JP9950295

JAERI-Tech
99-031

中性子科学研究計画における研究開発

1999年3月

中性子科学研究センター

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）で複写による実費頒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, 1999

編集兼発行　日本原子力研究所

中性子科学研究計画における研究開発

日本原子力研究所東海研究所
中性子科学研究センター

(1999年2月17日受理)

本報告書は、日本原子力研究所の中性子科学研究センター発足以来、平成１０年秋までの一年半の間に得た研究成果と、この期間を含む１０年間以上にわたる関連技術開発の成果をまとめたものである。この中では、1) 中性子科学研究計画の概要、2) 1.5 GeV, 5.3 mAビームを発生させる大強度陽子加速器(イオン源、リニアック、蓄積リング等)の設計検討及び研究開発、3) 物質科学に有力な手段を与える中性子散乱実験施設の設計検討及び同施設用核破砕ターゲットの研究開発、4) 基礎工学実験施設（ターゲット熱流動試験施設、材料照射試験施設、中性子核物理実験施設、消滅処理炉物理実験施設、消滅処理実験炉）の設計検討及び関連研究開発、5) 中性子科学にとって共通の基盤技術研究開発（ニュートロニクス、材料、中性子利用技術、計測技術）のほか、6) 大強度陽子加速器特有の放射線問題に焦点を当てた安全設計技術検討の状況について記述している。

東海研究所：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

Status of R&D for Neutron Science Project

Center for Neutron Science

Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 17, 1999)

This report summarizes the results of research and development (R&D) achieved in the period from April 1997 to September 1998 at the Center for Neutron Science, and the results of preceding R&D for about ten years in the Japan Atomic Energy Research Institute.

It describes, 1) outline of the Neutron Science Project, 2) design study and R&D of the most intense (1.5 GeV, 5.3 mA beam) proton accelerator (ion source, linac, accumulator ring, etc.), 3) design study of neutron scattering experiment facility and the R&D of its spallation neutron source which is expected to give prominent means to materials science, 4) design study of experiment facilities for basic engineering (thermal-hydraulics test facility for target development, materials irradiation test facility, neutron nuclear physics facility, transmutation reactor physics facility and experimental transmutation reactor) and related R&D, 5) basic technology researches (neutronics, materials, neutron utilization), and finally, 6) the basic policy of radiation safety design peculiar to a high power proton accelerator complex.

Keywords: Neutron Science, Proton Linear Accelerator, Neutron Scattering, Spallation Neutron Source, Nuclear Transmutation, Radiation Safety

目　次

1. 序言 1
2. 中性子科学研究計画の概要 3
2.1 中性子科学研究計画 3
2.2 中性子科学研究計画における国際協力 19
3. 加速器 25
3.1 加速器の設計現状 25
3.1.1 開発の概要 25
3.1.2 加速器開発の考え方 25
3.1.3 低エネルギー加速部 26
3.1.4 高エネルギー加速部の開発 27
3.1.5 高周波源 28
3.1.6 ビーム蓄積リング 28
3.1.7 まとめ 28
3.2 加速器の研究開発 33
3.2.1 イオン源・ビーム伝送系 33
3.2.2 RFQ 57
3.2.3 DTL/SDTL 72
3.2.4 超伝導リニアック 112
3.2.5 ＲＦシステム 132
3.2.6 蓄積リング 169
3.2.7 ユーティリティ 203
4. 中性子散乱実験施設 210
4.1 中性子散乱実験施設の設計 210
4.2 核破砕ターゲットの研究開発 218
5. 基礎工学実験施設 266
5.1 ターゲット熱流動実験施設 268
5.2 材料照射試験施設 278
5.3 中性子核物理実験施設 296
5.4 消滅処理炉物理実験施設 324
5.5 消滅処理実験炉 348
5.6 関連研究開発 371
6. 基盤技術 375
6.1 ニュートロニクス 375
6.2 材料 395
6.3 中性子利用技術 412

6.4 ＲＩイオン源 423
6.5 ビームロスモニタ 429
7. 放射線安全設計 433
8. 編集後記 453

Contents

1. Preface 1
2. Summary on Neutron Science Project 3
2.1 Neutron Science Project 3
2.2 International Collaborations for Neutron Science Project 19
3. High Intensity Proton Accelerator 25
3.1 Status of Accelerator Design 25
3.1.1 Overview of R&D 25
3.1.2 Development Scenario 25
3.1.3 Low Energy Accelerator Section 26
3.1.4 Development of High Energy Accelerator Section 27
3.1.5 RF Source 28
3.1.6 Beam Storage Ring 28
3.1.7 Summary 28
3.2 R & D of Accelerators 33
3.2.1 Ion Source and Beam Transport 33
3.2.2 RFQ 57
3.2.3 DTL and SDTL 72
3.2.4 Super-conducting Linac 112
3.2.5 RF System 132
3.2.6 Storage Ring 169
3.2.7 Utilities 203
4. Neutron Scattering Experiment Facility 210
4.1 Design of Neutron Scattering Experiment Facility 210
4.2 R & D of Spallation Neutron Source 218
5. Basic Engineering Experiment Facilities 266
5.1 Experimental Facility for Target Thermal-Hydraulics 268
5.2 Materials Irradiation Test Facility 278
5.3 Neutron Nuclear Physics Experiment Facility 296
5.4 Transmutation Reactor Physics Experiment Facility 324
5.5 Experimental Transmutation Reactor 348
5.6 Related R & D 371
6. Basic Research 375
6.1 Target Neutronics 375
6.2 Materials 395
6.3 Neutron Utilization Technology 412

6.4 RI Ion Source 423
6.5 Beam Loss Monitor 429
7. Radiation Safety Design 433
8. Afterword 453

本報告書作成については以下の者が分担した。

執筆分担

1章　向山武彦
2章　大山幸夫、関根俊明、新村信雄、野田健治、森井幸生
3章　水本元治、大内伸夫、小栗英知、金正倫計、草野譲一、千代悦司、富澤哲男、長谷川和男
4章　日野竜太郎、渡辺　昇、神永雅紀
5章　高野秀機、池田裕二郎、大山幸夫、滝塚貴和、佐々敏信、辻本和文、野田健治、安田秀志
6章　大山幸夫、池田裕二郎、池添　博、市川進一、片桐政樹、菊地賢司、曽山和彦、高田　弘、勅使河原誠、中島　宏、二川正敏、松林政仁
7章　笹本宣雄、原田康典、安田秀志
8章　安田秀志

編集分担

監修　安田秀志
編集　富田礼子、清水奈緒子、市川きみ江

中性子科学研究計画に関する問合せ先
日本原子力研究所　東海研究所
中性子科学研究センター　中性子科学計画室
大山幸夫
TEL:029 282 6809, FAX: 029 282 5996
EMAIL: oyama@fnshp.tokai.jaeri.go.jp

This is a blank page.

1. 序 言

1932年のチャドウィックによる発見以来、中性子は原子力エネルギー利用の道を拓き、また、中性子散乱回折による物質の原子レベルの構造探求などに大きな役割を果たしてきた。物質研究の優れたプローブとしての中性子は、これまでより二桁以上強力な中性子源が得られれば、生命の探求や物質研究に一大飛躍をもたらすことが可能となる。さらに、中性子核反応を用いる消滅処理により、原子力利用の大きな課題の一つである高レベル放射性廃棄物処理の高度化を図ることも可能となる。

原研では、1961年に研究炉JRR-2に中性子回折装置を設置し、原子炉を用いた我が国初の本格的な中性子散乱実験を行った。70年代には電子線リニアックを用いた中性子散乱実験を行い、90年代にはJRR-3を改造し、これを用いてより高度な中性子散乱実験が行われるようになった。最近では、原研研究炉部におけるスーパーミラー中性子導管の開発による中性子ビーム利用効率の著しい向上や、先端基礎研究センター新村グループによる中性子イメージングプレートの開発と、それを用いた中性子散乱実験によるニワトリ卵白リゾチームの水素原子、水和水を含む全原子構造決定の成功などの成果が上がっている。

世界的には、中性子散乱実験により高温超伝導体結晶構造、磁性体磁気構造、リゾチーム蛋白質構造の解明等の大きな進展があり、物質科学における中性子散乱実験の大きな寄与に対してその技術開発者に1994年のノーベル物理学賞が授与された。中性子源についてみると、これまで主として研究炉が用いられてきたが、施設の老朽化が進み、一方で、米国オークリッジ国立研究所の先進中性子源ＡＮＳ（Advanced Neutron Source）計画の挫折に見られるように新たな研究炉の建設は困難になってきた。この様な事情から、中性子源に対する要望の増加にも関わらず世界的な中性子源の不足が憂慮されるようになり（所謂ニュートロン・ギャップ）、大出力陽子加速器を用いた大強度核破砕中性子源建設計画が提案されるようになってきた。大強度核破砕中性子源建設計画として、わが国では高エネルギー加速器研究機構（KEK）が大型ハドロン計画の一部としてのＮアレーナ建設を、ヨーロッパではESS（European Spallation Source）計画を、米国ではオークリッジ国立研究所が2006年の完成を目指したSNS（Spallation Neutron Source）計画を推進している。なお、SNS計画は1999年度予算で建設が認められた。

一方、原研では1970年代中頃から群分離・消滅処理研究を行ってきたが、その中で加速器駆動型消滅処理システムは重要なテーマの一つであった。1988年に原子力委員会の下で「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」（通称オメガ計画）がスタートし、原研では消滅処理システム概念や大強度陽子加速器の概念の検討を進め、1991年には加速器工学研究室を発足させ、大強度陽子加速器開発に必要な要素技術の開発を行ってきた。

加速器開発に関しては、原研では1957年以来各種加速器19基を開発してきた。世界最大出力の核融合ブランケット研究用中性子源FNS、超伝導タンデム・ブースター、最近世界最高強度を達成した自由電子レーザーFEL、理研と共同で開発した世界最高強度の放射光施設SPring-8等がその一例である。

このようなこれまでに蓄積された技術や経験を基に、今後の構造生物学や物質科学における中

性子散乱研究の重要性に鑑み、また、これまでの中性子供給者としての役割を 21 世紀においても果たし続けるために、原研では大強度核破砕中性子源と研究施設を開発し、さらに、この中性子源用陽子加速器を用いて消滅処理研究を推進する中性子科学研究計画を開始した。1997 年 4 月にはこの計画の担い手として中性子科学研究センターを発足させた。

中性子科学研究計画の目標は、大強度陽子超伝導線形加速器と大出力核破砕ターゲットを開発し、世界最高強度の 5MW 核破砕パルス中性子源を実現させるとともに、この加速器を用いた消滅処理実験施設を建設することである。施設建設後は、中性子散乱による基礎科学の飛躍的な進展と高レベル放射性廃棄物処理法の高度化技術としての加速器駆動型消滅処理技術の開発を目指す。その他、中性子核物理、材料照射、スポレーション RI 科学、RI 製造の研究等も推進する。また、完成後の加速器を用いて大強度加速器の工業利用技術の開発を図る。

中性子散乱等の基礎研究のための施設は国内外の研究者に共同利用施設と広く解放する。一方、消滅処理実験等一部の原子力関連実験は原研が主体的に行うものの、国内外の研究者の参加を大いに歓迎する。このように、中性子科学研究計画により原研東海研究所は世界有数の中性子科学研究施設を実現することになり、中性子科学研究に関するアジア・オセアニア・センターを目指す。

本報告書は、1997 年 4 月の中性子科学研究センター発足以来、昨年秋までの一年半の期間に得た研究成果を中心に、消滅処理研究など一部関連研究についてはそれ以前に得られた研究成果についてもまとめたものである。

昨年秋以来、陽子加速器や中性子散乱施設などの共通部分のある原研の「中性子科学研究計画」と文部省高エネルギー加速器研究機構の「大型ハドロン計画」との施設統合についての検討を進めているが、本報告書では原研が独自に検討してきた中性子科学研究計画の範囲での研究目標、成果について述ることを予めお断りしておく。

2．中性子科学研究計画の概要

2．1　中性子科学研究計画

中性子科学研究計画は、世界最大強度の核破砕中性子源からの中性子ビームを、構造生物学、物質科学等の基礎科学や消滅処理技術開発に利用するプロジェクトであり、基礎科学と原子力研究の両分野にまたがる研究を推進することを目指している。

中性子は２０世紀後半からの原子力利用や、物質の構造探求などの基礎科学において大きな役割を果たしてきた。これまでより一桁以上強力な中性子源が得られれば、物質の構造及び機能の探索子としての優れた性質を有する中性子は生命の探求や物質・材料研究に一大飛躍をもたらすことを可能とする。さらに、中性子を用いる核変換により、これからの原子力利用にとって欠かすことの出来ない高レベル放射性廃棄物処理の高度化を図ることも可能となる。

日本原子力研究所では大強度陽子加速器を建設し、それを用いて生成する核破砕中性子により、基礎科学の飛躍的な発展や消滅処理技術開発等の先進原子力技術開発を進める中性子科学研究計画を推進している。

目標とする加速器は世界にも例が無い大出力のものであり、その研究施設は世界の研究拠点となるだろう。また、これを利用して得られる成果は２１世紀の科学をリードし、日本を従来のキャッチアップ型技術開発から脱した真の技術立国とするものであり、国家的な計画ということができる。

2．1．1　本計画の背景及び経緯

原研では、1970 年代中頃から群分離・消滅処理研究を行ってきたが、その中で加速器駆動型消滅処理システムの研究は重要なテーマの一つであった。1980 年代初めからは消滅処理に加えて核燃料増殖、核融合用トリチウム生産、材料研究等のほか、中性子散乱など基礎研究への加速器応用を検討した。1988 年に原子力委員会の下で、「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」（通称オメガ計画）が発足し、消滅処理システム概念や大強度陽子加速器の概念の検討をこの計画の下で進めてきた。1991 年には加速器工学研究室を発足させ、大強度陽子加速器構成要素の技術開発や超伝導陽子加速器のシステム概念の検討を行ってきた。

一方、３号炉（JRR-3M）における中性子を用いた共同利用研究は大きな成果をあげてきており、さらに、最近の先端基礎研究センターにおける研究の成果もあり、原研においても中性子を用いた基礎研究が活発になってきた。世界的に見ると、中性子散乱や照射による物質科学や生物学の大きな進展（高温超伝導体結晶構造、磁性体磁気構造、リゾチーム蛋白質構造の解明等）があり、中性子を利用する基礎科学の重要性に対する認識が深まり、1994 年にはノーベル物理学賞が中性子散乱研究に対して与えられている。これらの研究にはこれまで主として中性子源としては研究炉が用いられてきたが、世界的に施設が老朽化し、このため米国においてはＡＮＳ（先進中性子源用炉）計画が提案されたにもかかわらず、計画は挫折した。このように新たな研究炉の建設は困難な状況になっており、世界的に将来の中性子源の不足が憂慮され、1998 年に

OECD のメガサイエンスフォーラムにおいて、次世代の大強度核破砕中性子源の建設が提言された。このような核破砕中性子源計画として、原研の中性子科学研究計画に加え、わが国では文部省のＪＨＰ計画（陽子ビーム出力 0.6MW）やヨーロッパにおけるＥＳＳ計画（European Spallation Source、5MW)、及び米国のＳＮＳ計画（Spallation Neutron Source、1MW）があげられる。この中で、原研の中性子科学研究計画（8MW）はこのような核破砕中性子源計画と消滅処理実験計画を合わせた計画であり、世界的にユニークなものといえる。

２．１．２　研究施設の概要

中性子科学研究計画の構想図を Fig.2.1.1 に示す。計画では、陽子エネルギー 1.5GeV、電流 5.3mA の大強度陽子加速器とこれを利用する研究施設群を建設することを目指す。これら施設は国内利用者に開かれたもの、また国外の研究者にも利用出来るものとし、中性子散乱等の基礎科学においては米国、ヨーロッパに対抗できるアジア、オセアニアの中核的研究センターとなることを、さらに、消滅処理研究に関しては世界の研究開発拠点となることを目指している。

（１）加速器の基本構想

核破砕反応による中性子発生効率及び中性子散乱用ビーム蓄積リングへの入射効率を考慮して、陽子加速エネルギーは 1.5GeV とする。大電流を加速することから加速器本体及び周辺の放射化につながるビームロスは極力小さくしなければならない。この観点から線形加速器とし、高エネルギー加速にはビームダクト径を大きくすることができる超伝導加速空胴を用いる。超伝導加速の採用はビームロスが小さいことや加速距離が短かいことの外に、超伝導技術の将来性に着目したことにもよる。また、中性子散乱などの基礎研究のためにはパルス運転をする。一方、消滅処理実験や材料照射実験には連続ビームが必要となる。そこで、パルス運転と連続ビーム（CW）運転の２つの運転モードに対応できる加速器とする。

幾つかの異なる分野の実験が並行して行えることが望まれるので、パルス運転時には正負水素イオンを交互に加速する。このとき、負イオンはビーム蓄積リングに導き高輝度短パルスとして中性子散乱に用いる。正イオンはミリ秒単位の長パルスとして消滅処理用ターゲット基礎実験等に用いる。ビーム出力はパルス運転時には、中性子散乱用に 5MW、その他に 3MW、合計 8MW とする。CW 運転時には消滅処理実験、RI 製造や材料照射等のために各々占有マシンタイムを割り当てる。消滅処理システム実験には 2～5MW 必要であり、消滅処理ターゲット工学実験には 7MW 程度が必要となる。

ヨーロッパのＥＳＳ及び米国のＳＮＳは物質科学研究が目的であるためパルス運転のみであり、ビーム出力は最大 5MW を目標にしている。これに対して、原研の計画では、基礎科学と消滅処理実験の両方が主目的であるため、パルスと CW 運転の両方が可能であり、さらに、ビーム出力は８MWで世界最大である。

（２）研究施設

研究施設群はビーム利用の形態によって大きく３種類に分ける。高輝度短パルスを利用する中

性子散乱施設、ナノ秒の極短パルスを用いる中性子核物理や炉物理基礎実験の施設、そしてミリ秒パルスまたはＣＷビームを用いる消滅処理関連施設（ターゲット研究施設、実験炉）や材料照射施設である。

（3）スケジュール

加速器に関しては、１９８２年より R&D を開始しているが、ターゲットに関しては、1996年に本格的にＲ＆Ｄを開始したばかりである。現在、平成１３年度の建設着工を目標にしており、5 年で加速器から１mA のビームを加速器し、それから徐々にパワーを上げつつターゲットの試験を行い、5MW を実現する計画である。計画しているスケジュールを Fig.2.1.2 に示す。

２．１．３　中性子科学研究計画で目指す研究

研究分野は、中性子散乱による基礎科学、高レベル放射性廃棄物処理法の高度化技術としての加速器駆動型消滅処理技術開発であり、完成後の加速器を用いて、そのための大強度陽子加速器技術の開発を行う。また、中性子核物理、材料照射、スポレーション RI 科学、RI 製造利用の研究を行う。この節では、各々の研究構想について述べる。

２．１．３．１　中性子散乱

（1）　生命科学

ビッグバンに始まる宇宙の生成後、元素の生成、物質の進化の過程で、最初の生命は、みずからの複製を触媒できる RNA 分子集団の進化によって始まった、と考えられている。やがて、これらの RNA 触媒集団が協同作業を営むうちに、その中からポリペプチドの合成を指令する能力を獲得したものが現れ、進化に進化を重ね、現在の自然界を構成する生命体が実現した。35 億年に亘り繰り返された進化の歴史は、複雑なしかも生命体が生き延びるのに全く巧妙な生命現象を創出することになる。そしてようやく、人類は生命現象の本質を理解する糸口を構造生物学に見出そうとしている。

生体内ではさまざまな物質が機能し、生命活動を維持している。このような生体内物質の中でも、蛋白質は、最も重要な物質の一つである。蛋白質の種類は非常に多く、ヒトゲノムに含まれている蛋白質の種類は 10 万種に及ぶと言われている。又種類が多いだけでなく、一つ一つが複雑に折り畳まれ、多様な 3 次元立体構造を形成し、それを起源に発生する機能もまた多種多様である。このように多種多様な蛋白質それぞれが、巧妙にデザインされたメカニズムにしたがって作用し、機能を果たしている。これが生命である。生体物質はどのような構造をとり、どのように運動し、どのように機能を発現しているのであろうか。これが構造生物学であり、生命現象を理解するための一つの重要な学問である。しかも中性子散乱はこれらの研究課題を解明するのに最適な手法である。

1）生命科学研究のための中性子

中性子散乱が、生命科学研究で有効な実験手法となるのは、ひとえに中性子の有する性質から由来するものであり、物質との相互作用が他のプローブと比較して、全く特異的だからである。原子・分子の大きさに相当する波長(0.03～1nm) の中性子のエネルギーはちょうど、生体物質の運動エネルギーレベル（1meV～数 eV）に相当していることである。Fig.2.1.3 に示すように、これは中性子が質量を有しているからであり、X 線（質量を有しない）と比較すると、その違いが歴然とする。結晶解析に用いるλ=0.2nm のX線のエネルギーは 0.62×10^{4}eV で生体物質の運動エネルギーレベルより桁はずれに大きな値である。一方、生体物質の運動エネルギーレベルを調べるのに用いられる赤外線や紫外線の波長は 10^{3}～10^{1}nm で、生体物質の大きさを見るのに適さない。

中性子が有する特徴のうち生命科学研究に優利に働く項目を、以下のように列挙することができる。

①水素原子を観測できる。

②水素と重水素では中性子散乱能が大きく異なる。

③生体物質のダイナミックスを観測できる。

④生体物質に放射線損傷を与えない。

2） 中性子と構造生物学

「構造生物学」は 21 世紀の生命科学の動向を左右するきわめて重要な分野である。構造生物学とは、生体高分子の三次元構造を決定する学問であると思われているふしがあるが、全く誤った考えである。例えば、ワトソン・クリックの成果の大きな意義は、DNA の二重螺旋構造を決定したこともさることながら、その構造を通して遺伝学の原理を提示したことにある。これが「構造生物学」の原点であり、得られた構造に基づいてその機能を理解、説明できないと全く意味がない。米国ブルックヘブン国立研究所の Protein Data Bank (PDB)に登録された生体物質立体構造の数は、毎年ウナギ登りに増えて行き、5,000 近くに達している。ほとんどがX 線解析により決められたものである。

蛋白質や DNA は立体構造を形成して初めて機能を発揮する。原子レベルで見ると、蛋白質や DNA の骨格、アミノ酸残基および塩基に結合している水素原子及びそれらに配位する水の水素原子が直接あるいは間接的に殆どの機能発現に関与していることが知られている。ところが、立体構造決定においては、強力な実験手法であるX線回折法は水素原子位置決定では力不足である。一方、中性子回折法ではこれが可能である。また、生体物質の機能と分子のダイナミックスは直接対応づけられるものと考えられるようになってきており、その証拠もいくつかあがってきている。中性子は、スタテイックな立体構造の段階で足踏みしていた構造生物学分野に蛋白質分子の水素原子位置やダイナミックな運動情報を提供することができるので、生命科学研究に新たな視点を持ち込むことができる。このような観点から、中性子散乱実験が貢献できるだろう生命科学のテーマを Table 2.1.3.1 に列挙する。

Table 2.1.3.1　生命科学における中性子構造生物学の研究テーマ

● DNA の配位水の構造と機能
● 鉄輸送蛋白質トランスフェリンとその受容体の相互作用とダイナミックス
● DNA と非ヒストン DNA 結合蛋白質 HMG1, HMG2 との相互作用
● DNA 修復機構の解明
● 膜蛋白質の可溶化
● 光合成系アンテナ器官の構築原理の解明
● リポタンパク質の構造
● 生体組織内水の分布と機能
● 複合体形成メカニズム
● 酸素反応プロセスの直接観察
● 生体高分子結晶化過程の直接観察
● DNA 結合タンパク
● モーター蛋白質やG一蛋白質等によるヌクレオチド加水分解機構
● 生体高分子と糖の相互作用と水分子
● リボ核酸分解酵素のグルタミン酸と RNA のリン酸基との相互作用の解明

（2） 物質科学

２０世紀の物質科学或いは固体物理学は、凝縮系における物理法則の解明に多くの成果をもたらしたが、２１世紀の物質科学研究は、物質の「構造」と「機能」を高度に制御する事に多くの関心が集まると考えられる。特に、中性子回折・散乱を用いて物質科学研究にブレークスルーをもたらすものとして「極端条件下での物性の研究」と「ソフトマテリアルの研究」が期待される。

1）極端条件下における物性研究

温度、磁場、圧力等は、物質の物理的、化学的性質を変化させるため、新物質探索や物性研究において極めて有用な基本的独立パラメータとして用いられている。例えば、低温では核スピン相互作用が強調され、磁場をかけることにより、物質のスピン間相互作用や電子状態に対する知見を得ることが出来る。また、高圧は原子間距離を変えることにより系の電子状態を変えることができる。これらの極端条件を組み合わせること（多重極端条件）によって、新しい物理現象が現われる可能性もある。中性子は電子線や X 線に比べて物質に対する透過率が高いので、超低温、超高温、強磁場、超高圧等の極端条件を作り出す試料周辺機器の真空壁や構造材等を簡単に突き抜けて試料に到着でき、試料内部からの散乱によって極端条件下の物性の研究に大きな役割を果たすことができる。

次世代物質科学研究のために 10mK 超低温、20T 定常磁場、100T パルス磁場、5GPa 高圧の極端条件あるいはこれらの多重極限条件を開発し、この条件下で強相関電子系物質の研究を行う。特に酸化物、希土類化合物、アクチノイド化合物はその結晶構造、磁気構造や磁性と超伝導に関して非常に多彩な物性を示すものがあり、そのミクロスコピックな機構解明は、現代の固体物理学が取り組むべき最重要課題である。さらに、時間平均ではなく瞬間的な大強度中性子が利用出来れば、極端条件下で物質の示す過渡現象や緩和過程を高時間分解能で測定することも可能になる。

現在物質科学研究では、高温超伝導物質、フラーレン化合物を例に挙げるまでもなく、興味のある物性、機能を備えた新物質が次々に合成されている。これらの重要な新物質は、当初粉末状でかつ僅かな量しか創製されない場合が多い。また極端条件下では、通常の実験に比べて少量の試料しか使用できない。現在、このような微量粉末試料の構造解析は、放射光による X 線回折により可能になったが、X 線回折から電子密度分布を中性子回折からは核密度分布を求めることができるので、X 線と中性子は、相補的な情報を提供する。また軽元素の位置の決定、原子番号が隣り合った元素を含む系の構造解析等は、X 線回折に比べて中性子回折が得意とするところである。

2）ソフトマテリアルの研究

ソフトマテリアルはただ柔らかい物質という意味を持つだけでなく、単なる物質としての固体や液体というレベルの対象から，複雑性，機能性，自己再生性などの積極的な意味を含む自然界の上位階層の物質を総称するものとして捉えることができる。ソフトマテリアルの研究は、一体系から多体系、一成分系から多成分系、平衡系から非平衡系、線形系から非線形系、閉じ

た系から開放系への物性研究の展開であり、いわば、理想化された単純な系から、より現実に近い複雑な系への自然な研究の流れに対応し、次世代の物性研究の中核をなすものと考えられる。

ソフトマテリアルの代表的な例である高分子は、多数の単純な分子単位（一個の低分子に相当し、モノマーと呼ばれる）が化学結合で連なった「連結系」である。連結の様式も線形、非線形、グラフト状、ブロック状、ネットワーク状等、極めて多様であり、かつ制御可能な段階にまで至っている。連結系の特徴として一個の高分子自体、莫大な数の形態を取り得、莫大な内部自由度を保有している。即ち一個の高分子自体、様々な階層構造を有し、それらを特徴づけるのに、多くの基本的時空スケールが必要となる。この様な複雑な時空構造をもつ連結系が沢山集まって形成される多体系の集合構造とその運動も又、当然、階層構造を有し、これが物質の機能と深く関わっている。中性子散乱・回折法を用いることにより、初めて可能となる重水素ラベル法やコントラストマッチ法は、いわば多体中の一個の高分子や、一個の高分子の一部、又は複雑な多体系の集合構造の一部を色わけして識別し、それらの「運動と形」とを認識することを可能にする。即ち次世代中性子源による２１世紀のソフトマテリアル研究は、「集団の形と運動」とそれを構成する様々な大きさの「要素の形と運動」との関係について解明し、「物質のマクロな機能の起源」についての知見を得ることが期待される。

これまで高分子材料は巨視的スケールをもつ高分子凝集構造を構成単位と考えその諸物性をコントロールし、利用するのが主流であった。たとえばポリマーアロイなどが好例である。もちろん非常に微視的なスケール（たとえば高分子を構成する芳香環）の特殊な物性（非線形光学）を利用した材料開発も行われている。近未来、これら両者の中間のスケールで機能を発揮する材料、すなわち一つの高分子がそれぞれに機能を発揮する高分子機械が開発される可能性がある。高分子機械の開発には高分子スケールでの構造と高分子スケール及びその局所構造（構成高分子の置換基等）での分子運動の精密な理解が不可欠である。これらの局所構造の機能が様々な状態（他の成分と混合された時、温度・圧力変化等外場を印加した時）においてどのように応答するのか、そしてその機能がマクロな物性に対してどのような影響を及ぼすのかという問題の解明が必要である。

２．１．３．２　素粒子、量子力学

素粒子としての中性子そのものに関する研究は、中性子利用研究分野全体からみれば少数であるが、それが持つ自然科学的意義は極めて大きく、現代物理学の基幹をなす自然法則の検証という意図をもって様々な工夫を凝らして試みが続けられている。このような試みの一つの方向は、より低エネルギーの（超）冷中性子（UCN）を用いる方向であり、十分な強度を持つ UCN は、この方面の研究の発展に資するものと期待される。UCN を用いた研究として以下に掲げるテーマ等が考えられる。

（１）素粒子科学

１）自然法則の対称性の検証：ボトル貯蔵ＵＣＮのベータ崩壊における生成粒子の対称性の測定から、空間非対称性及び時間反転非対称性に関する最も正確な数値が得られる可能

性がある。

2）中性子寿命測定：すでに中性子寿命測定はＵＣＮボトル法が最も有利であることが実証されている。ＵＣＮ強度向上及びボトル実験の一層の精密化によりその測定精度を改善できる。

3）中性子電気双極子能率：時間反転非対称性の実証として、その追求が行われており、これもＵＣＮボトル法が最も有利であるが、ＵＣＮ強度以外に電場の安定性等多くの条件の精密化が重要である。

（2）量子力学における課題

1）観測問題：速度の遅いＵＣＮによる精密実験が可能となることにより、量子力学的観測問題に関する様々な様式の検証が具体的研究課題と成りうる。

2）スピン制御：ＵＣＮの強度が上がることにより、ＵＣＮビームのスピン制御を精密且つ自在に行うことが具体的実験課題と成りうる。スピン波動力学の格段の解明をもたらしうる。

（3）中性子光学の基礎

1）波束の波動力学：ＵＣＮはその波長が長いこと、速度が遅いことに加えて、ボトル壁面において多数回反射し得るという顕著な特徴を有することから、特に中性子の波束に関する基礎物理実験を有利に行うことができる。

2）重力波動力学：ＵＣＮが顕著な重力効果を表すことから、スピン依存性や慣性質量効果との相違性等、重要な実験の精度を格段に向上できる。

3）波動方程式の検証：ＵＣＮを用いた精密実験により現実的課題となる可能性がある。

２．１．３．３　中性子ラジオグラフィ、中性子即発ガンマ線分析

（1）中性子ラジオグラフィ

中性子ラジオグラフィは中性子線の透過特性がＸ線に比べて優れていることを利用して、Ｘ線ラジオグラフィでは困難であった三次元可視化を可能とし、多くの非破壊検査に応用されている。その応用は、工業利用にとどまらず、考古学等の人文科学にも及んでいる。今後益々利用が広がると思われる手法である。大強度パルス核破砕中性子を利用した次世代中性子ラジオグラフィとして 1）高速度運動体の静止画像取得法の開発 2）TOF 法と組み合わせたエネルギー選別中性子ラジオグラフィ法の開発 3）散乱成分の時間空間分布解析による新しい三次元画像再構成法の開発が検討されている。これらは、大強度ビームを利用して、より質の高い画像を得ようという試みである。

中性子ラジオグラフィによる可視化と計測は、金属管内の二相流、液体金属流れ、実際の機械内部の流れ等の熱流動現象の研究に極めて有力な手法である。加速器による中性子源では原子炉と異なり、大型の実験装置や機械を持ち込める大照射室中性子ラジオグラフィ装置の実現が可能となることが期待される。また熱中性子の他に高速中性子も利用することができるので透過力が特に必要な大型装置の可視化・計測も可能になる。このような可視化技術により、模擬燃料集合体の二相流挙動、仮想事故時または過酷事故時の原子炉挙動、高速増殖炉の液体金属熱交換器、

核破砕炉用の液体ターゲット、空調機、各種エンジン、コンプレッサー・ポンプ等の流体機器の設計等。さらに実際の機械が持ち込めるようになれば、いっそう工学的な応用が広がると考えられる。

（2）中性子誘起即発ガンマ線分析

中性子ビームを利用した元素（又は同位体）分析法としては，1）捕獲ガンマ線等の即発ガンマ線を測定する中性子即発ガンマ線分析（PGA）、2）(n,p) 及び (n,α) 反応等で放出される荷電粒子を測定し、試料中のホウ素及びリチウム等の分布測定を行なう中性子デプスプロファイリング（NDP）がある。 PGA は他の方法では分析が困難な水素、ホウ素、イオウ、ケイ素等の軽元素に有効な多元素非破壊同時分析法という特長を持ち、環境試料、考古学試料、地質及び隕石等の分析法として注目されている。一方、NDP は国内での研究例は皆無に等しいが、半導体中のホウ素及びリチウム等の分布分析に有効とされている。

核破砕中性子ビームを PGA の中性子源とした場合、1） 高ビーム強度により、分析感度が増大し，検出限界の改善及び測定時間の短縮ばかりでなく、2) 熱外中性子による共鳴吸収を利用したり、パルス中性子に同期したガンマ線測定による励起レベルの寿命の差を利用した選択的分析への応用等が期待される。

2．1．3．4　消滅処理の研究開発

（1）　消滅処理研究の目的

使用済み燃料の再処理によって発生する高レベル放射性廃棄物の処理・処分は、原子力の利用・開発を進めるうえでますます重要な問題になってきている。高レベル廃棄物中に含まれる長半減期のマイナアクチノイドは人間環境から超長期にわたって確実に隔離しておかなければならない。長半減期核種を短半減期あるいは安定な核種に変換する消滅処理技術は、高レベル放射性廃棄物の最終処分の負担の低減を図るものであり、処理・処分システムの効率の向上と安全性の積極的な向上に役立つことになる。

原研では、消滅処理を効果的かつ安全に行うために、マイナアクチノイド燃料未臨界高速炉心と、大強度陽子加速器を組み合わせたハイブリッド型の消滅処理専用システム概念を提案し、基礎的な研究を進めている。この概念の技術的可能性を実証するために、中性子科学研究計画のもとで消滅処理実験施設の建設を行う。消滅処理実験では、技術課題解決に向けた研究開発を進めるとともに、概念の実証と技術的成立性の実証、マイナアクチノイド消滅処理性能の実証を行う。さらに工学的実証及び実用化に向けて必要となる実験データの取得・蓄積と技術基盤の確立を図る。

（2）　原研の提案する消滅処理システム概念

原研が提案している消滅処理システムでは、大強度陽子加速器からの高エネルギー陽子ビームを重金属ターゲットに入射し、ターゲット中の核破砕反応で生じる大量の中性子をマイナアクチノイドを燃料主成分とする未臨界高速炉心に投入し、マイナアクチノイド自身の核分裂反応によ

る中性子増倍を利用して消滅処理を行う。

このハイブリッド型消滅処理専用システムは、効率的・効果的に消滅処理ができること、安全に運転できること、エネルギーバランスが優れていることが特長である。

これまでに、現行のナトリウム冷却高速炉技術に基づいた固体システム概念と将来オプションとして溶融塩システム概念の検討を行った。消滅処理実験施設では、技術基盤のある固体システム概念を主要研究開発対象とする。

固体システム概念のターゲット／炉心では、中心に設けたタングステンターゲット領域とその周りを囲むマイナアクチノイド 燃料領域から構成される。ビーム入射窓を通して高エネルギー陽子ビームを垂直下向きにターゲットに入射する。ターゲットは核破砕中性子源として働く。燃料アセンブリ、ターゲットアセンブリ及びビーム入射窓はナトリウムで冷却する。炉心の中性子実効増倍係数は 0.93 程度であり、1.5 GeV - 40 mA の陽子ビームにより 800 MW 程度の熱出力を発生する。これにより、大型軽水炉 10 基から排出されるマイナアクチノイド（年間250kg)を短寿命核種や安定核種に変換する。消滅処理システムの規模は何基の発電炉をサポートするかで決まる。マイナアクチノイド蓄積量を低いレベルに抑え、かつ合理的に消滅処理システムを導入するには、発電炉 10 基をサポートする 800MW 程度の炉心熱出力が適当である。

加速器の規模はシステムの熱出力が決まると炉心の未臨界度に依存する。未臨界度を決定するためには、反応度変化、燃料組成変化、燃焼特性、燃焼度、データ・手法の不確かさ、システム動特性、制御棒併用、照射損傷、保守・交換性、運転モードなどのさまざまな項目のトレードオフ設計及び安全性、経済性を含めた総合的評価が必要である。提案しているシステム概念では、消滅処理性能の最適化の観点から、中性子実効増倍係数 0.93 を選定している。

（3） 消滅処理システムの技術課題

加速器駆動消滅処理システムは、未臨界炉心を核破砕ターゲットを介して高エネルギー陽子ビームによって駆動するというまったく新しい概念のシステムである。このため、従来の原子力システムには見られないいくつかの新しい技術課題がある。加速器駆動消滅処理を実現するためには、これらの技術課題を解決し、システムの技術的成立性、性能の実証を行う必要がある。

まず、出力が大きく信頼性の高い陽子加速器の技術を確立する必要がある。中性子科学研究計画の大強度陽子加速器の開発、建設、運転によって、その技術基盤が確立されることになる。

ターゲット／炉心については、高エネルギーの陽子・中性子、高濃度・高燃焼度のマイナアクチノイド燃料、未臨界の硬スペクトル・高中性子束炉心、陽子ビーム駆動、高出力密度ターゲット、急激な過渡変化など加速器駆動型消滅処理システムに特有の新しい技術課題があり、炉物理、遮蔽、燃料、熱流動、材料、構造、計測・制御などの広範な研究分野が関連している。中性子科学研究計画施設では、消滅処理実験施設においてこれらの技術課題を解決するための研究開発を行う。

（4） 研究開発の考え方

加速器駆動消滅処理システムを実現するためには、技術の進展に対応して、段階的に研究開発を進めなければならない。基礎的な実験による概念成立性の実証、小規模実験施設による技術的

成立性の実証、大規模実証試験施設による総合的な工学的実証を経て実用化に至ることになる。原研の原子力研究開発における役割及び大強度陽子加速器の規模を考えると、原研は技術的成立性の実証までの初期段階を担当することが妥当と考えられる。そこで、中性子科学研究計画の消滅処理実験施設は、段階的に整備をすることとする。第 I 期には、基本的なシステム概念を実証するための実験施設を整備することを検討している。消滅処理技術の研究開発計画を進めるには、適宜計画の調整、見直しが必要であり、第 I 期の終了時点でチェックアンドレビューを行う。第 II 期には、第 I 期の実験の成果を反映させて、技術的成立性を実証するための施設を整備する。

整合性のある消滅処理システム研究開発を行うため、消滅処理実験施設における大強度陽子加速器を利用した研究開発と並行して、燃料研究開発、材料・構造研究開発、アクチニド化学・群分離研究開発、設計・評価研究等をオメガ計画（群分離・消滅処理技術開発長期計画）のもとで行う。加速器駆動消滅処理システム開発のシナリオを Fig.2.1.4 に示す。

（5） 消滅処理技術の実証

加速器駆動消滅処理のフィージビリティを実証するためには、実用消滅処理システムの運転条件に近い実験条件を外挿可能な縮小規模で実現する必要がある。これを総合的に実現させるには、大規模な試験施設が必要となる。このため、技術的実証は、必要な施設規模を小さくするため、技術課題に対応して 2 つの実験施設、高出力ターゲット実験施設と消滅処理実験炉、に分けて行う。

高出力ターゲット実験では、陽子加速器と未臨界炉心のインターフェイスとなる核破砕ターゲット及びビーム入射窓について、実際の形状を模擬した縮小モデルを用いて技術的成立性を実証する工学的実験を行う。これらのコンポーネントは加速器駆動消滅処理システムにおいて熱・構造的にもっとも条件が厳しく、安全上重要であるため、熱・構造条件を模擬する必要がある。また、実用システムに外挿可能な熱・構造データを得るためには、ビーム軸方向及び横方向スケールをそれぞれ 1/1 程度及び 1/2 以内、ビーム電流密度を 1/2 以内とすることが望ましい。このため、高出力ターゲット実験では、実用消滅処理システムの 1/8 のビーム出力約 7 MW を用いる。

消滅処理実験炉では、小規模・小出力のターゲット／未臨界炉心システムを用いて、システムレベルでの核的特性、MA 燃料照射、計測・制御等に関する技術的成立性及び MA 燃料消滅性能を実証する実験を行う。炉物理及び燃料照射の観点から、中性子スペクトル条件を模擬する必要がある。実用消滅処理システムでは、MA 燃焼率は年間約 10% である。これを合理的な期間内で実証するためには実験炉において年間数 % 程度の MA 燃焼率を達成する必要がある。このため、炉心の中性子束を実用システムの 1/10 程度より高くする必要がある。ここで、システムのスケールは炉心の構成、燃料組成と中性子増倍係数で決まるので、実験炉に必要な熱出力が導かれる。燃料を 20% 濃縮ウラン、中性子増倍係数を～0.93 、MA 燃焼率を年間 1%（140 日照射）とすると、少なくとも 30 MW の炉心の熱出力が必要となり、ビーム出力は 約 2.3 MW になる。実用消滅処理システムでは、CW ビームを用いるので、これらの施設の実験においても CW ビームを用いる。

２．１．３．５　材料照射施設での研究

核破砕中性子は、数百 MeV の高エネルギーまでに及び極めて幅広い中性子スペクトルと大電流化により極めて高い中性子束を発生できる特徴を備えている他、照射場への接近性が良いこと、中性子発生条件の制御性が良いこと等から材料照射損傷基礎研究等の材料科学から原子力システム材料の研究開発等までの幅広い材料照射研究で使用され得る。

材料照射試験施設で行う研究として以下の課題が考えられるが、これらには例えば核融合材料開発のように、材料開発の目的によってはパルスビームによる中性子照射では不十分と考えられる場合もある。

（１）材料科学

１）点欠陥等の過渡的挙動の研究

照射にともない生成する点欠陥の寿命、集合欠陥への移行等の過渡的過程を中性子パルスと同期させた光学的、電気的及び体積変化測定等により研究する。

これまでに、パルス電子線照射装置により、CaF_2 の短寿命の欠陥の生成の研究等が行なわれている。今後、特に、光学的スペクトル、電気的及び体積変化測定が可能なセラミックス等について、照射欠陥及び電子励起等の過渡的過程についての多くの情報が得られることが期待される。この情報は照射下の材料特性挙動を理解し、評価するための重要な知見となる。

２）低温における材料照射損傷基礎研究

原子炉に比べ、低温クライオスタット等を設置することが容易であり、その場実験を含めた低温における材料照射損傷基礎研究を精度良く実施することができると期待される。この場合パルス照射効果の影響は小さいと考えられる。

３）損傷組織及び照射特性に及ぼす照射損傷率の影響の研究

陽子ビームが高エネルギー、大電流の場合、高中性子束領域において大きな弾き出し損傷率が得られるので、これを生かし、損傷組織及び照射特性に及ぼす中性子照射による照射損傷率の影響の研究を行うことができる。

これまでも、原子炉を利用し、ある程度研究が行われているが、核破砕中性子では、高いレベルの弾き出しを与えるので、極めて広範囲の照射損傷率依存性の研究を行うことができる。特に、機械的性質等バルクの性質についての研究は中性子照射による研究が重要であり、この分野の研究が飛躍的に発展すると考えられる。

４）中性子照射下における材料特性挙動の研究

核破砕中性子照射施設では、その照射場における少ない規制、接近性の良さ、また、中性子束勾配等を生かして、原子炉ではできない種々の高度なその場実験が行うことが可能である。構造材料の照射下疲労、照射下クリープ及び照射誘起応力腐食割れ特性等、並びにセラミックス材料の照射下電気及び光特性等についての精度の高い研究がおこなわれることが期待される。

5）核変換生成物導入による材料特性変化の研究

高エネルギー中性子による核変換を利用し、種々の核変換生成物（特に、従来の方法では均一に導入できないものや放射性元素）を均一又は意図した配列で導入し、材料特性変化を調べる。これにより、新しい機能性材料等の創製の知見を得る。

6）弾き出し等を利用するバルク材料創製の研究

超微細結晶粒バルク材料は強度が大きいこと、界面の特異な特性を引き出せること等優れた材料としての可能性に富んだ材料であるが、溶解や焼結等の熱を加えてバルク材料を得る手法では結晶粒成長等を伴い、超微細結晶粒材料を作製するのは困難である。そこで、超微細原料粉末を大電流の中性子照射又は高エネルギー陽子照射による弾き出しを利用して結合させ、バルク材料を創製する技術を追及する。

一部がさらに、異なった種類の超微細原料粉末を適切な配列で組み合わせ、弾き出しによる結合により狙い通りの超微細結晶粒バルク材料を作製する技術の研究を行う。また、これによりこれまでにない優れた材料の創製を図る。

これまでに、このような観点で中性子照射や高エネルギー陽子照射を行ったことはなく、極めてユニークな研究テーマである。

（2）原子力基盤技術開発

1）消滅処理プラント、加速器駆動炉材料の開発

大強度陽子加速器を用いる消滅処理プラント及び加速器駆動原子炉に用いる材料は、高中性子束の核破砕中性子や高エネルギー陽子の厳しい照射に曝される。本施設による材料照射試験を通して消滅処理プラント及び加速器駆動炉用耐照射性材料の開発を行うとともに、その耐照射性材料の材料照射データを取得する。

2）核破砕用ターゲット材料の照射試験

核破砕用ターゲット構成材料の耐照射性を向上させるための材料試験を行い、耐照射性に優れた核破砕用ターゲットを開発する。

3）核融合炉材料の補完照射試験

現在、核融合炉材料開発及びその照射試験に不可欠な国際核融合材料照射施設（d－Li型中性子照射施設）の概念設計が、2000 年年代の初頭におけるその運転開始を想定し、行われている。しかし、IFMIF の高中性子束領域は試験体積に制限があるため、核融合材料開発には、IFMIF ばかりでかりでなく、高速炉等の核分裂炉を用いた補完的照射試験を行う必要がある。ところが、近年材料重照射試験に利用可能な高速炉が次々に運転停止となっており、本材料照射施設が建設されれば、高速炉の代替照射施設として、IFMIFの補完照射試験に利用されると予想される。

2．1．3．6　スポレーションＲＩ科学

1.5ＧｅＶの陽子ビームによる核破砕反応では原子番号と質量数の広い範囲にわたって多数の原子核が生成される。これらの核種の多くは有限の寿命を持った放射性原子核（ＲＩ）であり、

それ自体未知の核種を多く含んでいる。核破砕反応でつくられるＲＩのうちその寿命が百ミリ秒程度以上のＲＩを標的から引き出して加速器でビーム状に加速し、再度標的と核反応を起こさせて、従来の方法では合成できない新しい未知の原子核をつくり、その原子的性質や原子核の性質を研究することを目的としている。特にこのＲＩ利用施設では、中性子過剰なＲＩを選択的に生成するために、陽子ビームの標的として炭化ウラン（ＵＣ）など核燃料物質を使用して、直接的な核破砕反応のほかに２次的に発生した中性子による核分裂反応も利用する。この反応によって、質量数が８０から１５０程度までの中性子過剰なＲＩが核破砕反応の場合の数倍から１００倍程度の収量で得られる。このような強度の大きなＲＩビーム（標的位置で10^{10}粒子／秒以上）が作られることは、反応断面積の小さなエキゾチック原子核の研究にとってはキーポイントになる。核燃料物質などを使用するこの施設は原研独自のものであり、この豊富な中性子過剰ＲＩの利用研究として、他ではできない超アクチノイド元素の物理的、化学的性質の研究と中性子過剰核の構造研究およびＲＩビームを用いた物性研究について述べる。

（1）超アクチノイド元素の研究

原子番号１０４番以上の超アクチノイド元素は現在４０核種が知られているが、多くの核種は未発見のままであり、発見されていても生成量が少ないためにその物理的、化学的性質はほとんどわかっていない。また、この元素領域は未発見の原子番号１１４番の超重元素を含み、原子核物理のフロンティアとしても注目されている。

中性子過剰核ビームが利用できれば、中性子数の多い超アクチノイド核が合成できる。陽子数１０８付近で中性子数１６２に変形した閉殻構造の原子核が予言されている。この原子核はまだ合成されていないが、中性子数が１６２に近づくにつれて核種の寿命が長くなるという実験結果が得られており理論的予想と良く一致している。中性子数が増えると寿命が長くなるため、なかには寿命が数時間以上の核種も予言されており、その化学的性質を研究することが可能になる。この研究では超ウラン元素を取り扱う必要から特別な放射線管理施設が必要である。原研はそのための施設をもち、超ウラン元素に関する研究を行って多くの実績を積んでいるので、原研の本計画で行うのに相応しい研究課題である。

中性子過剰核のＲＩビームを使えば、中性子数の多い超重元素領域に直接アプローチできる。さらに、重イオンの核融合反応でできた中性子の多い複合核は中性子放出で冷却する確率が増えるため、複合核が分裂せずに超重元素として生き残る確率が増える。また、中性子過剰なＲＩは原子核の中の中性子が引き金になって核温度の低い状態で核融合反応を促進することも言われている。このように、中性子過剰核のＲＩビームは超重元素を合成できる唯一の手段と考えられる。このためには、強度の大きなＲＩビームが必要になり、１００μＡ程度の強力な陽子ビームが利用される。超重元素の測定には、反応生成核のみを分離・移送するための反跳核質量分析分離法が用いられるが、この実験手段は原研ですでに使われている手法である。

（2）中性子過剰核の構造研究

従来の安定核ビームでつくられる原子核の範囲は主に中性子欠損核の領域に限られていたが、各種のＲＩビーム（ビーム種と入射エネルギー）を用いることにより合成できる原子核の領域が

格段に広がり、原子核の存在限界に位置する極不安定核の構造研究が可能になる。とくに、中性子過剰核のＲＩビームを用いた深部非弾性散乱等により、より中性子過剰な原子核を生成できる。また特定の励起状態や高スピン状態を生成することも可能になる。これらの原子核の中には、超変形状態やハイパー変形状態などのエキゾチックな変形状態の原子核が期待されている。このような変形状態の生成断面積は小さいので、強度の大きなＲＩビーム（10^{10}粒子／秒）が必要で、１００μＡ程度の大強度陽子ビームを使って生成されるＲＩを使ってはじめて可能になる。これら未知の変形領域を探索することにより、これまで安定核領域で良く成り立つことが知られている殻模型が、陽子数・中性子数比が極端に異なる領域でどこまで適応できるかが試される。新しいマジック数の発現も期待される。

さらに、宇宙における重元素合成は中性子過剰核を経由して行われることが知られている。これに関与する中性子過剰核の崩壊過程の詳細はほとんど知られておらず、中性子過剰核のベータ崩壊確率や遅延中性子放出確率または遅延核分裂確率等の測定は宇宙における重元素合成の過程を理解する上で極めて重要である。

中性子過剰核の研究には多重ガンマ線測定器（クリスタルボール）を使用する。この測定器は遷移強度の小さい状態を選択的に検出できる装置で、現在、小規模ながら原研でも使われている。

（3）ＲＩビームを用いた物性研究

特定のＲＩビームを物質中に埋め込み、ＲＩが埋め込まれた位置での結晶場のつくる電場や磁場を、ＲＩの原子核のスピンとの超微細相互作用を利用してガンマ線の摂動角相関法により測定することができる。この方法では、試料にプローブ核を入れるこれまでの加熱溶解法では困難であった非溶解性のイオンを打ち込むこともでき、また、いろいろな寿命のＲＩを打ち込むことによって高速イオンと結晶場との相互作用を10^{-12}秒オーダーの時間スケールで動的に調べることも可能になる。

ＲＩビームの埋め込み法では埋め込まれた位置を、ＲＩの崩壊からでる放射線を測定することによって正確に決定できる。この手法は、癌治療など生体への粒子線利用にとって重要である。

２．１．３．７　中性子核物理

原子核の形状や核子多体系としてのダイナミックスを研究する手段として、中性子は古くから用いられてきたプローブである。初期においては放射性の中性子源を用いて共鳴状態の発見がなされ、それに基づく複合核理論の提案が原子核を理解する大きな転機となった。さらには核分裂の発見も中性子核反応によってもたらされ、現在見られる全ての原子力エネルギーシステムおよびその基礎としての核物理研究の発展につながる原動力となってきた。

大強度陽子加速器による核破砕反応で発生する中性子は、基本的にはゼロから入射ビームエネルギーに至る広いエネルギースペクトルを持つ白色中性子として発生する。そのような中性子を利用して原子核反応の断面積を測定することにより、広いエネルギー範囲に至るデータを同時に、かつ系統的に取得することが可能である。但し、白色中性子を実験に用いる場合は入射中性子のエネルギーを弁別するために、中性子をパルス状に発生し、検出器との間で飛行時間を測定する

必要がある。原子炉と異なり、陽子加速器を用いるメリットは、陽子ビームをパルス状にすることにより時間分解能が格段に優れた測定ができる点である。また、高エネルギー陽子による核破砕反応を用いると、ターゲット部での発熱に対して効率よく中性子を発生することができる。中性子科学研究計画で想定されているビーム強度であれば、ナノグラム程度の極微量試料でも捕獲断面積や核分裂断面積が測定可能であると推定され、不安定核や入手の極めて困難な試料の断面積測定が可能となり、データの極めて乏しいマイナーアクチノイドの反応や元素合成プロセスの理解に決定的な重要性を持つ軽核の断面積測定等が期待される。

少量サンプルによる測定の可能性は、例えば原子炉や、本施設で利用可能な大強度陽子ビームを用いてスポレーション反応により不安定原子核を生成し、それをオンライン同位体分離器(ISOL)や迅速化学分離法等で分離・捕集した直後に中性子断面積を測定するといった従来考えられなかった測定手法をも実現させる可能性がある。さらには重イオン分野で発展したクリスタルボール等の測定器を有効に応用することで、中性子過剰核/欠損核領域や超重元素領域、超変形核領域等における原子核物理を飛躍的に発展させるポテンシャルを有している。

中性子科学研究計画における中性子核物理研究では、中高エネルギー領域の中性子実験を主眼においているが、低エネルギー中性子、陽子・π中間子実験もスコープに含め、これら軽粒子と原子核による反応を系統的に研究することを目的とする。

２．１．３．８　ＲＩ製造及び利用研究

高エネルギー陽子加速器とは、200MeV 以上の陽子ビームを発生する装置をいう。低・中エネルギーのイオンビームでは、生成核種は数種類に限定されるが、200MeV 以上では、核破砕反応が起きて、広範囲（数十核種）のＲＩが同時に生成し、低・中エネルギーのイオンビームでは製造不可能なＲＩを製造できる。生成核種の種類が多くなると個々の核種の生成断面積は小さくなるが、入射エネルギーが大きいためにターゲットの有効厚さが増大する（200MeV の陽子では 25－40g/cm^{2}になる）ので、ビーム電流が大きければ、十分な量を得ることができる。これによって医学の治療・診断や生命科学において有用なＲＩを製造できる。

中性子科学研究施設においては、日本ではこれまで利用できなかったＲＩの普及のために、米国ブルックヘブン国立研究所のＲＩ製造施設（200MeV,60μA）の規模以上の陽子ビームによってＲＩを製造する。現在、長半減期の核種は輸入されて利用されている。例えば、^{68}Ge はＰＥＴ装置の校正に必要で、定期的に補充されている。輸入が困難な短寿命核種では、^{67}Cu がある。^{67}Cu は低エネルギーのβ線と、低エネルギーのγ線を放出し、銅のＲＩの中では最も半減期が長く、生体中の銅の挙動を長時間追跡する場合に必要である。その半減期は腫瘍の治療にも適当であって、放射免疫療法への利用が期待されてる。特に、その放出するγ線によって同時に診断も可能であって、治療のための大量投与に先だち、体内での集積度を調べ、適当な投与量を決定できる。なお、核破砕反応によってポジトロン放射体の ^{61}Cu（半減期：3.4 h）と ^{64}Cu（12.7h）が副生するので、これらをある程度減衰させて人体に投与する。

^{28}Mg も短寿命で高エネルギー陽子加速器で製造する必要のある核種であって、マグネシウム代謝の研究に欠くことができない。^{28}Mg は、^{27}Al(α,3p)^{28}Mg 反応でも製造できるが、エネルギ

ーを上げても厚いターゲット収率は 0.7 MBq/μA ・ h を超えることはできないが、陽子加速器では塩素を含むターゲットを照射すると150MeV でこの十倍となる。

^{117m}Sn の原子核は安定な ^{117}Sn の異性体で、スピン・パリテイ 11/2-をもつ。11/2-状態から3/2+の励起状態に M4 遷移する際に放出される内部転換電子及びオージェ電子を骨転移ガンの疼痛軽減に利用することが米国において臨床的に検討されている。同様な骨転移ガンの治療への利用が考えられているβ-崩壊核種 ^{89}Sr, ^{153}Sm, ^{186}Re に比べて、骨髄への障害が小さいとみられる。^{117m}Sn は、高中性子束原子炉で(n,γ)反応または(n,n')反応で製造できるが、担体の少ない高比放射能製品の製造を含めて、高エネルギー・大電流陽子加速器による製造も検討の価値がある。

これまではＲＩ製造法として、照射済みターゲットをホットセルに回収して化学分離によって目的ＲＩを得るものと考えてきたが、高エネルギー陽子加速器では ISOL（Isotope Separator On-line, オンラインアイソトープ分離器）の利用も考えられる。中性子科学研究施設では、この方法によるＲＩ製造をスポレーションＲＩの利用の中で計画している。ISOL では、加熱したターゲットに陽子ビームを照射して、生成物を蒸発させてからイオン化する。質量数の異なる種々のイオンの中から電磁石によって目的のイオンを取り出す。イオン化に先立って蒸発させるために蒸発し易い元素に応用できる。これまで高純度の ^{81}Rb/^{81m}Kr ジェネレーターの製造が試みられている。特に、電磁石によって分離されたイオンは数 10keV に加速されたビームであって、金属箔やポリエチレン膜などに注入することもできる。

２．２　中性子科学研究計画における国際協力

２．２．１　加速器及びターゲット開発の海外の動向と国際協力

大強度陽子加速器は欧米の大強度核破砕中性子源計画である ESS 及び SNS 計画においても、重要な開発課題となっている。両者とも 1.33GeV 及び 1GeV の常伝導空胴リニアックを採用している。また、米国では更に 100mA 以上の APT 計画での陽子加速器開発をロスアラモス研究所で行っている。現在稼働している、線形加速器では、英国のラザフォード研究所にある ISIS が 600MeV、270μA、ロスアラモス研究所の LAMPF が 800MeV,1mA で運転されてる。また、原研計画にも必要な、蓄積リングも両研究所の核破砕中性子源のために設置されている。しかしながら、超伝導陽子線形加速器については、現在運転されているものが無く、世界的にも、ロスアラモス研究所の APT 計画に関連して開発が行われているだけである。但し、最近 ESS 計画においても、超伝導線形加速器のオプションの検討が開始された。

国際協力では、上述のロスアラモス研究所と線形加速器の開発に関して協力を行っている。また、蓄積リングに関してはラザフォード研究所と協力を行っている。更に、最近原研が提案した、レーザーとウイグラー磁石を用いたリングへの荷電変換装置に関連して、実証実験を日米欧で共同して行う計画が持ち上がっている。

核破砕ターゲットの開発に関しては、やはり、SNS 及び ESS 計画で開発が進められている。ESS 計画では、ドイツのユーリッヒ研究所(FZJ)とスイスのポールシェラー研究所(PSI)が中心に

なって開発を行っており、特に PSI では水銀ターゲットの流動実験等、世界的に先行している。一方、米国では、1998 年 10 月に SNS 計画が予算化されたのに伴い ORNL 研究所を中心に活発化している。

国際協力では、原研、ESS 及び SNS 計画の共同により、米国ブルックヘブン国立研究所の 24GeV 陽子シンクロトロン（AGS）を用いて、水銀ターゲット中の熱衝撃による圧力波を調べる実験が 1997 年に始まっている。また、併せて中性子生成効率を 1.5GeV から 24GeV のエネルギー範囲で測定を行った。この他、材料開発では、PSI の核破砕中性子源（SINQ）を用いた陽子ビーム材料照射計画があり、これには米国 ORNL に加え原研も照射試料を提供している。最近、減速材に関して固体メタンペブル混入液体水素の新しい減速材概念を開発するための国際協力グループ（ACOM）が PSI と FZJ を中心に、また、中性子特性実験のために FZJ の 2GeV の陽子リングを用いる計画（JESSICA）が組織されつつある。

２．２．２　消滅処理研究の海外の動向と国際協力

わが国では 1988 年からオメガ計画が開始された。この計画のもとで、原研のほか、動燃及び電中研において、高レベル放射性廃棄物の処分の負担低減と効率化・高度化と積極的安全性の向上、有用元素回収による有効利用と資源化、将来の廃棄物処理処分システムのオプションの拡大、さらに創造的・革新的な原子力技術の開発と他分野への技術移転などの新たな可能性を目指して群分離・消滅処理の研究開発が進められている。現在、わが国のバックエンド方針は深地層処分に基づいておりオメガ計画は、これに対する代替技術開発のための短期的プログラムではなく、基礎的研究開発を進める長期的プログラムとされている。

わが国のオメガ計画の策定を契機として、フランスなどの諸外国においても群分離・消滅処理の研究開発が活発になってきた。特に、大強度加速器技術が大きく進展し、米国、欧州では新規原子炉の建設が難しくなってきたことなどから、加速器駆動システムによる消滅処理技術が注目されている。フランスの CEA/カダラッシュ研究所を中心とした GEDEON 計画（SPIN 計画）、米国のロスアラモス国立研究所の LIFT 計画（ATW 計画）、欧州合同原子核研究機関（CERN）のエネルギー増幅器（EA）計画などのプログラムが進められている。その他、スウェーデン、スイス、ロシア、チェコスロバキア、韓国等でも小規模ながら研究が進められている。国際協力も、経済協力開発機構/原子力機関（OECD/NEA）、国際原子力機関（IAEA）、欧州委員会（EC）により進められている。

これまでに、各国からさまざまな加速器駆動システム概念が提案されてきたが、最近になって原研が当初から提案しているような消滅処理を主目的とする線形加速器、高速炉心を用いたハイブリットシステム概念に収束しつつある。

以上のような背景から、加速器駆動システムによる消滅処理技術の研究開発のために国際的に共同利用できる施設の要望があり、消滅処理実験施設の建設に関心が高まっている。消滅処理実験施設の建設のための研究開発に、国際協力を積極的に活用するとともに、消滅処理実験施設を国際消滅処理実験センターとして国外研究者にも開放する。

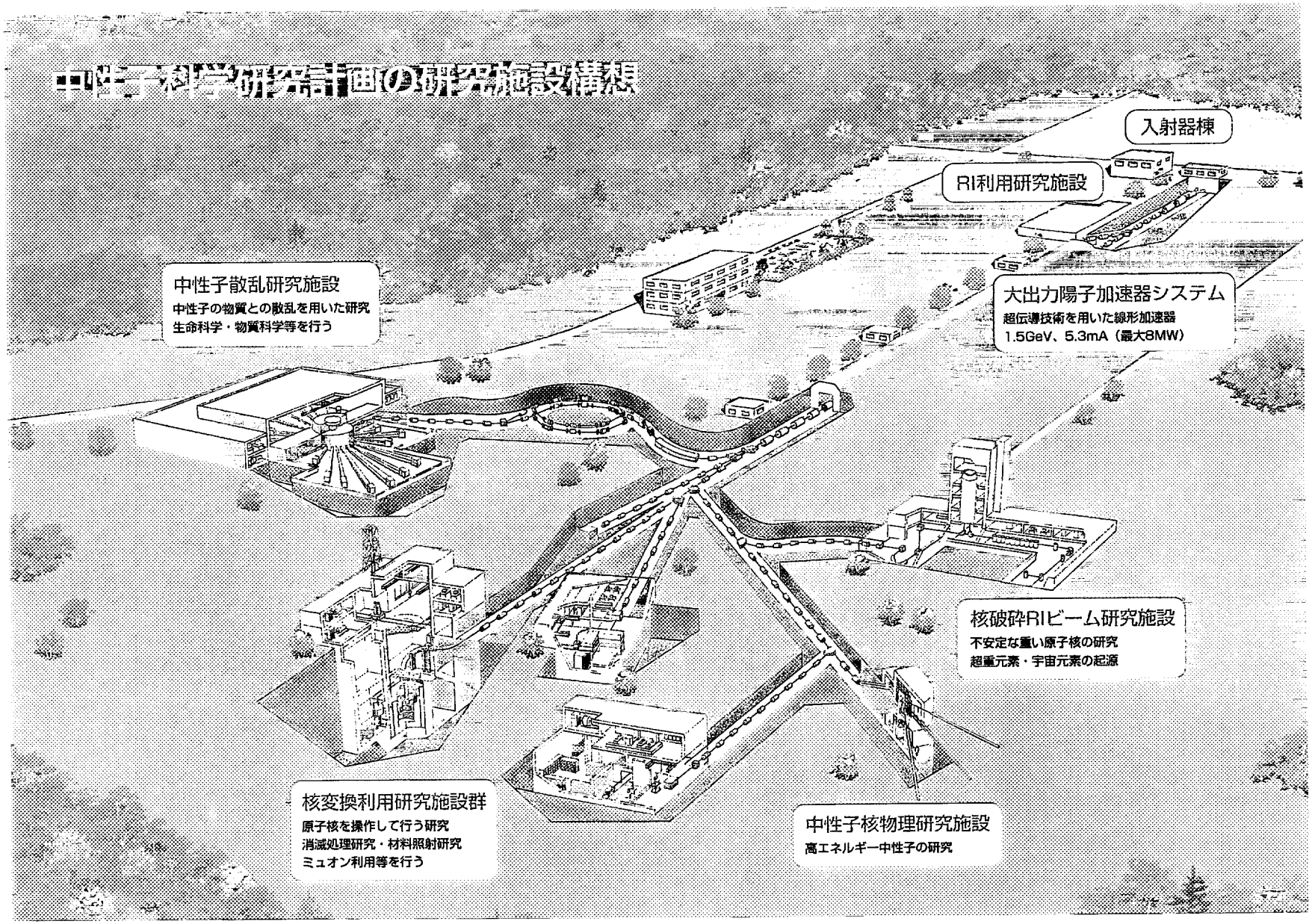


Fig. 2.1.1 Conceptual drawing of a facility complex for Neutron Science Project

This is a blank page.

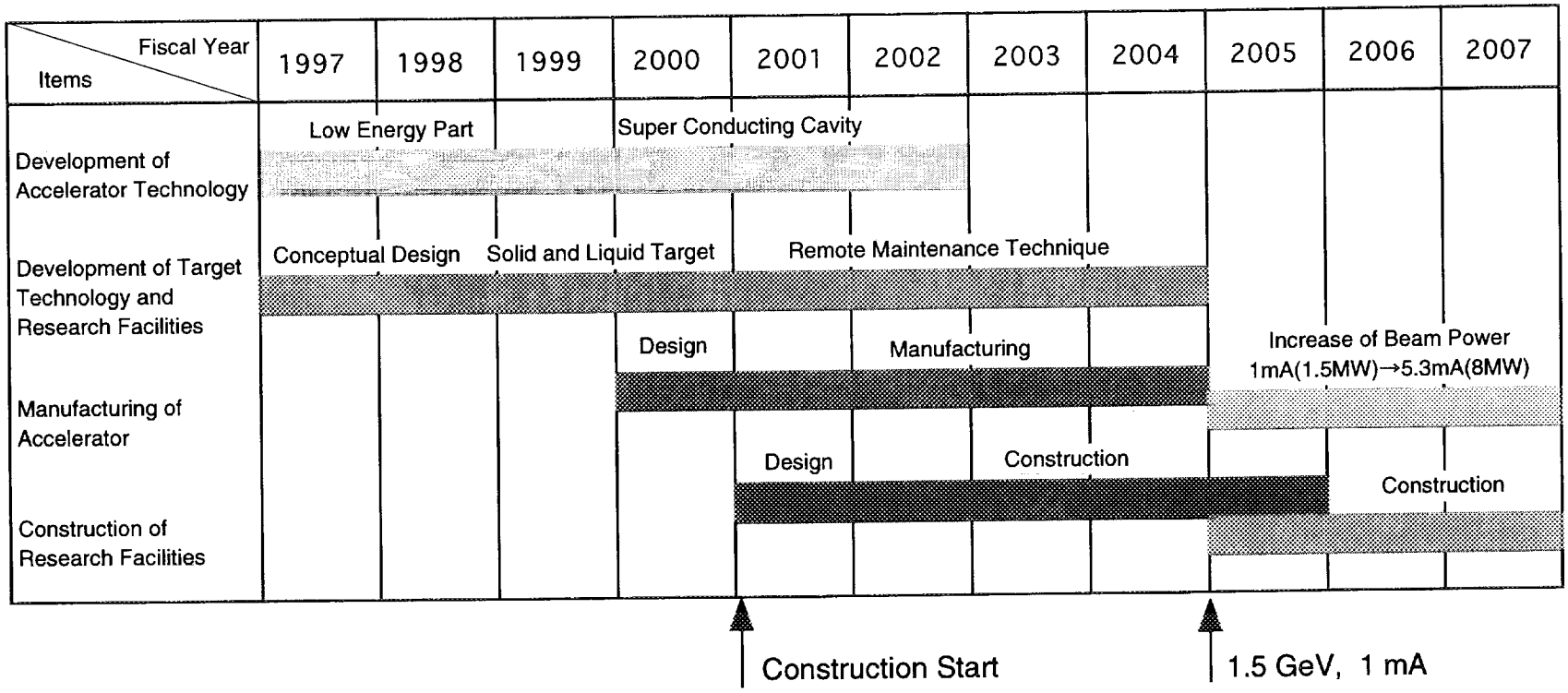


Fig.2.1.2 **Time Schedule of Neutron Science Project**

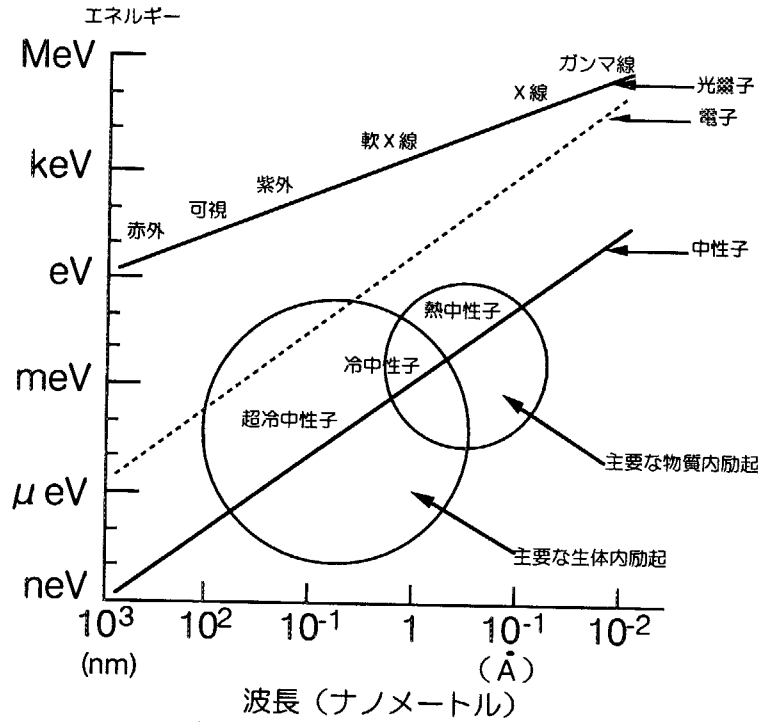


Fig. 2.1.3　　中性子と光量子のエネルギーと波長の関係

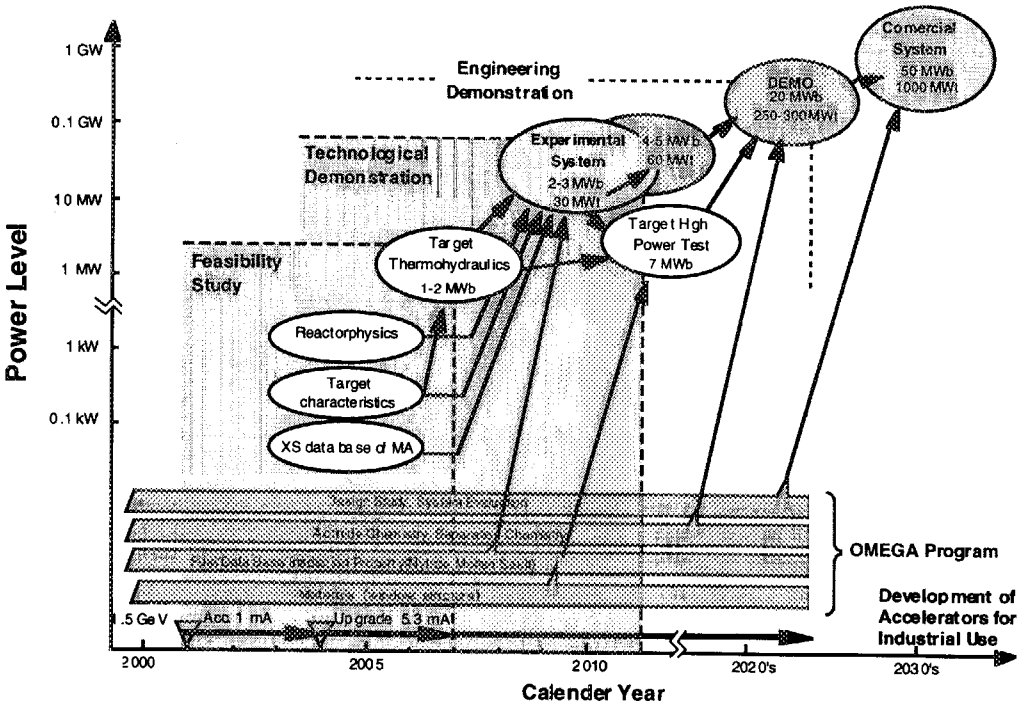


Fig. 2.1.4　　消滅処理技術の開発シナリオ

3．加速器

3.1 加速器の設計現状

3.1.1 開発の概要

中性子科学研究計画構想の中核となるのは、加速エネルギー1GeV クラスで平均加速電流数 mA、すなわちビーム出力数 MW 級の大強度陽子加速器である。将来の放射性廃棄物の消滅処理等の工学的な利用では更にビーム出力は数 10MW に及ぶ可能性がある。

ビーム出力数 MW 級の大強度陽子加速器の建設に対して原理的な困難はないとされており、パルスモードで運転されるピーク電流値のみを考えると、既に、基礎研究の分野では多くの加速器が 100mA 規模で定常的な運転を行っている。しかし、平均加速電流の大きな大電流加速、特に連続（CW: Continuous Wave）モードあるいは 10%以上の高デューティー（パルス幅 x 繰り返し）の運転については、解決しなければならない多くの課題が残されている。特に、大電流を加速する際の高エネルギー領域でのビームの漏れ（スピル）を如何に低減化するかが計画の成否を握る重要な鍵となる [1]。

3.1.2 加速器開発の考え方

大強度加速器開発を円滑に行うためには、加速器の基本的な概念の検討を実施すると同時に、加速器関連の技術基盤を確立することが重要である。加速器建設に対する信頼性は高まりつつあるものの、実用規模加速器の開発に繋がる一歩としては、可能な限り現在の技術の延長線上にある実証された技術を採用し、かつ着実な要素技術の確立の下での加速器建設を目指すことが必要である。Fig.3.1.1 に中性子科学研究用加速器の概念図を示す。

中性子科学研究計画では、計画を 2 つのステップに分けて建設を進めることとした。第一期では、加速器はパルスモードで運転し、平均加速電流は 1mA を目指す。第二期では、連続（CW）モードで運転し、ビーム出力 8MW（平均加速電流 5.3mA）を得る。また、高エネルギー加速部（高 β リニアック部）については CW モードの運転に有利な超伝導リニアックを第一の選択とする。超伝導リニアックは様々な技術的な課題が残されているものの、以下に挙げるような利点を有している。

（1）エネルギー効率を減ずることなくビーム口径を広く取り、ビームの漏れを少なくすることが出来る。
（2）加速器運転用の電力が節減できる。また、加速器自体の建設コストについては、（開発コストに関して不確定な部分が残るものの）軽減が期待される。
（3）平均加速電場を高くすることによって総延長距離の短いリニアックの建設が可能である。
（4）空胴の蓄積エネルギーが大きいためにビームをチョップする（短く区切る）ことによる加速電場への影響が少なくて済む

しかし、一方で、超伝導リニアックの場合、消費する高周波電力がほとんどビームによるものであるため、空胴内の高周波電場や位相の変動がビームに直接的な影響を与えやすい。そのため、高周波電源の制御性に対して不安定要因となり易く、第一期のパルスモード運転の際の高周波電場の安定性について技術開発の要素を残している。

中性子科学研究用加速器の基本仕様を Table 3.1.1 に示す。加速エネルギーと電流値、加速周波数、パルスの時間構造については、各加速器要素の現状技術の信頼性、基礎研究利用や消滅処理の工学試験からの要請、将来の実用化へ向けての加速器技術開発などの観点から決定された。特に、エネルギーの値と加速電流値とは相補的（トレードオフ）の関係にあり、利用側からの要請によっては、エネルギーを減少させ、加速電流値を増加させることも考慮すべきである。

計画の中でも主要な研究施設となる中性子散乱施設については、1μs 程度の強力なパルス中性子の利用が計画されている。この用途では、ビームをチョップすることによって 400ns から 1μs 程度の中間幅パルスを形成し、高エネルギーに加速した後にビーム蓄積リング（整形リング）用いることによってビームを重畳し、強力な短パルスを形成する。

原研では平成 3 年度以来、主要な加速器要素についての要素技術開発と、加速器システムの概念設計検討を実施してきた。現在進めている技術開発の流れを Fig. 3.1.2 に示す。技術開発では、計算コードを用いた加速器システムの設計と同時に、要素技術開発として 4 つの主要な装置群、①低エネルギー加速部、②高エネルギー加速部、③高周波源、④蓄積リングの開発を並行して実施している。また、各加速器要素の本格的なハイパワー試験やビーム加速試験を行うための技術開発エリア、インフラストラクチャー等の整備を進めている。

3.1.3 低エネルギー加速部

加速粒子は低エネルギー部において加速電場の歪みや、粒子自身が持つ電荷による反発力（空間電荷効果）の影響を最も受けやすい。このため、低エネルギー加速部の性能によってビームの質が決定されてしまう。中性子科学研究用加速器では、イオン源を出た後のビームを 2MeV まで高周波４重極リニアック（RFQ）を用いて加速し、その後、さらに、陽子のエネルギーが 100MeV 近傍までドリフトチューブリニアック（DTL）/分離型ドリフトチューブリニアック（SDTL）を用いて加速する。

低エネルギー加速部の開発の第一ステップとして各加速器要素（イオン源、RFQ、DTL/SDTL、高周波源）のＲ＆Ｄを進めてきた。Fig. 3.1.3-a に低エネルギー加速部の開発を行うための陽子リニアック開発試験装置の概念図を示す。装置の写真を Fig. 3.1.3-b に示す。

3.1.3.1 イオン源の開発

水素イオン源は、核融合炉中性粒子加熱装置（NBI）開発グループとの協力の下で進めてきた。まず、正水素イオン源の開発では、NBI グループで長年の経験のある体積生成型マルチカスプイオン源を採用し、イオンプラズマの生成にはタングステンフィラメントによるアーク放電を利用

する。現在、加速電圧 100kV において、引き出し電流 140mA 以上（パルス幅 1ms、デューティー 10%）を達成しており、前段加速部で必要とされるイオン源の性能を満足している。

一方、中性子散乱実験施設に短パルスを供給するための負水素イオンの開発では、正イオン源の電極を改造した負イオン源による予備実験を終了し、更に、新たな負水素イオン源を製作してビーム試験を開始した。また、並行して、負水素イオン源専用高圧電源の整備を進めている。

3.1.3.2 RFQ の開発

イオン源から引き出された水素イオンビームは、LEBT（低エネルギービーム伝送系）でビームのサイズ、方向を調整（マッチング）した後、RFQ へ導かれる。RFQ では 100keV の水素イオンを 2MeV まで加速する。試作した RFQ は、周波数 200MHz の 4 ベーン型であり、イオン源とともにビーム加速試験を実施している。現在、正水素イオンの加速電流は、最大 100mA（ピーク値）で、定常的には 10%デューティーで 50～60mA を安定に加速することが可能である。さらに、信頼性の向上、ビーム計測技術の開発、負イオン源の加速等を目的として、ビーム試験を進めている。

高エネルギー加速部で超伝導リニアックを想定した場合、RFQ は CW 運転が可能でなければならない。そのため、新たに CW-RFQ(CW 運転を前提にした RFQ)の設計検討を開始した。これまでの R&D 機では、ベーンとタンクとの間にある RF コンタクトがデューティー向上の障害となっていたために、CW-RFQ ではベーンとタンク間の溶接を一体化して行う構造を検討している。

3.1.3.3 DTL/SDTL の開発

DTL/SDTL の R&D では、内蔵 Q マグネットの開発、RF 特性試験、熱特性試験を目的として、最上流部分の 1m 長さのモデルタンクを製作した。周波数は RFQ と同じ 200MHz で、磁場勾配 80T/m のホローコンダクター型 Q マグネットを上流部の 2 つのドリフトチューブ内に組み込んだ。当初は高周波パワー負荷時に端板とタンク間の RF コンタクト部の接触不良等でデューティーが向上しなかったが、補修とコンタクトの改良により 20%デューティーでも安定に運転することが出来るようになった。

また、CW-RFQ と同様 CW-DTL/SDTL のパラメータについても検討を行った。CW-DTL/SDTL も、200MHz の加速周波数を想定して設計検討を進めている。検討では構造自体は R&D 機の設計を基本とし、空胴での発熱を低減させるために平均加速電場を 2MV/m から 1.5MV/m に変更した。R&D で開発した直流励磁ホローコンダクター型の Q マグネットを CW 機においても採用することを想定している。

3.1.4 高エネルギー加速部の開発

高エネルギー加速部は、前述したようにより効率的で信頼性が高く、かつ経済的な構造として期待できる超伝導リニアックを、第一のオプションとして開発していく。CW モードで運転される超伝導リニアックは電子加速器の場合はすでに確立された技術であり、高エネルギー加速器研究機構（KEK）の電子衝突型加速器（TRISTAN）で長年の運転の実績がある。しかし、陽子をエネル

ギー100MeV から最終エネルギー1.5GeV まで加速する場合、陽子の速度が、光の速度の 40%から 90%までエネルギーと共に変化するため、加速構造も順次変える必要がある。陽子用超伝導リニアックの開発では、ビーム挙動と加速空胴の構造強度の面等からの更なる技術開発を実施する必要がある。現在、原研では KEK との共同研究により、超伝導加速空胴の開発を実施している。

3.1.5 高周波源

大強度加速器においては加速構造の適否と共に高周波源を如何に製作するかによって、加速器の信頼性・安定性、建設コスト、さらに運転用電力に大きなインパクトを生じる。本加速器の加速周波数や、ビーム出力に適応可能な高周波源の候補は、100MeV 以下の低エネルギー加速部では 4 極管やクライストロード、ダイアクロードであり、高エネルギー加速部では IOT(Inductive Output Tube)、クライストロンである。現在これらの候補に対して、概念設計検討を進めると同時に、プロートタイプの試作・試験を進めている。

3.1.6 ビーム蓄積リング

ビーム蓄積リングの概念的な設計検討を進めている。中性子散乱実験用ビーム蓄積リングでは、負イオンを蓄積リングに導いた後、荷電変換し、～数 100ns～1μs の中間幅パルスを形成する。5MW に相当するリングへの最大蓄積陽子数は $4x10^{14}$ppp にも及ぶ。このように、蓄積電流値は限界に近いため、蓄積途中のビームの漏れの低減化、蓄積中のビーム不安定性の減少等の様々な課題の克服が必要である。

3.1.7 まとめ

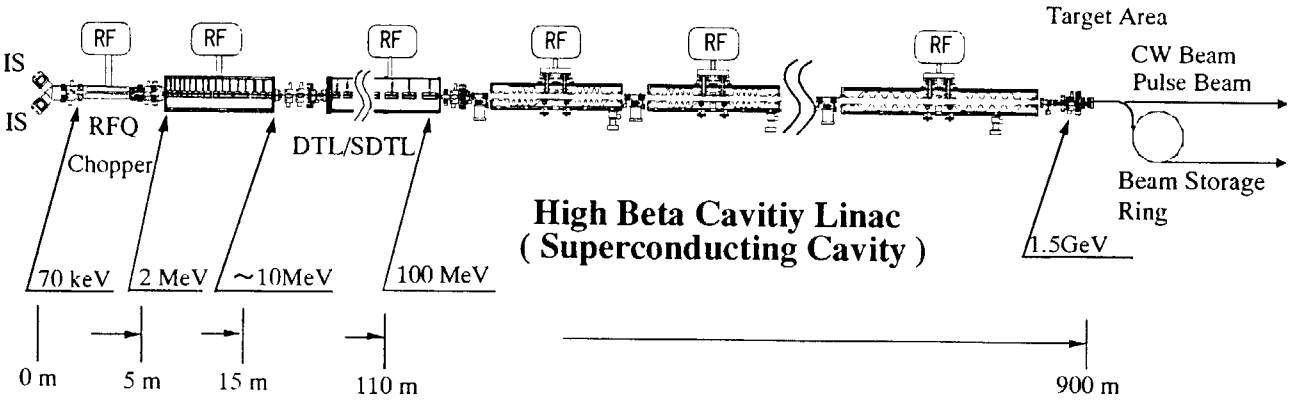
平成 3 年度から実施している大強度陽子加速器の R&D でイオン源、RFQ、高周波源、DTL 各要素の試作試験を進めた。また、RFQ までの機器についてはビーム加速試験を行った。また、高エネルギー領域では超伝導リニアック、ビーム蓄積リングを使用することを想定し、空胴の開発、概念設計を進めている。

参考文献

[1] M. Mizumoto et al.; "High Intensity Proton Accelerator for Neutron Science Project at JAERI", Proc. of European Accelerator Conference, June 22-26, 1998, Stockholm, Sweden.

