力差としては0.13 Pa（0.13 N/mm^2）しかない。

3．4．3．2 真空仕切り膜に起因するビームロス

真空仕切り膜を設置する場合のビームロスをDECAY-TURTLE コード[2] で計算した。アルミフォイル（5 μm）をBTトンネルのQV2, QV3間に設置した。計算は、位相空間分布で一様分布およびガウス分布を持つ場合の2ケースを行った。

結果をTable 3.4-2に示す。平均的なビームロスは0.1 W/m程度である。よって現在想定される平均的なビームロスよりも十分に小さい。また、エミッタンスの増大は1.7πmm·mradと、もとのビームのエミッタンスに比べて非常に小さいことがわかった。

3．4．3．3 ビームによる発熱

ビームによる膜全体の発熱を Q として、輻射による冷却を $Qrad$ [W]、熱伝導による冷却 を $Qcond$ [W]とすると

$$Q = Qrad + Qcond$$

Table 3.4-2 Proton beam loss due to the separation film (W).

場所	一様分布	ガウス分布
T-C2（薄膜）	13.6	11.3
QV3	1.3	1.8
QV4	5.6	5.2
QV5	1.3	0.4
B1D		1
QB3		0.4
BH3		4
BH4		4
COL2（コリメーター）	0.4	2
QN21	0.4	
合計	22.7	30.1

となる。

(a) 輻射による冷却

$$Q_{rad} = \sigma_{ex} SF\left(T^4 - T_{out}^4\right) = 2\sigma_{ex}\pi r_{in}^2 F\left(T^4 - T_{out}^4\right)$$

σ_{ex}はステファン・ボルツマン定数（5.67××10^{-8} W/m^2/K^4）、r_{in}はビーム半径 (m)、Fは輻射係数（0.2）、Tは膜の温度、T_{out}はビームダクト周辺温度である。輻射のみで冷却する場合 1W の付与がある場合に、ビームダクトの周辺温度を 303 K=30℃、r_{in}=4 cm とすると、アルミの温度は 90℃にしかならない。輻射による冷却効果は、下記の熱伝導による効果に比べ、非常に高い。

b) 熱伝導による冷却

膜の温度上昇をビーム照射部と非ビーム照射部に分けて考察する。ビーム照射部における温度上昇ΔT_1は発熱密度q'''（W/cc）がビーム半径r_{in}（m）で生じているとして、

$$\Delta T_1 = \frac{q''' r_{in}^2}{4k} = \frac{Q}{4\pi kt}$$

となる。ここで、Qは膜全体の発熱（W）、kは熱伝導率（W/m/K）、tは膜の厚さ（m）である。ビームが照射されない部分の温度上昇ΔT_2は、

$$\Delta T_2 = \frac{Q\ln(r_{out}/r_{in})}{2\pi kt}$$

となる。熱伝導による全体の温度上昇ΔTは、

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2$$

となる。熱伝導のみで 1W の冷却を行うと膜の温度は 187℃となる。

以上より、輻射と熱伝導を考慮した発熱と温度の間には

$$Q = \sigma_{ex}\pi r_{in}^2 F\left(T^4 - T_{out}^4\right) + \left[1/4\pi kt + \ln(r_{out}/r_{in})/2\pi kt\right]^{-1}\left(T - T_{out}\right)$$

という関係があることになる。5 μm 厚のアルミニウムを用い、ビーム半径は典型的に 4 cm 程度であると思われるので、

Q = 0.983 W（NMTC/JAM の計算結果）

r_{in} = 0.04 m

r_{out} = 0.1 m

k = 237 W/m/K

σ_{ex} = 5.67 × 10^{-8} W/m^2/K^4

T_{out} = 303 K = 77℃

よって溶融（融点 660℃）の可能性は全く無いと考えられる。また、クリープが顕著になる 100℃を下回るために、クリープも問題ないと考えられる。

3．4．3．4　ビームによる損傷および寿命

NMTC/JAM [3] で仕切り膜の DPA を計算した。この結果を Table 3.4-3 に示す。比較のために KEK-NML ビームライン（0.5 GeV）で使用されている SUS 製の仕切り膜についての結果も示す。KEK の真空・大気仕切り膜のビーム半径を 3 cm、電流を 8 μA で 8 年運転している。この膜は既に 0.66 DPA の損傷を受けているが、破損、真空漏れ等の問題は起こっていない。アルミニウムと SUS では破壊に至る DPA が異なるが、安全側に評価するために、仮にアルミニウムでも 0.6 DPA では破壊に至らないと仮定すると、3NBT で使用する仕切り膜の寿命は 1 年程度となる。ここで、この計算は位相空間で一様分布を持つモデルで行ったが、ガウス分布（4σ=81πmm·mrad）ではビーム電流密度が約 1.3 倍程度になるので、最短の場合でも寿命は 9 ヶ月である。

Table 3.4-3 DPA cross sections and DPA/year for J-PARC and KEK-NML. The beam profile is assumed to be uniform in phase space within φ80 mm for J-PARC 3-GeV 333-μA beam, and uniform in phase space within φ60 mm for KEK-NML 0.5-GeV 8-μA proton beam. The accumulated DPA's for 8 years are also shown for KEK-NML.

	材質	DPA σ(b)	DPA/年	DPA/8 年
J-PARC 3GeV	Al	687	6.51×10^{-1}	
	SUS	1897	$1.80 \times 10^{+0}$	
KEK 0.5GeV	Al	794	3.21×10^{-2}	0.26
	SUS	2041	8.26×10^{-2}	0.66
	W	3683	1.49×10^{-1}	1.20

参考文献

[1] 掘越源一：真空技術（物理工学実験第4巻、東京大学出版会、1994年、第3版）

[2] Broun K.L., Iselin Ch., Carey D.C. : "DECAY TURTLE", CERN 74-02 (1974).

[3] Niita K., et al. : JAERI-Data/Code 2001-007 "High Energy Particle Transport Code NMTC/JAM" (2001).

3．5 ビームダンプ

3．5．1 概要

ビームダンプの主な役割は、陽子ビームをすべて止め、発生する中性子などの二次粒子を遮蔽して土壌や地下水の放射化を防ぐことである。

3GeV RCS出射ビームダンプ（以下では、簡単に「ビームダンプ」という）は、3GeV RCS出射部直後のBTトンネルの下に設置される（3．2．2．2節）。Fig.3.5-1にビームダンプの設置概念図を示す。陽子ビームはビームダンプ直前の偏向電磁石で下方向に曲げられ、ビームダンプに入射する。ビームを停止させる部分としては鉄を使用し、その周囲をコンクリートで覆う。本計画で予定されているコミッショニングまたはビーム調整時のビーム強度は4 kWであり、強制冷却機構を設けない自然冷却型で十分対応できる。

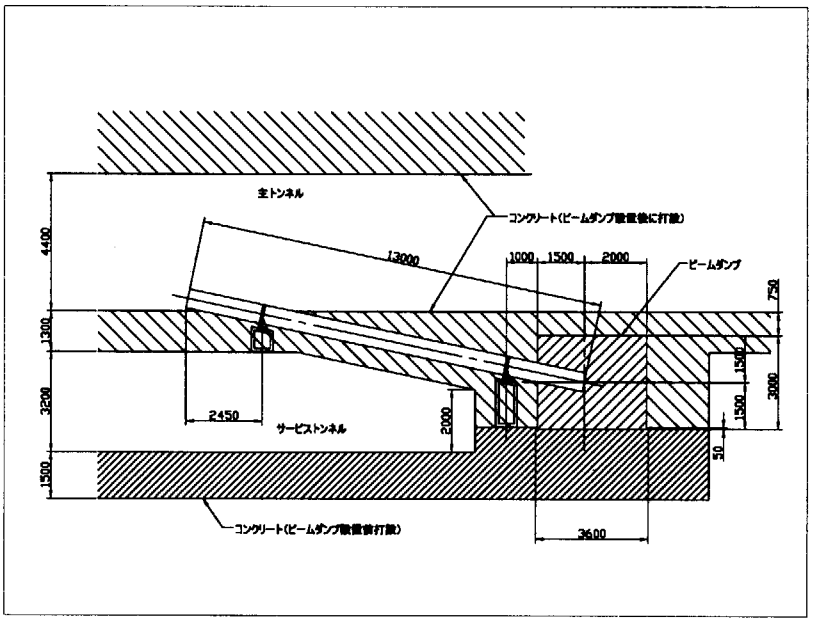


Fig.3.5-1 Beam dump for 3-GeV RCS

3．5．2 設計条件

ビームダンプの設計にあたり、以下のような条件を設定した。

(a) 入射陽子ビームの条件および使用時間

投入される陽子ビームのエネルギーは3 GeV、最大投入強度は4 kWとする。また、ビームダンプの連続仕様時間を48時間とする。

(b) 陽子ビーム入射時の中性子およびガンマ線の遮蔽性能に関する条件

本計画では、設計基準として土壌における中性子線量を11 mSv/h以下と定めている[1]。また、安全裕度としてファクター2を考慮することが求められている。つまり、コンクリート外側の土

[1]この値は、「ビームダンプを定格(4 kW)で使用中の時間平均線量」と解釈する。ただし、11 mSv/hはポイントロスする場合の規制値で、ラインロスの場合の規制値は5 mSv/h以下である。この基準は、コンクリート面に接する厚さ1 mの土中における中性子線量の平均値に対して適用される。

壌の線量目標値は、設計上 5.5 mSv/h 以下となる。

(c) 温度、熱膨張に関する条件

陽子ビームの入射によってビームダンプ内の鉄は発熱する。その熱は鉄からコンクリートに伝導し、コンクリートの温度を上昇させ、最終的には BT トンネル内の空気または土壌に放散される。温度の上昇は、特にコンクリートに大きな影響を与える。コンクリートは 60℃以上の高温状態になると内部の結晶水の蒸発によって脆くなり、構造物としての必要な強度が保てなくなる恐れがある。よって、ビームダンプ使用時の温度履歴を評価し、コンクリートの温度が 60℃を越えないことを確認する。

また、鉄の熱膨張によりコンクリートが応力を受けひび割れなどが発生する可能性がある。よって、温度分布から鉄がどれだけ膨張するか算出し、コンクリートに破壊的な応力がかからないことを確認する。

3．5．3　解析計算

以下に設計のために行った解析計算について示す。

3．5．3．1　陽子ビーム入射時の放射線遮蔽性能の評価

(1) 計算モデル

計算に使用したモデルを Fig.3.5-2 に示す。中性子線量は、ビームダンプの後面（Fig.3.5-2 の I の領域）下面（II の領域）および側面（III の領域）の土（厚さ 1 m）が受ける平均値を評価した。鉄の密度は、鋼板間に生ずる隙間を考慮して、実効的に 7.2 g/cm^3 とした。また、コンクリートおよび土の密度をそれぞれ 2.2 g/cm^3 または 1.5 g/cm^3 とした。

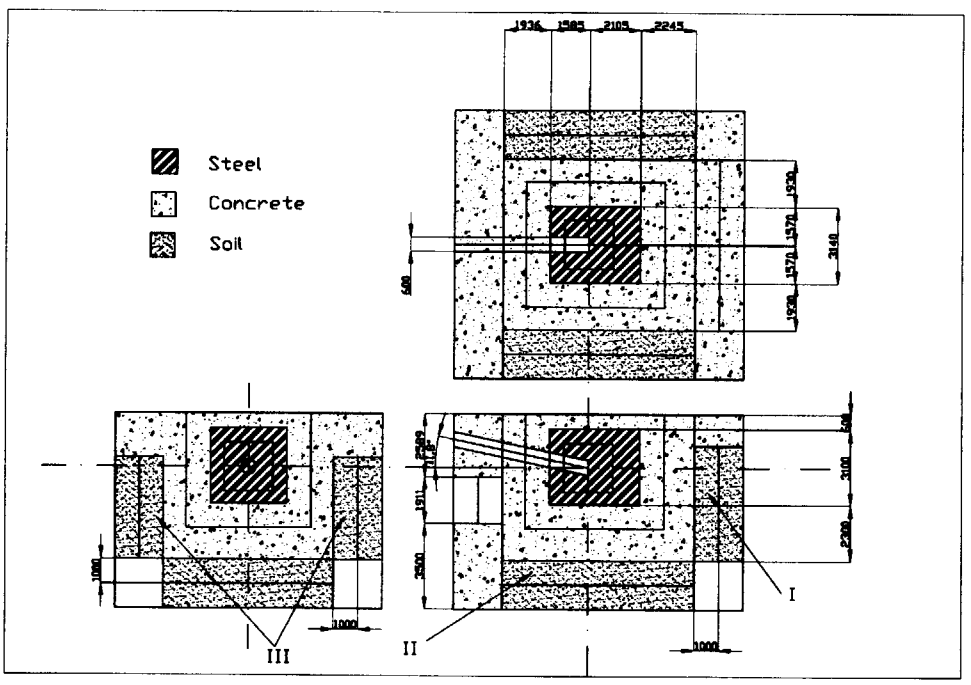


Fig.3.5-2　Calculation model for radiation shielding

(2) 計算コード

計算はMCNPXコード[1]を用いて行った。150 MeV以下の核データファイルにはLA-150を用いた。

(3) 結果

各領域における中性子線量の計算結果をTable 3.5-1に示す。すべての領域で目標線量値を下回っている。

Table 3.5-1 Estimated neutron dose rate around the beam dump

領域	I（後面）	II（下面）	III（側面）
中性子線量[mSv/h]	4.1	0.69	0.36

3．5．3．2 熱および応力に関する検討

(1) 計算モデル

計算に用いたモデルをFig.3.5-3に示す。また、計算に用いた物性値をTable 3.5-2に示す。

計算モデルはコンクリート外側の土（3 m厚）までを考慮した。境界条件として、土の外側部分を16℃と設定した。サービストンネル中は空気の移動が少なく温度も比較的高いことから、サービストンネル側のコンクリート面は断熱とした。BTトンネル側へは空気への熱伝達を考慮した。空気の温度は30℃とした。空気への熱伝達率はBTトンネルの大きさ（断面積など）およびその中を流れる空気の平均風速0.38 m/sから1.14 W/m^2Kと評価した。

鉄部分は厚さ20 cm程度の鋼板を積層した構造になる。そのため鋼板間には接触熱抵抗が生ずる。計算には、鋼板間に200 W/m^2Kの接触熱抵抗を考慮して算出した実効的な熱抵抗を用いた。

鉄とコンクリート間には3 mmの空気層があるものとした。

初期条件として、BTトンネル底面を30℃としてその面から3 m下の場所で16℃になるように直線近似した温度分布を設定した。

Table 3.5-2 Properties of materials for the thermal and stress analyses

物質名	密度[$g\ cm^{-3}$]	熱伝導係数[$Wm^{-1}K^{-1}$]	比熱[$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$]	温度等の条件
鉄	7.8	47.8	0.529	500K
コンクリート	2.2	1.6	0.9	
土（砂）	1.6	1.3	0.5	
空気	0.0011763	0.02614	1.007	300K、0.1MPa

a) 軟鋼（0.23C+0.6Mn）の値を用いた。「伝熱工学資料」参照。
b) 「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」（日本建築学会，47, 1998)を参照.
c) 「熱物性ハンドブック」（熱物性学会, 32, 1992)の評価式を使用。土の乾燥密度を1.5 g/cm^3、自然含水比を10%とした。

(2) 計算

まず、入射陽子ビームのプロファイルを DECAY-TURTLE コード[2] で計算した。その陽子ビームプロファイルを入力として、陽子入射による体系内の発熱分布を NMTC/JAM コード[3] を用いて計算した。さらに、その発熱分布を入力とし ABAQUS コードにより非定常条件における熱伝導計算を行った。4 kW の陽子ビームが 48 時間連続でビームダンプに入射したとして、ビームダンプ内部の温度分布の時間変化を計算した。

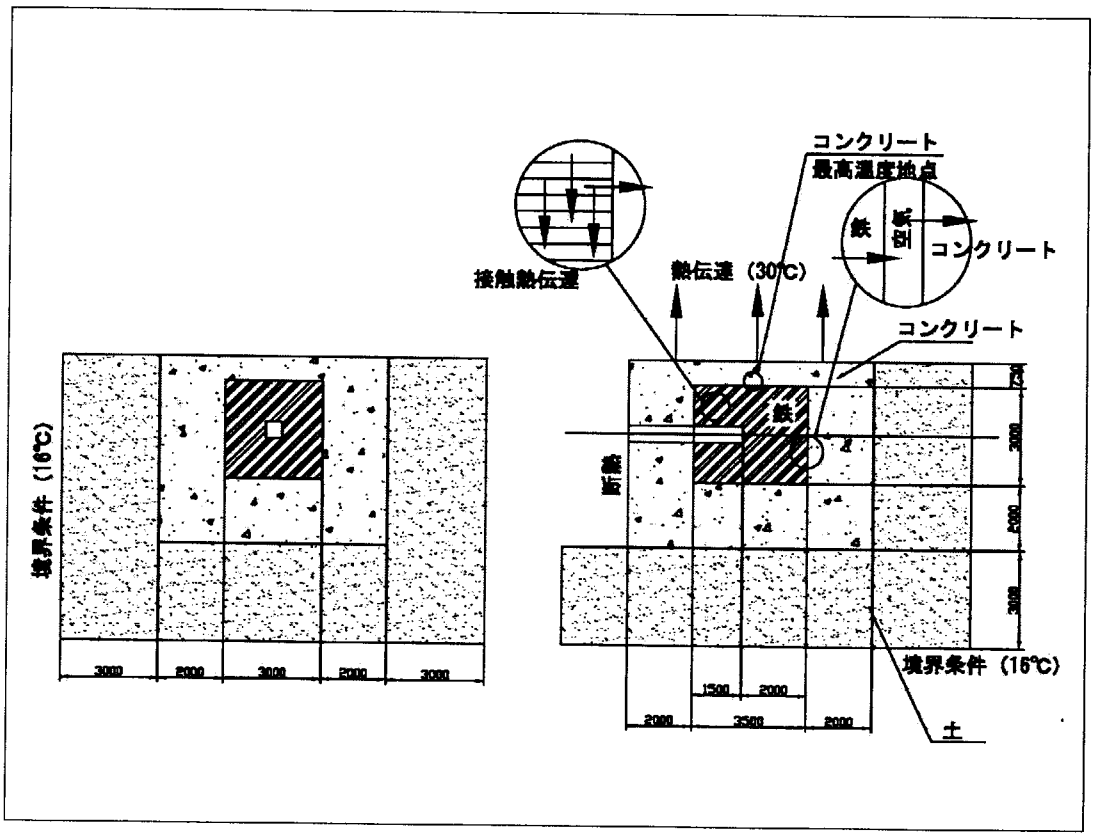


Fig.3.5-3 Model for thermal analysis. The 3 mm gap is assumed between a iron section and concrete walls and filled with air. The iron section is a pile of 200 mm thick steel plates. The highest temperature in the concrete walls is found just above the center of the iron section.

(3) 結果

Fig.3.5-4 に、鉄およびコンクリートの最高温度地点の温度履歴を示す。鉄中で最も温度が高くなる地点は中心の陽子入射位置付近で、最高温度は 220℃である。また、コンクリート中で最も温度が高くなる場所は、ビーム入射位置の直上である。（Fig.3.5-3 を参照。）鉄の温度は連続運転終了後にただちに下降するが、コンクリートの温度は運転終了後も温度が上昇しつづけ、運転終了後から約 1 日後に 37.5℃の最高温度になる。48 時間の連続運転中またはその後の冷却期間においても、コンクリートの温度はその使用条件である 60℃に比べて十分低く保たれる。

また、連続運転直後の鉄の温度分布から熱膨張による鉄の伸びを算出したところ、最大で 3 mm 程度になることがわかった。鉄部分は鋼板を積層する形で作り上げるので、全体で数ミリ程度の伸びならば鋼板間のすきまで十分に吸収することができる。また、鉄とコンクリートに間にも多

少の隙間があくと考えられるので、鉄の数ミリの伸びによってコンクリートに破壊的な応力がかかることはない。

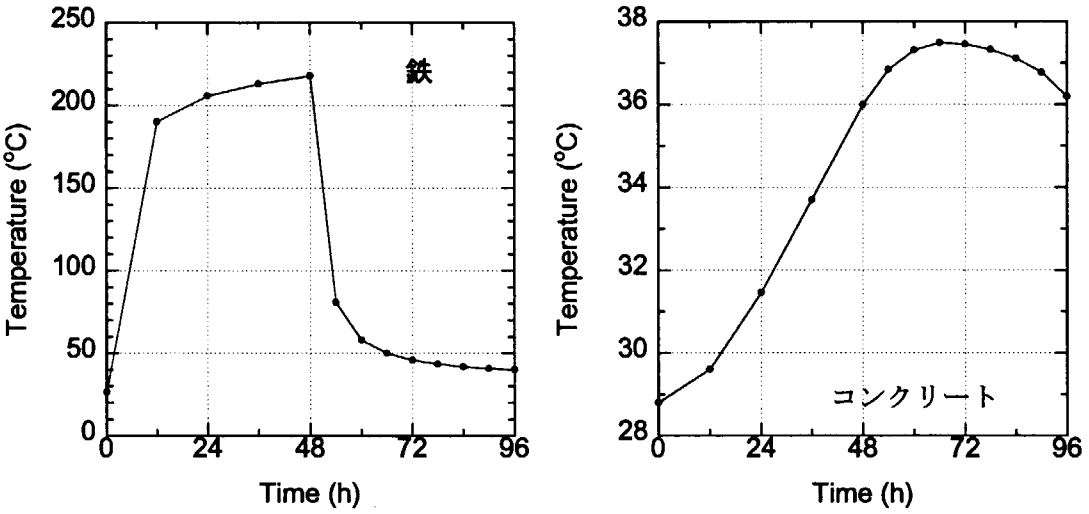


Fig.3.5-4 Transitions of the highest temperature in the iron section (left) and in the concrete walls (right). Proton beam of 4 kW is injected for 48 hours. The center of the iron section becomes hottest. The highest temperature in the concrete walls gets 37.5 ℃ just above the beam injection point in the iron section（see Fig.3.5-3）

参考文献

[1] Waters L.S. (Ed.), "MCNPX User's Manual", TPO-E83-G-UG-X-00001, Los Alamos National Laboratory (1999)

[2] Broun K.L., Iselin Ch., Carey D.C. : "DECAY TURTLE", CERN 74-02 (1974).

[3] Niita K., et al. : JAERI-Data/Code 2001-007 "High Energy Particle Transport Code NMTC/JAM" (2001).

4． 中性子利用実験装置

4．1 プロジェクト提案装置

4．1．1 はじめに

中性子は粒子と波の性質を合わせ持つ質量が電子の約 1800 倍のドブロイ波である。特に熱エネルギー領域の中性子はその波長とエネルギーが(1Å 対して 81meV)物質内の原子構造とその運動エネルギーのスケールにほぼ等しく、それが故に、物質の性質と機能を決定づける物質内の原子の時間的空間的相関(時空相関)をミクロスコーピックな観点から研究するのに非常に適したプローブである。中性子は核ポテンシャルにより散乱されるために、その散乱断面積は原子番号によらず、水素原子等の軽元素によっても大きく散乱される。このため、生体物質等の軽元素を含んだ物質の構造研究において非常に有効であるとともに、アイソトープ置換により特定の原子の部分構造の研究が可能となる。また、中性子はスピンにより物質内部の原子磁気モーメントによっても散乱される。その散乱断面積は核散乱と同程度であることから、スピンと格子の両者の情報を直接得ることが可能である。従って、物質の機能に直接関わる原子のダイナミックスの研究においても最も優れたプローブの一つである。このようなことから、中性子を利用した測定は、物質一般の原子構造とそのダイナミックスを研究する上で非常に重要な手段として利用されてきた。Fig. 4.1-1 に中性子利用によりカバーできる科学の分野を空間スケールと時間スケール（ダイナミックス）に対して示してみた。基礎物理から、物質科学、高分子、生命科学、産業利用、地球科学と非常に多くの研究分野をカバーするものである。

4．1．2 装置群の概要

Fig. 4.1.2-1 に中性子実験施設全体のレイアウトを示す。実験室の床面積は，120m×70m である。実験室には、23 台(23 ビームライン)の中性子実験装置・分光器が中性子源から放射状に配置される。これらの装置群は総じて前述の多岐にわたる研究分野をカバーすることとなる。現在計画されている分光器の内、物質の原子構造決定のための粉末回折計、単結晶の構造や局所的な構造の乱れを研究するための単結晶回折計、液体・非晶質の原子構造を研究するための全散乱装置、物質の界面や液体表面の原子構造を研究するための反射率計，セミマクロスコーピック・ナノ構造を研究するための小角散乱装置、また、原子や磁気モーメントのダイナミクスを研究する目的で、チョッパー型分光器、分子振動等を研究する結晶解析型分光器、非常に遅い揺動運動や緩和運動，トンネル運動等の微小なエネルギー変化を研究するためのスピンエコー分光器や結晶解析型分光器，また産業利用が大いに期待できる残留応力解析回折計や中性子ラジオグラフィー装置等が検討されてきた。このほか、中性子の干渉長の測定研究のための干渉計等も予定されている。その他、中性子を用いた基礎物理、宇宙物理研究用の装置も提案されている。実際建設される実験装置は、外部大学、海外からの提案も合わせ実験装置計画検討委員会で決定されることになる。

ここでは、J-PARC 物質生命科学実験施設・分光器サブグループが提案するプロジェクト提案装置についてその検討の経緯を含め概要をまとめる。

４．１．３　プロジェクト提案装置

次の 10 台をプロジェクト提案装置として位置づけている。

1)	生体関連物質結晶構造解析用中性子回折計(BIX-P1)	(汎用生物構造解析装置)
2)	SuperSirius 型粉末回折装置	(汎用粉末回折装置)
3)	超高分解能粉末回折計	(高強度粉末回折装置)
4)	残留応力回折装置	(残留応力回折装置)
5)	高強度汎用全散乱装置	(汎用全散乱装置)
6)	大強度型中性子小角散乱装置	(大強度型小角散乱装置)
7)	高性能試料水平型中性子反射率計	(水平型反射率計)
8)	高分解能型チョッパー分光器	(高分解能チョッパー型分光器)
9)	冷中性子ダブルチョッパー型分光器	(低エネルギー型分光器)
10)	生物用非弾性散乱装置 DYANA	(生物非弾性散乱装置)

Fig. 4.1.3-1 に上記 10 台のプロジェクト提案装置の配置とイメージ図を載せた。また、その一覧表を Table 4.1.3-1 に示した。更に、それらの概要については４．２節以降に示す。

４．１．４　装置検討の経緯

計画着手前

1999 年 10 月に本計画が原研-KEK の統合計画となり、計画推進体制の下に KEK、原研職員より成る中性子グループが組織され、中性子統括会議が結成された。その下に中性子分光器検討班が組織された。利用者の立場を重視した中性子分光器の検討を行うために、2000 年 5 月までに 10 の学会誌（物理学会、応用物理学会、高分子学会、化学と工業、放射光学会、結晶学会、機械学会、アイソトープニュース、金属学会、生物学会、応用磁気学会、原子力学会）に中性子分光器検討班員の募集を行い、6 月には約 100 名の応募があった。それを期に統合計画中性子グループ分光器検討班が組織された。分光器検討班は、さらに関連する装置群ごとに 10 の小班に分かれ検討を開始した。それらは、粉末回折計班、単結晶回折計班、全散乱装置班、チョッパー型分光器班、非チョッパー型分光器班、スピンエコー班、小角散乱装置班、反射率計班、生物装置予備検討班、ラジオグラフィー装置班である。装置検討の方針は、将来展開されるであろうサイエンスを念頭に置き、その研究を遂行するために要求される分光器がどのようなもので、さらにいかなる性能を持つべきであるか考慮するものであった。また、既存の技術のみならず、将来可能であろう技術、必要である技術開発についても念頭に置いた。集っていただいた方々は、それぞれ将来のサイエンスに展望、期待を持っている研究者であり、十分と言えないまでもサイエンスについての方向付けができたこと、また、中核をなす組織員のほとんどが統合計画以前より中性子分光器検討のグループ員であったこともあり、検討作業は急速に加速され、2000 年 10 月までにはその検討第一次案がまとめられた[1]。その後、検討作業はさらに詳細に進められ、その最終報告書がまとめられた[2]。結局 34 台が提案された。また、幾つかの分光器についての検討結果が別冊としてまとめられた[3、4、5]。

計画着手後

実験装置関連の予算措置を含まない状態で物質生命科学実験施設の建設が認められた。従って、ユーザーの利用を目的とする施設を完成させるために、早期に財政当局への予算折衝等の必要性が生じ、原研、KEK 双方がより具体的装置の構想、提案を持つことが非常に重要な時期となった。原子力行政からのミッションを持つ原研としての立場、原研内研究者の要望、また、共同利用研としての KEK の立場(利用者の立場)、KEK 職員の要望、さらに、要求予算規模の適正さを加味し、原研、KEK 双方をあわせ、前述 34 台の内から、10 台をプロジェクトチーム提案装置として位置付けることを確認した。

また、施設建設予算が獲得され建設期に入った 2001 年度には正式なプロジェクトチームである物質生命実験施設グループ分光器サブグループが編成され、上記 10 台の装置の検討を重点的に行うことになった。組織員は主に、原研、KEK の職員と大学等関係者である。(現在総勢 30 名、Table 4.1.4-1 を参照)

一方、この時期には 1MW パルス中性子源施設設計、実験室設計、実験室外道路・電力ライン設置等の設計、放射線管理についての諸事項(実験室放射線量、核燃料試料等の利用の有無、実験室管理の種類、インターロック)、実験装置における必要電力・冷却水、中央制御室への制御信号のやり取り、試料準備室等の場所の確保、等々の検討及び設計条件を示す必要があった。従って、設置される全実験装置の仮選定なしには施設の検討作業に支障が生じた。このような状況の中、分光器サブグループの責任で重要と思われる 23 台の実験装置を上記 34 台から仮選定する作業を行った。(Table 4.1.3-1 参照)

プロジェクトチーム提案装置の利用者との意見調整

上記に示したプロジェクト提案装置がプロジェクト関係者のみならず、利用者が実際にその必要性と設置の重要性を認識していることを確認するため、次の３つのワークショップを開催し、サイエンスを含んだ詳細検討がなされた。

それらは、

○　物質構造解析ワークショップ　(7 月 29-30 日、参加者数約 50 名)
(汎用生物単結晶回折計、超高分解能粉末回折装置、汎用粉末回折装置、残留応力測定装置、汎用全散乱装置)について議論。

○　ナノ構造解析ワークショップ　(8 月 2 日、参加者数約 40 名)
(水平型反射率計、汎用全散乱装置、大強度型小角散乱装置)について議論。

○　非弾性散乱ワークショップ　　(8 月 9 日、参加者数約 40 名)
(高分解能チョッパー型、低エネルギー型分光器、生物非弾性散乱装置)について議論。

であった。ワークショップの結果、プロジェクト提案装置は利用者の多くが望むものであることを確認できた。(3 つのワークショップの議事録は現在編纂中)

以上、このような中性子分光器の利用者からの要望の集約、検討の経緯を経て、ここに、示したプロジェクトチーム提案装置として提案することとなった。

参考文献

[1]「統合計画中性子分光器検討案（第一次）」KEK Internal 2000-18（全100ページ）

[2]「統合計画中性子分光器検討班報告書」KEK Report 2001-22（全218ページ）

[3]「大強度パルス中性子源における中性子スピンエコー分光器」KEK Report 2000-16

[4]「大強度パルス中性子源におけるチョッパー型分光器」KEK Report 2001-3

[5]「大強度パルス中性子源における全散乱装置」KEK Report 2001-16

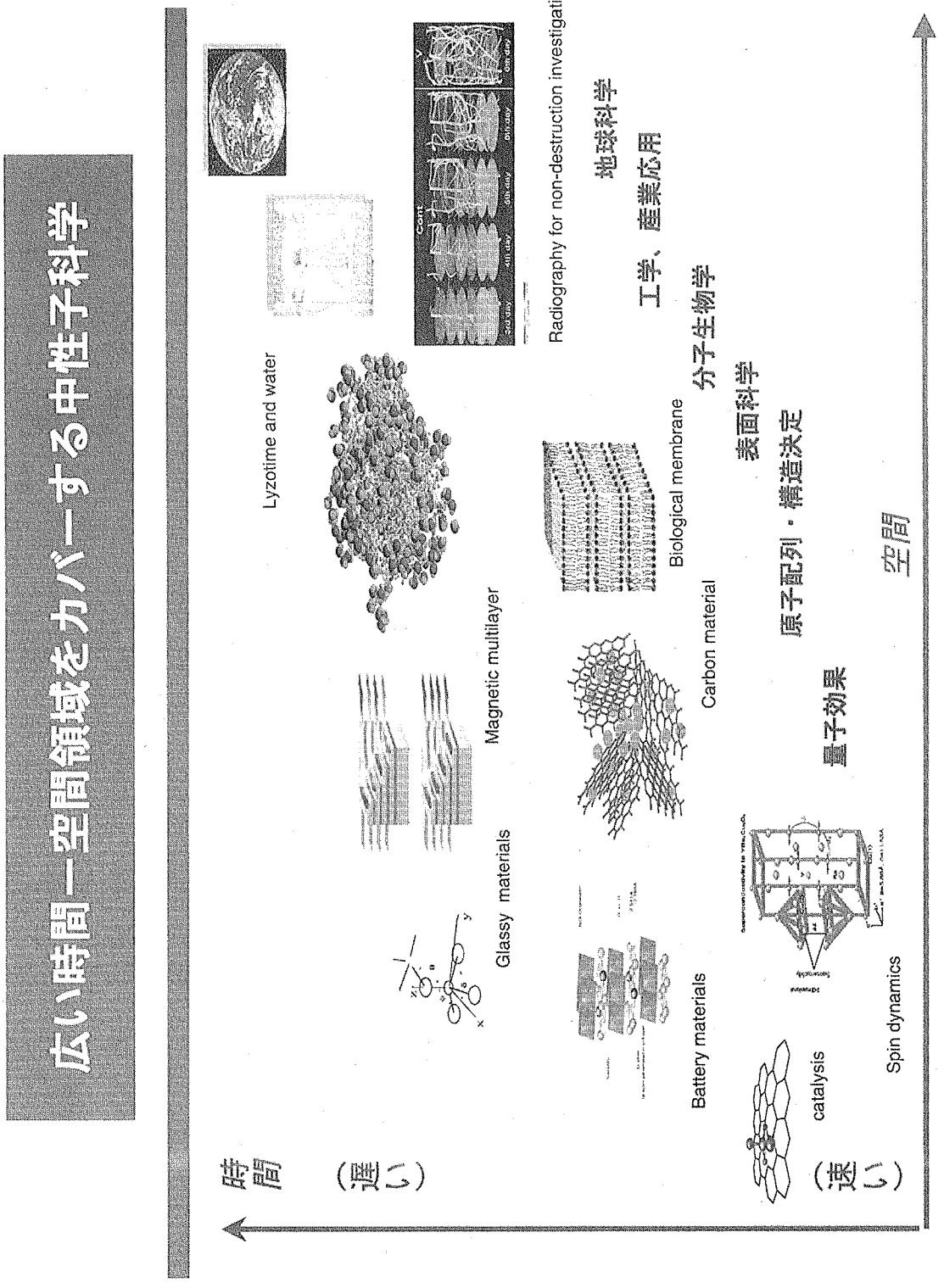


Fig.4.1-1 Time-space range covered by neutron science.

① 低エネルギー型分光器
② 高分解能背物構造解析装置
③ 汎用性物構造解析装置
④ 高分解能型小角散乱装置
⑤ テスト(基礎物理・γ-spectoroscopy)
⑥ ラジオグラフィー装置
⑦ 分子内励起分光器
⑧ 汎用粉末回折装置
⑨ 残留応力回折装置
⑩ 構造物性用単結晶回折装置
⑪ 生物用非弾性
⑫ 高分解能チョッパー型分光器
⑬ 二結晶型極小角散乱装置
⑭ 垂直型反射率計
⑮ 大強度型小角散乱装置
⑯ 水平型反射率計
⑰ スピンエコー
⑱ テスト(残留応力・粉末)
⑲ 超高分解能粉末回折装置
⑳ 逆転配置型低エネルギー分光器
21 汎用全散乱装置
22 液体用全散乱装置
23 大強度チョッパー型分光器

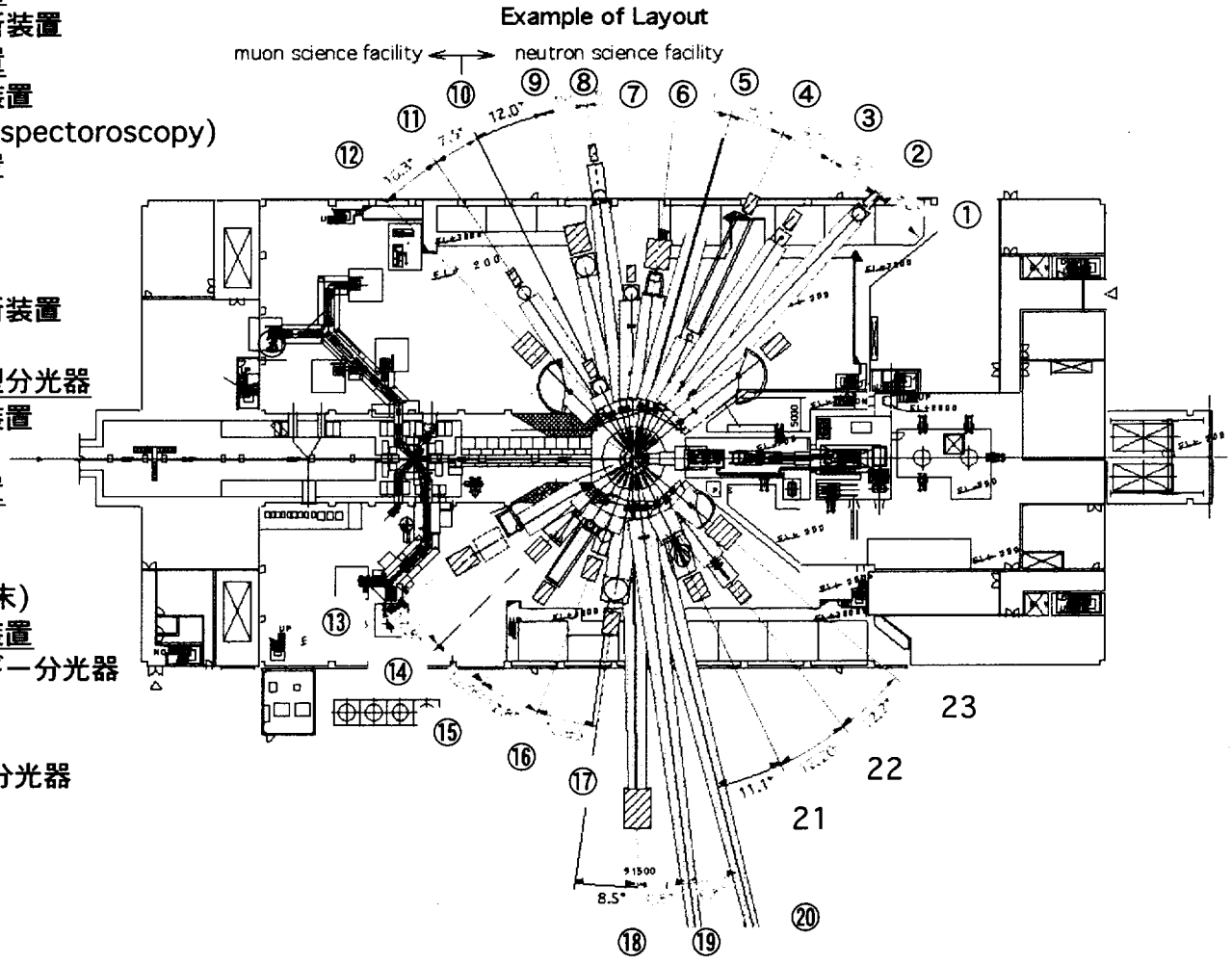


Fig.4.1.2-1 Preliminary layout of MLF facility.

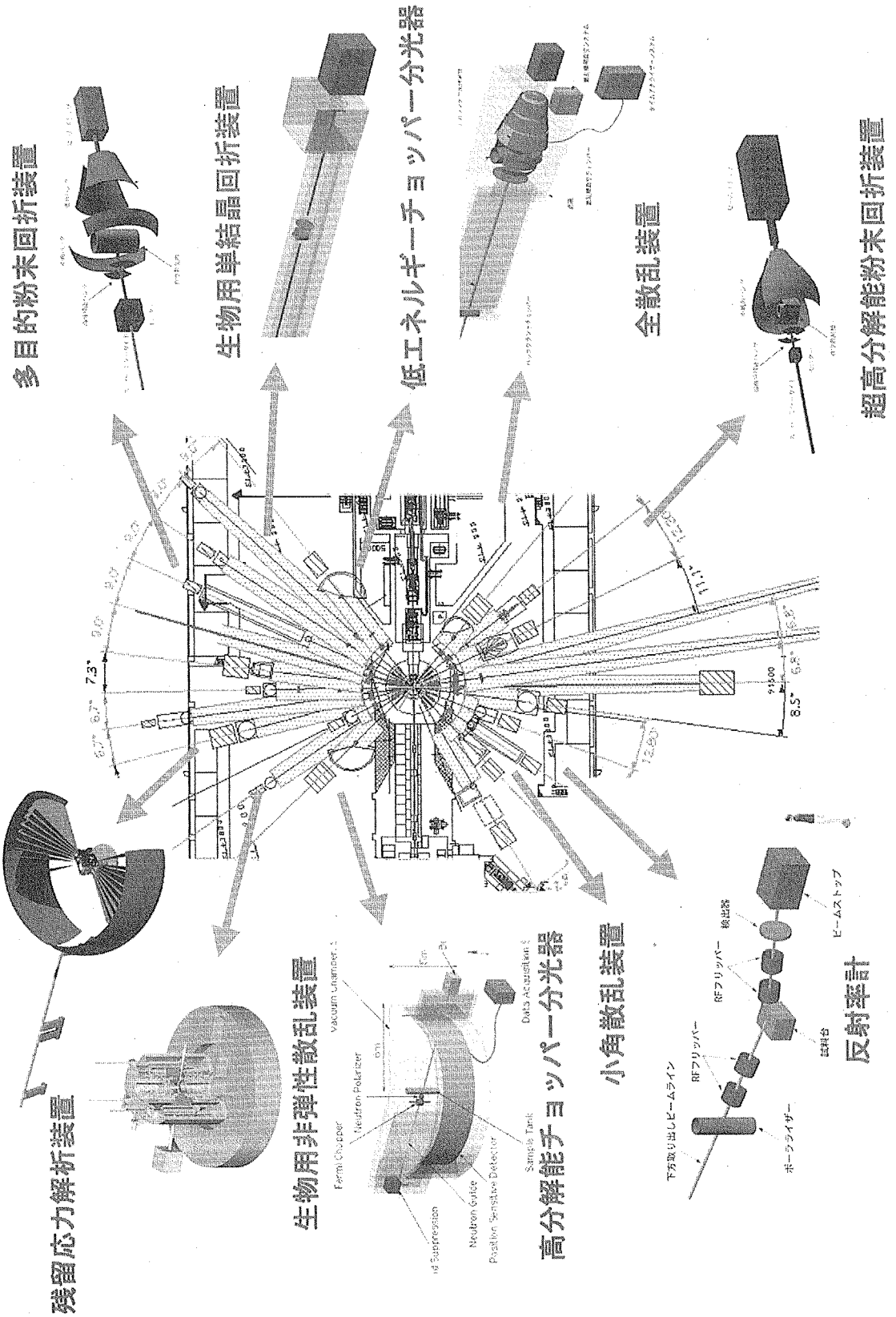


Fig.4.1.3-1 10 instruments proposed by project team.

Table 4.1.3-1 Proposed instruments.

(4)で提案された装置	分光器名	減速材	第１飛行距離 L1 (m)	仮配置の 23 台として選定	プロジェクトチーム提案１０台
高分解能粉末回折装置	HRPD40M	非結合ポイズン	30～40	○	○
高強度粉末回折装置	HIPD20M	非結合ポイズン（高分解能型）	20		
残留応力回折装置	RSD30M	非結合ポイズン（高分解能型）	30	○	○
高分解能残留回折装置	RSD50M	非結合ポイズン（高分解能型）	50	○（産業応用）	
超高分解能粉末回折装置	HRPD100M	非結合ポイズン（高分解能型）	70～100	○	○
単結晶構造解析装置	(bix-p1)	結合型液体水素	10	○	○
単結晶構造解析装置	(bix-p2)	結合型液体水素	20	○	
単結晶構造物性測定用回折計		非結合型水素	10	○	
全散乱装置	ALTO	非結合型水素	14	○	○
全散乱装置	FAST	非結合型水素	20	○	
高分解能型 SANS 装置	HR-SANS	結合型液体水素	20	○	
大強度 SANS 装置	HI-SANS	結合型液体水素	9	○	○
スピンエコー型 USANS 装置	SE-SANS	結合型液体水素	10～15		
ポンゼ・ハート型 SANS 装置	DC-SANS	結合型液体水素	10～20	○	
産業利用型 SANS 装置	AP-SANS	結合型液体水素	9		
垂直型反射率計	垂直型	結合型液体水素	10	○	○
水平型反射率計	水平型(偏極オプション)	結合型液体水素	11.5	○	
スピンエコー反射率計	(NSE-NR)	結合型液体水素	11.5		
チョッパー型分光器	高分解能型	非結合型水素	15	○	○
	大強度型	非結合型水素	15	○	
	ダブルディスクチョッパー	結合型液体水素	30	○	○
	ダブルフェルミチョッパー	結合型液体水素	15		
非チョッパー型分光器	原子運動測定分光器 ATOMS	結合型液体水素	15		
	逆運配置型結晶アナライザー高分解能 Back Scattering 分光器 HIPS	非結合型水素	85	○	
	汎用型逆転配置分光器 MADNES/Hi-FI	非結合型水素	20		
	高分解能非弾性中性子散乱分光器 MI6	非結合ポイズン	25-60m		
	汎用飛行時間焦点逆転配置分光器 SCAT	結合型液体水素	16.30.60	○	
	WHATS	結合型液体水素	30		
	大強度型結晶アナライザー分光器（ディスクチョッパー型）CANDI	非結合	50	生物用非弾性散乱装置と置き換えられる可能性がある	
スピンエコー	NSE(Mezei)	結合型液体水素	20	○	
	NSE(Mieze),	結合型液体水素	20		
	NSE(Mezei)MSS 型	結合型液体水素	20		
	NSE(Mezei)NRSE 型	結合型液体水素	20		
ラジオグラフィー	パルス中性子ラジオグラフィ	結合型液体水素	10 - 20	○	
特別に配慮したもの					
生物用非弾性	DYANA	非結合型水素	30	○	○
基礎物理	高エネルギー用		未定	○	
基礎物理	V CN	結合型液体水素		○ ポンゼ・ハート型 SANS と共用	

Table 4.1.4-1 Neutron instrumentation group.

大強度陽子加速器計画プロジェクトチーム

物質・生命科学実験施設グループ分光器サブグループの平成１５年度体制

プロジェクトチーム員：指名された原研職員・KEK 職員、研究嘱託、客員、協力研究員
協力チーム員：プロジェクトチームの作業に随時参加する方
アドバイザー：プロジェクトチームの作業に必要に応じて参加、支援，助言する方

平成 15 年 3 月作成

分光器ボード： 新井（主）、曽山（副）、相澤、松林、鈴木、田中、鈴谷、神山、伊藤、大友、鳥飼、柴田、目時、中島											
	結晶構造解析装置グループ				ナノ構造解析実験装置グループ			非弾性散乱装置グループ			イメージング装置予備検討グループ
	生物構造回折計チーム	残留応力解析装置チーム	大強度粉末回折計チーム	超高分解能粉末回折計チーム	小・中角散乱装置チーム	全散乱装置チーム	反射率計チーム	低エネルギーチョッパーチーム	高分解能チョッパーチーム	低エネルギー非弾性装置チーム	
プロジェクトチーム員	＊田中(原研)	＊盛合(原研)	＊神山(KEK)		＊鈴木(原研)	＊大友(KEK)	＊鳥飼(KEK)	中島(原研)	＊伊藤(KEK)	柴田(原研)	＊松林(原研)
	新村(原研)	森井(原研)	石井(原研)		相澤(原研)	鈴谷(原研)	曽山(原研)	松田(原研)		鬼柳（北大）	山岸(原研)
	栗原(原研)	皆川(原研業務委嘱)	石垣(室蘭)、及川(KEK)				武田(東北大)	目時(原研)		加美山（北大）	中村(原研)
	＊尾関(東工大)	鳥居(茨城大)				伊藤(KUR)	山崎(原研)	加倉井(原研)			片桐(原研)
	大原(KEK)	秋庭(名大)				亀田(山形大)	田崎(KUR)				
		秋田(武蔵工)									正岡(原研 PD)
		鈴木(茨城大)									坂佐井(原研)
協力チーム員									長壁(原研)		
									大山(東北大)	(筑紫(千葉工大))	
									梶本(お茶の水大)	(佐藤(物材研))	
									桑原(都立大)		
アドバイザー						福永(京大)	松岡(京大)			(金谷(京大))	
						社本(東北大)	高橋(群大)				
シミュレーション			及川(KEK)		相沢(原研、世話人)						
					田村(原研)						

４．２　生体関連物質結晶構造解析用中性子回折計(BIX-P1)

４．２．１　全体概要

1MW の大強度陽子加速器施設(J-PARC)におけるパルス中性子を用いた単結晶回折装置は、広い逆格子空間を、大きな検出器立体角と波長で、低バックグラウンド走査できるため、原研 3 号炉の生物用回折計(BIX-3 や BIX-3M)に比べて 50 倍以上の測定スピードが期待される。そこで、生命科学分野の国際競争や産業応用への展開を考慮すると、単位格子 135Å以下の試料結晶を対象とした生体高分子及び有機化合物単結晶構造解析用の回折計(BIX-P1)の建設が必要である。これは別途設置を考えている単位格子 350Å以下の生体高分子結晶をターゲットとした高分解能回折計(BIX-P2)と対をなすものである。

４．２．２　研究概要

タンパク質等の生体高分子中の水素結合・水和構造が、立体構造の安定性、反応性に大きく関与していることが明らかとなり、タンパク質分子中の原子数の約半分を占める全水素原子の位置情報に関する需要が急速に増大しつつある。これを満足させる唯一の実験手法が中性子回折実験であり、ポストゲノムにおける役割は大きい。最近の研究開発によると、原研 3 号炉における生物用回折計(BIX-3 及び BIX-3M)の成功により、タンパク質内のアルファヘリックス中の水素結合の詳細、H/D 交換、水和構造ネットワーク、水和構造ダイナミクス、機能性水素原子等を中性子回折法で直接観察し、大変興味ある結果が提出され、それが実証されてきた。これは非常にユニークなものであり、この分野を世界的にリードしている。しかしながら、現状の生命科学分野における中性子構造生物学の需要は増すばかりであり、国際競争や産業応用への展開を考慮すると、十分な性能とはいえない。更なる発展を目指して、1MW 大強度陽子加速器施設(J-PARC)におけるパルス中性子を用いた高性能単結晶回折装置の建設が必要となる。これにより、より短時間に、より小さい結晶での実験が可能となり、適用できる試料の幅が広まることが期待される。特に創薬、生命科学理解に重要な多くのタンパク質の水素、水和構造を観測し、データベース化することで、タンパク質立体構造構築原理、分子認識、機能解析に最も重要な貢献をし、産業応用としての創薬その他に結びつけられる可能性が高い。

また、生体高分子結晶の結晶成長も、中性子構造生物学を推進していく上で重要な研究テーマであり、これも同時に取り組んでいく。

一方、有機化合物・高分子や金属錯体などにおいて、最近の研究により、結晶中での動的な構造解析によって化学反応の機構が解明されるようになった。その多くは X 線回折により非水素原子の動きを追跡するものであったが、現在は、特に反応の前後の水素原子の移動を中性子回折により明らかにすることにより、水素原子の移動を伴う化学反応の機構解明への道が開かれた。パルス中性子を利用することによりさらにこの研究を推し進め、反応に伴う水素原子の動きをリアルタイムかつ実空間で追跡することが可能となり、水素原子の関与する化学反応(化学反応のほとんど全てがこの範疇に入るといっても過言ではない)の機構が解明されることが期待される。また、近年盛んに合成されている超分子相互作用を利用したナノメーターサイズの分子の構築や、様々な物性変化を伴う結晶の相変化などにおいては、水素結合を主とする分子間の相互作用が決定的な役割を果たしている。このような系は、生体物質のモデル化合物として、また、次世代の

機能性有機材料として注目されている。J-PARC における強力なパルス中性子の利用でこれらの化合物について小さな単結晶でのハイスループットな解析を可能にすることにより、さらに高い機能を有する物質の設計に寄与することが期待される。

建設が完了した当該装置によって、1MW フルパワー時、年平均 20 個程度の生体高分子の構造決定が可能となる。これまで原研 3 号炉で解析が終了し、データベース化されたものも含めて、タンパク質立体構造構築原理、分子認識、機能解析等の生命科学基礎研究に着手し、一方で創薬等の特定の生体高分子の機能解析も可能となるであろう。これは、別途設置を考えている生体高分子用高分解能回折計(BIX-P2)の完成及び稼働によってさらに加速されるものと期待される。

４．２．３　仕様概略

Table 4.2.3-1 Specification of BIX-P1

分光器名	生体関連物質結晶構造解析用中性子回折計(BIX-P1)
減速材	Coupled H_2
L1(m)	40
L2(m)	0.3(注)
ガイド管	3Qc 集光
実験装置配置(水平、垂直等)	水平
ビームライン占有角度	4.3 deg
最小面間隔反射	0.7Å以下
最大単位格子長	135Å
所要減速材面積(a × b mm^2)	100×100
試料大きさ(a × b mm^2)	最大 3×3、標準 0.5×0.5
バンド幅(Å)	0.7 - 4
検出器空間分解能(a × b mm^2)	1×1 以下(注)
検出器計数率 (n/μsec/pulse/cm^2)	1mm^3 有機化合物の最大：0.15 0.1mm^3 生体高分子の標準：1.9×10^{-5}
T0 チョッパ、テールカッタ	双方とも有
その他必要なデバイス	真空ポンプ、低温窒素吹付装置、クライオミニ等

(注)検出器空間分解能が 1mm 以下にならない時は、L2 がやや大きくなり、検出器立体角が小さくなる(予算の関係)可能性もある。

4．2．4　装置模式図

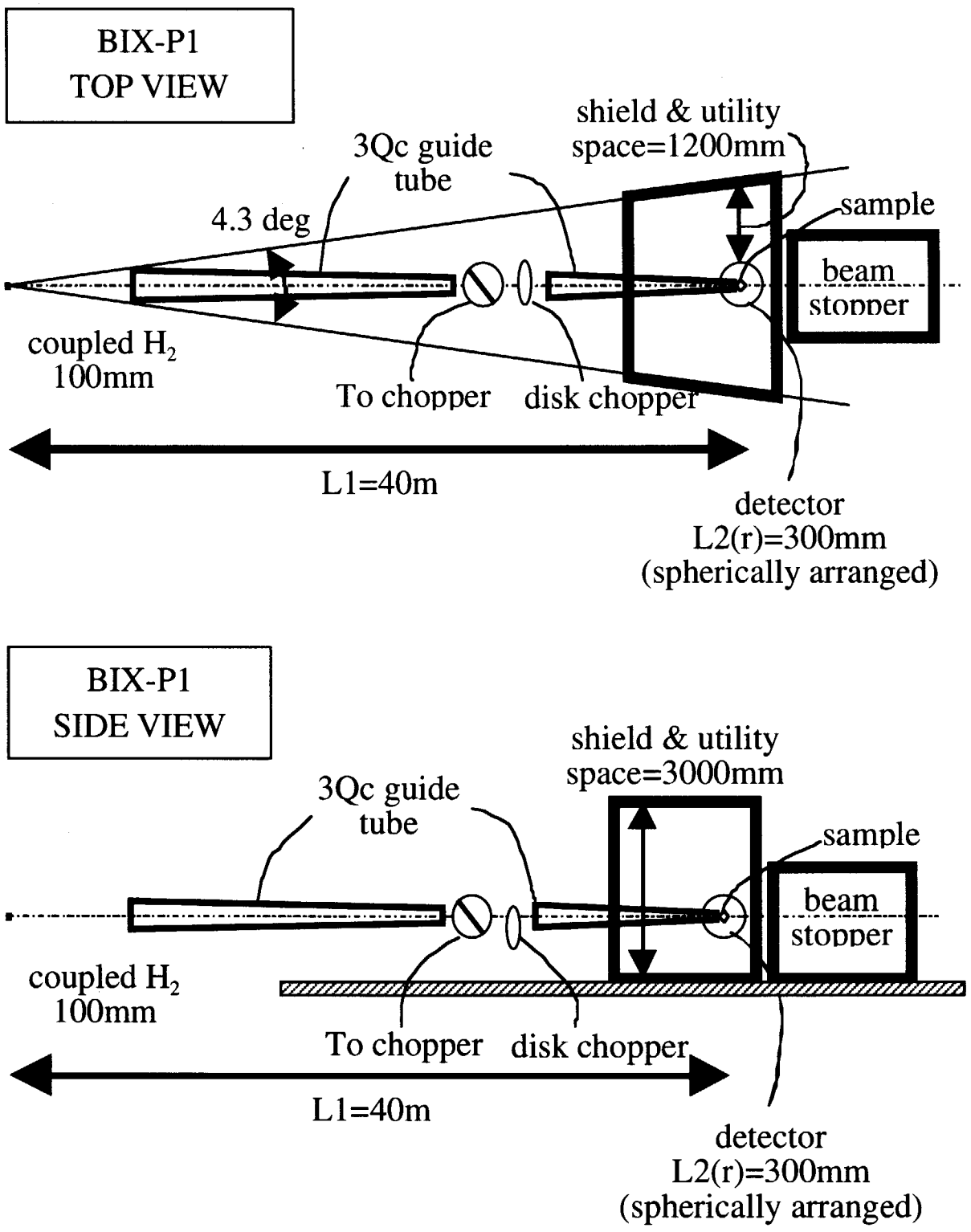


Fig.4.2.4-1 Schematic layout of BIX-P1.

４．３　多目的高分解能粉末中性子回折装置(Super Sirius Diffractometer)

４．３．１　全体概要

粉末中性子回折法は、酸化物超伝導ブームを契機として急速な発展を遂げ、結晶構造解析の標準的な手段として認知されるようになった。現在世界中で 60 台程度の粉末中性子回折装置が稼働していて利用者の要求に答えている。これほど数が多い中性子の装置は他にない。

一方、近年、実験室 X 線装置の高精度化が進み、多くの研究者がその恩恵に浴している。実験室 X 線装置は国内だけで年間数十台は販売されている。利用者の多くが、セメント、リチウム電池、燃料電池材料などを研究分野としているが、これらの材料は軽元素を含むため、粉末 X 線回折では十分な情報を取り出せず苦慮しているのが現状である。彼らは潜在的な粉末中性子回折の利用者であるにも関わらず、実験室 X 線のように、手軽に(中性子の知識を要求されずに)、迅速に(試料をつくってからデータを受け取るまでの時間)測定をすることができないという障害に直面している。したがって、化学分析のような身近な評価手段として中性子利用のシステムを確立させれば、材料開発・物質探索へのインパクトは非常に大きくなる。

本研究では、多目的高分解能粉末回折装置 (Super Sirius)を建設し、

A)　Super Sirius を中核とした新規材料構造評価・開発ネットワークを作り上げ、

B)　それを用いることで初めて実現できる付加価値の高い材料を創成する。その手法を公開することで我が国の材料研究開発能力を飛躍的に高めることに貢献する。

本研究では、A)をあえて研究内容・開発項目として捉えることに特徴がある。A)は、B)の実現に不可欠であると同時に、Super Sirius を我が国の材料研究開発能力を飛躍的に高めるツールとして提供するためのシステムである。

A)を実現するためには以下の開発を行う。

(1)　データベースや多種多様な解析を行うためのソフトウェア(リートベルト解析、未知構造解析、マキシマム・エントロピー解析、プロファイル解析、局所構造解析、ナノ構造解析、ウェーブレット変換、自己組織化マップ、第一原理計算などのシミュレーション)をフィルタ(**ファンクション**)のように扱えるようにし、ファンクションを解析の流れ(**プロシージャ**)にそってフローチャート上で自由に設計できること、複数のプロシージャの実行を自動化し(**プロジェクト**)、プロジェクトの実行結果を視覚化できること(構造パラメータの鳥瞰図など)。データベースとの自動的リンクを可能とすること。これらをソフトウェア・パッケージとしてもつこと。

(2)　コンビナトリアル構造解析を行う実験ステージを実現すること。

(3)　年間数万個以上となる試料の受付システム、試料管理システム、ネットワーク上での実験管理システム、放射化管理システムの実現

(4)　我が国の産学官のポテンシャルを結集する枠組み(コラボラトリ)と中性子利用体制の確立(研究・開発支援センター)。

４．３．２　研究内容

B)として本研究で遂行するのは、以下の課題である。

(1) イオン伝導の視覚化と新規イオン伝導体の開発

酸化物イオン、リチウム・イオン、プロトン伝導体中のイオン伝導をマキシマム・エントロピー法等で視覚化する。機能発現機構を解明するために、イオン伝導のシミュレーションを、第一原理計算、MD 等を用いて行う。数日程度で新規材料の開発可能なコンビナトリアル構造解析/材料創成システムを構築し、新しいイオン伝導体を探索する(数千～一万のライブラリの中から最適な構造条件を選び出す)。

(2) メモリ材料の微少構造変化と新規メモリ材料の開発

誘電体メモリ、光メモリ、磁性体メモリの微小構造変化を in situ 実験により調べると同時に、シミュレーションを実施、比較する。コンビナトリアル構造解析/材料創成システムを活用し、メモリとして最適な構造条件を探索する。例えば、不揮発性強誘電体メモリでは、結晶に反転対称がなく、陰イオンと陽イオンの重心が大きくずれることが分極ベクトルを作り出し（構造パラメータから分極ベクトルを計算)、陰イオンと陽イオンのつくる多面体の回転などが分極ベクトルやその温度変化に関わっており、その観点で最適構造をコンビナトリアル手法で探索する。

(3) クリーンテクノロジー材料

クリーンテクノロジー材料では、水素、酸素、リチウムなどの軽元素がキーエレメントであるため、その機能と構造との関連の研究、構造情報を元にした新規材料の開発には中性子回折がもっとも適している。リチウム・イオン電池では、正極・負極のそれぞれの材料の組み合わせや、電解質との組み合わせで、性能向上の方策が異なる。多数の実験データの蓄積と、*in situ* 実験や *ex situ* 実験(充放電を繰り返した実用電池を解体してパーツごとに構造を調べる)を実施する。その上で最適構造をコンビナトリアル手法で探索する。1000℃付近で動作する固体燃料電池の構成材料は例えば、陽極(Air electrode) : $(La,Sr)MnO_3$、$(La,Ca)MnO_3$、陰極(Fuel electrode) : Ni/YSZ Cermet、電解質(Electrolyte) : $(ZrO_2)_{1-y}(Y_2O_3)_y$、インターコネクト : $(La,Ca)CrO_3$、$(La,Sr)CrO_3$ などである。高イオン伝導状態における構造解析が不十分であるために、未解明な点が多い。電池として作動しているときの各構成材料の熱膨張係数や材料の反応を、高温 *in situ* 粉末回折実験(酸化、あるいは還元状態で)調べる。

(4) その他の研究

ゼオライトなどの高性能触媒、化学反応、電気化学反応、ガラス性結晶の構造緩和など、磁性研究(強相関系、アクチナイド系等)、環境調和材料(グリーンマテリアル)などの研究を行う。

４．３．３　建設する実験装置の概要

Super-Sirius は KENS の Sirius、ISIS の GEM の良い点を追及した。その点では装置としての革新性は低いが、確立した装置をベースに開発を進める強みがある。強度が強いことを背景に、産学官のポテンシャルを結集する枠組みと中性子利用体制を確立する点にもっとも革新性がある。

Super Sirius は以下の性能を持つ。

(1) 膨大な数の試料(年間数万個)を受け入れるシステムをもつ。そのため、通常測定の試料量は実験室 X 線レベル(0.5cc)とする。5 分以内の測定時間を実現する。

(2) 最高分解能レベル $\Delta d/d = 0.1$ %(一定値)を $0.15 < d\,(\text{Å}) < 4$ で実現、

(3) $4 < d\,(\text{Å}) < 60$ では、上記の領域での測定と強度の点でマッチングをとりつつ、分解能は緩やかに変化する最小限の値を実現する

(4) ガイド管の選択(脱着可能部分)や検出領域(d に対する波長範囲・散乱角範囲)の選択、周波数を選択することにより、上記のそれぞれで高分解能モードと中分解能モードを設定できる。

(5) 広い温度範囲：極低温(数百 mK)から超高温(3000K)まで、低温・ガス圧 4K・1GPa、強磁場下 10T を標準的に備え、各種その場観察実験(化学反応、各種ガス雰囲気下、電気化学反応、触媒反応など)に対応できる。

(6) コンビナトリアル構造解析を行う実験ステージを持つ。

(7) データベースやリートベルト解析などの多様なソフトウェアから構成されるファンクションを組み合わせてプロシージャを自由に設計できる、自動化した複数のプロシージャの実行をプロジェクトとして管理、プロジェクトはその実行結果を視覚化できる。データベースとの自動的リンクを可能とする。これらをソフトウェア・パッケージとしてもつ。

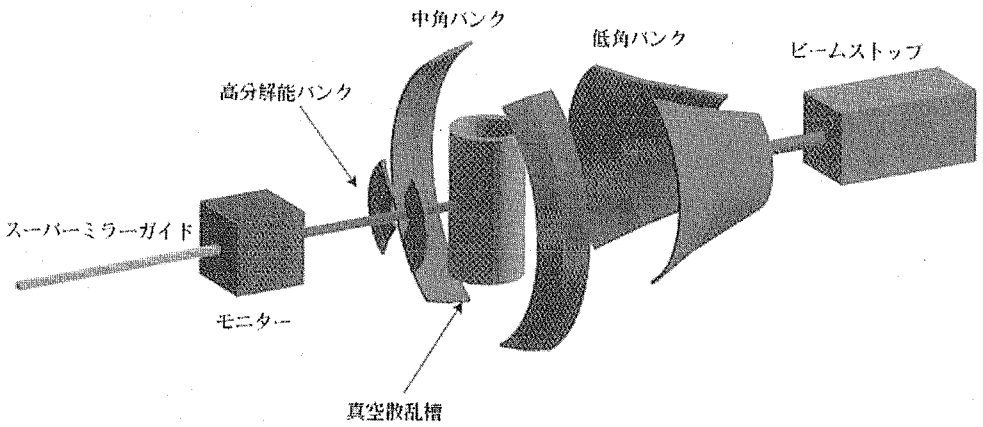
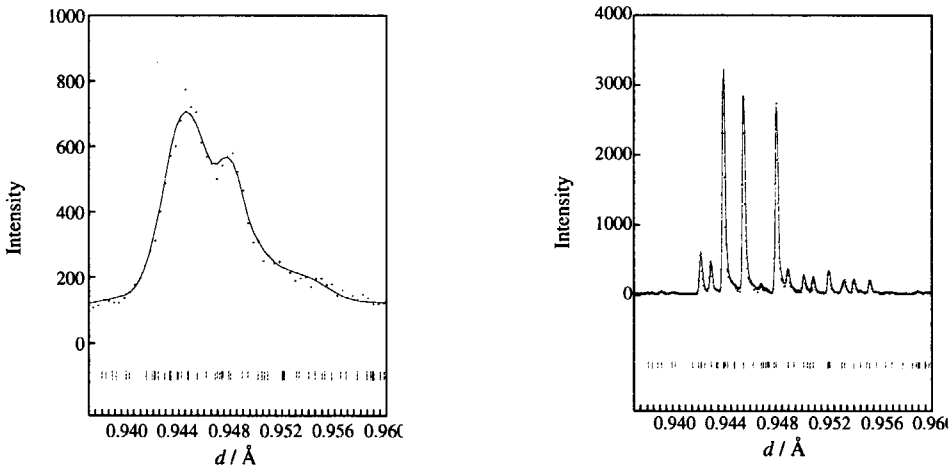


Fig.4.3.3-1 3D view of Super Sirius Diffractometer.

４．４　超高分解能粉末中性子回折装置(Super High Resolution Powder Diffractometer)

４．４．１　全体概要

過去 5 年における APS、ESRF、Spring-8 等の大型放射光施設建設ラッシュ以来、粉末 X 線回折は高輝度・短波長 X 線の実現に加え、マキシマム・エントロピー法などの高精度構造解析手法に支えられて、大きく進展してきた。放射光では、高い統計精度測定と極く少量試料でよいため、新規に開発された材料をすぐに測定・解析できる体制が整いつつある。高精度構造解析手法は、粉末中性子回折にも適用できるものであるが、現在の中性子強度で実現できる統計精度と分解能では、その威力が半減してしまい急速な進展は実現していない。このような制約は近未来に出現する中性子源によりまったく消えさってしまうだろう。日本の J-PARC を初め、英国 ISIS のアップグレード、米国 SNS の実現により粉末中性子回折は次の時代に突入しようとしており、高精度構造解析手法を受け止めるだけの統計精度と分解能が実現できるようになる。その結果、粉末中性子回折法は比類なき飛躍が達成されるだろう。そのような時代の中で、世界をリードするために、本研究は、**1)** 放射光常設粉末X線の最高レベルの分解能を、強度を犠牲にせずに中性子で実現させ、J-PARC 実現直後、**世界最高分解能を 5-10 年確保**すること、**2)** 中性子ならではの高精度構造解析を支える手法を開発することで、**A) 最新材料開発技術により生み出される、複合材料、超分子や医薬品などの複雑な構造や、ナノ構造の階層構造**などを高精度で求めること、及び、**B) 僅かな構造歪み**を精度良くとらえ、新しい構造物性を切り開くことを目指す。また、**C) 強度・分解能の点でX線との相補性を真に実現**させ、両者の組み合わせで、電子と格子に関わる新しい構造解析法を開拓し、実用化することを目指す。



Δd / d(Vega) ~ 0.3 %　　Δd / d (J-PARC)~ 0.03 %

Fig.4.4.1-1 Rietveld fitting of Vega data (left) and Simulated pattern with McStas together with fitting pattern (right). Tick marks indicate Bragg peak positions.

４．４．２　研究内容

本研究で遂行するのは、以下の課題である。

(1)　微少構造歪みの検出と新しい構造物性

従来ディラトメータで行われてきた定性的な構造歪み研究がある。精度は10^{-6}から10^{-7}であり、従来の粉末構造解析はまったく手が出ない世界だった。ディラトメータから構造パラメータをとりだすことはできないが、分解能を上げることで、わずかな歪みからも構造パラメータが抽出でき、定量的で、新しい構造物性に展開できる。また、構造物性の理解のために、相転移は長い間多くの研究者の研究対象であったが、材料の特性が相転移点付近で大きく変化することが多いため、高温超伝導体、新しい超イオン導電体などの新材料が発見されるたびに相転移と材料特性・物性の関係が取り上げられてきた。粉末法による構造解析は相転移研究で一定の役割を演じてきたが、相転移点付近で精度が下がることが多く、構造と物性の相関を明らかにする上で深刻な問題となってきた。これはブラッグ反射の重なりが変化するためで、本装置が開発されれば従来の分解能を数倍向上させて相転移点付近の構造が解明しやすくなる。構造物性の理解のために相転移は長い間多くの研究者の研究対象である。

(2) 複合材料、高度階層化したナノ構造体の構造解析

実用材料では機能強化のためにしばしば複合材料が用いられる。複合材料の機能は、単体の性能の組み合わせではなく、新しい機能が付け加わっており、その構造解析は重要である。複合材料では、構成する各相の結晶構造を評価することが大切で、それにより、実用材料の開発を従来の経験中心のテクノロジから予測に基づくテクノロジに繋がる。新しいサイエンスが芽生える可能性もある。しかしながら多相試料の粉末回折ピークは重なりがひどいために極端に精度が低くなるため、高分解能X線回折法や電子顕微鏡法が発展してきた。しかし、これらの手法は破壊検査であり表面状態しかわからないため、材料の性質を理解したとは言えない場合が多々ある。このような深刻な問題点を解決して複合材料における結晶構造を精度良く求めることが、本装置の開発により可能となる。

(3) 低対称・巨大ユニットセル

放射光粉末X線回折は、ヨーロッパやアメリカを中心として、医薬品などの低分子有機化合物の未知構造解析手段として急速に利用されてきている。それを支える手法開発も盛んに行われ、最近3年の急速な発展に促されて、粉末法を用いた医薬品国際会議が毎年開かれるようになった。その最初の目的は結晶多形を見分けることにあり、水素を除く骨格構造を求める。しかし、水素の位置も含めて構造決定すること不可能と認識されている。強度・分解能の点でX線との相補性を真に実現させ、水素の位置も含めて全構造決定を目指す。

4．4．3 建設する実験装置の概要

(1) 世界最高分解能$\Delta d/d$ = 0.03%である。モデレータの構造も最適化したことで、SNS や ISIS にない、高分解能であること。ISIS-HRPD と同じ飛行距離(100m)にも関わらず、分解能で1.7倍良く、利用可能波長が2倍広い(加速器周期が ISIS の 50Hz に対し、25Hz である)。

(2) SNS に設置される第 3 世代型高分解能粉末回折装置 POWGEN3 では、最高分解能範囲が狭い(最高分解能 0.09%、面間隔 d で1 Å)。これを回避するために本装置の検出器バンクを二つに分け、分解能 0.03%を実現する面間隔領域を広く確保($0.5 \leq d(\text{Å}) \leq 4$)できた。$4 < d(\text{Å}) < 45$ では、上記の領域と連続的に繋げるとともに、強度のマッチングをとりつつも、POWGEN3 の特徴である緩やかに変化する最高の分解能を実現する。

(3) 超高分解能測定において現行 ISIS-HRPD に比べ数十倍の短時間測定が可能。0.5cc を 1.5 時間で測定できる。

(4) 高精度構造解析を支えるソフトウェアを開発することで、超高分解能を生かした未知構造解析、高精度構造解析による複雑な構造変化を抽出することができ、それらを視覚的に表示することで、本質的で僅かな構造変化に集中した解析が容易かつ迅速に実現できること。

(5) 極限環境下での微弱な構造変化を超高分解能で測定できる：極低温（数百 mK）から超高温(3000K)まで。

世界最高分解能の達成と 5-10 年間世界一を保てる理由

本装置は、世界一の高分解能を狙った装置であるため、ビーム強度が不足しても成果を上げることができるという特徴がある。しかも TOF では分解能を上げても強度の劣化が少ないし、J-PARC では 25Hz なので海外の競合する施設に比べ L1 を長くしても一度に使える波長範囲が 2 倍ある。その意味で、弱いビームが供給される最初の数年に確実に成果を上げることが可能な、数少ない装置のひとつである。J-PARC での実験が開始される直後から物質・生命科学実験施設は厳しい評価にさらされる。我々は、ビームが供給されはじめる最初の頃から、継続的に重要な成果を出すことが大変重要と考えている。この装置は、ビーム供給開始とともにすぐに世界一のデータと結果を出せることを強く主張したい。さらに、ISIS の第 2 ターゲット・ステーションが実現されると、繰り返し周波数は低いため、そこに同種の装置を建設する可能性がある。しかし、そこではせいぜい 100μアンペアクラスであり、本装置の強度は得にくいため、高度な技術により合成される最先端の少量試料を用いた最先端の研究にはなりにくい。一方、SNS の POWGEN3 は分解能が低く本装置の分解能性能には及ばない。したがって、SNS が低い繰り返し周波数を実現して高分解能粉末回折装置を実現するか、ヨーロッパ計画 ESS が実現するまで、本装置の優位性を保てる。

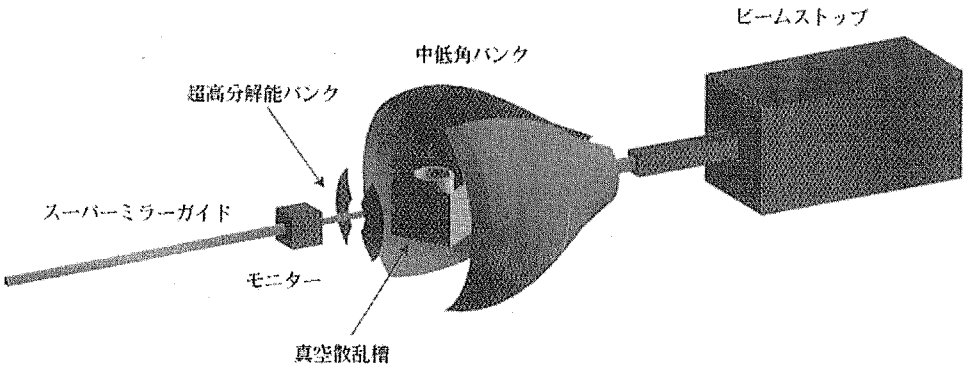


Fig.4.4.3-1 3D view of Super-High-Resolution Powder Diffractometer.

４．５　残留応力解析用パルス中性子回折装置

４．５．１　全体概要

中性子回折法による構造材料の残留応力解析は、中性子の高い物質侵入能力を利用した非破壊内部ひずみ測定法であり、X 線や放射光を利用する同種の回折法による手法では部材のごく表面(数 10mm)の情報しか得られないが、中性子法は数 cm の位置のひずみを測定することができ、実機スケールレベルでの試験検査を実現し、広く現代社会の信頼性確保や安全性確保に寄与する有力な方法である。現在では、国内外の主要な中性子散乱実験施設に残留応力解析専用の中性子回折装置が設置されており、最近では産業界の利用も活発化している。また、このような動向を反映して、1996 年から、先進国間の共同の先端材料と標準化にかかわるベルサイユプロジェクトにおいて検討が行われ、本法は国際標準化の段階に達している。

J-PARC プロジェクトにおける本装置は、大強度のパルス中性子を利用できることを生かしている。すなわち、従来の角度分散型装置では数時間から数日を要した $1mm^3$ ゲージボリュームの三次元ひずみ測定を、角度分散型装置と同程度あるいはそれ以下のひずみ精度 10^{-4}~10^{-5} で、かつ、10 分から 1 時間程度の極めて短時間で実施が可能である。

４．５．２　研究内容の概要

中性子回折法の特徴は材料内部のひずみを非破壊で測定して残留応力を導出できることである。この手法を利用して材料工学、機械工学分野において、機械強度の観点から材料の健全性診断、信頼性診断や予寿命予測に関する研究を行い、それを応用して産業界を始めとする社会全般へ貢献することを主目的とする。具体的な研究項目の一例を以下に列記する。

(1) 構造用材料の開発・信頼性向上に関する研究

試料全体のバルク平均情報を得る目的では、測定環境も外力、温度、磁場などを変化させながらその場測定する試みが増えている。多結晶体の塑性変形に伴う粒間応力、転位密度、セルサイズの変化、配向性(集合組織)の発達など、その場測定は他の手法ではできなかった実験である。解像度の高い測定とプロファイル解析の進歩によって、従来の理論的推定が検証でき、新しい材料開発及び材料製造プロセス開発の促進が期待される。その他、溶接部の残留応力、成膜やショットピーニング材の材料表面の残留応力変化、共析鋼伸線ワイヤの残留応力、変形中の構成相の応力分配、鋼の疲労試験中のその場測定、疲労による粒間応力の発生の観察等も本装置の研究課題である。

(2) 機能材料の開発に関する研究

形状記憶材料は結晶構造の異なる相の生成と消滅・結晶方位に関するバリアント変化が基本なので中性子回折の利用に適しており、Ni-Ti、Cu 系合金、Fe 系合金、Ni-Mn-Ga 系のいずれについても、応力誘起変態と逆変態、応力誘起バリアント変化や磁区移動などがその場測定され、優先生成バリアントや内部応力発生の情報を基に、応力・ひずみ・温度・磁場の連成構成式、そして形状記憶合金を利用する機械設計に寄与している。新しい形状記憶材料探索にも、その発現原理の研究にも威力を発揮すると期待される。

(3) 金属基複合材料、セラミック材料の開発及び信頼性、寿命評価研究

複合材は異種材料を複合化することにより構成材の特性が加算され、互いの材料の弱点を補う

相互作用を持つ新たな機能材料でもある。金属は高分子材料やセラミックス材料に比べて高い塑性変形能力、じん性、熱伝導性、電気伝導性を有している。この特徴を基に新たな構造材料、機能材料として金属基複合材料の研究を行う。例えば、超伝導線材にあっても構造的に一種の複合材料と言える。超伝導材によるコイルは、高速鉄道としてのリニアモーター車両に使用され出している。超伝導臨界温度と常温との繰り返しにより線材内部に異種金属相互の熱膨張相異による残留応力が発生し、寿命、安全性に変化をもたらすことが予想される。そのため、非破壊による内部応力測定を行い評価を行う。新たな複合材としては、高温タービン翼材としてセラミックスを基材とした複合材が開発されている。異種材料間の内部応力を温度変化させながら相関応力を求めることにより信頼性、安全性を評価することができる。

(4) 医療材料、電子材料の安全性、信頼性評価研究

多くの医療材料は、体内に埋め込まれて使用されるため、材料物性的、医学的、生物学的に安定した材料でなければならない。そのため、塑性変形、クリープ、材料疲労などが発生しない製作技術を開発することが重要である。材料内部までの中性子回折による格子面間隔測定を行い、材料ひずみを正確に測定し、その結果を基に材料選択の改善、製作工程の改善を行うとともに、寿命予測を行い十分な安全性評価を行う。電子材料では多くの種類の目的に伴う製法があるが、最も産業的に重要なことは、量産される電子材料の信頼性であり、製造工程での不良製品の歩留まり率がゼロになることが大きな経済効果に繋がる。多くの電子材料メーカーは、IC 内部の回路配線にアルミ材薄膜を用いていたが、熱膨張による剥離断線の問題解消のため銅材薄膜に変わろうとしている。これ等の製作技術開発のために基材と薄膜相互間の応力測定を行い、製品評価を行うことができる。

4．5．3　建設する装置の主な仕様

以下に本装置の特徴的なスペックを述べ、最後にスペック一覧と装置概念図を示す。

(1) 分解能

図の通り、検出器バンクは、両翼に低角(60°)、中角(90°)、高角(150°)の 3 バンクを連続的に配置する。最も需要が多い三次元ひずみ測定では中角バンクが主に用いられる。また、試料直前に 2~4m の可換ガイド管・ストレートコリメータ(運転中に脱着可能)を設けることにより、高分解モードあるいは高強度モードなどの測定モードを選択できる。例えば 16m スーパーミラー管、3m の可換ガイド管・ストレートコリメーター、直径 5mm の試料及び検出器の場合、分解能Δd/d は、低角バンクの高分解モードで 0.35%(高強度モードでは 0.5%)、高角バンクで 0.15%(0.17%)、最も多用する中角バンクで 0.20%(0.25%)である。

(2) 空間分解能

中性子残留応力測定では、部材の表面あるいは内部のある特定の観測領域を規定して、その部分についてのひずみを捉える。この規定された領域をゲージボリュームといい、角度分散型装置では入反射中性子の双方の進路上にスリットを置いて観測領域を規定する手法をとる。本装置では、この従来の手法によらず、飛行時間型装置である特長を踏まえ、扇形のラジアルコリメーターを製作し設置する。こうすることで、例えば三次元ひずみ測定において、水平面内角度 90°から±φ度分視野角を増やして主軸方向から角度的にずれたひずみ成分からの反射も取り入れれば、

我々の目標に置く分解能の許容範囲内で測定が可能と同時に計数統計精度のよいデータを収集することができる。本装置においては、1mm 角サイズを実用的な最小のコリメータとすることを目指す。

(3) 測定時間

大型構造物の測定や、生産現場に直結し測定から結果を得るまでのスピードが重要視される産業利用においては、測定時間は速ければ速いほど良いことは容易に想像される。現在、原研 RESA で試料内の一箇所の三方向主軸のひずみ測定を一つの hkl について $1mm^3$ ゲージボリュームで行うには最低 5 時間程度を要する。本装置ではこれを 1 時間程度以下に短縮する。

同時にスピードアップのプロセスとして上記のことと直接リンクするソフト及びハードウェアの開発整備も実施する。特に測定結果を逐次自動解析して視覚化するための応力・ひずみマッピング技術の開発が重要と捉えて実現する。

(4) 大型試料対応

米国ロスアラモス研究所の中性子散乱実験施設 LANSCE の SMARTS 分光器では 1500kgw 程度までの大型被測定物(エンジン本体等の機械あるいは構造物の一部等)を乗せることが可能なゴニオメータが開発されている。本装置においても、それと同等程度の大型ゴニオメータを設置する。

(5) 試料環境機器

工業材料が使用される環境は、多種多様である。実使用(稼動)条件を模擬する in-situ 測定が不可欠である。本装置では、試料加熱及び冷却装置のほか、引張や圧縮、さらに疲労試験機等の各種補助機器類を開発整備する。

Table 4.5.3-1 Specification of Engineering Diffractometer.

減速材	非結合型ポイゾン(40mm)
T_0チョッパ	有
ディスクチョッパ	有
検出器	^{3}He 検出器またはシンチレーション検出器 三次元ひずみ測定及び集合組織観察　60°≤2θ≤175° 二次元ひずみ測定　0°(透過ビーム)
減速材－試料距離	30m うち、18m スーパーミラーガイド管(3Qc 5cm×5cm)及び 2~4m 可換ユニットを設置
試料－検出器距離	2m
d レンジ	0.5≤d(Å)≤5
その他の機器	・大型ゴニオメータ ~1,000kgw(最大積載荷重)、x(y)=±500mm、 z = ±250mm、 θ = ±90° ・ラジアルコリメータ 各種ゲージボリューム(1mm、 2mm、 3mm、 4mm、 5mm) ・試料環境機器 引張試験機、圧縮試験機、高温炉、冷凍機等

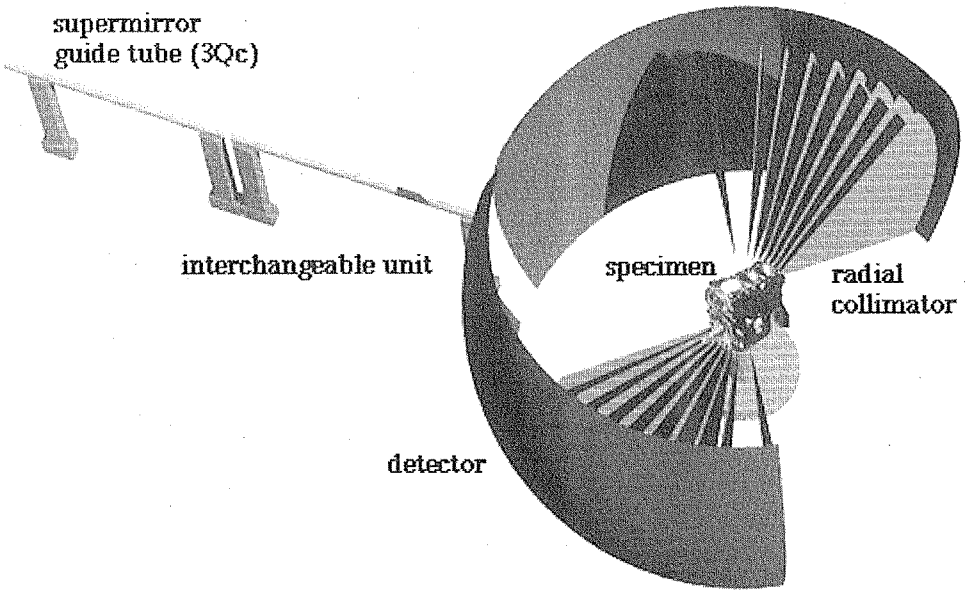


Fig.4.5.3-1 3D view of Engineering Diffractometer.

４．６　高強度汎用全散乱装置

４．６．１　全体概要

本装置の研究は、生体関連物質から高度な工業材料まで、物質が示す多彩な性質がいかなる原子構造により発現しているのかを解き明かそうとするものである。

ナノスケール構造は、物質の性質がどのように発現するのかを理解するために非常に重要であるにも関わらず未だ解明されていない。ナノスケール構造を理解することは、最隣接原子間相関から数十ナノメートルまでの数桁の距離スケールにわたる構造解明である。物質のナノスケール構造における原子の位置ならびにその構造揺らぎを正確に捉えることは、物性研究におけるブレークスルーを引き起こす一つの起爆剤になるものと考える。

本装置は、$0.01Å^{-1} \leqq Q \leqq 100Å^{-1}$($Q$：散乱ベクトルの大きさ)ときわめて広い逆格子空間上の構造測定を行い、フーリエ変換などにより構造モデルに依存することなく非常に高い空間分解能のナノスケール原子構造の情報を得ることができるという原理的特徴を持っている。こうした手法は、これまで液体や非晶体などブラッグ反射が生じない物質の構造解析に用いられてきたが、結晶性物質においても、構造モデル構築が困難であるような複雑な結晶相の構造解析やブラッグ反射の解析からは得られない局所的な構造の乱れを解析する手法として有効であることが知られている(結晶 PDF 解析)。本装置の研究対象は、液体や非晶体に限定されることなく、結晶相を含むあらゆる物質であり、これまでの固定概念を超越し、広く生体関連物質や医薬品、工学的実用材料なども包括すると考えている。つまり、物質科学、生命科学そして産業応用まで広い分野での総合的利用が行われることになる。

装置の基本的な仕様としては、$0.01Å^{-1}$ から $100Å^{-1}$ までの領域を同時に測定できること、微少試料の実験を短時間で行えること、結晶材料の構造解析のため最高 Q 分解能 0.5%を達成することである。本装置では、電子顕微鏡などによる直接観察では得られない試料中の全原子の高精度の統計平均としての構造情報が得られ、微小な位置的揺らぎを高分解能かつ高精度で観測可能である。その構造情報を元に精緻な構造モデルを構築し、ナノスケール構造情報と特異な物性との関連性を明らかにすることにより、21 世紀の科学に貢献することが本装置の使命である。

４．６．２　研究内容の概要

本装置では、液体や非晶体などの不規則系をはじめとする非平衡物質(結晶、ナノ結晶、非晶質)が主対象となる。非平衡物質は実用材料としても重要であり、またより優れた実用材料を開発するために原子構造から物性発現機構を解明することが社会的に求められている。非平衡物質の物性発現機構に関わる重要な相関を効率的に明らかにするために本装置は設計されている。

(1) 気相からの急冷、液体急冷そして固相(固気相)反応を用いて作製した非平衡ナノ物質の構造の解明

(2) 超高温、超高圧状態すなわち超臨界状態の物質の構造解明やその超臨界状態を利用して作製された非平衡材料の構造解明

(3) 機能性材料（非平衡材料）の構造と特性の関連性の解明

(4) エネルギー材料（非平衡状態の水素吸蔵材料、電池材料など）の特性向上と構造との関係の解明

(5) 実用構造材料に及ぼす水素脆性など、水素に関する不明な要因を解明
(6) 溶液中における生体関連分子の溶媒和構造及び生体分子と金属イオンの相互作用
(7) 多分野間での融合的研究を推進による萌芽的成果の創出

４．６．３ 建設する装置の概要

本装置において使用する中性子の波長は 0.12Å から 9Å であり、散乱角 0.5 度から 160 度まで検出器を配置する。微少試料測定や実時間測定を行うために検出器の総立体角は大きくとる。実空間分解能は 0.038Å を達成する。リートベルト解析を行うために高角検出器の Q 分解能は 0.5% 以上とし、同時に短波長中性子までの強度を得ることを考慮し、減速材は非結合型水素(ポイゾン無し)、減速材—検出器間距離は最短 15 メートル(高角検出器、ちなみに減速材—試料間距離は 14 メートル)とする。最高分解能は約 0.25%である。

検出器は、検出効率、安定性、実績という点ではヘリウムガス検出器が適当であるが、本装置では 1MHz 程度の計数率が必要なため Li-ZnS シンチレーション検出器を第 1 候補と考えている。検出器に関してはさらに検討が必要で、ヘリウムガス検出器とシンチレーション検出器を組み合わせて使うことなども念頭におく。

波長が 0.12Å 以下の速中性子を取り除くためのチョッパー、いわゆる T0 チョッパーは $100Å^{-1}$ を達成するために重要なデバイスであるが、100Hz で回転するチョッパーを 2 台組み合わせることを考えている。

試料位置での中性子フラックスにより比較すると、本装置は、現在、高エネルギー加速器研究機構において稼働している全散乱分光器 HIT の 160 倍になる。1 試料あたりの測定時間は、数秒から約 5 分程度が一般的と予想される。ただし、以上の測定時間は、目安として試料位置での中性子フラックスにより比較したものであり、検出器の検出効率や立体角により変わる。Q 分解能よりも強度が優先される場合に対応するため、試料サイズは最大で $20\times40mm^2$ とする。他の施設における同型の装置と、試料位置での中性子フラックスで比較すると、ISIS-GEM の 2～4 倍、SNS-Disordered Materials Diffractometer の 3～5 倍である。実効的な強度比較は現在検討中である。

４．６．４　建設する実験装置の主な仕様

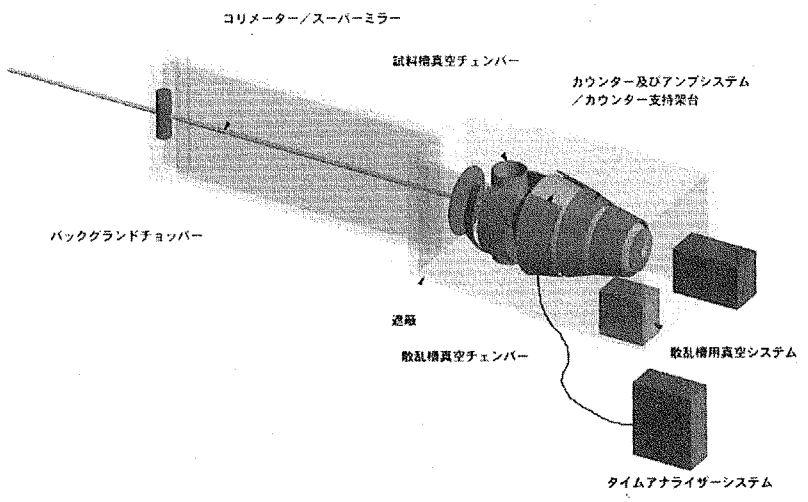


Fig.4.6.4-1 3D view of High Intensity Total Scattering Diffractometer.

Table 4.6.4-1 Specification of High Intensity Total Scattering Diffractometer.

減速材	Decoupled	バンド幅（Å）	8.8
L1(m)	14	検出器空間分解能	5×5
L2(m)	1.3 - 4.0	（a×b mm^2）	
ガイド管	有	検出器計数率	10^6
試料位置での強度	1.0×10^9	（count/sec/pulse）	
n/sec/MW		T0 チョッパー	有
Q レンジ（$Å^{-1}$）	0.01 - 100	テールカッター	有
Q 分解能（$\Delta Q / Q$）	0.5% - 35%	その他必要なデバイス	中性子偏極デバイス
r 分解能（FWHM、Å）	0.038		スーパーミラー
所要減速材面積（a× b mm^2）	100×100	高圧ガス許認可	不要
最大試料大きさ（a×b mm^2）	20×40	建屋外における工事	無

４．７　大強度型中性子小角散乱装置(HI-SANS)

４．７．１　全体概要

大強度型中性子小角散乱装置は、ナノスケールの構造評価を目的とした装置である。中性子小角散乱法は、1970 年代に ILL に設置された D11 の成功以来、中性子の特徴である軽元素識別能力、スピン偏極、物質透過能力等の特徴を活かして、サブナノメートルからサブマイクロメートルに及ぶ空間スケールにおける構造研究の手段として、物質科学及び生命科学分野で幅広く利用され、最近では産業利用にも応用され始めている。

一方、近年の急速な情報化社会の発達、環境問題の認識、高齢化社会の出現等は、従来に無いより高機能な材料開発の必要性を示唆している。例えば、電子デバイスとして期待されるナノ粒子、究極的にはバイオ技術への応用を目指した機能性ソフトマター、生体模倣高分子等の開発である。これらの物質の構造研究では、散乱体の内部構造を今まで以上に高精度に調べる必要があり、既存の原子炉型の小角散乱装置で標準的な q 領域に比べて、より高 q 領域、かつ、階層構造を理解するための広い q 領域の高効率測定が重要になる。

大強度型小角散乱装置は、汎用性の高い設計が可能な装置であり、10^{-2} － 10^{2} nm^{-1} の q 領域をカバーすることができる。本装置を用いて、ナノスケールの構造評価をキーワードにした物質科学から生命科学に及ぶ広い分野での機能性材料の開発と高度化を目指した研究が展開でき、その成果を社会に還元することが期待される。

４．７．２　研究内容の概要

(1) 固体物性分野

現在のエレクトロニクス技術と情報技術の発展は、電子の電荷とスピンの制御技術の発展に支えられている。例えば集積回路では、半導体中の電子の電荷を制御することで、またハードディスクでは、磁性体中の電子のスピンを制御することで、その機能を実現している。従来これらの機能を生み出す基礎構造のサイズは、小さいものでも数 100 nm 程度あり、小角散乱の観測対象としては少々大きかった。しかし、所謂ナノテクノロジーの発展により、基礎構造のサイズは、数 nm から数 10 nm 程度にまで小さくなっている。小角散乱が得意とするこのようなサイズの基礎構造の評価は、新しい機能性素材の開発に結び付くものである。

例えば近年、シリコン半導体を数 nm の微結晶(量子ドット)とすることにより、赤から青に至る強い発光が得られることが分かり注目を集めている。シリコン微結晶の発光特性は、量子サイズ効果と微結晶表面に終端された水素の励起・緩和効果に関係すると考えられている。高 q 側の測定効率が高い本装置を利用すると、薄膜試料にレーザーを照射しながら終端水素の配置を測定することにより、未解明の表面励起・緩和効果の評価ができると考えられる。

情報技術としては、記録媒体の一層の高密度化が求められている。現在のハードディスクの記録密度は 100 $Gbit/inch^2$ で、データの一つ一つは 180 nm×32 nm の非常に小さな磁石で構成されている。高 q 側の測定効率が高い本装置は、薄膜媒体中のナノスケールの磁石が一記録単位として機能しうるかどうかの評価に利用することができるので、今後のテラビットメモリー(記録密度：1 $Tbit/inch^2$、1 ビットのサイズ：25 nm×25 nm)の開発に寄与することができる。

(2) ソフトマター分野

小角散乱の対象物は多岐にわたり、例えば、固体、ソフトマター、生体と大別できる。このような分類のもとで、ソフトマターは、固体物理として確立されたモデル化、粗視化といった物性研究の手法を、生体のような複雑系に応用するためのモデル系としての役割を持つ。生体では物質の個性を尊重し、生体物質が形成するユニークな構造を結晶学的に決定することが求められ、今後、ソフトマターの研究もこの方向への要求が大きくなると思われる。

例えば、超分子という新しいタイプの人工高分子は生体模倣物質であり、蛋白質のように複数の構成要素(セグメント)が意味をもって 1 次元配列し、これが 3 次元的に立体構造を形成する。この 3 次元的な立体構造は超分子の機能と直結する。立体構造を精度良く決定するには、分子の外形情報を与える小角領域より少し高角側の散乱情報が大変重要となる。その点、本装置は、小角から中角領域を効率良く測定できるため有効である。しかし、構造決定のような分子の形状因子の観察では、形状因子があるパワー則で急激に減少するため、中角領域では軽水素に起因する非干渉性散乱の評価及び除去が重要となる。この問題を克服するために偏極中性子を利用する。

(3) 生命科学分野

生命現象の理解は、単に人類の夢であるのみならず、現在、人類が抱える様々な環境問題やエイズ・痴呆などの病気を解決するための機能性高分子の開発や創薬に極めて重要な鍵を与えるものである。生命現象の本質は、一定の範囲の外部環境からの刺激や変動に対して、自律的・協同的に応答・順応(情報の伝達)し、個体の維持と種の保存(情報の保存)を図る極めて柔軟で効率的なシステムを実現させてきたことにある。そのような生命の本質を理解するために、情報(ゲノム)そのものの解読は、近年飛躍的に進展してきたが、一方で、情報の伝達・保存に直接関与する極めて広い時間(エネルギー)・空間における生体系の反応連鎖の分子機構を対象とした研究も精力的に進められている。

本装置では、従来から良く知られている中性子散乱の特徴(広い波長帯、高透過率、水素・重水素置換)に加えて、動的核スピン偏極(DNP)を利用することで、生体高分子凝集系・分散系の集団挙動・機能を対象とした研究が可能になり、中でも、蛋白質や超分子、生体膜などの機能発現と密接に結びついた中・長距離(1～100 nm)の構造に関する情報を得ることができる。また、本装置では、溶媒コントラスト変化法や三重同形置換法などを駆使することで、溶液中での様々な溶質分子や分子集合体の内部構造(ドメイン間相関・配列や二次構造など)の外部環境変化(温度・圧力・溶媒条件等)に対する応答を評価することができる。

(4) 産業利用分野

産業利用分野では、本装置の大強度性の利用及びそれによる微小ビーム実験が可能になる。例えば、(a) イオン注入法による新物質創製・機能性材料探索の研究においてマイクロメータ厚の観察対象領域からの情報を抽出できる。(b) 大強度を利用した小角散乱測定は、迅速にバルク材の損傷の程度を評価でき、ガスタービン等の非破壊余寿命診断高度化技術の開発を実施できる。(c) 微小ビームにより材料の局所的な組織の評価が可能になる。例えば、0.5 mmφ程度のマイクロビームを用いて中性子小角散乱を測定すると、鋼材の焼き入れ表面から深部へかけての組織変化を評価でき、製品作成条件等を決定できる。(d) 物質生命科学実験施設は、非密封 RI 使用施設として建設されるので、現在国内では、実施できない RI 試料、放射化試料の研究が展開できる。

例えば、原子炉プラントにおいて安全上重要な圧力容器の構造健全性に関する研究、即ち中性子照射による脆化のメカニズムの基礎研究等が新たに実施できる。

４．７．３　建設する実験装置の主な仕様

重量：1500 t、施設建屋外工事：無

Table 4.7.3-1 Specification of HI-SANS.

中性子減速材	結合型液体水素減速材
T0 チョッパー	7.5 m 位置、25 Hz
バンド規定チョッパー	8 m 位置、25 Hz
フレームオーバーラップ除去ミラー	有、2 nm 以上用
ガイド管	3Qc スーパーミラー、4 極磁石
コリメータ系 ピンホールコリメータ 収束型コリメータ 集光素子 スピン偏極素子	 物質レンズ、磁気レンズ(6 極磁石) 3Qc 磁気スーパーミラー
散乱槽 スピン検極素子	 3Qc 磁気スーパーミラー、スピンフィルター
試料空間	試料サイズ 10 mm×10 mm(標準)、30 mm×30 mm(最大) 試料空間半径 50 cm 掘り込み：有、直径 2 m、深さ 1.5 m 各種試料環境制御装置 (温度、圧力、電磁場、動的核スピン偏極)
検出器 小角部 中角部 高角部	 ^{3}He 二次元位置敏感検出器+高分解能ファイバー検出器 ^{3}He 一次元位置敏感検出器 ^{3}He 一次元位置敏感検出器
ビームストップ	有
遮蔽体	鉄+コンクリート
L1	12 m
L2	3 - 10 m
q レンジ	0.01 – 100 nm^{-1}
$\Delta q/q$	約 1 – 0.07
有効波長帯	0.06 – 0.719 nm

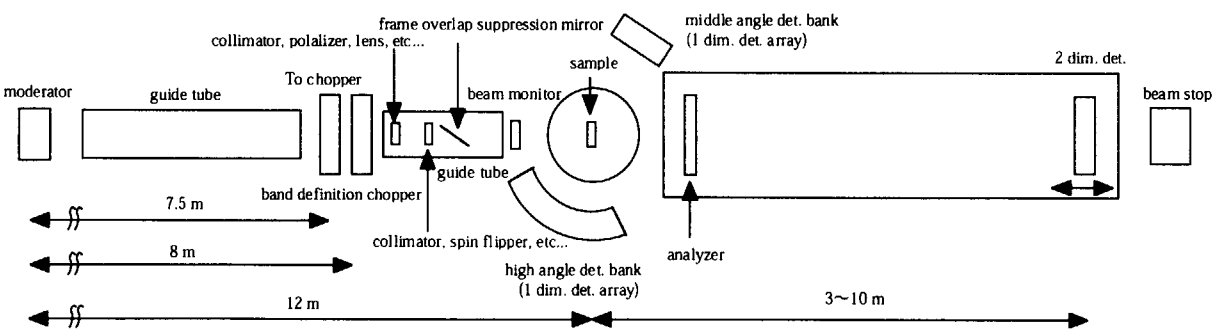


Fig.4.7.3-1 Schematic layout of HI-SANS.

４．８　高性能試料水平型中性子反射率計

４．８．１　全体概要

試料水平型中性子反射率計は、試料の設置方式として水平方式を採用するために、垂直型の反射率計では測定できない、液体表面や液液界面といった自由界面をはじめ、あらゆる物質界面を測定対象とする。測定には、結合型液体水素減速材からの冷中性子(波長：0.25-0.9nm)を、水平より下向きに取り出して用いる。これにより、自由界面を有する試料についても、試料を傾けることなく、全反射領域から中性子の移行運動量 q の大きさで $5nm^{-1}$ までの鏡面反射率を定常的かつ効率良く測定できることを、デザイン上の前提とする。また、パルス(白色)中性子を用いるために、一つの入射角度で一度に広い q 領域をカバーでき、さらに位置敏感型検出器との組み合わせにより、鏡面反射と非鏡面反射の同時測定も可能となる。これは、原子炉における単色ビームを使う反射率計と比べ圧倒的に有利な点であり、大強度のパルス中性子源に装置の設置を実現することにより、これまで困難であった、コントラストの弱い試料からの反射や、表面・界面の面内構造を反映した、微弱な非鏡面反射を精度良く観測でき、しかもこれらの測定が分オーダーあるいは秒オーダーの時分割かつ高分解能で可能になる。

この反射率計に偏極中性子オプションを導入することにより、磁性薄膜や人工格子が示す微小な磁気モーメントの空間分布の検出に加え、水素の非干渉性散乱を識別でき、水素を多く含む高分子・生体物質を測定する際の非干渉性散乱に起因するバックグラウンドが軽減され、これら試料の構造情報がより詳細に得られる。さらに、試料の表面近傍を進行するエバネッセント波を利用して、表面ナノ微細構造を観測するための斜入射回折(斜入射小角散乱)オプションや、これまで反射率計への組み込みは実例のない、表面・界面が示すナノ eV オーダーのダイナミクスを観測するためのスピンエコーオプションについても導入する。

これにより、多くの分野における表面・界面のサイエンス、ナノテクノロジーの飛躍的発展が見込まれると共に、いわゆる境界領域での新たなサイエンスの創出も期待できる。また、完成後の共同利用を通じて、産・官・学のいずれの分野においても、界面ナノテクノロジーの発展と新たな界面サイエンスの創成が期待でき、大強度パルス中性子源によってのみ可能な、本邦における先進的界面ナノテクノロジーの創成へと展開する。

４．８．２　研究概観

表面が重要な機能を果たすのは、表面が物質と真空あるいは大気との異種界面のためであり、一般に固体、液体、気体に限らず、異なる物質が接する界面では、界面の構造と機能が密接に結びついている。しかし、原子間力顕微鏡などの表面に対するプローブは、物質内部に埋もれている界面に対しては全くの無力である。X 線や中性子を光源とする反射率法は、表面は言うまでもなく界面のナノ構造をも非破壊的に知ることのできる唯一の実験手法である。特に、中性子は、X 線と比べ物質に対する透過力が非常に大きく、物質中に深く埋もれた界面にも容易に達することや、X 線が苦手とする軽元素に対する感度も大きいため、金属、高分子、生物とその測定対象を問わない理想的な表面・界面ナノ構造の研究手段である。また、中性子をプローブとした場合には、同じ元素であっても同位体で中性子に対する散乱能が異なり、特に、分子中に水素原子を多数有する高分子、界面活性剤などのソフトマテリアルや生体物質に関する研究においては、軽

水素(H)と重水素(D)の間の大きな散乱能の差を利用して、分子全体あるいは分子中の特定の H を D で置換(重水素ラベル)することにより、それらが示す物理的な性質を大きく変えることなく、分子中に中性子に対するコントラストが付けられ、他のレーザーや X 線を使っては得ることのできない多くの構造情報が得られる。

また、ここで達成される装置面での大きなブレークスルーにより、この中性子反射率計では、

(1) 高分解能の反射率測定が 10^{-10} オーダーまで(国内の現状は 10^{-6} オーダー)可能になり、これまで見ることができなかった、ナノ以下の精度での極めて詳細な界面構造がわかる。
(2) 微小な非鏡面反射(入射角と反射角の大きさが異なる反射)の測定が可能になり、表面や界面の面内の分布に関する情報を得ることができ、界面構造の三次元情報が得られる。(X 線では既に実用化。)
(3) 界面・表面の構造が、温度や磁場、光照射などによって、比較的短い間に刻々と変化する現象を、時分割で観測できる。
(4) 斜入射回折法あるいは斜入射小角散乱法により、物質表面の数原子層の構造を選択的に調べられる。特に、磁性体の表面に関しては、その特殊な電子状態や低次元性に起因する新たな相転移現象を示すことが期待される。
(5) スピンエコーオプションの導入により、表面・界面の構造だけでなく、界面におけるナノ eV オーダーのダイナミクスが観測できる。

この反射率計を用いて展開される、様々な分野の表面・界面に関わる研究テーマを以下に示す。

・気液界面、液液界面、固液界面における自己組織化と超分子化学
・気水界面における生体物質の組織化と生体情報伝達機構
・高分子薄膜が示す時空間構造の精密解析
・磁性、超伝導薄膜・人工格子
・磁性体表面の磁性
・中性子多層膜ミラーの開発
・イオンビーム物質改質による準安定表面の物理と化学
・ 薄膜・多層膜からの散漫散乱とその応用

さらに、反射率計による研究対象には、磁気光学デバイス、磁気ヘッド、界面活性剤や吸着・接着など、実生活に密接に結びついたものが多く、産業界の潜在的な利用需要は非常に多い。したがって、単にサイエンスの側面からだけでなく、大強度中性子源を最大に活かすことで、数秒から数分での短時間測定を可能とし、材料開発に要求される、大量の試料に対して迅速にデータを提供することにより、産業利用が促進されることも期待できる。

４．８．３　高性能試料水平型中性子反射率計のスペック

Table 4.8.3-1 Specification of of High-performance neutron reflectometer with horizontal sample geometry.