Table 3.1.1　大強度陽子加速器の基本仕様

・エネルギー：	1.5GeV
・加速粒子：	負水素イオン，正水素イオン
・加速電流：　第1期	パルス平均電流　1mA，ピーク電流　16.7mA （パルス幅 2ms，繰り返し 50Hz）
第2期	CW　最大電流 5.3mA パルス平均電流 5.3mA、ピーク電流 30mA
・低エネルギー加速部：	RFQ、DTL/SDTL 常伝導リニアック，200MHz
・高エネルギー加速部：	超伝導リニアック，600MHz
・中間パルス構造：	パルス幅～400ns、間隙～270ns
・チョッピング効率：	60%



I S : High Brightness H Ion Source
RFQ : Radio Frequency Quadrupole Linac
DTL : Alvarez Type Drift Tube Linac
RF : Radio Frequency Power Source

Fig. 3. 1. 1 中性子科学研究用加速器の概念図

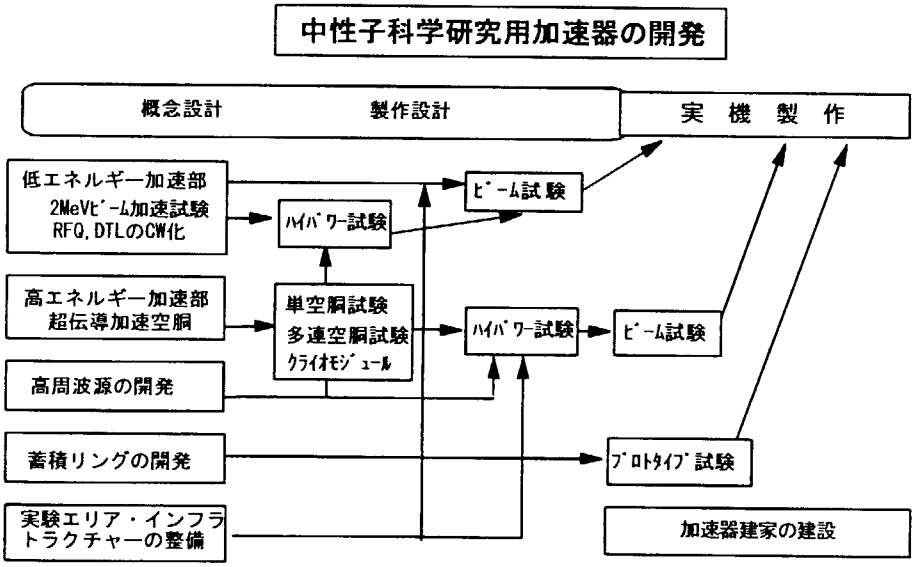


Fig. 3. 1. 2 大強度陽子加速器の技術開発の流れ

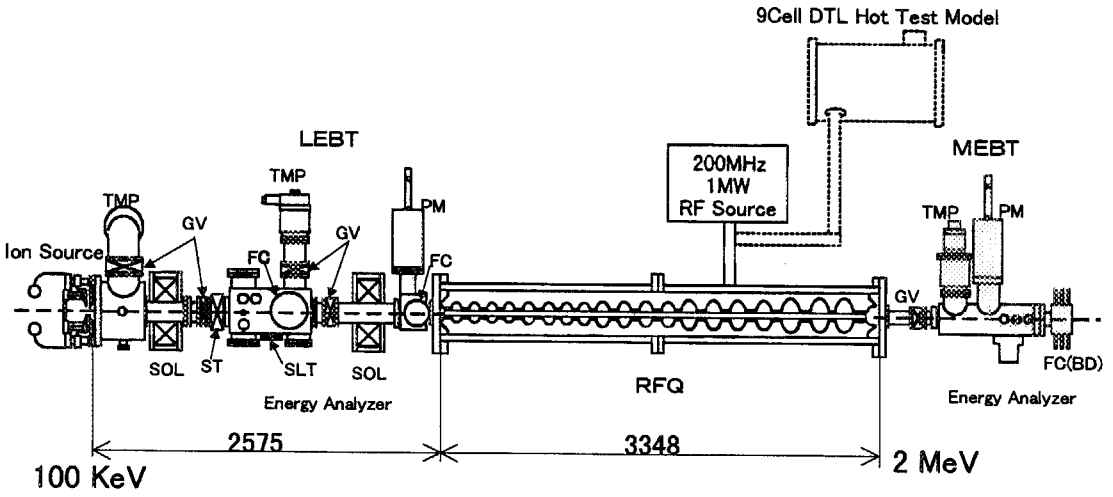


Fig.3.1.3-1a　陽子リニアック開発試験装置の概念図

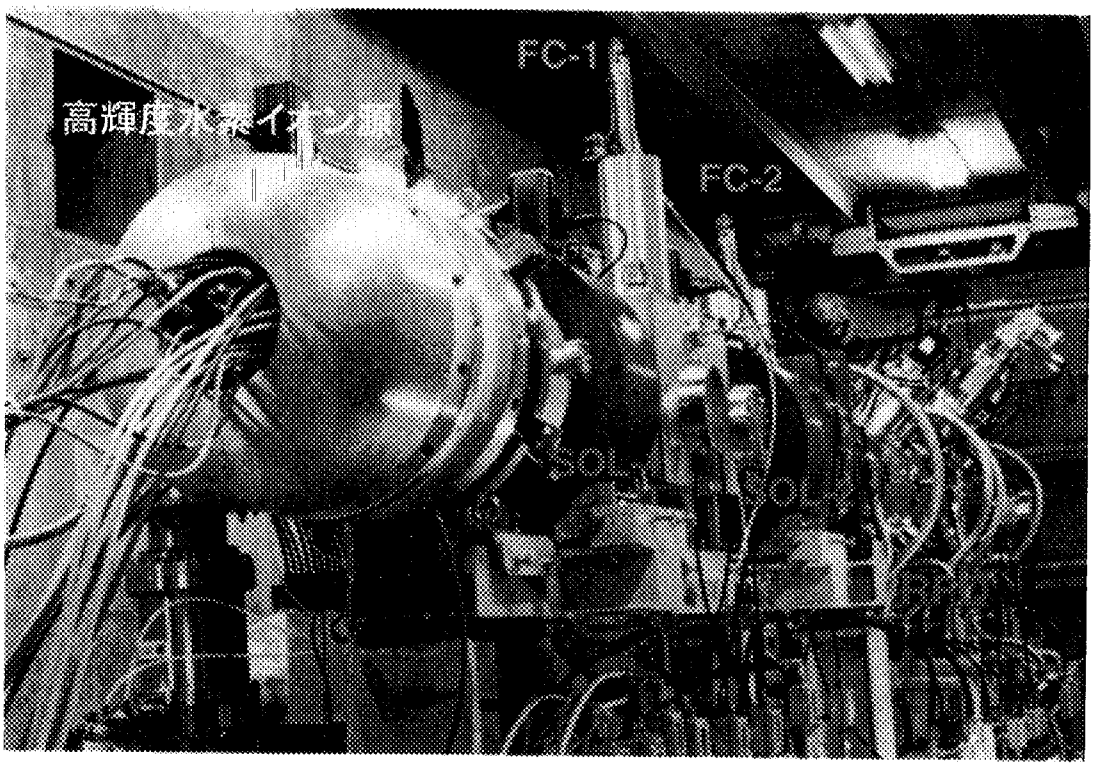


Fig.3.1.3-1b　開発試験装置（写真）

This is a blank page.

3.2 加速器の研究開発

3.2.1 イオン源・ビーム伝送系

3.2.1.1 イオン源

中性子科学研究計画で使用するイオン源の要求性能を、Table 3.2.1.1にまとめる。本計画では、パルス運転用負イオン源および正イオン源の2種類のイオン源を使用する予定である。

3.2.1.1.1 負イオン源

中性子科学研究計画では、中性子散乱施設にビームを供給するためにリニアックの下流に陽子蓄積リングを設置する予定である。リングにビームを入射するためには、ストリッピングセルを通して荷電交換を行う必要があるため、負水素イオン源の開発が必要となる。

負イオン生成法として、主に荷電交換法、表面生成法、体積生成法の3つの方法がある。前者の2つの方法は、比較的大量のアルカリ金属を使用するため取扱いが面倒であり、またビームの収束性が悪い。それに対し体積生成法は、動作が安定している、構造が簡単である、アルカリ金属を使用する場合も少量で済む、正イオン源で蓄積した技術を応用できるなどの利点がある。1980年代以降、核融合の分野を中心に体積生成型負イオン源の研究開発が精力的に進められ現在に至っている。

（1）負イオン源開発の現状

原研では平成9年度より、2MeVビームラインのLEBT機器を使用して負水素イオン源の開発を実施している。今回実験を行った体積生成型負イオン源の概念図をFig.3.2.1.1.1.1に示す。本イオン源は、後述する正イオン源のプロトタイプを、負イオン源に改造したものである。ソースプラズマは、タングステンフィラメントを用いたアーク放電にて生成し、マルチカスプ磁場によって閉じ込められる。本来、本イオン源には多孔ビーム引き出し用としてビーム孔が各電極に7個設けられているが、今回は単孔ビーム試験を行うために、プラズマ電極上に周辺孔塞ぎ板を設け中心孔のみを使用した。ビーム孔直径は9mmである。ビーム引き出し系は4枚の電極で構成され、プラズマ生成室側からプラズマ電極、引出電極、電子抑制電極および接地電極と呼ぶ。負イオンと同時に引き出される電子は、引出電極中に組み込まれた永久磁石が発生する磁場によって軌道が曲げられ、引出電極上に衝突して除去される。しかし引出電極に衝突した電子は、自分自身の反射または新たに二次電子を生成して加速領域に漏れ出すことがある。そのため電子トラップとして電子抑制電極を設置し、必要ならばこれに引出電極に対し負のバイアス電圧を印加して、電子抑制効果を高めることが出来る[1]。セシウムは、オーブンを用いてプラズマ生成室上蓋から添加した。本実験でのセシウム添加量は約100mgである。

セシウム添加前後の負イオン電流および電子電流のアーク放電パワー依存性を、Fig.3.2.1.1.1.2に示す。負イオン電流は、イオン源下流1.6mに設置したファラデーカップで測定した。測定時の運転デューティは5%（1.0msecパルス幅、繰り返し50pps）である。アークパワー35kW時の負イオン電流は、セシウム添加によって8mAから21mA（電流密度33mA/cm^2）に増加した。また電子電流は、セシウム添加前は負イオン量の約40倍であったが、セシウム添加後は5倍程度に減少した。

負イオンビームのパルス平坦度は、イオン源のガス流量に依存する。セシウム未添加時におけるビーム平坦度のガス流量依存性を、Fig.3.2.1.1.1.3に示す。測定時のビームパルス幅は、2.0msecである。図中の縦軸は、パルス立上り後1.8msecと0.4msecのピーク電流値の差を0.4msec後のピーク電流値で割った値である。低ガス流量領域では、パルス内の電流値は時間とともに減少し、逆に高ガス流量領域では増加する。良好な平坦度が得られるガス流量条件は12SCCM程度と高い。しかしセシウムを使用すると、パルス波形の流量依存性は小さくなり、2SCCM程度の低ガス流量運転でも十分な平坦度が得られることが分かった。Fig.3.2.1.1.1.4に、2SCCMと4SCCM運転時に得られた典型的なパルス波形を示す（図中でIH-と記述した波形）。負イオン引き出しの場合、イオン源下流の残留ガスによるビームの荷電変換損失が問題になるので、低ガス流量運転のメリットは非常に大きい。

セシウムを使用する場合、セシウムが高電圧部分に付着すると放電を誘発するので、イオン源からのセシウム拡散量を十分低く押さえる必要がある。原研の核融合グループでは、核融合NBI用に開発中の定常負イオン源を用いて、セシウムの拡散量を測定した[2]。イオン源内部とイオン源下流ビームライン機器の主要箇所に銅チップを設置し、イオン源の運転後それらのチップを回収し、付着したセシウムの定量分析を行った。その結果をTable 3.2.1.2に示す。イオン源ソース部下流10cmの1時間あたりの付着量は、表より3.6×10^{-2}μg/cm^2.hである。直径9mmの単孔ビーム引き出しの場合、セシウムの拡散量は過大評価しても上記結果の1/10程度であるので、付着速度は3.6×10^{-3}μg/cm^2.hと予想できる。放電を誘発するセシウム付着量は約30μg/cm^{2}であるので、単孔イオン源を運転した場合、10cm下流の機器に対するセシウム除去作業頻度は7,500時間に1回であり、実用上問題はない。後段加速器は現状ではイオン源下流2mの場所に設置される予定なので、セシウムの影響は全く無いと考えられる。

（2）負イオン源の開発課題

a）大電流化

今までの実験結果から、セシウム添加は本計画の負イオン源要求性能を満たす方法として非常に有効であることが分かった。セシウム効果を最大限利用するには、セシウムの導入方法や添加量、プラズマ電極温度などについて、実験によって最適条件を探す必要がある。しかし今回使用した負イオン源は、元来、正イオン源として設計されているため、構造上、これらの最適化実験

を行うのは不可能である。現在、新たに負イオン源を製作し、実験の準備を進めており、今後、この新負イオン源を用いてセシウム添加実験等を継続して行い、負イオンビームの目標達成を目指す。

一方、セシウムを添加しないで大電流負イオンビームを得る方法として、多孔ビーム引き出しが挙げられる。イオン源のビーム孔の単位面積当たりから引き出されるビーム電流（ビーム電流密度と呼ぶ）は、ビーム引き出し口径の小さい方が高い。よって、トータルで同じビーム孔面積でも、大口径の単孔よりも小口径多孔の方が、高いビーム電流値が得るうえで有利である。しかし、多孔のビーム引き出しでは全体のビームサイズが大きくなってしまうため、何らかの方法でビームを絞らなければならない。イオン源ビーム引き出し系の電極間においてビーム引き出し孔の位置に変位を与えると、電極間に偏向静電場を形成されるので、ここを通るビームは偏向を受ける。これを多孔のうちの周辺孔に適用すれば、周辺孔から引き出されたビームをイオン源下流で集束させることができる。原研ではこの方法を用いたビーム試験を実施し、ビーム引き出し孔変位によるビーム集束を確認した[3]。しかしこのようなビームを加速器がアクセプトできるかどうか、今後の検討が必要である。

b）長寿命化

負イオンビームと同時に引き出される電子は、一般的にはイオン源の第2電極に永久磁石を設置し、磁場によって電子を偏向し第2電極上に当てて除去する。しかし、大電流ビームを高デューティーで引き出すイオン源では、多量の電子が熱負荷となって電極を破損する恐れがあり、イオン源の寿命に大きな影響を与える。ESS用負イオン源では、引出電極は設けずにその代わりイオン源の外部に専用の電子抑制ダンプを設け、フル加速された電子を強磁場によってダンプに導く方法を提案している[1]。イオン源の外部ならば、基本的に高電圧や設置スペースの制限が無いため、より強固なダンプの設置が可能となる。しかし電子がフル加速されるため、発熱量は多大なものになる。一方、SNS用負イオン源では、第１電極上に0.1 T以上の強磁場を生成し、引き出される電子の方向を180度曲げて、第1電極に戻す方法を提案している[5]。この方法を使えば電子が全く加速されないため、電極の熱負荷は非常に少なくなる。しかしこのような強磁場が存在すると、負イオンビームも偏向を受ける。現在、三次元ビーム計算コードを使用して、負イオンビームの偏向量やそれに対する最適なビーム引き出し構造の検討を実施している[6]。

イオン源の寿命を決める主要因は、この他にフィラメントの寿命がある。これについては、正イオン源についても同様の問題であるので、正イオン源の項で述べる。

3.2.1.1.2　正イオン源

（1）正イオン源開発の現状

現在RFQの入射器として稼動しているマルチカスプ型正イオン源の概念図をFig. 3.2.1.1.2.1に示す。本イオン源では、3本のタングステンフィラメントによるアーク放電を使用して、プラズマ生成を行っている。ソースプラズマは、プラズマ生成室壁に並べられた永久磁石が生成する

マルチカスプ磁場により閉じ込められる。閉じ込め磁場強度は、壁付近の最も強い場所で2kG程度、生成室の中央では30G以下である。

ビーム引き出し系は、４枚の電極で構成されており、プラズマ生成室側からプラズマ電極、中間電極、減速電極および接地電極と呼ぶ。プラズマ電極のビーム孔直径は10.0mmである。中間電極を設けることで、2段ビーム引き出し系を形成し、中間電極の印加電圧を変えれば、ビーム電流とビーム質の調整を容易に行うことができる。今、プラズマ電極電位をVp、中間電極電位をVgとして、分圧比Γを以下のように定義する。

$$\Gamma = Vg / Vp$$

ビーム電流およびビーム質（エミッタンス）の分圧比依存性をFig.3.2.1.1.2.2に示す。分圧比が大きいと、エミッタンスが最小となるビーム電流（ここでは最適ビーム電流と呼ぶ）は減少するが、最小エミッタンス値は小さくなる。Γ =0.74時の最小エミッタンス値は、0.15πmm.mrad (rms)である。この理由は、分圧比が大きいと1段目の加速ギャップ（プラズマ電極－中間電極間）の電界が小さくなるので空間電荷制限電流が減少し、最適ビーム電流が減少する。その代わり、2段目の加速ギャップ（中間電極－減速電極間）の電界が相対的に大きくなるので静電レンズによるビーム収束効果が増加し、その結果ビームの質が向上するからである。ビーム電流値に余裕があるのならば、なるべく分圧比を大きく選ぶと良いが、大きくし過ぎると2段目ギャップ中での放電破壊の発生頻度が増え、安定な高電圧印加が困難になる。本イオン源のパービアンス特性およびビームイオン組成比をFig.3.2.1.1.2.3に示す。本計画では、RFQの入射エネルギーは70keVである。本イオン源の70kV印加時のトータルビーム電流は90mA、この時の陽子比は70%程度であるので、70kVで得られる陽子ビームは63mAとなり、本計画のパルス運転用正イオン源の要求性能を満足する。

イオン源を大気に曝した直後は、ビーム中に水分子（H_2O^+）等の不純物イオンが多量に含まれる。不純物イオンが多いとビームの等価質量が増加するため、得られるビーム電流値が減少する。Fig.3.2.1.1.2.4に、ビームが発光するバルマーアルファー光のスペクトル分布の典型例を示す。スペクトルの左端ピークはビームプラズマが放出する光で、波長は656.3nmである。その右の4本のピークが、ビームが放出するドップラーシフト光で、左側から不純物イオン（OH^+、H_2O^+、H_3O^+）、H_3^+、H_2^+、H_1^+に対応する。図の上方のスペクトルは、大気開放したイオン源の運転開始1分後、下方は469分後のスペクトルである。明らかにイオン源の運転を続けると不純物イオン量が減少していることが分かる。Fig.3.2.1.1.2.5に、不純物イオン量減少の時間経過示す。運転時間500分（約8時間）で、不純物量は2%程度に減少する。フィラメント交換などでイオン源を大気開放すると、8時間程度のコンディショニング運転が必要となる。

（2）正イオン源の開発課題

これまで示してきたように、本計画用の正イオン源の要求基本性能は、既存の技術で十分達成可能であると考えられる。よって今後は実用化に向けた研究開発が必要となる。ここでは、実用化研究の中の重要課題であるイオン源の長寿命化について述べる。

現在稼動中の正イオン源の連続運転時間は、フィラメントの寿命で制限されており、200時間程度である。そこで今回、フィラメントの主要消耗過程を調べ、フィラメントの長寿命化の可能性を検討した。フィラメントの主な消耗過程は、プラズマによるスパッタリングと温度上昇による蒸発の2つである。スパッタリングが消耗の主過程ならば、フィラメントの占有面積程度ではプラズマ密度に差は生じないので、フィラメントは均一に消耗されるはずである。一方、蒸発が消耗の主過程ならば、温度上昇の高い側、つまりフィラメントのマイナス端に消耗が集中する。よって使用後フィラメントの消耗量の位置分布を調べれば、どちらが主要過程であるか判断できる。Fig.3.2.1.1.2.6に、フィラメントの使用前後の太さ（直径）の変化を示す。本測定では3本のフィラメントのうち、#1フィラメントが断線した時点で、イオン源の運転を停止した（#2、#3フィラメントは未断線。図では#1および#3フィラメントの測定結果を表示）。図中横軸の符号は、フィラメント両端のうちフィラメント電源のプラス端に接続した方をプラス、マイナス端に接続した方をマイナスと記述している。測定結果は、明らかにフィラメントはマイナス端で局部的に消耗している。このことから、フィラメントの消耗の主過程は温度上昇による蒸発であることが分かる。それならば、フィラメントを今までのDC通電ではなくAC通電に変えれば、フィラメントの両端が均等に消費されフィラメント寿命が2倍以上延びる可能性がある。ただしAC通電の場合、フィラメント自身が発生する磁場の影響で電子放出量が時間変化し、アーク電流にリップルが生じる可能性もある。AC通電が有効であるか、今後実験を行って確認する必要がある。

一方、フィラメントの長寿命化方法として、フィラメント材質を変えることが考えられる。長寿命化が期待できる材質として、六ホウ化ランタン（LaB_6）がある。LaB_6は、タングステンと比較して、電子放出係数が高く比較的低い温度で運転できる、蒸発量やスパッタリング率が低いため消耗量が低い、などの特長をもつ。KEK-PS施設では、LaB_6を使用した表面生成型負イオン源の実用運転を実施しており、フィラメント交換頻度は半年に1回程度である[7]。しかし、LaB_6は高デューティの運転では局所的に加熱し、暴走することが考えられる。また、タングステンと比較して非常に高価であること、機械的強度が非常に弱いため、取扱いに注意を要するなどの欠点もある。

また、フィラメントを全く使用しないECRイオン源を採用することも考えられる。ECRイオン源の場合、高周波窓等に寿命が存在するが、フィラメントに比べると長寿命化の手段は容易である。一方で、ECRイオン源の場合、プラズマ生成室内にミラー磁場が存在するため、出力ビームのエミッタンスがアーク放電型に比較して悪いという報告もある。ECRイオン源については、今後開発の検討を行う。

3.2.1.2　ビーム伝送系

3.2.1.2.1　ビームライン

低エネルギービーム輸送系（LEBT）には、負イオン源と正イオン源の2台を設置し、イオン源から引き出されるパルスビームを偏向磁石によってRFQに入射する。LEBTの概念図を

Fig.3.2.1.2.1.1に示す。イオン源から引き出されたビームはソレノイド電磁石で集束させた後、偏向電磁石によって45度偏向させ、RFQ直前のソレノイド電磁石によってRFQとのマッチングをとる。負イオン源ビームラインは、負イオン源からのビーム発散角が正イオンビームに比べて若干小さいため、イオン源とソレノイド電磁石との距離を正イオン源ビームラインよりも少し長くしている。

（1）ビーム軌道計算

負イオン源および正イオン源から引き出されるビームの初期条件をTable 3.2.1.3に示す。また、200MHz－RFQのビーム最適入射条件をTable 3.2.1.4およびFig.3.2.1.2.1.2に示す。本検討では、イオン源出力電流値を0、10、30、50mAの4通りについて、TRACE2Dコードを用いてビーム輸送計算を行った。計算では、イオン源のビーム初期条件とRFQビーム最適化条件をフィッティング条件として、ソレノイド磁場強度を決定した。4通りのビーム電流に対する負イオン源および正イオン源ビームラインの計算結果をTable 3.2.1.5およびTable 3.2.1.6にまとめる。ソレノイド電磁石の仕様として最大軸上磁場3.5kG程度が必要となるが、この規模の電磁石は既にR&D用LEBTで使用しており、製作上特に問題となることはない。

（2）ビーム診断機器

本計画で使用するビーム診断機器は、耐高熱負荷性能を有する必要がある。従来、ビーム電流測定用としてファラデーカップ、ビームプロファイル測定用としてマルチワイヤーモニターが使用されているが、これらの測定器はビームを直接照射して測定する、いわゆる破壊型ビーム測定法を使用したもので、基本的に高熱負荷ビームに対しては測定が不可能である。例えば、RFQ-R&Dモデルで使用しているファラデーカップは、ビームストッパーとビーム電流測定の二つの用途を目的として設計・製作したが、高熱負荷によるカップ表面の融解および二次電子散逸効果によるビーム電流測定誤差が発生し、両方の用途とも満たさないものとなった。

これに対し、測定器に直接ビームを照射しない、いわゆる非破壊型ビーム測定法または瞬時測定法を用いれば、熱負荷の制限は皆無または軽減される。非破壊法の場合はビームを複数の地点で同時に測定することができ、ビームの全体監視が可能となる利点もある。

a）カレントトランスフォーマ

カレントトランスフォーマ（CT）は、代表的な非破壊型ビーム電流測定器である。CTとは、フェライトあるいはアモルファス合金などの強磁性体から成るトロイダルコアの中央に荷電粒子ビームを通し、それを一次コイルと見なしたトランスである。コアに巻いた（2次）コイルに誘起される電圧は、ビーム電流に比例するので、ビーム電流を測定することが出来る。

CTは、ビームダクトの外に設置するものとビームダクト内、つまり真空中に設置するものがある。ビームダクト外に設置するCTはフランスのBergoz社などから市販されている。しかし、CTの内径がそれほど大きくないため、ビームサイズが比較的大きいLEBTでは使用できない可能性がある。その場合はビームダクト中に設置することになり、真空中で使用できるコア材質を選択するか、コアをガラス等で覆うなどアウトガス対策が必要である。

b）高速エミッタンスモニター

破壊型ビーム測定法でも、測定時間が短時間であれば測定器が受ける熱負荷は軽減できる。高速エミッタンスモニターの一例としてノーススロップ・グラマン社が製作しているエミッタンス測定器がある。センサー部分はスリットとファラデーカップ、この間にデフレクターを設置し、デフレクターに印加する電圧とビーム偏向角の相関関係から、スリットから入射したビームの角度を測定する。センサー部分の駆動速度は30cm/secと格段に早く、1回のエミッタンス測定が0.5秒程度で終了するため、ビーム照射による熱破損がほとんどない。

3.2.1.2.2 チョッパー

（1）概要

原研中性子科学用の加速器では1.5GeVに加速されたH-粒子をコンプレッサーリングに貯え1μs以下のパルスとしてターゲット系に送る必要がある。リングに入射するためには（エネルギーの低い時に）ビームをチョップしておく必要がある。原研中性子科学用のコンプレッサーリングではビーム入射の為に270nsのビームがない領域を必要とする。また1μs以下という条件、リング周長の制約からチョッピング条件は400nsの間ビームON、270nsの間ビームOFFなっている。ビーム強度の要求を満たす為にはこの様なチョッピング（ミクロパルス）ビームを幅3.7ms、繰り返し50Hz（マクロパルス）で供給する必要である。代表的なビームパルス波形をFig.3.2.1.2.2.1に示す。また200MHzのビームバンチを考えるとチョッパー電圧の立ち上がり、立ち下がりの時間は5ns以下でなければならない。原研中性子科学で必要とするビームのチョッピング条件をまとめると次の様になる。

・ビームON時間　：　400ns　（立ち上がり時間　5ns以下）
・ビームOFF時間　：　270ns　（立ち下がり時間　5ns以下）
　　（繰り返し周波数　・・・・・　1.49MHz）
・バースト継続時間　：　3.7ms以上
・マクロな繰り返し　：　50Hz

チョッパーの役割としてはこの他にイオン源からのマクロパルスビームの先頭部分約500μsをカットする事も検討する。

（2）システム検討

ビームをチョップする場合、ビームのエネルギーが高ければ必要な電界強度、ビーム軸方向のスペースは大きくなる。また熱的問題、放射化の観点からチョップした後のビームの取り扱いが困難になる。しかしビームのエネルギーが低い場合には空間電荷効果やビームの中性化の問題が顕著に表れ、ビームの質を悪くする懸念がもたれる。そのため中性子源として開発中の最近の加速器（ESS, SNS）はチョッパーをRFQより後段のエネルギーが高いラインに入れるように計画されている。ESS, SNSのチョッピング箇所での粒子のエネルギーはそれぞれ2.5MeVと2MeVである。またLAMPFでは7MeVでのチョッピングと100keVでのチョッピングの場合の2通りを検討している。いくつかの伝送線型チョッパーの概要をTable 3.2.1.7に示す。現在の半導体を考えた場

合、チョッパー電源の電圧は1kV以下に設定するべきと考えられる。また立ち上がり，立ち下がりの時間は10ns程度は必要と思われる。正確なチョッピングを実現するには加速器のRF周波数の１周期よりも早い立ち上がり、立ち下がり時間を実現しなくてはならない。200MHzのシステムで正確なチョッピングを実現するには、5ns以下で立ち上げ立ち下げが可能な電源が必要となる。チョッパーの開発ではチョッパー本体にもまして電源の開発が重要になる。

ａ）RFQ下流でチョップする場合

SNSの例を参考にＲＦＱの後でチョップする場合を検討した。ビームエネルギーは2MeV（β=0.065）である。チョッパーの長さ、電極のギャップをそれぞれ50cm、2cmとするとビームを10mrad偏向するには1650Vのパルス電源が必要である。またDTLとのマッチングをとるためにチョッパーを含め5m以上のビームラインが必要となる。MEBT1の機器配置をFig.3.2.1.2.2.2に示す。

ｂ）RFQ上流でチョップする場合

LEBTでチョップする場合を検討した。ビームエネルギーは70keV（β=0.012）である。電極ギャップを4cm、電極電圧を現実的な値850Vし、ビームの偏向角を45mradとするとチョッパーの長さは30cmでよい。チョッパーの30cm下流にビームストッパーを設置するとすればここでのビームのずれは約40mmとれ、ビームが作る電場を考えても十分なチョッピングが可能と思われる。しかしエネルギーが低い場合ビームの中性化が大きな問題になる。中性化に必要な時間はチョッピング間隔に比べ長いが中性化に関わるプラスイオンの寿命はチョッピング間隔と同程度と思われる。そのため中性化が起こるとチョップされたビームの先頭では中性化の影響を受けないが、後のビームは中性化の影響を受けることになり、TWISSパラメータがパルスの中で変化することが懸念される。H^-粒子がH^+粒子を生成する確率は70keVの場合2MeVに比べ約20倍程度と予想される。

ビームの中性化については分からない要素が多々有るが、真空度とイオン源からのビームの発散角を調べたデータから考えると、チョッパー部分の真空度は1×10^{-6}Torr程度にする必要があると思われる。

（３）構造検討

チョッパーの構造は伝送線路型で検討する。チョッパーをLEBT（70keV）に設置した場合でもMEBT（2MeV）に設置した場合でも、チョッパーの基本構造にはほとんど影響がなく、電極間の間隙、チョッパーの長さ、遅延伝送線の長さが変わるだけである。伝送線型チョッパーの概念をFig.3.2.1.2.2.3に示す。またNSPで検討した場合の基本寸法をTable 3.2.1.8に示す。電極の間隔は25mmとした。

LEBTにチョッパーを設置した場合，ビームとチョッパー電圧との同期をとるために約6.8nsの遅延回路が必要である。粒子のエネルギーが2MeVだと1.3nsとなる。通常遅延回路にはパルス波形を鈍らずに伝達するために同軸ケーブルが使用される。6.8nsの遅延回路にはケーブルの波長短縮率を65%として約140cmの同軸ケーブルが必要である。電極は特性インピーダンスを合わせ

るためにストリップラインで設計する。特性インピーダンスは通常50Ωで設計されるが電源容量を小さくするために250Ωで設計することとした。同軸ケーブルの特性インピーダンスは、

$$Z = 60 \bullet \ln.(\frac{Dout}{Din})$$

で表される。つまりインピーダンスを大きくしようとすると外径と内径の比を指数関数的に大きくする必要がある。特性インピーダンスを250Ωとし、内径の直径を2mmとすると外径は約13cmにもなってしまう。チョッパーは限られた空間に設置する必要があるため１つの遅延回路に13cmものスペースをとる事はできない、そのため遅延回路はレッヘル線を採用する事にした。レッヘル線はシールドが無いため同軸線に比べ特性が劣化すると思われる。Fig.3.2.1.2.2.4に遅延回路として同軸線を使用した場合と、レッヘル線の場合の電極電圧の波形を示す。レッヘル線の場合は特性インピーダンスの容量と同程度の浮遊容量があるとして計算している。この結果，同軸線を使用した場合（理想的条件）、パルスオフ時のリンギングは約1%なのに対し、レッヘル線の場合は約3.5%に増え減衰する時間も5nsから10nsになることが分かった。実際の機器では遅延回路と電極の接合部でのミスマッチが考えられる。この接合部の構造を考えるとむしろレッヘル線の方が自由度が有り都合がよい点も有る。チョッパーのビーム軸部分の電場分布をFig.3.2.1.2.2.5に示す。またビーム軸方向の位置での中心部の電場の変化をFig.3.2.1.2.2.6に示す。

（4）まとめ

チョッピングされるビームのエネルギーが低い場合には空間電荷効果やビームの中性化の問題が顕著に表れ、ビームの質を悪くする懸念がもたれる。そのため中性子源として開発中の最近の加速器（ESS，SNS）はチョッパーをRFQより後段のエネルギーが高いラインに入れるように計画されている。しかし、ESS、SNSの場合はLEBTの機器構成からの制約も大きく影響しているとおもわれる。一方NSPの場合は正負同時加速のためにLEBTにベンディングマグネットを入れる必要があり、LEBTのラインは約3.2mである。チョッパーの設置位置を決定するには、まず現在あるＲ＆Ｄ機（イオン源、LEBT、RFQ）を改造し、LEBTのチョッピングのテストを行う必要があると思われる。その場合LEBTの真空度は1×10^{-6}Torr程度にしておく必要がある。Ｒ＆Ｄ器でチョッパーの試験を行う場合の機器配置案をFig.3.2.1.2.2.7に示す。この場合のビームエネルギーは100keVである。チョッパーの電極間隙は40mmである。そのためチョッパー上流にΦ25のフィルターを入れビームの一部をカットする事にした。チョッパーにより偏向されたビームはチョッパーより約30cm下流に設置するΦ40のフィルターによりダンプされる。ここでのビームの変移は約40mmと予想される。チョッパーとRFQ間を1×10^{-6}Torr程度の真空度に保つためにチョッパー部分にポンプ取り付け用のΦ253のフランジを２ポート、RFQ直前の診断箱にΦ203のフランジを１ポート準備しておく。真空に関する検討は差動排気型のイオン源を取り付けイオン源からのガスの流れ込みを測定してから検討を行う。

電源に関してはあまり検討を行わなかったが、現状で以下のことが問題になると思われる。

①繰り返し周波数が高いためスイッチに負担がかかる。

②バーストモードの継続時間が長い事。

③チョッパーをLEBTに設置した場合でも電流値が４Aにもなってしまう事。

①の対策としてはチョッピングを500nsビームON、300nsビームOFFの様にする事が考えられるが、リングが大きくなってしまう。②に関してはビームのピーク値を上げることが考えられる。③については伝送線タイプでなく一般的な静電チョッパーを並べる、といったことが考えられる。電極の静電容量を10pFと仮定した場合の静電チョッパーの電圧波形をFig. 3. 2. 1. 2. 2. 8に示す。静電チョッパーでも電源側にチョッパーにシリーズに適当な値の抵抗を入れるとリンギングを十分に押さえることができることが分かった。レッヘル線式の伝送線型チョッパーで良い特性が得られなかった場合はこの方式も検討する。

参考文献

1 Y. Okumura, et al., "Development of a Volume H- Ion Source at JAERI", Proceedings of 11th Symp. on Fusion Engineering , Austin, (1985), 113
2 Y. Okumura, Private communication, (1997)
3 H. Oguri, et al., "Development of a High Brightness Negative Ion Source", Rev. Sci. Instrum. 67 (3), (1996), 1051
4 K. Volk, et al., "The Frankfurt H- Source for the European Spallation Source", Proceedings of the 1998 Linac Conference, Chicago, USA, (1998)
5 M. A. Leitner, et al., "Development of the Radio Frequency Driven H- Ion Source for the National Spallation Neutron Source", Rev. Sci. Instrum. 69 (2), (1998). 962
6 M. A. Leitner, et al., "Simulation of the Low Energy H- Injector into the National Spallation Neutron Source Radio Frequency Quadrupole Accelerator", Rev. Sci. Instrum. 69 (2), (1998), 965
7 A. Takagi, Private communication, (1996)

Table 3.2.1.1　中性子科学研究計画用イオン源の目標性能

引出粒子	負イオン	正イオン
運転モード	パルス	パルス
ビーム電流 (mA)	50	50
ビームエネルギー (keV)	70	70
パルス長 (ms)	3.7	2.2
繰り返し (Hz)	50	50
デューティー (%)	18.5	11
RMS エミッタンス (πmm.mrad)	0.1	0.1

Table 3.2.1.2　定常負イオン源のセシウム拡散量

イオン源ビーム引き出し孔	直径9mm×30個
運転条件	エネルギー50keV、ビーム電流300mA
運転時間	140時間（定常）
セシウム付着量測定結果	イオン源ソース部下流10cm：5μg/cm^2 イオン源ソース部下流100cm：0.1μg/cm^2

Table 3.2.1.3　イオン源から引き出されるビームの初期条件

	ビーム エネルギー (keV)	エミッタンス(π mm·mrad)			ツイスパラメータ		
		規格化 RMS	規格化 100%	非規格化 100%	α	β (mm/mrad)	γ (mrad./mm)
負イオン源	70	0.1	0.6	50	0	0.18	5.56
正イオン源	70	0.1	0.6	50	0	0.08	12.5

Table 3.2.1.4　200MHz－RFQのビーム最適入射条件

規格化エミッタンス (π mm·mrad)	ビーム電流 (mA)	RFQ入口の整合条件		
		α	β (mm/mrad)	γ (mrad/mm)
0.6	0	1.34	0.0774	36.12
0.6	10	1.74	0.0933	43.17
0.6	30	2.64	0.1295	61.54
0.6	50	3.63	0.1703	83.25

Table 3.2.1.5　負イオン源ビームラインの集束要素パラメータ

	ソレノイド電磁石		45度偏向磁石			ソレノイド電磁石	
ビーム電流	有効長	磁場	入射エッジ角	曲率半径	出射エッジ角	有効長	磁場
(mA)	(mm)	(T)	(度)	(mm)	(度)	(mm)	(T)
50	206	0.3063	0	450	18	206	0.3273
30	206	0.3045	0	450	18	206	0.3227
10	206	0.3174	0	450	18	206	0.3127
0	206	0.2961	0	450	18	206	0.2796

Table 3.2.1.6　正イオン源ビームラインの集束要素パラメータ

	ソレノイド電磁石		45度偏向磁石			ソレノイド電磁石	
ビーム電流	有効長	磁場	入射エッジ角	曲率半径	出射エッジ角	有効長	磁場
(mA)	(mm)	(T)	(度)	(mm)	(度)	(mm)	(T)
50	206	0.3184	0	450	18	206	0.3248
30	206	0.3135	0	450	18	206	0.3217
10	206	0.3196	0	450	18	206	0.318
0	206	0.3022	0	450	18	206	0.2874

Table 3.2.1.7　チョッパーの概要

		NSNS rfq-dtl H-	ESS rfq-rfq H-	ANL 132	BNL. befor rfq H-	LAMPF after rfq befor rfq H-		JHF after rfq H-
周波数	MHz	402.5	175	12.125	200	201.25	201.25	432
エネルギー	MeV	2.5	2		0.035	7	0.1	3
ベータ		0.0731	0.0654	0.0085	0.0087	0.1219	0.0147	0.0801
ﾋﾞｰﾑ電流	mA	27.7	59.5	?	20	30	30	20
長さ	cm	50	60	41	38	100		100
電圧/1	V	900	2000	1000	860	2000		1500
ギャップ	mm	10		36	80			25
Rise Time	ns	2	4.5	5	less 10	5		10
Delaylina	cm	35.5		529.4	299.9	9.8		87.4
ang. def	m rad	8.96			57.78	14.32		10.00
del(X)	mm	4.48			21.98	14.3		9.96

Table 3.2.1.8　チョッパーの基本寸法

		ＲＦＱの後	ＲＦＱの前
		H-	H-
エネルギー	Mev	2	0.07
ベータ		0.0654	0.0123
長さ	cm	50	30
電圧/1	V	1650	850
ギャップ	mm	20	40
遅延回路	cm	40	212
偏向角	m rad	10.3	45.1
変移	mm	5.1	13.5

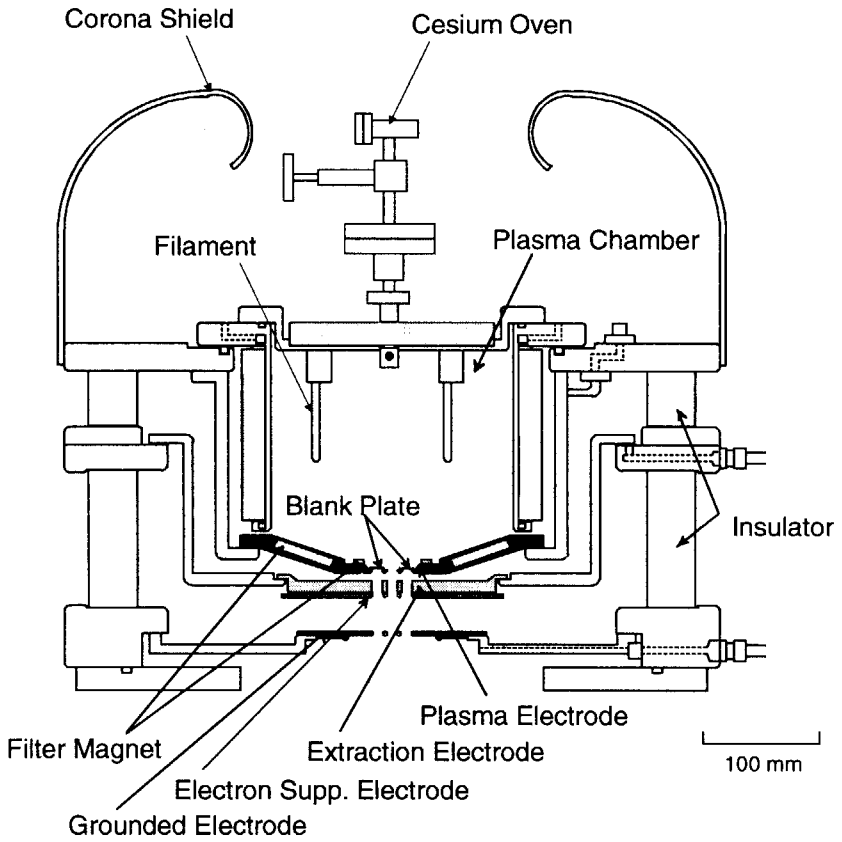


Fig. 3.2.1.1.1.1　体積生成型負水素イオン源概念図

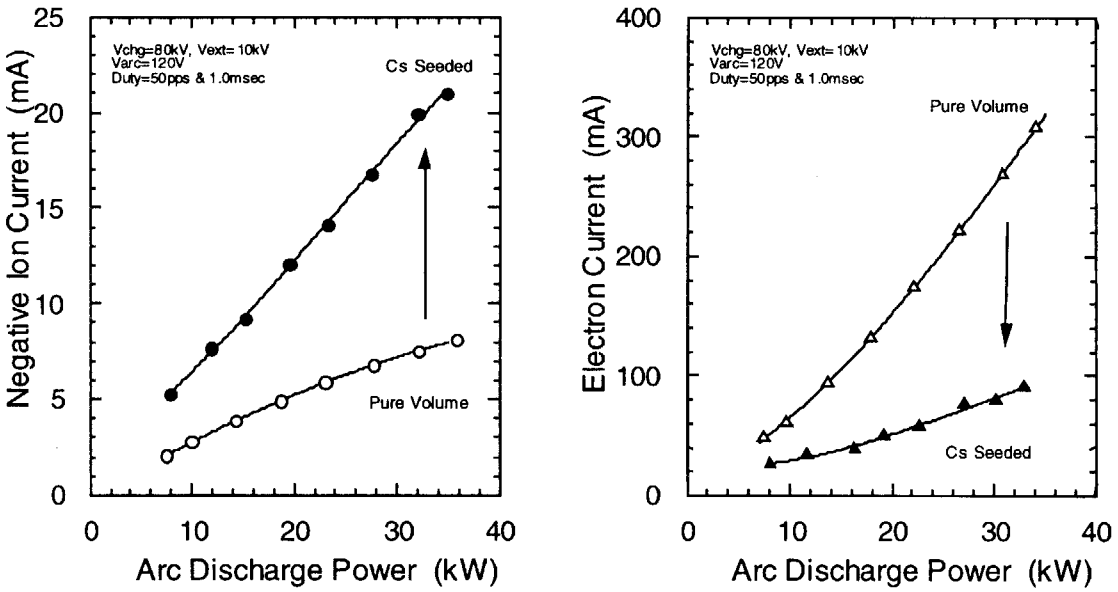


Fig. 3.2.1.1.1.2　負イオン電流・電子電流のアーク放電パワー依存性

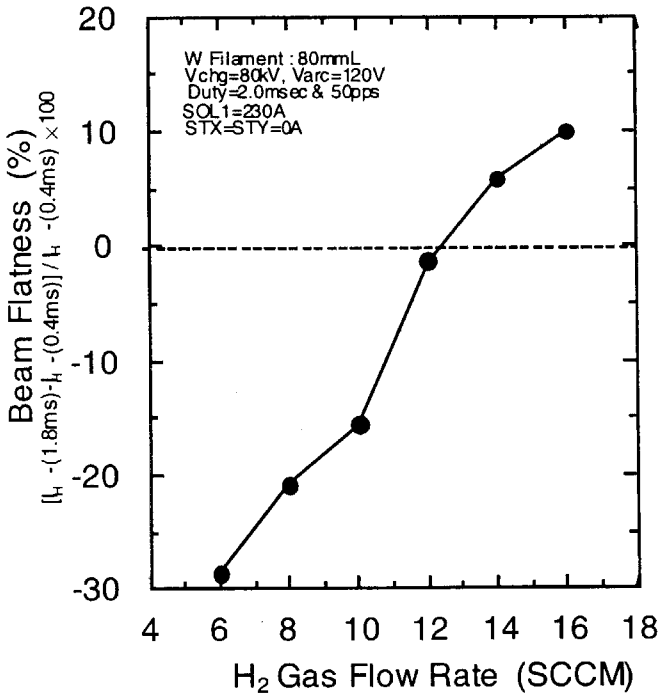


Fig. 3.2.1.1.1.3　ビームパルス平坦度のガス流量依存性（セシウム無し）

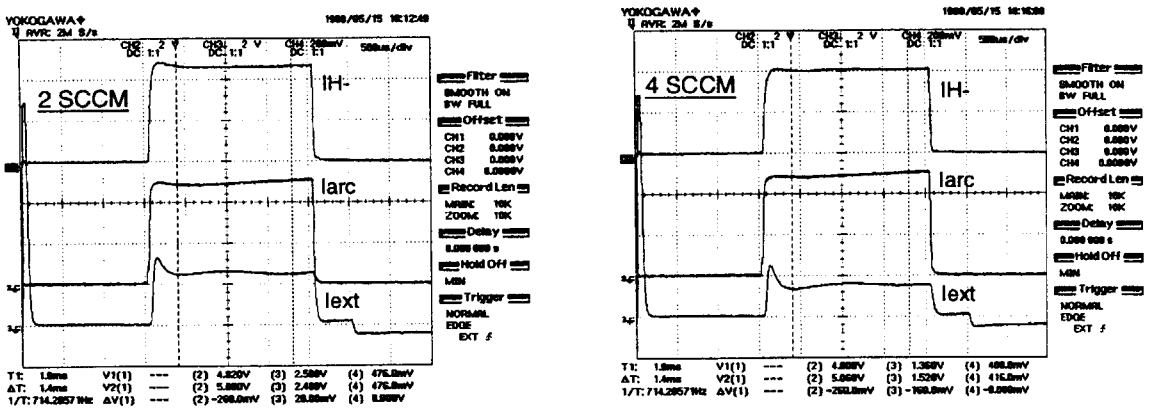


Fig. 3.2.1.1.1.4　ビーム波形（セシウム添加時）

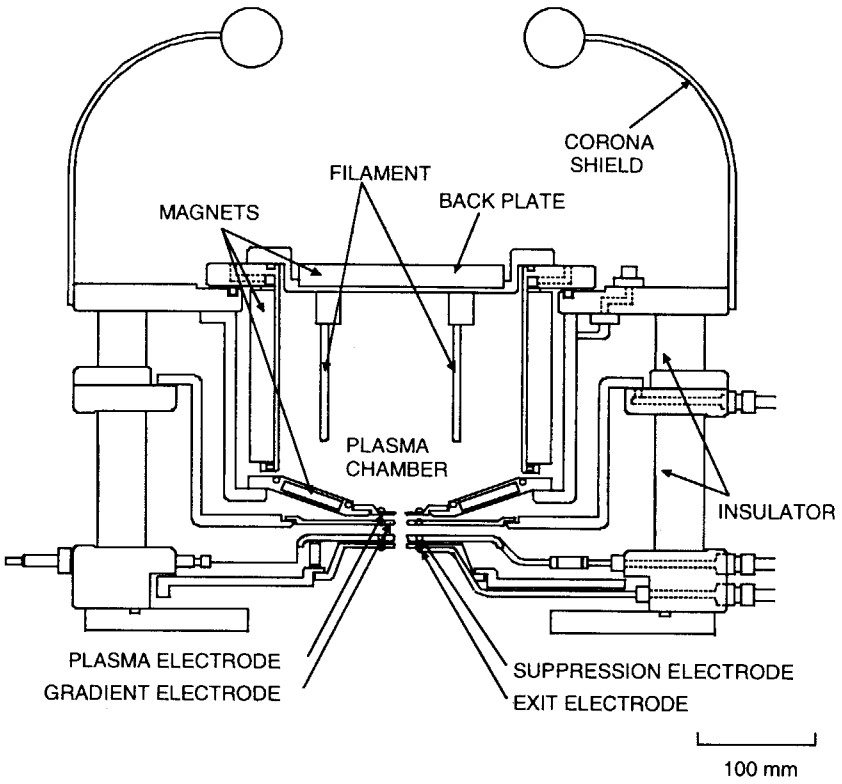


Fig. 3.2.1.1.2.1　マルチカスプ型正イオン源構造図

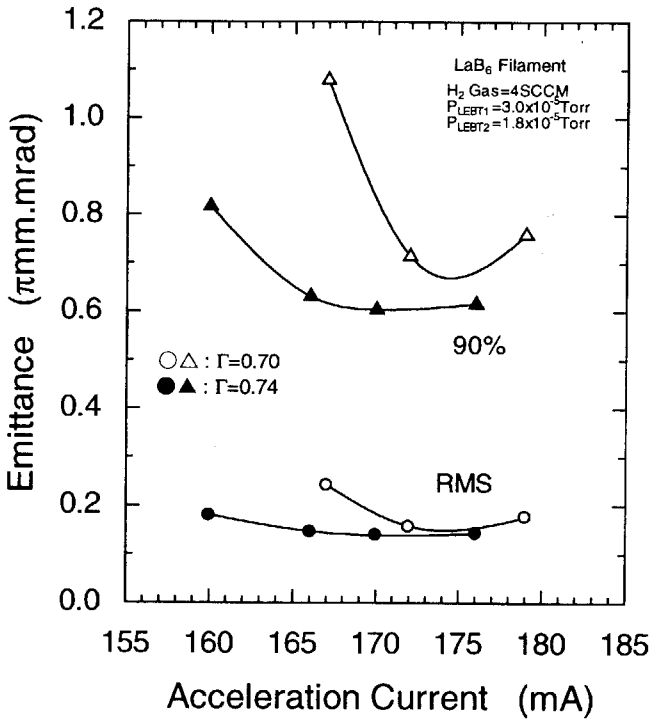


Fig. 3.2.1.1.2.2　ビーム電流・エミッタンスの分圧比依存性

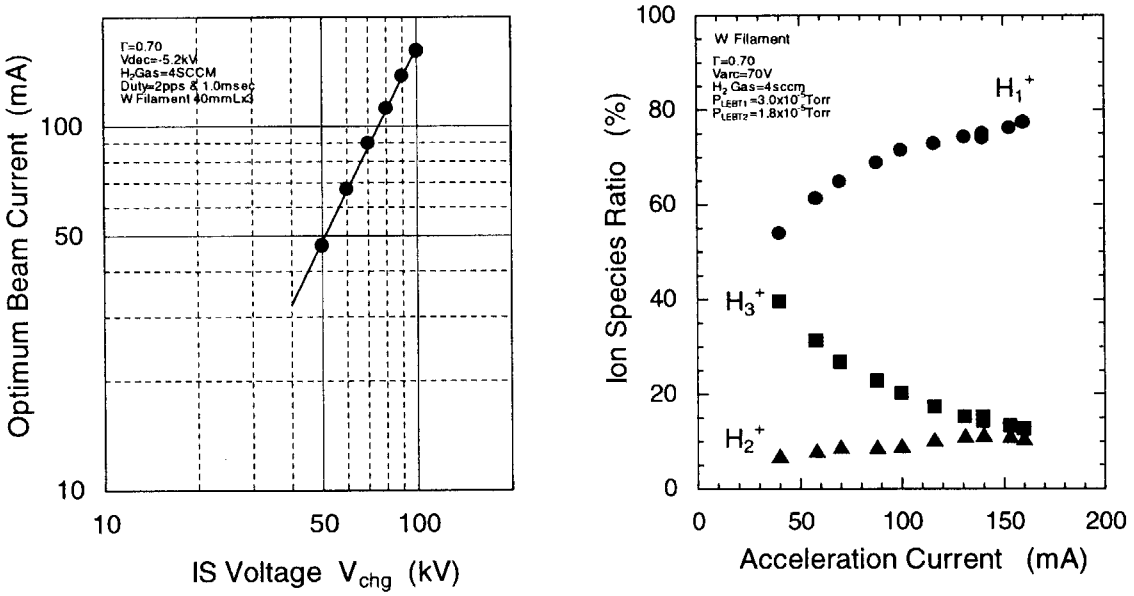


Fig. 3.2.1.1.2.3　パービアンス特性およびイオン組成比

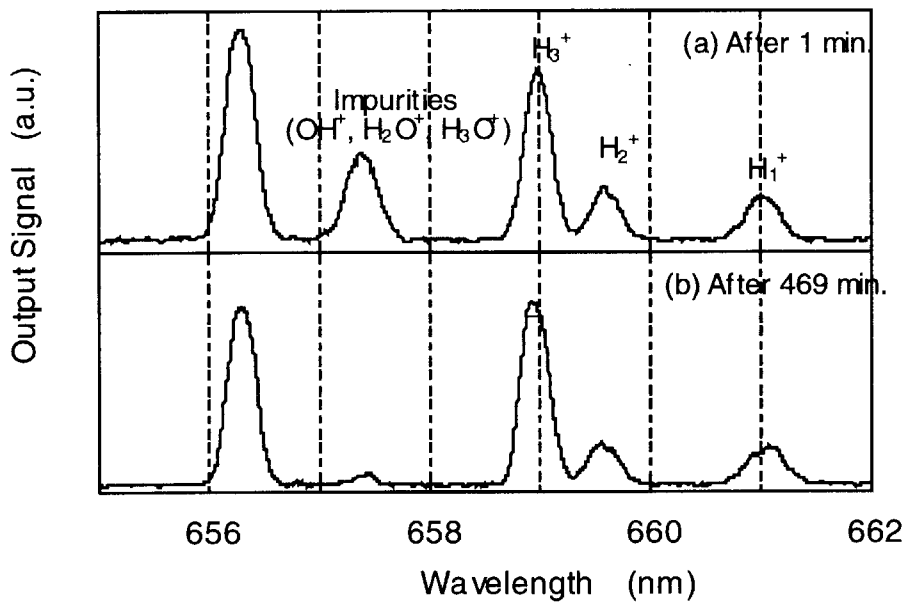


Fig. 3.2.1.1.2.4　ビームが発光するバルマーアルファ光のスペクトル分布

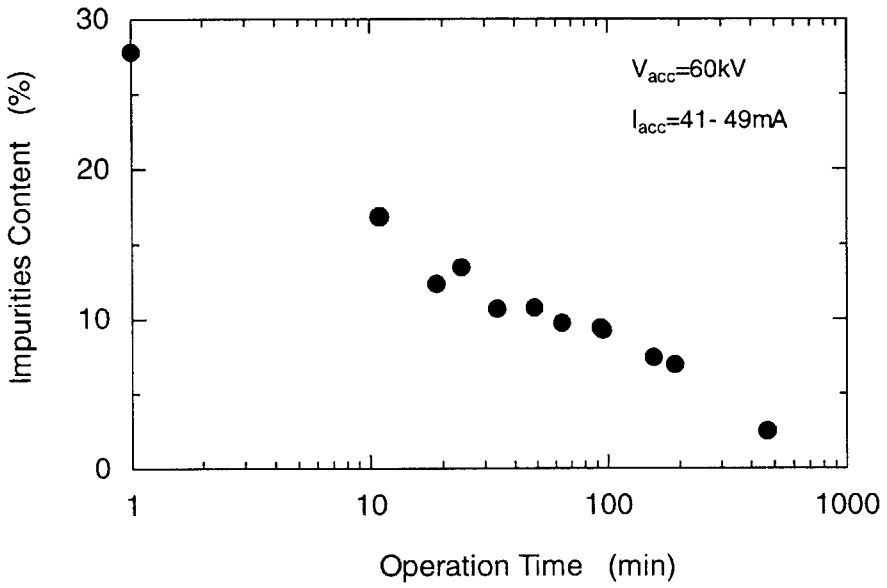


Fig. 3. 2. 1. 1. 2. 5　ビーム中の不純物イオン量の時間的変化

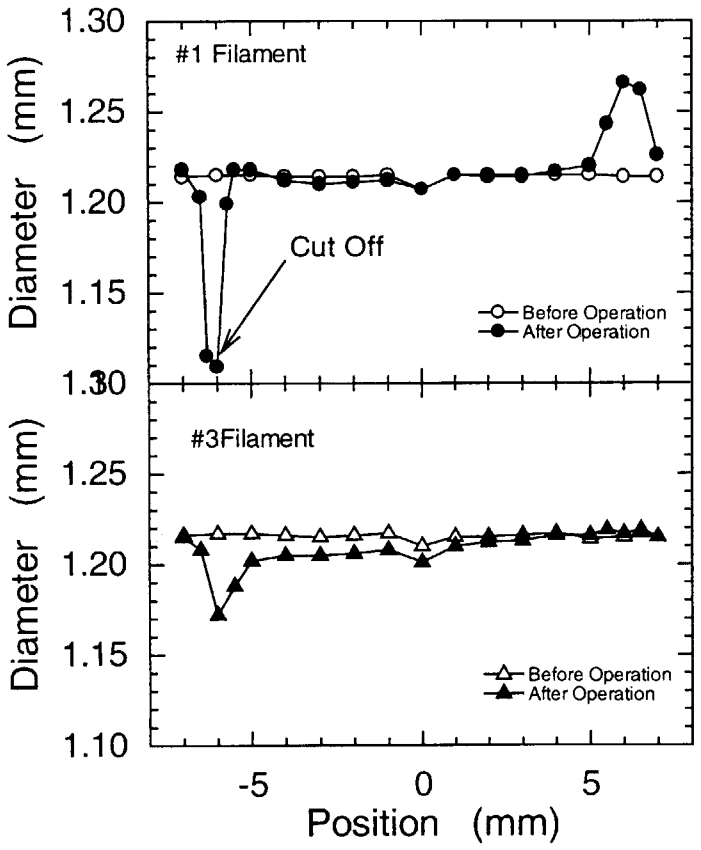


Fig. 3. 2. 1. 1. 2. 6　フィラメント消耗量の位置分布

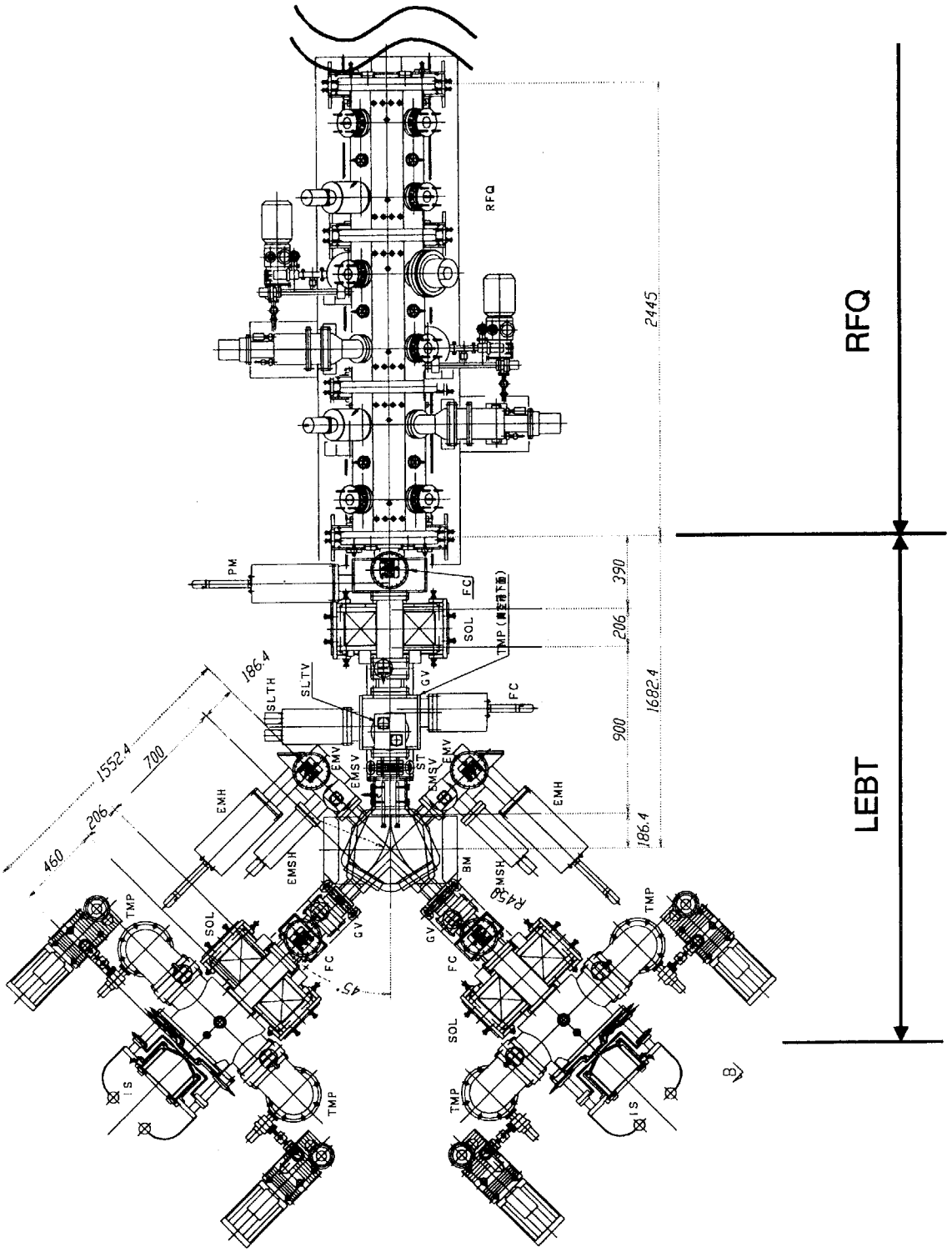


Fig. 3.2.1.2.1.1 LEBT 概念図

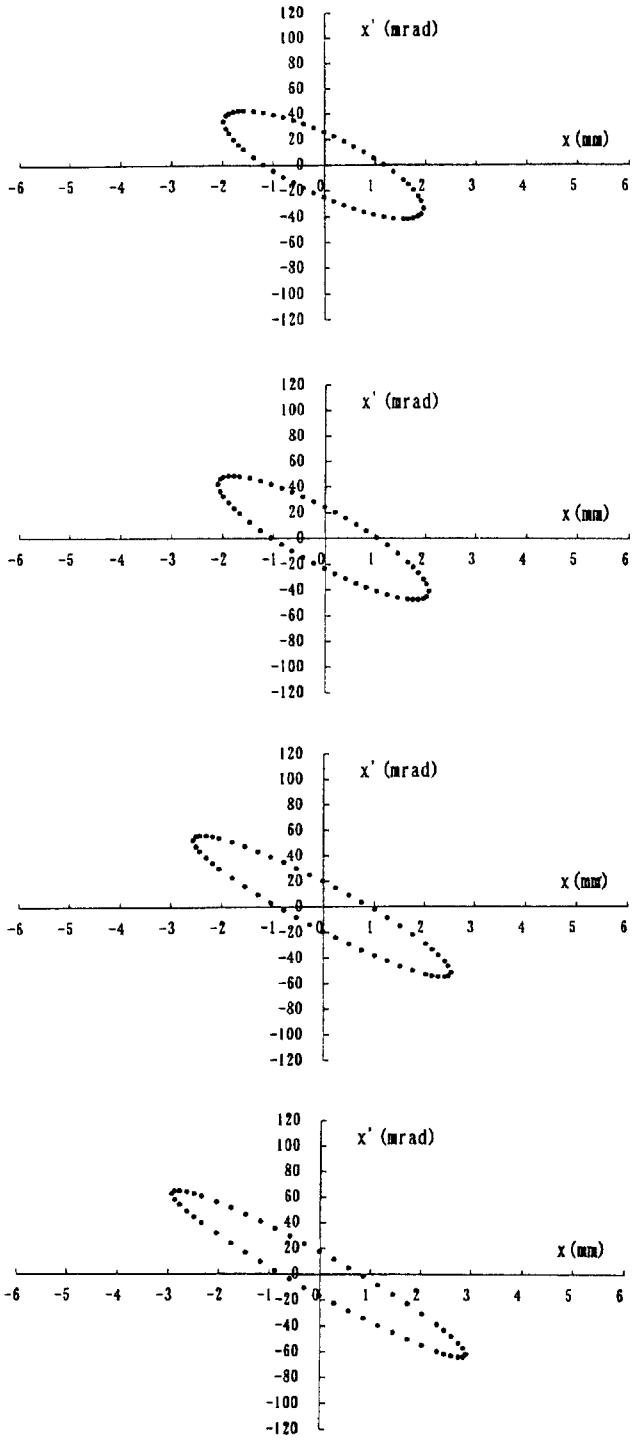


Fig. 3.2.1.2.1.2　RFQビーム最適入射条件（上から0、10、30、50mA）

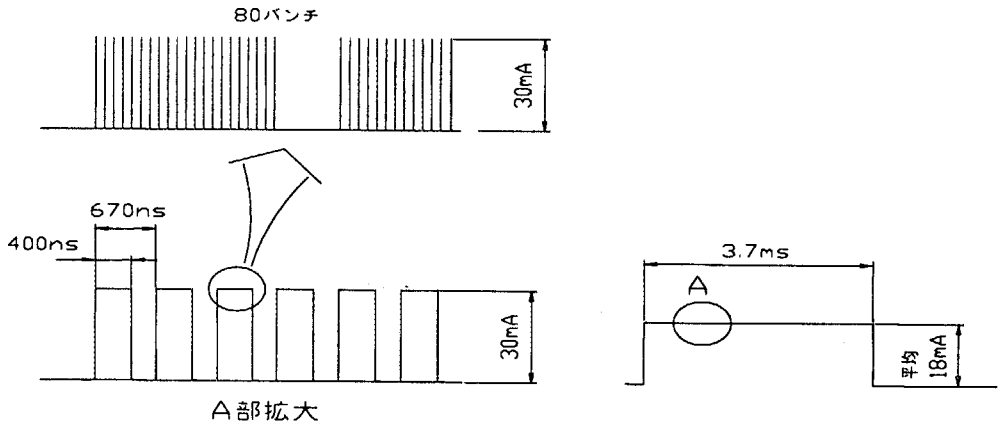


Fig. 3. 2. 1. 2. 2. 1　ビームパルス波形

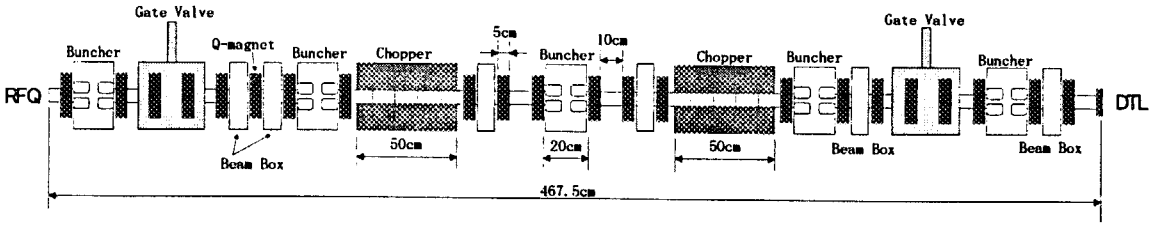


Fig. 3. 2. 1. 2. 2. 2　MEBT1機器配置

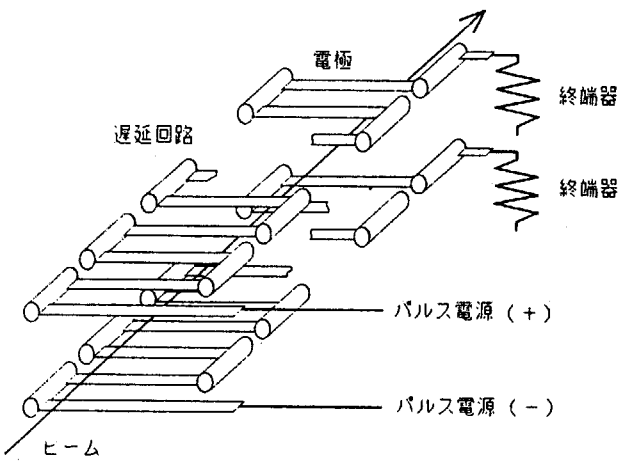


Fig. 3. 2. 1. 2. 2. 3　チョッパー概念図

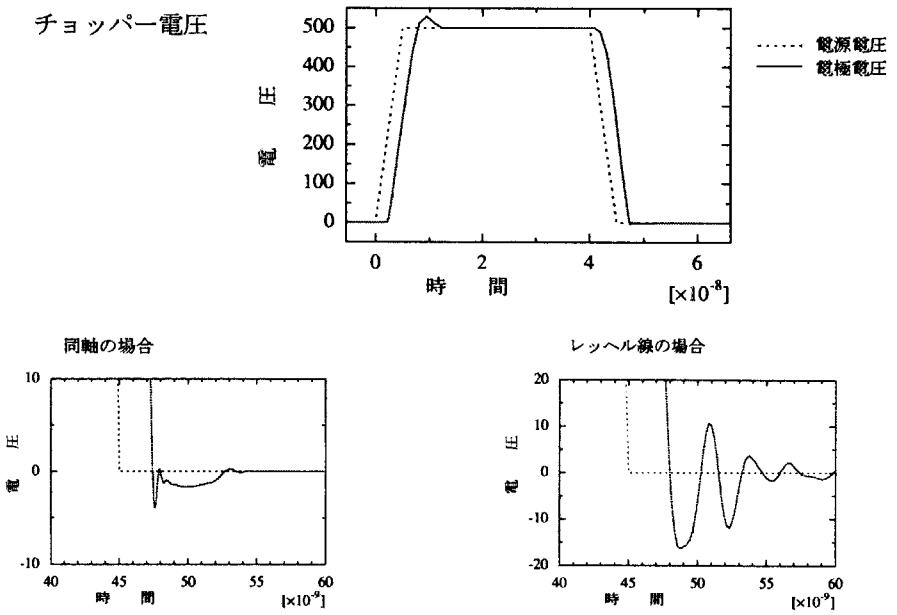


Fig. 3. 2. 1. 2. 2. 4　チョッパーの電圧波形

上：全体波形。電源の立ち上がり，立ち下がりは5ns。
下左：マッチングがとれた場合のたち下がり波形。
下右：レッヘル線の場合で浮遊容量の影響を含んだ場合。

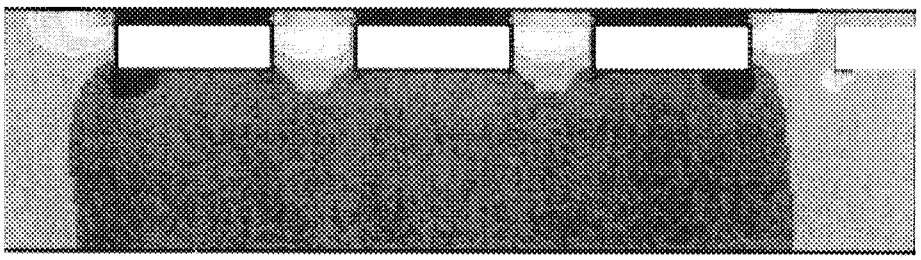


Fig. 3. 2. 1. 2. 2. 5　チョッパーのビーム軸部分の電場分布

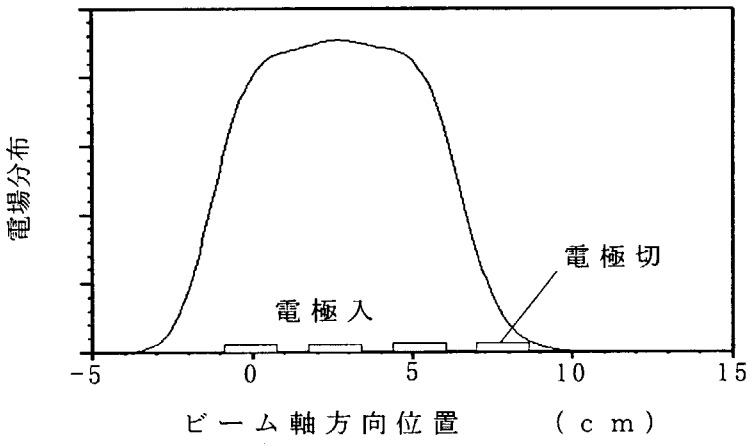


Fig. 3. 2. 1. 2. 2. 6　ビーム軸方向位置での中心部の電場変化

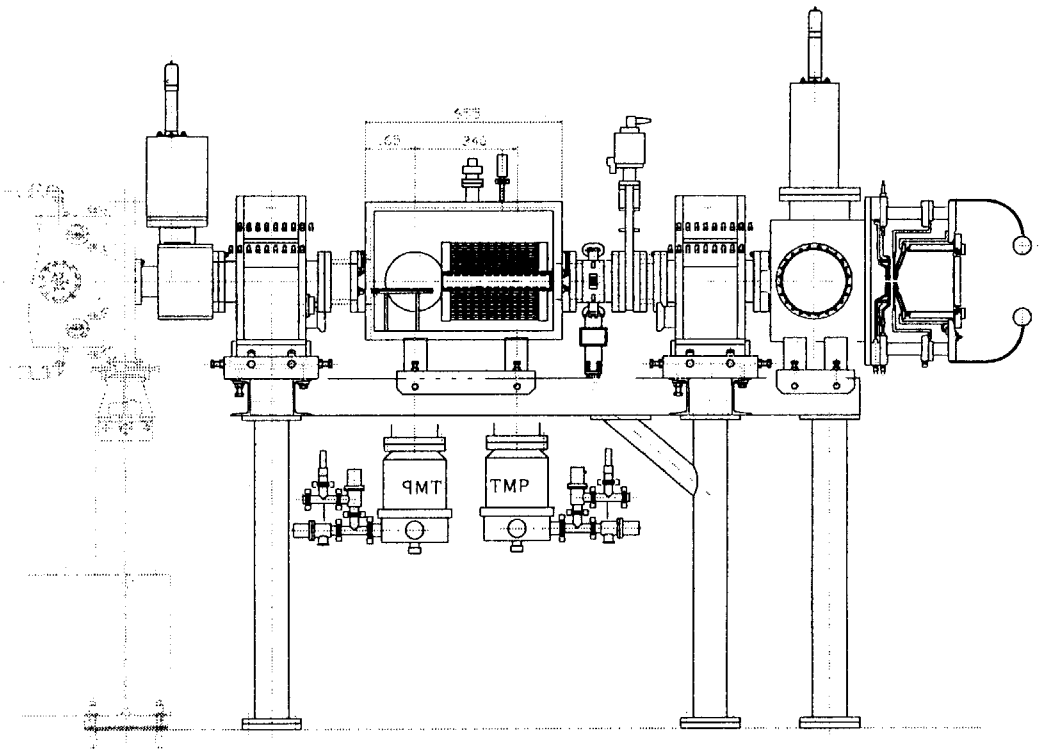


Fig. 3. 2. 1. 2. 2. 7　LEBTでのチョッピングのテスト計画

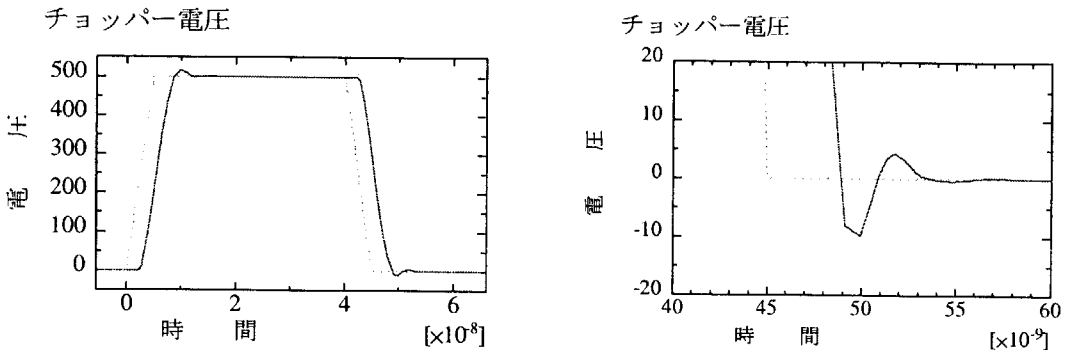


Fig. 3.2.1.2.2.8　静電チョッパーの電圧波形

3.2.2 ＲＦＱ

RFQ の設計は、ビームダイナミックス計算を含めたセルパラメータの設計が基本となる。この設計により RFQ の透過率、エミッタンスといったビームの諸特性、長さやボア半径などの大きさに関する量、そしてベーン間電圧などの重要なパラメータが決定される。この結果を受けて電磁場計算を行い、必要な高周波電力、発熱密度、最大電場強度などの評価、構造の検討を行う。