減速材種類	結合型液体水素
$L1$	15 m
$L2$	2.5 m
ガイド管	有り(ベンダー)、$3Q_c$
実験装置配置(水平、垂直等)	試料水平型
ビームライン占有角度	-6.35 deg <θ< 6.35 deg (ビームライン遮蔽を含む。)
波長レンジ	(1Å) 2.5Å ≤ λ ≤ 9.0Å
下方ビーム取出し角度	5.71、2.22、0.862、0.335deg
Q_z レンジ(鏡面反射)	$Q_z \leq 0.5$ Å^{-1}(1Å^{-1})
Q_z 分解能	$\Delta Q_z/Q_z \leq 10\%$
所要減速材面積	5cm(高さ)×10cm(水平)
試料の大きさ	最大 5cm×5cm
検出器	2D-PSD(1mm×1mm pixel)
T0 チョッパー(有無)	有り
テールカッター(有無)	無し
その他	非鏡面反射 偏極中性子オプション 斜入射回折オプション スピンエコーオプション

４．８．４　概念図

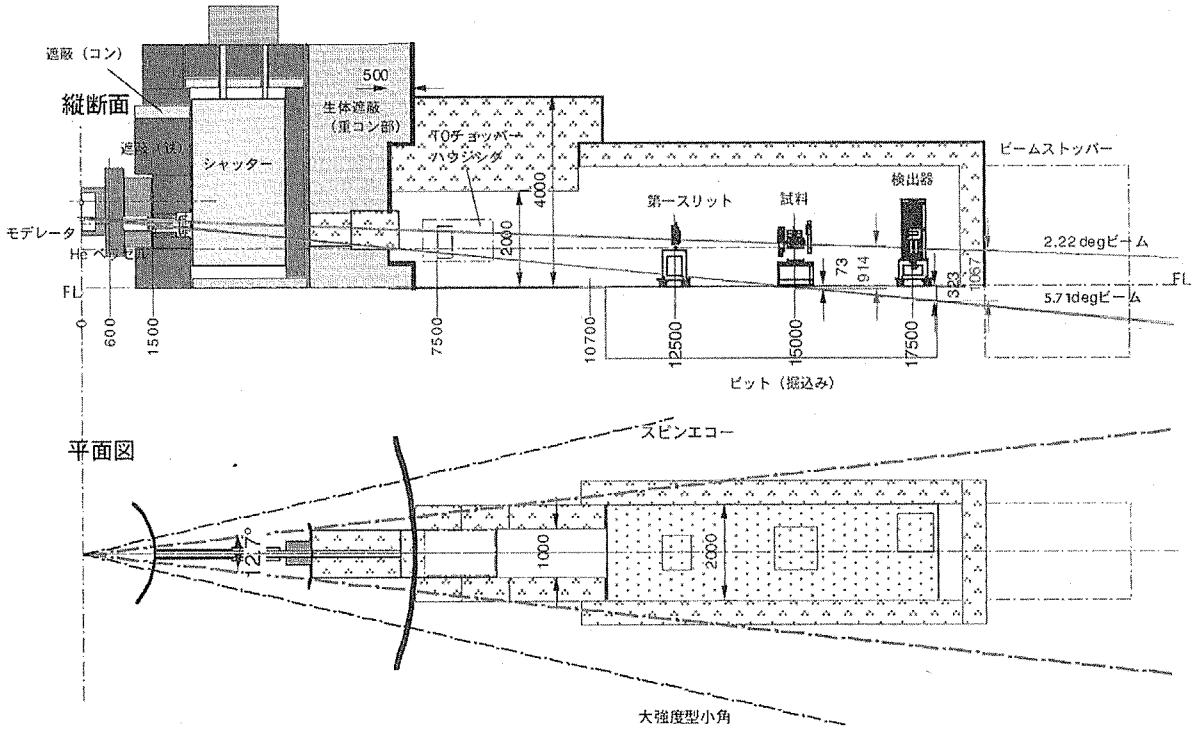


Fig.4.8.4-1 Schematic layout of High-performance neutron reflectometer with horizontal sample geometry.

４．９　高分解能型チョッパー分光器

４．９．１　全体概要

チョッパー分光器は大強度パルス中性子源を用いてダイナミクスを測定する標準的な分光器であり、高分解能型、低エネルギー型、大強度型等が考えられる。本研究では、このうち、高分解能型チョッパー分光器を建設し、強相関電子系、非一様磁性体、液体、不規則系、超分子及び高次複合体等におけるダイナミクスの研究を展開する。これらの系ではダイナミクスが広いダイナミックレンジで Qω空間に広がり、10μeV～1eV の広いエネルギー範囲を高分解能でカバーするこの分光器を用いて初めて系統的研究が可能になる。建設する分光器は、非結合型減速材に設置され、フェルミチョッパー1 台を用いた実証済みの方法に基づくものである。最高分解能は、従来の同種の分光器の目標分解能を達成することを目標とし、Q 分解能もエネルギー分解能と整合性をとることにより高分解能化をはかる。大立体角位置敏感型検出器群を配置し、可干渉性非弾性散乱を効率的に測定するものであって、既存の同種の分光器に比べて一桁上の計数効率を目指す。

４．９．２　研究内容の概要

中性子非弾性散乱実験は、1MW の中性子源が完成して初めて満足できる高精度の測定が可能になり、ダイナミクスの研究が推進できる。研究グループでは、以下にかかげるようなダイナミクスの研究を行なうが、これらの系ではダイナミクスが広いダイナミックレンジで Qω空間に広がり、10μeV～1eV の広いエネルギー範囲をカバーする高分解能型チョッパー分光器を用いて初めて系統的研究が可能になる。ここで展開されるサイエンスの成果は人類の知的進化に貢献することはもとより、人類の生命、産業、環境等に利益をもたらすものである。

(1)　非一様磁性体のダイナミクス
(2)　希土類強相関電子系の磁性
(3)　液体ダイナミクスの基本原理の解明
(4)　不規則系のナノスケール揺らぎ
(5)　固体中の水素原子のダイナミクスと波動関数
(6)　超分子及び高次複合体化学の新規材料への展開
(7)　水の物性化学と環境・生体への展開

４．９．３　建設する実験装置の性能

チョッパー型分光器は単色化された中性子を用い、飛行時間法により非弾性散乱を測定するものであるが、標準的には 10 数 m の大きさを有し、入射中性子エネルギーに対して 1%程度のエネルギー分解能をもつ。検出器が連続して散乱角をカバーすることも特徴であり、広い Qω空間でのダイナミクスを一挙に測定できるものである。統合計画のパルス中性子源で設置が検討されている減速材は全て液体水素であり、フェルミチョッパー型のチョッパー型分光器では広いエネルギー領域の中性子を単色化できるため、非結合型液体水素減速材を選択するだけで、1meV から数 eV までの Ei を選択でき、ΔE/Ei=1%とすれば、10μeV から数 eV に及ぶこれまでにない広いエネルギー領域をカバーする分光器となる。測定できるエネルギー範囲はどこまで Ei が小さく

できるかで決まり、加速器の繰り返しに依存する。最小の Ei が 1meV 程度までとることができることは、統合計画の加速器の繰り返しが 25Hz であることにもよる。

本分光器では、L1=15m、L2=4m という装置サイズを選択し、チョッパーの開口時間Δtch をパルス幅Δtm の 30～50%にしぼることによってΔE/Ei=1%が達成でき、かつ、Q 分解能も最適化されて、ΔQ/ki= 0.5%が実現する。ΔE/Ei=1%という分解能は、従来同種の分光器が目標性能に掲げてきたものであるが、この建設で初めて達成することを目指す。

チョッパー分光器ではΔtch=Δtm が最適条件と考えられるが、非結合型減速材を用いて、L1=15m、L2=4m のサイズでは、Δtch=Δtm のとき、弾性散乱に対してΔE/Ei=2.3%になる。ΔE/Ei=1%を達成させるためにはΔtch<Δtm という条件を採用する必要があるが、分解能幅を狭めるとともにピーク強度も減少する。シミュレーション結果によれば、Δtch/Δtm=1 のときに比べて、Δtch/Δtm=0.5 のときはΔE/Ei=1.3%でピーク強度は 89%、Δtch/Δtm=0.3 のときはΔE/Ei=1%でピーク強度は 75%となり、エネルギースペクトルの非対称性もさほど気にならないことがわかった。従って、Δtch をΔtm の 50～30%にしぼることによってΔE/Ei=1%が実現できる。

Q 分解能に対する角度分解能からの寄与がエネルギー分解能からの寄与と同程度になるように角度分解能を選ぶとすると、ΔQ/ki=Δφ=(1/2)ΔE/Ei の関係が成り立つ。すなわち、ΔE/Ei=1%に対しては、ΔQ/ki=0.5%、Δφ=5mrad がエネルギー分解能に見合う Q 分解能及び角度分解能である。本分光器ではΔφ=5mrad となっていて、分光器サイズは、エネルギー分解能に見合う Q 分解能をもつ理想的なものになっている。

角度分解能にみあう検出器の大きさは 2cm であるが、散乱角を定義するためには 1/2 インチの位置敏感型検出器の導入が必要である。全エネルギー領域で、計数率を確保するためには 20 気圧検出器が不可欠である。1/2 インチ検出器を導入することによって、オプションとしてチョッパーをもう 1 台用いてパルス整形を行ない、ΔE/Ei=0.5%の高エネルギー分解能化を行なうことが可能である(1 インチではそのΔL によりΔE/Ei=1%が限度)。ΔE/Ei=0.5%の場合は、単一チョッパーでΔtch/Δtm=1 のときに比べて、ピーク強度は 40%程度になる。

散乱角を水平方向で-30° から 130° 、垂直方向で-22° から 30° の範囲を覆う 40m^2 の検出器群をもち、2.5str の大立体角をカバーすることにより、従来のこの種の分光器よりも一桁以上の計数率が実現する。中性子スペクトルの積分強度で比較しても、従来型と同程度のエネルギー分解能の場合には従来型の一桁上の強度であり、ΔE/Ei=0.5%の場合でも従来型と同程度の強度が期待できる。チョッパーの開口時間を制御することによりΔE/Ei が数%程度の実験も可能であり、そのとき、中性子スペクトルの積分強度は従来型の二桁近く上の値になる。

偏極子・検極子は、磁気散乱を非磁性バックグラウンドからの分離、あるいは、可干渉性散乱と非可干渉性散乱との分離を厳密に行なうような高精度実験には不可欠であり、その導入をめざす。

ダブルチョッパーによる高エネルギー分解能化とともに、より小角に検出器を配置するとこにより、kinematic constrain にせまるスキャンの実現を目指す。

４．９．４　概念図

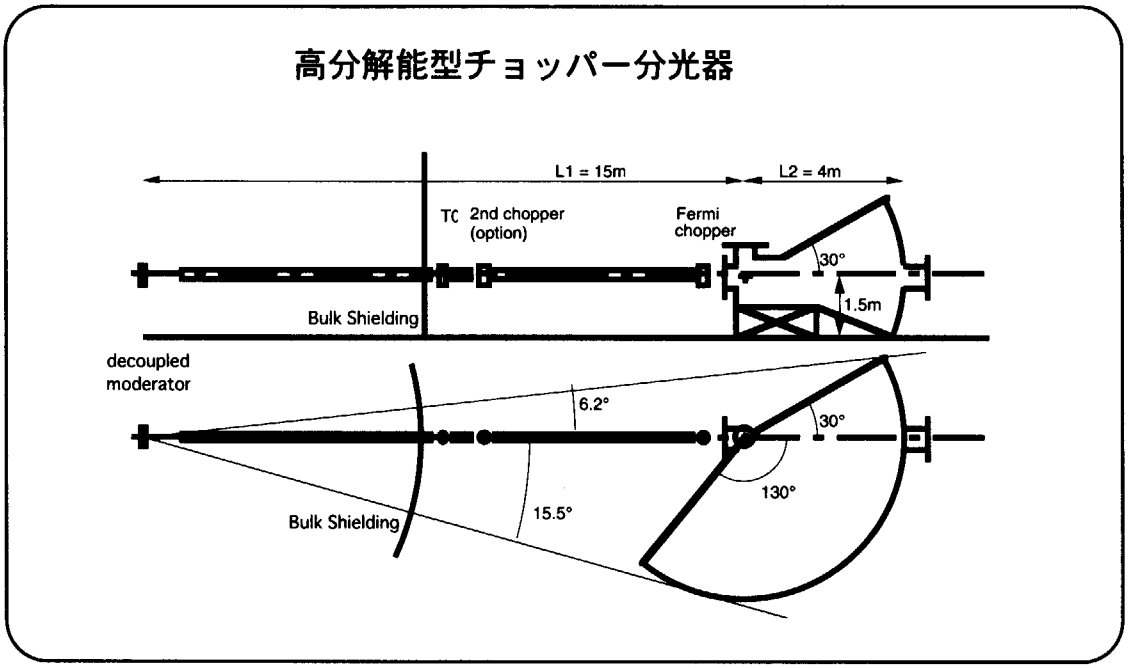


Fig.4.8.4-1 Schematic layout of High Resolution Chopper Spectrometer.

４．１０　冷中性子ダブルチョッパー型分光器

４．１０．１　全体概要

冷中性子ダブルチョッパー型分光器は、線源近傍に据え付けられるパルス整形用の初段チョッパーとサンプル直前に置かれる単色化用のチョッパーを併せ持つ直接配置型の非弾性散乱測定装置である。結合型減速材に設置され、その高い強度を装置の性能を損なうことなく享受し、かつ、水素減速材の特性に合わせたエネルギー領域の中性子を利用することで、特に、E_i=1meV から 20meV 程度までの低エネルギー領域で既存のチョッパー型分光器の数桁上の検出効率を実現する。10μeV から 20meV までの非弾性散乱を数%のエネルギー分解能、最高$\Delta Q/k_i$~0.5%のQ分解能で、広い運動量空間に渡って測定する能力を持ち、固体単結晶試料内の集団励起を中心に、液体、高分子、生体物質内の低エネルギー励起まで広い範囲のテーマをその測定の対象とする。また、ディスクチョッパーの利点を活かし、余裕を持った設計で広い自由度を持ち、さらに必要に応じて、測定範囲は、80meV 程度まで、エネルギー分解能は最高 1%まで実現することも可能である。また、マルチホールディスクチョッパーによる測定の高効率化で実質的な測定強度をさらに数倍にするオプションも持つ。既存のチョッパー型分光器の性能を大きく凌駕するこの分光器により、これまで実現困難だった対象となる研究領域のブレイクスルーが期待できる。

４．１０．２　研究内容の概要

中性子は、物質中の素励起を、位相空間上の運動量及びエネルギーを独立なパラメータとして、非常に高い分解能で測定することができる唯一のプローブである。中性子非弾性散乱実験によって、原子や電子の動力学的な性質、また量子力学的な自由度に基づく励起が様々な分野で測定され、系の本質的理解に極めて重要な役割を担ってきた。近年、例えば固体物理学の分野では、高温超伝導体関連物質の研究や、低次元磁性体の研究において、中性子非弾性散乱は必要不可欠な測定手段である。また、化学、材料、生命科学の領域においても、中性子非弾性散乱、準弾性散乱は、他の測定手段では得られない重要な情報を与える。一方、大強度陽子加速器計画の本格的な運用が早くとも 5 年後、1MW の定常運転が約 10 年後であることを考えると、そのような施設に設置される分光器が担うべき研究の内容は、単に当該分野の現時点における中心的課題を延長するにとどまらず、将来の学術的発展性を十分見据えたものであるべきである。そして、それは、既成概念にとらわれない新しい物質観を構築することである。そのため、そういった課題の解決に適合した能力を持つ分光器、必要なエネルギー－運動量空間において、高効率化と大強度化を最も重要なキーワードとし、付随して必要なダイナミックレンジと分解能を確保した分光器を建設し、研究を行う。

固体物理学の分野においては、今後 10 年間、さらに様々な新物質の合成が進み、また学問分野の発展に伴い、今まで省みられることがなかった物質についても進展が期待される。多種多様な酸化物や有機物の合成によって、まったく新しいタイプの低次元物質、フラストレーション系やフラクタル構造等々が、続々と新しい研究対象となるであろう。こういったエキゾチックな系においてユニバーサリティーやスピン量子数を変化させたり、梯子や交代鎖構造によって相互作用の共存競合を導入すれば、その興味は無限の広がりを持つ。さらに電荷注入によって自由度を格子点から解放すれば、金属-非金属転移や超伝導など、新しい強相関電子系特有の振る舞いが

期待される。このように、研究対象として広いフィールドが約束されている。

国際規制物質として国内的にはほとんど省みられることのなかった超アクチナイド化合物は、ほとんど手付かずの領域が数多く残されており、今後 10 年間で飛躍的に研究が進むと期待される。特に最近ウラン化合物における強磁性超伝導や、プルトニウム化合物における重い電子系高温超伝導物質の発見は、超アクチナイド化合物の *5f* 電子の局在-遍歴性に伴う強相関化合物としての側面と、その学問上の重要性を明瞭に示している。大強度陽子加速器が建設される日本原子力研究所は、超アクチナイドの研究をする上で国内では最も適した研究所であり、その利点を最大限活用することによって国際的にも極めて強力な研究体制を構築することが可能である。

従来から知られていた電荷とスピンの自由度に加えて、軌道・電気四極子、さらに磁気八極子などの高次の自由度とその相互作用が物性に重要な役割を果たしていることが近年の研究から明らかになりつつある。これら高次の自由度は、系の秩序を記述する上で、全く新しい世界と空間を提供している。今まで単にいわゆる磁気転移や構造相転移として理解されていた現象が、その根元から統一的に理解される可能性を秘めている。さらに近年の発展として、こういった新しい自由度に関する励起を研究する重要性が指摘されている。電荷の励起（すなわち電子構造）や磁気励起は従来から観察されてきたが、多重極子については、軌道・電気四極子の励起は観察例がなく、八極子にいたっては秩序変数としての報告例も存在しない。

新しい量子力学的自由度がもたらす新しい物質観は、各自由度の結合を考えることでさらに広がりを見せる。高温超伝導体が発見された当初、LSCO や YBCO で観察されたスピンギャップや擬ギャップ、共鳴ピークなどの磁気励起は、人々の熱い注目を集めた。しかし現在では、これらの磁気励起に加えて電荷ストライプや、格子振動が超伝導発現機構を考える上で重要と考えられている。さらに一歩進んで、これらの励起がダイナミカルに結合した新しい素励起が存在し、それこそが本質であると理論的に予言されている。他にも例えば $CuGeO_3$ などスピン・パイエルス系や、ボンド交替鎖における磁気励起と格子振動の結合モード、またスピノン・ポーラロン・スピンポーラロン、さらに電荷密度波・スピン密度波・価数波・軌道波・エキシトンなど参加者が増え、タイムスケールを含めた 4 次元空間に物理が拡張されれば、我々の物質観は真の意味で一変するであろう。

一方で、液体・溶液化学分野においては、分子やイオンの拡散運動を調べることは最も重要で日常的に行われている過程である。特に近年は、燃料電池内の水素の拡散問題、生体機能解明に関わる生体高分子周りの水、アミノ酸や酵素分子、K や Ca などの生体内イオンの拡散運動が注目を集めており、将来の研究領域として今後の発展が求められている。これらの研究において、NMR や光散乱とともに、中性子準弾性散乱は代表的な手段である。中性子準弾性散乱スペクトルのQ変化の解析からは、単に拡散係数だけでなくジャンプ距離や滞在時間などの詳細な情報が得られる。これらの拡散運動にかかわる主要なエネルギー領域は数 10meV 以下であり、また、7 $Å^{-1}$ までの広い*Q*領域の準弾性散乱スペクトルを測定することが、液体・溶液の研究に非常に重要である。この領域において大強度の分光器が得られれば、この領域の研究を飛躍させることが可能である。また、ダブルチョッパー型分光器で実現されるような良く制御された対称なエネルギー分解能関数を持つ分光器による測定は、必要となる複数の拡散過程が混在するような複雑な解析を可能にする。

この他、金属超格子／磁性薄膜とその表面／界面、カーボンナノチューブや C_{60} などの分子集合体や、ゼオライトに代表される吸着系などいわゆるナノスケール物質群、各種燃料、触媒等の機能の解明、超高圧、高磁場、超高温、そして超低温における量子液体の振る舞いなどの極端条件下で見つかりつつある新しい物質相、量子現象の解明には中性子散乱による研究が極めて重要であり、これらも大強度陽子加速器計画における冷中性子チョッパー型分光器の研究対象である。

これらの問題について探求すべき現象は、エネルギースケールとしては、その本質的な部分が数 10μeV から数 10meV という比較的低エネルギーの領域に集中し、時に 100meV 近くに及ぶダイナミックレンジの広いものであると予想される。さらに、多くの問題ではそのダイナミカルな応答の運動量空間での変化の詳細が極めて重要であり、高い分解能で広い運動量空間に渡る情報の把握が求められる。このような要求に合わせたこの次世代の低エネルギーチョッパー型分光器によるダイナミクスの研究は、将来の物理、化学、材料、生命科学の研究領域に大きな役割を果たすと考えられる。

４．１０．３　スペック

Table 4.10.3-1 Specification of Cold Neutron Disk-Chopper-Spectrometer.

L_1(m)	15 m
L_2(m)	4 m
L_3(m)	0.8 m
L_{T0}、L_{C1}、L_{C2}(チョッパー位置)	L_{T0}=8.4 m、L_{C1}=6.2 m、L_{C2}=14.2 m
ガイド管	$3Q_C$
実験装置配置	水平
ビームライン占有角度	6.2+15.5=21.7°
散乱角範囲	水平 -30° ～130°　垂直 -22° ～30°
Q レンジ(Å^{-1})	Q<1.3 Å^{-1} (E_i=1 meV)　Q<7 Å^{-1} (E_i=20 meV)
Q 分解能($\Delta Q/k_i$)	~0.5%
Ei レンジ(meV)	1-80 meV(1-20 meV を主たる使用エネルギーとする)
E 分解能($\Delta E/E$)	>1%
所要減速材面積(a×b mm^2)	100×100 mm^2
試料大きさ	20mm×10mm ϕ
検出器空間分解能(a×b mm^2)	10×12 mm^2
検出器	1/2inch He^3 PSD (20atm)
ディスクチョッパー	w(窓幅)=1 cm、3 cm、5 cm、R(半径)=30 cm ω=50 Hz - 300 Hz
その他のデバイス	T_0 チョッパー、フレームオーバーラップ除去用ミラー、偏極用フィルター、高荷重非磁性ゴニオメーター、その他

４．１０．４　概念図

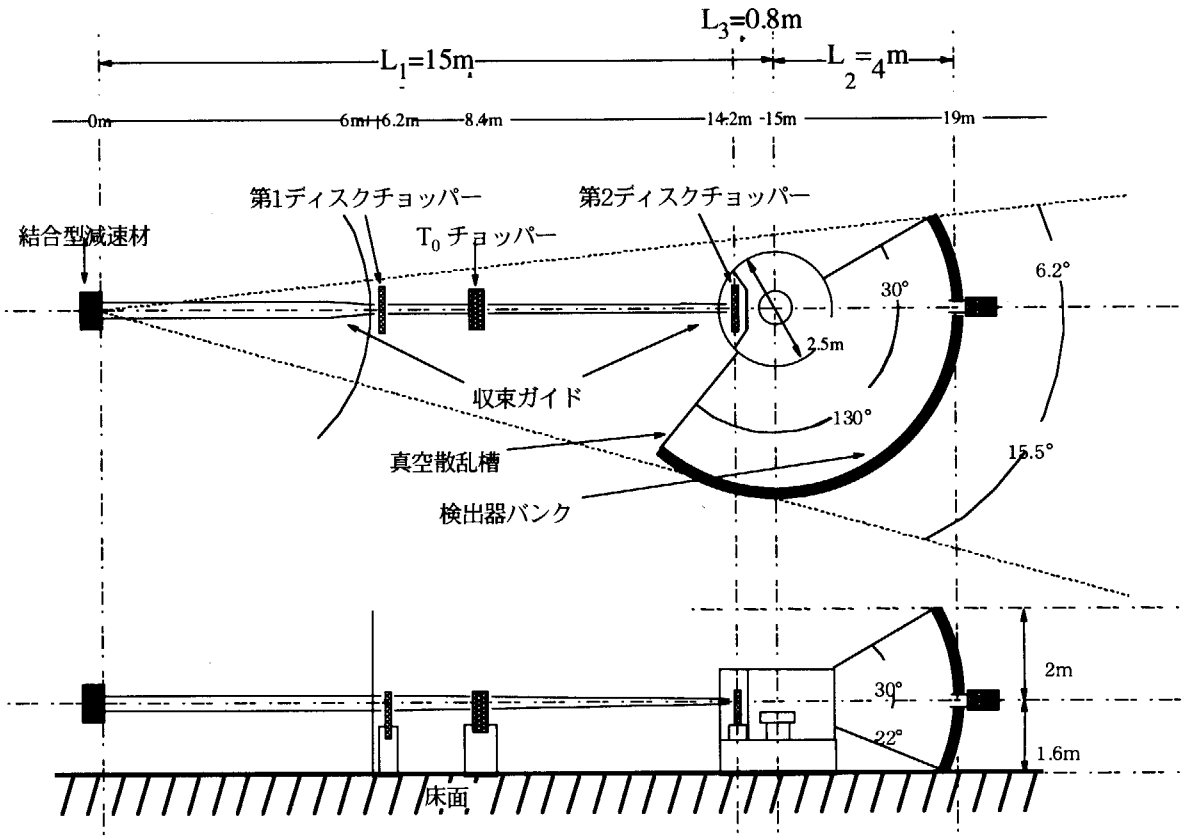


Fig.4.10.4-1 Schematic layout of Cold Neutron Disk-Chopper-Spectrometer.

４．１１　生物用非弾性散乱装置 DYANA (protein DYnamics ANAlysis instrument)

４．１１．１　全体概要

ヒトゲノム情報の解読完了により、現在はゲノムから実際に作られるタンパク質の機能解析が「ポストゲノム」として焦点となっている。タンパク質は複雑な分子機械であり、各分子固有の立体構造をもちそのまわりを揺らぐことにより機能を発揮する。タンパク質の機能をその立体構造ダイナミクスに基づいて理解することは自然科学における最も中心的な課題の一つである。そのための実験手段として中性子非弾性散乱の有用性は以前から指摘されていたが、中性子強度が弱いことから実際のタンパク質研究にあまり用いられてこなかった。しかし、世界最高強度のパルス中性子源が我が国で実現することとなり、世界に先駆けて中性子非弾性散乱によるタンパク質の機能解析ができる下地が整った。そこで我々はタンパク質の機能と関わるダイナミクスが観測できるエネルギー領域で中性子散乱強度を最大限にできるハイスループット生体物質用非弾性散乱分光器を建設することにした。

パルス中性子源の設置するいくつかの非弾性散乱分光器のタイプのうちエネルギー分解能 $\Delta E<100$ meV の特性をもつ高分解能低エネルギー分光器として、エネルギー解析結晶を背面反射で用いる逆転配置型分光器は非常に優れた特性をもつことが知られている。本分光器は、生体物質の動的特性と機能解析を研究することを主たる目的にする。

４．１１．２　研究内容の概要

(1) 立体構造ダイナミクスのエネルギー範囲から見た中性子散乱概要

タンパク質の動的特性の時間、空間スケールは大変広く、時間軸では fsec から year にまで、空間軸では nm から m にまで及ぶ。これを 1 台の装置でカバーするのは不可能であり、焦点を絞る必要がある。これまでも、タンパク質の中性子非弾性散乱実験は行われてきた。そこで行われてきたエネルギー範囲とタンパク質動的特性は、すべて水素の非干渉性散乱強度の大きいことを利用して、数 100meV の spectroscopy、 数 10meV まで見て振動数分布を得る、Boson peak を見る数 meV の実験、準弾性散乱や確率的運動や自己拡散を求めるものが主流であった。タンパク質の動的特性と機能の関係で最も重要なものの一つに、hinge bend motion (蝶番運動)があるがこれの観測は皆無に近い。またその動的特性もほとんど判っていない。例えば、運動モードなのか確率的なものか。運動モードとして計算すると数 meV との予測もある。また、その運動特性上強い方向性を持っていることが期待されるので、干渉性散乱による assign が可能である。そこで、我々はほとんどその特性が判っていない hinge bend motion を定常的に観測できる装置を建設する。この運動が確率的なものである可能性もあるので、定常観測エネルギー範囲を 15meV から 10meV とする。これは同時に従来行われてきた、数 10meV まで見て振動数分布を得る、Boson 凝縮を見る数 meV の実験、準弾性散乱で確立的運動や自己拡散を求める実験も、従来の数 100 倍の測定効率が得られるものでもある。

hinge bend motion の中性子非弾性散乱測定は過去に何度か試みられているが、散乱断面積が大変小さいので、決定的なデータは皆無である。当該装置はこれを世界に先駆けて観測可能にするものでその意義は大変高い。これにより、酵素反応等のタンパク質の機能発現に原子レベルでの理解が加わり、機能解析への大きな寄与となる。(2) 研究の位置づけ

バイオテクノロジー分野ではヒトゲノム情報の解読完了により、現在はゲノムから実際につくられるタンパク質の機能解析が「ポストゲノム」として焦点となっている。日本でも「タンパク3000」プロジェクトにより今後数年で大量のタンパク質立体構造が決定されていくと予想される。しかし前述の通り、静的立体構造だけでは機能発現のメカニズムをすべて解明することは難しい。本装置は中性子非弾性散乱を用いたタンパク質の機能と関わる立体構造ダイナミクス研究を世界に先駆けて行うものである。世界最高強度のパルス中性子源を利用した逆転配置型分光器DYANA によりはじめて実現可能となる研究であり、タンパク質の機能解析へのおおきな寄与が期待できる。

また、関連する高分子物質の低分子物質の動的構造に関してもより微少な試料で測定可能になり、測定可能な物質の範囲が拡がり広範な研究が進められることが期待できる。

４．１１．３　建設する実験装置の概要

生物用非弾性散乱用分光器の構造は、エネルギー解析結晶を背面反射で用いる逆転配置型飛行時間法分光器であり他の形式の分光器にない優れた特徴を有する。

(1) 概略

生体物質の動的構造を研究することを主たる目的にした高測定効率の逆転配置型分光器DYANA は以下の特性を示すことが期待される。

(a) 特徴

逆転配置型結晶アナライザー採用による高エネルギー分解能($\Delta E/Ef$~0.5%)の達成

大面積ミラーの採用等による高検出効率

(同一線源で IRIS の約 80 倍以上、1MW 運転時約 500 倍以上)

３種類の結晶アナライザーの設置による広いエネルギー測定範囲（~4.5 桁）

Polarized Super Mirror による偏極解析測定

以上の特徴から、線源運転開始当初の弱いビーム強度の時点から十分な成果が期待される　"Day 1" 分光器と考えられる。

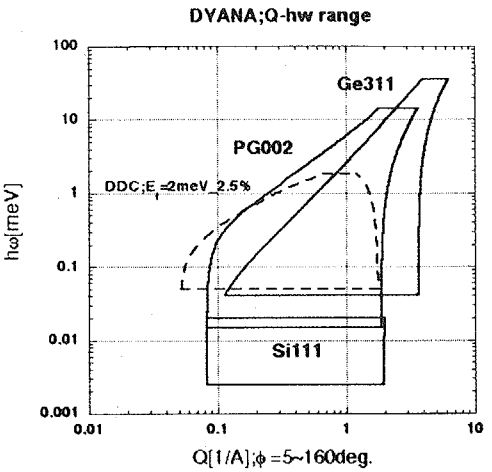
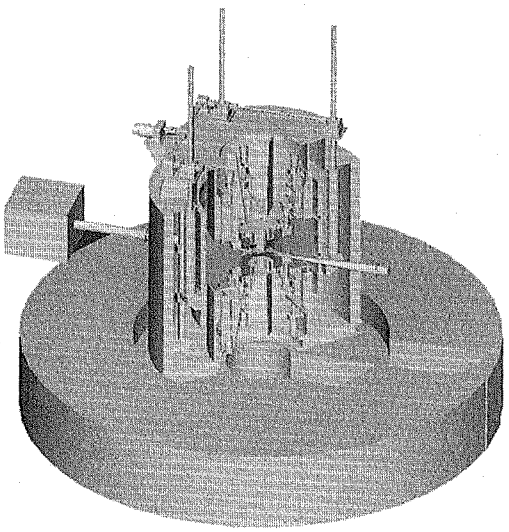


Fig.4.11.3-1 Covered Q-E space of DYANA. Comparison of DYANA and chopper spectrometers (Disk Chopper and Fermi chopper spectrometers).

4．１１．４　建設する実験装置の主な仕様



DYANA 分光器概念図

Fig.4.11.4-1 3D view of DYANA.

Table 4.11.4-1 Specification of DYANA.

Type	Indirect Geometry Crystal Analyzer TOF Spectrometer
Moderator	**Decoupled Cold liq.H_2**
L1 [m]	32
L2 [m]	1.8
Guide	Super Mirror Guide;3Qc
Solid Angle covered by Analyzer Mirror around Sample position [str]	1.20 π
Analyzer Crystal	PG(002) 、 Ge(311) 、 Mica(004)、 Mica(002)
Final Energy [meV] @θ_B=80deg.	1.874 7.247 0.8520 0.2130
Q Range[$Å^{-1}$] Scattering Angle[deg.]	0.08~1.88 0.12~3.69 0.06~1.26 0.03~0.63 5 ~ 160
Q Resolution [Å-1]	0.05 0.07 0.04 0.02
E Range[meV]	-0.30~14.0、-7.0~35.0、-0.150~0.500、-0.030~0.030
E Resolution [meV] ΔE/Ei [%]	15 40 5 1 (0.8%) (0.6%) (0.6%) (0.5%)
Surface of Moderator (a×b mm^2)	100×100
Sample Size (a x b mm^2)	10×10
Frequency [HZ]	25
Band width of Wave Length[Å]	4.95
Spatial Resolution at Counter (a ×b mm^2)	10×10
Filter	Cooled Be for PG(002)
T0 Chopper (Yes or No)	Yes、 25 Hz
Tail Cutter (Yes or No)	Yes、 25 Hz × 2
Detector	He3 proportional
Polarizer(In and Out)	Solar Super Mirror Polarizer

5．ミュオン科学実験施設

5．1　全体概要

日本は、歴史的にみて中間子科学との関わりが深く、湯川秀樹博士によって中間子の存在が予言された国として有名である。この新しい中間子（パイオン）は実際に発見され、大型加速器によって人工的に生成できるようになり、今ではパイオンや、パイオンが崩壊して生まれる正・負ミュオンが容易に得られる。日本でも、1980年に東京大学理学部中間子科学研究センター（現、KEK 中間子科学研究施設）のパルス状ミュオン施設において、世界に先駆けて陽子シンクロトロンからのビームを使ったパルス状ミュオン科学実験が始まり、幅広い研究がなされてきた。現在の陽子ビーム強度は 500MeV/5μA である。J-PARC 原研・高エネ研統合計画における 3GeV/333μA 陽子ビームを用いたミュオン科学実験施設が完成した暁には、現在の 400 倍にも至る大強度のパルス状ミュオンが生み出され、まさに次世代の科学研究が飛躍的に展開される。

ミュオン科学実験施設は、3GeV 陽子ビームを用いてパルス状ミュオンを生成することを目的として建設される。強度のみでなくその性質においても最高のビームを生成するための先端的なビームチャンネルの設計が現在進んでいる。ミュオン科学施設は、中性子科学施設の上流に位置し、中性子源に向かう陽子ビームライン上に串刺し状 10-20mm 厚の 2 種類のパイオン生成標的が設置される。その際、中性子グループとの話し合いで、この串刺し案の場合において、パイオン標的によるビームロスを10%以下を目処にすることでの合意が得られている。予算の都合上、ミュオン科学の第１期では、下流側にパイオン第１標的、第１標的に付随するスクレーパ群並びに１次陽子ビームラインが設置される。また、２次ラインとしては、超伝導ソレノイド磁石を用いた表面・崩壊ミュオンチャンネルが建設される予定である。ポート数としては、第１期には当初２ポートしか建設されないが、3 x 10^7 個/秒の表面ミュオン、1 x 10^6 個/秒の崩壊ミュオン(10-100MeV)など２種類の世界最強のパルスミュオンビームが得られる。Fig. 5.1-1 に、第１期のレイアウトを示す。

第２期には、第１標的から引き出す表面ミュオンチャネル、超低速ミュオンチャネルの完備に引き続き、上流に更にもう１つの標的を増設し、大強度ミュオンチャネルを建設する事を計画している。Fig. 5.1-1 に、第２期のレイアウトを示す

ミュオン科学実験施設は、物質・生命科学実験施設のミュオンサブグループとして、ミュオンターゲット及び NM（中性子-ミュオン）トンネル、及び NM トンネル内陽子ビームライン機器設計製作、２次ライン設計製作、建て家に関連して生ずる担当範囲の機器設計、製作についての責任分担を担っている。現在、パイオン標的近傍の陽子ビームライン、２次ビームライン、冷却水設備、電源ケーブル、空調、遮蔽ブロック等の配置・スペースを考慮し、整合性のあるトンネル内構造の詳細設計をとりまとめつつあるところである。最も重要な検討項目の１つは、遮蔽体の中に埋もれた形で設置される電源ケーブル・電磁石等から発生する 70kW を効率よく除熱し、且つトンネル内を負圧を担保するためのシナリオを構築することである。敷地境界での気体廃棄物の濃度を法令限度以下に担保することを前提条件に、検討が進められている。

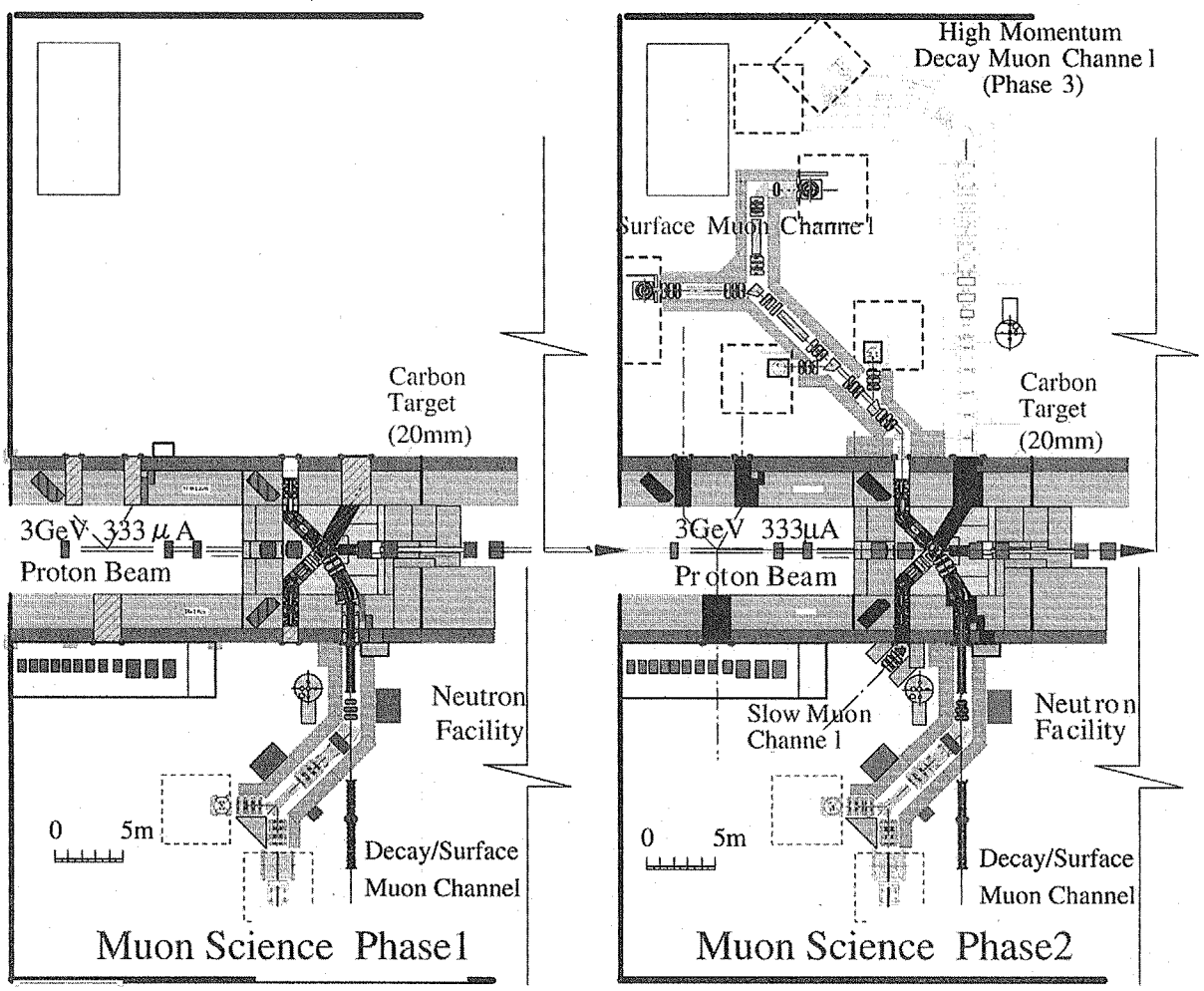


Fig. 5.1-1 Layouts of the J-PARC muon science facility at Phase I and Phase II.

５．２　ミュオン標的

５．２．１　標的チェンバーシステム

(1) 目的と基本概要

ミュオン科学は物質生命科学実験施設に属し 3GeV、333 マイクロアンペアの陽子ビームライン上にミュオン生成用の炭素標的を設置する。その下流には陽子ビームの散乱を止めビーム成形を行うスクレーパーを２機設置する。標的は床面より 1600mm の高さに設置される。大強度陽子ビームにより高度の放射化が予想され、人間による保守作業のためには約 2m の鉄遮蔽もしくは同等の遮蔽を必要とする。よって現在すべての保守作業は床面より 4m のメンテナンスエリアより遮蔽体上部から行われることとする。また標的は真空容器内に設置され、なおかつ保守を必要とするため 4m の高さに真空フランジを設け、ここから保守を行うこととする。標的は約 2m の遮蔽体ごと移動できる構造とする。今回、この標的と遮蔽体の集合体を標的アッセンブリと呼ぶ。標的アッセンブリは標的チェンバー内に設置された固定遮蔽体に挿入される構造とする。また、同様に散乱した陽子ビームをコリメートするためのスクレーパーも設置する。スクレーパーと可動遮蔽体の組み合わせをスクレーパーアッセンブリと呼ぶこととする。電磁石の配置等を考慮し、標的チェンバーには以下に定義する標的アッセンブリ１機及びスクレーパーアッセンブリ１機を、スクレーパーチェンバーにはスクレーパーアッセンブリ 2 機を挿入することとする。標的アッセンブリ等の保守交換については高度に放射化しているため、標的チェンバー上部にキャスクを設置し、その中に標的アッセンブリを引き抜き、天井クレーンによってホットセルに移動する。標的チェンバーシステム（Fig. 5.2.1-1）とはこれら標的チェンバー、スクレーパーチェンバー、標的アッセンブリ（Fig. 5.2.1-2)、スクレーパーアッセンブリ、固定遮蔽体一式である。

(2) 設計方針

1) ミュオン標的は炭素部の熱伝導の劣化を考慮し約半年に一度の交換作業を行う予定である。スクレーパーに関しては配管ロウ付け部の劣化を考え約 10 年に一度の保守作業を考えている。交換頻度を考慮すると標的に関しては標的、冷却水配管、標的支持材を廃棄し、可動遮蔽体等は再利用する。スクレーパーに関しては交換頻度の少なさを考え、可動遮蔽体を含め廃棄する。標的、スクレーパーは高度に放射化しているため作業員が近づき交換作業を行うことは非常に困難である。よって中性子グループによって製作されたキャスクと呼ばれる輸送用容器に遠隔操作で標的アッセンブリ、スクレーパーアッセンブリを吊り込み、標的アッセンブリは remote handling 室にて交換作業を行い、スクレーパーアッセンブリは廃棄される。これらを考慮して、標的チェンバーシステムを設計することは非常に重要である。

2) 標的に事故があった場合（熱伝導の劣化等)、真空を保持したまま予備標的に交換し、また完全に陽子ビームライン上から引き抜いた状況を作り出せるような標的上下機構を持つものとする。標的上下機構のストロークは 600mm を目安とし、標的上下機構自体の高さは 1000mm 程度を目安とする。標的の位置精度は 1mm であるとする。

3) 標的チェンバーシステムの要求到達真空度は $1x10^{-6}$ Torr であるとする。ただし、フランジの取り合いにはピローシールを用いることとしピローシールのリークレートとしては $1x10^{-7}$Torr l/s であるとする。また使用する真空排気システムとしては 1000l/s のターボ分子ポンプであるとす

る。

(3) 今後の問題点、課題

現在、概念設計は進行中であり、おおまかな設計は完成している。ただし、リモートハンドリングで交換し、真空を保持したまま移動することができ 1mm の精度で設置する標的に関してはさらなる検討が必要とされるであろう。

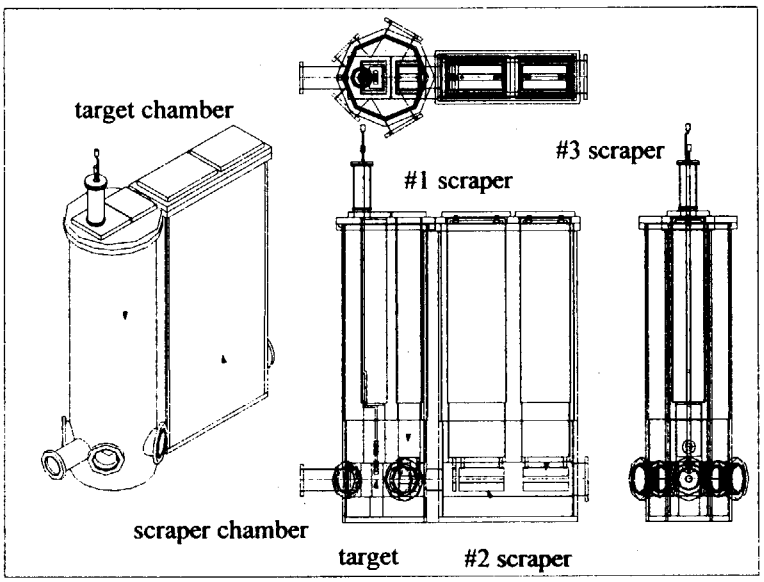


Fig. 5.2.1-1 Target chamber system

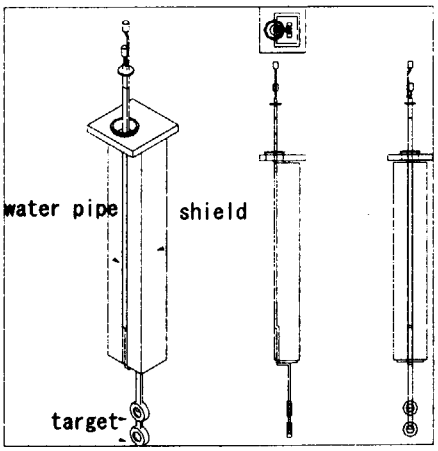


Fig. 5.2.1-2 Target assembly

５．２．２　ミュオン標的

(1) 目的と基本概要

ミュオン科学は物質生命科学実験施設に属し 3GeV333 マイクロアンペアの陽子ビームライン上にミュオン生成用のグラファイト標的を設置する。また ミュオン標的上では約 3.3kW の熱が発生し、この熱を除去するために標的周りに配置した冷却水配管によって間接冷却を行う。これらのミュオン標的に関わる諸問題を考慮し、標的の設計を行っている。諸問題としては静的特性、動的特性、冷却水の評価、事故時の解析等の評価を行っている。

(2) 設計方針

(a) 静的特性

1) 熱の問題

標的材質はミュオンの生成効率及び、下流の中性子への影響を考慮し、 20mm 厚のグラファイトを用いる。またビーム径を考慮しグラファイト標的は φ70mm の円盤状とし、その周りに配置された銅フレームによって間接冷却を 行う。グラファイト標的中心で発生した熱のほとんどは この銅フレームへの熱伝導によって取り除かれる。輻射の影響は計算上では 十分に小さいものとしている。陽子ビームが標的に衝突する際の発熱分布 及び DPA 値はミュオン科学の河村によって NMTC/JAM を用いて計算された。 総発熱量は約 3.3kW であり、そのうちのほとんどが中心の φ25mm に集中 している。DPA 値についても同様で中心部がもっとも高く、二週間で約 0.1dpa の放射線照射があることがわかった。 グラファイトの重要な物性として熱伝導率の中性子照射による劣化があることが丸山らによって研究されている。中性子照射が無い場合には常温で熱伝導率は 120W/m/K にも達する。しかし、温度上昇とともに熱伝導率は次第に低下してゆき 1600℃においては 50W/m/K にまで低下する。一方、中性子照射を 行った場合は温度上昇に伴い熱伝導率は上昇してゆく。これは中性子照射 によって切断された格子間の結合が温度によって回復するからと思われる。 中性子の照射量が大きくなるにともない熱伝導率は下降してゆく。0.25dpa の 照射量の元ですら 1000℃以下では 10W/m/K 以下となる。この値は 炭素の熱伝導率によって冷却を行う間接冷却のためには低すぎる値である。しかし、同時に熱伝導率は中性子照射を行う際の温度によっても変化する。400℃において中性子照射が行われた場合は 25W/m/K 程度まで上昇する。Fig. 5.2.2-1 に等方性黒鉛の熱伝導率の温度及び中性子照射の依存性を示す。これらを考慮して標的中心部には 0.82dpa の照射が 400℃で起きた場合の 熱伝導率、中心部以外には 0.02dpa の照射が 200℃で起きた場合の熱伝導率 を導入した。

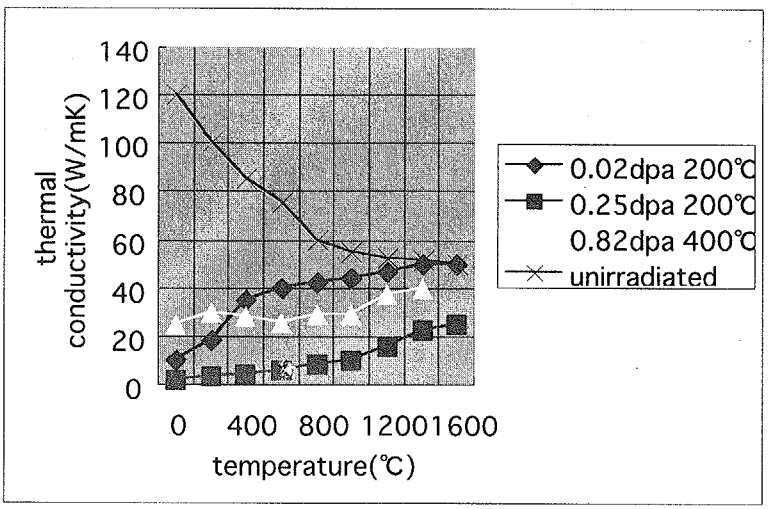


Fig. 5.2.2-1 Neutron irradiation effect of graphite

これらを元に有限要素法コード ANSYS を用いて計算してみるとステンレス配管を一周巻く程度では配管内面温度が非常に高温となることがわかった。よって現在は 3/8 インチ配管を三周程度巻くことを予定している。これらのモデルでの計算結果を Fig. 5.2.2-2 に示す。標的中心部での

温度は約1460℃となることがわかった。

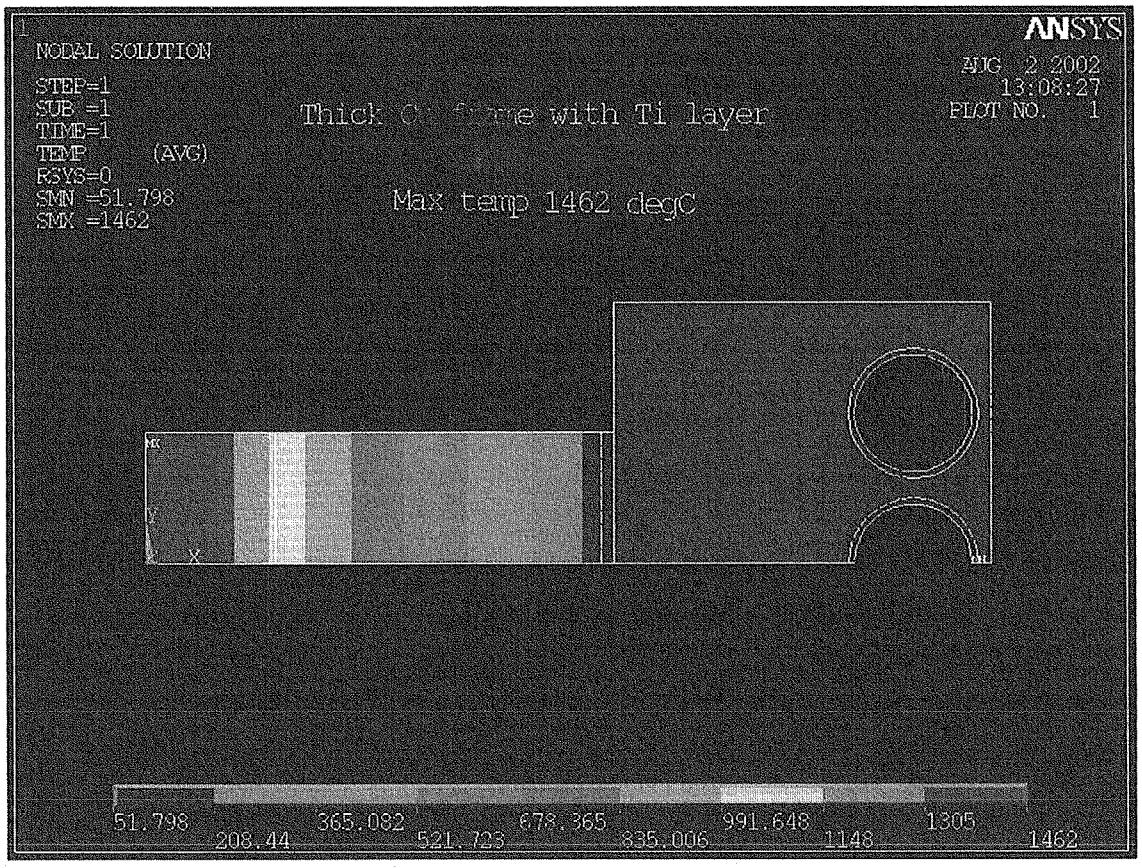


Fig. 5.2.2-2 Temperature distribution of muon target

(b) 応力の問題

グラファイト標的上では(a)で述べたように大きな温度勾配が発生する。また周辺には熱膨張係数の異なる金属が存在する。これらより大きな応力が発生することが予想される。これらを解決するために我々はチタン層をグラファイトと銅フレームの間に挿入することとした。チタンを選んだ理由は低膨張率、低ヤング率であるからである。グラファイトは引っ張り応力、せん断応力に対しての強さが小さいのであるが、チタン層を挿入することにより大幅に引っ張り応力、せん断応力を減少させることができた。次に引っ張り応力の分布図を示す（Fig.5.2.2-3)。

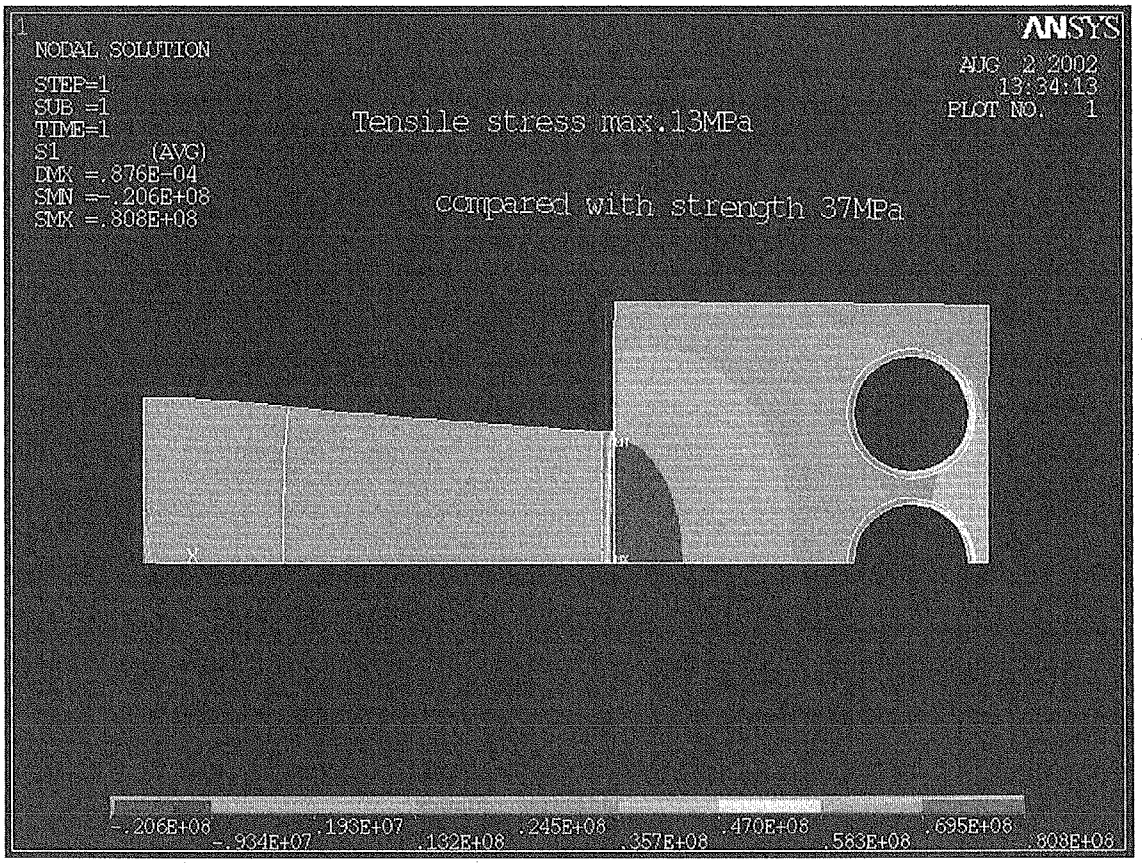


Fig. 5.2.2-3 Distribution of Tensile stress

(c) 動的特性

1) 熱伝播過渡応答

陽子ビームによって温度上昇した中心部が熱伝導で外周に向かって温度分布が広がっていく。この広がりは比熱、密度に依存する。 計算では主に以下の二点を評価した。

a. 約何秒で平衡状態に達するのか？？また平衡状態よりビーム停止が起きた時約何秒で常温に達するのか？？

b. 1パルス当たりの温度上昇の評価及び、パルス当たりの応力変化（平衡状態において）

発熱を以下のように仮定する。 静的評価 ～3500W の熱が一定に連続的に加わる。動的評価 ～ バンチ構造等は無視して $2x10^8$W の熱が 700ns の間ステップ関数的に加わる。(25Hz) ただし、この条件で計算を行うと a に関しては計算機の制約を大きく受ける。よって最初に a に関して連続的な発熱（3500W）を仮定し、計算を行い、(Fig.5.2.2-4) 後に b に関して上記の条件のもと過渡応答の評価を行った。

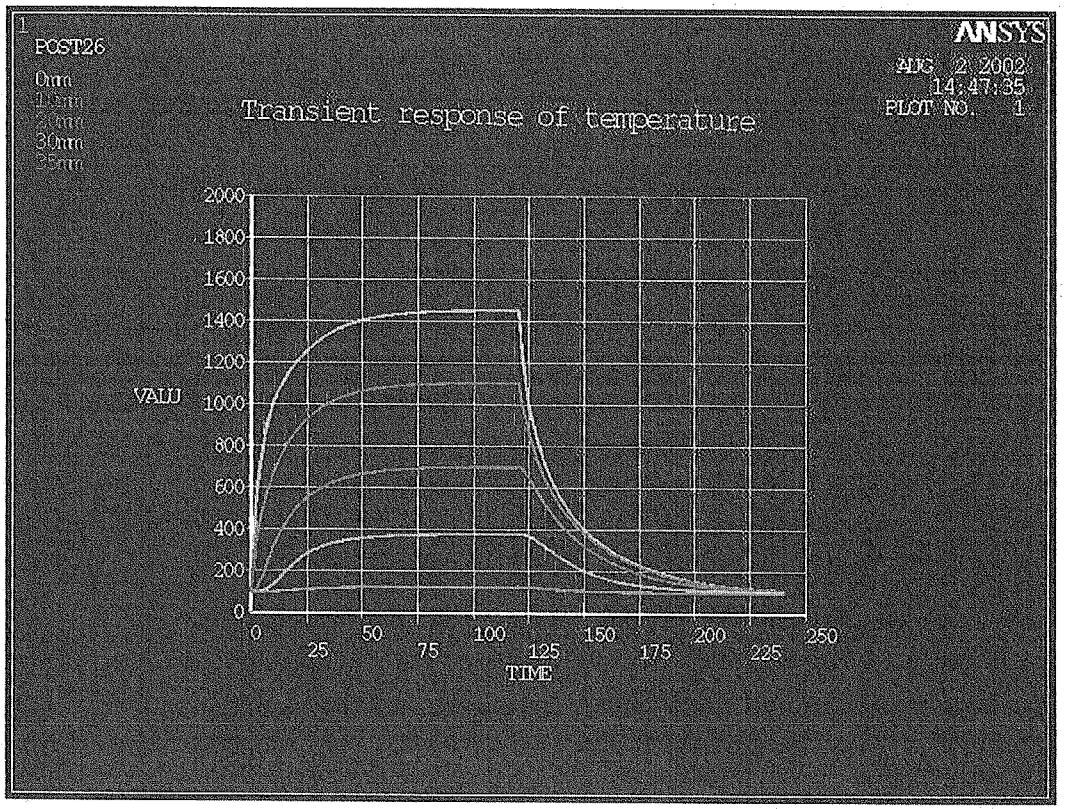


Fig. 5.2.2-4 Transient response in case of beam start ant beam stop

最高温（1450℃）に達するのに約 1 分かかることがわかった。熱伝導率や比熱の温度依存性によって静的状態より温度勾配がついている可能性も考えられたが、問題が無いように見える。またグラフからわかるように高温である中心部の方が下降速度は断然早いことがわかる。よって中心から外周に向かっての温度勾配は最高温の場合が最も高いことになる。応力に関しても問題とならないであろう。 またビーム停止から約 100 秒程度でほぼ常温となることがわかった。
続いて b の評価を行う。

結果ファイルを評価することによって以下のことがわかった。特に温度が最高となる標的中心に関して 1 パルス当たりの温度上昇を調べた。これらはその温度まで 3500W で加熱を行った後、パルス的な熱を付与することによって計算を行っている。

- 中心温度が約 100℃（0 秒）～1 パルスでの温度上昇は約 11℃。 次のパルスまでにほとんど温度は下降しない。
- 中心温度が約 450℃（2 秒後） ～1 パルスでの温度上昇は約 8℃。 次のパルスまでに 2℃ほど温度下降。
- 中心温度が約 1100℃（15 秒後）～1 パルスでの温度上昇は約 7℃。次のパルスまでに 6℃ほど温度下降。
- 中心温度が約 1450℃（80 秒後 平衡状態）～1 パルスでの温度上昇は約 6℃。次のパルスまでに 6℃ほど温度下降。

常温より高温の方が比熱が大きいため 1 パルス当たりの温度上昇は高温の方が小さいが次のパ

ルスまでの温度下降に関しては標的上の温度勾配が大きくなるために温度下降も大きくなるという予想通りの結果となった。1 パルス当たりの温度上昇及び下降は 6℃であった。また、これによる応力変化量は ANSYS によると 0.1MPa と非常に微少な値を示した。

2) 衝撃波

陽子ビームによる衝撃波の発生過程を簡単に述べる。 陽子ビームが炭素標的に衝突すると、瞬間的な発熱が発生する。これにより炭素は温度が上昇するのだが、瞬間的であるがために定積比熱に従い温度上昇する（膨張はしない)。定積のまま温度が上昇するために中心部に圧力上昇を生み出す。この圧力が外周に向かって広がって行くものが衝撃波である。ミュオン標的の場合に温度上昇を見積もる。φ20mm に 3.5kW の熱が集中していると仮定すると、炭素の重量は体積 V=6.28 (cm^3) 、密度 r=1.82 (g/cm^3) であるから W=11.42 (g)である。 ここで定積比熱を求める。

（一般的に与えられている比熱は定圧比熱）

$C_p-C_v=TVa_v^2/k$ (ネルンストーリンデマンの式)

T ; 絶対温度 、V ; 比体積 、a_v ; 体膨張係数、k ; 等温圧縮率 であるから $V=0.55\times10^{-6}$(m^3/g)線膨張係数は 4.8ppm だから $a_v=14.4\times10^{-6}$ （K^{-1}）また k は体積弾性率の逆数であるので $k=3(1-2n)/E=1.4\times10^{-10}$ よって $C_p-C_v=Tx4.1\times10^{-7}$ 定圧比熱を炭素材料のカタログから調べると

温度（℃）	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
定圧比熱（J/K/g）	0.75	1.10	1.40	1.60	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20

定積比熱と定圧比熱の違いは 1400℃ですら 0.05%程度の違いしかない。おそらく炭素の場合はどちらを使っても問題ないであろう。（銅の場合は 10%程度違う）これらより 1 パルス当たりの温度上昇を見積もると、ビームロスは 3500(J/s)であるので 140(J/pulse)より $\Delta T=140/2.1/11.42=5.6$（℃） @1400℃これにより発生する応力はnをポアソン比、aを線膨張係数とすると $P=E\,a\Delta T/(1-2\,n)=0.6$ (MPa) となる。

炭素の応力強さはもっとも小さなせん断応力ですら 10MPa であるので問題とならないであろう。

3) 冷却水の評価

ANSYS の評価において熱伝達係数を使用しているが、この係数の決定は次の評価によっている。まず、物質生命科学実験施設より与えられる冷却水圧力差を 5kgf/cm^2 であるとして流速を求める。3/8 インチ、10m の引き抜き直管を仮定し、Darcy-Weisbach equation に代入すると V=2.6 (m/s) を得る。これは流量 10l/min に相当する。ただし、実際には配管の屈曲、オリフィスの設置を考え 5l/min 程度とするのが適当であろう。円管内乱流における水と熱伝達係数の関係にはプラントル数及びレイノルズ数によりさまざまな公式が考えられているがおおよその近似として以下の式を用いる。ここで熱伝達係数を h (kcal/m^2h℃)、 水の平均温度を t (℃)、単位面積当りの重量流量を G (kg/m^2h)、配管直径を D(m)とすると

$$h=(0.0075+0.000093t)G^{0.8}/D^{0.2}$$

これより h=3400(kcal/m^2h℃)=4000(W/m^2℃)を得る。

また、流量が低下していった際に配管表面上のの液膜が消失するドライアウトが発生する流量

を評価すると 0.43l/min である。この流量以下となると急激に配管内面の熱伝達係数が低下する。

4) 事故時の解析

次に万一の事故として冷却水が停止した場合を想定してインターロックシステムについて考える。計算モデルとしては以下のような 20mm 厚、半径 35mm の黒鉛周辺に 20m 厚、半径 50mm の銅フレームを巻いた単純なものである。(Fig.5.2.2.5) また初期条件として常温から銅フレーム外表面を 100℃に固定し黒鉛の中心部φ20mm の部分に 3.5kW の熱を与えた。約 60 秒で最高温に達し平衡状態となる。120 秒間加熱しつづけた後、外表面の冷却（100℃という拘束条件）を止める。この状態で 120 秒間加熱し続けた時に黒鉛中心部、黒鉛-銅フレーム界面、銅フレーム外表面の温度経過をグラフで表した。(Fig. 5.2.2-6)

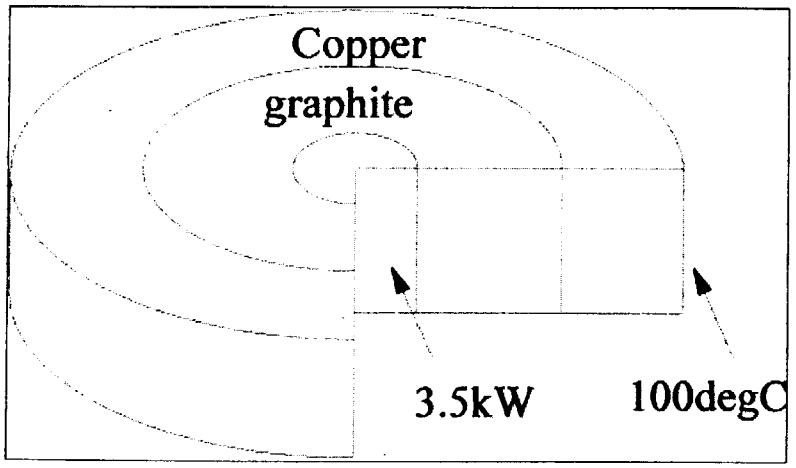


Fig. 5.2.2-5 Simple model

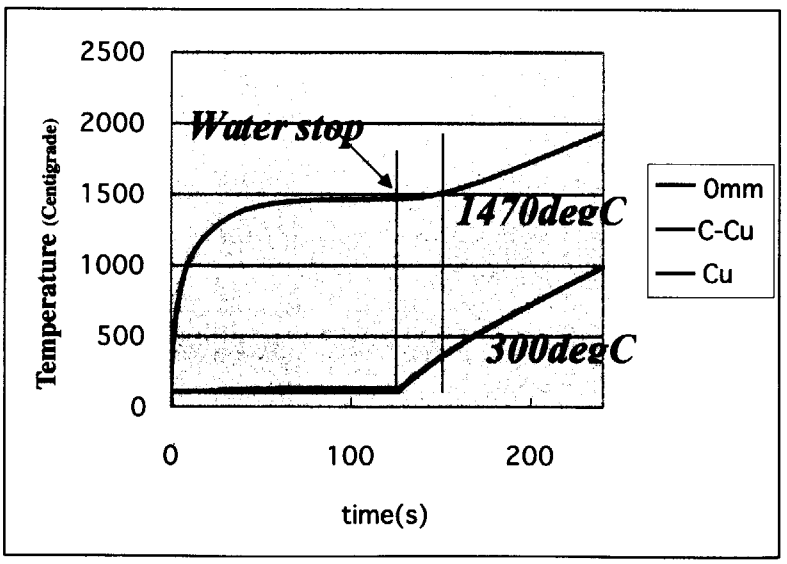


Fig.5.2.2-6 Temperature in case of water stop

まず、標的に関係する監視項目としては冷却水流量、冷却水温度、フレーム温度、(黒鉛温度)、真空度がある。冷却水が停止した場合、流量計で検知できればビームを停止することができ問題

とはならないであろう。冷却水温度も異常があり検知できれば問題なく停止できるであろう。ただし、なんらかの要因でこれらが検知できなかった場合を考える。先ほどのグラフを参照すると、

① 冷却水が停止すると銅フレーム、黒鉛-銅フレーム界面の温度は即座に上昇するが黒鉛部はゆるやかに温度上昇していく。インターロックをかける温度は今後の検討事項ではあるが仮に銅フレームが 300℃を超えたときをビーム停止時とするとこのとき標的中心は 1470℃である。またこのときは冷却水停止後、約 20 秒後である。

② さらにこれでも検知できなかった場合は徐々に温度上昇し、銀ロウの融点 680℃となる。このときには真空度が劣化し、検知することが可能であろう。このときの標的中心部の温度は 1660℃である。冷却水停止後 68 秒後である。

③ 冷却水停止後ビームを止めない場合は約 2 分後に銅フレームが溶融を始めるであろう。このときの黒鉛中心部の温度は 1930℃である。黒鉛は溶融はしていないが蒸気圧により真空度が劣化していることが予想される。

5) まとめ

仮に冷却水が停止した場合に冷却水停止を検知できなかったとしても、約 20 秒後に銅フレームの温度で検知でき（300℃と設定すれば）このときの黒鉛温度は約 1470℃である。また 68 秒後にはロウ材の溶融が発生し、このときには真空度の劣化が起こる。よって実際に銅フレームの溶融が始まる二分後までには陽子ビームを停止することが可能であろう。またこのときになっても黒鉛は溶融しないであろう。

(3) 今後の問題点、課題

(a) 標的の試作

これまで理論計算により理想的な標的モデルを検討してきたが実際に製作可能かどうかを評価するために標的の試作を行った(Fig. 5.2.2-7 参照)。現在のところ銅フレームの中にステンレス配管を HIP 加工で接合することは成功している。ただし、チタン層を黒鉛に銀ロウ付けする際に若干の隙間が見られることがある。これはおそらくロウ付けの工程の改良によって解決することができるであろう。

(b) 標的の加熱

またこれらの製作した標的を実際に加熱してみることを計画している。計算上は成立すると考えられるが、実際には予期せぬ問題がある可能性もある。また特に冷却水と配管との熱伝達係数は計算と実際には差異が出る可能性は十分に予想される。同様に材質間の界面の熱伝達も気になる部分である。現在は電子ビームによる加熱を計画している。

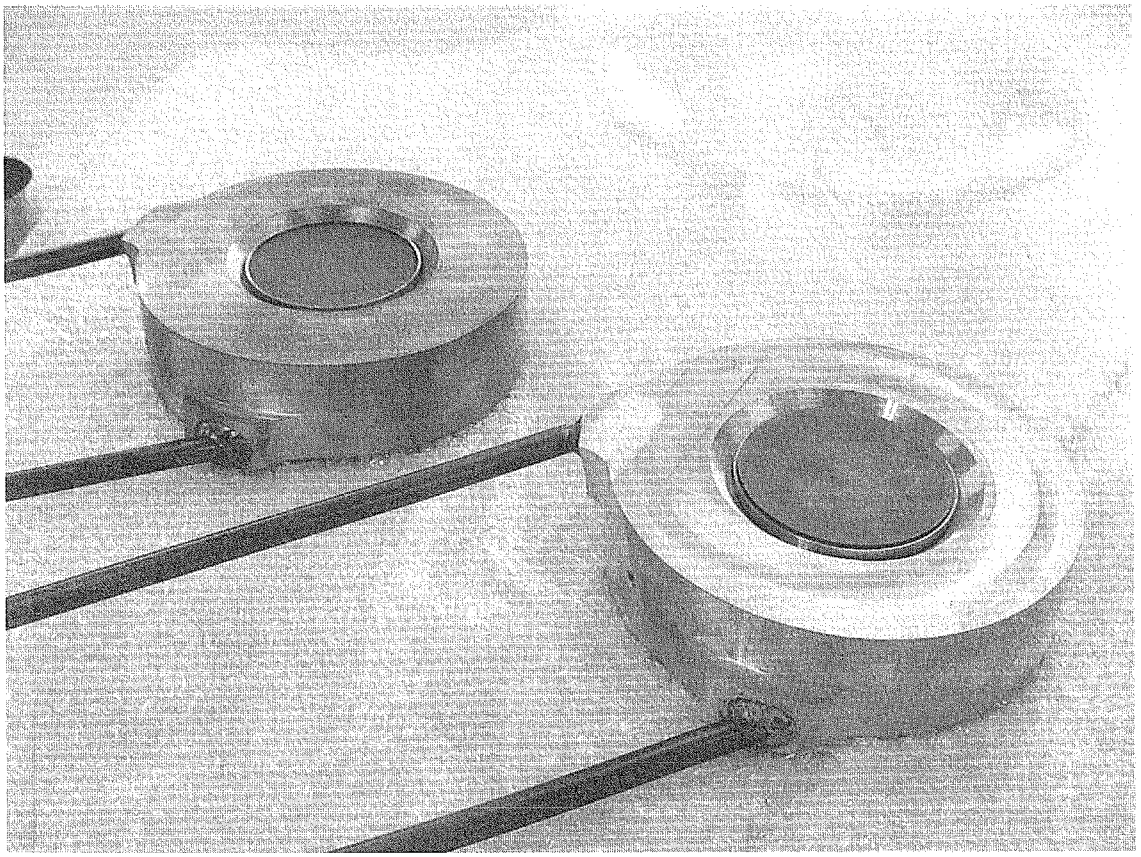


Fig. 5.2.2-7 Test pieces of muon target

５．３　ミュオン周辺建家構造・遮蔽体構造

ミュオン周辺建家構造は、陽子ビームをミュオン生成標的に照射し、さらに下流に有る中性子標的に陽子ビームを安全に導き、ミュオン標的から出るパイオンおよびミュオンを集めて、ミュオンビームを作り、ミュオン実験を効率的かつ安全に行うことを目標として設計される。建設と同時に運転保守も含めて、合理的な設計が求められる。

５．３．１　ミュオン周辺建家概要

ミュオン科学の建家構造は物質生命科学研究施設の建家の一部であり、基本的に東西に別れた２つの実験室と陽子ビームラインおよびミュオン標的が設置される棟屋部分からなっている(Fig.5.1-1)。棟屋の中は空調冷却機械が設置される Ｍ１トンネル部分と、ミュオン標的およびミュオンビームラインさらには中性子標的までのビームダクトおよび電磁石系が設置される Ｍ２トンネル部分に別けられる。建築的には Ｍ１トンネルと Ｍ２トンネルは物質生命科学建家の棟屋の一階部分に設けられ、二階部分にあたる大型機器取扱作業室と空間的に一体であり、可動遮蔽体で区画される。大型機器取扱作業室はミュオン施設から中性子科学実験施設まで一体の空間を占め、大型クレーンが設置される。ミュオン標的系、中性子標的系、生体遮蔽系、ビームライン輸送系（電磁石、ダクト、真空装置）などの設置（建設時)、保守（建設後）などに使用される。

東西に別れた実験室には、ミュオンビームを導くための二次ビームライン（ミュオンビームライン）が設置されミュオンビームの出口にはそれぞれにミュオン実験装置の置かれる実験ポートが置かれる。またビームを輸送する為の電磁石電源等も実験室内に設置される。

東西の実験室（第一実験ホールと第二実験ホール）は物質生命科学建家の実験ホールの一部として考えられており、ミュオン部分の隔壁等は設けず中性子実験装置群とミュオン実験装置群の間での自由な行き来ができる様考慮されている。実験室は常時（運転中）も実験者（放射線従事者）が立ち入りことが想定されている。

また建物の外は一般区域として、想定されており、建家構造遮蔽体構造は空間線量的にこれを担保できるように設計される。詳細は８．２．３項を参照していただきたい。

５．３．２　Ｍ１トンネルとＭ２トンネル

棟屋部分と東西の実験エリアとは建築的に１m 厚の壁で区劃されており、二次ビームラインを取り出すための貫通部分があいている。第一標的からは４本の二次ビームラインが、また将来使用されるであろう第二標的からは２本の二次ビームライン用の貫通口が開いている。さらに加えて、トンネル内の二次ビームライン電磁石への電流を供給する為の電線の貫通口が設置されている。実験エリア内および建物の壁外の放射線の空間線量を基準値以下に押さえるために、ミュオン標的およびその下流の陽子ビームラインからの放射線遮蔽のために、Ｍ２トンネルはコンクリートを厚く打設した建築構造とし、遮蔽厚が不十分な部分は鉄遮蔽体をコンクリート内部に埋め込む構造としている（Fig.5.3.2-1)。

また Ｍ２トンネルの上方向には FL４m のところにメインテナンスの為の高さ２m の空間を設ける。その上方向 FL６m から FL１０m の間に可動コンクリートブロックを４m 分重ねて大型機

器取扱作業室の天井方向への遮蔽を行う。遮蔽厚の不十分な部分には可動鉄シールドを設置する。

Ｍ１トンネルには当面標的を設置せず、Ｍ２トンネルの空冷装置、Ｍ１の空調機器がおかれ、陽子ビームロスは陽子ビームラインの一般的なガイドラインである１w／m のロスを見込んでコンクリート壁厚４m で設計されている。二次ビーム貫通口は可動コンクリートブロックで遮蔽しさらに空気の完全遮断を行う。二次標的設置時には十分な厚さの鉄遮蔽ブロックを設置できる空間が設けられており、また床耐荷重も考慮された設計となっている。上方向には Ｍ２トンネルと同様にFL６mからFL１０mの間に４m分の可動コンクリートブロックを設置する。

放射化される空気をビームライントンネルに閉じ込めるために、Ｍ１および Ｍ２トンネルからミュオンビームラインが実験エリアへ導かれる壁の貫通部分はフランジ構造とし空気の完全遮断を目指す。またトンネル内のミュオンビームライン電磁石に電力を供給するケーブルの貫通孔も密閉構造とする。

また Ｍ２および Ｍ１トンネルから大型機器取扱い室への空気遮断の為にコンクリート遮蔽の上にシートを設置する。このシートはコンクリートの構造体にクイックジョイントで押さえ付ける構造とする。

Ｍ１トンネルとＭ２トンネルの隔壁および非常扉は密閉構造とする。

５．３．３　実験エリア

東西の実験エリアに置かれる二次ビームラインは電磁石によるビームの輸送系であり、収束させるための四重極電磁石と曲げるための偏極電磁石から構成されており、必要に応じて電子とミュオンを分離する静電セパレーターや連続して来る二つのミュオンパルスを分離するキッカー電磁石等が付加される。

これらのビームラインはコンクリート遮蔽ブロックで周囲をかこみ、放射線遮蔽を施し、遮蔽体表面での線量が基準値をこえないようにする。特に実験ポートはコンクリートブロック、金網等で区画し実験ポート外での線量が基準値をこえないようにする。このために二次ラインが予定されている区画には十分な床強度を予定しておく。第二実験ホールには超伝導ソレノイドを含んだ二次チャネルが予定されておりそのための冷却系の配管の為に床ピットを設ける。

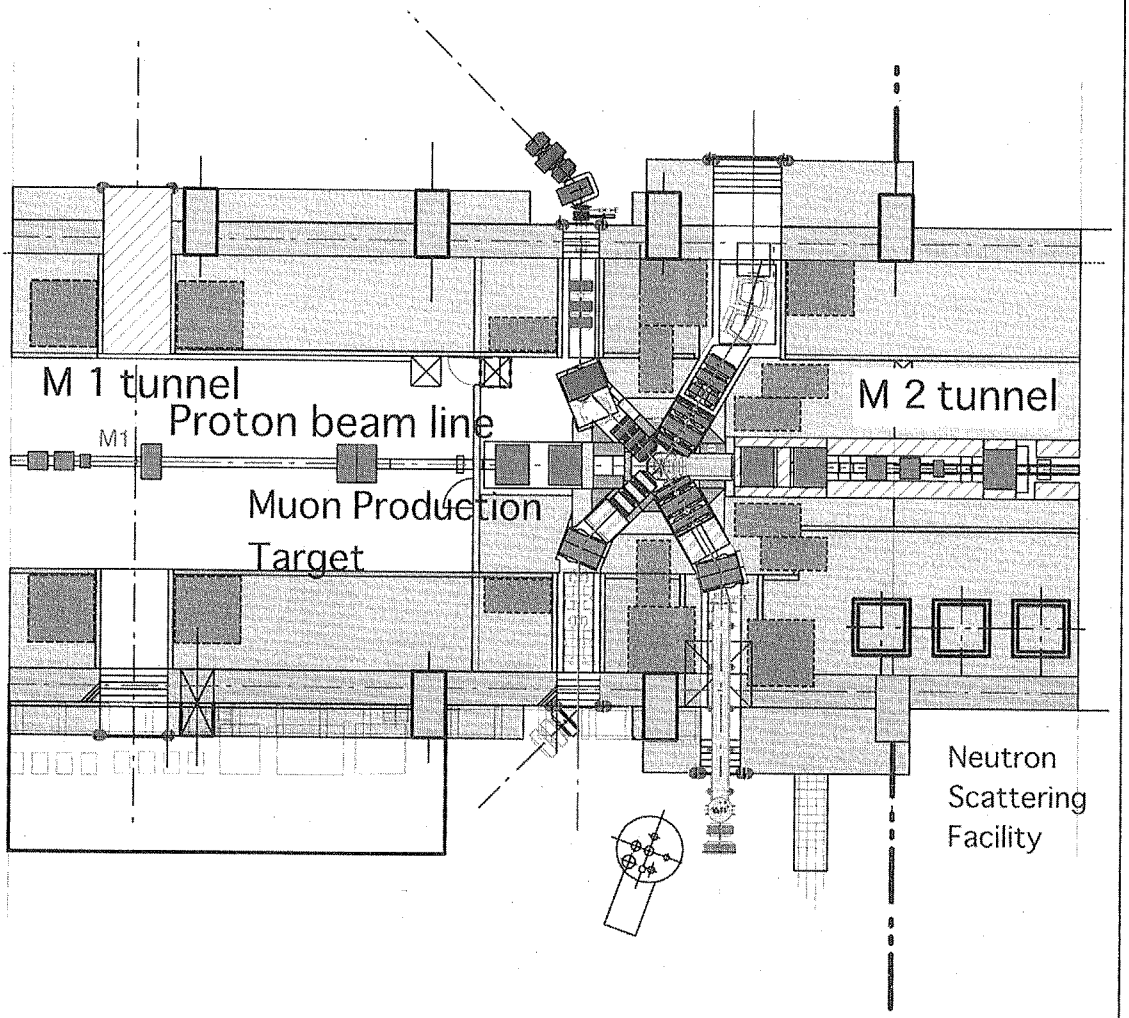


Fig. 5.3.2-1 Iron shield imbedded in building concrete structure

５．４　２次ビームライン

５．４．１　２次ビームラインオプティクス

５．４．１．１　概要

J-PARC ミュオン施設において特に、建設の早期実現が望まれている、汎用超伝導ミュオンチャネル、表面ミュオンチャネルについて現在までの技術的検討特に光学設計について述べる。また最後に実際の超伝導ソレノイドについての概略を記載する。本セクションでは、各チャネルの概要と予想される、ミュオン強度を最初にまとめておく。

(1) 汎用超伝導ミュオンチャネル

汎用超伝導ミュオンチャネルは標的前方 60 度方向からビームを取り出し、ミュオン実験施設の南西部分に展開される（Fig. 5.4.1.1-1 参照)。その主要な構成は１）パイオン入射系、２）超伝導ソレノイド、３）ミュオン輸送系の３つの機器に分類される。

a) パイオン入射系

パイオン入射系はパイオンあるいは表面ミュオンの取り込みのための四重極電磁石三重項および、運動量分析のための偏向電磁石から構成される。四重極電磁石三重項は標的より 65cm の位置に設置され、取り込み立体角は 65msr である。それに続く偏向電磁石は最高で 200MeV/c の運動量を持つパイオンをソレノイドに導く。

b) 超伝導ソレノイド

超伝導ソレノイドはボア半径 6cm、長さ 50cm の超伝導コイル 12 個から構成され、最大 60kG の磁場を発生することが可能である。この高磁場中でパイオンは進行方向と垂直面内では閉じ込められその大部分（60-90%）がソレノイド中でミュオンへ崩壊する。この崩壊によって生じたミュオンもソレノイド磁場で閉じ込められることにより、高い効率でミュオンビームとして取り出すことが可能となる。

c) ミュオン輸送系

ミュオン輸送系はソレノイド直下でのミュオンビーム取り込みのための四重極電磁石三重項、ミュオン運動量分析用偏向電磁石、DC セパレータ（ミュオンと電子の分離)、
中間四重極電磁石三重項、輸送用偏向電磁石（あるいはマグネティックキッカー＋セプタム電磁石）および最終四重極電磁石三重項から構成される。

この輸送系では最大 120MeV/c のミュオンビームが輸送可能であり、マグネティックキッカー＋セプタム電磁石が採用された場合には同時に２つの実験を行うことが可能となる。

ミュオン強度

表面ミュオン	30MeV/c ($\Delta p/p$=4%)	3.0×10^{7}/s
崩壊正ミュオン	60MeV/c ($\Delta p/p$=10%)	4.8×10^{6}/s
崩壊正ミュオン	120MeV/c ($\Delta p/p$=10%)	2.2×10^{7}p/s

崩壊負ミュオン	60MeV/c (Δp/p=10%)	1.4×10^{6}/s
崩壊負ミュオン	120MeV/c (Δp/p=10%)	1.0×10^{7} /s

(2) 表面ミュオンチャネル

表面ミュオンチャネルは標的後方 45 度方向からビームを取り出し、ミュオン実験施設の北東部分に展開され４つの実験ポートで同時に実験が行えるように構成される(Fig. 5.4.1.1-2 参照)。

a) 表面ミュオンの取り込みのための四重極電磁石三重項は標的より 65cm の位置に設置され、取り込み立体角は 40msr である。続いてミュオン運動量分析用偏向電磁石、中間四重極電磁石三重項がトンネル内に設置される。
b) 同一運動量を持つミュオンと電子を分離するための DC セパレータが続いて設置される。この DC セパレータは保守性の容易さから実験室内に設置されることとなる。
c) パルス電場キッカーとセプタム電磁石が各ポートに対応して設置され、各々の実験ポートに単一バンチのミュオンビームを輸送する。
d) 後方の２つのポート部へのビームラインにはスピンローテータを設置し、ミュオンスピンの進行方向に対する向きが 90 度まで自由に変えられることとする。

ミュオン収量

表面ミュオン	30MeV/c (Δp/p=8%)	1.0×10^{7} /s	（各ポートごと）

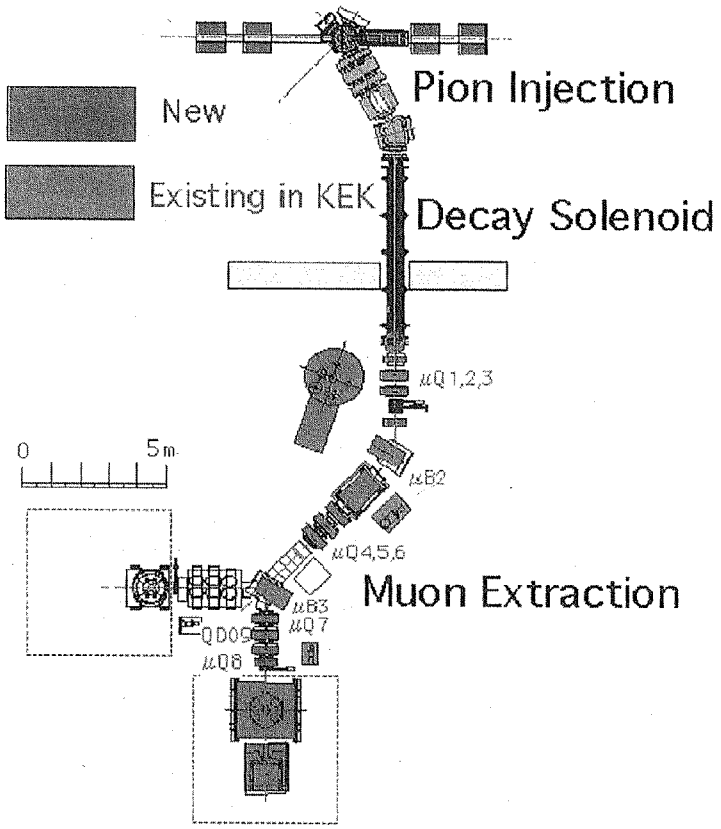


Fig. 5.4.1.1-1 Layout of the superconducting muon channel.

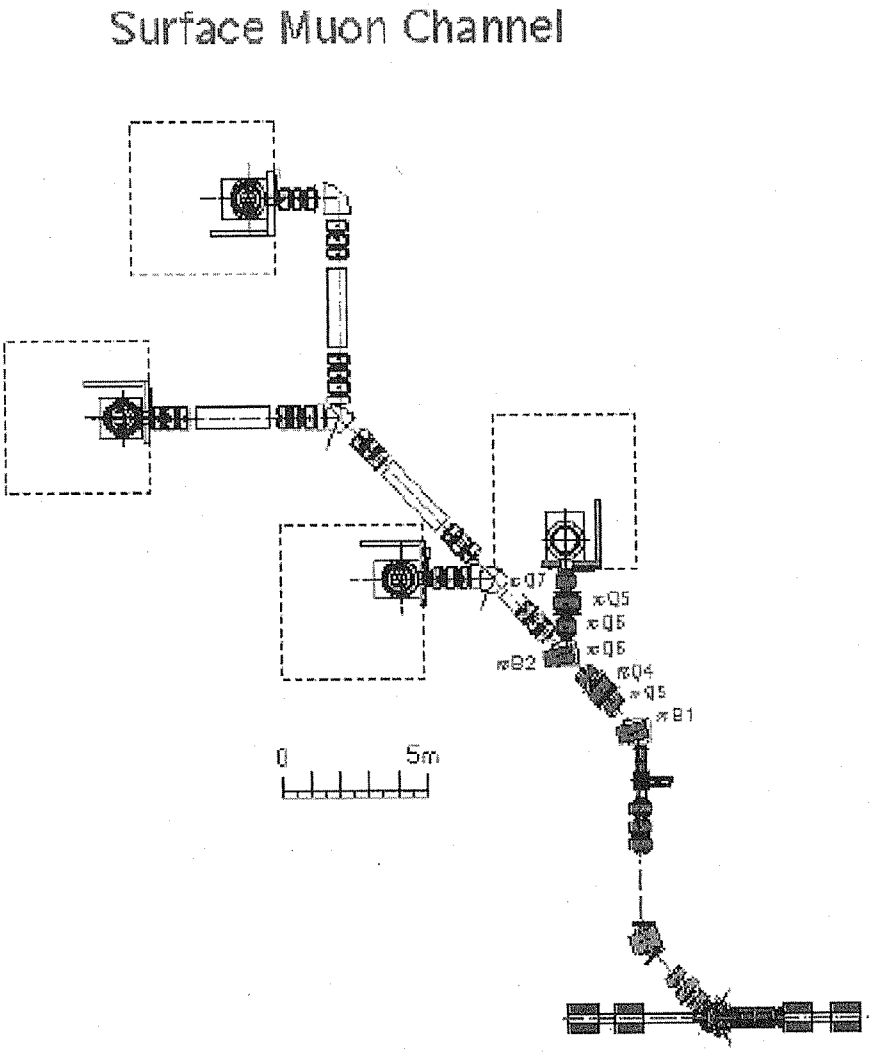


Fig. 5.4.1.1-2 Layout of the surface muon channel.

５．４．１．２　光学計算

上記概要に述べた各チャネルについての光学設計について以下に要点を記載する。実際の設計にあたっては、軌道計算コードとしてスイス PSI 研究所の U.Rohrer 氏によって改良が進められた PSI Graphic Transport および不安定粒子の崩壊過程を含むモンテカルロシミュレーションコードとして PSI Decay Turtle を使用した。

(1) 汎用超伝導ミュオンチャネル

a) パイオン入射系

パイオン入射系はパイオンあるいは表面ミュオンの取り込みのための四重極電磁石三重項および、運動量分析のための偏向電磁石から構成される。四重極電磁石三重項は標的より 65cm の位置に設置される、Q１電磁石のボア径は 250mm および Q２、Q３電磁石のボア径は 300mm と大きくすること、それに続く偏向電磁石のウエッジフォーカスを生かすことで取り込み立体角 65msr を達成する。また偏向電磁石は 200MeV/c の運動量を持つパイオンをソレノイドに導くように設計されこれにより後述するように最大限 120MeV/c の後方崩壊ミュオンの発生が可能となる。Fig. 5.4.1.2-1 に Transport による計算結果を示す。

b) 超伝導ソレノイド

超伝導ソレノイドはボア半径 6cm、長さ 50cm の超伝導コイル 12 個から構成され、最大 60kG の磁場を発生することが可能である。この高磁場中でパイオンは進行方向と垂直面内では閉じ込められその大部分（60-90%）がソレノイド中でミュオンへ崩壊する。この崩壊によって生じたミュオンもソレノイド磁場で閉じ込められることにより、高い効率でミュオンビームとして取り出すことが可能となる。後述するミュオン輸送系のパラメータと決める際の基礎資料としておよびミュオン強度の評価のために Decay Turtle を用いてパイオン入射部＋ソレノイド系のパイオン崩壊過程を含むモンテカルロ計算をおこなった。Fig. 5.4.1.2-2～Fig. 5.4.1.2-4 に典型的な例として入射パイオンの運動量が 200MeV./c の場合のソレノイド出口でのミュオンビームのプロファイル、広がり角、運動量分布について示す。

上記計算結果より 200MeV/c のパイオンを入射した際のソレノイド出口でのミュオンビーム径は約 40mm、広がり角は 100mrad 程度であることがわかる。また 200MeV/c のパイオンが崩壊することで確かに 120MeV/c の後方崩壊ミュオンが発生することが示される。

ソレノイド出口でのミュオンへの変換効率は以下のようにして求められる。まず J-PARC ミュオン使節における汎用超伝導ミュオンチャネルにおいてはパイオンの偏向角度が 30 度と、現在運転中である KEK-MSL,RIKEN-RAL のそれに比べて小さいためソレノイドに入射するパイオンの運動量分布が大きくなることが予想される。このため崩壊ミュオンの偏極度が小さくなる可能性がありその評価が必要となる。またミュオンへの変換効率を評価しておくことで実験エリアでのミュオン強度を推定することが可能となる。したがって、実際の条件でどの程度までパイオンが取り込まれ、ミュオンに変換するかを RIEKN-RAL の場合（60 度偏向）と J-PARC の場合（30 度偏向）についてシミュレーションをおこなった。実際には 10^5 個のパイオンを決められた立体角中に発生させ、運動量広がりを変化させながらソレノイド出口でのミュオン発生効率を比較す

ることでどの程度の運動量広がりまで取り込めるかを調べた。

Fig. 5.4.1.2-5 からわかるように J-PARC の場合（30 度偏向）の場合は運動量で±10%までがソレノイドに取り込まれミュオンに変換することになり、RIEKN-RAL の場合（60 度偏向）に比べて約２倍の効率となる。一方崩壊ミュオンの偏極度を調べるために一旦入射パイオンの運動量分布を０％と仮定して運動量を少しずつ-10%から+10%まで変化させながら 120MeV?c 付近のミュオンが後方崩壊によるものか前方崩壊によるものかの割合を調べた。その結果予想される崩壊ミュオンの偏極度は約 75%程度であり、これは現在の KEK-MSL、RIKEN-RAL に比べて若干低い。ただし表面ミュオンの場合は当然ながら 100%程度の偏極度が期待できる。

実際の実験にあったてはミュオンの運動量は実験条件でいろいろに変わるものであることからその収量を予想するために上述した方法でパイオン入射運動量を替えながらソレノイド出口でのミュオンのビームプロファイル、広がり角を調べる必要がある。

Fig. 5.4.1.2-6 はその結果であり、ビームプロファイルはほとんど運動量依存性を持たないが、広がり角は入射パイオンの運動量が下がるにつれて広がり、ミュオン輸送系に取り込まれる割合が低くなることが示される。

c) ミュオン輸送系

ミュオン輸送系はソレノイド直下でのミュオンビーム取り込みのための四重極電磁石三重項、ミュオン運動量分析用偏向電磁石、DC セパレータ（ミュオンと電子の分離）、
中間四重極電磁石三重項、輸送用偏向電磁石（あるいはマグネティックキッカー＋セプタム電磁石）および最終四重極電磁石三重項から構成される。

この輸送系では最大 120MeV/c のミュオンビームが輸送可能であり、マグネティックキッカー＋セプタム電磁石が採用された場合には同時に２つの実験を行うことが可能となる。現段階ではこれらの電磁石系はすべて現有の KEK-MSL の崩壊ミュオンチャネルの再利用が仮定されており、光学設計もこの方針に準じておこなわれた。Fig. 5.4.1.2-7 に表面ミュオン（運動量 30MeV/c）の場合の計算結果を示す。

この結果からソレノイド出口で 40mm 程度であったビームサイズが 60mm 程度になることが示されている。

次にミュオンビーム強度の評価方法についてパイオン入射運動量が 200MEV/c の場合について計算方法を記載しておく。

陽子ビーム	333mA=	2.1×10(e15) /s
炭素標的	2.0cm 厚 比重 2.25g/cm^3	
	したがって標的中の炭素原子核数は	
	6.0×10(e23)×2.0×2.25/12=	2.25×10(e23) /cm
Positive (Negative) Pion 生成断面積@60° (in Lab.)		13(6) mb/str/MeV
取り込み立体角		65mstr
パイオン取り込み運動量幅 ±10%		33MeV
ソレノイド出口でのミュオンへの変換効率		5.2%

したがってソレノイド出口でのミュオン強度は

2.1×10(e15)×2.25×10(e23)×12×10(e-30)×65×10(e-3)×40×0.052=

7.7×10(e8)/s

ミュオン輸送系の効率

ソレノイド出口でのミュオンの運動量分布 ～120MeV/c

取り込み可能な運動量広がり 8%

ソレノイド出口でのミュオンビームの広がりが100mradであり取り込み角が

70mrdであることを考慮して 50%

輸送効率は 70%

したがって実験エリアに供給されるミュオンの強度は

6.3×10(e8)×0.08×0.50×0.70=2.2×10(e7)/s(positive)

=1.0×10(e7)/s(negative)

他の場合も同様の計算を行うことにより概要で示したミュオンビーム強度が得られる。ただし表面ミュオン強度については石田（理研）の評価を基におこなった。

(2) 表面ミュオンチャネル

表面ミュオンチャネルについては一部のみ光学設計がおこなわれている。現段階での計算結果をFig. 5.4.1.2-8に示す。計算結果からはDCセパレータ部でビーム径は十分にしぼられておりロスなくミュオンと陽電子の分離が可能なことが示されている。また最終焦点でのビームサイズは30であり十分小さいものである。

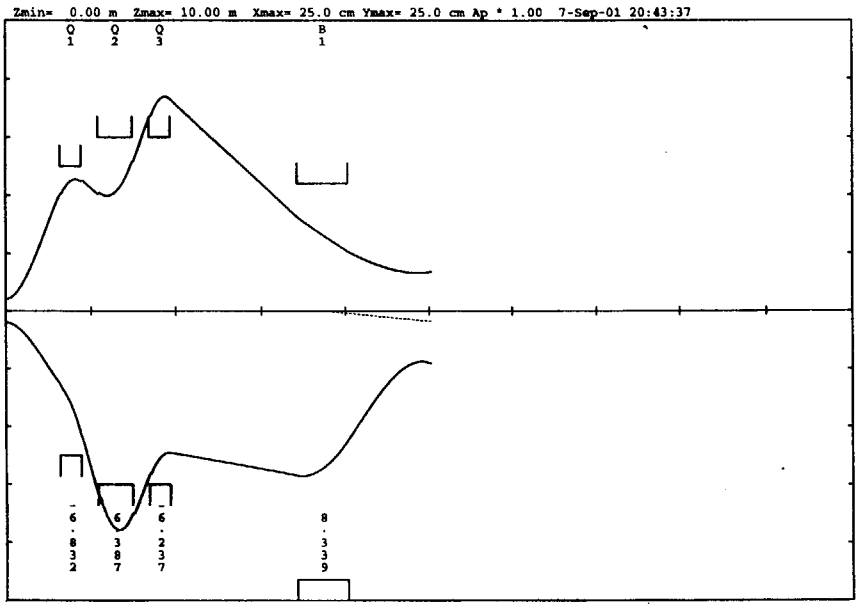


Fig. 5.4.1.2-1 Optics at the pion injection.

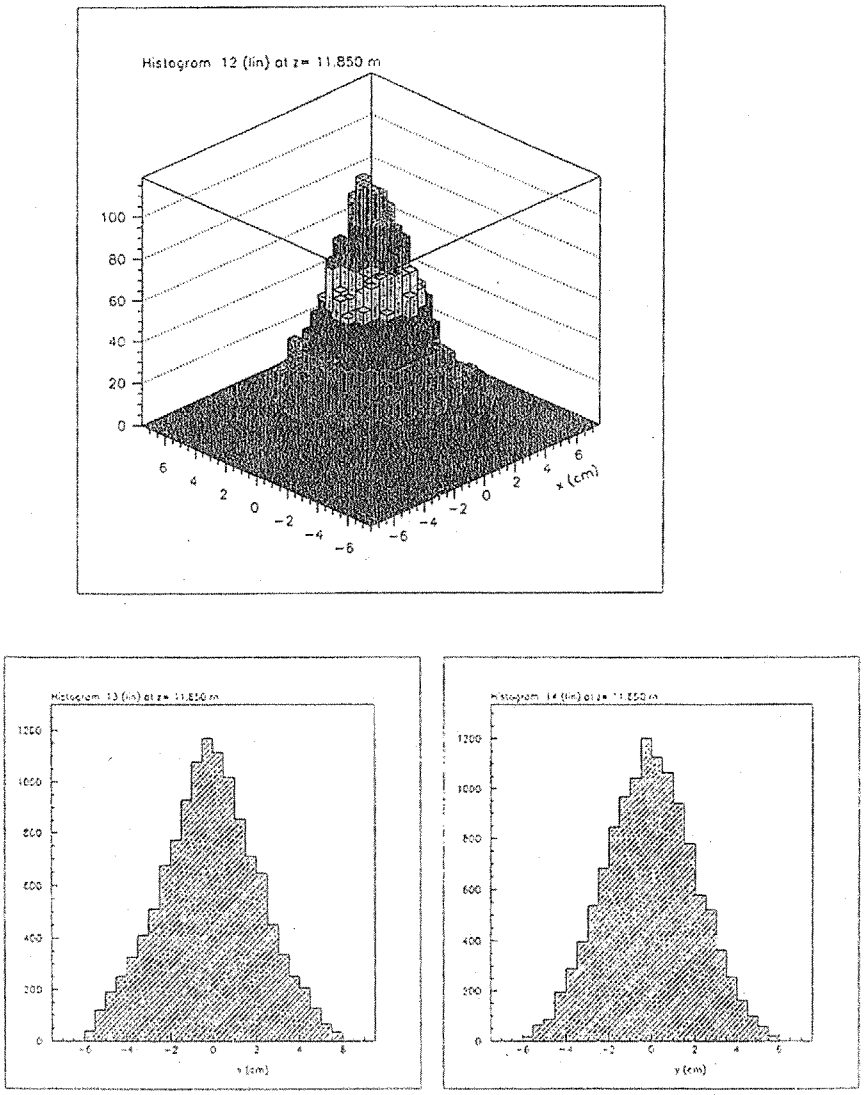


Fig. 5.4.1.2-2 Muon beam profile at the exit of the solenoid.

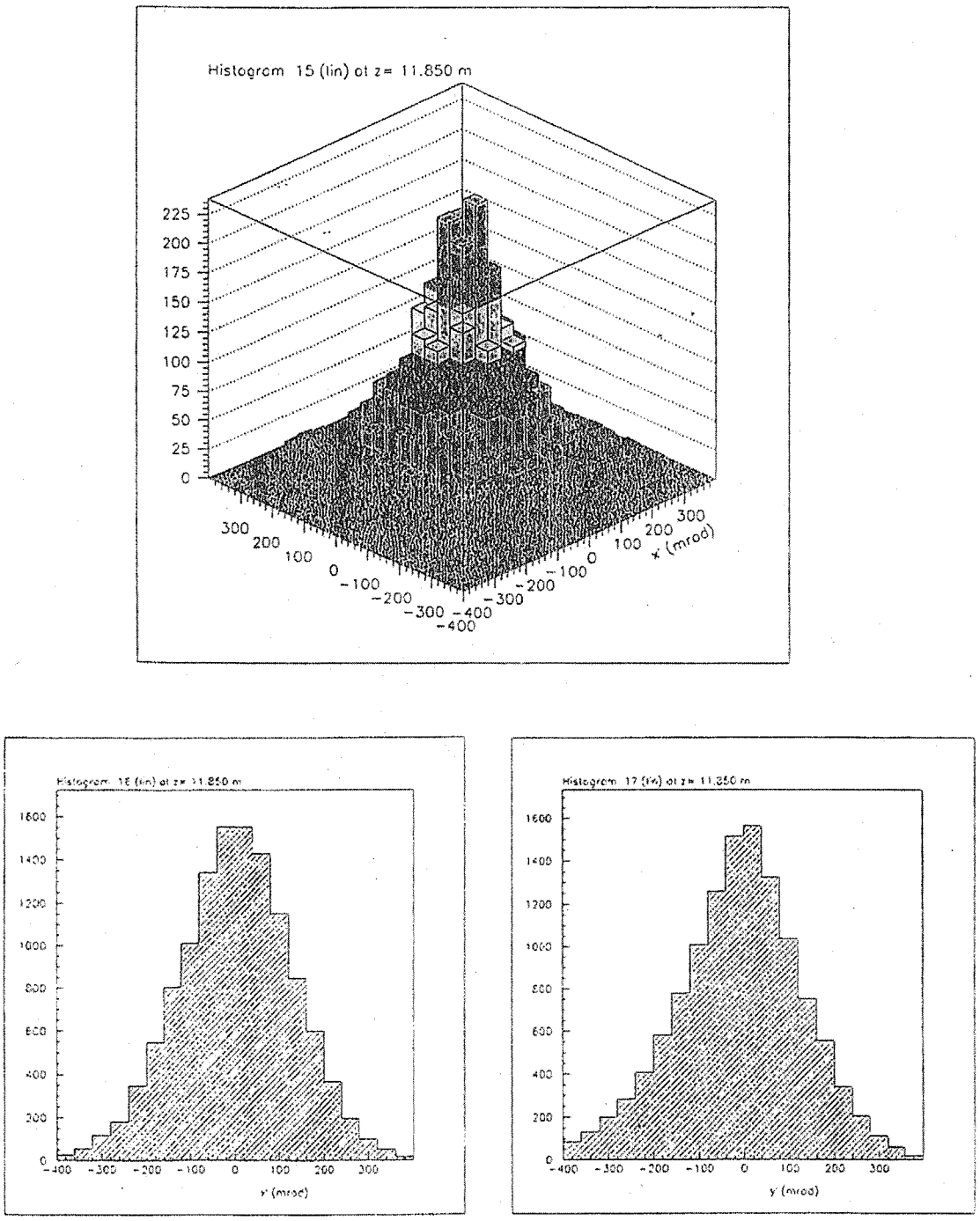


Fig. 5.4.1.2-3 Muon beam angular distribution at the exit of the solenoid.

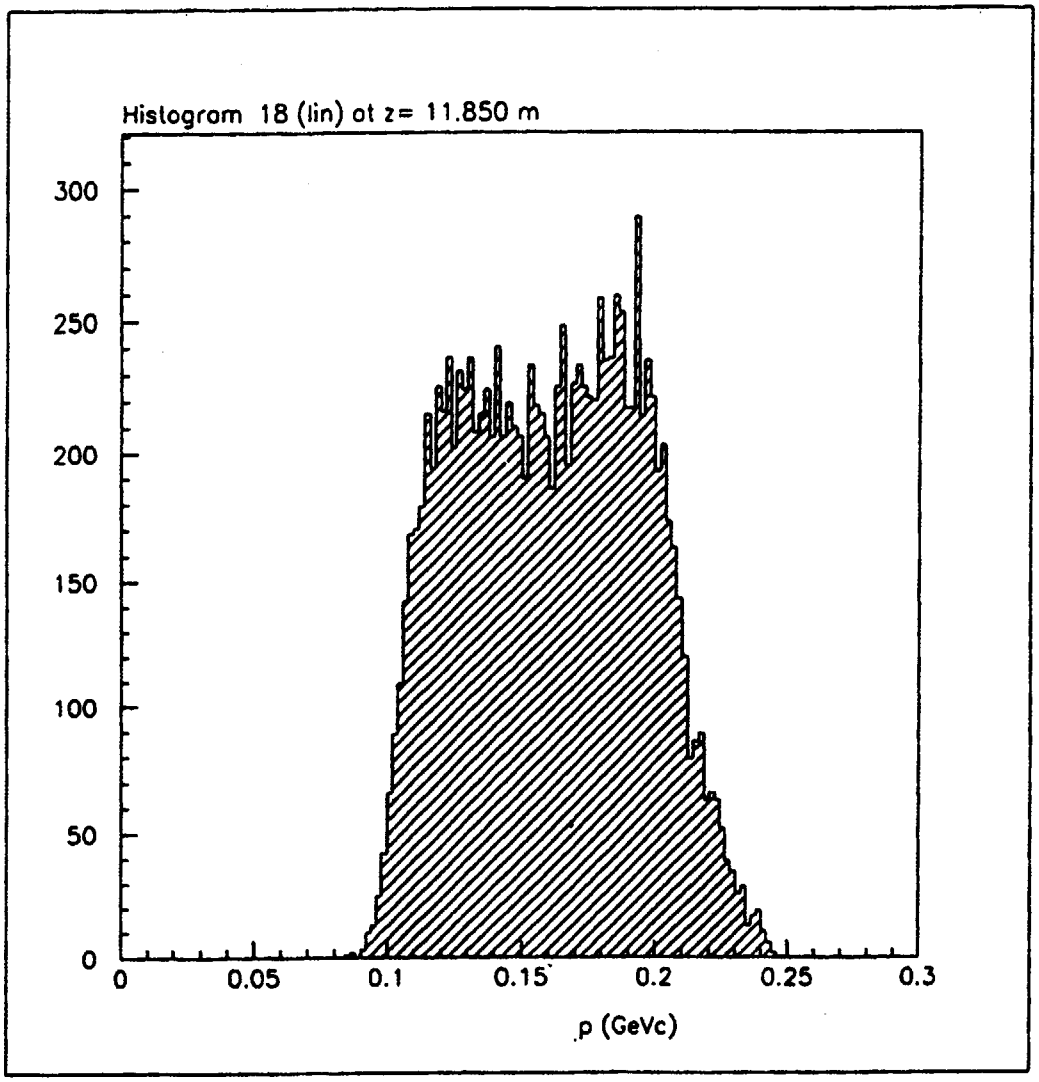


Fig. 5.4.1.2-4 Muon beam momentum distribution at the exit of the solenoid.

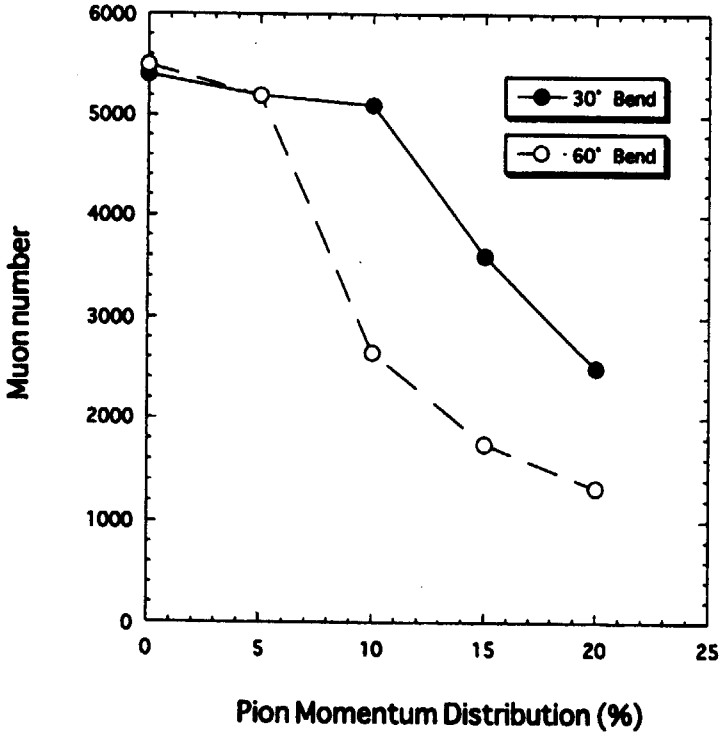


Fig. 5.4.1.2-5 Dependence of the transported muon fraction on the momentum distribution of pions.

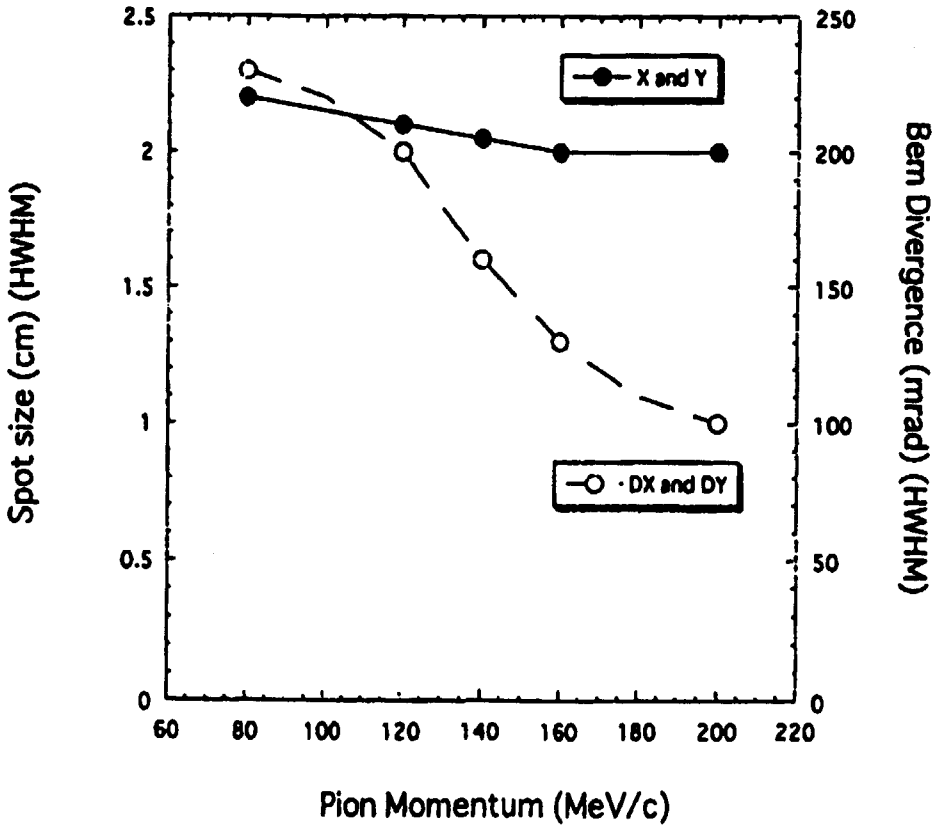


Fig. 5.4.1.2-6 Dependence of muon beam profile and angular distribution on the pion momentum.

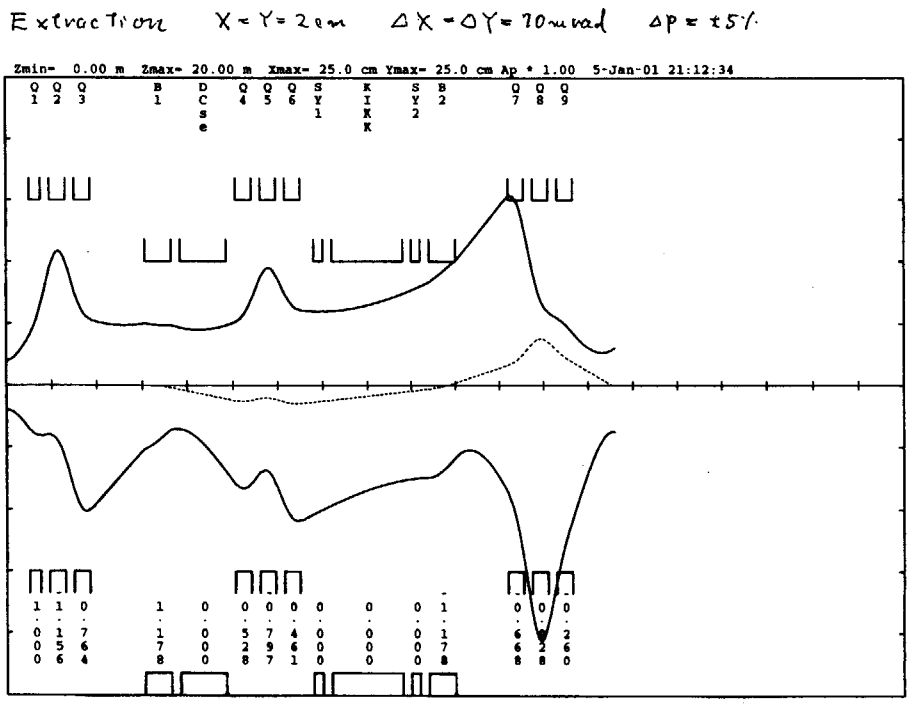


Fig. 5.4.1.2-7 Optics at the muon extraction.

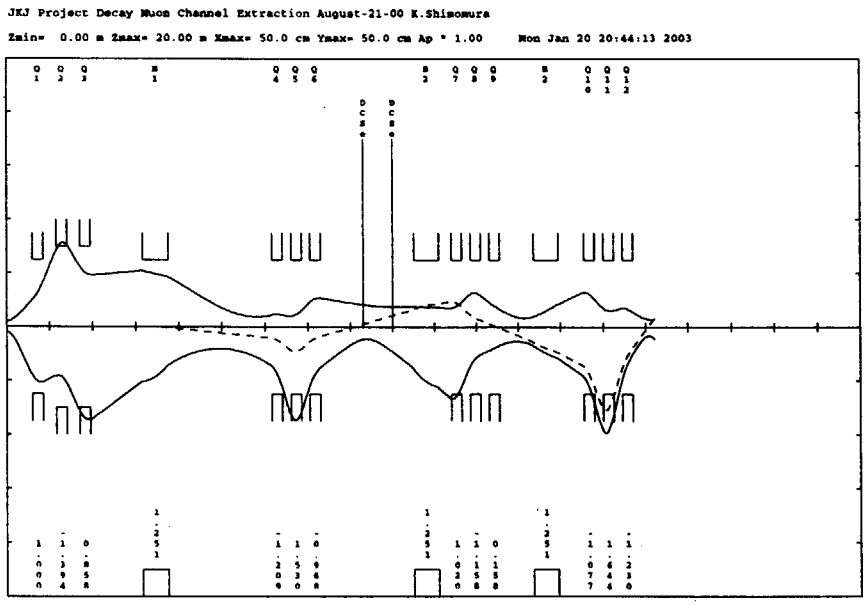


Fig. 5.4.1.2-8 Optics design for the surface muon channel.

５．４．１．３　超伝導ミュオンチャネル冷凍設備について

この冷凍設備は、超伝導ソレノイド電磁石を超臨界ヘリウムガスにより冷却するために、ヘリウム冷凍機（TCF 50 型）、ヘリウム圧縮機（MYCOM200LG 型）及び、バッファータンク（10 m^3 X2）で構成されている。

(1) ミュオン発生用大型超伝導ソレノイド電磁石について

当施設の基幹設備である大型超伝導ソレノイド電磁石は、陽子ビームをベリリウム標的に衝突させ、その核反応によって生じたパイオンを約 10mの真空中を飛行させながら、自然崩壊させることによってミュオンが発生する。そのミュオンを四方八方に分散させないために、ビーム進行方向に沿った一様な高磁場が必要であり、ミュオンの垂直運動成分を回転運動に変え“閉じこめる”ことによって非常に効率よく、ミュオンを生成させるための装置である。この超伝導ソレノイド電磁石は、超伝導コイル、６K シールド、８０K シールド、及び、コイルを断熱収納するクライオスタット等により構成され、Fig. 5.4.1.3-1 のような全体構造である。

物質・生命科学実験施設のミュオン実験室に設置されるこれらの冷凍設備は、中間子第一実験室、第二実験室に設置されている超伝導ソレノイド電磁石、ヘリウム冷凍機、ヘリウム圧縮機、バッファータンク等を、一部改良して使用する。特に、超伝導ソレノイド電磁石は、８０K シールドを現行の液体窒素冷却から Fig. 5.4.1.3-1 に示す冷凍機のヘリウムガスによる冷却に改造し、冷却系システムを自動制御運転で行う。

バッファータンク（ニ）に貯えられているヘリウムガスをスクリュー式ヘリウム圧縮機（ハ））にて、約 10Kg/cm^2に昇圧されたヘリウムガスは、冷却器で冷却され油分離システムをへて TCF100 冷凍機（ロ）に入り、第一熱交換器を経て、その一部は、直列に連結された、2 台のガスベアリング式高速膨張タービンで、断熱膨張されて、約 10K（−263 度）位に冷却され、熱交換器（HX-4～HX-1）を通って残りのヘリウムガスを予冷する。予冷されたヘリウムガスは、熱交換器（HX-5）でさらに冷却されてから、必要に応じて 3 分割されて、そのうちの一つは、CV106JT 弁により膨張されて気液混合状態となり、液体ヘリウム溜めに入りここで気液が分離される。分離されたヘリウムガスは、熱交換器（HX-5）の低圧経路に導かれ、その出口でタービン系統を通って、ヘリウムガスと合流してさらに熱交換器（HX-4～HX-1）の低圧経路を通り、常温まで加温されて、圧縮機の吸入側にもどる。残りの高圧ヘリウムガスは、 予冷時は、CV107、CV108 の自動弁を通って液体ヘリウム溜めの中に巻きこんであるそれぞれの熱交換器（HX-6）を通り、μ1 コイル（NO1～6）、μ2 コイル（NO7～12）に 2 分割されて、並列に超伝導コイルを均等に予冷する。超伝導コイルを予冷したヘリウムガスは、それぞれ CV113、CV111 の自動弁を経て、CV114 自動弁に合流して、第一熱交換器手前の低圧ラインに戻る。定常時には、CV108 自動弁一カ所を通り、μ1 の各コイルからμ2 の各コイルへと直列に、それぞれ液体ヘリウム槽の熱交換器（HX-6）に入り、そこで 4.2K の液体ヘリウムで冷却されて、10 気圧 4.5K の超臨界ヘリウム（SHE）となり、超伝導ソレノイドコイル冷却管に圧送されて超伝導状態に冷却される。また、液体ヘリウム槽の CV109 自動弁よりパワーリード線を冷却して、戻りガスはそのまま圧縮機の吸入側に戻る。

超伝導コイルを冷却した帰途ガスは、 CV112JT 弁を経て膨張して、液は液体ヘリウム溜めに、

ガスは帰還ガスとして、先の分離されたガスと合流して、各熱交換器の低圧経路を通ってヘリウム圧縮機に戻る。

バッファータンク（ニ）が 2 台設置されて、ヘリウム圧縮機（ハ）、ヘリウム冷凍機（ロ）及び、超伝導ソレノイド（イ）の間で、計空圧縮機（ホ）による自動弁でガスの出入りは全てコントロールされ、閉回路を構成しているため、高価なヘリウムガスの損失を最小にするように効率のよい冷凍システムになっており、長期間にわたって安定した冷却・励磁運転が行われている。

このようにして、6mの長さをもつ約1ｔもある超伝導ソレノイドは、約2日の運転で4.5K～4.7Kに冷却される。600 アンペアの電流を流すことにより、有効直径 120ｍｍ、長さ 6mの空間に一様な 50 キロガウス（5 テスラ）の磁場を発生することができ、ソレノイドに入射されたパイオン（π中間子）を自然崩壊させて、効率良くミュオン（μ中間子）を生成することができる。

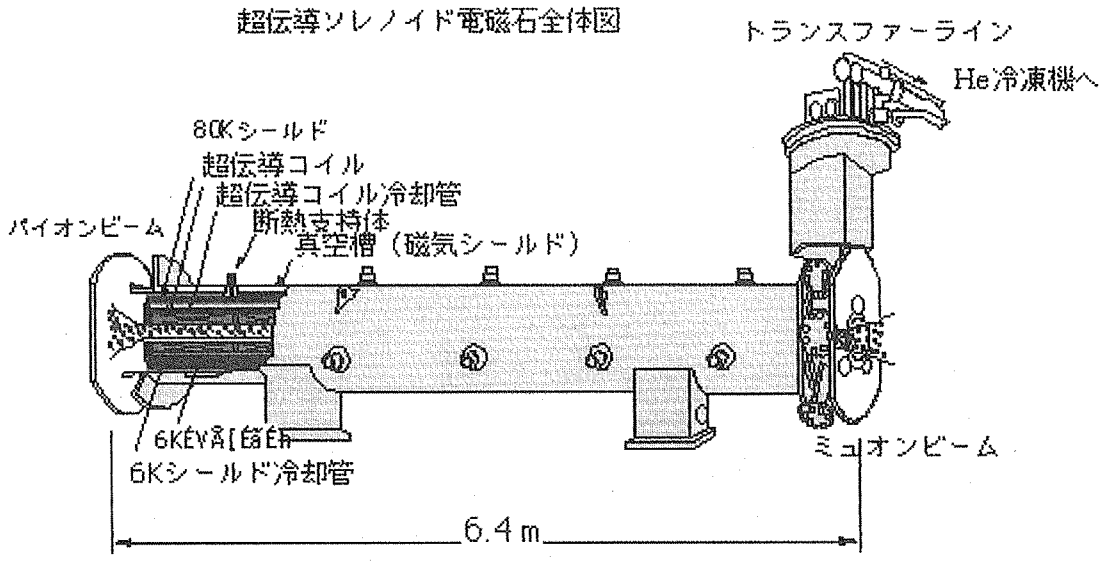


Fig. 5.4.1.3-1 View of the superconducting solenoid.

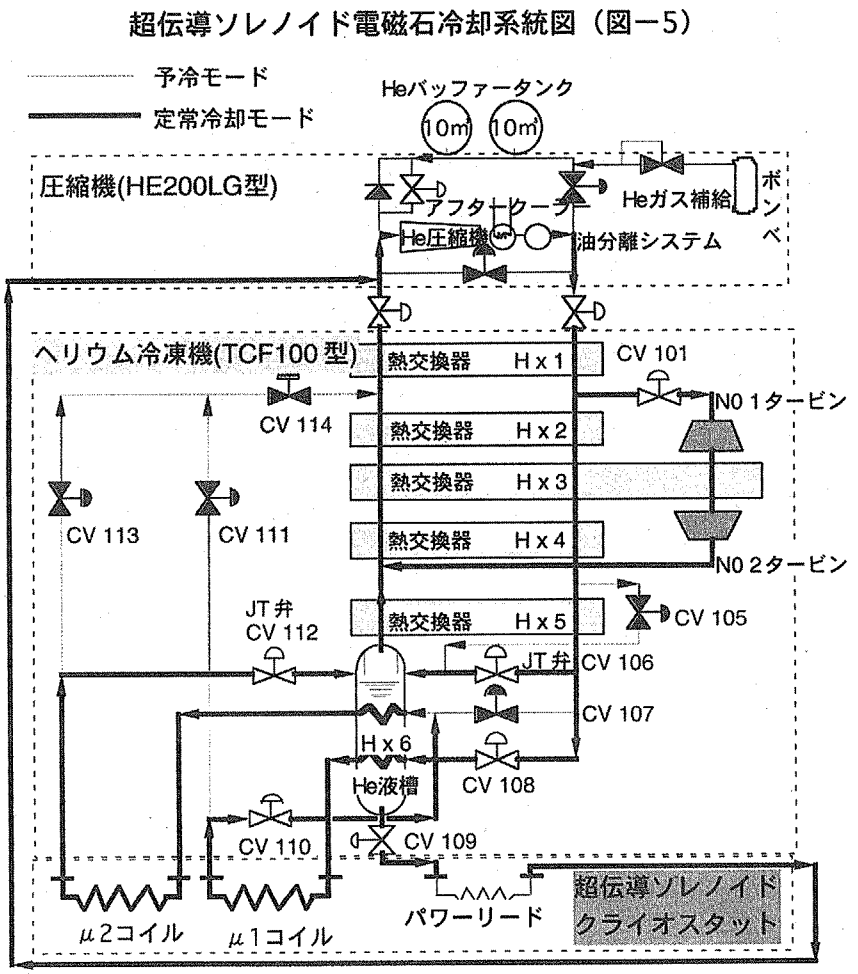


Fig. 5.4.1.3-2 Schematic diagram of the refrigeration system for solenoid cooling.

５．４．２　Muon Experimental Port

５．４．２．１　概要

ミュオン科学実験施設では基礎物理から生命科学にわたる広大な領域の科学が展開される。このために必要な実験ポートについて述べる。

現在予定されている実験ポートは Table 5.4.2.1-1 のようなものとなる。

以下に各ビームポートの特色とそこで展開される科学について述べる。

(1) 崩壊ミュオンライン

崩壊ミュオンラインの２つのポートへはキッカー磁石によりバンチごとにふりわけられるため同じ運動量及び同じ電荷であれば 2 ポート同時に測定が可能である。この２つのポートでは正負のミュオンが得られる。正のミュオンを用いてはミュオンスピン回転・緩和・共鳴実験（これらを総称してμSR と略す）による物質、生命研究を中心に、正ミュオン寿命測定による標準模型の検証、ミュオニウム・反ミュオニウム変換などの基礎物理実験が行われる。また運動量は 27-120MeV/c であり、極低温や高圧のような特殊条件にも対応する、また負のミュオンを用いてはμSR、ミュオン触媒核融合（μCF）をはじめとした原子核実験、負ミュオン寿命測定による CPT 対称性の検証といった基礎物理実験が行われる。

(2) 表面ミュオンライン

表面ミュオンラインの４つのポートへもパルス電場キッカーにより同時にビームを出すことが可能である（ただし各バンチを半分に分けてけり出すか、あるいはバンチごとに 12.5Hz でけり出すかは検討中である）。これらのポートへは運動量 29MeV/c の正ミュオン（表面ミュオン）が供給され、主としてμSR による物質、生命研究に使用される。またそれを用いて生成した熱エネルギー程度のミュオニウムによるラムシフトの測定や、正ミュオンの寿命測定など基礎物理にも用いられる。

(3) 超低速ビームライン

高温のタングステン表面から熱的に放出されるミュオニウムをレーザー解離することにより、数 keV の超低速正ミュオンビームを供給する。超低速ビームに関しては KEK で発生に成功し、現在 RIKEN-RAL ミュオン施設に置いて R&D が進行している。超低速ビームは超高真空中で生成されるため、そのビームを利用しての実験も超高真空中で行われることになる。主に表面、界面での磁性研究、触媒効果、水素同位元素のダイナミクスなどの物質研究として用いられる。また超低速ミュオンを用いて高い効率で作られる大強度ミュオニウムは QED の検証等に利用される。

(4) 高運動量ライン

280MeV/c までのミュオンを出すことが出来る。主目的はミュオンのイオン冷却実験を行うことにあり、これは将来のミュオンコライダーのソースなどへの応用が期待される。また高圧、高温下のμCF 実験も計画されている。

Table 5.4.2.1-1 Experimental area.

	ポート数	運動量(MeV/c)	建設時期	電荷
(a)崩壊ミュオンライン	2	27-120	第一期	正負
(b)表面ミュオンライン	4	27	第二期	正
(c)超低速ミュオンライン	1	数 keV	第二期以降	正
(d)高運動量ライン	2	280	第二期以降	正負

5．4．2．2　スペクトロメーター

崩壊ミュオンラインの 1 ポート及び表面ミュオンラインの３つのポートには基調セットアップとしてμSR 用のスペクトロメーターを設置する。崩壊ミュオンラインのもう 1 ポートはμCF 用セットアップを設置する。また表面ミュオン 1 ポート及びその他のポートは実験ごとに必要なセットアップを組めるような自由度を持たせる。ここではμSR 用のスペクトロメーターについて述べる。

μSR スペクトロメーターは任意の方向に磁場を印可するための複数の電磁石及びミュオンが崩壊して生じる陽電子を測定するためのカウンター群から成る。電磁石系に関しては既存のスペクトロメーターのものをそのまま使用することが可能である。Fig. 5.4.2.2-1 に既存の電磁石の一例を示す。この磁石系の場合はビーム方向に 5kG までの磁場が印可できる。

通常はこの中心に冷却器等に設置された測定試料を置き、照射したミュオンをその試料中に止め、その中でミュオンが崩壊して生じる陽電子を周囲に設置した（陽）電子カウンターで時間に対するヒストグラムとして計数する。このための（陽）電子カウンターとしては現在光電子増倍管を利用している。J-PARC においても基本的には同様なカウンターを使用可能である。ただしビーム強度に応じてカウンター数及びそれに付随するエレクトロニクス群を増やす必要があることからコストの大幅な増大が見込まれる。そこでカウンター系の開発が進行中である。例えば安価な APD（アバランジェフォトダイオード）やマルチアノードフォトチューブを用いたカウンターシステムの構築等、テスト実験が行われている（Fig. 5.4.2.2-2 参照）。

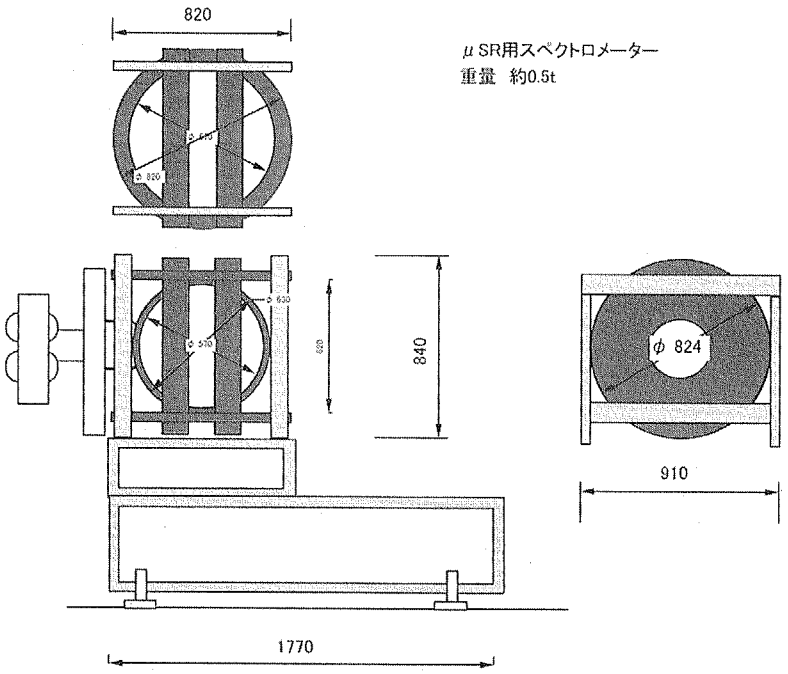


Fig. 5.4.2.2-1 Schematic view of the μSR spectrometer.

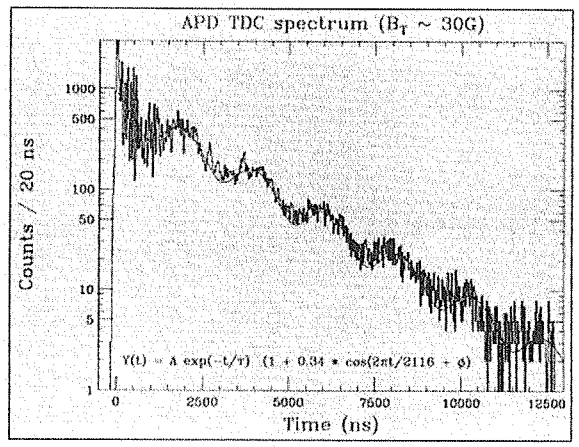


Fig. 5.4.2.2-2 μSR time spectrum obtained by APD counter.

５．４．２．３　実験エリア

μSR を例とした場合は実験エリアは Fig. 5.4.2.3-1 の概念図のような構成となる。ビーム最下流にすぐ隣接してスペクトロメーターが設置される。エリア内には冷凍機、レーザー、共鳴実験用高圧電源など必要に応じた機器が置かれる。このため 5m x 5m 程度の空間が必要となる。

各ポートに必要な電力、水、空気は以下のようになる。

(1) 電力

各ポートでの電力は現在 Tabel 5.4.2.3-1 の様な要望が出されている。この量は通常予想される実験にほぼすべて対応できる量である。

(2) 水

水は冷却水等に必要である。μSR スペクトロメーター縦磁場磁石用冷却水は 100l/min が必要であり、この条件と他の機器と併用することを考えた場合 7 気圧 150l/min 程度は必要となる。

(3) 圧縮空気

圧縮空気は電磁バルブその他に必要であり、現在と同様に 5 気圧程度が必要となる。

Table 5.4.2.3-1　Expected electrical power at the experimental area

3φ 400V	200A x 1	133kW
3φ 200V	50A x 2, 75A x 2	86.6kW
1φ 200V	20A x 2, 50A x 1	18kW
1φ 100V	20A x 6, 50A x 3	27kW
ToTal 265kW		

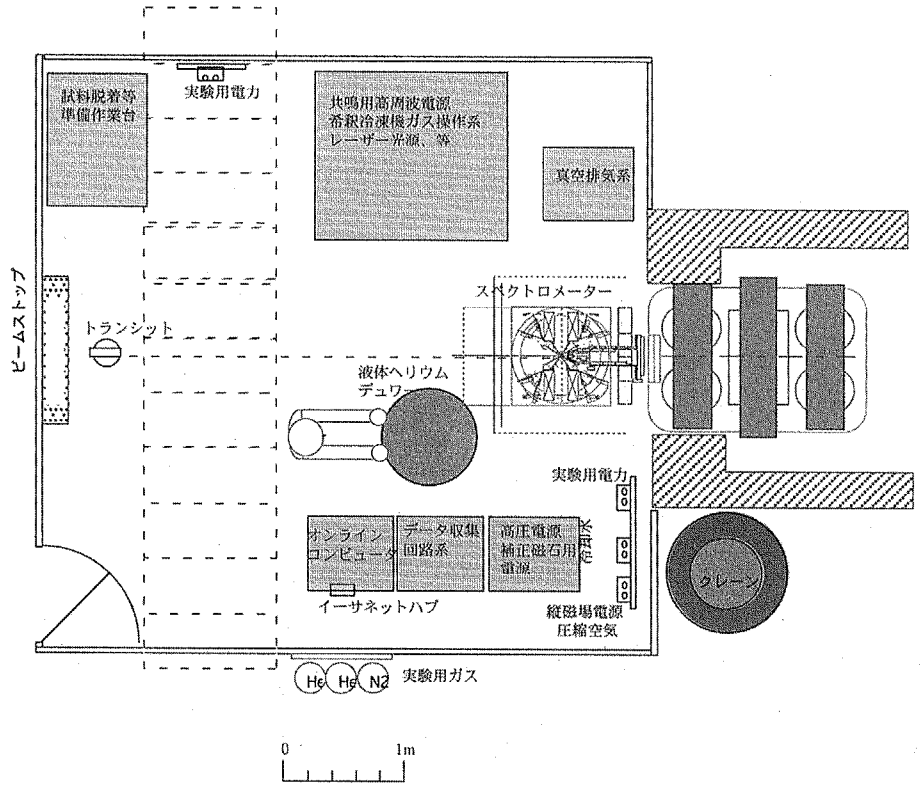


Fig. 5.4.2.3-1 Layout of the experimental area for the μSR.

５．５　NM ライン空冷装置

５．５．１　空冷装置

物質生命科学実験施設の陽子ビームトンネル M1 ラインを空調するシステム及び M2 ラインを循環空調するシステムに関する技術書である。

５．５．１．１　空調する領域

物質生命科学実験施設の陽子ビームトンネルは、Fig. 5.5.1.1-1 に示すように上流部のビームロスが小さく、放射化の比較的少ないＭ１ラインとミュオン標的、スクレーパなどのビームロスが大きく、あらゆる機器が高度に放射化する可能性がある領域Ｍ２ラインとに分割されている。Ｍ１ラインと M2 ラインの境界は、密封性の良い隔壁、並びにシール扉により構成されている。M2 ラインのＦＬ４－６ｍの領域は、様々な機器を保守するための領域として、メインテナンスエリアという名称で呼んでいる。

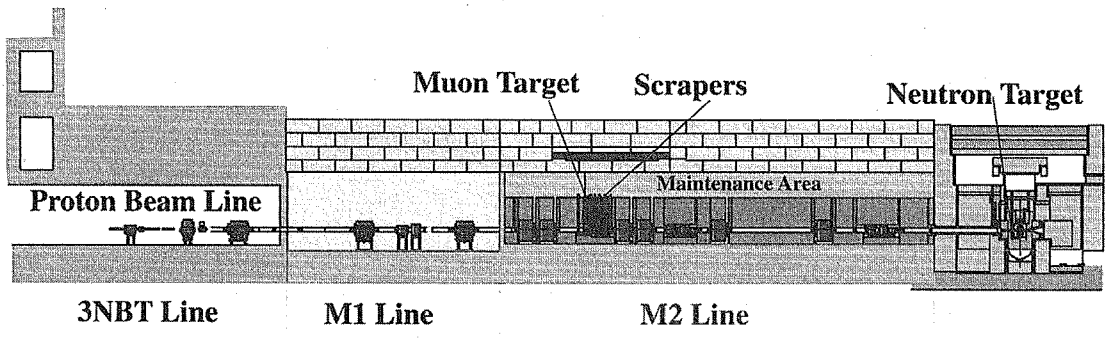


Fig. 5.5.1.1-1 A figure down shows a cut view along the primary beam line showing a schematicstructure of the tunnel structure of materials and life science building. Proton beam line consists of the M1 line region and the M2 line region. The M1 line is located further upstream of the muon target where not significant beam loss is yielded. The M2 line is in the vicinity of the muon target where severe beam loss is deposited on the beam line components surrounded.

５．５．１．２　設計方針　/Ｍ２ライン空調の空気の流れ

PSI 方式にならい、0.2-0.5mFL から、冷却された空気を供給し、FL4m のメンテナンスから吸気する方式で、電磁石、ケーブル、核発熱により発生する 60kW の発熱を除去できる空調システムの可能性を検討していたが、以下の理由により、最終的に空気の流れを逆にとり、メンテナンスエリアに冷却した空気を供給し、0.2-0.5mFL から、吸い込む方式とすることとした(Fig. 5.5.1.2-1 参照)。

・こぼれた冷却水がメンテナンスエリア全体にまき散らされない。
・放射性の埃がまき散らされにくい。
・トンネルメンテナンスエリアに設置されるターボポンプなどの精密機器や、電力ケーブルの発熱等温度条件を考慮すると、メンテナンスエリアに冷却された空気を供給したい。

・MIC 電磁石は耐温度特性が高く、60℃になっても問題ないので、ΔＴを大きくとれる。

また、Ｍ１ラインとの密封は、ケーブル・空調ダクトを、（4m-6m）の領域で、発泡ポリスチレンスプレー等で密封する。また、電磁石のメンテナンス時には、空調ダクトの一部を取り外すことが可能な構造とする。

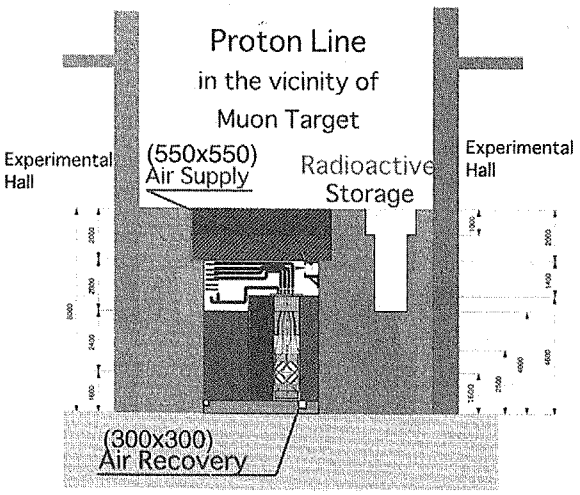


Fig. 5.5.1.2-1 We are designing an air-circulating system, supplying cooled air to the maintenance area and 90 kW of heat loss from the magnets/target are removed by the air-flow through the non-uniform narrow gap between magnets/chambers and shield blocks.

５．５．１．３　空調機器（冷却コイルユニット、ファン）

・前提条件として、メンテナンスを考慮して、ベルトを用いない直結式ファンを使用する。
・空調吹出温度を１５度とする。
・縦置き型の冷却コイルユニット、ファンを M1 トンネルに設置
・M1 用、M2 用共に予備循環ファンを１台設ける。
・3000m^3/h のプレフィルター・HEPA フィルターをＭ１用に１台、M2 用に２台用いる。
・トンネルメンテナンスエリアに於ける精密機器等温度条件を鑑み、熱交換器を 3NBT 機械室に設置し、８度の冷水をＭ１ラインに設置した冷却コイルユニットへ送り込む方式とする。
　✧　熱交換器入り口１３度、出口８（ユーティリティ側入り口７度、出口１２度）を 3NBT の機械室に設置する。
　✧　操作盤を含む
　✧　Ｍ２ライン用の風量 5000 m^3/h、冷却コイル　3.2 mm, 8-18 列（温度による）
　✧　Ｍ１ライン用の風量３000 m^3/h、
　✧　空気温度Ｍ２ライン入り口１５度、出口５５度.

５．５．１．４　換気シナリオ

- M２ラインの体積評価を Table 5.5.1.4-1 に示す。
- 15.6 [m^3] に対して、原田氏の評価では、２次ラインの引き出し近傍に空間を評価していただいていたので、23 [m^3]と比べて、少し小さめに評価となった。
- メンテナンスエリアを含む空調エリア総体積は 337.3 [m^3]
- N-13 の濃度を 23 [m^3]に対して、200 [Bq/cc]とすると、
- 15.6 [m^3]に対して、濃度だけは変わらないとして、200 [Bq/cc]
- これを、337.3 [m^3]で薄める事ができるので、 (200x15.6+0.3x337.3)/337.3 = 9.55 [Bq/cc] の濃度となる。
- 3120 MBq/h の放射能に相当する空気量は、326.7 [m^3/h]となる。

標的周辺の空間体積は、15.6 [m^3] である。メンテナンスエリアを含む空調エリア総体積は 337.3 [m^3]であり、気体廃棄物として問題となる N-13 の濃度は、(200 x 15.6 + 0.3 x 337.3) /337.3 = 9.55 [Bq/cc]となる。スタックを用いて排出する場合の許容濃度 3120 MBq/h の放射能に相当する空気量は、326.7 [m^3/h]となる。仮に 1/3 の寄与としても、109 [m^3/h]の排気をスタックにできれば、負圧管理を担保しつつ敷地境界のレベルを満足できる空調を構築できる。但し、放射線安全管理室の意向により、当面は、排気をせず、循環運転を行う。

Table 5.5.1.4-1 The estimated volume of the each section in the M2 line

	幅[m]	高[m]	長さ[m]	磁石の幅	磁石の数	磁石長さ	配管周り面積	Volume[m3]
メンテナンスエリア								
ミュオン	6.5	2	11					143
中性子上流	4.5	1.4	20					126
ミュオン２次ライン								
① 超伝導ミュオンライン	1.7	2	2.5					8.5
② 表面ミュオンライン	1.6	2	2.5					8
③ 低速ミュオンライン	1.6	2	2.5					8
④ 高モーメンタムライン	2.62	2	2.5					13.1
空調用空気口								
下部３００角	0.3	0.3	31					2.79
２次ライン空気口	0.1	0.1	23.4					0.234
冷却水ピット	0.2	0.2	62					2.48
Dirty Line以外の２次ライントンネル部隙間								
① 超伝導ミュオンライン	0.05	3.5	9.5	1.25	1	3.5		1.6625
② 表面ミュオンライン	0.05	3.5	12.92	1.12	3	3.1		2.261
③ 低速ミュオンライン	0.05	3.5	19.64	1.12	6	3.1		3.437
④ 高モーメンタムミュオンラ	0.05	3.5	12.4					2.17
Dirty Lineとして考えられる隙間								
標的チェンバー周り			3.5				0.3142	1.0997
スクレーパ	0.05	3.5	3.94	0.82	1	1.15		0.6895
１次ライン電磁石	0.05	3.5	21.2	1.2	8	1		3.71
１次ラインダクト			23				0.03917	0.90091
２次ライン周り								
① 超伝導ミュオンライン	0.05	3.5	16.2	1.25	4	3.1		2.835
② 表面ミュオンライン	0.05	3.5	15.16	1.12	4	3.1		2.653
③ 低速ミュオンライン	0.05	3.5	15.16	1.12	4	3.1		2.653
④ 高モーメンタムミュオンラ	0.05	3.5	6.2					1.085
Total Dirty Line Volume								15.62611
Total Dirty Line + Maintenance Volume								337.26061

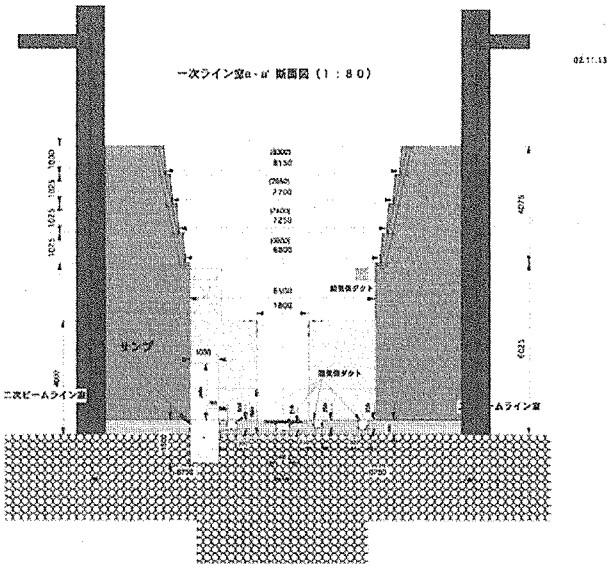


Fig. 5.5.1.4-1 The air-flow was realized to be very poor mainly in the secondary beam lines and also at the several magnets in the primary beam line. By adding three sets of extra retrieving air-ducts we solved this problem and consequently, made a realistic scenario of the air-circulating system, which would be realized for the construction of the facility.

5．5．1．5　ダクト等のレイアウト

Fig. 5.5.1.5-1 に、空調用のダクト等の配置図を示す。

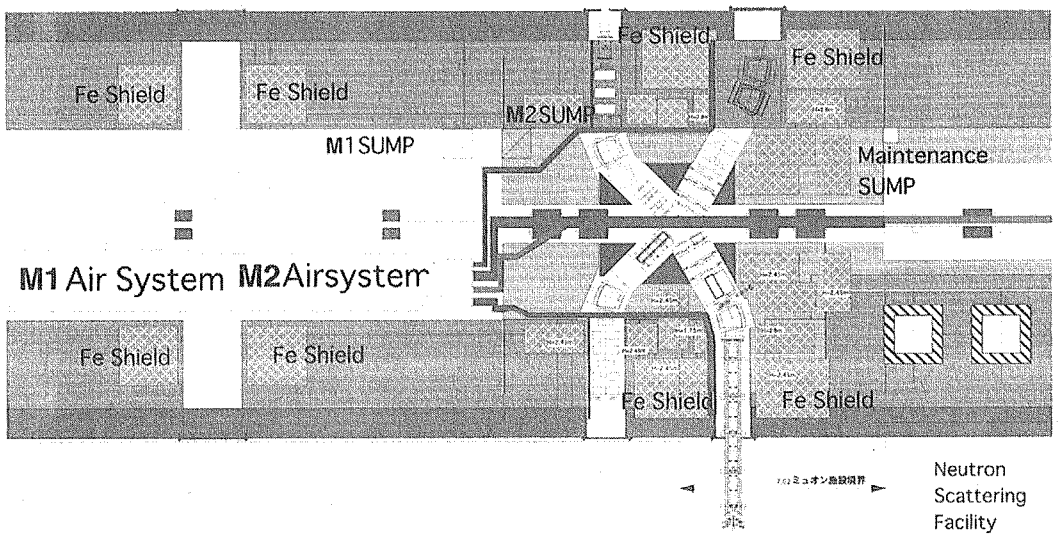


Fig. 5.5.1.5-1　A top view is shown in the vicinity of the muon target.　Water spilled out in the M1 and the M2 line are intended to flow into the M1 sump and M2 sump, respectively.　Some water spilled out on the maintenance area is intended to flow into the maintenance sump.

５．５．２　電磁石の気中発熱

M2 トンネルに設置される電磁石は全て水冷式であるので、電磁石のほぼ全ての発熱は冷却水により除去される。しかし、コイル導体にかなりの温度上昇があるために、コイル表面の熱伝達により、電磁石の発熱は空気中に漏れる。そこで、電磁石の気中発熱がどの程度生じるか定量的に評価した。

５．５．２．１　検討に用いる条件

電磁石の気中発熱には、保守的に評価するために電磁石に最大定格の電流を与える場合を想定した。四極電磁石の電力配線には、電磁石２台の配線のうち１本を共通化（コモン）する３線式が採用される。この方法において、２台の電磁石が全く同じ電流を流す場合には、共通とした配線には全く電流が流れない。共通とした配線の最大電流が流れる場合は、一方の電磁石に最大電流を流し、もう一方に全く流さない場合に生ずる。この場合二台のケーブル発熱は、２台に最大定格の電流を流す場合の半分となる。よって、ケーブルの発熱を評価において、コモンに流れる最大電流の半分とすれば十分に保守的な評価となる。

５．５．２．２　解析モデル

電磁石の気中発熱(Q [W])は下記の式で導出される、

$$Q = K A (T_1 - T_0) \quad (5\text{-}1)$$

上式で K[W/m^2/K]は熱貫流率、A[m^2]はコイル表面積、T_1 はコイル内面に接する冷却水の温度[K], T_0 は電磁石周辺の空気の温度[K]である。K は

$$K = 1/(D/k_{mic}+1/h_{air}) \quad (5\text{-}2)$$

となる。この式で、D[m]はコイル内の冷却水流路の直径である。K_{mic} は MgO の熱伝達率で 2[W/m/k]とし、h_{air} は空気の熱伝達率で 8.6[W/K/m^2]とした。式(5-1)の T_1 は下記の式で導出される、

$$T_1 = q_1/h\pi D+T_{ave} \quad (5\text{-}3)$$

ここで q_1[W/m]は電磁石コイル 1 m 当たりに消費する電力、T_{ave} は冷却水の平均温度である。熱伝達率の h[W/K/m^2]は下記の式により導出した。

$$h = Nu\lambda/D \quad (5\text{-}4)$$

λは水の熱伝導率0.635[W/m/k]である。Nu はヌッセルト数でありディタス・ベルターの式から、

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (5\text{-}5)$$

となる。Re, Pr はそれぞれレイノルズ数およびプラントル数であり、

$$Re = Dv\rho/\mu \quad (5\text{-}6)$$

$$Pr = C_p\mu/\lambda \quad (5\text{-}7)$$

v[m/s]は冷却水の流速、ρ[kg/m3]は冷却水密度、μ[kg/m/s]は粘性係数、C_p[J/kg/K]は定圧比熱である。水の場合には、

$Pr= 4.13e3x0.616x10^{-3}/0.635 = 4.02$

となる。

５．５．２．３　気中発熱量の計算

1) 各電磁石の発熱量

先に示したモデルを用いて、M2 トンネルに設置する下記の電磁石の気中発熱量を評価した。Table 5.5.2.2-1 に一次ビームラインに設置する四極電磁石(Q26100MIC)および二次ビームラインに設置する四極電磁石(DQ1, DQ2) および偏向電磁石(DB)の気中発熱量を示す。なお、下記の表において、空気の温度を 25℃とした。実際の空気の温度はこれよりも高いと思われ、式(5-1)で示したように周辺空気の温度が上昇すると気中発熱量は減るので保守的な評価となる。

2) 一次陽子ビームライン電磁石の気中発熱量

一次陽子ビームライン電磁石の気中発熱量を Table 5.5.2.2-2 に示す。表の計算値の欄に、オプティクスの計算に用いられる磁場勾配を用いる場合の気中発熱量を示す。実際には、ビーム軌道を修正するために補正電磁石を励磁すると考えられ、これらの総和が電磁石の気中発熱量と考えられる。しかしながら、補正電磁石でどの程度の角度を補正し、どの程度の電流を必要と評価することは難しい。そこで、気中発熱量を安全側に評価するために四極電磁石に最大定格の電流を流す場合で設計する。この値を設計値の欄に示す。この結果、一次陽子ビームライン電磁石から 11.9 kW の発熱量が生ずる。

なお上記の検討において、一次陽子ビームライン電磁石 Q26100MIC は日立電線製の 2500A 型の MIC 電線を用いる場合で評価した。

3) 二次ビームライン電磁石の気中発熱量

二次ビームラインの気中発熱量を Table 5.5.2.2-3 に示す。二次ビームラインの電磁石は、全て最大励磁する可能性があるために、最大電流に対する値のみを評価した。S-Q1～3, U-Q1～3 には間接冷却型の MIC が採用されることが予定されている。間接冷却型の場合には、導体温度が著しく高くなることが考えられるために、他の電磁石よりも高い放出率として 3%の気中放出率を見込んだ。

4) M2 トンネルの電磁石の気中発熱

以上から M2 トンネル内の電磁石の気中発熱は Table 5.5.2.2-4 の通りとなる。また、ケーブルの発熱も Table 5.5.2.2-4 に示す。M2 トンネルの装発熱量は約 45 kW となり、空冷装置はこれらの発熱に対応できるものを製作する必要がある。

Table 5.5.2.2-1 : Specification for magnet located at M2 tunnel

	Q26100MIC	DQ1	DQ2	DB
D[m]	1.13E-02	7.57E-03	7.57E-03	7.57E-03
電流[A]	2500	1000	1000	1000
入口温度[℃]	35	35	35	35
出口温度[℃]	55	80	61	62
平均温度[℃]	45	57.5	48	48.5
水路数	8	12	12	6
流速[m/s]	2.11	0.56	0.56	1.98
レイノルズ数 Re	3.87E+04	6.83E+03	2.50E+04	2.43E+04
ヌッセルト数 Nu	188	46.9	132	129
コイル温度　T1[℃]	47.2	58.6	48.9	48.7
コイル表面積[m^2]	6.33	1.72	3.23	1.63
消費電力[kW]	142	54	115	65
気中発熱[W]	1618	666	888	1771
気中放出率[%]	1.2	1.2	0.8	0.7
設計値[%]	1.4	1.8	1.8	1.8

Table 5.5.2.2-2 : Heat production due to magnet for primary beam line placed at M2 tunnel

電磁石	設計値(kW)	計算値(kW)
QM1	2.0	1.0
QM2	2.0	1.0
QN1	2.0	1.4
QN2	2.0	1.1
QN3	2.0	0.22
QN4	2.0	0.07
合計	11.9	4.9

Table 5.5.2.2-3 : Heat production due to magnet for secondary beam line placed at M2 tunnel

	気中発熱 (kW)	冷却方式
D-Q1	0.9	直接冷却
D-Q2	2.0	直接冷却
D-Q3	0.9	直接冷却
D-B1	1.1	直接冷却
S-Q1	0.3	間接冷却
S-Q2	0.3	間接冷却
S-Q3	0.2	間接冷却
S-B1	0.3	間接冷却
S-Q4	0.1	直接冷却
S-Q5	0.1	直接冷却
S-Q6	0.1	直接冷却
U-Q1	0.3	間接冷却
U-Q2	0.3	間接冷却
U-Q3	0.2	間接冷却
U-B1	0.3	直接冷却
U-Q4	0.1	直接冷却
U-Q5	0.1	直接冷却
U-Q6	0.1	直接冷却
U-Q7	0.1	直接冷却
U-Q8	0.1	直接冷却
U-Q9	0.1	直接冷却
H-Q1	0.9	直接冷却
H-Q2	1.9	直接冷却
H-Q3	0.9	直接冷却
H-Q４	0.9	直接冷却
H-Q５	1.9	直接冷却
H-Q６	0.9	直接冷却
H-B1	1.1	直接冷却
H-B２	1.1	直接冷却
計	17.7	

Table 5.5.2.2-4 : Summary of heat production at M2 tunnel

	気中発熱量(kW)
一次陽子ライン	11.9
二次ライン	17.7
核発熱	8.0
一次陽子ラインケーブル	3.8
二次ラインケーブル	3.2
合計	44.6

５．６　真空・ピローシール

５．６．１　基本概要

統合計画においてミュオン科学では真空内に配置された炭素標的に真空ダクト内を通過してきた陽子ビームが衝突する。現在のKEK中間子に比べてビームロスが大きいため高放射線場での保守を考慮してPSI方式を採用している。すなわち大きな真空チェンバー内に固定遮蔽体と可動なプラグシールドが設置される。標的、スクレーパーの保守の際には標的チェンバー上部の冷却水、信号線等のコネクタを取り外し、プラグシールドと一体の構造体ごとremote handling室に運ばれ、保守される。また、フランジ面はピローシールと呼ばれる遠隔操作によって着脱が可能な機構によって真空を保持する。これは、人力による真空シールよりも大きなリーク量を持つこととなる。真空ポンプは保守を考え、大きなガス放出が予想される標的チェンバー付近ではなく、M1Lineに設置される。巨大なチェンバー、大きな表面積を持った遮蔽体、狭い遮蔽体の隙間、ピローシールからのリーク、遠隔に設置された真空ポンプ等の条件を考慮し、定量的な評価が必要とされるであろう。まず、到達真空度及び排気時間を評価した。次に3GeVリング、3NBTへの影響を評価した。次にミュオン科学の真空機器の配置案に関して述べる。また、それぞれの真空機器の現在の進行状況を述べる。

５．６．２　設計方針

(1) 真空度、排気時間の評価

真空を得る際に粗排気用にロータリーポンプ、本排気用にターボ分子ポンプを使用する予定である。目標とする到達真空度は今回仮に 10^{-4}Pa とする。ガス発生源は陽子ビームライン、標的チェンバー、二次ライン、ピローシールとした。チェンバー、ダクト類は SUS 製であるとし、脱脂程度で特殊な表面処理は施さないものとする。ガス放出率として 3.0×10^{-6}Pa・m/s で一定であるとする。（実際には真空排気を維持すればガス放出率は低下する。）本排気用ポンプとしては 1000l/s のターボ分子ポンプ、粗排気用ポンプとしては 600l/min のロータリーポンプ一組を仮定する。ポンプの設置場所はコンダクタンスを考慮し標的チェンバー近傍に設置すれば、より高い真空を得る事ができるが、運転、保守等を考慮すると高放射線場である標的近傍には可能であるならば設置しないことが望ましい。従って今回、M1Line と呼ばれる標的上流から真空ポンプで排気を行い、その際の到達真空度を計算した。その結果、標的近傍にターボ分子ポンプを設置することが必要とされるかを決定する。また計算の妥当性を検討するために現在の KEK-NML ビームラインの場合についても評価した。

到達真空度、及び排気時間を計算した。一般に到達真空度はチェンバーからのガス放出量ピローシール等からのリークと排気速度とコンダクタンスによって決定される。一方、排気時間は排気する容積と排気速度とコンダクタンスによって決定される。また、コンダクタンスに関しては気体が粘性流として扱われる場合と分子流として扱われる場合で値が異なる。（実際にはその中間の遷移流というものも存在するが今回は簡便化のため無視する）粘性流領域としてはターボ分子ポンプが動作可能となるまでの10^{5}Pa～10^{0}Paとし、それ以降を分子流領域とする。ここで計算した排気時間はターボ分子ポンプが動作するまでの粗排気の時間である。また、ポンプは真空度によって排気速度が変化する。一般的なロータリーポンプのカタログによって、10^{5}～10^{3}Paの範

囲では600l/min、10^3～10^1Paの範囲では550l/min、10^1～10^0Paの範囲では300l/minの排気速度を採用した。計算に際し全ての構成要素を一度に計算するのは複雑な計算を必要とされる。従って、以下の4つの場合に大別し計算を行う。

1.一次ビームライン 2.二次ライン。3.ピローシール。4.標的チェンバー。

到達真空度に関してはポンプ付近では10^{-4}Pa台の真空度である。低真空部では中性子陽子ビーム窓付近、標的チェンバー上部で10^{-3}Pa台の真空度となる。大きな問題とはならないであろう。排気時間に関しては陽子ビームラインがもっとも大きく79分である。しかし、二次ラインもかなり大きく49分という結果が出ている。おそらくターボ分子ポンプが動作するまでに2時間程度かかるであろうと思われる。

また、これらに関して現在のKEK-NMLラインに適応して評価したがほぼ妥当な結果であることがわかった。

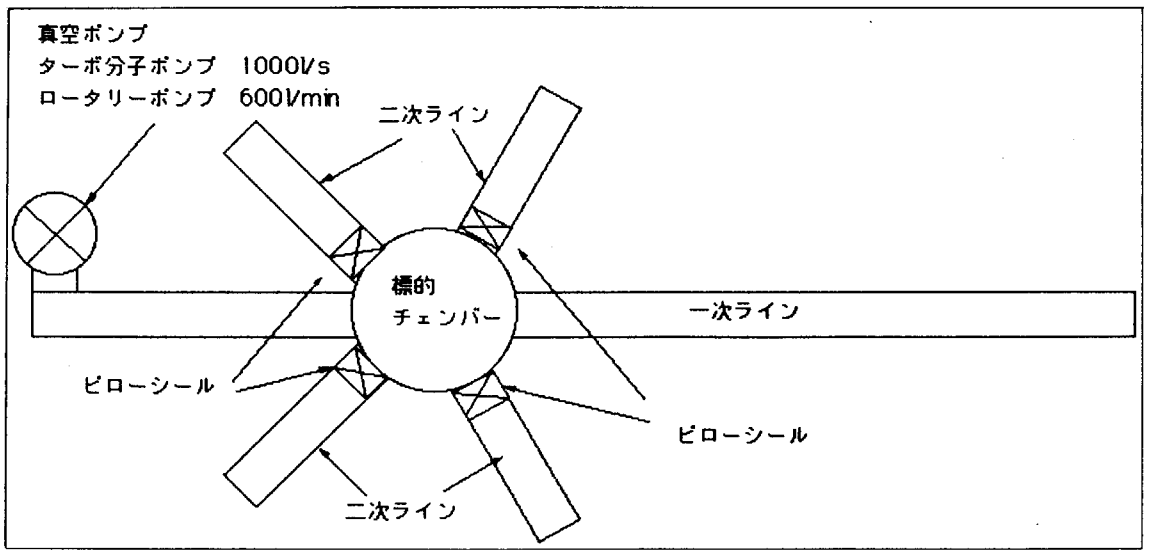


Fig. 5.6.2-1 Muon vacuum model

(2) 真空機器配置

1) M1Line

M1 lineは標的の存在しない比較的、放射線的にはきれいな場所である。ここではピローシールは使用せず、人の手によるフランジの保守を行う。基本的には現在のNMLビームラインと同程度の保守である。ダクト径は300mmである。ポンプはM1ラインに設置した1000l/sのターボ分子ポンプのみとする。ただし、補助的に標的チェンバーに1台設置する可能性もある。

2) M2Line

M2Lineは標的周辺の遮蔽体によって埋まった部分を言う。ここでは、基本的に遠隔操作による保守を考えている。陽子ビームライン上にはゲートバルブ、緊急遮断弁は存在しない。ピローシールが磁石の上流側と下流側に存在する。ダクト径は250mmである。ポンプは標的チェンバー脇に250l/s程度のターボ分子ポンプを設置する可能性もある。またピローシール中間排気用に250l/sのターボ分子ポンプを設置する。バックアップ用に2台を並列で運転する。ピローシールに

はそれぞれにバルブを設け独立に開閉ができるような構造とする。

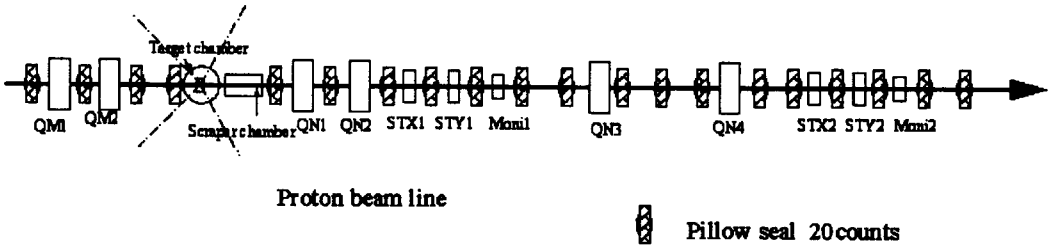


Fig. 5.6.2-1 Proton beam line

3) 崩壊ミュオンチャネル

崩壊ミュオンチャネルのトンネル内も遠隔操作が基本となる。標的チェンバー出口から始まり三重項電磁石に繋がる。このダクト径は250mmとする。次にピローシール、D300の真空ダクト、偏向電磁石が次にやってきてソレノイドとの間にゲートバルブを配置する。（偏向電磁石-ソレノイド間は80cm）ゲートバルブの両側にはピローシールを設置する。ピローシールのうちのソレノイド側の方にはフォイルを取り付け、実験室側とトンネルを仕切る真空膜とする。ただし、表面ミュオンの効率を考え、大気圧には耐えないフォイルとする。当然、このフォイルを守る論理回路が必要とされ、バイパス弁も必要とされるであろう。ソレノイドに実質どの程度まで近づいて周辺機器を設置できるかは確認が必要とされるであろう。またトンネル内にポンプは設置しない。

トンネル外はハンズオンメンテナンスを基本とする。フランジはISO規格とし、ヘリコフレックスを使用する。ソレノイド出口より三重項電磁石に繋がりゲートバルブの下流に緊急遮断弁を設置する。この目的は実験ポート最下流のミュオン取り出しフォイルの破損等に備えるためである。偏向電磁石下流の方が設置場所としては余裕があるが、空気分子が真空中で40msに16m進むことを考えると三重項電磁石下流となる。次にbeam blockerを配置する。これは真空を封じきる役目は無く、セパレーター等を保守の際の荷電粒子対策とする。銅10センチ厚程度であろう。次に偏向電磁石、セパレーターと続き、最後のポート入り口にはそれぞれのポートへの入域を考え、荷電粒子ブロッカーを設置する。またゲートバルブも設置し、ポートに入域する際にはこれを閉めるようにする。緊急遮断弁上流に250l/sのポンプを設け、ゲートバルブ、緊急遮断弁間を排気する。到達真空度を考慮しセパレーターには500l/sのターボ分子ポンプを設置する。崩壊ミュオンチャネル最下流のゲートバルブのポート側にもターボ分子ポンプを設置する。トンネル外の真空ポンプの排気は大気放出ではなくスタックへ戻すこととする。

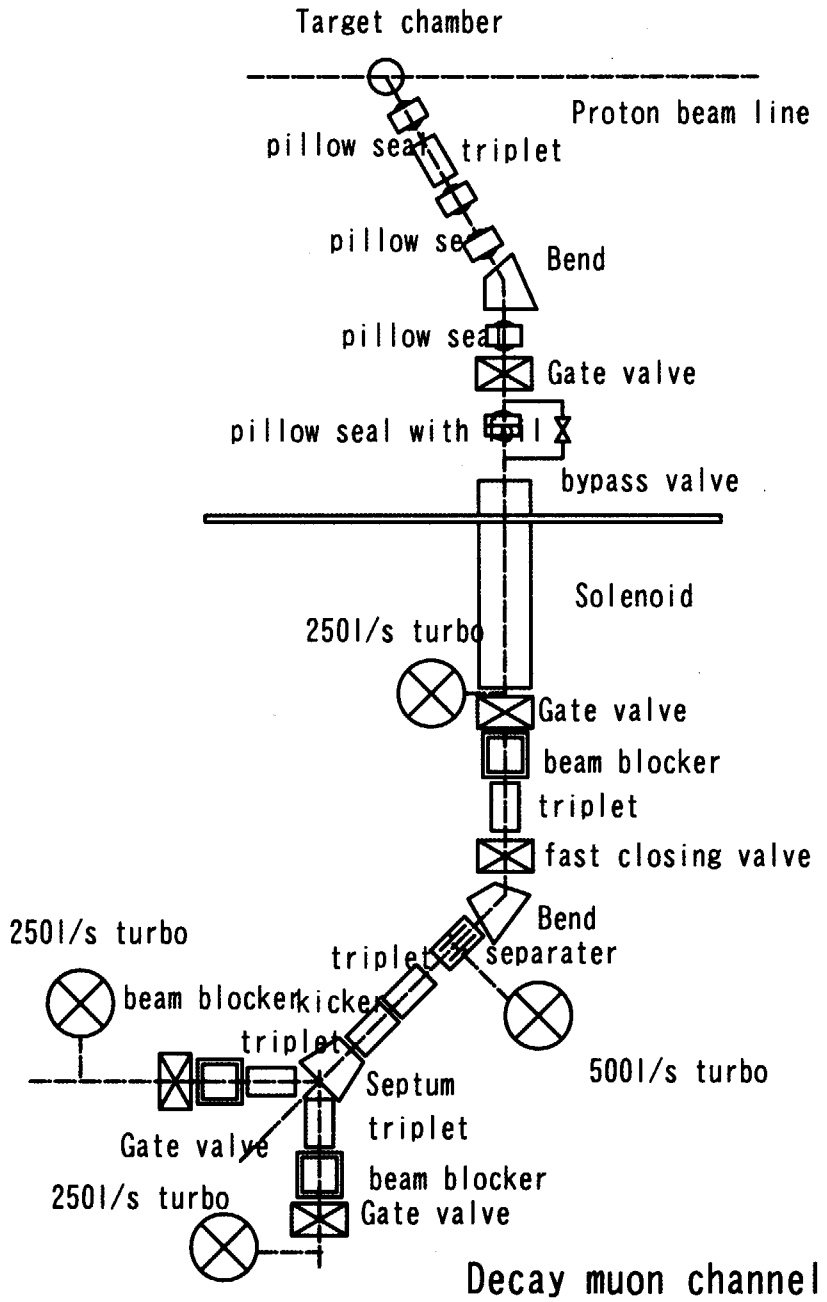


Fig. 5.6.2-3 Decay muon channel

4) 表面ミュオンチャネル

表面ミュオンチャネルはソレノイドを使用しないのでゲートバルブはトンネルの外に置くこととする。標的チェンバーからD250のピローシールを両側に設置した三重項電磁石の後にD300の偏向電磁石を設置する。次にD300の三重項電磁石を設置する。トンネルを出た後にゲートバルブを設置し緊急遮断弁を設置する。この後に偏向電磁石と続きDCセパレーターに続く。ポートごとにゲートバルブを設置すること及び最下流にフォイルを設置することは崩壊ミュオンチャネルと同じとする。ポンプはトンネル境界から出た直下のゲートバルブ下流にターボ分子ポンプを設置し、最下流ゲートバルブの下流にもターボポンプを設置することは崩壊ミュオンチャネルに同じとする。

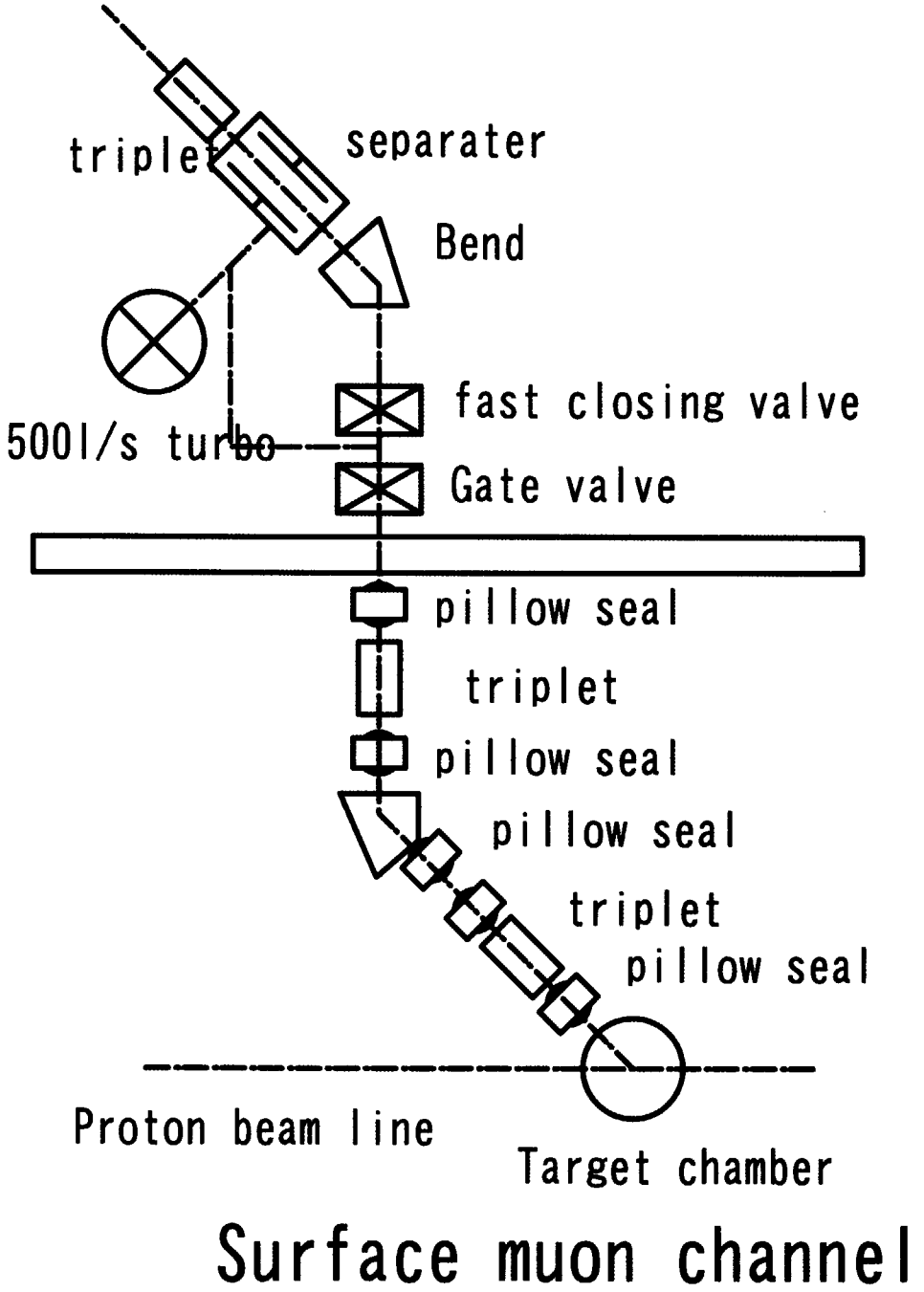


Fig. 5.6.2-4 Surface muon channel

(3) 真空機器

1) ゲートバルブ

エラストマーシールを使用しているゲートバルブは放射線に対して弱いためにオールメタルゲートバルブを使用するかどうかは評価が必要である。現在は極力標的からゲートバルブの位置を離すことによりエラストマーシールを用いたゲートバルブを使用する予定である。ただし、寿命は存在するのでゲートバルブごと交換する必要があるだろう。

2) 緊急遮断弁

緊急遮断弁はミュオンの場合、二次ライン上に設置するので放射線的にはそれほど厳しいわけではない。現在、φ160mmが最大径であるが200mm以上のものも開発可能であるという回答をもらっている。ただし、圧空バッファタンクより空気を導入する時間が長くなるので遮断時間は長くなる。φ160mm の遮断時間は25ms程度であるが、φ200mmとなると40msとなることが予想される。 40msの間に空気分子は約16m進む。さらに大きな緊急遮断弁も開発可能ではあるが、遮断時間は長くなる。

3) ピローシール

ピローシールとはスイスの PSI 研究所によって開発された遠隔操作用真空シール機構である。日本では高エネルギー加速器研究機構12GeV-PSグループの山野井氏らによって開発されている。ピローシールの基本概念はステンレス箔を圧縮空気によって膨らませ真空シールを行うことである。またリーク量を小さくするために中間排気部を設け、真空性能を向上させている。

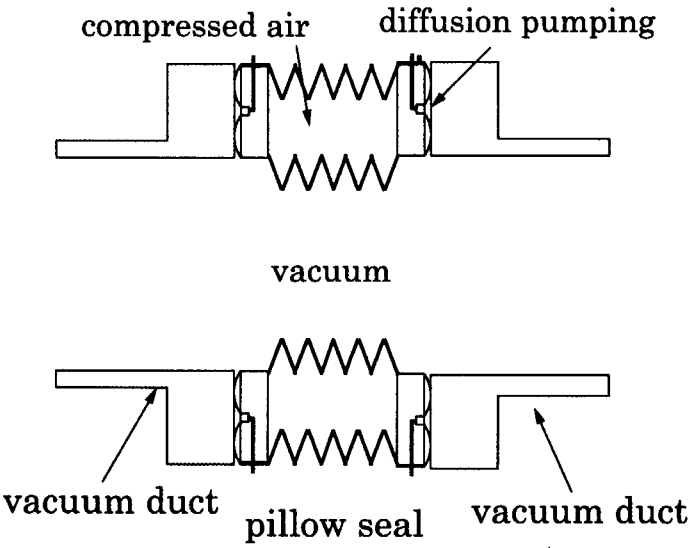


Fig.5.6.2-5 Pillow seal

これらはいくつかの研究開発が行われているが、ミュオン科学には 30 台以上のピローシールがあり重要度が非常に高いということと、日本のものはプラグを含めたアライメント機構は製作されていない、小さなギャップ内に挿入するための両側ピローシールフランジではない等の理由により試作を行いR&Dを行う予定である。

今回R&Dを行う主な目的を以下に挙げる。

a. プラグを取り付けることにより生じる挿入用アライメント機構の製作
b. 両側ピローシールフランジの開発
c. 真空ダクトフランジがチタンの場合の真空性能
d. 圧縮空気配管、中間排気配管の最適化

である。b に関しては特に開発要素が高い。現在、両側ピローシールは一つのベローの両側にダイアフラム付きのベースフランジを溶接するのであるが、プラグに保持することが困難である。

よって今回、工作センターの佐藤氏に協力を依頼し、パンタグラフを使用した保持機構を製作中である。その他の三項目に関しても製作業者、工作センター、ミュオン科学の三者の協力によりR&Dを行う予定である。

4) 真空ポンプ

今までの評価ではM1 line上にKEKからのポンプを使用するという予定であった。基本的にはそのままで良いと思うが､粗引きポンプをロータリーポンプからドライポンプにすべきであろう。現在はルーツポンプを使用予定である。

5) 真空ダクト

M2line上の真空ダクトは検討が必要とされるであろう。ここでは人が近づいて保守作業を行うことが困難であるためにベローを設置することが難しいであろう。現在は人が近づかなくても真空ダクトのアライメントが行えるような機構を設計中である。またピローシールのベローでいくらかのずれの許容を持たす可能性も検討の余地がある。

５．６．３　今後の問題点と課題

現在、ピローシールは設置の R&D 及び真空性能の R&D を行うべく試作機を製作している。これらは今後の課題として最重要である。また真空ダクトの設置及びアライメントに関しては実機を製作しR&Dを行うべきであろう。

５．７　制御

ミュオン科学実験施設の制御について述べる。

５．７．１　人への安全系インターロック

(1) 入域と退域

人に対する安全系インターロックは実験ポート入域扉に対して置かれる。崩壊ミュオンラインを例にすると通常実験エリア(A)にミュオンビームを出したまま(B)に入域するためには以下の条件が必要となる。

	生成標的	B1	パイオンブロッカー	セプタム	ミュオンブロッカー	ミュオンビーム
エリアA側	IN	ON	OUT	A ON	A OUT	ON
エリアB側				B OFF	B IN	OFF

ここではセプタム磁石を２系統の独立した電源で操作することにより、(A)、(B)それぞれに対するスイッチ磁石として使用する。

入域

1) 入域エリア側のセプタムをOFF、
2) 入域エリア側のミュオンブロッカーIN、
3) マスターキーをキーボックスより外しスレーブキーを外す為の鍵穴へ移動。
4) スレーブキーをキーボックスより外し、扉を開ける。

退域

1) エリア内のボタンを押す。ブザーが鳴ることなどの待避確認により他に人がいないことを確認。
2) 扉を閉めてすべてのスレーブキーをキーボックスに戻す。
3) マスターキーを外し、元の鍵穴を閉める。なお、マスターキーはすべてのスレーブキーが揃った時のみ外れる。
4) ミュオンブロッカーを外す。
5) セプタムON

表面ミュオンラインについてもプラグ類、磁石類は同様の構成となる。入域等に関しても崩壊ミュオンラインと同様になる。なお、誤動作時は扉が開くと同時にセプタム磁石電源が切れ、ミュオンブロッカー落ちるようしておくことで２重の安全対策をとる。

(2) メインテナンス時の対策

メインテナンスには該当個所のシールドを外すことになる。シールドを外す作業に関しては放射線管理室の管理下で行われることになるため特にインターロック等は設けない。なお、各部のシールドを外しての作業は以下の条件で可能である。

・キッカー電磁石から実験エリアまで

標的	B1	パイオンブロッカー	一次ビーム
IN 又は OUT	OFF	IN	ON 又は OFF

B1 電磁石 OFF、パイオンブロッカーIN の状態であれば外すことが可能、なおターゲットＩＮの状態で中性子ダクトストリーム評価ではキッカー電磁石部トンネルにおいて 1.3μＳｖ/h 以下となる。またスイッチマグネット、プラグによる２重の対策がなされる。

・壁面からキッカー電磁石まで

標的	B1	一次ビーム
OUT	OFF	ON 又は OFF

・壁面より内部

一次ライン入域と同様な条件である。これは陽子ビーム停止、上流側でのビームブロッカー（もしくはスイッチング磁石)、また排気がなされていることおよび放射線レベルが基準値より下がっていることである。

(3) PPS(Personal Protection System)

ミュオン施設における PPS は各ポート内の非常停止ボタンでのみ動作することで検討中である。

５．７．２　装置等への安全系インターロック

装置系へのインターロックは大別して１次ラインを停止する必要のあるものとそうでないものに別れる。１次ラインを止める必要のあるものとしては標的、スクレーパー、空調等が挙げられる。それらの

(1) MPS(Machine Protection System)

標的、およびスクレーパーの異常に際しては MPS を作動させて緊急にビームを停止する処置を取ることで検討中である。

・ミュオン標的

ミュオン標的は標的温度、冷却水圧力、水量、水温、漏水、ターゲットチェンバー真空度及び標的位置の７項目に関して異常が発生した際に MPS を作動させる。

・スクレーパー

スクレーパーはスクレーパー温度、冷却水圧力、水量、水温、漏水の５項目に関して異常が発生した際に MPS を作動させる。

(2) MN トンネル空調、冷却水

これらの異常に際しても一次ビームを止めることが必要である。これらはどの段階でのビームを停止するかは検討中である。

(3) 二次ライン

二次ラインにおける異常は他の部分に影響を及ぼさないものが大部分であり、これらは電磁石電源へのインターロックとして対応する。ただし真空だけは全体に影響を及ぼす可能性があるため別対応となる。

(4) 真空

ビーム最下流付近での真空の異常は緊急遮断弁およびゲートバルブにより対応する。ミュオン標的直下での真空異常は一次ライン真空の異常と同様な扱いとなるものと考える。

５．７．３　タイミング信号

ミュオン科学ではパルスと同期したタイミングで外部条件を作動する実験が行われる。例えば RF、光、レーザー、高電場などがその条件として挙げられる。最も条件の厳しいレーザーに関しては以下のようになるためこれを満たすタイミング信号が要求される（Fig. 5.7.3-1 参照)。

レーザーは繰り返し２５Ｈｚで、外部信号起動（External Trigger）でパルス状レーザーをビーム に同期させる。信号は大きく分けて２種類を使用する。

1） Ｑスイッチ用の信号。：ミュオンビームに同期して、Ｑスイッチをかけるので、

(ア) ジッターは 10ns 以下が望ましい。

(イ) この信号を用いてレーザーの出力を駆動するが、その際レーザーのタイミング 回路で、１－２micro 秒の時間遅れが生じる。従って、陽子ビームが実際に標的に到 達するタイミングは、２μｓ以上、遅れていなければならない。

2） フラッシュランプをトリガーする信号

(ア) フラッシュランプは、Ｑスイッチのタイミングより２００－３００μｓ 前に トリガーされる必要がある。

(イ) 従って、KEK では、前のパルス（Ｂトップ信号）を用いて、クロックを使用して 適切なタイミングの出力を得ている。従って、前のパルスと正確なクロックが必要。

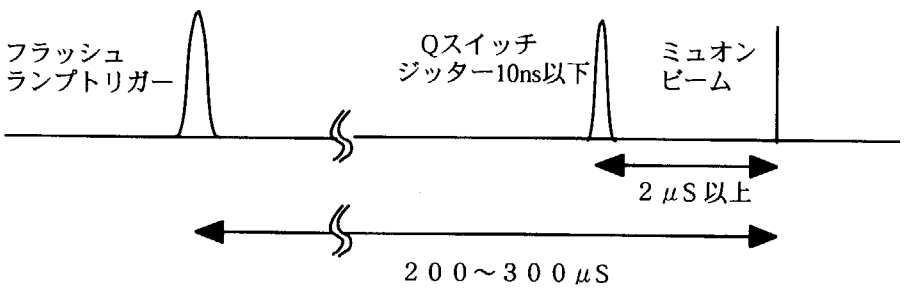


Fig. 5.7.3-1　A timing diagram for the laser trigger signals synchronized with the muon beam.

５．７．４　ネットワーク

ミュオンのネットワークは以下の本数が検討されている。

第一実験ホール　一般、local　10
　　一般、Grobal　4
　　機器制御　　3　（２次ビームライン制御、スイッチ磁石、
　　プラグ、ビームシャッター）

第二実験ホール　一般、local　10
　　一般、Grobal　4
　　機器制御　　5　（２次ビームライン制御、スイッチ磁石、
　　プラグ、ビームシャッターおよび
　　ミュオンターゲット監視制御）

第一実験準備室　　一般、Local　2

第二実験準備室　　一般、Local　2

５．８　保守

すべての操作は可能な限り遠隔操作で行うことを前提条件として考えている。標的・スクレーパの交換・保守の場合、密閉構造の遮蔽構造を有するキャスクを用いる。この際、大型機器取り扱い室の１３０トンクレーンを用いる。交換時の概略は以下の通りである。一旦、最上部のシールドを取り外した後、巻き上げ装置内蔵のキャスク容器に標的アセンブルを格納し、格納後、下部の蓋を閉める。これらをターゲットの交換・保守作業を行うミュオン源直下流の標的等１次保管庫に持ち運ぶ。１－２年冷却した後、廃棄標的はキャスクに入れて物質生命施設から持ち出し、原研内に保管する。標的のメンテナンスは半年ないしは、１年に一回を想定しており、スクレーパ等はPSIや、ISISの例をみても、半永久的であると考えている。

キャスクに関しては､物質生命科学で用意されているキャスクを共有する事を前提としている。交換の手順を以下に期す。

M標的交換手順案

①標的チェンバー上部シールド（ＦＬ６ｍより上）を移動させる。

- この時、１３０ tonクレーンないしは５０トンクレーンを用いる。

②冷却水配管の取り外し。

- チェンバーのトップフランジ4mFLのメンテナンスエリアにおいて、冷却水バルブ（入力部、出力部）を手動で締める。
- 配管内部の冷却水を可能な限りすべてバッファタンクに回収する。
- クイックジョイントをとりはずす。
- 配管内部に残った冷却水を、乾燥窒素の強制循環或いは真空に引いて取り除く。

③熱電対ケーブル等の計測線を取り外す。

④標的用の上部フランジのボルトをとりはずす。

⑤キャスクによる標的・スクレーパ回収

- 標的の破損したときに破片がこぼれにようにじょうご状の容器を標的フランジに設置する。
- ＦＬ６ｍの位置にキャスク設置用のキャスク支持ガイドレールを設置する。
- ＦＬ６ｍの位置のキャスク支持ガイドレール上にキャスクを設置。
- キャスクから、位置決め用の支持筒をおろし、標的との位置のマッチングを取りながら位置の微調整を行う。
- 標的集合体をキャスク内蔵の巻き上げ装置でキャスク内に引き上げる。
- キャスクの下の蓋を閉じる。

⑥キャスクの移動

- キャスクをミュオン標的上流部に用意する一次保管場所に移動し、標的集合体ともども冷却する。
- 第１想定として、新しい標的アセンブリを直ちに標的チャンバーに設置する。長期に渡って標的を設置しない場合には空隙部にプラグを挿入する。
- 一次保管場所から予備の標的を標的チェンバーに移動し、設置する。
- 冷却水クイックジョイントを接続、熱電対等の計測線を接続。

⑦ホットセルでの作業

- 一次保管場所で、標的集合体を冷却した後、シャットダウンの期間にキャスクに格納してホットセルへ１３０ｔクレーンで輸送する。
- キャスクをホットセルに設置する。
- 炭素標的部の標的並びに冷却水用配管をマニピレータで取り除く。
- 新しい炭素標的部をマニピレータを用いて、据え付ける。

キャスク並びに標的交換の概念図を下に示す。

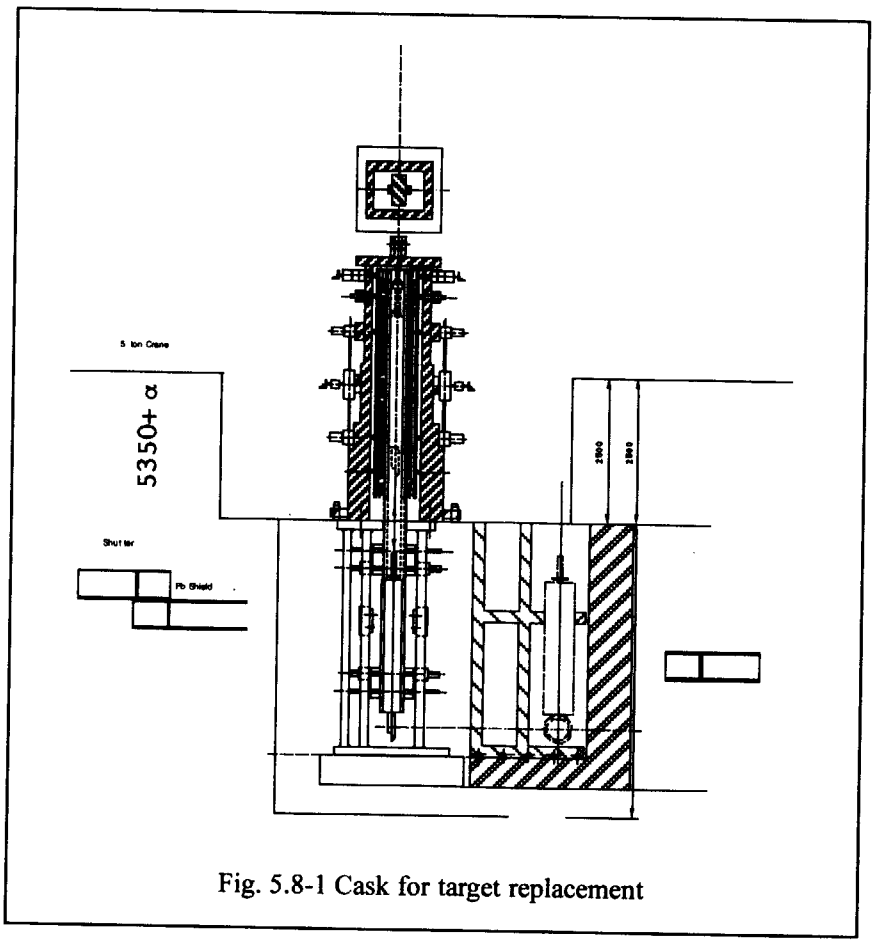


Fig. 5.8-1 Cask for target replacement

6．安全性

6．1　安全設計指針と設計方針

物質・生命科学実験施設では 1MW の 3GeV 陽子ビームが水銀ターゲットに入射することに伴い、多量の放射線（中性子、γ線等）が発生し、それに伴い、水銀ターゲット及び水銀ターゲット周りの機器、冷却水、ガス等が高度に放射化されるとともに、放射性ガスも生成される。そのため、このような放射線及び放射化した機器を遮蔽して作業者、一般公衆の安全を確保する必要がある。また、放射化した水、ガスに含まれる放射性核種を外部に放出する際は一般公衆の安全を確保しなければならない。物質・生命科学実験施設は核燃料物質を取扱う施設ではなく、核破砕生成物として核燃料物質が生成されることもないため、「放射性同位体元素等による放射線障害の防止に関する法律（障防法）」に基づいた安全設計を行う。さらに、放射性物質を取り扱う施設に対する安全の重要性から、物質・生命科学実験施設の一層の安全性向上のため多重防護の考え方を尊重した設計とする。

なお、同様の施設である SNS には原子炉の安全クラスの機器はないとしている。物質・生命科学実験施設においても、ハザードポテンシャルは十分小さい見通しであることから、安全クラスの機器が必要とされることはない。従って、ここでいう多重防護に係わる設備は、直接的には万一、事故が起こった場合にも、施設への影響を軽減し、施設の修復や早期の運転再開のための設備であり、この結果として放射線被曝をできる限り小さくするものであるから、いわゆる財産保護ための設備として位置付けられる。

また、物質・生命科学実験施設では減速材として液化水素を使用するため、「高圧ガス保安法」に基づいた液化水素循環系の安全設計を行う必要がある。

●多重防護　：異常の発生の防止（信頼性の高い設計）
　　異常の検知
　　事故影響の抑制

6．2　安全設計評価

6．2．1　異常事象の選定

安全評価は、異常時に事象を緩和する手段として設備設計に対応しており、この設計の妥当性を確認するために設計確認評価を実施することである。そこで、各系統又は設備設計が安全要求を満足していることを確認するための異常事象の選定を行った。

ここで選定している異常事象は、放射線防護の観点で放射性物質を内包している配管機器についての１個所の破損、又は、単一故障等を想定した場合に放射性物質を内包している配管機器の破損の可能性がある異常（温度、圧力の上昇等）を選定している。

以下に、異常時に事象を緩和する手段の設計を確認するための設計上重要な事象を示す。

(1) 放射性物質環境放出防止の設計確認事象

放射性物質環境放出防止の観点で厳しいのは、放射性物質を内包している配管機器が破損して

放射性物質が各系統が設置されている部屋又は放射性物質が通常殆どなく遮蔽のされていない系統内に流出した場合である。各部屋、各系統毎に最も厳しいと考えられる代表事象は、下記の通りである。

・ターゲットステーション室；ターゲット１次冷却系（水銀冷却系）配管破損
・ヘリウムベッセル；ターゲットアウターケーシング破損
・中性子ステーション室；中性子ビームライン冷却系配管破損
・１次冷却水循環機械室；水銀ターゲット容器、ヘリウムベッセル、反射体、プリモデレーター、陽子ビーム窓、水銀ターゲット台車先端遮蔽体冷却系配管破損
・遮蔽体冷却設備室；生体遮蔽体冷却系ダクト破損
・陽子ビームライン；陽子ビーム窓破損
・常用２次冷却系；１次冷却系熱交換器プレート破損

(2) 中性子ターゲット冷却系の設計確認事象

核破砕生成物を含む重水又は水銀を内包するターゲット容器の温度又は冷却材の圧力が上昇した場合、容器が破損して核破砕生成物が流出する可能性がある。この異常事象を緩和するためにターゲット容器冷却系等により容器を冷却する設計としている。代表事象は、下記の通りである。

・ターゲット１次冷却系（水銀冷却系）配管破損
・ターゲットインナーケーシング破損
・ターゲット１次冷却系（水銀冷却系）熱交換器除熱低下
・ターゲット１次冷却系（水銀冷却系）循環ポンプ停止

(3) 予備循環ポンプ又はブロアの設計確認事象

放射性物質を内包する系統の循環ポンプ又はブロアが停止した場合、冷却材等の温度及び圧力が上昇し、配管等が破損して放射性物質が流出する可能性がある。この異常事象を緩和するために放射性物質を内包する主要な系統の循環ポンプ又はブロアが停止した場合には予備循環ポンプ又はブロアが起動する設計としている。代表事象は、下記の通りである。

・液体水素減速材系循環ポンプ停止
・ヘリウムベッセル冷却系循環ブロア停止
・生体遮蔽体冷却系循環送風機停止
・水銀ターゲット台車冷却系循環ポンプ停止
・使用済みターゲット冷却系循環ポンプ停止

(4) 陽子ビーム停止の設計確認事象

放射性物質を内包する系統の温度又は冷却材の圧力が上昇した場合、配管等が破損して放射性物質が流出する可能性がある。この異常事象を緩和するために陽子ビームを停止して発熱源を遮断する設計としている。何らかの異常があった場合には陽子ビームを停止するが、上記(2)(3)以外の陽子ビーム停止の設計確認を行う代表事象は、下記の通りである。なお、上記(2)(3)を含めて陽子ビーム停止に対する要求時間が最も厳しい異常事象は「ターゲット１次冷却系（水銀冷却

系）配管破損」又は「ターゲット流路閉塞」であると考えられる。

・陽子ビーム強度異常増加
・液体水素減速材ケーシング破損
・液体水素減速材系冷却器除熱低下
・液体水素減速材系真空断熱層への流体流入
・陽子ビーム窓破損

(5) 陽子ビームシャッター閉鎖の設計確認事象

陽子ビーム窓が破損した場合、放射性物質を含む水が陽子ビームライン内に流出して加速器内に流入する可能性がある。加速器内に水が流入すると加速器が使用不能になる可能性があり、水の流入を防止する対策が必要である。現在の設計ではファーストクロージングバルブを設置してこの異常事象時に閉鎖するものとしている。代表事象は、下記の通りである。

・陽子ビーム窓破損

(6) 非常用ディーゼル発電機起動の設計確認事象

外部電源が喪失した場合、ターゲット取扱室、反射体取扱室等のホットセル内の負圧を保持することができなくなり、場合によっては放射性核種の濃度が高いガスが放射線作業従事者が常時立ち入る箇所に漏洩する可能性がある。この異常事象を緩和するために非常用ディーゼル発電機（D/G）を起動してホットセル内の負圧を保持するための空調設備が止まらない設計としている。代表事象は、電源喪失であり、確認するポンプ又はブロアの起動は下記の通りである。

・ホットセル空調設備

(7) 火災爆発防止の設計確認事象

液体水素減速材系の配管が破損した場合、可燃性物質である水素が減速材冷却設備室内に流出し、部屋内の水素と酸素の濃度によっては爆発の可能性がある。爆発を防止するために液体水素減速材系の通る部屋は全てヘリウムあるいは窒素雰囲気としている。代表事象は、下記の通りである。なお、ヘリウムベッセル内の液体水素減速材系の配管及びケーシングは、真空断熱層と水減速材系のプリモデレータの配管又はケーシングで覆われており、液体水素減速材系の配管又はケーシングが破損してもヘリウムベッセル内に水素が流出することは考えられない。

・液体水素減速材系配管破損

６．２．２　異常事象の評価

前節では各系統又は設備設計が安全要求を満足していることを確認するための異常事象の選定を行ったが、ここでは、安全評価事象として放射性物質の放出を伴う事象の中から、公衆被曝への影響が最も大きいと考えられる水銀冷却系配管破損事象について、代表事象としての評価を行う。「障防法」及び「高圧ガス保安法」では、事故時の評価は必ずしも求められないが、設計対策の妥当性を確認する観点から、以下の２つの事象について評価を行った（Fig. 6.2.2-1 参照）。

(1) 水銀冷却系配管破損事象

a．目的

何らかの原因により、水銀冷却系配管が破損した場合の公衆被曝への影響を評価し、系統内水銀ドレンあるいは漏洩水銀の回収、換気系フィルタによる放射性物質の放出抑制等の設計対策の妥当性を確認する。

b．異常事象想定

水銀の漏えいに伴って、水銀中に含まれる核破砕生成物が同時に放出される事象を想定する。漏えい箇所は、漏えい水銀の量が最大となる位置として、線源台車内配管からの漏えいを想定する。破損規模としては、公衆被曝への影響が大きくなると考えられる大規模漏えいとする。万一、水銀冷却系からの漏えいが発生した場合には、水銀温度上昇等の検知により、陽子ビームは自動的に遮断される。また、漏えいした水銀は線源台車の床面に設置されたライナまたはキャッチパンにより集められ、ドレンタンクに回収、隔離される。ドレンタンクに回収されるまでに、蒸発した水銀中に含まれる希ガス、ヨウ素及び放射化水銀が部屋の換気系を経由してスタックから放出される。

c．解析条件

解析では、公衆被曝線量に関して実際よりも十分厳しい結果を得るために、解析条件を次のように仮定する。

(a) ポンプの停止、系統内水銀のドレンに失敗し、水銀全量が瞬時に漏洩するものとする。

(b) ライナまたはキャッチパンに適切な勾配を設けることにより、１時間以内でドレンタンクへ回収可能であるが、保守的に２時間でドレンタンクへ回収されることを仮定する。

(c) 水銀の蒸発面積は線源台車の床面積の 100%を考慮する。

(d) 空調系の停止に失敗したことを仮定する。

(e) 空調系のフィルタ効率は９９％とする。

d．解析結果

Table 6.2.2-1 に解析結果を示す。本事象時に環境に放出される放射性物質の放出量は以下の通りとなる。

・希ガス　　約 8.6×10^{13} (Bq)

・ヨウ素　　約 1.1×10^{7} (Bq)

・水銀　　約 8.3×10^{8} (Bq)

また、放射性物質の放出に伴う敷地境界外における最大被曝線量は、

・希ガスによる全身被曝線量　　約 0.0086 (mSv)

・ヨウ素による甲状腺被曝線量　　約 0.0000056 (mSv)

・水銀による全身被曝線量　　約 0.00011 (mSv)

であり、自然放射線による公衆被曝線量の 1mSv (全世界平均) を十分下まわるものである。この結果、水銀冷却系配管破損事象が安全上問題となることはなく、対策設備が妥当な設計になっていることが確認された。

(2) 安全裕度評価用水銀冷却系配管破損事象

a．目的

何らかの原因により、水銀冷却系配管が破損した場合の公衆被曝への影響を評価し、放射性物質の放出抑制対策設備の不作動や評価条件を保守的に想定した場合の安全裕度を確認する。

b．異常事象想定

水銀の漏えいに伴って、水銀中に含まれる核破砕生成物が同時に放出される事象を想定する。漏えい箇所は、漏えい水銀の量が最大となる位置として、線源台車内配管からの漏えいを想定する。破損規模としては、公衆被曝への影響が大きくなると考えられる大規模漏えいとする。万一、水銀冷却系からの漏えいが発生した場合には、水銀温度上昇等の検知により、陽子ビームは自動的に遮断される。また、漏えいした水銀は線源台車の床面に設置されたライナまたはキャッチパンにより集められるが、何らかの原因によりドレンタンクに回収、隔離に失敗する。その後、運転員リカバリによりドレンタンクに回収されるまであるいは漏洩水銀がアマルガム化されるまでに、蒸発した水銀中に含まれる希ガス、ヨウ素及び放射化水銀が部屋の換気系を経由してスタックから放出される。

c．　解析条件

解析では、安全裕度の確認のため及び公衆被曝線量に関して実際よりも十分厳しい結果を得るために、解析条件を次のように仮定する。

ポンプの停止、系統内水銀のドレンに失敗し、水銀全量が瞬時に漏洩するものとする。

(a) ライナまたはキャッチパンに適切な勾配を設けることにより、1時間以内でドレンタンクへ回収可能であるが、何らかの原因で回収に失敗し、本事象発生から 10 日後に運転員リカバリによりドレンタンクに回収されるか、又は、漏洩水銀がアマルガム化することを仮定する。

(b) 水銀の蒸発面積は線源台車の床面積の 100%を考慮する。

(c) 空調系の停止に失敗したことを仮定する。

(d) 空調系のフィルタ効率は 90%とする。

(注) ＡＢＷＲでは、フィルタ効率として各種事故 99.9%、重大・仮想事故 99%を使用。原型炉もんじゅでは、各種事故 99%、重大・仮想事故 95%を使用している。ここでは、これらと同様に、設計値に余裕を持った値として 90%とした。

d．　解析結果

Table 6.2.2-1 に解析結果を示す。本事象時に環境に放出される放射性物質の放出量は以下の通りとなる。

・希ガス　　約 8.6×10^{13} (Bq)

・ヨウ素　　約 1.4×10^{10} (Bq)

・水銀　　約 1.0×10^{12} (Bq)

また、放射性物質の放出に伴う敷地境界外における最大被曝線量は、

・希ガスによる全身被曝線量　　約 0.0086 (mSv)

・ヨウ素による甲状腺被曝線量　　約 0.0067（mSv）

・水銀による全身被曝線量　　約 0.14（mSv）

であり、自然放射線による公衆被曝線量の 1mSv（全世界平均）を十分下まわるものである。この結果、水銀冷却系配管破損事象が公衆被曝に関して高い安全裕度を有していることが確認された。

（注）現段階では、公衆被曝への影響の概略把握のため、主要な核種について評価したが、今後、評価核種の検討、水銀によるヨウ素のトラップ効果、気象データ等の評価条件の整備・検討が必要と考えられる。

６．３　今後の課題

ここで行った安全設計評価は予備的なもので、今後、最新の設計を基に異常事象の洗い出し、異常事象時の対応も踏まえた詳細な解析を様々な機器に対して行っていく必要がある。

Table 6.2.2-1 Public exposure estimation at case where mercury coolant duct is broken.

	水銀冷却配管破損事象	安全裕度評価用水銀冷却配管破損事象
事象想定	・水銀冷却系から冷却材全量が瞬時放出 ・冷却材漏えい量が大となる線源台車内での漏えいを想定 ・漏えい水銀は２時間でドレンタンク内へ回収、隔離	・同左 ・同左 ・同左（水銀の蒸発面積100%）
ソースタームの想定	・漏えい水銀の飽和蒸気量＋水銀プール表面からの蒸発量に比例する放射性物質インベントリ	・同左
評価条件		
・水銀温度(℃) ・水銀の蒸発速度(g/m2h) ・漏えい水銀表面積(m2)	150 3.67 35 (台車最低面部床面積)	150 3.67 35 (台車最低面部床面積)
評価結果		
・水銀の蒸発量(g) ・水銀放出量合計(kg) ・放出割合(%)	256.9 0.26 0.0016	30828 30.83 0.1942
水銀中放射性物質ｲﾝﾍﾞﾝﾄﾘ		
・希ガス(Bq) ・ヨウ素(Bq) ・放射化水銀(Bq)	8.56E+13 6.93E+13 5.13E+15	8.56E+13 6.93E+13 5.13E+15
ハザードポテンシャル		
・希ガス放出量(Bq) ・希ガス全身被曝線量(mSv)	8.56E+13 8.59E-03	8.56E+13 8.59E-03
・ヨウ素放出量(Bq) ・甲状腺被曝線量(mSv)	1.12E+07 5.60E-06	1.35E+10 6.72E-03
・水銀放出量(Bq) ・水銀全身被曝線量(mSv) ［事故評価期間 (h) ］	8.30E+08 0.00011 [2]	9.96E+11 0.14 [240]
備考 D/Q(Sv/MeV/Bq) X/Q(h/m3)	3.8E-19 (東海二号設置許可申請書) 1.10E-07 (ＦＣＡ設置許可申請書)	

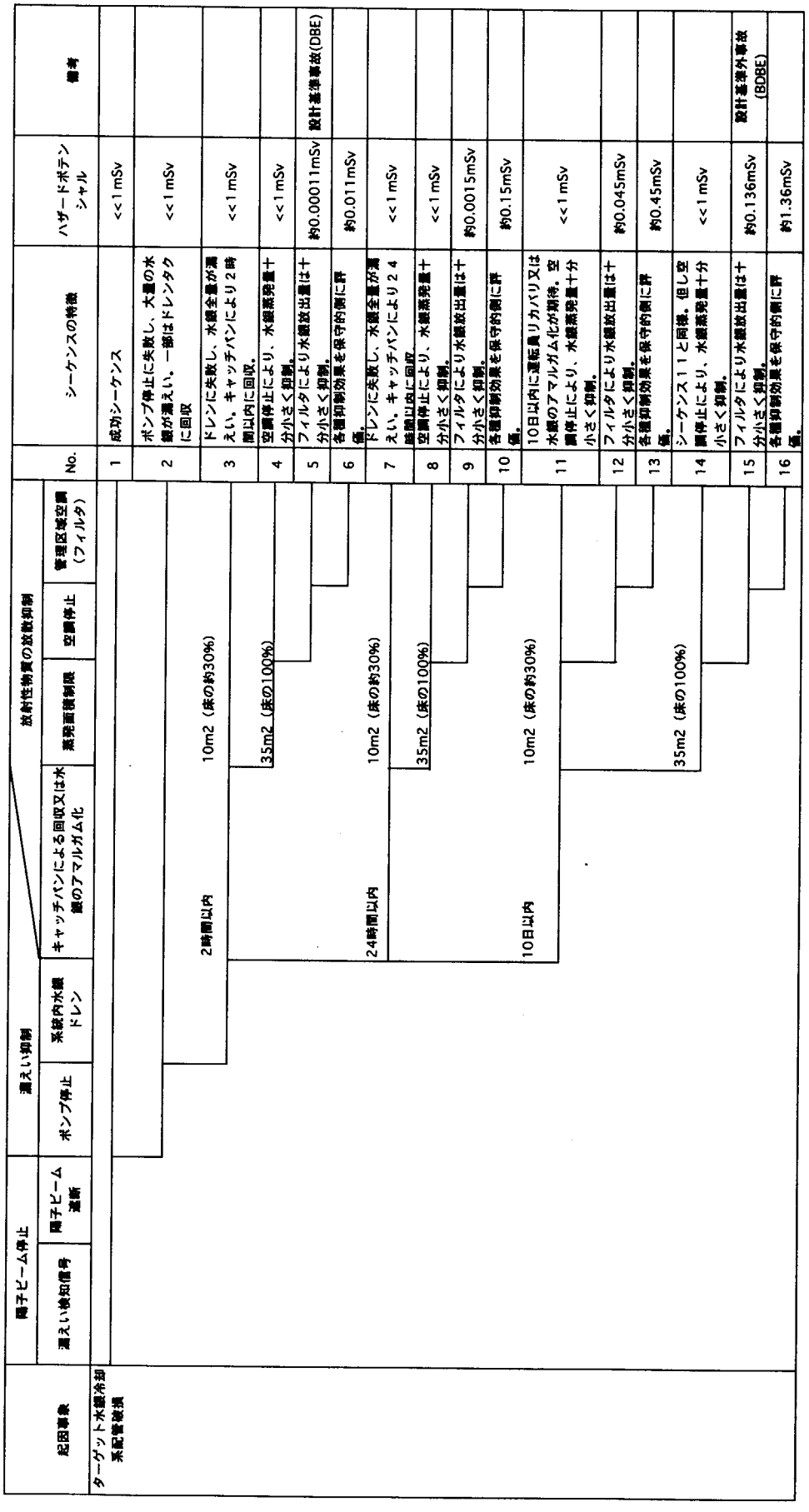


Fig. 6.2.2-1 Event tree at case where mercury coolant duct is broken.