ここでは RFQ の設計検討、および原研での開発の現状について示す。

3.2.2.1 セルパラメータ設計

（1） セルパラメータ設計の指針

セルパラメータを設計するにあたり RFQ 設計の仕様と指針について示す。

① 基本仕様

加速器全体の仕様や、イオン源・後段となる DTL との取り合いを考え、RFQ の基本仕様を以下のようにした。

・入射エネルギー	70keV
・出射エネルギー	2 MeV
・加速周波数	200 MHz
・入射エミッタンス	0.1 π cm. mrad（100% 規格化）
	（0.017 π cm. mrad, rms 規格化）
・目標加速電流	30～60mA

② 最大表面電場強度

最大表面電場強度は、より高いほど加速効率、アクセプタンスが大きく取れ、全長も短くなる利点がある一方、放電の危険性や高周波電力密度が大きくなる欠点もある。

最近設計されている RFQ では、CW 運転用でもキルパトリックで 1.8 倍の電圧が多い。しかし、R&D の経験（1.8 倍で設計）から、高デューティでより安定な運転には、更に下げる方が望ましいと判断し、1.5 倍とした。

③ 加工精度を考慮した設計

設計計算上、良好な特性の RFQ であっても、実際の製作が難しいパラメータでは設計値との性能ギャップが大きくなる。これを避けるために次の指針を設けた。

長さについて、長い RFQ はダイポールモードの影響や工作精度の影響が出ることが考えられるため、R&D で製作した RFQ である 3.4m 程度を目安とした。

モジュレーションの増加は、実際の加工精度を考慮して決定することとし、高次モードの影響を少なくするために、最大モジュレーションは 2 以下とした。

（2）セルパラメータ設計の方法

セルパラメータの設計は、ロスアラモス研究所で開発された CURLI と RFQUIK のコードを用いて行った。ここでは加速電流値が R&D の設計値である 100mA よりも低いことから、従来の設計指標にはとらわれずにパラメータサーベイを行った。この結果、従来用いていた Gentle Buncher 出口 エネルギーの設定である Wi×(99.5/φs)**2 よりも、低い値を取ることで、低電流では良好な特性で、かつ長さが短い RFQ の設計ができることが判明した。

（3）セルパラメータ設計の結果

Fig.3.2.2-1 に設計パラメータの長さ方向依存性を示す。縦方向のエミッタンスを向上させる目的で、Shaper セクションでモジュレーションを緩やかに上げている。

Gentle Buncher 出口（図では 170cm 付近の位置に相当する）での同期位相を-30° とすると、縦方向の capture 効率が下がり透過率が下がった。逆に-40° では透過率は向上したが横方向のエミッタンスが悪化した。ここではそのバランスから-35° を選択し、RFQ 出口における最終同期位相を-30° にして加速効率を若干上げることとした。

3.2.2.2 ビームダイナミックス計算結果

設計したセルパラメータについて、PARMTEQ コードを用いてビームダイナミックスの計算を行った。実際はこの計算結果からセルパラメータにフィードバックがなされ、より良いパラメータのサーチを行った。

最終的なパラメータに基づく軌道計算結果、および入口と出口部分の位相空間分布を、それぞれ Fig.3.2.2-2 および Fig.3.2.2-3 に示した。加速されずにロスされる粒子の多くは、縦方向のバンチからはずれたものである。

透過率とエミッタンスの電流依存性を Fig.3.2.2-4 に示す。電流 60mA まで透過率は 98%以上、80mA で 95%である。縦方向エミッタンスは 30mA 付近が最小で、15mA 以下では急激に大きくなり、0mA で 0.25πMeVdeg(rms)となる。横方向エミッタンスは 15mA に山があるが 20 から 40mA で比較的平坦で 0.02πcm.mrad(rms)程度である。

Fig.3.2.2-5 は透過率と出口エミッタンスの入射エミッタンス依存性である。仕様であるイオン源のエミッタンス（0.017πcm.mrad,rms）の３倍の 0.05πcm.mrad の入射でも、透過率の顕著な落ち込みは見られない。これは大きなアクセプタンスを確保し、余裕をもった設計を行ったことに起因している。縦方向エミッタンスの入射エミッタンス依存性は小さいが、横方向エミッタンスは入射エミッタンスにほぼ比例する。このことから、入射エミッタンスが低い方が良質のビームが得られることがいえる。

Fig.3.2.2-6 は、同様に入射粒子エネルギー依存性である。98%の透過率を得るためにはイオン源からの引き出し電圧の誤差が±1kV、95%では±3kV 以内でなければならないことが示される。

3.2.2.3 電磁場解析

（1） 電磁場解析の方法

SUPERFISH コードを用い、電場強度、高周波損失などの高周波に関係する諸量の評価を行った。共振周波数は、チューナが半分挿入された状態で運転周波数である 200MHz に同調させることを目標とし、体系としては 195MHz になるようにした。

高周波電力の壁ロスは、理想的な銅の伝導度に対して 70%の Q 値を仮定し、43%の余裕 (1/0.7=1.43) を持った値で示した。

（2）ＲＦＱの電磁場計算結果

SUPERFISH による RFQ の計算体系と結果を Fig.3.2.2-7 に示す。中心部からベーン先端までは 5.9mm、タンク壁面までは 165mm である。最大電場強度は 21MV/m で、これは 1.43 倍のキルパトリック電圧に相当する。発熱密度はタンク壁面になるほど高くなり、最大で 4.1W/cm^2 である。ベーンの長さを考慮した計算体系全体の発熱量から、必要な高周波電力は 266kW (70%Q) と評価した。

3.2.2.4 構造検討

（1）構造検討

パルス運転では最大で 30%、CW 運転では 100%のデューティで運転されるために、温度上昇を抑える必要があり、これについて以下の方策を取った。

① ベーンの電圧を低くして、RFQ 全体の消費電力を下げる

消費電力はベーン電圧の２乗にほぼ比例するため、電圧を下げることで発熱密度や消費電力を抑えることができる。しかし、加速性能の低下や、アクセプタンスの減少、全長が長くなるなどのデメリットがあり、これらのバランスを考慮してセルパラメータを決定し、構造設計に反映させた。

② ベーンの冷却管水路をタンクとの接合部に近くする

R&D で製作した RFQ は、冷却管路が最高温度個所から多少離れていたが、これを近づけることで温度上昇を抑えることとした。

③ タンクを銅材で製作する

タンクの最高温度個所にはチューナが配置されるために近くに冷却管路を設けることは困難な状況にある。タンクを銅材で製作し、高い熱伝達係数により温度上昇を抑えることとした。

④ 高周波コンタクト構造

R&D で製作した RFQ は、タンクとベーンの接合部にコンタクト（高周波接触子）を使用し、ベ

ーン先端位置を、ベーン取り付けフランジに取りつけ具合で微調整できる構造をしている。この構造では、コンタクトに対する接触圧力が十分加えられるとは限らず、タンクやベーンの製作精度によっては設計値を上回る接触抵抗が生じることが考えられる。

また、フランジを介してタンクとベーンを組み立てる構造は、ゴム製の０リングを使用せざるを得ず、温度上昇の問題、経年変化の問題がある。

これらの問題を解決するために、RFQ 断面を、ベーンとタンクが一体となったブロックで製作し、ロー付けで接合する製作方法が LANL 等で取られている。ここで検討している RFQ も、①から③の対策に加え、コンタクトを使用することから生じる種々の問題を回避し、高い信頼性を得るために一体構造で製作することを基本とした。

（２）機器配置の検討

① チューナの検討

チューナは、製作・組み立て誤差から来る共振周波数のずれと、運転中に生じる本体の温度変化による共振周波数とのずれを補正する役割を負う。

ここでは、初めに固定チューナの仕様を検討するために、製作・組み立て誤差に伴う周波数のずれを求めた。SUPERFISH で求めた境界領域毎に製作・組み立て誤差を若干大き目に想定し、これによる周波数のずれを評価した。計算結果を Table 3.2.2-1 に示す。この計算では、xy 両方向に周波数シフトが起こり得る領域に対しては、誤差が両方向に等価に影響すると仮定した。この結果、製作・組み立て誤差に起因するずれは、最大でも±1.1MHz であるといえる。

固定チューナおよび自動チューナは、直径 80mm、ストローク±30mm とした。 これらのチューナの補正容量は、R&D 機用の自動チューナの実測結果に基づき、以下の様に算出した。R&D 機は直径 63mm、４台のチューナを用いており、これをストローク 60mm で駆動させたときの周波数変化は約 710kHz であった。これから、上記仕様のチューナ１台あたりの周波数変化量は、チューナの体積と RFQ の長さを補正して、

$\Delta f = 710/4 \times (80/63)^2 \times 336/360 = 267\,(\mathrm{kHz})$

となる。

この結果、固定チューナは１０台程度で、±1.3MHz の調整範囲が得られ、製作、組み立て誤差の影響を補正できることがわかる。チューナは、周波数を合わせるだけではなく、電場の均一度や平坦度を合わせる役目も持つ事から、実際の RFQ の配置では、この３倍以上の合計３４台の固定チューナを配置することにする。

本体に配置される固定チューナ３４台、自動チューナ４台による周波数シフトは、合計±5MHz であり、チューナが中点位置での周波数として、電場解析を行う際の目標周波数を 195MHz とした。

② チューナ、排気口などの配置の検討

RFQ のタンク壁面には、カプラ、チューナ、真空ポンプなどの機器を配置することになる。真空ロー付けは、炉の大きさなどから１本あたり約 800～900 mm 程度とし、タンク４台を軸方向に

並べて構成することにした。各々にチューナ、ポンプ、カプラ用のフランジ 12 個、ピックアップモニタ用のフランジを４個取り付ける。機器台数は次の通りとなる。

- カプラ　　1台
- 固定チューナ　　34台
- 自動チューナ　　4台
- 真空排気口　　9個所
- ピックアップモニタ　　16台

（３）RFQ計画図

以上の検討結果に基づいたRFQの計画図をFig.3.2.2-8に示す。前兆3.6mを、それぞれ約90cm長さの４つのタンクで構成している。

3.2.2.5　原研のRFQ開発の現状と課題

原研におけるRFQの開発は、加速電流100mA、デューティ10%を目標に1991年に開始した。1994年２月に住友重機械工業（愛媛県、新居浜市）の工場において、約２週間にわたるビーム加速試験を行ない、短時間ではあるが、最大デューティ5%を達成した。 1994年８月に原研への移設を行ない、11月よりビーム加速試験を本格的に開始した。Fig.3.2.2-9に試験の配置を示す。ビームラインは、水素イオン源、LEBT、RFQ、MEBT から構成される。加速試験の結果、最大運転デューティ 10%、加速電流 100mA の目標性能をそれぞれ達成した。ここでは、この結果を得るに至るまでの経過と課題について簡単に述べる。

① 高デューティ化についての経過

1994年10月に、ベーンとタンク間のコンタクトであるシールドスパイラルが、2%以上のデューティ運転に耐えられず、破損することが明らかになった。これを解決するために、コンタクトの銀メッキ厚を 30 から 100μmに厚くした。メッキ厚を増やすことで高周波と熱の伝導を高くする効果とともに、強度的に硬くなり、ベーンとタンクの締め付け圧力の向上を意図したものである。また、それまではベーンの端部に開口部を有しており、この部分を高周波電流が迂回するような形から発熱が集中する構造であることも明らかになった。これについては、銅ブロックを用いて開口部に蓋をする措置を取った。これらの改良の結果、運転デューティは 8%を達成し、短時間であるが最大で10%を達成した。

② RFQ入口の電流と透過率

1995年１月にRFQ直前のファラディーカップ(FC2)が破損した。ここは第二ソレノイドでビームが絞られる位置であり、過大な熱負荷により穴が空いたものである。また、このファラディーカップには二次電子抑制用のサプレッサがスペース的に十分入れる事が難しく、測定電流自体の信頼性も低いものであった。

1996年10月にエレクトロニクス課の協力で、トロイダルコアを用いた電流トランス（CT）を

開発した。これをRFQ直前に設置し、RFQ入口電流の測定が可能となった。

LEBT出口とRFQの出口における電流値と透過率を、それぞれFig.3.2.2-10およびFig.3.2.2-11に示した。Γは、イオン源ビーム引き出し部における1段目と2段目の印加電圧の比である。Γ値を大きく取ると、イオン源の出力ビーム電流は減少するが、RFQの透過率は向上する。

③ エミッタンス測定

エミッタンスはダブルスリット型のモニターで測定した。入口部と出口部のスリット幅は、それぞれ0.4mm、0.1mmであり、スリットの間隔は380mmである。測定は、入口部のスリットの除熱から、2.3Hz（1msecビーム幅）で行った。Fig.3.2.2-12は、エミッタンス測定結果の例を示す。

Fig.3.2.2-13はエミッタンスのベーン間電圧依存性である。XおよびY方向エミッタンスともに規格化ベーン間電圧で0.95～1.0で最小のエミッタンスを与えることがわかる。

3.2.2.6 まとめ

周波数200MHzのRFQの設計検討を行った。Table 3.2.2-2にパラメータをまとめた。

設計に用いたキルパトリック値は1.5と、R&Dでの設計値である1.8よりも17%低い値を取り、発熱密度の低下と高デューティでの安定な運転をねらった。Shaper部分のパラメータや最大モジュレーションの見直しを行うとともに、製作精度を考えたパラメータを選択した。セルパラメータ設計で得られた結果をもとに、SUPERFISHによる電磁場解析、構造検討を行なった。

R&Dで設計・製作し、特性試験を行ったRFQの成果と問題点をまとめた。ベーンとタンク間のコンタクトの過熱が、高デューティで安定な運転を行なう上での障害となることが明らかになり、この対策を取ることで、デューティ、ピーク電流、単独ではそれぞれ目標性能を達成した。

ベーンの2次元断面加工に対する加速効率の補正、高次の電場モードによる影響の評価、出口部分のテーパーセクションの検討による次段とのマッチング評価が今後の課題となる。

Table 3.2.2-1 製作・組み立て誤差に伴う周波数シフト

	周波数への感度 (MHz/mm)	製作・組み立て誤差 (mm)	周波数シフト (MHz)
ベーン先端曲率	7.2	±0.05	±0.36
ベーン先端ストレート	0.8	±0.05	±0.04
ベーン肩部	0.003	±0.1	±0.0003
ベーン本体	0.35	±0.1	±0.035
タンク径	0.88	±0.2	±0.18
ベーン径方向アライメント	5.7	±0.05	±0.28
ベーン水平方向アライメント	4.3	±0.05	±0.22
合計			±1.1

Table 3.2.2-2 RFQのパラメータ

共振周波数 (MHz)	200
入射エネルギー(keV)	70
出射エネルギー(MeV)	2
加速電流	-60
ビームデューティファクタ (%)	30 (パルス) 100 (CW)
ベーン全長 (m)	3.57
セル数	202
収束力	6.1
ベーン間電圧 (kV)	89.2
キルパトリック値	1.5
最小アパチャ半径 (mm)	3.9
平均ボア半径 (mm)	5.93
最大モジュレーション	1.90
GentleBuncher出口での同期位相 (度)	-35
最終同期位相 (度)	-30
空洞のQ値 (100%Q)	13100
高周波損失(kW/70%Q)	266

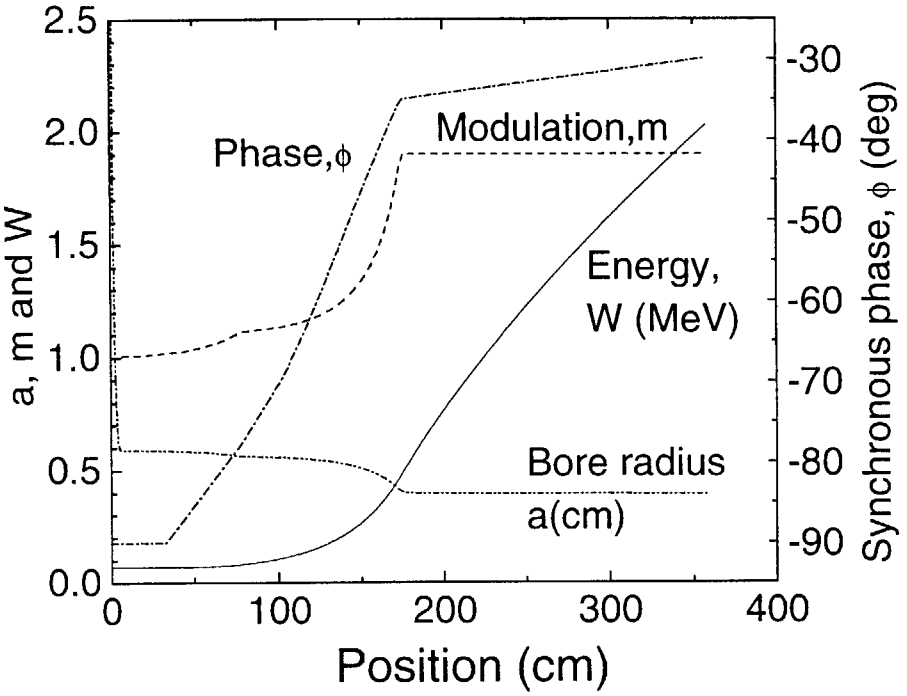


Fig. 3.2.2-1 RFQ のセルパラメータ

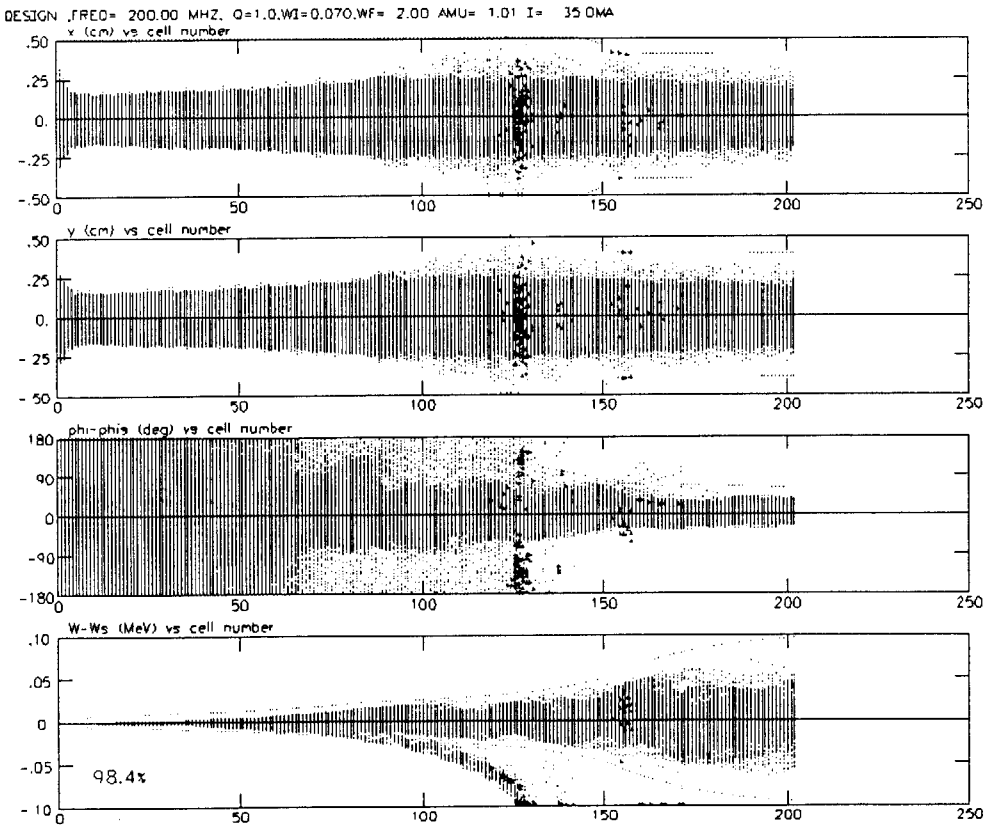


Fig. 3.2.2-2 RFQ のビーム軌道計算結果

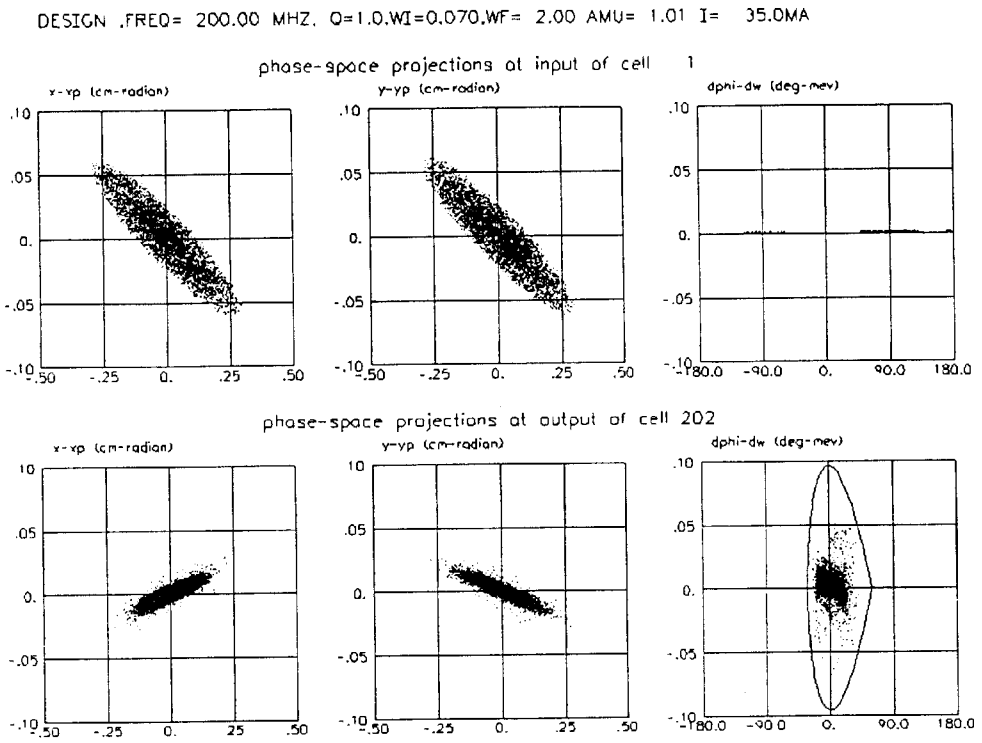


Fig. 3.2.2-3 RFQ の入口・出口粒子の位相空間分布

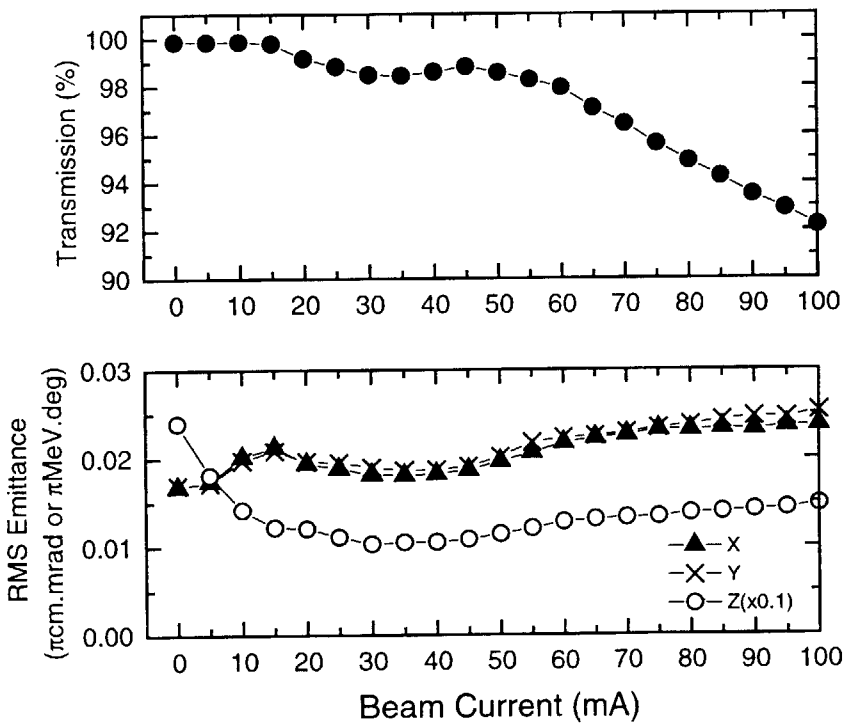


Fig. 3.2.2-4 RFQ 特性の加速電流依存性

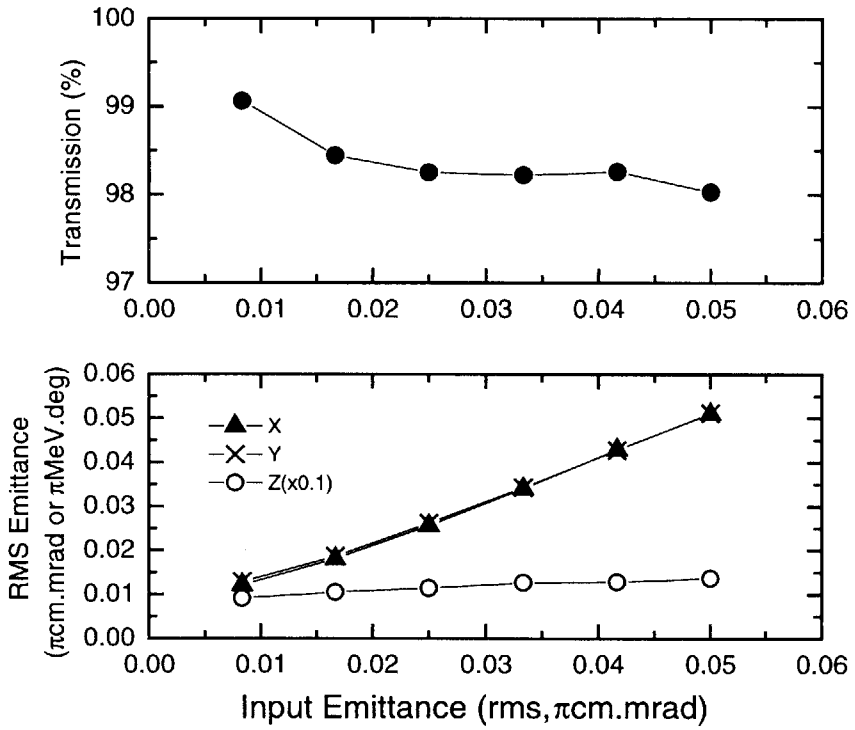


Fig. 3.2.2-5　RFQ 特性の入射エミッタンス依存性（入射電流 35mA）

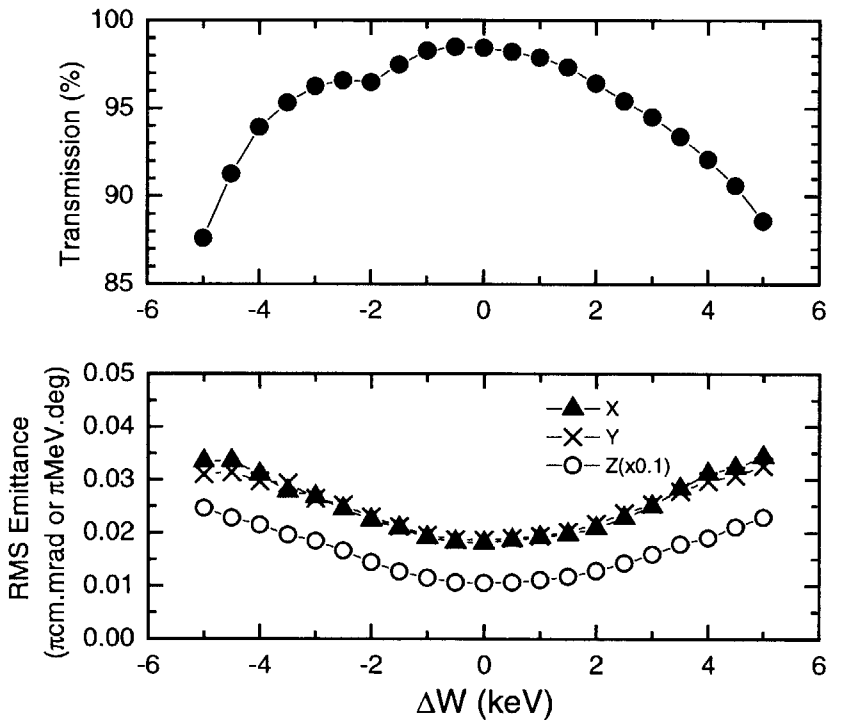


Fig. 3.2.2-6　RFQ 特性の入射電圧誤差依存性（入射電流 35mA）

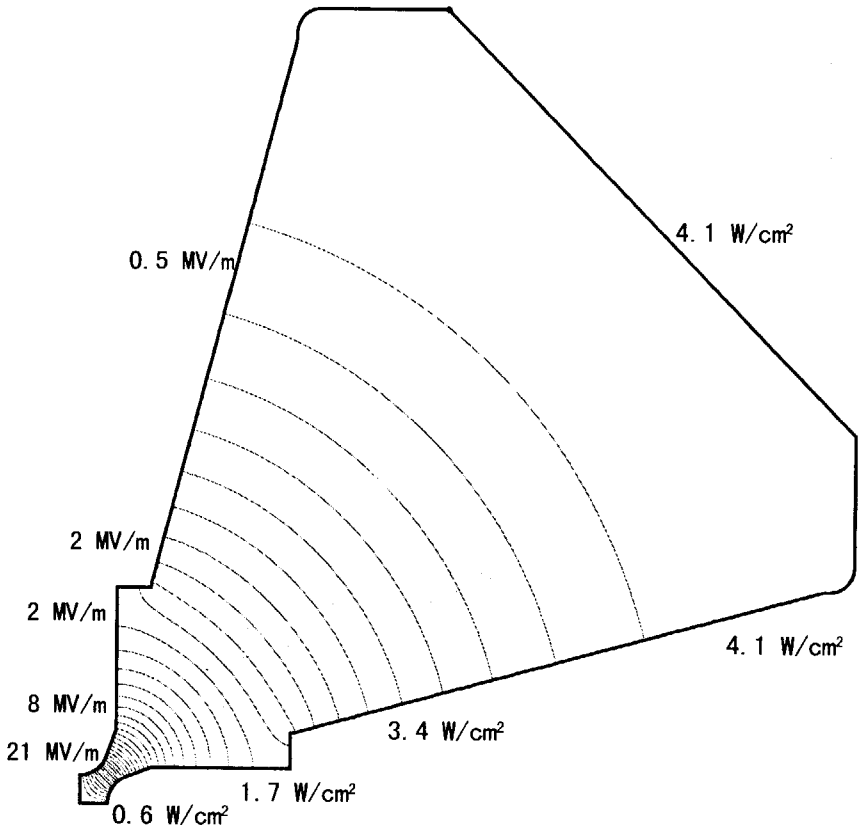


Fig. 3.2.2-7　RFQ の SUPERFISH 計算結果

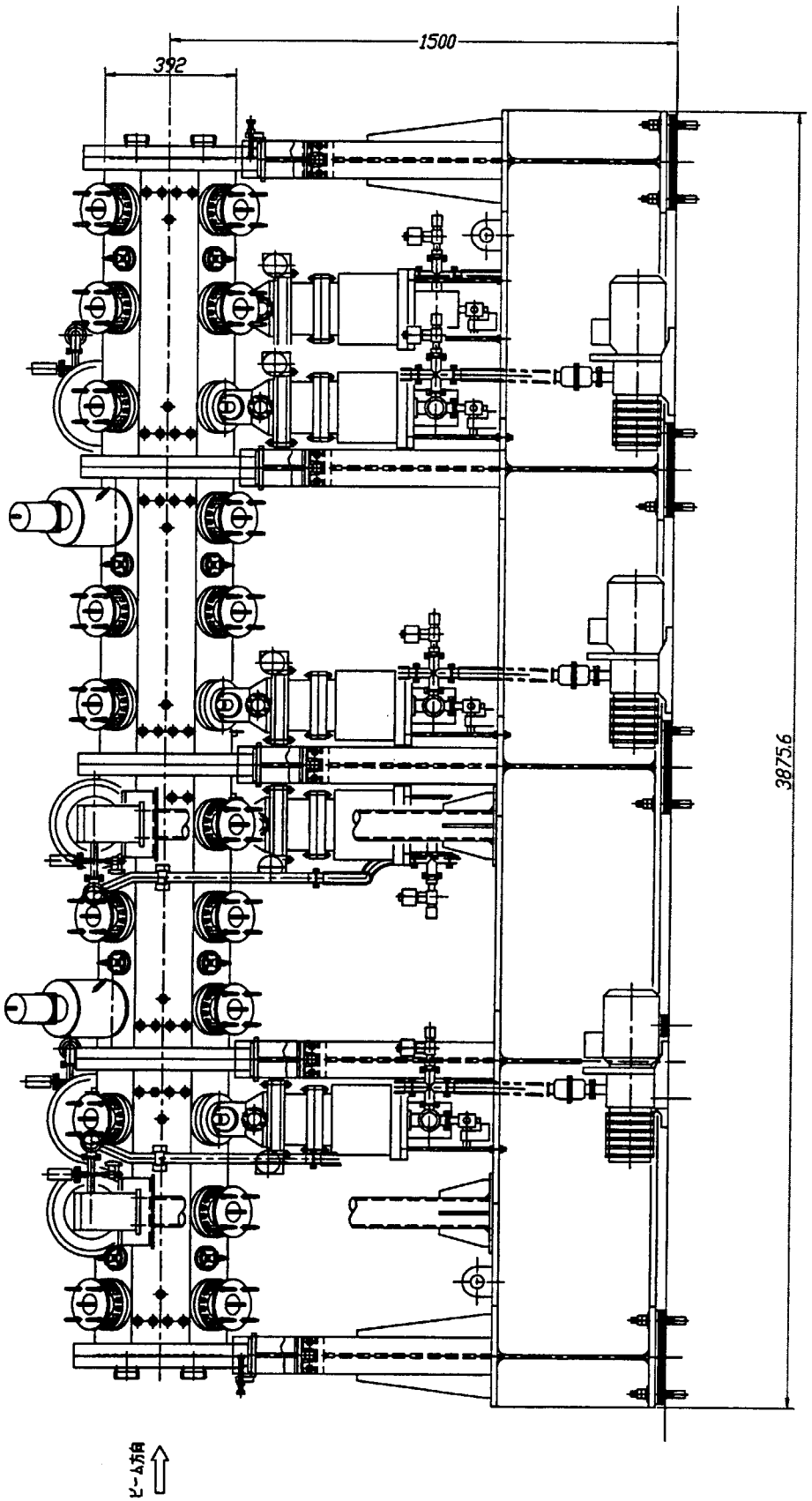


Fig. 3. 2. 2-8　RFQ 計画図

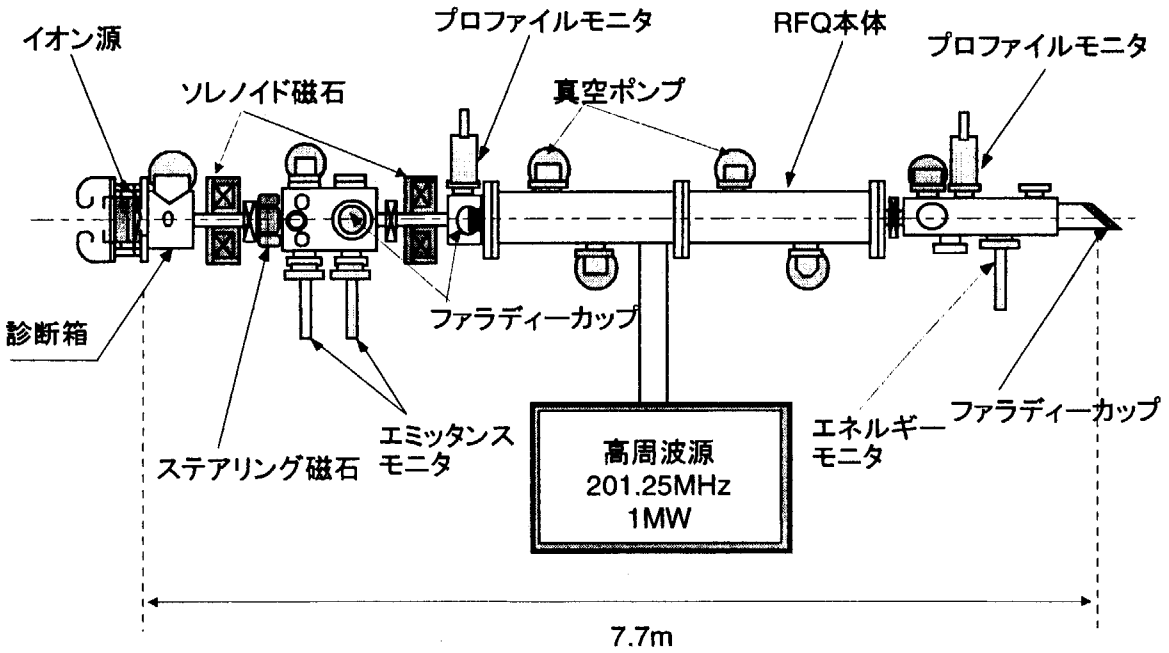


Fig. 3.2.2-9　RFQ ビーム試験の配置図

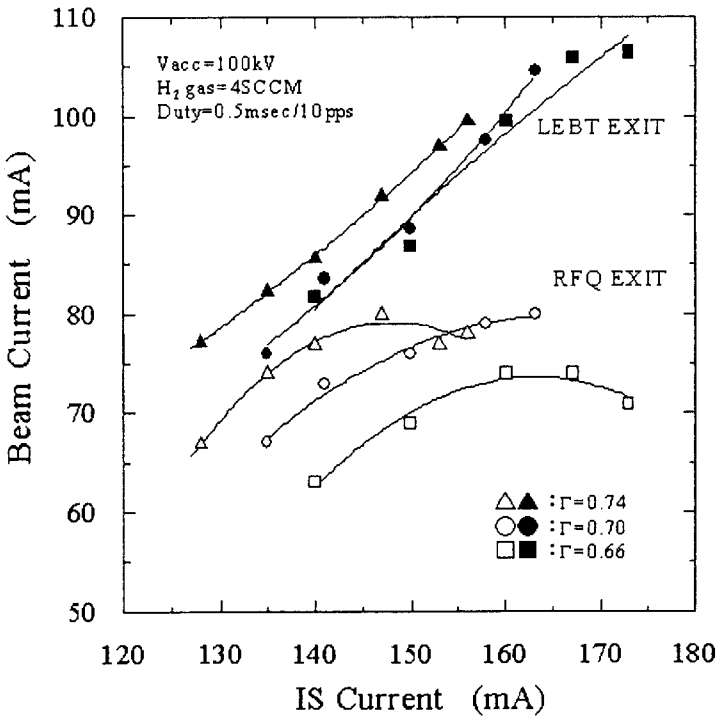


Fig. 3.2.2-10　LEBT と RFQ の出口電流とイオン源引き出し電流の関係

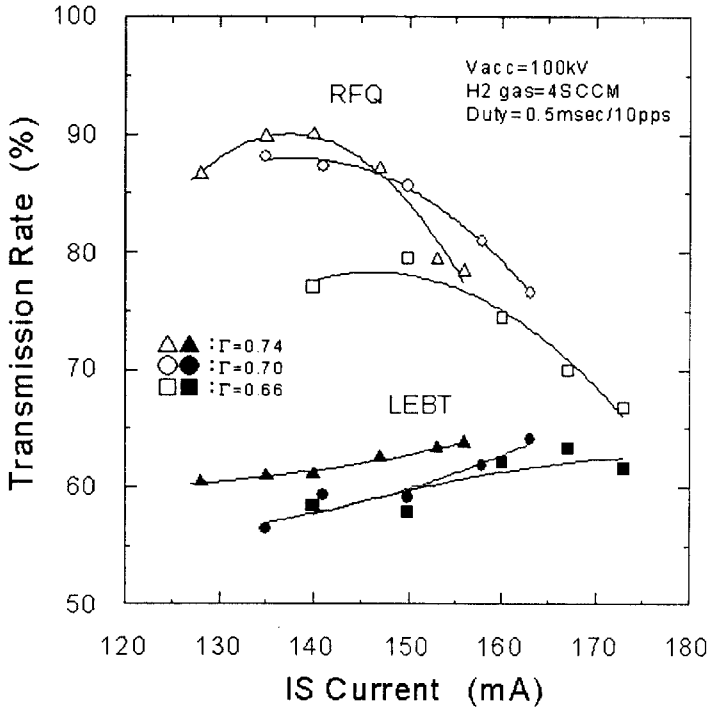


Fig. 3.2.2-11　LEBT と RFQ の透過率とイオン源引き出し電流の関係

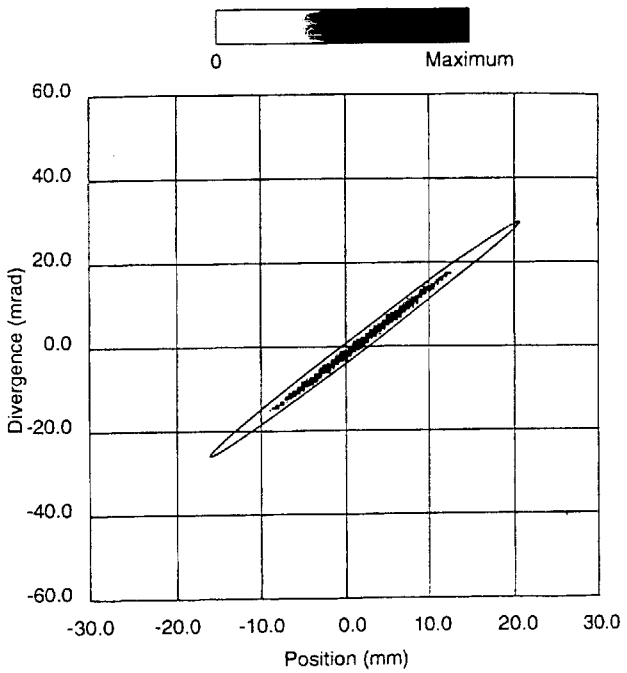


Fig. 3.2.2-12　エミッタンス測定結果の例

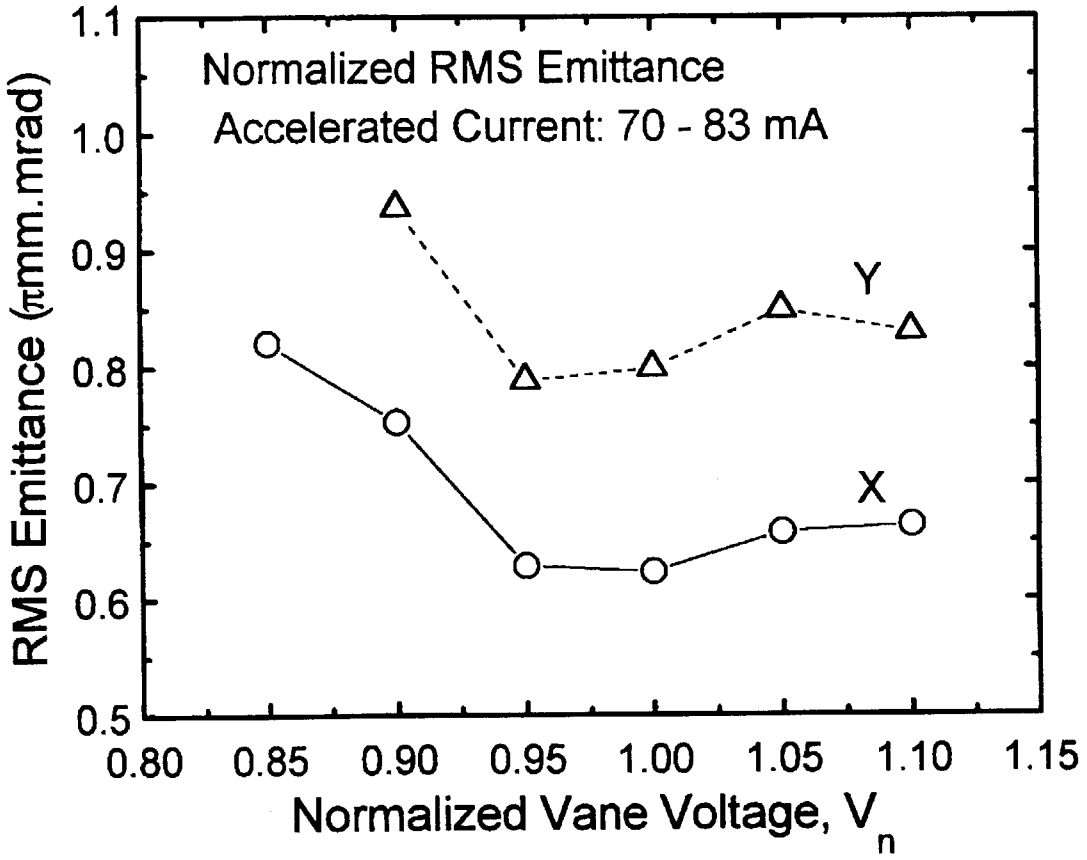


Fig. 3.2.2-13　RFQ出口エミッタンスのベーン間電圧依存性

3.2.3 ＤＴＬ／ＳＤＴＬ

3.2.3.1 はじめに

本章は、DTL と SDTL について、概念設計を行った結果をまとめた。中性子科学研究計画用大強度陽子加速器は高いピーク電流（30mA、パルス運転時)、高デューティ（～CW）で運転されるため、設計にあたっては次の２点が重要となる。

・エミッタンス増加が少ない、安定したビームを出すための加速構成と収束系パラメータの検討。

・CW 運転による発熱を考慮した設計。

また、３点目として、当然のことではあるが、

・コスト低減、メンテナンス簡素化のための工夫

も重要である。

これらの点を考慮して、DTL-SDTL 部分について設計の枠組みを設定するとすれば、次のようになる。

① 加速構造としては、すでに安定した実績を持つ DTL を基本的に採用する。

② エミッタンス増加の少ないビームを実現させるために、収束系には Equipartitioning 法を導入する。

③ CW 運転を考慮し、冷却構造に工夫を懲らすと同時に、平均電場強度は低め（1.5MV/m 程度）に設定する。

④ DTL 後段部分については SDTL 構造を採用して Q-magnet の個数を減らし、コスト低減、メンテナンス簡素化を図る。

設計はこの枠組みを基にSUPERFISHとPARMILAを使って行った。設計の詳細については、3.2.3.4で紹介する。尚、DTL 後段の加速構造を SDTL とすることについては、それぞれ長所と短所がある。この比較検討によって、従来 SDTL の短所といわれていた部分については DTL と比べてそれほど悪影響はなく、むしろ長所の影響の方が大きいことが分かった。

3.2.3.5 では、DTL～SDTL を通したビームシミュレーション結果について報告する。ここでは、アライメント等の誤差を考慮した場合のシミュレーションも行い、誤差がビームのエミッタンスに与える影響について検討した。

3.2.3.6 では、主なビームトランスポート系である RFQ-DTL 間(MEBT-1)、DTL-SDTL 間、SDTL-SCC 間（MEBT-2)、及び CW-Pulse ラインの merge 部分についての検討を行なった。各加速構造をつなぐトランスポート系は、ビームの質に大きく影響し、加速器の概念設計においても重要なポイントなるところである。一般的に、MEBT 等のトランスポート系の概念設計には envelope のみを計算する TRACE3D がよく使われているが、本検討では TRACE3D に設定したパラメータを、更に PARMILA に入力して、粒子シミュレーションのレベルでの検討も行った。

更に、3.2.3.7 では ABAQUS による熱計算を行ない、CW 運転時の各コンポーネント（DT、ステム、ポストカプラ、タンク、端板、半固定チューナ）の温度及び熱変形をシミュレートし、問

題点を検討した。

3.2.3.2 基本仕様

Table 3.2.3.2.1 に DTL-SDTL 部に対する基本仕様を示す。本検討では加速周波数 200MHz、加速区間 2～100MeV の検討をメインに考えた。

SUPERFISH と PARMILA のみを使って設計検討を行う際、電流値については、パルス第 2 期運転の 30mA を想定して行っておけば、他の運転モードにも同じ設計パラメータが適用できる。また、デューティについては CW を想定して設計しておけば、パルスモードにも同じ設計パラメータが適用できる。従って本検討では、基本仕様にある運転モードの種類には一致しないが、30mA、CW 運転想定して検討を進めた。

3.2.3.3 概　要

最初に Fig.3.2.3.3.1 に示すように、本検討では 2～100MeV 区間の加速構造として、2～50MeV までを DTL (drift tube linac)、50MeV～100MeV までを SDTL (separated-type drift tube linac) を使って加速することを想定する。また、Pulse line と CW line の合流地点としては DTL 7MeV 地点を想定した。Fig.3.2.3.3.1 に示すように DTL-SDTL 部の全体の長さはタンク間トランスポート系も含めて約 122m、このうち DTL 部の長さは約 58m、SDTL 部の長さは 64m となる。

DTL 部は 3 つのタンクに別れており、最初のタンクは CW-line と Pulse-line 共に 2～7MeV まで粒子を加速する。CW-line と Pulse-line の合流は最初と 2 番目のタンクの間 (7MeV 地点) で行われる。合流部分のトランスポート系については、Pulse line は H-、H+の同時加速となるため直線構造とし、CW line を偏向させる構造とした。本検討では CW-line の偏向電磁石 1 つあたりの曲げ角を 2° として合計 10° ビームを偏向させて Pulse line と合流させた。2 番目のタンクは 7MeV～30MeV まで、3 番目のタンクは 30MeV～51MeV まで、それぞれ粒子を加速する。30MeV 地点でタンクを分けたのは、タンクの運転モード (TM010) と他のモードとの共振周波数の差がせまくなり過ぎないためである。セル数は 3 タンク合わせて 179 で、Q-magnet は 182 個必要となる。各タンクのオートチューナ、半固定チューナ、RF インプットカプラ、及びポストカプラは Fig.3.2.3.3.2 に示す位置に取り付けられる。

SDTL 部は 51～100MeV の加速区間を 17 タンクに分割している。Fig.3.2.3.3.3 に SDTL の概念図を示す。各タンク内のセル数はすべて 5 セルずつとした。SDTL は、DTL で各 DT の中に組み込まれていた Q-magnet をタンクの外にダブレットとして配置することにより横方向の収束を行う。オートチューナ、半固定チューナ、RF インプットカプラの位置は DTL と同じとなるが、SDTL ではポストカプラが不要となる。

DTL 部と SDTL 部をつなぐトランスポート系の構成は、バンチャー 1 つのみとなる。横方向のマッチングは DTL 内の最後の (ドリフトチューブ内臓) Q-magnet 4 つを使って行ない、縦方向のマッチングはバンチャー 1 つとドリフトスペースで行なう。

タンク内のセル形状は、放電限界の指標である kilpatrick の 3.2.1.2 以下の範囲で、できる

だけ実効シャントインピーダンス（ZTT）が高くなるように設計した。ZTT は DTL-SDTL 全体を通じて 30MΩ/m 以上を維持している。

運転時に必要となる RF ピーク電力（タンク励振用+ビームパワー）は DTL 部で 4.28MW、SDTL 部で約 4.62MW となり、全体で約 8.9MW となる。

タンク内の平均電場強度の設定は主に熱的観点から決めた。特に DT とステムが RF により発熱すると熱膨張を生じ、その結果ボア中心の位置がずれてビームの質に悪影響を及ぼす。そこで、DT とステムの CW 運転を想定した熱計算を行い、その結果を基に平均電場強度を（DTL-SDTL 共に）1.5MV/m とした。

収束系の磁場勾配の設定については、ビームのエミッタンス増加を極力抑えるために、Equipartitioning 法を用いた。PARMILA によるシミュレーションでは、RMS エミッタンス増加の割合は DTL-SDTL（2～100MeV）を通じて約 1.6%となり、この手法の効果を確認できた。磁場勾配は最高で約 51T/m となるが、Q-magnet は既に 80T/m のものを開発済み[*2)]なので問題はなく、コアの材質も磁場勾配が 60T/m 以下なので鉄を使用できる。

ビームシミュレーションの検討では、原研で開発した 9 セル DTL ハイパワーモデル（以下 9 セルモデル）のアライメント結果と同じ程度の誤差を PARMILA に入力し、エミッタンス増加がどの程度になるかをシミュレートした。この結果、これらの誤差を含めた場合でもエミッタンス増加 RMS、90%共、10%以内に収まることが分かった。

除熱の問題に関しては、冷却水路内流速の上限を 5.0m/sec、平均電場強度 1.5MV/m、CW 運転の条件で、9 セルモデルの形状をベースに冷却構造に改良を加えたモデルで ABAQUS による熱計算を行なった。DT（ドリフトチューブ）とステムでは、出来るだけ RF 熱が発生する近傍に冷却水路を設ける構造を設定し、ポストカプラではタブ内部に噴流による冷却構造を設定し、またタンクについては外壁のほとんどを冷却水が覆う構造を設定し、端板は冷却系統を 9 セルモデルの 2 倍にしてそれぞれ計算を行なった。半固定チューナに関しては従来通り（9 セルモデル）の構造で計算した。その結果、タンクのステムポート部分（タンクとステムの接触部分）と端板に取り付けるハーフ DT の外周部（端板とハーフ DT の接触部分）で温度がそれぞれ 60～70℃に達し、冷却系統の強化が必要であるが、その他の部分については温度的には問題ないこと、熱変位に関してはすべてのコンポーネントについて問題ないことが分かった。

その他、主要パラメータを Table 3.2.3.3.1 に示す。

3.2.3.4 各パラメータ検討

3.2.3.4.1 タンク分割の検討

3.2.3.4.1.1 DTL と SDTL の分かれ目

SDTL の一つの利点として、縦方向の transition と横方向の transition を別々の加速エネルギーで行えるというのがある。横方向は空間電荷効果を弱めるためになるべく低いエネルギーで transition を起こすことが望ましく、逆に縦方向は出来るだけビームをバンチさせるため、高

いエネルギーで transition を行うことが望ましい。縦方向の transition は 100MeV と決まっているので、問題は横方向であるが、あまり低いエネルギーでの transition は DTL からのビームの Phase advance も大きく、エミッタンスも安定しないため好ましくない (Fig.3.2.3.4.1.1.1)。おそらく 30～50MeV 付近が妥当と思われるが、ここではシミュレーションの結果から、十分にビームの挙動が安定する 50MeV を SDTL の開始エネルギーとした。

3.2.3.4.1.2 DTL 区間 (2～50MeV) タンク分割

この部分は 2 個所でタンクを区切り、合計 3 つのタンクとした。No.1 タンクは 2～7MeV のエネルギー範囲である。7MeV で区切った理由は以下の理由による。

・ NSP 加速器では RFQ を CW 運転用と Pulse 運転用の 2 種類を想定した設計を行っているが、その CW ラインと Pulse ラインは DTL のどこかで合流させる必要がある。そうした場合、ビームロスによる放射化問題の観点から考えれば、合流地点は出来るだけエネルギーの低いところが良いが、エネルギーが低いところではビームの Phase advance が大きいため、ビームの質を維持するようなトランスポート系を設計するのが困難となる。そこで、万一ビームロスが起こっても中性子が発生しない 7MeV 地点を No.1 タンクの区切りとし、ここで 2 つのラインを合流させることにした。

No.2、No.3 タンクはそれぞれ 7～30MeV、30MeV～50MeV とした。1 タンク辺りの長さを長くすることは、タンク内に発生するモードの共振周波数の差を小さくし、perturbation に対して不利となる。従って 7～50MeV の間で一個所、30MeV 地点でタンクを区切った。Fig.3.2.3.4.1.2.1 は加速エネルギー 2～10MeV の 1/3 コールドモデルにおける、タンク長に対する TM010 と TM011 の共振周波数の測定結果である。この結果をもとに、実機の 200MHzDTL での運転モードと TM011 モードとの周波数差を計算すれば、一番長い約 24m の No.2 タンクで約 80kHz である。

3.2.3.4.1.3 SDTL 区間

SDTL 区間のタンク数は全部で 17 タンクとなる。1 タンク当たりのセル数はすべて 5 セルとした。SDTL から後段への横方向のスムーズな移行を得るために、100MeV 地点での超伝導加速部のダブレット間距離 (=4m) と同じ間隔で SDTL のダブレットを配置した結果、1 タンク当たり 5 セルとなった。

3.2.3.4.2 平均電場強度

NSP 加速器では、CW 運転を考慮した設計が必要となる。この場合、熱的観点から平均電場強度はパルス仕様の DTL よりも低く設定することが望ましい。しかし、一方で平均電場強度を低くすることはビームに対する縦方向 (エネルギー方向) アクセプタンスを狭くすることになり、それを補うために同期位相を深く取る必要が生じ、結果的に加速効率を落とすことになる。

平均電場強度は、ビームの質に最も影響を及ぼす DT (drift-tube) とポストカプラについて幾つかの熱計算を行い、その結果得られた予想表面温度及び変位量から判断して E0=1.5MV/m とした。熱計算の詳細は 3.2.3.7 の熱検討のところで説明する。

3.2.3.4.3 同期位相

RFQ からのビームを余裕を持ってキャプチャーするために、DTL 入り口の同期位相はなるべく大きくすることが望ましい。ここでは Fig.3.2.3.4.3.1 に示すビームシミュレーションの結果から判断して、通過する rms ビーム位相幅の 7 倍以上のアクセプタンスを確保するために、入り口の同期位相を-55deg. とした。そして、DTL 内でビームがバンチされるに合わせて徐々に-30deg. まで同期位相を狭くしていき、25MeV 地点以降、SDTL を含む 100MeV までは-30deg. 一定とした。

同期位相の急激な変化は縦方向の収束力の急激な変化を意味し、ビームダイナミックスの観点からは当然望ましくなく、同期位相はスムーズに変化させていくことが重要である。

3.2.3.4.4 RF 電力の評価

PARMILA コードの計算結果から各タンクに必要な電力を Fig.3.2.3.4.4.1 及び Table 3.2.3.4.4.1 にまとめた。タンク No.1～3 が DTL、No.4～20 が SDTL である。ここでは 70%Q 値を想定したタンク励振用の電力と、ビーム電力、及び同軸管の損失を考慮して高周波源に必要なピーク電力を算出した。更に、SDTL に関しては端板分の RF 電力を考慮して、各タンクの Wall loss を PARMILA 計算値の 20%増としている。

なお、ここで PARMILA が算出する RF 電力と SUPERFISH が算出する RF 電力の違いについて、SDTL の最初 (No.3) と最後 (No.20) のタンクを使って比較した結果を Table 3.2.3.4.4.2 に示す。表から PARMILA がタンク端板の RF 電力を計算していないとすれば、3%弱 SUPERFISH よりも PARMILA の方が高い値を示すことになる。また SUPERFISH による計算では、SDTL の端板部分の Wall loss 影響は、端板無しの場合と比べて SDTL の最初のタンクで約 17%増、最後のタンクで約 13%増である。(タンク長が短いほど端板の影響は大きいので、SDTL の最初のタンクがもっと影響が大きく、最後のタンクが最も少ない。) 従って、端板の影響が無視できない SDTL の RF 電力を評価する場合、PARMILA の算出した値を 20%増しにしておけば、見積りとして妥当な値が得られると言える。

3.2.3.4.5 実効シャントインピーダンス

平均電場強度を固定すれば、実効シャントインピーダンス (以下 ZTT) はセル形状によって決まるので、ここでは各タンクのセル形状をどのように設定したかも含めて説明する。始めに Fig.3.2.3.4.5.1 に DT の各部名称を示す。空洞形状はこの図に示した各部の値が決まれば決まる。

3.2.3.4.5.1 セル形状決定の手法

加速効率の評価として使われる実効シャントインピーダンス（ZTT）はシャントインピーダンス（Z）とTransit-time factor（T）の二乗の積であらわされる。

$$ZTT = \frac{E_0^2}{(P_w / L)} \times \left(\frac{\sin(\pi g / L)}{\pi g / L} \right)^2$$

E_0：平均電場強度
P_w：空洞内電力損失
L ：セル長
g ：ギャップ長

上式より、E_0=1.5MV/m 一定であり、L（=βλ）もβを決めれば一定となる。すると、ZTT を高くするには Pw、つまり DT のボリュームを出来るだけ小さく、g を出来るだけ狭く取れば良いことになる。しかしセル形状を考えた場合、g を狭くするということは Pw を大きくすることであり、逆に Pw を小さくするということは g を広くするということであるので、どこかで最適な値を見つけ出す必要がある。

そこで、DTL 部と SDTL 部それぞれで、以下のようにして ZTT を決定した。

DTL 部：各タンク最初のセルのβを対象に、kilpatrick 値の 1.2 以下で（JHF は 1.3 以下）、Q-magnet を挿入するスペース(DT 直径 20cm)を確保しながら、出来るだけ Face_angele を大きく取った上で（出来るだけ Pw を小さくした上で)、g を振って ZTT が最も高くなるようにセル形状を決める。

SDTL 部：SDTL が始まる 51MeV（タンク No.4）地点と 75MeV（タンク No.13）地点のβを対象に、kilpatrick 値の 1.2 以下で（JHF は 1.3 以下)、冷却水路を挿入するスペースを確保しながら、出来るだけ Face_angle を大きく取った上で（出来るだけ Pw を小さくした上で)、g を振って ZTT が最も高くなるようにセル形状を決める。

基本的に g 以外の各部の値がどのような条件から決まるかを Table 3.2.3.4.5.1 に示す。

3.2.3.4.5.2 ZTT

検討の結果得られた ZTT の値を Fig.3.2.3.4.5.2 に示す。DTL 部ではタンク毎にセル形状の最適化を行なった結果、タンクが変わる毎に ZTT が高くなっている。しかし、SDTL では 75MeV 地点（Tank No.13）でセル形状の最適化を行なったにもかかわらず、ZTT は高くなっていない。これはすなわち、SDTL 部では各タンク毎にセル形状の最適化を行う必要が無いことを示している。

3.2.3.4.6 四重極電磁石磁場勾配の検討

DTL、SDTL 共に四極電磁石の磁場勾配はバンチビームの space charge を考慮した Coupled envelope equations と Equipartitioning 理論を組み合わせることにより求めた。Fig.3.2.3.4.6.1 に粒子の加速エネルギーに対する磁場勾配と磁極長を示す。最も磁場勾配が高いのは DTL 入り口の 5.18kG/cm (=51.8T/m) であるが、4極電磁石の開発については既に 80T/m を達成しており問題はない[*2)]。DTL 部のラティスはビームサイズをより小さくできる FODO を設定した。尚、一般に Q-magnet は電源個数を減らす目的で、数個分を同じ磁場勾配 (電流) にして、それらを一つの電源で駆動 (Q-magnet のグループ化) する。

3.2.3.4.7 ボア半径

収束系の設定に equipartitioning 法を使うと、ビームサイズは加速エネルギーが上昇するにしたがって大きくなっていく。従って、ボア半径も加速エネルギーの上昇と共に広げていく必要がある。またハローとなった粒子が DT に当たらないためには、ボア半径は出来るだけ広く取ることが望ましいが、それはまた加速効率 (ZTT) を下げてしまう方向でもある。今回の設計では、RMS ビームサイズの 6～7 倍を目安として、DTL 部では No.1 タンクを 1.0cm、No.2 及び No.3 タンクを 2.0cm とし、SDTL 部では 2.5cm とした。Fig.3.2.3.4.7.1 に各加速エネルギーでの径方向の最大ビームサイズと設定したボア半径の関係を示す。

3.2.3.4.8 チューナの検討

チューナについては CW 運転を考慮して冷却構造を改善すれば、基本的に DTL9 セルモデルハイパワー試験で使用したチューナを使用しても問題ないと考え、ここでは 9 セルモデルのデータを基にチューナの本数について検討を行った。

9 セルモデルのオートチューナは直径 125mm で、ストローク長が 200mm であり、このチューナの感度はタンク 1m あたりおおよそ 400kHz であることが分かる。

一方、Fig.3.2.3.4.8.1 には 9 セルモデルのデューティに対するチューナ挿入量を示す。9 セルモデルは平均電場強度 (E0) =2.0MV/m、20%デューティで測定したが、Fig.3.2.3.4.8.1 の実測値より 1.5MV/m、CW のときの挿入量を予測することが出来る。一般に、チューナの挿入量 (つまり熱膨張量) は発熱密度 (W/m^2) によって決まる。従って、E0=1.5MV/m、CW と同じ発熱密度を有するのは E0=2.0MV/m、56.3%デューティとなり、Fig.3.2.3.4.8.1 のデューティ 56%地点が、E0=1.5MV/m、CW で予想される挿入量ということになる。

このチューナを使う場合、オートチューナはタンク 2m に一本の間隔で設置するのが妥当である。つまり、まずタンク 2m に一本の場合、周波数感度は 200KHz (400÷2)' となる。そして、Fig.3.2.3.4.8.1 の挿入量の値は感度が 1/2 になったので 2 倍することになる。この時タンク流量を 200 l/min とすれば、挿入量は約 130mm (流量 200 l/min の線で、56%デューティのときの

値を 2 倍する）で、このチューナのストローク長 200mm 以内に収まることが分かる。CW 用の実機では更にタンクの冷却系統を改良して、400～600 l/min 程度の流量を流すことを考えると、オートチューナは 2m に一本が妥当であることが分かる。

オートチューナを 2m おきに、半固定チューナを 2m おきに取り付け、オートチューナと半固定チューナの間隔を 1m とした場合の各タンクのチューナ必要本数を Table 3.2.3.4.8.1 にまとめた。

なお、定性的に考えると、チューナの径はなるべく小さく、数はなるべく多く、配置はビーム軸に対し対称にするのが望ましいが、加速電場への影響が微少の範囲であれば、チューナの径を太くし、チューナの間隔を広くして全体の個数を減らすことも考えられる。

3.2.3.4.9 ポストカプラ本数

DTL は定在波型加速空洞であり、2πモード運転される。しかし、この場合群速度は 0 となり、電磁波のエネルギーは伝播せず、そのため負荷のビームにより加速電場が乱され、ビームの質も悪化してしまう。そこで、一般的には、DT に複数のステムを付けた構造や、タンクにポストカプラを付けた構造にして、群速度が有限の大きさを持つようにする。群速度が有限の値を持てば電磁波エネルギーが伝播し、セル形状の違いによる加速電場の傾きや、チューナや各種ポートによる加速電場の乱れも低減される。

群速度に有限の値を持たせる方法としては様々な方法があるが、今回の検討では、既に LANL や KEK 等で実績のあるポストカプラ方式を取りいれることにした。また、ポストカプラの形状についても、既に実績のある KEK の 200MHzDTL のもと同じ形を採用した。ポストカプラ方式は挿入量を調節したり、先端に取り付けたタブを回転させることにより電場の微調整が出来る特徴がある。

ポストカプラの必要本数を検討するに当たっては、2～10MeV までの 1/3 サイズコールドモデルを製作し、実験的に最適値を求めた（Fig.3.2.3.4.9.1）。取り付け方法は、Fig.3.2.3.4.9.2 に示すように基本的に水平方向に、交互に取り付ける形を取った。従って、ここで検討するのは、Fig.3.2.3.4.9.3 に示すようにポストカプラを何セル毎に付けるのが良いかということである。

Fig.3.2.3.4.9.4 に、各ポストカプラ間隔（P/C=1/2～1/5）の挿入量に対するビーム軸上の電場分布の安定度 Dx を示す。Dx は次式で定義される。

$$Dx = \sum_{i=1}^{N} \left| E_i - \langle E \rangle \right| \Big/ \langle E \rangle$$

E_i は i 番目のセルの平均加速電場、<E>はタンク全体の平均加速電場、N は全セル数（60 セル）を示す。Fig.3.2.3.4.9.4 が示す通り、ポストカプラは間隔が密になるほどより高い安定度が得られる。しかし一方では、DT 間隔の狭い低エネルギー部では各セル毎（P/C=1/1）にポストカプラを挿入すると、数多く発生したポストモードが運転モード（TM010）と縮退して逆に加速電場を乱してしまうことが起こる。

これらのことから、ポストカプラは少なくとも 2～7MeV の No.1 タンクについては 2 セル毎に 1 本ずつ挿入するのが良いと判断した。Fig.3.2.3.4.9.4 より、P/C=1/2 で最も加速電場が安定

する挿入量は26mmであり、これを実機の200MHzでの挿入量に換算すると78mmとなる。

タンクNo.2、No.3についてはセル間隔が広くなっているため、ポストの間隔は1セルに1本(P/C=1/1)で対応できると思われる。(KEK PS-linac 40MeVDTLも1セルに1本の割合となっている。)

3.2.3.5 ビームシミュレーション

ここでは、PARMILAを使ったビームシミュレーションについて、まず典型例を示し、次に、アライメント誤差(各セルの平均電場強度、Q-magnetのX,Y平面、pitch、yaw、タンク毎のPhase)を含めた場合のシミュレーションについて、主にエミッタンス増加の観点から評価した結果について報告する。

3.2.3.5.1 計算モデル

シミュレーションの計算モデル(Fig.3.2.3.3.1)では、DTL部のトランスポート系(Pulse-lineとCW-lineの合流部分、及び30MeV地点のドリフトスペース)は省略した。入射ビームのエミッタンスは、MEBT-1のシミュレーション結果の出力RMSエミッタンスとほぼ同じ値(をPARMILAで発生させた。入射ビームのツイスパラメータは、3.2.4.6節で示した手法により求めた磁場勾配をTRACE3Dに入力し、matchingパラメータを求めることにより設定した。シミュレーションに使用した入射粒子形状をFig.3.2.3.5.1.1に、数値をTable 3.2.3.5.1.1に示す。

3.2.3.5.2 アライメント誤差無し典型例

100MeV地点粒子形状をFig.3.2.3.5.2.1に、Fig.3.2.3.5.2.2にアライメント誤差がない場合の典型的な結果を示す。図が示すようにエミッタンス増加は、RMS値で最高約5%(y方向100MeV地点)、90%値で約最高10%(x方向6.5MeV地点)となった。また、x方向、y方向、z方向を平均した値では、RMS値で最高約1.4%(100MeV地点)、90%値で最高約3%(100MeV地点)となった。図中の粒子のばらつきがどこで生じているかについては、入射直後～40MeV付近でエミッタンス増加が起こり、その後は一定していることから、主にDTL区間でばらつきが発生していることが分かる。

3.2.3.5.3 アライメント誤差を含むシミュレーション

各セルの平均電場強度、Q-magnetのX,Y平面、pitch、yaw、及びタンク毎のPhaseの誤差がビームのエミッタンスに与える影響を調べた上で、9セルホットモデルのアライメント実績をこのシステムに組み込んだ場合にどうなるかをシミュレートしてみた。Q-magnetへの誤差の与え方はDTL部のものとSDTLのものと同じとした。

入射粒子の分布は、すべての計算で3.2.5.2に示した典型例と同じものを使用し、ランダム関

数に影響を受けるのは誤差の要素のみとした。更にランダム関数の seed は時間（秒、分）を利用して計算の度に変化させた。ある誤差範囲において、どの程度エミッタンス増加が起きるかの判定については、一つの誤差範囲の設定に対して 8 回計算を行い、RMS 値で最もエミッタンス増加の大きいものをその誤差範囲でのエミッタンス増加とした。

3.2.3.5.4 複数エラー付きシミュレーション

ここでは、各種のアライメントエラーをすべて取り入れたシミュレーションを行った。各エラーの値は Table 3.2.3.5.5.1 に示すように、基本的に 9 セルモデルの実績値を基に、もっともらしい値を入力した。入射粒子の分布は、3.2.3.5.2 に示した典型例と同じものを使用し、ランダム関数に影響を受けるのは誤差の要素のみとした。また、ランダム関数の seed は時間（秒、分）を利用して計算の度に変化させた。計算回数は 20 回で、そのうち RMS エミッタンスの増加が最も大きかったケースを結果として採用した。

Table 3.2.3.5.5.1 の誤差を入れた場合と入れない場合とで、エミッタンス増加を比較したものを Fig.3.2.3.5.5.1 に示す。誤差を入れた場合でも RMS、90%共エミッタンス増加は 10%以下となっている。更に 100%エミッタンスの場合は、誤差を入れた場合と入れない場合とでほとんど差が出なかった。従って、この程度の誤差の範囲であれば、ビームコア部分のエミッタンスが若干増加するものの、ビームの質への大きな悪影響はないと言える。

3.2.3.6 トランスポート系の検討

ここでは、RFQ-DTL 間（MEBT-1）、SDTL-超伝導加速部間（MEBT-2）、及び Pulse-CW line 合流部のトランスポート系の検討について報告する。

3.2.3.6.1 RFQ-DTL 間（MEBT-1）の検討

3.2.3.6.1.1 構　成

最初に Fig.3.2.3.6.1.1 に今回検討した MEBT の構成を示す。

設計方法は、最初に下図に示すようにバンチャーとダブレットと 50cm のドリフトスペースで一つの周期構造を構成する（入り口と出口のツイスパラメータを同じにする）。そして、これを 3 周期分配置し、各ドリフトスペースは 2 つをチョッパー用に、1 つをビーム診断機器用とする（以降、この 3 周期部分をチョッパー部と呼ぶ）。最後にこのチョッパー部の、入り口と RFQ 出口を 4 つの Q-magnet とバンチャー、及びドリフト長で、また出口と DTL 入り口を 4 つの Q-magnet と 2 つのバンチャーでマッチングを取る。チョッパー部を 2 個所に分けたのは、ドリフトスペースが 100cm にもなると、ビームの縦方向の広がりが大きくなってエミッタンスの悪化を生じるからである。

3.2.3.6.1.2 PARMILA シミュレーション

次にPARMILAによるシミュレーションを行った結果をFig.3.2.3.6.1.2に示す。入射粒子は現在検討中のRFQシミュレーション結果の情報をもとに、RMSエミッタンスとツイスパラメータがほぼ一致したものをPARMILAで作り出した。粒子数は10000。分布はX,Y,Z方向で一様分布の粒子で計算した。

RMSエミッタンスの増加は横方向で約11%、縦方向で約4%であり、許容できる範囲である。Phase advanceを見ると、MEBTの始めと終わりで横方向に急激な変化が見られるが、RMSエミッタンスが増加する部分とこのPhase advanceが急激に変化する部分が一致していることから、これがエミッタンス増加の一因となっていると思われる。Phase advanceを緩やかに変化させるようにすればエミッタンスの増加は押さえられるかもしれないが、実際の場合を考えると、そのためには更にQ-magnetやバンチャーを更に付け加える必要があり、(アライメント誤差等で)かえって逆効果となる可能性もある。結局、低エネルギーでの長いドリフトスペースを含むMEBTでは、シミュレーション上でも10%程度のエミッタンス増加はどうしても起きてしまうことになる。

3.2.3.6.1.3 バンチャー形状

Fig.3.2.3.6.1.1より得られたMEBTパラメータをもとに、バンチャーの検討を行う。ここでは、バンチャー電圧の最も高いBuncher-6についてSUPERFISHにより、バンチャー形状を検討した。

Fig.3.2.3.6.1.1のバンチャー電圧はTRACE3Dによって計算されたもので、その定義は、

バンチャー電圧=E0×T×L [MV]

システム設計でバンチャーに与えられたスペースが30cmであることから、バンチャーの長さとしてはL=15cm程度に限られてしまう。従って、Buncher-6の場合、バンチャー電圧=0.1545MVより、E0T=1.0300MV/mとなる。ボア半径はシミュレーション結果からRMSビームサイズが0.4cmを超えていることから、3.0cmとした。CORNER_radius=1.6cm、INNER_nose_radius =0.9cmは放電限界から、DRIFT_TUBE_Diameter=12cmは内部冷却構造のスペース確保の必要から、FLAT_length=0.5cmはアライメント上の必要からそれぞれ決まる。ギャップ長及びバンチャー外径については、ギャップ長を変化させたときのバンチャー直径及びKilpatrick値の特性でKilpatrick≒1.0以下、且つZTTが最も高くなるところを選んだ($g/\beta\lambda=0.16$)。

3.2.3.6.1.4 四極電磁石形状

シミュレーション結果から、RMSビームサイズは最高で約0.4cmとなり、これからQ-magnetに必要なボア半径は2.5～3.0cm程度となることが分かる。

Fig.3.2.3.6.1.1のMEBT-1の構成では、磁極長はすべて5cmであるため、ここでは一番磁場勾配が高いNo.1 Q-magnetにつての大まかな設計を行った。設計はD.J.Liska "Generalized Design Formula for Low Energy Electromagnetic Quads" (LA-12759-MS, UC-414 and UC-910, Jun.