7．建設工程

7．1 概 要

物質・生命科学実験施設に据えつける機器は以下のように大別される。

①３ＮＢＴ機器（電磁石、陽子ビームライン機器、電源、冷却設備等）

②ターゲットステーション構成機器

③水銀ターゲット、液体水素設備、水、ガス系設備、遠隔操作機器等、建屋躯体内に設置する機器

④ミュオン実験施設機器（ミュオン標的、２次ビームライン、電磁石、電源、機械、遮蔽等）

⑤中性子ビームライン機器（分光器、遮蔽体等）

全体建設工程を検討する上での主なマイルストーン条件は以下のとおり。

・平成１９年３月に物質・生命科学実験施設へのビームを受入れる。

・平成１８年９月に 3 GeV 陽子シンクロトロンのコミッショニングが開始。即ち、3NBT トンネルは物質・生命科学実験施設建屋境界部から上流部が放射線管理区域と設定される。

・実験施設建屋の建設工事が平成１５年度から着工、平成１７年度末に竣工する。

上記の機器類の据付場所は建屋である程度区画分けされるが、据付、試験等の作業は同時に行われることが予想されるため、互いの作業内容をよく把握して建設工程を立てることが必要である。また、物質・生命科学実験施設の周辺では 50GeV 陽子シンクロトロン、原子核・素粒子実験施設等の他施設の工事が同時に進むので、これらの建設工程にも配慮する必要がある。このような周辺状況をはじめとする諸事情により、今後、工程は常に調整が必要となる。ここでは、基本となる建設工程を検討した。なお、本検討段階では中性子ビームライン機器の製作に係る予算の割り当てがなく、製作計画が不明のため、中性子ビームラインの据付についてはまだ考慮していない。

7．2 建設工程の検討

(1) 許認可手続きと建設工程

. 建設工程を検討する上で、本施設に設置する機器が関係する法令（放射線障害防止法と高圧ガス保安法）との関係は十分に配慮しておく必要がある。

(a) 放射線障害防止法との関連

本施設は平成１９年３月にビームを受ける時点では、施設全体が放射線障害防止法の許可を得ておく必要がある。また、本施設は施設検査を受ける対象となるので、検査日の事前に所定の機器の据付を完了しておく必要がある。なお、ビームを受ける時点で、本施設は所内の放射線予防規定に定める第１種管理区域（密封されていない放射性同位元素の使用施設）となる。

ミュオン実験施設機器の据付では、既存施設で使用している放射化した機器を平成１８年度に移設する計画がある。据付時期は平成１９年３月より早い時期なので、この時点で変更許可申請手続きを行い、機器の搬入の際には必要な範囲を放射線管理区域指定することになる。現時点では管理区域指定範囲が明確になっていない。放射線障害防止法に係る許可変更申請の工程を Fig.7.2-1 に示す。

現段階でこの他に放射線障害防止法の変更許可申請手続きが必要な対象機器はない。しかし、平成１８

年９月に 3 GeV 陽子シンクロトロンのコミッショニングが開始されること関係して、物質・生命科学実験施設より上流に位置する BT トンネル内への 3NBT 機器の据付は８月には完了することが必要となる。これは、物質・生命科学実験施設内の陽子ビームライントンネル部に据えつける物であっても、ダクト、配線等、上流側から連続して敷設すべき機器はこの時点で据付完了しておくことを意味している。

(b) 高圧ガス保安法との関連

据付時に、高圧ガス保安法に係る検査を受ける機器としてモデレータ及びこれに接続する水素系配管、液体水素設備等の機器がある。検査に必要な期間に余裕をもった据付工程をつくる必要がある。

(c) その他

機器の輸送時の港湾、道路の利用について、必要な許可申請手続きは行うこと。

(2) 機器据付工程

機器の据付は実験施設建屋屋内で作業で実施することが環境的に最適であるが、建屋竣工後から据付に着手した場合、所定の期間内に全ての作業を終えることは困難と判断した。このため、ターゲットステーション構成機器は建屋建築工事と平行して、据付作業を行うこととした。建屋建設工事と機器据付工事との工程案を Fig. 7.2-2 に示す。

建設工事と機器据付工事の主な調整点は以下のとおりである。

・建設工事については、⑩通り付近を境界に上流側（A 工区）と下流側（B工区）で工区を分け、ターゲットステーション機器を据付ための基礎が早く施工されるよう調整した。建屋と通り番号の関係は Figs. 7.2-3 及び 7.2-4 を参照のこと。

・実験施設建屋のクレーンを用いた機器据付作業ができるだけ早く開始できるように、A工区のうち、ターゲットステーション付近で１３０トンクレーン及び実験ホールのクレーンが稼働できるよう計画した。

・重コンクリート遮蔽体の施工は建築側の所掌とする。

ターゲットステーション機器の据付工程を Fig.7.2-5 に示す。このうち、重量機器の据付作業内容を Tables 7.2-1 ～ 7.2-14 に示す。また、3NBT 関連の機器据付工程を、物質・生命科学実験施設より上流に位置する BT トンネル内も含め、Fig.7.2-6 に示す

７．３　搬入方法の検討

(1) 前提条件

① 3NBT 機器

電磁石等の主要機器は性能試験のため、事前に東海研究所構内の HENDEL 棟に納入されている。これらの機器は HENDEL 棟建屋でトラック等に積み込んで、物質・生命科学実験施設建屋に輸送する。搬入では、主に建屋北寄りの③—④通り間の搬入口を利用する。

②ターゲットステーション機器

・重量物は海上輸送とすることとした。海上輸送する機器と陸上輸送する機器の仕分け例を Table 7.3-1 に示す。

・ベースプレート、ボトムライナー、アウターライナーは工場で一体物として製作し、これを輸送することとした。

(2) 港湾の選択

機器輸送の際には下記の港湾の利用が可能である。

・日本原子力発電（株）東海港（以下、原電東海港）

・常陸那珂港

両港の使用に係る条件は Table 7.3-2 に示すとおり。アウターライナーとボトムライナーを一体物として輸送する際、原電（株）東海港の場合、道幅の制約上不可能と判断し、ここでは、常陸那珂港の利用を前提とした。

常陸那珂港を利用する場合の具体例は以下のとおり。

a．出航時及び10時、15時に台船の動静連絡をFAXにて行う。

b．台船の遅れは水切重機のキャンセル及び作業員の待機等、出費の原因となるため、余裕を持った航海工程にする。

c．緊急時に備え、「海上輸送連絡体制表」を作成する。

d．台船輸送の機器は岸壁にて水洗い実施。

ヘリウムベッセルは立てた状態での本船積載となるが、架台の仕様によっては機器高が高くなり、本船ハッチが閉まらない可能性がある。オープンハッチにて海上輸送の場合、水切後岸壁にて水洗いを実施する。

また、常陸那珂港で水切り作業を行う場合、準備すべき揚重機を Table 7.3-3 のとおり見積もった。水切り作業時に必要な手続きは以下のとおり。

a．常陸那珂港湾事務所との事前協議により入港許可取得のこと。

b．事前協議は水切業者に一任でよいと思われるが、第1船及び最終船のみ原研も同席する。

c． 事前に入港船数及び水切り予定日を書面で提出する。

d．入出港に際しては海上保安部に「入出航届」を提出する。（船舶代理店）

(3) 輸送道路

① 常陸那珂港から物質生命科学実験施設へ至る経路は、常陸那珂港臨港道路～工事用輸送道路～構内仮設輸送道路を経由し、NUCEF 前合流点より現・燃料輸送道路を通る順となる。中央制御棟前方向から進入する途中、燃料輸送道路は 50 GeV シンクロトロンを交差する。この部分の勾配は6% である。

② 工事用道路、仮設燃料輸送道路は最大重量 70 トンの物品を搭載したトレーラー（総重量 107 トン）の通行にあたり十分な地耐力を有する。工事用道路の幅は８m、ルート途中の最大勾配は６%、道路中心から道幅方向の勾配は最大２%であり、道路両側には高さ 2.3mの外忍び付フェンスが設置されている。路面はアスファルトコンクリート舗装されている。

③ 臨港道路から工事用道路への入口には幅 9 m のゲートが設けられる。アウターライナー、ボト

ムライナーを一体物として輸送する場合、東京電力側の支柱及び門扉の一時撤去が必要である。

④ 工事用道路の途中には電線が路上を横断する地点が２カ所ある。陸側（核燃料サイクル開発機構側）フェンス外にある電柱４本によるものである。東京電力（株）の電柱移動計画を調査し、移動がない場合、電線高さを一時的に上げる等の措置が必要である。

⑤ 工事用道路途中の仮設橋付近に大宮土木事務所所轄のゲートが設置されている。アウターライナーを一体物として輸送する場合、片側の支柱を一部切断し、門扉一時撤去する必要がある。大宮土木事務所との事前相談が必要である。

⑥ 工事用道路から原研構内入口には守衛詰所が設けられている。対面に水銀灯があり、アウターライナーを一体物として輸送する場合、道路幅の制限のため、この水銀灯を一時撤去することが必要である。構内の仮設燃料輸送道路及び燃料輸送道路の水銀灯も同様の措置を講じることが必要とある。

⑦ 物質・生命科学実験施設前の燃料輸送道路は平成１７年度より嵩上げ工事が予定されている。具体的スケジュールは未定だが、今後の道路利用上調整を要する事項である。

(4) 実験施設建屋への搬入、仮置き

① 野外工事時

(平成１５年度)

BT トンネルへのビームダンプ据付作業のため、燃料輸送道路より進入し、八間道路からトンネル方向へ新修する。

(平成１６年度)

野外クレーンによるターゲットステーション機器の据付作業のため、燃料輸送道路より進入する。同時期に行われる建設工事に係る輸送と工程調整が必要となる。野外クレーンは中心から８～９m位置まで寄りつけるものとする。仮置き場所は野外クレーンの周辺にある基礎の上を利用することとする。

② 平成１７年度５月頃から

建屋の⑨通り付近に、大型機器取扱作業室のクレーンが走行する下に東西に貫通する搬入路（幅 7m 程度）が仮設されている。機器を据付る時には、トレーラーまたはトラックにより搬入路の 130 トンクレーン位置まで機器を持ち込み、130 トンクレーンで取扱う。搬入口高さは約 9m である。

第１実験ホールと第２実験ホールとなる空間には、それぞれ 50 トン及び 30 トンのクレーンが設置されている。第１及び第２実験ホールの空間は、機器の仮置き場所として利用できる。原則として、第１実験ホールには重量が 30 トンを超え 50 トン以下の機器、第２実験ホールには重量が 30 以下の機器を仮置くものとする。

③ 平成１７年１２月頃から

②項に記し搬入路は塞がれ、②—③通り間の搬入口と建屋最南端に設けられた機器搬出入口（4×9m）より機器を施設内に持ち込む。②—③通り間の搬入口は主に３ＮＢＴ機器の搬入に用いる。ターゲットステーション機器及び南側躯体内に設置する機器はトレーラーまたはトラックにより機器搬出入口の下まで機器を移送した後、130 トンクレーンで機器を搬入する。

この期間、建家周辺に相当クレーンが利用できる仮置き場所はない。

7．4　今後の課題

・ターゲットステーション構成機器の工事については、各機器の受注メーカの輸送、据付方法を反映した詳細な工程の作成及び調整を行うこと。
・躯体内設置機器の工程を作成すること。
・中性子ビームラインの設置計画を明確化し、据付工程を作成すること。
・建屋建設の受注業者が決まった段階で、具体的な工程打合わせ
・実験施設内への仮置きスペースの検証
・他の施設、建設工事との関係調整（道路利用、搬入計画）

Table 7.2-1 Installation procedures of base-plate

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
輸送作業 1) 積載されたベースプレートをレバーブロックにてトレーラに固縛する。 2) 常陸那珂港～原研構内据付場所まで輸送する。 輸送に際しては、先導車及び誘導員を配備する。 使用トレーラ：20ｔ低床トレーラ 輸送距離：約 3.0 km 所要時間：約20分	・５ｔレバーブロック ・固縛用ワイヤー、シャックル ・20ｔ低床トレーラ	１．一般道路運行に際しては、特殊車両通行許可（道路管理者）及び制限外積　載許可（出発地警察）申請を事前に行い許可を取得しておく。 ２．許認可取得期間は一概には言えないが、最低一ヶ月以上かかる。 ３．幅広物輸送の際は通常、既設物との接触及び他車両との交通事故防止のため先導車、誘導員を配備するが配備のポイント、人数等は原研より指示。 ※上記１～３は全ての水切り機器の共通事項とし、次項よりは記載しない。
取卸し・据付作業 1) 基礎上に据付位置マーキング（墨打ち）を行う。 2) 据付場所最寄に 160t 油圧クレーンを設置する。 3) ベースプレートを吊上げ、基礎上まで旋回し、着座直前まで吊り下ろす。 4) ベースプレート４点にチェーンブロックをセットし位置決めを行った後、着座させる。 5) ベースプレート最寄にオートレベルを設置する。 6) ベースプレート上に金尺を立て、オートレベルで高さ確認を行いつつ、ジャッキボルトにて水平精度を出す。 7) ベースプレートにドレンパイプを溶接する。	・巻尺、金尺 ・160t 油圧クレーン ・玉掛けワイヤー、シャックル ・チェーンブロック ・オートレベル ・スパナ関係・溶接機	１．位置決めは基礎マーキングと機器マークの３点が合えば可とする。 ２．水平度確認ポイントはＸ、Ｙ軸上の各２点とし、そのポイントで水平度が許容範囲内であれば可とする。 ３．精度確認時の熱膨張対策はどうするのか。 一般的に検査は早朝又は夕方の、日光の影響の少ない時間に行う。 ４．クレーンのアウトリガー下は鉄板にて養生を行う。
グラウト打設作業 1) 機器取り卸し前に基礎の目荒し（ハツリ）を終了させておく。 2) ベースプレート周囲に型枠を設置する。 3) 無収縮モルタルをベースプレート下に流し込む。 4) グラウトの養生期間は２週間とする。	・ハンマードリル ・型枠材 ・モルタルミキサー	１．ベースプレート下面とグラウトの付着率（目標80%）の確認方法未定。
溶接作業 1) ボルト穴のシール溶接を行う。 2) エア抜き孔のシール溶接を行う。	・溶接機	１．グラウト養生期間中でも溶接はできるものとする。
溶接部検査 1) 各溶接部のＰＴ検査を行い、溶接状態を確認する。	・検査液	

Table 7.2-2 Installation procedures of bottom liner

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
輸送作業 1) 積載されたボトムライナーをレバーブロックにてトレーラに固縛する。 2) 常陸那珂港～原研構内据付場所まで輸送する。 輸送距離：約 3.0 km 所要時間：約 90 分	5t レバーブロック ・固縛用ワイヤー、シャックル ・165t ユニットキャリヤ	1．輸送経路中の障害物（ゲート）等は、事前に撤去又は拡幅等の措置を講じる。 2．仮設橋のフェンス高さ（2300H）をクリアするため、機器を嵩上げして積載する。 輸送に際しては、先導車及び誘導員を配備する。
4．取卸し・据付作業 1) 基礎上に据付位置マーキング（墨打ち）を行う。 2) 据付場所最寄に 200t 油圧クレーンを設置する。 3) ボトムライナーを吊上げ、基礎上まで旋回し、着座直前まで吊り下ろす。 4) ボトムライナー４点にチェーンブロックをセットし位置決めを行った後、着座させる。 5) ベースプレート上にトオートレベルを設置する。 6) ボトムライナー上に金尺を立て、オートレベルで高さ確認を行いつつ、ジャッキボルトにて水平精度を出す。	・巻尺、金尺 ・200ｔ油圧クレーン ・玉掛けワイヤー、シャックル ・チェーンブロック ・オートレベル ・スパナ関係	1．ボトムライナーとベースプレートは工場にて仮組を行い、双方の機器にマーキングを行うとともに、ベースプレートにガイド機構を取り付ける。 2．位置決めは基礎マーキングと機器マークの３点が合えば可とする。 3．水平度確認ポイントはX、Y軸上の各２点とし、そのポイントで水平度が許容範囲内であれば可とする。 4．ボトムライナーは水切日より、据付当日まで据付場所周辺に仮置とする。 5．精度確認時の熱膨張対策はどうするのか。 一般的に検査は早朝又は夕方の、日光の影響の少ない時間に行う。 6．クレーンのアウトリガー下は鉄板にて養生を行う。
5．グラウト打設作業 1) 機器取り卸し前に基礎の目荒し（ハツリ）を終了させておく。 2) ボトムライナー周囲に型枠を設置する。 3) 無収縮モルタルをボトムライナー下に流し込む。 4) グラウトの養生期間は２週間	・ハンマードリル ・型枠材 ・モルタルミキサー	1．ベースプレート下面とグラウトの付着率（目標80%）の確認方法未定。
6．溶接作業 1) ベースプレートとボトムライナーのシール溶接を行う。 2) ボルト穴のシール溶接 3) エア抜き孔のシール溶接	・溶接機	1．シール溶接は内側のみ１層とする。 2．グラウト養生期間中でも溶接はできるものとする。
7．溶接部検査 1) 各溶接部のＰＴ検査を行い、溶接状態を確認する。	・検査液	

Table 7.2-3 Installation procedures of outer liner

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
輸送作業 1) 積載されたアウターライナーをレバーブロックにてトレーラに固縛する。 2) 常陸那珂港～原研構内据付場所まで輸送する。 輸送に際しては、先導車及び誘導員を配備する。 輸送距離：約 3.0 ｋｍ 所要時間：約 120 分	・５ｔレバーブロック ・固縛用ワイヤー、シャックル ・165ｔユニットキャリヤ	１．輸送経路中の障害物（ゲート）等は、事前に撤去又は拡幅等の措置を講じる。 ２．仮設橋のフェンス高さ（2300H）をクリアするため、機器を嵩上げして積載する。 ３．輸送経路中の上空障害物は、事前に撤去又は嵩上げ等の措置を講じる。 ４．輸送前に、新たに障害となる構築物等が無いか調査を行う。（水切り１ヵ月前）
取卸し・据付作業 1) 基礎上に据付位置マーキング（墨打ち）を行う。 2) 据付場所最寄に 500t 油圧クレーンを設置する。 3) アウターライナー下部を吊上げ、基礎上まで旋回し、着座直前まで吊り下ろす。 4) アウターライナー４点にチェーンブロックをセットし位置決めを行った後、着座させる。 5) ベースプレート上にトランシットを設置する。 6) アウターライナー下部本体上面よりに巻尺を下ろし、オートレベルで高さ確認を行いつつ、ジャッキにて垂直精度を出す。 7) 高さ調整で生じたアウターライナー下面の隙間は、シムライナー等で調整する。 8) 据付完了後ボトムライナーとのボルト締結を行う。 9) アウターライナーのＸ軸、Ｙ軸の内外に足場を組む。（計８箇所） 10) アウターライナー上部を吊上げ、下部本体上まで旋回し、着座直前まで吊り下ろす。 11) アウターライナー上部を吊上げ、下部本体上まで旋回し、着座直前まで吊り下ろす。 12) 上部本体４点にチェーンブロックをセットし位置決めを行った後、着座させる。 13) 上部据付完了後株とのボルト締結を行う。 14) アウターライナー上部本体上面よりに巻尺を下ろし、オートレベルで高さ確認を行う。	・巻尺、金尺 ・500ｔ油圧クレーン ・玉掛けワイヤー、シャックル ・チェーンブロック ・トランシット ・オートレベル ・スパナ関係 ・50t 油圧ジャッキ ・シムライナー ・トルクレンチ	１．アウターライナーとボトムライナーは工場にて仮組を行い、双方の機器にマーキングを行うとともに、ボトムライナーにガイド機構を取り付ける。 ２．位置決めは基礎マーキングと機器マークの３点が合えば可とする。 ３．水平度確認ポイントはＸ、Ｙ軸上の各２点とし、そのポイントで垂直度が許容範囲内であれば可とする。 ４．クレーンのアウトリガー下は鉄板にて養生を行う。 ５．締結ボルトの締め付けトルク値不明。 ６．アウターライナーは水切日より、据付当日まで据付場所周辺に仮置とする。 ７．精度確認時の熱膨張対策はどうするのか。 一般的に検査は早朝又は夕方の、日光の影響の少ない時間に行う。 ８．アウターライナー上下部は工場にて仮組を行い、双方の機器にマーキングを行うとともに、下部本体上面にガイド機構を取り付ける。 ９．上部据付後、高さ確認を行うが、上下部間でのシムライナー調整は行わない。 10．締結ボルトの締め付けトルク値不明。

Table 7.2-3 Installation procedures of outer liner (continued)

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
溶接作業 1) アウターライナー下部とボトムライナーのシール溶接を行う。 2) アウターライナー内側に溶接用足場を組む。 3) アウターライナー上部と下部のシール溶接を行う。	・溶接機 ・足場材	1．シール溶接は内側のみ1層とする。
溶接部検査 1) 各溶接部のＰＴ検査を行う。	・足場材 ・検査液	

Table 7.2-4 Installation procedures of helium vessel support cylinder

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
輸送作業 1) 積載されたヘリウムベッセルサポートシリンダをレバーブロックにてトレーラに固縛する。 2) 常陸那珂港～原研構内据付場所まで輸送する。 輸送距離：約 3.0 km 所要時間：約 20 分	・5t レバーブロック ・固縛用ワイヤー、シャックル ・20t トレーラ	輸送に際しては、先導車及び誘導員を配備する。
取卸し・据付作業 1) ベースプレート上に据付位置マーキング（墨打ち）を行う。 2) 据付場所最寄に 200t 油圧クレーンを設置する。 3) サポートシリンダを吊上げ、ベースプレート上まで旋回し、着座直前まで吊り下ろす。 4) サポートシリンダ４点にチェーンブロックをセットし位置決めを行った後、着座させる。 5) 位置決め機構にてＸ軸、Ｙ軸を合わせる。 6) 最寄にオートレベルをセットする。 7) サポートシリンダ上に金尺を立て、オートレベルで高さ確認を行いつつ、ジャッキボルトにて水平精度を出す。 8) 高さ調整で生じたアウターライナー下面の隙間は、シムライナー等で調整する。 9) 据付完了後ボトムライナーとのボルト締結を行う。	・巻尺、金尺 ・500t 油圧クレーン ・チェーンブロック ・オートレベル ・スパナ関係 ・トルクレンチ ・玉掛けワイヤー、シャックル	１．サポートシリンダとベースプレートは工場にて仮組を行い、双方の機器にマーキングを行うとともに、ベースプレートに位置決め機構を取り付ける。 ２．位置決めは基礎マーキングと機器マークの３点が合えば可とする。 ３．水平度確認ポイントはX、Y軸上の各２点とし、そのポイントで垂直度が許容範囲内であれば可とする。 ４．クレーンのアウトリガー下は鉄板にて養生を行う。 ５．精度確認時の熱膨張対策はどうするのか。 一般的に検査は早朝又は夕方の、日光の影響の少ない時間に行う。 ６．水平度調整はジャッキボルトにて行うため、サポートシリンダにはジャッキボルトがついているものとする。 ７．シムライナーの固定は行わない。 ８．締結ボルトの締め付けトルク値不明。 ９．この時期建築側で鉄骨フレーム工事が始まるため、当方工事（特にクレーン設置スペース）との取り合い確認が必要。
基準マーキング補正（X，Y軸） 1) アライメントジグ中心にトランシットをセットする。 2) アライメントジグ上のX，Y軸にトランシットラインを合せ、事前に付けたマーキングと相異が無いか確認する 3) トランシット据付位置からアウターライナー外部が見通せない場合は、トランシット位置をX，Y軸どちらかにずらし、補正を行う。	・トランシット ・巻尺、金尺	１．据付基準点はヘリウムベッセルサポートシリンダ中心を正規とする。

Table 7.2-4 Installation procedures of helium vessel support cylinder (continued)

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
中性子ビームラインマーキング作業		
1) サポートシリンダにアライメントジグを取り付ける。 2) アライメントジグ上のビームライン始点位置にトランシットをセットする。 3) 各々ビームライン位置をアウターライナー内面及びボトムライナー上面にマーキングする。 4) アウターライナーのビームダクト取付穴より外を見通し、ビームラインをマーキングする。	・トランシット ・巻尺、金尺	1．アライメントジグ上にはトランシットがセットでき、人が乗れるものとする。 2．ビームラインはアウターライナー外の地面にもマーキングする。
サポートシリンダ内遮蔽据付作業		
1) 据付場所最寄に 300t 油圧クレーンを設置する。 2) アライメントジグを撤去する。 3) シリンダ内遮蔽をトレーラより吊上げ、シリンダ内所定位置に据付ける。 4) シリンダ内遮蔽とシリンダ内壁とを接続板を溶接し固定する。(4 箇所)	・300 t 油圧クレーン ・溶接機 ・接続板 ・玉掛けワイヤー、シャックル	

Table 7.2-5 Installation procedures of helium vessel

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
輸送作業 1) 積載されたヘリウムベッセルをレバーブロックにてトレーラに固縛する。 2) 常陸那珂港～原研構内据付場所まで輸送する。 輸送に際しては、先導車及び誘導員を配備する。 輸送距離：約 3.0 km 所要時間：約 90 分	・5t レバーブロック ・固縛用ワイヤー、シャックル ・165t ユニットキャリヤ	1．輸送経路中の上空障害物は、事前に撤去又は嵩上げ等の措置を講じる。 2．輸送前に、新たに障害となる構築物等が無いか調査を行う。（水切り 1 ヵ月前） 3．ヘリウムベッセルは輸送後、サポートシリンダ据付まで、原研構内に仮置。
取卸し・据付作業 1) 据付場所最寄に 500t 油圧クレーンを設置する。 2) ヘリウムベッセルに玉掛を行い、輸送用架台を取り外す。 3) ヘリウムベッセルを吊上げ、サポートシリンダ上まで旋回し、着座直前まで吊り下ろす。 4) ベッセル周辺に人員を配置し、位置決めピン等で位置決めを行った後、着座させる。 5) 接続ボルトにてサポートシリンダと締結する。 6) ターゲット台車挿入部遮蔽及び陽子ビーム入射部遮蔽据付後、振止梁を 4 ヶ所取り付ける。	・巻尺、金尺 ・500 t 油圧クレーン ・スパナ関係 ・トルクレンチ ・玉掛けワイヤー、シャックル	1．ベッセルはサポートシリンダとセットした時点で、据付精度が出ているものとする。 2．ベッセルには据付精度確認用のマーキングが付いているものとする。 3．据付精度の確認は行えるが、据付後のレベル調整は困難。 レベル調整を行う可能性がある場合は、ジャッキボルト等のレベル出し機構が必要。 4．ベッセル内への異物混入を防ぐため、ボルト止めできる仮蓋を用意する。
ビームライン位置確認 1) ボトムライナーのビームラインマーキング上にトランシットをセットする。 2) ヘリウムベッセルの枝管中心及びアウターライナーマーキングより巻尺を下げ、各々のライン位置、高さを確認する。	・トランシット ・オートレベル ・巻尺	1．ベッセル内に測定機器が設置できれば、その方法での測定がベターと思われる。 2．上記の場合ベッセル内に装着できるアライメントジグが必要となる。
溶接作業 1) ヘリウムベッセル底部にドレンパイプを溶接を行する。	・溶接機	1．シール溶接は 1 層とする。 2．溶接はベッセル内側から行う。
溶接部検査 1) 各溶接部のＰＴ検査を行う。	・検査液	

Table 7.2-6 Installation procedures of neutron beam ducts

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
取卸し・据付作業		
1) 基礎コンクリートにダクトサポート固定用アンカーボルトを打設する。	・巻尺、金尺	1．サポート固定用アンカーは後打ちケミカルアンカーとするのか。
2) 据付場所最寄に 50t 油圧クレーンを設置する。	・50ｔ油圧クレーン ・足場材	2．レーザー測定器の機種、設置方法、精度については今後検討要。
3) ダクトサポートを設置しアンカーボルトで固定する。	・スパナ関係 ・トルクレンチ	
4) ダクトサポート周りに足場を組む。	・ケミカルアンカー	
5) 50ｔ油圧クレーンにてビームダクトを吊上げ、仮据付を行う。	・玉掛けワイヤー、シャックル	
6) トランシット、レーザー測定器等を使用しビームダクト位置決めを行い、据付ける。	・トランシット ・オートレベル	
7) 高さ調整についてはサポートとダクト間のシムライナーにて行う。	・レーザー測定器	
重コン打設用補強（サポート材）取付		
1) 重コン打設時ダクトの移動防止のため、アウターライナー外側より補強部材を溶接する。	・溶接機	1．建築に重コン打設要領を確認し、ビームダクトに極力衝撃を与えない方法を確立する。
2) ビームサポートに移動の恐れがある場合は、サポート周囲にアンカーを打設しサポート材を溶接する。	・サポート材 ・ケミカルアンカー	2．据付精度の確認は行えるが、据付後のレベル調整は不可。
	・足場材	レベル調整を行う可能性がある場合は、ジャッキボルト等のレベル出し機構が必要。

Table 7.2-7 Installation procedures of shielding blocks placed lower level from beam ducts of helium vessel

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
輸送作業 1) 積載された枝管下部遮蔽をレバーブロックにてトレーラに固縛する。 2) 常陸那珂港～原研構内据付場所まで輸送する。 輸送距離：約 3.0 km 所要時間：約30分	・5t レバーブロック ・固縛用ワイヤー、シャックル ・50t トレーラ	輸送に際しては、先導車及び誘導員を配備する。
取卸し・据付作業 1) 据付場所最寄に 360t 油圧クレーンを設置する。 2) 遮蔽体を吊上げ、ベースプレート上まで旋回し、着座直前まで吊り下ろす。 3) ベースプレートの凹凸（位置決め機構）に合せ着座させる。 4) 固定板を溶接し、ベースプレートと固定する。 5) 重コン流入防止のため薄鉄板等で遮蔽体外周を目張りし溶接する。	・360 t 油圧クレーン ・スパナ関係 ・トルクレンチ ・玉掛けワイヤー、シャックル ・溶接機	1．乾燥空気給気ダクトが据付済であること。 2．クレーンのアウトリガー下は鉄板にて養生を行う。 3．遮蔽体を水平に吊るためには最低３ヶ所の吊りピースが必要。

Table 7.2-8 Installation procedures of liners around target trolley

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
取卸し・据付作業 1) ベースプレートを設置しレベル調整、位置決めを行う。 2) ベースプレート周囲に型枠を設置し無収縮モルタルを流込む。 3) 2週間養生を行う。 4) 据付場所最寄に 50t 油圧クレーンを設置する。 5) 50 t 油圧クレーンにてライナーを吊上げ、仮据付を行う。 6) トランシット、オートレベル等を使用しライナー位置決めを行い、据付ける。	・巻尺、金尺 ・50 t 油圧クレーン ・足場材 ・スパナ関係 ・トルクレンチ ・ケミカルアンカ ・玉掛けワイヤー、シャックル ・トランシット ・オートレベル	1．サポート固定用アンカーは後打ちケミカルアンカーとするのか。 2．レーザー測定器の機種、設置方法、精度については今後検討要。
溶接作業 1) ターゲット台車挿入部ライナーとアウターライナー外面とのシール溶接を行う。 2) ターゲット台車レール部とのシール溶接を行う。	・溶接機 ・足場材	1．シール溶接はターゲット台車挿入部ライナーの内側から行う。
溶接部検査 1) 各溶接部のＰＴ検査を行う。	・足場材 ・検査液	
重コン打設用補強（サポート材）取付 1) 重コン打設時ライナーの変形防止のため、ライナー内側に補強部材を取り付ける。	・サポート材 ・足場材	1．サポート材はジャッキ式パイプサポート等を使用し、ライナー内での溶接は行わない。
基準点移設（Ｊ通り基準点） 1) ボトムライナー上にマーキングしているＪ通り基準点の延長線上にトランシットを設置する。 2) ボトムライナー上の基準線をターゲット台車ライナー内に延長しマーキングする。	・巻尺、金尺 ・トランシット	

Table 7.2-9 Installation procedures of shielding blocks placed upper level from beam ducts of helium vessel

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
輸送作業 1) 積載された枝管上部遮蔽をレバーブロックにてトレーラに固縛する。 2) 常陸那珂港～原研構内据付場所まで輸送する。 輸送距離：約 3.0 km 所要時間 ： 約 30 分	・５ｔレバーブロック ・固縛用ワイヤー、シャックル ・110ｔトレーラ	輸送に際しては、先導車及び誘導員を配備する。
取卸し・据付作業 1) 搬入口内にトレーラを進入させる。 2) 天井クレーンにて遮蔽体を吊上げ、枝管部遮蔽上まで移動し、着座直前まで吊り下ろす。 3) 枝管部遮蔽の凹凸（位置決め機構）に合せ着座させる。 4) 遮蔽体上面にオートレベルを設置する。 5) 遮蔽体上面に金尺を立て、オートレベルで水平度確認を行う。 6) 水平度が出ていない場合はシムライナー等で調整する。	・玉掛けワイヤー、シャックル ・スパナ関係 ・トルクレンチ ・オートレベル ・巻尺 ・金尺	１．天井クレーンは最優先で使用できるものとする。 ２．遮蔽体を水平に吊るためには最低３ヶ所の吊りピースが必要。

Table 7.2-10 Installation procedures of pedestals for interstitials blocks

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
取卸し・据付作業		
1) 搬入口内にトラックを進入。	・玉掛けワイヤー、シャックル	1．天井クレーンは最優先で使用できるものとする。
2) 天井クレーンにて支持台座を吊上げ、所定場所まで移動し吊り下ろす。	・スパナ関係	2．支持台座を水平に吊るためには最低３ヶ所の吊りピースが必要。
3) アウターライナー内側のビームラインマーキングと支持台座のビームラインマークを合わせる。	・トルクレンチ	3．テーパーライナーにて水平度調整の場合は、完了後溶接止めを実施する。
4) 最寄にオートレベルを設置する。	・オートレベル	4．フレーム構造を採用する場合は重コン打設前にフレームの据付を行う。
5) 支持台座上面に金尺を立て、オートレベルで水平度を確認。	・巻尺 ・金尺	
6) 水平度調整はテーパーライナー又はジャッキボルトにて行う。	・溶接機	
7) アンカーボルトにて支持台座を固定する。		
グラウト打設作業		
1) 支持台座周囲に型枠を設置。	・型枠材	1．据付前に基礎コンクリートの目荒し（ハツリ）を行う。
2) 無収縮モルタルを支持台座下に流し込む。	・モルタルミキサー	
3) グラウトの養生期間は２週間とする。		
枝管上部遮蔽マーキング（シャッター間構造体据付のため）		
1) 支持台座のシャッター間構造体据付中心線上に、トランシットを設置する。	・トランシット	1．支持台座にはシャッター間構造体据付中心線をマーキングしておく。（出荷時）
2) トランシットにて枝管上部遮蔽肩部を見通し、マーキングする。		

＊ターゲット台車挿入部遮蔽台座及び陽子ビーム入射部遮蔽台座も同要領にて据付を行う。

Table 7.2-11 Installation procedures of interstitials blocks

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
輸送作業 1) 積載されたシャッター間構造体をレバーブロックにてトレーラに固縛する。 2) 常陸那珂港～原研構内据付場所まで輸送する。 輸送距離：約 3.0 km 所要時間：約 30 分	・5t レバーブロック ・固縛用ワイヤー、シャックル ・50 t トレーラ	輸送に際しては、先導車及び誘導員を配備する。
4．取卸し・据付作業 1) 搬入口内にトレーラを進入させる。 2) 天井クレーンにて構造体を吊上げ、トレーラを退出させる。 3) １Ｆ Ｌ床面に構造体を吊り下ろし、上部吊ピースに玉掛を行う。 4) 上部を吊り上げながら、構造体を立て起こす。 5) 支持台座上まで移動し、着座直前まで吊り下ろす。 6) 支持台座の凹凸（位置決め機構）に合せ着座させる。 7) 枝管上部遮蔽上面とアウターライナー内面のマーキングに合せ、仮固定する。 8) 構造体上面にマスレベルを設置し水平度を確認する。 9) 水平度調整は支持台座と構造体間のシムライナーで行う。 10) 連結板にてボルト固定を行う。	・ナイロンスリング ・シャックル ・トルクレンチ ・スパナ関係 ・マスレベル ・巻尺 ・金尺 ・トランシット	１．天井クレーンは最優先で使用できるものとする。 ２．構造体の吊りピースは重心を考慮し、水平に吊れる位置に付ける。 ３．立て起こし時構造体底部が支点となるが強度的に問題ないか。 ４．構造体上面での据付位置確認はできるが、底部での確認はできない。 　また、位置決め機構の凹凸にセットされているため、底部での位置調整は困難。 ５．精度確認時の熱膨張対策はどうするのか。 ６．据付精度確認方法は今後検討要。 ７．締結ボルトの締め付けトルク値不明。 ８．据付完了後、シャッター挿入口よりの転落及び異物の落下事故防止のため、コンパネ等で開口を塞ぐ。

Table 7.2-12 Installation procedures of shutter gates

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
輸送作業		
1) シャッター間構造体をレバーブロックにてトレーラに固縛。	・５ｔレバーブロック	
2) 常陸那珂港～原研構内据付場所まで輸送する。 輸送距離：約 3.0 km 所要時間：約 20 分	・固縛用ワイヤー、シャックル ・20ｔトレーラ	輸送に際しては、先導車及び誘導員を配備する。
取卸し・据付作業		
1) 建屋内に吊下げシャフト取付用架台を組み立てる。		１．シャフト取付用架台は高さ２m程度で作業員２名が作業できるスペースを設ける。
2) 搬入口内にトレーラを進入させる。		２．取付用架台はシャッターブロック搬入日までに組立を完了させておく。
3) 天井クレーンでシャッターブロックを吊上げ、トレーラを退出。	・ナイロンスリング	３．天井クレーンは最優先で使用できるものとする。
4) 1FL 床面にシャッターブロックを吊下し、上部吊ピースに玉掛。	・シャックル	４．シャフトを取付けた場合、吊りピースとの位置関係検討要。
5) 上部を吊り上げながら、シャッターブロックを立て起こす。	・ トルクレンチ ・ スパナ関係	５．立て起こし時底部が支点となるが強度的に問題ないか。
6) シャッター間構造体上まで移動し挿入口より吊り下ろす。	・マスレベル	６．シャッター挿入がスムーズに行えない場合は、シャッターを吊上げ、原因を　　究明する。
7) シャッター上部遮蔽ブロックを取付ける。	・巻尺 ・金尺	７．シャッター間構造体上面には遮蔽ブロック据付位置マークが付いているものとする。
8) シャッター間構造体上にトオートレベルを設置する。	・オートレベル	８．締結ボルトの締め付けトルク値不明。
9) 遮蔽ブロック上面に金尺を立て、オートレベルで高さ確認を行いつつ、シムライナー調整にて水平精度を出し、ボルト締結を行う。		９．駆動試験は据付け順に１台ずつ行うか、全量据付後行うか検討要。
10) シャッター駆動機構を据付け、配線を行う。		
11) シャッターの駆動試験。		

Table 7.2-13 Installation procedures of in-vessel components

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
取卸し・据付作業 1) 建屋内に内、外部プラグ結合作業用足場組み。(建屋内作業場) 2) 搬入口内にトレーラを進入。 3) 天井クレーンにて水冷遮蔽体を吊上げ、ベッセル上部まで移動。 4) ガイド機構に合せ水冷遮蔽体をベッセル内部に挿入し据付け。 5) 同要領にて非水冷遮蔽体を水冷遮蔽体上部に据付け、ボルト締結する。 6) 反射体と反射体外部プラグを結合する。(建屋内作業場) 7) 結合した機器を天井クレーンにて吊上げ、ベッセル内に据付け。 8) 陽子ビーム中心から各指定ポイントの距離を測定する。 9) 反射体と反射体外部プラグをベッセル内から取り出し、建屋内作業場に仮置する。 10) 内部プラグを取付け、再びベッセル内に据付ける。	・足場材 ・玉掛ワイヤー、シャックル ・10ｔチェーンブロック ・トルクレンチ ・スパナ関係 ・レーザー測定器 ・巻尺 ・金尺	1．機器を水平に吊るためにチェーンブロックを使用する。 2．機器結合作業の際、機器の転倒防止措置を講じる。 機器の周辺４ヶ所にアンカーを打設するかウェイトを設置し、機器上部からワイヤー等で張りをする。 3．ベッセル内部及び内部機器には、ベッセル内挿入用のガイド機構が付いているものとする。 4．締結ボルトの締め付けトルク値不明。 5．レーザー測定器の設置場所及びレーザービームの太さ等検討要。 6．締結ボルトの締め付けトルク値不明。 7．建屋内作業場はシート等で周囲を囲い、ゴミ、ホコリを防ぐ。 8．プラグ結合作業用足場は機器搬入日までに組立を完了しておく。
真空試験 1) 冷却水配管フランジ部にメクラ蓋及びゲージを取付ける。 2) コンプレッサにて真空引きを行いリークテストを行う。 3) リークテストは各冷却系統ごとに行う。	・リーク測定ゲージ ・コンプレッサ	
溶接作業・ＰＴ検査 1) 冷却水配管とベッセル側配管をシール溶接する。 2) 各溶接部のＰＴ検査を行う。	・溶接機 ・検査液	

Table 7.2-14 Installation procedures of roof shields

作業内容	使用重機・機材	取合い条件・調整事項
輸送作業 1) 積載された天井遮蔽をレバーブロックにてトレーラに固縛。 2) 常陸那珂港～原研構内据付場所まで輸送する。 輸送距離：約 3.0 ｋｍ 所要時間：約 30 分	・5t レバーブロック ・固縛用ワイヤー、シャックル ・110ｔトレーラ	輸送に際しては、先導車及び誘導員を配備する。
取卸し・据付作業 1) 天井遮蔽枠板をコンクリート部に取付ける。 2) 天井遮蔽枠板が分割搬入される場合は現地にて溶接を行う。 3) 搬入口内にトレーラを進入させる。 4) 天井クレーンにて遮蔽体を吊上げ、トレーラを退出させる。 5) 1FL 床面に構造体を吊り下ろし、チェーンブロックにて遮蔽体を斜めにする。。 6) 2FL まで吊上げた後、チェーンブロックにて遮蔽体を水平にする。 7) 据付場所まで移動し、着座直前まで吊り下ろす。 8) 位置決めを行った後、着座させる。	・玉掛けワイヤー、シャックル ・25t チェーンブロック×2	1．天井クレーンは最優先で使用できるものとする。 2．遮蔽体の吊りピースは、遮蔽体全長を３等分した位置に各２ヶ所ずつ取付。

Table 7.3-1 Transportation methods of target station components

作 業 内 容	使用重機 ・機材	主要機器
1．海上輸送作業		
1) 製作工場にて機器を台船に積み込む。	・台船	ベースプレート、ボトムライナー、アウターライナー、
2) 製作工場より常陸那珂港まで海上輸送を行う。	・小型鋼船	ヘリウムベッセルサポートシリンダ、ヘリウムベッセル、枝管下部遮蔽、枝管状部遮蔽、シャッター間構造体、シャッターブロック、天井遮蔽
2．陸上輸送作業		
1) 製作工場にて機器をトラックに積み込む。	・トラック	中性子ビームダクト、ターゲット台車挿入部ライナー、シャッター間構造体支持台座、ベッセル内機器
2) 製作工場より常陸那珂港まで陸上輸送を行う。		

Table 7.3-2 Comparison of utilization conditions between Hitachi Naka port and the port of the Japan Atomic Energy Power Company Co. Ltd. Tokai power plant.

項 目	常陸那珂港	原電東海港
使用申請先	茨城県常陸那珂港事務所	日本原子力発電（株）東海発電所
入港条件	特になし 船長判断で入港可能状況であれば可	水切当日早朝の入港会議にて可否判断。 有義波 1.5m 以下 風速 10 m 以下 視界 1500m以上 事前に港入口の水深調査を行い浅い場合は浚渫工事要（水深データ非公開） 出港時にも同様の可否会議実施
水切作業条件	風速 10m 以下　船体動揺上下±50cm 前後１m程度であるが、最終判断は発注者、荷役会社、船長の三者による合議	本船入港後に荷役可否会議を行い判断 有義波 1.5m 以下 風速 10 m 以下 船体動揺　前後 50cm 以下、左右 30 cm 以下、上下 30cm 以下
揚重機	無し	125t/30t ジブクレーン
仮置きスペース	10,000 m^2 以上	5,000 m^2 以上。ただし上記水切作業条件を満足しなければ港への立入り不可
輸送経路	臨港道路～専用工事用道路～原研構内 臨港道路通行のための法的許認可要（港湾事務所、警察）	原電構内道路～燃料輸送道路 障害となるゲート３カ所（最狭幅 7m） 所（最狭幅 7m）

Table 7.3-3 Unloading procedure of target station components at Hitachi Naka port.

作 業 内 容	使用重機 ・ 機材	主な対象機器
1) 常陸那珂港重量物専用岸壁に台船を接岸する。 2) 水切用油圧クレーンの組立を行う。 3) クレーンフックに玉掛ワイヤーをセットし、玉掛を行う。 4) ベースプレートを吊上げ、岸壁に待機中のトレーラに積み込む。	・500t 油圧クレーン ・ 360t 油圧クレーン 300 t 油圧クレーン ・ 玉掛けワイヤー、シャックル	ベースプレート、ボトムライナー、アウターライナー、天井遮蔽 ヘリウムベッセルサポートシリンダ、ヘリウムベッセル 枝管下部遮蔽、枝管上部遮蔽、シャッター間構造体、シャッターブロック シャッター間構造体、シャッターブロックはクレーンフックに玉掛ナイロンスリングをセットし、玉掛を行う。

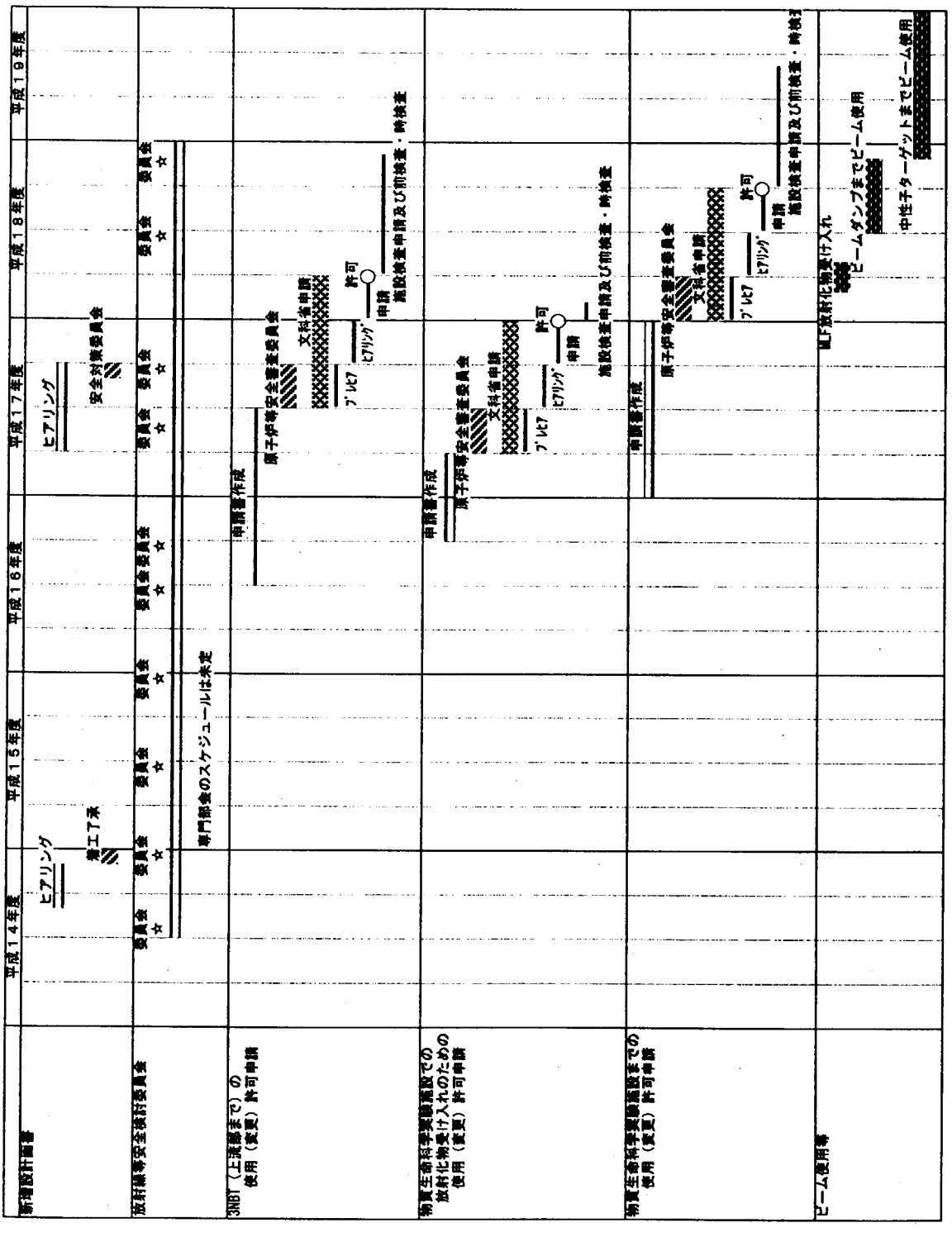


Fig. 7.2- 1 Master schedule of radiation safety for Materials and Life Science Facility.

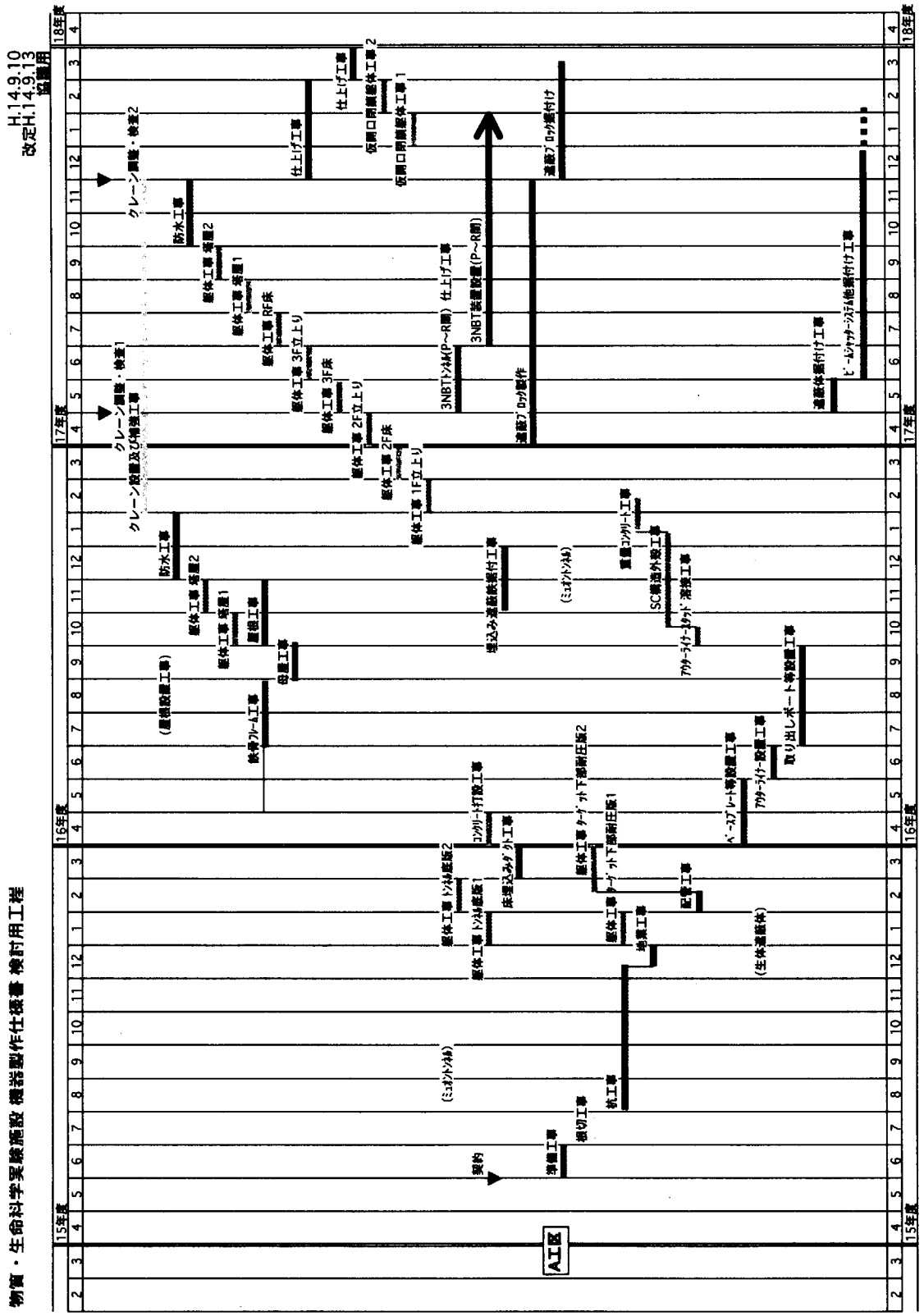


Fig. 7.2-2 Master plan of building construction and installation of target station components.

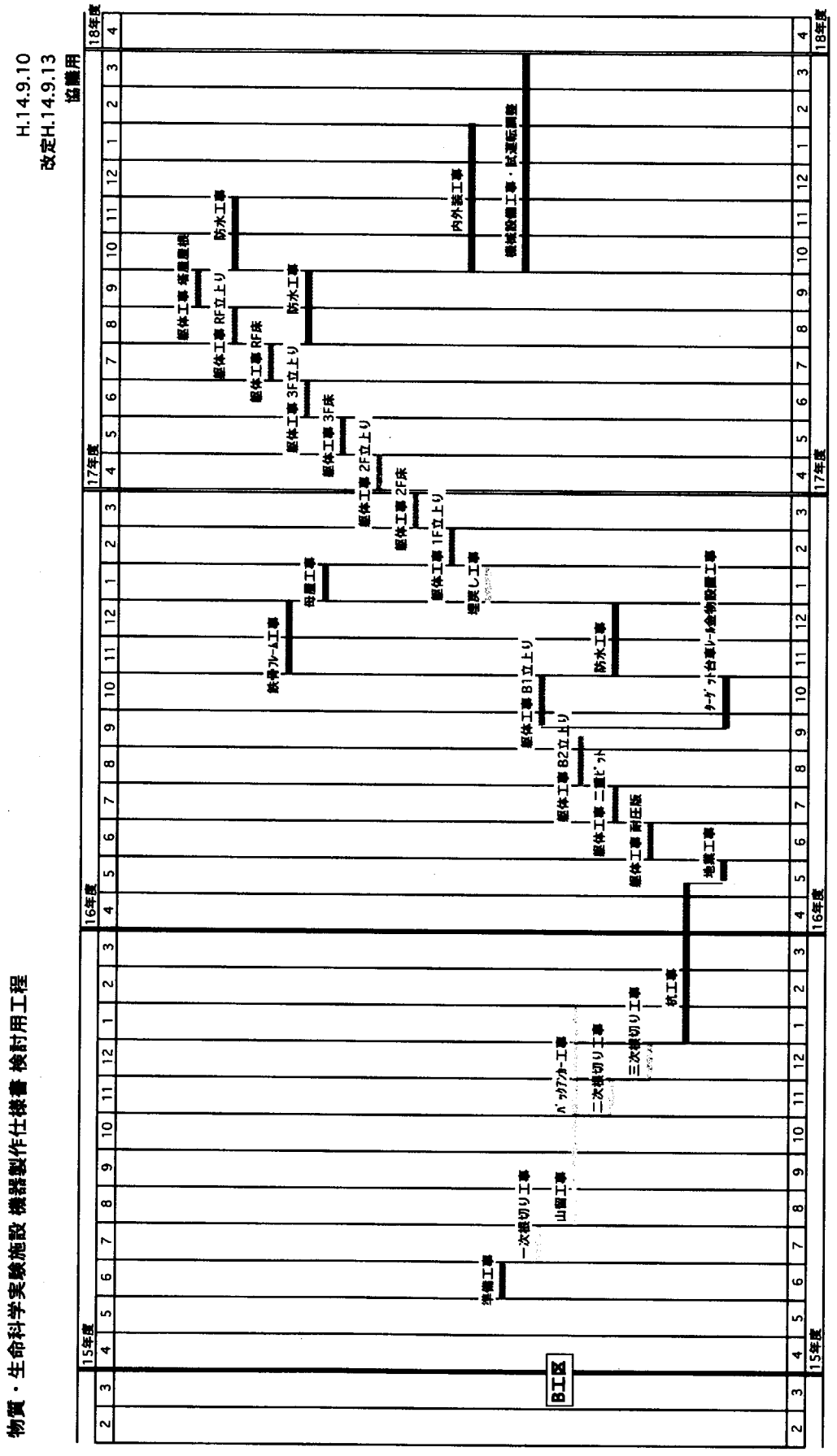


Fig. 7.2-2 Master plan of building construction and installation of target station components. (continued)

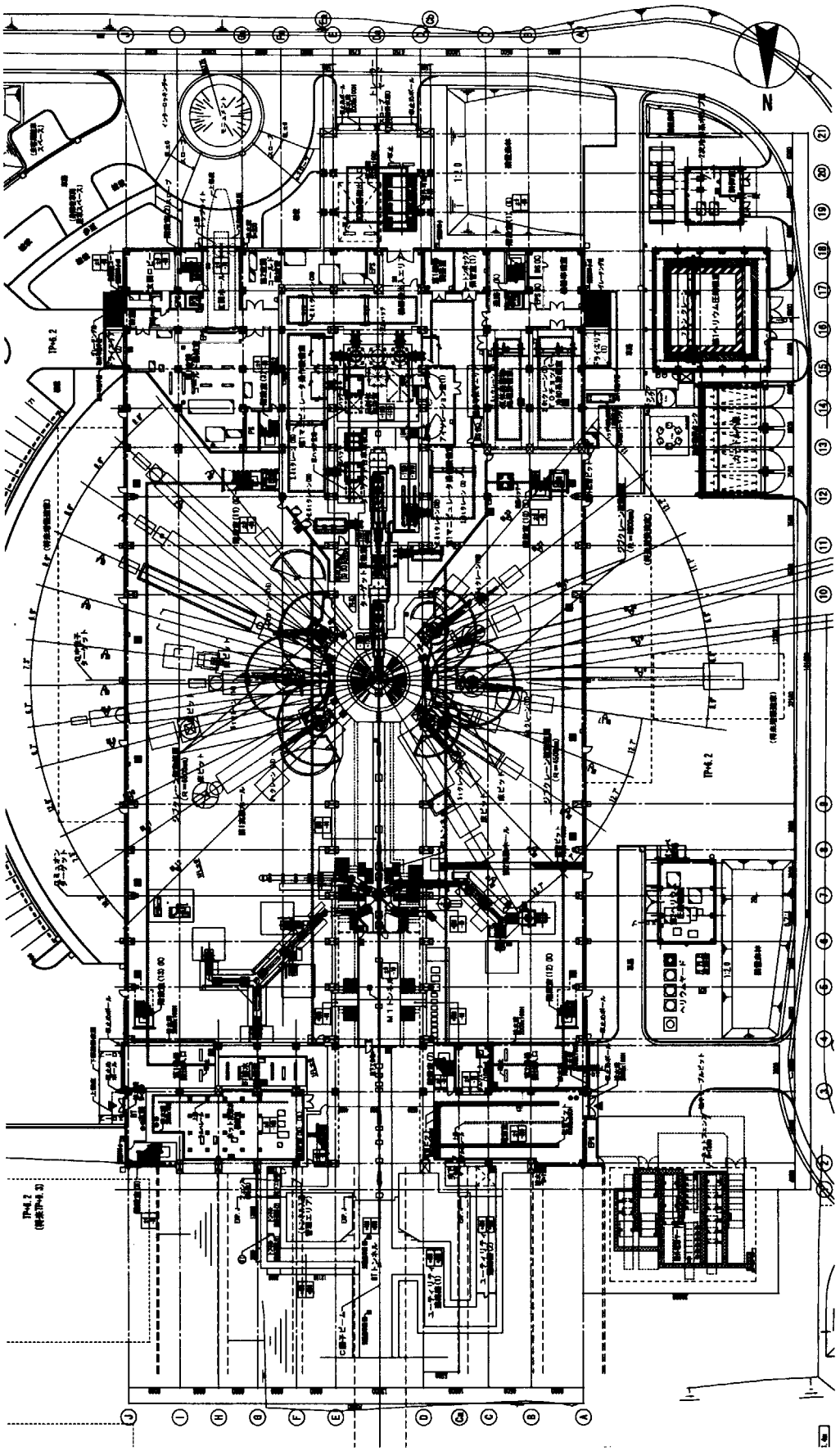


Fig. 7.2-3 Plane view of Material and Life Science Facility building.

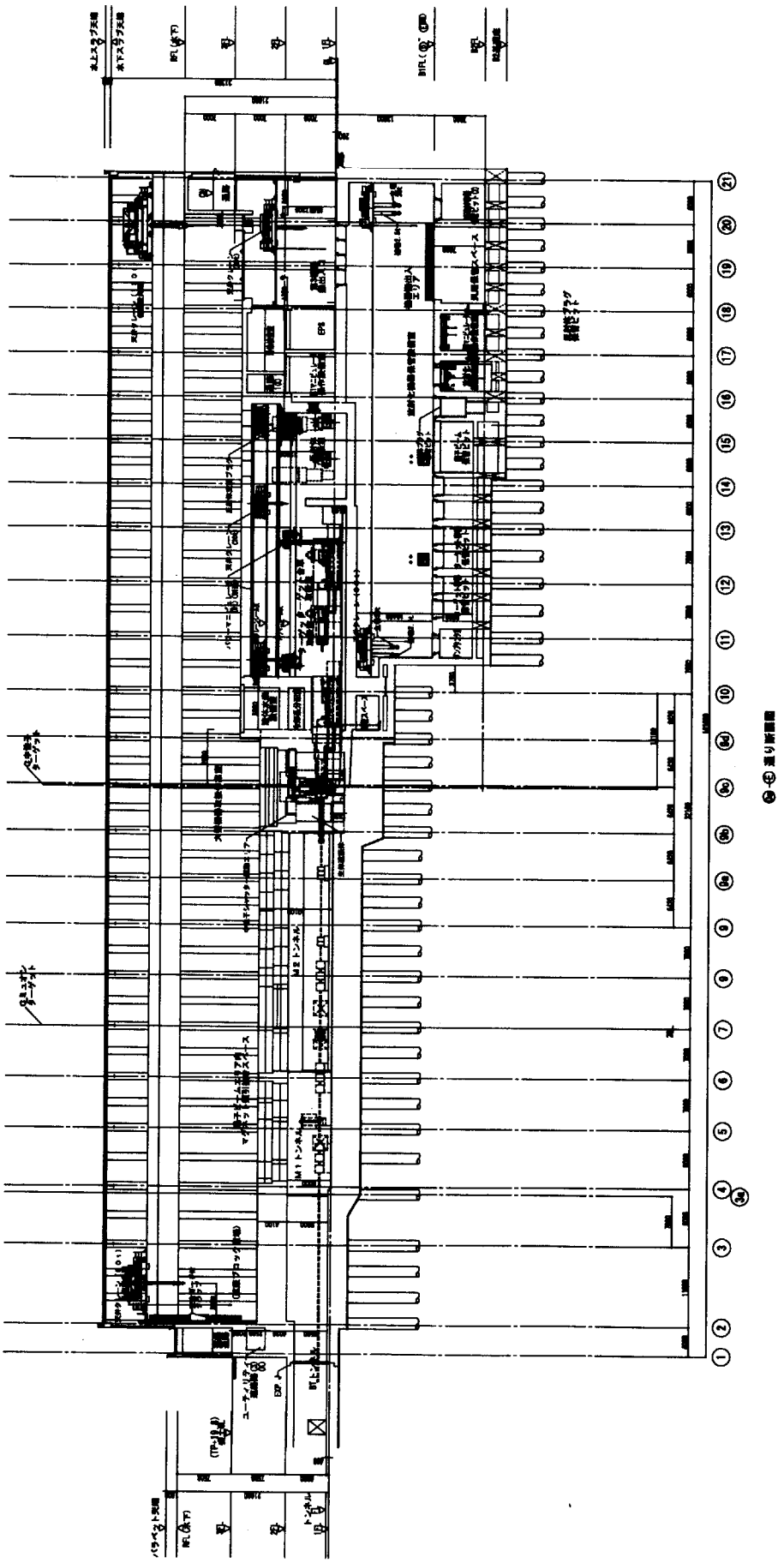


Fig. 7.2-4 Elevation view of Materials and Life Science Facility building.

物質・生命建屋建設工事と平成１４年度発注予定の主要機器の据え付けの概略工程

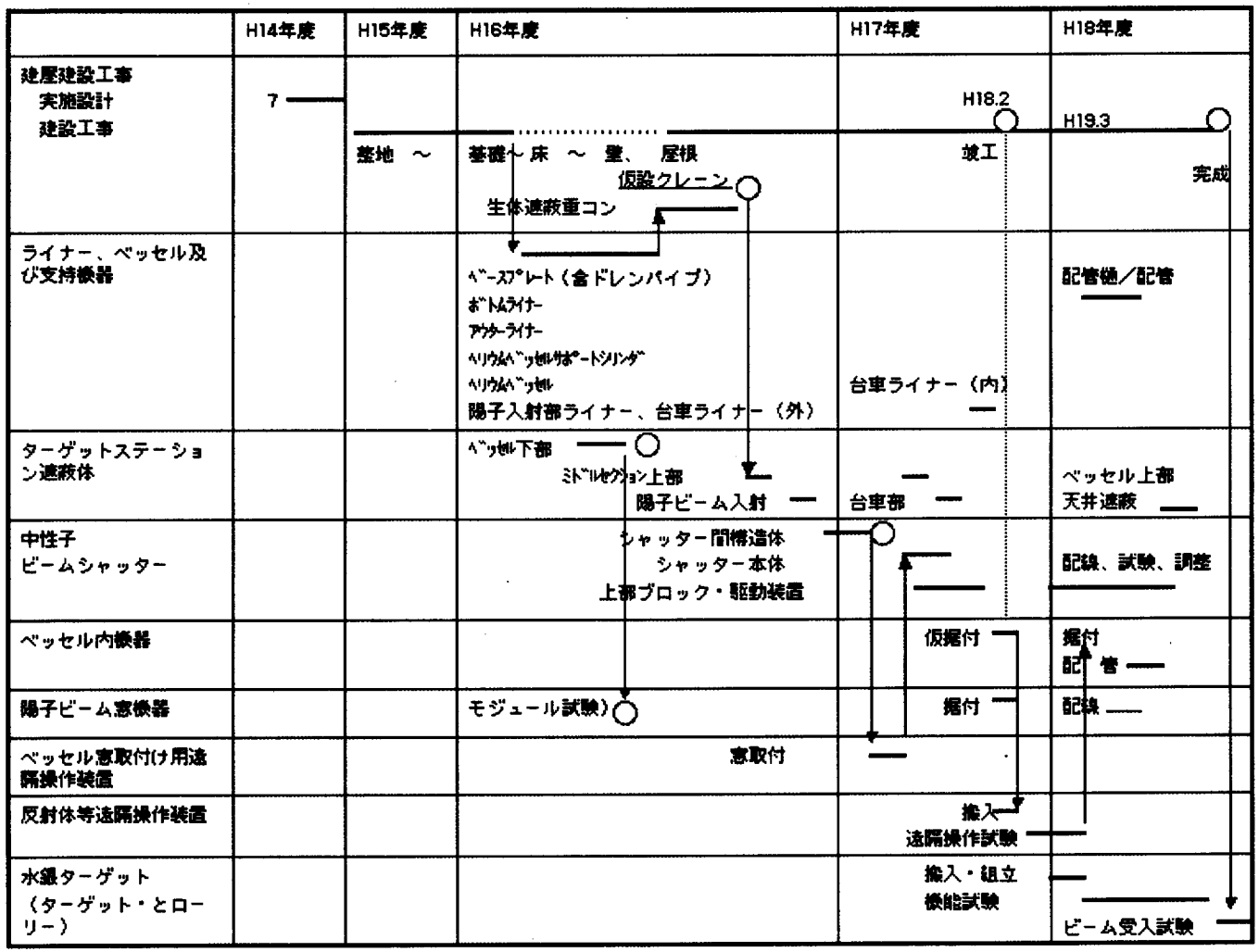


Fig. 7.2.5 Time schedule plan of target station component installation

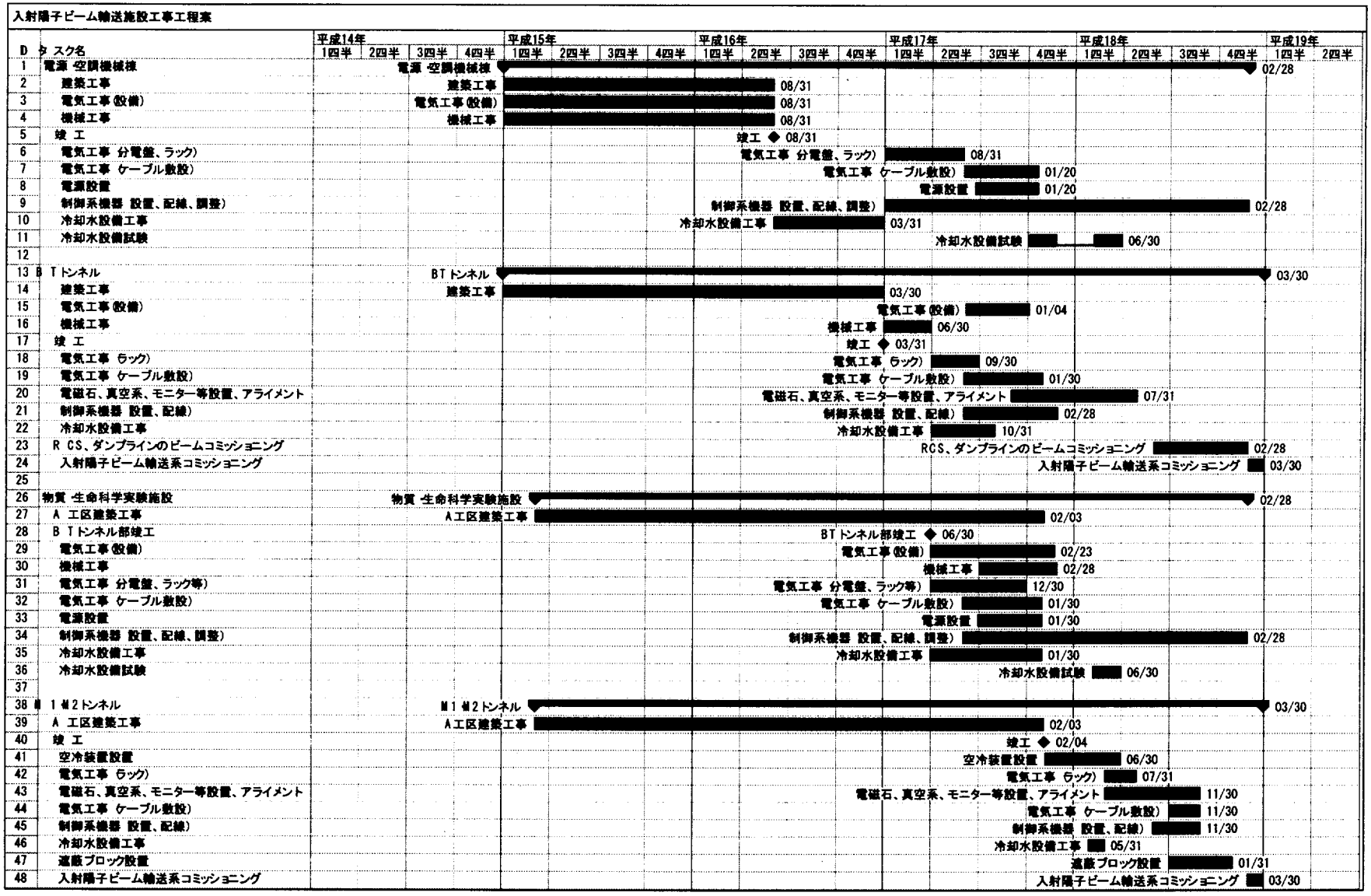


Fig. 7.2-6 Installation schedule of the 3-GeV beam transport facility (3NBT)

8．解析評価

8．1　ニュートロニクス（ニュートロニクス、核発熱、放射線損傷）

8．1．1　ニュートロニクス計算における加速法

時間収束法（Time focusing method）は、中性子パルス計算における有効な加速方法の一つである。パルス計算には、統計的な問題からMCNPの点検出器を用いるが、点検出器は、中性子散乱実験に合わせて、モデレータから十分（通常は、10m）離れた位置に設置する。そのまま点検出器を用いた場合、モデレータ表面から点検出器までの飛行時間がカウントされるため、中性子のエネルギーに応じた飛行時間もカウントされてしまう。そのため、モデレータから中性子が放出されるまでの中性子源内の減速過程における時間事象を反映するパルス時間構造が、中性子のエネルギーの広がりによる時間的な広がりに埋もれてしまうため、パルス計算におけるエネルギービンを小さくする必要があり、現在の計算性能では、十分な統計が得られない。そこで、モデレータ表面から、点検出器までの飛行時間を計算せず、中性子放出までの事象を時間に反映するようにして、中性子源内の減速過程における時間事象を見ること主眼に置く計算方法を採用した。パルス計算において、エネルギービンを大きくしたほうが、限られた計算時間の中で統計精度を上げることができるが、同時に時間分解能の低下が生じる。そのため、Fig. 8.1.1-1に示すように、減速領域の中性子パルスに対して、エネルギービンと時間分解能との関係を評価した。その結果、時間分解能の劣化が10%以下にするためには、エネルギービンを25%以下にする必要があることがわかり、パルス計算におけるエネルギービンは、（対象エネルギーの）25%にすることとした。

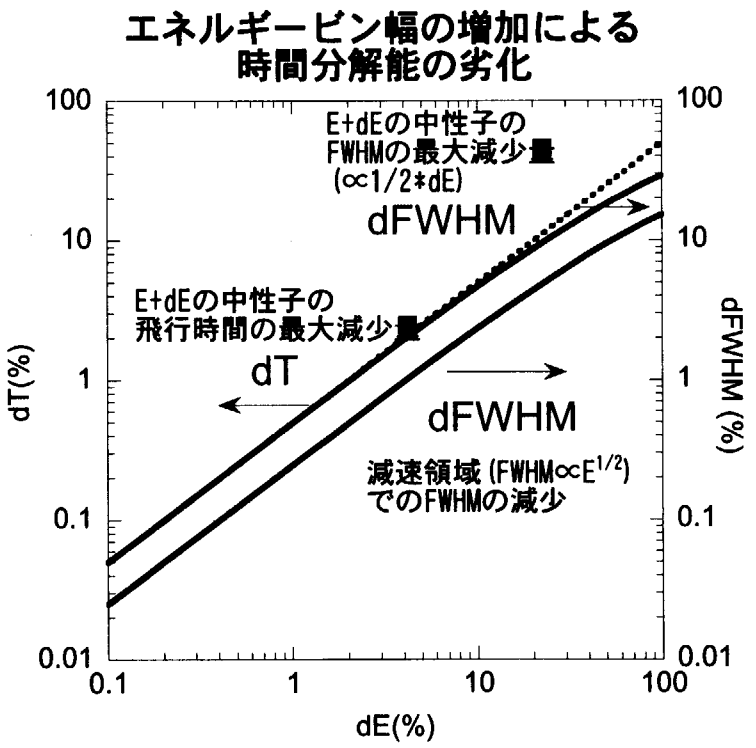


Fig. 8.1.1-1　Energy resolution dependence of time resolution

８．１．２　核発熱計算の概要と計算方法、計算条件

核発熱値は、構造設計や冷却系設計において非常に重要な値であり、効率の良い設計にするためには、精度の良く核発熱値評価を行う必要がある。

核発熱計算及びコードは、NMTC/JAM 及び MCNP を用いた。断面積データは、評価済み核データファイル JENDL-3.2 を用いた。中性子発熱計算用のカーマファクタは、改訂されたカーマファクタ係数を用いた。高エネルギーの光子の発熱は、旧来のカーマファクタ係数を利用したものでなく、電子のエネルギー損失過程における発熱をベースにした。液体水素冷却対象や、核発熱より崩壊熱が大きくなるデカップラー＆ライナー部分では、発熱計算の中に、崩壊熱を考慮した。崩壊熱計算では、NMTC/JAM、MCNP、DCHAIN-SP を用い、定常運転状態での生成放射性核種からのβ線、γ線を考慮した。

核発熱計算の信頼性は、ISTC における核発熱分布測定実験の結果と比較を行って確認している。

評価を先立ち、これまでの検討で得られた工学モデルをベースにした計算モデルを構築した。このモデルでは、再現できない形状（ターゲット形状）は、それに近い形状で模擬し、重要度が小さい部分（水冷遮蔽体冷却構造やミドルセクション冷却構造）は、混合材質と設定した。Fig. 8.1.2-1 に、計算モデルの概略図を示す。

計算条件を Table 8.1.2-1 に示す。陽子ビーム入射は、陽子ビーム窓直前で 1MW としている。

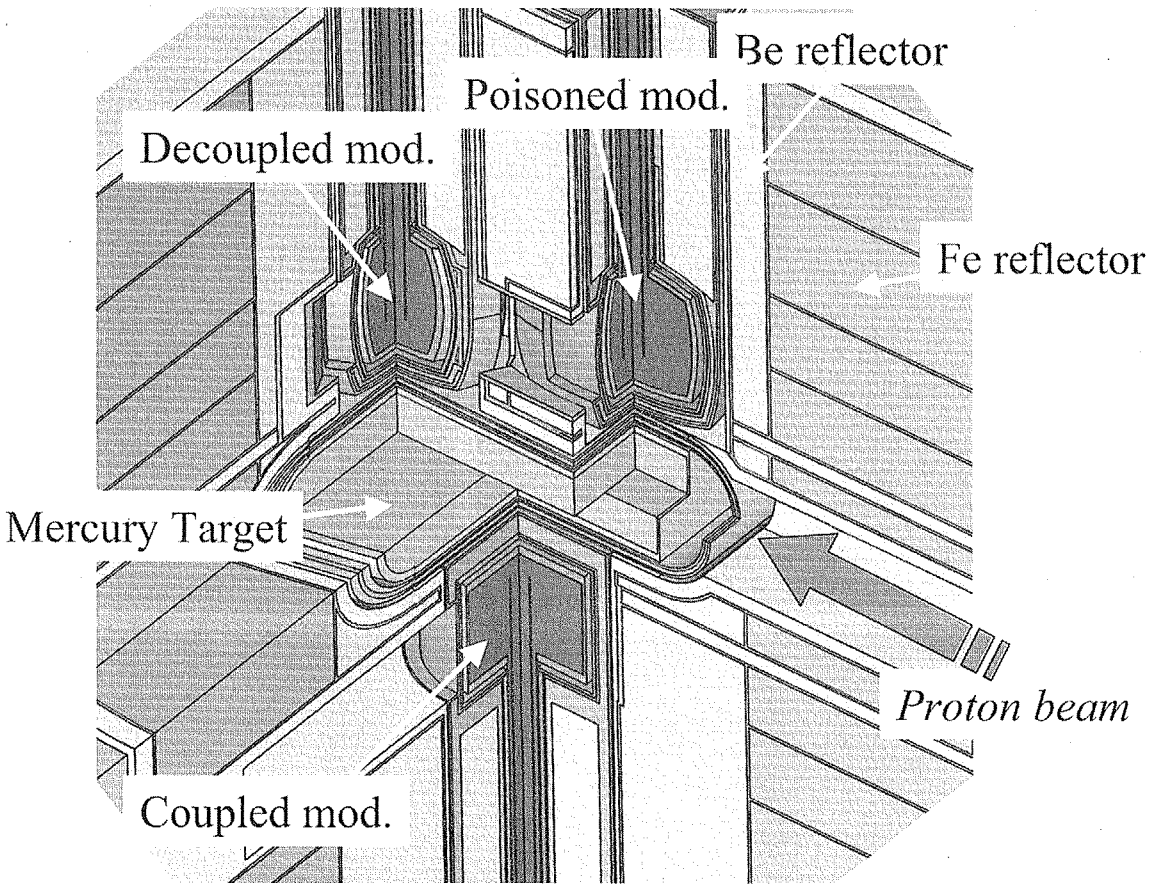


Fig. 8.1.2-1Calculation model

Table 8.1.2-1 Calculation conditions

Item1	Item2	Item3
Proton beam	Power	1MW before proton beam window
	Profile	81 π mm･mrad & Gaussian in phase space
Target	Material	Mercury
Moderator	Material	Liquid hydrogen at 20K
	Type	1 coupled, 1 decoupler and 1 poisoned
Reflector	Material	Inner : Beryllium & Outer : Iron
	Cooling water	Heavy water
		Edge-cooling, gap 3mm
Water-cooled shielding & middle section	Material	Iron 90% + light water 10% (Homoger
Non-cooled shielding	Material	SUS304
Transport particles		Proton, neutron, electron, photon

８．１．３ 核発熱計算

(1) 総発熱量およびピーク発熱量

総発熱の計算結果を Table 8.1.3-1 に示す。表中の重量、体積は、MCNP の体積計算機能から導出したものである。また、平均発熱密度は、単純に核発熱値を、体積で割っただけである。Table 8.1.3-2 には、発熱密度のピーク値を示す。

(2) ターゲット部

水銀ターゲットは、水銀と水銀容器、セーフティハル、セーフティハル冷却水、冷却水容器から構成されている。各構成要素の発熱分布を Fig. 8.1.3-1 から Fig. 8.1.3-5 までに示す。

(3) モデレータ部

水素循環系の熱負荷評価に直結するモデレータの総発熱量計算は、通常運転状態の陽子入射ビーム強度を分母とした。これまでの発熱計算は、陽子ビーム窓直前で 1MW の陽子入射ビーム強度としているが、50GeV リング入射分の欠損、ミュオンターゲットにおける欠損分を考慮して、評価している。そのうちわけを、結果を Table 8.1.3-3 に示す。これらを基に再計算した結果、内訳は、Table 8.1.3-4 のようになった。

モデレータ部の発熱分布を Fig. 8.1.3-6～Fig. 8.1.3-8 に示す。発熱部分は、ターゲットからの距離の 2 乗に反比例することがわかる。

(4) 反射体、水冷遮蔽体、ミドルセクション部

反射体部分の冷却系設計に必要な熱負荷は、反射体部の発熱分布を Table 8.1.3-5 に示す。なお、上、中、下の各部に分かれているアルミ合金製の仕切り板は、半分ずつをそれぞれの熱負荷とした。上部反射体部は、AIC 合金のライナーがあるために、総核発熱量が下部反射体部に比べて大きな値となっている。また、Fig. 8.1.3-9 及び Fig. 8.1.3-10 に反射体や水冷遮蔽体、ミドルセクシ

ョンの陽子ビーム軸を通る水平、垂直断面発熱分布を示す。実際は、他の高さでの水平断面を計算して、熱応力計算や熱流動解析のデータとして利用されている。Fig. 8.1.3-11 は、反射体プラグの高さ方向発熱分布を示している。

(5) 陽子ビーム窓部

陽子窓近傍の発熱分布を Fig. 8.1.3-12 に示す。

Table 8.1.3-1 Total nuclear heat of each component

分類	負荷	重量 (t)	発熱量 (Wt/MW)	種類	体積 (cc)	重量 (g)	発熱 (Wt/MW)	平均発熱密度 (Wt/cc/MW)
ターゲット	水銀	1.739	498.035	水銀	121,059	1,583,686	475.158	3.925001
				水銀容器	14,394	113,717	21.039	1.461632
				鉄ビームダンプ	5,298	41,646	1.838	0.346911
	重水冷却水	0.470	30.113	ターゲット冷却水	15,844	17,504	5.577	0.352006
				セーフティハル＋冷却水容器	57,326	452,884	24.536	0.428014
	軽水冷却水	8.870	3.843	トローリー先端部フランジ	36,632	289,397	101	0.002758
				トローリー先端部鉄遮蔽体	1,190,100	8,580,347	3.742	0.003145
				トローリー先端部非水冷遮蔽	559,001	4,393,983	203	
				ターゲット後方ボイド	44,619	0		
				セーフティハルボイド	232,904	0		
				ボイド	64,219	0		
反射体	反射体冷却水	35.557	197.332	反射体容器	160,763	450,110	27.476	0.170910
				反射体冷却水	39,778	43,945	8.484	0.213294
				Be反射体(上)	22,262	41,184	9.014	0.404899
				Be反射体(中)	4,089	7,564	2.955	0.722703
				Be反射体(下)	35,522	65,716	11.430	0.321775
				SS反射体(上)	218,954	1,729,741	50.882	0.232387
				SS反射体(中)	70,883	559,979	21.798	0.307520
				SS反射体(下)	209,090	1,651,815	49.742	0.237898
				ライナー1(ポイズンド)	2,032	14,232	2.383	1.172708
				ライナー2(非結合型)	2,346	16,429	3.490	1.488009
				内反射体プラグ	2,371,707	17,099,462	3.724	0.001570
				外反射体プラグ	1,924,710	13,876,716	5.954	0.003093
遮蔽体	遮蔽体冷却水	36.651	95.688	水冷遮蔽体	5,083,540	36,651,154	95.688	0.018823
	ミドルセクション冷却水	35.719	26.362	ミドルセクション	4,954,303	35,719,385	26.362	0.005321
				非水冷遮蔽体	134,371,740	1.0562E+09	6.917	0.000051
陽子ビーム窓	窓冷却水	2,525.389	3.095	陽子ビーム窓	267	2,187	2.345	8.781527
				陽子ビーム窓冷却水	339	338	360	1.061545
				陽子ビーム窓枠	2,962	24,257	389	0.131438
ポイズンド	液体水素	0.001	1.096	液体水素1	1,036	73	520	0.501308
				ポイズン	37	221	134	3.596411
				モデレータ容器1	384	1,076	443	1.152519
	モデレータ冷却水	0.016	4.540	デカップラー1	423	2,962	1,610	3.806284
				モデレータ付属Be反射体1	4,031	7,458	987	0.244919
				冷却水1	1,328	1,323	712	0.536642
				He+真空容器1	301	632	309	1.028750
				He容器＋冷却水容器1	1,129	3,161	921	0.815956
				真空ギャップ1	755	0		
非結合型	液体水素	0.001	1.091	液体水素2	1,071	75	548	0.512329
				モデレータ容器2	384	1,076	543	1.412677
	モデレータ冷却水	0.015	5.263	デカップラー2	405	2,840	1,800	4.439654
				モデレータ付属Be反射体2	4,010	7,418	1,232	0.307342
				冷却水2	1,265	1,261	746	0.589441
				He+真空容器2	299	628	385	1.287174
				He容器＋冷却水容器2	1,152	3,227	1,100	0.954652
				真空ギャップ2	736	0		
結合型	液体水素	0.002	2.151	液体水素3	1,897	133	1,034	0.545417
				モデレータ容器3	783	2,192	1,116	1.425810
	モデレータ冷却水	0.020	7.169	モデレータ付属Be反射体3	5,701	10,546	1,211	0.212346
				冷却水3	4,292	4,278	3,908	0.910447
				He+真空容器3	481	1,010	548	1.138930
				He容器＋冷却水容器3	1,499	4,197	1,503	1.002793
				真空ギャップ3	1,038	0		
陽子ビーム孔				陽子ビーム孔	39,239	0		
中性子ビーム孔				中性子ビーム孔	661,678	0		
ギャップ				ギャップ	2,956,742	0		
総発熱量							882.899	

Table 8.1.3-2 Peak heat density

Component	Material	Peak heat density (W/cm^3@1MW)
Target	SS-316L	690
Proton Beam Window	Inconel-718	310
Moderator Vessel	Aluminum alloy	3.4
Moderator	H_2	1.2
Reflector Vessel	Aluminum alloy	6.0
Water-cooled shield	SS-316L	0.8
Hellium Vessel	SS-316L	0.2

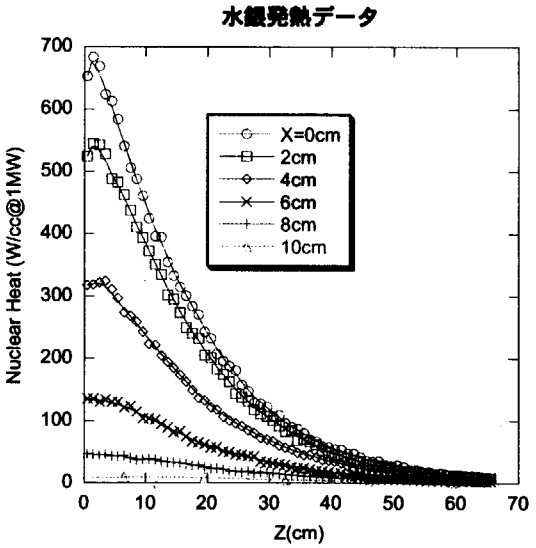
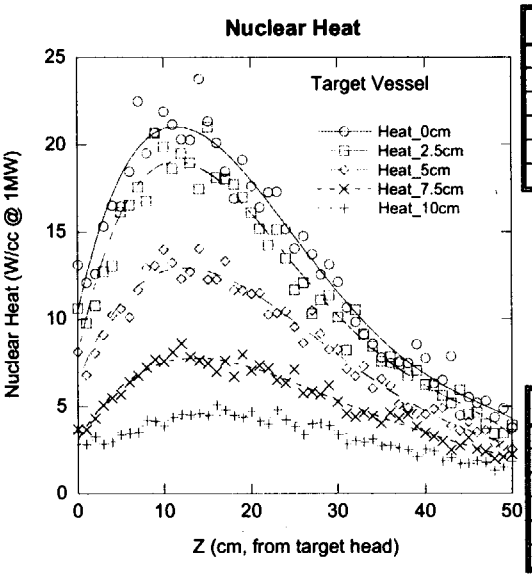


Fig. 8.1.3-1 Nuclear heat distributions in the mercury target



Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	10.533
M1	2.16
M2	-0.13859
M3	0.0028538
M4	-1.9919e-05
R	0.98291

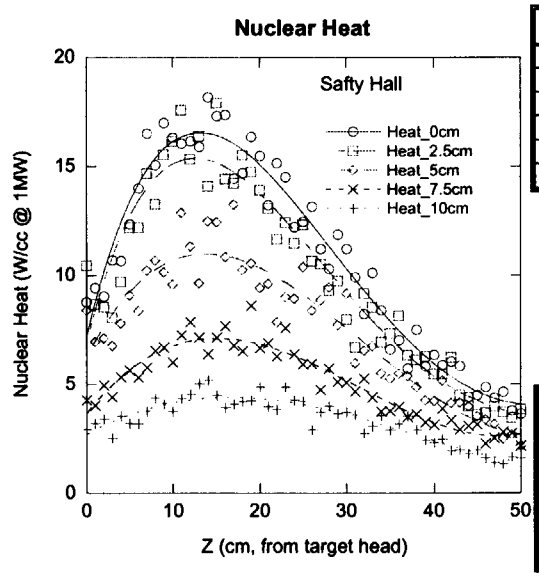
Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	7.9909
M1	2.2731
M2	-0.14776
M3	0.0031912
M4	-2.365e-05
R	0.98484

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	6.4623
M1	1.2198
M2	-0.071653
M3	0.0013485
M4	-8.6634e-06
R	0.9849

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	3.1036
M1	0.81232
M2	-0.045118
M3	0.00085704
M4	-5.7684e-06
R	0.97975

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	2.792
M1	0.16855
M2	-0.0014809
M3	-0.00020632
M4	3.2068e-06
R	0.95981

Fig. 8.1.3-2 Nuclear heat distributions in the target vessel



Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	7.2003
M1	1.6563
M2	-0.091073
M3	0.0015746
M4	-8.8146e-06
R	0.97865

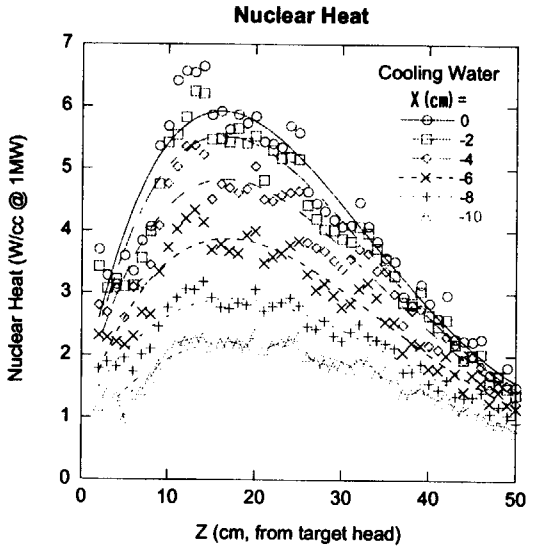
Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	6.8997
M1	1.5703
M2	-0.090658
M3	0.0016729
M4	-1.0283e-05
R	0.96288

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	6.2518
M1	0.76906
M2	-0.036977
M3	0.00046422
M4	-1.2135e-06
R	0.94751

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	3.6656
M1	0.49968
M2	-0.020682
M3	0.00016623
M4	7.9925e-07
R	0.95606

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	2.7222
M1	0.21126
M2	-0.0069882
M3	1.0351e-05
M4	6.8737e-07
R	0.92838

Fig. 8.1.3-3 Nuclear heat distributions in the safety hall



Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	1. 3596
M1	0. 67351
M2	-0. 031483
M3	0. 00049255
M4	-2. 6141e-06
R	0. 98215

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	1. 2701
M1	0. 62208
M2	-0. 028751
M3	0. 00044405
M4	-2. 3242e-06
R	0. 98464

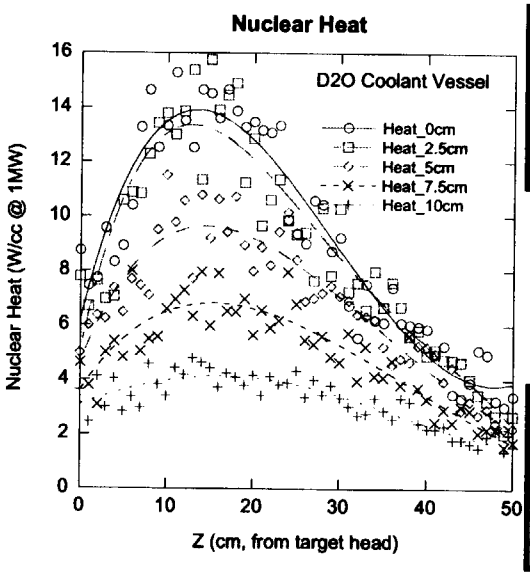
Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	1. 2274
M1	0. 51683
M2	-0. 023424
M3	0. 00035348
M4	-1. 8097e-06
R	0. 98453

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	0. 55943
M1	0. 21301
M2	-0. 0086036
M3	0. 00011585
M4	-5. 303e-07
R	0. 98533

+ M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	1. 006
M1	0. 40379
M2	-0. 017959
M3	0. 00026607
M4	-1. 3393e-06
R	0. 98317

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	1. 0113
M1	0. 25504
M2	-0. 010714
M3	0. 00014531
M4	-6. 5907e-07
R	0. 98644

Fig. 8.1.3-4 Nuclear heat distributions in the cooling water



Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	6. 1379
M1	1. 3218
M2	-0. 068774
M3	0. 0010575
M4	-4. 5772e-06
R	0. 95707

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	5. 0033
M1	1. 5464
M2	-0. 091514
M3	0. 0018672
M4	-1. 3541e-05
R	0. 94858

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	4. 6197
M1	0. 79711
M2	-0. 039432
M3	0. 00062072
M4	-3. 4062e-06
R	0. 94661

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	3. 6093
M1	0. 47667
M2	-0. 021692
M3	0. 00029706
M4	-1. 3904e-06
R	0. 90705

Y = M0 + M1*x + ... M8*x^8 + M9*x^9	
M0	3. 0888
M1	0. 11507
M2	-0. 0019337
M3	-9. 968e-05
M4	1. 6074e-06
R	0. 89595

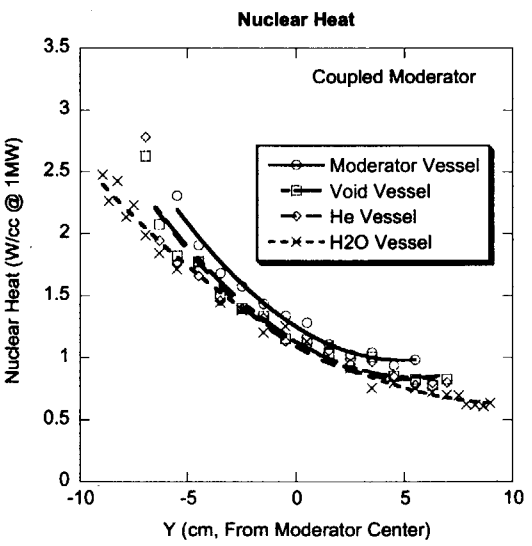
Fig. 8.1.3-5 Nuclear heat distributions in the cooling water vessel

Table 8.1.3-3 Proton beam intensity in normal operation and total nuclear heat of three moderators

1MW当たりの水素負荷(W)	4,476
モデレータ容器厚さの補正(W)	-276
補正後1MW当たりの水素負荷(W)	4,200
陽子ビーム窓到達ビーム強度(MW)	0.89294
最終水素負荷(W)	**3,750**

Table 8.1.3-4 Total nuclear heat of each moderator

		補正後発熱量 (W/cc/ .89294MW)		補正後体積 (cc)	補正後発熱量 (W/cc/ .89294MW)	*補正前発熱量 (W/cc/MW)*
ポイズンド	液体水素	1,026	液体水素1	1,027	442	*495*
			ポイズン	46	137	*153*
			モデレータ容器1	416	447	*463*
非結合型	液体水素	986	液体水素2	1,057	467	*523*
			モデレータ容器2	406	519	*536*
結合型	液体水素	1,739	液体水素3	1,898	946	*1,059*
			モデレータ容器3	558	793	*1,246*
総発熱量	液体水素	3,750				



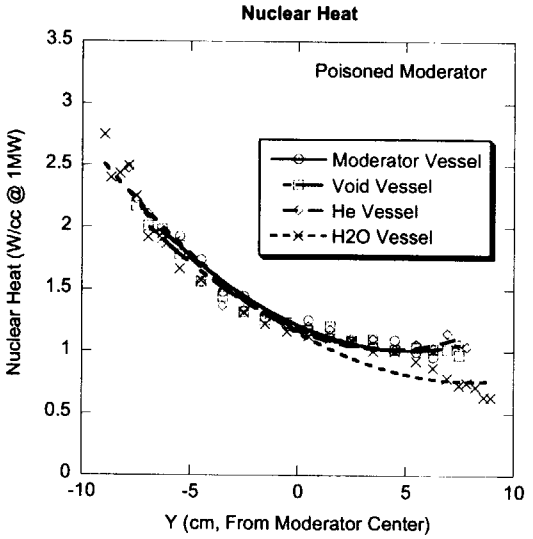
y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.011247	0.0017635
m2	4.9029	0.80525
m4	0.97884	0.038755
カイ２乗	0.037358	NA
R	0.99035	NA

y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.0095818	0.0017912
m2	5.4765	1.0823
m4	0.84226	0.050834
カイ２乗	0.18754	NA
R	0.97694	NA

y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.010283	0.0025414
m2	5.0801	1.3385
m4	0.8249	0.06625
カイ２乗	0.37751	NA
R	0.95547	NA

y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.0048709	0.0005318
m2	10.105	1.1294
m4	0.6305	0.043867
カイ２乗	0.12721	NA
R	0.9938	NA

Fig. 8.1.3-6 Nuclear heat distributions in coupled moderator



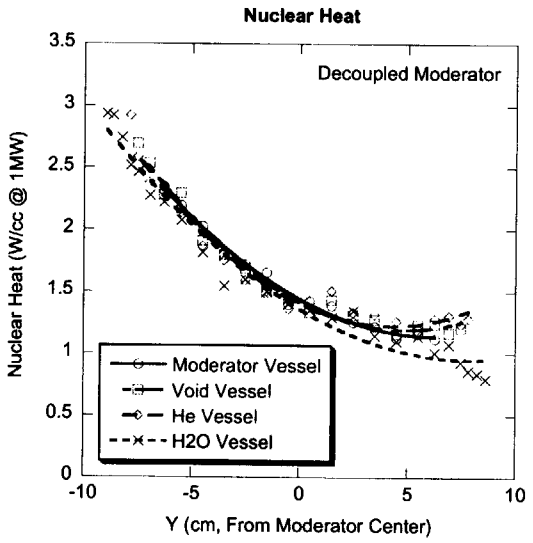
y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.0071497	0.0011487
m2	5.3229	0.89916
m4	1.0098	0.030039
カイ２乗	0.038565	NA
R	0.98673	NA

y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.0069728	0.00074925
m2	5.0461	0.5829
m4	1.0105	0.021008
カイ２乗	0.0576	NA
R	0.98854	NA

y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.0087428	0.00093937
m2	4.1995	0.50245
m4	1.0188	0.02771
カイ２乗	0.14089	NA
R	0.98153	NA

y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.0060438	0.00090926
m2	8.0623	1.2577
m4	0.75994	0.047489
カイ２乗	0.37189	NA
R	0.98228	NA

Fig. 8.1.3-7 Nuclear heat distributions in poisoned moderator



y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.0073492	0.00091224
m2	6.4187	0.82512
m4	1.1372	0.033196
カイ２乗	0.024322	NA
R	0.99432	NA

y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.0092869	0.00087518
m2	4.9072	0.49906
m4	1.1936	0.024159
カイ２乗	0.078591	NA
R	0.99072	NA

y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.0097652	0.0010681
m2	4.3199	0.52337
m4	1.2247	0.031467
カイ２乗	0.18216	NA
R	0.98171	NA

y = M1*(M0-M2)^2+M4		
	値	エラー
m1	0.0064747	0.00089816
m2	7.9551	1.1728
m4	0.95009	0.048615
カイ２乗	0.31222	NA
R	0.9861	NA

Fig. 8.1.3-8 Nuclear heat distributions in decoupled moderator

Table 8.1.3-5 Total nuclear heat of each part of reflector and reflector vessel

名称	発熱 (kW@1MW)	体積 (cc)	発熱密度 (W/cc@1MW)		名称	発熱 (kW@1MW)	体積 (cc)	発熱密度 (W/cc@1MW)
上部反射体部発熱	74.6	320830	0.233		上部反射体	72.3	315032	0.230
					上部反射体仕切り板	4.6	11596	0.395
中間部反射体部発熱	43.4	124075	0.350		中間部反射体	39.0	111379	0.350
					下部反射体仕切り板	4.2	13796	0.307
下部反射体部発熱	68.6	322479	0.213		下部反射体	66.5	315581	0.211

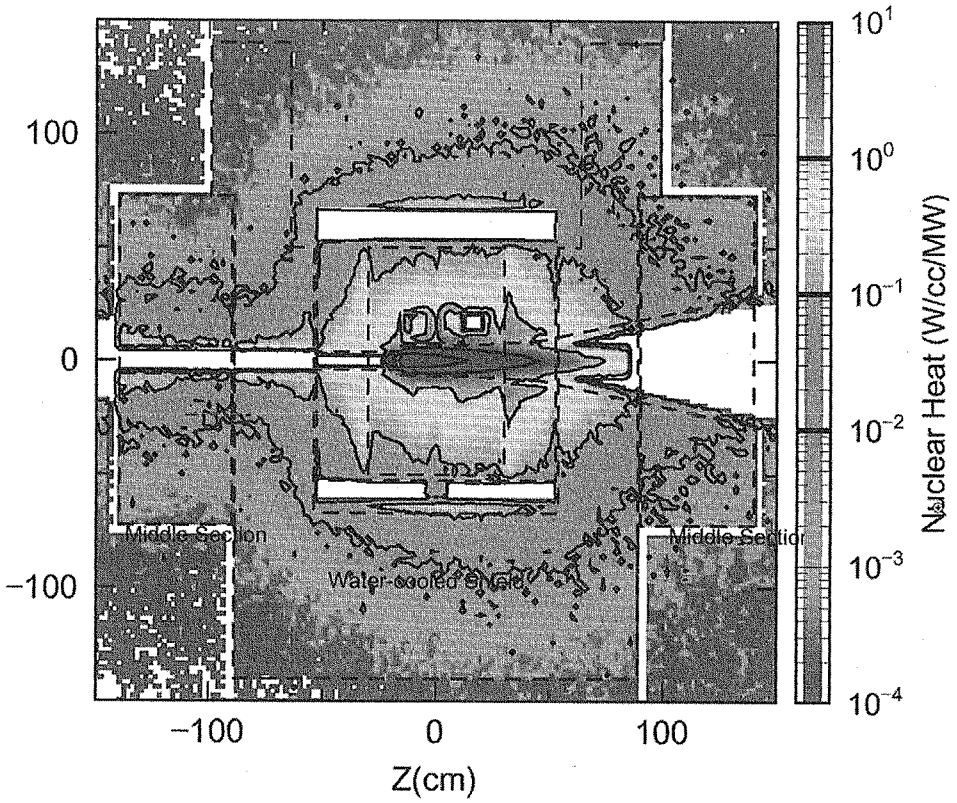


Fig. 8.1.3-9 2-dimentional nuclear heat distributions (vertical)

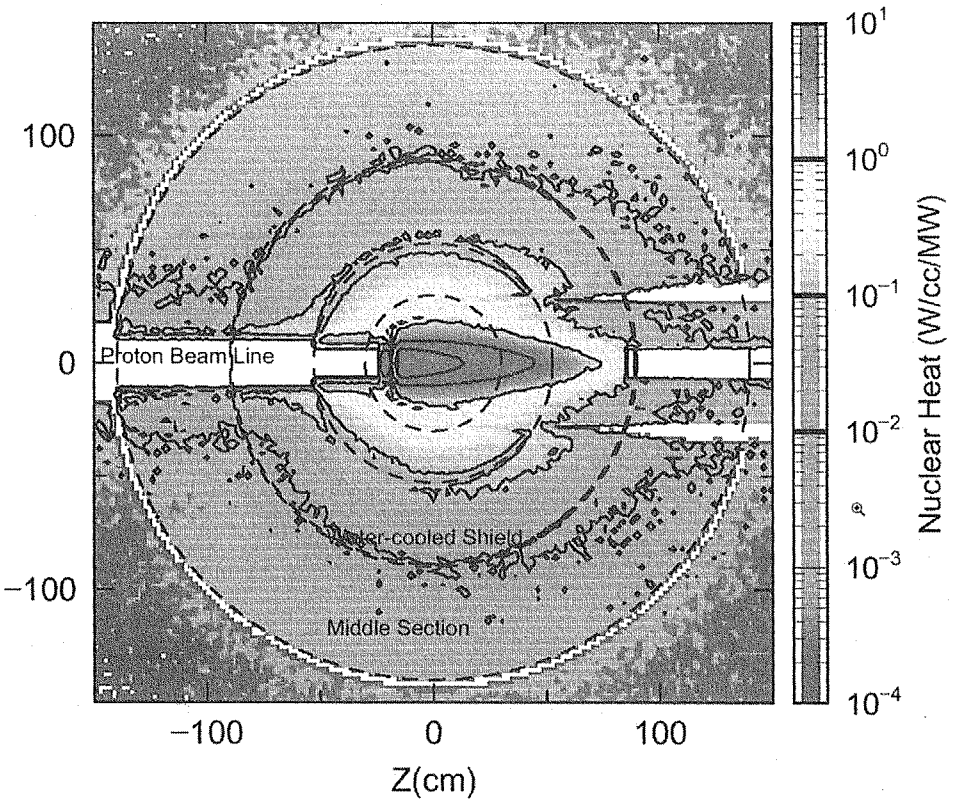


Fig. 8.1.3-10 2-dimentional nuclear heat distributions (horizontal)

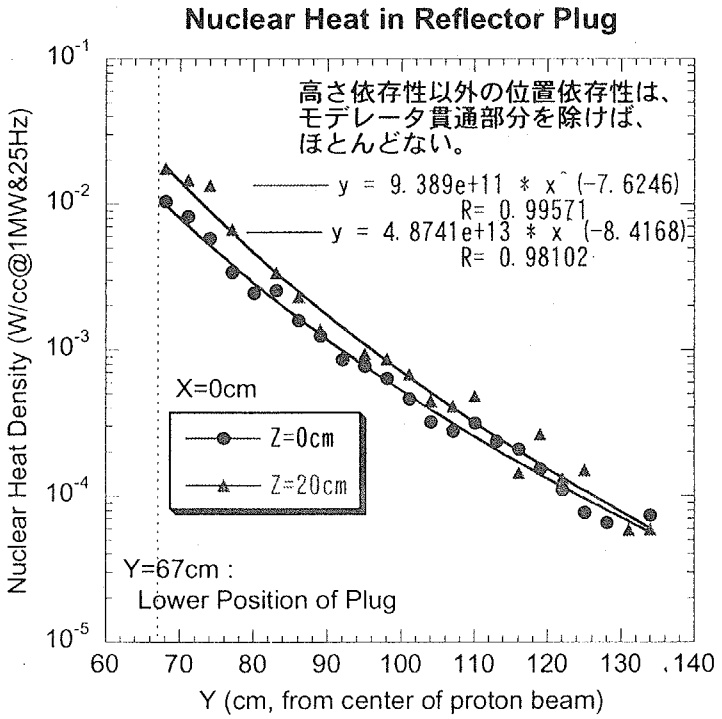


Fig. 8.1.3-11 Nuclear heat distributions in reflector plug

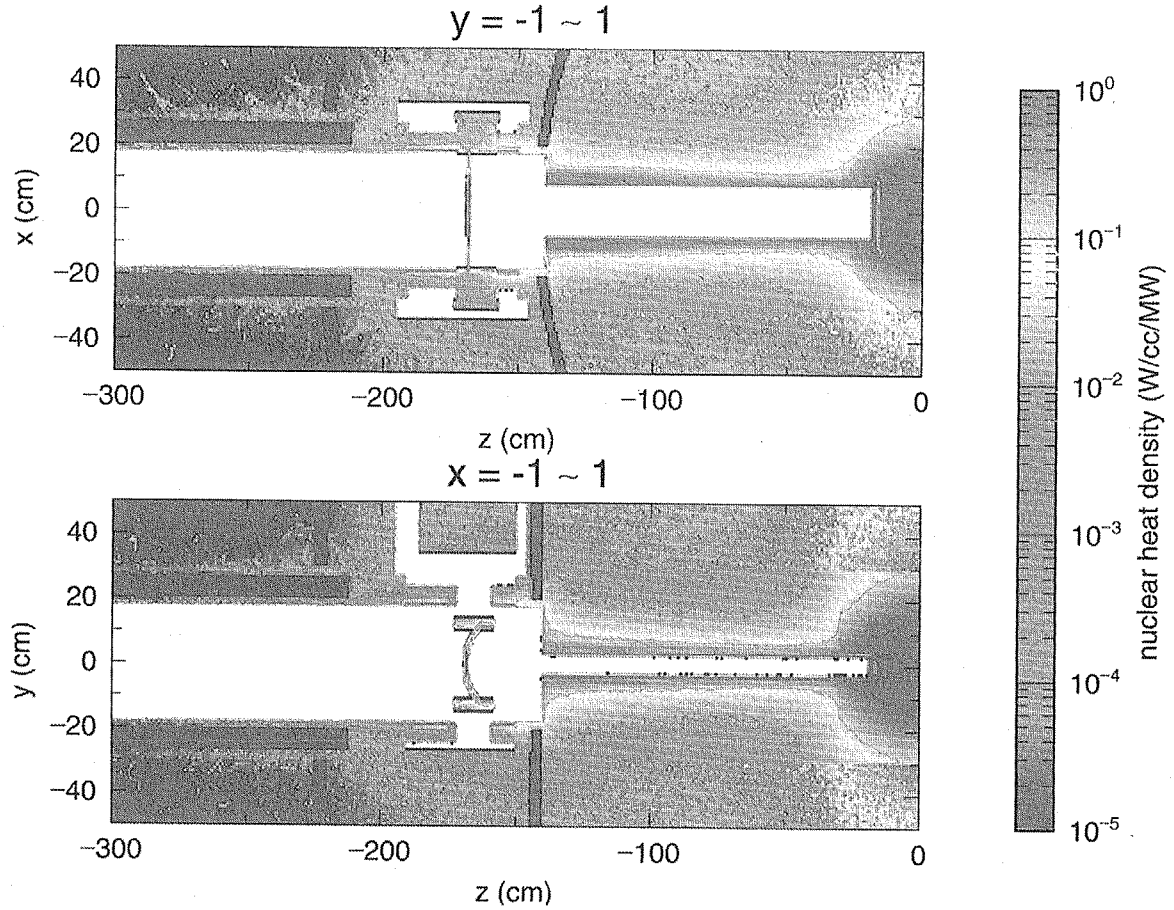


Fig. 8.1.3-12　Nuclear heat distributions in proton beam window and around

８．１．４　放射線損傷

(1) 概要と計算方法、計算条件

放射線損傷評価は、機器の寿命を評価するために必要不可欠であり、指標のひとつとして、DPA（Displacement per atom）が一般的に用いられ、本評価でも、DPA を指標とした。

DPA 計算では、まず、DPA 断面積の作成を行った。陽子及び高エネルギー部分の中性子の DPA 断面積を NMTC/JAM から計算し、低エネルギー中性子用 DPA 断面積は、LA150 をベースに、NJOY により作成した。中性子用 DPA 断面積は、150MeV で切り替えている。最終的には、MCNP の FM カードとして利用できる Dosimetry File 形式に変換し、NMTC/JAM、MCNP、MCNPX で使用することが可能である。作成した核種は、Table 8.1.4-1 にまとめている。鉄の中性子入射時の DPA 断面積を Fig. 8.1.4-1 に示す。

また、放射線損傷は、ターゲット容器など、ガス生成が顕著である部分では、H 及び He ガス生成量も指標とした。

評価を先立ち、これまでの検討で得られた工学モデルをベースにした計算モデルを構築した。このモデルでは、核発熱計算で用いられたものと同じものを使用した。

計算条件を Table 8.1.4-2 に示す。DPA 計算では、陽子及び中性子による DPA のみを考慮し、光子や電子による DPA への寄与は、非常に小さいものと考え、今回は無視した。また、生成された

放射性核種の崩壊による DPA への寄与も同様に無視した。

(2) DPA 計算結果

1MW、5000 時間運転の DPA 計算値のうち、各コンポーネントの最大値を、Table 8.1.4-3 に示す。ターゲット容器が最も高い。また、モデレータ容器の DPA も大きい。DPA のほとんどは、低エネルギー中性子によるものである。

Table 8.1.4-1 List of materials converted to DPA cross section

Be-9	C-12	Al-27		
Cr-50	Cr-52	Cr-53	Cr-54	
Fe-54	Fe-56	Fe-57	Fe-58	
Ni-58	Ni-60	Ni-61	Ni-62	Ni-64
Cu-63	Cu-65			
Pb-206	Pb-207	Pb-208		

Table 8.1.4-2 Calculation condition

Item1	Item2	Item3
Proton beam	Power	1MW before proton beam window
	Profile	81 π mm･mrad & Gaussian in phase space
Target	Material	Mercury
Moderator	Material	Liquid hydrogen at 20K
	Type	1 coupled, 1 decoupler and 1 poisoned
Reflector	Material	Inner : Beryllium & Outer : Iron
	Cooling water	Heavy water
		Edge-cooling, gap 3mm
Water-cooled shielding & middle section	Material	Iron 90% + light water 10% (Homo
Non-cooled shielding	Material	SUS304
Transport particles		Proton, neutron

Table 8.1.4-3 Maximum DPA of each major component

Component	Material	Maximum DPA@1MW&5000hr
Target Vessel	SS-316L	10.0
Proton Beam Window	Inconel-718	4.0
Moderator Vessel	Aluminum alloy	3.0
Reflector Vessel	Aluminum alloy	3.0
Water-cooled shield	SS-316L	～0.03
Hellium Vessel	SS-316L	～0.01

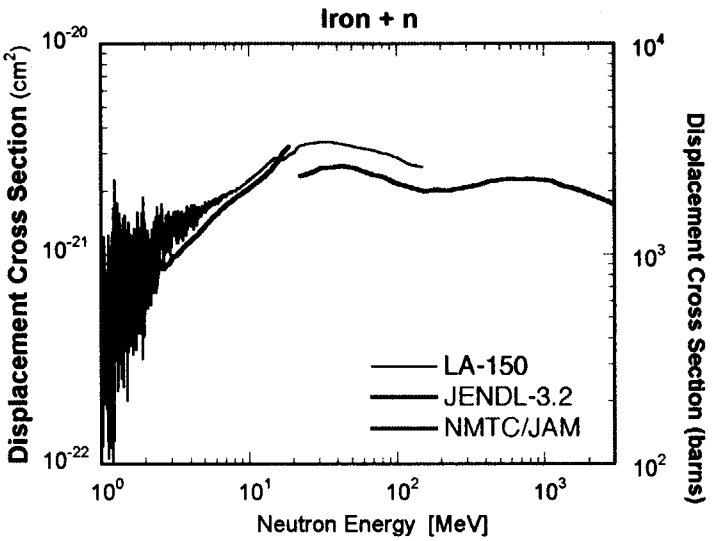


Fig. 8.1.4-1　DPA cross section of n+Iron

８．１．５　まとめと今後

核発熱やDPA評価は、一通り終了した。しかしながら、設計の進展により、設計モデルの変更が予想されるため、再評価をする可能性が十分ある。

今後、個別に評価する必要があるものは、別途評価を行う。モデレータ関連の核発熱評価を除き、崩壊熱を考慮していないが、十分無視できるものであると考えている。ただし、確認をする必要があると考えている。また、DPA計算においては、光子や電子、核種崩壊によるDPAの寄与を無視しているが、これに関しても、影響評価を行っておく必要があるであろう。

８．２　施設遮蔽設計

８．２．１　設計目標線量

物質・生命科学実験施設の遮蔽設計は、リニアック、3GeVRCS と同様に施設安全 G が設定した設計目標値 Table 8.2.1-1 を遵守して行なった。

Table 8.2.1-1 Design value for radiation shielding.