1994）で示されている手法により行った。ここでは、巻線としてホローコンダクタ型を想定している。以下に設計するに当たっての仮定を示す。

－assumptions－

Conductor size=0.2576"square

Conductor copper area=0.04852in^2

Conductor cooling area=0.01606 in^2

Allowable Field Coil Curents=650 Amps. =13400 A/ in^2

Pole tip allowable Flux Densities (for linear performance) =10kGmax

Yoke allowable Flux Densities (for linear performance) =5kGmax

Quad Flux Efficiency (loss in bore due to leakage flux)=0.9

計算の結果得られた Q-magnet のパラメータを Table 3.2.3.6.1.4 に、概観図を Fig.3.2.3.6.1.4 に示す。

3.2.3.6.2 SDTL-超伝導加速部間（MEBT-2）の検討

MEBT-1 の設計では、粒子の速度（β）が低いため横方向の収束間距離は 50cm 程度しか取ることが出来ず、バンチャーやビーム診断用機器を挿入するスペースを確保するのが困難であったが、この点 MEBT-2 は通過する粒子のエネルギーも 100MeV と高く、横方向収束間距離は約 4m 程度でも可能となる。従って MEBT-2 は横方向のマッチングについては比較的設計は容易になるが、この区間は加速器の励振周波数を 200MHz から 600MHz へとジャンプさせる区間として、縦方向のビームの取り扱いは非常に重要となる。

設計のためというより、問題点を探るための計算例として、TRACE3D によるマッチングの計算結果及びその入力ファイルを Fig.3.2.3.6.2.1 に示す。マッチングは 3 つの doublet と 2 つのバンチャーによって行った。電磁石の磁場勾配とバンチャー電圧をチューニングパラメータとしておけば、実際の運転の場合でもマッチングの調整が可能である。全体の長さは約 10.13m である。入射粒子のツイスパラメータは DTL-SDTL 区間 PARMILA 計算結果の値を使用した。

TRACE3D の計算結果が示すように、3 倍の周波数ジャンプに対応させるために縦方向のビームサイズは RF ギャプで急激に絞る必要があり、そのために必要なギャップ電圧（=E0×T×L [MV]）は 4.35MV である。DTL-SDTL 区間で発熱密度が最も高くなるのは SDTL 部最後のセルであるが、このセルの E0×T×L は 0.723MV（1.5×0.7508×0.642101）であることから、4.35MV を CW で駆動するバンチャーを製作するにあたっては熱的問題が非常に大きいことが分かる（発熱密度は電場の二乗に比例する）。

またTRACE3Dで求めたマッチングパラメータをPARMILAに入力してシミュレーションを行った。入射粒子は DTL-SDTL シミュレーションで得られた粒子情報をそのまま入力として使用した。超伝導加速部へのマッチングを取るために、ビームサイズは途中から絞られていき、それに伴いエミッタンスは増加し始める。MEBT-2 区間のエミッタンス増加は RMS、90%値で約 3%、100%値で約 10%である。エミッタンス増加を更に抑えるためには、ビームサイズを急激に絞らないような工夫が必要となる。

3.2.3.6.3 Pulse-CW Merge section の検討

NSP では Pulse 運転時 H+, H-を同時に加速するため、Pulse line は直線で設計する必要がある。そのため merge 部については CW line の方を、偏向電磁石等を用いて徐々にビームを曲げていき、Pulse line へ merge させるという形になる。

ビームを偏向させる角度については、加速エネルギーが低いため、一つの偏向電磁石で曲げられる角度は精々 2〜3 度程度であることが TRACE3D によって分かっている。設計方法としては、例えばFig. 3.2.3.6.3.1 に示すように、ビームを曲げるための偏向電磁石、横方向の発散を押さえるための四極電磁石、縦方向の発散を押さえるためのバンチャーを一組とした周期構造を形成し、これを数周期分配置して必要な曲げ角を得えるという方法をとる。ここでは、1 周期辺りの偏向角を 2deg. とした。粒子入射条件は、DTL の 7MeV 地点までのシミュレーション結果を基に、このツイスパラメータと一致するようにトランスポート系の始めの地点で PARMILA により粒子を発生させている。粒子数は 10000、粒子分布は x, y, z で一様分布である。Fig. 3.2.3.6.3.2 では、RMS エミッタンス増加は約 6%となっているが、一周期辺りの偏向角を大きくしていけば、エミッタンス増加の割合も大きくなる。

3.2.3.7 熱検討

この章では、ABAQUS を使って平均電場強度 E0=1.5MV/m、CW 運転の環境を想定した DT、ステム、ポストカプラ、タンク、端板、及びチューナの熱計算を行ない、その温度や熱変位量を調べた。その結果、タンクのステムポート付近、及び端板のハーフ DT との接触部付近については更に冷却対策を施すことが望ましいと考えられるものの、その他の部分については定常運転時に問題が起こると予想されるような結果は見つからなかった。

計算コードを使った DTL の定常熱伝導解析では、以下の①〜④の項目を設定すれば、温度と熱変位量を計算することが出来る。

① 解析するモデルの形状と、
② その材質の物性値、
③ 発生する FR 発熱量と
④ 冷却水流速
⑤ 冷却水の熱伝達率

今回の検討では、このうち① 解析モデルの形状に関しては、原研 9cell モデルの寸法をベースに冷却構造に改良を加えたモデルを設定した。DT（ドリフトチューブ）とステムでは、出来るだけ RF 熱が発生する近傍に冷却水路を設ける構造を設定し、ポストカプラではタブ内部に噴流による冷却構造を設定し、またタンクについては外壁のほとんどを冷却水が覆う構造を設定し、端板は冷却系統を 9 セルモデルの 2 倍にしてそれぞれ計算を行なった。また、②材質の物性値では温度に関係なく一定値を使用し、③発生する RF 発熱量は SUPERFISH の計算により求めた。但し、ABAQUS への入力値は SUPERFISH の計算値を 0.7 で割った値（70%Q0 値）を使用した。④の 流速は基本的に上限 5m/sec を想定した。銅の冷却水路を持つ多くの加速器はこのレンジで水を流

しており、例えば建設以来25年以上経過しているLANSCEのDTLは通常6.5m/secで冷却水を流しており（この間、侵食の問題が発生したのは2回であった[*3]）、実績から考えれば5m/secはもっともらしい値と言える。そして、⑤の冷却水の熱伝達率はh次式により求めた[*1]。

$$R_e = \frac{vD}{\nu}$$

$$h = \frac{\lambda}{D} N_u$$

$$D = \frac{4S}{L}$$

$$N_u = \frac{(f/2)(R_e - 1000)P_r}{1 + 1.27\sqrt{f/2}\left(P_r^{2/3} - 1\right)}$$

$$f = 0.079/R_e^{0.25}$$

N_u：ヌセルト数
D ：相当直径
S ：流路断面積
L ：濡れぶち長さ
R_e：レイノルズ数
v ：流速
ν：動粘性係数
f ：管摩擦係数
P_r：プラントル数
λ：熱伝導率
h ：熱伝達率

3.2.3.7.1 除熱のポイント

例えば、ステムを想定してFig.3.2.3.7.1.1のような円管モデルを考え、円管内には冷却水が流れており、円管外壁にはRF熱が発生していて、外壁の外は真空とし、定常状態を仮定する。また、冷却水温度を$\theta f1$、管壁内側の温度を$\theta w1$、外側の温度を$\theta w2$とし、管壁内側の冷却水への熱伝達率をhとする。この場合、発生したRF熱Qと、管壁を熱伝導で伝わる熱量Q_2と、冷却水へ熱伝達で伝わる熱量Q_1との間には次の関係が成り立つ。

$$Q = Q_1 = Q_2 \qquad (7\text{-}1\text{-}1)$$

また、Q_1、Q_2はそれぞれ次式で与えられる。

$$Q_1 = h\pi d_1(\theta_{f1} - \theta_{w1}) \times 1 \qquad (7\text{-}1\text{-}2)$$

$$Q_2 = \frac{2\pi\lambda(\theta_{w1} - \theta_{w2}) \times 1}{\ln\frac{d_2}{d_1}} \qquad (7\text{-}1\text{-}3)$$

式（7-1-1）～（7-1-3）より、

$$(\theta_{f1} - \theta_{w2}) = \left(\frac{1}{h\pi d_1 1} + \frac{\ln\frac{d_2}{d_1}}{2\pi\lambda 1}\right) Q \qquad (7\text{-}1\text{-}4)$$

従って、冷却水温θ_{f1}及び熱伝達率h_1を一定とした場合、RF熱が発生する管壁外側の温度を下げるためには管の内径d_1を大きくするか、管壁の厚み（d_2/d_1）を薄くするかすればよいことが分かる。

ここで、式（7-1-4）に具体的な値を入れてみる。

SUPERFISHの計算によれば、DTとSTEMの中で、最も発熱密度が高くなる部分はSTEMとDTの

接合部分のSTEM側である。Fig.3.2.3.7.1.2に各β（各セル）のSTEM部の最高発熱密度を示す。

まず熱伝達率hはd_1=3.0cm、流路の厚みtを3[mm]、そこに流れる流量を6[l/min]（流速約2[m/sec]）とすれば約10000[W/m²·K]となる。またθ_{f1}=25℃は固定とする。RFTable面に発生する発熱密度は、Fig.3.2.3.7.1.2のグラフよりもっと高い27[W/cm²]（SDTL100MeV地点）を使う。このとき横軸を円管壁厚さ(d2-d1)/2、縦軸を円管壁内外側の温度差$\theta_{f1}-\theta_{w2}$にとってプロットすればFig.3.2.3.7.1.3となる。この結果から判断すれば、ステムの外壁の厚さは大体4～5mm程度が望ましいことが分かる。

尚、温度上昇と変位量は、流量が同じであれば、発熱密度に比例し、電場強度の2乗に比例する。

3.2.3.7.2 DT-STEMの熱計算結果

3.2.3.7.1の考え方に基づいて､DTとステムのなるべく表面に近いところに冷却溝を配置した。ステム部は表面から4mmのところに、DT部は表面から5mmのところにそれぞれ冷却路を通している。設定した流速はステム部で2m/sec、DT冷却部で4.33m/sec、熱伝達率はステム部で11000W/m²K、DT部で26000W/m²K、水温はステム部で25℃、DT部で26℃である。またRFによって発生する発熱密度は各セル毎に値が異なる（エネルギーが高いほど高い）が、ここでは10MeV地点のセルを取り上げた。ABAQUSを使って熱計算を行なった計算ではQ-magnetを挿入し、ホローコンダクタに780Aの電流を流している状態を想定している。この場合DTTable面の最高温度は約40℃（corner radius部）となり、熱膨張によるボア中心のずれは約60μmとなる。

尚、このモデルは、実際に試作品を製作しており、既に発熱表面に近いところに冷却水路を通す方法は確立している。

3.2.3.7.3 ポストカプラの熱計算結果

Fig.3.2.3.7.3.1にポストカプラの計算モデルを示す。CW運転用対策としては、従来冷却水路を設けていなかったタブ内部に新たに冷却水路を付け加えた。各部の流速、熱伝達係数、冷却水温度をFig.3.2.3.7.3.1中に示す。この計算ではステムの長さを30cmとした。この場合、最高温度は約57℃（タブ上部）となり、挿入方向への熱膨張は約60μmとなる。

計算結果から考察して、タブの部分の温度57℃はRFコンタクタが無い部分の発熱であるため特に問題はなく、膨張量についても、ポストカプラの挿入量は通常mm単位で行なわれることを考えると、非常に少ないと言える。

3.2.3.7.4 タンクの熱計算結果

Fig.3.2.3.7.4.1に直径89.3cm、長さ310cmの1/4対称範囲の計算モデルを示す。同図には境界条件も色分けによって示しているが、冷却水路は80×5mmの矩形流路がタンク外側のほとんどを覆う形を想定している。タンク表面冷却水ジャケットの熱伝達率は21500W/m²K、水温は31℃

である。また、室温の熱伝達率は 10W/m²K、室温は 25℃である。タンク内側温度は全体的に約 50℃、最も温度の高かったところはステムポート付近の 57℃であった。周方向変位量の最大値は端板から最も離れたタンク中央部で発生し、その値は約+200μm であった。この+200μm の周方向への膨張がタンク内に一様に起こった場合の共振周波数に与える影響を、タンク長が約 320cm の SDTL 最後タンクを使って算出すれば、約-26kHz となる。計算結果から考察して、膨張量に関しては9セルモデルで使用したチューナで十分対応できることが分かる。しかし、タンク温度に関してはタンクとステムの接触部分となるところが 57℃となっており、ここには新たな冷却水路を設ける必要がある。

3.2.3.7.5 端板の熱計算結果

端板の変位はタンクの変位と密接に関わっているため、端板とタンクを一体として計算を行なった。温度の最も高かった場所はハーフ DT との接触部付近で約 68℃であった。この付近は O-リングや RF コンタクタがある部分なので、新たな冷却対策が必要である。また、最大変位量は端板上部のタンクとの接触部分で、約 260μm であった。端板は全体的には膨らむ方向に変位するが、形状は中心部が内側にへこんだ状態となる。

3.2.3.7.6 半固定チューナの熱計算結果

半固定チューナの計算モデルは、タンクのチューナポート周囲に冷却水路を設けて、タンクと半固定チューナを一体化している。チューナスタブの温度はどこも 40℃を下回っており、変位も微少である。

3.2.3.8 まとめ

今回の原研大強度陽子加速器用 DTL-SDTL（2～100MeV）の概念設計を行うことで、今後取り組むべき課題が明らかになってきた。

システム構造（第4章）に関しては、SDTL の開始エネルギーをどこに設定すべきかが今後の課題となる。Q-magnet の個数の減少、タンク構造の簡素化という観点からすれば、開始エネルギーは低いほうが良く、また 3.2.3.4.1 の中でも述べたようにビームシミュレーション結果（誤差無しの場合）からは 30MeV くらいからの開始も可能なようにも考えられる。しかし、アライメント誤差を考慮した場合、SDTL は横方向の収束間距離が DTL に比べて長くなるため、同じ Q-magnet のアライメント誤差に対して SDTL を通過するビームの方がより大きな影響を受けることになる。また SDTL はタンク数が増えるため、タンクのアライメント誤差の影響も SDTL を通過するビームの方がより大きな影響を受ける。50MeV を SDTL の開始エネルギーとした今回の検討（3.2.3.5）では、その影響は許容できる範囲であることが分かったが、それより低いエネルギーに関しては、今後新たに検討が必要である。

ビームシミュレーション（3.2.3.5）に関しては、equipartitioning 法を用いてエミッタンス

増加が少ない、良好な結果を得ることが出来た。しかしながら、SDTL 出口（100MeV 地点、アライメント誤差無し）の粒子分布にはビームコアの周辺に若干のばらつきが存在し、この原因がどこにあるのかを明確にするのが今後の課題といえる。もしこれが、単に入射粒子のミスマッチに起因するとすれば、それは加速器パラメータに影響を与えるものではないので大きな問題とはならなが、これが電場強度や同期位相、周波数の設定に起因するとなると、新たな観点からのパラメータ再検討が必要となり、問題は大きくなる。

トランスポート系の検討（3.2.3.6）では、構成の検討を行ない、その構成を PARMILA によるビームシミュレーションで評価した結果、おおむね良好な結果を得た。今後は個々の機器（バンチャー、Q-magnet）の設計が重要となる。MEBT-1 では、限られた狭いスペースの中にバンチャーや Q-magnet を配置するため、各機器のコンパクト化が必要である。また Pulse-CW line 合流部では２つの line が近接した個所の機器の設計が重要となる。そして、MEBT-2 では高いギャップ電圧を CW で駆動できるバンチャーの設計が必要となる。

熱計算（3.2.3.7）に関しては、検討の結果 RF コンタクト部、及び真空止め部分（タンク・ステムポート及びハーフ DT 外周部）周辺の冷却構造の強化策が今後必要なことが分かった。また、本加速器の重要な開発課題の一つにハローを含めたビームロスの低減があることを考えると、熱膨張がビームの質に与える影響については今後とも検討を行なっていく必要がある。

参考文献

*1) Design of the JHP 200-MeV Proton Linear Accelerator, Takao KATO, KEK Report 96-17, February 1997

*2) 長谷川和男、原研 BTA 用 DTL の要素技術開発、第 18 リニアック技術研究会、KEK、1993 年 7 月

*3) Richard L. Wood, THERMAL/STRUCTUAL DESIGN AND FABRICATION DEVELOPMENT OF HIGH POWER CCDTL AND CCL STRUCTUERS, 18th International Linear Accelerator Conference, Geneva, Switzerland, 26 - 30 Aug 1996 1997)

*4) 日本機会学会、伝熱工学資料（改訂第４版）p55

Table 3.2.3.5.1.1 入射粒子 (Fig.3.2.3.5.1.1の値)

	Emittance		
	x-xp [π cm·rad, norm.]	y-yp [π cm·rad, norm.]	φ-W [π deg·MeV, norm.]
100%	0.1135	0.1178	0.3753
90%	0.08739	0.08964	0.28331
RMS	0.022	0.022	0.07
	Twiss parameters		
α	0.16719	0.19733	-0.13114
β	29.9047[cm/rad]	74.9629[cm/rad]	387.5732[deg/MeV]

Table 3.2.3.5.5.1 各種誤差入力値

平均電場強度	±1.0%
Q-magnet XY平面	±100μm
Q-magnet pitch	±0.057 deg (1.0mrad)
Q-magnet yaw	±0.057 deg (1.0mrad)
Q-magnet rotation	±0.057 deg (1.0mrad)
タンク間Phase	±1.0deg

Table 3.2.3.6.1.4 MEBT-1 No.1 Q-magnetパラメータ

GL [kG]	=	26.9000
Lstl [cm]	=	5.00000
r :pole tip radius [cm]	=	3.20000
ΔT :Coolant temperature rise [℃]	=	30.0000
LEFF :Effective field Length [cm]	=	7.75200
Bpt :Pole tip field [kG]	=	11.1042
N :No. of turns per pole	=	32.0000
Ic :Actual coil current [A]	=	490.918
Lc :Coil length per half coil assembly (two poles) [cm]	=	2161.79
H :Stack height of coil [cm]	=	12.9073
t :Yoke thickness [cm]	=	7.55200
P :Total quad power [W]	=	6723.75
V :Total quad voltage [V]	=	13.6963
Q :Total quad cooling [l/min]	=	3.21341
μ :Cooling flow rate [m/sec]	=	0.855352
ΔP :Total quad pressure drop [psi]	=	15.9204
ΔT1 :Coolant temperature rize [℃]	=	29.9961
Quad φ :Quad diameter [cm]	=	54.9785

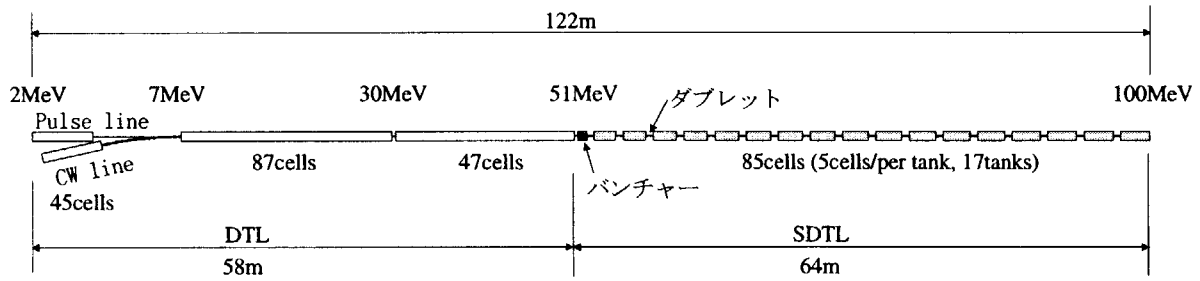
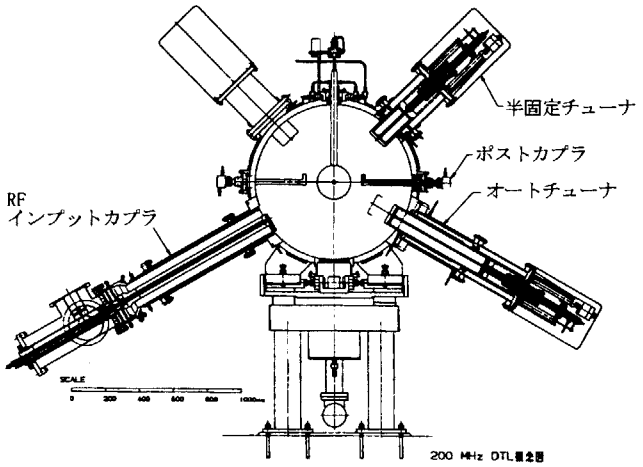
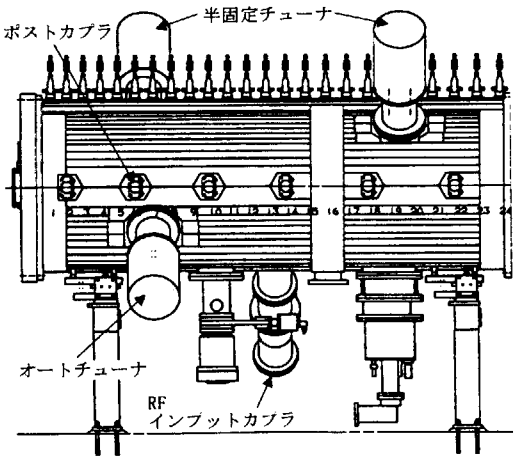


Fig. 3. 2. 3. 3. 1 2～100MeV 区間加速器構成



（正面）



（側面）

Fig. 3. 2. 3. 3. 2 DTL 機器配置図

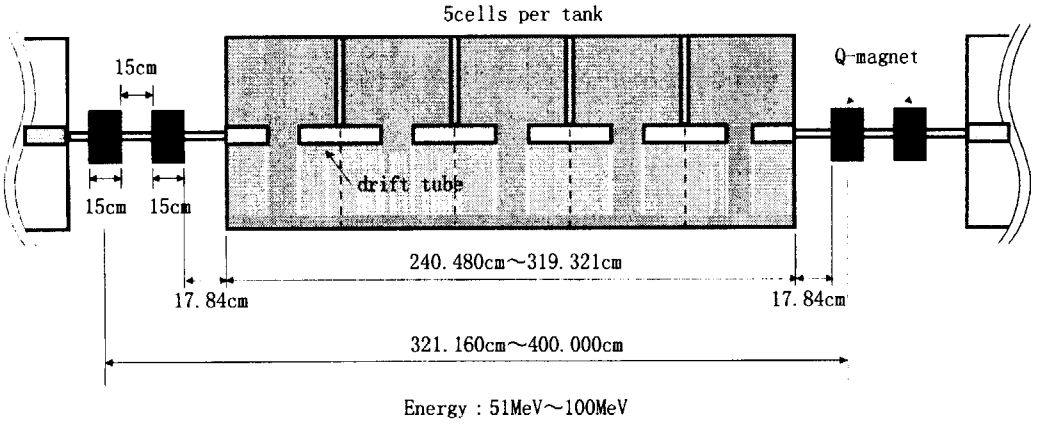
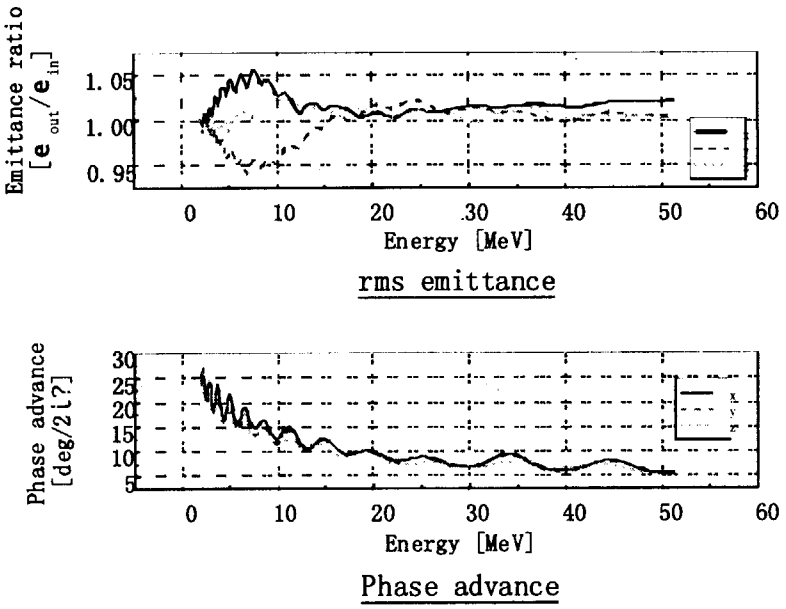


Fig. 3.2.3.3.3 SDTL 概念図



PARMILAの シミュレーションによれば、DTL入射直後のビームはEmittanceが安定せず、 Phase advanceも大きいが、30MeV付近を 過ぎてからは、 両者とも安定する ようになる。

Fig. 3.2.3.4.1.1.1 DTL と SDTL の分かれ目の検討

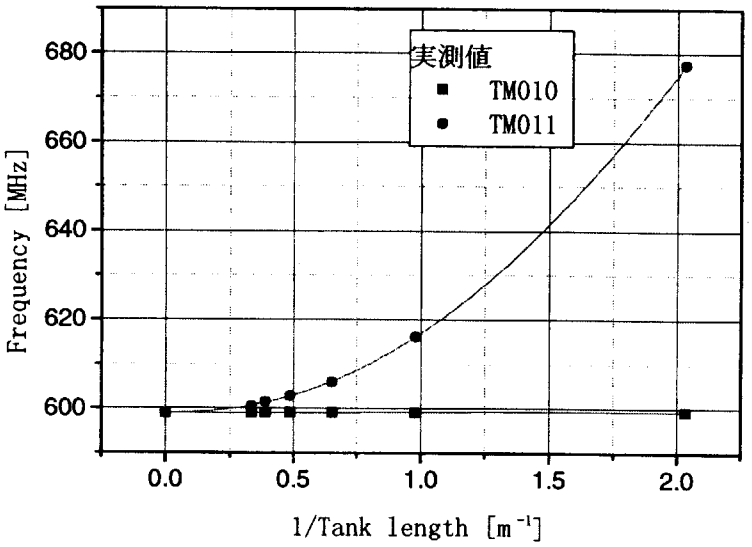


Fig. 3.2.3.4.1.2.1　1/3 コールドモデルのタンク長に対する TM010 と TM011 のモード分布

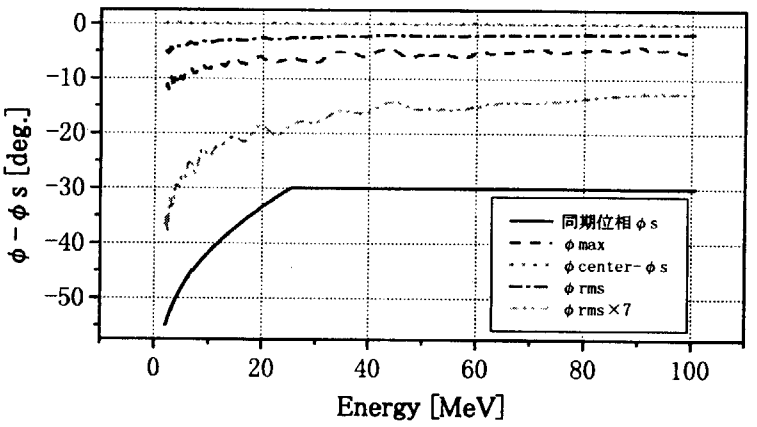


Fig. 3.2.3.4.3.1 同期位相の検討

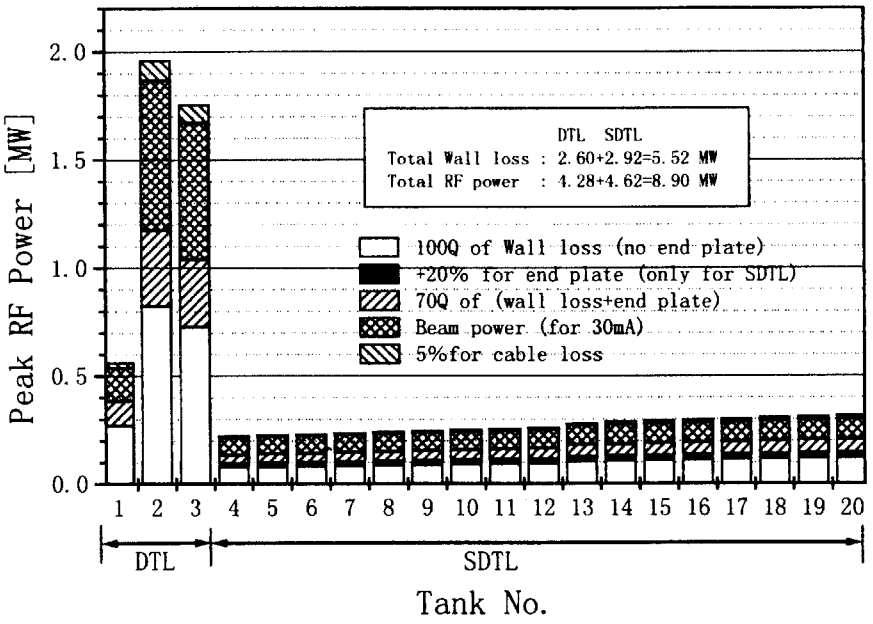


Fig. 3.2.3.4.4.1 RF源に要求されるRFピーク電力（30mA時）

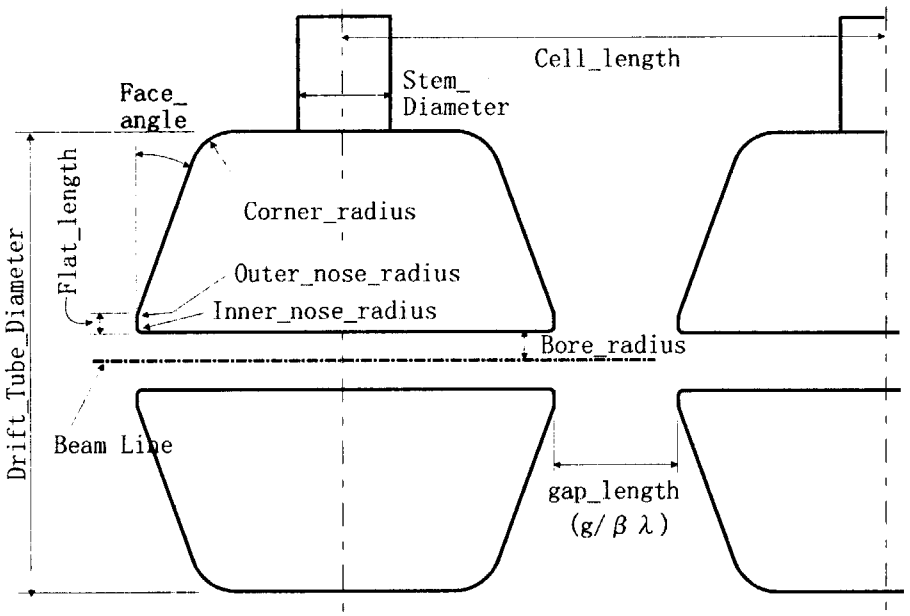


Fig. 3.2.3.4.5.1 ドリフトチューブ（DT）各部名称

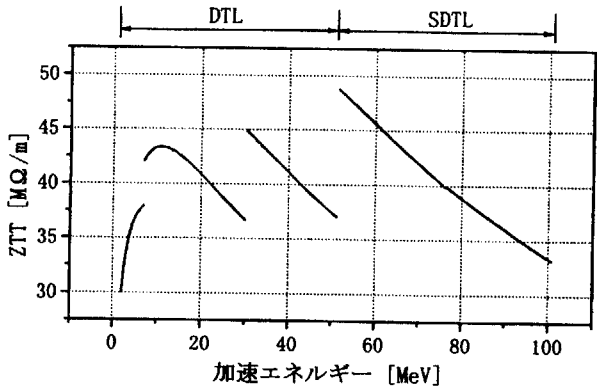


Fig. 3.2.3.4.5.2 DTL-SDTL 実行シャントインピーダンス (ZTT)

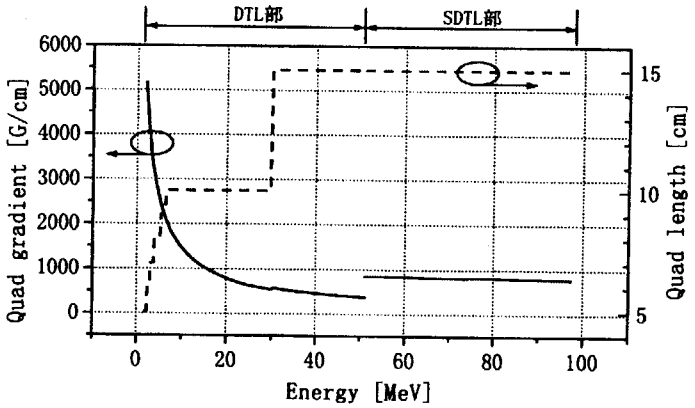


Fig. 3.2.3.4.6.1 DTL-SDTL の磁場勾配と磁極長

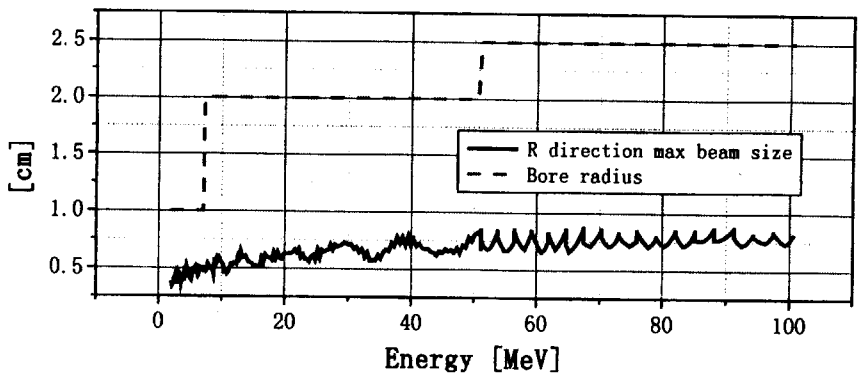


Fig. 3.2.3.4.7.1 R (周方向) max ビームサイズとボア半径の関係

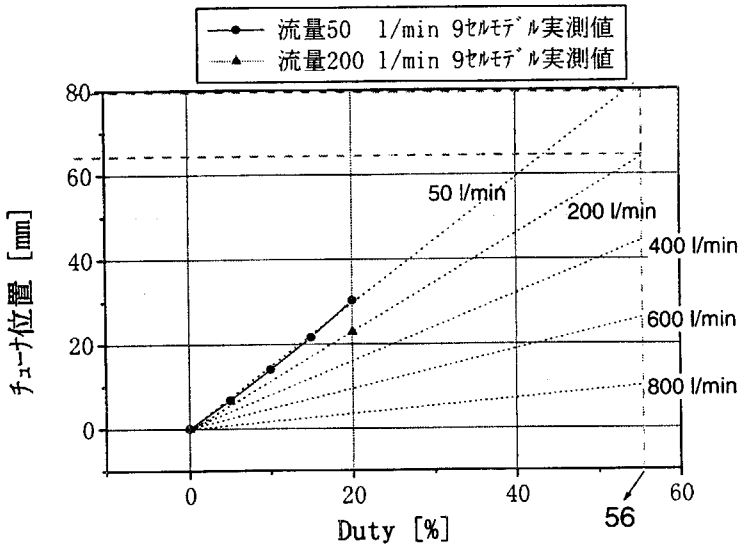


Fig. 3. 2. 3. 4. 8. 1　9 セルモデルのデューティに対するチューナ挿入量

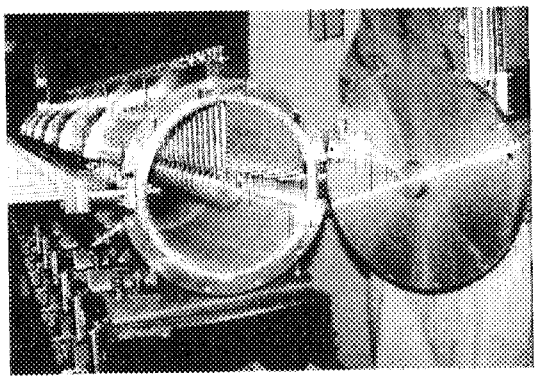
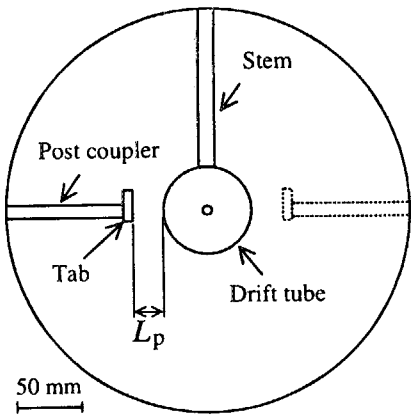


Fig. 3. 2. 3. 4. 9. 1 1/3 サイズ 2～10MeV DTL コールドモデル



Cross sectional view of
the cold model

Fig. 3. 2. 3. 4. 9. 2 ポストカプラの位置

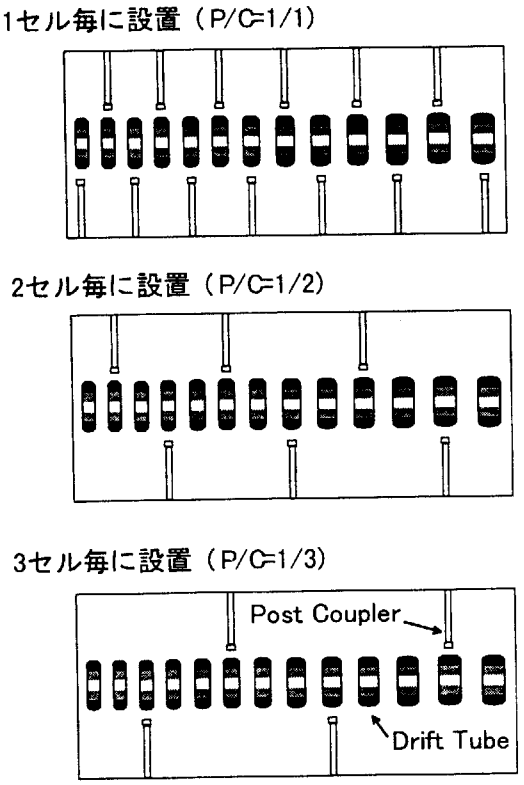


Fig. 3.2.3.4.9.3 ポストカプラの間隔

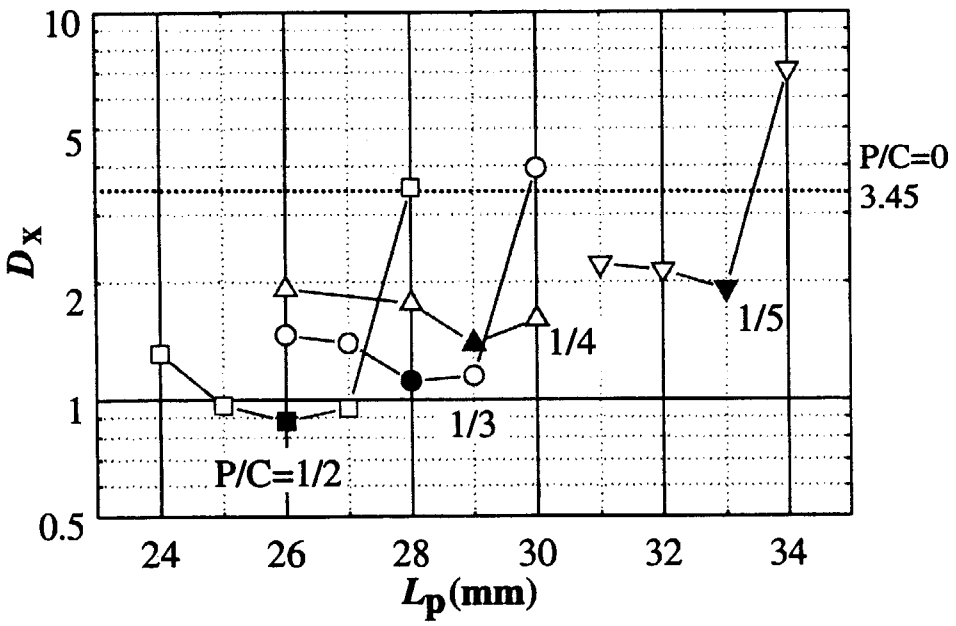


Fig. 3.2.3.4.9.4 各ポストカプラ間隔の挿入量特性

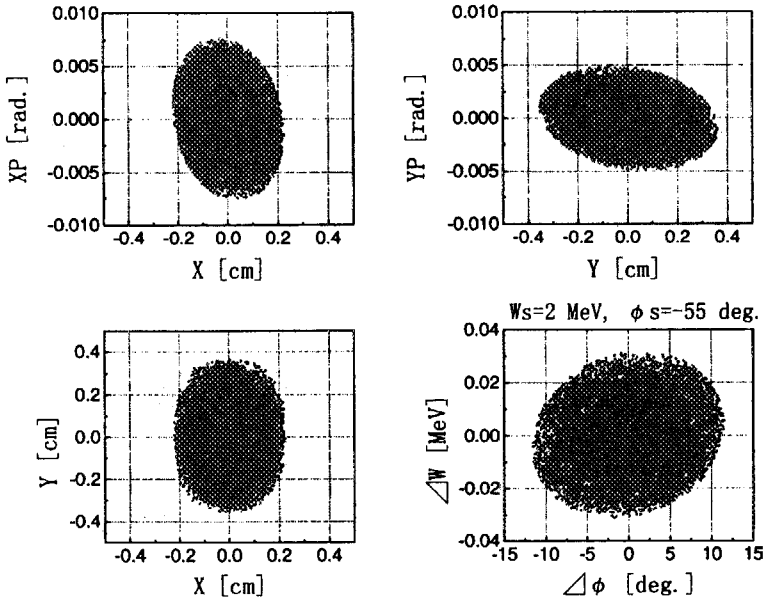


Fig. 3.2.3.5.1.1 入射粒子形状

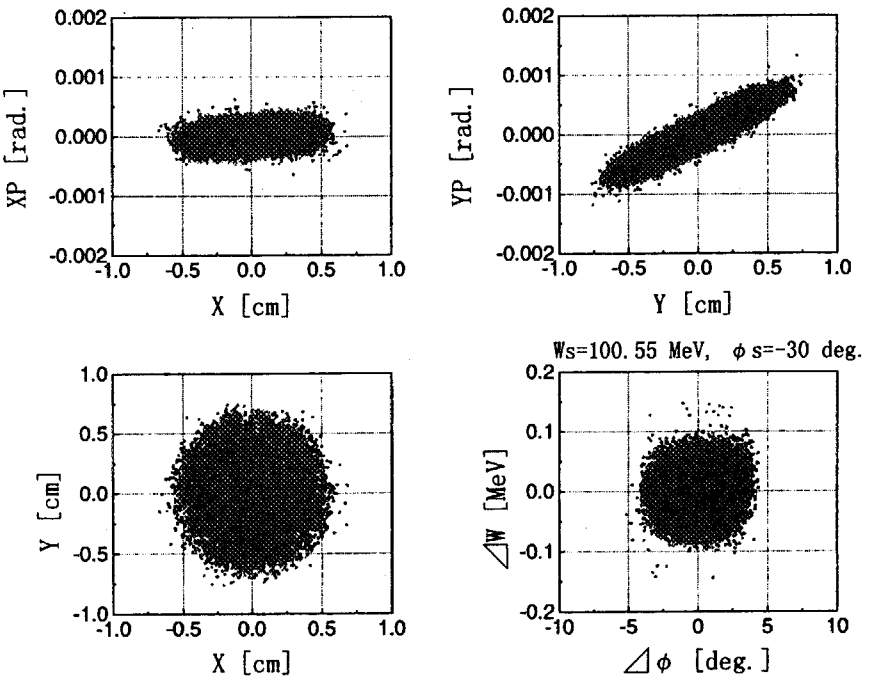


Fig. 3.2.3.5.2.1 DTL-SDTL 出口粒子形状

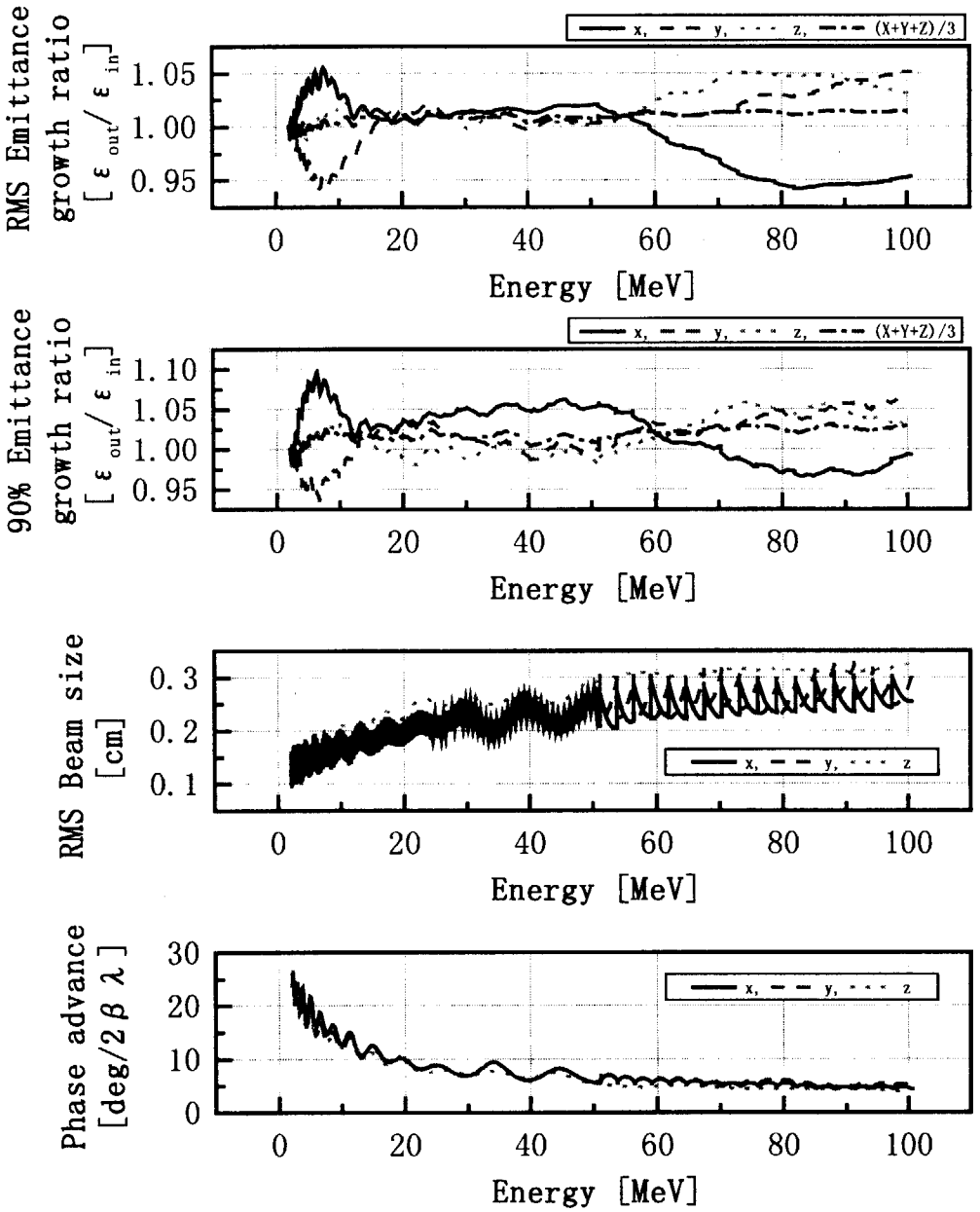


Fig. 3.2.3.5.2.2 DTL-SDTL シミュレーション結果

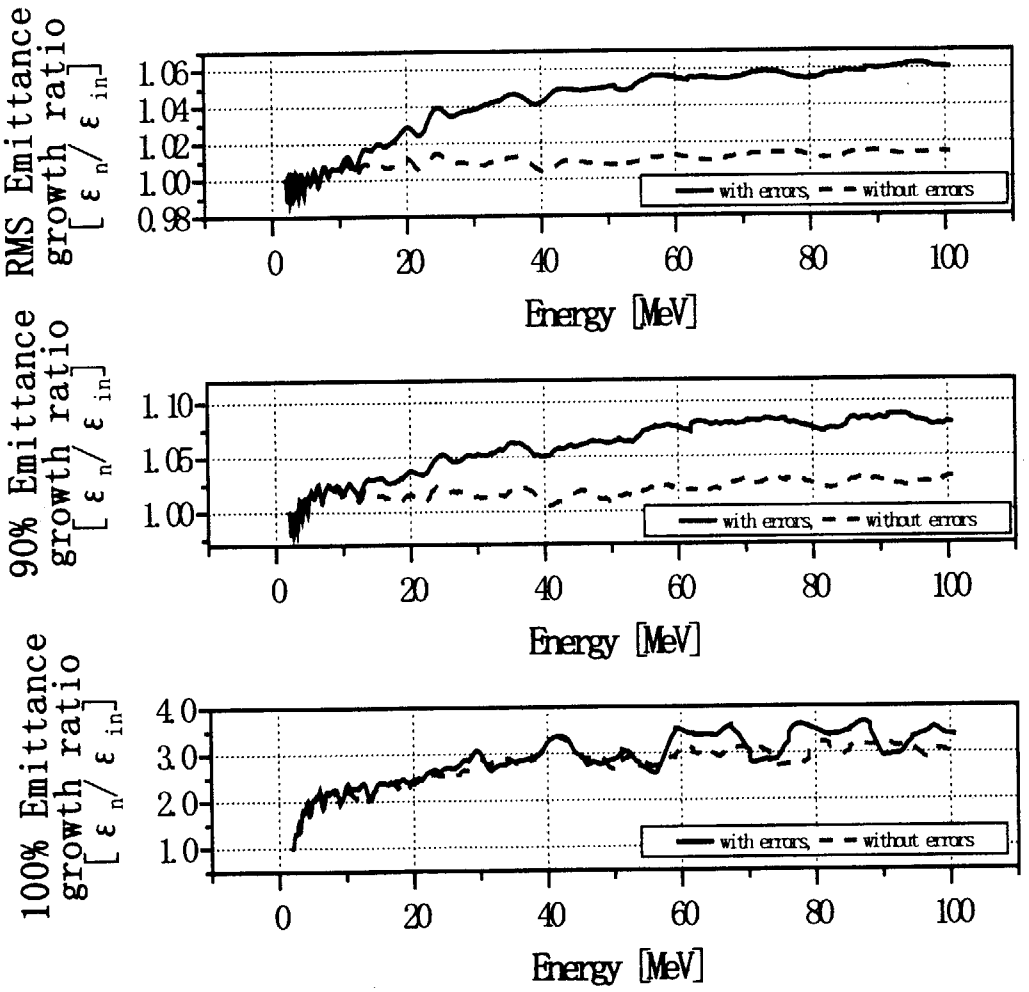
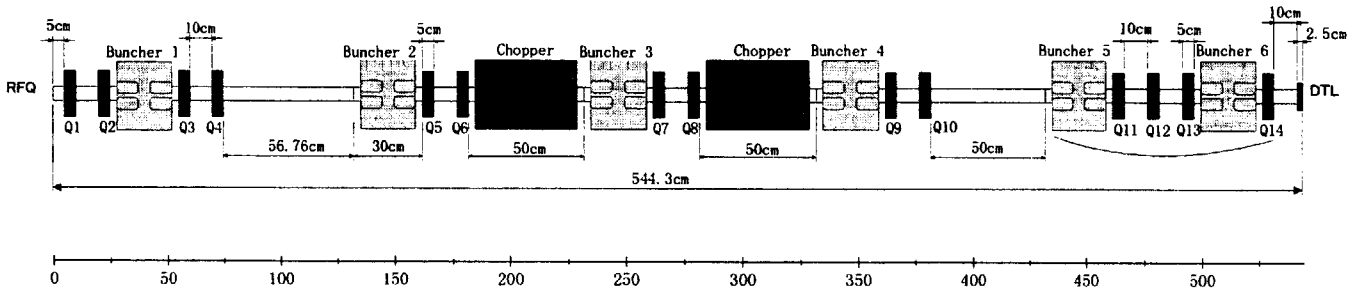


Fig. 3.2.3.5.5.1 誤差を含めた場合と誤差無しの場合のシミュレーション比較



Q-magnet No.	Gradient T/m	Length cm
1	53.787069	5
2	-32.867616	5
3	27.714025	5
4	-21.60443	5
5	23	5
6	-20	5
7	23	5

Q-magnet No.	Gradient T/m	Length cm
8	-20	5
9	23	5
10	-20	5
11	20.613158	5
12	-30.527227	5
13	26.494053	5
14	-27.813225	5

Buncher No.	Gap Volt. MV
1	0.13802336
2	0.1
3	0.1
4	0.1
5	0.10956373
6	0.15450718

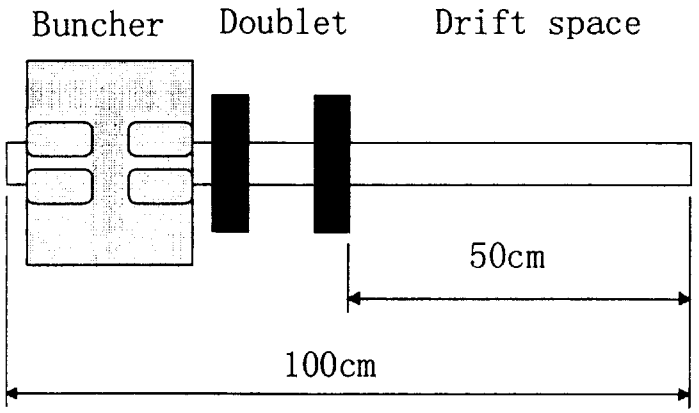


Fig. 3.2.3.6.1.1 ＭＥＢＴ構成図

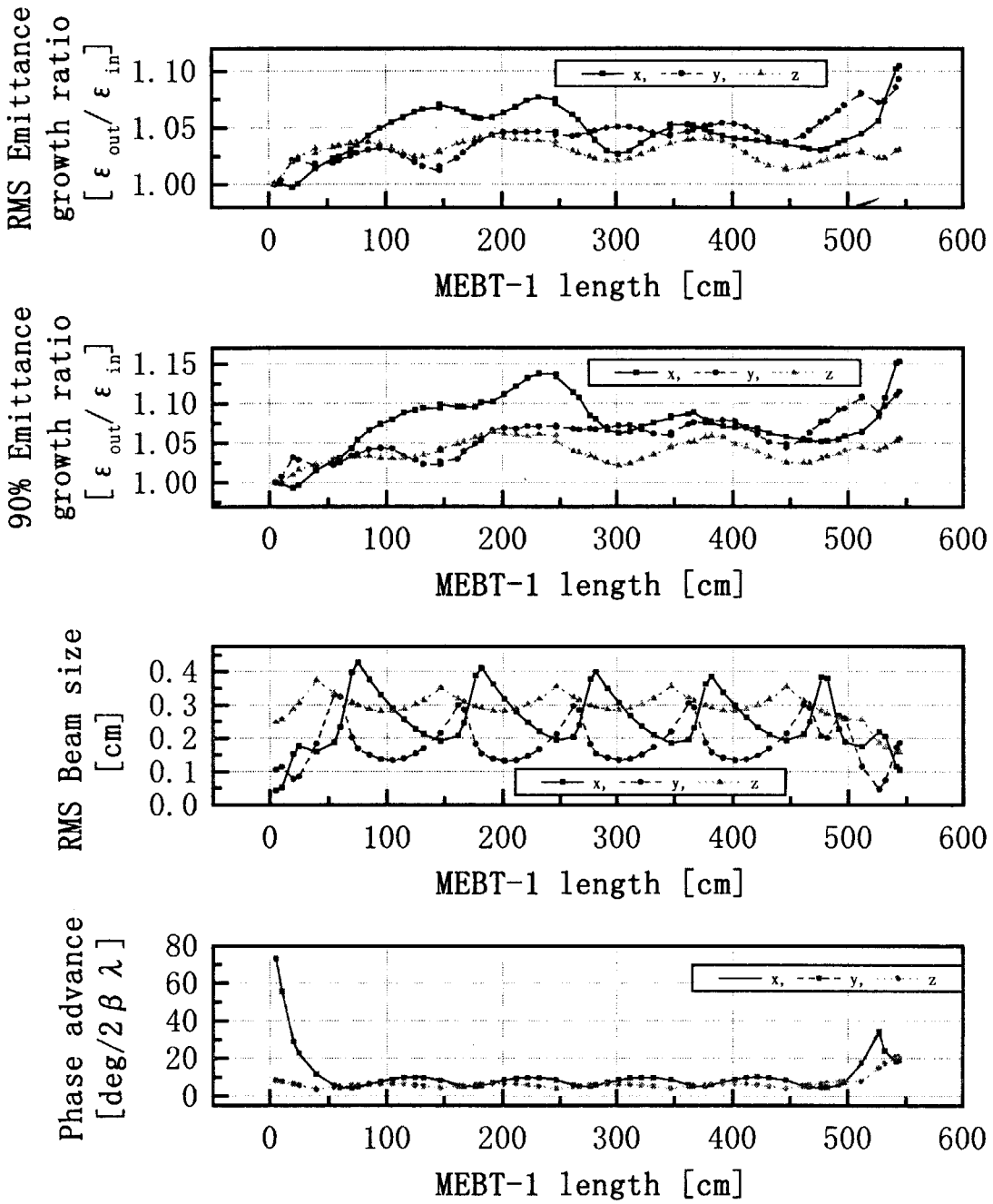


Fig. 3.2.3.6.1.2 MEBT-1 PARMILA シミュレーション結果

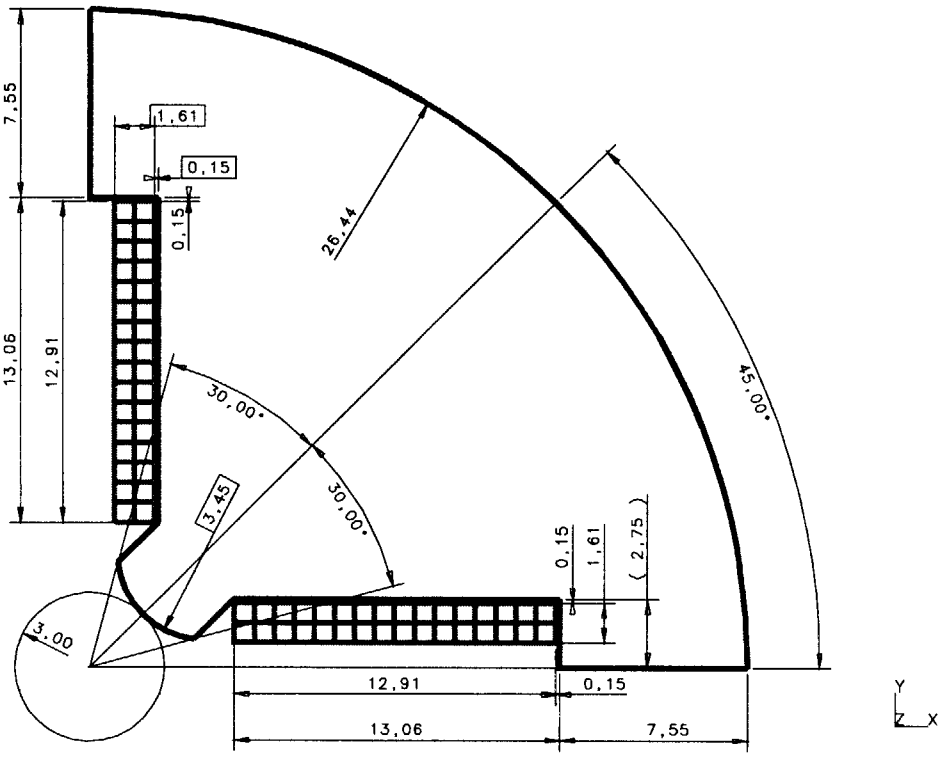


Fig. 3.2.3.6.1.4 MEBT-1 No.1 Q-magnet 設計

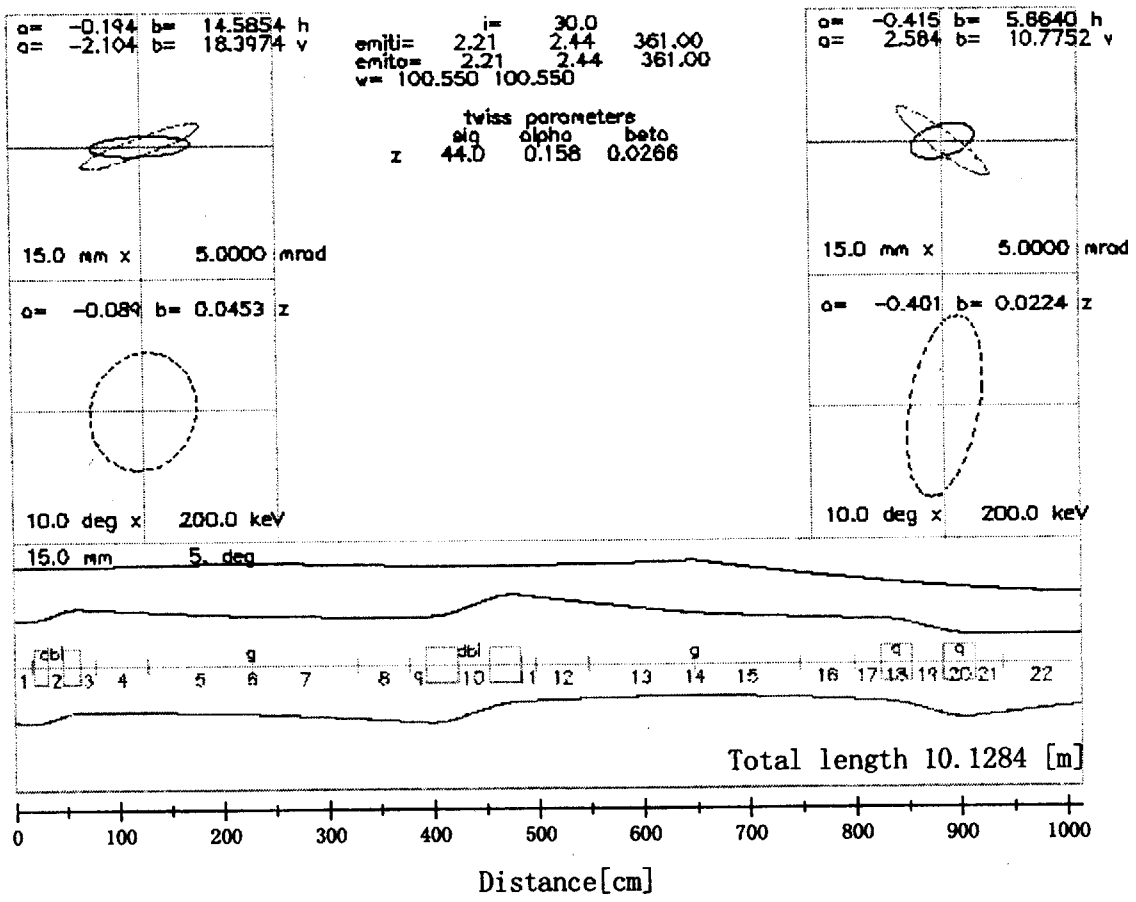


Fig. 3.2.3.6.2.1 MEBT-2 TRACE3D 計算結果

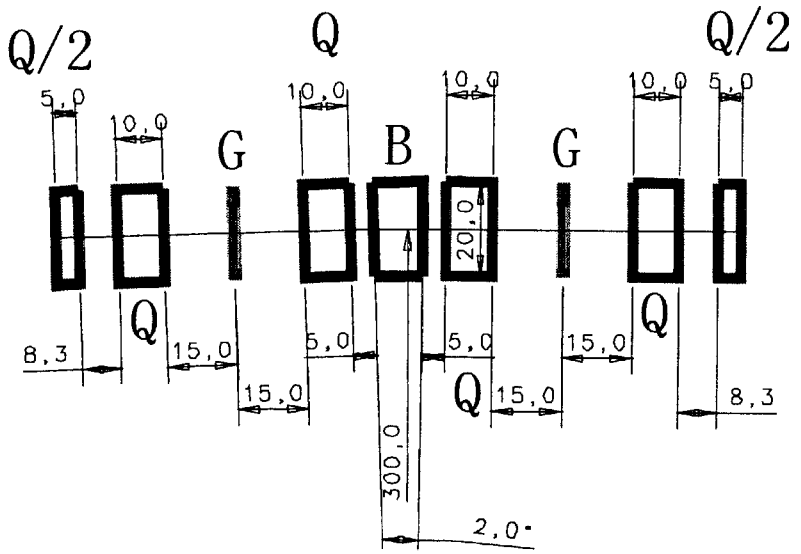


Fig. 3.2.3.6.3.1 Pulse-CW 合流部周期構造

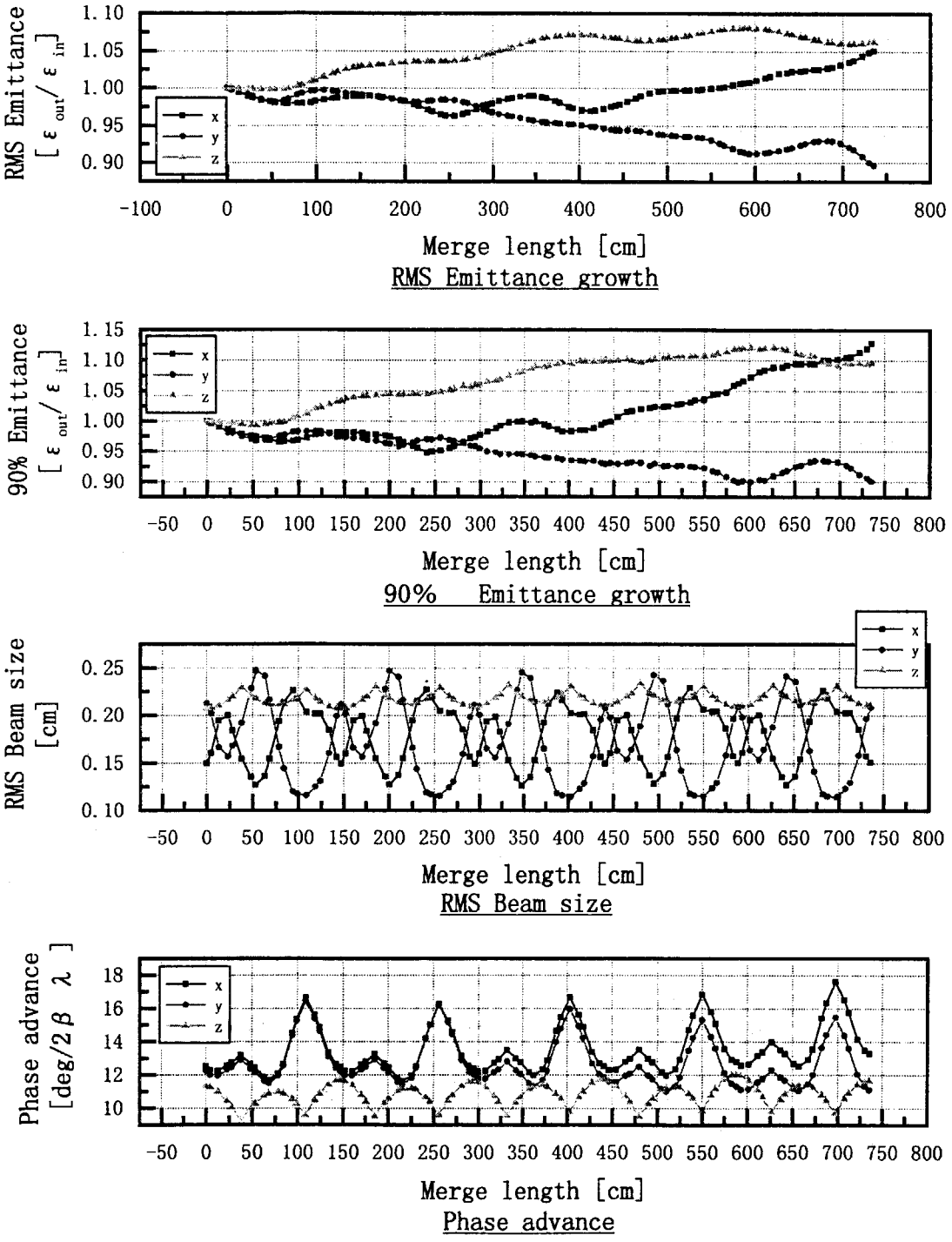


Fig.3.2.3.6.3.2 Pulse-CW 合流部 PARMILA シミュレーション結果

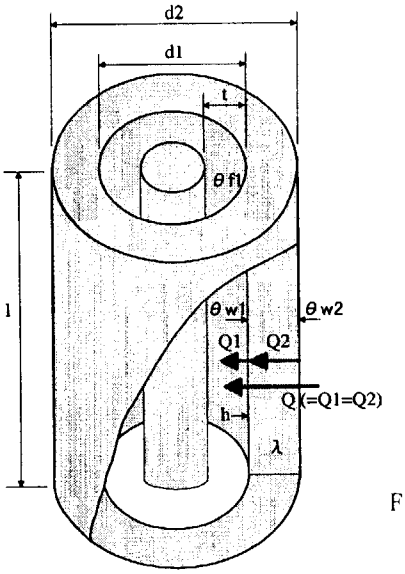


Fig. 3.2.3.7.1.1 円管モデル

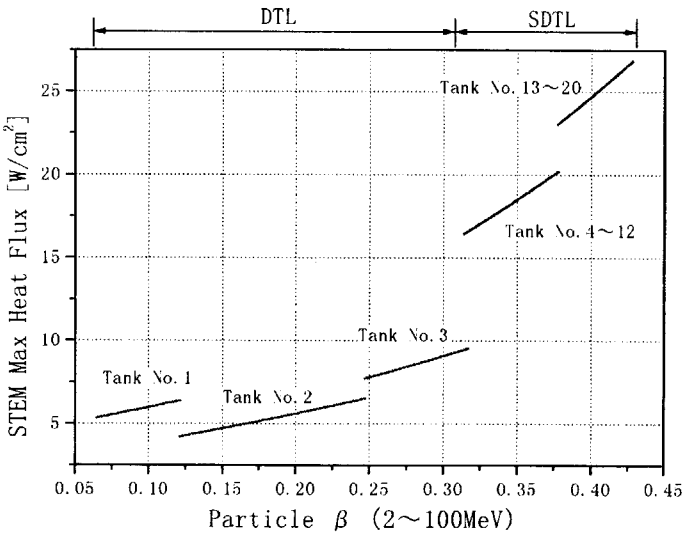


Fig. 3.2.3.7.1.2 各セルにおけるステム部最高発熱密度

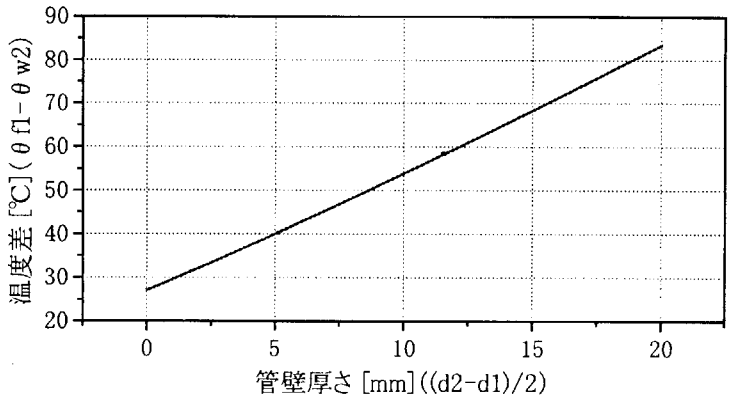


Fig. 3.2.3.7.1.3 ステム温度計算

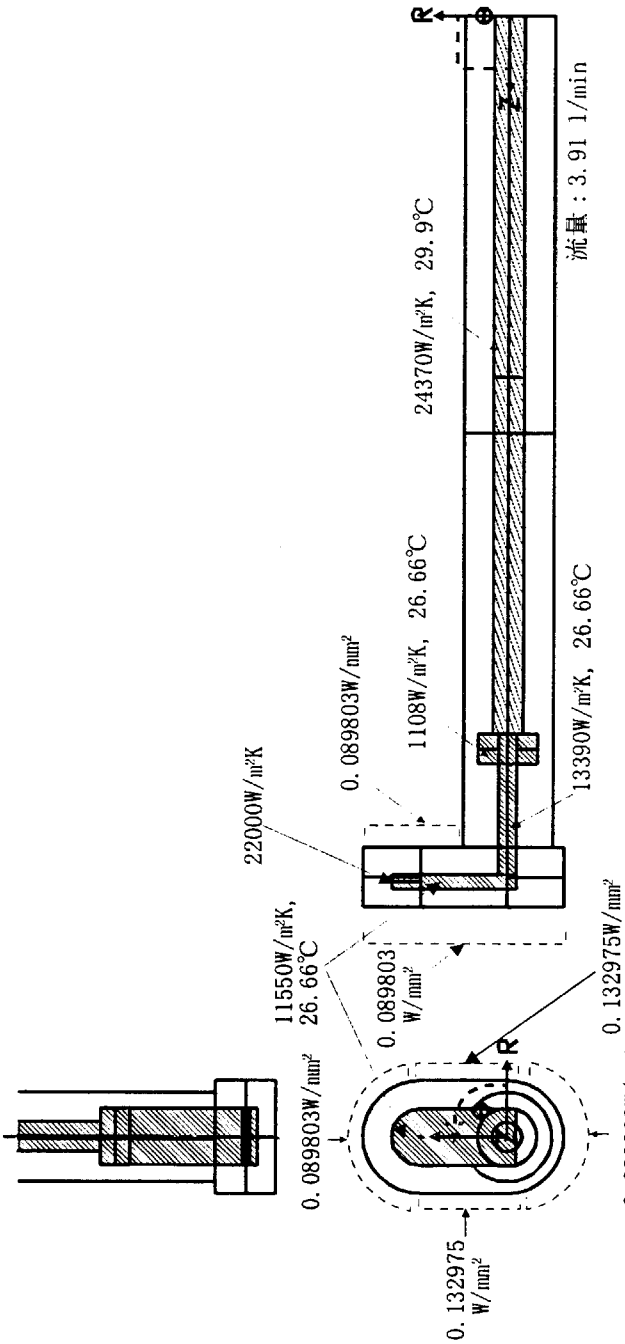


Fig.3.2.3.7.3.1 ポストカプラ熱計算モデル

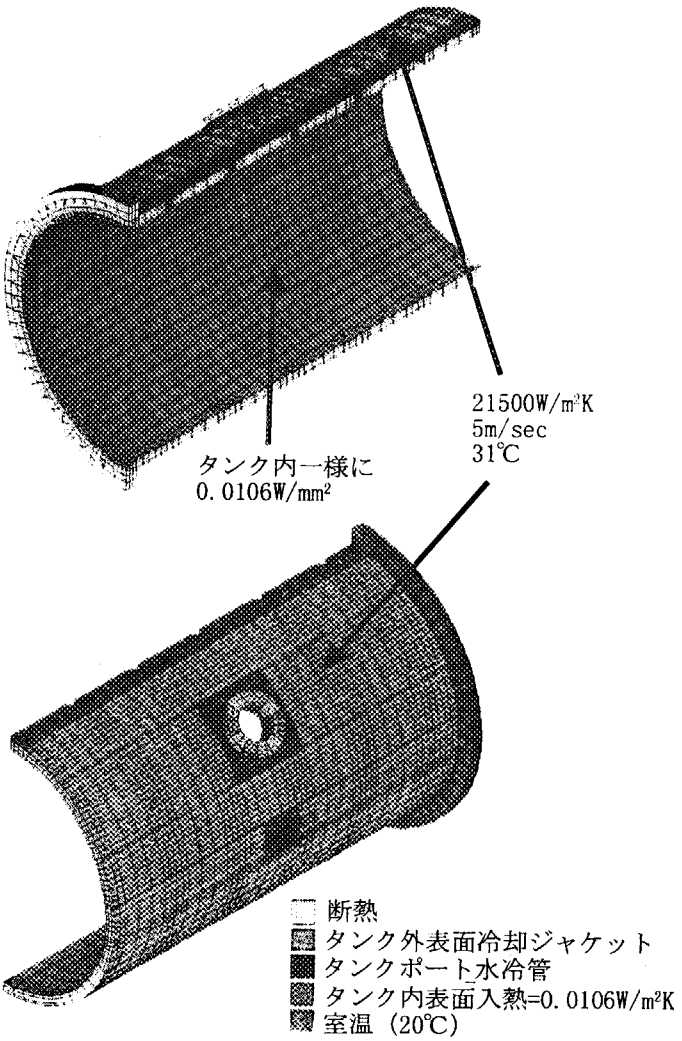


Fig. 3.2.3.7.4.1 タンク熱計算モデル

Table 3.2.3.2.1 DTL-SDTL 基本仕様

加速エネルギー	2～100MeV (350MHz の場合、3～100MeV)
加速周波数	200MHz (350MHz)
運転モード、加速電流	第１期 ・パルス運転 加速電流(ピーク値) 16.7mA (H^-) 繰り返し 50pps ビームパルス幅 2msec 中間パルスデューティ 60% 第２期 ・パルス運転 －１ (H^-の単独運転) H^-加速 加速電流(ピーク値) 30mA ビームパルス幅 3.7msec 繰り返し 50pps 中間パルスデューティ 60% ・パルス運転－２ (H^-と H^+の同時運転) H-加速 加速電流(ピーク値) 30mA ビームパルス幅 3.7msec H+加速 加速電流 (ピーク値) 30mA ビームパルス幅 2.2msec 繰り返し 50pps 中間パルスデューティ 60% ・CW 運転 加速電流 5.3mA(H^+)

Table 3.2.3.3.1 DTL-SDTL パラメータ

Parameters		DTL部	SDTL部	Total
入射/出射ｴﾈﾙｷﾞｰ	[MeV]	2/51	51/100	2/100
共振周波数	[MHz]	200	200	-
Tank 数		3	17	20
Total tank長 *1)	[m]	50.17	47.83	98.00
Total cell数 *2)		179	85	264
Wall loss (70%Q)	[MW]	2.60	2.92	5.52
RF源必要出力ピーク電力 (30mA)	[MW]	4.28	4.62	8.90
平均電場強度E0	[MV/m]	1.5	1.5	-
同期位相φs	[deg.]	-55 → -30	-30	-
収束系ﾗﾃｨｽ		FODO	Doublet	-
4極電磁石磁場勾配 (for 30mA)	[T/m]	50.8 - 4.97	8.47 - 7.85	-
実効ｼｬﾝﾄｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽ	[MΩ/m]	30.0 - 43.3	48.7 - 33.2	-
最大表面電場(kilpatrick)		0.90	1.2	-
DT (ﾄﾞﾘﾌﾄﾁｭｰﾌﾞ) 最大発熱密度	[W/cm^2]	4.85	13.84	-
STEM最大発熱密度	[W/cm^2]	9.54	26.85	-
RMS Emittance growth ratio *3)	[%]	1.2	0.4	1.6

*1) Drift spaceは含まない
*2) SDTL部は1tankあたり5cells
*3) (x方向+y方向+z方向)/3, 電流値30mA

Table 3.2.3.4.4.1 DTL-SDTL RF パワーの評価 (Fig.3.2.4-4-1 参照)

		cells	Energy in [MeV]	Energy out [MeV]	Energy gain [MeV]	Tank length [cm]	Wall loss for 100Q [MW]	Beam power for 30 mA [kW]	Requied RF peak power* [MW]	ZTT at last cell [MΩ/m]
DTL	TANK NO. 1	45	2.028	7.036	5.008	621.058	0.271	150.234	0.565	37.914
	TANK NO. 2	87	7.036	30.083	23.047	2399.153	0.824	691.405	1.962	36.655
	TANK NO. 3	47	30.083	51.144	21.062	1993.897	0.728	631.851	1.756	37.065
SDTL	TANK NO. 4	5	51.144	53.777	2.633	240.480	0.079	78.994	0.226	47.962
	TANK NO. 5	5	53.777	56.448	2.671	245.995	0.082	80.117	0.231	46.942
	TANK NO. 6	5	56.448	59.153	2.705	251.419	0.084	81.164	0.236	45.919
	TANK NO. 7	5	59.153	61.891	2.738	256.751	0.086	82.135	0.241	44.897
	TANK NO. 8	5	61.891	64.659	2.768	261.991	0.088	83.035	0.246	43.881
	TANK NO. 9	5	64.659	67.455	2.796	267.138	0.090	83.868	0.250	42.873
	TANK NO. 10	5	67.455	70.276	2.821	272.194	0.092	84.635	0.255	41.877
	TANK NO. 11	5	70.276	73.121	2.845	277.161	0.094	85.341	0.259	40.895
	TANK NO. 12	5	73.121	75.987	2.866	282.036	0.096	85.988	0.264	39.930
	TANK NO. 13	5	75.987	78.990	3.003	286.924	0.106	90.082	0.285	39.152
	TANK NO. 14	5	78.990	82.015	3.026	291.812	0.108	90.770	0.290	38.253
	TANK NO. 15	5	82.015	85.062	3.047	296.611	0.111	91.400	0.295	37.370
	TANK NO. 16	5	85.062	88.128	3.066	301.324	0.113	91.976	0.300	36.503
	TANK NO. 17	5	88.128	91.211	3.083	305.948	0.115	92.501	0.304	35.654
	TANK NO. 18	5	91.211	94.310	3.099	310.489	0.117	92.976	0.309	34.822
	TANK NO. 19	5	94.310	97.424	3.113	314.946	0.120	93.405	0.313	34.010
	TANK NO. 20	5	97.424	100.550	3.126	319.321	0.122	93.790	0.318	33.216

*:70%Q wall loss + end plate loss + beam power + cable loss

Table 3.2.3.4.4.2 SDTL タンク端板分の RF 電力の見積り

Tank4 (SDTL 最初のタンク)

SUPERFISH が計算した全 Wall loss (タンク+端板+DT+ステム)①	89.89kW
SUPERFISH が計算した端板の wall loss(上流+下流)②	13.08kW
端板の影響①/(①—②)	1.17 倍
PARMILA が端板の wall loss を考慮していないとした場合、PARMILA が出すべき値①—②	76.81kW
実際に PARMILA が出した値③	79.09kW
SUPERFISH と PARMILA の差③/(①—②)	1.03 倍

Tank20 (SDTL 最後のタンク)

SUPERFISH が計算した全 Wall loss (タンク+端板+DT+ステム)①	133.84kW
SUPERFISH が計算した端板の wall loss(上流+下流)②	15.76kW
端板の影響①/(①—②)	1.13 倍
PARMILA が端板の wall loss を考慮していないとした場合、PARMILA が出すべき値①—②	118.08kW
実際に PARMILA が出した値③	121.34kW
SUPERFISH と PARMILA の差③/(①—②)	1.03 倍

Table 3.2.3.4.5.1 DT の各部の説明

DIAMeter	DT形状とギャップ長と共振周波数が決まれば決まる。
G_OVER_Beta_lambda	各タンク最初のセルにおいてこのパラメータを振って最も高いZTTが得られるところを選ぶ。
CORNER_radius	このパラメータが大きければ大きい程、高いZTTが得られる。直接的にはFACE_angleとSTEM_diameterの値によって制限させる。ZTTへの影響はこのCORNER_radius よりもFACE_angleの方が大きいため、設計の際はまずFACE_angleの値を先に決める。
INNER_nose_radius	放電限界によって決まる。
OUTER_nose_radius	放電限界によって決まる。
FLAT_length	組立時のアライメント調整のために0.5cm必要。
FACE_angle	Q-magnetや冷却水路のためのスペースがあれば、大きく取れるだけ取った方が高いZTTが選られる。放電限界を決めるのはこのFACE_angleではなくINNER_nose_radiusとOUTER_nose_radiusである。
DRIFT_TUBE_Diameter	Q-magnetや冷却水路のためのスペースがあれば、より小さい方が高いZTTが選られる。
STEM_diameter	冷却水流量によって決まる。
BORE_radius	通過するビームサイズによって決まる。今回の検討ではRMSビームサイズの6倍以上を目標とした。

Table 3.2.3.4.8.1 チューナ必要本数

	Tank No.	Tank length [cm]	チューナ本数 (オート+半固定)
DTL	1	624.058	6
↓	2	2399.153	23
↓	3	1993.897	20
SDTL	4	240.48	3
↓	5	245.995	3
↓	6	251.419	3
↓	7	256.751	3
↓	8	261.991	3
↓	9	267.138	3
↓	10	272.194	3
↓	11	277.161	3
↓	12	282.036	3
↓	13	286.924	3
↓	14	291.812	3
↓	15	296.611	3
↓	16	301.324	3
↓	17	305.948	3
↓	18	310.489	3
↓	19	314.946	3
↓	20	319.321	3
	sum.	9799.648	100

3.2.4 超伝導リニアック

3.2.4.1 はじめに

中性子科学研究計画用加速器の高エネルギー加速部(0.1～1.5GeV)については、超伝導リニアックを第1のオプションとしており、その設計、開発を平成7年度よりKEKと共同で進めている。

加速器のシステム検討から、超伝導陽子リニアックは陽子エネルギーの違いに対応して、空胴サイズの異なる8個のセクションで構成し、最大表面電場強度(E_{peak})を16MV/m以下に設定した。このシステム検討に従って、8種類のβ値（β：陽子の速度と光速の比）の異なる超伝導空胴の設計検討を行った。また、超伝導空胴開発の一環として、テストスタンドの整備・改造を行うとともに、β=0.5用2台とβ=0.886用1台の超伝導単セル空胴を製作し、その縦測定（電磁場特性試験）を行った。なお、β=0.5とβ=0.886はそれぞれ陽子エネルギー145MeV、1100MeVに相当する。

ここでは、陽子加速器用超伝導加速空胴の設計、空胴開発の現状について報告する。

3.2.4.2 超伝導加速空胴の設計

3.2.4.2.1 超伝導陽子リニアックの概念

NSP用超伝導陽子リニアック(0.1～1.5GeV)ではβが0.43から0.92まで増加する。高加速効率と高品質ビーム(低エミッタンス)を実現するには空胴形状をβとともに連続的に変えることが望ましいが、実際には製作コスト等の問題があるので、リニアックを幾つかのセクションに分割して空胴形状を変化させる。

3.2.4.2.2 基本パラメータ

概念設計に先立って、超伝導リニアックの基本パラメータを決定した。KEKのTRISTANでの超伝導空胴の経験から［1］、空胴当たりのエネルギー増加、ビームにより誘起される高次モードの影響、RF入力カプラの許容パワー等を考慮して、空胴は5セルとした。クライオモジュール（加速ユニット)には2個の空胴を設置し、各空胴にはRF入力カプラを取り付ける。Fig.3.2.4.2-1の超伝導加速器構成図に示すように、ビーム集束用の四重極電磁石、ビーム診断系、真空排気系はモジュール間の室温部に設置する。また、冷凍負荷や空胴の安定な運転を考慮して、空胴内表面最大電場強度（E_{peak}）を16MV/mに設定した。

3.2.4.2.3 セクション分割

粒子のβ値と空胴の幾何学的なβ値($\beta_g=2L/\lambda$、L:空胴のセル長、λ:RF波長)の差により各セルにおける粒子の位相が変化する(位相スリップ)。その結果、加速効率が減少し、ビームの縦方

向エミッタンスが増大する影響が現れる。分割数が多ければ位相スリップが減少し高加速効率及び低エミッタンスを実現できるが、あまりに多くの分割ではモジュールが多種類となり製作・保守コストが増大する。分割数の最適化を図るために、5～９分割で構成されるシステムを比較した。Fig.3.2.4.2-2にセクション分割数を変化させたときの加速器長と空胴数の比較を示す。分割数の増加に伴い加速効率が増加し、加速器長及び空胴数が減少することが分かる。また、８分割以上では全てのβ値を変化させた場合に対応するリファレンスケースと同程度となる。また、ビームシミュレーションの結果、6分割以上では高品質ビームを得られることを確認した。以上の検討より、最終的に8分割を採用した［2］。

3.2.4.2.4　加速器構成

Fig.3.2.4.2-3に超伝導リニアックの基本パラメータをまとめる。加速器全体で空胴数284個、全長約690mとなる。第7、8の2セクションのみで加速エネルギーの約2/3を担い、全空胴数、全長の約半分を占める。これは、高エネルギー領域では相対論的効果によりβの増加が飽和し、分割数を少なくできるためである。

空胴材料としては高純度ニオブが用いられ、運転温度は4.4～4.5K(He-I)若しくは2K(He-II)が想定される。2Kの場合には表面抵抗が1桁以上低下するので熱侵入や冷凍機効率を考慮しても運転コストを低減できる。したがって、空胴の運転温度として２Kを選択した。ただし、この温度では超流動ヘリウムのコールドリークなどの対策に配慮する必要がある。

3.2.4.2.5　空胴形状の決定

SUPERFISHコードによるRF電磁場計算をもとに、超伝導空胴の形状を決定した。Fig.3.2.4.2-4に、ハーフセル形状の模式図を示す。設計の指針として、以下の項目をベースに設計を進めた。

（１）セル数を５とする。

（２）共振周波数 600MHz

（３）スロープ角度(α)及びアイリス部楕円半径　(r_1, r_2)は、空胴の幾何学的β(β_g)に対して線形に増加させる。

（４）アイリス半径(a)は、7.5cmとする。

（５）アイリス直線部(L_1)は、2mmとする。

（６）各セルの軸上電場分布を一定にするように、 エンドセルの赤道直線部(L_2')を調整する。その際に、L_2'は、2mm以上確保する。

設計手順は、まずセンターセルの赤道直線部(L_2)を適当に設定し、センターセルの周波数が600MHzになるように、赤道半径(b)及び赤道部円弧半径(r)を決定する。その後、5セル体系において平坦な電場分布が得られるようにL_2'を調整する。その際に、L_2'が2mm以下となる場合には、L_2を再設定し再設計を行う。

Fig.3.2.4.2-5及びTable 3.2.4.2-1に、本設計によって得られた空胴形状と電磁場計算コード

SUPERFISHによる電気力線、及び形状パラメターを示す。エンドセルの赤道直線部調整量(L_2-L_2')は、2.2～2.5mmであり、最終的にはすべてのβ_gについてL_2=5mmを採用した。

3.2.4.2.6 空胴のＲＦ特性

超伝導空胴の軸上電場分布の例として、Fig.3.2.4.2-6にβ_g=0.453空胴の電場分布(Ez、2.5セル体系)を示す。また、各セル中心での軸上電場分布ピーク値のばらつきをTable 3.2.4.2-2に示す。表に示されるように、2番目のセルの電場強度が若干低下する傾向が見られるが、すべての空胴に対して3%以内の電場分布平坦度が得られている。

Fig.3.2.4.2-7に、最大表面電場強度と加速電場強度の比(E_{peak}/E_{acc})を示す。E_{peak}/E_{acc}は空胴のβ_gだけでなく陽子のβにも依存する。これは、空胴のトランジットタイムファクタが陽子のβに依存するためである。図に示されるようにE_{peak}/E_{acc}はβに対してほぼ単調に減少しており、β=0.42で最大(約6.5)となり、β=0.92で最小(約2)となる。このE_{peak}/E_{acc}～2という値は、電子用超伝導加速空胴の値とほぼ等しい。また、超伝導陽子リニアックの概念設計では、所定の電場強度をE_{peak}～16MV/mと設定しており、その際に得られるE_{acc}の値もFig. 3.2.4.2-7に示す。今回の概念設計では、４個の空胴は１台のRF源により駆動されるとしているため、この４個の空胴については同一のE_{acc}値(したがって異なるE_{peak}値)を設定している。E_{peak}/E_{acc}が単調減少となっているのに伴い、E_{acc}は滑らかな短調増加関数となっている。これは、ビームダイナミックス上好ましいものである。

Fig.3.2.4.2-8に、最大表面磁場強度と加速電場強度の比(H_{peak}/E_{acc})を示す。E_{peak}/E_{acc}と同様にH_{peak}/E_{acc}もβに対してほぼ単調に減少している(最大値130 Oe/(MV/m)、最小値45 Oe/(MV/m))。また、所定の電場強度におけるH_{peak}の値も図中に示してある。H_{peak}値は300～370 Oeとほぼ一定の値となっており、このことはH_{peak}/E_{peak}の比がすべての空胴についてほぼ一定値となっていることを示唆するものである。

Fig.3.2.4.2-9に、パルス運転及びCW運転時の空胴当たりのRFビーム負荷を示す(パルス運転の場合にはピーク値)。空胴１個当たりにRF入力カプラ１本を想定しているので、このビーム負荷はカプラパワーに相当する。パルス運転(ピーク電流30mA、チョッピングファクタ60%)の場合には、最大ビーム負荷が約140kWとなる。最大ビームパワー(8MW)運転時のデューティは約30%であり、このビーム負荷はさほど大きな値ではない。また、CW運転時(ビーム電流5.33mA)には、ビーム負荷量は最大でも40kW程度であり、十分安定な運転が期待される。

パルス運転とCW運転でピークビーム電流が変化するために、RF入力カプラでのマッチングをとるためには結合度を各運転モードにおいて変化させる必要がある。Fig.3.2.4.2-10に、パルス運転(ピーク電流30mA)及びCW運転(5.33mA)時のRF入力カプラの外部Q値(Q_{in})を示す。パルス運転時には、Q_{in}は1～2×10^6であるのに対して、CW運転時には3～7.5×10^6となる。したがって、RF入力カプラとしては、最低でも４倍程度の結合度の調整範囲を有するアジャスタブルカプラとする必要がある。さらに低ビーム電流での運転を無反射の状態で行うためには、結合度調整範囲を大きくする必要がある。

RF入力カプラの結合度を各運転モードで変化させることにより、空胴の負荷Q値が変化し、し

たがって空胴のバンド幅も変化する。Fig.3.2.4.2-11にパルス運転(ピーク電流30mA)及びCW運転(5.33mA)における空胴のバンド幅を示す。パルス運転時には負荷Q値が小さいためにバンド幅は240～500Hz程度と比較的広くなるが、CW運転時には80～150Hzとかなり狭くなることが分かる。空胴のバンド幅は、RF制御の観点から非常に重要であるが、CW運転時には定常的な運転となるのでバンド幅が狭いことはさほど問題とはならない。むしろ、パルス運転時において、ローレンツ力による共振周波数の変化や、パルス状のビーム負荷に対する空胴内電場強度や位相の変動が大きな問題となる。

Fig.3.2.4.2-12に、空胴のR/Q値(R:実効シャントインピーダンス、Q:無負荷Q値)及び空胴の形状因子($\Gamma=R_sQ$、R_s:表面抵抗)を示す。R/Q値は粒子のβに大きく依存し、β=0.43では約40Ω/cavityであるのに対して、β=0.92では約470Ω/cavityとなる。Γは空胴形状(β_g)のみに依存し、β_g=0.453では約120Ω、β_g=0.886では約240Ωとなり、ほぼ線形に増加する。

Fig.3.2.4.2-13に、空胴のRF壁損失を示す。空胴の運転温度は2K、表面抵抗は15nΩを想定している。空胴のRF壁損失はβとともに増加し、β_g=0.453では5.5W/cavity、β_g=0.886では10.5W/cavityとなる。これらの壁損失は全体で2.4kWとなる。現在の概念検討では2種類の熱シールド(4～20K及び80K)を想定している。2Kの冷凍機負荷としては、RF損失(2.4kW)、熱侵入(0.5kW)及び輸送損失(0.5kW)を見積もっている。また、4～20Kシールドの負荷としては、熱侵入(3kW)、輸送損失(3.6kW)を見積もっている。これらはヘリウム冷凍機の負荷となるが、そのAC電力としては5.4MW程度となる。

3.2.4.2.7　空胴の機械的特性

空胴の機械的特性については、真空荷重に対する変形・強度、ローレンツ力による空胴の周波数変化及び機械的な振動の解析が重要である。

Fig.3.2.4.2-14に、真空荷重による空胴の最大Von Mises応力の計算例を示す。計算は5セル体系で、種々の条件の下で行っている(空胴両端の拘束条件(自由・固定)や、空胴の壁厚(3mm、4mm)、補強構造(Stiffener)の有無)。空胴の壁厚3mmで拘束なし(図中の■)の場合には、最大120MPa以上の応力がかかるが、両端を拘束すると(図中の□)応力は半分以下まで低下する。また、空胴の壁厚を4mmに増加させると(図中の▲、△)、3mmの場合と比較して応力は約2/3に低下する。空胴に補強構造を施した場合には(図中の○)、応力は約半分に低下する。高純度ニオブ材の耐力は40MPa程度と想定されるので、β_g<0.6の空胴に対しては、両端を拘束したとしても4mmの壁厚か補強構造が必要であることがわかる。

Fig.3.2.4.2-15に、空胴を所定の電場強度まで励振した場合のローレンツ力による共振周波数変化量の計算値を示す。計算は半セル体系で行っている。図中には、空胴のバンド幅(パルス運転、ピーク電流5.33mA)も併せて示す。空胴の壁厚3mmで補強構造なしの場合(図中●)には、β_g=0.453において共振周波数変化は約360Hzで空胴のバンド幅を上回る。これに対して、空胴に補強構造を施すと周波数変化は2/3以下にまで低下する。ここで、空胴の補強構造は真空荷重に対して最適化されているため、ローレンツ力に対して最適化を行えばより一層の周波数変化の低減が期待される。しかしながら、パルス励振の場合には、後述する機械的振動が誘起されること

が予想され、したがってパルス励振を想定したダイナミックな解析が必要である。現在、パルス励振に関する動的解析を進めている。

Table 3.2.4.2-3に、空胴の機械的固有振動周波数の計算例を示す。ここでの計算体系は、β_g=0.5、0.7、0.92に対するもので、Table 3.2.4.2-1に示す空胴形状とは必ずしも一致していないが、一般的な傾向は現れている。表中に示されるように、空胴のセル数を増加させると、軸方向及び横方向のモードともに周波数が低下することがわかる。また、空胴のβ_gに依らずに、補強構造がない場合には最低の周波数は横方向のモードで、50Hz近傍にあることがわかる。ローレンツ力は基本的には軸対称に作用するが、空胴の歪みや重力の影響で50Hzのパルス励振により横方向の振動が励振されることが予想される。したがって、補強構造のない空胴に関しては、空胴を横方向に拘束して横方向の振動をダンピングする必要があると思われる。

3.2.4.3 超伝導加速空胴の開発

3.2.4.3.1 開発の目標

空胴開発の目標として(1).安定加速電界性能の確保、(2).機械的荷重に耐える構造、(3).製作手法の確立を掲げ、更に運転コストの検討の中で、空胴の運転温度を2Kとする。空胴のセル数は前節で記述したように加速効率および単位空胴当たりの必要RF電力とカプラー給電能力のバランスから５連セルと定めた。空胴開発の手順として、まず、単セル空胴の試作と性能評価を行い、その後実機に近い５連セル空胴の試作・試験を行い、順次、カプラー付きの空胴試験に移行し、最終的にはクライオモジュールに組み込んだ加速空胴により、必要な各性能、制御手法の確認と量産化する時のための組立・調整手法の確立を目指している。

これまでにKEKトリスタンの経験［3］を基に空胴形状の検討、空胴構造強度の検討、ビームダイナミクスの検討等を行うと共に単セル空胴の製作と性能評価試験を行って来た。本節ではこれらの現状報告として空胴試験で得られた性能と５連セル空胴試験のための機器整備状況について述べる［4］。

3.2.4.3.2 空胴試験用テストスタンドの整備

試作した空胴の性能を試験するには、空胴を液体ヘリウム温度以下に冷却し、空胴にRFパワーを入力して、Q値、表面抵抗、表面電場強度等の測定を行う必要がある。これらの試験を行うことを目的として、600MHz超伝導空胴試験用テストスタンドの整備を行った。テストスタンドは、(1)空胴組立用クリーンルーム、(2)高圧水洗浄システム、(3)超高真空排気システム、(4)クライオスタット、(5)データ収集システムに大別される。製作及び表面処理の完了した空胴は、高圧水洗浄システムにより最終洗浄され、クリーンルーム内でRF入力カプラ、フランジ等の組立が行われる。その後、超高真空排気システムにより真空排気され、クライオスタットに据え付けられた後に冷却および測定が行われる。以下に、各システムの概要及び性能を示す。

3.2.4.3.2.1　空胴組立用クリーンルーム

空胴組立用クリーンルームは、約5.9mx8mの大きさとなっており、内部は4つのセクションに分割されている。クラス10エリアでは、最終洗浄後の空胴開封作業、RFカプラ、フランジ類の組立を行う。また、2つのクラス100エリアは、それぞれ組み立て作業準備室、及び高圧洗浄室となっている。クリーンルーム入り口部分はクラス10000エリアとなっており、空胴の真空排気及びクラス10/100エリアへの入室準備室である。

クラス10エリアでは、空胴の開封作業を行うので、最も良い清浄度が要求される。パーティクルカウンターにより無人状態でのクラス10エリアのダストの測定をした結果、粒径0.5μm以上のダストについては5p/ft^{3}以下、0.3μm以上のダストについては10p/ft^{3}以上であり、良好な清浄度を有していることを確認した。

3.2.4.3.2.2　高圧洗浄装置

高圧洗浄装置本体はクリーンルーム内クラス100エリアに設置しており、洗浄／組立野市連の工程はクリーンルーム内で行うことが可能である。一方、高圧ポンプはダイアフラム式で8～9Mpaの水圧まで加圧する。超純水製造装置は90l/hの製造能力を有し、約半日で高圧水洗浄に必要な超純水（～1.2m^3）を製造する。超純水の抵抗値は18MΩ/cm以上であり、TOC（Total Organic Carbon）は典型的な値で約100μg/lであった。

KEKでは、Lバンド（1.3GHz）超伝導空胴の開発を行っており、KEKにおいて測定された空胴を本高圧洗浄装置で洗浄した後、KEKにおいて再度真空排気及び測定をした結果、Fig.3.2.4.3-1に示すように、KEKでの測定結果を再現した。なお、この図の縦軸は後述するように空胴に供給するRFパワーを変化させ、加速電場の値を変えたときのQ値を示す。この測定結果から、本洗浄装置はKEKの装置と同様に良好な性能を有していることが確認された。

また、現状の超純水高圧洗浄装置は単セル用のストローク(610mm)であり、これを全ての５連セル空胴の洗浄に対応できるストローク(1,700mm)とするために、装置を収納しているクリーンルームの改造と併せて1998年に高圧水洗浄装置の全面改造した。

3.2.4.3.2.3　超高真空排気システム

真空排気用の超高真空排気システムは、ターボ分子ポンプ（排気速度500l/sec）、イオンスパッターポンプ（排気速度200l/sec）および、フォアラインポンプにより構成される。また、大気開放のための高純度窒素ガス導入ラインには0.01μmのフィルターを設け、ダストの侵入を防いでいる。

システム単体での到達真空度は約5x10^{-11}Torr、600MHz超伝導空胴を真空排気した場合の真空度は約1x10^{-9}Torrであった。当初、フォアラインポンプとしてスクロールポンプを採用し、完全オイルフリーを実現していた。しかしながら、スクロールポンプは清浄直後の濡れた空胴の排気には不適であったため、現在はロータリーポンプを使用している。

3.2.4.3.2.4 クライオスタット

装置は、床下にピットを掘り、縦型のクライオスタットが埋め込まれている。クライオスタットの構造は、外側からSUSの真空槽、磁気シールド、スーパーインシュレーター、液体ヘリウム槽となっている。空胴は上部天板から、吊り下げられる構造になっている。本クライオスタットの特長は、ヘリウム槽全FRP製とすることにより熱侵入を低減していることである。ヘリウム槽の全長は3.5mとなっており、4～5セル程度のマルチセルにも充分対応可能な大きさである。また、ヘリウム槽は3000l/minの真空排気ポンプ（メカニカルブースターポンプ+ロータリーポンプ）に接続されており、減圧することにより2Kでの測定を可能としている。

超伝導材料の残留抵抗を低減するための磁気シールドは、特に2Kでの測定では重要である。室温においてクライオスタット内の残留抵抗を測定した結果、空胴がセットされている位置での磁場強度は10mGauss以下となり、良好な特性を有していることを確認した。また、4.2K冷却時の液体ヘリウム蒸発量から推定した熱侵入量は2.2.Wであり、非常に良好な断熱性能を有していることを確認した。さらに、ヘリウム槽を6時間40分排気することにより、最終的な到達温度1.9Kを達成した。

3.2.4.3.2.5 データ収集システム

データ収集システムは、RF系、RF入力カプラ制御装置、極低温温度計、液体ヘリウム液面計、ヘリウム槽圧力計で構成される。RF系は、PLL（Phase Locked Loop）回路による安定化を図っており、トランジスターにより300W（600MHz）のRFを出力する。測定時には、NI社製Lab Viewソフトウェアーによるデータ収集を行い、高速で効率的な測定を行っている。

3.2.4.3.2.6 熱処理用高真空炉

空胴表面処理の電解研磨工程の際に空胴ニオブ材へ吸蔵される水素を熱処理脱ガスするために高真空炉を整備した。装置の概略図をFig.3.2.4.3-2に示す。本装置は$8\beta_g$グループの全ての５連セル空胴の熱処理を可能とするためにワークエリアは 850W x 850H x 1800L と大きめに設定し、真空排気系には全オイルフリー排気システムを用いた。Fig.3.2.4.3-3にβ=0.5空胴を熱処理した際の温度、真空度の時間依存性を示す。空胴の熱処理を行った時の条件は室温の時の到達真空度が1x10-7 Torr、室温から750。Cまでの昇温に２時間かけ、750 Cで３時間連続の脱ガスの後ヒーターを切り、約24時間の冷却時間を置き、空胴周辺温度が70 C以下となってから乾燥窒素ガスを導入し、大気圧に戻してから空胴を取り出している。残留ガス分析装置の主要ガス時間分析結果からは室温から昇温途中の炉内圧力は水(Mass=18)に支配されているが、炉内温度が600。Cを超える段階からはニオブからの放出水素ガス(Mass=2)により支配され、約30分から40分間ほど水素ガス放出が継続し（圧力：～$3x10^{-5}$ Torr）、その後、炉内圧力は～$2x10^{-6}$ Torrへ低下する。炉内の温度分布はワークエリア中心軸上の中央と端部間で±3 C程度であり、５連セルの等温加熱が可能である。

3.2.4.3.3 単セル空胴の製作と試験

空胴開発の第１ステップとして単セル空胴の試作と性能評価試験を行っている［5］。低β側の空胴（β=0.5）は、その形状が扁平なため電子マルチパクティングが懸念されており、空胴内電界放出電子による電界制限レベルの確認と併せて設計仕様である最大表面電界（Epeak）：16MV/mの安定達成が目標である。新たに製作した高β側の空胴（β=0.89）はNSP加速器の中で最多数となるβgグループの空胴であり、加速空胴性能と製作工程の確認を主目的として空胴試験を実施した。

空胴は高純度ニオブ板の成形加工により製作した。二種類の空胴とも製作工程の大部分はKEKの工作センターで実施した。3mm厚のニオブ板を500 tonプレス機の深絞り加工でハーフセルに成形し、電子ビーム溶接でセル赤道部、ビームパイプ、フランジを溶接して、所定の形状に仕上げた。その後の粗研磨、電解研磨を野村鍍金(株)で行い、その際に空胴ニオブ材へ吸蔵される水素を真空炉で熱処理・脱ガスした後、高圧水洗浄を施して直ちに真空・RF系を組み立て、縦測定クライオスタットにてRF特性測定を行った。

3.2.4.3.3.1 β=0.5単セル空胴の再試験

低β側の性能確認のためβ=0.5単セル空胴は２個製作し、１号機をJ5001、２号機をJ5002と名付けRF特性測定を行った。β=0.5単セル空胴の断面形状の図をFig.3.2.4.3-4aに写真をFig.3.2.4.3-4bに示す。β=0.5単セル空胴(J5001)のRF特性測定結果をFig.3.2.4.3-5に空胴のQ値と･Epeakの関係として示す。J5001空胴では粗研磨（バレル研磨）を約51μm削り、初回の電解研磨（研磨厚：23μm）後に得られたEpeakMAXはLHe温度2Kに於いて25MV/m程度であったが、その後の再度の電解研磨（追加研磨厚：33μm）により30MV/mを達成し、Epeak～16MV/mの実用加速電界領域におけるQ値は2.2×10^{10}であった。この時の電界上限を決めたのは電界放出であった。

J5002空胴は粗研磨厚を約96μmと厚く削り、電解研磨厚を33μmとした後の第１回目の測定で･EpeakMAX=44MV/mを達成した。この時の実用加速電界領域におけるQ値は2.9×10^{10}であった。この空胴を大気中（クリーンルーム内）で半年間保管した後、高圧水洗浄のみの表面処理で実施した第２回目の測定でQ値は1×10^{10}に低下した。これらの測定結果をFig.3.2.4.3-6に示す。観測されたQ値低下の原因は空胴表面の酸化等による劣化と考えられるが、表面抵抗温度依存性の測定結果から求められた残留抵抗値の変化に現れている。しかしながら、Q値の低下に関わらずEpeakMAXは44MV/mを再現し、設計仕様である16MV/mに対する十分な余裕度を示した。

3.2.4.3.3.2 β=0.886の単セル空胴の製作と試験

８つのβ_gで最もエネルギーが高いグループの空胴について、低β側J5002空胴と同様の製作・表面処理手法にて単セル空胴を試作しRF特性測定を行った。製作したβ=0.886単セル空胴の断面形状をFig.3.2.4.3-7に示す。球形に近くなる形状効果によりβ=0.5空胴よりも高いQ値が得られ、EpeakMAXはLHe温度4.2Kに於いて26MV/mを得た。この値はRF測定系の通過出力上限で制限されたものであり、空胴そのもののクエンチではない。2K環境での測定は実験系の不調により通常の測

定は中断したため、再測定の予定である。但し、実験途中で打切ったが、LHe減圧中の中間的な温度：3Kに於いてのRF特性測定結果からは、Epeak=36MV/mまで電界放出無しで安定に到達しており、空胴本体性能は良好である。β=0.889の空胴の測定結果をFig.3.2.4.3-8に示す。

以上のJ5001, J5002, J8901 三空胴の実験結果からは低β側および高β側それぞれの単セル空胴の製作、表面処理に至る一連の手法の妥当性が実証されたと云える。

3.2.4.3.3.3 β=0.5の５連セル空胴の製作

開発の第２ステップとして５連セル空胴を試作し、単セル空胴試験で得られた性能との比較および５連セル空胴取扱の問題点の摘出を図る。このために５連セル空胴の設計検討・製作と試験用設備の対応について整備を進めている。

扁平形状で構造的に弱い低β側空胴の試験のためにβ=0.5の５連セル空胴の試作を開始した。設計した空胴の断面形状をFig.3.2.4.3-9に示す。５セル中の両端のセルのみセル長を短くし、各セル間の電場分布の平均化を図っている。これまでに3mm厚の銅板を用いたモデル空胴を製作し、加工技術上のシミュレーションと後述のプリチューニング装置を用いた５連セル空胴のチューニング手法確立を目指している。更に並行して新たに製作したニオブ製空胴でプリチューニングを実施しており、今後引きつづき表面処理、縦測定を予定している。

3.2.4.3.3.4 ５連セル空胴用プリチューニング装置の製作

多セル空胴の製作誤差による共振周波数のズレや、電場分布の不均一性を補正するためにプリチューニング装置が必要である。NSP加速器・超伝導加速部の8β_gグループの全ての５連セル空胴についてプリチューニングが施せるよう、空胴全長および各セル長サイズに適合するプリチューニング装置を製作した。装置は空胴水平据え置き型で、２枚の「固定アーム」とパルスモータ駆動の１枚の「可動アーム」によりセル１段毎の伸縮を行うようにしている。「アーム」は空胴の立体形状にフィットするよう加工してあるため、異なるβ_gグループの多セル空胴をチューニングする際は「アーム」を交換して対応する。チューニングは本体に付設したビーズ走行装置との組合せによりRF情報をフィードバックし、作業の効率化を図るようにした。

3.2.4.4 まとめ

NSP用超伝導陽子加速器について、高加速効率、低ビームロスを目指した加速器システムの概念設計を進めた。また、超伝導空胴開発として、電子用空胴の技術をベースに単セル空胴の試作・試験を行い、設計仕様を十分に満足する性能を得た。今後、加速器要素(加速モジュール、RF入力カプラ、ヘリウム冷凍機、RFシステム等)の詳細設計を進めると共に、5セル空胴及び加速モジュールの試作・試験により実機相当の空胴性能を実証する予定である。

参考文献

[1] S. Noguchi; "Experiences on Superconducting RF System in TRISTAN", Particle Accelerators, 1996, Vol.54, p325-336

[2] K. Hasegawa et al.; "System Design of a Proton Linac for the Neutron Science Project at JAERI", to be published in J. of Nucl. Sci. and Tech., 1999

[3] K. Saito et al.; "R&D of Superconducting Cavities at KEK", Proc. of the 4th Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan, p635, 1990

[4] J. Kusano et al.; "Development of Superconducting Single-Cell Cavity for a Proton Linac in the Neutron Science Project at JAERI", Proc. of 6th European Particle Accelerator Conference, Stockholm, 1998

[5] N. Ouchi et al.; "Design and Development Work for A Superconducting Proton Linac at JAERI", Proc. of the 8th Workshop on RF Superconductivity, Italy, 1997

Table 3.2.4.2-1 5セル超伝導空胴形状パラメータ

β_g	b(cm)	r (cm)	L(cm)	L'(cm)	L_2(cm)	L_2'(cm)	α(°)	$r_1 \times r_2$
0.453	22.80	2.45	5.66	5.44	0.5	0.28	5.24	1.58 × 3.17
0.499	22.69	2.86	6.23	6.00	0.5	0.27	5.70	1.75 × 3.49
0.549	22.59	3.31	6.86	6.61	0.5	0.25	6.21	1.92 × 3.84
0.604	22.51	3.83	7.54	7.29	0.5	0.25	6.80	2.10 × 4.20
0.666	22.42	4.44	8.32	8.07	0.5	0.25	7.40	2.30 × 4.60
0.732	22.37	5.03	9.14	8.88	0.5	0.26	8.10	2.60 × 5.20
0.805	22.30	5.82	10.06	9.82	0.5	0.26	8.83	2.82 × 5.63
0.886	22.25	6.68	11.07	10.84	0.5	0.27	9.65	3.10 × 6.20

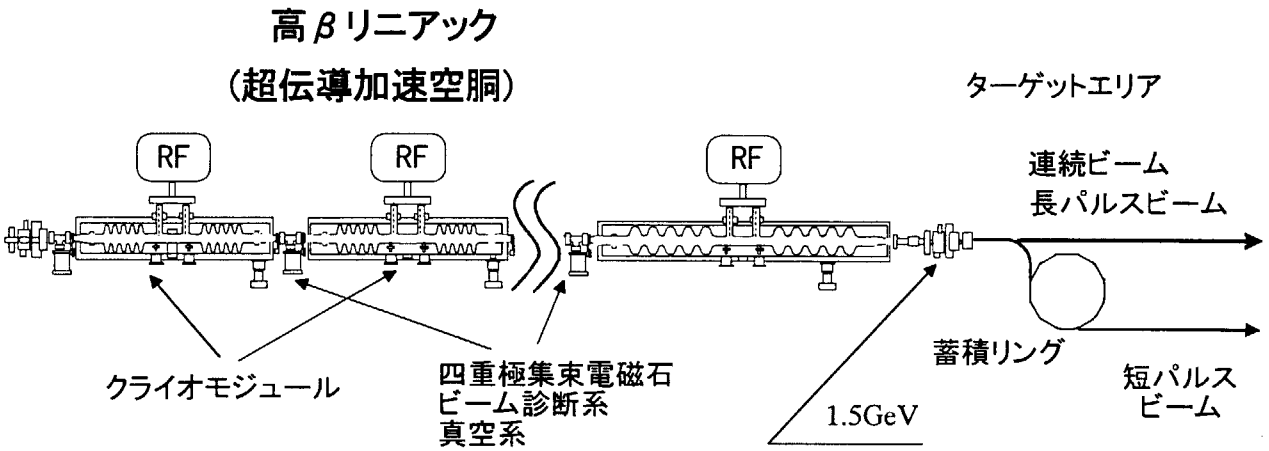
Table 3.2.4.2-2 各セル中心での軸上電場分布
ピーク値(相対値)

β_g	Center Cell	2nd Cell	End Cell
0.453	1	0.97	1.00
0.499	1	0.98	0.99
0.549	1	0.98	1.00
0.604	1	0.98	0.99
0.666	1	0.99	0.98
0.732	1	0.99	0.99
0.805	1	1.00	1.01
0.886	1	1.00	1.03

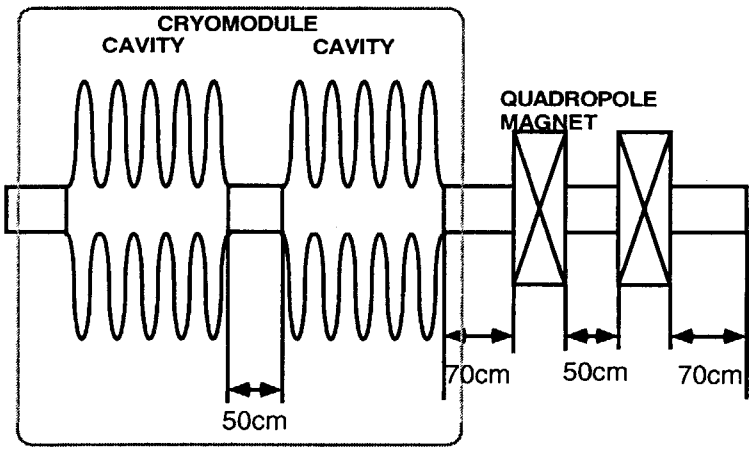
Table 3.2.4.2-3 空胴の機械的固有振動周波数

β_g	セル数	周波数 (Hz)		
0.5	4	55.05	*63.01*	90.26
	5	38.45	*49.64*	71.92
	4*	*100.22*	112.56	195.19
	5*	*79.82*	81.06	155.76
0.7	4	76.44	141.47	*143.72*
	5	54.18	110.93	*114.71*
0.92	4	61.21	*120.42*	124.40
	5	42.19	94.24	*96.79*

*Stiffener付き



超伝導加速器の構成



基本加速構成単位

Fig. 3.2.4.2-1　超伝導加速器構成図

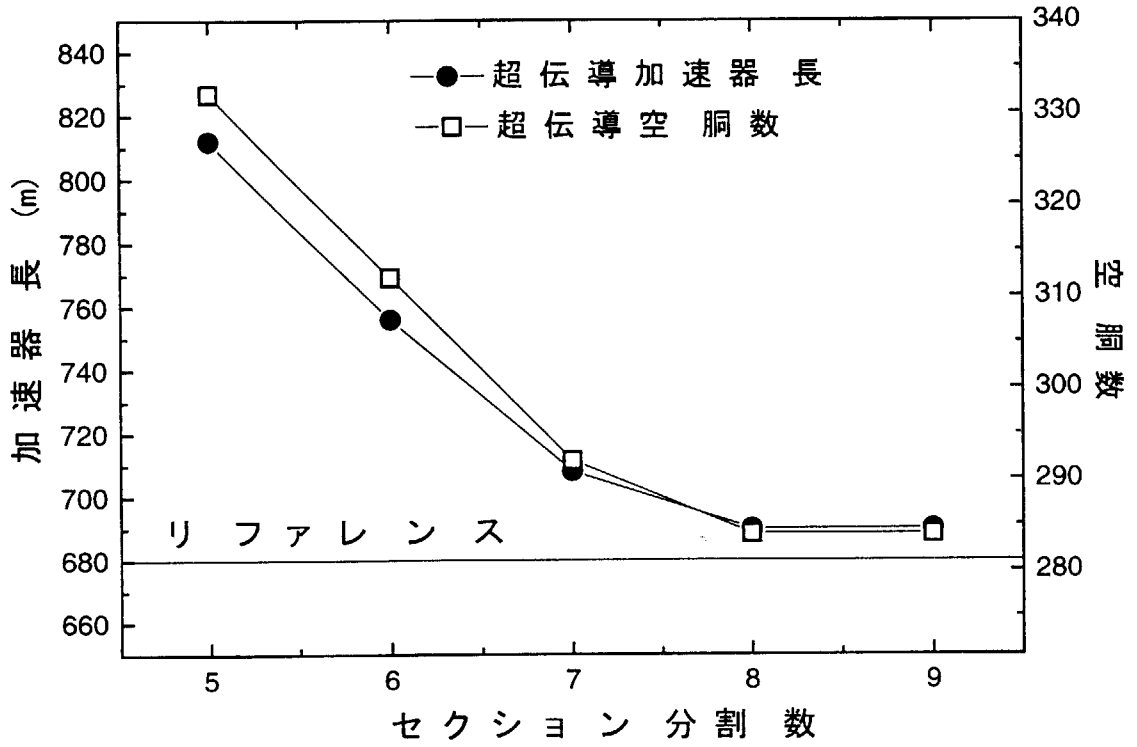


Fig. 3.2.4.2-2　超伝導加速部加速器長と空胴数のセクション分割依存性

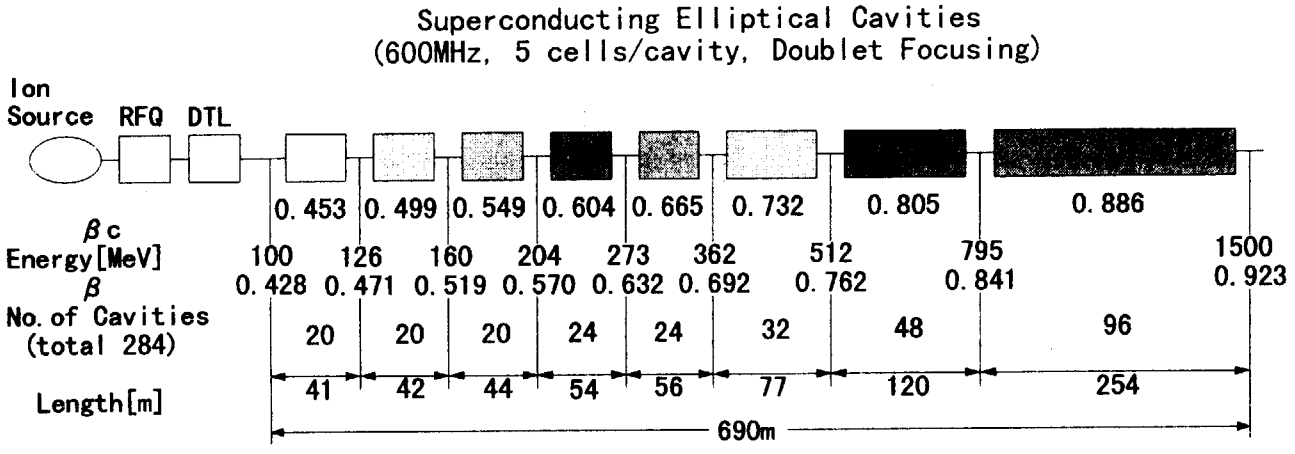


Fig. 3.2.4.2-3　超伝導加速器基本パラメーター

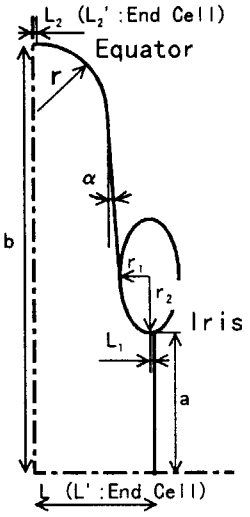


Fig. 3. 2. 4. 2-4 超伝導空胴ハーフセル形状模式図

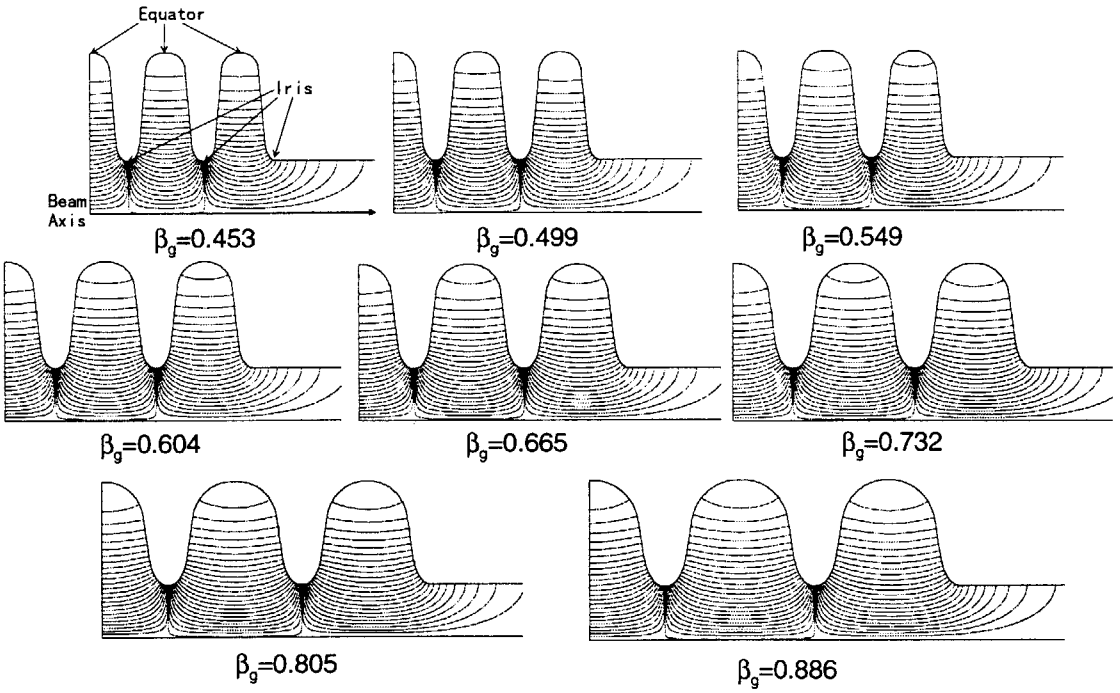


Fig. 3. 2. 4. 2-5 5セル超伝導空胴形状及びSUPERFISHによる電気力線

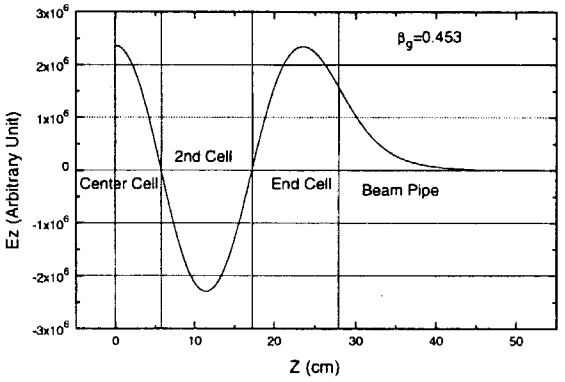


Fig. 3.2.4.2-6 β_g=0.453空胴軸上電場分布

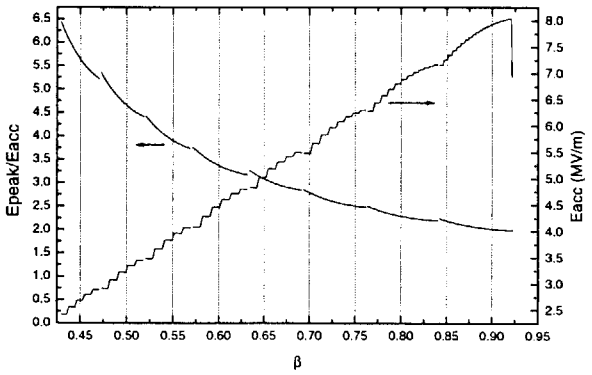


Fig. 3.2.4.2-7 E_{peak}/E_{acc}及び所定の電場強度におけるE_{acc}

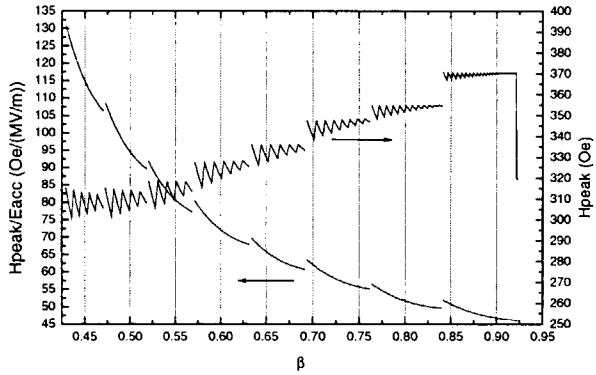


Fig. 3.2.4.2-8 H_{peak}/E_{acc}及び所定の電場強度におけるE_{acc}

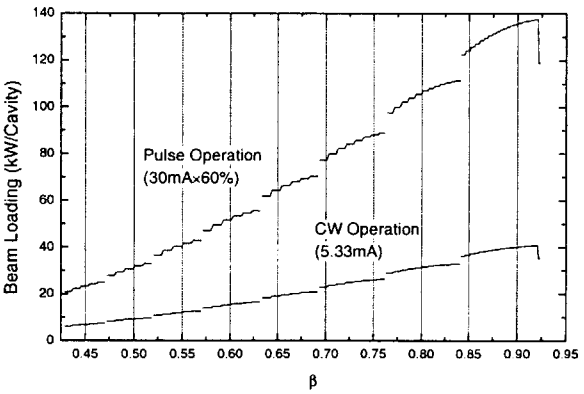


Fig. 3.2.4.2-9 空胴当たりのRFビーム負荷

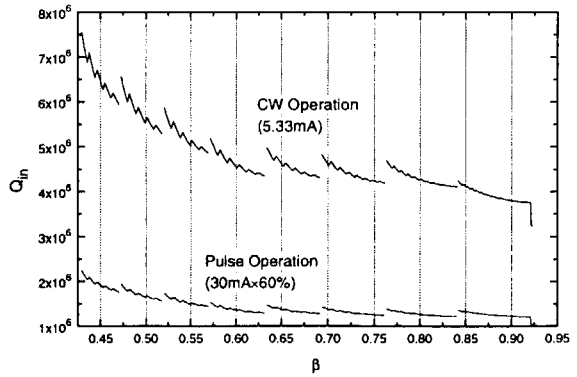


Fig. 3.2.4.2-10 パルス運転及びCW運転でマッチングをとるために必要なRF入力カプラの外部Q値

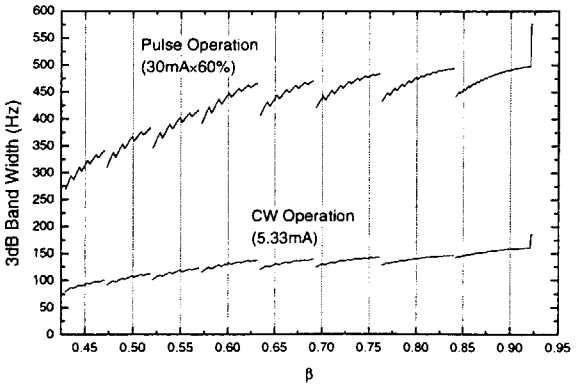


Fig. 3.2.4.2-11 パルス及びCW運転における空胴バンド幅

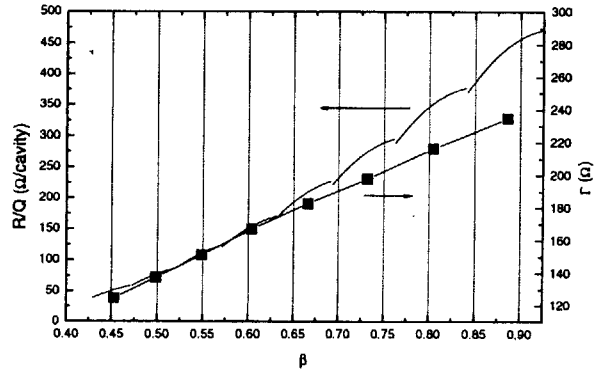


Fig. 3.2.4.2-12 空胴のR/Q値及び形状因子(Γ)

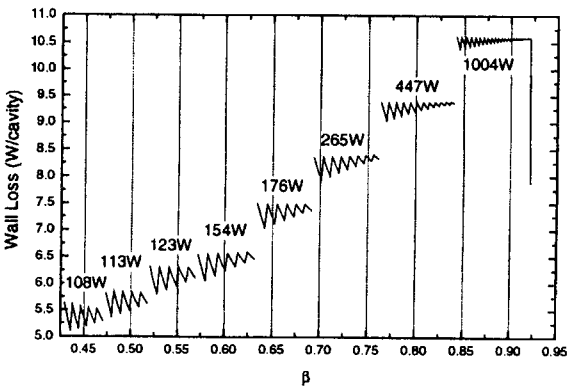


Fig. 3.2.4.2-13 空胴のRF壁損失

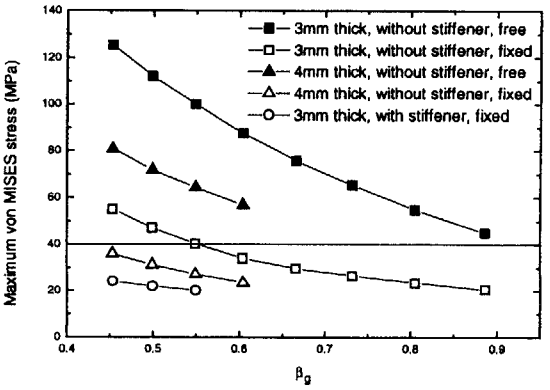


Fig. 3.2.4.2-14 真空荷重による空胴の最大Von Mises応力

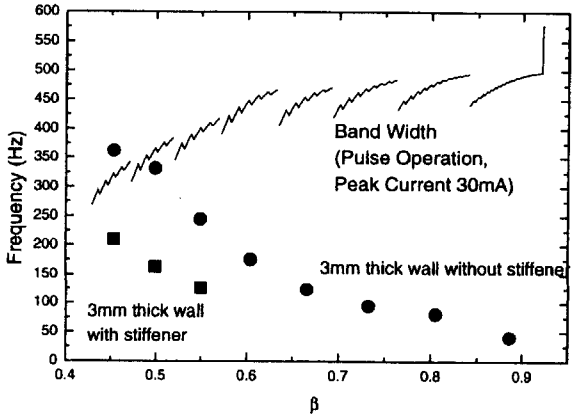


Fig. 3.2.4.2-15 ローレンツ力による共振周波数変化

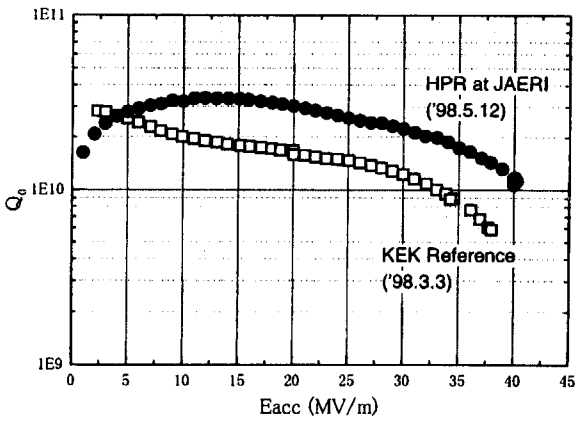


Fig. 3.2.4.3-1 K-8空胴の原研における高圧水洗浄の結果

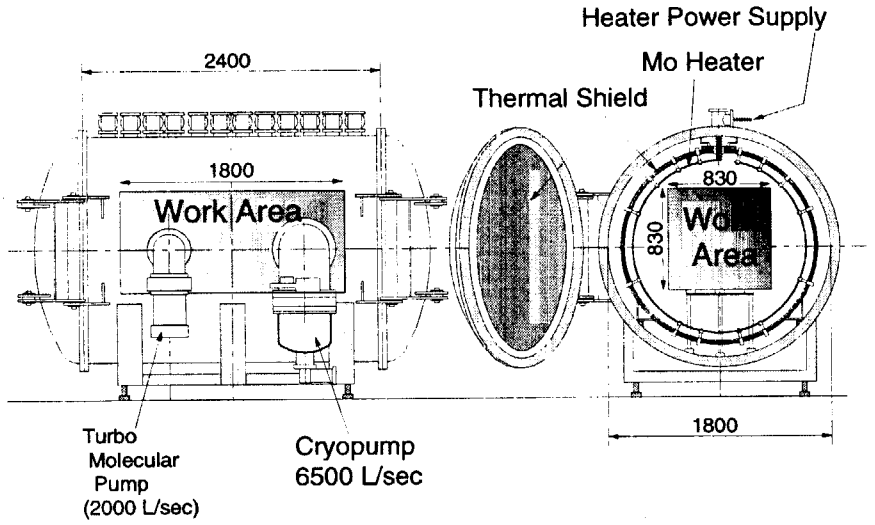


Fig. 3.2.4.3-2　熱処理用真空炉概略図

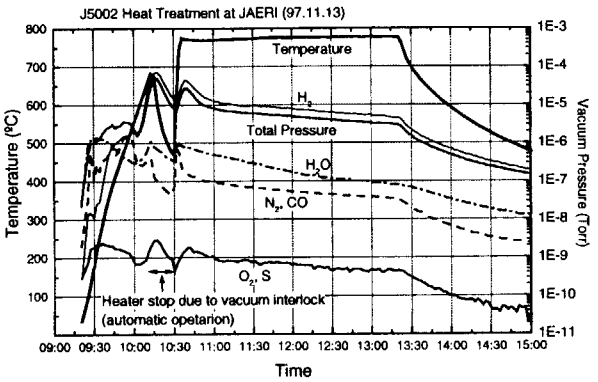


Fig. 3.2.4.3-3　β=0.5（J5002）空胴熱処理における温度、真空度

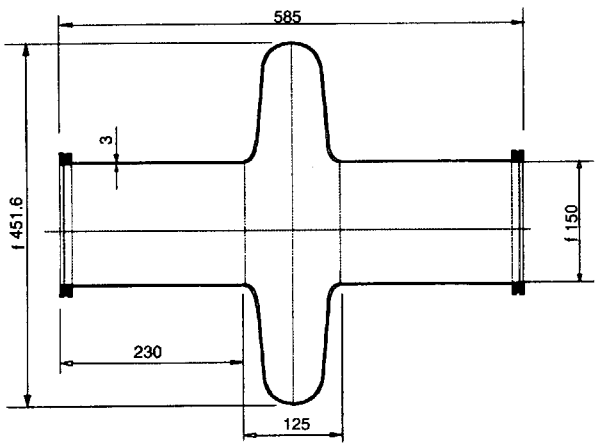


Fig. 3.2.4.3-4a 600MHz　(β=0.5) 単セル空胴

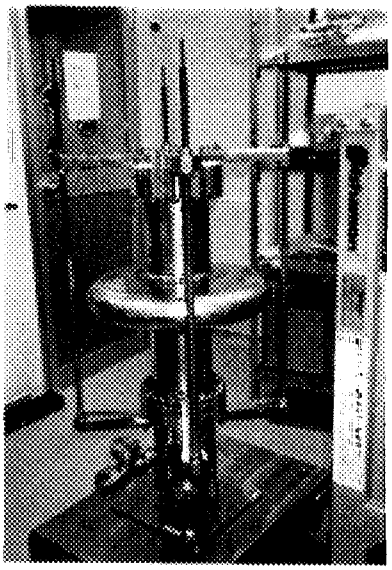


Fig.3.2.4.3-4b 600MHz（β=0.5）単セル空胴（写真）

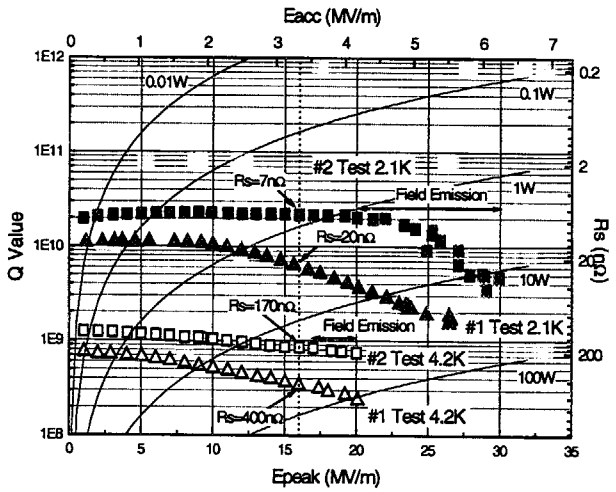


Fig.3.2.4.3-5 J5001(β=0.5)空胴縦測定結果

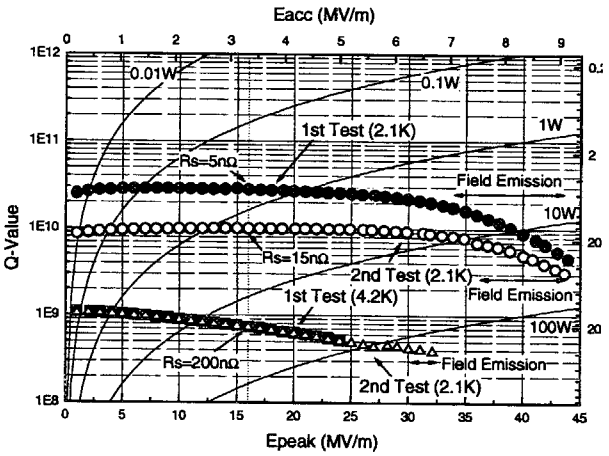


Fig.3.2.4.3-6 J5002(β=0.5)空胴縦測定結果

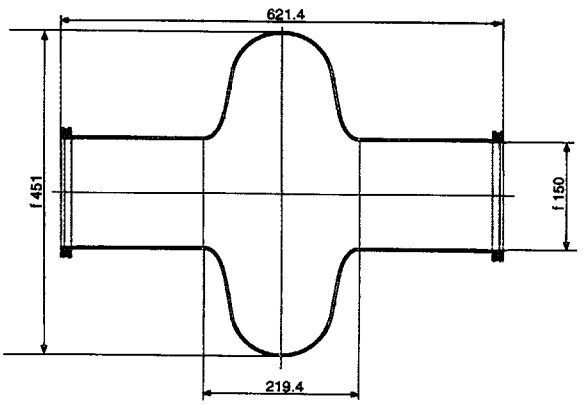


Fig.3.2.4.3-7 600MHz（β=0.886）単セル空胴

This is a blank page.