区域	設計目標値	法令、予防規定など	備考
事業所境界	<50μSv/年	<250 μ Sv/ 3 ヶ月 <20μSv/週	
事業所内 一般区域	<0.25μSv/h		
管理区域 I	<12.5μSv/h	<1mSv/週	
管理区域 II	<10mSv/h		時間、施錠管理及び インターロック
管理区域 III	>10mSv/h		
土壌放射化にかかる基準	<5mSv/h (11mSv/h)	－	事業所境界 実効線量 10μSv/年相当

- 基本的に、設計目標値は法令値などの 1/2 とする。
- 設計目標値では、科学技術庁放射線安全課長通知により、３ヶ月:500h、週:40h とする。
- 管理区域 I は、常時立ち入りが可能な区域とする。
- 管理区域 II は、原則として立ち入り制限区域とする。
- 管理区域 III は、原則として立入禁止区域とする。
- 警戒区域は、設計上設置せず、実際の管理上設定することとする。
- 土壌放射化にかかる基準は各施設平均（土壌 1m 厚の平均）とし、局所的最大値として 11mSv/h を許容する。

この中で土壌放射化に関わる基準というのは実際には地下水の放射化が環境に及ぼす影響に関する基準値であり、将来の工事が予想される箇所の土壌の放射化に対する設計基準は別途設定されている。

設計裕度に関しても施設安全 G が次のように設定したものを遵守した。

- モンテカルロコード MCNPX、NMTC/JAM、MCNP 等を用いる場合は、実験との比較結果を考慮して、粒子束に対しファクター２を裕度とする。
- 簡易計算法を用いる場合は、それ自体裕度を含んでいることから更に裕度を考慮しない。

８．２．２　3GeV 陽子ビーム輸送ライン（除くミュオンターゲット部分）に関わる遮蔽設計

物質・生命科学実験施設にある 3GeV 陽子ビーム輸送ラインは、1W/m のビームロスの M1 トンネルとその上流部分及びビームロスが約 60kW もある M2 トンネルの２つから構成される。ここでは、前者に関わる遮蔽設計について述べる。M2 トンネルの遮蔽に関しては８．２．３ミュオン実験施設の遮蔽設計で述べる。

８．２．２．１　１W／mのビームロスの3GeV陽子ビーム輸送ライン

M1 トンネルとその上流部分に関しては 1W/m のビームロスであるため Moyer モデルを用いて遮蔽設計を行なった。ビームロスはリニアック、3GeV 同様、四極電磁石のみで起こるとした。1W/m のビームロスは物質・生命科学実験施設よりも上流の 3GeV 陽子ビーム輸送ラインにおいても想定されており、それらも含めると約 280m の長さに 50 個の四極電磁石があるので、四極電磁石一個当たりのビームロスは5.6W とした。評価結果を Table 8.2.2.1-1 に示す。

Table 8.2.2.1-1　Shield thickness and estimated radiation dose.

評価地点	区域区分	しゃへい厚さ [m]		線量率
		空間	コンクリート	[μSv/h]
電源室	一般区域	1.9	6.5	0.15
BT 排水設備室	管理区域	3.1	4.8	2.2
第１実験ホール	管理区域	3.25	5	1.5
第２実験ホール	管理区域	3.25	5	1.5
大型機器取扱室	管理区域	4.4	4	6.6
第１実験ホール建屋外	一般区域	33.5	5	0.07
第２実験ホール建屋外	一般区域	26.5	5	0.1

８．２．２．２　3GeV陽子ビーム輸送ライントンネルへのアクセス路

物質・生命科学実験施設から 3GeV 陽子ビーム輸送ライントンネルへケーブル、空調ダクト、冷却水等を供給したり、人が出入りするためのアクセス路として、ユーティリティー連絡路とトンネル連絡路の２つがある。これらのアクセス路は線量が数 Sv/h の 3GeV 陽子ビーム輸送ライントンネルと人が常時立ち入ることのできる 12.5μSv/h 以下の管理区域、あるいは、0.25μSv/h 以下の一般区域を遮蔽体無しで繋がなければならず、アクセス路に Figs. 8.2.2.2-1、8.2.2.2-2 に示す屈曲を設けることによってストリーミングによる線量の低減を行なった。線量評価はモンテカルロコード MCNPX を用いて行なった。ユーティリティー連絡路とトンネル連絡路が繋がっている 3GeV 陽子ビーム輸送ライントンネルは 1W/m のビームロス部分であるため、直上流の四極電磁石との距離[m]×1[W/m]のビームロスが四極電磁石に生じるとした。計算結果を Figs. 8.2.2.2-3、8.2.2.2-4（中性子線量率とγ線量率の合算線量率）に示す。ユーティリティー連絡路の出口での線量は裕度 2 を考慮すると 0.14μSv/h となり、東側の 6.5m 厚のコンクリートを透過した線量 0. 097μSv/h（Moyer モデルで評価）を合算しても線量は 0.24μSv/h で、一般区域の線量目標値を達成することができている。また、トンネル連絡路の出口付近での線量は裕度 2 を考慮しても 2μSv/h 以下で西側の 4.8m 厚のコンクリートを透過した線量 2.2μSv/h（Moyer モデルで評価）を合算しても線量常時立ち入り可能な管理区域 I の線量目標値 12.5μSv/h を下回っている。但し、トンネル連絡路には８．２．２．３で述べる高度に放射化した M2 トンネルの冷却水が通っているため、この冷却水からのγ線による線量も評価する必要がある。この線量評価を８．

２．２．３と同様に MCNP コードで行なった。計算モデルを Fig. 8.2.2.2-5 に示す。冷却水からのγ線によるトンネル連絡路の出口での線量は裕度 2 を考慮しても 1μSv/h 以下であり、中性子による寄与を含めてもトンネル連絡路の出口での線量は線量常時立ち入り可能な管理区域 I の線量目標値 12.5μSv/h を下回る。

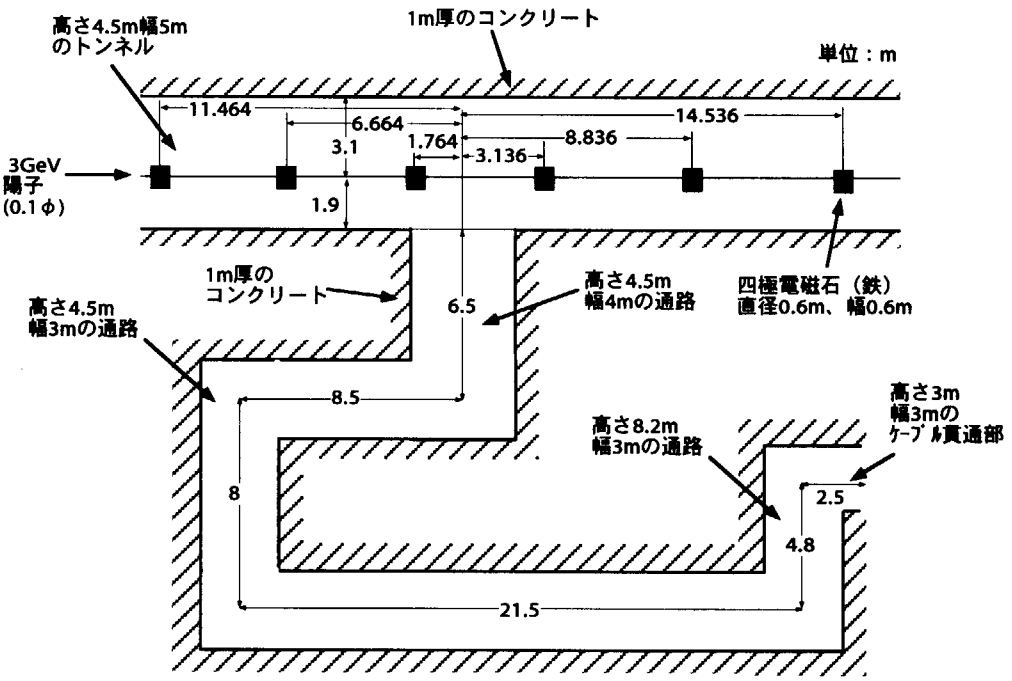


Fig. 8.2.2.2-1 Calculation model for utility connection path.

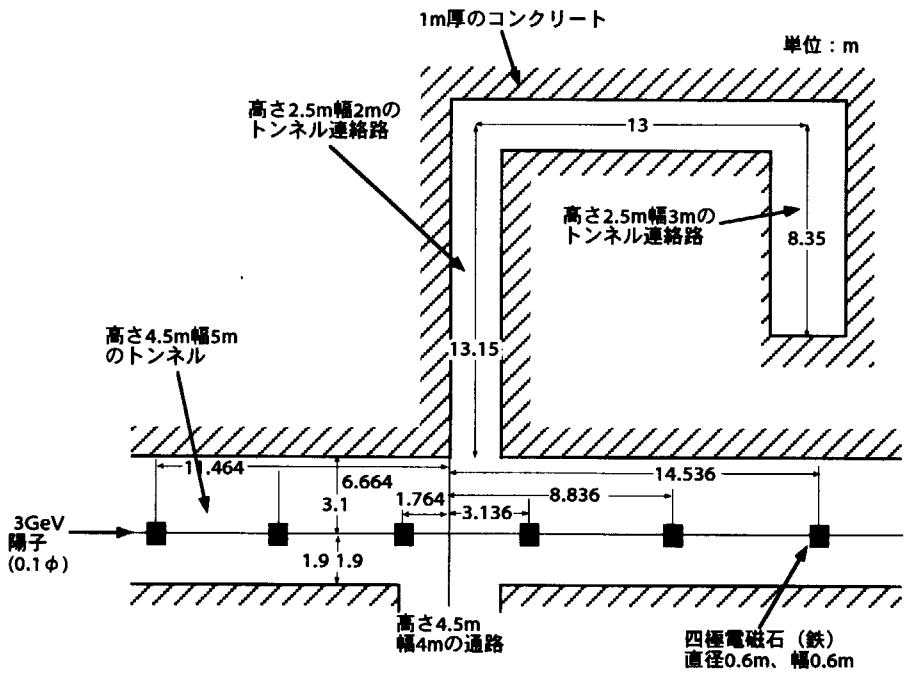


Fig. 8.2.2.2-2 Calculation model for tunnel connection path.

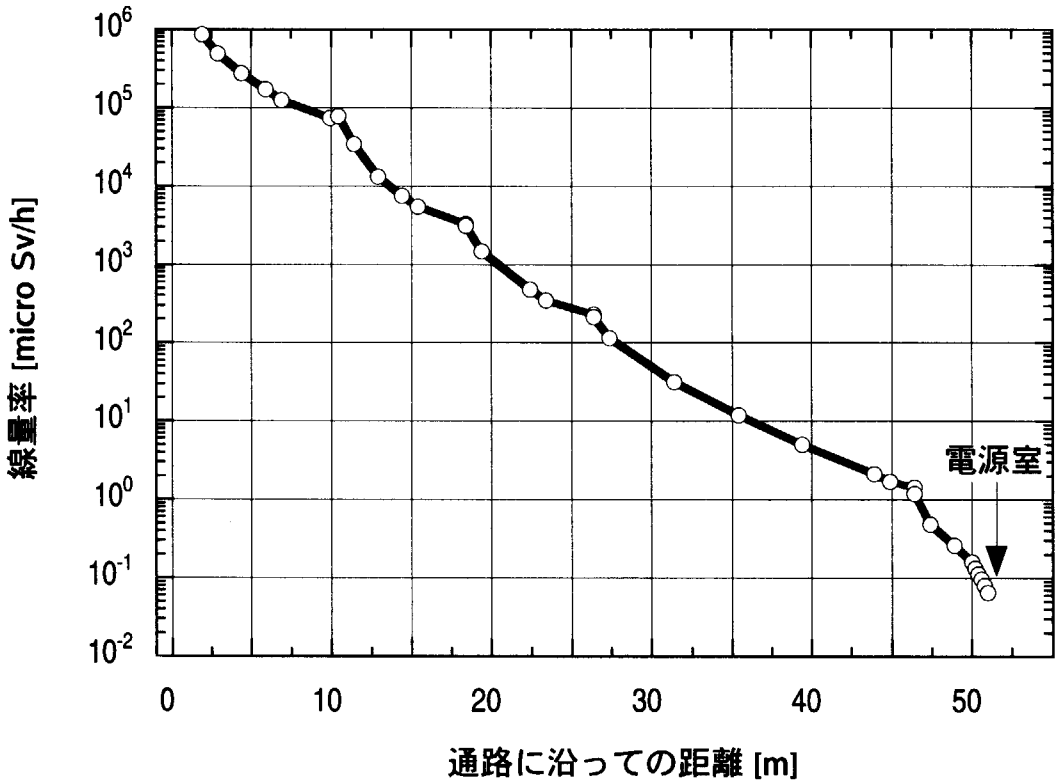


Fig. 8.2.2.2-3 Estimated total dose along utility connection path.

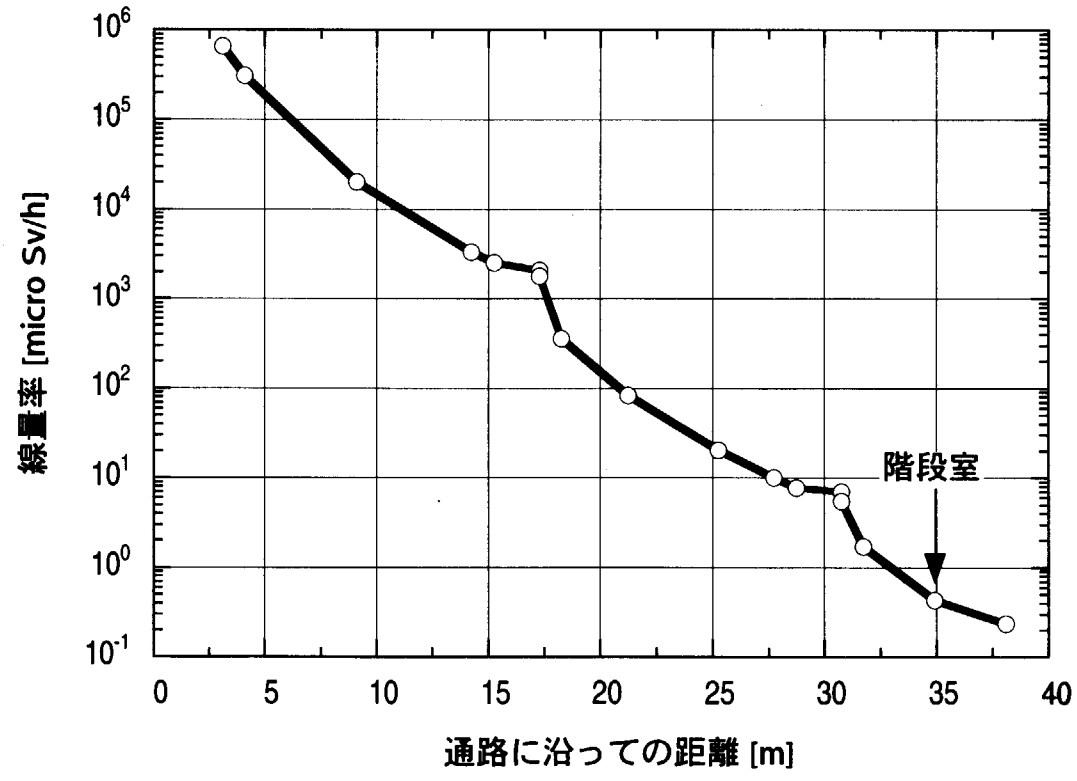


Fig. 8.2.2.2-4 Estimated total dose along tunnel connection path.

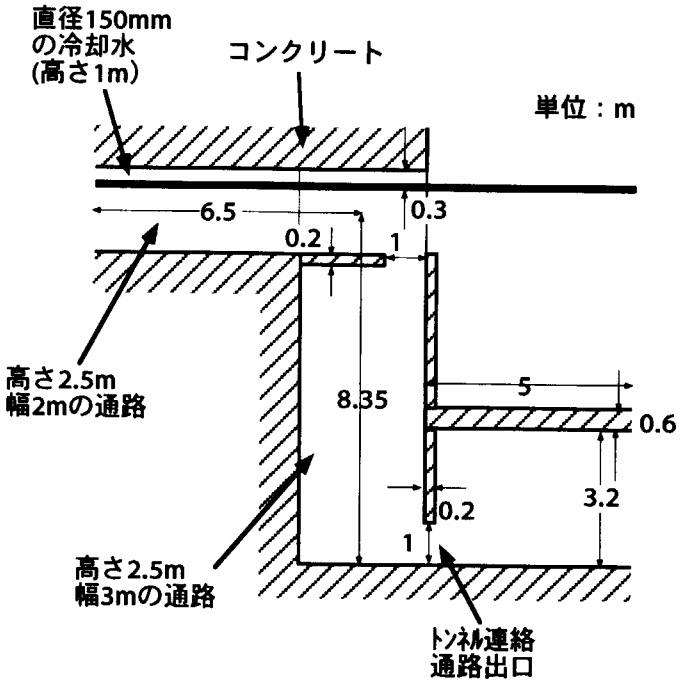


Fig. 8.2.2.2-5 Calculation model for tunnel connection path for cooling water gamma.

８．２．２．３　ホット冷却水機械室

物質・生命科学実験施設のホット冷却水機械室では M2 トンネルのミュオンターゲット、スクレーパ、MIC 電磁石、ミュオンビームラインの電磁石の冷却水の冷却、精製等を行なう。ミュオンターゲット、スクレーパ、MIC 電磁石でのビームロスは、陽子ビームラインの他の箇所と比べ大きなビームロスを引き起こすため、その冷却水は高度に放射化する。この放射化量の評価は２．８で述べられている。この放射化量の評価値を用いてホット冷却水機械室の遮蔽評価をモンテカルロコード MCNP で行なった。ホット冷却水機械室には $1m^3$ のサージタンク１個が置かれ、直径 150mm の冷却水配管が複数通っている。これらのサージタンク、配管に放射化した水があるとした。この時、M2 トンネルからホット冷却水機械室までの距離は約 85m あり、冷却水の流速は約 1.5m/秒であるため、約 50 秒の冷却を考慮した。$1m^3$ のサージタンクと冷却水配管をそれぞれ Figs.8.2.2.3-1、8.2.2.3-2 の計算モデルで模擬した（コンクリートまでの距離は実際の配置をもとに設定）。計算結果を Figs.8.2.2.3-3、8.2.2.3-4 に示す。冷却水配管は 6 本程度あることを考慮してもホット冷却水機械室の東側及び上側にある一般区域に対してはコンクリート厚 1.1m で十分一般区域の線量目標値以下にすることができる。ホット冷却水機械室の外側の管理区域に対しては壁、天井を 60cm 厚のコンクリートにすることにより常時立ち入りの可能な管理区域 I の線量目標値 12.5 μSv/h 以下にすることができる。更に、ホット冷却水機械室の上にあるホット空調機械室に関して、一般区域に接するホット冷却水機械室の壁、天井をそれぞれ 50cm 厚、30cm 厚のコンクリートにすることにより、線量を一般区域の線量目標値以下にすることができる。

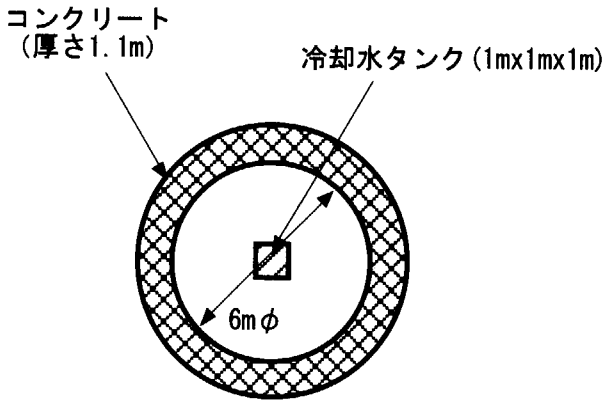


Fig. 8.2.2.3-1 Calculation model for surge tank.

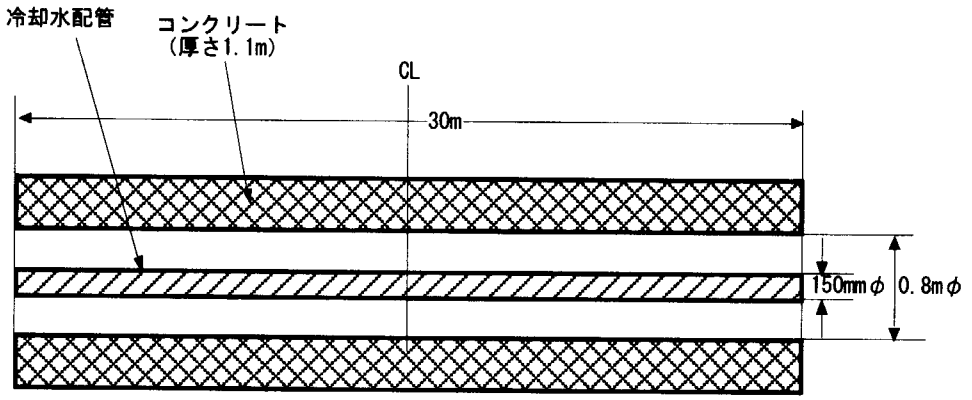


Fig. 8.2.2.3-2 Calculation model for water duct.

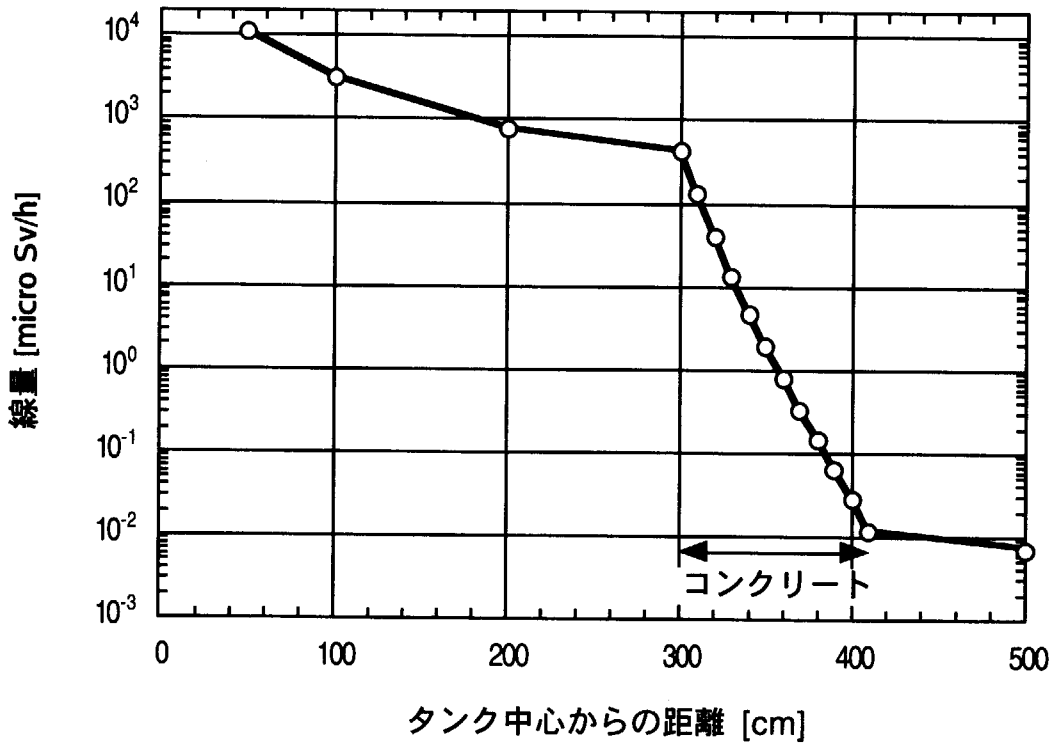


Fig. 8.2.2.3-3 Estimated gamma dose for surge tank.

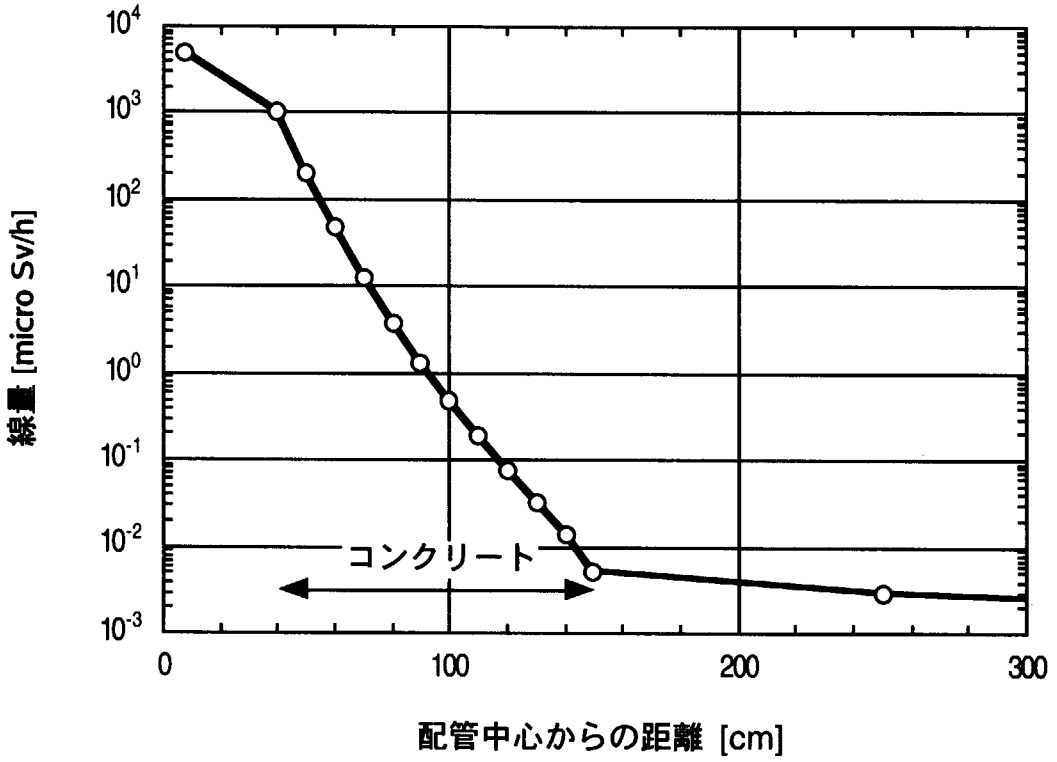


Fig. 8.2.2.3-4 Estimated gamma dose from water duct.

８．２．２．４　ホット空調機械室

物質・生命科学実験施設のホット空調機械室では M1 トンネルよりも上流の 1W/m のビームロスの陽子輸送ビームラインのうち水平偏向部から物質・生命科学実験施設隔壁までの空気の冷却を行なう。この放射化量の評価は２．８で述べられている。ホット空調機械室には 900mm 角の空調ダクトが通る予定である。この空調ダクトに放射化した空気があるとした。この時、空調ダクトを流れる空気の流速は速いため、放射性核種の冷却を考慮しなかった。計算モデルを Fig.8.2.2.4-1 に示す(コンクリートが無い計算も実施)。900mm 角の空調ダクトを直径 1m の空調ダクトで模擬した。計算結果を Fig.8.2.2.4-2 に示す。陽子輸送ビームラインでの放射化空気による遮蔽はコンクリート 10cm 厚程度で十分である。８．２．２．３でも述べたが、ホット空調機械室の遮蔽は、下にあるホット冷却水機械室からのγ線による線量を低減させるように決定した。

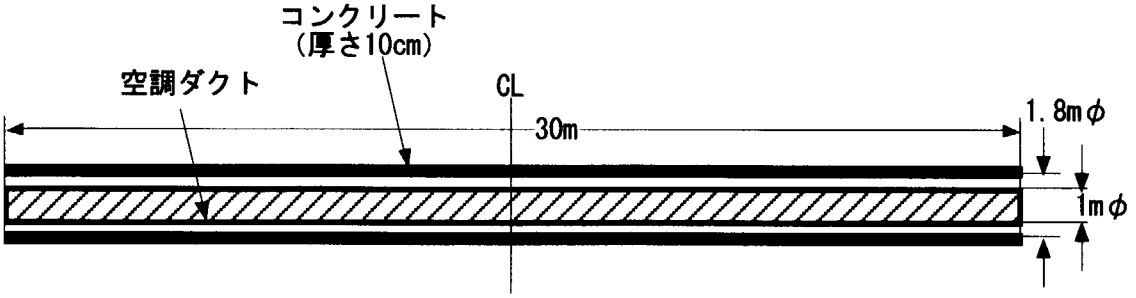


Fig. 8.2.2.4-1 Calculation model for air duct.

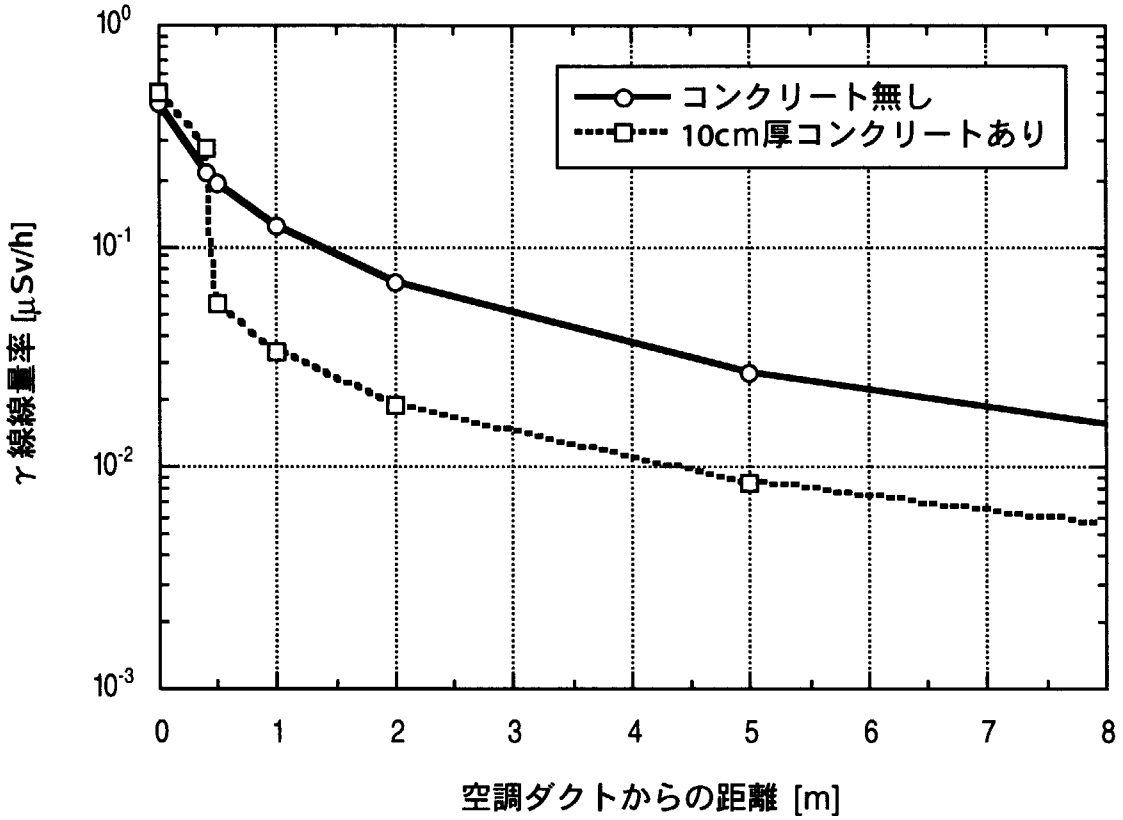


Fig. 8.2.2.4-2 Estimated gamma dose from air duct.

８．２．３　ミュオン実験施設の遮蔽設計

８．２．３．１　目的と基本概要

3GeV ビームライン上に串刺し状に挿入されたミュオン標的、及びそれに付随する装置により生じる放射線の遮蔽を目的とし、遮蔽体の総量・配置場所の最適化のための線量評価を行った。

８．２．３．２　評価方針

評価の対象は以下の箇所とする。

1. 基礎と地面との境界
2. 3NBT トンネル内サービスエリア床面
3. 3NBT トンネル側壁の実験エリア側の面
4. ミュオンビームラインントンネル外面

各評価点での設計目標線量は原則的には安全グループにより提示された値に従う。即ち、1 に関しては土壌放射化にかかる基準（5mSv/h 未満）、2 及び 3 に関しては常時立ち入り可能な管理区域 I（12.5μSv/h 未満）とする。ただし、2 に関してはスカイシャインへの影響、3 に関しては事業所内一般区域（建屋外壁面）への影響を考慮すると、実際にはさらに厳しい設計目標が必要である。そこで、一応の目安として 2 に関しては平均で 10μSv/h 以下、3 に関しては平均で 1μSv/h 以下という基準を設けた。

８．２．３．３　評価方法

評価計算は全ての評価対象に対してMCNPX v.2.1.5（以下、単にMCNPXと記す）によるMonte-Carlo計算で行った。線量へのγ線の寄与は無視できる程度であると思われるので、計算では陽子及び中性子の輸送のみを扱った。各評価対象は、ミュオン標的上流10mから下流30mまでを2m×2mに分割し、各区画での平均線量を求めている。ただし、3NBTトンネル側壁ではミュオンビームラインントンネルの部分は避けて平均をとっている。

陽子ビームはグラファイト製のミュオン標的直上流で発生させている。陽子ビームのプロファイルは位相空間上で一様で、エミッタンスが 81π mm・mrad となるものを原則として用いた。具体的には標的上で半径 12mm で、6.75mrad の広がりを持ったビームが入射することが 3NBT の計算により示されている。ただし、必要に応じて異なるプロファイルのビームによる評価も行った。

評価に用いたモデルの幾何学形状の一例を Fig.8.2.3.3-1 に示す。これらの図に見るように、陽子ビームライン、4 本のミュオンビームラインなどが再現されている。ビームラインを中心軸に同心円をなす円柱状に区分されているのは、IMPORTANCE の調整のためである。また、これらの図では材質毎に色分けがなされ、それらは Table 8.2.3.3-1 のようにまとめられる。

また、安全グループよりの指針により、Monte-Carlo 法による線量評価に対しては裕度 2 を見ることが求められている。したがって、前述の設計目標に対して、基礎と地面との境界で 2.5mSv/h 未満、事業所内一般区域との境界では 6.25μSv/h 未満を計算上は担保する必要がある。

評価結果

1. 基礎と地面との境界

   基礎と地面との境界での線量を床のコンクリ厚さを変えながら評価を行った結果を Fig. 8.2.3.3-2 に示す。ただし、これらの図で横軸は陽子ビームラインにそった位置を示し、ミュオン標的位置を原点に左側（マイナス方向）が上流、右側（プラス方向）が下流である。また、図中で色の異なる線はビーム軸からの垂直方向の位置の違いを表す。これらの結果をもとに床のコンクリートに必要な厚さをまとめたものが Fig. 8.2.3.3-3 である。

2. 3NBT トンネル内サービスエリア床面

   天井部コンクリート遮蔽体、鉄遮蔽体、陽子ビームライン直上の鉄遮蔽体などの総量・配置などの最適化により、Fig. 8.2.3.3-4 に示すような評価結果を得た。

   天井部の遮蔽体はビームラインレベルに対して 440cm から 840cm までのコンクリートとする。ただし、ミュオン標的から下流約 5m のところまでは幅 7mの鉄遮蔽体を設置し、線量を低減している。

3. 3NBT トンネル側壁の実験エリア側の面

   標的周辺の鋳鉄、埋め込み鉄遮蔽体の総量・配置などを最適化により、Fig. 8.2.3.3-5 に示すような評価結果を得た。

   3NBT トンネルのコンクリート遮蔽は両翼 14.5m が必要である。また、陽子ビームラインに対して前方方向に展開するミュオンビームライン（崩壊ミュオンビームライン）の 3NBT トンネル出口付近はこれに加え、2m のコンクリート遮蔽の張り出しが中性子施設との境界付近まで必要となる。

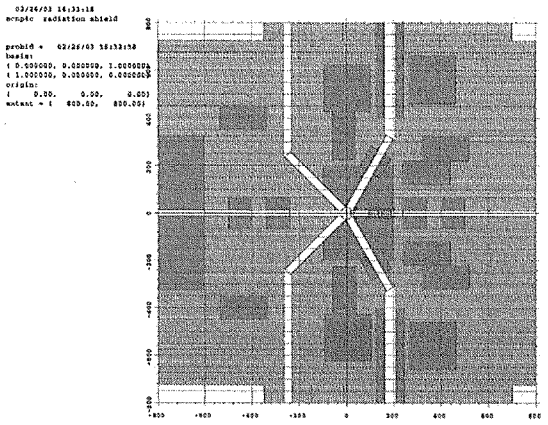
4. ミュオンビームライントンネル外面

   ミュオンビームライントンネル遮蔽の外表面での線量の評価結果を Fig. 8.2.3.3-6 に示す。陽子ビームラインに対して後方（135 度）取り出しとなる表面ミュオンラインは厚さ約 1m のコンクリート、前方（60 度）取り出しの崩壊ミュオンラインは厚さ約 2m の遮蔽を 3NBT トンネルの出口付近では必要とする。

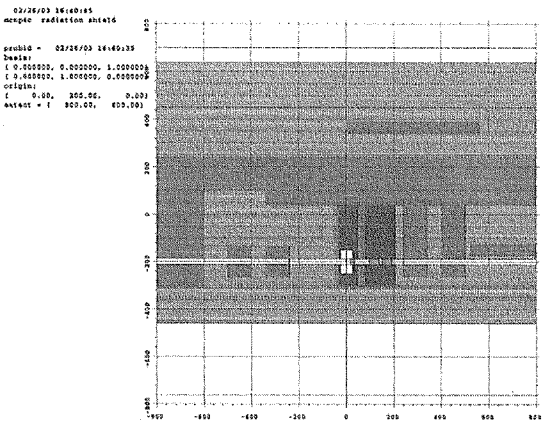
Table 8.2.3.3-1: A list of materials using in a MCNPX calculation as shown in Fig. 8.2.3.3-1.

色	材質	密度 [g/cc]	主な使用場所
無色	真空	0	
紫色	グラファイト	1.80	ミュオン標的
青色	SUS316	7.88	標的・スクレイパーベッセル
水色	水	1.00	冷却水
黄色	純銅	8.93	スクレイパー
薄青色	空気	$1.27\square 10^{-3}$	メンテナンスエリア
灰色	コンクリート	2.20	3NBT トンネル棟家
灰色	コンクリート（砂なし）	1.80	ケーブル貫通口
橙色	鋳鉄	7.00	ミュオン標的周辺遮蔽体
橙色	鉄ブロック	7.50	トンネル内埋め込み鉄遮蔽体
橙色	純鉄	7.87	3NBT ライン電磁石

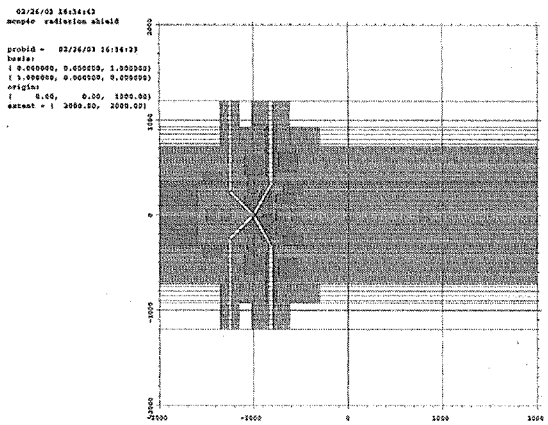
(a) 陽子ビームラインでの水平断面
（ミュオン標的周辺）



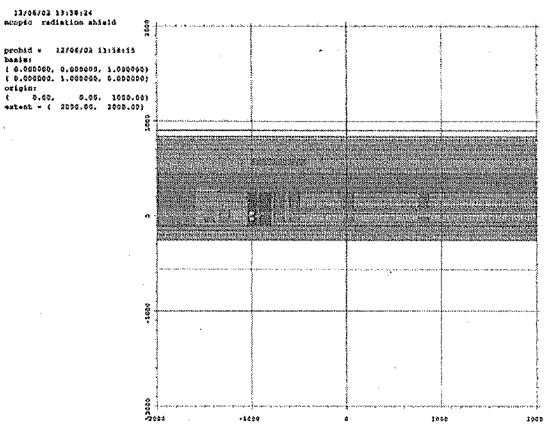
(b) 陽子ビームラインでの鉛直断面
（ミュオン標的周辺）



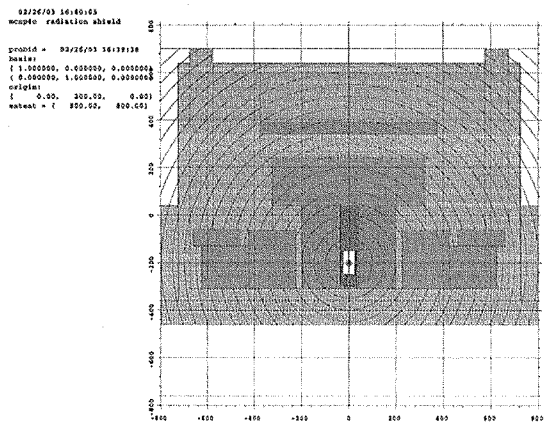
（c）陽子ビームラインでの水平断面



(b) 陽子ビームラインでの鉛直断面



(e) 陽子ビームラインに対する垂直断面
（標的位置）



(f) 陽子ビームラインに対する垂直断面
（標的から 15m 下流）

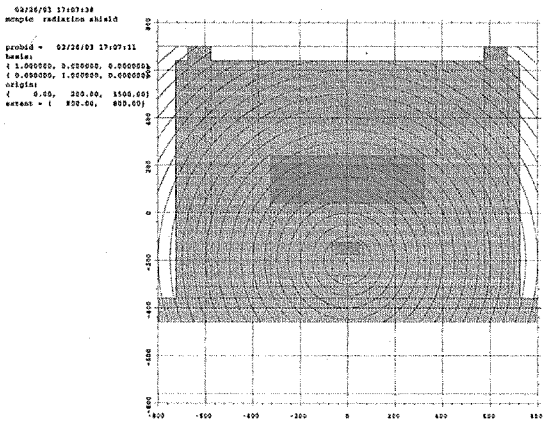
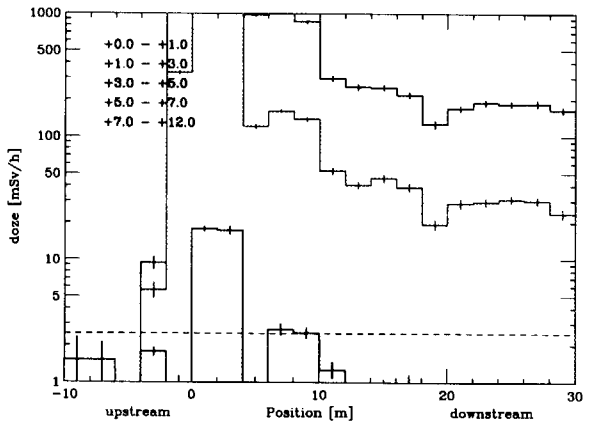
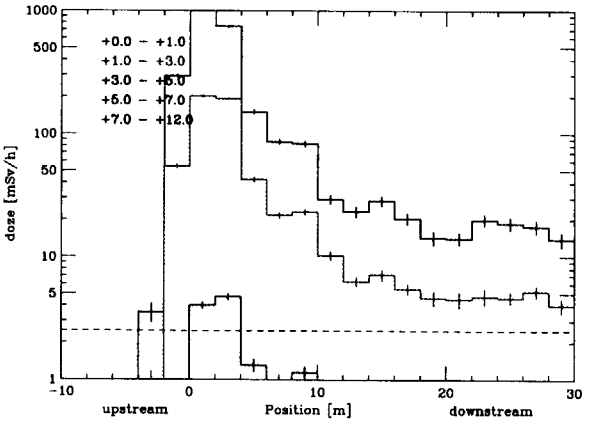


Fig. 8.2.3.3-1 A typical MCNPX model reconstructing Meson Science Facility.

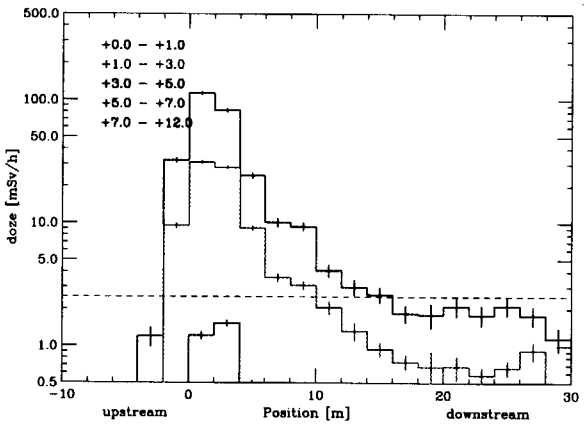
(a) 床厚 0m



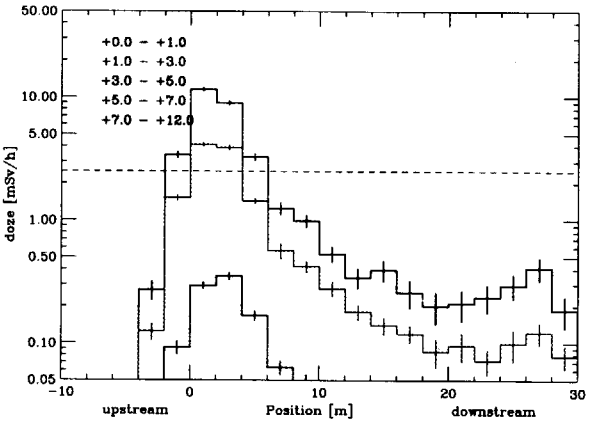
(b) 床厚 1m



(c) 床厚 2m



(d) 床厚 3m



(e) 中心軸の左右 3m のみ床厚 4m

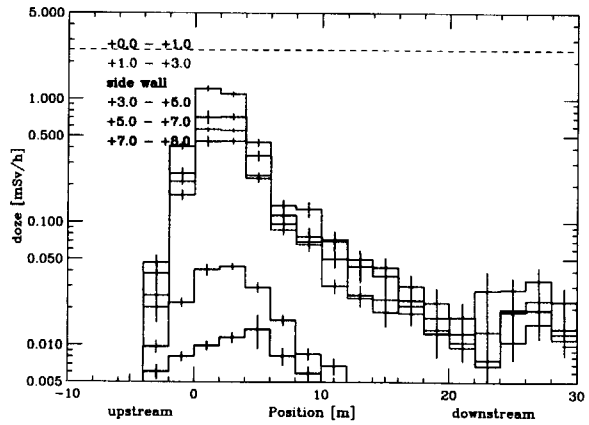


Fig. 8.2.3.3-2 The result of evaluation for the doze on the boundary between the foundation and the ground. In each figure, the dashed line indicates the target of the design work (2.5 mSv/h).

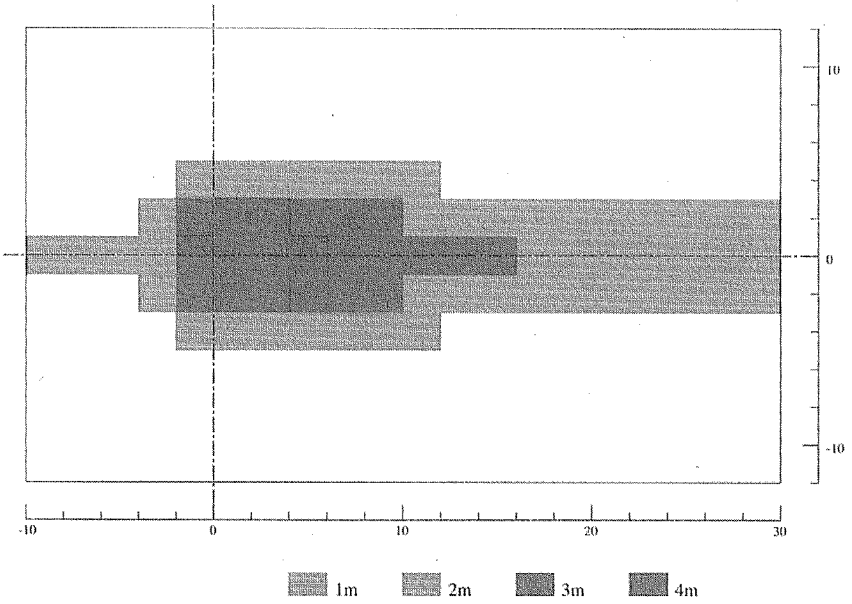


Fig. 8.2.3.3-3 The required thickness of the floor.

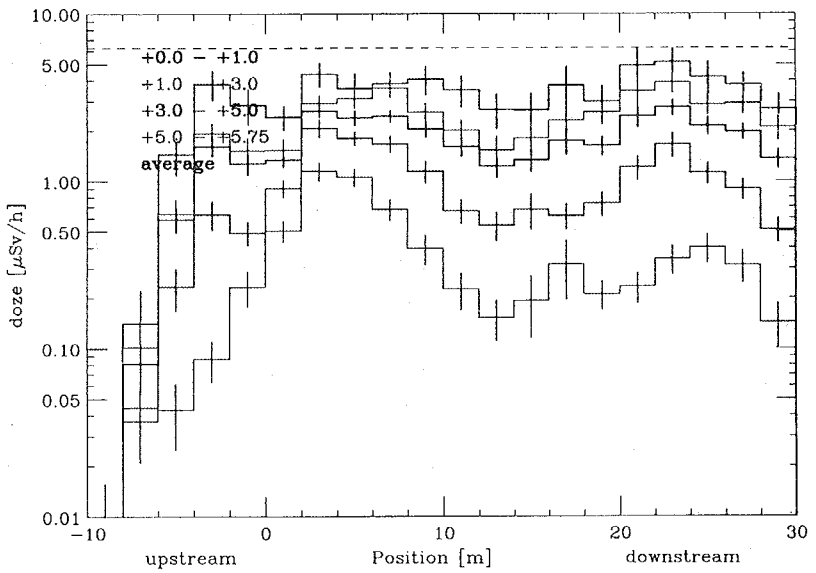


Fig. 8.2.3.3-4 A typical calculated result of the doze on the floor in maintenance area. The dashed line indicates the target of the design work (6.25 μSv/h).

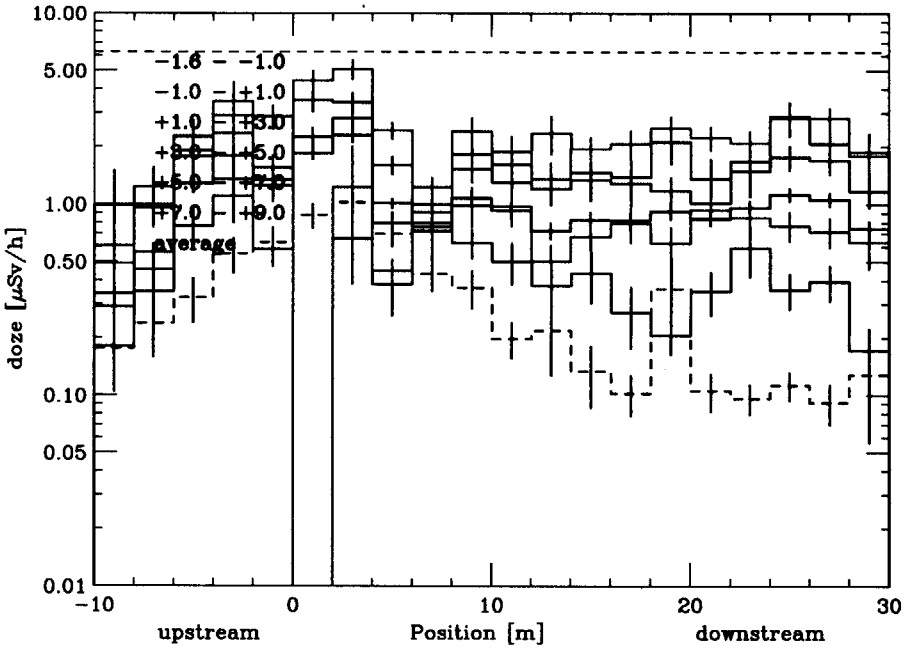


Fig. 8.2.3.3-5 A typical calculated result of the doze on the wall of 3NBT tunnel. The dashed line indicates the target of the design work (6.25 μSv/h).

(a) 表面ミュオンライントンネル
後方（135 度）取り出し

(b) 崩壊ミュオンライントンネル
前方（60 度）取り出し

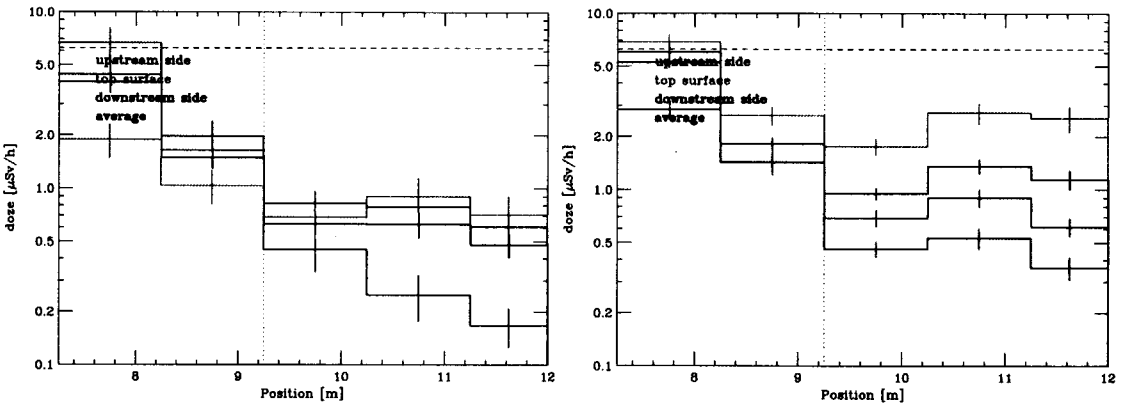


Fig. 8.2.3.3-6 A typical calculated result of the doze on the exterior wall of (a) the surface muon channel and (b) the decay muon channel. The dashed line indicates the target of the design work (6.25 μSh/h). In the case of the decay line and the downstream side of the surface line, inside of the dotted lines (below 9.25 m), the muon beam line tunnels are surrounded by the extra concrete shield, and thus the design target is not applied.

８．２．４　中性子実験施設の遮蔽設計

８．２．４．１　設計方針

(1) 設計手順

本節では、物質・生命科学実験施設の 1-MW 核破砕中性子実験施設の遮蔽設計について述べる。中性子実験施設はターゲット、モデレータ、反射体、ヘリウムベッセル、シャッター等の機器類及びそれを取り巻くコンクリート層からなる中心から半径約 7m の範囲内の中性子源と、そこから第１及び第２実験ホールに向けて放射状に延びる 23 本の中性子ビームラインとに分けられる。

中性子源を構成する機器の大部分は平成 14 年度発注であり、機器の構成、構造及び関連する遮蔽設計はほぼ終了している。中性子源の遮蔽設計は２つの段階を踏んで行った。初めに、核破砕中性子源遮蔽体中における放射線透過現象の理解、生体遮蔽体の概略寸法及び材料の決定、計算条件の変化が結果に与える影響の評価、の３点を目的とし、１次元球体系による遮蔽計算を行った。この結果については参考文献 [1] にまとめられており、本レポートではその概要を 8.2.4.2 節で述べる。次に、中性子源を３次元的にモデル化し、機器間の隙間等によるストリーミング現象まで考慮に入れた詳細設計計算を行い、中性子源内の様々な機器の寸法決定と生体遮蔽体全体寸法の決定を行った。これを 8.2.4.3 節で述べる。なお、３次元遮蔽設計の結果の一部は参考文献 [2] に記述されている。

中性子ビームラインにつては、現段階ではそれぞれのビームラインの詳細仕様は決定していない。このため、典型的なビームラインに対するビームライン遮蔽厚さの評価等の概念検討を行った。この結果は、実験ホール内における中性子ビームライン配置決定時に使用された。中性子ビームライン遮蔽に関する結果は、現状では本レポートには含まれていないが、今後執筆することとする。

(2) 計算手法

従来の高エネルギー加速器施設のバルク遮蔽設計の多くは、Moyer の式 [3] と呼ばれる簡易評価式を用いて行われてきた。しかし Moyer の式は、核破砕中性子源施設の生体遮蔽の評価には次の３点においてその適用が難しい。第１に、Moyer の式は基本的に陽子ビーム入射方向に対して 90 度方向の高エネルギー中性子の減弱を表現するものであるため、陽子ビーム入射方向に対する角度依存で変化する核破砕中性子源施設の生体遮蔽体厚さを評価するには不向きである。第２に、３次元形状やストリーミングの効果を考慮できない。第３に、厚い鉄遮蔽体の外側にコンクリート層があるような生体遮蔽体では、その外側において Moyer の式で評価する高エネルギー中性子が必ずしも全線量に対して支配的にならず、代わりに 1MeV 以下の低エネルギー中性子や２次γ線が支配的になることがある。そこで本設計では、モンテカルロ法粒子輸送計算コード MCNPX-2.2.6 [4] により設計計算を行った。150MeV 以下のエネルギーの中性子に値しては、LA-150 [5] の核データを用いた。線量換算係数には、参考文献 [6] の値を使用した。

この他にも補助的にいくつかの計算コードを使用したが、これらについては後述することとする。

(3) 目標線量

物質・生命科学実験施設は原研東海研の敷地内に建設されるが、実験施設と事業所境界間の最短距離は約 350m と比較的短い。このため、実験施設内の遮蔽体外側における設計目標線量は、事業所境界におけるスカイシャインによる線量の制約から、スカイシャインの対象となる遮蔽壁面にわたる平均値で 1μSv/h としている（最大値は 1μSv/h を超過しても良い）。ただし、生体遮蔽体外周部の多くの部分はビームライン遮蔽体で覆われる。また生体遮蔽体の一部は上部に位置する大型機器取扱作業室の床下にもぐり込むためにスカイシャインに対する影響が小さい。このため、設計目標線量として、時間管理を要しないで放射線作業従事者が立ち入ることが出来る線量である 12.5μSv/h（ピーク値）を適用することとする。ただし、以下の補正係数及び安全裕度を考慮した。

(a) MCNPX コードによる鉄中の高エネルギー中性子透過計算の過小評価 [7] に対する補正係数（ちなみに、MCNPX はコンクリートに対しては安全側に過大評価するため、ここでは補正係数は考えない。）
遮蔽厚 1m あたり 20%の過小評価、全遮蔽厚はアウターライナーの半径である 4.8m として、
$1/0.8^{4.8} \fallingdotseq 3$。

(b) 遮蔽厚さの決定にあたっては、計算の簡略化のため 10MeV 以上の中性子による線量のみを計算し、10MeV 以下の中性子及びγ線まで含めた全線量はこれの 2 倍以下であると仮定した。この仮定は、コンクリート層が 2m 近い本中性子源の遮蔽構造では正しい。この補正係数 2。

(c) 大強度陽子加速器計画全体で統一的に使われている、モンテカルロコードによる遮蔽評価に対する安全裕度である係数 2。

以上を考慮すると、

$12.5/(3\times2\times2) \fallingdotseq 1$ μSv/h

となる。そこで設計目標線量は、10MeV 以上の中性子による線量の生の計算値で 1μSv/h とした。

(4) 遮蔽材料

遮蔽材料としては、安価でかつ一般的な材料である鉄鋼、普通コンクリート、重コンクリートを用いることとした。計算で使用したそれぞれの材料の組成及び密度の値は、計算を行った時期により多少の変動があるが、最終的に必要遮蔽厚さを評価し、遮蔽体外側における線量を計算する際には、以下の値を使用した。

・鉄　鋼

組成については、鉄 100 % と仮定した。不純物は低エネルギー中性子に対する遮蔽性能を高めるため、100%の仮定は安全側となる。密度について、理論密度は 7.86 g/cm^3 であるが、空隙のない無垢の鉄鋼を使用する場合には、プロジェクトで統一して用いる値である 7.7 g/cm^3 とした。鉄鋼板を積層して遮蔽ブロックを形成する場合にはブロック中にある程度の空隙が生じる。この場合には、計算では密度として 7.4 g/cm^3 の値を使用し、実際のブロック製作時の仕様では多少の余裕を見て 7.6 g/cm^3（約 3.3%の空隙率に相当）を要求することとした。

・普通コンクリート

組成については、従来の原子力関係の遮蔽計算で良く用いられてきた米国 ANS 標準の値 [8] を採用した。密度については、プロジェクトで統一して用いる値である 2.2 g/cm^3 とした。

・重コンクリート

骨材は磁鉄鉱とした。組成については、文献 [9] の値を使用した。水分は結合水のみであり、自由水は含まれていない。密度については、無理なく達成できる値である 3.4 g/cm^3 とした。

8．2．4．2　1次元計算による中性子源遮蔽の概念検討

(1) 計算方法

全体の計算は、2つの段階に分割して行った。第1段階では、直径 120cm、高さ 120cm の反射体内側の領域を3次元的にモデル化し、ターゲットに陽子ビームを入射して、ターゲット-モデレータ-反射体集合体（TMRA）領域から漏洩する中性子束を計算した。計算された中性子束が次の第2段階の線源となるため、この第1段階の計算を「線源項計算」と呼ぶこととする。第2段階では簡単のため1次元球体系を用い、第1段階で計算された中性子線源を用いて遮蔽体中における中性子及び2次γ線の減衰を計算した。この第2段階を「深層透過計算」と呼ぶことにする。

線源項計算では、TMRA から漏洩する中性子束の陽子ビームに対する角度依存性を考慮するため、0-15, 15-30, 30-45, ..., 165-180 度というように 15 度毎に分割した 12（=180/15）の角度範囲を設定した（Fig. 8.2.4.2-1 参照）。そして、TMRA が点と見なせるような十分に大きな球面（実際には半径 1 km）を考え、この球面を通過する中性子束のエネルギースペクトルを各角度範囲毎に計算した。

深層透過計算では、Fig. 8.2.4.2-2 に示す1次元球体系モデルを用いた。球体系は内側から TMRA 領域、鉄遮蔽領域、コンクリート遮蔽領域に3分割されている。TMRA 領域は半径 0.687m の内側部分で、その体積が 1.2mφ×1.2m の円柱形状 TMRA と同じになるように半径を決定した。TMRA 領域の材料は、実際にはターゲット、減速材、反射体等多くの要素機器材料からなるが、ここでは簡単のために最も体積の大きい反射体材料で代表させた。標準ケースの鉄遮蔽領域は、中心から半径 4.8m までその厚さは 4.113m、材料は密度 7.2g/cm^3 の純鉄である。その外側のコンクリート層は、半径 8.0m までその厚さは 3.2m、材料は磁鉄鉱を骨材とする密度 3.483g/cm^3 の重コンクリート（Magnetite Concrete）である。コンクリートの厚さ 3.2m は実際に想定される厚さよりもかなり厚く、計算結果はコンクリート領域外側表面では目標線量を下回る。すべてこの条件で計算を行い、目標線量を達成できるコンクリート層厚さを求めた。

線源項計算では陽子ビーム入射方向に対して 12 の角度領域依存で TMRA からの漏洩中性子束スペクトルを求めたが、1次元球体系ではこの角度依存性をそのままでは考慮することができない。そこである1つの角度範囲、例えば 0-15 度の角度範囲に対して計算された漏洩中性子束スペクトルを線源として球の中心付近から等方に発生させ、計算を行う。すると、0～15 度の角度範囲の線源に対する遮蔽厚さを決定することができる。これを 12 の角度範囲の線源を順次用い、

1体系につき 12 の異なる線源による計算を行い、陽子ビーム入射方向依存で遮蔽厚さを決定した。

本計算は生体遮蔽体の概略寸法を決定するためのものであるため、遮蔽材の組成、密度、寸法等は可変パラメータである。この他にも反射体材料や計算に用いる核データファイル等、計算結果に影響を及ぼすパラメータがいくつか存在し、これらのパラメータの組み合わせは膨大な数になる。そこで、ある1つの組のパラメータを選定し、これを標準ケースとして定めた。次に、標準ケースのパラメータのどれか1つを変化させた計算を行い、計算パラメータの変化が結果に及ぼす影響を調べた。後者の計算を摂動計算と呼ぶことにする。標準ケースでは、反射体として重水冷却の鉛、反射体の外側で中心から 4.8m までが密度 7.2g/cm^3 の純鉄遮蔽、中心から 4.8m 以降が密度 3.483g/cm^3 の重コンクリート遮蔽である。

(2) 標準ケースの結果

Fig. 8.2.4.2-3 に陽子ビーム入射軸に対する角度範囲 30-45、75-90、135-150 度に対応する遮蔽体中の中性子及びγ線スペクトルを示す。また Fig. 8.2.4.2-4 は、同じ3角度範囲に対する 1MW 運転時の線量の減衰を、1MeV 以上の高エネルギー中性子、0.4eV～1MeV の低エネルギー中性子、熱中性子、光子の4成分に分けて示したものである。鉄遮蔽体中では 1MeV 以上の高エネルギー中性子束は早く減衰するものの、1MeV 以下の低エネルギー中性子束の減衰は緩やかである。重コンクリート層に入ると減衰傾向は大きく変わる。1MeV 以下の中性子束は急速に減衰し、熱中性子束となって、吸収される。この吸収に伴って2次γ線が生成し、中心からの距離 5～6m あたりでは、全線量に対して光子が支配的になる。中心からの距離 7m 以降では光子束も減衰し、すべての成分の減衰傾向は高エネルギー中性子の減衰傾向に従うようになる。

(3) 摂動効果

Table 8.2.4.2-1 に示したように、標準ケース（Case-01）のパラメータのどれか1つを変化させた計算を行い、計算パラメータの変化が結果に及ぼす影響を調べた。変化させたのは、反射体材料（Case-02, 03）、コンクリート遮蔽材料（Case-11～16）、鉄遮蔽材料（Case-21～25）、核データ（Case-31～33）、鉄遮蔽厚さ（Case-41, 42）である。結果については、参考文献 [1] を参照のこと。

(4) 遮蔽体厚さ削減の可能性

これまで検討を行ってきた遮蔽構造では、陽子ビーム入射方向に対して前方角では高エネルギー中性子に対する遮蔽が全体の遮蔽厚さを決定していた。これに対し後方角では、目標線量を達成する厚さの遮蔽体表面において低エネルギー中性子に起因する2次γ線が全線量に対して支配的であった。しかし、低エネルギー中性子やγ線は高エネルギー中性子と比較して遮蔽が容易であるため、高エネルギー中性子以外の成分が支配的になる遮蔽構造というのは最適ではなく、材料や配置を変更することにより遮蔽構造の最適化を行うことが可能であると考えられる。本節では、低エネルギー中性子とそれに伴う2次γ線を低減して遮蔽体厚さを減少させることができると考えられる鉄鋼とコンクリートの多層遮蔽構造について述べる。

TMRA 周りに鉄 5m（密度 7.2g/cm^3）と普通コンクリート 1m（密度 2.2g/cm^3）の遮蔽を考えた場合（Case-A）、１m厚のコンクリートを 0.5m に２等分しその一方を厚さ 5m の鉄遮蔽の外側表面寄り 4m の位置に挿入した場合（Case-D）の計算結果をそれぞれ Figs. 8.2.4.2-5、8.2.4.2-6 に示す。Case-D の結果は、Case-A と比較して遮蔽体外側表面における線量が低下している。Fig. 8.2.4.2-6 (d) に示すように、遮蔽体外表面において０度から後方角までかなり広い角度範囲にわたって高エネルギー中性子による線量が支配的で、ほぼ最適遮蔽と考えて良い。また、Case-A では遮蔽体外側における角度依存の線量率が 40～150 μSv/h であったのが、Case-D では最前方でも 0.4 μSv/h、最も低い 135-150 度あたりでは 0.0005 μSv/h と、Case-A との比較において線量が極めて低く抑えられている。

多層遮蔽構造の優れている点は、低価格であり実際の使用を想定している鉄及びコンクリートの配置を変えただけで、特別な材料を持ち込んでいない点である。ただし、実際の核破砕中性子源施設の水平方向にこの多重遮蔽構造を導入するには問題点がある。鉄遮蔽体は中性子ビームシャッターで中心から放射状に寸断されており、さらに多層遮蔽構造を適用すると円周方向にも材料の境界面が導入されるため、構造強度の点で問題がある点である。ただし、線源の上部方向にはシャッターのような構造はなく基本的には遮蔽板を積層するだけなので、鉄遮蔽体中にコンクリート層を設けることは十分に可能である。

(5) コンクリート材料の選定

アウターライナー外側のコンクリート層の材料に関し、普通コンクリート、重コンクリート、鉄入り重コンクリート等の選択肢がある。この選択により必要遮蔽厚さが大きく変わるが、標準ケースの重コンクリートを採用することとした。この理由は、重コンクリートの使用により普通コンクリートと比較して全体の遮蔽厚さを 60cm とかなり低減できるが、さらに鉄入り重コンクリートとしてもあと 20cm 程度しか薄くできず、効果が少ないことが１つの理由である。また後の中性子ビームラインの項で述べるが、バルク遮蔽ではなく中性子ビームライン遮蔽の観点からも重コンクリートが望ましいことが、２つ目の理由である。

(6) まとめ

8.2.4.2 節の評価は簡単な１次元球体系モデルによるもので、３次元形状やストリーミング効果を無視したものではあるが、半径 4.8m のアウターライナー内を鉄鋼を主とする遮蔽材で埋め、その外側に重コンクリートを配置することにより、線源中心からの距離およそ 6～8m の範囲内で目標線量を下回る生体遮蔽体を設計できることが分かった。この寸法は、建家構造及び中性子ビームラインのチョッパー等の機器配置の点で、特に無理のない値であるため、以降の詳細設計において基本寸法として採用することとする。

８．２．４．３　３次元計算による中性子源遮蔽の詳細設計

(1) ３次元計算モデルと計算の手順

核破砕中性子源の生体遮蔽体は単純なバルク遮蔽ではなく、ヘリウムベッセルやシャッターのような様々な機能を持った機器の集合体であり、それぞれの機器間に隙間や空隙が存在する。こ

れらの隙間や空隙による中性子のストリーミング効果が、場合によっては遮蔽厚さを決定する要因となるため、遮蔽設計においてはストリーミング効果を詳細に考慮し、またストリーミング効果を抑制するような機器配置とする必要がある。そこで中性子源遮蔽の詳細設計においては、機器間の隙間や空隙まで考慮した 3 次元モデルを作成し、このモデルを用いてモンテカルロ計算により線量等を評価することとした。３次元モデルで考慮した主な隙間は以下のとおりである。

３本のモデレータから延びる水素輸送管		140×140 mm、屈曲角ダクト
内部プラグ-外部プラグ間の隙間	10 mm	
外部プラグ-水冷/非水冷遮蔽体間の隙間		10 mm
水冷/非水冷遮蔽体-ヘリウムベッセル間の隙間		10 mm
ヘリウムベッセル-ベッセル外周遮蔽間の隙間		50 mm
ベッセル外周遮蔽-シャッター間の隙間		50 mm
アウターライナー-遮蔽ブロック間の隙間	50 mm	
シャッター-シャッター間構造体間の隙間	12.5 mm	
枝管-枝管周り遮蔽体間の隙間		20 mm
隣り合うシャッター上部遮蔽間の隙間		20 mm
シャッターシャフト-シャッター上部遮蔽体間の隙間		25 mm

最初に作成したモデルは、当然のことながら詳細な遮蔽計算には基づいておらず、各部の寸法は経験的に決められた。その後３次元遮蔽計算を進めるに従って各部の構造及び寸法を決定していき、それに伴って計算モデルの改変を行い、最終的な中性子源の機器配置及び遮蔽構造を決定した。初期及び終期の計算モデルをそれぞれ Figs. 8.2.4.3-1, 8.2.4.3-2 に示す。また Figs. 8.2.4.3-3, 8.2.4.3-4 には、終期に近い３次元計算モデルの鳥瞰図及び断面図を示す。

計算には、モンテカルロ法コード MCNPX-2.2.6 及び LA-150 を用いて計算を行った。本計算では 10 桁以上にも及ぶ中性子束の減衰を考慮する必要があるため、セルインポータンスによる分散低減を行った。この時、計算を容易にするために２つの成分に分けた。一方は 10MeV 以上の高エネルギー中性子、他方は数 MeV 以下の低エネルギー中性子及び付随するγ線である。なぜならば、両成分は遮蔽体中における減衰傾向、ストリーミング現象、線源条件等が大きく異なるからである。10MeV 以上の高エネルギー中性子は、モデル中の水銀ターゲットに 3GeV-1MW の陽子ビームを入射させることにより発生させ、ターゲット近傍における高エネルギー中性子生成の空間、角度、エネルギー分布を詳細に考慮した。数 MeV 以下の低エネルギー中性子及び付随するγ線の計算は数 MeV にピークを持つ核破砕中性子を線源とし、3GeV 陽子１個あたり 80 個の中性子を 60cmφ×60cm 高さの領域で均一に発生させた。この時、中性子のスペクトルは MCNPX コードデフォルトの蒸発スペクトル（E×exp(-E/1.2895), ここで E は MeV 単位の中性子エネルギー）を仮定した。

分散低減にはセルインポータンス法を用いたが、隣り合うセル間のインポータンスの差が小さくなるように、同一物質であっても予めセルを細分化した。各セル毎のインポータンス値は、繰り返し計算で直前の計算値から推定することにより自動的に決定した。

中性子源遮蔽体の重コンクリート層外側の中性子ビームラインには、ビームライン遮蔽体が設置される。ただし本計算を行った時点においては、中性子源の運転開始時にビームライン遮蔽体がどの程度設置されているかが未定であった。このため、ビームライン遮蔽体が全くないという前提で、重コンクリート層外側表面で目標線量を下回るように遮蔽体厚さを決定した。上下に駆動するシャッターは下に降りきった状態としたが、これによりシャッター上部に空隙が生じ、遮蔽の観点からはより厳しい条件となっている。またシャッターを上げて中性子ビームを通している状態も考えられるが、この場合には中性子ビームライン遮蔽体によって対処できるため、8.2.4.3節では対象外とした。

一例として、Figs. 8.2.4.3-5 に、初期の計算モデルに対する計算結果を示す。陽子ビーム入射軸に対し 30-60 度の角度範囲内における、10MeV 以上の中性子による線量の分布をメッシュタリーを用いて表現したものである。半径 1.2m 及び 2.2m 付近の位置に、上方へ向けてストリーミングによる線量の増加が見られる。また、中性子ビームライン高さ（縦軸 0cm のところ）の重コンクリート外側及び天井遮蔽上面（モデル上端面）において目標線量である 1 μSv/h を超えている。このことは、ストリーミング現象を低減するように機器を配置し、また目標線量を下回るように適切に遮蔽厚さを決定しなければならないことを示している。

(2) シャッターストローク

シャッターを上下方向に動かすことにより開閉する現設計では、ストロークに要する長さ分だけシャッターの上部あるいは下部に空隙が生じ、大きな遮蔽欠損となる。そこで、始めにシャッターのストロークを決定するための計算を行った。中性子ビームダクトを 100×100mm とし、ストロークを 100～600mm の範囲で 100mm 刻みで変化させ、中性子ビーム軸上で中心から 6.4m 位置（生体遮蔽体外側を想定）を評価点として、線量を評価した。ターゲット上部及び下部のモデレータそれぞれにつき、またシャッターを上側に移動して閉じる場合及び下側に移動して閉じる場合の計算を行った。

その結果、上部モデレータと下部モデレータの違いによる差はあまりなかった。また、閉じる方向を上側と下側のどちらに選んでも、差はあまりなかった。そこで、全てのシャッターは下側に移動したときに閉とすることとした。これにより、(1) 万一シャッターが落下しても、その結果は閉となる、(2) シャッターを開にして測定を行う場合にはシャッター上部の空隙が塞がれることになり、実験ホール内の線量を低減することが出来る、という２つのメリットを享受できる。

高エネルギー中性子による線量に関しては、シャッター開時における評価点において約 1×10^6 μSv/h であったのが、ストローク 100, 200, 300, 400mm と増加させることによって約 1,000, 50, 20, 10 μSv/h と線量が減少し、それ以上ストロークを増加させても有意な線量の減少は見られなかった。低エネルギー中性子による線量に関しては、シャッター開時における評価点において約 1×10^9 μSv/h と極めて高いが、シャッターを 100mm 移動することにより 10^6 μSv/h を超える程度となり、ストロークをそれ以上にしても有意な線量の減少は見られなかった。以上から、シャッターのストロークは 400mm と決定した。さらに、上下に 50mm ずつの余裕を持たせることとし、今後の解析ではシャッターストロークに要する空隙の高さを 500mm とした。なお、低エネルギー中性子による線量がシャッター閉時においてもまだ高いが、これについては計算では鉄鋼を仮

定しているシャッターに、ポリエチレン等の含水素材料を一部導入することにより対処することとした。この詳細についてはシャッターの設計の項で述べる。

(3) シャッターの高さ

シャッターの垂直方向高さの検討を行った。シャッター高さを短くするほどシャッターの重量が軽くなって駆動及び取り扱いが容易になるが、シャッターストロークに必要な空隙がビームラインに接近してストリーミングの影響が増加するため、最適化が必要である。

まず、シャッター下部のシャッターとシャッター下部遮蔽体との間に生じる高さ 500mm の空隙の位置を上下に変化させた計算を行った。この時、すべての中性子ビームラインはターゲット下部に設置したモデレータを見ていると仮定した。陽子ビーム高さを基準としたとき、中性子ビームラインは-100～-200mm の範囲にある。空隙の位置は、-350～-850mm、-600～-1,100mm、...、-1,600～-2,100mm と、250mm ずつ６通りに変化させた。線源中心から見て空隙の延長線上にある重コンクリート遮蔽外表面の評価点において、ストリーミングによる線量のピーキングが生じる。重コンクリート遮蔽によって、評価点における低エネルギー中性子による線量は十分に低いため、ここでは高エネルギー中性子による線量に着目した。空隙が-350～-850mm の場合には線量が約 2,000 μSv/h であるが、空隙を-600～-1,100mm、-850～-1,350mm、-1,100～-1,600mm、-1,350～-1,850mm と下げることによって線量は 200, 50, 20, 10 μSv/h と減少する。シャッター下部に空隙が生じるのはシャッターを開いて中性子ビームを通している時であり、この場合には重コンクリート遮蔽の外側には必ず中性子ビームライン遮蔽が存在する。このため、評価点における目標線量を高めに設定することが出来る。目標線量設定に決定的な根拠はないが、評価点における高エネルギー中性子による線量の計算値が 100 μSv/h 以下になる条件を満たすこととし、空隙の位置を-900～-1,400mm と決定した。

次に、シャッター上部のシャッターとシャッター上部遮蔽体との間に生じる高さ 500mm の空隙の位置を上下に変化させた。この時、すべての中性子ビームラインはターゲット上部に設置したモデレータを見ていると仮定した。陽子ビーム高さを基準としたとき、中性子ビームラインは100～200mm の範囲にある。空隙の位置は、900～1,400mm、1,150～1,650mm、...、2,400～2,900mm と、250mm ずつ８通りに変化させた。シャッター下部の場合と同様に、線源中心から見て空隙の延長線上にある重コンクリート遮蔽外表面の評価点における高エネルギー中性子による線量に着目した。空隙位置の選定根拠について、重コンクリート遮蔽の厚さはほぼ陽子ビームライン高さに現れる線量のピークが目標線量以下になるように決定されるべきであり、シャッター上部空隙のストリーミングによる線量のピーキングが決定要因になるのは最適な遮蔽構造ではないと考えられる。そこで、シャッター上部空隙による線量のピークがほぼ陽子ビームライン高さに現れる線量のピークを下回るように、シャッター上部空隙の位置を 2,100～2,600mm と決定した。

以上により、シャッターを挿入する空隙は高さ-1,400～2,600mm にわたる 4,000mm であり、この中を高さ 3,500mm のシャッターが 500mm のストロークで移動することとなる。ただし、ヘリウムベッセルの中性子ビーム窓取付用遠隔操作装置の寸法の制限から、シャッター下部空隙の位置が 320mm 引き下げられ、これに伴ってシャッターの高さが 320mm 延長された。

(4) シャッター下部遮蔽の材料選定

当初の計画（Figs. 8.2.4.3-1）では、アウターライナー内で、かつシャッターの下部に位置するシャッター下部遮蔽の材料として、鉄鋼を想定していた。米国 SNS の設計でも当該部分は鉄鋼である。シャッター下部遮蔽が影響するのは、中性子ビームライン遮蔽未設置時の生体遮蔽体外側の実験室床面付近である。これは、Figs. 8.2.4.3-1 右の線量分布図では高さ-160cm に相当する。シャッター下部遮蔽が Figs. 8.2.4.3-1 のように鉄鋼である場合、線量の分布は線源中心を中心とする同心円状となり、実験室床面付近に着目すれば遮蔽が過剰となる。そこで、シャッター下部遮蔽の材料を重コンクリート及び普通コンクリートに変えた計算を行った。その結果、中性子ビームライン遮蔽が無い時に、普通コンクリートの場合には生体遮蔽体外側の実験室床面付近の線量が陽子ビームライン高さの線量を上回るが、重コンクリートであればこれを下回り、適当であることが分かった。

以上の結論は生体遮蔽体の外側に中性子ビームライン遮蔽が無い場合を想定しているが、その後、生体遮蔽体を取り囲むように中性子ビームライン前置き遮蔽体が当初から設置されるように計画が変更された。この場合、シャッター下部遮蔽は重コンクリートである必要はなく、普通コンクリートで良い。

(5) コンクリート層

中性子源は高エネルギー中性子の遮蔽のため、鉄鋼を主要な遮蔽材料としているが、Fig. 8.2.4.2-3 からも分かるように、鉄鋼は 1MeV 以下の中性子に対する遮蔽性能が良くない。そこで、陽子ビームからの高さ 3,000mm 付近のヘリウムベッセル内の反射体プラグ及び非水冷遮蔽体、ベッセル外の枝管上部遮蔽体、シャッター上部遮蔽体等に、厚さ 200mm 程度のコンクリート層を挟む構造とした（Fig. 8.2.4.3-6 参照）。コンクリート中の水分により低エネルギー中性子を効果的に減衰し、運転中におけるシャッター駆動室内の線量が人に対する線量換算で $10^6\,\mu$Sv/h から $10^4\,\mu$Sv/h 程度に下がる。これにより、シャッター駆動装置やヘリウムベッセルのシール材に対する放射線損傷を約 2 桁低減できる。また運転停止時におけるシャッター駆動室の放射化による線量は主に ^{58}Fe(n,γ)^{59}Fe 反応で生成する ^{59}Fe によるため、コンクリート層の挿入により低エネルギー中性子で主に引き起こされるこの反応を抑制し、作業員の被曝を約 2 桁低減することができる。

(6) 上部方向に対するストリーミング効果

ステーション内の機器は基本的にクレーンにより上方から吊り降ろして設置するため、垂直方向に必然的に隙間が生じ、この隙間によるストリーミングへの対処が遮蔽設計の対象となる。

モデレータから延びる水素輸送配管は、反射体プラグの切り欠き中を伝って反射体プラグ上部へと達する。この切り欠きは 140×140mm 程度と大きく主要なストリーミング経路となる。この切り欠きは、上から下に投影して見た時、水銀ターゲットで中性子が多く発生する領域、つまり水銀ターゲットの先端から下流に向けて幅 200mm 程度の領域を避けて、出来るだけ陽子ビーム入射方向に対して後方になるように配置した。

Fig. 8.2.4.3-5 に示したように、初期のモデルにおいて上部方向へのストリーミングの影響が大

きいのはヘリウムベッセルとベッセル外周遮蔽間の 50mm の隙間、及びベッセル外周遮蔽とその外側の遮蔽やシャッター間の 50mm の隙間である。初期モデルではベッセル上部胴の屈曲は 50mm であったが、150mm に増加した。また初期モデルではベッセル外周遮蔽とその外側の遮蔽やシャッター間に 50mm の隙間が上方に向けて連続的に開いていたが、シャッター上部遮蔽ブロックをベッセル外周遮蔽側へ張り出すことにより、隙間を封鎖することにした。これらの変更は、Fig. 8.2.4.3-1 及び-2 を比較すれば分かる。

(7) 上部方向に対する遮蔽検討

反射体プラグは反射体と 3 台のモデレータを交換するときに、上方へ引き上げる。このため、反射体プラグの高さをできるだけ低く抑えることは、反射体プラグを収納するキャスクの軽量化及び建家の天井を低く抑えることにつながる。また、反射体プラグの軽量化はこれを吊り上げるクレーンの最大荷重を低く抑えることにつながる。このため、反射体プラグの高さをできるだけ短く抑える必要がある。一方、反射体プラグが短いとプラグ自身の遮蔽性能が低下し、その上部空間における放射化量が増し、プラグ上部でハンズオンにより各種配管の脱着作業時の被曝線量増加につながる。そこで、プラグ上部空間における放射化した鉄遮蔽体からの線量を 100 μSv/h まで許容し、プラグの高さを低く抑えることとした。鉄鋼材料中の放射能は主に $^{58}Fe(n,\gamma)^{59}Fe$ 反応で生成する ^{59}Fe（半減期 44.5 日）であると考えられ、線量の評価においては次のような簡易評価法を用いた。低エネルギー中性子を線源にしたときの全中性子束の計算結果に、実効巨視的断面積 1.66×10^{-5}[1/cm]、および線量変換係数 0.037[(μSv/h)/(Bq/cm^3)]を乗じ、線量を求めた。ここで、実効巨視的断面積は鉄中で平衡スペクトルに達した 1MeV 以下の低エネルギー中性子束と $^{58}Fe(n,\gamma)^{59}Fe$ 反応率との比率であり、線量変換係数は ^{59}Fe の密度が 1 [Bq/cm^3] である 1 次元無限鉄平板に接する空間中の線量率から計算したものである。その結果、反射体プラグの高さは陽子ビーム高さから 3,000mm までとした。

次に、シャッター本体とシャッター駆動装置を近づけ、両者を繋ぐシャフトを出来るだけ短くする観点から、シャッター上部遮蔽の高さは低い方が良い。一方で、シャッター上部遮蔽の上のシャッター駆動室から重コンクリート遮蔽を経て実験ホールに漏洩する中性子を減らすためには、シャッター上部遮蔽の高さは高い方が良い。そこで、重コンクリート遮蔽の厚さを決定する上で、シャッター上部空間からの漏洩中性子対策により重コンクリート遮蔽の厚さを増加させる必要がないように、シャッター上部遮蔽の高さを決定した。その結果、シャッター上部遮蔽上端の位置を陽子ビーム高さから 3,500mm までとし、シャッター上部遮蔽の高さを 900mm とした。

反射体プラグの短尺化及びシャッター上部遮蔽高さの最小化により、上部方向への遮蔽が初期モデルよりも薄くなった。これに伴い、ベッセル上部遮蔽及び天井遮蔽の厚さを増加させた。最終的に、ベッセル上部遮蔽は 1m 強、天井遮蔽は厚さ 400mm の鉄鋼と厚さ 700mm の普通コンクリートを組み合わせた遮蔽を上下 2 段に重ねる構造とした。

以上、(2)～(7)項で述べた機器形状、配置及び遮蔽構造の最適化の結果が、Fig. 8.2.4.3-2 に示した計算モデルに集約されている（ただし、その後に若干の修正がある）。本モデルによる計算結果は、次の(8)項で示すこととする。

(8) 各ビームライン毎の水平方向重コンクリート層厚さの決定

ターゲットから発生する高エネルギー中性子は陽子ビーム入射軸に対し強い角度依存性があるため、前方方向に厚い遮蔽が必要となる。ここでは、計 23 本の各ビームライン毎に必要な遮蔽厚を求めた。

アウターライナーの半径は 4.8m で固定した。シャッターは閉の状態とし、シャッターよりも下流のダクトには、中心から 5.8m までを鉄、それよりも外側を普通コンクリートのプラグで埋めた。本計算に用いたモデルではビームラインを等間隔でしか並べることができないが、実際のビームライン配置計画ではビームライン間の角度は様々である。そこで、角度幅の等しいラインをグループ化して計算することとし、Fig. 8.2.4.3-7 に示すように合計 6 つの計算モデルを作った。

3 本のビームラインについての計算結果を例として Figs. 8.2.4.3-8～8.2.4.3-10 に示す。これより、1 本毎の中性子ビームラインについて 1 μSv/h の等高線が全て収まる厚さを必要遮蔽厚さとして求めた。陽子入射方向に対し前方側のビームライン#2（Fig. 8.2.4.3-8）では、中性子ビームライン高さの線量が他の高さと比べて高く、線源中心から 7.4mまでの遮蔽が必要である。ほぼ 90 度方向のビームライン#7（Fig. 8.2.4.3-9）及び後方のビームライン#12（Fig. 8.2.4.3-10）では、中性子ビームライン高さ（BL+0）とシャッター駆動室の高さ（BL+4000~6000）においてほぼ同じ線量であり、必要遮蔽厚さはそれぞれ 7.0m、6.5m となった。

以上の計算結果を基に、重コンクリート製生体遮蔽体外側の形状を、Fig. 8.2.4.3-11 の最も外側の太線のように決定した。陽子ビーム入射軸に対して約 90 度よりも後方のビームラインでは必要遮蔽厚さが 7m 以下となったが、7m よりも内側にビームラインのデバイス類を設置する計画がないこと、及び後に設置するビームライン遮蔽の負担を減らすことから、遮蔽厚さを一律に 7m とした。この外形状は、実験ホール床からの高さ 0m～9m の範囲に適用する。ただしこの生体遮蔽体には中性子ビームライン遮蔽が接続することとなるが、その接続面が面一であればストリーミングが問題になる。そこで、実験ホール床からの高さ 1m～3m の範囲は、Fig. 8.2.4.3-12 のように生体遮蔽体を 500mm 掘り込み、ストリーミングによる中性子の漏れを抑える構造とした。

(9) ギャップ幅変化が線量に及ぼす影響の定量的評価

これまでの 3 次元計算では、様々な機器間の隙間をそれぞれ一定値としたが、実際には設計変更により異なる値が採用されたり、また寸法公差を考慮することにより変化することが考えられる。そこで、主要な隙間を変化させ、線量がどのように変化するかを調べた。

(a) シャッター-シャッター間構造体間の隙間

標準隙間を 12.5mm とし、0mm、20mm 及び 30mm の時の高エネルギー中性子による線量を計算した。評価点は、陽子ビームライン高さで線源中心から 6.4m の生体遮蔽体外側表面である。線量は全てのビームラインの平均値としているため角度依存性については考慮していない。標準隙間 12.5mm に対し、0mm で 0.7 倍、20mm で 1.6 倍、30mm で 3.7 倍と線量が変化した。

(b) 枝管-枝管周り遮蔽体間の隙間

標準隙間を 20mm とし、0mm、40mm とした時の高エネルギー中性子による線量を計算した。評価点は(a)と同じである。標準隙間 20mm に対し、0mm で 0.75 倍、40mm で 1.6 倍となった。

(c) 隣り合うシャッター上部遮蔽間の隙間

標準隙間を 20mm とし、0mm、40mm とした時の高エネルギー中性子による線量を計算した。評価点は、シャッター上部遮蔽よりも上の、シャッター駆動装置室である。標準隙間 20mm に対し、0mm で有意な差はなく、40mm で 1.2 倍となった。

(d) シャッターシャフト-シャッター上部遮蔽体間の隙間

シャッターシャフトの直径は 120mm で固定し、シャッター上部遮蔽体に設けたシャフトが貫通するスリーブの径 170mm を標準とした。スリーブ径 120mm（隙間無し）、200mm として高エネルギー中性子による線量を計算した。スリーブ径 120mm の場合には標準隙間に対して有意な差はなく、200mm で 1.2 倍となった。

(e) 内部プラグ-外部プラグ間の隙間

標準隙間を 10mm とし、隙間を 0mm、20mm 及び 40mm と変化させた時の、反射体プラグ上部空間における高エネルギー中性子による線量を計算した。標準隙間 10mm に対し、0mm で 0.9 倍、20mm で 1.5 倍、40mm で 3.6 倍となった。また、同じ隙間の条件で低エネルギー中性子を線源とする計算を行い、反射体プラグ上部空間における低エネルギー中性子による鉄の放射化量の変化を調べた。標準隙間 10mm に対し、0mm で 0.8 倍、20mm で 1.4 倍、40mm で 4.8 倍となった。

(f) 外部プラグ-水冷/非水冷遮蔽体間の隙間

標準隙間を 10mm とし、隙間を 0mm、20mm 及び 40mm と変化させた時の、反射体プラグ上部空間における高エネルギー中性子による線量を計算した。標準隙間 10mm に対し、0mm では有意な差はなく、20mm で 1.3 倍、40mm で 1.6 倍となった。また、同じ隙間の条件で低エネルギー中性子を線源とする計算を行い、反射体プラグ上部空間における低エネルギー中性子による鉄の放射化量の変化を調べた。標準隙間 10mm に対し、0mm で 0.6 倍、20mm で 1.6 倍、40mm で 4.1 倍となった。

(10) まとめ

核破砕中性子源の遮蔽設計を、機器間の隙間等も考慮した詳細な 3 次元モデルによるモンテカルロ計算コードにより行った。Fig. 8.2.4.3-13 に、最終的な中性子源ステーション内の機器構造及び遮蔽構造の垂直断面図を示す。これはあくまでも概念図であって詳細はこのとおりではない部分もあるが、基本的な寸法及び仕様材料を示してある。重コンクリートの使用範囲については、Fig. 8.2.4.3-2 よりもさらに削減し、コスト低減を図っている。水平断面については、先に Fig.

8.2.4.3-12 に示したとおりである。

参考文献

[1] 前川藤夫、他：「大強度陽子加速器計画における核破砕中性子源のバルク遮蔽に関する検討」、JAERI-Tech 2002-035 (2002).

[2] 田村昌也、他「大強度陽子加速器計画おける核破砕中性子源の３次元遮蔽設計」、JAERI-Tech (印刷中).

[3] B.J. Moyer,"Method of Calculation of the Shielding Enclosure for the Berkeley Bevatron", Proc. 1st Int. Conf. Shielding around High Energy Accelerators, Presses Universitaires de France, Paris, p.65 (1962).

[4] L.S. Waters (Ed.), "MCNPX User's Manual", TPO-E83-G-UG-X-00001, Los Alamos National Laboratory (1999).

[5] M.B. Chadwick, P.G. Young, S. Chiba, *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, 131, 293 (1999).

[6] 坂本幸夫、山口恭弘, "高エネルギー陽子加速器施設の遮へい設計計算のための線量換算係数", JAERI-Tech 2001-042 (2001).

[7] 前川藤夫、私信 (2002).

[8] ANL-5800, 660 (1963).

[9] 「放射線施設遮蔽」研究専門委員会, "ガンマ線遮蔽設計ハンドブック", （社）日本原子力学会 (1988).

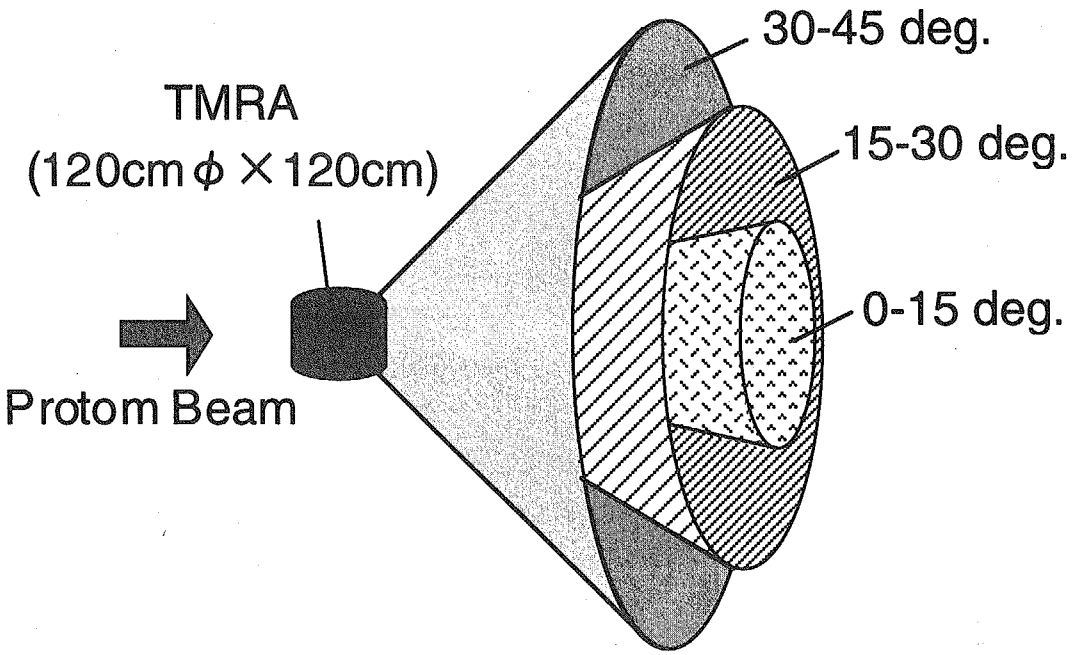


Fig. 8.2.4.2-1 Illustration of angle bins for the source term calculation

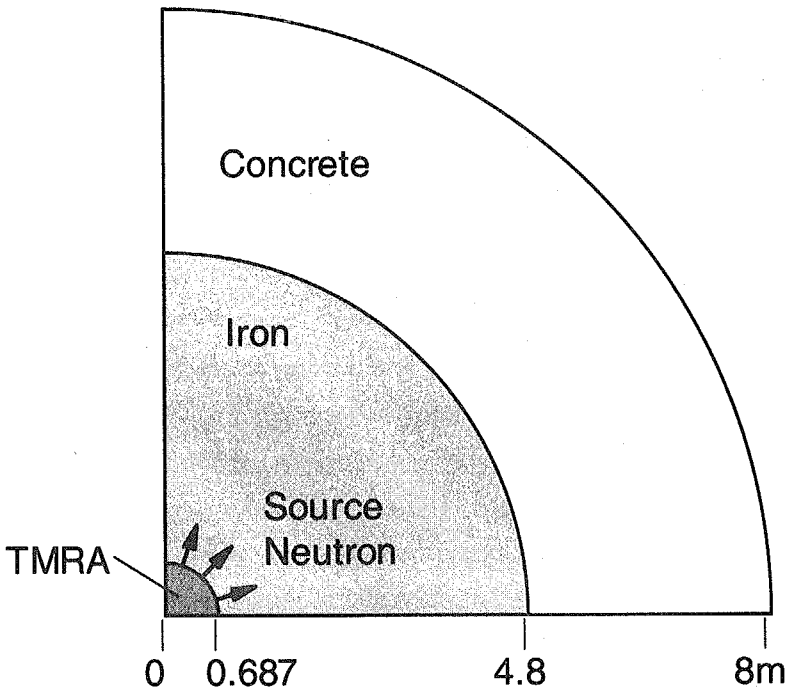
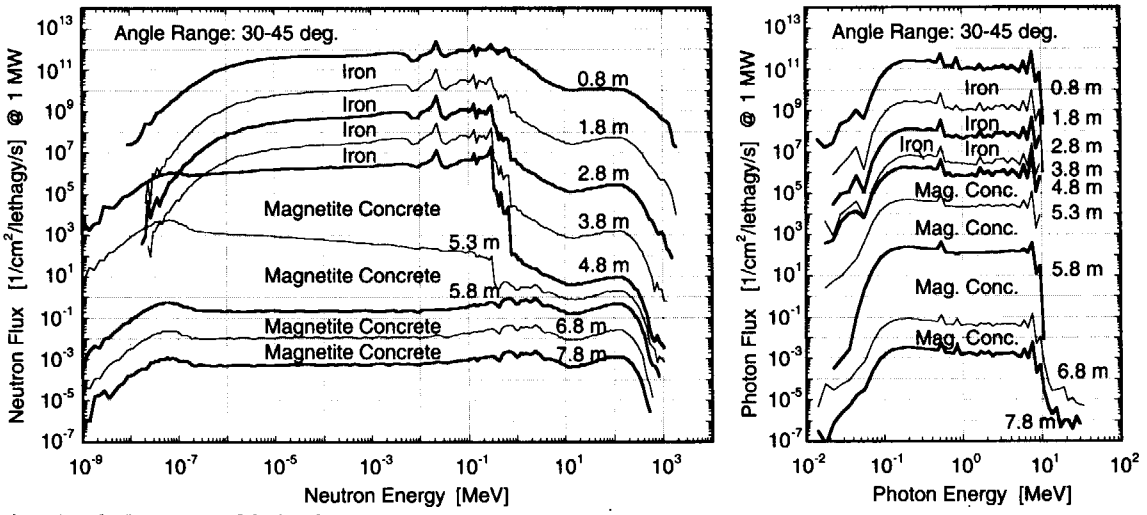
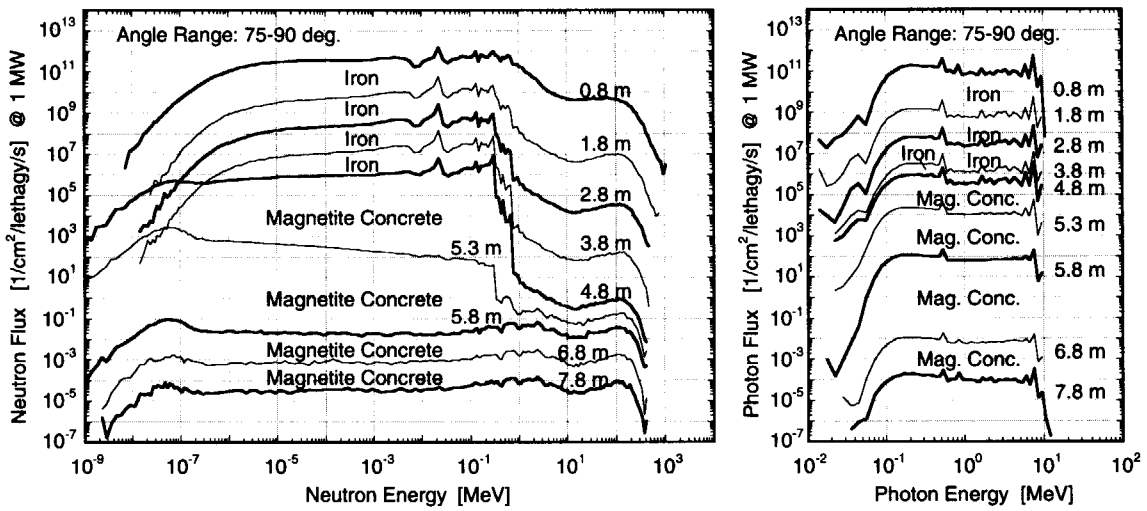


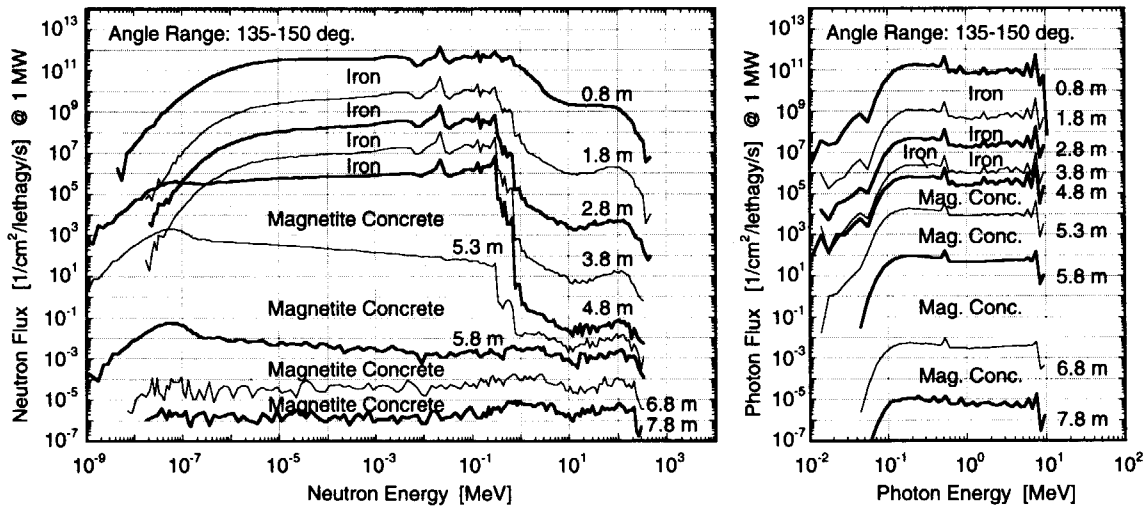
Fig. 8.2.4.2-2 Illustration of a quarter section of the one-dimensional spherical calculation model for the deep penetration calculation.



(a) Angle Range: 30-45 degrees



(b) Angle Range: 75-90 degrees



(c) Angle Range: 135-150 degrees

Fig. 8.2.4.2-3 Neutron and photon energy spectra in the bulk shield for the Case-01 for angle ranges of (a) 30-45, (b) 75-90 and (c) 135-150 degrees with respect to the proton beam direction.

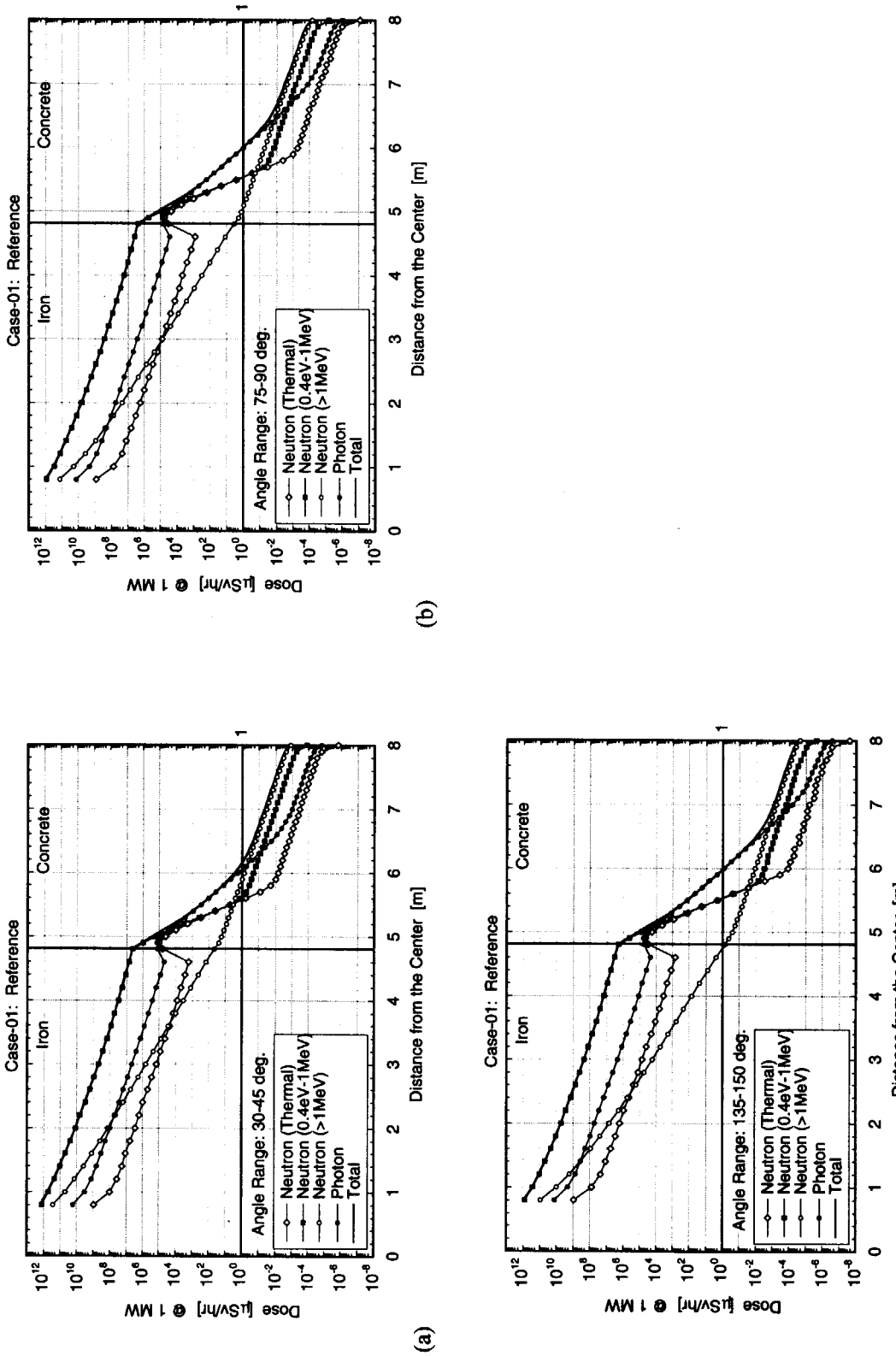


Fig. 8.2.4.2-4 Attenuation curves of radiation dose as a function of the shield thickness for the reference case for angle ranges of (a) 30-45, (b) 75-90 and (c) 135-150 degrees with respect to the proton beam direction.

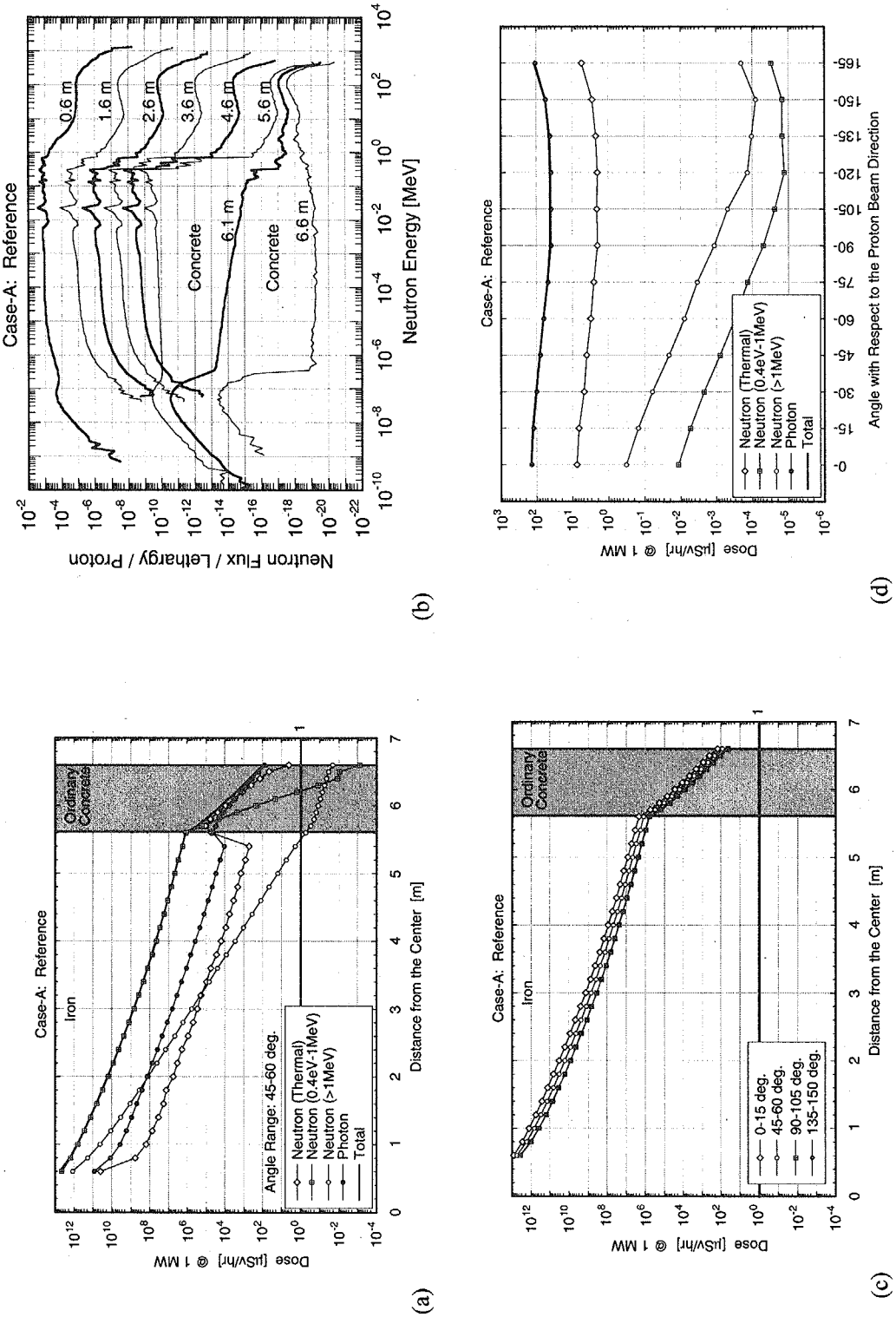


Fig. 8.2.4.2-5 Calculated results for optimizing the shield configuration (Case-A: reference).
(a) Attenuation curves of four kinds of radiation doses v.s. the distance from the center, (b) Attenuation curves of radiation doses for four angle ranges v.s. the distance from the center, (c) Neutron spectra in the shield, (d) Radiation doses at the outer boundary of the shield at 6.6 m from the center.

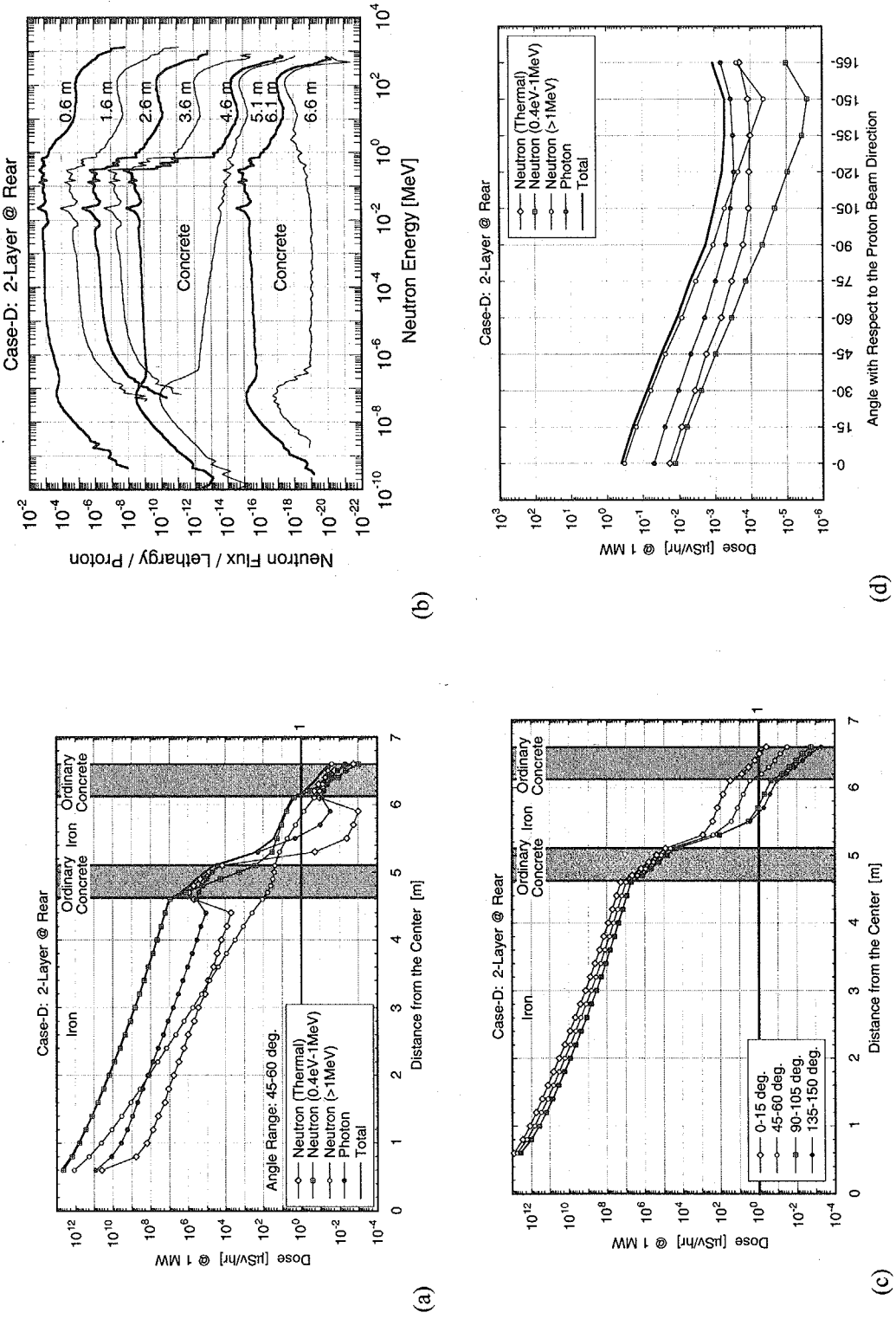


Fig. 8.2.4.2-6 Calculated results for optimizing the shield configuration (Case-D: concrete layer at the rear).
(a) Attenuation curves of four kinds of radiation doses v.s. the distance from the center, (b) Attenuation curves of radiation doses for four angle ranges v.s. the distance from the center, (c) Neutron spectra in the shield, (d) Radiation doses at the outer boundary of the shield at 6.6 m from the center

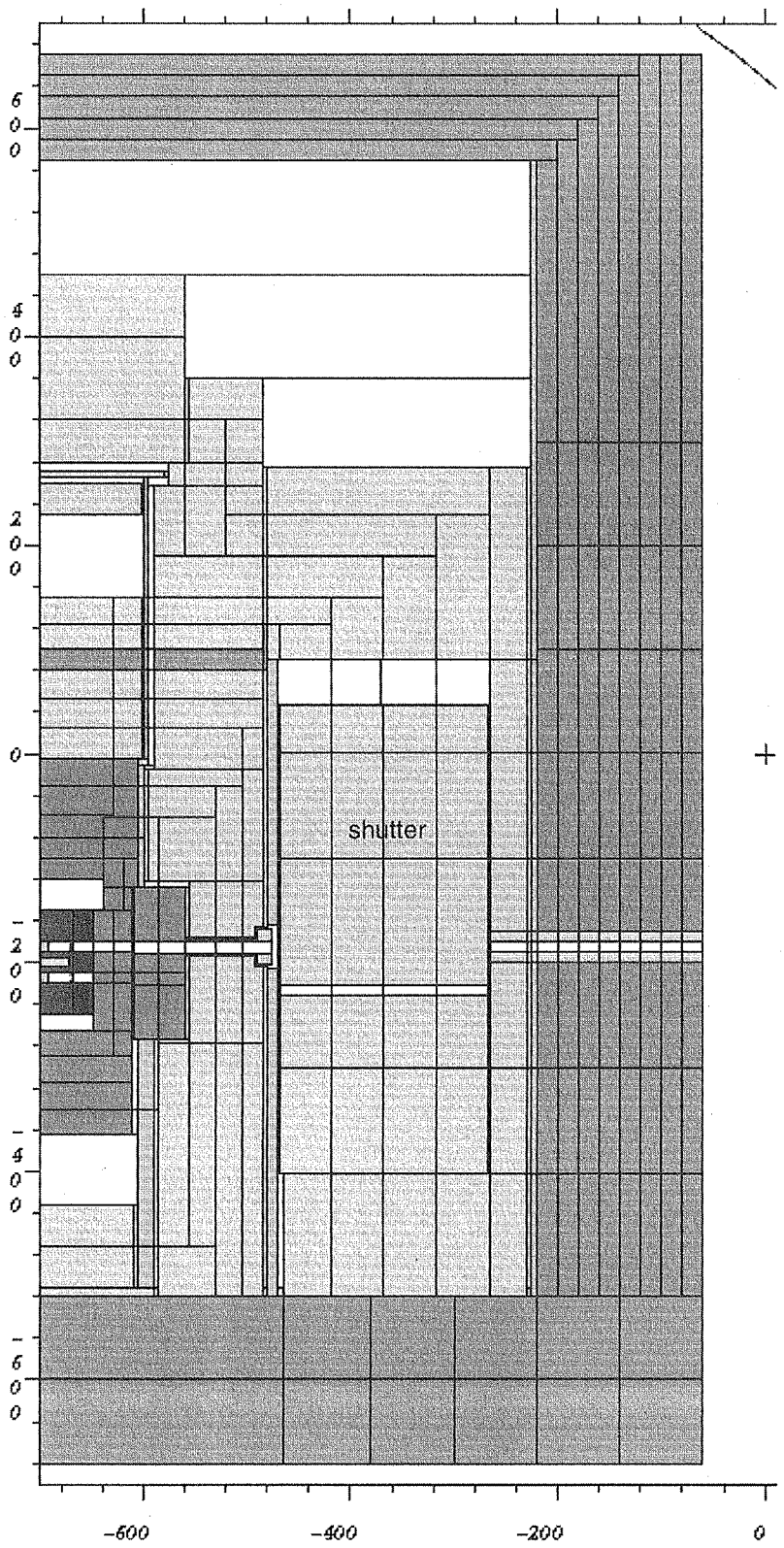


Fig. 8.2.4.3-1 Calculation model at the begining of the shielding design.
(Colors indicate as follows, pink: steel (low density), light blue: steel (nominall density), orange: heavy concrete, green: water cooled stainless steel, etc.)

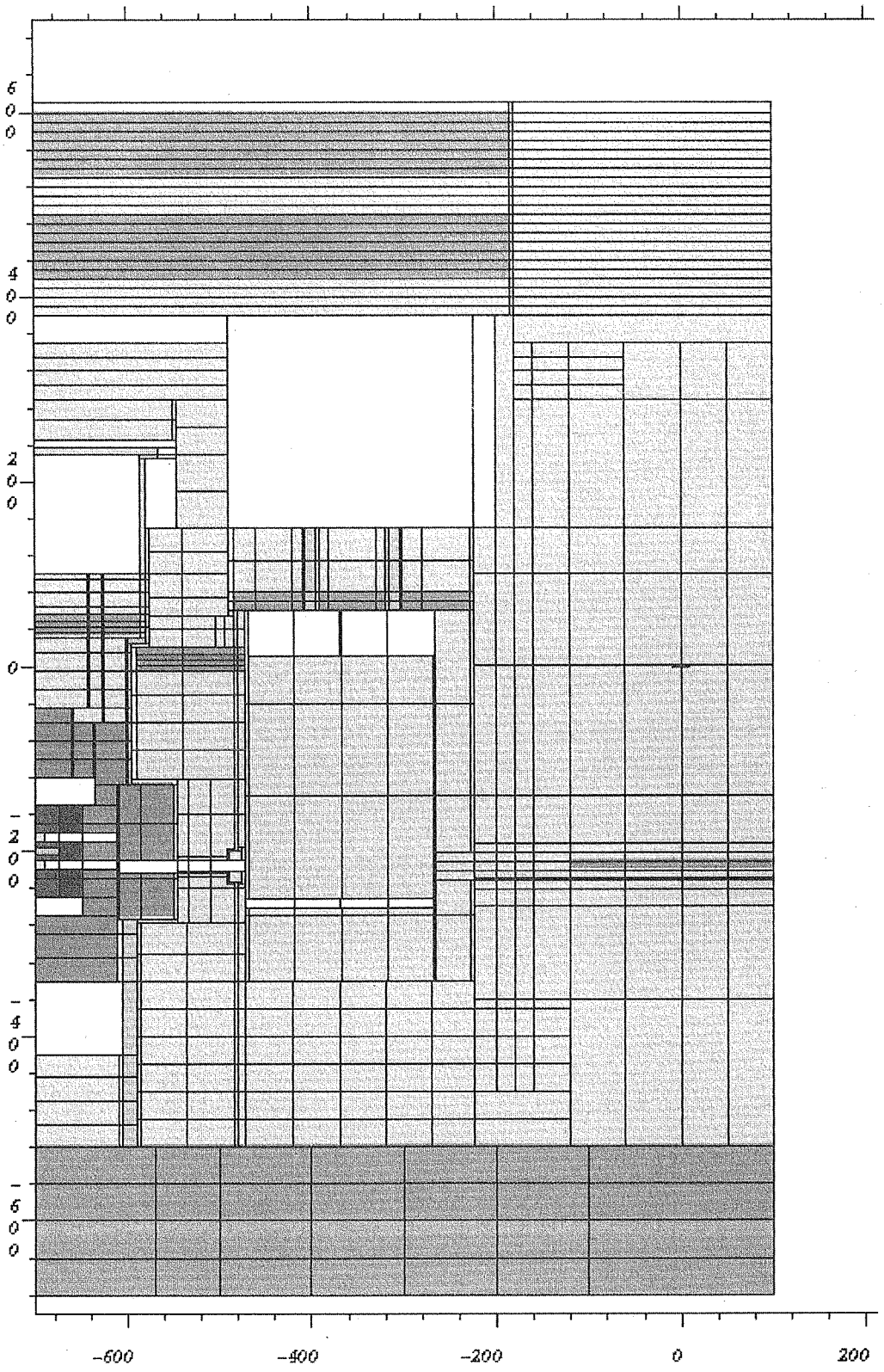


Fig. 8.2.4.3-2 Calculation model in the final stage of the design.
(Colors indicate as follows, pink: steel (low density), light blue: steel (nominall density), orange: ordinary concrete, gray: heavy concrete, green: water cooled stainless steel, etc.)

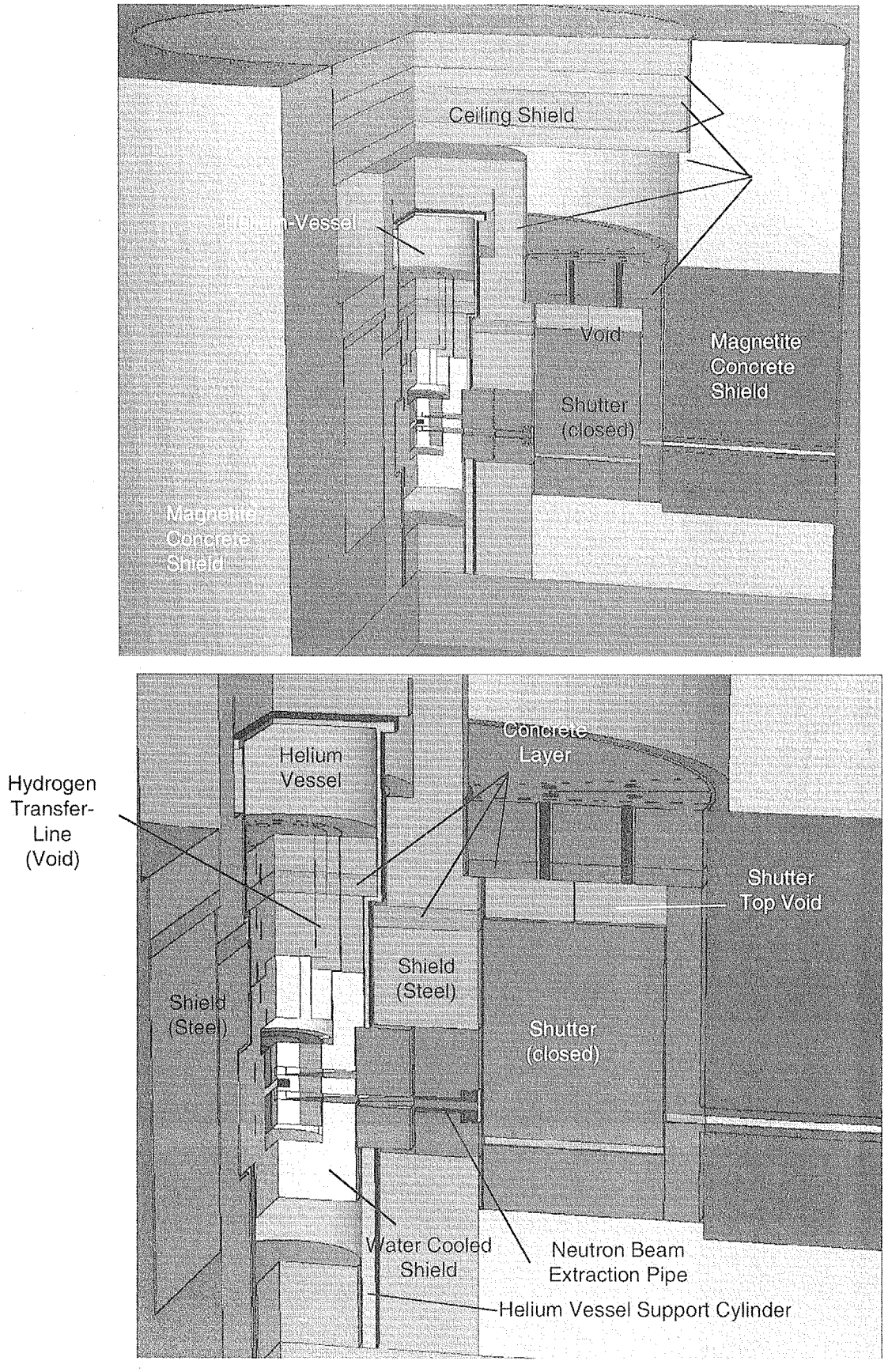


Fig. 8.2.4.3-3 Birds-eye view of the 3-D calculation model.

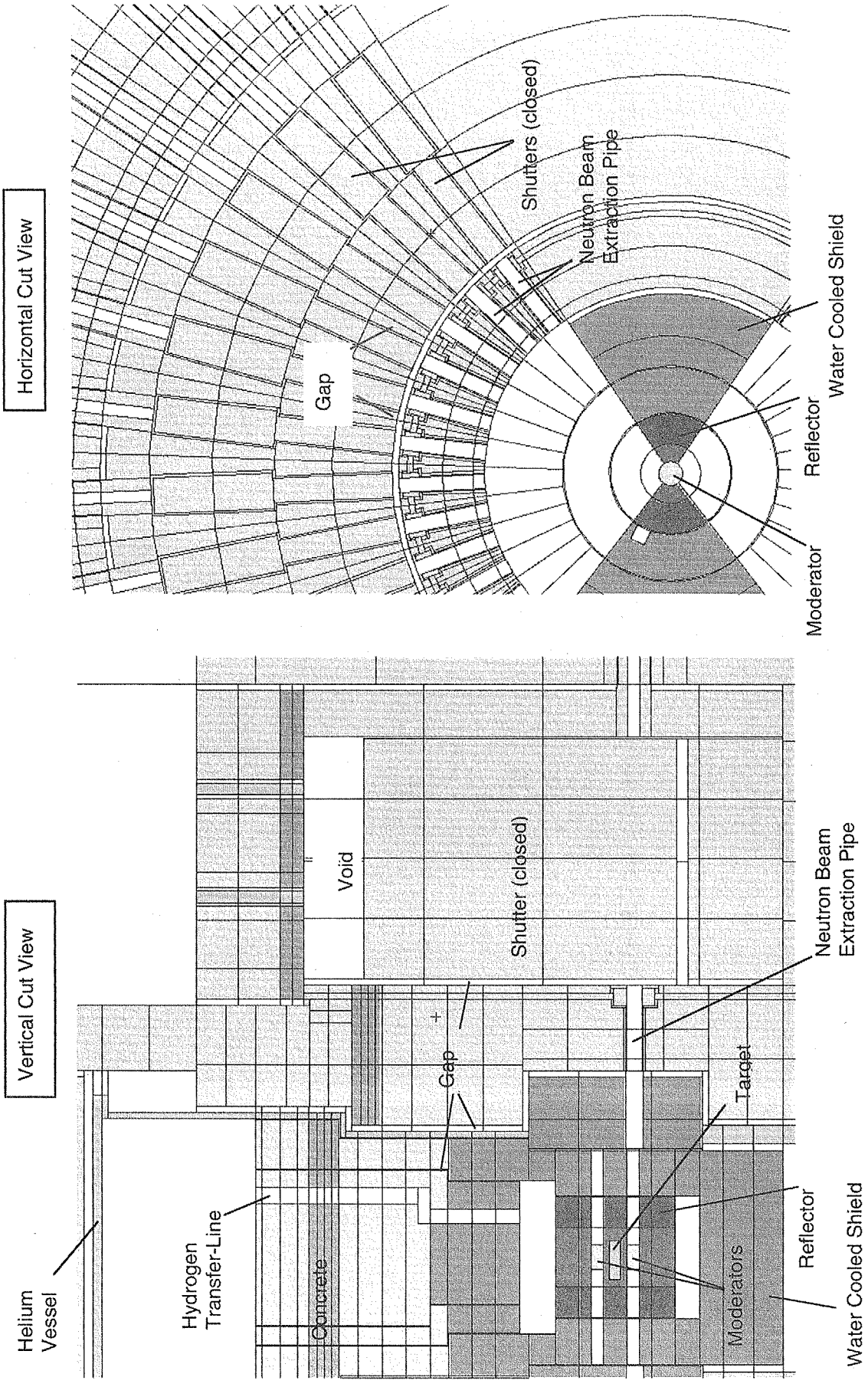


Fig. 8.2.4.3-4 Vertical and horizontal cut view of the 3-D calculation model.

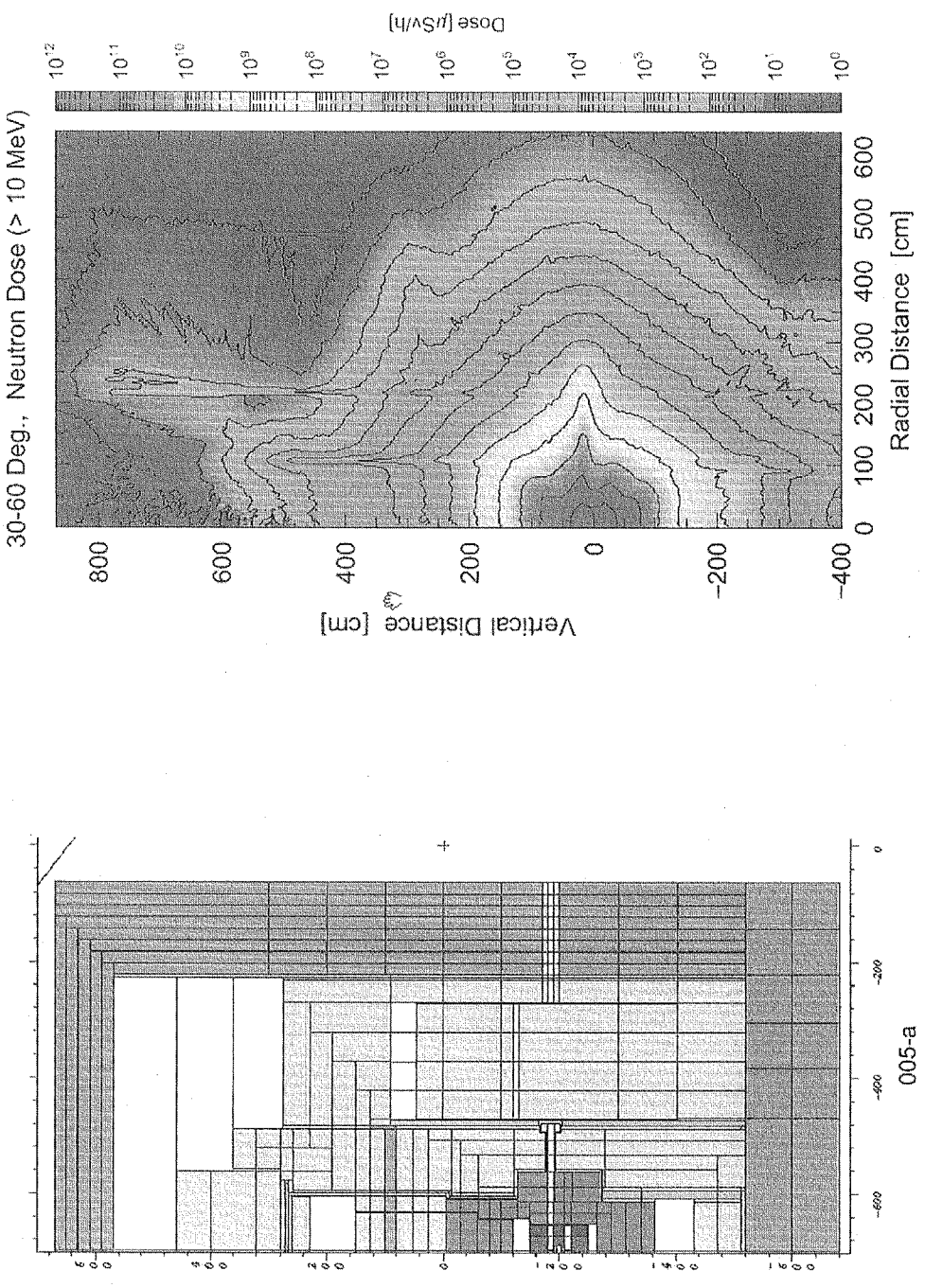


Fig. 8.2.4.3-5 Calculated dose by neutrons above 10 MeV (right-hand-side) for a 3-D calculation model (left-hand-side).

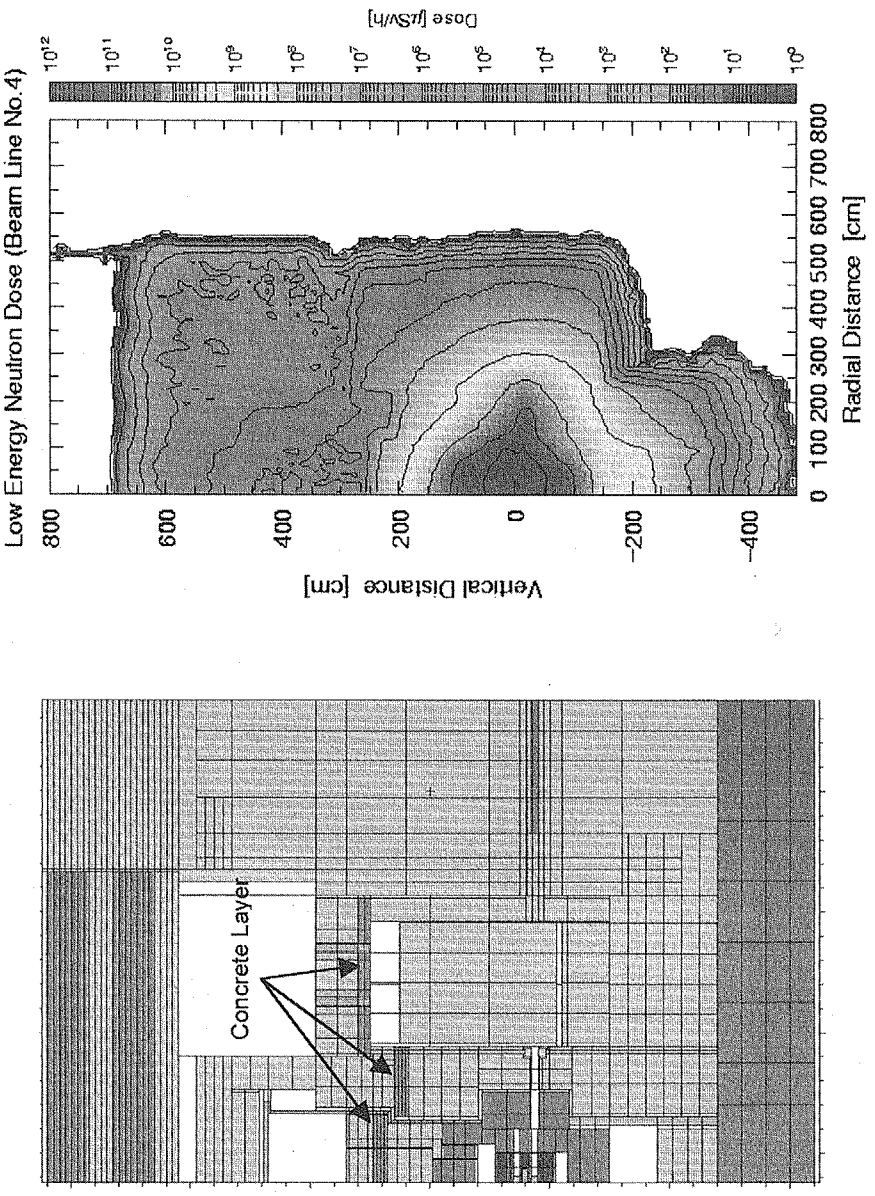


Fig. 8.2.4.3-6 Calculated dose by low-energy neutrons (right-hand-side) for a 3-D calculation model (left-hand-side).

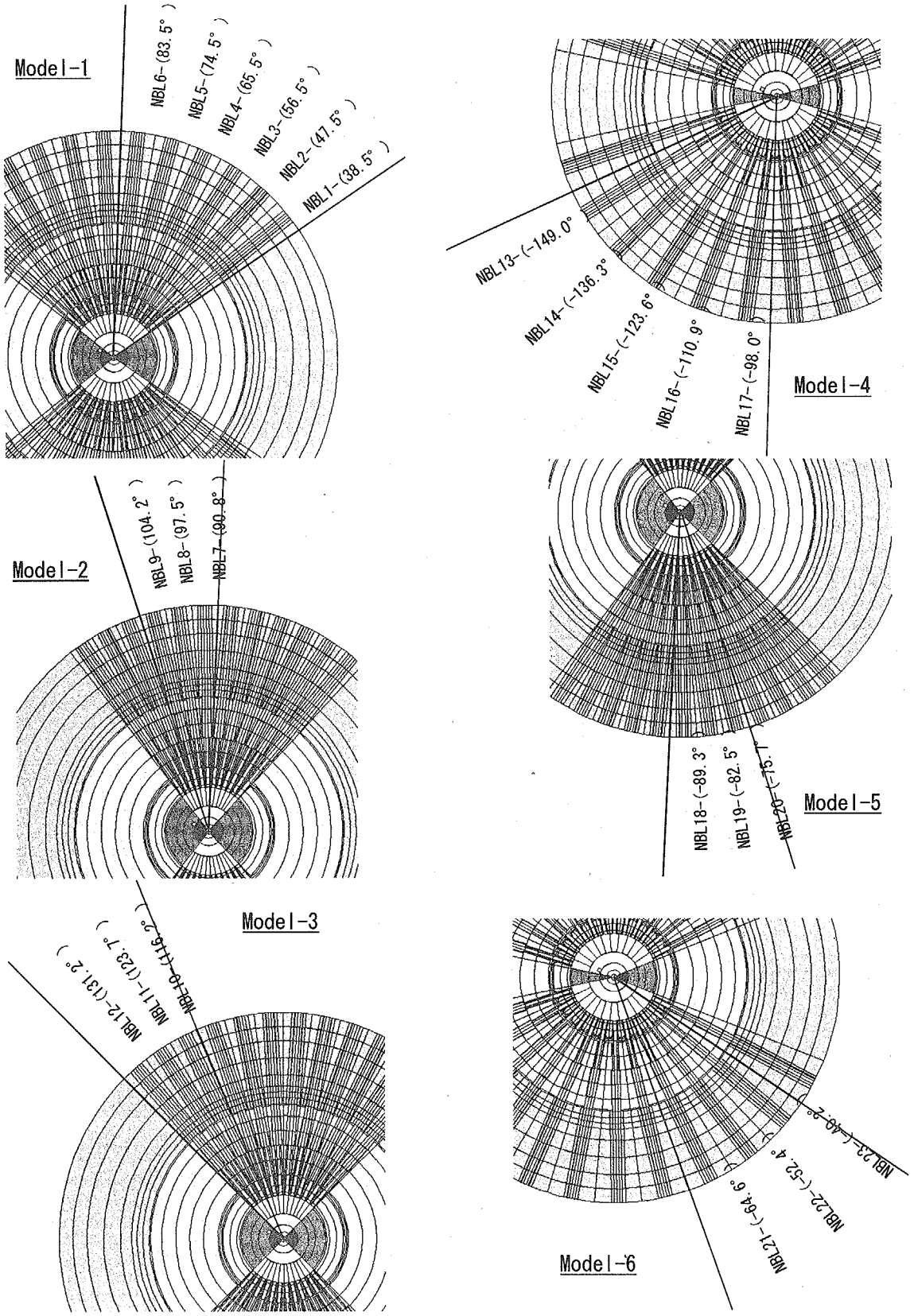


Fig. 8.2.4.3-7 Calculation model to determine lateral shield thickness for all the 23 beam lines.

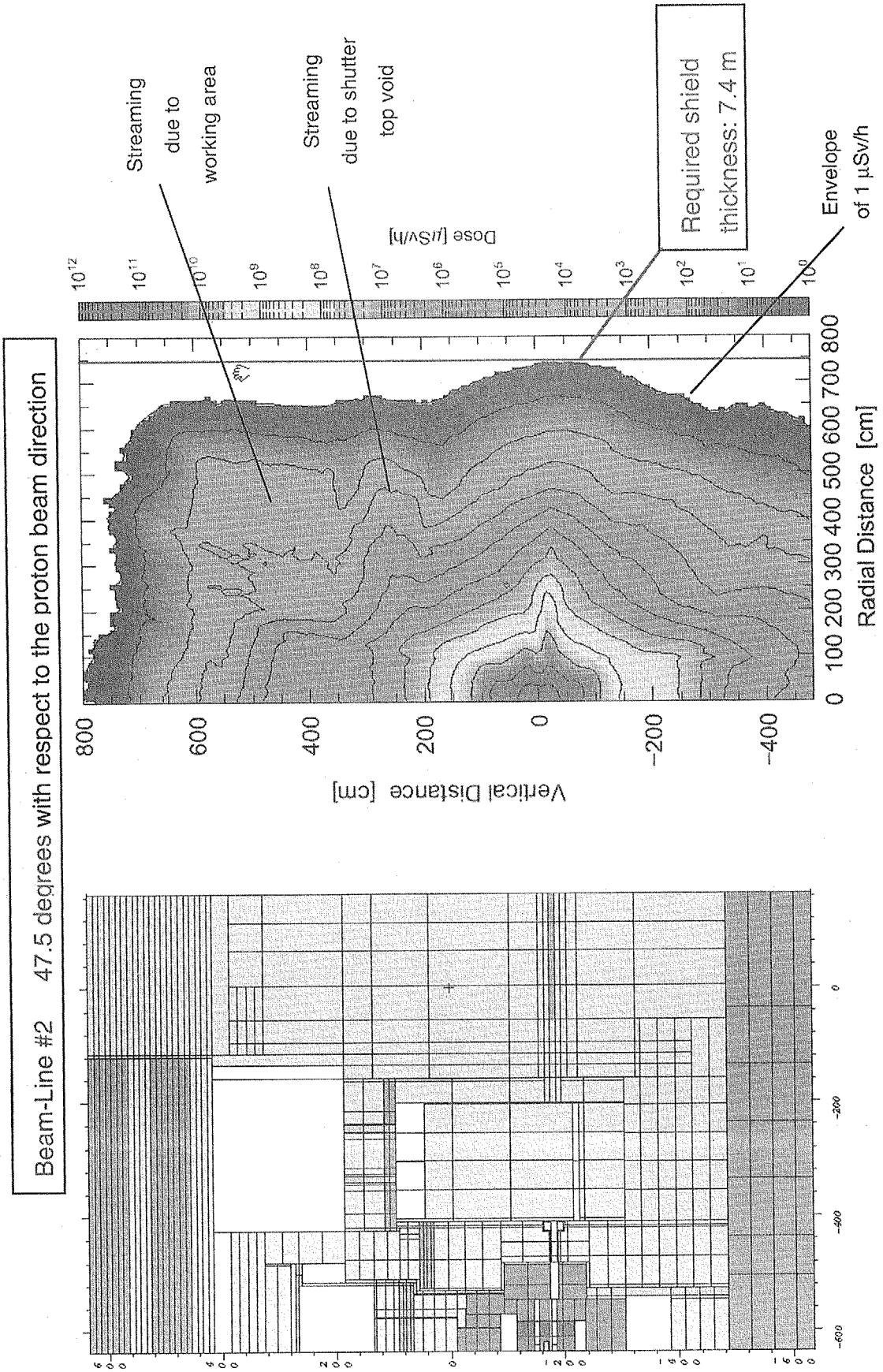


Fig. 8.2.4.3-8 Calculated results to determine a required shield thickness for the beam-line #2.

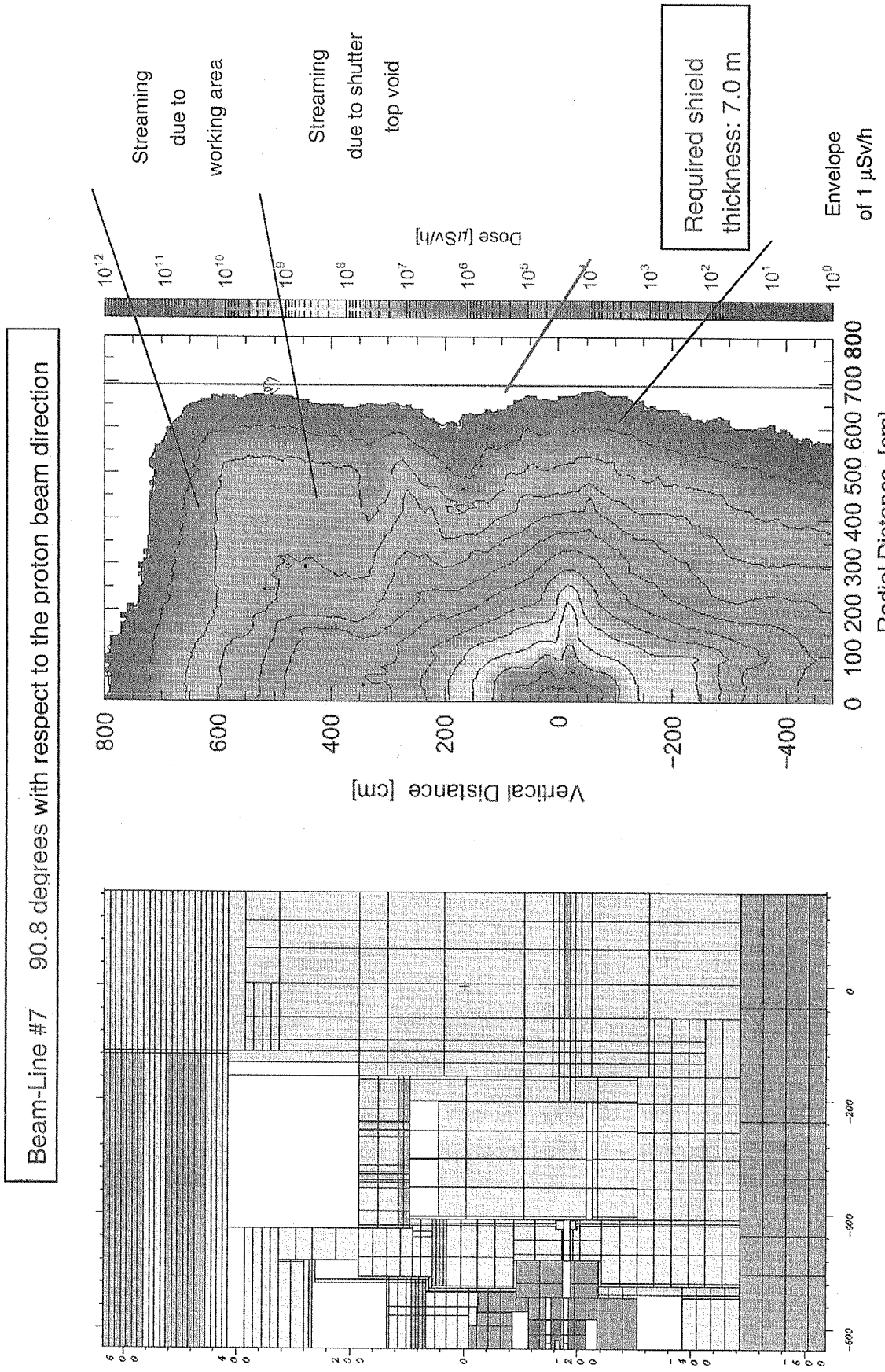


Fig. 8.2.4.3-9 Calculated results to determine a required shield thickness for the beam-line #7.

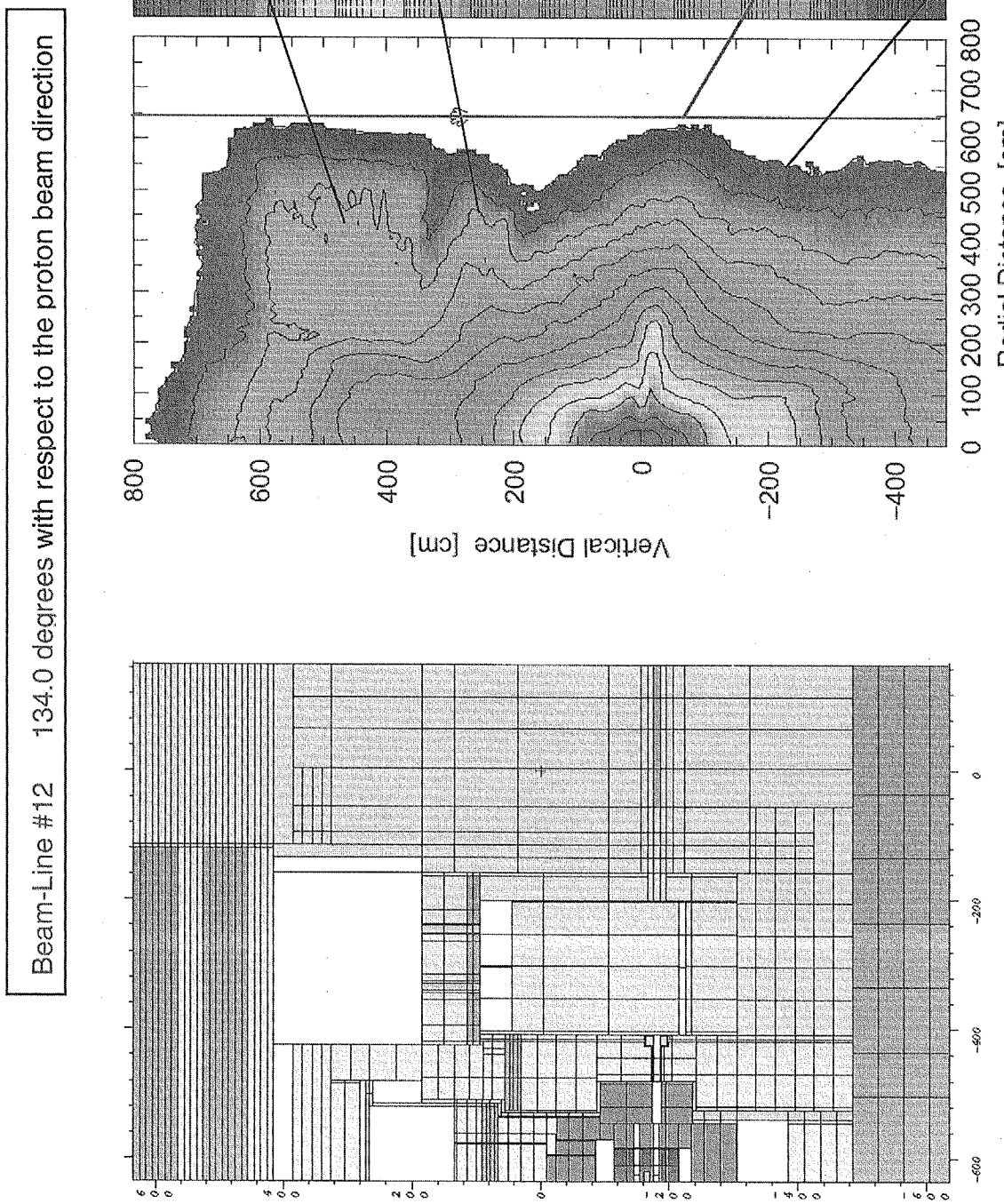


Fig. 8.2.4.3-10 Calculated results to determine a required shield thickness for the beam-line #12.

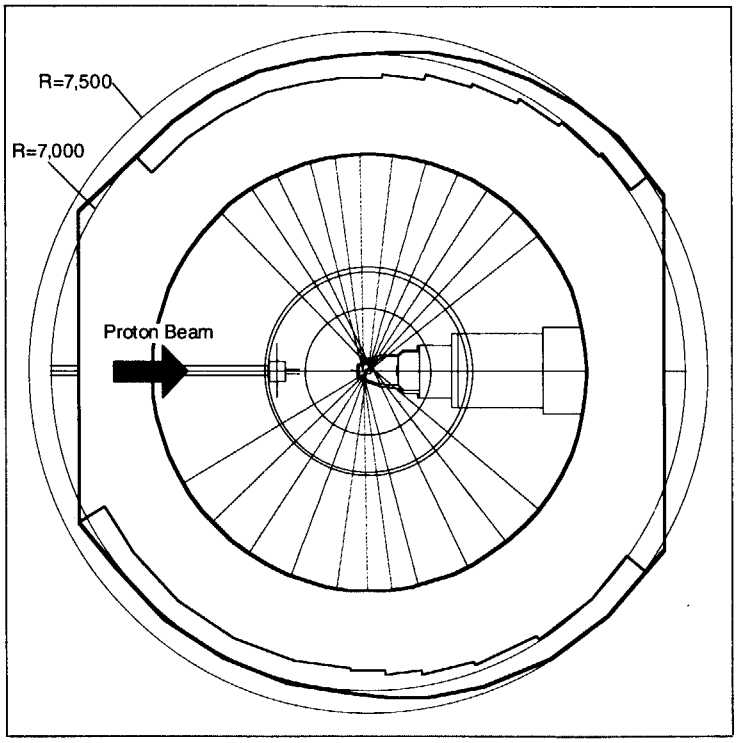


Fig. 8.2.4.3-11 Horizontal shape of the biological shield (outermost bold line) for the spallation neutron source determined by the 3-D shielding calculation.

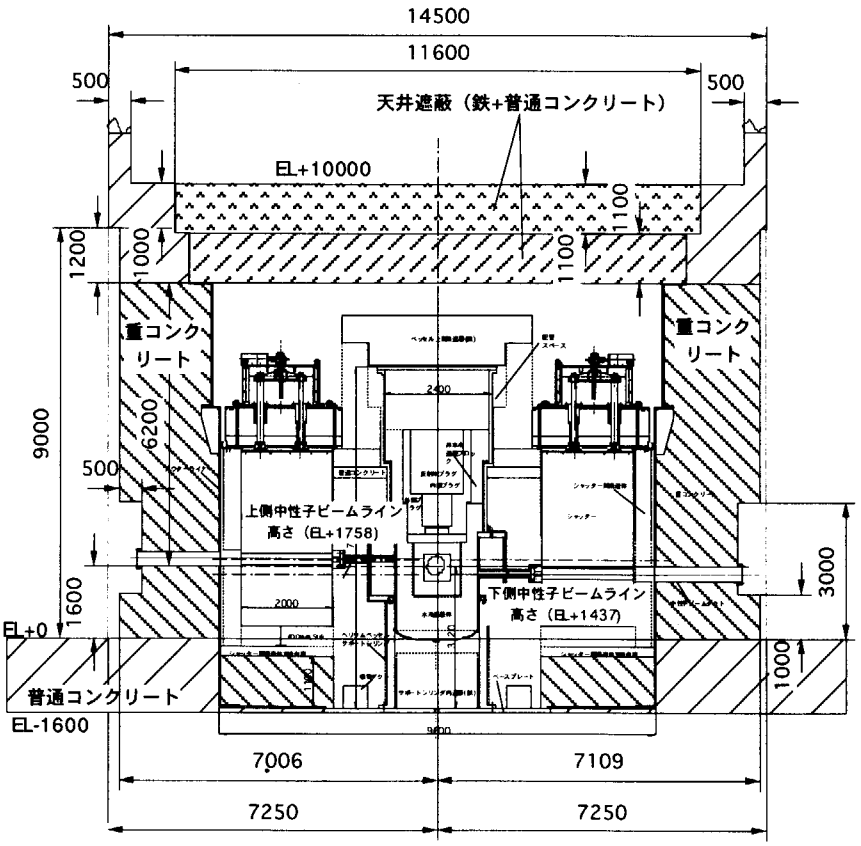


Fig. 8.2.4.3-12 Vertical cross section of the biological shield.

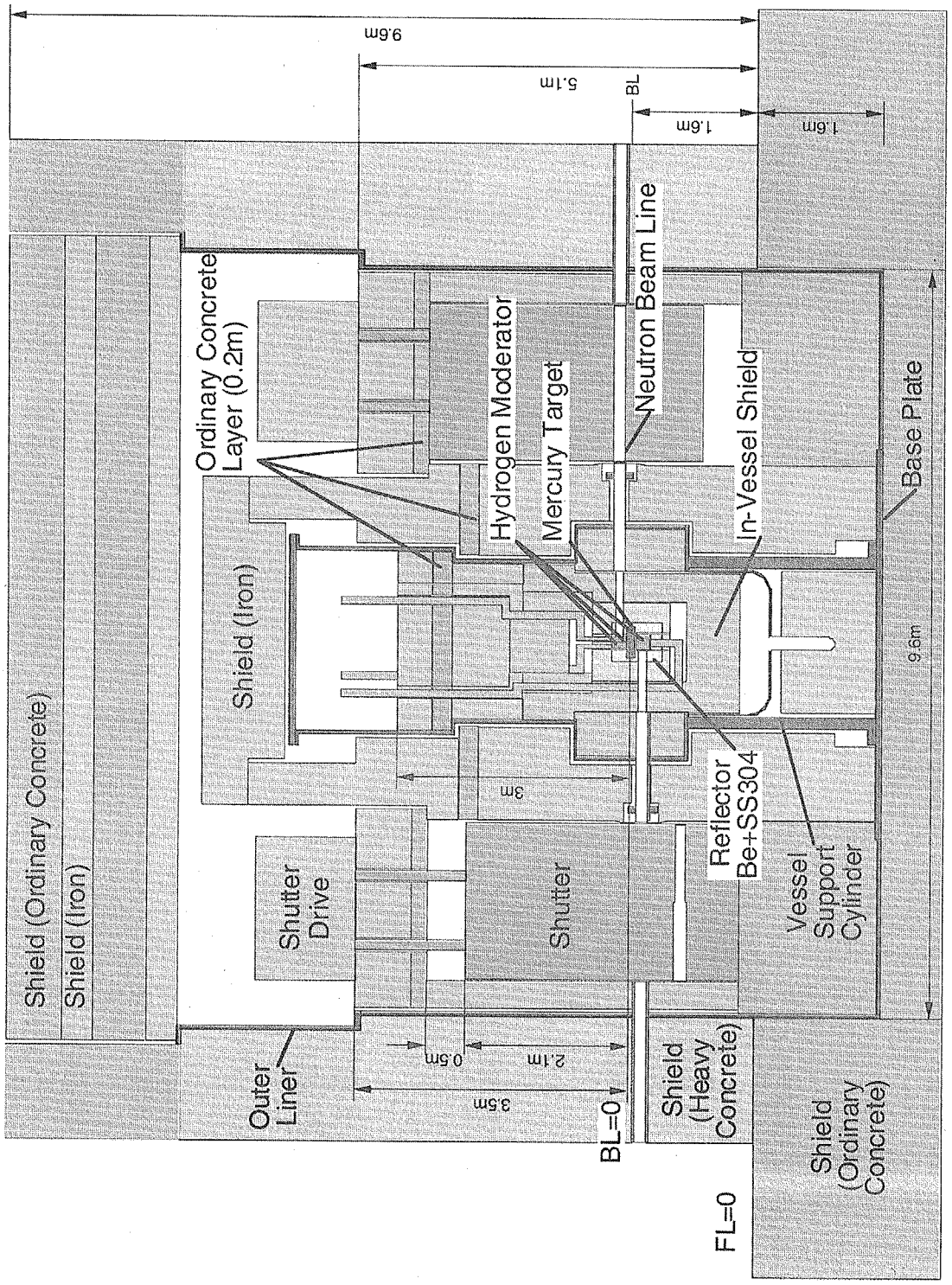


Fig. 8.2.4.3-13 Vertical layout of shielding structure for the 1-MW spallation neutron source determined by this study.

８．２．５　物質・生命科学実験施設建家壁の遮蔽設計

物質・生命科学実験施設は、陽子ビーム照射によって生じる誘導放射能の取扱いを行う区域を有する。これらの区域の遮蔽設計にあたって、誘導放射能を評価し、必要な遮蔽厚さを評価した。

８．２．５．１　誘導放射能評価

８．２．５．１．１　計算方法

誘導放射能評価に使用した DCHAIN-SP コードシステムの概要を Fig.8.2.5-1 に示した。DCHAIN-SP は 20 MeV 以下の中性子スペクトルに 175 群の放射化断面積を乗じて 20 MeV 以下の中性子による核種生成率を計算し、陽子、中間子、高エネルギー(20 MeV 以上)中性子による核種生成率と足し合わせる。その後、崩壊データを利用して照射中及び照射中及び照射終了後の任意の時刻における核種の蓄積量、誘導放射能、α、β及びγ線の放出による崩壊熱及びγ線エネルギースペクトル等を評価する。陽子、中間子、高エネルギー中性子による核種生成率は NMTC/JAM、20 MeV 以下の中性子スペクトルは MCNP/4C により計算を行った。

８．２．５．１．２　評価対象と計算条件

誘導放射能評価の対象要素は、ターゲット水銀、ターゲット容器、反射体集合体、モデレータ集合体、及び陽子ビーム窓とした。これらの構成要素、材質、及び重量を Table 8.2.5-1 にまとめた。また、誘導放射能評価を行う際の照射時間、及び冷却時間についても記載した。一方、線源集合体を冷却する冷却水(ターゲットセーフティハル冷却水、反射体冷却水、ターゲットトロリー冷却水、ヘリウムベッセル冷却水、陽子ビーム窓冷却水、モデレータ冷却水。Table 8.2.5-2 にインベントリーを示す。)は高度に放射化されるため、これらに対する放射能評価も必要となる。冷却水は、照射場と非照射場を繰り返し循環していることから、Ti(s)時間の照射と Tc(s)時間の冷却が繰り返されていると考えることができる。このとき、冷却水中の放射能濃度は時間とともに増加し、やがて飽和する。このときの核種 n の飽和放射能濃度 $A_{n\infty}$(Bq/cm^3)は次式で表される。

$$A_{n\infty} = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ R_n \left(1 - e^{-\lambda_n T_i}\right) e^{-\lambda_n (T_i + T_c) k} \right\} = R_n \frac{1 - e^{-\lambda_n T_i}}{1 - e^{-\lambda_n (T_i + T_c)}}$$

ここで、Rn、λn はそれぞれ核種 n の生成率(atoms/s/cm^3)、崩壊定数である。この式では、生成した核種が再び核反応を起こす 2 次反応を考慮していないが、本施設の規模では、2 次反応は殆ど問題にならないと考えられる。一方、^{3}H(半減期 12 年)、^{10}Be(半減期 160 万年)、^{14}C(半減期 5730 年)については、半減期が長く運転期間中に濃度が飽和すると考えるのは妥当ではないことから、これらの核種の放射能濃度は、実効的な照射時間に比例していると考えた。

８．２．５．１．３　誘導放射能評価の結果

Fig. 8.2.5-2～6 には、評価対象の放射能の時間変化を示した。図中には、Table 8.2.5-1 に示した冷却時間において、γ線を放出する核種の中で割合の大きな上位 5 核種の時間変化も示した。また Fig.8.2.5-7 には、評価対象のγ崩壊熱の時間変化を示した。γ崩壊熱は、全γ線放出エネルギーに比例しており、γ崩壊熱の時間変化によりγ線量率の時間変化の目安を得ることができ、

合理的な冷却時間を知ることができる。冷却時間 1 日以降のγ崩壊熱の減少は緩やかであり、半年から数年の冷却期間でγ崩壊熱の減衰が期待できることが分かる。

冷却水中の最大放射能濃度を Table 8.2.5-3 に示した。

８．２．５．２　γ線遮蔽計算

８．２．５．２．１　計算方法

DCHAIN-SP コードシステムを用いて得られる誘導放射能のγ線スペクトルを線源として、MCNP/4C により遮蔽体中でのγ線輸送計算を行った。

８．２．５．１．２　必要遮蔽厚さ

必要な遮蔽厚さを決定するにあたり、目標とする線量率を決める必要がある。そこで、施設を以下のように A～D の区域に分け、それぞれ設計目標とする線量率を規定した。

A 区域: 立入制限区域。　100 μSv/h 以下。
B 区域: 作業者立入区域。　12.5 μSv/h 以下。
C 区域: 実験者立入区域。　5 μSv/h 以下。
D 区域: 一般区域。　0.125 μSv/h 以下。

評価の結果から得られた必要な遮蔽厚さを Table 8.2.5-4 にまとめた。

Table 8.2.5-1 Radioactivity estimation items, material, weight and calculation condition.

評価対象	構成要素	材質	重量(kg)	照射	冷却
ターゲット	水銀	水銀	830(*1)	30y(*2)	2d
ターゲット容器	ターゲット容器	ステンレス	200	2500h	2d
	ビームストップ	ステンレス	100		
反射体	内側反射体	ベリリウム	280	10y(*2)	5d
	外側反射体	ステンレス	$3.1x10^3$		
	反射体容器	アルミ合金	385		
	ライナー	Ag-In-Cd 合金	46		
モデレータ集合体	モデレータ容器	アルミ合金	9.1	6y(*2)	5d
	デカップラー	Ag-In-Cd合金	7.0		
	ポイゾン	ガドリニウム	0.17		
	反射材	ベリリウム	21		
陽子ビーム窓	陽子ビーム窓	インコネル	26	5000h	2d
		ステンレス	444		

*1 照射される部位のみ。*2 年間 5000 時間。

Table 8.2.5-2 Inventory of each component of water-cooling-system.

冷却系統	被照射部 (L)	Delay Tank (L)	サージタンク (L)	熱交換器 (L)	配管 (L)	流量 (L/s)
セーフティハル冷却系	9.9	400	2000	0	285	3.3
反射体冷却系	49.3	700	3300	0	315	5.6
ターゲットトロリー冷却系	93	0	1400	0	285	1.4
ヘリウムベッセル冷却系	1004	600	3200	0	315	5.0
陽子ビーム窓冷却系	6.5	200	1600	0	315	1.4
モデレータ冷却系	5.8	600	3200	0	315	5.0

Table 8.2.5-3 Saturated radioactivity (Bq/cm^3) of short-life (1 s～60 d) nuclide.

	Be-7	Be-11	C-10	C-11	C-15	N-13	N-16	N-17	O-14	O-15	O-19
セーフティハル冷却系	6.7e+5	1.2e+6	4.6e+6	1.6e+6	1.2e+7	1.3e+6	1.8e+8	3.7e+5	7.2e+6	1.7e+7	2.3e+3
反射体冷却系	3.2e+5	8.2e+5	1.5e+6	1.0e+6	5.7e+6	7.4e+5	1.1e+8	1.8e+5	2.4e+6	1.1e+7	7.0e+3
ターゲットトロリー冷却系	1.0e+4	1.1e+4	2.8e+4	3.2e+4	2.5e+4	2.4e+4	5.2e+5	6.6e+2	5.3e+4	3.3e+5	2.2e+1
ヘリウムベッセル冷却系	2.0e+5	8.5e+4	1.6e+5	6.5e+5	2.2e+5	4.5e+5	4.8e+6	6.0e+3	6.3e+5	5.1e+6	4.1e+2
陽子ビーム窓冷却系	1.6e+5	1.4e+5	2.6e+6	2.4e+5	1.1e+6	2.9e+5	6.4e+6	1.0e+4	5.0e+6	4.3e+6	2.9e+2
モデレータ冷却系	2.3e+5	6.6e+5	1.5e+6	7.0e+5	8.8e+6	5.5e+5	1.2e+8	2.5e+5	2.5e+6	8.2e+6	8.1e+3

Table 8.2.5-4 Required shielding-wall thickness and design dose.

線源	目標線量率 (μ Sv/h)	線源-遮蔽体間距離 (cm)	必要遮蔽厚さ (cm)
ターゲット容器	100	0	150
	100	200	120
	12.5	200	150
	0.125	200	200
反射体集合体	100	0	120
ポイゾンドモデレータ	100	200	110
結合型モデレータ	100	200	60
1次冷却水	5	10	180

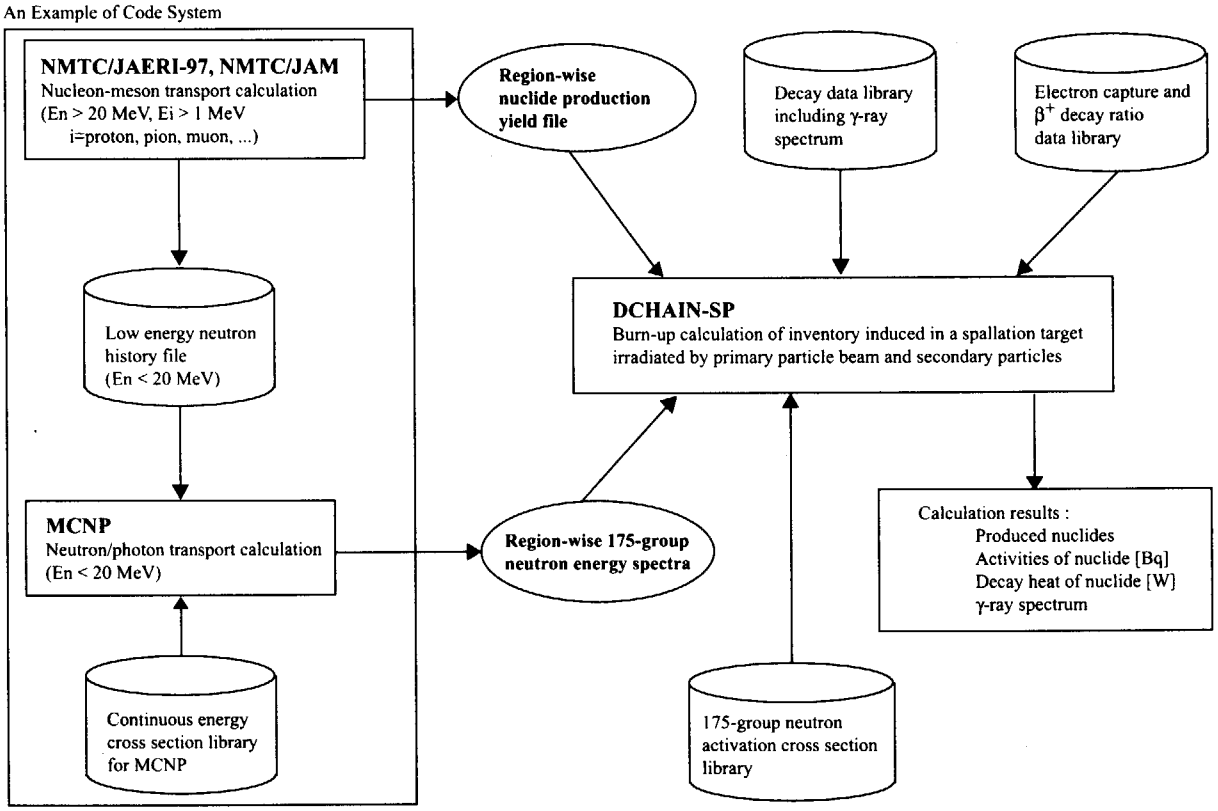


Fig.8.2.5-1 Flow of high energy particle induced radioactivity calculations with DCHAIN-SP code.

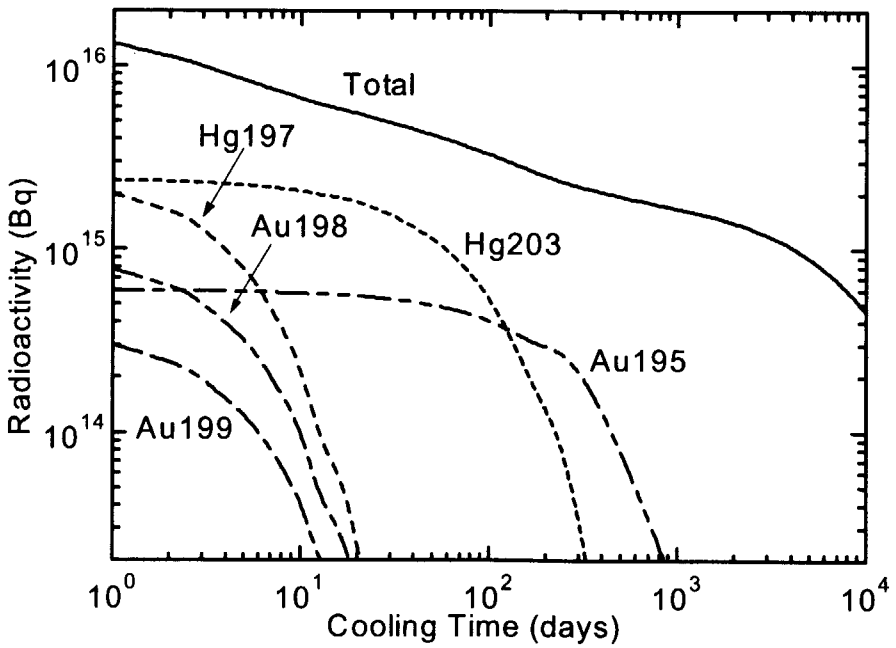


Fig.8.2.5-2 Time evolution of induced radioactivity in mercury.

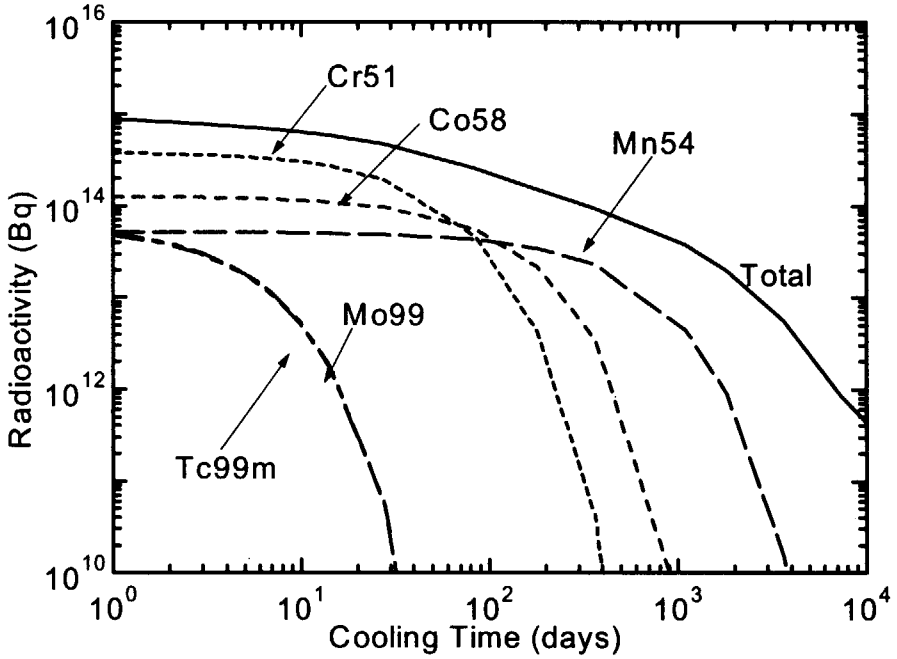


Fig.8.2.5-3 Time evolution of induced radioactivity in target container.

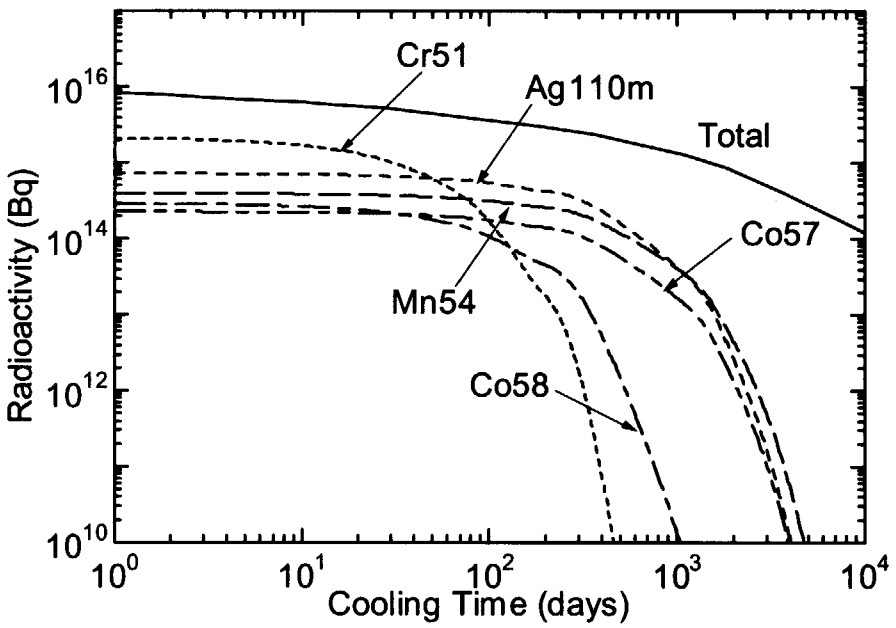


Fig.8.2.5-4 Time evolution of induced radioactivity in reflector.

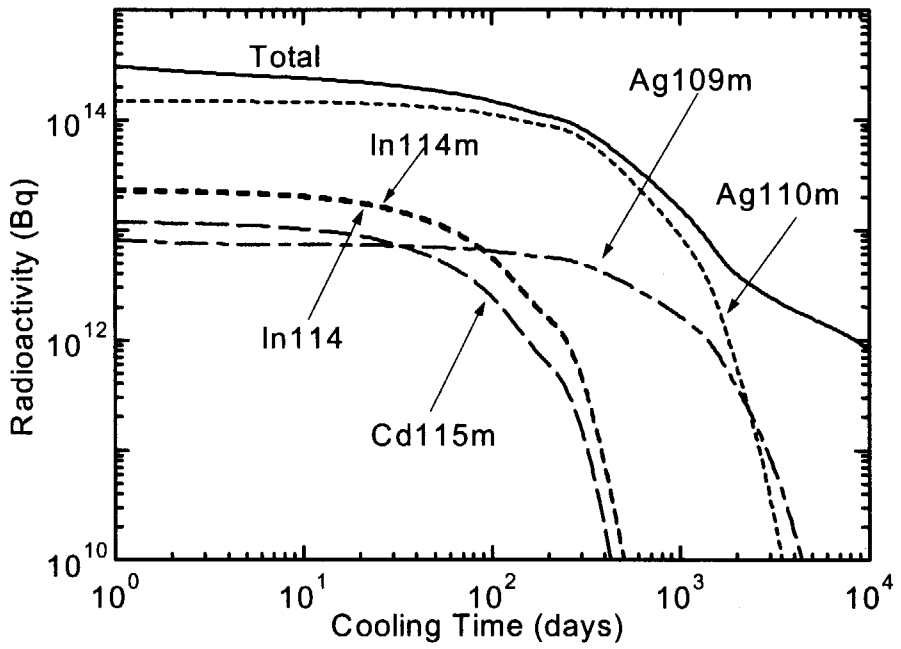


Fig.8.2.5-5 Time evolution of induced radioactivity in poisoned moderator.

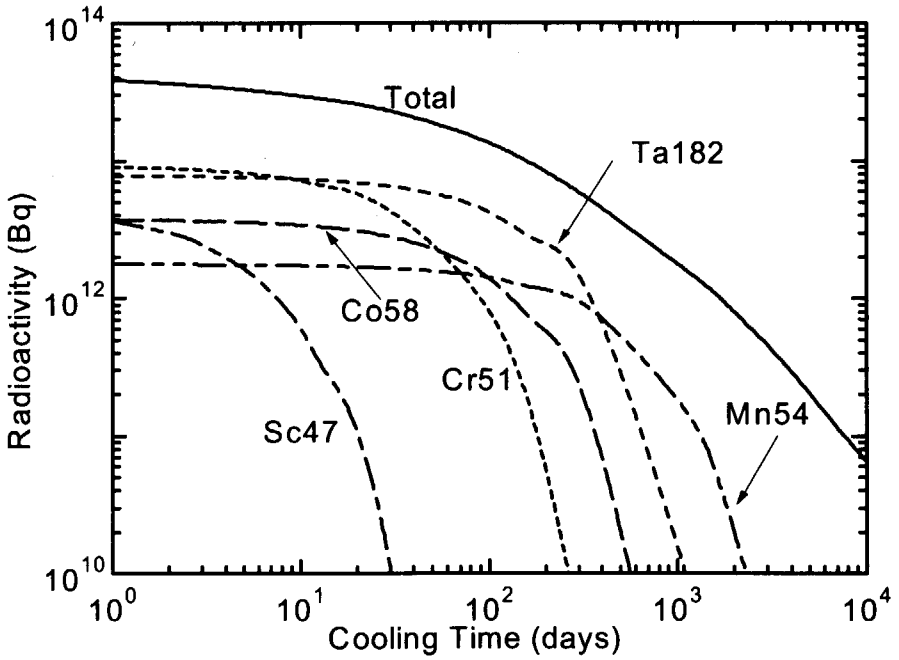


Fig.8.2.5-6 Time evolution of induced radioactivity in proton beam window.

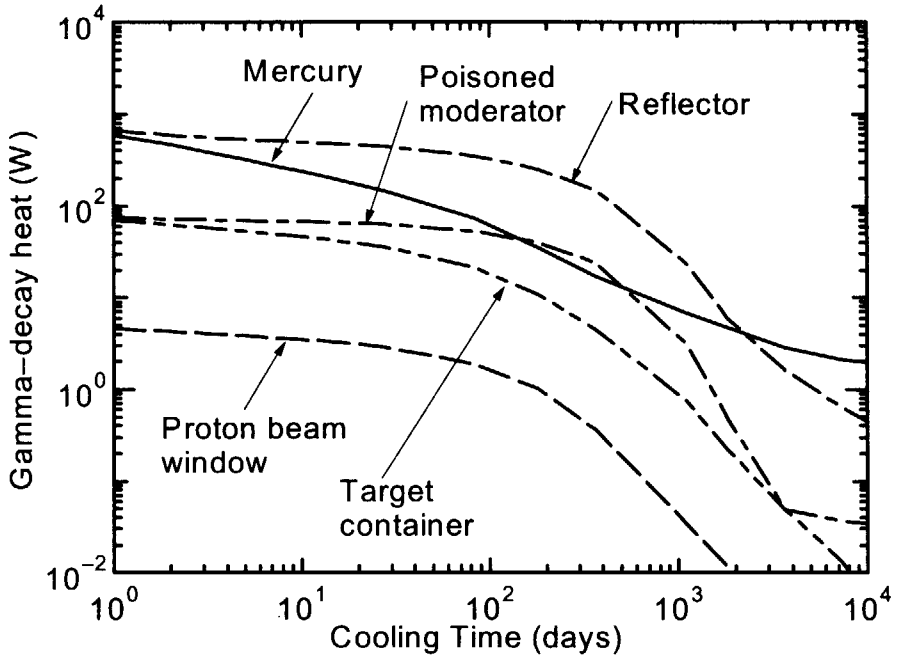


Fig.8.2.5-7 Time evolution of gamma-decay heat in TMRA items.

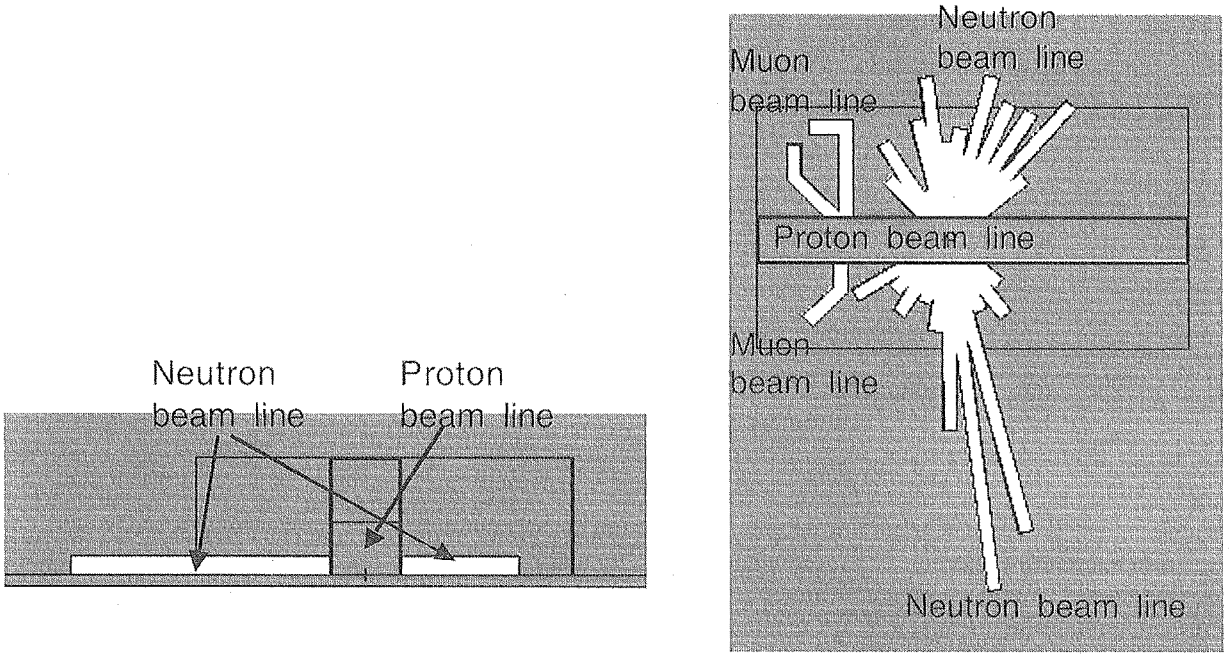
８．２．６　事業所境界での線量評価

８．２．１で述べたように事業所境界での設計目標線量は大強度陽子加速器施設全体で<50μSv/年と非常に厳しいものになっている。ここでは、物質・生命科学実験施設からの放射線による事業所境界での MCNPX コードで評価した。計算モデルを Fig. 8.2.6-1 に示す。この時、遮蔽体の外側表面での平均線量を以下のように設定した。

- 中性子ビームライン：2μSv/h
- ミュオンビームライン：2μSv/h
- 3GeV ビーム輸送ライン：6μSv/h
  (裕度２を含む)

計算結果を Fig. 8.2.6-2 に示す。この結果には大強度陽子加速器計画の第１期の他の施設からの線量も括弧で表示した。

大強度陽子加速器計画の第１期計画では事業所境界で<50μSv/年の設計目標線量を達成できている。第２期計画の核変換実験施設とニュートリノ実験施設は線量の高い評価点５－７から遠いため、第２期計画も含めて事業所境界で<50μSv/年の線量を達成できる見込みである。



(a) Vertical cross section. (b) Horizontal cross section.

Fig. 8.2.6-1 Calculation model.

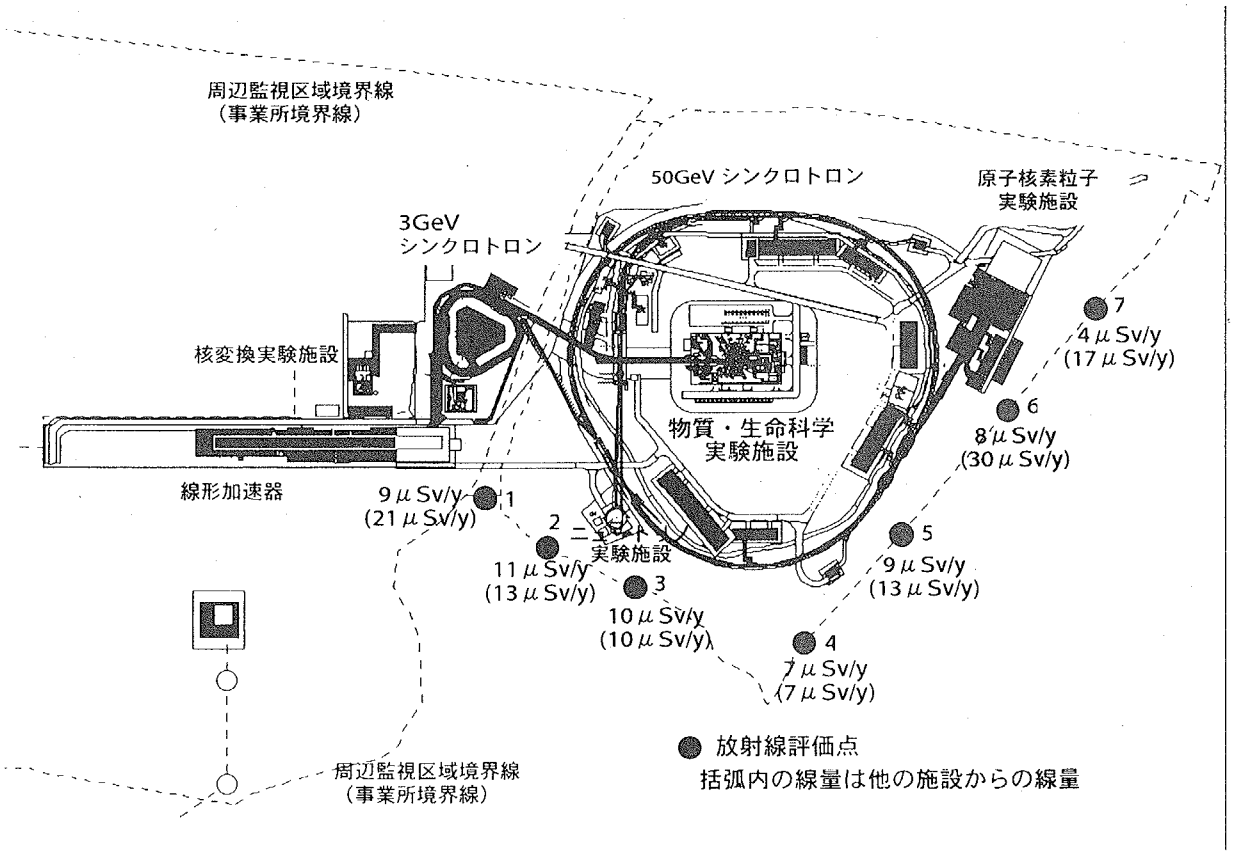


Fig. 8.2.6-2 Estimated dose at site boundary.

9．R & D

9．1 水銀ピッティング

9．1．1 はじめに

ステンレス鋼製容器に充填された水銀に 1μs の陽子ビームパルスが入射されると、核破砕に伴う瞬時発熱により局所的に膨張し、圧力波が発生する。圧力波の伝播過程で構造/水銀界面で負圧が生じ、キャビテーションの発生・崩壊に伴う局所衝撃負荷によるピットの形成が容器構造体内壁で実験的に確認された。このピッティング損傷はターゲット容器の寿命決定因子の一つと考えられることから、発生条件、損傷形態、程度を十分評価し、如何に設計に反映するかが重要課題となっている。ここでは、まず、当該課題の端緒となった SHPB 及び高サイクル衝撃負荷 MIMTM による Off-line 実験及び WNR による On-beam 実験から、これまでに得られている結果の概要を述べると共に、これらの実験及び解析的検討から今後必要とされる R&D の内容について示す。

9．1．2 Off-line 実験

(1) SHPB

液体水銀の動的挙動を調べるために、陽子入射時に発生すると推測される衝撃圧縮波を再現できるホプキンソン棒衝撃負荷装置（Split Hopkinson Pressure Bar : SHPB）による衝撃実験が行われた。実験過程で、液体水銀と固体入出棒との接液界面に多数の Fig. 9.1.2-1 に示すようなピットの形成が認められた。実機ターゲット容器において、同様な損傷形態の出現の可能性が考えられたため、その後、材料特性と衝撃負荷条件の観点から、ピッティング損傷に関する系統的な実験を実施した。

供した材料は、オーステナイトステンレス鋼SUS316、アルミニウム合金A6061、ニッケル基合金Inconel600、マレージング鋼である。また、数種の表面改質あるいは被覆処理を SUS316 に対して行った。すなわち、浸炭処理の一種である Kolsterise 処理[1]、及び TiN と CrN 被覆処理である。SHPB 実験の場合、試験片設置調整に時間を要することから、負荷衝撃回数に制限（100 回程度）が生じる。従って、壊食損傷を評価するために、通常用いられる質量減少の計測が可能となる程度の十分な損傷を与えることができない。そこで、ピット損傷面積率(A_e/A_0)による評価を行った。すなわち、レーザー顕微鏡により撮影された３D画像に対して、基準面より深くなったピットの開口面積（A_e）を求め、全計測面積（A_0）に対する割合として、損傷面積率 A_e/A_0 を求めた。Fig. 9.1.2-2 に材料表面硬さと壊食抵抗との関係を、Hammitt らが古典的音響振動法(Classical Ultrasonic Vibratory :CUV)により水銀中で評価した結果と併せて示す。なお、硬さと壊食抵抗性は、それぞれ SUS316 の値で規格化した。SHPB の場合、壊食抵抗性は、先の損傷面積率の逆数($1/(A_e/A_0)$)とし、CUV では、定常状態における質量減少から見積もられる平均壊食率(Mean Depth Penetration : MDP rate）の逆数（$1/MDP_{rate}$）とした。なお、被覆処理を含む表面改質材の場合、表面硬さは基材硬さの影響を受ける。したがって、ここではピット形状から推測される局所衝撃力に相当する準静的押込み荷重で評価した硬さを用いた[2]。CUV と SHPB の結果は、硬さに対する壊食抵抗性に関して定性的には良く一致し、材料表面の硬さが上昇するに従い、壊食抵抗性が増す傾向を示す。硬さは、ある形状の圧子により静的に負荷したときに生じる変形量で荷重を除した値として定義されることから、材料の局所変形抵抗性を示す。したがって、ピット形成がマイクロジェットや衝撃波による局所衝撃負荷による損傷であるとすれば、壊食抵抗性が硬さとのある程度の相関を示すことは理解できる。しかしながら、連続的に衝撃負

荷が加わると、単に変形抵抗としての尺度でなく、局所疲労損傷あるいは破壊の観点からも評価することが必要である。例えば、CrN 被覆材の硬さは Hv（100gf）で 2000 程度（SUS316 アニール材で約 200）であるが、CUV による高サイクル負荷で容易に損傷を受けたことが報告されている[3]。

SHPB で 100 回までではあるが、損傷面積率の衝撃繰り返し回数と衝撃速度（衝撃圧力）依存性について調べた結果を Fig. 9.1.2-3 に示す。損傷面積率は、衝撃速度の増加により、その程度は増す傾向が認められる。1 回、10 回、100 回負荷後の比較的大きなピットについて、レーザー顕微鏡で撮影したマイクロ写真と深さ分布を Fig. 9.1.2-4 に示す。複数回の局所衝撃負荷の重畳効果により、あるいは過大な衝撃力の発生頻度が衝撃負荷回数の増加とともに増すため、ピット開口径及び深さは負荷回数と共に増加したと考えられる。このことからも、実機サイクル程度（約 10^8 回程度）の繰り返し局所衝撃負荷による損傷の程度に対する評価が、設計寿命を見積もるには重要となる。

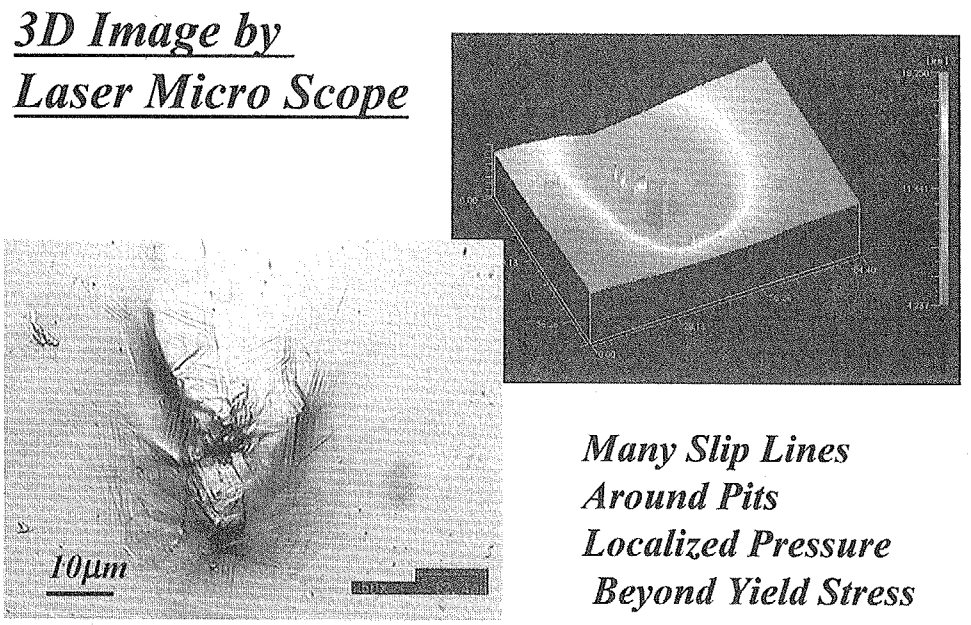


Fig. 9.1.2-1 Morphology and 3D image of pit taken by a laser microscope

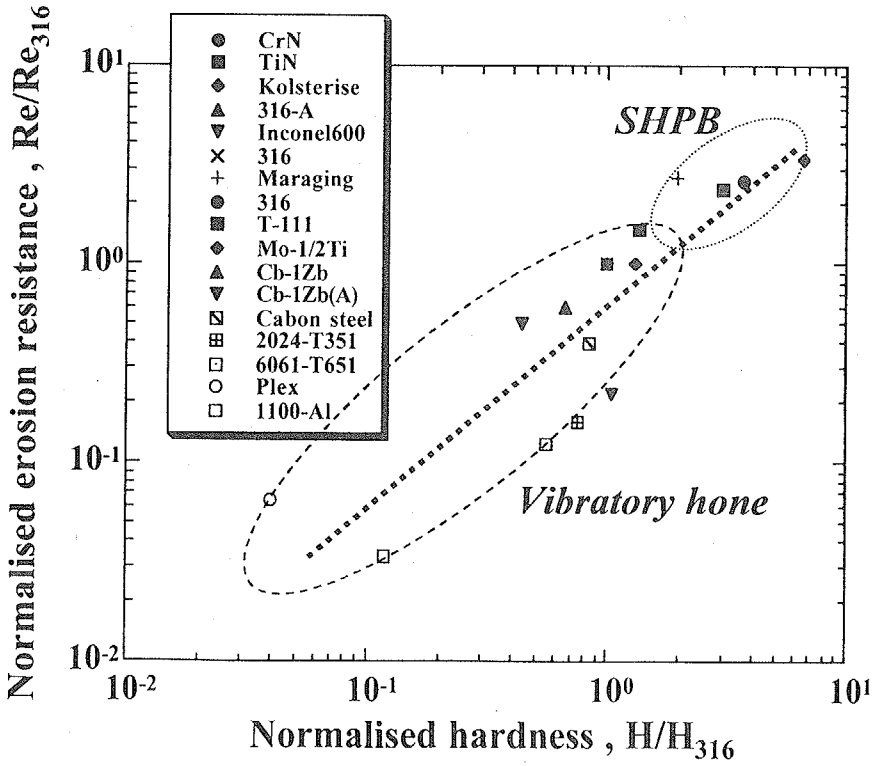


Fig. 9.1.2-2 Relationship between normalized hardness and erosion resistance

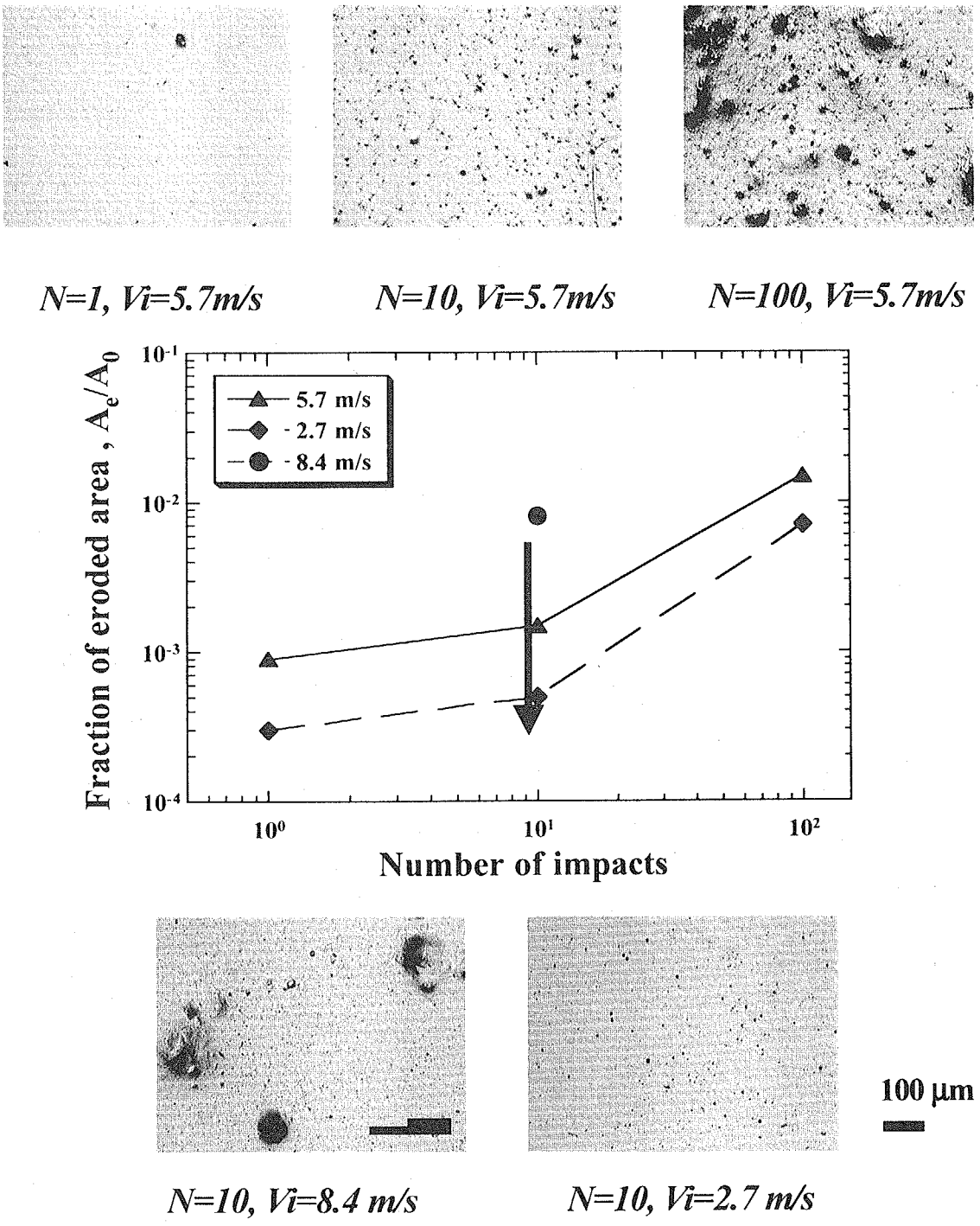


Fig. 9.1.2-3 Impact number and velocity dependency in 316SS

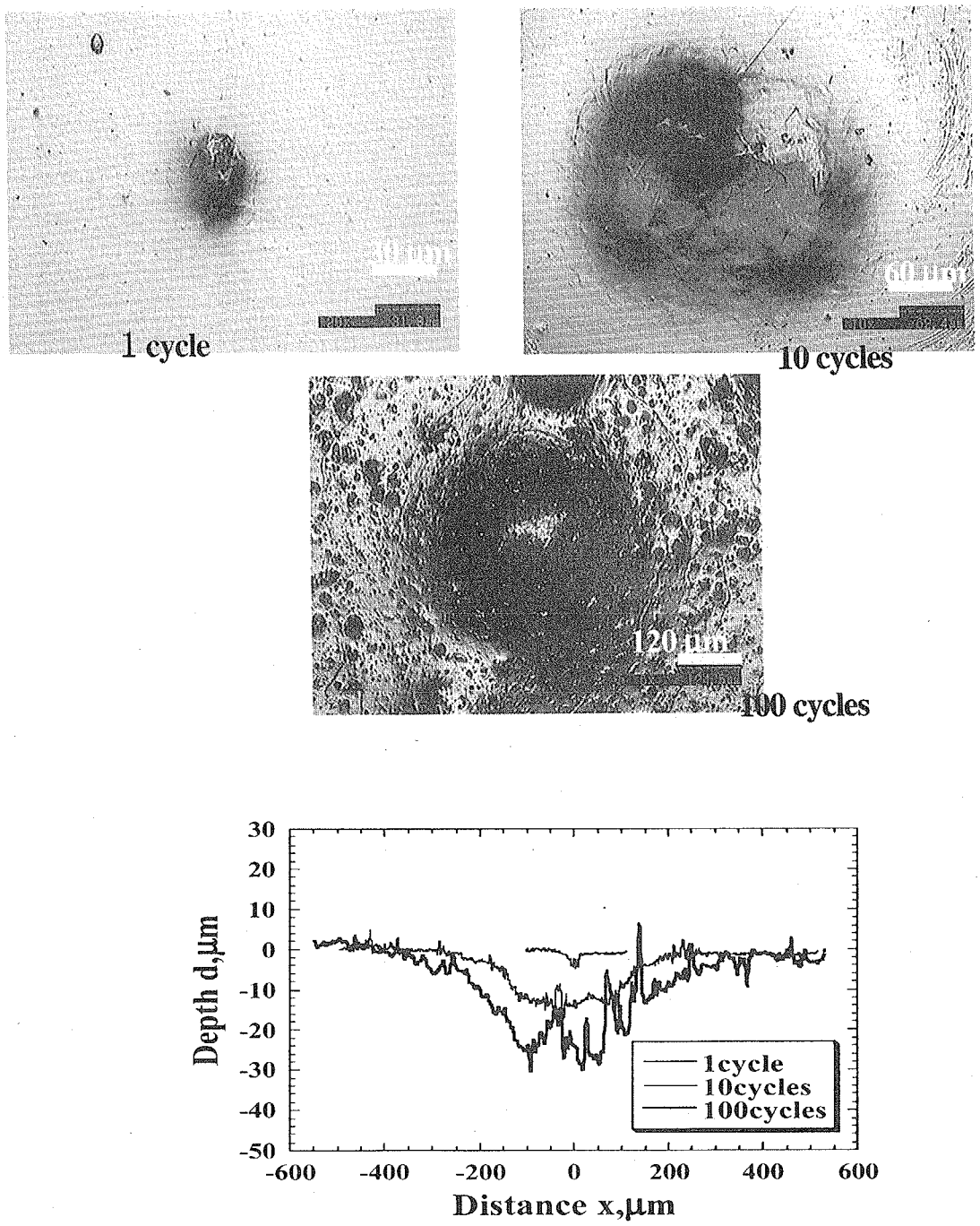


Fig. 9.1.2-4 Depth profiles and micrographs of typical individual isolate pits formed at 5.7 m/s in 316SS

(2) MIMTM

電磁力により繰り返し（20Hz）衝撃圧を固体デスク試験片を介して、水銀中に負荷させることで、液体水銀中に負圧を生じさせてキャビティーの発生を可能とした。水銀中の負圧の発生条件は、後述する On-beam 実験で生じたピットの Morphology が再現出来るように負荷速度、保持時間、振幅を調整した。Fig. 9.1.2-5 に再現したピットを On-beam 実験で得られたものと比較した。両者は類似の損傷形態を示す。この条件で、最大 10^7 回の衝撃圧を加え、負荷回数に対する損傷挙動をレーザー顕微鏡による 3D 観察結果から評価した。デスク試験片は、目標とする回数負荷後に評価領域をビニールテープでマスキングすることで、回数ごとの損傷挙動を一枚のデスク試験片より観測した（Fig. 9.1.2-6)。各負荷回数領域で観測した一連のピットのマイクロ写真を Fig. 9.1.2-7 に示す。これより、衝撃回数に対するピットの形成挙動は、以下のように 3 つの Phase に分類できることが分かった。すなわち、

Phase 1 （$N<10^4$ 回）：塑性変形により形成されたピットが、独立した状態で存在する。

Phase 2 （$10^5<N<10^6$ 回）：ピットが重畳、連結し、ピット間を伝播する亀裂が観測される。

Phase 3 （$10^6<N<10^7$ 回）：表面全体に均一にピット損傷が広がり、質量損傷が顕著になる。

さらに、従来の壊食評価法である質量変化の観点から議論するために、デスク試験片中央にボタン型（直径約 16mm）試験片を設置して、任意の衝撃回数に対する質量減少をマイクロ天秤にて計測した。SEM 写真観察結果と共に、質量減少の計測結果を Fig. 9.1.2-8 に示す。10^6 回負荷後に、著しい質量減少を伴ういわゆる定常期が出現し、それ以下では質量減少をほとんど示さない潜伏期が認められる。定常期では、SEM 観察によれば 10 ミクロン程度の空孔の存在が認められ、質量が欠落により減少したことが理解できる。

古典的音響振動法により評価された水銀に対する定常期の壊食挙動の結果[4,5,6]を、種々の材料に対して両対数グラフ上にプロットして Fig. 9.1.2-9 にまとめた。通常、横軸は試験時間で表示してあるが、ここでは負荷回数との対応を検討するために、20kHz で加振されたことを考慮して、20kHz x 時間（秒）=負荷回数として評価した。縦軸は、質量減少から評価された平均壊食深さ（MDE : Mean Depth of Erosion）である。さらに、10^8 回の MDE で規格化すると、Fig. 9.1.2-10 に示すように、ほぼ一つの直線、規格化統一線上にプロットできることを見出した。ここで、得た定常期の MDE を表す規格化統一線は、

$$\text{Log MDE}=A \text{ Log } N+B \qquad (9.1.2\text{-}1)$$

で与えられ、水銀の場合、A=1.27、B は材料、キャビテーション強度に支配され、潜伏期の長さを決定する定数となる。MIMTM で得た MDE の結果を Fig. 9.1.2-11 に示す。図中には、ORNL で実施された縦置き SHPB 実験の結果及び Kolsterise 表面処理材の結果も示す。さらに、WNR による On-beam 実験結果も併せて図示した。MIMTM の MDE 値は WNR の結果とほぼ同様な傾向を示しており、先に示したピット形態に関する良好な再現性からも、On-beam による損傷挙動を十分表しているといえる。ORNL 縦置き SHPB 実験結果についても、(1)式で表せることが分かるが、潜伏期が短く衝撃負荷回数に対する MDE 値を過大に評価する懸念がある。また、Kolsterise 表面処理材は、潜伏期を 316SS 材に比べて、少なくとも 1 桁延長

できることが確認できた。この結果は、後述する On-beam 実験において、Kolsterise 処理材に損傷の低減が認められたことと一致する。

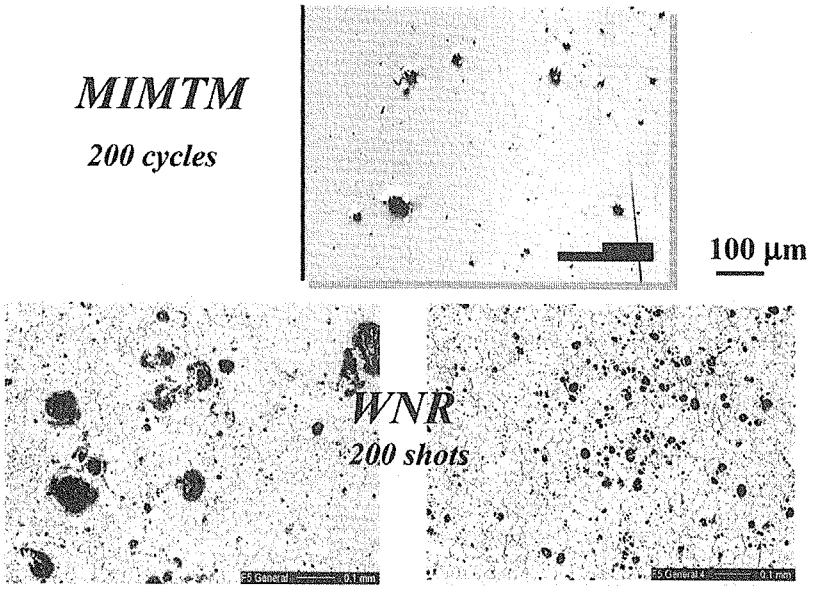


Fig. 9.1.2-5 Comparison of pit morphology between in MIMTM and in WNR.