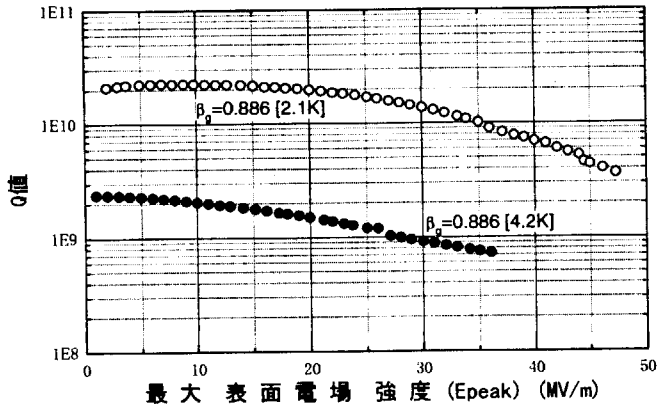


Fig. 3.2.4.3-8 J8901空胴(β=0886)縦測定結果

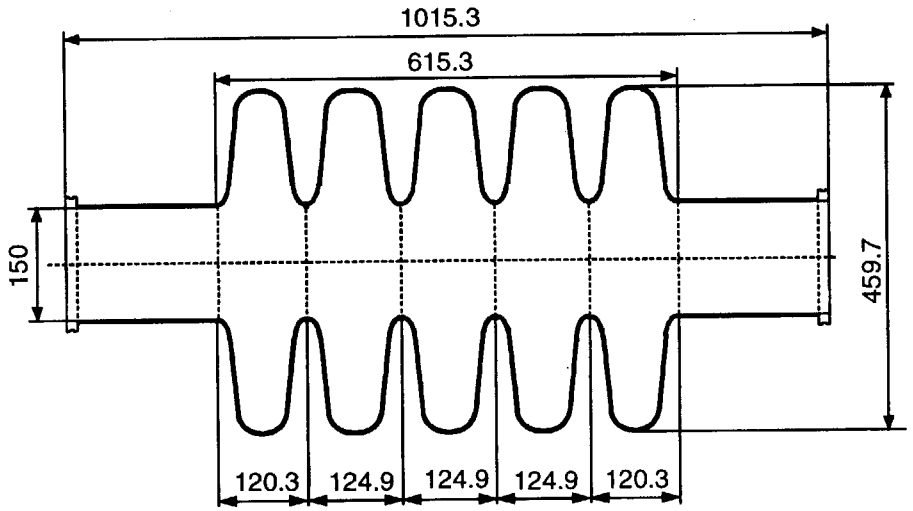


Fig. 3.2.4.3-9 600MHz, β=0.5,5連セル空胴の断面形状

3.2.5 RF システム

3.2.5.1 低エネルギー加速部の RF システム

3.2.5.1.1 システムに要求される仕様

低エネルギー加速部の RF システムは、RFQ（1 タンク）、DTL（3 タンク）および SDTL（17 タンク）からなる常伝導加速器を駆動する。加速周波数は 200MHz であり、終段増幅器としてクライストロンを適用すると筐体が巨大となるため現実的でない。したがって、高出力四極管を採用する。

低エネルギー部で要求される RF 電力は、運転モードにより 3 通りが予定されている。Table 3.2.5.1-1 は、各タンクに要求される RF 電力を示す[1]。DTL タンク 2 での要求電力が最も高く、2 期パルスモードで 1.9MW、CW モードで 1.3 MW である。四極管 1 球当たりの最高出力は 1MW 程度に制限されるので、DTL タンク 1、タンク 2 は、2 台の終段増幅器によって駆動される。

3.2.5.1.2 四極管に関する検討

周波数が 150 MHz を越える場合、四極管の使用はスクリーン電極の RF 発熱で制限される。Table 3.2.5.1-2 に数種類の 4 極管の公称性能を示す。いずれのメーカーも 100 MHz 近辺では 1.5MW から 2MW クラスの実績を有するが、200 MHz となるとほとんど実績が無いのが現状である。現段階で最も高出力が可能と思われる四極管は、原研大強度陽子加速器の R&D で使用した CPI 社の 4CM2500KG と、もう 1 つは THOMSON 社が開発し工場テストで 1MW 連続運転を実証している TH628 (Diacrode)である。両管のスクリーン電極の発熱量をもとめ、1MW 連続出力の可能性を評価した。

3.2.5.1.2.1 ダイアックロード（TH628）

両管の評価を行なう前にダイアックロードの特徴を記述する。この真空管の基本的構造は四極管そのものだがスクリーンとアノードのキャビティーが上下にあり、スクリーン電極の有効領域（アクティブエリア）の中間点が最大電圧点になるため周波数が高くなってもゲインの低下が少なく、電極の発熱も小さくなる。また従来型の電極に有るような上部のキャップが無いため、浮遊容量分の電流も小さくなりさらに発熱は減少すると考えられる。つまり通常の四極管（TH526）に比べて、

・電極の有効長も従来の 2 倍以上見込まれる事から周波数の増加にともなう
　増幅率の低下、効率の低下が改善できる。
・出力容量が小さくなり電極の電流密度が小さくなる。

と言った利点を有する。

参考に四端子回路法での計算結果を示すと Table 3.2.5.1-3 の通りである。ロスの計算には

材質、メッシュの効果は含んでいない。スクリーン電極の発熱をダイアックロード（TH628）とその原型となった４極管（TH526)とで比べると 1/3 以下になると期待できる。

3.2.5.1.2.2　4CM2500KG と TH628 の評価

EIMAC の 4CM2500KG、THOMSON 社が開発し工場テストで 1MW 連続運転を実証している TH628 (Diacrode) のスクリーン電極部のアクティブエリアでの損失量を求め、1MW 連続出力の可能性を評価した。評価の方法と条件は下記に示す通りである。

a）計算はＳＵＰＥＲ－ＦＩＳＨを使用した。

b）アノードとスクリーン電極間に 200MHz で共振する回路をつける。

c）アクティブエリアでの発熱量を求める。

d）アクティブエリアの中央部を動作電圧（Vrf）になるように換算する。

e）材質と形状を考慮するために発熱量を 29.4 倍する。これは、アクティブエリアの材質を銅としてコード中でシミュレートしているが、実際の材質は焦性黒鉛であるためである。この値はＣＰＩのレポートに示して在る値である。

Fig.3.2.5.1-1 は、シミュレーションコード SUPER-FISH の計算出力の一例を示す。4 極管を含めた出力空胴の共振周波数が 200MHz となるよう形状を決定し、アクティブエリアでの損失を評価した。結果を Table 3.2.5.1-4 に示す。この値には DC 損失の予想値 5kW を含んでいる。4CM2500KG、TH628 のスクリーン電極の最大許容損失はそれぞれ、20kW と 12kW である（カタログ値)。この値から判断すると 4CM2500KG のプレート RF 電圧は 13 kV 以下、TH628 では 14kV 以下にしなくてはならない。この値以上の電圧で動作させると真空管を破壊する恐れがある。

この結果から TH628 は、4CM2500KG の半分程度の損失となっているが、TH628 の許容損失が低いため、4CM2500KG と比べるとその特長は大きくないと言える。4CM2500KG、TH628 それぞれの概略を Fig.3.2.5.1-2、Fig.3.2.5.1-3 に示す。4CM2500KG はプレート電極を真空管ベース部近くにまで延ばす事によりスクリーン電極サポートを短くし、ベース部の電流密度を小さくする工夫がなされている。また TH628 は先に示したように電極の上下に共振回路を付けアクティブエリアでの電圧を最大にするよう工夫されている。

各管の動作条件を製造メーカのテクニカルレポートをもとに評価した。TH628 はその構造上スクリーン電極電圧を RF スイング電圧（Vrf）に直流電圧（3kV）を加算した電圧とし、1MW 出力時の動作を解析した。それらの結果を Table 3.2.5.1-5 にまとめる。両管とも動作インピーダンスを極端に下げ、効率を落とした動作をさせなくとも現実的な動作条件で１MW、ＣＷ出力は可能と思われる。ただし長時間の信頼性については実績がないため早い時期に実証試験を行う事が望ましい。

3.2.5.1.3　システム検討

3.2.5.1.3.1　概　要

200MHz の RF システムのブロックを Fig.3.2.5.1-4 に示す。基準信号器（シンセサイザ）からの 200 MHz 基準信号を分配器により各系統に分配する。分配した信号は各加速空胴の位相と加速電圧を制御する回路を経て 3kW の半導体アンプ、真空管式の 60 kW アンプで順次増幅され終段の真空管アンプで最大 1MW まで増幅する。増幅された RF 信号は同軸管、方向性結合器、カプラを経て加速空胴に供給される。

空胴の位相制御は空胴のピックアップ信号と基準信号の位相差を比較して行い、電圧の制御はピックアップレベルが設定値と等しくなるようにフィードバック制御される。また空胴の共振周波数は自動チューナを駆動して制御される。自動チューナの制御は同軸管にとりつけられた方向性結合器からの進行波の信号とピックアップ信号の位相信号を処理して行う。空胴の位相、電圧の制御についてはビームローディングが大きいことを考慮してフィードフォワード制御も行う。

3.2.5.1.3.2　ビームローディング

空胴にはビームを加速するための電場が印可されている。ビームはこの電場によって加速されるが自身が誘起する電場にも影響される。つまりビームは RF 源によって発生された電場と自身が誘起した電場のベクトル和によって加速される。ビーム電流値が小さい場合この問題は重要で無いが、大電流の加速器の場合はこの影響を無視できなくなり、空胴をデチューニングする必要が出てくる。必要なデチューニングの量（Δf）は、

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{I_0}{2V_c}(R/Q)\cdot\sin(\phi_s) \qquad (3.2.5.1\text{-}1)$$

で与えられる[2]。ここで f は加速周波数、I_0は、平均ビーム電流、V_cは transit time factor を掛けた加速電圧、R および Q はそれぞれ加速空胴のシャントインピーダンスおよび無負荷 Q 値、ϕ_sは平均同期位相である。7 MeV での DTL のパラメータ，

I_0=18 mA, Vc=1.5 x 0.82 MV, R/Q=514.5, Φs= 30 deg

を代入すると、△f=377.97 Hz となる。これを空胴の位相と電圧で表すと，△φ=17deg、電圧比=0.95 となる。従って、加速空胴の共振周波数は、加速周波数（200MHz）から △f だけずれた周波数にデチューニングする。

3.2.5.1.3.3　終段増幅器

周波数 200MHz を採用した場合、最大の問題は 1MW 出力を求められる終段増幅器の設計である。この増幅器をドライブする 60kW クラスの増幅器に関しては既に実績が有るので以下では終段増幅器について大まかな検討を行う。

（1） 出力回路

出力回路は3/4λの円筒同軸型キャビティーとする。キャビティーの特性インピーダンスは10Ω程度とし、皮相電流による電圧の上昇をできるだけ抑える設計にする。内筒外径を 362mm、外筒内径を426mm（特性インピーダンス9.8Ω）として以下検討を進める。

（2） 共振周波数

共振周波数は同軸空胴の先端をショートする位置を変えることによって調整する。SUPERFISHを用いた計算によれば、TH628 を採用した場合この位置は真空管のベース部から約 75cm のところになる。

（3） 電界強度

真空管の RF 動作電圧を 14kV とした場合、共振回路部の最大電圧は 12.5kV 程度になる。電界強度は3.9 kV/cm となり、大気中の放電限界 10 kV/cm に比べて十分小さい値になる。

（4） 発熱計算

SUPER-FISH による計算から出力回路での発熱量は2.2kW が得られた。ただし実際の回路では、電気接触が完全ではない事、導体表面が理想通りでない事を考慮して、発熱を 3 kW として熱評価する。3 kW の熱が内導体の両面、外導体の片面で放出されるとすると風速 5 m/s の冷却で温度上昇は200度を越えると予想される。よって出力回路は水冷する必要があると判断する。

3.2.5.1.3.4 真空管用ＤＣ電源

1MW アンプにパワーを供給する DC 高圧電源はアンプ１台あたり 2MW 程度の出力容量になる。このような大出力の電源を設計する場合、特に真空管管内放電から電極を保護するための配慮が重要になる。一般的によく使われるのはイグナイトロンを用いたクローバ回路で、真空管内でアーキングが発生した場合、電源側の平滑コンデンサを瞬時に短絡し、真空管への突入パワーを50ジュール以下にする。このため高速動作のクローバ回路が必要となる。Fig.3.2.5.1-5 に代表的なプレート電源の回路構成図を示す。

一方、最近では、半導体素子であるGTOを多段に重ねて、出力を遮断するような回路も用いられている。この場合、トランスからみた場合、電源は短絡にならないので、トランス、整流器、真空遮断機などの機器に対する負担が低減される。

またスクリーン、コントロールグリッド電源についても同様で、サイリスタスイッチ等を用いたクローバ回路が用いられることがある。もしくはFETを用いたカスケードコントロール回路によって電圧の安定化と真空管の保護を同時に行うことも可能である。

電源は、連続運転（CW）とパルス運転の両方に対応する必要がある。従って、平滑コンデンサには、バンクコンデンサを兼ねた、容量の大きなコンデンサが必要となる。サグを5%とし16kVで100A の電流を流したとき、RF パルス幅を 4ms とすれば 500μF になる。実際にはチョークコ

イルから平均電流分が定常的に供給されるのでコンデンサの容量は軽減できると思われる。蓄積エネルギーは、76800Jにも及ぶので、クローバ回路の設計が重要である。

3.2.5.1.3.5 伝送系

加速器のRF伝送では放射損・抵抗損が少ない、同軸管または導波管を使用する。同軸管は導波管に比べ小型・軽量であり、広帯域の信号伝送に適している。しかし周波数が高くなると内部導体の抵抗損が急激に増加し、伝送電力が制限されてしまうといったデメリットがある。一方、導波管は同軸管に比べ減衰が少ないと言ったメリットがあるが遮断周波数と言ったものが存在し、伝送する周波数が低いと寸法が大きくなると言ったデメリットがある。200MHzを方形導波管で伝送すると、その断面寸法の長径は1mを超えてしまい取り扱いが難しくなる。従って、200MHzの伝送ラインは同軸管で検討する事にする。

（1）同軸管の電力容量

同軸管の伝送電力は、周波数に比例して増加する抵抗損による内部導体の温度上昇、あるいは周波数に依存しない導体間の放電で制限されてしまう。放電耐圧は進行波だけでなく、反射波を考慮して設計する。全反射時（VSWR=∞）の電圧は、進行波の4MW分に相当する。50Ωの同軸管：WX-203Dを用いた場合、全反射時の電界強度は3.8 kV/cmとなり、特にSF6ガスなどを充填する必要は無いと判断できる。よってここでは発熱の問題を検討する事にする。

（2）発熱量

伝送線の電力損失には抵抗損と誘電体損失があるが同軸管の場合、殆どが中空であり内導体をサポートするための誘電体による誘電損失は殆ど問題にならない。同軸管をWX-203Dで構成すると1000kWのパワーを伝送した場合1m当たり220Wのロスがあり、自然空冷の場合、内導体、外導体の温度はそれぞれ440℃、107℃になることが見込まれる。従って、同軸管の内導体を水冷し、外導体を強制空冷する必要がある。

（3）同軸管長さ

加速タンクで放電が発生したとき、加速タンクとのインピーダンスマッチングがとれなくなりパワーは全反射となる。この時同軸管の長さとアンプの出力キャビティーのショート板位置によっては、真空管のアノード部に非常に高い電圧が発生し、真空管内でのアーク放電を誘起する。この様なことを避けるために一般的にはアンプと加速空胴との間にサーキュレータを入れ反射電力がアンプに戻らない様にしている。しかしこれまでのR&Dでの実績から、同軸管の長さを、1/8λ，3/8λ，5/8λ等の1/8λの奇数倍にすれば反射パワーは真空管の出力を抑える様に働く事が分かっているので実機でもこの方法を採用しサーキュレータは省くことにする。

（4）電力の分配

同軸管の伝送電力を1MWとして検討を進めているが、伝送ラインと加速空胴との整合をとるカプラの限界がCW運転で数百（～200）kWと言われている。そこで伝送ラインで電力を2ないし4分配する必要がある。分配合成回路としてはマジックT、ラットレース回路等が有名であるがこれらは導波管の回路である。同軸管（ケーブル）の分配合成回路としては3dBカプラ、ブリッジダイプレクサ、ウィルキンソン法、等があるがどれも大電力には不向きに思われる。構造が複雑な上に内導体を水冷する事を考えると同軸型の電力分配器は大変なものになると予想される。今後継続して検討する必要がある。

3.2.5.2 高エネルギ加速部のRFシステム

3.2.5.2.1 システムに要求される仕様

高エネルギー加速部のRFシステムは、5連セルで構成された284個の空胴から成る超伝導（SC）リニアックを駆動する。超伝導空胴は、加速する粒子のエネルギーの違いから8つの異なるβセクションに分けられている。Fig.3.2.5.2-1は、各セクションごとのエネルギー、加速器長、空胴数を示す。加速周波数は、600 MHzで平均同期位相は-30度である。Table 3.2.5.2-1にNSPで示されている運転モードの基本仕様を示す。超伝導空胴は壁損失が殆どないため、要求されるRF電力は運転モードにより大きく変化する。1期では、低電流低デューティで運転を行い、徐々に出力を上げ2期へのアップグレードにより定格8 MWのビーム加速を行う。

NSPリニアックは大電流ビームを高デューティで加速するため、ビームスピルは、より一層の低減が求められている。このため、空胴内電場に求められる安定度は厳しく、振幅で+/-0.5 %、位相で+/-1度以内である。

Fig.3.2.5.2-2は、運転モードに対する各空胴ビームローディングを示す。加速電圧が低エネルギー空胴から高エネルギー空胴にわたって増加するためビームローディングは、超伝導リニアックの両端の空胴で6.6倍異なる。また、ビームローディングは運転モードによっても大きく異なり、2期パルスモードとCWモード間では必要とする電力が各空胴で3.4倍異なる。従って、本RFシステムでは、CW運転時の低出力からパルス運転時の高出力まで効率よくRFを発生する必要がある。Table 3.2.5.2-2は各セクションごとの空胴RFパラメータを記す。カプラーの結合度や空胴の共振周波数は、ビームローディングに対し最適化を行うものとする。このため、空胴のバンド幅やフィリングタイムなどのRF特性は、各運転モードごとに異なる。

2期の運転において、CWモードとパルスモードとを数ヶ月のオーダで繰り返し切り替えるためカプラーや空胴チューナー、電源などは円滑にモード切り替えに対応するのもとし、また、1期から2期へのアップグレード方法にも経済的に対応するものとする。

主増幅管や直流電源方式の選定は、RFシステムの建設コストのみならず建屋を含む全加速器の建設コストに大きな影響を及ぼす。また稼働率などの信頼性を決定する重大な要因になる。目標とする稼働率（200日/年）を達成するために、信頼性・保守性を考慮し、経済的なシステム

を建設する必要がある。

3.2.5.2.2 RF コントロール

3.2.5.2.2.1 運転パターン

RF 源での電力損失と空胴での壁損失を低減するために、パルス運転モードでは、空胴はパルス励振される。Fig.3.2.5.2-3 の上段は、2 期パルスモードの正負イオン同時加速での RF 運転パターンを示す（図中ではビームローディングによるデチューニングは考慮していない）。I_B は平均ビーム電流でピーク値に中間デューティを掛けたものである。入射 RF 電力（P_f）はビーム到達前に印加し、空胴に所定の加速電圧（V_{acc}）を立ち上げる。この立ち上がり時間（t_r）は、空胴のフィリングタイムと入射 RF 電力（振幅・位相）に依存する。加速電圧立ち上げ時でのフィリングタイムは、1 期パルスモードの低エネルギ端空胴で 2.1 ms、高エネルギ端空胴で 1.2 ms、2 期パルスモードでは 1.2 から 0.6 ms まで異なる。SC リニアック全体にわたってフィリングタイムが異なるため、RF 投入タイミングを各空胴ごとに調整する必要がある。

負イオン（H^-）と正イオン（H^+）パルス間の時間（t_w）は、位相などを調整するための時間であり、空胴のフィリングタイム程度必要である。この間、V_{acc} を維持するために必要な電力は、空胴が位相で-30 度分デチューニングされていると定常状態でビーム加速時の P_f の 1/3 倍である。

2 期ＣＷ運転の場合、空胴はＣＷ励振される（Fig.3.2.5.2-3 下段）。このため、V_{acc} は一定であり、電場の立ち上げ、立ち下げ時のローレンツ力による空胴の変動がない。しかしながら、常に電圧が印加されているため空胴の平均壁損失はパルス運転の 2～3 倍となる。

3.2.5.2.2.2 ビームローディング

SC リニアックでは、P_f を最小化するため空胴と導波管の結合度を各運転モードのビーム電流に対して最適化する。式（3.2.5.2-1）は、整合結合度（β_{opt}）の関係式を示す[5]。

$$\beta_{opt} = 1 + \frac{P_B}{P_{loss}} = 1 + \frac{R_a I_B \cos\phi_S}{V_{acc}} . \qquad (3.2.5.2\text{-}1)$$

ここで、P_B はビームローディング、P_{loss} は空胴の壁損失、R_a は空胴のシャントインピーダンス、ϕ_s は平均同期位相である。Fig.3.2.5.2-4 (a) は、各モードでの β_{opt} を示す。超伝導空胴では P_B に対し P_{loss} が少ないため、結合度が運転モードごとに大きく変わり、したがって空胴の負荷 Q 値やバンド幅も運転モードごとに異り、2 期パルス運転と CW 運転とではそれぞれ 3.4 倍異なる。

ビームローディングの低い CW 運転では、β_{opt} が低くなるため負荷 Q 値（$Q_L=Q_0/\beta$）が高くなる。このためバンド幅が狭く、低エネルギ端の空胴で 151 Hz になる。後節で記述するローレンツ力やマイクロフォニック振動等による空胴のデチューニングの影響を考慮するとバンド幅は余り小さくできず、1 mA 運転などの更に低い電流でビームを加速する場合、結合度を最適化することができず、不整合状態で運転を行う可能性がある。

空胴の共振周波数（f_C）もまた、入射 RF 電力を最小化するためチューニングされる。式(3.2.5.2-2) は、最適化のための条件式である。

$$\tan\psi_{opt} = \frac{f_C - f_{rf}}{f_C}\cdot\frac{2Q_0}{1+\beta_{opt}} = -\frac{R_a I_B}{(1+\beta_{opt})V_{acc}}\sin\phi_S \quad . \qquad (3.2.5.2\text{-}2)$$

ここで、f_{rf} は加速周波数、Q_0 は無負荷時の空胴の Q 値である。Ψ_{opt} は、最適時で $\Psi_{opt} = -\phi_s$ となり、上式より空胴のデチューニング量（$\delta f_B = f_c - f_{rf}$、$f_c \approx f_{rf}$）は、

$$\frac{\delta f_B}{f_{rf}} = -\frac{I_B}{2V_{acc}}(R_a/Q_0)\sin\phi_S \quad , \qquad (3.2.5.2\text{-}3)$$

となる。Fig.3.2.5.2-4 (b) は、各運転モードごとの δf_B を示す。デチューニング量もまた運転モードにより異なり、従ってモード切り替え時には、カプラーと空胴それぞれのチューニングを行なう。

3.2.5.2.2.3 ローレンツ力の影響

SC リニアックに用いられる超伝導空胴は、電子加速用超伝導空胴と比較して形状が偏平であり、変形しやすい。したがって、空胴内に RF を印加するとその電磁場によるローレンツ力により空胴が変形し、共振周波数がずれる。この影響は、低エネルギ部の空胴で顕著になる。空胴の共振周波数が加速周波数からずれると反射が生じ、加速電圧を維持するのにより大きな電力を必要とする。ローレンツ力による共振周波数の変動は次式により表記され、その時間的変化は空胴の機械的変形の応答時間（τ_m）に依存し、ずれ量（δf_L）はデチューニング定数 K（単位：Hz/(MV/m)^2）と空胴の加速電界（E_{acc}）に依存する。

$$\frac{d\delta f_L}{dt} = -\frac{1}{\tau_m}\cdot\delta f_L + \frac{1}{\tau_m}\cdot K\cdot E_{acc}{}^2 . \qquad (3.2.5.2\text{-}5)$$

τ_m は、RF 制御を行う上で重要であり、シミュレーション解析により、数十μs～数 ms であると見積もられている。τ_m が ms オーダーとなるとビーム加速時に空胴が変形し続けることになり、入射 RF 電力をビーム加速時に変化させなければならず RF 制御が困難になると予想される。

空胴を CW 励振する場合、電圧を立ち上げた後、空胴のローレンツ力による変形をチューナーにより復元する。このチューニングにより、空胴の共振周波数は、加速周波数からビームローディングのためのデチューンを考慮した周波数（$f_{rf}+\delta f_B$）になる。あるいは、あらかじめチューナによりローレンツ力によるデチューニング分空胴の共振周波数をずらしてから RF 電力を供給する方法もある（Fig.3.2.5.2-3 参照）。

空胴をパルス励振する場合、チューナの応答速度をパルス運転のくり返し周期に合わせられないため空胴の共振周波数は、変形した状態で $f_{rf}+\delta f_B$ となるようにオフセットをかけなければならない。ローレンツ力によるデチューンは、共振周波数が減少する方向で発生するので、電場が立ち上がる前の空胴の共振周波数は $f_{rf}+\delta f_B+\delta f_L$ となる（Fig.3.2.5.2-3）。デチューニング

した空胴の共振周波数がそのバンド帯より大きくなると空胴内に RF が入りにくくなり、電場の立ち上がりが悪くなる。

3.2.5.2.2.4 マイクロフォニック振動

マイクロフォニックにより空胴が振動すると空胴共振周波数が変動する。このため空胴位相にチューニングエラーが生じ、RF 電力が反射され空胴電圧が低下する。この影響はバンド幅の狭い Q_l の高い空胴で顕著である。Fig.3.2.5.2-5 は、定常状態における空胴 #1 の共振周波数エラーに対する振幅エラーおよび V_{acc} を規定値に維持するために必要な電力増加比を表わす。+/-6Hz の共振エラーで、V_{acc} は 0.5 %程度低下する。従って、RF フィードバック制御により規定の安定度（+/-0.5%以内）に電場を保たなければならない。

3.2.5.2.3 ローレベル制御

空胴の共振周波数調整、空胴への RF の投入タイミング、ビームローディング、外部擾乱等による加速空胴内の RF の変動を押さえるためには、RF 制御を行なう必要がある。制御の内容は以下に大別される。

①加速空胴の周波数チューニング制御
②加速空胴の電圧、位相制御
③加速空胴および大電力 RF 系の保護

これらの中で、①は遅い制御でよいが、②③は早い制御を行なう必要がある。

3.2.5.2.3.1 空胴の共振周波数チューニング制御

空胴チューニング制御は、ローレンツ力およびビームローディングによる周波数の影響を考慮し、空胴を所定の周波数だけデチューニングし、その共振周波数を制御するものである。これによりビーム加速時には、RF 源からみて空胴はチューニングされた状態となる。そして、RF 入力時およびビーム入射時の擾乱に対する速い空胴チューニング制御は行なわないものとし、RF 以外の緩やかな外乱要因によって変化する空胴の共振周波数は、所定の周波数にチューニングするものとする。

運転中の空胴のチューニングは、基準 RF（または空胴への入力 RF）と空胴内の RF の位相を比較し、位相差が常に一定になるように空胴をチューニングする。ここでは空胴が機械的に共振しない程度の緩やかな制御を行なう。Fig.3.2.5.2-6 に空胴チューニング制御のブロック図を示す。

3.2.5.2.3.2 加速空胴の電圧・位相制御

（1） フィードフォワード制御

空胴に RF を供給したときのローレンツ力、およびビームローディングによる共振周波数のずれの影響に対しては、あらかじめ決められた所定の振幅・移相をフィードフォワードで制御を行う。

（2） 主増幅管 RF 出力電力、位相のフィードバック制御

パルス運転モードにおいて直流電源は、長パルス時間にわたり大電流を主増幅管に供給しなければならない。しかしながらパルス毎の安定度、およびパルス内電圧変動（サグ）の要求値を厳しく設定すると製作コストが高く、規模も大きくなる。このため直流電源の安定度を低く設定し、ローレベル制御で RF 出力を補償する。Fig.3.2.5.2-7 は、フィードバック制御のブロック図を示す。基準 RF（または増幅管への入力 RF）と増幅管 RF 電力・位相を比較して入力 RF にフィードバックをかける。反射波による影響を避けるために、増幅管とサーキュレータの間に設けた方向性結合器から取り出した RF と基準 RF の信号とを比較して、常に一定の出力になるよう入力ラインにフィードバックをかける。

（3）ビームローディング時の空胴内 RF 電圧・位相制御

空胴内の加速電界は、増幅管から供給された RF が作る電界と、ビームが誘起する電界の合成となる。この加速電界はバンチビームに対し一定の位相関係を保つ必要がある。したがって Fig.3.2.5.2-8 に示すように、空胴内の RF をピックアップし、その RF の電力と位相を基準 RF と比較し常に一定の関係を保つようにフィードバック制御する必要がある。1 台の増幅管で複数の空胴を駆動する場合、各空胴のピックアップ信号をベクトル合成し、基準 RF の位相とロックするようフィードバックを掛ける。

しかし、パルス運転においては次のような問題点が考えられる。

① パルスビームローディングの過渡時定数に対し早いフィードバックしなければならないので、電圧フィードバック、位相フィードバックの負担が重くなる。

② 電圧フィードバックと位相フィードバック間のクロストークが生じ、制御特性が悪くなる。

③ マイクロフォニックの振動周期が比較的早いときは、空胴内の電圧、位相も早い周期で振動し、上記クロストーク等のため、制御特性が悪くなる。

3.2.5.2.3.3 加速空胴および大電力 RF 系の保護

構成機器に何らかの異常が起こったとき、ローレベル RF 系を遮断することにより、加速空胴および大電力 RF 系を保護する。RF の停止は、ローレベル制御系に設けた RF スイッチにより行なう。異常の原因として、導波管系での RF の異常反射、導波管系での放電、陽子ビームの異常停止、真空異常、冷凍機等の異常、利用系からの異常停止、等が考えられる。

3.2.5.2.3.4 基準信号の伝送

SC リニアックの長さは約 700mあるため、環境温度変化に影響されない高安定伝送系を実現する必要がある。従来使用されていた位相安定化 SF 同軸ケーブルは生産中止となっているので、位相安定化（伝播時間安定化）光ファイバを使用する。それに伴い周波数帯域 1 GHz 以上の電気／光（E/O）、光／電気（O/E）変換器を使用する。

3.2.5.2.3.5 技術課題

空胴内の電界強度（+/-0.5 %）および位相の安定度（+/-1 度）に対する要求が厳しいこと、および空胴の機械的特性が明確でないため、モデル空胴を用い RF 制御の R&D を行なう必要があると考えられる。
今後重要と思われる検討内容を以下に記述する。

①ローレンツ力およびビームローディングによる位相のずれを補正するために行なうフィードフォワード制御の性能の確認。
②ビームローディングを補正するための、フィードバック制御の性能確認。
③マイクロフォニックに対する制御をどのようにしたら可能かの検証。
④カプラの結合度の最適化とその手法。

3.2.5.2.4 システム検討

3.2.5.2.4.1 概　要

本節では、超伝導加速器部の RF システムについて記述する。RF システムは、直流電源、ローレベル制御系、増幅管および伝送線路で構成される。Fig.3.2.5.2-9 に平面配置例を、Fig.3.2.5.2-10 に加速器建屋の予想断面図を示す。本システムでは、主増幅管としてモジュレーティングアノード方式のクライストロンを用い、1 台のクライストロンにより 4 空胴を励振する。CW 運転およびパルス運転を同一モジュールで行なうため、パルス出力には、アノード電圧のスイッチングにより対応する。また、クライストロンの電源条件（電圧、電流、パルス幅）が、運転モードごとに、また各クライストロンごとに異なるため出力の可変範囲の広い電源を使用する。伝送系は導波管、分波器（パワーデバイダーまたはマジックティー）、位相器、方向性結合器およびサーキュレータから構築される。

3.2.5.2.4.2 クライストロン

（1） クライストロン

クライストロンの台数は、1 台あたり 4 空胴に RF を供給するので、71 台必要となる。クライ

ストロンの最大出力は、ビームローディングにRFマージンと伝送損失を考慮して、900 kW 程度必要である。TRISTAN、SPring-8 において、UHF 帯（508MHZ）で、高出力（1MW）、長パルス（CW）運転の実績があるため、最大出力に関してクライストロンを増幅管として用いるのに問題はないと考えられる。

本RFシステムでは、空胴のビームローディングに応じてRF分配数を変えないため、低エネルギ空胴と高エネルギ空胴とでは要求されるRF電力が6.6倍異なる（Fig.3.2.5.2-2)。このため、定格出力の異なる何種類かの管を使用する。ビームローディングに応じて多種類の管を使用すると効率のよいシステムが構築できるが、管種が増えるためメンテナンスが煩雑となる。本検討では、高出力管（定格1000 kW）と低出力管（最大 400 kW）の2管種の使用を想定している。

クライストロンは、パルス幅で2 ms（50Hz）からCW、電力比で5倍以上もの差がある出力を各運転モードに応じて発生しなければならない。クライストロン設計において、両運転モードとも、効率を最適化することは極め困難である。ここでは、高出力パルスモードで最適化された管で評価を行なった。したがって、低出力 CW モードでは、動作効率はパルスモードよりかなり低くなる。

本概念設計では、低出力動作時の効率低下を防ぐため、パービアンスを下げて運転を行なうものとする。したがって、カソード（ビーム）電圧、アノード電圧は出力に応じて最適化を行い、飽和出力を動作出力の規定倍（ここでは、1.25 倍）に設定する。このため、カソード・アノード電圧はクライストロン毎に異なる。Fig.3.2.5.2-11 中の点は、508MHz、1MW クライストロン(E3732、東芝製）の飽和出力—効率特性の実験値を示す。高出力クライストロンの動作領域は、120 kW（2期CWモード）から720kW（2期パルスモード）であり、この時の飽和効率は、35%から 65%となる。飽和出力に対するカソード電圧･アノード電圧を Fig.3.2.5.2-12 に示す。高出力管を駆動する直流電源の電圧範囲はカソード電圧で80 - 55kV、アノード電圧で30 - 20kV である。

（2）システムの効率と電力

クライストロンは、RF 制御のため出力に余裕を持たせて運転を行う。制御のためどの程度マージンが必要なのかは、更に検討が必要であるが、本検討では飽和出力の80 % の出力（RFマージン15%＋伝送損失5%）で運転することを想定する。この時の動作効率は、飽和状態より減少し、例えば飽和効率60%の管を飽和出力の80 %で動作する、動作効率は48%となる。

クライストロンや RF 分配数を運転モード毎に入れ替えない想定のもとでは、管種は最も負荷の大きい2期パルス（30 mA）モードで決定され、その配列はRF電力がそのクライストロンの最大出力を超えないように配置される。飽和出力の 80 %で運転することとした今回の検討では、低エネルギー端の1台目から27台目までが定格400kWのクライストロンを使用し26台目から71台目までが定格1 MWのクライストロンを使用する。

ヒーター電力や収束コイルに供給される電力と比較して、カソードへの電力が供給電力の大部分を占めるため、システム効率と電力はRF出力電力と動作効率より求めた。Fig.3.2.5.2-13 は各クライストロンに供給されるピーク DC 電力を示す。カソード電源は、パルス動作において 1

台あたり最大 1.1 MW の電力を供給し、また、同じモジュールで CW 運転時に 460 kW の電力を供給する。Table 3.2.5.2-3 は、RF システム全体の効率および電力をまとめたものである。平均 DC 電力は、電場の立ち上がり時間を含むパルスデューティを考慮した値であり、AC 電力は、AC-DC 変換効率を 80 % として計算した。AC 電力量が最も大きいのが CW 運転であり、約 30 MW の AC 電力が必要とされる。

3.2.5.2.4.3 クライストロン直流電源

クライストロン電源は、カソード電源、アノード電源、ヒータ電源、集束コイル電源、クライストロン電源制御盤から構成される。パルス運転は、カソード電圧を一定に保ち、アノード電圧をスイッチングすることにより実現する。

（1） カソード電源

大容量カソード電源で複数のクライストロンを駆動すると台数が低減でき、設置面積・コストが低く抑えられる。しかしながら、クライストロン出力が大きくなる高エネルギ側では、アークが発生した時の管を保護するためのクローバ回路の実現が困難となる。また、クライストロンの各出力要求値に対する最適化の自由度も狭まる。以下に考えられるカソード電源方式についての検討結果を記述する。

a）AC スイッチ方式

カソード電源は、降圧トランス（Tr_1）、逆並列に接続したサイリスタ（以後 AC スイッチと呼ぶ）、昇圧トランス（Tr_2）、整流器（Diode）、コンデンサーバンク（C_h）およびクローバ回路から構成される（Fig.3.2.5.2-14）。カソード電圧は、サイリスタのオンタイミングを制御することにより規定値を得る。AC スイッチは 12 パルス構成としてカソード電圧リプルの系統への高調波流出の低減を図る。

コンデンサーバンクの容量は、サグの設定値と負荷（増幅管）のオンタイムに依存する。最も容量の大きいバンクは、高エネルギ端電源（クライストロン＃70、V_h=78kV、I_b=14A 出力）であり、正負イオン同時加速運転モード（アノード電源の立ち上がり時間を除くパルス幅で 7.3ms）においてサグを 0.5% 以内に抑えるためには、260μF のコンデンサー容量が必要となる。バンクのおおよその大きさを見積もると、バンクの蓄積エネルギーは、790 kJ であり、一方、単位体積当たり誘電体に蓄積できるエネルギーは、その誘電体の絶縁耐圧（E）と誘電率（ε）から求められる。誘電体を含浸紙（E=15MV/m、ε_r=6）とすると 6kJ/m^3、絶縁油（E=27MV/m、ε_r=2.2）とすると 7kJ/m^3 となり、バンクの体積で約 110～130 m^3 が導かれる。実際には、絶縁破壊に対する安全率、ブッシング体積も考慮されるので更に大きくなる。バンクは、増幅管近くに設置されるので膨大なバンク容積は建屋建設費に大きな影響を与える。このため、よりエネルギー密度の高いコンデンサバンクの開発が必要となる。

クライストロン短絡保護用のクローバ回路は、バンクの容量が大きいため高速で起動しかつ大

電流に耐えなければならない。遮断速度、遮断ピーク電流値などはクライストロン保護抵抗を含めて詳細な回路解析より求める必要があるが、管内アーク損失を 20 - 30 J に抑えるのにクローバ回路は、厳しい設計仕様になると予想される。

b）AC スイッチ＋四極管制御方式

この方式は、カソード電源に、AC スイッチと昇圧変圧器及び整流器、コンデンサーバンクを接続し、四極管によりカソード電圧を制御する方式である。Fig.3.2.5.2-15 に回路構成図を示す。カソードの四極管とアノード電源を協調運転してパルス運転をする。負荷がオンする前のバンク電圧をカソード電圧より高くし4極管でレギュレーションを行うことにより、コンデンサー容量を小さくでき、またクロバー回路の要求も軽減される。しかしながら、4 極管での損失が加わること、また、大容量の四極管の寿命が短く、四極管の制御回路が高圧側に浮いているので、そこでの故障（絶縁不良）が多いと予想されるなど、効率・信頼性に関して問題がある。

c）インバータ方式

サイリスタ整流器（Converter）、低圧フィルタ（Cp）、インバータ、高周波トランス（Pulse Tr）、整流器、コンデンサーバンクから構成される。Fig.3.2.5.2-16 に回路構成図を示す。サイリスタ整流器の位相、インバータのパルス幅によりカソード電圧を制御する。インバータを高周波制御（20kHz 程度）することによりカソード電圧リプルを低減でき、また高速のフィードバック制御によりバンク容量を数十 nF 程度に低減することができる。このため、クロバー回路の仕様は AC スイッチ方式と比較してかなり軽減される。しかしながら、1MW クラスで高繰り返しのインバータ電源は実績はあまりなく、特に高周波トランスは R&D を必要とする。

（2）アノード電源方式比較

アノード電源はクライストロン1台につき1台必要になる。アノード電源により出力にモジュレーションをかけるので、立ち上げ、立ち下がり、パルス平坦度・安定度などの電源仕様は厳しくなる。また、アノード電極の過熱を防ぐため、立ち下げ立ち上がり時にアノード電極への電流の吹き込みがないようにする。以下に、アノード電源の電源構成の方式について記述する。

a）四極管制御方式

カソード電圧の分圧によりアノードに電圧を印加する。Fig.3.2.5.2-17 に回路構成を示す。アノード電圧立ち上げ時には、四極管 V2 をオンし、V2 の内部抵抗と R1 の分圧比によりアノード電圧を調整する。この時、アノード電圧をモニターし、V2 のグリッド制御により電圧を一定に保つ。電圧立ち下げ時は、V2 をオフにしアノードの電位をカソード電圧まで下げる。この時、四極管 V1 をオンにすることにより、アノード回路中の浮遊容量を急速に充電し、高速の立ち下がりを実現する。V2 の代わりにゲート操作が容易な半導体スイッチを用いることもできる。立上り、立下りはそれぞれ 1 ms 程度が可能で、パルス運転にも容易に対応できるが、四極管の寿命が短いという短所がある。

b）直流電源＋半導体スイッチ方式

外部電源を用いてアノードに電圧を印加する。Fig.3.2.5.2-18 に回路構成図を示す。電源にはインバータを用い、インバータのターンオンによりアノード電圧の高速立ち上がりを図る。電圧の調整は、レギュレータ及びインバータのオンタイムにより制御を行う。電圧の立ち下げには、インバータをオフにし、半導体スイッチ SW（または四極管）を短絡することで、速い立ち下がりを図る。この電源の特徴として半導体スイッチによる電圧の高速立ち上げ立ち下げが可能で、寿命が長いことであると考えられるが、実証実験が必要である。

3.2.5.2.4.4 伝送ライン

伝送ラインには、終段増幅器をドライブするための低電 RF 伝送系と、増幅器の RF 出力電力を空胴に導く大電力 RF 伝送系からなる。ここではクライストロンで発生した RF 電力を 4 空胴に分配するシステムについて記述する。

（1） 低電力 RF 伝送系

RF 低電力伝送系は、低β加速部用 RF 源に供給する 200 MHz の基準 RF 信号を 3 逓倍し、600 MHz の基準信号を増幅し、個々の RF 源に分配する。分配した 600 MHz 信号は、クライストロンをドライブできる電力まで増幅する。クライストロンをドライブする RF 低電力伝送系の全体構成を Fig.3.2.5.2-19 に示す。

（2） 大電力 RF 伝送系

RF 大電力伝送系は、600 MHz、最大 900 kW の RF 電力を低損失で無駄なく空胴に伝送する基本目的とともに以下の機能を備えている必要がある。第一に、空胴からの反射電力がクライストロンや他の空胴に影響を与えない機能、または保護機構があること。そのため、クライストロン出力部に大電力サーキュレータを用いるか、又は各空胴入力部に小電力サーキュレータを用いるかの二通りが考えられる。大電力サーキュレータを用いる方がスペースファクタの点で有利である。それに対し、各空胴にサーキュレータ入れる方式は、方向性結合器において空胴からの RF の反射の影響が小さい。どちらが良いかは RF 制御およびコスト比較になると考えられる。

第二に、導波管内での放電等による異常状態を検出し、インターロック制御系へ信号を出力し、RF 源を保護するとともに、その他の機器を保護する。クライストロンの RF 窓、およびサーキュレータ内の放電を検出する放電モニタを備える。また、進行波電力、反射波電力をモニタできるようにクライストロン出力部と空胴入力部に方向性結合器を設ける。

第三に、ローレベル RF 制御系で使用する RF 信号をピックアップする。クライストロンの出力部と空胴入力部の方向性結合器からの信号をローレベル RF 系にフィードバックする。

大電力サーキュレーター台を用いた大電力伝送系のブロック構成図を Fig.3.2.5.2-20 に示す。導波管は WR-1500 により構成され、導波管路長は約 20m であり、この場合線路による 減衰量は約 0.05［dB］が見積もられる。構成機器のうち、最も損失が大きいのはサーキュレータであり、

減衰量は約 0.15 [dB]である。したがって全損失量は 0.2 [dB]となり、伝送電力の 5%が伝送線路で損失される。

3.2.5.2.5 IOT システム

クライストロンに替る有力な増幅管の候補として IOT (Inductive Output Tube) がある。IOT の構造は Fig.3.2.5.2-21 に示すように、球形電子銃のカソード、カソードに近接されて設置されたグリッド電極およびアノードの三極管の基本構成に、電子ビームが通過できるようにアノードに少孔が設けられ、その先に出力空胴とコレクターが設置される。ドライブ入力は、入力空胴を経てグリッドに印加される。このグリッドは負電位にバイアスされていてドライブ入力がカットされる部分があり、IOT の低出力領域はクラス B の動作特性を持つ 3 極管の働きをする。ドライブ電圧が高くなると、グリッドより電子ビームが引き出され、カソード-アノード間をドリフトしているうちに、電子ビームはバンチされ、更にアノードの少孔を通じて空胴に入り込む。この電子のバンチング現象でクライストロンと同様に出力空胴に高周波電界を誘起して、RF 出力を得ることが出来る。この結果、IOT は、三極管とクライストロンの両方の特性を有しており、その特徴を以下にまとめると、

- ドライブがない時、グリッドが不要な電子ビームを制御するので損失が少ない、
- クラス B で動作する、
- RF の入出力回路 (空胴)が分離でき、取り扱いが容易である、
- 電子ビームの走行距離が短いため、コンパクトである、
- 動作電圧が 30 kV 程度で低い、
- 寿命がクライストロンなみに長い、
- 高出力の動作実績が少なく、最大出力はパルス運転で 150kW、CW 運転で 50kW 程度である、
- ゲインが 20dB 程度と低く、2 段増幅が必要である、

などが挙げられる。

Fig.3.2.5.2-22 は、THOMSON 社製 IOT (TH760) の出力電力に対する効率および供給電力の特性を示す。動作点はビーム (カソード) 電圧が 28kV、グリッド電圧が 140V である。ビーム・グリッド電圧一定でドライブ電力を減少させ、出力を低下させるとビーム電流が減少し IOT 供給電力が減少する。したがって、動作効率は高効率を維持する。これは、入力がなくても一定のビーム電流が流れ電力を損失するクライストロンとは異なり、IOT のもつ大きな特長である。

低エネルギー端の超伝導空胴のような、ローレンツ力によるデチューニング量が大きく、バンド幅の狭い空胴をコントロールする場合、大きな RF マージンが必要となる。例えば動作点を定格出力の 1/2 に設定し 50%の RF マージンをとると、クライストロンでは動作効率が飽和効率 (60%) の半分の効率である 30%となり、IOT では Fig.3.2.5.2-22 より、約 50%の動作効率が得られる。従って、IOT は、低出力から定格出力まで出力可変範囲が広い、多くの RF マージンを必要とする空胴の駆動に適している。

しかしながら、現在動作実績のある IOT においては、その最大出力が低いため SC リニアックに適用する場合、1 空胴当たり 1 台の IOT 電源が必要となる。従って 4 空胴 RF 分配のクライストロンシステムと比較し 4 倍の管数が必要となる。またゲインが低いため 1kW 程度の前段増幅器も必要となる。

3.2.5.2.6 システム検討課題

本概念設計では、1 台のクライストロンにより 4 空胴をドライブし、パルス運転時には空胴をパルス励振する方式について検討を行なった。しかしながら、増幅管 1 台あたりの RF 分配数により、あるいは、空胴の CW／パルス励振ににより、制御方式、使用する増幅管などが異なる。クライストロン等の高出力の増幅管により多数の空胴を駆動する場合、RF ユニットの数が低減でき、信頼性が向上すると思われる。一方、個々のキャビティーのベクトル和により加速空胴の電場を制御するため、空胴の個別制御ができない。増幅管 1 台あたり 1 空胴を駆動する場合、管の最高出力が低減でき小型化でき、IOT などの低出力でも効率があまり低下しない管が使用できるが、管数が増えメンテナンスが煩雑となる。しかしながら、RF 制御に関しては、RF システムや空胴の擾乱の制御に対し柔軟性および拡張性があるとされている。1 増幅管あたり駆動できる空胴の数は重要な問題であり、建設・運転コスト、保守･操作性、ビームダイナミックス、RF 制御など包括的に検討し、RF 分配数を決定しなければならない。

3.2.5.3 ユーティリティー

低エネルギー加速部と高エネルギー加速部の RF システムで要する電源設備容量および冷却水容量について見積もる。電源設備容量はデューティの最も大きい CW 運転モードの要求電力で決定される。

3.2.5.3.1 低エネルギー加速部

低エネルギー加速部で最も電力を必要とする要素は、終段増幅器のプレート電源である。プレート電源への供給電力を Table 3.2.5.3.1 の RF 電力から見積もる。4 極管の動作効率は RF 出力の低い CW モードでもクライストロンと異なりそれほど低下しない。CW 運転時の動作効率を 50% と見積もると、5.9MW の全 RF 電力を発生させるのに 12MW の電力が必要となる。電源の交流-直流変換効率を 80%、力率を 0.8 とするとプレート電源で合計 18MVA の受電容量が必要となる。Table 3.2.5.3-1 は、前段アンプの電源も含めて RF 源の電源設備容量を記す。RF システムの全電源設備容量は約 20 MVA と見積もられた。

冷却水も最終段増幅器のプレート電極で最も多く必要とされる。四極管 4CM2500KG のカタログから、2.5MW のプレート電極損失に対し 720 リットル/min の冷却水量（純水）が必要とされているので（入出口での冷却水の温度差を 50 度にしている)、6MW の全プレート損失に対し 1730 リットル/min の冷却水が必要となる。その他に同軸管やアンプ出力空胴、直流電源の冷却にも純

水が必要であるため、2000 リットル/min 以上の冷却水が必要とされる。また、冷却系は、加速器の冷却系も含めて 15MW の冷却能力のもつシステムが必要となる。これは、低エネルギ加速部のビーム出力が CW モードで 5.33mA x 100MeV=0.5MW であり、電力の殆どが加速器構造体および RF アンプ、直流電源で消費されるためである。

RF システムからの気中放熱は一般に消費電力の 1 割程度といわれているが、そうすると電源で 300kW、増幅器で 600kW、トータルで 1MW 程度の気中放熱量となる。これでは、空調設備の容量が大きくなるので、水冷個所を増やし気中放熱量が少なくなる設計を行う必要がある。

3.2.5.3.2 高エネルギー加速部

Table 3.2.5.3-2 は、高エネルギー加速部の RF 源の負荷容量を示す。カソード電源の容量は負荷の最も大きい 2 期 CW 運転モードの値を用い、電源の力率が 0.8 として求めた。ローレベル電源には、前段アンプ、チューナ制御盤、高周波モニター盤容量を含む。クライストロン冷却装置は、コレクタで加熱された一次冷却水の熱交換器である。各負荷容量は単体容量と台数（71 台）から求められ、RF システムの全負荷容量は約 40 MVA が見積もられた。

RF システムの損失の大部分がクライストロンのコレクターで発生する。コレクター損失は、アノード電源の立ち上がり、立下り時間を無視すると、(コレクター損失)=(平均 DC 電力)－(平均 RF 電力)から求められる。Table 3.2.5.3-3 は、各運転モードでのコレクター損失と冷却水量を示す。コレクターへの冷却水量は、入出力の水温差で 20 度として求めた。

3.2.5.4 まとめ

本報告において NSP 大強度陽子加速器用 RF システムの設計概念を記述し、また、今後取り組むべき検討課題を明らかにした。

低エネルギー加速部の RF システムにおいては、四極管 4CM2500KG と TH628 のスクリーン電極での損失を評価しプレート損失が規格内に収まるプレート電圧を計算した。また両管の運転条件を求めた。システム検討においては、終段増幅器、直流電源、伝送系の基本設計を行なった。終段増幅器出力空胴は 3/4λ 共振の同軸構造とし、熱検討から水冷が必要であることが判明した。直流電源のコンデンサーバンクは大容量（500μF）であり、真空管保護のため高速応答のクローバ回路が必要である。伝送系は同軸管（DX-203）で構成し、内導体を水冷、外導体を空冷する。低エネルギー部の RF 源の検討課題は、終段増幅器における 1MW-CW 運転の長期安定性の実証であり、また、伝送系での同軸型電力分配器の開発である。

高エネルギー加速部の RF システムにおいては、RF 運転パターンを示し、ビームローディングに対する最適なカプラ結合定数、空胴デチューニング量を求めた。超伝導空胴において共振周波数の変動に対する加速電圧の振幅変動の影響は大きく、2 期 CW 運転モードにおける低エネルギー端空胴では、+/-6Hz の周波数の変動で振幅が 0.5%低下することを示した。これら振幅・位相の変動をコントロールするローレベル制御方式を記述し、今後、重要となる検討内容を挙げた。

高エネルギー加速部のシステム検討では、クライストロン 1 台当たり 4 空胴を駆動するシステ

ムを第一の候補として、効率および供給電力を見積もり、システム全体の基本設計を行なった。クライストロンは、ビーム電流の低い CW 運転で低効率で運転しなければらず、従って、供給電力はCWモードで一番高く約30MW必要となる。クライストロン直流電源の幾つかの方式の特徴を挙げ、サイリスタを用いた一般的な直流電源（AC スイッチ方式）では、膨大なコンデンサーバンク容積（約 100m^3）が必要であることが分かった。今後取り組むシステム検討の課題は、増幅管 1 台当りの駆動空胴数を決定することであり、建設・運転コスト、保守・操作性、RF 制御方式など包括的な検討・試験が必要である。

RF システム全体の電源設備容量は低エネルギー部で 20MVA、高エネルギー部で 40MVA であり、冷却水量は低エネルギー部、高エネルギー部でそれぞれ 2 ton/min、10 ～ 15 ton/min 程度必要である。

参考文献

1) 伊野浩史ら：JEARI-Tech 98-028 “原研大強度陽子加速器用 DTL-SDTL の概念設計”（19898）
2) 絵面栄二：OHO 97 “RF フィードバック” 第 4 章、（1994）

Table 3.2.5.1-1　低エネルギー加速部で要求されるRF電力と増幅管数

加速器構造	出射ビームエネルギー (MeV)	壁損失 (70%Q値) (kW)	RF要求電力* (16.7mA) (kW)	(30mA) (kW)	(5.33mA) (kW)	増幅管台数
RFQ	2	300	322	339	307	1
DTL1	7	387	471	538	414	1
2	30	1177	1562	1869	1300	2
3	51	1040	1392	1672	1152	2
SDTL1	54	129	173	208	143	
2	56	133	178	213	147	
3	59	136	182	218	151	1
4	62	140	186	222	155	
5	65	143	190	226	158	
6	67	147	193	231	162	
7	70	150	197	235	165	1
8	73	154	201	239	169	
9	76	157	205	243	172	
10	79	173	223	263	189	1
11	82	176	227	267	193	
12	85	180	231	272	196	
13	88	184	235	276	200	1
14	91	187	239	280	204	
15	94	191	243	284	208	
16	97	195	247	288	211	1
17	100	198	250	292	215	
合計		5379	7024	8335	5904	11

＊ 壁損失 + ビーム電力

Table 3.2.5.1-2　四極管実績リスト

メーカ	Tube No.	周波数 (MHz)	最大出力 (kW)	パルス	Duty (%)	平均出力 (kW)	効率 (%)
THOMSON	TH526	200	400	CW	100	400	46.0
		200	1600	1.2ms	20.6	330	53.7
		120	1000	CW	100	1000	65.0
THOMSON	TH628*)	200	1000	CW	100	1000	40
CPI	4CM2500KG	200	1000	1.25ms	12.5	125	62
		130	1700	5.4s	none	1700	81
SIEMENS	RS2074SK	100	1600	1ms	25	400	74

*) 設計値

Table 3.2.5.1-3　真空管、及びキャビティー内のロス

	TH628 (Diacrode)		TH526(Normal Tetrode)	
動作電圧	10 kV	15 kV	10 kV	15 kV
真空管内ロス	1.3kW	3.0kW	4.2kW	9.4kW
空胴のロス	1.6kW	3.6kW	3.3kW	6.7kW

Table 3.2.5.1-4　各主増幅管のスクリーン電極での損失

	アクティブエリアでの損失 (kW)				
動作電圧 Vrf (kV)	11	12	13	14	15
4CM2500KG	16.4	18.6	20.6	23.5	26.2
TH628	9.7	10.6	11.6	12.7	13.8

Table 3.2.5.1-5　1MW 動作時の各管の運転条件

	4CM2500KG	TH628
プレート電圧 (kV)	15.7	16
電流 (A)	98	96
スクリーン電圧 (V)	1500	1600
電流 (A)	3	3
グリッド電圧 (V)	350	300
電流 (A)	4.2	2
ドライブ電力 (kW)	45	32

Table 3.2.5.2-1　NSP リニアックの運転モード仕様

運転モード	加速粒子	ビーム電流 (mA)		デューティ	ビーム電力 (MW)
		ピーク値	平均値		
1 期 Pulse	H^-	16.7	10	2 ms/20 ms	1.5
2 期 Pulse	H^-	30	18	3.7 ms/20 ms	5
	$H^- + H^+$	30 + 30	18 + 18	5.9 ms/20 ms	8
2 期 CW	H^+	-	5.33	-	8

Table 3.2.5.2-2　各セクションごとの空胴RFパラメータ

Section /Beta	cavity No	E0 (MV/m)	TTF	Z/Q (ohm/m)	Q0	Vacc (MV)	Rth (ohm/cav)	Pwall (W)	Eenergy (MeV)	β	Beam Loading (W) 1st Pulse	2nd pulse	2nd CW
1	1	4.56	0.524	251	8.31E+09	1.33	3.20E+11	5.54	101.2	0.4300	1.15E+04	2.07E+04	6.14E+03
0.453	20	4.46	0.646	251	8.31E+09	1.61	4.86E+11	5.31	125.6	0.4711	1.39E+04	2.50E+04	7.42E+03
2	21	5.29	0.544	315	9.16E+09	1.77	5.24E+11	5.96	127.1	0.4734	1.53E+04	2.75E+04	8.15E+03
0.499	40	5.19	0.663	315	9.16E+09	2.11	7.79E+11	5.73	159.4	0.5187	1.83E+04	3.30E+04	9.76E+03
3	41	6.10	0.565	386	1.01E+10	2.33	8.37E+11	6.47	161.4	0.5213	2.02E+04	3.63E+04	1.07E+04
0.549	60	6.00	0.677	386	1.01E+10	2.75	1.20E+12	6.26	203.7	0.5697	2.38E+04	4.28E+04	1.27E+04
4	61	6.96	0.580	460	1.11E+10	3.01	1.28E+12	7.08	206.3	0.5724	2.61E+04	4.69E+04	1.39E+04
0.604	84	6.88	0.696	460	1.11E+10	3.57	1.84E+12	6.93	272.8	0.6319	3.10E+04	5.56E+04	1.65E+04
5	85	7.86	0.611	540	1.22E+10	3.94	2.01E+12	7.72	276.2	0.6346	3.42E+04	6.14E+04	1.82E+04
0.665	108	7.80	0.706	540	1.22E+10	4.52	2.69E+12	7.59	361.4	0.6917	3.92E+04	7.04E+04	2.08E+04
6	109	8.82	0.618	622	1.32E+10	4.93	2.83E+12	8.59	365.7	0.6942	4.28E+04	7.68E+04	2.28E+04
0.732	140	8.78	0.717	622	1.32E+10	5.70	3.82E+12	8.50	510.7	0.7617	4.94E+04	8.88E+04	2.63E+04
7	141	9.86	0.635	703	1.44E+10	6.24	4.07E+12	9.56	516.1	0.7638	5.41E+04	9.72E+04	2.88E+04
0.805	188	9.84	0.728	703	1.44E+10	7.14	5.35E+12	9.52	793.7	0.8403	6.19E+04	1.11E+05	3.29E+04
8	189	10.94	0.653	785	1.57E+10	7.83	5.74E+12	10.69	800.5	0.8417	6.80E+04	1.22E+05	3.62E+04
0.886	280	10.93	0.735	785	1.57E+10	8.82	7.29E+12	10.67	1471.8	0.9210	7.65E+04	1.38E+05	4.07E+04
	284	9.43	0.736	785	1.57E+10	7.62	7.30E+12	7.95	1498.2	0.9227	6.61E+04	1.19E+05	3.52E+04

E0：軸上平均加速電界、TTF: トランジットタイムファクター、Vacc:加速電圧(=E0 x TTF x キャビティ長)

Rth: シャントインピーダンス、Pwall: 壁損失、β: 粒子速度の光速との比

Table 3.2.5.2-2 各セクションごとの空胴RFパラメータ（続き）

Section	Optimum Copuling			Optimun detune (Hz)			Band width (Hz)			Filing time (s)		
/Beta	1st Pulse	2nd pulse	2nd CW	1st Pulse	2nd pulse	2nd CW	1st Pulse	2nd pulse	2nd CW	1st Pulse	2nd pulse	2nd CW
1	2.09E+03	3.75E+03	1.11E+03	43.5	78.1	23.1	151	271	80	2.11E-03	1.18E-03	3.97E-03
0.453	2.63E+03	4.72E+03	1.40E+03	54.7	98.4	29.1	190	341	101	1.68E-03	9.34E-04	3.15E-03
2	2.58E+03	4.63E+03	1.37E+03	48.7	87.4	25.9	169	303	90	1.89E-03	1.05E-03	3.55E-03
0.499	3.20E+03	5.75E+03	1.70E+03	60.5	108.7	32.2	210	377	112	1.52E-03	8.45E-04	2.85E-03
3	3.12E+03	5.61E+03	1.66E+03	53.7	96.4	28.5	186	334	99	1.71E-03	9.53E-04	3.22E-03
0.549	3.80E+03	6.83E+03	2.02E+03	65.4	117.5	34.8	227	407	121	1.40E-03	7.82E-04	2.64E-03
4	3.68E+03	6.62E+03	1.96E+03	57.7	103.6	30.7	200	359	106	1.59E-03	8.87E-04	2.99E-03
0.604	4.47E+03	8.03E+03	2.38E+03	70.0	125.7	37.2	242	435	129	1.31E-03	7.31E-04	2.47E-03
5	4.43E+03	7.96E+03	2.36E+03	63.0	113.2	33.5	218	392	116	1.46E-03	8.12E-04	2.74E-03
0.665	5.16E+03	9.28E+03	2.75E+03	73.5	132.0	39.1	255	457	135	1.25E-03	6.96E-04	2.35E-03
6	4.98E+03	8.95E+03	2.65E+03	65.4	117.5	34.8	227	407	121	1.40E-03	7.82E-04	2.64E-03
0.732	5.82E+03	1.045E+04	3.09E+03	76.4	137.2	40.6	265	475	141	1.20E-03	6.70E-04	2.26E-03
7	5.66E+03	1.017E+04	3.01E+03	68.0	122.2	36.2	236	423	125	1.35E-03	7.52E-04	2.54E-03
0.805	6.50E+03	1.168E+04	3.46E+03	78.2	140.4	41.6	271	486	144	1.18E-03	6.54E-04	2.21E-03
8	6.36E+03	1.143E+04	3.39E+03	70.4	126.5	37.5	244	438	130	1.30E-03	7.26E-04	2.45E-03
0.886	7.17E+03	1.289E+04	3.82E+03	79.4	142.6	42.2	275	494	146	1.16E-03	6.44E-04	2.18E-03
	8.32E+03	1.494E+04	4.43E+03	92.1	165.4	49.0	319	573	170	9.98E-04	5.56E-04	1.88E-03

Table3.2.5.2-3　SC リニアック RF 源のシステム効率と電力

運転モード		1期	2期		
		パルス	パルス	パルス*1)	CW
ﾋﾞｰﾑﾊﾟﾙｽ幅	(ms)	2	3.7	5.9	—
ﾋﾟｰｸ RF 電力	(MW)	14	25	25	7.5
平均ｸﾗｲｽﾄﾛﾝ効率	(%)	41	48	48	33
ﾋﾟｰｸ DC 電力	(MW)	34	53	53	23
平均ﾃﾞｭﾃﾞｨ*2)	(%)	18	23	38	100
平均 DC 電力	(MW)	5.8	12	20	23
AC 電力*3)	(MW)	7.3	15	25	29

*1) 正負イオン同時加速モード

*2) 立上がり時間 (=フィリングタイム)等を含む、

*3) AC-DC 変換効率 80%

Table 3.2.5.3-1　低エネルギー加速部 RF システムの電源設備容量

分類	機器名	単機容量*1) (kV)	台数	容量 (kVA)	電源
1MW アンプ	プレート電源	-	11	18000	3 相 6.6kV
	スクリーン電源	25	11	280	3 相 200V
	グリッド電源	5	11	55	3 相 200V
	フィラメント電源	18	11	200	1 相 200V
60kW アンプ	プレート電源	200	11	220	3 相 400V
	スクリーン電源	9	11	100	3 相 200V
	グリッド電源	0.8	11	10	3 相 200V
	フィラメント電源	4	11	44	1 相 200V
3kW アンプ	固体アンプ	8	11	88	3 相 200V
	制御盤	1	11	11	1 相 200V
冷却系	クーリングタワー	10	8	80	3 相 400V
	冷却ポンプ	30	8	240	3 相 200V
	純水ポンプ	100	8	800	3 相 400V
空調系	ヒートポンプ	20	8	160	3 相 200V
	ブロワー	9	8	72	3 相 200V
合計				20360	

1)　力率 0.8 として算出

Table 3.2.5.3-2　高エネルギー加速部 RF システムの電源設備容量

	容量 (kVA)	単機容量 (kVA)	電源
カソード電源	36000	-	三相 6.6 kV
アノード電源	500	7	三相 210 V
ヒータ電源	280	4	三相 210 V
収束コイル電源	850	12	三相 210 V
クライストロン冷却装置	1070	15	三相 210 V
ローレベル電源	500	7	単相 105 V
電源制御盤	570	8	三相 210 V
合計	39770		

Table 3.2.5.3-3　クライストロンコレクターの損失および冷却水量

運転モード	平均 DC 電力 (MW)	平均 RF 電力 (MW)	ｺﾚｸﾀｰ損失*2) (kW/kly.)	全ｺﾚｸﾀｰ損失 (MW)	冷却水量*3) (kλ/min)
1 期　パルス	5.8	1.4	100	4.4	3
2 期　パルス	12	4.6	120	7.4	5
パルス*1)	20	7.4	200	12.6	9
CW	23	7.5	300	15.5	11

*1) 正負イオン同時加速、　*2) 出力の最も大きい クライストロン #70 の値

*3) 冷却水温度上昇を 20 度に設定、流量(kλ/min) = 60･ｺﾚｸﾀｰ損失 / (1000･c_p･ΔT)

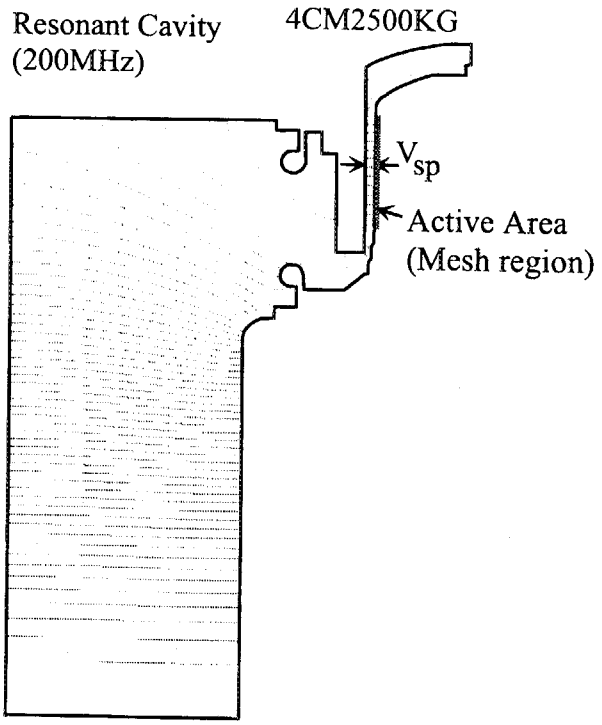


Fig. 3.2.5.1-1　シミュレーションコード SUPER-FISH の出力ファイル
四極管と出力空胴で200MHz共振空胴をつくり、
四極管アクティブエリアでの損失を評価する

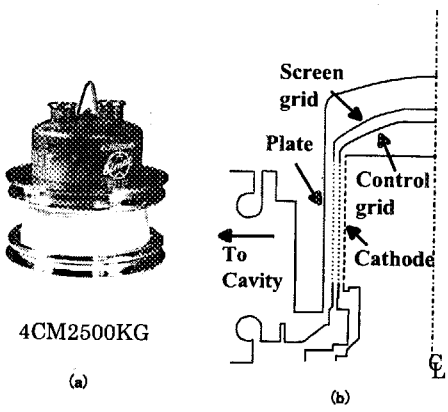


Fig. 3.2.5.1-2 4CM2500KG の概要
(a) 4CM2500KG 外観　(b) 管内の構造

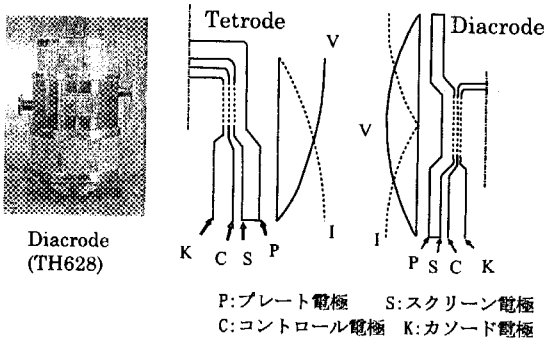


Fig. 3.2.5.1-3 TH628 の概要
(b) 管内の電圧(V)・電流(I)分布の比較

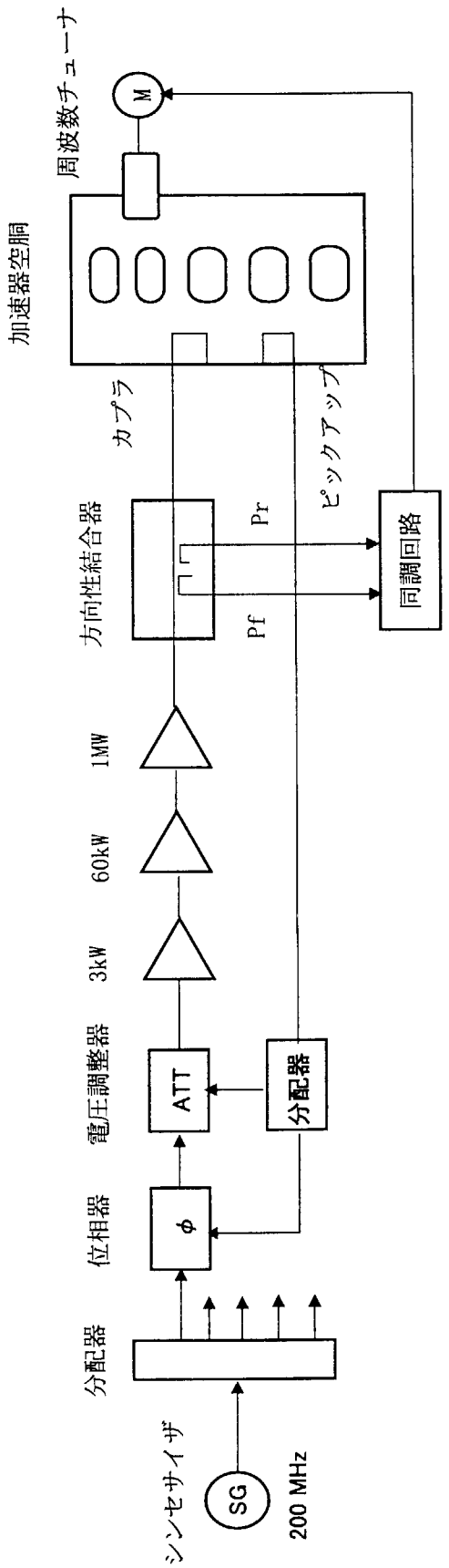


Fig. 3. 2. 5. 1-4 低エネルギー加速部のRFシステムブロック図

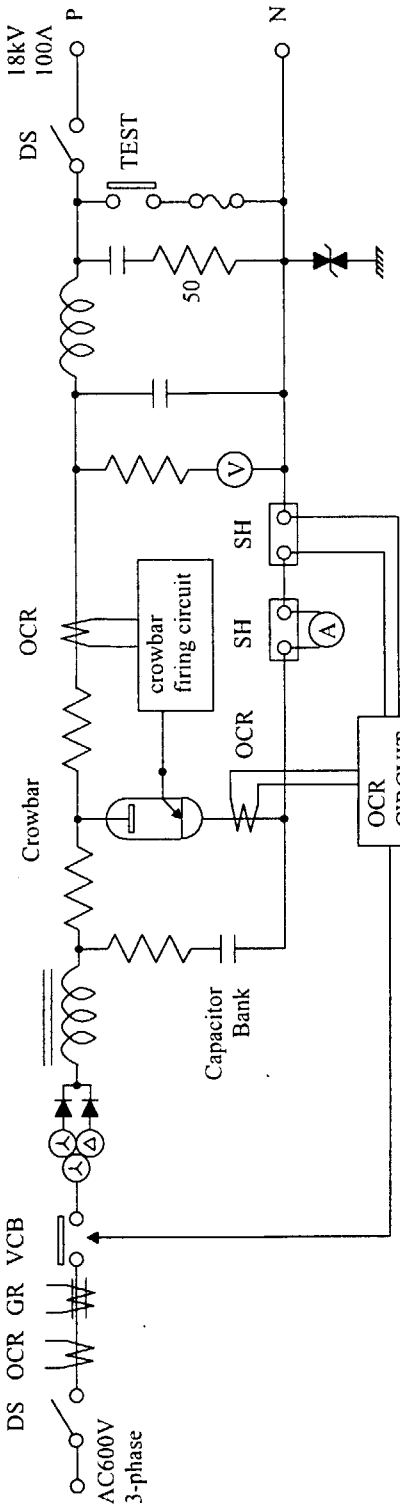


Fig. 3. 2. 5. 1-5 代表的なプレート電源構成図

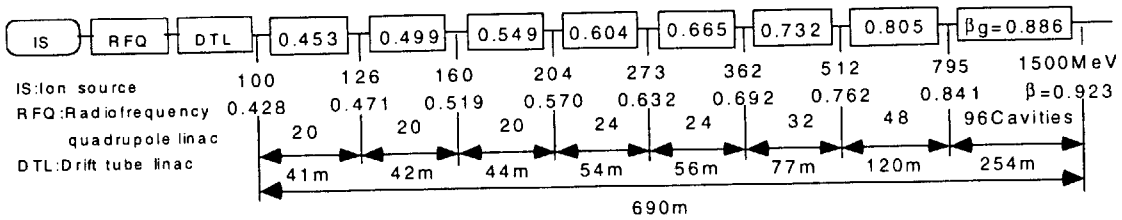


Fig. 3.2.5.2-1　超伝導加速器のβセクション構成図

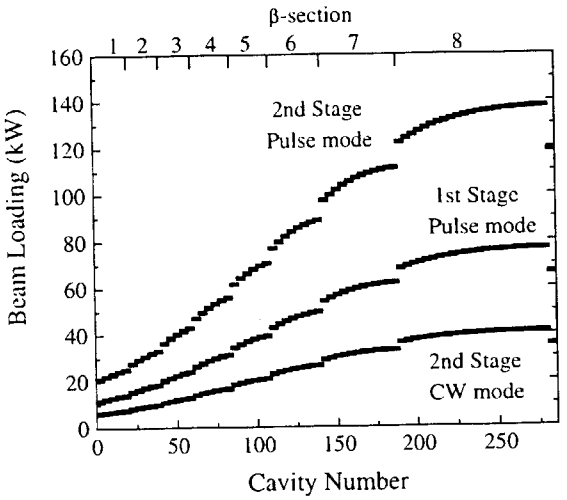


Fig. 3.2.5.2-2　各運転モードに対するビームローディング

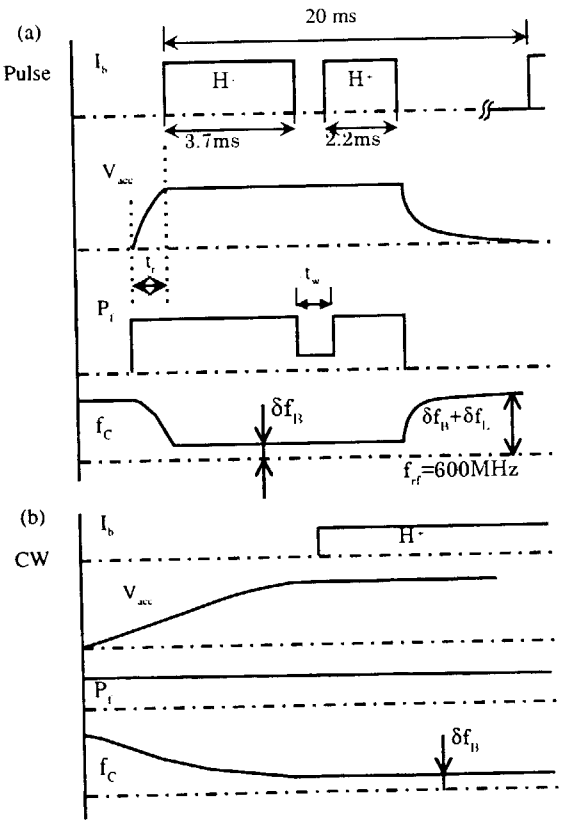


Fig. 3.2.5.2-3 超伝導空胴の
RF励振パターン
(a) パルス励振、(b) CW励振

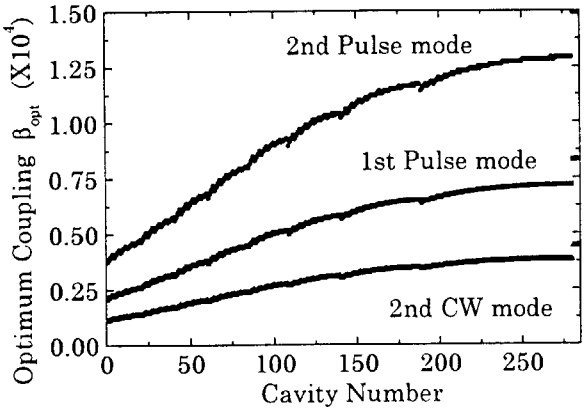


Fig. 3.2.5.2-4 (a) 各運転モードに対する空胴カプラーの最適結合度

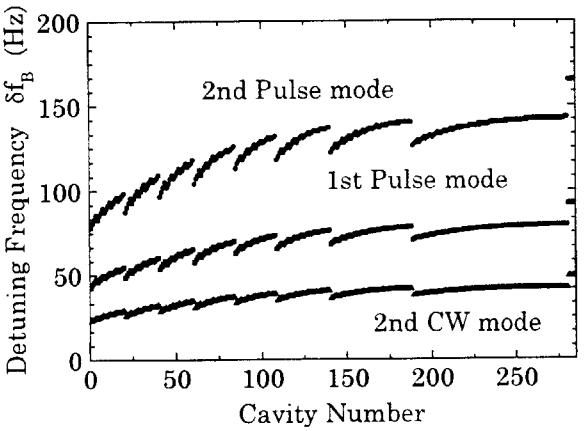


Fig. 3.2.5.2-4 (b) 各運転モードに対する空胴デチューニング周波数

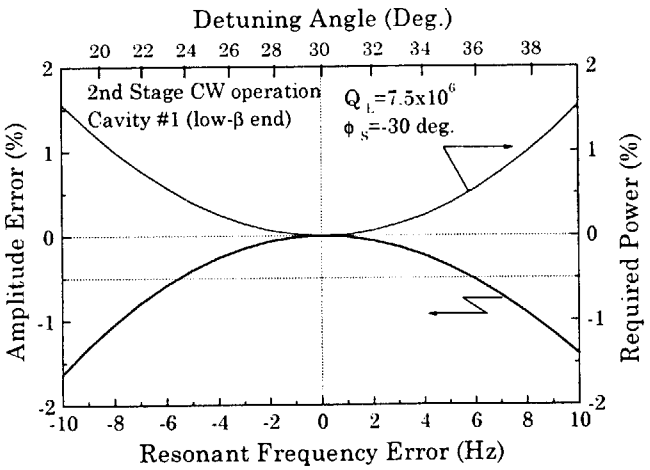


Fig. 3.2.5.2-5 空胴共振周波数エラーに対する加速電圧と電力増加比の関係
定常状態における空胴＃1の共振周波数のエラーに対する加速電圧の減少量（下線）
および加速電圧を一定に保つために必要な電力増加量（上線）

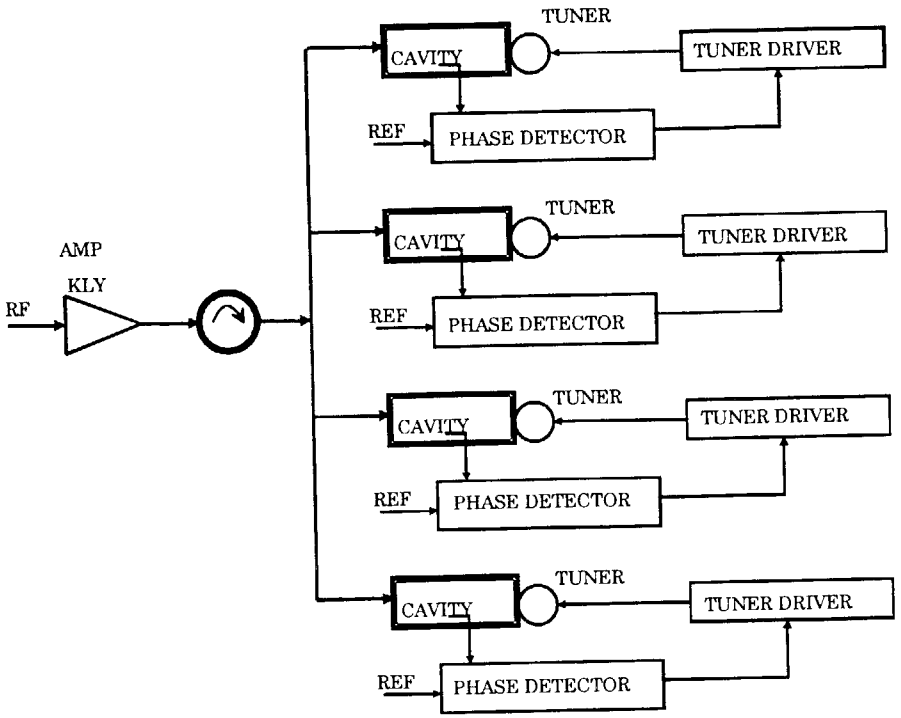


Fig. 3.2.5.2-6　空胴チューニング制御のブロック図

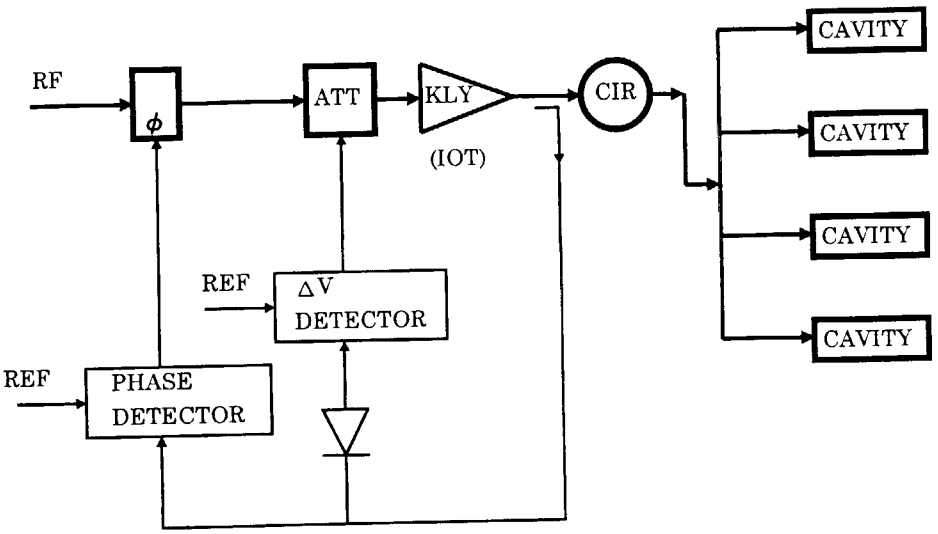


Fig. 3.2.5.2-7　増幅管出力制御のブロック図

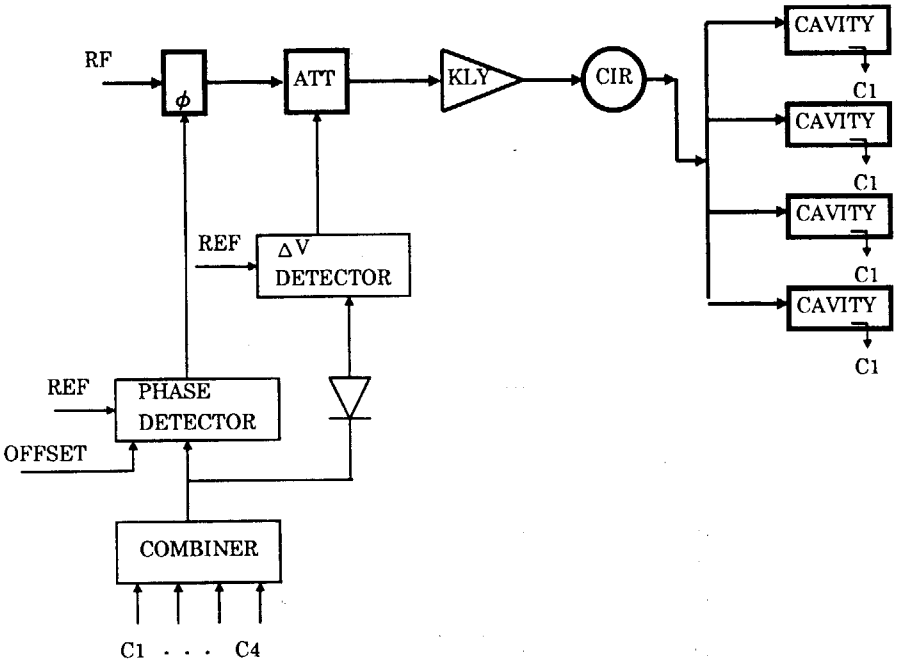


Fig. 3.2.5.2-8. 空胴電場制御のブロック図

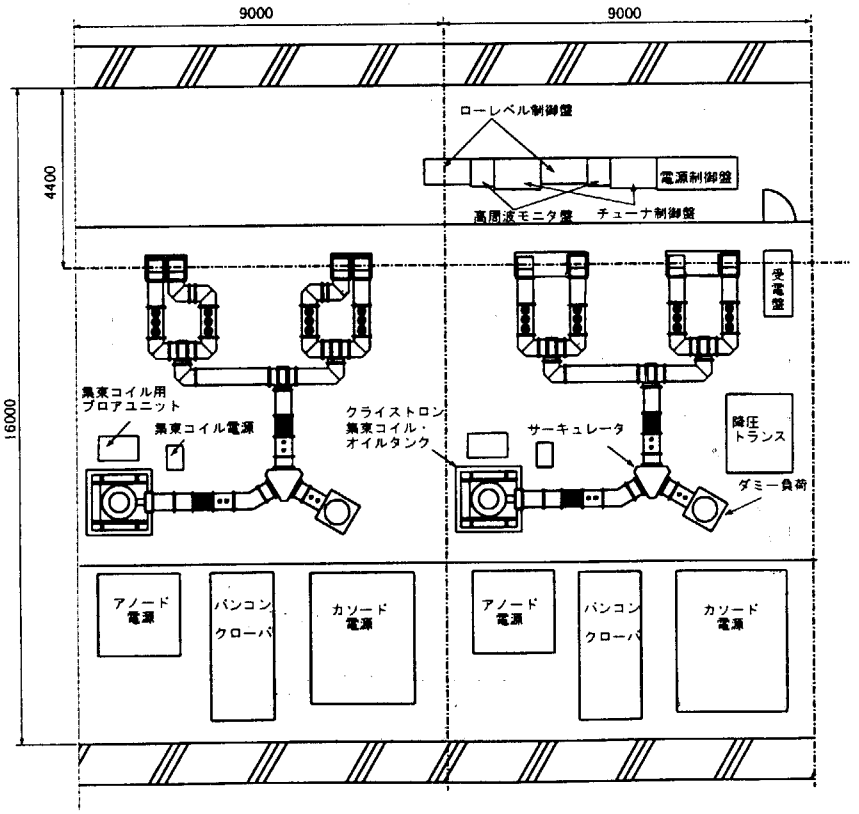


Fig. 3.2.5.2-9 RF 源室 平面配置例

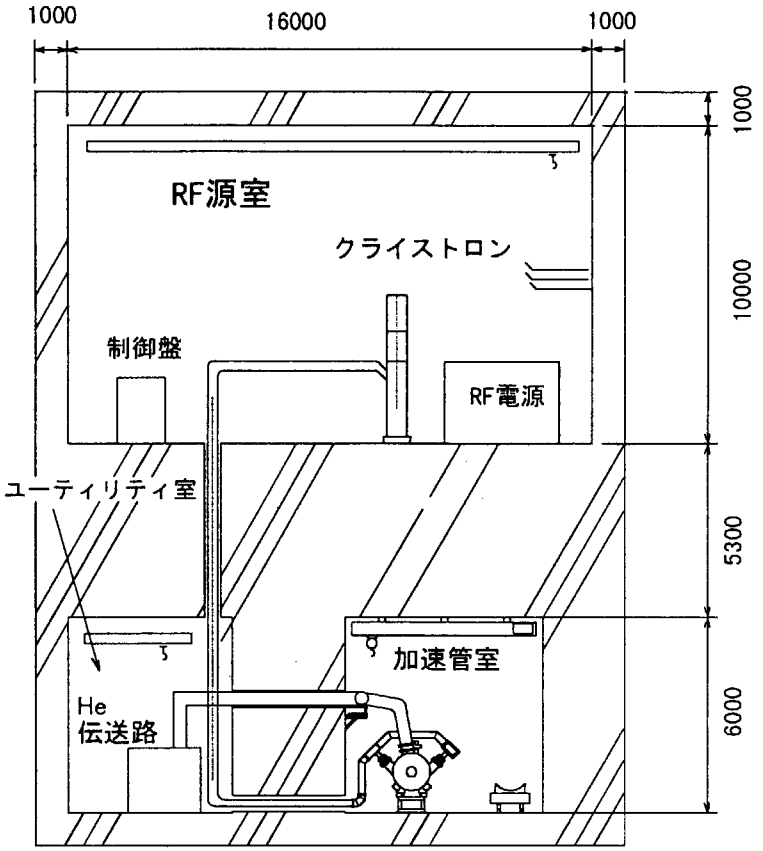


Fig. 3.2.5.2-10　加速器棟建屋 断面図

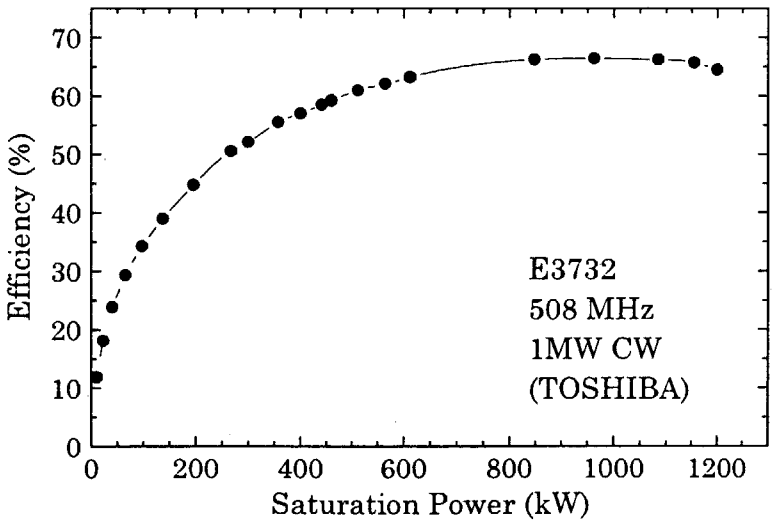


Fig. 3.2.5.2-11 クライストロン（E3732）の飽和出力に対する動作効率特性

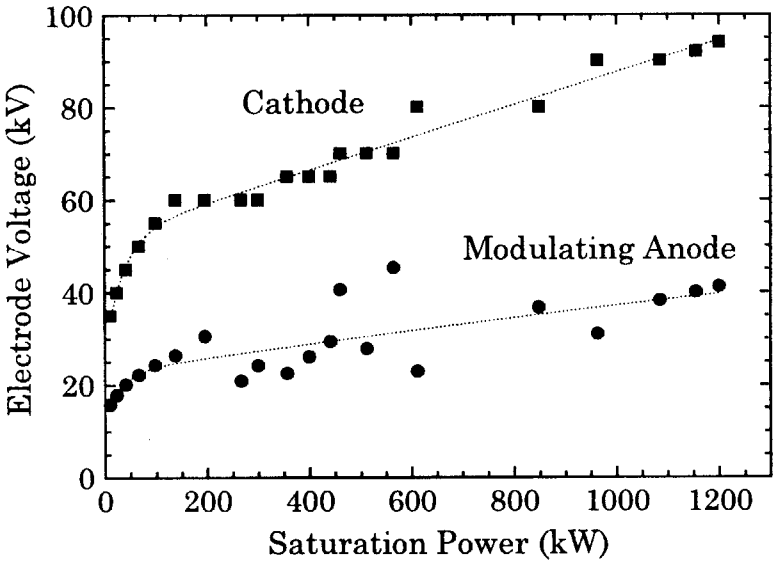


Fig. 3.2.5.2-12 クライストロン（E3732）の飽和出力条件
各飽和出力に対し最高効率が得られるカソード電圧
およびモジュレーティングアノード電圧

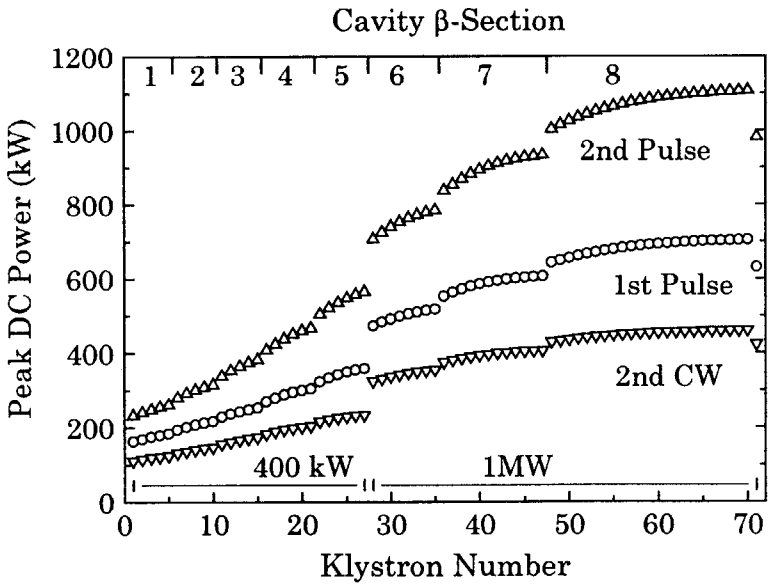


Fig. 3.2.5.2-13 各クライストロンに供給されるピーク直流電力

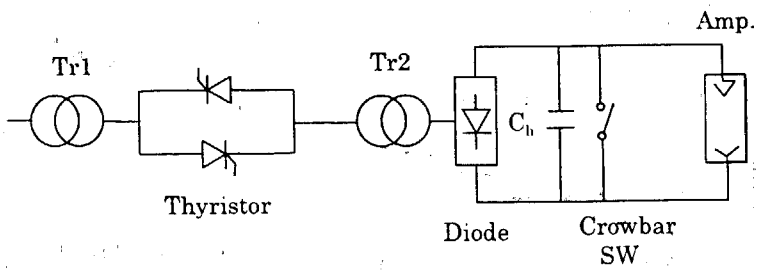


Fig. 3.2.5.2-14　AC スイッチ方式カソード電源

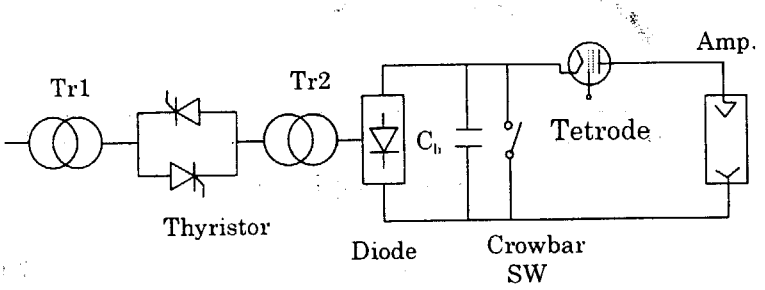


Fig. 3.2.5.2-15　AC スイッチ+四極管制御方式カソード電源

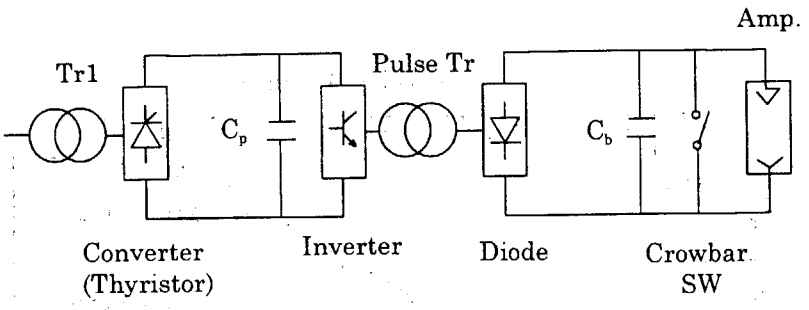


Fig. 3.2.5.2-16　インバータ方式カソード電源

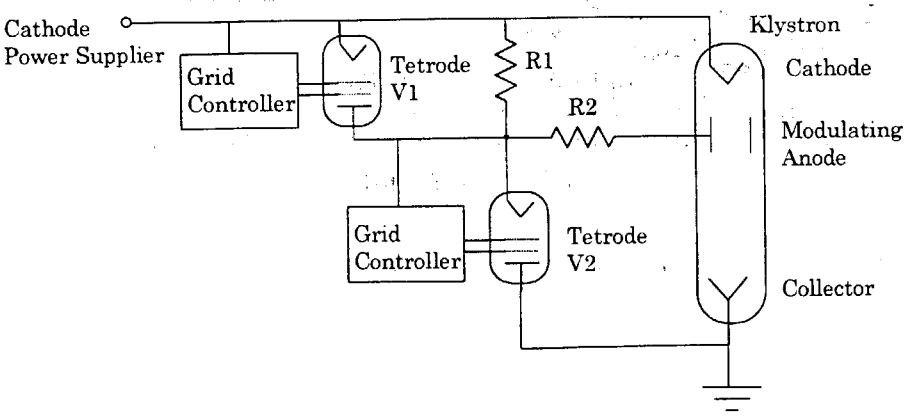


Fig. 3.2.5.2-17　四極管制御によるアノード電圧モジュレート方式

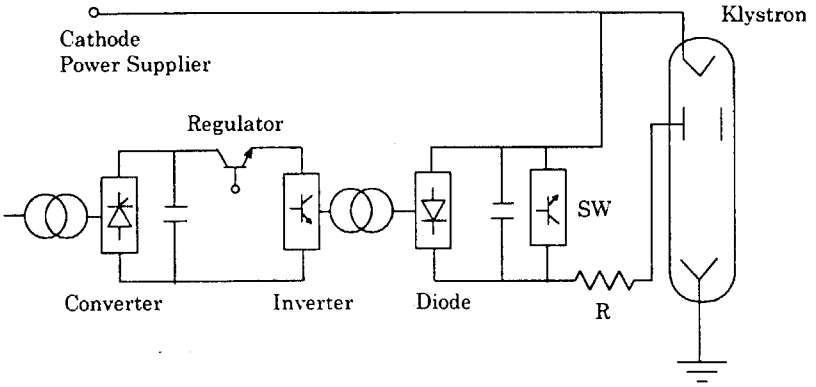


Fig. 3.2.5.2-18　インバータ電源によるアノード電圧モジュレート方式

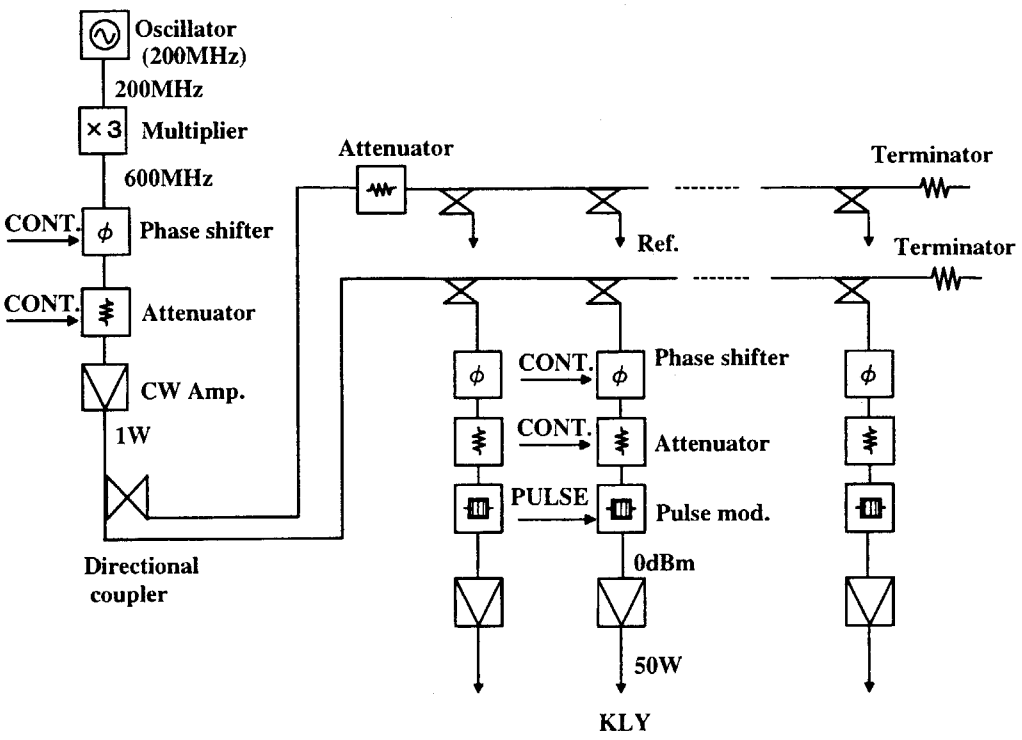


Fig. 3.2.5.2-19　低電力 RF 伝送系

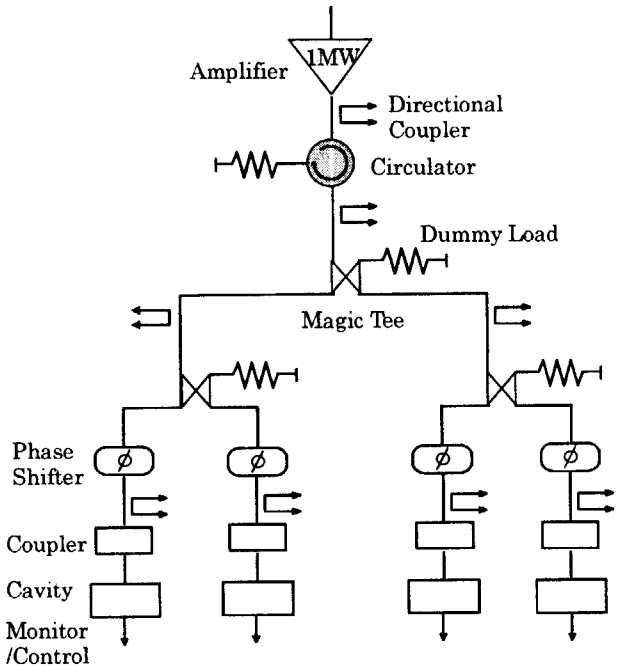


Fig. 3.2.5.2-20　大電力 RF 伝送系

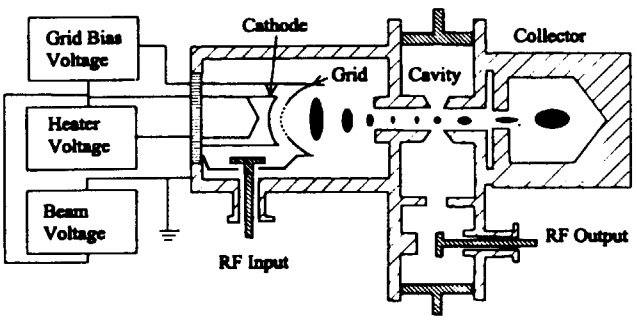


Fig. 3.2.5.2-21　IOT 内部構造模式図

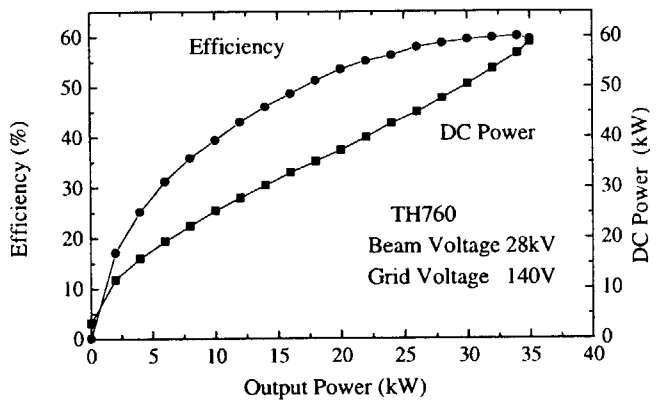


Fig. 3.2.5.2-22　IOT 動作特性

3.2.6 蓄積リング

陽子蓄積リングでは超伝導リニアックでビームエネルギー 1.5GeV まで加速したビームを蓄積し、中性子散乱実験用短パルス（パルス幅 1μs 以下）の高輝度ビームを生成する。蓄積ビームパワーは 5MW と非常に大きなため、中性子科学研究計画では 2 機の陽子蓄積リングを製作する予定である。この場合でも蓄積ビームパワーはリングあたり 2.5MW にも達し、わずかなビームロスでもハンドオンメンテナンスが困難となる。このためリングへのビーム入射方法、リング内でのビーム安定性、ビームロスの局在化など十分な検討が必要となる。また、リング及び入射領域のビームロスの低減には安定した入射ビームが前提条件となる。したがってリニアックからリングまでの高エネルギービーム輸送系でのビーム整形が非常に重要となる。以下、3.2.6.1 でリニアックからリングへの高エネルギービーム輸送系について、3.2.6.2 で陽子蓄積リングについて検討した結果を示す。

3.2.6.1 高エネルギービーム輸送系（HEBT）

高エネルギービーム輸送系(HEBT)とは超伝導リニアック出口と蓄積リングをつなぐビーム輸送系である。超伝導リニアックでビームエネルギー 1.5GeV まで加速された H^- ビームにハローが存在したり、時間的に位置、エネルギーが許容範囲を超えて変動するとリングでのビームロス増大につながる。そのため HEBT では、横方向(Transeverse)、縦方向(Longitudinal)のビーム整形を行い、リニアックで加速されたビームの質変動に起因する陽子蓄積リングでのビームロスの増大を防ぐ必要がある。また HEBT のもう一つの重要な役割は、リング入射部で入射に適したツウィスパラメータおよび分散関数となるようにマッチングを行うことである。これらのことを考慮してたシステムについて 3.2.6.1.1 節で HEBT のラティス、3.2.6.1.2 節でロスビームの処理、3.2.6.1.3 節で 2 機のリングにビームを振り分けるのに必要な振り分け電磁石について述べる。

3.2.6.1.1 HEBT

Fig.3.2.6.1-1 に高エネルギービーム輸送系(HEBT)の全体構成を、Fig.3.2.6.1-2 に HEBT のベータ関数及び分散関数を示す。図に示すように HEBT は大きく分けて縦方向のビーム整形を行うアクロマット領域、超伝導リニアックとアクロマット領域とのマッチング及び横方向のビーム整形を行う LABT 領域、そして、アクロマット領域と陽子蓄積リングとのマッチングを行う ARBT 領域の 3 領域に分けられる。Table 3.2.6.1-1 にこれらの 3 領域の取り合い点でのツウィスパラメータ及び分散関数を示す。以下、3.2.6.1.1.1～3.2.6.1.1.3 において各領域の設計概念を示す。

3.2.6.1.1.1 リニアックーアクロマットビーム輸送系（LABT）

リニアックーアクロマットビーム輸送系（LABT）では超伝導リニアックからのビームを

3.2.6.1.1.2節に示すアクロマット領域の入口に合うようにツウィスパラメータ及び分散関数の調整を行う。また横方向(Transeverse)のビーム整形を行うため位相進みで180deg程度のフリースペースを確保する。LABTでは分散関数がゼロであるので効率よく横方向のビーム整形を行うことができる。H^-イオンの第2電子は0.754eVという弱い結合エネルギーで結合している。このため、H^-イオンが数MV/cmの強い電磁場中に置かれると、ローレンツストリッピングによりH^0原子に変換する確率が増大する。このため使用する電磁石の磁場強度には制限がある。Fig.3.2.6.1-3に磁場強度に対するH^-残存率を示す。これよりローレンツストリッピングに起因するビームロスを10^{-5}以下に抑えるためには、最大ビームサイズの位置で感じる磁場強度を0.18T以下とする必要があることがわかる。現在の設計では、最大ビームサイズを12mmとして最大磁場強度は0.03T以下となっている。

3.2.6.1.1.2 アクロマットビーム輸送系

アクロマット領域では、縦方向(Longitudinal)のビーム整形を行う。縦方向の整形を行う領域ではベータ関数と比較して相対的に分散関数ηが大きいことが望まれる。そのため2カ所に分散関数ηが大きくなるようにラティスが構成されている。ハロー部分のH^-はその分散関数ηが大きい地点に設置した荷電変換フォイルによりH^+に変換した後、直後の四極電磁石によって発散力を受け直近のコリメータによって取り除かれる。この領域で使用する偏向電磁石、四極電磁石の強度は、ともにローレンツストリッピングに起因するビームロスを低減するため、最大ビームサイズでの有感磁場強度を0.18T以下とする必要がある。現段階での設計では偏向電磁石強度を0.18Tとし、四極電磁石強度も最大ビームサイズ40mmの点での最大磁場強度は0.09T以下となっている。偏向電磁石は1台あたり5.625度の偏向角を有する偏向電磁石16台を使用する。また、リニアック出口及びリングの入射点では周回ビームのフォイルヒッティング確率を低くするためη=0としている。そのため、アクロマットの出入口でダブルアクロマット（$\eta=\eta'=0$）の条件を満たす様にラティスを構成している。アクロマットを構成する最初の偏向電磁石はリニアックビームラインとリング入射ラインとのスイッチング機能を併せ持つ。

3.2.6.1.1.3 アクロマット-リングビーム輸送系（ARBT）

ビーム入射点において輸送系とリングのツウィスパラメータ及び分散関数が一致しないとエミッタンス増加やペインティング効果の低下を引き起こす。そのためアクロマット-リングビーム輸送系（ARBT）では整形されたビームを入射点でのリングのツウィスパラメータ及び分散関数に合うようにラティスを調整する。

3.2.6.1.2 ロスビームの処理

ビーム輸送系ではリニアックによってビームエネルギー1.5GeVまで加速されたビームを陽子蓄積リングまで輸送するだけでなく、蓄積リング入射部及び蓄積リング内でのビーム損失を許容

範囲内にまで低減させるため、ビーム整形を行う必要があることは前述の通りである。高エネルギービーム輸送系ではビームは H^- の状態で輸送されるため、ハロー部分は荷電変換フォイルを使用し H^+ に変換した後、ビームラインから軌道をずらせビームダンプもしくは輸送系内に設置されたコリメータへと導く。また、コリメータは複数箇所に設置し、傾き方向のハロー成分も取り除く必要がある。Fig. 3.2.6.1-4 に高エネルギービーム輸送系におけるコリメータの配置を示す。

3.2.6.1.2.1 横方向(Transverse)コリメータ

横方向(Transverse)のコリメートは輸送系の分散関数 η=0 の領域でベータ関数 β が大きなで行う。 x 及び y 方向のビームサイズは

$$x = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x} + \eta_x \frac{\Delta p}{p}, \qquad y = \sqrt{\varepsilon_y \beta_y} \tag{3.2.6.1-1}$$

で表されるので、ビームサイズにおける上式第一項のみでビームサイズが決まる。そのため効率よく横方向のハローを処理することができる。横方向に関してビームはベータトロン振動によって位置と傾きを変えながら輸送される。そのため、一カ所だけのコリメートではハローを完全に取り除くことは不可能である。そのため位相進みにしておよそ 180 度のコリメーション領域が必要となる。荷電変換フォイルを用いる場合、位相進みを関数として適当な周期ごとにフォイルを設置することによってハローの傾き成分もコリメートする事ができる。Fig. 3.2.6.1-5 に横方向コリメータの配置を示す。x 方向のコリメーション用荷電変換フォイルは発散用四極電磁石 QD と収束用四極電磁石 QF の間に適当な周期毎に配置する。これらのフォイルによって荷電変換されたビームは直後の QF で x 方向に発散力を受け直近のコリメータによって取り除かれる。同様に y 方向のコリメーション用荷電変換フォイルは QF と QD の間に配置する。これらのフォイルによって荷電変換されたビームは直後の QD で y 方向に発散力を受け直近のコリメータによって取り除かれる。今後これらの詳細検討を行う予定である。

3.2.6.1.2.2 縦方向(Longitudinal)コリメータ

縦方向(Longitudinal)のコリメータは輸送系で分散関数が大きくなる個所を作りそこで縦方向（運動量方向）広がりのコリメーションを行う。 x 方向のビームサイズは(3.2.6.1-1)式で表されるので、ビームサイズにおける第二項の寄与が大きくなっており、効率よく縦方向のハローを処理することができる。ビーム輸送系における縦方向のコリメーションは横方向とは異なり、振動運動をしていないため周期的にコリメータを設置する必要はない。Fig. 3.2.6.1-6 に 1 段目の縦方向コリメータの配置を示す。これは主として超電導空胴の故障等によって大幅に最終エネルギーが変動した場合に、アクロマット領域に進入したビームを除去するためのものである。この場合、H^- ビームは荷電変換フォイル部分で荷電変換され次の偏向電磁石でアクロマット軌道から分離し、輸送系外に設置されたビームダンプに導く。この部分の偏向電磁石は C 型を用いる。

一方、定常運転時の縦方向ハローを除去する縦方向コリメータの配置を Fig.3.2.6.1-7 に示す。ここではアクロマット領域に形成した長直線部の QF の手前に荷電変換フォイルを配置する。これによって荷電変換されたビームは QF によって x 方向に発散力を受け QF 直後のコリメータによって取り除かれる。アクロマット領域ではこのような縦方向コリメータを２カ所に配置できるように設計されている。

3.2.6.1.3　振り分け電磁石

第１期計画で建設した蓄積リングと第２期計画で増設した蓄積リングに入射ビームを振り分けるためにビーム振り分け電磁石が必要となる。ビームを２機のリングに振り分ける方法としては 670ns のミクロパルスごとに振り分ける方法と 1.86ms のマクロパルスに分けて振り分ける方法が考えられる。しかし通常のキッカー電磁石を用いた場合、充・放電、熱の制限から前者のミクロパルスで振り分ける方法は困難と思われる。一方、後者のマクロパルスで振り分ける場合の概念図を Fig.3.2.6.1-8 に示す。この場合、振り分け電磁石のフラットトップは 1.86ms 以上の長い時間が必要となる。また、マクロパルスの間隔はできるだけ短い方が好ましい。これはビーム不安定性の面からリング内にビームを蓄積しておく時間をできる限り短くする必要性からである。KEK で開発中の Long Flat Top キッカー電磁石[1]は立ち上がり 150ns、フラットトップ 1ms 程度まで達成している。今後さらに長い 1.86ms 以上のフラットトップを有するキッカー電磁石の開発が重要となる。

[1] T.KAWAKUBO et al.; "The Kicker Magnet System used to Generate a High Magnetic Field with a Fast Rise and a Long Flat Top", KEK Preprint 96-43 (1996)

3.2.6.2　蓄積リング

中性子科学研究計画では、２機の陽子蓄積リングで最大ビームパワー 5MW を達成すること目指している。現在、ビーム出力 2.5MW の陽子蓄積リングについての検討を行っている。現段階では、蓄積リングを構成する各項目に関して、詳細な検討は現在継続中であるので、検討結果の途中報告を行う。この節の構成は次のとおりである。3.2.6.2.1 では、リング内に安定に陽子ビームを蓄積するためのビーム安定性について述べ、3.2.6.2.2 では、現在検討中の２種類のラティスについて述べる。また、3.2.6.2.3 では、リングへのビーム入射システムについて、荷電変換フォイルと位相空間ペインティングを中心に述べる。3.2.6.2.4 では、蓄積ビームのバンチを安定に保つための RF システムについて述べ、最後に１ターン出射システムについて 3.2.6.2.5 で述べる。

3.2.6.2.1　ビーム安定性

ここでは、蓄積ビームの安定性について述べる。3.2.6.2.1.1 では、ビームパワー 2.5MW を得

るために必要な蓄積粒子数を求める。まず検討が必要な空間電荷制限に関しては、横方向について3.2.6.2.1.2で、縦方向については3.2.6.2.1.3で述べる。大強度陽子蓄積リングでのビーム不安定性としては、Microwave instability、Head-tail instability、e-p instability 等が考えられる。これらについて、それぞれ、3.2.6.2.1.4、3.2.6.2.1.5、そして3.2.6.2.1.6で述べる。

3.2.6.2.1.1 ビーム電流値

ビームパワー 2.5MW を得るために必要なリングの平均電流は、ビームエネルギーが 1.5GeV の場合、

$$I_{op}=2.5\times10^{6}\div1.5\times10^{9}=1.67[mA] \qquad (3.2.6.2\text{-}1)$$

となる。リニアックビームのピーク電流値を 30[mA]、パルス幅を t[s]、チョッピングファクタを 400/670 とすると、50Hz 運転の場合この平均電流 I_{op} は、

$$I_{op}= 30\times10^{-3}\times400/670\times t\times50 \qquad (3.2.6.2\text{-}2)$$

であるから、リニアックビームのパルス幅 t は 1.86[ms]となる。

従ってリングに蓄積される陽子の個数 N_p は、

$$N_p=30\times10^{-3}[A]\times1.86\times10^{-3}[s]\times400/670\div1.602\times10^{-19}[C]$$
$$=2.08\times10^{11} \qquad (3.2.6.2\text{-}3)$$

となる。この値をリングに蓄積される最大電流 I_{RING} で Table すと、

$$I_{RING}= N_p \times f_{beam} \times e$$
$$=2.08\times10^{11}\times1.492[MHz]\times1.602\times10^{-19}[C]$$
$$=49.75\ [A] \qquad (3.2.6.2\text{-}4)$$

となる。ここで f_{beam} はビームの周回周波数で $f_{beam}=h\beta c/C=1.492$[MHz]、e は素電荷量 1.602×10^{-19}[C]である。

3.2.6.2.1.2 横方向空間電荷制限

空間電荷効果によってビームが発散力を受けると、四極電磁石の実効収束力が弱まり、ベータトロン振動数が減少する（チューンシフト）。このチューンシフトにより動作チューンが共鳴線に近づくことによってビーム損失が生じる危険がある。動作チューンを ν、許容できるチューンシフトを $\Delta\nu$ とした場合、リングに安定に蓄積できる粒子数は、Laslette の式から、

$$N_{sp}=-\frac{0.5\pi b(a+b)\beta^{2}\gamma^{3}B(2\nu\Delta\nu)}{r_0RF} \qquad (3.2.6.2\text{-}5)$$

で求められる[1]。ここで a、b はそれぞれ水平及び垂直方向のビーム半径、F は image force 係数、r_0 は古典的陽子半径（$=1.584\times10^{-18}$m）、R はリングの平均半径（$=C/2/\pi=29.5$m）である。また、B はバンチングファクタで、

B=（バンチの平均密度）÷（バンチの最大密度）　(3.2.6.2-6)

により定義される。ここで粒子の進行方向分布をパラボリック分布で仮定すると、Bは、

$$B=\frac{2L_{beam}}{3L_{rf}} \qquad (3.2.6.2\text{-}7)$$

と表される。ここでL_{beam}/L_{rf}は、入射ビームのパルス構造から 400/670 であるので、バンチングファクタ B=0.398 となる。

(3.2.6.2-5) 式から、ビームサイズが大きくなるに従って、リングに蓄積できる粒子数N_{sp}も大きくなる。一方、ビーム輸送の観点から、リニアックから来るビームのエミッタンスならびに運動量の拡がりは、小さくなるように設計されている。このままでのビームサイズでは空間電荷制限に抵触してしまい、リングに蓄積できる粒子数が制限される。そこで、空間電荷制限を緩和するためエミッタンスと運動量の拡がりを制御し、ビームサイズを調整する必要が生じる。次にビームサイズをどの程度まで大きくすればよいかについて検討する。水平、垂直方向のビームの半径をそれぞれ a、b とし、a=b と仮定する。以下この値を平均ビームサイズと呼ぶ。(3.2.6.2-5) 式に B=0.395、F=1、$\Delta\nu$=0.1 の場合の平均ビームサイズの運転チューン依存性を Fig.3.2.6.2-1 に示す。この結果から、例えば、チューンν=3.75 の場合ビーム半径は、a=b≒26.2[mm]となる。

水平、垂直方向の平均ビームサイズは、それぞれのエミッタンス及びベータ関数、さらに分散関数と運動量分散を用いて、

$$a=\sqrt{\varepsilon_x\beta_x}+\frac{\Delta p}{\eta p}+COD$$

$$b=\sqrt{\varepsilon_y\beta_y}+COD \qquad (3.2.6.2\text{-}8)$$

と表すことができる[2]。ここで、COD とは closed orbit distortion のことで、COD の項には補正後の COD の値を用いる。この式から必要なエミッタンスの値を見積もることができる。リングのベータ関数の平均値$\langle\beta_x\rangle$、$\langle\beta_y\rangle$をそれぞれ、

$$\langle\beta_x\rangle=\langle\beta_y\rangle=15[m] \qquad (3.2.6.2\text{-}9)$$

とし、補正後の COD を 5mm と仮定して、運動量分散項を無視して考えると

$$\varepsilon_x=\varepsilon_y\fallingdotseq 30[\pi\,mm\cdot mrad] \qquad (3.2.6.2\text{-}10)$$

となる。この値は空間電荷効果の影響を考慮したときに、チューンシフトの値を 0.1 以下に抑えるために最低限必要な値である。

3.2.6.2.1.3 縦方向空間電荷制限

横方向で考えたのと同様に縦方向でも、蓄積粒子数が増加してくると、空間電荷効果によりビームは発散力を受ける。周回ビームはこの発散力により減速され、周回軌道からずれる。空間電荷効果による発散力は、高周波空胴等で外部から電圧を与えることにより、打ち消すことが可能である。ここでは、縦方向の空間電荷力を打ち消し、蓄積された粒子が周回軌道上を安定に周回するために最低限必要な電圧を求める。

縦方向の空間電荷制限を考慮した時のリングに安定に蓄積できる粒子数は次式で与えられる[3]。

$$N_{sp} = \frac{2Vhl^3}{3evR^2\, Im\,(Z/n)} \qquad (3.2.6.2\text{-}11)$$

ここで、Vは高周波電圧、hはハーモニック数、lはバンチ半幅、eは素電荷量、vは粒子の速度、Rはリングの平均半径である。Imはlongitudinal coupling impeadanceの虚数項で、

$$Im\,(Z/n) = \frac{g_0 Z_0}{2\beta\gamma^2} - \omega_0 L \qquad (3.2.6.2\text{-}12)$$

で表される。Z_n/n は longitudinal coupling impeadance、Z_0は真空インピーダンス (=377Ω)、ω_0は高周波空胴のrf角周波数、Lはダクト全体のインピーダンスを表す。g_0はcoupling factorと呼ばれ、真空ダクト半径r_dとビーム半径r_bを用いて次式で求められる。

$$1 + 2\ln(r_d/r_b) \qquad (3.2.6.2\text{-}13)$$

ここで、ダクトインピーダンスの項$\omega_0 L$を無視し、r_d/r_b=1.5 とすると longitudinal coupling impeadanceは

$$Im\,(Z/n)_{=}54.8\ [\Omega] \qquad (3.2.6.2\text{-}14)$$

となる。したがって、2.08×10^{11}個の粒子が周回軌道上を安定に周回するために最低限必要な電圧は、

$$V=3.9\ [kV] \qquad (3.2.6.2\text{-}15)$$

となる。

3.2.6.2.1.4 Microwave instability

Microwave instability はシンクロトロン振動と比較して非常に速い時定数をもつ不安定性である。Keil-Schnell Criterionより Microwave instabilityを抑えるには、

$$\mathrm{Im}\left(\frac{Z_n}{n}\right) = \frac{g_0 Z_0}{2\beta\gamma^2} < F \cdot \frac{m_0 c^2 \beta^2 \gamma |\eta|}{e I_{RING}} \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2_{FWHM} \qquad (3.2.6.2\text{-}16)$$

の条件を満たさなければならない事が導かれる[4]。F は form factor、m_0は粒子の質量、I_{RING}はリング内を周回するビーム電流値を表す。またηは slippage factor と呼ばれるパラメーターで、

$$\eta = \frac{1}{\gamma_t^2} - \frac{1}{\gamma^2} \qquad (3.2.6.2\text{-}17)$$

で定義される。ビームエネルギーが 1.5GeV の場合、$\gamma = 2.599$ であるので、$\gamma_t = 4.511$ の場合には$\eta = -0.099$となり、$\gamma_t = 5.59$ の場合には$\eta = -0.116$ となる。従って (3.2.6.2-16)式で F=1 と仮定すると、Microwave instability を抑えるためには入射ビームの運動量拡がり $(\Delta p/p)_{FWHM}$ は、それぞれ±0.365%、±0.337%より大きくする必要がある。

3.2.6.2.1.5 Head-tail instability

Head-tail instability の立ち上がり時間τは、ビーム強度が大きくない場合には一般的に、

$$\tau_{\pm}^{-1} = \mp \frac{Ne^2 W_0}{2\pi n_0 \gamma \omega_\beta} \frac{\xi z \omega_0}{\eta} \qquad (3.2.6.2\text{-}18)$$

と表される[5]。ここで、N は粒子数、e は素電荷、W_0は wake potential、m_0は粒子の質量、γは Lorentz factor、ω_βは粒子のベータトロン振動数、ξはクロマティシティ、z はシンクロトロン振動の振幅、ω_0は粒子の自由振動数、そしてηはスリッページファクタである。$\omega_0 \xi z/\eta$は head-tail phase と呼ばれる。式中の±の符号は、head と teil の粒子の運動を表し、+の場合は両方の粒子が同時に上下し、-の場合は別々に上下することを表す。前者を+モード、後者を-モードと呼ぶ。この式から分かるようにクロマティシティξをゼロに補正することで、この不安定性は抑えることができる。しかしながら、ビーム強度が大きくなると、いわゆる strong head-tail instability (transverse mode coupling instability とも言う) が起こり、ビームが不安定になる[6]。我々が現在検討中の陽子蓄積リングは、蓄積粒子数が 2.08×10^{11}個と大強度であるので、strong head-tail instability が起こる可能性がある。今後この点について検討を行う。

3.2.6.2.1.6 e-p instability

米国のロスアラモス国立研究所(LANL) の陽子蓄積リング(PSR)のビーム強度を制限している理由の一つが e-p instability であると考えられている[7]。e-p instability とは、何らかの理由で発生した電子によって誘発されるビーム不安定性をいう。この電子の発生原因としては、(1)荷電変換入射の際に H^-イオンからはぎ取られた電子、(2)リングの周回ビームが真空ダクトに

当たった際に起こる、マルチパクタリング、(3)残留ガス等が考えられる。ただ、e-p instability が観測された例は PSR 以外には過去に、CERN の Intersecting Storage Ring で観測されたのみである[8]。この加速器は非常に大強度（電流値数 A）で周回ビームは完全にデバンチされていた。これ以外にバンチビームを加速している加速器で e-p instability は現在のところ観測されていない。これらのことから、PSR のビーム強度を制限する原因の一つとしての e-p instability は現在のところ、推測の域を脱していない。しかしながら、e-p instability がビーム強度を制限する可能性がある以上は、先に述べた電子発生源をついての対策が必要である。また、それ以外に、ビームをデバンチさせないことが、最重要項目である。我々の蓄積リングに対して、これらの件についての定量的な検討は現在進行中である。

3.2.6.2.2 ラティス

リニアックからのビームのパルス構造が与えられたものとしてラティスの構造を検討した。リニアックからのビームのパルス構造が与えられ、リングのハーモニック数を決めればリング周長は一義的に決まる。次に入射機器、取り出し機器、高周波空胴などの直線部を必要とする機器の数量、サイズを見積もることでセル数の上限が決定される。セル数が決定されればおおよその動作チューンが決まることになる。

ラティスの構造としては FBDB ラティスから一方の偏向電磁石を抜いた FBDO ラティスや、さらに FBDO を発展させ分散関数の値がゼロの領域を持たせたもの、ダブレット、トリプレットを用いたラティスなどが考えられる。また、リング内に分散関数の値がゼロの領域をつくるか否かによってもラティスの構造は大きく変わる。大電流をリングに入射し、取り出す必要があるために、それぞれの領域で長い直線部が必要となる。本検討では、ラティスに分散関数の値がゼロの領域をもたせることを条件として、ラティスの検討を行った。以下に現在検討中の二種類のラティスについて述べる。

3.2.6.2.2.1 20 セル FODO ラティス

大強度の陽子ビームをリングに蓄積する場合、ビームサイズが局所的に急激に変化すると、ビームが不安定になる。従って、リングを周回するビームのサイズ、すなわち、ベータ関数の変化はリング一周にわたって滑らかであることが望ましい。FODO ラティスでは、ベータ関数の変化は他のラティスに比べて滑らかである。以下では分散関数の値がゼロの領域をもつ FODO ラティスの検討を行った結果を示す。

20 セルで超周期が 4 のチューンダイアグラムを Fig.3.2.6.2-2 に示す。この図では、チューン ν が 2～6 付近の 4 次までの構造共鳴とその他の 2 次までの共鳴が示してある。動作点は、チューンシフトが生じた場合であってもこれらの共鳴線から十分離れている点とする必要がある。今回の計算では動作点を暫定的に（ν_x、ν_y）＝（4.84、4.78）付近にとるようにした。またラティスを決定するに当たっては、分散関数の値がゼロの領域を作ること、リング 1 周にわたってビームサイズの変化をできるだけ小さくすることを考慮した。

20 セルリングの MAD による計算結果を Fig. 3.2.6.2-3 にリングの全体構成図を Fig. 3.2.6.2-4 に示す。このラティスは長直線部でダブルアクロマットの条件（エネルギー分散関数 η およびその勾配 η' がゼロ）を満たしており、入射ペインティングを行う際に、運動量の拡がりがフォイルヒッティング確率に影響を与えないようになっている。また、ミッシングベンドの手法により、分散関数の値が大きくなる領域に運動量方向コリメータ設置用のフリースペースを確保している。このラティスは FODO をベースに構成しているため、動作チューンも比較的広い範囲で変更可能である。Table 3.2.6.2-1 にパラメータを示す。

3.2.6.2.2.2 トリプルベンドアクロマティクラティス (Triple Bend Achromatic Lattice)

大強度の陽子ビームをリングに入射、蓄積し、取り出すためには、それらの機器を配置するために、長い直線部が必要となる。このとき分散関数の値がゼロであれば、ラティスがビームに与える影響が小さくなる。本ラティスでは、分散関数の値がゼロでしかも非常に長い直線部を持たせることが可能である。以下にダブレット四極電磁石を用いた TBA ラティスの検討結果を示す。

本ラティスでは、ベータ関数の最大値が x および y 方向でほぼ同じになるように、短直線部の四極電磁石の強さを長直線部がダブルアクロマットになるような条件で変化させた。

この結果、$(\nu_x, \nu_y)=(2.75, 2.75)$ の動作点でベータ関数の最大値をｘ、ｙ方向ともに３０ｍ以下にすることができた。この時のラティス関数のリングの１／４周分を Fig. 3.2.6.2-5 にリングの全体構成表を Fig. 3.2.6.2-6 に示す。長直線部（図の左側および右側で、四極電磁石間で 8.32x2=16.64m）でダブルアクロマットの条件を満たしている。短直線部の２組の四極電磁石は中央の入射用偏向電磁石から各々２ｍの距離に配置した。この動作点では、短直線部の四極電磁石の両側でｘおよびｙ方向のベータ関数の大小が逆転しているため、六極電磁石を配置する事でクロマティシティ補正が可能である。Table 3.2.6.2-2 にパラメータを示す。

3.2.6.2.3 入射システム

本リングでは、大強度の陽子ビームを蓄積する必要があるので、リングへのビーム入射方法としては、荷電変換入射を採用する。荷電変換入射では、リニアックで加速された H^- ビームからフォイルや強磁場により電子を２つはぎとり、H^+ ビームに変換しリングに入射する。この方法を用いると、位相空間上の同じ位置に何度もビームを入射することが原理的に可能であるために、大強度の陽子ビームをリングに入射することが可能となる。この節では、現在稼働中の陽子リングで用いられている二種類の荷電変換入射方式の概要を 3.2.6.2.1.3.1 で述べ、その後荷電変換フォイルの変換効率と温度上昇について 3.2.6.2.1.3.2 で述べる。また、H^- ビームの荷電変換入射の際生成される水素原子の励起状態について 3.2.6.2.1.3.3 で述べ、その処理及び入射ミスビームの処理方法を 3.2.6.2.1.3.4 で述べる。最後に、空間電荷効果及び周回ビームのフォイルヒット確率を低減させるために行う入射ペインティングについて 3.2.6.2.1.3.5 で述べる。

3.2.6.2.3.1 入射方式

ビーム入射の過程でまず問題となるのは、入射方法の選択である。現在稼働中のリングで用いられている入射方法には次の２種類がある。

(1)リング内の荷電変換フォイルにより H^- ビームを直接 H^+ ビームにする方法

(2)リング外で磁場により H^- ビームを H^0 ビームに変換し、その後リング内のフォイルにより H^+ ビームにする方法

(1)の方法は KEK-PS を始め、多くのリングで実際に採用されている方法であり、ESS や SNS 計画でも検討が進められている。一方(2)の方法は米国ロスアラモス国立研究所の PSR で採用されていたが、H^0 のハンドリングが不可能なため、入射時のビームロスが多く、最近では PSR でも(1)の方式に変更された。これらの点から、本蓄積リングでは、(1)の方法を採用することにする。入射方法の概略図を Fig.3.2.6.2-7 に示す。

この方法ではリング内に入射用偏向電磁石を設置し、その中央に設置したストリッピングフォイルで H^- ビームを H^+ ビームに変換する。次に荷電変換フォイルについて述べる。

3.2.6.2.3.2 荷電変換フォイル

リニアックで加速された H^- ビームは、荷電変換フォイルにより H^+ ビームに変換される。荷電変換フォイルとしては、炭素や酸化アルミが利用されている。荷電変換フォイルの材質や厚さを決定するためには、H^- ビームが H^+ ビームに変換される荷電変換効率とフォイルの寿命を検討することが重要である。フォイル材料として炭素を利用した場合の荷電変換効率と温度上昇について検討を行った結果を以下に述べる。

3.2.6.2.3.2.1 荷電変換効率

H^- イオンビームが物質中を通過する時に起こる荷電変換反応には、次のような６種類が考えられる。反応前後の電荷を(i, j)と書くと、電子を失う反応(-1, 0)、(-1, 1)、(0, 1)と、電子を捕獲する反応(1, 0)、(1, -1)、(0, -1)である。ここで、-1 は H^-、0 は H^0、そして、1 は H^+ を表す。H^- イオンビームのエネルギーが 100keV 以上になると、電子捕獲反応の断面積は非常に小さくなるなり無視できる。従って、H^- イオンビームが物質中を通過した後のビーム中の H^-、H^0、H^+ の割合を n^-、n^0、n^+ とし、物質中の通過距離を単位面積当たりの原子数 x で表せば、次の３つの微分方程式が得られる。

$$\begin{aligned} dn^-/dx &= -(\sigma_{10}+\sigma_{-11})\,n^- \\ dn^0/dx &= \sigma_{-10}\,n^- - \sigma_{01}\,n^0 \\ dn^+/dx &= \sigma_{-11}\,n^- + \sigma_{01}\,n^0 \end{aligned} \qquad (3.2.6.2\text{-}19)$$

ここで、σ_{ij} は電荷 i から j に変換する反応断面積である。x=0 で $n^-=1$、$n^0=n^+=0$ だから、

$$n^- = \exp\left[-(\sigma_{-10}+\sigma_{-11})\,x\right]$$

$$n^0 = \sigma_{-10}/(\sigma_{-10}+\sigma_{-11}-\sigma_{01})$$

$$\cdot \left[\exp(-\sigma_{01} x) - \exp\{ -(\sigma_{10} + \sigma_{11}) x \right] \qquad (3.2.6.2\text{-}20)$$

$$n^+ = 1 - n^- - n^0$$

である。

これらの式を用いて、H^-イオンビームが物質中を通過した後のビーム中の H^-、H^0、H^+の割合を求めるためには、電荷変換の反応断面積の値を知る必要がある。しかしながら、これまで 1.5GeV の H^-イオンビームが物質中を通過する時に起こる荷電変換反応の反応断面積は求められていない。従って、これまで求められている炭素と H^-イオンビームの反応断面積のいくつかの実験データを基に[9][10][11]、1.5GeV での反応断面積を見積もる。

Fig.3.2.6.2-8 に σ_{01} すなわち $H^0 \rightarrow H^+$の反応断面積と H^-イオンビームエネルギーの関係を示す。グラフの横軸は H^-イオンビームエネルギー、縦軸は反応断面積 σ_{01} の値である。これまでの実験データを基に最少自乗法により 1.5GeV での σ_{01} の値を見積もると 1.337×10^{-19} (cm^2/atom) となる。Fig.6.2-9 に $\sigma_{-10} + \sigma_{11}$ すなわち $H^- \rightarrow H^0$ 及び H^+となる反応断面積と H^-イオンビームエネルギーの関係を示す。横軸は H^-イオンビームエネルギー、縦軸は反応断面積 $\sigma_{-10} + \sigma_{-11}$ の値である。σ_{01} の値を見積もったのと同様に、最少自乗法で 1.5GeV での $\sigma_{-10} + \sigma_{-11}$ の値を見積もると 4.83×10^{-19} (cm^2/atom) となる。これらの結果より、σ_{01} の値は $1 \times 10^{-19} \sim 2 \times 10^{-19}$、そして、$\sigma_{10} + \sigma_{-11}$ の値は $4 \times 10^{-19} \sim 6 \times 10^{-19}$ の範囲にあると予測できる。それぞれの反応断面積の値が、これらの範囲にあるとして、(3.2.6.2-20)式からもとめた H^+、H^0、及び H^-の存在する割合の範囲を Fig.3.2.6.2-10 に示す。この図の横軸はフォイルの厚さ、縦軸は各粒子が存在する割合である。

荷電変換フォイルで H^+に変換されなかった粒子は、リング構成機器の放射化を防ぐためにリング外に取り出す必要がある。現段階の検討では、変換されなかった H^-及び H^0 を再度フォイルを通過させ 100%H^+としてリング外に取り出す予定である。

3.2.6.2.3.2.2 フォイルの温度上昇

入射ビームや周回ビームがフォイルを通過することにより、荷電変換フォイルの温度は上昇する。荷電変換フォイルの温度が上昇すると、主に昇華によりフォイルが破損すると考えられる。荷電変換フォイル材料として、炭素を用いた場合の温度上昇を以下の条件と仮定のもとで検討する。

【入射ビーム条件】

・入射ビームエミッタンス：2πmm・mrad

・フォイル位置でのβ関数：15m

これらの条件から、フォイルに入射されるビームの半径は約 5.5mm となる。

【仮定】

・入射ビームは円筒状で、半径 5.5mm、長さはフォイルの厚さと同じ。

・炭素フォイルの大きさは、ビームサイズと同じ（半径 5.5mm の円筒状）。

・発熱はビームが炭素フォイルを通過するときに失うエネルギー（ストッピングパワー）のみに

よる。

・放熱は輻射のみ。

・ビームがフォイルを通過する際は発熱のみで、この時の放熱は考えない。

フォイル厚さに対するフォイルの到達温度を Fig.3.2.6.2-11 に示す。この図でαは周回ビームのフォイルヒット確率である。結果から、フォイルの温度上昇には、周回ビームのフォイルヒット確率が大きく影響することが分かる。荷電変換フォイルに炭素を利用した場合の炭素の昇華温度は定かではないが、仮に 2000℃程度であると考えると、500μg/cm² の厚さの炭素フォイルを利用した場合、周回ビームのフォイルヒット確率αは0.7%以下にする必要がある。

3.2.6.2.3.3 水素原子の励起状態

H^-イオンビームがフォイルを通過後、全てのH^-イオンがH^+イオンに変換されるわけではなく、一部の粒子は励起状態にあるH^0原子（$H^0(n)*$）となる。ここで、nは主量子数である。このH^0原子が強磁場中を通過すると、$H^0(n)* \rightarrow H^+ + e^-$の反応により、$H^+$イオンに変化する。この反応が起こる時間、すなわち$H^0(n)*$の寿命は、励起状態のレベルと磁場強度によって決まる。

磁場中におけるH^0原子の励起状態の寿命τは、

$$\tau = \frac{\hbar}{\Gamma_{n,n_1,n_2,m}} \qquad (3.2.6.2\text{-}21)$$

で与えられる。ここで、hはプランク定数、$\Gamma_{n,n1,n2,m}$は励起状態（$n=n_1+n_2+m+1$）の共鳴幅である。Dumburg と Kolosov によれば、この共鳴幅は原子単位を用て次式で与えられる[12]。

$$\Gamma_{n,n_1,n_2,m} = \frac{(4R)^{2n_2+m+1}}{n^3 \cdot n_2!(n_2+m)!} \times \exp\left\{-\frac{2R}{3} - \frac{n^3F}{4}\left(34n_2^2 + 34n_2m + 46n_2 + 7m^2 + 23m + \frac{53}{3}\right)\right\}$$

ここで、 (3.2.6.2-22)

$$R = \frac{(-2E)^{\frac{3}{2}}}{F}$$

$$E = -\frac{1}{2n^2} + \frac{3}{2}n(n_1-n_2)F - \frac{n^4}{16}\left\{7n^2 - 3(n_1-n_2)^2 - 9m^2 + 19\right\}F^2$$

$$+\frac{3}{32}n^7(n_1-n_2)\left\{23n^2 - (n_1-n_2)^2 + 11m^2 + 39\right\}F^3 \qquad (3.2.6.2\text{-}23)$$

$$-\frac{n^{10}}{1024}\left\{\begin{array}{c} 5487n^4 + 35182n^2 - 1134m^2(n_1-n_2)^2 \\ +1806n^2(n_1-n_2)^2 - 3402n^2m^2 + 147(n_1-n_2)^4 - 549m^4 \\ +5754(n_1-n_2)^2 - 8622m^2 + 16211 \end{array}\right\}F^4$$

$$+\frac{3}{1024}n^{13}(n_1-n_2)\left\{\begin{array}{c} 10563n^4 + 90708n^2 + 220m^2(n_1-n_2)^2 \\ +98n^2(n_1-n_2)^2 + 772n^2m^2 - 21(n_1-n_2)^4 \\ +725m^4 + 780(n_1-n_2)^2 + 830m^2 + 59293 \end{array}\right\}F^5$$

F は電場強度で 5.13x10^{9}V/cm を単位とし、エネルギーは 27.2eV を単位とする。例えば、H^0 原子の基底状態のエネルギーを求める。上式に n=1、$n_1=n_2=m=0$ を代入して、E=-1/2 となるので、H^0 原子の基底状態のエネルギーは-13.6eV となる。この式を用いてエネルギーが 1.5GeV の H^0 原子の励起状態（n=4,5）の磁場中での寿命を計算した結果を Fig.3.2.6.2-12 に示す。

この入射方法ではフォイル通過時に H^+に変換されずに H^0 の励起状態にある粒子が入射用偏向電磁石の磁場を感じフォイルの位置以外のところで H^+に変換される粒子が存在する。これらの粒子はビームハローとなりリングの放射化を引き起こす。したがって磁場強度 B、偏向角 θ の入射用偏向電磁石を用いる場合、

$$\frac{\rho\sin(\theta)}{\beta c} = \frac{7.51\sin(\theta)}{B\beta c} \geq \tau \qquad (3.2.6.2\text{-}24)$$

となるような励起 H^0 は H^+に変化することなくリング外に取り出すことができる。しかしこの方法ですべての励起 H^+を処理することは不可能である。したがって n=4 以下の粒子をこの方法で処理するには Fig.3.2.6.2-12 より B=0.15[T]とすればよいことになる。

3.2.6.2.3.4 入射ミスビームの処理

n>4 の寿命の短い励起 H^0 は、偏向電磁石内のフォイル以外の場所で H^+となり、ビームハローとなってリングを周回することになる。従って何らかの方法でこのハローを取り除く必要がある。このハロー処理の概略図を Fig.3.2.6.2-13 に示す。詳細設計に際してはリングの構成機器との干渉を十分考慮する必要がある。

3.2.6.2.3.5 位相ペインティングシミュレーション

本リングでは横方向（Transverse）位相空間においてペインティングを行うことにより、空間電荷効果によるチューンシフトを抑えるとともに、フォイルヒッティングプロバビリティを低く抑える必要がある。これらの効果はペインティング関数に大きく依存するためシミュレーションが必要となる。そのため、予備的検討としてペインティングシミュレーションコードを作成し、評価を行った。ただし、現段階では空間電荷力、磁場誤差等の効果は入っていない。

3.2.6.2.3.5.1 ペインティングバンプを使用し、楕円分布をつくる場合

Fig.3.2.6.2-14 に示すペインティングパターンの場合、ペインティングにしたがって x 方向のバンプ軌道が外側に張り出すため、x 方向のダクトサイズを大きくとる必要がある。ここで使用したペインティング関数は、x 方向、y 方向の最大バンプ軌道変位をそれぞれΔx、Δy、入射時間を T としたとき、t の関数として次のように表す。

$$x = \Delta x(\frac{t}{T}), y = \Delta y\sqrt{1-\frac{t}{T}}$$

この場合、フォイルのサイズは入射領域以外にも周回ビームが当たる領域があるため若干大きくなる。また、ビームの入射領域以外にもリングアクセプタンスとフォイルが重なる領域があるため周回ビームのフォイルヒット確率も高くなる。しかし実空間の分布は円形に近く、密度分布も極端に高くなることはなく、粒子分布としては望ましい形になっている。Fig.3.2.6.2-15 はシミュレーションの結果である。

3.2.6.2.3.5.2 ペインティングバンプを使用し、長方形分布をつくる場合

Fig.3.2.6.2-16 に示すペインティングパターンの場合、x、y方向ともにバンプ軌道を徐々に下げアクセプタンスの中心から外側に向かってペインティングを行うため、ペインティング中にビームが外側に張り出すことがない。ここで使用したペインティング関数は次の通りである。

この場合、ダクトサイズも最小とすることができる。また、フォイルと周回ビームの重なる点は常に入射領域のみであるためフォイル自体小型のものでよく、周回ビームのフォイルヒット確率も最小となる。しかしこの方法では実空間分布が四角形となり、対角線上の粒子密度が高くなる傾向が見られる。Fig.3.2.6.2-17 はシミュレーションの結果である。

3.2.6.2.4 高周波空胴システム

本リングでは実効的な加速を行わないが、1μs 以下の出力ビームを達成するためにリング内でバンチ構造を保つ必要がある。このため高周波空胴が必要となる。以下、本リングで使用する高周波空胴について述べる。

3.2.6.2.4.1 基本周波数

高周波空胴の基本周波数 f_{rf} は

$$f_{rf} = h\beta c / C \qquad (3.2.6.2\text{-}25)$$

で求められる。現在の設計ではハーモニック数 h=1 としているので、高周波源に要求される周波数は、

$$f_{rf} = 1.492[\mathrm{MHz}]$$

となる。

3.2.6.2.4.2 空胴電圧

必要な高周波電圧 V_{rf} はビームの捕獲に必要な電圧 V_p と空間電荷効果による加速電場の打ち消し分 V_{sc} との和となる。

3.2.6.2.4.2.1 運動量拡がりΔp/pのビームを捕獲するの必要な電圧V_p

運動量の拡がりDp/pのビームを捕獲するの必要な電圧V_pは、

$$eV = \frac{h\kappa^2 |\eta| \beta^2 E \pi^3 B^2}{8q} \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 \qquad (3.2.6.2\text{-}26)$$

で求められる。ここでhはハーモニック数、κはdilution factorと呼ばれる因子でlongitudinal phase spaceでビームの占める面積と高周波バケットの面積の比でTableされる。ここではk＝2とした。入射ビームの運動量の広がり（Δp／p）は縦方向の不安定性を抑えるために必要な運動量幅に広げてあるものとする。またEは全エネルギー、qは荷電数、ηはスリッページファクタ、Bはバンチ幅÷高周波波長である。

3.2.6.2.4.2.2 空間電荷効果の電圧換算値V_{sc}

空間電荷効果による加速電圧の打ち消し分V_{sc}は、ビームの進行方向分布形状をパラボリックで近似した場合、

$$V_{sc} = \frac{3eg_0N}{4\varepsilon_0\gamma^2 R\Delta\phi^2} \qquad (3.2.6.2\text{-}27)$$

で求められる。ここでΔφはバンチ半幅を表し、ここでは入射ビームのバンチ構造が保存されるとして400／670×π[rad]とする。g_0は3.2.6.2-13式で表されるカップリング係数で、現段階ではr_d/r_b=1.5とし、g_0＝1.81とした。また、e_0は真空中での誘電率8.854×10^{-12}[F/m]、Rはリングの平均半径29.5[m]である。

以上より必要な高周波電圧V_{rf}はTable 3.2.6.2-3に示すようになる。

Table 3.2.6.2-3の値から、磁性体装荷型高周波空胴の単位長さあたりの発生電圧を10kV/mとすると、空胴の設置に必要な直線部L_{CAVITY}は、

L_{CAVITY} ＝2.5[m]

となる。

3.2.6.2.4.3 高周波空胴

Fig.3.2.6.2-18に高周波空胴の概念構造を、Table 3.2.6.2-4にその設計仕様を纏める。高周波空胴の構造は1/4波長半同軸共振器対向型とし、装荷する磁性体コアとして鉄基アモルファス系の磁性合金もしくはフェライトを採用する。加速勾配10kV/m以上を実現するため、コアは8本装荷し加速間隙に8kV（±4kV）を印加する。磁性体を選択する上で、高飽和磁束密度、高キュリー温度特性などを考慮する必要がある。また、ビームサイズが従来の陽子加速器と比べて大きいため、磁性体の製作にも注意が必要である。またビームの周回電流の変化に伴う共振周波数のずれ、シャントインピーダンスの変化なども十分考慮する必要がある。

3.2.6.2.4.4 縦方向シミュレーション

縦方向の安定性を考える場合、バンチングファクタが重要な意味を持つことになる。また、ビームを早い取り出し方法によってリングから取り出す場合、キッカー電磁石を立ち上げる時間（～150ns）に相当するビームの存在しない領域をリング内に確保する必要がある。これらを調べるために longitudinal 位相空間におけるビームシミュレーションコードを開発し、longitudinal 方向のシミュレーションを行っている。シミュレーションコードは位相空間における運動方程式

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\Delta E}{\Omega_s}\right) = \frac{qeV_{rf}}{2\pi}[\sin\phi - \sin\phi_s] \qquad (3.2.6.2\text{-}28)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{h\eta\Omega_s}{P_s R_s}\left(\frac{\Delta E}{\Omega_s}\right) \qquad (3.2.6.2\text{-}29)$$

を差分法によって解くことにより、粒子の運動をトラッキングする。ここでΔE は1ターンあたりのエネルギーゲイン、Ω_S は同期粒子の角周波数、q は電荷数、e は素電荷量、V_{rf} は高周波電圧、f_sは同期位相、h はハーモニック数、η はスリッページファクタ、P_sは同期粒子の運動量、R_sはリングの平均半径を表す。空間電荷効果は、各ターン（もしくは数ターン）ごとに粒子分布をフーリエ級数で求め、次式を用いて取り入れる。現段階ではビームローディングの影響は入っていない。

$$V_{sc} = \frac{eg_0 N}{2\varepsilon_0 \gamma^2}\frac{\partial\lambda}{\partial s} \qquad (3.2.6.2\text{-}30)$$

Fig.3.2.6.2-19 に現段階でのシミュレーションの一例を示す。Fig.3.2.6.2-19a は基本波空胴のみを利用した場合のシミュレーション結果である。下段の図が longitudinal 位相空間におけるビームの分布を示し、上段の図はそのときの空間電荷力を示している。図からわかるようにキッカー電磁石の立ち上げに必要なビームのない領域は十分確保できている。この場合のバンチングファクターは 0.33 であった。次に Fig.3.2.6.2-19b は基本波空胴に2倍高調波空胴を追加した場合のシミュレーション結果である。この場合も下段の図が longitudinal 位相空間におけるビームの分布を示し、上段の図はそのときの空間電荷力を示している。この場合、バンチングファクターは 0.45 となり、基本波空胴のみの場合と比較して 35%程度改善されていることがわかる。今後はバリア空胴を用いた場合のバンチビーム入射やコースティングビーム入射についても検討を行い、周回ビームのフォイルヒット確率への影響を調べる予定である。ちなみにリングにコースティングビームを入射することによって周回ビームのフォイルヒット確率の低減、入射時間の短縮などのメリットが考えられるが、その一方で一旦コースティングにしたビームを捕獲し直すには数 ms の時間が必要となる。この間、最大電流のビームをリング内に蓄積する事になるため、不安定性の検討を十分行う必要がある。また、この方法を用いた場合、e-p 不安定性がどの程度起こるかという点の考慮も必要である。

3.2.6.2.5 出射システム

リングに蓄積されたビームを取り出す方法としては、共鳴を利用した遅い取り出しとキッカー電磁石でビームを蹴り 1 ターン以内に取出す早い取出しがある。本リングでは、ユーザー側の要請から、早い取り出しを行う。以下で早い取り出しの検討を行う。

3.2.6.2.5.1 1ターン出射

リング入射ビームのパルス構造から、リング内にビームのある領域が 400ns で、ビームのない領域が 270ns である。1 ターン出射では、ビームのない領域でビーム取り出し用のキッカー電磁石を立ち上げ、ビームをリング外に取り出す必要がある。したがって、原理的には、270ns 以下の時間でキッカー電磁石が立ち上がればよい。しかしながら、縦方向のビーム拡がりを抑えるために最適化された高周波バケツを利用しても、蓄積粒子数が大きいために、縦方向にビームが拡がる。したがって、キッカー電磁石の立ち上がり時間は~150ns が必要である (Fig. 3.2.6.2-20)。ここで、簡単にキッカー電磁石のサイズ（長さ）を見積もってみる。Fig. 3.2.6.2-21 に速い取り出し方法の概念図を示す。$\beta_k \beta_s$はキッカー電磁石、セプタム電磁石の位置でのベータ関数値、l はキッカー電磁石の長さを表す。ここで d を蹴りだす大きさとした場合、蹴り出す角度はで与えられる。

$$\theta_K > \frac{d}{\sqrt{\beta_K \beta_S}} \qquad (3.2.6.2\text{-}31)$$

また、このとき必要な磁場強度は

$$B = \frac{B\rho}{l}\theta \qquad ; B\rho = 7.5\ [\mathrm{Tm}] \qquad (3.2.6.2\text{-}32)$$

で求められる。(3.2.6.2-31)、(3.2.6.2-32)式から Table 3.2.6.2-5 に示す条件で、ビームを蹴り出すのに必要な蹴り角 θ 及びキッカー電磁石の有効長を求める。

Table 3.2.6.2-5 の条件のもとで求めた蹴り角 θ とキッカー電磁石の有効長 l を Table 3.2.6.2-6 に示す。

今後ビームトラッキングにより、キッカー電磁石及びセプタム電磁石を考慮した取り出し軌道計算を実施し、キッカー電磁石を配置する位置等、ビーム出射に関する詳細な検討を行う予定である。

3.2.6.2.6 アップグレード

陽子蓄積リングでは、リニアックからのパルスビームを蓄積し、中性子散乱実験用の短パルス（<1μs）で大強度の陽子ビームを生成する。中性子研究計画では、2 つのステップに分けて建設を進める予定である。第一期では、加速器はパルスモードで運転し、平均加速電流値は 1mA を目指す。第二期では、平均電流 3.33mA のパルス運転と 2mA の連続運転を両立させ、合計で平均加速電流値は 5.33mA を達成する。陽子蓄積リングからのビーム出力は、第一期では 1.5MW、

第二期では5MWに相当する。リニアックのパルスビーム条件をTable 3.2.6.2-7に示す。

第一期と第二期とでは、平均電流値で 3 倍以上もの大きな違いがあるので、この二段階の開発のみで、蓄積リングの出力パワーを一気に増加させることは大変困難である。そこで、陽子蓄積リングに関しては、以下に示すように、リニアックの増強計画とは別のステップで出力パワーの増加を行う。

①第一期でビームパワーが2.5MW出力可能なリングを建設する。

②リニアックの出力にあわせて、ビームパワー1.5MWの出力を達成する。

③リニアックビームのパルス幅もしくはピーク電流を増加し、ビームパワー 2.5MW の出力を達成する。

④第二期で同じリングをもう一つ建設し、2つのリング合計でビームパワー5MWの出力を達成する。

参考文献

[1] C.Bovet, R.Gouiran, I.Gumowski, K.H. Reich : A SELECTION OF FORMULAE AND DATA DSEFUL FOR THE DESIGN OF A.G. SYNCHROTORONS, DERN/MPS-SI/INT. DL/70/4, APRIL, 1970

[2] 例えば、OHO'84 pII-33

[3] A. Hofmann, Proc. Erice School, CERN77-13(1977) p139

[4] E. Keil and Schnell, CERN-ISR-TH-RF/69-48 (1983)

[5] 例えば、A.W. Chao, PHYSICS OF COLLECTIVE BEAM INSTABILITIES IN HIGH ENERGY ACCELERATORS p201

[6] 例えば、A.W. Chao, PHYSICS OF COLLECTIVE BEAM INSTABILITIES IN HIGH ENERGY ACCELERATORS p129

[7] D. Neuffer et al., Nucl. Instru. and Meth. A321, 1(1992)

[8] H.G. Hereward, CERN Internal Report 71-15(1971)

[9] E.Acerbi et al. ; Lett.Nuovo Cimento 10, 598 (1974)

[10] Robert C.Webber et al. ; IEEE Trans., vol. NS-26. No.3 June 1979

[11] M.S.Gulley et al. ; Phys. Rev. A 53, 3201 (1996)

[12] R.J. Dumburg and V.V. Kolosov ; "Theoretical studies of hydrogen Rydberg atoms in electric fields", eds. R.F. Stebbings and F.B. Dunning, "Rydberg states of atoms and molecules", Cambridge University Press, 1983, pp31-71

Table 3.2.6.1-1　ツウィスパラメータ及び分散関数

	βx	αx	βy	αy	ηx	ηx'	ηy	ηy'
OUT LINAC /IN LABT	15.3	1.1	30.0	-1.9	0.0	0.0	0.0	0.0
OUT LABT /IN Achromat	6.5	-0.014	36.3	0.001	0.0	0.0	0.0	0.0
OUT Achromat /IN ARBT	6.5	-0.014	36.3	0.001	0.0	0.0	0.0	0.0
OUT ARBT	15.0	-1.8	5.5	0.75	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 3.2.6.2-1 FODO ラティス基本パラメータ

Super Periodicity	4
Operating Tune	(4.84, 4.78)
Chromaticity	(-4.70, -5.28)
Transition γ	4.511
Acceptance	200 π mm. mrad
Δp/p	±0.365%

Table 3.2.6.2-2 TBA ラティス基本パラメータ

Super Periodicity	4
Operating Tune	(2.75, 2.75)
Chromaticity	(-3.52, -6.01)
Transition γ	5.59
Acceptance	200 π mm. mrad
Δp/p	±0.34%

Table 3.2.6.2-3　必要高周波電圧（基本波のみ）

	20 セル FODO	TBA
V_ρ	15.3	15.3
Δp／p	0.37%	0.34%
η	-0.099	-0.116
V_{sc}	7.4	7.4
V_{rf}	22.7	22.7

Table 3.2.6.2-4　磁性体装荷型加速空胴の設計

運転周波数	1.49 MHZ	
加速間隙電圧	8 kV	
インピーダンス	230 ～ 460Ω	
空胴形状	1／4波長半同軸型共振器×2	
	空胴長	800 mm
	外導体直系	1170 mm
	内導体直系	300 mm
加速間隙	間隙長	30 mm
	設置数	1
コア形状	環状型	
	外直系	930 mm
	内直系	520 mm
	幅	26 mm
コア装荷数	8	

Table 3.2.6.2-5　キッカー電磁石の蹴り角を求めるための条件

	20 セル FODO	TBA
ビーム半径	40mm	75mm
セプタム厚さ	10mm	10mm
蹴り出す大きさ d	90mm	160mm
キッカー電磁石位置でのβ関数の大きさ β_k*	10m	17m
セプタム電磁石位置でのβ関数の大きさ β_s	10m	10m

*TBA ではβ＝２７m とβ＝７m の位置にキッカー電磁石を設置することを検討しているため、その平均値として、β_k=17m とする。

Table 3.2.6.2-6　キッカー電磁石の蹴り角及び有効長

	20 セル FODO	TBA	
蹴り角 θ	9mrad	12mrad	
キッカー電磁石の蹴り角	9mrad	4mrad	8mrad
キッカー電磁石の磁場強度	0.02T	0.03T	0.03T
キッカー電磁石の有効長 l	3.4m	1m	2m

Table 3.2.6.2-7　リニアックパルスビーム条件

	第一期	第二期
ピーク電流	16.7mA	30mA
パルス幅	2ms	3.7ms
繰り返し	50Hz	50Hz
マイクロパルス構造	400ns：ON、270ns：OFF	400ns：ON、270ns：OFF
平均ビーム電流	1mA	3.33mA
粒子数	1.25×10^{11} particles	4.17×10^{11} particles
出力ビームパワー	1.5MW	5MW

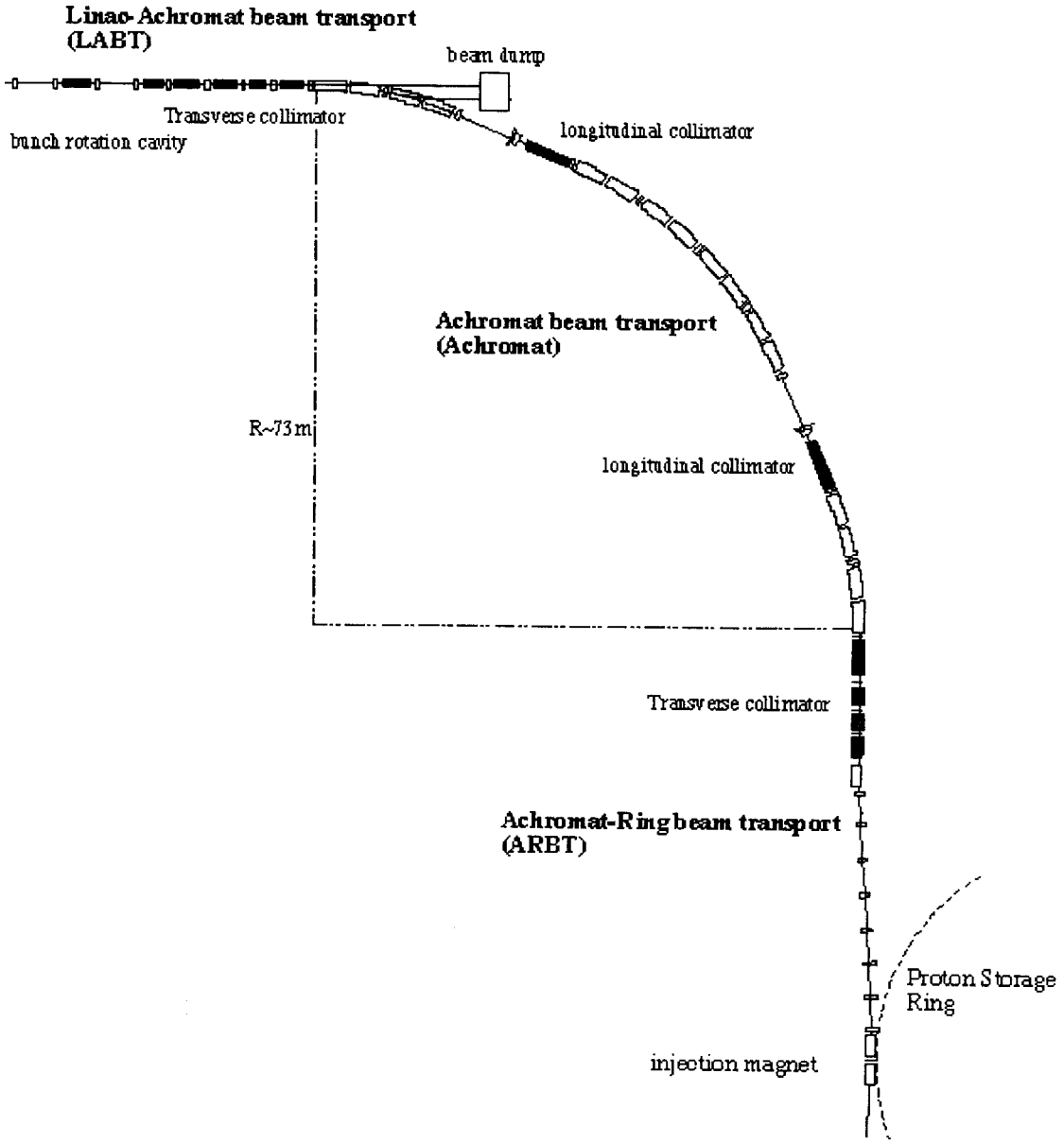


Fig. 3.2.6.1-1　高エネルギービーム輸送系(HEBT)の全体構成

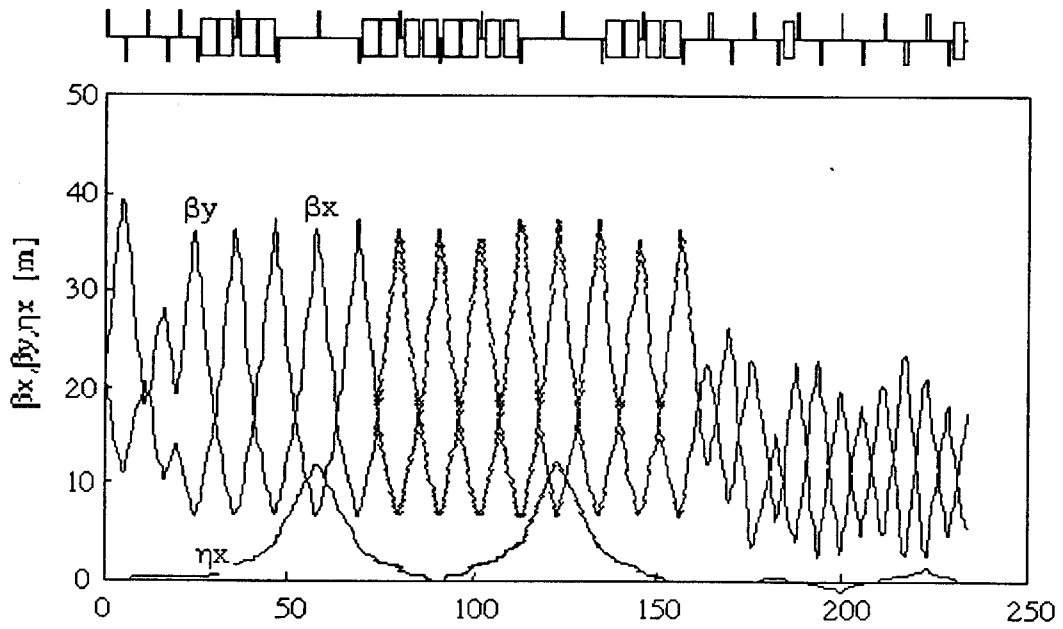


Fig. 3.2.6.1-2　HEBT のベータ関数及び分散関数

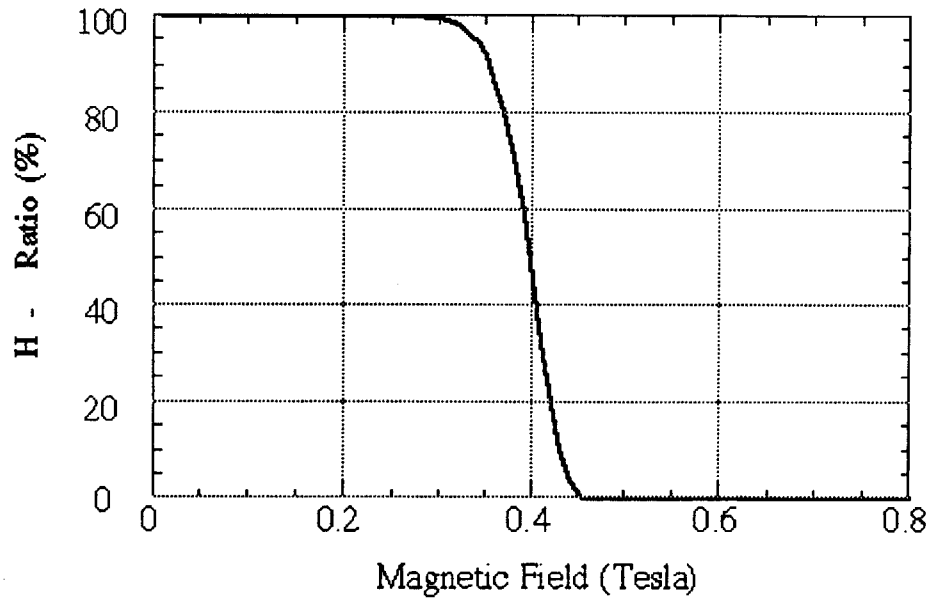


Fig. 3.2.6.1-3　磁場強度に対するH⁻残存率

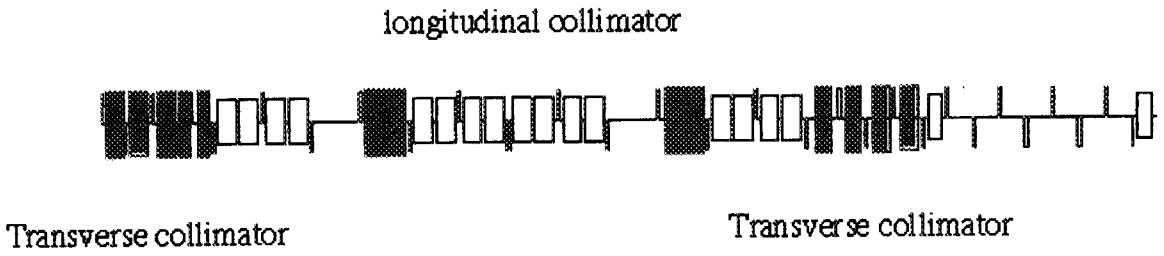


Fig. 3.2.6.1-4　高エネルギービーム輸送系におけるコリメータ配置図

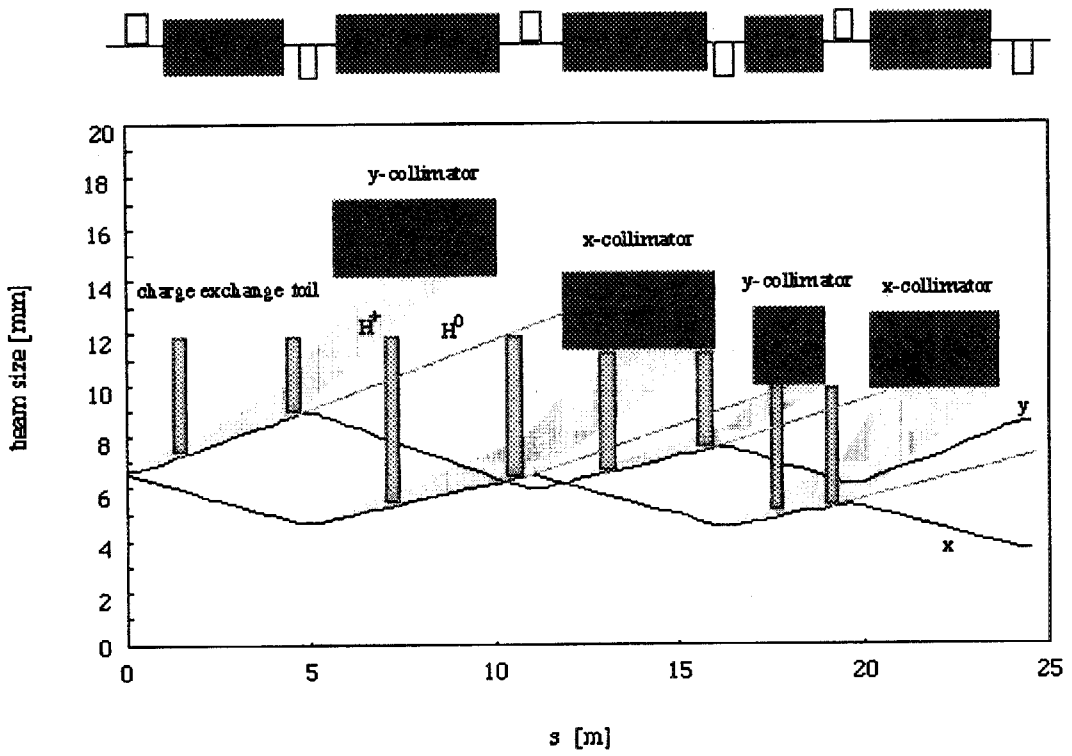


Fig. 3.2.6.1-5　横方向コリメータの概念

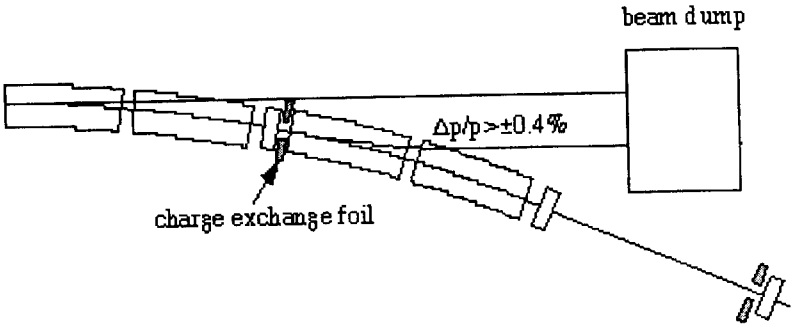


Fig. 3.2.6.1-6　縦方向コリメータ（1）

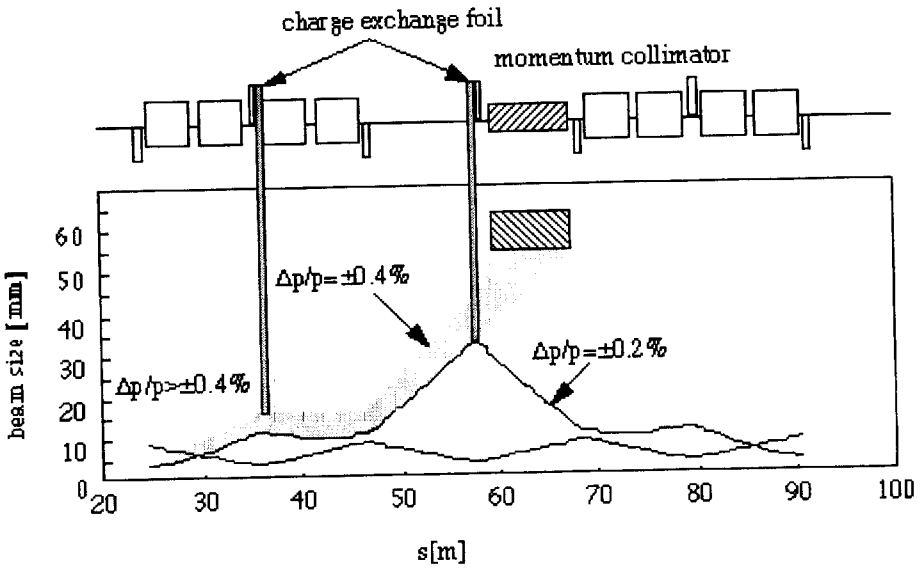


Fig. 3.2.6.1-7　縦方向コリメータ（2）

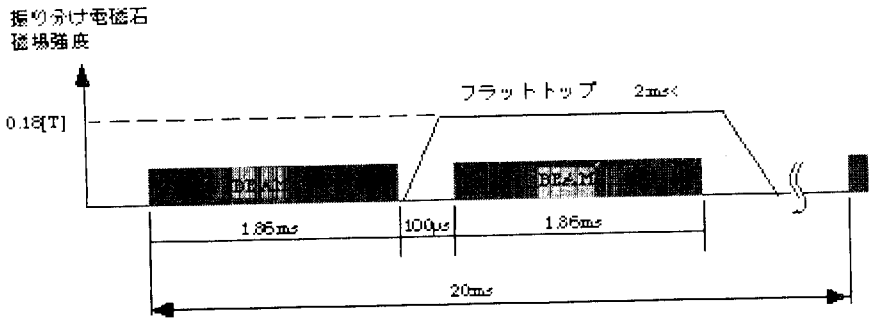


Fig. 3.2.6.1-8　振り分け電磁石の運転モデル

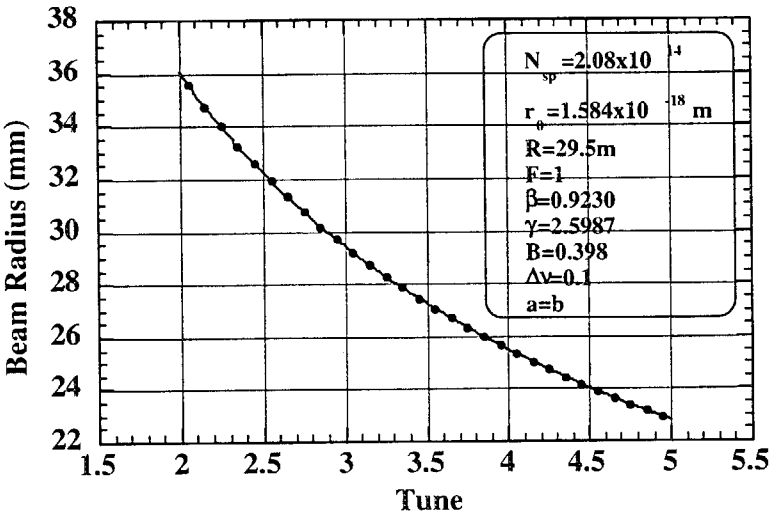


Fig. 3.2.6.2-1　平均ビームサイズの運転チューン依存性

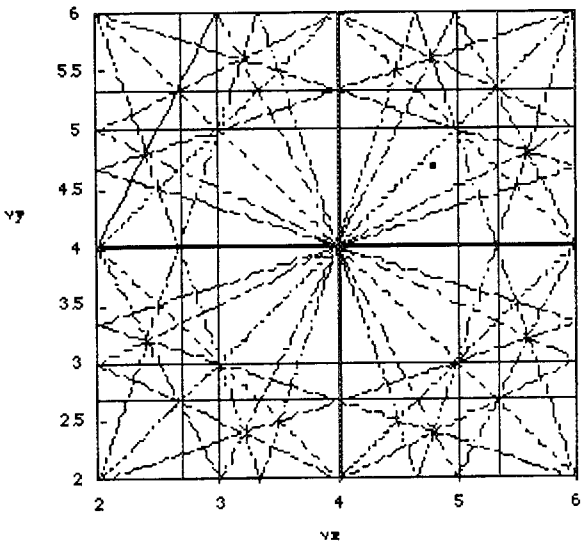


Fig. 3.2.6.2-2　超周期４のチューンダイアグラム

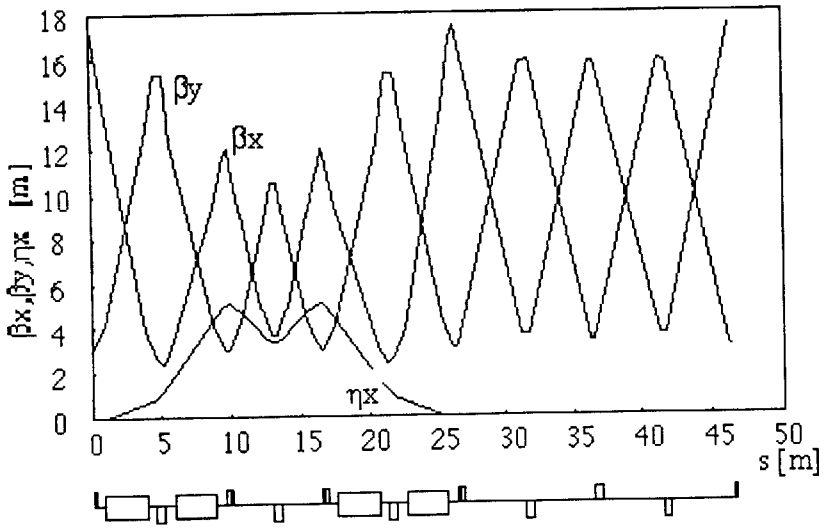


Fig. 3.2.6.2-3　β関数及び分散関数の変化

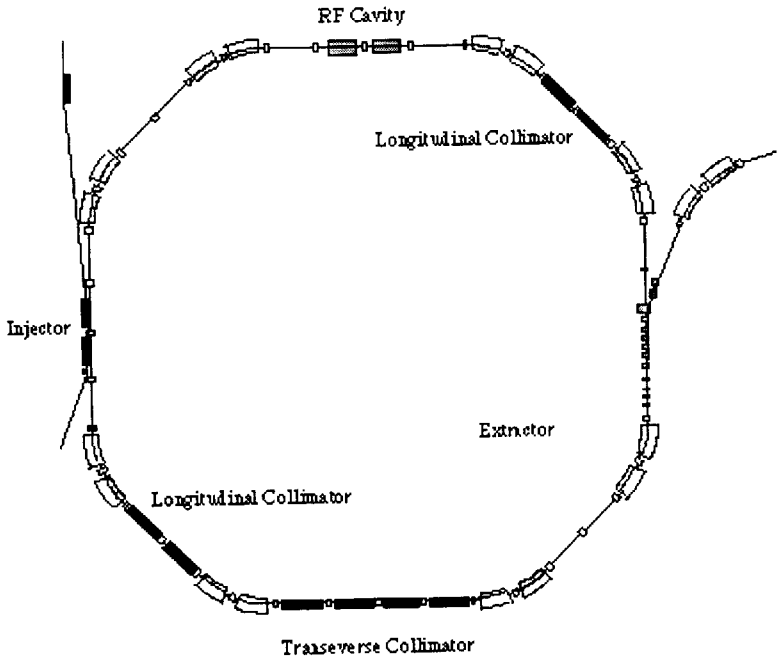


Fig. 3.2.6.2-4　全体構成図

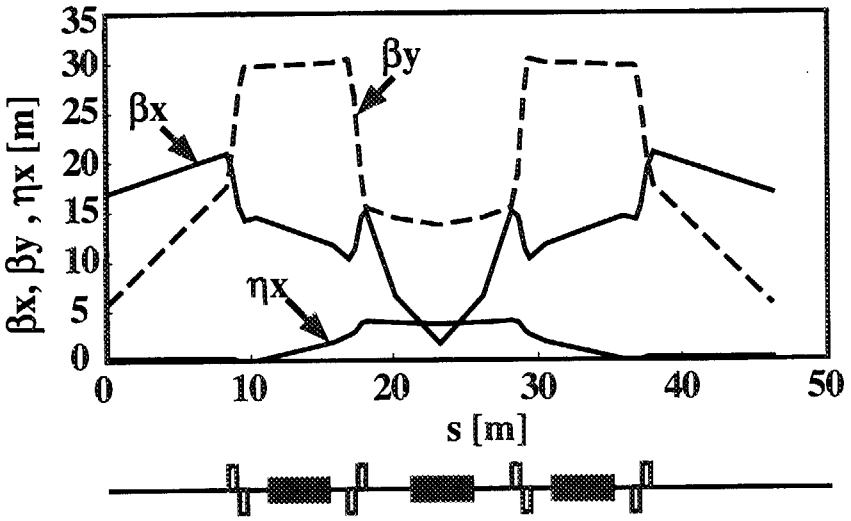


Fig. 3.2.6.2-5　β関数及び分散関数の変化

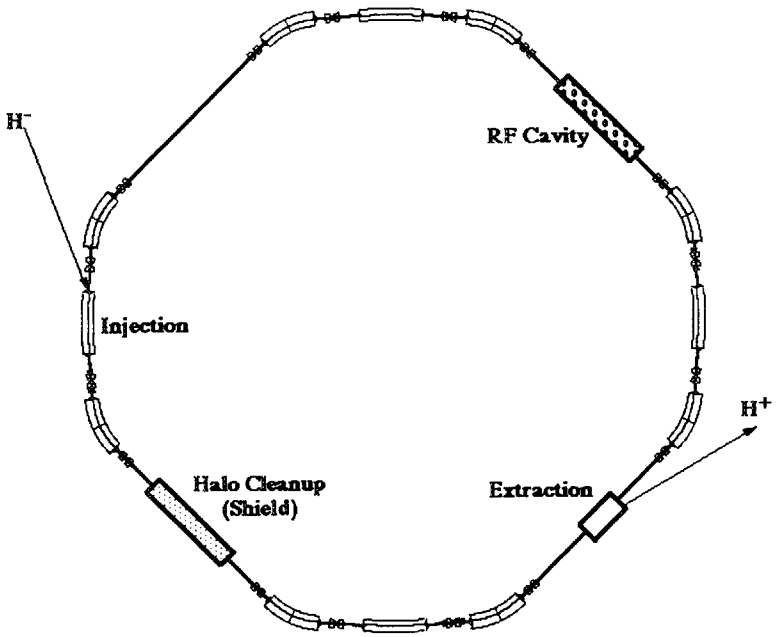


Fig. 3.2.6.2-6　全体構成図

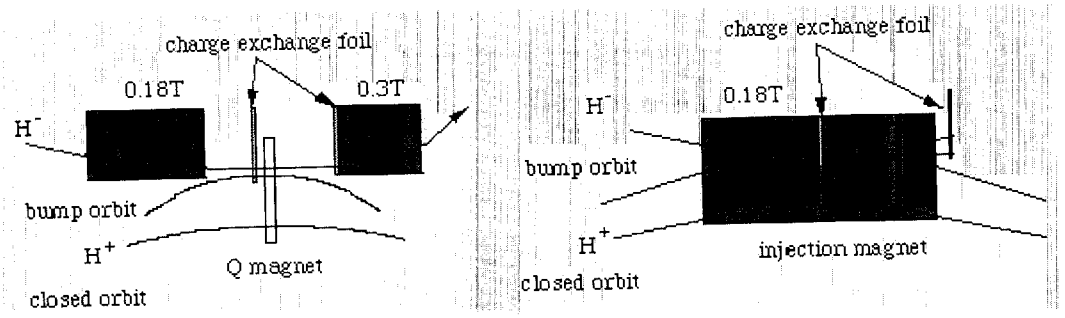


Fig. 3.2.6.2-7　入射方法の概略図

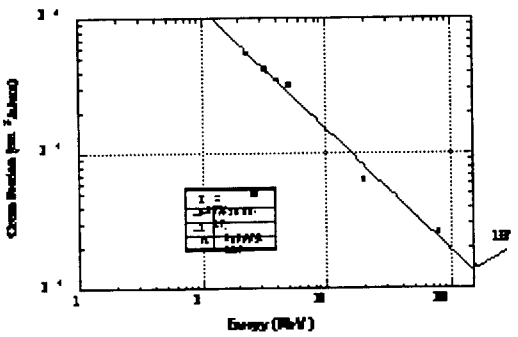


Fig. 3.2.6.2-8　$H^0 \rightarrow H^+$の反応断面積

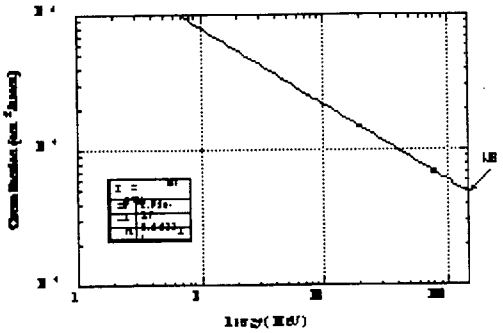


Fig. 3.2.6.2-9　$H^- \rightarrow H^0$及びH^+となる反応断面積

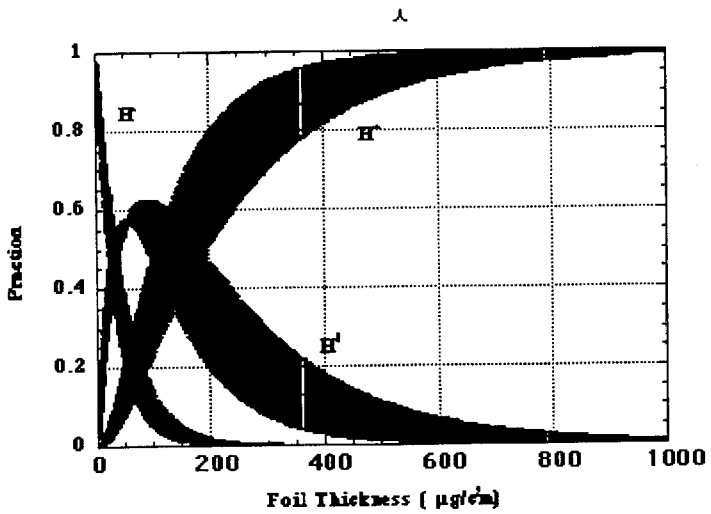


Fig. 3.2.6.2-10　H^+、H^0、及びH^-の Fraction

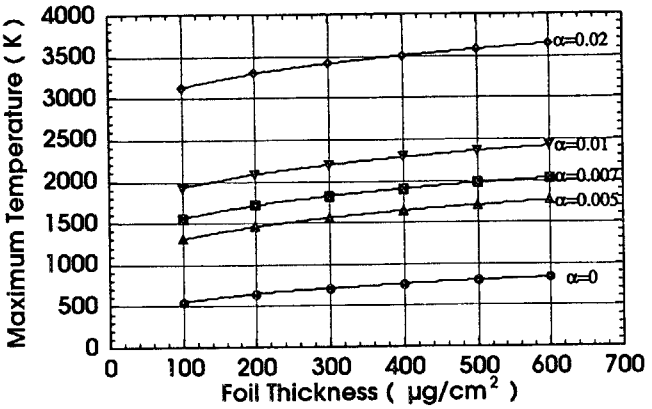


Fig. 3.2.6.2-11　フォイルの温度上昇

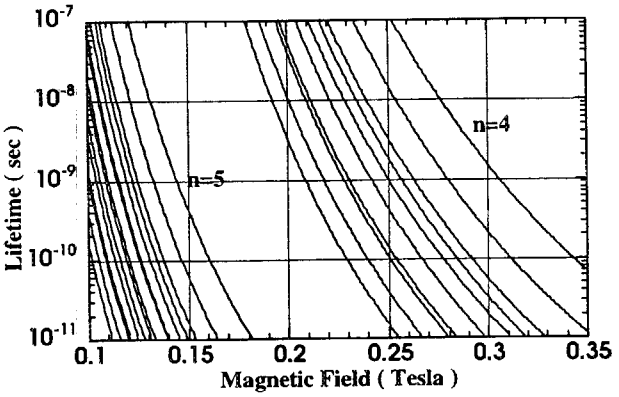


Fig. 3.2.6.2-12　H^0原子の励起状態の磁場中での寿命

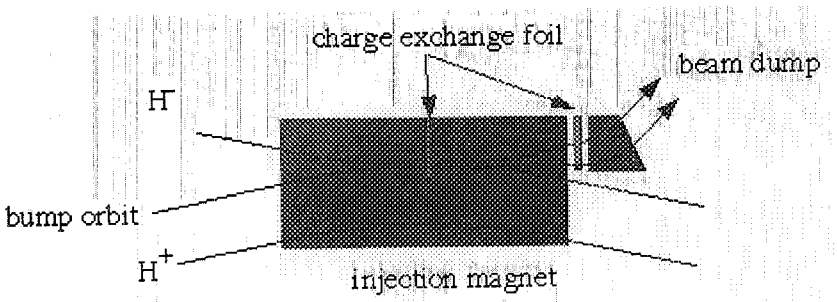


Fig. 3.2.6.2-13　ハロー処理の概略図

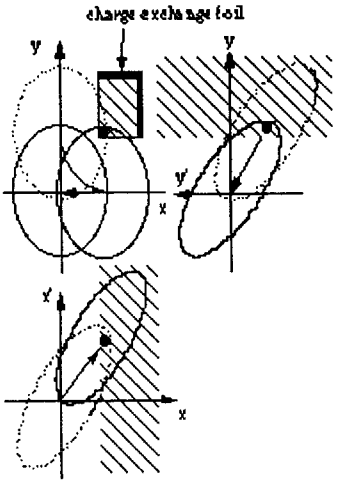


Fig. 3.2.6.2-14　ペインティングパターン

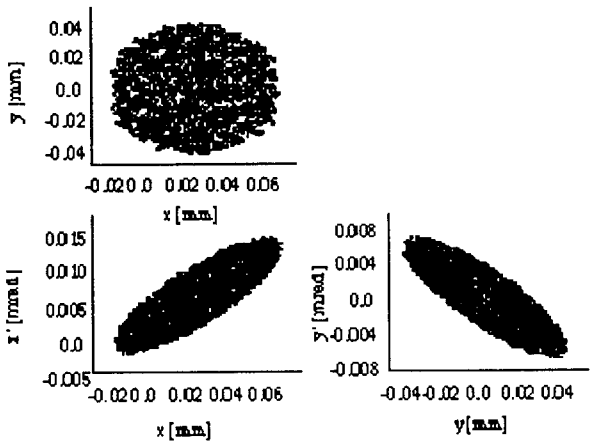


Fig. 3.2.6.2-15　シミュレーション結果

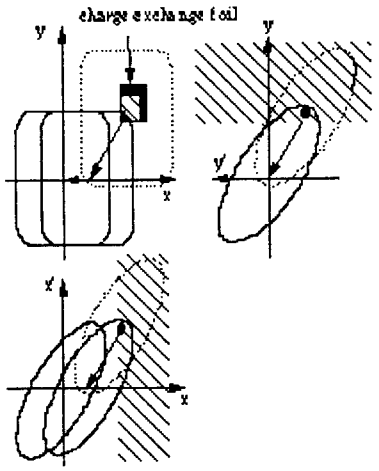


Fig. 3.2.6.2-16　ペインティングパターン

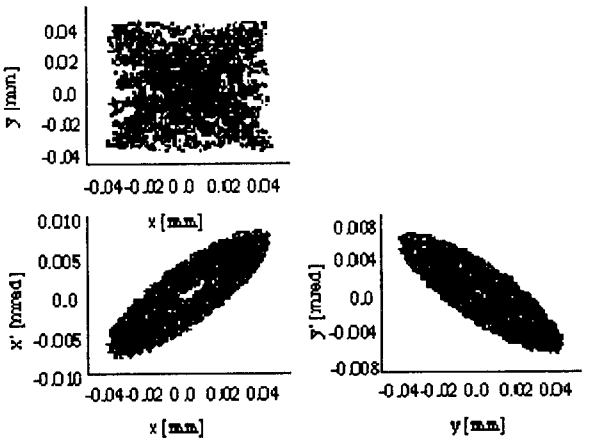


Fig. 3.2.6.2-17　シミュレーション結果

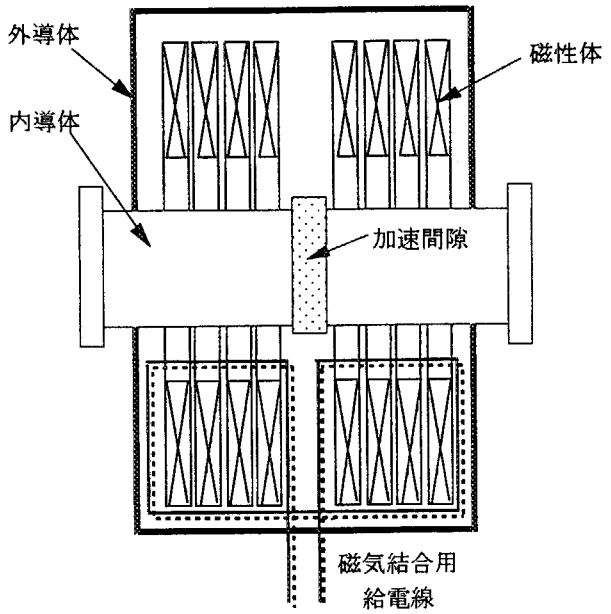


Fig. 3. 2. 6. 2-18 磁性体装荷型加速空洞の構造
(非同調型空胴の場合)

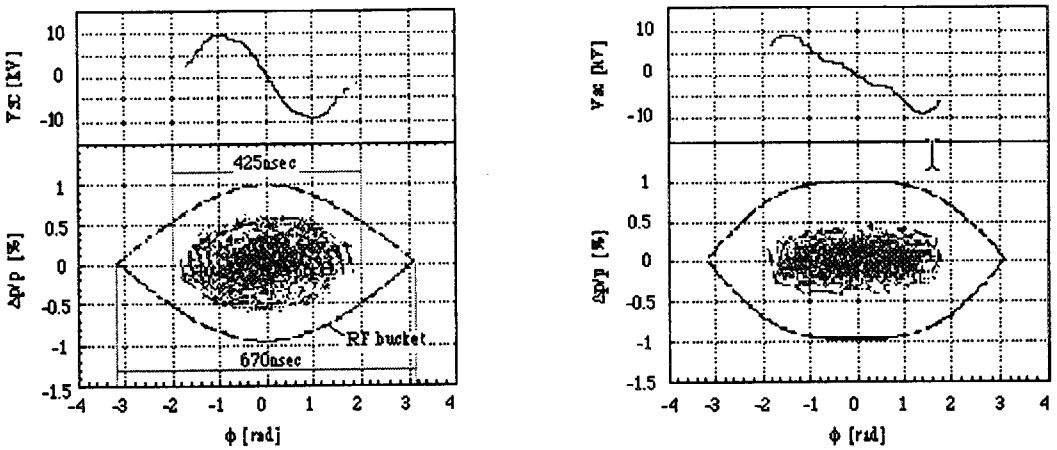


Fig. 3. 2. 6. 2-19 シミュレーション

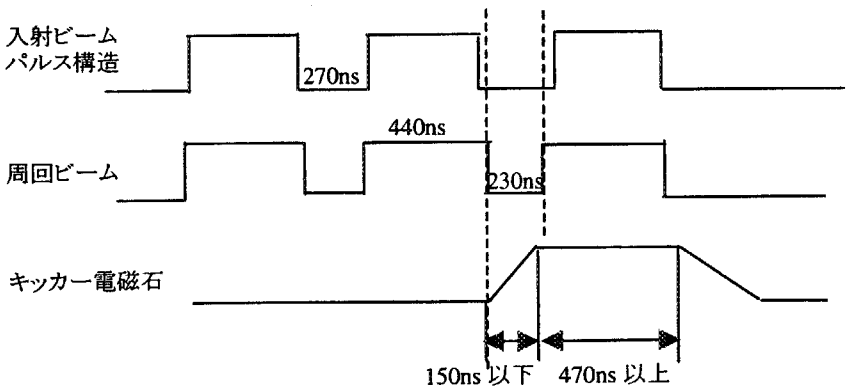


Fig. 3. 2. 6. 2-20 キッカー電磁石の励磁パターン

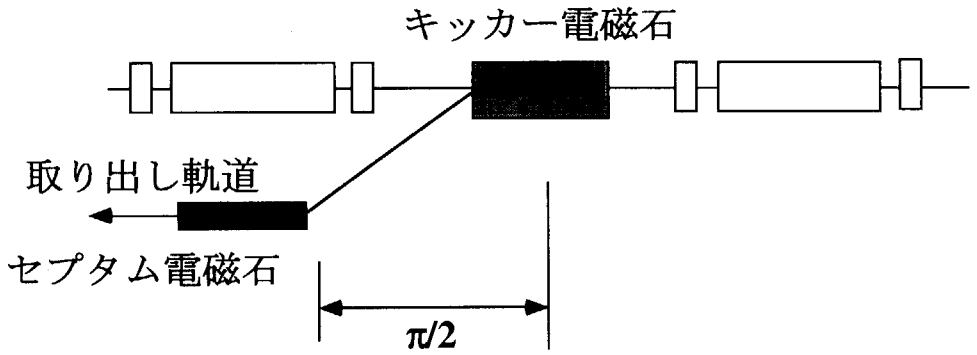


Fig.3.2.6.2-21　速い取り出し方法

3．2．7 ユーティリティ

中性子科学研究用大強度陽子加速器の建設に際しては、全長約 850m の直線加速器及び全周約185.4m×２基の蓄積リングに対し、各構成部に必要なユーティリティ及びユーティリティースペースを確保しなければならない。本章では、加速器系建家構造の条件及び加速器の各構成部に必要なユーティリティを網羅し、現時点でユーティリティに課せられている設計条件を検討した結果を示す。

3.2.7.1 加速器系建家

大強度陽子加速器を稼働させるために必要な建家は、直線加速器を設置するための加速器棟、加速器棟にユーティリティを供給するためのユーティリティ供給棟（Utility Service Building）、加速器棟のイオン入射部を含む低エネルギー加速部初段を収納するための入射棟（Injector Building）、高エネルギービーム伝送系（HEBT）を設置するための蓄積リング導入路、陽子蓄積リング本体施設（Proton Storage Ring）、全体を監視・管理するための主管理棟（Main Building）、品質管理工程管理上で必要となる装置部品の組立工場（Assembling Factory）が考えられる。
以上の加速器系建家の他に、利用施設を含む中性子科学研究計画で示された大強度陽子加速器施設全体配置図を Fig.3.2.7.1 に示す。

3.2.7.1.1 加速器棟

加速器棟は、直線加速器の大半（全長約 850m の内約 690m）を占める高エネルギー加速部に対し、特に放射線管理上の配慮が必要となる。従って、周囲への放射線の影響を考慮し、地下埋設構造とする。現状では、数種類ある地下埋設構造物の建築工法の中からトンネル工法と開削工法を選択し比較した結果、コスト面から開削工法を採用する方向で検討している。

また、加速器棟の構造は、加速器装置本体を設置する加速管室、高周波源を設置するＲＦ源室、各種ユーティリティを供給するユーティリティ室の３孔構造を基本とする。各室には照明空調等付帯設備と共に、装置及び人員が移動可能な通路と、装置や物品の搬出入に必要なクレーン乃至はこれに相当する運搬機器（揚重設備）を設置する。
加速器棟の加速部断面を Fig.3.2.7.1.1 に示す。

3.2.7.1.2 ユーティリティ供給棟

全長約 850m もの長い直線加速器に対し、必要とされるユーティリティを一括して供給・管理することは現実問題として不可能であるため、加速器棟の一定区間のユーティリティを供給・管理するためのユーティリティ供給棟を加速器棟の４個所に約 250m 間隔で隣接させる。

加速器の各構成部に供給すべきユーティリティ、すなわち電力、高周波、冷却、冷凍、計測、制御、安全、空調、換気の各系統への供給設備については、この４個所の建家に分散させて設置

する。ただし、換気系については、放射線管理上の理由から分散を避け、加速管室側を負圧にし、加速管室の風向を低エネルギー加速部（上流）から高エネルギー加速部（下流）へ流れるような経路を形成し、気中放射化物を減衰除去した後、排気する系統とする。また、加速器棟への装置の搬出入はこのビルから行う。高エネルギー加速部を構成するクライオモジュールは８つのβセクションに種類分けしているため、クライオモジュールの予備をそれぞれ２セクション分づつ必要数をこの４個所の建家に保管し、故障時に対応する。

3.2.7.1.3　入射棟

加速器にイオンを注入する低エネルギー加速部は、利用運転に際し問題となる稼働率及び出力されるビームの品質を大きく左右する重要な部分である。
特にイオン源は正負２種類、パルス運転と連続（ＣＷ）運転の２つのモードを持っているため、計３台が常時設置された状態となる。
イオン源を含む低エネルギー加速部は利用運転そのものに直接関与する部分であるので、予備品を用意する等故障が起きないように整備しておく必要がある。このため、低エネルギー加速部へのユーティリティ供給及び点検・保守・整備等に対応できるよう建家を建設し、第１章「計画の概要」で述べた中性子科学研究計画における建設ステップに併せて、利用施設に対し対応が取れるように準備して行く。

3.2.7.1.4　蓄積リング導入路及び陽子蓄積リング本体施設

蓄積リング導入路及び陽子蓄積リング本体施設は、加速器棟から出力された高エネルギービームを偏向・蓄積させるため、加速器棟と同様、地下埋設構造としなければならない。

3.2.7.1.5　主管理棟

主管理棟は、上述した加速器系建家の状態を把握し、これらを監視、制御する。また、利用施設からの情報を逐次取り入れ、加速器施設全体を統括、管理する。また、試験運転及び利用運転に対応できるように、夜勤業務可能な居室レイアウトを考慮する。

3.2.7.1.6　組立工場

組立工場は、加速器の予備装置や予備部品類を逐次供給して行くための施設であり、建設ステップに応じた量産、改造を行えるように各構成部毎にライン（組立→計測→調整）を設けて生産し構成部品をストックする。

3.2.7.2 各構成部のユーティリティ

3.2.7.2.1 低エネルギー加速部

低エネルギー加速部は、入射棟及び加速器棟の前段（上流側）約 150m に設置する正負イオン源（ＩＳ）、ＬＥＢＴ（低エネルギービーム伝送系）、ＲＦＱ（高周波四重極リニアック）、ＤＴＬ（ドリフト・チューブ・リニアック）、ＳＤＴＬ（分離型ＤＴＬ）、ＭＥＢＴ（中間エネルギービーム伝送系）で構成される。低エネルギー加速部に関しては 3.2.1～3 項で詳しく述べているが、各構成部の概略系統図を Fig.3.2.7.2.1 に、使用電力比較表を Table 3.2.7.2.1-1 に、気中放熱量比較表を Table 3.2.7.2.1-2 に示す。

3.2.7.2.2 高エネルギー加速部

高エネルギー加速部は、加速器棟の大部分約 690m を占める連なる 142 基のクライオモジュール群であり、3.2.4 項で述べられたように、基本パラメータを基に８つのβセクションに分割された構成となっている。超伝導による高効率化と、それに伴う加速器設置距離の短縮及び電力量の抑制効果が期待される。クライオモジュール本体の気中放熱量も少ないため、ユーティリティで考慮すべき項目は冷凍系と放射化対策であろう。

放射化対策については後述するものとして、冷凍系については現在２Ｋ運転を考えている。２Ｋ運転を維持するためには、超流動をクリアしつつ、クライオモジュール内セル外周ジャケットに供給する液体ヘリウムを負圧にしなければならない。温度バリア設定はジャケット内から２Ｋ、４．２Ｋ、８０Ｋ、クライオモジュール外筒となっている。極低温の液体ヘリウムを供給する場合の熱損失はかなり大きなものになるため、690m もの距離を有する装置に対し冷凍設備からの一括供給はまず無理である。また、液体ヘリウムは大変貴重で高価であるため、回収系を通じて再利用できる形が望ましい。このため 3.2.7.1.2 ユーティリティ供給棟で示したとおり、４分割乃至は８分割で各セクションに分散供給する接続構成を取らなくてはならない。

3.2.7.2.3 ＲＦ源

ＲＦ源の構成は 3.2.5 項で述べたとおりであり、低エネルギー加速部に対しては 200MHz、高エネルギー加速部に対しては 600MHz の高周波を供給する。それぞれのＲＦ源に必要な電源及び変調器等はそれぞれの項目の表中に示している。ユーティリティにおけるスペース及び電力の問題の大部分は、この電源設備に依存する。

3.2.7.2.4 陽子蓄積リング

陽子蓄積リングは、3.2.6 項で詳細に説明されている。蓄積リングを構成する構造物の殆どが電磁石であり、各構成部分に対し相当量の電力量と冷却能力が見込まれる。

3.2.7.2.5　ビームダンプ

高エネルギービームをダンプするため、ターゲットは高熱化、高放射化する。ここでは冷却及び放射化対策を充分考慮する必要がある。デフォーカス方法については要検討。

3.2.7.3　その他の検討事項

3.2.7.3.1　計測・制御・安全系

実際に加速器本体に取り付けられる計測機器、安全機器については、メンテナンスの頻度を考慮しながら、放射化対策を取る必要がある。
いづれにしても主管理棟で集中監視することになるが、末端を光ファイバで結び、共通バス（ＶＭＥ）で集約、そのデータをセクション毎にＷｉｎｄｏｗｓ ＮＴマシンに取り込み、それらをワークステーションで制御する方法に落ち着く筈である。開発言語はＶｉｓｕａｌ Ｃ＋＋（またはＶｉｓｕａｌ ＢＡＳＩＣ）であろう。
安全系については、原子炉の設置上の手法、則ちフェイルセーフ（安全保護）、インターロック（緊急停止）、フールプルーフ（誤操作防止）、マルチプル（多重化）の考え方を適応し、運転時は人を侵入させない、点検中は運転できないといった機械的な対応が必要である。

3.2.7.3.2　放射化対策

建家の放射化の問題は、高エネルギービームを物質と相互作用させるターゲット施設ならば当然考慮すべきであるが、一般に加速器本体はビームが通過するだけであり、放射化しないものと考えられがちである。しかし、識者はご存知のとおり、あるエネルギーを超過すると放射線、とりわけ高エネルギー粒子が物質に当たって生じるＸ線とγ線及び二次的に放出される中性子線が無視できなくなってくる。超伝導空胴部分では内部に極微量の塵があればビームを入射しなくとも、高周波エネルギーを加えるだけでＸ線を発生する。
現在のところ、原子炉施設に適応している原子力コードを用いた計算解析手法は放射線評価方法としてほぼ確立しているものと考えられるが、これらは中性子及びγ線を線源として扱っており、ビーム粒子の挙動とは一致しない。従って、加速器中のエネルギー分布等を考慮して、各セクションでの放射線の影響を評価すべきである。また、加速器における放射線評価方法が確立していないため、現在のところは一般的な線量評価で論じなければならず、今後は、各方面からコンセンサスが得られる評価方法を確率してゆく必要がある。

3.2.7.3.3　アライメント対策

全長約 850m に及ぶ加速器本体のアライメントは、基本的に他の大型加速施設の設置方法と同

様とする。建築構造物へのマーキングとトランシットによる計測。架台の標準化及び架台の位置調整。アライメント調整専用のレーザービームダクト（空気による揺らぎを無くすため真空に引く）の設置。いずれにしても加速管の中心を通す校正が不可能であるならば、設置床面の水平度要求と相対位置による計測しか確認の方法がないため、例えば架台の標準化を行い、微調整可能な構造を確立する必要がある。

3.2.7.4 まとめ

電力について

結論として加速器系建家全体で 76MW 程度の電力を使用することとなる。加速器系建家で使用される電力量は、各構成部の効率や状態、更に環境条件によって変動するものであるため、ここでは単純に必要とされる使用電力量と機器効率を見込んだ実際に必要とされる受電容量を示した。ただし、各機器の効率については確実な値ではないので、極力消費電力を抑える設計または設備を選択し、高効率化を施して行かなければならない。また、主要な装置の他に空調、照明、防火設備等に使用される電力量を考慮する必要があるため、各構成部に共通な項目として付帯設備を追加しなければならない。さらに利用設備側の施設、特にターゲット施設の冷却等にかなりの電力を使用するため、計画全体で 100MW 強の電力が必要となる。

Table 3.2.7.2.1-1　低エネルギー加速部使用電力比較

各構成部名称	機器名称	使用電力 (kVA)	効率	受電容量 (kVA)	備考
イオン源	パルス用負イオン源	36	0.95	37.894737	
	〃　正　〃	36	0.95	37.894737	
	CW用　正イオン源	36	0.95	37.894737	
ＬＥＢＴ	本体	5.05	0.9	5.6111111	
	チョッパー	5	0.8	6.25	
ＲＦＱ	パルス用ＲＦＱ	280	0.8	350	
	CW用　ＲＦＱ	280	0.8	350	
ＲＦ源	ＲＦＱ用 ＲＦ源	179.65	0.9	199.61111	(200MHz)
	ＤＴＬ１用ＲＦ源	649.95	0.9	722.16667	
	ＤＴＬ１用ＲＦ源	649.95	0.9	722.16667	
	ＤＴＬ２用ＲＦ源	538.95	0.9	598.83333	
	ＤＴＬ３用ＲＦ源	3054.05	0.9	3393.3889	
ＤＴＬ	ＤＴＬ１（パルス）	1432	0.8	1790	2MeV-7MeV
	ＤＴＬ１（CW）	1432	0.8	1790	〃
	ＤＴＬ２	1245	0.8	1556.25	7MeV-30MeV
	ＤＴＬ３	1341	0.8	1676.25	30MeV-51MeV
	ＳＤＴＬ				
ＭＥＢＴ	Q-mag	1.412	0.85	1.6611765	パルス
真空ポンプ	ロータリポンプ	0.75	0.1	7.5	IS:2*3 LEBT:4
	分子ターボポンプ	0.3	0.1	3	RFQ:R:5, TM5, CR4
	クライオポンプ	0	0.1		

Table 3.2.7.2.1-2　低エネルギー加速部気中放熱比較

各構成部名称	機器名称	気中放熱量 (kW)	冷却水量 (l/m)	除熱量 (kW)	備考
イオン源	パルス用負イオン源		30	100	
	〃　正　〃		30	100	
	CW用　正イオン源		30	100	
ＬＥＢＴ	本体		30	13.5	
	チョッパー		20	10	
ＲＦＱ	パルス用ＲＦＱ		1410	210	タンク＋ベーン
	CW用　ＲＦＱ		1410	210	〃
ＲＦ源	ＲＦＱ用 ＲＦ源	14.206			HPA, IPA, LPA
	ＤＴＬ１用ＲＦ源	85.222			〃
	ＤＴＬ２用ＲＦ源	46.612			〃
	ＤＴＬ３用ＲＦ源	42.612			〃
ＤＴＬ	ＤＴＬ１	24.667	305	85.2475	
	ＤＴＬ２	12.333			
	ＤＴＬ３	12.333			
	ＳＤＴＬ				
ＭＥＢＴ		0.000			
真空ポンプ	ロータリポンプ	0.675			
	分子ターボポンプ	0.27			
	クライオポンプ	0	10	1.7	
	クライオポンプ				

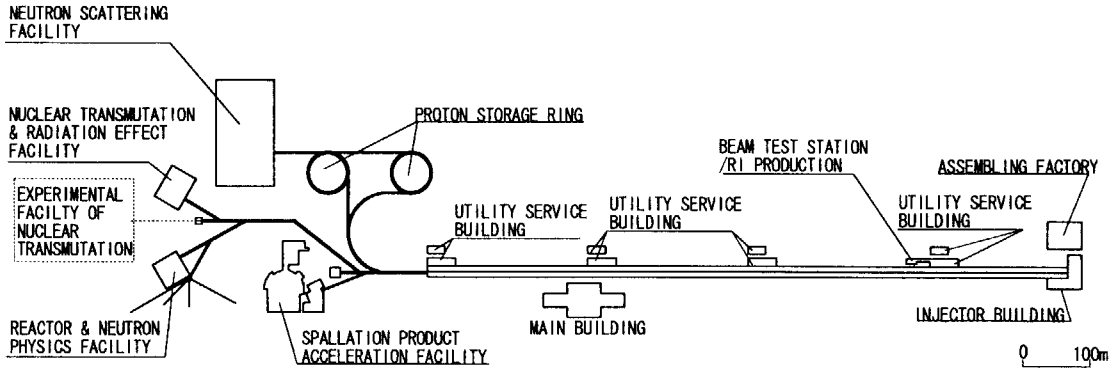


Fig. 3.2.7.1　大強度陽子加速器施設全体配置図

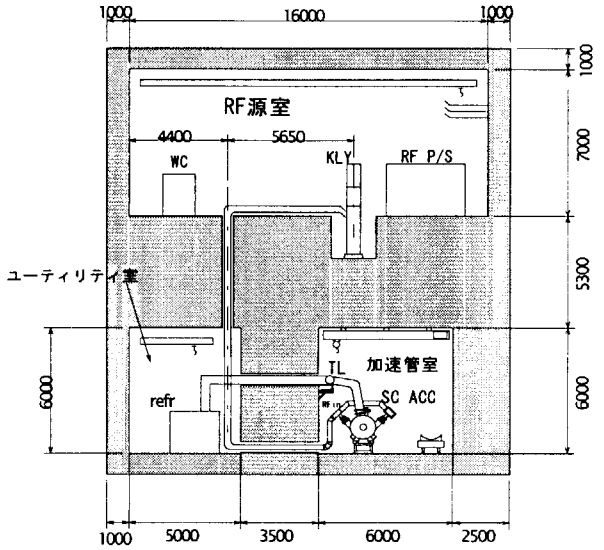


Fig. 3.2.7.1.1　加速部断面図

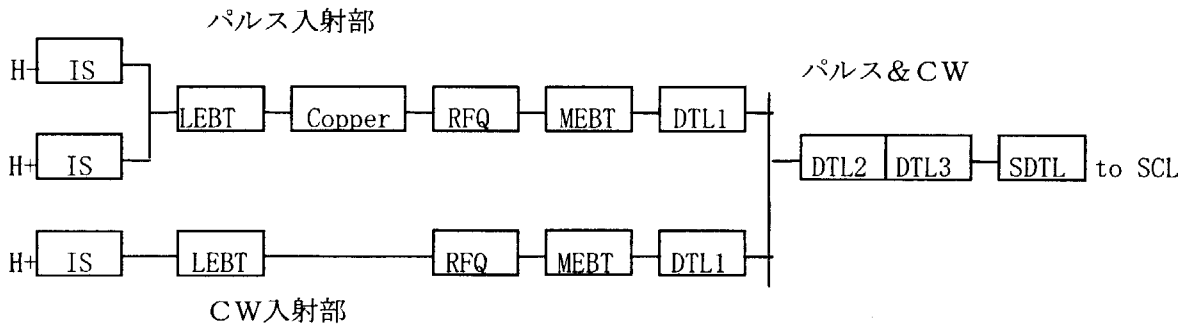


Fig. 3.2.7.2.1　低エネルギー加速部概略系統図

4．中性子散乱実験施設

4．1　中性子散乱実験施設の設計

中性子散乱実験施設は、陽子加速器からの陽子ビームを重金属製のターゲットに入射して核破砕反応を起こし、発生する大強度中性子ビームを用いて各種試験を行うことを目的とした放射線施設である。本節では、中性子散乱実験施設の要求仕様、提案する施設の概要及び今後必要な検討等について述べる。

4．1．1　中性子及びターゲットステーションの条件

中性子散乱実験施設は、核破砕反応によって大強度の中性子ビームを発生させるターゲットステーションと、ターゲットステーションからの中性子ビームを用いて各種試験を行う中性子ステーションから構成される。以下に、中性子及びターゲットステーションの主要条件について記す。

（1）　中性子ステーション

（a）　中性子ステーションでの実験に必要な建屋条件は、

・床面積　：　160m×90m以上

・高　さ　：　～15m

（クレーン揚程10m以上）

・天井クレーン：　30ton　2基以上

（全エリアをカバーできること）

・建屋構造：　鉄骨構造。換気空調要。

・建屋自身の遮蔽能力不要。

・床耐荷重：　2t/m^{2}以上

である。中性子ステーションは測定機器等の搬入・据付等の便を考慮して地上１階に配置し、中性子ビームラインは床より1m～1.5mの高さに設置する。また、中性子利用の需要が極めて高いことから、中性子ビームライン数は従来施設よりも約2倍多い32本を目標とする。

（b）　各中性子ビームラインには第２種管理区域基準を満たす十分な遮蔽を施すこととし、各ビームラインには必要に応じて最適なコリメータを備えるものとする。中性子ビームラインに接続する測定器と中性子エネルギー領域をTable 4.1 に示す。

（c）　各測定器のために電源及び冷却水の供給設備、さらに、各分光器共通に液体窒素供給設備を設ける。電源については、各測定器の配電盤に低ノイズ電力10kW（単相100V）、通常電力20kW（単相100V、三相200V／400V）の計30kWを供給できるようにする。

（d）　中性子ステーション内に、試料調整、クライオスタット、電気炉等の準備等を行なう実験準備室と資材置場、データ処理等のための部屋を設置する。

（2） ターゲットステーション

ターゲットステーションは核破砕中性子源を構成するターゲット、減速材、反射体、生体遮蔽体などの機器と、それらを保守点検・交換するための遠隔操作設備、冷却設備、電源設備、使用済ターゲット保管設備等から構成される。Fig. 4.1にターゲットシステムの主要機器構成を示す。ターゲットの上部に冷中性子減速材を2個、下部に熱及び熱外中性子減速材をそれぞれ1個ずつ配置し、全体を反射体で取り囲み、さらにその外側を生体遮蔽体で覆う構成である。以下に、ターゲットステーションの条件を記す。

（a） ターゲットは中性子ステーションに合わせて地上一階に設置し、陽子ビームは地上1.2m（暫定）の水平方向からターゲットに入射させる。

（b） ターゲットについては、陽子ビーム出力1.5MW（1.5GeV、1mA）運転時（第Ⅰ期）には固体及び水銀ターゲットを設置し、フルパワーの5MW運転（1.5GeV，3.3mA、第Ⅱ期）のための高度化及び運転制御データを取得する。第Ⅱ期においては水銀ターゲットをメインターゲットとして使用し、固体ターゲットはバックアップとして準備する。設計検討中の固体及び水銀ターゲットの構造概要は4.2節で述べる。

（c） 減速材、生体遮蔽体、中性子シャッター(中性子ビームライン遮断用)、冷却設備等の主要な機器・設備は、第Ⅰ期及び第Ⅱ期ともに共通とし、5MWベースで設計する。このとき、中性子シャッターは中性子ビームラインの要求数に合わせて設置する。

（d） ターゲット本体は水平方向に移動可能なターゲット台車に搭載し、陽子ビーム窓、減速材、反射体、中性子シャッターは上方向に引出す方式とする。これらの点検保守・交換はマニピュレータ、クレーン等による遠隔操作で行う。

（e） 建屋内に長期保管を前提とした使用済ターゲット等の保管エリアを設ける。

（f） ターゲットについては、ISIS等の運転経験からターゲット寿命の長期化を目指して設計上限温度を200℃とし、これに見合う冷却設備を設けるものとする。

（g） システム各機器の冷却設備は3重の系統構成とし、放射性物質の環境への放散を防止するために、1次及び２次冷却系は閉ループ構成とする。3次系はクーリングタワー方式とし、大気に放熱する。2次及び3次冷却水には軽水を用い、中性子収率等に影響する固体ターゲット冷却系、ターゲットケーシング冷却系、反射体冷却系、冷中性子減速材のプレモデレータ部、陽子ビーム窓冷却系等には重水を使用する。

（h） 電源は一般用に加えて非常用電源を備える。非常用電源母線からの電力を供給する系統は以下の通りとする。

・水銀循環系
・固体ターゲット冷却系
・ターゲットケーシング冷却系
・陽子ビーム窓冷却系
・減速材系
・反射体、生体遮蔽、ヘリウムベッセル冷却系他

（i） 安全保護

・系統の異常を検出した場合には、加速器本体及びリング側に「陽子ビームトリッ

プ」信号を発信し、ターゲットへの陽子ビーム入射を停止させる。

・重水の漏えい時にトリチウムがターゲット等の点検保守・交換を行うホットセル換気系統に流入した場合は、流入したトリチウムは大気中に希釈排気する。このとき、トリチウム濃度が排出許容濃度以上になった場合には冷却凝縮法によりトリチウム水として補集し、１次冷却水（重水）系のドレンタンクに回収する。

・水銀漏えい時は漏えい水銀をダンプタンクに回収するとともに、ホットセル換気系統に流入した水銀蒸気は水銀用キレート材フィルタ又は活性炭で吸着補集する。

・１次冷却水系統を収納する部屋はSUSライナ張りの気密セルとし、負圧制御を行う。

・ターゲット台車の周囲には気密カバーを設けて水銀の漏えい飛散を防止するとともに、台車上にはループからの漏えい水銀を回収するために亜鉛被覆した鋼鉄製トレイを設置する。（水銀のアマルガム化）

・冷中性子減速材など水素を用いる機器及び配管の最外壁はヘリウムガスを充填した多重構造とし、配管敷設経路の部屋は空気の滞留がないように換気空調を行い、水素漏えい時の燃焼及び爆燃を防止する。

４．１．２　提案する施設の概要

４.1.1項で述べた条件に従って検討した施設の鳥瞰図をFig.4.2に、ターゲットステーションの鳥瞰図をFig.4.3にそれぞれ示す。施設建屋は地下１階、地上４階の５階層構造である。施設全体の規模、特殊設備等の概要をまとめたものをTable 4.2に、平面配置図をFig.4.4～4.8に、立面配置図をFig.4.9.1～3にそれぞれ示す。また、配置図に記した各設備室の床面積、階高、室容積と放射線管理区分をまとめてTable 4.3.1～2に示す。放射線管理区分の詳細については7章で述べる。施設に設置する主要機器の仕様をTable 4.4.1～2にまとめて示す。以下に各階層の構成概要を記す。

（a） 地上１階

地上１階の平面配置図をFig.4.4に示す。地上１階は、施設のメインとなる設備を設置するエリアである。ターゲットステーション周りの機器配置はFig.4.10に示すように、陽子ビームライン、生体遮蔽体及びターゲット台車取扱室は直列に配置し、ターゲット台車取扱室後方には、ターゲット台車メンテナンス室及び反射体メンテナンス室を設けてある。その後方には、機器の搬出入性を考慮して機器搬出入室を設けた。また、ターゲット及びターゲット台車の保守点検のために、ターゲット台車取扱室の両側にマニュピュレータ操作室を設けた。Fig.4.11に設計検討中の水銀ターゲットを組込んだターゲット台車の構造概要を示す。なお、陽子ビームラインの点検保守等のために、中性子ステーション（２）側にマグネットの搬出入領域及び通路、中性子ステーション（１）側にケーブル等の敷設経路を確保した。

生体遮蔽体廻りには計32本の中性子ビームラインを配置し、Table 4.1に示した測定機器を設置できるようにし、測定器廻りへの近接性及びその点検保守性を考慮して、

中性子ステーション（1）～（4）の区域を設定した。各中性子ステーション近傍には測定用試料の調整作業（加工等）を行う実験準備室を設置し、さらに、測定器等の搬出入を容易にするために各中性子ステーション毎に機器搬出入室を設けた。

減速材及び反射体の保守点検作業性を考慮して、反射体メンテナンス室廻りに反射体取扱操作室を設け、それに隣接して1次冷却水循環系機械室を設けてターゲット台車への冷却水配管ルートを確保した。また、使用済みのターゲット、減速材、反射体等の移送作業性を考慮して、ターゲット移送室、ターゲット取扱スペース及び操作室を1次冷却水循環系機械室の反対側に設けた。

ターゲット取扱スペースの隣にはターゲット搬出入室を設け、使用済みターゲット等を試験検査のために別建屋のホットセル室へ移送できるようにした。ターゲット搬出入室の隣には高汚染区域用の出入管理設備（3）を設け、非常時（遠隔操作機器の故障を想定）におけるターゲット・反射体保管エリア及びターゲット移送室等への作業員の接近性の便を図った。

中性子ステーション（2）及び1次冷却水循環系機械室近傍に研究員、作業員（補機メンテナンス員）の出入管理室をそれぞれ設け、さらに、屋外からの接近性性を考慮して、その手前にロビー室（1）及び一般員の展示、休憩室を設けた。また、中性子ステーション（1）の側部エリアにロビー室（2）及び出入管理設備室を設けて、研究員が出入りする便を図った。ロビー室（1）近傍には非常用発電機（D/G）を設置するとともに、非管理区域設備（中央制御室及び電気設備）への入退出の便を考慮して非管理区域用エレベータを設置した。

（b） 地上2階

地上2階の平面配置図をFig. 4.5に示す。重水取扱い機器の保守点検時及びトリチウムが漏えいした場合のトリチウム処理を行う機械室である重水関連設備室は、重水風導配管の敷設経路とトリチウム漏えい及び被ばく低減の観点から、重水取扱設備である1次冷却水循環系機械室（地上1階）の上部に設置した。機器メンテナンス作業員の線源区域への接近性性を考慮して、入・退域の監視室である出入管理関係設備を地上1階設置の出入管理設備室の上部である重水関連設備室の隣室に設置した。また、重水関連設備、出入管理関係設備室の仕切壁の外側は非管理区域設備エリアとし、電源設備室、運転員等の居室及びターゲットシステム全体の実験測定、監視を行うデータ処理室を設置した。

中性子ステーション（1）の側部エリアは、ステーションへの出入りを考慮して、研究員の居室及びデータ処理室等の非管理区域設備を集約配置した。なお、本エリアから非管理区域全体に通じることが可能なように非管理通路を設け、また、中性子ステーション（1）の側部、中性子ステーション（2）及び（3）（4）間に中性子ステーション全体が見学可能な通路を設けた。

天井クレーンは、中性子ステーション（1）及び（2）用に30tonクレーンを各1基、中性子ステーション（3）及び（4）に共通に 30tonクレーンを1基、後述するターゲ

ット台車取扱室及びターゲット移送室用に 5tonクレーンを各1基設置した。

（c） 地上３階

地上３階の平面配置図をFig.4.6に示す。生体遮蔽体、ターゲット台車取扱設備エリア（地上2階）の上部に減速材交換用の反射体交換プラグを吊上げるための反射体取扱室（高さ約15m）を設置した。反射体取扱室の隣室には、減速材への冷却配管ルート及び建屋耐震性を考慮して、陽子ビームラインエリア上部に減速材冷却設備室を設置し、減速材冷却設備室の一部領域に中性子ステーション（１）及び（２）間の出入りを円滑にするために連絡階段及び通路を設けた。また、反射体取扱室の右側部には、非管理区域設備を集約配置することとし、接近性及びケーブル敷設経路を考慮して、ターゲットシステムの運転・制御のための制御室、制御中継盤、無停電電源装置等を設置する電源盤・バッテリ室を配置した。反射体取扱室の左側部には、ターゲット台車及びターゲット関連設備機器の保守点検作業性を考慮して、機器メンテナンス室及びターゲット関連の部品を保管する機器置場（倉庫）を設けた。

（d） 地上４階

地上４階の平面配置図をFig.4.7に示す。反射体取扱室の右側部には、外気取入れ及びダクト経路を考慮して管理・非管理区域を共用とした給気系の換気空調機械室を設置し、その隣には排気性を考慮して放射線源を持たない非管理区域用排気系の換気空調機械室を設置した。反射体取扱室の左側部は、その下の階層が管理区域設備エリアであることから、排気性及びダクト経路を考慮して管理区域用排気系の換気空調機械室を設置した。反射体取扱室には、中性子シャッター、反射体交換プラグ（減速材／反射体を一括交換するのに使用）などの点検保守・交換用に100ton天井クレーンを1基設置した。

（e） 地下１階エリア構成

地下１階の平面配置図をFig.4.8に示す。地下１階は、建屋掘削量低減の観点から必要最小限の設備を設けることとした。ターゲット・反射体保管エリア（使用済みのターゲット、減速材、反射体、陽子ビーム窓などの放射化した機器とそれらの保守点検・交換時に発生した各種放射化廃棄物を保管する区域）は水プール方式（暫定）とし、使用済みのターゲット、減速材などを移送する作業性を考慮して、ターゲット台車取扱室、ターゲット移送エリアの下部に設置した。本エリアには、移送のために5ton天井クレーンを1基設置した。

排水設備は、ドレン配管経路及び排水性を考慮すると最下階に設置する必要があるため、機器・床ドレン等の一般用の排水設備（１）は、一般ドレン配管の経路及び排水性を考慮してターゲット・反射体保管エリアを挟んで反対側に設置した。排水設備室（２）は、トリチウム漏えい低減の観点から重水ドレン配管のルート性を考慮し、重水取扱設備である１次冷却水循環系の真下に重水取扱設備の排水設備用として設置した。また、２次冷却循環系機械室は、１次冷却水循環系機器の連絡冷水配管ルートを考慮して排水設備（２）に隣接して設置した。

4.1.3 主要設備

(1) 使用済みターゲット等の保管設備

本設備では、使用済みの固体ターゲット及び水銀ターゲット容器を中心にして、減速材容器、陽子ビーム窓、反射体など放射化された機器の保管を行う。上記主要機器の交換頻度（目標）は以下の通りとし、約10年分保管する。なお、保管設備の主要部分である水循環プールは、幅が約8m、全長が約30m、深さが約4mであるが、水の管理作業、コスト低減等の観点から保管をより容易にするために大気中での保管を検討中である。

固体ターゲット： 0.5年／基 計 5基
(2.5年分)

水銀ターゲット容器： 0.4年／基 計19基
(7.6年分)

水素減速材容器： 1.5年／基 計21基
(10.5年分)

水減速材容器 ： 2.5年／基 計 4基
(10年分)

陽子ビーム窓 ： 1年／基 計10基
(10年分)

反射体 ： 10年／式 計1式
(10年分)

本設備には、ターゲット等の保守点検・交換時に発生した廃棄物（水銀循環系の配管、機器等）を併せて保管するものとする。

(2) 冷却設備

大強度陽子加速器からの陽子ビームが重金属製のターゲットに入射する時、ターゲットでの核破砕反応とそれに伴い発生する中性子等の周辺機器への照射により、ターゲット、減速材、反射体、生体遮蔽体等で多量の熱を発生する。Fig.4.12に各機器で発生する熱量の概略（推定値）を示す。本冷却設備は、これらの熱を適切に除去して機器の健全性を維持するためのものである。

固体ターゲットを組み込んだときの冷却系の全体系統をFig.4.13に、水銀ターゲットを組み込んだときの冷却系の全体系統をFig.4.14に示す。固体ターゲットの冷却系であるターゲット１次冷却系（冷却材：重水、120m^3/h）は、核破砕反応によりターゲットで発生した熱を熱交換器で除去してターゲットの温度を200℃以下に保つことを目的とし、また、Fig.4.14に示す水銀冷却系（50m^3/h）は水銀ターゲット材の供給系として、核破砕反応により発生した熱を熱交換器で除去して、ターゲット入口水銀温度を50℃程度に保つことを目的としている。いずれも放射性物質の拡散を防止するために閉ループ構成とし、熱交換器は２次冷却系Ｉ（冷却材：軽水、170m^3/h）に接続している。

ターゲット１次冷却系及び水銀冷却系に設置したサージタンクのカバーガスにはヘリウムガス

を用い、ヘリウムパージ装置によって圧力を制御しながら重水又は水銀を循環させる。ターゲット部で発生した水素ガスはサージタンクで濃度を監視し、必要に応じてヘリウムガスとともに大気に放出する。また、上記の冷却系には循環ポンプを２台設置し、運転中に1台のポンプが停止した場合には、陽子ビームトリップ信号を発信した後、健全なポンプ及びターゲットケーシング冷却系（冷却材：重水）で崩壊熱を除去する。なお、以下に記す冷却系に設置しているサージタンクのカバーガスはすべてヘリウムガスであり、ヘリウムパージ装置によって循環再使用する。

ターゲットケーシング冷却系は（冷却材：重水、65m^3/h）、中性子の照射によりターゲットケーシング、反射体で発生した熱を除去するとともに、ターゲット１次冷却系及び水銀冷却系での異常発生時に、陽子ビーム停止後の崩壊熱を除去することを目的としている。冷却材は核破砕反応によって発生した中性子の吸収をできるだけ少なくするために重水を使用する。放射性物質の拡散を防止するために閉ループ構成とし、また、ターゲット１次冷却系との独立性が保てるように、熱交換器を介して熱を２次冷却系Ⅱ（冷却材：軽水、1300m^3/h）に伝える。

減速材系は、核破砕反応によって発生した高速中性子を減速して、使用目的に合わせたエネルギーの中性子に減速するもので、（超臨界）液体水素減速材系（冷中性子用、15m^3/h）、液体水素－固体メタン減速材系（熱中性子用、15m^3/h）及び水減速材系（熱外中性子用、4m^3/h）から構成される。液体水素の供給は冷却ボックスで行い、減速材で発生した熱は熱交換器を介してヘリウム冷凍機で除去する。また、水減速材系は軽水を用いた閉ループ構成で、上記のターゲット1次冷却系と同じ構成である。なお、液体水素―固体メタン減速材系については開発に長期間を要するため、毒物を組み込んだ液体水素減速材を使用する予定である。

線源台車冷却系（冷却材：重水、50m^3/h）は、ターゲット台車、生体遮蔽体及び陽子ビーム窓で発生した熱を除去することを目的としている。この設備も放射性物質の拡散を防止するために閉ループ構成とし、熱交換器を介して熱を２次冷却系Ⅱに伝える。

ターゲット、反射体、減速材を収納するヘリウムベッセルには、ヘリウムガスを閉ループ構成で循環させ（17600Nm^3/h）、ヘリウムベッセルで発生する熱はループの熱交換器を介して２次冷却系Ⅰに伝える。

ヘリウムベッセル外側の生体遮蔽体については厚さ約６ｍの鋼製で大型設備であるため、線源台車冷却系による水冷に加えて、空気を強制的に生体遮蔽体内を循環させて冷却する方式の生体遮蔽体冷却系（16800m^3/h）を設置する。ただし、空気の強制循環については空気の放射化等の問題もあり、今後の検討課題である。

上述したように、水銀冷却系、（固体）ターゲット１次冷却系、ヘリウムベッセル冷却系等は２次冷却系Ⅰに、ターゲットケーシング冷却系（反射体冷却系含む）、線源台車冷却系等は２次冷却系Ⅱに接続し、２次冷却系Ⅰ及びⅡはクーリングタワーを有する３次冷却系に熱交換器を介して接続する。

（３）　電気設備

電気設備は、変電所より3相6.6kV（50Hz）を高圧受電設備（容量11000kVA）に受電し、

・3相400V（50Hz）　6000kVA

・3相200V（50Hz）　4000kVA

・単相200V／100V　　890kVA

に変圧して、動力、計装制御、照明、コンセント、直流／交流無停電電源等に使用する。また、瞬時の電源喪失も許されない負荷のうち交流負荷は交流無停電電源装置から、直流負荷は直流（