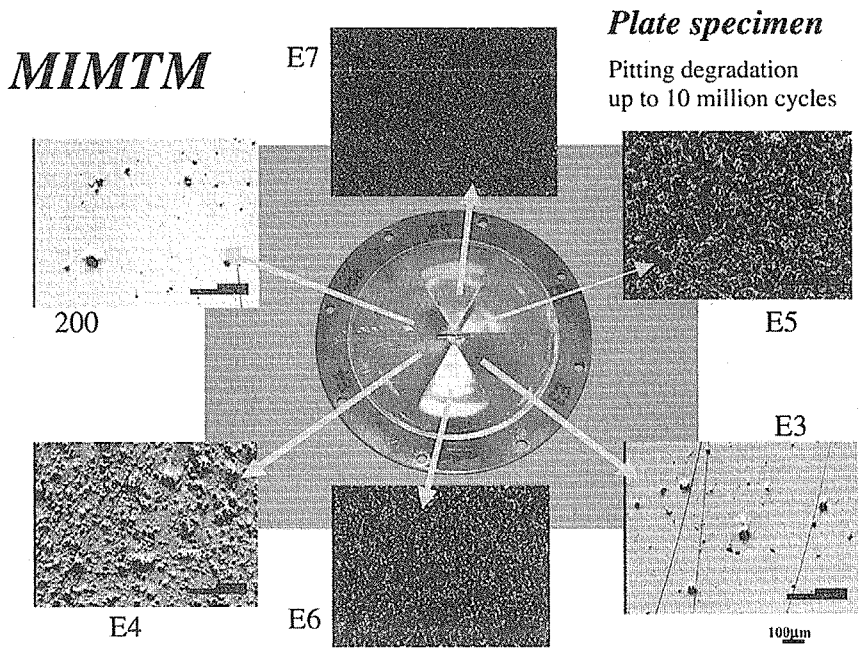


Fig. 9.1.2-6 Plate specimen divided into six regions subjected to each impact cycles

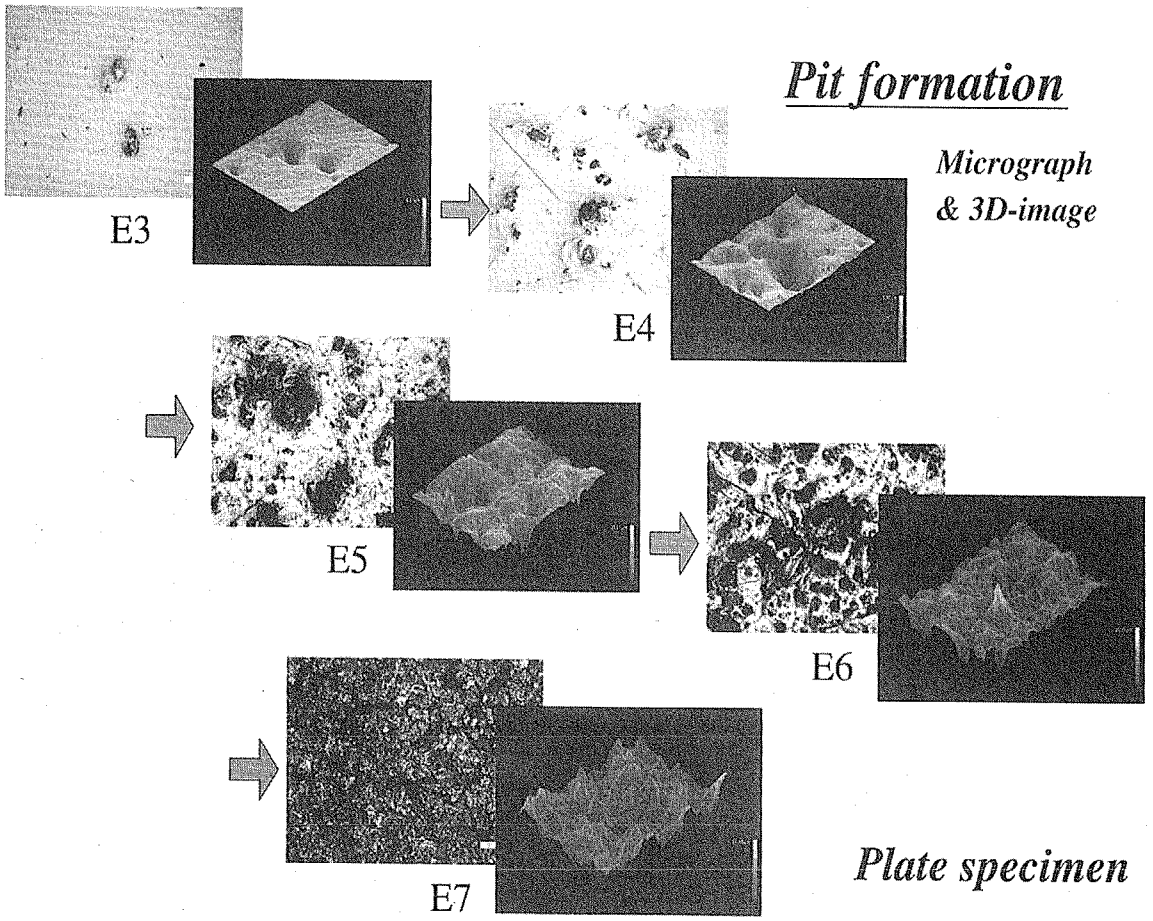


Fig. 9.1.2-7Micrograph and 3D images in each impact cycles. Pitting damage formation up to 10 million impact cycles.

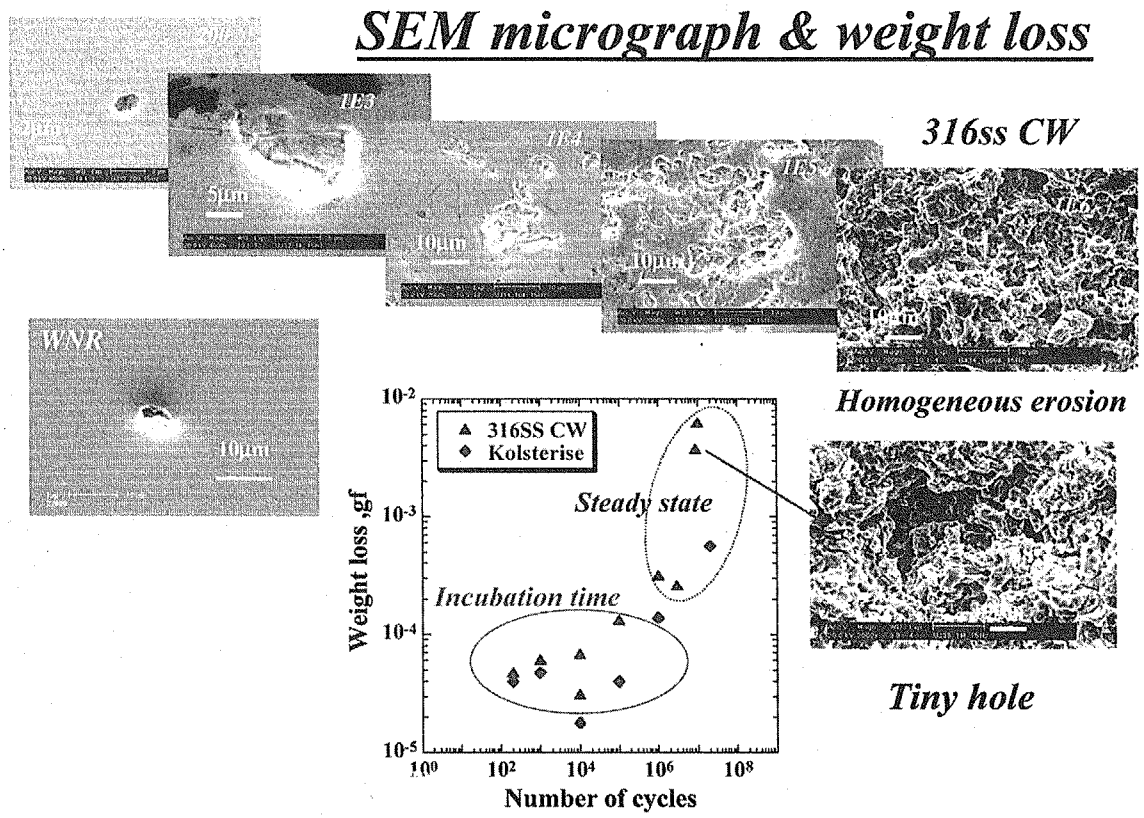


Fig. 9.1.2-8 Weight loss dependency on number of cycles

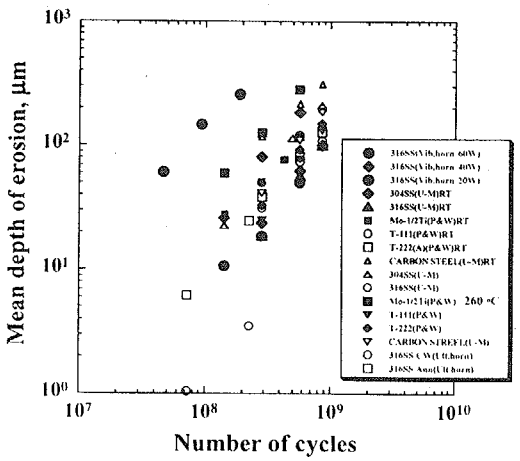


Fig. 9.1.2-9 MDE in mercury measured by a vibratory

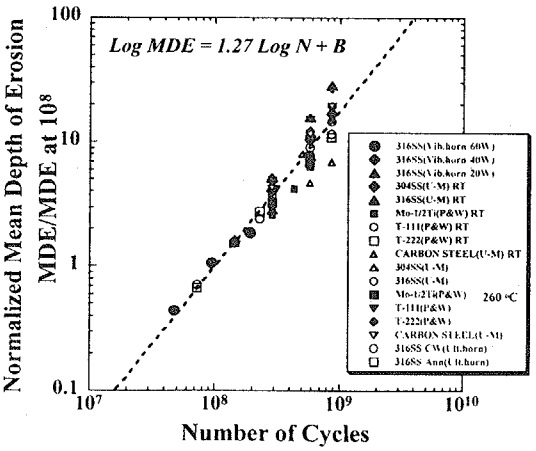


Fig. 9.1.2-10 Homologous MDE in mercury

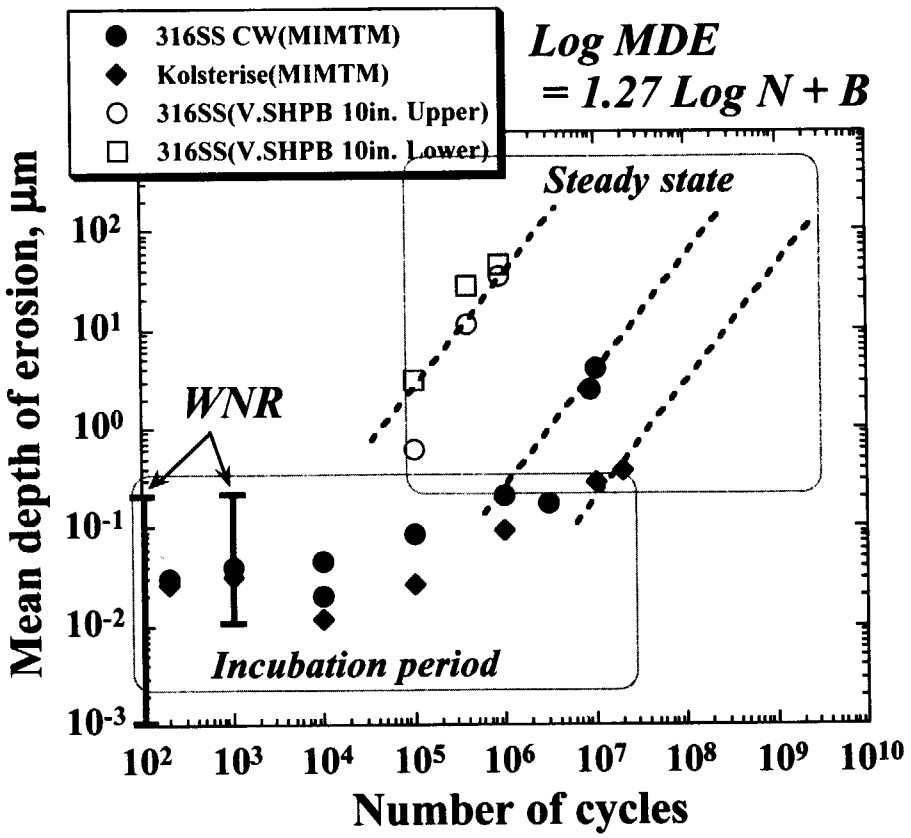


Fig. 9.1.2-11 MDEs obtained by MIMTM, V.SHPB and WNR

9．1．3 On-beam 実験

原研で実施した一連の SHBP 実験によるピット形成の報告[7]を受け、ターゲット構造体におけるピッティング損傷の重要性を認識した ORNL は、2001 年7月に LANCE/WNR による陽子パルス入射ピッティング損傷に関する実験を実施した。水銀を封入した円筒型ターゲット容器に 800MeV 陽子を 3MW-SNS 実機相当のビーム強度で 200 パルス負荷した（Table 9.1.3-1 参照)。その結果、ほとんどのケースでピットの形成を確認した。しかしながら、浸炭硬化処理（Kolsterising、Hv≅1000（316ss の場合、Hv≅200））を施した場合に、損傷が低減することを確認した。これは、SHPB による一連の実験結果と一致する。さらに、ピッティング損傷のターゲット容器形状依存性を評価するために、2001 年 12 月に矩形断面容器、二重壁構造などの実機構造の基本要素形状を含んだ試験体で実施した。前回同様、最大パルス数は 200 回である。損傷形態について SEM 観察など精力的に行われ、円筒型ターゲット容器で観測された比較的大きなピット群は矩形ターゲット容器では消滅したことから、圧力波のフォーカッシング効果による形状依存性を確認した。唯一、ここでも Kolsterise 処理した試験体は、ピッティング損傷が著しく減少した。しかしながら、実機寿命を評価するには、あまりにも入射パルス数が少なく、10^8 回オーダーのパルス負荷後の損傷形態を外挿できるデータではない。そこで、パルス数及びパルス強度依存性、さらにバブル注入による損傷低減効果等を評価するため、最大 1000 回パルス入射実験を 2002 年6月に実施した。主な試験項目及び結果を以下に列記する。

- ビーム出力依存性

  2.5MW、1.2MW、0.4MW と変化させ、損傷範囲、程度が一桁以上減少することを確認した。

- バブル/ガス注入効果

  窓に沿って導入されたバブル・ガス・レイヤーによる損傷面積の低減効果を確認したが、水銀中バブル注入法については十分理解できる程度の結果を得られなかった。

- 形状効果

  二重壁構造体をモデル化したターゲットでは、壁間に水銀を挿入した場合ほぼ全面に損傷を確認したが、水の場合では、水との接面では損傷が観察されなかった。また、反射圧力波の散逸効果を狙って、ビーム下流側に水銀自由界面を設けた L 型ターゲットにおける損傷低減は、観測されなかった。

- 材料依存性

  一般に、水の場合に壊食低減効果を有する Nitronic60 材では、SUS316 材より損傷の程度は悪化した。
  これまでの結果では、Kolsterise 処理材が最も良い特性を示した。これに加えて、電解研磨し適度な表面粗さを有した試験片は、比較的良好な耐侵食性を示した。

Table 9.1.3-1 WNR Beam Parameters for Cavitation Damage Tests

	WNR	SNS@2MW	J-PARC
Proton energy, GeV	0.8	1	3
Energy deposited in mercury target, kJ	2.2	20	40
Maximum energy deposition density, MJ/m3	19	13	27
Z-distance at max energy density, mm	10	10	20

９．１．４　今後の計画

原研で実施した水銀ターゲットを念頭とした圧力波入射実験により、最初にピッティング損傷を観測して以来、９．１．２で述べた高サイクル圧力波入射を可能とした MIMTM による Off-line 実験、及び９．１．３で述べた WNR による実際の陽子線入射 On-beam 実験で観測・検討されてきたピッティング損傷が、高出力核破砕中性子源水銀ターゲットの開発において重要課題であることは周知となった。ここでは、Ｎ－ＴＡＣにおける国際アドバイザリー委員会から出された主なコメント及び提案を反映して立案した、R&D 計画について述べる。

国際アドバイザリー委員会で出された主なコメントを以下に示す。

・Off-line 実験と実機条件との相関について検討すること。
・ 平均壊食深さに加え、直接ターゲット構造体の健全性に係わると考えられる亀裂を含む、実壊食プロファイルの観点から壊食挙動を検討すること。
・表面改質効果及び表面改質部の照射効果について検討すること。
・熱応力や水銀圧力がピッティング損傷に与える影響について検討すること。
・水銀流れがピッティング損傷に与える影響について検討すること。

このようなコメント及びこれまでに観測された実験事実を考慮し、次のようなＲ＆Ｄ項目を立案した。

・ピッティング損傷後残強度評価
・水銀圧力による損傷の影響
・静的応力負荷による損傷の影響
・表面改質処理による損傷低減効果
・表面処理層への照射の影響
・キャビテーション強度の計測確証実験

以下に、各項目の内容について具体的に述べる。

・ピッティング損傷後残強度評価

平均壊食深さによる評価と構造強度の相関について、ピッティング損傷を受けた後の残強度を評価することは、実質的なターゲット構造の設計強度評価及び寿命評価上極めて重要である。特に寿命評価には、水銀環境を考慮したピッティング損傷を受けた後の疲労強度を知る必要がある。すでに、ORNL では、水銀環境の疲労強度への影響について、316LN 材に対して引張単軸疲労強度試験データを取得している[8]。ここでは、一般的な疲労強度特性に加え、さらに重要と考えられる結論として、1)高応力負荷低サイクル疲労強度には、水銀環境依存性が顕著となり、大気中に比べて低下する。特に、0.1Hz の低周波数条件で水銀の影響が明瞭となる（Fig. 9.1.4-1）、2) ピッティング損傷抑制効果が認められる加工硬化処理は、疲労強度を改善する、などが示された。また、MIMTM による SUS316 材のピッティング損傷挙動評価実験から得た、試験片断面のマイクロ写真を Fig. 9.1.4-2 に、また、この断面写真を基に実測したピット深さと、質量減少から評価した MDE との相関を Fig. 9.1.4-3 に示す。MDE は 10^6 回以降急激な増加が認められるが、実測値は 10^6 回迄は徐々に増加するが、それ以降ではほぼ一定値（約 20mm）に漸近する傾向がある。また、10^6、10^7 回の断面写真では、ピット底に亀裂の存在が認められた。このような表面性状は疲労強度に影響すると考えられるから、ピッティング損傷を受けた後の疲労強度評価試験を、水銀環境も考慮して実

施する。

・水銀圧力による損傷の影響

実機ターゲットでは、５気圧程度の静圧が水銀に負荷される予定である。これ迄のピッティング損傷試験は、大気圧下で実施している。Fig. 9.1.4-4 に Hammitt らが、水環境で実施した古典的音響振動試験結果を示す[9]。静圧力を１気圧から４気圧に変えた場合、SAE660 銅合金の累積重量減少は、圧力上昇と共に増加した。静圧の上昇と共に、キャビティーの発生が抑制されることも期待できるが、キャビティー崩壊時の局所衝撃力は増大するため、損傷が拡大したと考えられる。水銀の場合でも、同様に損傷の静圧依存性が考えられるため、MIMTM の水銀チャンバーに最大５気圧負荷した状態で、ピッティング損傷試験を実施し、静圧の影響について評価する。

・表面改質効果及び改質部への照射効果

一連の Off-line 及び On-beam 実験を通して、Kolaterise 浸炭表面硬化処理のピッティング損傷低減効果を確認したが、照射による残留圧縮応力緩和、炭素析出などによる硬さの低下が懸念される。また、類似の表面硬化処理として窒化硬化処理、及び複合化表面処理技術として各種コーチング処理材を、MIMTM により評価する。Fig. 9.1.4-5 には現在検討中の各種処理材のビッカース硬度を示す。表面処理層の照射特性については、TIARA によるトリプルイオンビーム照射により、基礎データの構築を行う。また、すでに ORNL と協力して、一部 HFIR による照射実験の準備も開始した。

・キャビテーション強度の計測確証実験

On-beam と Off-line 実験との相関を明確にするために、損傷の定量評価に加え、キャビテーション強度すなわち局所衝撃力を双方で評価する必要がある。Fig. 9.1.4-6 には、MIMTM で試験片に損傷を確認した条件（60G）及び確認できなかった条件（30G）で、レーザードップラー振動速度計により試験片底部で測定した音響振動を示す。損傷を確認した条件で測定した信号には、キャビティー崩壊に伴う局所衝撃により発生したと考えられる、高調波信号が重畳されている。また、祖山らは、水流ポンプのケーシングで AE センサーにより計測した音響振動の高周波成分の振幅（キャビテーション強度）と侵食速度に良い相関が有ることを見出している（Fig. 9.1.4-7）。このように、局所衝撃から誘発される信号に着目すれば、損傷率予測の可能性を示唆しており、レーザードップラー技術は遠隔・非接触で計測可能であることから、実機における侵食挙動のモニタリング技術あるいは異常診断技術としての応用が期待できる。

また、On-beam と Off-line 実験結果の相関は、多角的にデータを構築することが重要である。即ち、On-beam 実験では、放射化により残留水銀の完全除去などが困難であるため、質量減少に関する正確な計測は不可能である。従って、損傷形態から設計寿命に反映できる精度良い、あるいは意義のあるデータを導出することが必要である。Fig. 9.1.4-8 に示すように、潜伏期における面積損傷率は、衝撃負荷の大きさ（キャビテーション強度と等価）及び材料の表面特性により変化し、ほぼ損傷率が１になると質量減少が顕著となる定常期に移行する。従って、潜伏期の長さは面積損傷率より評価でき、定常期の損傷程度は規格化統一線図より予測できる。各材料に対して、潜伏期における面積損傷率の増加挙動とキャビテーション強度に着目したデータを構築することが重要である。実機においてもキャビテーション強度が評価できれば、Off-Line 実験で構築されるデータベースに基づいた損傷評価が可能となろう。

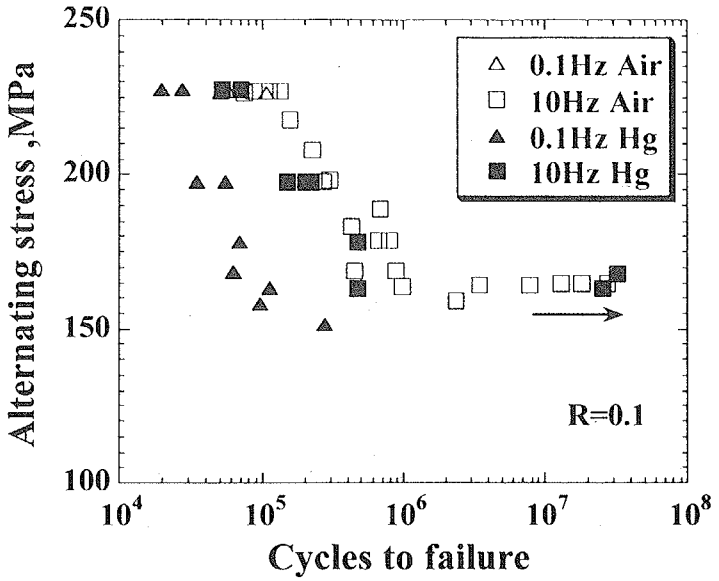


Fig. 9.1.4-1 Cyclic fatigues in mercury

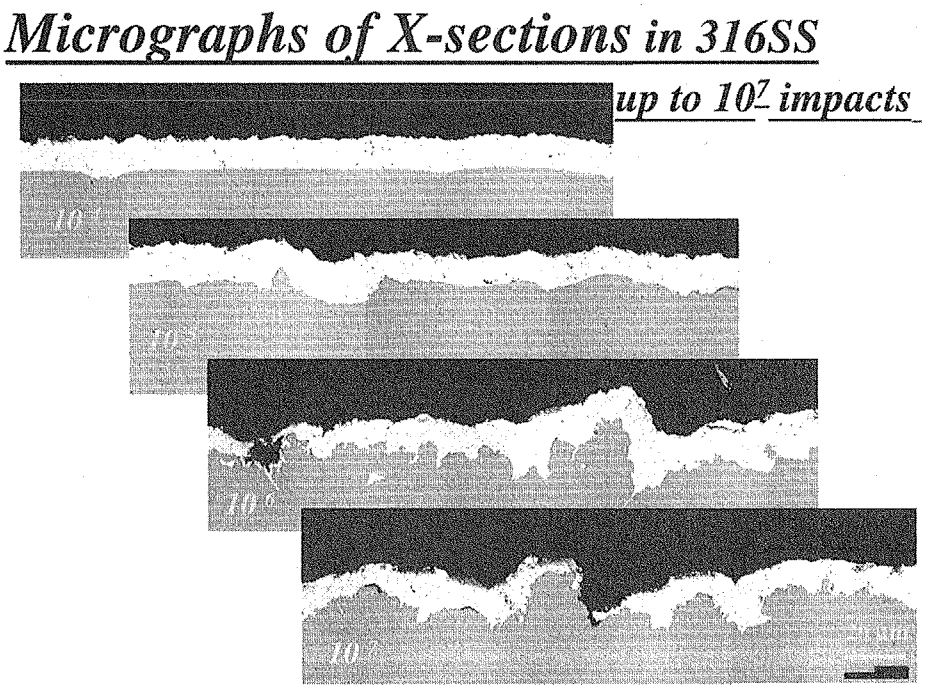


Fig. 9.1.4-2 Cross sections of pitting damaged surfaces

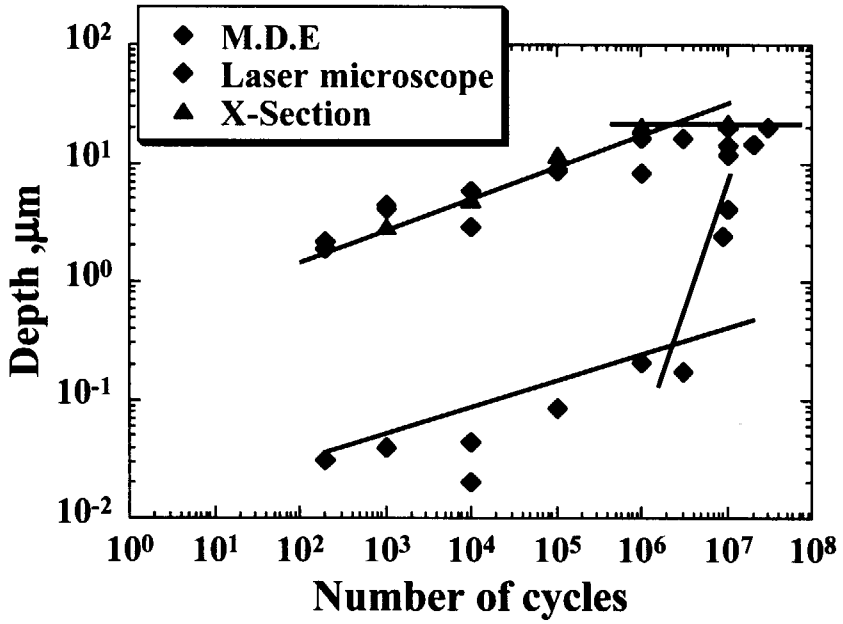


Fig. 9.1.4-3 Relationship between MDE and depth evaluated by laser microscope and cross sections

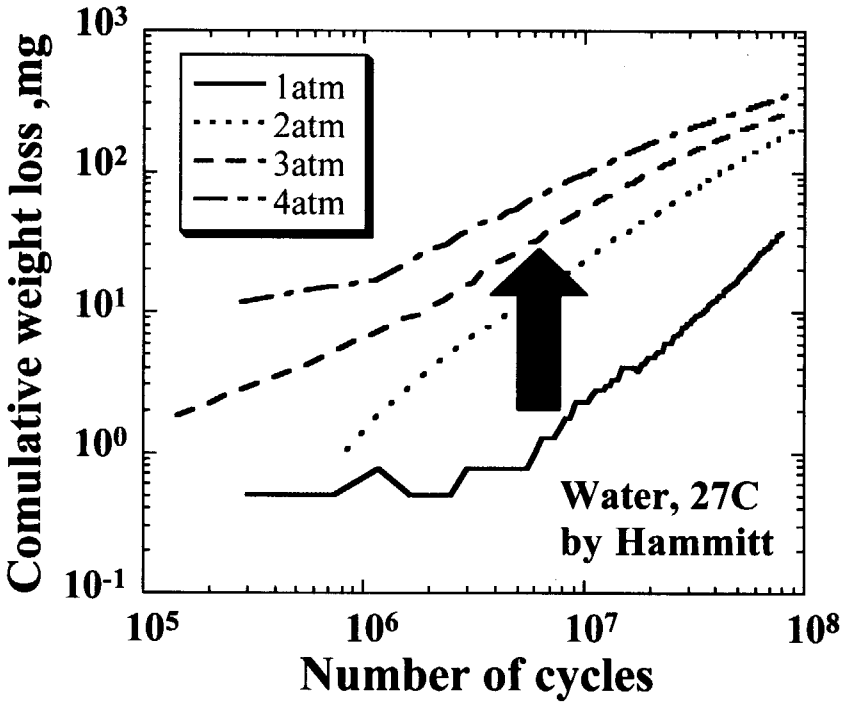


Fig. 9.1.4-4 Weight loss dependency on static pressure in vibratory erosion tests.

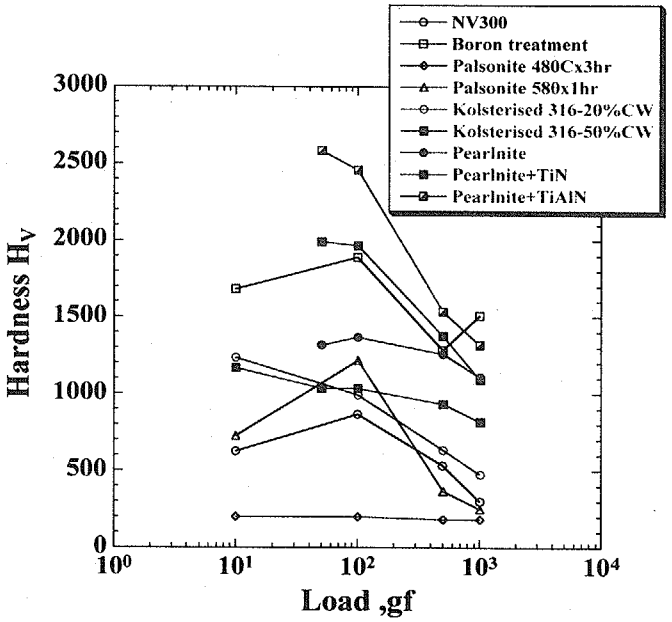
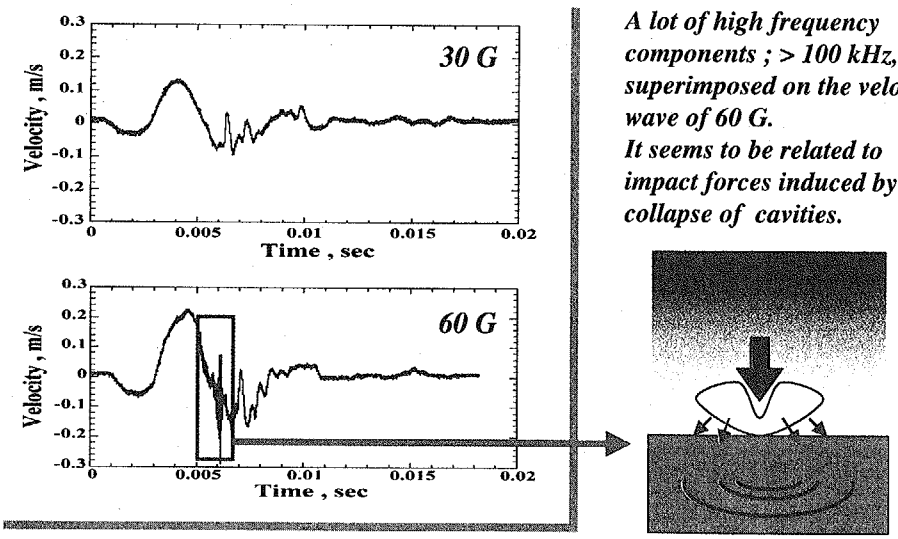


Fig. 9.1.4-5 Hardness of various surface treated 316ss specimens

Cavitation intensity monitoring



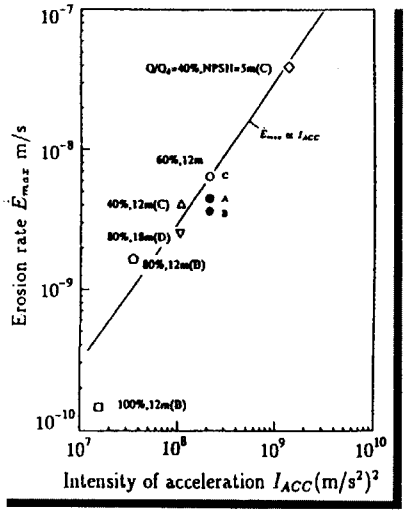
A lot of high frequency components ; > 100 kHz, are superimposed on the velocity wave of 60 G.
It seems to be related to impact forces induced by a collapse of cavities.

Experimental results on dynamic response are useful to develop analytical model to simulate dynamic response of the mercury target.

Fig. 9.1.4-6 Acoustic vibrational signals measured by a laser Doppler technique.

Have to know the relationship between the beam power , cavitation intensity and pitting damages

Acc. measured at casing of pump



Proton injection

⇓

Cavitation intensity

⇓

Degradation due to pitting

⇓

Estimation of pitting rate

- **Cavitation intensity**
- **Resistance of materials**
- **Threshold level of materials**

Monitoring of damage depth

Fig. 9.1.4-7 Relationship between erosion rate and cavitation intensity (intensity of acceleration)

Fraction of eroded area & MDE

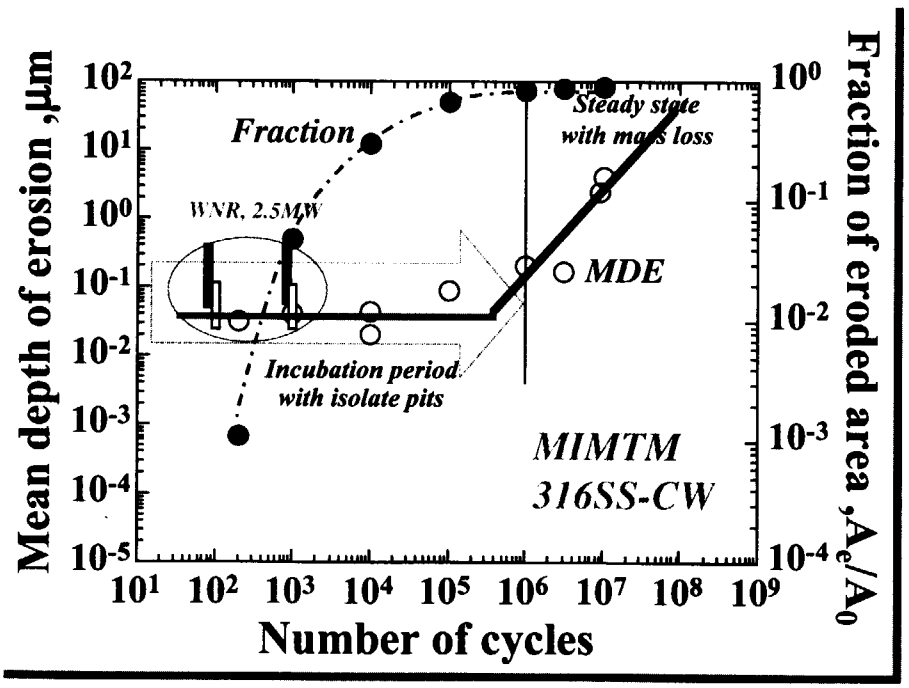


Fig. 9.1.4-8 Relationship between MDE and fraction of eroded area

Power dependency

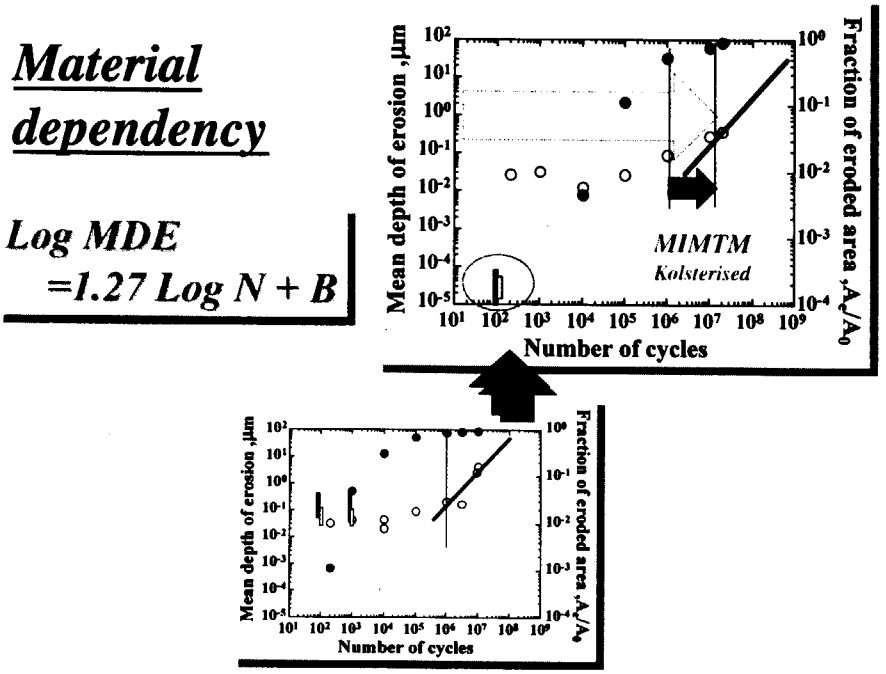


Fig. 9.1.4-9 Relationship between MDE and fraction of eroded area

Material dependency

９．１．５　まとめ

高出力核破砕中性子源水銀ターゲットを実現させるためには、ピッティング損傷の解決が重要課題であることは今や世界的に周知となった。その端緒となった SHPB 及び高サイクル衝撃負荷 MIMTM による Off-line 実験及び WNR による On-beam 実験の概要を述べ、それらの実験結果及び解析的検討から、今後必要とされる R&D の内容について述べた。Table 9.1.5-1 に各項目とスケジュールについて、協力機関と共に示す。解析的検討の取り組みについては、今回十分触れていないが、質の良い、多角的な実験データの構築と解析的考察は、両輪のごとく実施されなければならない。例えば、ターゲット容器/水銀の相互干渉効果を含む非線形動的挙動解析、あるいは面積損傷率の増加挙動と局所衝撃力強さ/分布に関する解析的考察を開始している。

参考文献

[1] Bell T. and Li C. X. (2002), Low temperature nitriding and carburizing, Advanced materials & processing, June, 49-51

[2] 二川、粉川、他、液/固体界面の衝撃壊食に及ぼす表面硬化の影響、衝撃シンポジウム、2002.

[3] Pawel S., Manneschmidt E. (2002), Preliminary evaluation of cavitation resistance of type 316LN stainless steel in mercury using a vibratory horn, Int. Workshop, Spal. Mats. Tech.-5, Charleston, South Carolina, USA.

[4] M.D. Kass, J.H. Whealton, N.E. Clapp Jr., J.R. DiStefano, J.H. DeVan, J.R. Haines, M.A. Akerman and T.A. Gabriel, Nonlinear cavitation erosion of stainless steel in mercury versus applied power, Tribology Letters 5 (1998) 231-234.

[5] Young, S.G. and Johnston, J.R. ,Accelerated cavitation damage of steels and superalloys in sodium and mercury, ASTM STP 408 186-212 (1967)

[6] Garcia R., Hammitt F.G., Nystron, R.E.(1967), Correlation of cavitation damage with other material and fluid properties, ASTM STP 408, Am. Soc. Testing Mats., pp239-283.

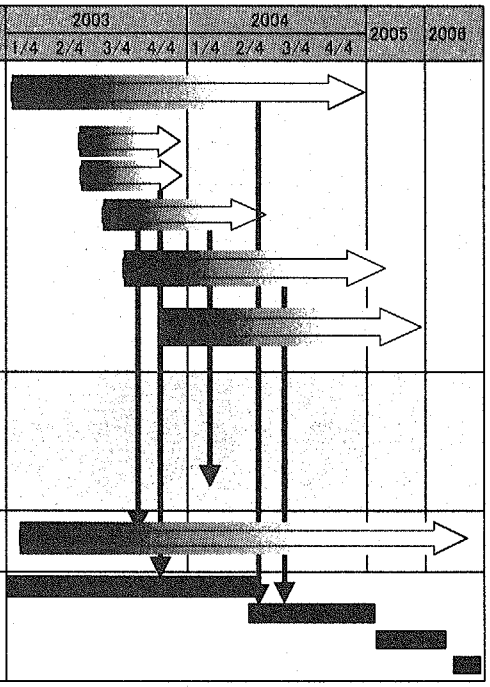
[7] M. Futakawa, et al, Measurement of dynamic response of liquid metal subjected to uniaxial strain wave, J. Phys. IV France 10 (2000).pp Pr9-237-242.

[8] J.P. Strizak, et al., The effect of mercury on fatigue behavior of 316 LN stainless steel, Jour. Nucl. Mat. 296 (2001) pp.225-230.

[9] Hammitt, et al , Effects of pressure and temperature variation in vibratory cavitation damage test, Jour. Mech. Eng. Sci. Vol12, No6 1970. 432-439.

Table 9.1.5-1 R&D items and schedule

	Items	Apparatus	Collabo.
Off-line test	Data up to 2E8	MIMTM	Private co.
	Hardening & Coating		SNS,ESS
	Pressurised Hg	MIMTM	
	Stressed specimens	MIMTM	
	Monitering system	MIMTM	Tohoku Univ.
	Fatigue (Hg,Pitting)	New Machine	
		MIMTM	
	Flowing Hg effect	Hg-LOOP	ESS
	Mitigation system		
On beam test	Data up to E5		SNS,ESS
	Mitigation		ESS,SNS
	Hardening & Coatings		SNS,ESS
	Monitering system		
Simulation	Dynamic response		Tokyo Univ.
	Cavitation intensity		
Hg-Target	Design		
	Trial fabrication		
	Fabrication		
	Installation		



９．２　水銀流動試験

９．２．１　水銀流動基礎実験装置の概要

大強度陽子加速器計画(J-PARC, Japan Proton Accelerator Research Complex)において建設する物質･生命科学実験施設は、中性子散乱実験施設とミュオン実験施設で構成される。1MW の陽子ビームを受けて中性子を発生するターゲット材として、高密度の熱除去及び構造強度の観点から液体金属である水銀を採用することとしている。水銀ターゲットを開発する上で水銀の流動特性の把握及び水銀流動システム機器の開発は極めて重要となる。しかし、現在ある水銀の熱流動特性のデータは非常に乏しく、また、水銀流動試験を行うための施設も充実していない。そこで、水銀における圧力損失特性、熱伝達特性等の流動特性と配管エロージョン、水銀ポンプ特性等の機械的特性を実験により測定して、実機設計を円滑に行い、かつ、合理的なシステム開発を行うため、水銀流動基礎実験装置を原研･東海研究所に製作した。水銀流動試験装置により、圧力損失試験、熱伝達試験を行い、水銀に対する熱流動解析の妥当性を検証するとともに、ポンプ、流量計等の機器の開発に必要なデータの取得を行った。

Fig.9.2.1-1 及び -2 に水銀流動基礎実験装置の外観図及び系統図をそれぞれ示す。水銀流動基礎実験装置は主に試験用流路、膨張ポット、ギアポンプ、電磁ポンプ、流量計及び熱交換器で構成される。主配管は 25A-Sch80 (内径 25mm, 肉厚 4.5mm)である. 膨張ポットはアルゴンガスで加圧され定圧を保つ。２種類のポンプが設置してあり、独立に使用できるよう並列に配置している。最大高低差は約 1.5m で全長は約 11m である。水銀容量は最大約 30 リットルである。全ての機器は SUS316 製である。

水銀及び水銀蒸気の漏洩を防ぐためにアクリルプレートと鉄製のトレイで覆われている。内部は連続的にチャコールフィルターを通して排気している。

基本性能は以下の通りである。

流量　：15 little/min (2.5×10^{-4} m^3/s) by Electro-Magnetic Pump
　　20 little/min (3.3×10^{-4} m^3/s) by Gear Pump

容量　：最大　30 little
　　試験時　20 little

材質　：SUS316

圧力　：最高　0.5MPa
　　試験時　0.4MPa

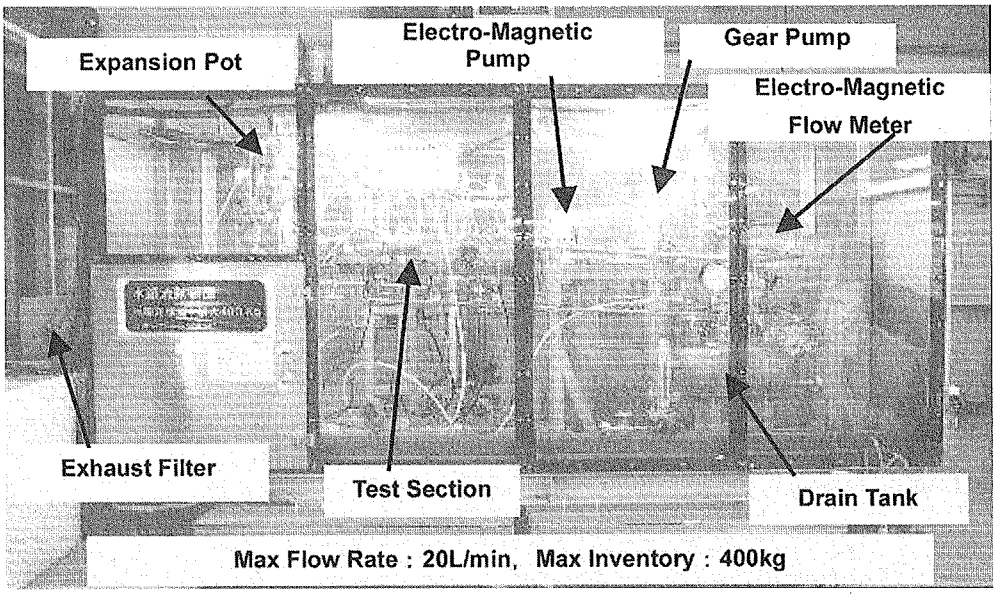


Fig.9.2.1-1 Outer view of the mercury experimental loop.

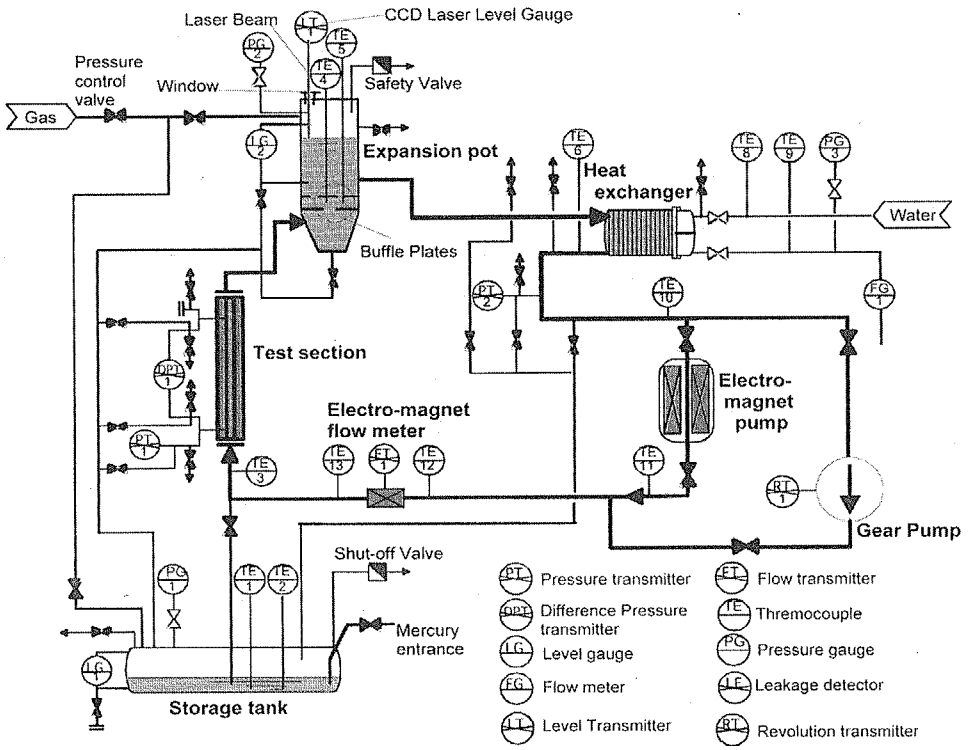


Fig.9.2.1-2 Schematic diagram of the mercury experimental loop

９．２．２　管摩擦係数測定試験

壁面摩擦係数は、ギアポンプ試験時のテストセクション部の圧力損失測定結果から求めた。壁面摩擦係数測定に用いたテストセクションは、機械加工を施した２重円管流路で外管内径25mm、内管外径20mm、及び内径14.3mmの引き抜き管円管流路である。テストセクションの全長は1,000 mmで、圧力損失（差圧）の測定はテストセクション出入口から180 mmの位置に設置した圧力導管に隔膜式差圧計を取り付け、640 mmの区間で測定した。試験中の水銀温度は25℃～30℃に保った。

Fig.9.2.2-1に測定したテストセクション圧力損失測定結果から求めた壁面摩擦係数を示す。

壁面摩擦係数λは、次式により求めた。

$$\lambda = \Delta P \cdot \frac{De}{L} \cdot \frac{2g}{v^2} \qquad (9.2.2\text{-}1)$$

ここで、λ　：壁面摩擦係数　(-)

ΔP　：圧力損失ヘッド　(m)

g　：重力加速度　(m/s^2)

De　：等価水力直径 = 0.005 m　(m)

L　：圧力損失計測区間距離 =0.64 m　(m)

v　：水銀流速　(m/s)

また、圧力損失ヘッド、レイノルズ数の計算に用いた水銀の密度及び動粘性係数は、水銀の温度の関数として以下の式によりそれぞれ求めた[1]。

$$\rho = -5.3021718\times10^{-7}\cdot T^3 + 8.01360966\times10^{-4}\cdot T^2 - 2.78664121\cdot T + 1.43072131\times10^{4} \qquad (9.2.2\text{-}2)$$

ここで、ρ　：密度　(kg/m^3)

T　：温度　(K)

$$v = -2.74932750\times10^{-20}\cdot T^5 + 6.49494552\times10^{-17}\cdot T^4 - 6.19458591\times10^{-14}\cdot T^3 + 3.01343929\times10^{-11}\cdot T^2 - 7.6356912\times10^{-9}\cdot T + 9.04285985\times10^{-7} \qquad (9.2.2\text{-}3)$$

ここで、v　：動粘性係数　(m^2/s)

T　：温度　(K)

環状流路における壁面摩擦係数測定結果は、水銀ループの運転時間をパラメータとして示した。壁面摩擦係数は、水銀を充填した直後でブラジウスの式に対し約-25%で、運転時間の増加とともに増加し、運転時間が11時間を越えると摩擦係数に大きな変化は見られず-10%の範囲に収まっている。本試験における測定データはブラジウスの式に対して+8%から-10%の範囲に入っている。

環状流路を用いた試験では、流路断面積が本試験で用いた円管流路とほぼ等しいが、等価水力直径が5.0mmと円管流路の14.3mmに比べ約1/3であること、また、電磁ポンプのみを用いてい

ることにより流量の上限が 14L/min であることからレイノルズ数の上限が約 5.7×10^4 であった。円管での試験では、テストセクションの変更により等価水力直径が増加したこと、また、ギアポンプにより流量範囲が拡大したことから、より高いレイノルズ数の範囲までデータの取得が可能になり、レイノルズ数 3.2×10^5 までのデータを取得することができた。

参考文献

[1] 日野竜太郎、羽賀勝洋、会田秀樹、関田健司、小磯浩司、神永雅紀、数土幸夫、高橋浩道、"大強度陽子加速器ターゲット試験用大型水銀ループの検討", JAERI-Tech 97-009, 1997.

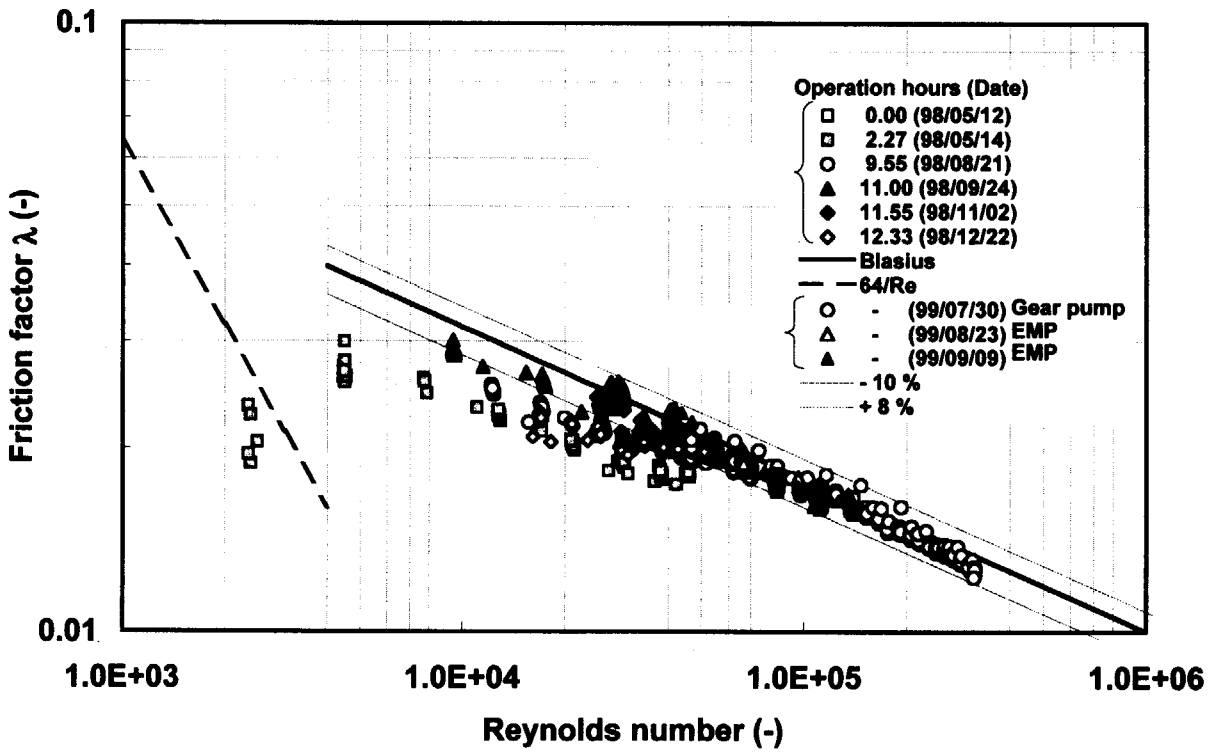


Fig.9.2.2-1 Comparison of wall friction factor measurement results with previous experimental results using annular test section

９．２．３　熱伝達試験

９．２．３．１　加熱用試験体の概要

Fig.9.2.3-1 及び-2 は加熱試験流路の模式図及び外観を示す。加熱試験部は 15A-Sch80 (内径 14.3mm, 肉厚 3.7mm) の円管で SUS316 製、長さは 1000 mm (有効加熱長さ 600mm)である。試験部 4.5 kW のヒーターブロックで覆われている。 銅ブロックには螺旋状に溝が加工してあり、３本のヒーターが並行に全長にわたって巻かれている。32 本の熱電対が SUS 管の表面に設置してあり、2 本の熱電対が水銀の入口及び出口温度を測定するために設置してある。 入口及び出口の直線部は 150mm あり、管内径の 10 倍以上となっている。圧力損失 640mm の距離について測定する。

機器のもつ測定精度については以下のようである。

(精度は測定値に対する誤差で表す。)

圧力計	:	0.2%	
電磁流量計	:	0.2%	
熱電対	:	SUS 管表面温度	; 0.1%
		ヒーター温度	; 0.1%
		水銀温度	; 0.7%

９．２．３．２　実験条件

実験条件を以下に示す。

最大流量： $0.6m^3/hr$ (電磁ポンプ)
$1.2m^3/hr$ (ギアポンプ)

最大流速： 2 m/s

圧力 : 0.4MPa

入口温度： ～40℃ (313K)

SUS 管内表面温度は 1 次元定常熱伝導方程式により計算した。

熱伝達試験前に水銀は全て入れ替えており、熱伝達実験は管内表面の濡れ性を確保するため、新規に水銀を導入してより 12 時間以上の運転後から開始した。8 時間程度の運転により圧力損失特性は上昇し一定値を示すようになる。

９．２．３．３　実験結果

Fig.9.2.3-3 に試験部 0.64m 間の圧力損失と水銀流速の関係について示す。約 1.0m/s の水銀流速で圧力損失は約 9 kPa であり、ブラジウスの式に対して約 80% 高い値となっている。測定した圧力損失値はブラジウスの式より高い傾向を示している。入口助走区間としては約 120 mm (約 10 ×Di)であるが、 境界層の助走区間は管内径に対して約 20 ～ 30 倍である。このことから、実験結果には助走区間の影響が含まれていると考えられる。また、図内に助走区間の影響についての相関式も破線で示したが、 実験値はこの相関式に対しても高い値となっている。したがって、実験値は管壁粗さ(k)の影響を受けていると考えられる。さらに、管壁粗さの影響を含む Colebrook の式の $k/D = 6.0\times10^{-3}$ (k=85μm)と 3.0×10^{-3} (k=35μm)の場合について図内に示してあるが実験値

は2本の線の間にほぼ分布していることがわかる。よって、 管壁粗さは 3.0×10^{-3} (k=35μm)～6.0×10^{-3} (k=85μm)の間にあると推測できる。

Fig.9.2.3-4 に管摩擦係数とレイノルズ数(Re)の管径について示す。Blasius の式と Colebrook の式もあわせて示してある。さらに、入口助走区間の影響についても示す。乱流領域において、実験値は 50～80 % Blasius 式よりも高い値を示している。また、wall roughness region の境界も図内に示してある。実験値は管壁粗さの過渡領域にあることがわかる。しかし、Re>200,000 の領域でほぼ一定値を示すようになっている。この傾向は管壁粗さの影響を表す特徴である。一定となる領域の値は2本の Colebrook の式の間である。したがって、実験値は比較的大きな管壁粗さの影響を受けていると考えられる。しかしながら、９．２．２項での水銀流動基礎実験装置の初期テストにおける摩擦係数は、機械加工をした管の場合に Blasius の式とよく一致していた。

Fig.9.2.3-5 に水銀の粗さ Reynolds 数を示す。 粗さ Reynolds 数は以下の式のより計算する。

$$\mathrm{Re}_{rough}=\frac{k\cdot u^*}{\nu} \qquad (9.2.3\text{-}1)$$

ここで u* は摩擦速度で以下の式で計算する。

$$u^*=u\sqrt{\frac{f}{8}} \qquad (9.2.3\text{-}2)$$

この場合 f は Blasius の式で計算され、k は Fig. 9.2.3-4 と Fig. 9.2.3-5 の結果より 35μm と 85μm を用いた。 本試験に用いた SUS 管は引き抜き鋼で管粗さは一般的に約 50μm 程度である。図によると、水銀の粗さ Reynolds 数は 5 より大きく、この値は滑らかな領域の最大値となり、その時の速度は 0.1～0.3m/s である。 本条件での粗さ Reynolds 数は過渡領域である。 水銀流れの境界層厚さは 22μm (0.5m/s) , 12μm (1.0m/s)、8μm (1.5m/s) で, 圧延鋼の粗さ 50μm よりも小さい。また、水銀の同粘性係数 (ν)は他の流体に比べ小さく, 境界層厚さは小さい。よって、圧力損失は管壁粗さの影響を受けて大きくなっていると考えられる。

Fig.9.2.3-6 に熱伝達係数と水銀流速の管径を示す。 熱伝達率は一番低い流速 (約 0.05m/s) で 2500 W/m^2·K, 1.0m/s で 12,000 W/m^2·K 、2.0m/s で 18,000 W/m^2·K となっている。熱伝達率の増加率は水銀流速の上昇に伴って低下している。

Fig.9.2.3-7 に Nusselt 数 (Nu) と Peclet 数の関係を示す。Peclet 数(Pe)は Reynolds 数と Prandtl 数の積 (Pe=Re×Pr)として表される。また、図内には以下の相関式[1]を示す。

Martinelli-Lyon の式

$$Nu=7+0.025Pe^{0.8} \qquad (9.2.3\text{-}3)$$

Subbotin の式

$$Nu=5+0.025Pe^{0.8} \qquad (9.2.3\text{-}4)$$

Lubarsky and Kaufman の式

$$Nu=0.625Pe^{0.4} \qquad (9.2.3\text{-}5)$$

SNS 設計式 by Siman-Tov et al. [2]

$$Nu=0.685Pe^{0.372612} \qquad (9.2.3\text{-}6)$$

本試験結果は Subbotin の式によく一致している。また、式としては以下で表せる。

$$Nu=0.5603Pe^{0.448} \qquad (9.2.3\text{-}7)$$

熱伝達データはその他の式に対しても顕著に高くなっていることはなく、管壁粗さの影響等はないと考えられる。これは、水銀の熱伝導率が非常に高く、Prandtl 数が低くので、 温度境界層が速度境界層に比べ大きくなり、影響が非常に小さいと考えられる。プラントル数から推測すると温度境界層は速度境界層の約 50 倍であると考えられる。

９．２．３．４　３次元水銀熱流動解析

熱流動解析を市販の計算コードである STAR-CD を用いて行った。

Figure 9.2.3-8 に解析モデルとメッシュについて示す。解析モデルは実験に用いてテストセクションと東洋としてある。内径は 14.3mm 加熱長さ 600 mm (入口助走区間 400mm). 全メッシュ数は最大 750000 である。 軸方向メッシュサイズは 2 mm, 半径方向メッシュサイズは流速により管壁垂直方向無次元距離 y+を約 30 とするようにあわせた。y+ の各条件での値は Table 9.2.3-1 に示す。y+ は小さいレイノルズ数で小さく大きなレイノルズ数で大きいという傾向を示している。

解析条件は以下に示すとおりである。

速度　　；0.1 m/s ～ 100 m/s

熱流束　　；99.663 kW/m^2

壁境界　　；No slip condition

乱流モデル　　；Standard k-ε model

乱流プラントル数　；1.5

乱流プラントル数は Myong and Kasagi [3]によって提案された以下の式によって評価した。

$$Pr_t = 0.75 + \frac{1.63}{\ln(1 + Pr/0.0015)} \qquad (9.2.3\text{-}8)$$

水銀物性値 ；

熱伝導度　　；8.58 W/m･K

比熱　　；139.2 J/kg･K

密度　　；13521.3 kg/m^3

粘性率　　；0.001407 kg/m･s

Fig.9.2.3-9 に摩擦係数を示す。実験値及び Colebrook-White の式と Blasius の式 を比較のため示す。Colebrook の式粗い管路に対する摩擦係数を表すために用いられる。Colebrook-White の式は以下に示すとおりである。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right) \qquad (9.2.3\text{-}9)$$

解析では２つの婆愛について計算した。１つは管壁が滑らかな場合、もう一つは管壁が粗い場合で k/D=6.0×10^{-3}(k=85 μ m)とした。

管壁が粗い場合の計算結果は実験値に比較的よく一致している。解析及び実験の結果は Colebrook –White の式によく一致している。厳密にいえば解析結果は Reynolds 数の大きな領域で同条件(k/D=6.0×10^{-3})の Colebrook–White の式 よりやや低い値を示す。しかし、y+ に対して高流速領域で壁近傍のメッシュサイズが充分小さくない事も影響していると考えられる。上記より Star-CD による解析は、管壁粗さを考慮に入れた圧力損失に対して良い予測を得られる事が確認

される。

Fig.9.2.3-10 に熱伝達係数の解析結果を示す。熱伝達率は２種類の管壁粗さに対して行っている、これは摩擦係数の解析と同様である。図には実験値もあわせて示してある。解析結果は Pe=500～10000 の範囲で実験結果と良い一致を示しており、Subbotin の式とも近い値となる。この領域は実機ターゲットシステムの流動条件を十分にカバーしている。また、解析値は管壁粗さによって大きな違いを示していないが、若干、管壁が粗い場合の方が滑らかな場合に比べて大きな値となる。高い Peclet 数の領域では増大率が低くなり２つの計算結果の違いが大きくなる傾向にある。これは、メッシュサイズが高流速領域で十分に小さくなく粗さの影響が流速の増大によって大きくなっていると考えられる。

Fig.9.2.3-11 に流速 2.07m/s の場合の３次元解析で得られた管壁温度分布を示す。最高温度は 40.38℃で温度差は 10.38℃を示す。

Fig.9.2.3-12 に流速 2.07m/s の場合の３次元解析で得られた熱伝達率分布を示す。熱伝達率は最高値を加熱部入り口付近で示し下流に向かって低くなる傾向を示し、加熱部出口付近では熱伝達率は一定値となっている。

Fig.9.2.3-13 に軸方向熱伝達率分布を示す。加えて、Gnielinski の式 [4] を図内に示す。Gnielinski の式は以下に示すとおりである。

$$Nu(x) = Nu_{\infty}(1+(x/De)^{-2/3}) \qquad (9.2.3\text{-}10)$$

ここで、Nu(x) は温度境界層助走区間におけるヌセルト数 Nu_{∞} は十分に発達した領域におけるヌセルト数である。x は加熱距離 De は等価水力直径を示す。

相関式によると、ヌセルト数は入り口付近で比較的高く 0.2m 以降でほぼ一定値となる。解析結果は Gnielinski の式の良い一致を示す。この結果から、解析は助走区間での熱伝達率について良い予測を示すことがわかる。

以上より、Star-CD による解析は現設計施設の良い予測を行えると考えられる。よって、今後、水銀ターゲットシステムの解析に Start-CD を用いて行く。

参考文献

[1] JSME, "JSME Data Book: Heat Transfer –4th Edition-" p107, (1997) (in Japanese)

[2] Siman-Tov M., Wendel M., Haines J. and Rogers M., "Thermal-Hydraulic Analysis of the Liquid Mercury Target for the National Spallation Neutron Source" Proc of Reactor Safety (ARS'97), Orlando, Florida, (1997-6)

[3] Myong, H.K., Kasagi, N., and Hirata, M., "Numerical Presiction of Turbulent Pipe Flow Heat Transfer for Various Prandtl Number Fluids with the Improved k- ε Turbulent Model", JSME Int. J., Vol.32, No.4, p613-622, (1989)

[4] Gnielinski, V., Int. Chem. Eng., " New Equations for Heat and Mass Transfer in turbulent Pipe and Channel Flow", Vol.16-2, p359, (1976)

Table 9.2.3-1 y+ value for Reynolds number

Re	y+
13314.65	25.001
33286.5	29.586
66573	30.004
133146.5	30.509
265016.4	30.017
665730	32.167
1331465	33.106

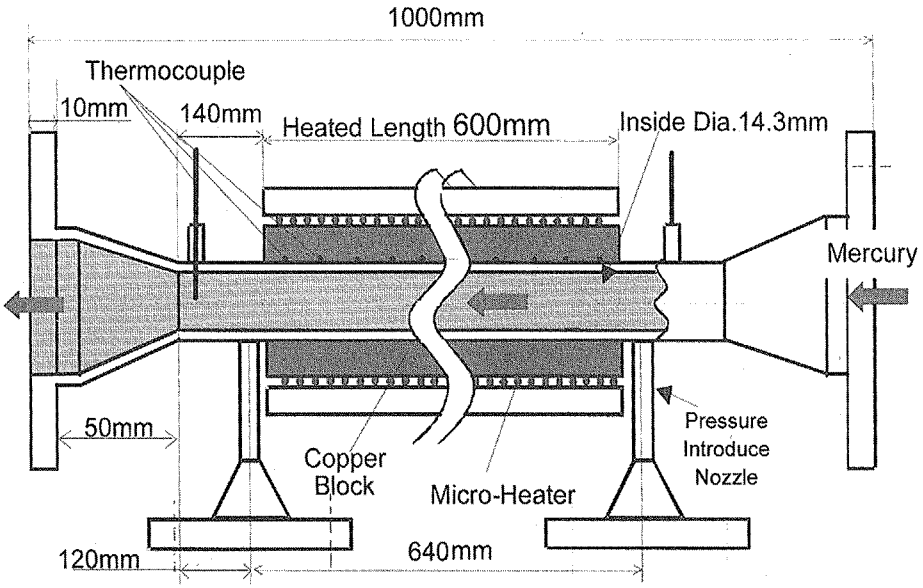


Fig.9.2.3-1 Schematic drawing of the test section.

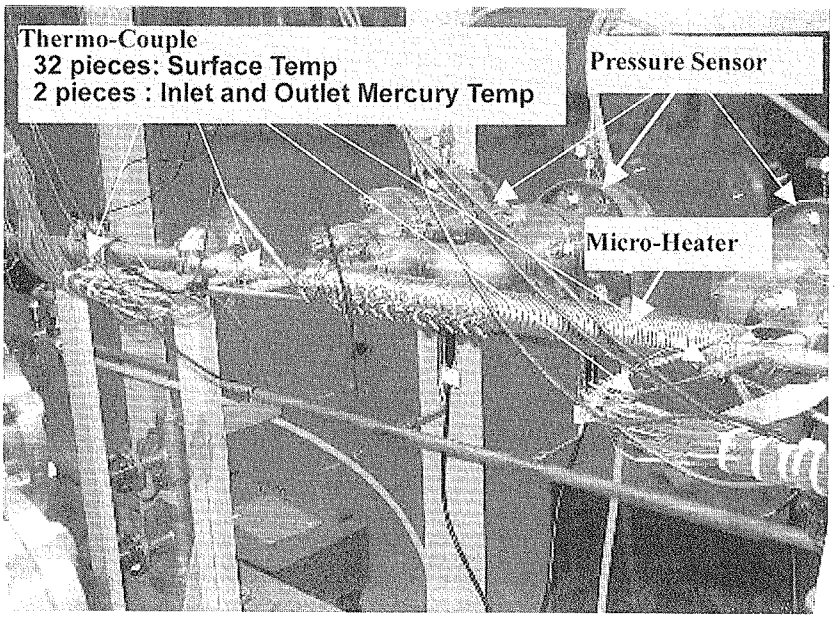


Fig.9.2.3-2 Outer view of the test section.

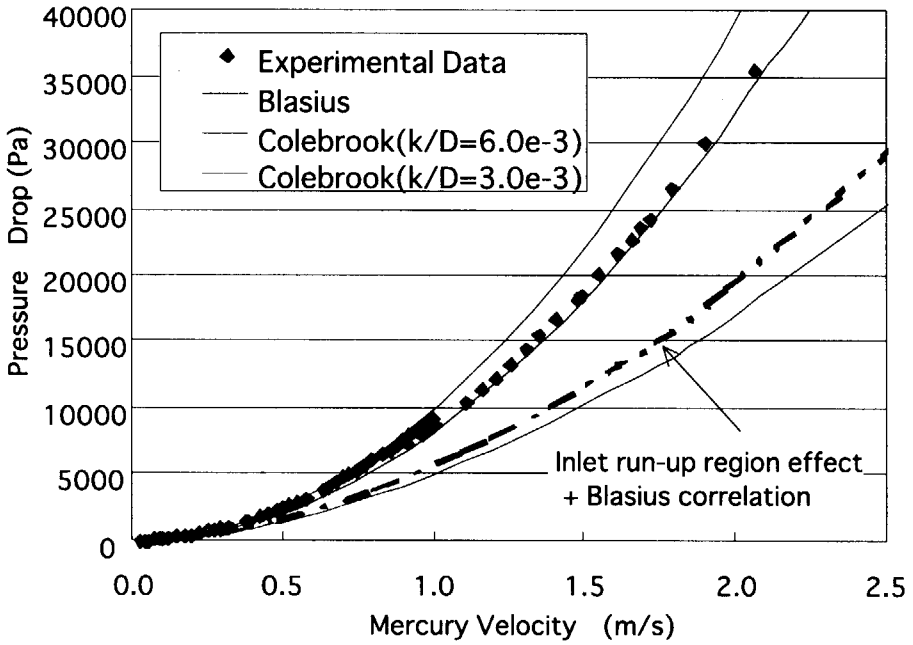


Fig.9.2.3-3 Relationship between pressure drop and mercury velocity.

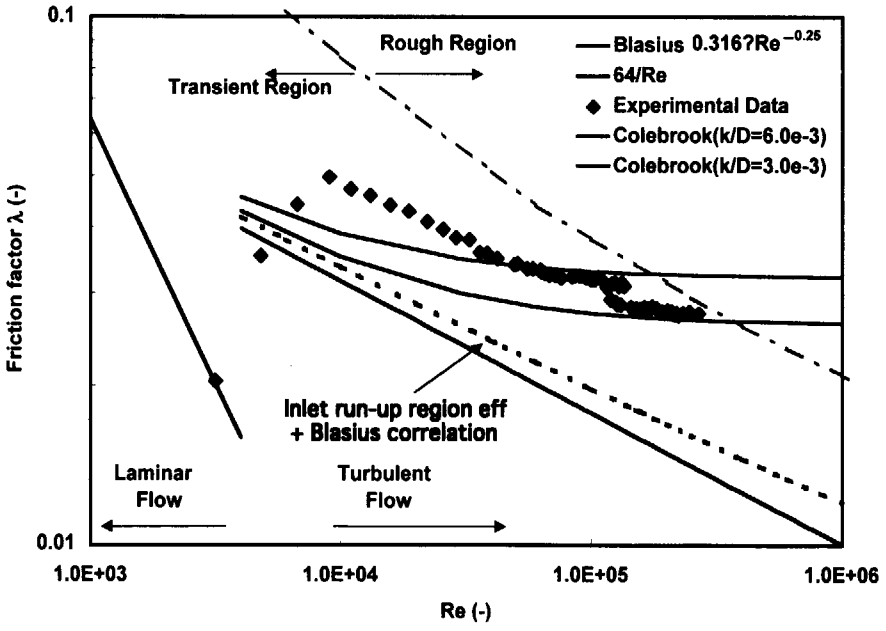


Fig.9.2.3-4 Relationship between friction factor and Reynolds number.

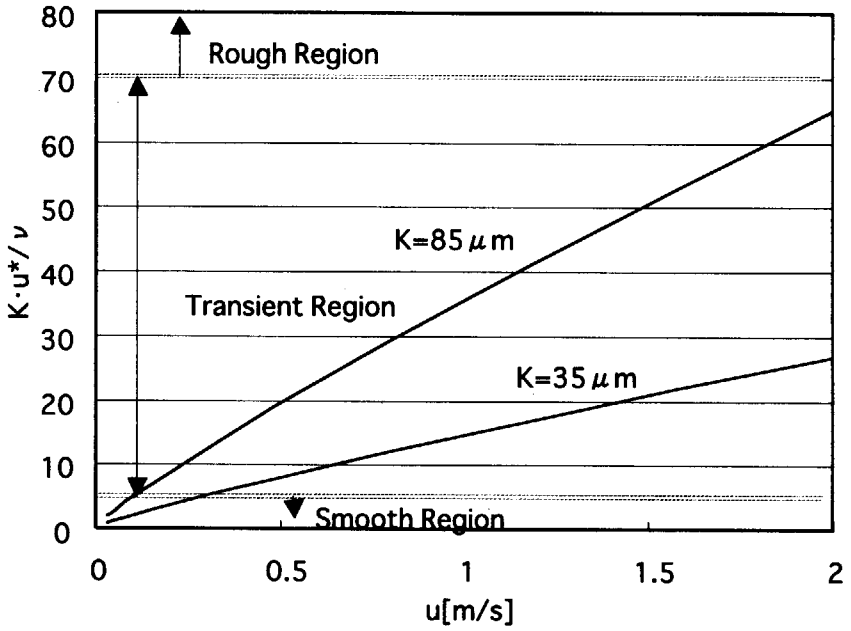


Fig.9.2.3-5 Roughness Reynolds number of mercury
(Roughness k = 35 and 85 μ m)

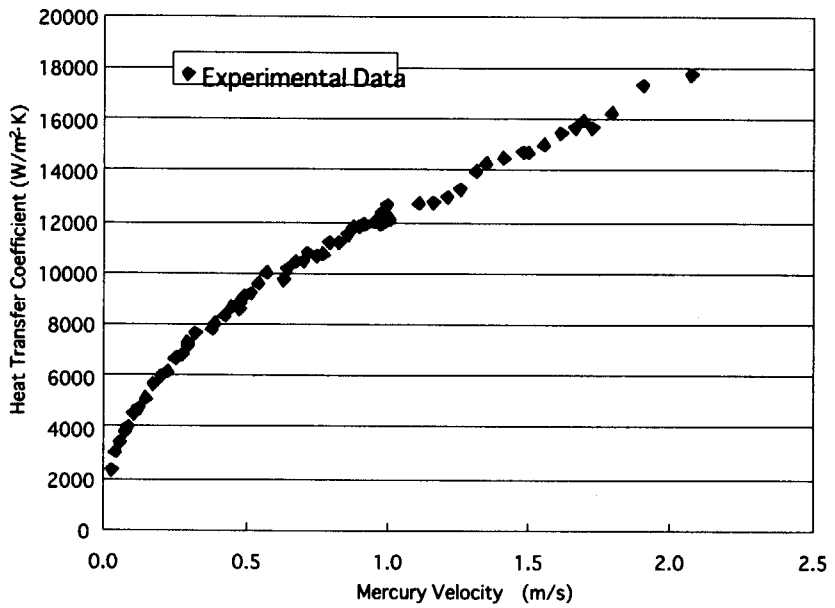


Fig.9.2.3-6 Relationship between heat transfer coefficient and mercury velocity.

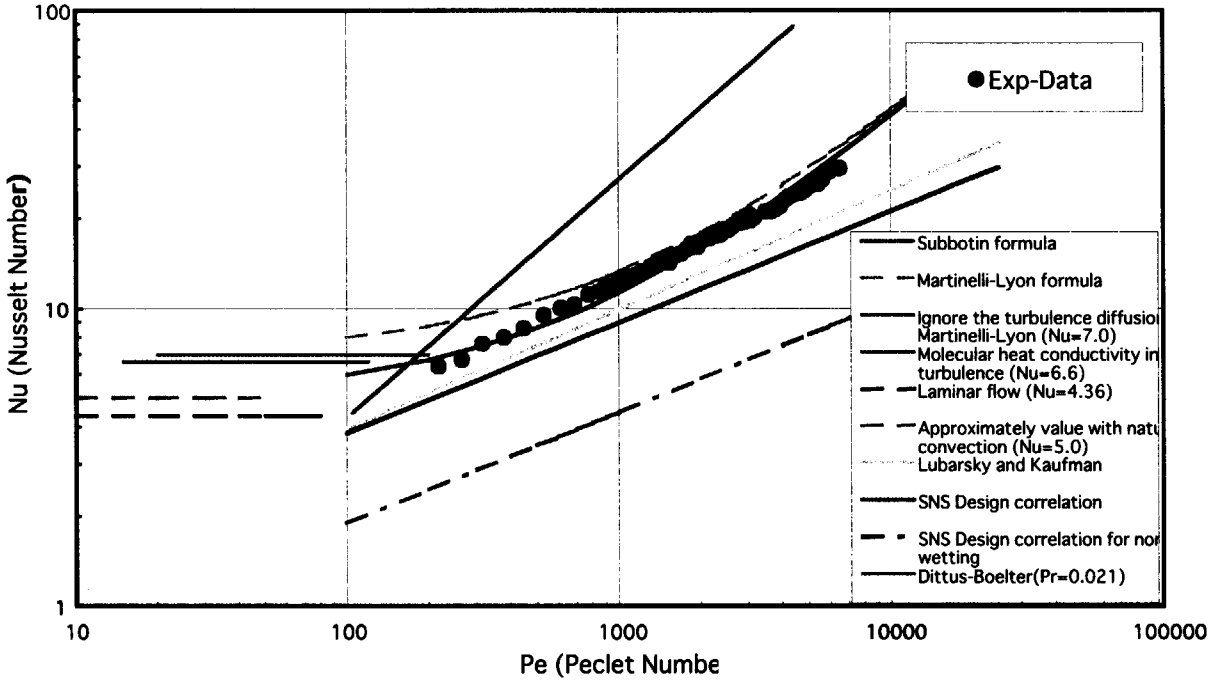


Fig.9.2.3-7 Relationship between Nusselt number and Peclet number with previous experimental data and correlations.

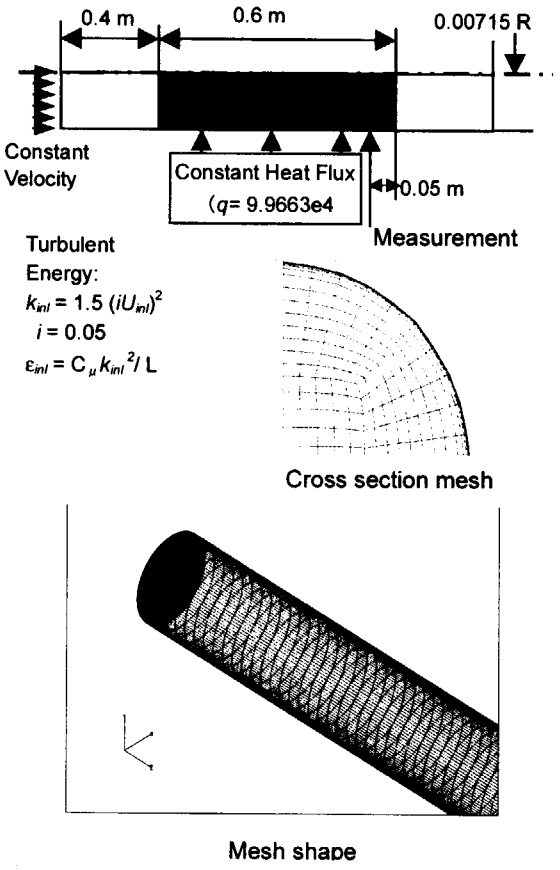


Fig.9.2.3-8 Calculation model for heat transfer analysis

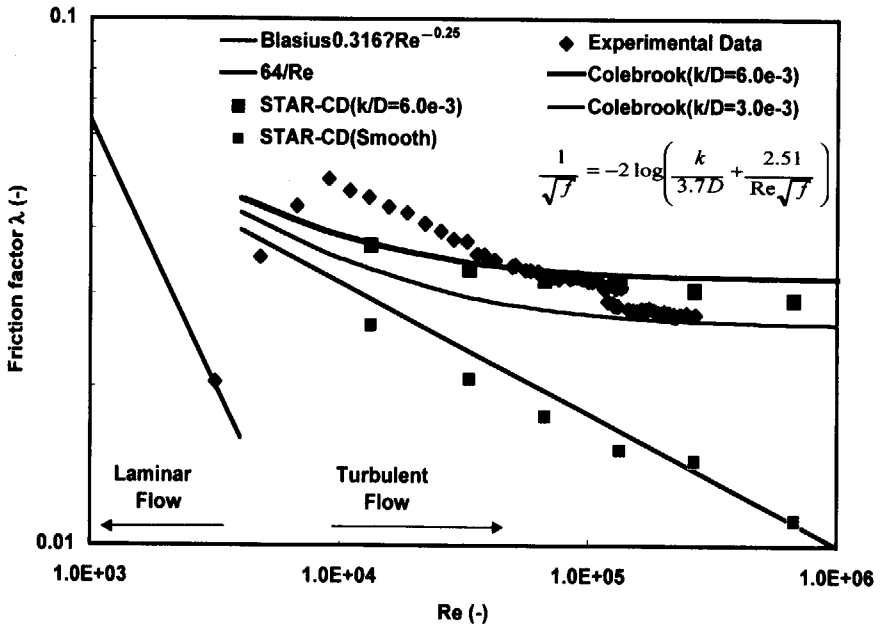


Fig. 9.2.3-9 Comparison with experimental and analytical results of friction factor.

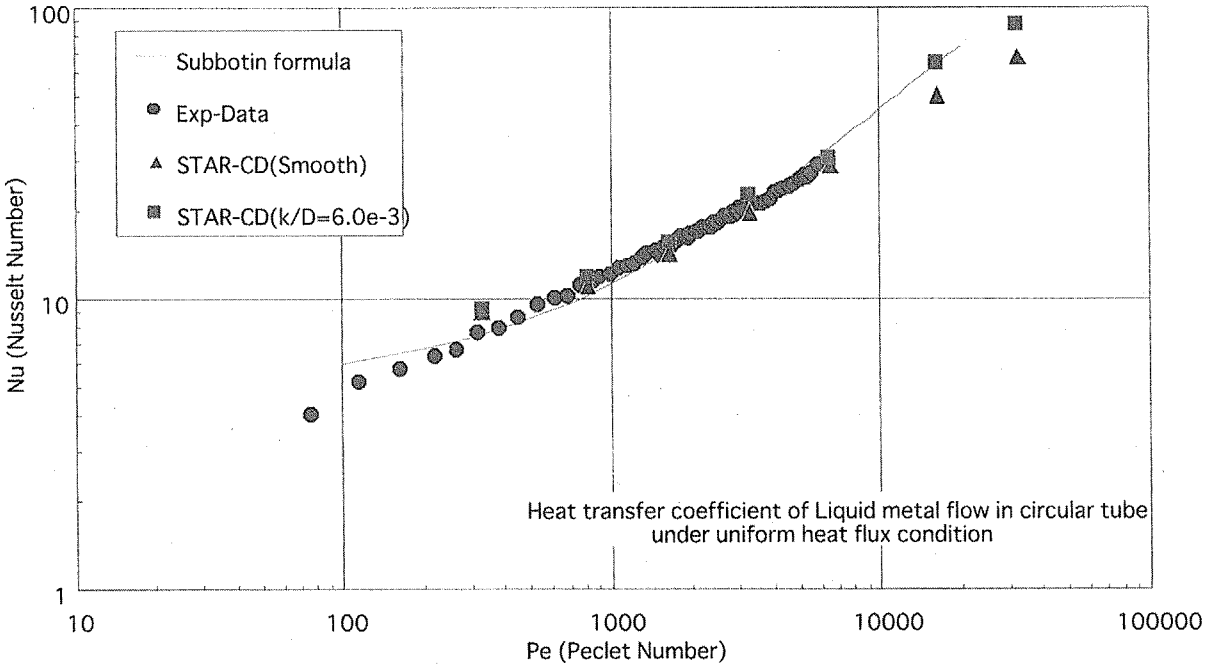


Fig.9.2.3-10 Nusselt number comparisons of analytical results and experimental results.

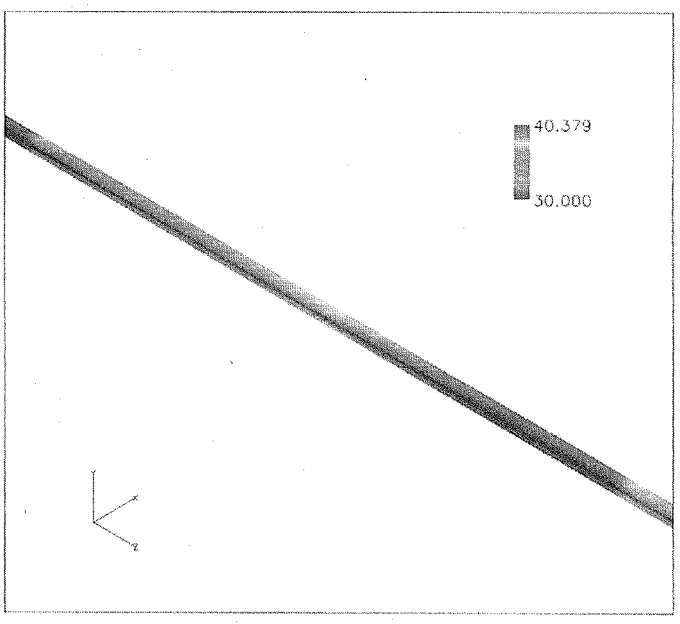


Fig.9.2.3-11 Temperature distribution

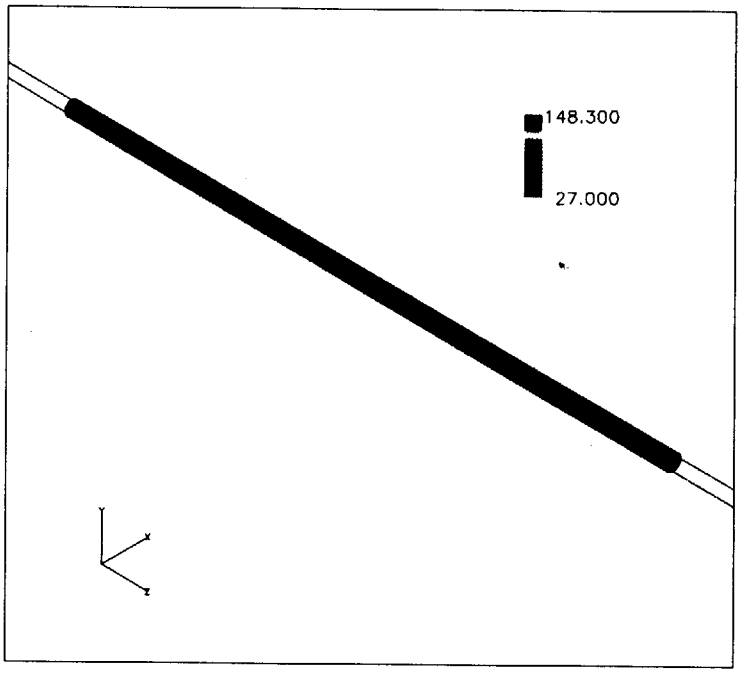


Fig.9.2.3-12 Heat transfer coefficient distribution

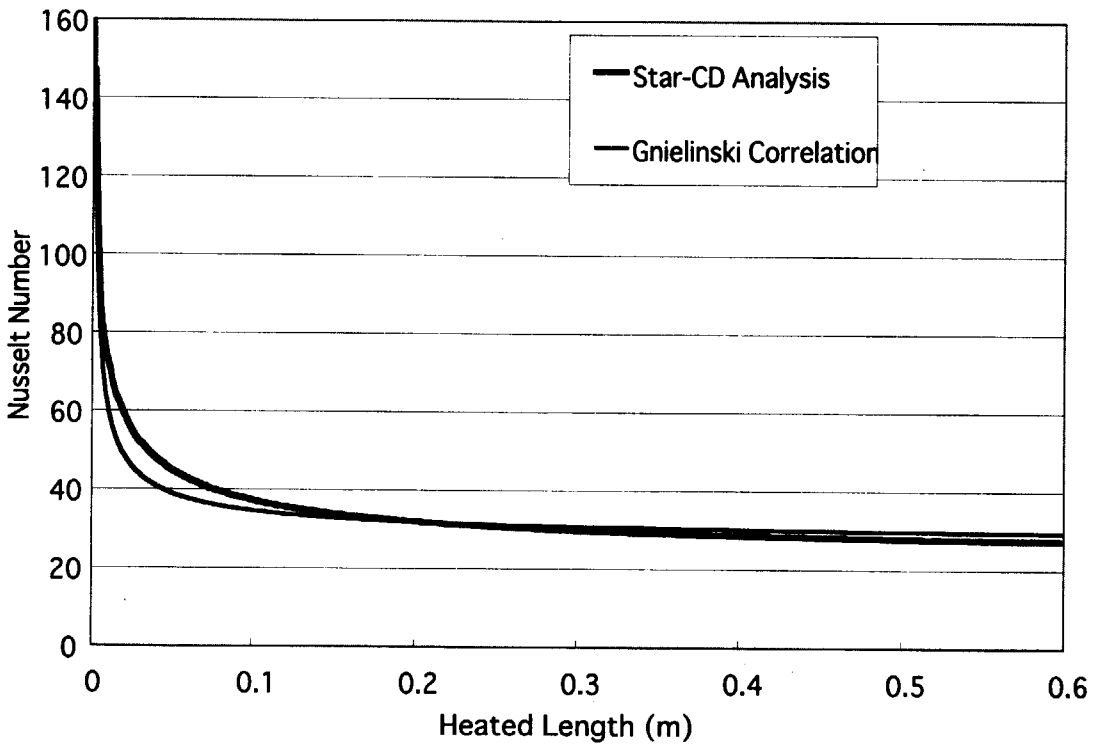


Fig.9.2.3-13 Heat transfer coefficient along with flow direction

９．２．４　エロージョン試験及び残留水銀量測定

９．２．４．１ エロージョン試験体の概要と実験装置

Fig. 9.2.4-1 には、エロージョン試験流路の構成を、また、Fig. 9.2.4-2 にはエロージョン試験流路の外観を示す。エロージョン試験流路はステンレス製の配管(O.D=21.7mm, I.D=14.3mm)をエルボーとレデューサを用いてフランジで接続した構造で全長は約 1.4m である。試験流路には幅 10mm、長さ 40mm で厚さ約 1.9mm の SUS316 製の試験片(クーポン)をフランジに設けた溝に挿入して固定している。水銀流量はエロージョン試験配管を設置した条件において、電磁ポンプを用いた場合に最大約 7×10^{-3} m^3/min、ギアポンプの場合で最大 2×10^{-2} m^3/min である。

実験は、水銀流動基礎実験装置に設置したエロージョン試験用配管を約 1000 時間の運転毎に取り外し、残留水銀量を計測するため配管に付着した水銀を超音波洗浄槽で取り除いた後、各測定点毎の管壁厚さを超音波厚さ計を用いて測定し、運転時間毎の厚さ変化によってエロージョン量(配管減肉量)を評価した。管壁厚さ測定に用いた超音波厚さ計の外観を Fig.9.2.4-3 に示す。厚さ測定用の探触子がストレートのものと 45° 傾いたものの２種類あり、測定個所によって使い分けた。測定は探触子先端部分が垂直に配管外表面に当たるようにし、ディスプレイで波形が正しく表示されていることを確認しつつ厚さを確定した。超音波厚さ計の仕様を以下に示す。

超音波厚さ計

製　造　：　日本パナメトリクス株式会社
製　品　：　A-スキャンディスプレイ付き超音波厚さ計
型　式　：　厚さ計　MODEL 25DL PLUS
測定範囲　：　0.080～500mm（材料・探触子のタイプによる）
測定精度　：　0.001mm
測定方式　：　「パルス/エコー」原理により以下の式で算出する。

$$x=V(t-t0)/2$$

x　：材料厚さ
V　：材料の中における音速
t　：測定したパルスの往復通過時間
t0　：ゼロオフセット要素（探触子のウェアプレート遅延、ケーブル遅延、他の固定遅延の調整）

探触子　：　コンタクト探触子（V260-SM、V260-45）

また、厚さ測定に先立って配管を洗浄した際に取り除いた水銀に関しては、超音波洗浄槽に設置している水銀溜めで集めた後、水銀重量を化学天秤で量り、配管内表面へ付着した残留水銀量評価を行った。超音波洗浄槽の外観を Fig. 9.2.4-4 に示す。超音波洗浄槽は大きさが幅 1.4m、奥行き 0.5m、深さ 0.45m で、内部に超音波振動子を 3 台設置した。内部には洗浄する配管等が発振器の下へ落ちないよう金網のかごを設置した。下部に設置した水銀溜はガラス製で水銀を溜めた後、洗浄槽より取り外して水銀を補集できるようにした。

以下に超音波発振器の仕様を示す。

超音波発振器

型　式	：	UE-1200Z38S-2A
外形寸法	：	262W×450L×154H　[mm]
所用電源	：	単相　200V　50Hz　約 2.4kW
出　力	：	1200W

超音波振動子

型　式	：	UT-30Z38/24-98X005
外形寸法	：	440W×300L×73H　[mm]
照射面積	：	400×300　[mm]
周波数	：	38kHz

Fig.9.2.4-5 にエロージョン試験配管の管壁厚さ測定位置を示す。測定点は A～Q までの１７カ所で各点は、直管部分、レデューサ及びエルボーの各部分においてそのほぼ中央部分である。また、円周方向での違いの有無を確認するために、円周方向に 0～270° の 4 カ所の測定点において管壁厚さを測定した。クーポンについてはマイクロメーターと超音波厚さ計の双方で中央部分の厚さを測定した。なお、厚さの測定は同一箇所を 3 回計測し、その平均値を用いた。

今回の実験では、電磁ポンプを用いて約 7×10^{-3} m^3/min の流量条件で試験を行った。この場合の試験配管での流速は約 0.7m/s となる。Fig.9.3.4-6 に今回の実験における水銀温度と流速を示す。水銀温度に違いがあるのは、図中に示すとおり熱交換器に使用している冷却水温度が季節により変化するためであり、それに伴って流速も若干変化している。今回の実験条件を以下に示す。

入口圧力	；	約 0.38　MPa
入口水銀温度	；	約 35　～50　℃
流速（テストセクション）	；	約 0.7 m/s
（クーポン部）		約 0.3 m/s

９．２．４．２　エロージョン試験結果

エロージョン試験配管を用いた実験結果を示す。Table 9.2.4-1、-2、-3、-4に試験前及び約1000、2000、3000時間における管壁厚さ測定結果を示す。ただし、試験前の管壁厚さの測定は工場検査値であり、今回の試験に用いた計測器よりも精度は低い。そこで、評価に当たっては1000時間以降の測定値を用いることとした。3回の測定結果から管壁厚さについては大きく変わっていないことがわかる。その差についてTables 9.2.4-5、-6に1000時間から2000時間と2000時間から3000時間までの厚さ変化(減肉)としてそれぞれ示す。1000時間毎の減肉量はパイプ、レデューサ 、エルボーと異なる部位においても大きな違いはなく10μm以下となっている。特に直線部での変化は2回とも約3.2μmで非常に小さな値である。

Table 9.2.4-7に本実験の評価結果について示す。また、Fig.9.2.4-7に運転時間とエロージョン量の関係を示す。図より、エロージョン量が時間に比例するとして近似すると、今回の測定結果は

+10%、-1%の範囲内であり、この結果より5000時間(１年間の運転時間)における減肉量を評価すると約12μm、30年使用した場合には約370μmの減肉が予測される。また、クーポンについてみるとクーポン部では厚さはほとんど変化していない。クーポン部分の流速条件(0.3m/s)では超音波厚さ計やマイクロメーターの分解能が1μmであることからエロージョンによる減肉はほぼゼロであると考えられる。

実機の設計では、150A-Sch80又は200A-Sch80の配管を用いることとしており、それぞれ配管肉厚は11.0、12.7mmである。今回の評価結果は+10%を見込んでも0.5％にも満たない値である。水銀循環システムの配管には最高で1.0MPaの内圧がかかる設計であるため、内圧に対して十分な裕度を持つ必要がある。SUS316Lの許容応力は115MPaであり、エロージョンのない場合には、内圧が1.0MPaの場合、配管の応力はそれぞれ13.7MPa、15.5MPaであり、1mm減肉した場合において15.1、16.8MPaとなる。この結果から、実機での水銀循環システムにおける配管では、30年間使用してもエロージョンによる配管の減肉は微少であり、エロージョンを原因とした強度低下はないと考えられる。

今回は同一流速での結果であるが、エロージョンは流速に大きく影響されるため、水銀ターゲット内では配管内に比べ流速が高くなることから、水銀ターゲット容器ビーム窓部近傍で想定される最大水銀流速1.5m/s以上の流速におけるエロージョン量の変化を測定する計画である。

９．２．４．３　残留水銀量測定結果

水銀ターゲット交換時等の水銀ドレン時に問題となるターゲット容器や配管への水銀の付着量について、超音波洗浄槽でエロージョン試験配管部より取り除いた水銀を採取し、化学天秤を用いてその重量を測定し、評価した結果について述べる。

Table 9.2.4-8 に1000，2000，3000時間のエロージョン試験後に測定した付着水銀量を示す。3回の測定結果から、運転時間に対して水銀の付着量が変化する傾向は見いだせない。3回測定した平均値から評価すると、付着していた水銀は重さ1.475gで、常温での水銀密度13,530kg/m^{3}を用いて体積に換算すると0.11ccとなる。また、エロージョン試験配管部の内面積は7.73×10^{-2}m^{2}であるため単位面積あたりの付着水銀量は19.1g/m^{2}と極めて小さく、平均付着厚さを計算すると1.4μmとなる。このことから、150A-Sch80の配管1mにおける残留水銀量を評価すると8.59gの水銀が配管に付着残留し、200A-Sch80の配管では11.45gが付着残留することになる。また、Fig.13.3.4-8に示す現設計における水銀ターゲット容器の場合には内表面積が2.1m^{2}であり、約40g(約3cc)が残留することが想定される。水銀の運転停止後の残留放射能4.0×10^{11} Bq/ccは運転中の放射能1.4×10^{12} Bq/ccに比べて低く[1]、3cc程度の水銀が残留しても水銀の残留放射能は1.2×10^{12} Bqであり、ターゲット容器の放射化量1.0×10^{15} Bqと比べてはるかに小さい。(運転停止後の水銀によるガンマ線強度は、200A-Sch80の配管に残留した水銀が配管内面に一様に付着したとすると、一様に5□m付着した場合、管表面で2mSv/hr程度と評価されている[2]ことから推量して0.56mSv/hrとなる。) ターゲットシステムのメンテナンスはほとんどリモートで行う計画であるが、緊急の場合に人間がアクセスする可能性があり、残留水銀による線量の評価が必要となる。そこで、残留水銀量評価についても、今後さらに繰り返し測定を行うことによってより精度の高いデータを取得して行く予定である。

参考文献

[1] 小林薫、神永政紀、羽賀勝洋、木下秀孝、麻生智一、粉川広行、日野竜太郎、”水銀ターゲットシステムにおけるソースタームの予備的評価”、JAERI-Tech 2000-050, (2000-8)

[2] H.Hayashi, H. Nakano, Y. Ogawa, K. Kobayashi, T. Kai, M. Kaminaga and R. Hino, “Gamma-ray Dose Rate on the Target Trolley at Maintenance Period. “ The 2nd Int. Workshop on Mercury Target and Cold Moderator Engineering, November 13-15, JAERI-Tokai, 2000

Table 9.2.4-1 Thickness measurement results before test (0 hours)

Degree	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
0	5.21	3.61	5.31	5.40	4.67	3.62	4.62	4.64	3.68	4.83	5.49	5.25	3.75	5.24	5.61	3.75	5.27
90	5.37	–	–	5.58	3.87	–	–	–	–	4.04	5.27	5.46	3.69	5.47	–	–	5.04
180	5.51	3.75	5.48	5.39	4.71	3.75	4.86	4.85	3.69	4.51	5.12	5.64	3.58	5.57	5.48	3.63	5.04
270	5.43	3.61	5.59	5.25	4.79	3.72	3.84	4.10	3.76	4.84	5.32	5.47	3.67	5.48	5.35	3.64	5.32

Unit; mm

Test Piece

	Micrometer	Super-Sonic
R	1.89	1.91
S	1.89	1.91
T	1.89	1.90
U	1.89	1.91

Unit; mm

Precious Time
0 h 0 m

Table 9.2.4-2 Thickness measurement results after 1000 hours

Pipe wall

Degree	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
0	5.135	3.728	5.475	5.600	4.670	3.726	4.623	4.730	3.665	4.676	5.382	5.644	3.627	5.460	5.410	3.594	5.270
90	5.340	–	–	5.340	3.867	–	–	–	–	3.932	5.361	5.449	3.714	5.429	–	–	5.073
180	5.445	3.579	5.282	5.342	4.689	3.579	4.559	4.553	3.664	4.765	5.187	5.226	3.674	5.211	5.304	3.724	5.070
270	5.330	3.691	5.199	5.486	4.807	3.701	3.808	3.997	3.739	4.750	5.170	5.487	3.576	5.434	5.349	3.699	5.283

Unit; mm

Test Piece

	Micrometer	Super-Sonic
R	1.888	1.888
S	1.886	1.886
T	1.887	1.887
U	1.892	1.892

Unit; mm

Precious Time
1000 h 30 m

Table 9.2.4-3 Thickness measurement results after 2000 hours

Pipe wall

Degree	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
0	5.130	3.725	5.464	5.591	4.659	3.725	4.619	4.723	3.660	4.664	5.377	5.639	3.623	5.458	5.407	3.590	5.267
90	5.338	3.623	5.511	5.326	3.863	3.639	4.780	4.629	3.555	3.923	5.358	5.452	3.714	5.419	5.309	3.617	5.072
180	5.440	3.576	5.275	5.333	4.679	3.577	4.552	4.551	3.661	4.757	5.175	5.221	3.671	5.213	5.300	3.722	5.062
270	5.329	3.690	5.186	5.481	4.796	3.696	3.801	3.992	3.736	4.746	5.163	5.480	3.572	5.428	5.346	3.698	5.276

Unit; mm

Test Piece

	Micrometer	Super-Sonic
R	1.888	1.888
S	1.886	1.886
T	1.887	1.887
U	1.892	1.892

Unit; mm

Precious Time
2037 h 8m

Table 9.2.4-4 Thickness measurement results after 3000 hours

Pipe wall

Degree	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
0	5.127	3.726	5.461	5.591	4.655	3.724	4.619	4.719	3.651	4.662	5.378	5.635	3.621	5.457	5.403	3.583	5.263
90	5.335	3.625	5.509	5.325	3.857	3.634	4.778	4.619	3.551	3.923	5.354	5.449	3.713	5.417	5.303	3.616	5.070
180	5.440	3.574	5.275	5.321	4.677	3.574	4.549	4.548	3.659	4.756	5.171	5.220	3.671	5.210	5.299	3.721	5.057
270	5.329	3.687	5.185	5.481	4.796	3.692	3.799	3.991	3.735	4.743	5.159	5.480	3.571	5.425	5.345	3.695	5.271

Unit; mm

Test Piece

	Micrometer	Super-Sonic
R	1.888	1.888
S	1.886	1.886
T	1.887	2.022
U	1.892	1.892

Unit; mm

Precious Time
3109 h 4m

Table 9.2.4-5 Thickness defference between 1000 to 2000 hours

Pipe wall

Degree	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
0	0.005	0.003	0.010	0.009	0.011	0.002	0.004	0.007	0.005	0.012	0.004	0.005	0.004	0.003	0.003	0.004	0.004
90	0.003	–	–	0.014	0.005	–	–	–	–	0.008	0.003	-0.003	0.001	0.010	–	–	0.001
180	0.004	0.003	0.007	0.010	0.010	0.002	0.008	0.002	0.003	0.007	0.012	0.005	0.003	-0.002	0.004	0.002	0.007
270	0.001	0.001	0.013	0.005	0.011	0.005	0.007	0.004	0.003	0.004	0.007	0.007	0.004	0.005	0.003	0.002	0.008
Av.	0.0031	0.0024	0.0103	0.0095	0.0091	0.0029	0.006	0.0044	0.0034	0.0079	0.0067	0.0035	0.0031	0.0038	0.0033	0.0023	0.0049

Unit; mm

TestPiece

	Micrometer	Super-Sonic
R	0	0.000
S	0	0.000
T	0	0.000
U	0	0.000
Av.	0	8.3E-05

Unit; mm

Pipe	Reducer	Elbow	Total
0.0028	0.0056	0.0069	0.0051

Outside 0.0060
Inside 0.0077
Side 0.0075

Precious Time	Total Time
1036 h 38m	2037 h 8m

Table 9.2.4-6 Thickness defference between 2000 to 3000 hours

Pipe wall

Degree	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
0	0.003	0.000	0.004	0.000	0.004	0.001	0.000	0.004	0.010	0.002	0.000	0.004	0.002	0.001	0.004	0.007	0.003
90	0.003	-0.002	0.002	0.002	0.005	0.005	0.002	0.009	0.005	0.000	0.004	0.003	0.000	0.002	0.006	0.001	0.002
180	0	0.002	0.000	0.012	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.004	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.005
270	0	0.003	0.001	0.000	0.000	0.004	0.002	0.001	0.001	0.003	0.004	0.000	0.001	0.004	0.001	0.003	0.005
Av.	0.0015	0.0007	0.0015	0.0033	0.0029	0.0032	0.0020	0.0042	0.0043	0.0014	0.0030	0.0022	0.0008	0.0023	0.0029	0.0031	0.0039

Unit; mm

TestPiece

	Micrometer	Super-Sonic
R	0	0.000
S	0	0.001
T	0	0.001
U	-0.001	0.001
Av.	0	6.7E-04

Unit; mm

Pipe	Reducer	Elbow	Total
0.0024	0.0026	0.0026	0.0025

Outside 0.0023
Inside 0.0013
Side 0.0024

Precious Time	Total Time
1071 h 56m	3109 h 4m

Table 9.2.4-7 Erosion estimation for the experimental facility

	Precious Time	Erosion Thickness [μm]	1year [μm]	30years [μm]
1	1036 hr 36 min	2.8	13.51	405.2
2	1071 hr 56 min	2.4	11.19	335.84
Av.			12.35	370.5

150A-Sch80 11.0mm
200A-Sch80 12.7mm

Table 9.2.4-8 Amout of mercury attached on piping after drainege

Test Section Inner Surface 0.0773 m^2
Mercury Density 13.53 g/cc

	1st	2nd	3rd	Av.
Attached Mercury [g]	1.4866	1.2168	1.7216	1.4750
Volume [cc]	0.1099	0.0899	0.1272	0.1090
Av. Thickness [m]	1.42E-06	1.16E-06	1.65E-06	1.41E-06
Amount / 1m^2				
[cc]	1.422	1.164	1.646	1.410
[g]	19.24	15.74	22.28	19.09
150A-Sch80	Inner Dia. 143.2 mm Perimeter 449.9 mm			
Amount / 1m [g]	8.654	7.083	10.022	8.586

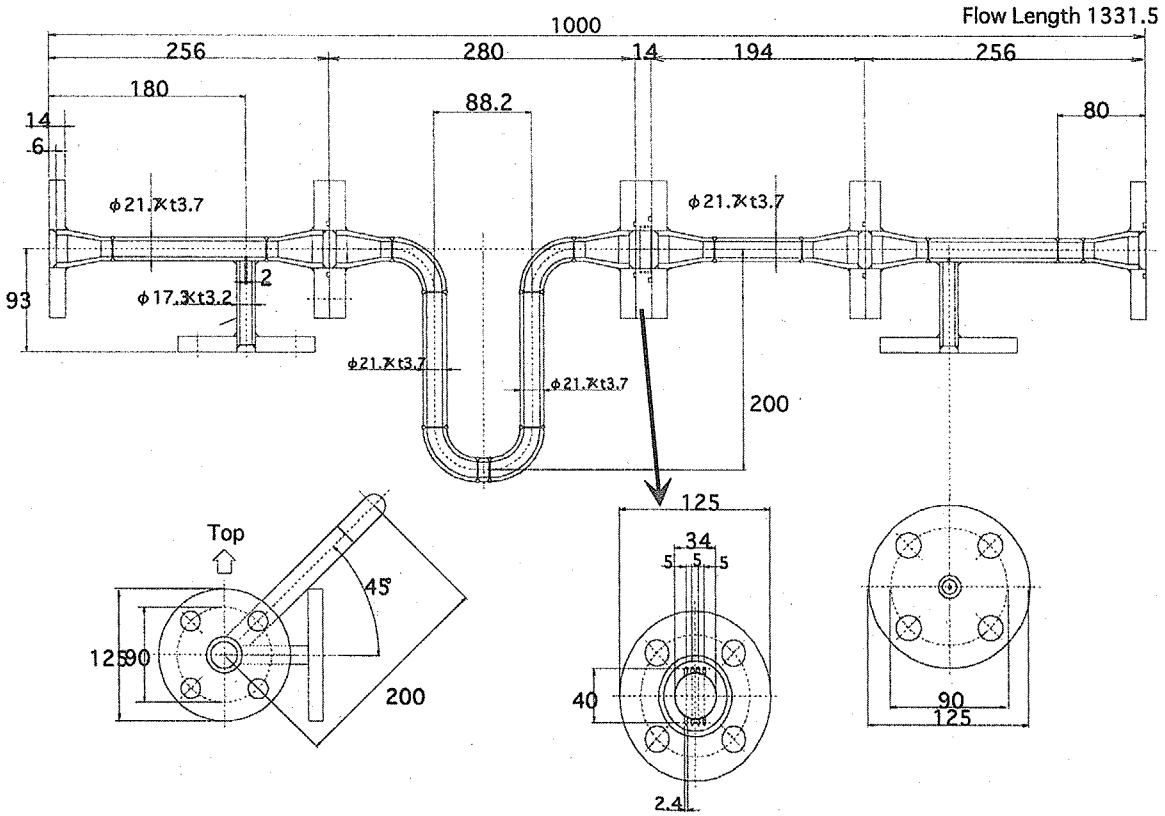


Fig.9.2.4.1 Schematic drawing of the erosion test secton

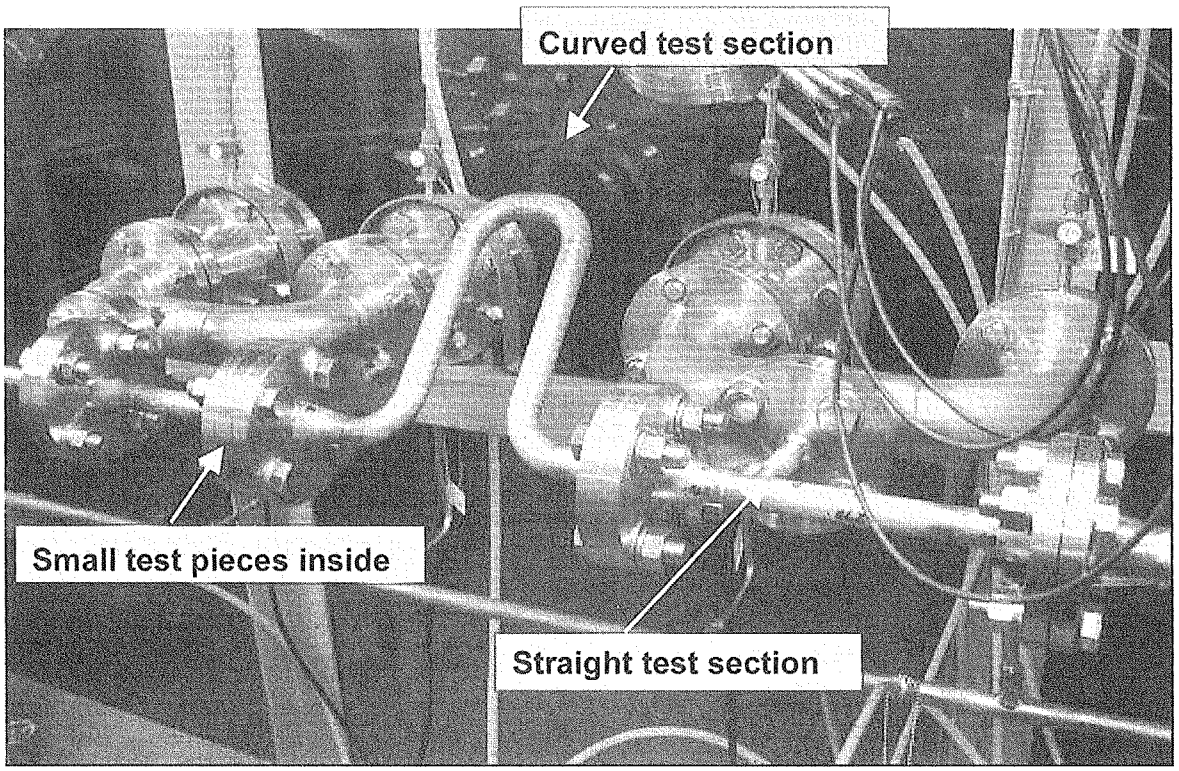
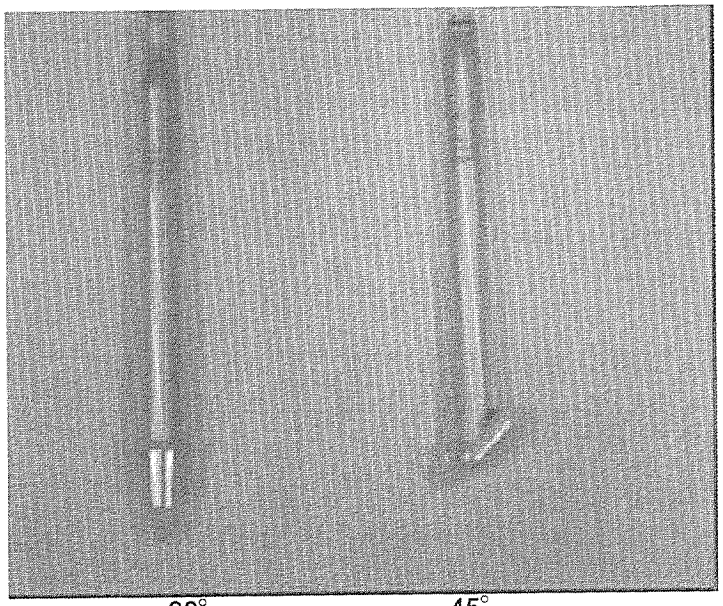
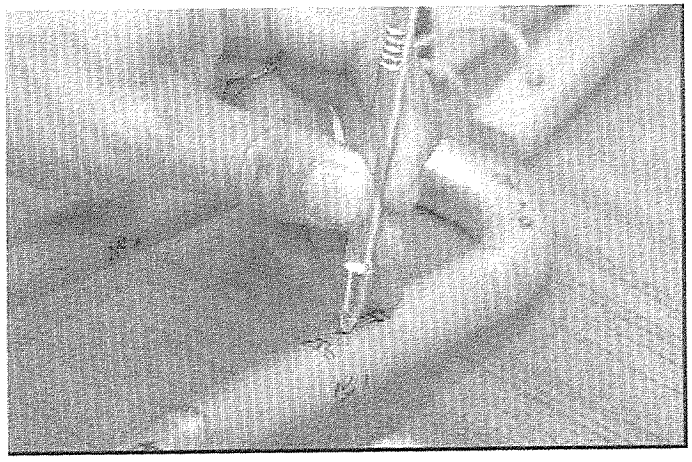


Fig.9.2.4-2 Outer view of the erosion test secton





Transducers



View at Measuring

Fig. 9.2.4-3 Outer view of the ultra sonic thickness gage

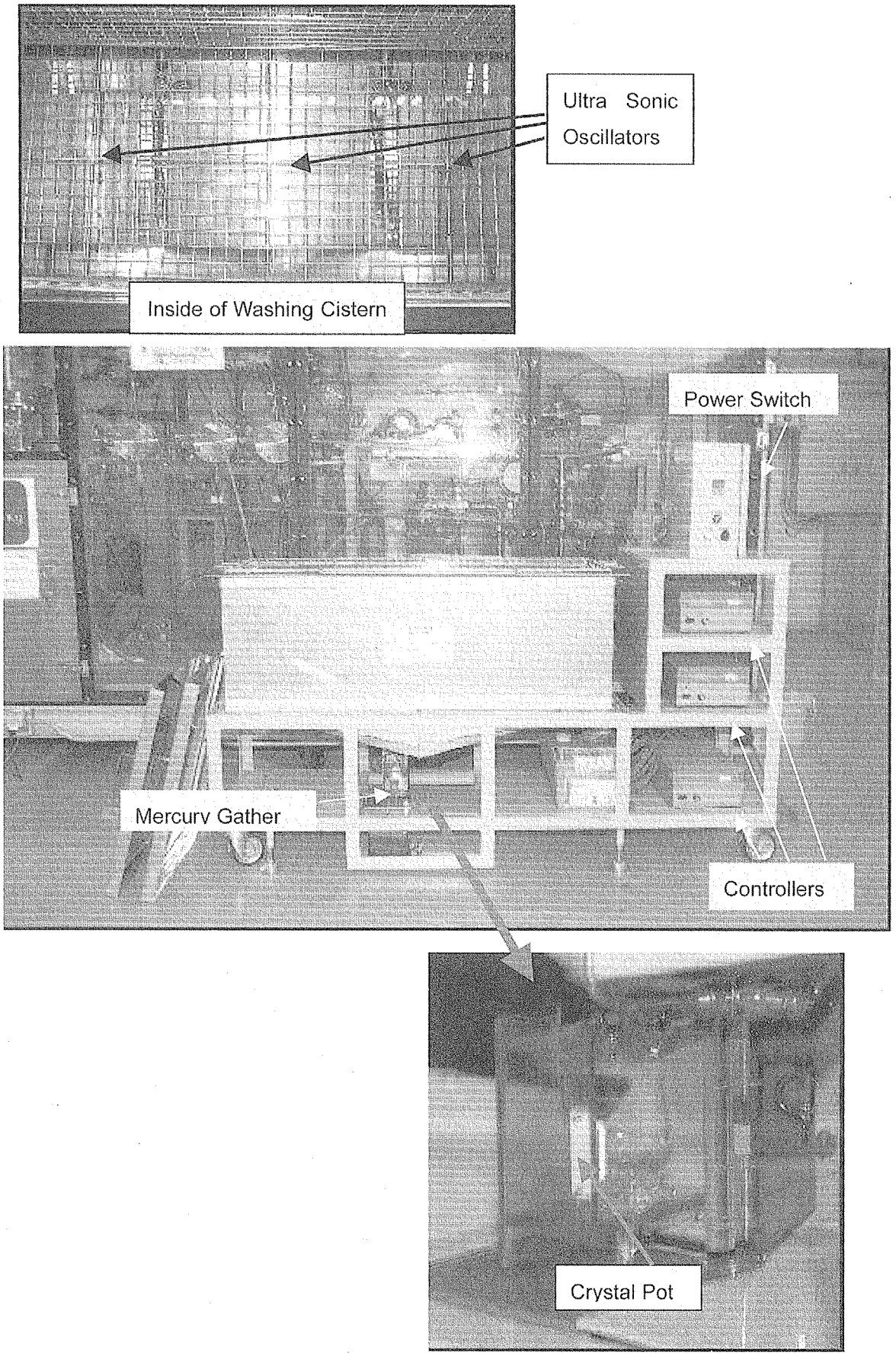


Fig. 9.2.4-4 Outer view of the ultra sonic washer for the test section

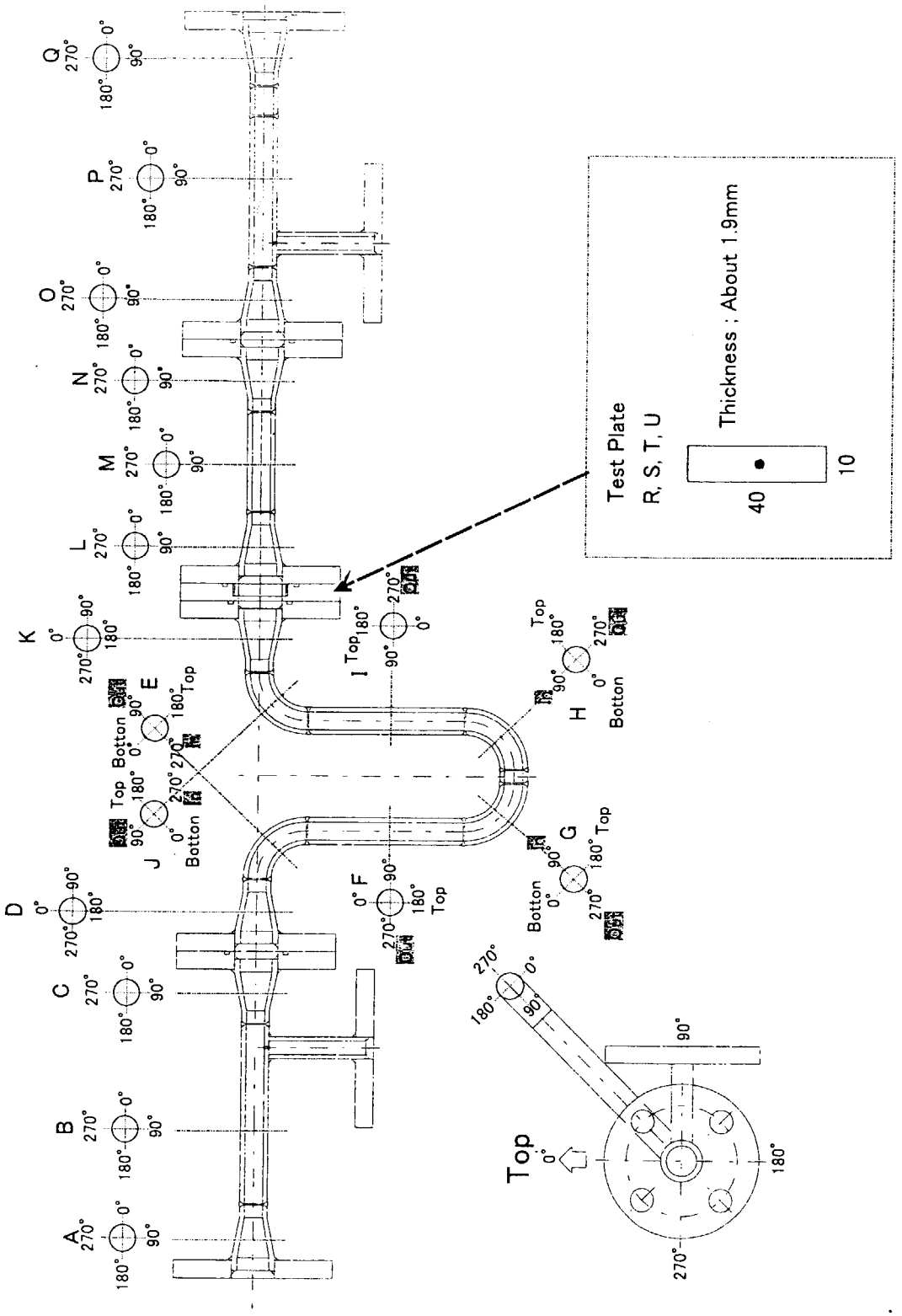


Fig.9.2.4-5 Measurement point of tube wall thickness

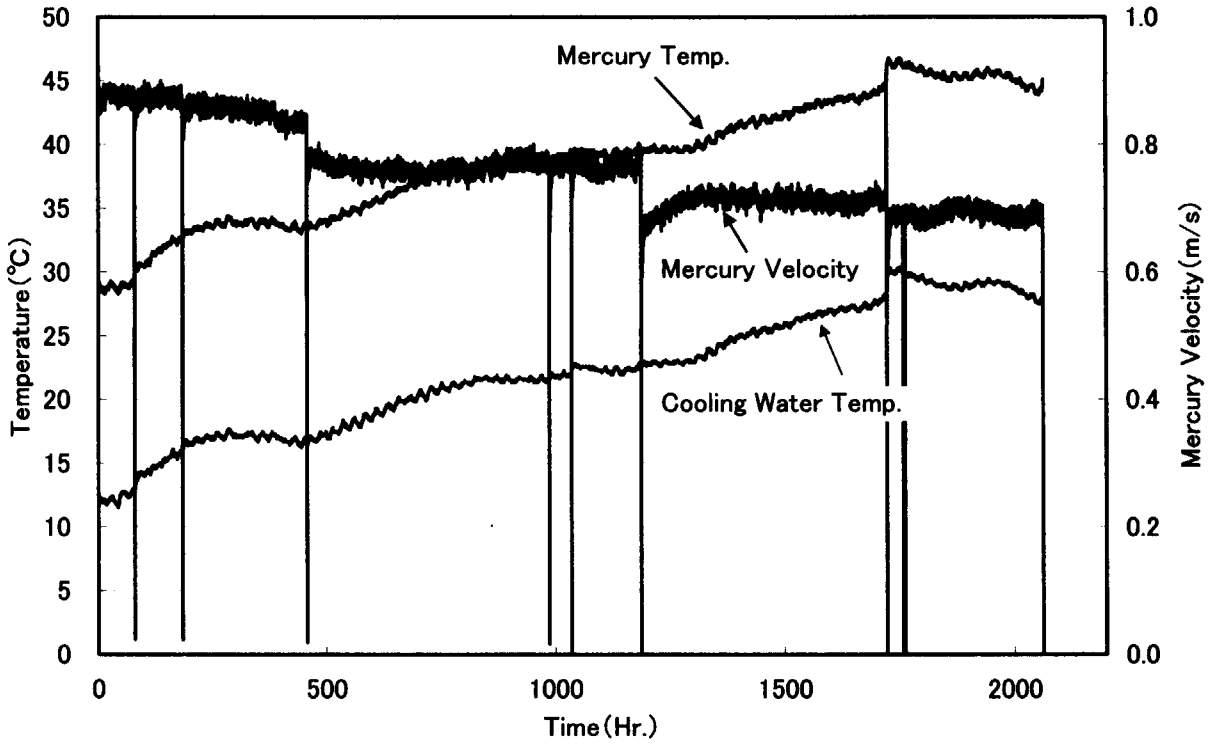


Fig. 9.2.4-6(1) Temperature and velocity histry during erosion test
(0～2000 hours)

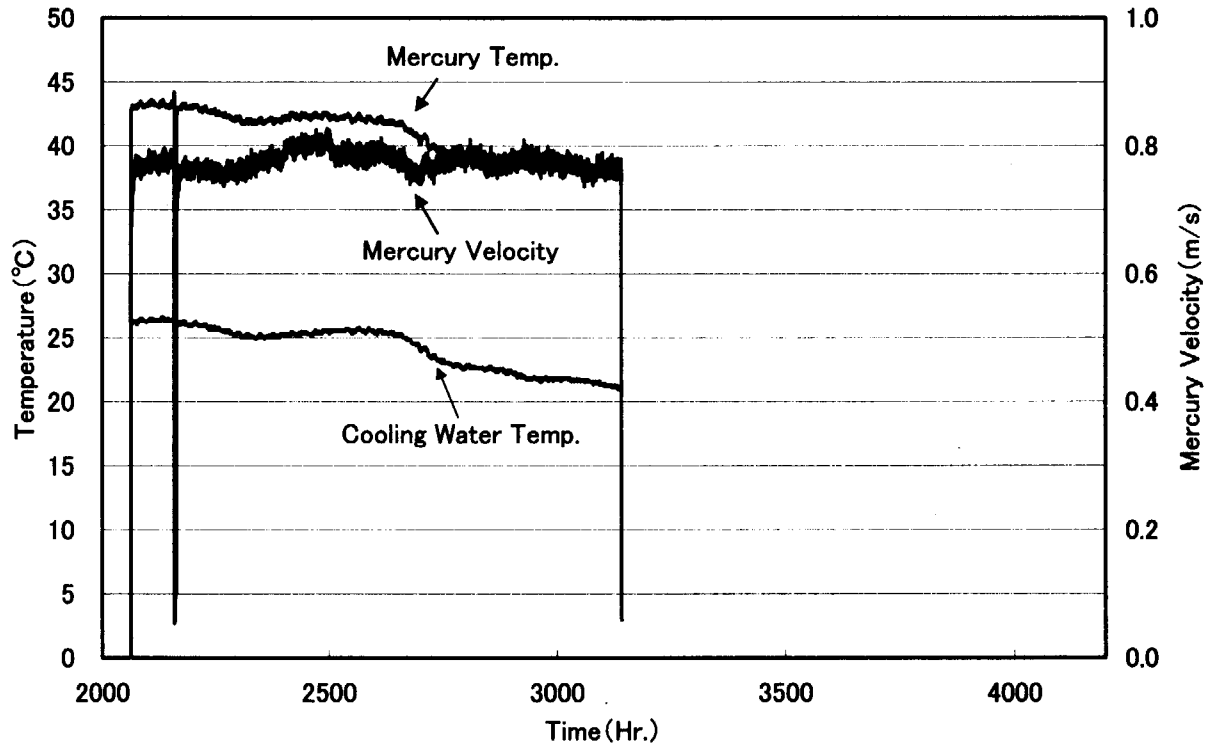


Fig.9.2.4-6(2) Temperature and velocity histry during erosion test
(2000～3000 hours)

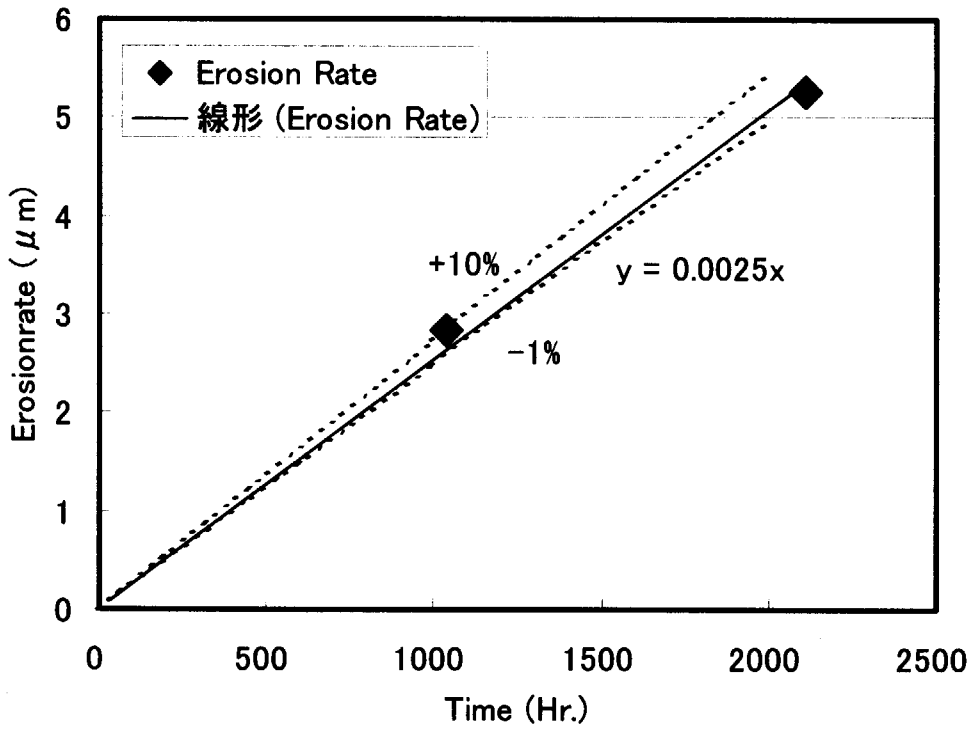


Fig.9.2.4-7 Erosion rate vs. Experimental time

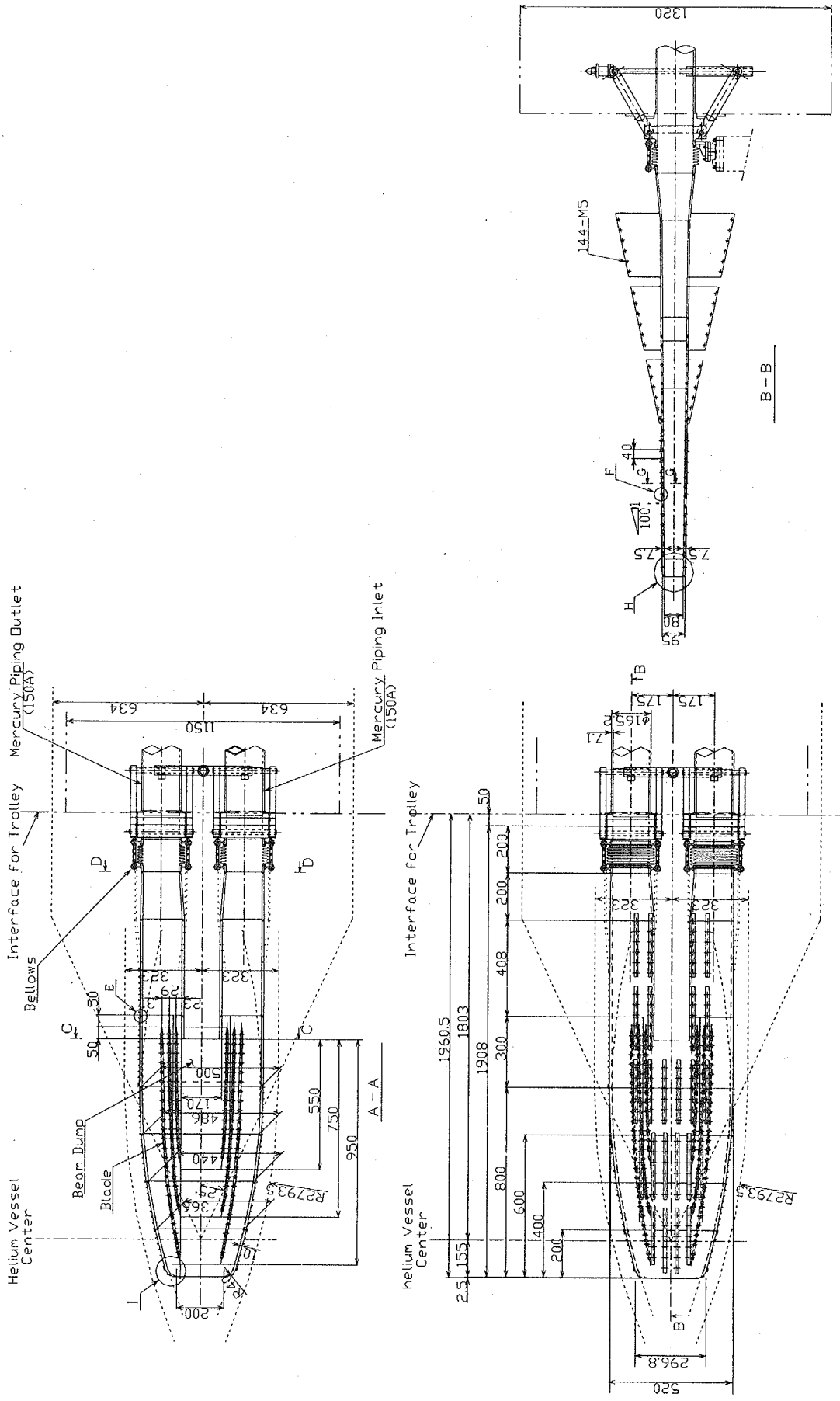


Fig.9.2.4-8 Detailed drawing of the mercury target

９．２．５　ギアポンプ特性試験

９．２．５．１　水銀循環用ギアポンプ設計指針

水銀を流動させるポンプとしては、電磁誘導の原理を用いた電磁ポンプと、遠心ポンプやギアポンプ（容積型）等の機械式ポンプに大別できる。

電磁ポンプは、機械的な稼動部が無くいことから耐エロージョン（損耗）性に優れ、軸受を必要としないことからシール性に関する問題を回避できるなど優れた特徴を有している。しかし、同一性能の機械式ポンプに比べ、①コイル部が大きくポンプ単体が大型になる、②消費電力が大きい、③電磁ポンプ用コイルの発熱が大きいため水銀温度が上昇する、④コイルの耐放射線性及び放射化等の問題点他が挙げられる。

一方、機械式ポンプは、往復式などの一部回転ポンプ以外の形式もあるが、往復式ポンプでは流れに大きな脈動を生じるため、ここでは遠心ポンプを代表とする回転式のポンプを設計検討の対象とした。機械式ポンプでは、羽根車やギアが回転することから、羽根車、ギア及びケーシングの耐エロージョン性、回転軸のシール性・耐久性等が問題となるものの、先に挙げた①～④に示す電磁ポンプを用いた場合の問題点が解消できる。さらに電磁ポンプよりも一層の小型化が可能であることから、設置スペースに制約の多い実機用ポンプとして電磁ポンプよりも有利である。ただし、遠心ポンプは、羽根車（インペラ）を液中で高速に回転し、これにより流体にエネルギを与えるもので、一般に容積型のギアポンプ（300rpm ～）に比べ回転数が高く（米国 SNS 計画の実規模水銀ループで採用した遠心ポンプの場合定格回転数は 600 rpm [1]）、インペラの耐エロージョン性を考えた場合には、ギアポンプに比べより厳しい条件にさらされる可能性が高い。

そこで、機械式ポンプとしては低回転で安定した流量を確保できるギアポンプを採用し、水銀流動用ギアポンプを試作して水銀流動基礎実験装置で試験を実施することとした。以下にギアポンプの設計方針を記す。

(1) 定格回転数は、300rpm 程度に低く抑える。

(2) 主要構成部品は、耐放射線性等のデータが豊富なステンレス鋼を用いる。

(3) 軸受けは給油の不要なメカニカルシールを採用する。

(5) 定格流量は、既設電磁ポンプと同様に 15 L/min とする。

(6) 吸込・吐出側接続部は、主配管と同じ 1 B (25A)とする。

９．２．５．２　水銀循環用ギアポンプ基本性能

水銀流動基礎実験装置を用いて実験を行うための水銀流動用ポンプの設計条件を以下に示す。

(1) 最大流量

15 L/min（既設電磁ポンプと同一に設定）

(2) 最高使用圧力

0.5 MPa

(3) 最高使用温度

473 K　(200 ℃、水銀ループとしての最高温度は80℃)

(4) 取扱流体

水　銀

水銀用ギアポンプの外観をFig.9.2.5-1に示す。また、主要な仕様を以下に示す。ポンプ本体は、幅180 mm、高さ 228 mm、全長 220 mmと流量が同程度の電磁ポンプに比べ小型である。駆動方式は、設置スペースに制約があるため、ポンプと駆動用電動機を並列に配置してVベルトによる駆動方式を採用した。

型　　式：Vベルト駆動式ギアポンプ
OHC-6 MG-46（大東工業(株)製）
流　　量：～15 L/min
定格回転数：350 rpm
圧　　力：吸込 0.10 MPa、吐出 0.25 MPa、全圧 0.25 MPa、差圧 0.15MPa
主要材質：ギア SUS630、シャフト SUS304、側板 SUS304、ケーシング SCS13
寸　　法：420 mm（全幅）、180 mm（ポンプ本体幅）、
220 mm（全長）、228 mm（高さ）
接続配管：25A(1B)、フランジ接続 JIS10K　1 B
設計圧力：1.08 MPa
設計温度：473　K
電動機：0.75 kW、4極、電源　三相 200V、50Hz
歯　　車：インボリュート、スーパーギア
軸　　受：ボールベアリング
軸　　封：メカニカルシール
数　　量：1台

ギアポンプの回転数測定のため、回転計を設置した。回転計には光電センサ方式非接触回転計を用い、ポンプ側プーリーに90度毎に反射板を取付け、低回転でも精度良く回転数を測定可能なように1回転当たり4パスルの信号を取り出して回転数を計測するようにした。回転計の設置状況をFig.9.2.5-1に示す。回転計の仕様は以下に示すとおりである。

型　　式：光電センサ方式非接触回転計
SP-522-AV（ユーアイニクス製）
出　　力：0～10 V（0～500 rpm）
センサ部：ファイバ型小型光電センサ
JRF-NC（オプティクス製）
応答周波数：最大1428 Hz（センサ部）

数　　量：　1台

9．2．5．3　ギアポンプ性能試験結果

ギアポンプは、回転ポンプの一種で容積式ポンプとして定義されるのものであり、ケーシングの中で二つの歯車をかみ合わせた構造を持つ。ポンプの作動原理は、2 個の歯車が回転する際、その歯と歯の谷間とケーシングとの空間に流れ込んだ液体が回転により吐出し口まで移動して送られるものである。ギアポンプは構造上、次のような特徴を有している。

① 構造が簡単であり、取り扱いが容易である。
② 吐出圧力の変化によらず、吐出量（流量）がほぼ一定である。
③ 回転数を変化させることによって、任意の吐出量が得られる。
④ 低粘土から高粘土まで、どのような液体にも使用できる。
⑤ 自吸引作用が強く、呼び水等は必要としない。
⑥ ポンプ容量、回転数に関係なく高圧が得られる。
⑦ 脈動が起こらない。

(1) 水銀用ギアポンプ特性曲線

水銀用ギアポンプ特性試験は、先ず、設備の整ったポンプ製作工場において実施した。工場で試験を実施するに当たっては、水銀を使用することが出来ないため、粘度が水銀に近い試験用油を用いた。水銀の粘度は、300K で 1.52 mPa·s、500K で 1.02 mPa·s であり、試験に用いた油は熱媒油ハイサーム 100 で、粘度は 413K で 4 mPa·s である。ギアポンプの特性は、流体の粘度によって異なってくる。粘度が高くなると歯車とケーシングの隙間からの漏れ量が減り、容積効率が増加するため流量が増加し、また、所要動力が増加する傾向を示す。

Fig.9.2.5-2 にギアポンプの特性曲線を、Table 9.2.5-1 にポンプの特性測定結果をそれぞれ示す。試験点は回転数一定の条件で、吐出圧を 0.5、1.0、1.5 kg/cm^2 に設定して吐出量を計測するとともに、ポンプ効率、容積効率等を評価した。本ポンプの内部詳細寸法は、公開されていないが 1 回転当たりの理論量は 75.3 cc/rev である。

Fig.9.2.5-2 から明らかなようにポンプ特性試験で変化させた吐出圧力の範囲 0.5～1.5 では、吐出量（流量）は 25～22.3L/min の範囲にあって大きく変化せず、設計流量 15 L/min を十分満足する結果が得られた。吐出量を理論量（75.3 cc/rev ×回転数）で割った容積効率（体積効率）は、吐出圧力の増加とともに低下する。容積効率η_{ϖ}は、工作精度の影響を大きく受け、精度が悪いときには非常に小さくなり、精度のよいポンプでは、η_{ϖ}=0.85～0.95 である[2]。本試験ではη_{ϖ}=90.7～81.4%であり、本ポンプの工作精度は非常に高いものである。

(2) 水銀流動基礎実験装置における水銀用ギアポンプ特性

Fig.9.2.5-3 に横軸にポンプ回転数を変化させた場合の流量及び理論吐出量を示す。理論吐出量は、1 回転当たりの理論量（75.3 cc/rev）と回転数から求めたものである。ギアポンプ流量は、Fig.9.2.5-3 に示すように回転数に比例して増加し、定格回転数 350rpm において設計流量 15L/min を約 8L/min も上回る 23.1 L/min を達成した。流量が回転数に比例することから、ギアポンプの回転数と流量の関係を予め校正しておけば、回転数により流量を評価することが可能である。本ギアポンプを水銀ループに設置した状態における、回転数と流量の関係は次式で表される。

$$Q = 0.0645 \times N + 0.18$$

ここで、Q　：流量　(L/min)

N.　：ポンプ回転数　(rpm)

定格回転数における理論吐出量に対する比（容積効率）は約 88％であり、工場においてハイサーム油を用いた場合に比べ高い効率を示し、ギアポンプが水銀に対して優れた特性を示すことが明らかとなった。なお、回転数 50rpm 以下ではポンプ駆動用モーターのトルクが不足し、回転数が不安定となるためデータを取得できなかった。回転数 50rpm における水銀流量は、3.5L/min である。

Fig.9.2.5-4 にインバータ周波数とポンプ回転数の関係を、Fig.9.2.5-5 にインバータ周波数とモーター電圧の関係をそれぞれ示す。ポンプ周波数 10Hz、回転数約 50rpm で安定した運転を達成した後は、定格回転数までほぼリニアに周波数に比例して回転数が増加する。周波数 10Hz での電圧は約 90V で、周波数 44Hz で定格電圧約 200V に到達した。Fig.9.2.5-6 にインバータにより回転数を変化させた場合の流量とポンプ出入口圧力及びポンプ全圧の変化を示す。ポンプ出入口圧力は、ポンプ入口側（冷却器出口）及びポンプ出口側（テストセクション入口）に設置した圧力計による実測値に基づき、ポンプ出入口と圧力計の高低差、配管・エルボー及び弁の圧力損失計算値に基づき評価したものである。

配管の壁面摩擦係数は次に示すブラジウスの式[3]により求めた。また、圧力損失計算では、水銀温度の実測値に基づき水銀温度を 26℃とした。

$$\lambda = 0.3164 \cdot Re^{-0.25}$$

ここで、λ　：壁面摩擦係数　(-)

Re　：レイノルズ数　(-)

適用範囲：$2000 < Re < 10^5$

また、90° エルボー、45° エルボーについては、次に示す式により全損失係数ζを求めた[3]。

$$\zeta = 0.00241\alpha\theta Re^{-0.17}\left(\frac{R}{a}\right)^{0.84}$$

ここで、ζ　：全損失係数　(-)

a ：管の内半径 (m)

R ：ベンド中心の曲率半径 (m)

Re ：レイノルズ数 (-)

θ ：角度 (°)

α ：θ=45° では $\alpha = 1 + 14.2\left(\frac{R}{a}\right)^{-1.47}$

θ=90° では $\alpha = 0.95 + 17.2\left(\frac{R}{a}\right)^{-1.96}$ R/a＜19.7

$\alpha = 1$ R/a＞19.7

ポンプ出入口には、ベローズシールグローブ弁が各 1 基設置してある。これらの弁の Cv 値は、5.8 である。Cv 値の定義は、次式で表される。

$$Cv = \frac{Q}{\sqrt{\frac{\Delta P}{S.G.}}}$$

ここで、Cv ：Cv 値 (-)

Q ：流量 (Gallons/min)

$S.G.$ ：60°F の水を 1 ときの比重(-)

ΔP ：差圧（圧力損失） (psi)

上式を単位変換して流量を L/min、圧力を Pa で表すと次式となり、この式によりベローズシールグローブ弁の圧力損失を求めた。

$$Cv = \frac{21.9 \cdot Q}{\sqrt{\frac{\Delta P}{S.G.}}}$$

ここで、Cv ：Cv 値（=5.8） (-)

Q ：流量 (L/min)

$S.G.$ ：15°C の水を 1 ときの比重(-)

ΔP ：差圧（圧力損失） (Pa)

試験は、テストセクション出口側に設けた膨張ポット内の圧力を一定に保って実施した。このため、Fig.9.2.5-6 に示すように流量の増加と共にポンプ出口の圧力が増加し、ポンプ入口側の圧力が低下している。

定格回転数 350rpm 運転時のポンプ全圧は 4.23 kg/cm^2、流量は 23.1 L/min、モーター入力は 360W である。Table9.2.5-1 に示した工場試験結果からモーター効率を約 70%と仮定すると、モーター出力（ポンプ入力）は 256W となる。一方、ポンプ全圧 4.23 kg/cm^2 と流量 23.1 L/min から理論動力は、次式のように 160W と求められるので、この時のポンプ効率は約 63%となる。

$$L = P_T \times W \times g$$
$$= (4.23 \times 10000) \cdot \frac{23.1}{(1000 \times 60)} \times 9.80665 = 159.6\ W$$

ここで、L　：理論動力　($kg \cdot m^2/s^3 = J/s = W$)

P_T　：ポンプ全圧　(kg/m^2)

W　：流　量　(m^3/s)

g　：重力加速度　(m/s^2)

水銀ループにおけるギアポンプ特性の測定結果をまとめたものを Table 9.2.5-2 に示す。Table 9.2.5-1 に示した工場におけるポンプ特性試験結果と定格回転数 350rpm における試験結果を比べると効率が大幅に増加していることがわかる。この理由は、ポンプ効率がポンプ全圧の増加とともに増加する傾向を示すためである。また、ポンプ全圧が増加したため、ポンプ駆動用モーターの出力も増加している。駆動用モーターの最大出力は 750W であるため、モーター効率 70％を仮定しても本ギアポンプ駆動用モーターとしては十分な余裕があり、水銀ループの圧力損失がさらに増加しても、設計流量の 15L/min を十分確保できる能力がある。

本試験結果からポンプ効率を 60%、モーター効率を 70％と仮定し、実機水銀循環系で 2 台のギアポンプにより $50m^3/h$ の流量確保し、かつ、ポンプ全圧を $5kg/cm^2$ とした場合、理論動力は 3.4kW となるので、ギアポンプ駆動用モータ出力は 1 台当たり 8.1 k W と求められ、比較的小型のモーターで対応が可能である。

参考文献

[1] T. Mason, “SNS Update”, Contributions to the 6th ESS General Meeting Vol. M4, ESS-99-99-M-4, 1999.

[2] 森北出版株式会社　流体機械、1975

[3] 日本機械学会　管路・ダクトの流体抵抗出版分科会編、”技術資料　管路・ダクトの流体抵抗”、1979

Table 9.2.5-1 Gear pump characteristic test results using oil

No.	圧力			ポンプ					
	吸込	吐出	全圧力	回転数	吐出量	理論量	容積効率	理論動力	備考
	kg/cm^2	kg/cm^2	kg/cm^2	r p m	L/min	L/min	%	k W	
1	0.0	0.5	0.5	366.0	25.0	27.6	90.7	0.020	
2	0.0	1.0	1.0	365.0	23.6	27.5	85.9	0.039	
3	0.0	1.5	1.5	364.0	22.3	27.4	81.4	0.055	
No.	圧力			モーター					
	吸込	吐出	全圧力	電圧	電流	入力	効率	出力	ポンプ効率
	kg/cm^2	kg/cm^2	kg/cm^2	V	A	k W	%	kW	%
1	0.0	0.5	0.5	205	2.75	0.30	61.0	0.18	11.1
2	0.0	1.0	1.0	205	2.80	0.32	68.5	0.22	17.6
3	0.0	1.5	1.5	205	2.83	0.34	69.0	0.23	23.2

Table 9.2.5-2 Gear pump characteristics test results using the mercury experimental loop

No.	圧力			ポンプ					
	吸込	吐出	全圧力	回転数	吐出量	理論量	容積効率	理論動力	備 考
	kg/cm^2	kg/cm^2	kg/cm^2	rpm	L/min	L/min	%	W	
1	2.14	2.34	0.20	68.3	4.7	5.1	90.7	1.5	
2	2.04	2.39	0.34	93.3	6.3	7.0	89.7	3.5	
3	1.85	2.46	0.61	126.2	8.5	9.5	89.0	8.5	
4	1.65	2.56	0.92	156.8	10.5	11.8	88.5	15.6	
5	1.40	2.67	1.28	187.3	12.5	14.1	88.3	26.0	
6	0.94	2.89	1.95	233.2	15.5	17.6	88.0	49.2	
7	0.58	3.05	2.48	265.4	17.6	20.0	87.9	71.1	
8	0.21	3.23	3.02	294.6	19.5	22.2	87.7	96.1	
9	-0.03	3.34	3.37	311.2	20.6	23.4	87.7	113.0	
10	-0.62	3.61	4.23	350.1	23.1	26.4	87.6	159.6	
No.	圧力			モーター					
	吸込	吐出	全圧力	電圧	電流	入力	効率*	出力	ポンプ効率
	kg/cm^2	kg/cm^2	kg/cm^2	V	A	W	%	W	%
1	2.19	2.30	0.11	130.4	1.97	147.9	70.0	103.6	1.5
2	2.12	2.31	0.19	109.7	2.00	126.8	70.0	88.8	4.0
3	1.99	2.32	0.33	125.6	2.12	153.9	70.0	107.7	7.8
4	1.86	2.35	0.49	138.5	2.23	178.1	70.0	124.7	12.5
5	1.70	2.37	0.67	151.4	2.26	197.4	70.0	138.2	18.8
6	1.41	2.42	1.01	168.6	2.43	236.5	70.0	165.6	29.7
7	1.18	2.45	1.27	180.8	2.72	284.3	70.0	199.0	35.7
8	0.96	2.49	1.53	190.3	2.91	319.7	70.0	223.8	42.9
9	0.81	2.51	1.71	196.4	3.00	340.2	70.0	238.2	47.5
10	0.43	2.56	2.13	207.2	3.02	360.6	70.0	252.4	63.2

*70%を仮定

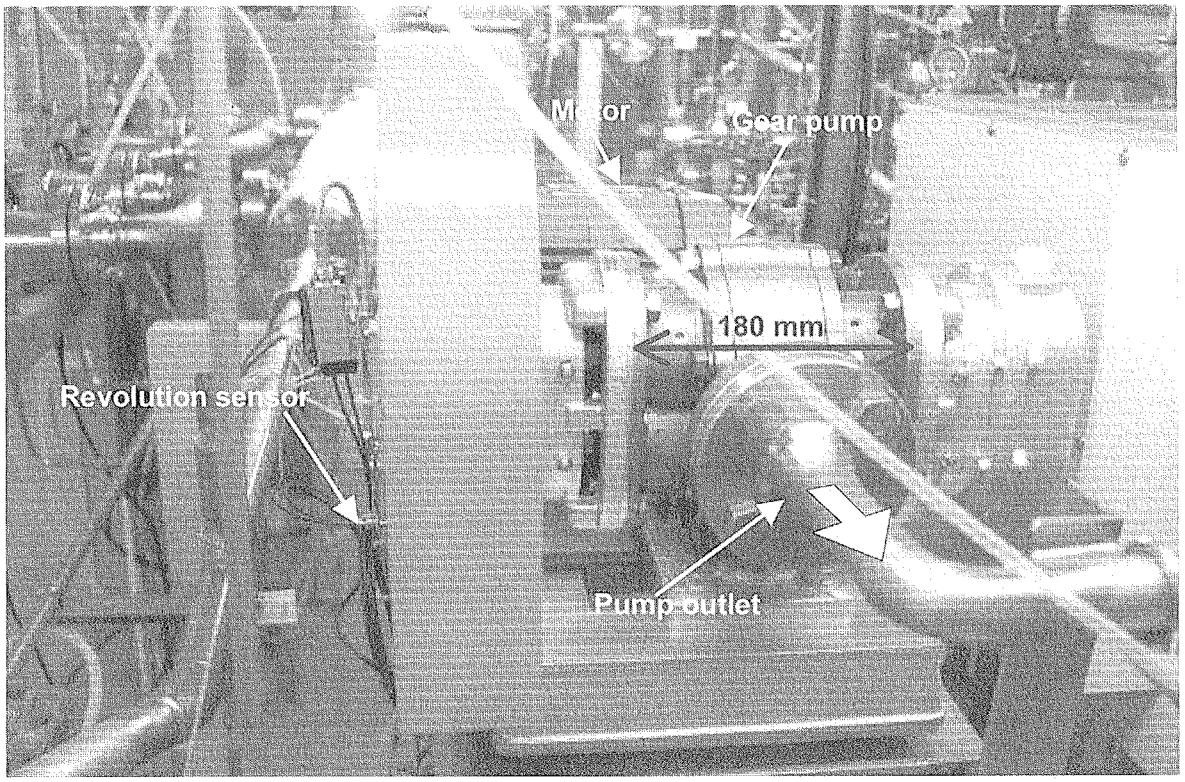


Fig.9.2.5-1 External view of the experimental gear pump

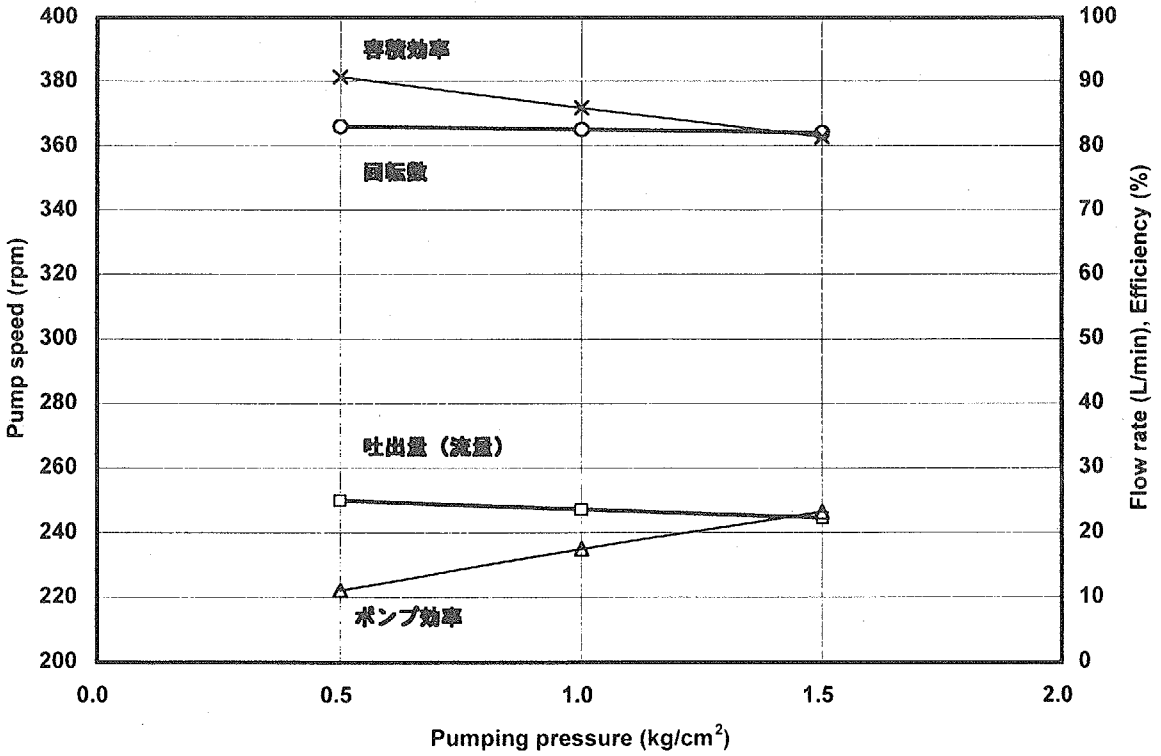


Fig. 9.2.5-2 Gear pump characteristic curve using oil

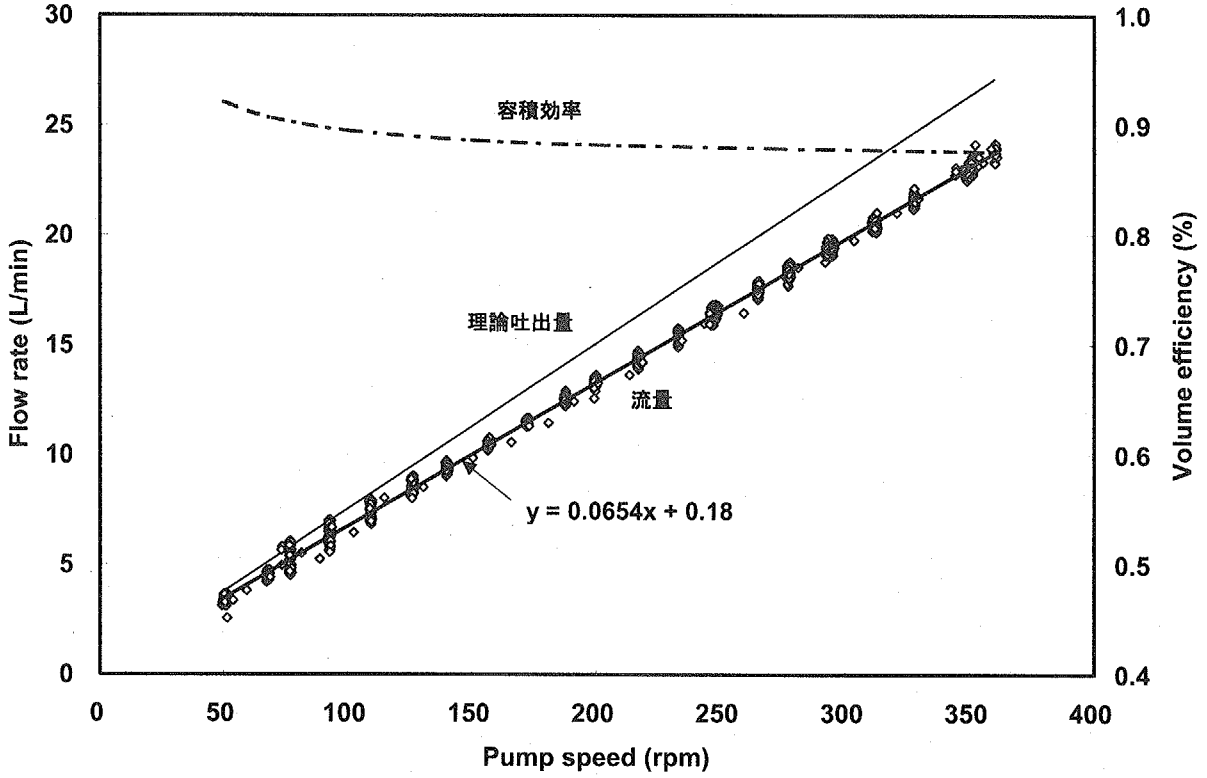


Fig.9.2.5-3 Gear pump flow rate and volume efficiency vs. Pump speed

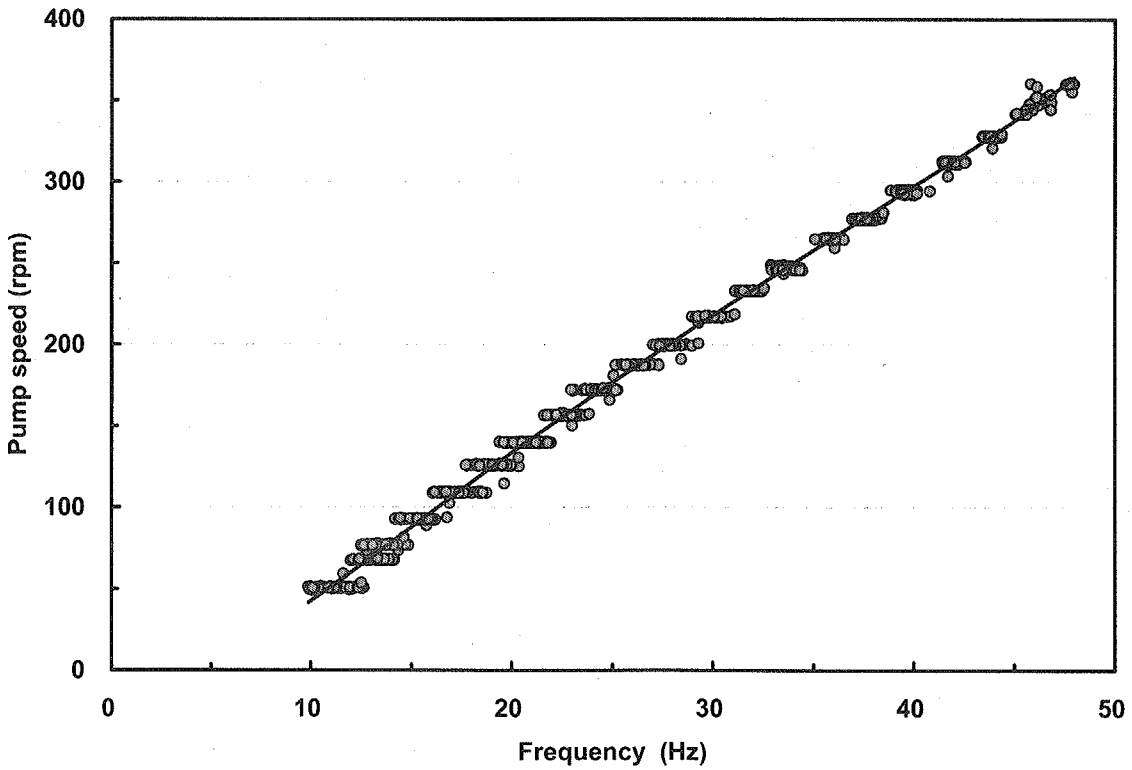


Fig.9.2.5-4 Frequency vs. pump speed

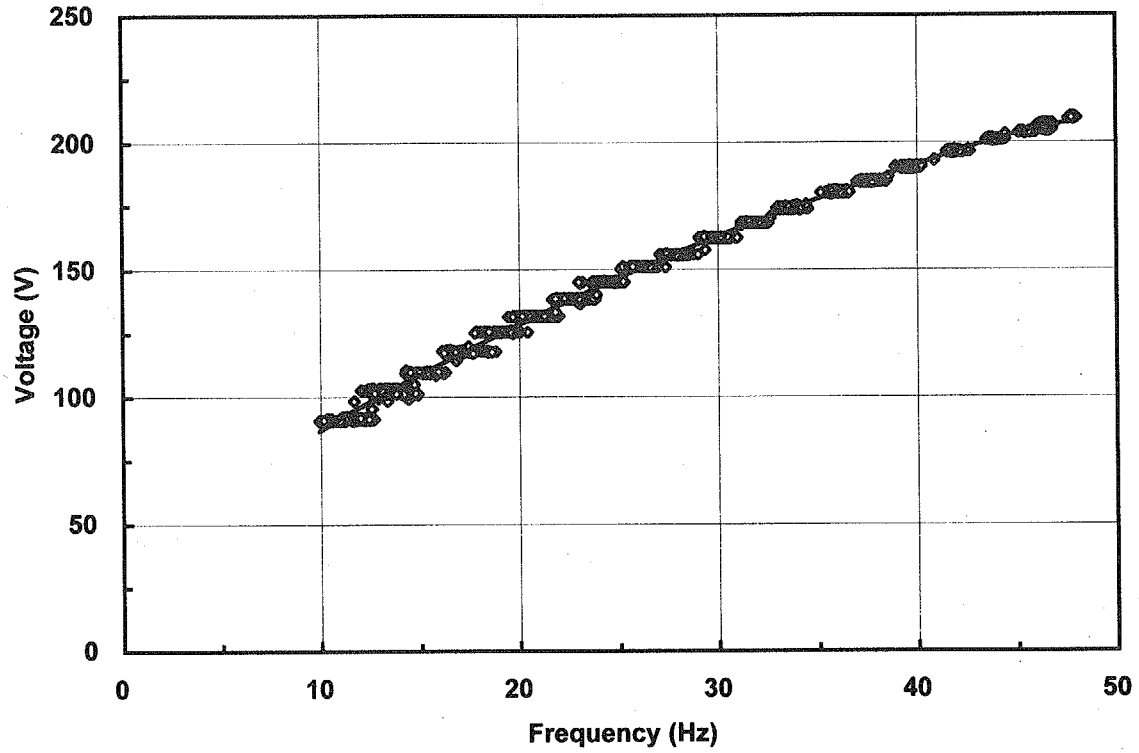


Fig.9.2.5-5 Frequency vs. Voltage

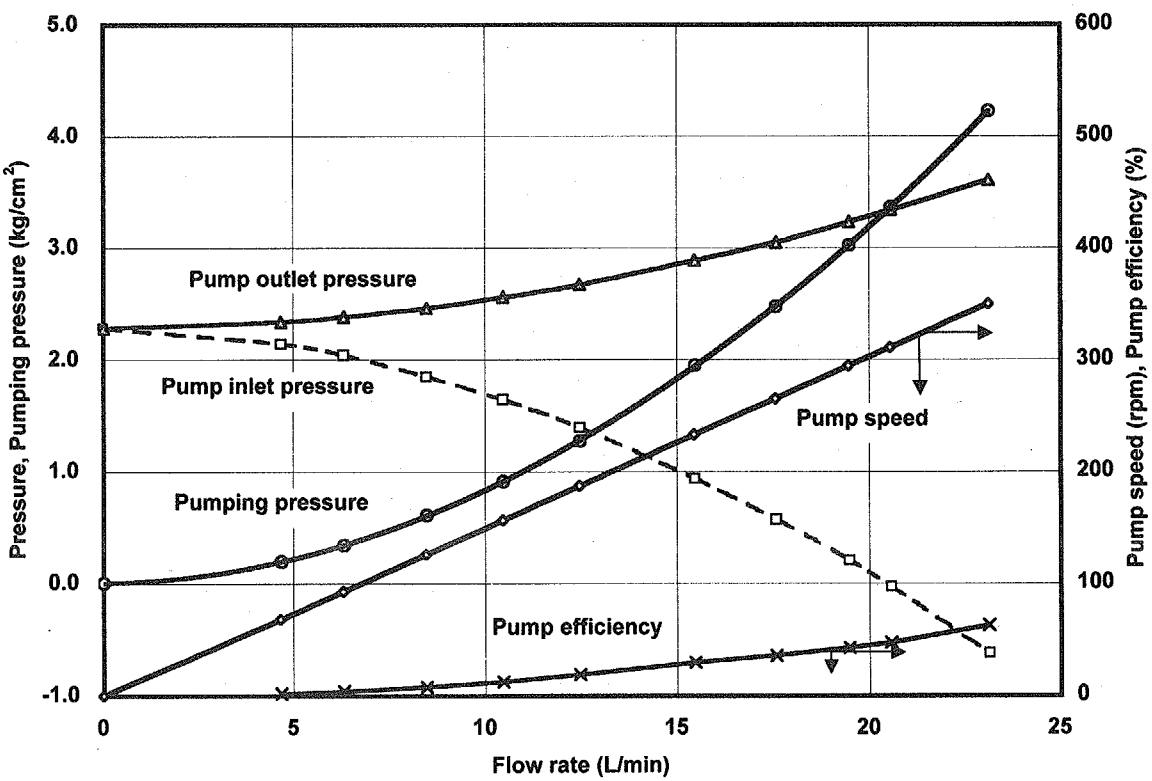


Fig.9.2.5-6 Pump inlet and outlet pressures, pumping pressure vs. Flow rate

９．２．６　水銀流動試験まとめ

水銀流動基礎試験装置を用いて、水銀流動試験を行ってきた結果として、以下の知見を得た。この知見は水銀流動システムを製作して行く上でシステムの合理化に役立てて行く。

(1) 計測した壁面摩擦係数データは既報の結果ともよく一致し、レイノルズ数 1×10^4 ～ 3.2×10^5 の範囲で+8%から-10%の偏差を考慮した上でブラジウスの式を設計に適用することが可能であることを明らかにした。

(2) 熱伝達率は Subbotin の式とよく一致しており以下の式のように表せることが明らかとなった。

$$Nu = 0.5603 Pe^{0.4475}$$

(3) 3 次元熱流動解析によって計算される熱伝達率は、メッシュサイズを y+が約 30 になるようにすることと、プラントル数を 1.5 とすることで実験値に対して一致した結果が計算できることを明らかとした。

(4) 1000 時間毎に測定したでエロージョン量はエルボーやレデューサ部分で 10mm 以下であり、直線部分では 0.7m/s の条件で約 3mm、1.6m/s の条件で約 6mm であり、であった。このことから、流速の増加によりエロージョン量が増える傾向にあることが明らかとなった。

(5) 経験的に得た関係式を用いると、実機水銀流動システムの定格流速の 0.7m/s での管壁等の減肉量は１年換算の 5000 時間で約 13mm（15%マージン含む）であり、３０年間に換算すると約 390mm と推定できる。しかし、この減肉量は構造強度低下に影響を与えるものではない。

(6) 配管残留水銀量は 50.7g/m^2 (3.74Hg-cm^3/m^2)と推定でき、ターゲット容器内（約 2.1m^2）には 約 106.5 g (7.9cm^3)の水銀が付着して残留すると推定できる。この量の水銀の放射能はターゲット容器に比べて 3 桁ほど低い値となる。

(7) ポンプ性能試験において、ギアポンプの吐出量と回転数は 50 ～ 360 rpm の間で比例関係であることを明らかとした。このことから、回転数を測定することでポンプ自体が流量計としても機能することが明らかとなった。

(8) ギアポンプ性の試験より推定する実機ポンプ(定格流量 41m^3/hr、吐出圧 0.2MPa、モーター効率 0.88 と仮定) の実効出力は 2.2 kW, ポンプ出力 4.5 kW 、モーター出力 6.4 kW となる。

Appendix A 各部の入熱量検討

A1. S.Box（セイフティボックス）内供給側配管

A1.1 該当部分

ＨＸ（熱交換器）出口側から各系統の分岐点までの配管。

A1.2 評価項目

①S.Box 壁面から配管への入熱を、等価熱伝導率を用いて評価する。

②配管サポート部の熱伝導は考慮しない。（S.Box 筐体からサポートを取らない、或いは断熱構造を考慮したサポートとする。）

A1.3 検討条件

①当該配管は下記条件のＳＩを施工する。

・ＳＩ層数；40

・ＳＩの厚さ＝40/57＝0.7(cm)

②当該配管のサイズ、長さは下記とする。

・サイズ；50Asch10S（外径 60.5mm、肉厚 2.8mm、内径 54.9mm）

・長さ；5(m)

③温度条件は下記とする。

・高温側（S.Box 壁面）；300K

・低温側（当該配管） ；20K

A1.4 等価熱伝導率に基づく入熱計算

①単位長当りの入熱

$$Q_0 = 2.09\times10^{-6}\times\frac{2\cdot\pi\cdot100}{ln\left(\frac{6.05+0.7\times2}{6.05}\right)}\times(300-20)=1.77\ \text{(W/m)}$$

②当該配管部の入熱

$$Q = Q_0\times5 = 8.9\ \text{(W)}$$

A2. S.Box 内戻り側配管

A2.1 該当部分

各系統からの合流点から熱交換器入口までの主回路配管。

A2.2 評価項目

A1.2 項と同様。

A2.3 検討条件

①当該配管長；20(m)

②上記以外は、A1.3 項と同様。

A2.4 等価熱伝導率に基づく入熱計算

①単位長当りの入熱

A1.4 項の①の結果から、1.77(W/m)とする。

②当該配管部の入熱

$$Q = Q_0 \times 20 = 35.4 \quad (W)$$

A3. S.Box 内戻り側機器

A3.1 該当機器と評価項目

①バッファタンク	本体部への入熱とサポートからの入熱
②循環ポンプ	ポンプ入熱とケーシングからの侵入熱
③触媒反応器	本体部への入熱とサポートからの入熱
④熱交換器	本体部への入熱とサポートからの入熱
⑤弁	駆動軸からの侵入熱

A3.2 バッファタンク

A3.2.1 検討条件

①ＳＩを施工する。ＳＩは57層（ＳＩの厚さは1cm）とする。

②タンクの形状は、直径0.7m、長さ0.8mの円筒とする。

A3.2.2 本体部への入熱

＜胴部＞ $$Q_1 = 2.09\times10^{-6} \times \frac{2\cdot\pi\cdot80}{ln\left(\frac{70+1\times2}{70}\right)} \times (300-20) = 10.44 \quad (W)$$

＜鏡部＞ $$Q_2 = 2.09\times10^{-6} \times \frac{2\cdot\pi/4\cdot70^2}{1.0} \times (300-20) = 4.51 \quad (W)$$

A3.2.3 サポートからの入熱

＜計算条件＞

①サポートは、材質ＳＵＳ、外径30mmの丸棒、長さ0.5m、４本とする。

②サポートの熱伝導率は、ハンドブックからＳＵＳの熱伝導積分値の300K時(=30.6W/cm)及び20K時(=0.163W/cm)の値を基に次式で求めた。

$$\lambda_{SUS} = \frac{30.6-0.163}{(300-20)} = 0.109 \quad (W/cm\text{-}K)$$

＜入熱計算＞

$$Q_0 = \frac{0.109\times\pi/4\times3^2\times(300-20)}{50} = 4.31 \quad (W/本)$$

サポート全体 $Q_3 = Q_0 \times 4 = 17.3$ (W)

A3.2.4 バッファタンク全体の入熱

$$Q_{BUF} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 10.44 + 4.51 + 17.3 = 33 \quad (W)$$

A3.3 循環ポンプ

A3.3.1 検討条件

①ポンプ効率は0.5とし、軸動力の全量が液体水素の温度上昇に寄与すると扱う。

②ケーシングからの侵入熱は、メーカカタログ値を参考に10(W)とする。

A3.3.2 ポンプ入熱

ポンプ入熱は次式で求める。

$$L_w = \frac{Q \times H}{\eta} \quad (\mathrm{W})$$

ここに、L_w ；軸動力(W)

Q ；体積流量(L/s)

H ；ポンプ揚程(kPa)

η ；ポンプ効率＝0.5 と扱う。

ポンプ入熱を検討するためのプラント状態を下記と設定する。

・主回路の循環流量　　180(g/s)=2.4(L/s)

・主回路の圧損　　50(kPa)

・分岐回路の圧損　　65(kPa)

ポンプ入熱は、$L_w = \frac{2.4 \times (50+65)}{0.5} = 552$ (W)

（注記；ポンプ入熱は、プラント状態の設計進捗に合わせ、適宜見直すものとする。）

A3.3.3 循環ポンプ全体の入熱

$$Q_{pump} = 10 + 552 = 562 \quad (\mathrm{W})$$

A3.4 触媒反応器

A3.4.1 検討条件

①ＳＩを施工する。ＳＩは57層（ＳＩの厚さは1cm）とする。

②形状は、直径0.5m、長さ1.2mの円筒相当とし、外表面積は$2m^2$とする。

A3.4.2 本体部への入熱

$$Q = 2.09 \times 10^{-6} \times \frac{2 \times 10^4}{1.0} \times (300 - 20) = 11.7 \quad (\mathrm{W})$$

A3.4.3 サポートからの入熱

＜計算条件＞

①サポートは、材質ＳＵＳ、外径30mmの丸棒、長さ0.5m、４本とする。

②サポートの熱伝導率は、A3.2.3項と同様に$\lambda_{SUS} = 0.109$ (W/cm-K)とする。

＜入熱計算＞

・サポート全体の入熱は、A3.2.3項と同様に17.3(W)とする。

A3.4.4 触媒反応器全体の入熱

$$Q_{cat} = 11.7 + 17.3 = 29 \quad (\mathrm{W})$$

A3.5 熱交換器

A3.5.1 検討条件

①ＳＩを施工する。ＳＩは57層（ＳＩの厚さは1cm）とする。

②熱交換器の形状は、0.6mH×1.2mH×0.5mD とし、外表面積は 3.5m^2 とする。

A3.5.2 本体部への入熱

$$Q = 2.09\times10^{-6}\times\frac{3.5\times10^{4}}{1.0}\times(300-20) = 20.5 \quad (\mathrm{W})$$

A3.5.3 サポートからの入熱

＜計算条件＞

①サポートは、材質ＳＵＳ、外径 30mm の丸棒、長さ 0.5m、４本とする。

②サポートの熱伝導率は、A3.2.3 項と同様に $\lambda_{SUS} = 0.109$ (W/cm-K)とする。

＜入熱計算＞

・サポート全体の入熱は、A3.2.3 項と同様に 17.3(W)とする。

A3.5.4 熱交換器全体の入熱

$$Q_{HX} = 20.5 + 17.3 = 38 \quad (\mathrm{W})$$

A3.6 弁

低温工学ハンドブックのデータから、弁サイズ 50A、エクステンション長さ 0.5m での侵入熱は 6W/台と記載があり、この値を使用する。

弁は合計 10 台とし、ＰＭ、ＤＭ、ＣＭ、バイパス系に各 1 台（各 6W）、その他の分岐配管に 6 台（計 36W）とする。

A4. S.Box 内分岐配管

A4.1 該当配管

①水素（ガス）供給用配管（1/2B）

②安全弁用配管（2B）

③その他配管（1/2B）

A4.2 評価項目

該当配管は、通常運転時に液体水素の流動がないので、S.Box 貫通部からの熱伝導のみを考慮する。

A4.3 検討条件

①考慮する配管のサイズと本数

・2Bsch10s　　外径 60.5mm、内径 54.9mm、長さ 0.5m、３本

・1/2Bsch5　　外径 21.7mm、内径 18.4mm、長さ 0.5m、９本

②温度条件　　高温側 300K、低温側 20K

③熱伝導率（ＳＵＳ）：0.109(W/cm-K)

A4.4 入熱計算

＜2B 配管＞

$$Q_{2B} = 0.109\times\frac{\pi/4\times\left(6.05^2 - 5.49^2\right)}{50}\times(300-20) = 3.1 \quad (\mathrm{W/本})$$

全体で、9.3(W)

＜1/2B 配管＞

$$Q_{1/2B} = 0.109 \times \frac{\pi/4 \times \left(2.17^2 - 1.84^2\right)}{50} \times (300 - 20) = 0.7 \quad (\text{W/本})$$

全体で、6.3(W)

A4.5 当該部分の合計入熱

9.3+6.3＝15.6(W)

A5. ＰＭ系分岐点～合流点

A5.1 該当配管

①分岐点～S.Box 出口の供給側配管

②S.Box 出口～ヘリウムベッセル頂部まで（輸送管）の供給側配管

③交換プラグ内の並行管部の供給側配管

④交換プラグ内の同軸管の供給側配管

⑤ＰＭ本体

⑥交換プラグ内の同軸管の戻り側配管

⑦交換プラグ内の並行管の戻り側配管

⑧ヘリウムベッセル頂部～S.Box 入口まで（輸送管）の戻り側配管

⑨S.Box 入口～合流点の戻り側配管

A5.2 分岐点～S.Box 出口の供給側配管

A5.2.1 検討項目

①A1.1 項（S.Box 内供給側配管）と同様

②弁（1 台）

A5.2.2 検討条件

①当該配管のサイズ、長さは下記とする。

・サイズ；外径 25.4mm、肉厚 2mm、内径 21.4mm

・長さ；1m

②その他の条件は A1.3 項（S.Box 内供給側配管）と同様。

A5.2.3 入熱計算

①単位長さ当りの入熱

A1.4 項（S.Box 内供給側配管）と同様の計算により、0.9(W/m)。

②当該配管部の入熱は、0.9(W)。

A5.2.4 弁　　6（W/台）×1 台＝6(W)

A5.2.5 当該部分の合計

0.9+6＝6.9(W)

A5.3 S.Box 出口～ヘリウムベッセル頂部まで（輸送管）の供給側配管

A5.3.1 検討項目

①当該配管への入熱を、等価熱伝導率を用いて考慮する。

②配管サポート部の熱伝導を考慮する。

③継手部の熱伝導を考慮する。

A5.3.2 等価熱伝導率に基づく入熱計算

(1) 検討条件

①当該配管は下記条件のＳＩを施工する。

・ＳＩ層数；40　　・ＳＩの厚さ＝40/57＝0.7(cm)

②当該配管のサイズ、長さは下記とする。

・サイズ；外径 25.4mm、肉厚 2mm、内径 21.4mm　　・長さ；20(m)

③温度条件は下記とする。

・高温側（真空用配管壁面）；300K　　・低温側（液体水素用配管）；20K

(2) 入熱計算

①単位長当りの入熱

$$Q_0 = 2.09\times10^{-6}\times\frac{2\cdot\pi\cdot100}{ln\left(\frac{2.54+0.7\times2}{2.54}\right)}\times(300-20)=0.84 \quad (\mathrm{W/m})$$

②当該配管部の入熱

$$Q = Q_0\times20 = 16.8 \quad (\mathrm{W})$$

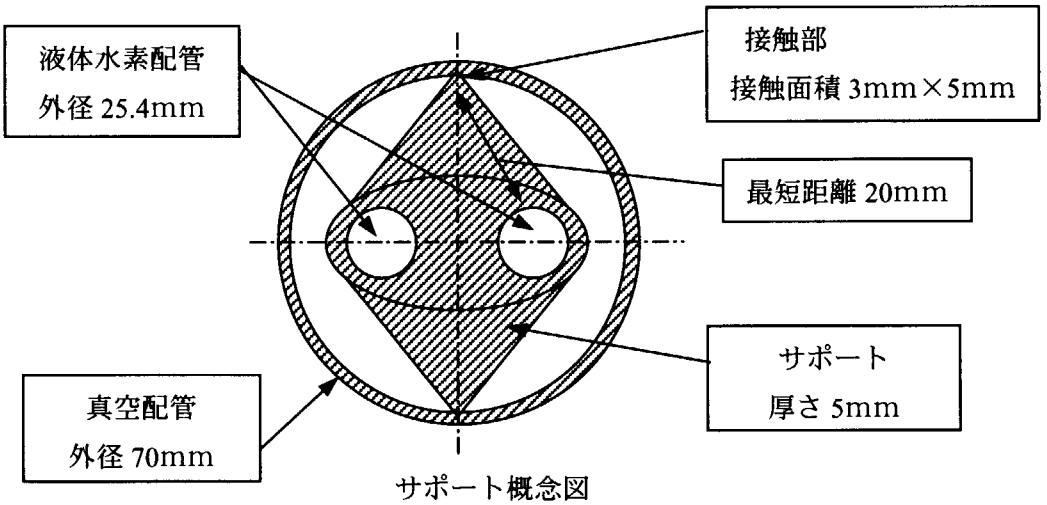
A5.3.3 サポートからの侵入熱

(1) 検討条件

①サポートは、材質テフロン、厚さ 5mm、取り付け間隔 2m 毎（合計 10 枚）とする。

②テフロンの熱伝導率は、300K 時の熱伝導積分値 70.2(W/m)、20K 時の熱伝導積分値 1.64(W/m)から、2.45×10^{-3}(W/cm-K)を使用する。

③サポート（1 枚当り）と真空配管との接触は、幅 3mm、厚さ 5mm、2 箇所接触、サポート中の熱伝導最短距離を 20mm とする。



サポート概念図

(2) 入熱計算

$$Q_0 = 2.45\times10^{-3}\times\frac{0.3\times0.5\times2}{2}\times(300-20)=0.1 \quad (\mathrm{W/枚})$$

サポート 10 枚では 1(W)。

A5.3.4 継手部の熱伝導

(1) 検討条件

①材質ＳＵＳで熱伝導率は、0.109(W/cm-K)とする。

②配管は 50Asch10S（外径 60.5mm、肉厚 2.8mm）で該当部分の長さを 0.5m とする。

③該当箇所は S.Box と輸送管の継手部、及びヘリウムベッセル頂部での輸送管と交換プラグの並行管の継手部で、合計 2 箇所とする。

(2) 入熱計算

$$Q_0 = 0.109 \times \frac{\pi/4 \times \left(6.05^2 - 5.49^2\right)}{50} \times (300 - 20) = 3.1 \ \text{(W/箇所)}$$

継手部 2 箇所で、$Q = 3.1 \times 2 = 6.2\,(\text{W})$

A5.3.5 当該配管の合計の侵入熱

S.Box 出口～ヘリウムベッセル頂部まで（輸送管）の供給側配管の侵入熱の合計は 24(W)。

A5.4 交換プラグ内の並行管部の供給側配管

A5.4.1 検討項目

①当該配管への熱放射による入熱を考慮する。

②配管サポート部の熱伝導を考慮する。

A5.4.2 熱放射に基づく入熱計算

(1) 検討条件

①当該配管はＳＩを施工しない。

②液体水素用配管のサイズ、長さは下記とする。

・サイズ；外径 25.4mm、肉厚 2mm、内径 21.4mm

・長さ；3.06(m)

・外表面積 0.08(m^2/m)、0.244(m^2)

③真空用配管のサイズ、長さは下記とする。

・サイズ；外径 70mm、内径 65.4mm

・長さ；3.06(m)

・内表面積 0.205(m^2/m)、0.629(m^2)

④温度条件は下記とする。

・高温側（真空側配管壁面）；300K

・低温側（液体水素用配管）；20K

(2) 熱放射の計算

①単位長さ当りの入熱

$$Q_0 = \frac{\sigma \times A_1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{A_1}{A_2} \times \left(\dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \times \left(T_2^{\,4} - T_1^{\,4}\right) \ \text{(W/m)}$$

ここに、σ：ステファン・ボルツマン係数＝5.67E-8(W/m^2-K^4)

ε_1：内部物体の放射率；ＳＵＳ20K＝0.13

ε_2 ：外部物体の放射率；ＳＵＳ300K＝0.34

A_1 ：内部物体の単位長当りの外表面積＝0.08(m^2/m)

A_2 ：外部物体の単位長当りの内表面積＝0.205(m^2/m)

T_1 ：内部物体の温度＝20K

T_2 ：外部物体の温度＝300K

数値を代入すると、4.4(W/m)。

②当該配管部の入熱

$$Q = Q_0 \times 3.06 = 13.5 \quad (W)$$

A5.4.3 サポートからの侵入熱

(1) 検討条件

①サポートは、材質ＳＵＳ、厚さ 5mm、合計 3 枚、形状は A5.3.3 項と同様とする。

②ＳＵＳの熱伝導率は、0.109(W/cm-k)を使用する。

(2) サポートからの入熱計算

$$Q_0 = 0.109 \times \frac{0.3 \times 0.5 \times 2}{2} \times (300 - 20) = 4.6 \quad (W/枚)$$

サポート 3 枚では 13.8(W)。

A5.4.4 該当部分の侵入熱の合計

交換プラグ内並行管部の供給側配管の合計侵入熱は 27.3（W)。

A5.5 交換プラグ内の同軸管の供給側配管

①供給側は同軸管の内側なので熱放射による入熱を評価しない。

②サポートからの熱伝導も同様に評価しない。

従って、同軸管の供給側は外部からの熱侵入は無いものとして扱う。

A5.6 ＰＭ本体

A5.6.1 検討項目

①核発熱による入熱を評価する。

②容器本体の熱放射による入熱を評価する。

③容器本体のサポートによる熱伝導を評価する。

A5.6.2 核発熱による入熱

ＰＭの核発熱合計は 1026(W)。詳細は本文 2.1 項（主要な検討条件）を参照。

A5.6.3 熱放射による入熱

(1) 検討条件

①ＰＭ（アルミ）のサイズは下記とする。

・13cm×12cm×6.2cm、外表面積＝0.0622m^2

②真空容器（アルミ）のサイズは下記とする。

・14cm×13cm×7.2cm、内表面積＝0.0753m^2

③温度条件は下記とする。

・高温側（真空容器壁面）；100℃＝373K

・低温側（冷減速材容器壁面）；20K

④放射率は下記とする。（本文 2.3 項参照）

・高温側；アルミ 373K＝0.17

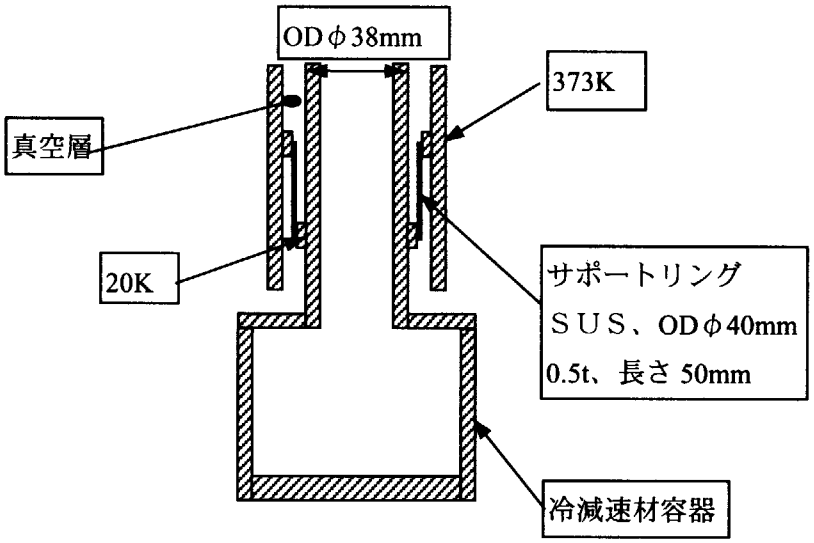
・低温側；アルミ 20K＝0.08

(2) 熱放射の計算

$$Q=\frac{5.67\times10^{-8}\times0.0622}{\frac{1}{0.08}+\frac{0.0622}{0.0753}\times\left(\frac{1}{0.17}-1\right)}\times\left(373^4-20^4\right)=4.1\ \text{(W)}$$

A5.6.4 サポートからの入熱

下図で想定するサポートリングの熱伝導を検討する。



サポートリングの熱伝導率を 0.15(W/cm-K)と想定する。

$$Q=0.15\times\frac{\pi/4\times\left(4^2-3.9^2\right)}{5}\times\left(373-20\right)=6.6\ \text{(W)}$$

A5.6.5 ＰＭ本体部の合計侵入熱

$$Q=1026+4.1+6.6=1036.7\ \text{(W)}$$

A5.7 交換プラグ内の同軸管の戻り側配管

A5.7.1 検討項目

①当該配管への熱放射による入熱を考慮する。

②配管サポート部の熱伝導を考慮する。

A5.7.2 熱放射に基づく入熱計算

(1) 検討条件

①液体水素側戻り配管（ＳＵＳ）のサイズは下記とする。

・ODφ38.1mm、2.0mmt、外表面積＝0.1197m^2/m、配管長 1.99m

②真空側配管（ＳＵＳ）のサイズは下記とする。

・ODφ70.0mm、2.3mmt、内表面積＝0.2055m^2/m

③温度条件は下記とする。

・高温側（真空配管壁面）；350K

・低温側（液体水素配管壁面）；20K

④放射率は下記とする。（本文 2.3 項参照）

・高温側；ＳＵＳ350K＝0.36

・低温側；ＳＵＳ20K＝0.13

(2) 熱放射の計算

$$Q_0 = \frac{5.67\times10^{-8}\times0.1197}{\frac{1}{0.13}+\frac{0.1197}{0.2055}\times\left(\frac{1}{0.36}-1\right)}\times\left(350^4-20^4\right)=11.7 \quad \text{(W/m)}$$

$$Q = Q_0\times1.99 = 23.3 \quad \text{(W)}$$

A5.7.3 サポートの熱伝導に基づく入熱計算

(1) 検討条件

①サポートは、材質ＳＵＳ、厚さ 5mm、合計 3 枚、形状は A5.3.3 項に類似（接触面積は 3mm×5mm、接触箇所は 2 箇所とする）。

②ＳＵＳの熱伝導率は、0.109(W/cm-K)を使用する。

③サポート部の熱伝導距離は 10mm とする。

(2) サポートからの入熱計算

$$Q_0 = 0.109\times\frac{0.3\times0.5\times2}{1}\times(373-20)=11.5 \quad \text{(W/枚)}$$

サポート 3 枚では、34.5(W)。

A5.7.4 該当部分の侵入熱の合計

同軸管戻り側配管の合計の侵入熱は、$Q = 23.3+34.5 = 57.8$ (W)。

A5.8 交換プラグ内の並行管の戻り側配管

A5.4 項（並行管部の供給側配管）と同様。合計の侵入熱は 27.3(W)。

A5.9 ヘリウムベッセル頂部～S.Box 入口まで（輸送管）の戻り側配管

A5.3 項（輸送管の供給側配管）と同様。合計の侵入熱は 24(W)。

A5.10 S.Box 入口～合流点の戻り側配管

(1) 検討条件

①該当配管の長さは 1m とし（A5.2 項と同様）、その他の条件も A5.2 項と同様とする。

(2) 入熱

当該配管部の入熱は、A5.2 項と同様に 0.9(W)。

A6. ＤＭ系分岐点～合流点

A6.1 該当配管

①分岐点～S.Box 出口の供給側配管

②S.Box 出口～ヘリウムベッセル頂部まで（輸送管）の供給側配管

③交換プラグ内の並行管部の供給側配管

④交換プラグ内の同軸管の供給側配管

⑤ＤＭ本体

⑥交換プラグ内の同軸管の戻り側配管

⑦交換プラグ内の並行管の戻り側配管

⑧ヘリウムベッセル頂部～S.Box 入口まで（輸送管）の戻り側配管

⑨S.Box 入口～合流点の戻り側配管

A6.2 分岐点～S.Box 出口の供給側配管

A5.2 項と同一の条件とする。

単位長さ当りの入熱は 0.9(W/m)で、当該配管部の入熱は 0.9(W)。

弁の侵入熱 6(W)を加え、合計 6.9(W)。

A6.3 S.Box 出口～ヘリウムベッセル頂部まで（輸送管）の供給側配管

A5.3 項と同一の条件とする。

等価熱伝導率に基づく入熱は 0.84(W/m)で、配管全長で 16.8(W)。

サポートからの侵入熱は 0.1(W//枚)で、2 枚では 1(W)。

継手部の熱伝導は 6.2(W)。

これらを合計して 24(W)とする。

A6.4 交換プラグ内の並行管部の供給側配管

ＤＭ系の並行管部の長さを 3.74(m)とする以外は A5.4 項と同一の条件とする。

熱放射による入熱は 4.4(W/m)で、配管全長で 16.5(W)。

サポートからの熱伝導は 4.6(W/枚)で、計 13.8(W)。

これらを合計して 30.3(W)とする。

A6.5 交換プラグ内の同軸管の供給側配管

A5.5 項と同様に、同軸管の供給側は外部からの熱侵入は無いものとして扱う。

A6.6 ＤＭ本体

核発熱以外は A5.6 項と同一の条件とする。

核発熱による入熱は 986(W)。

容器本体の熱放射による入熱は 4.1(W)。

サポートによる熱伝導は 6.6(W)。

これらを合計して 986+4.1+6.6＝996.7(W)。

A6.7 交換プラグ内の同軸管の戻り側配管

ＤＭ系の同軸管の長さを 2.09(m)とする以外は A5.7 項と同一の条件とする。

熱放射による入熱は 11.7(W/m)で、配管全長では 24.5(W)。

サポート部の熱伝導は 11.5(W/枚)で、計 34.5(W)。

これらを合計して 59(W)とする。

A6.8 交換プラグ内の並行管の戻り側配管

A6.4 項（並行管部の供給側配管）と同様。合計の侵入熱は 30.3(W)。

A6.9 ヘリウムベッセル頂部～S.Box 入口まで（輸送管）の戻り側配管

A6.3 項（輸送管の供給側配管）と同様。合計の侵入熱は 24(W)。

A6.10 S.Box 入口～合流点の戻り側配管

A5.10 項と同一の条件とする。当該配管部の入熱は 0.9(W)。

A7. ＣＭ系分岐点～合流点

A7.1 該当配管

①分岐点～S.Box 出口の供給側配管

②S.Box 出口～ヘリウムベッセル頂部まで（輸送管）の供給側配管

③交換プラグ内の並行管部の供給側配管

④交換プラグ内の同軸管の供給側配管

⑤ＣＭ本体

⑥交換プラグ内の同軸管の戻り側配管

⑦交換プラグ内の並行管の戻り側配管

⑧ヘリウムベッセル頂部～S.Box 入口まで（輸送管）の戻り側配管

⑨S.Box 入口～合流点の戻り側配管

A7.2 分岐点～S.Box 出口の供給側配管

A5.2 項と同一の条件とする。

単位長さ当りの入熱は 0.9(w/m)で、当該配管部の入熱は 0.9(W)。

弁の侵入熱 6(W)を加え、合計 6.9(W)。

A7.3 S.Box 出口～ヘリウムベッセル頂部まで（輸送管）の供給側配管

A5.3 項と同一の条件とする。

等価熱伝導率に基づく入熱は 0.84(W/m)で、配管全長で 16.8(W)。

サポートからの侵入熱は 0.1(W/枚)で、10 枚では 1(W)。

継手部の熱伝導は、6.2(W)。

合計で、24(W)とする。

A7.4 交換プラグ内の並行管部の供給側配管

ＣＭ系の並行管部の長さを 4.21(m)とする以外は A5.4 項と同一の条件とする。

熱放射による入熱は 4.4(W/m)で、配管全長で 18.5(W)。

サポートからの熱伝導は 4.6(W/枚)で、計 13.8(W)。

合計で、32.3(W)とする。

A7.5 交換プラグ内の同軸管の供給側配管

A5.5 項と同様に、同軸管の供給側は外部からの熱侵入は無いものとして扱う。

A7.6 ＣＭ本体

入熱を考慮する項目は A5.6 項と同一とする。

核発熱による入熱は 1739(W)。

サポートによる熱伝導は A5.6 項と同一で 6.6(W)。

容器本体の熱放射による入熱は下記とする。

(1) 検討条件

①ＣＭ（アルミ）のサイズは下記とする。

・φ15cm×高さ 11cm 円筒形、外表面積＝0.0872m^2

②真空容器（アルミ）のサイズは下記とする。

・φ16cm×高さ 12cm 円筒形、内表面積＝0.1005m^2

③温度条件は下記とする。

・高温側（真空容器壁面）；100℃＝373K

・低温側（冷減速材容器壁面）；20K

④放射率は下記とする。（本文 2.3 項参照）

・高温側；アルミ 373K＝0.17

・低温側；アルミ 20K＝0.08

(2) 熱放射の計算

$$Q=\frac{5.67\times10^{-8}\times0.0872}{\frac{1}{0.08}+\frac{0.0872}{0.1005}\times\left(\frac{1}{0.17}-1\right)}\times\left(373^4-20^4\right)=5.7\ \ (\mathrm{W})$$

従って、合計の入熱は 1739+6.6+5.7＝1751.3(W)。

A7.7 交換プラグ内の同軸管の戻り側配管

ＣＭ系の同軸管の長さを 3.54(m)とする以外は A5.7 項と同一の条件とする。

熱放射による入熱は 11.7(W/m)で、配管全長では 41.4(W)。

サポート部の熱伝導は、11.5(W/枚)で、計 34.5(W)。

合計で 75.9(W)とする。

A7.8 交換プラグ内の並行管の戻り側配管

A7.4 項（並行管部の供給側配管）と同様。合計の侵入熱は 32.3(W)。

A7.9 ヘリウムベッセル頂部～S.Box 入口まで（輸送管）の戻り側配管

A7.3 項（輸送管の供給側配管）と同様。合計の侵入熱は 24(W)。

A7.10 S.Box 入口～合流点の戻り側配管

A5.10 項と同一の条件とする。当該配管部の入熱は 0.9(W)。

A8. バイパス系分岐点～合流点

A8.1 該当配管

①分岐点～合流点（全て S.Box 内）（弁 1 台を含む）

A8.2 検討条件

①当該配管のサイズ、長さは下記とする。

・サイズ；外径 25.4(mm)

・長さ；分岐点～弁：2(m)

弁～合流点：2(m)

②ＳＩ施工する。ＳＩは 40 層、ＳＩ厚さは 0.7(cm)とする。

A8.3 等価熱伝導率に基づく入熱計算

①単位長当りの入熱

$$Q_0 = 2.09\times10^{-6}\times\frac{2\cdot\pi\cdot100}{ln\left(\frac{2.54+0.7\times2}{2.54}\right)}\times(300-20) = 0.84 \quad (\mathrm{W/m})$$

②当該配管部の入熱

$$Q = Q_0\times4 = 3.4 \quad (\mathrm{W})$$

A8.4 合計の侵入熱　　6+3.4＝9.4 (W)

Appendix B

等温圧力係数と体積膨張係数の変数変換について

一般な熱力学の教科書には、等温圧力係数κと体積膨張係数βの定義式として、以下の体積Vを用いた式で示されている。

$$\kappa = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \quad \text{及び} \quad \beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \qquad \cdots\cdots(B1)$$

これらの式においてVをρに変換する。Vとρは$V = 1/\rho$の関係にあるから、

$$\kappa = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T = -\rho\left(\frac{\partial}{\partial P}\left(\frac{1}{\rho}\right)\right)_T = -\rho\left(\frac{\partial}{\partial \rho}\left(\frac{1}{\rho}\right)\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T = -\rho\left(\left(-\frac{1}{\rho^2}\right)\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T$$

となる。同様にβも、

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P$$

となり、本文の式と一致する。

Appendix C

定常流における低速流の1次元圧縮性流体に関する方程式の開発

1 次元圧縮性流体の運動量の式は、以下に示される。

$$dP = -\frac{2fG^2}{\rho D}dx + \frac{G^2}{\rho^2}d\rho \quad \cdots\cdots\cdots(C1)$$

右辺第2項の密度変化 $d\rho$ の項には、等温圧縮率と体積膨張率を係数に持った以下の式を用いることが出来る。

$$\frac{d\rho}{\rho} = \kappa dP - \beta dT \quad \cdots\cdots(C2)$$

一方、図 1 に示す用に、単位面積当たり $\dot{q}(W/cm^2)$ のような入熱がある円管の体積要素におけるエネルギの式は、以下のように示される。

$$\pi D\dot{q}dx = \frac{\pi GD^2}{4}\frac{\partial}{\partial P}\left(H + \frac{v^2}{2}\right)_T dP + \frac{\pi GD^2}{4}\frac{\partial}{\partial T}\left(H + \frac{v^2}{2}\right)_P dT \quad \cdots\cdots(C3)$$

ここで、π は円周率、H はエントロピー、v は流体の速度である。

上式の偏微分項を実際に実行して、熱力学関数、等温圧縮係数、そして体積膨張率を用いて表現すると、以下のような式となる。

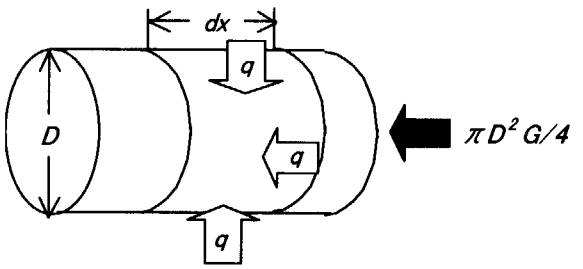


図 1　入熱のある円管流れ

$$\frac{4\dot{q}}{GD}dx = -\left(C_P\psi + \frac{G^2}{\rho^2}\kappa\right)dP + \left(C_P + \frac{G^2}{\rho^2}\beta\right)dT \quad \cdots\cdots\cdots (C4)$$

以上の(B1),(B2),(B4)の 3 式より、$d\rho$ を消去し、dP/dx、及び dT/dx を求めると、以下に示す各方程式が得られる。

$$\frac{dP}{dx}=\frac{-\frac{2fG^2}{\rho D}-\frac{4\beta G\dot{q}}{\rho D\left(C_P+\frac{G^2}{\rho^2}\beta\right)}}{1-\frac{G^2}{\rho}(\kappa+\beta\varphi)} \qquad \cdots\cdots\cdots(C5)$$

$$\frac{dT}{dx}=\frac{-\frac{2fG^2\varphi}{\rho D}+\frac{4\dot{q}\left(1-\frac{G^2}{\rho}\kappa\right)}{GD\left(C_P+\frac{G^2}{\rho}\beta\right)}}{1-\frac{G^2}{\rho}\kappa+\frac{G^2}{\rho}\beta\varphi} \qquad \cdots\cdots\cdots(C6)$$

$$\varphi=\frac{C_P\psi+\frac{G^2}{\rho^2}\kappa}{C_P+\frac{G^2}{\rho^2}\beta}\approx\psi+\frac{G^2\kappa}{\rho^2C_P} \qquad \cdots\cdots\cdots(C7)$$

実際の物性値や、低流速の条件を用いて、(C5)から(C7)式を使いやすい表式に変換する。たとえば、流速を3(m/s)程度とすると、

$$\frac{G^2}{\rho^2}\kappa=v^2\kappa=9(m^2/s^2)\times0.01\times10^{-6}(ms^2/kg)=9.0\times10^{-8}(m^3/kg)$$

$$\frac{G^2}{\rho^2}\beta=v^2\beta=9(m^2/s^2)\times0.01(1/K)=0.09(m^2/s^2K)\approx0.09(kJ/kgK)<<C_P$$

となり、これらの項は無視できるほど小さい。従って、これらの項をゼロとして
(C5)から(C7)式を書き直すと、

$$\frac{dP}{dx}=-\frac{2fG^2}{\rho D}-\frac{4\beta G\dot{q}}{\rho DC_P} \qquad \cdots\cdots\cdots(C8)$$

$$\frac{dT}{dx}=-\frac{2fG^2\varphi}{\rho D}+\frac{4\dot{q}}{GDC_P} \qquad \cdots\cdots\cdots(C9)$$

$$\varphi\approx\psi \qquad \cdots\cdots\cdots(C10)$$

と言うように、本編に示した(3)及び(4)が得られる。

This is a blank page.

国際単位系（SI）と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分，時，日	min，h，d
度，分，秒	°，′，″
リットル	l，L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10^{-19}J

1 u=1.66054×10^{-27}kg

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m\cdot kg/s^2$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N·m
工率，放射束	ワット	W	J/s
電気量，電荷	クーロン	C	A·s
電位，電圧，起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	℃	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10^{-10}m

1 b=100fm^2=10^{-28}m^2

1 bar=0.1MPa=10^{5}Pa

1 Gal=1cm/s^2=10^{-2}m/s^2

1 Ci=3.7×10^{10}Bq

1 R=2.58×10^{-4}C/kg

1 rad=1cGy=10^{-2}Gy

1 rem=1cSv=10^{-2}Sv

表5 SI接頭語

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

（注）

1．表1－5は「国際単位系」第5版，国際度量衡局 1985年刊行による。ただし，1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2．表4には海里，ノット，アール，ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3．barは，JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4．EC閣僚理事会指令ではbar，barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10^{5}dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度　1 Pa·s(N·s/m^2)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度　1 m^2/s=10^{4}St(ストークス)(cm^2/s)

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm^2	atm	mmHg(Torr)	lbf/in^2(psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10^7 erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1

1 cal= 4.18605J（計量法）

= 4.184J（熱化学）

= 4.1855J（15℃）

= 4.1868J（国際蒸気表）

仕事率　1 PS(仏馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

（86年12月26日現在）

大強度陽子加速器プロジェクト　物質・生命科学実験施設機器技術設計書

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています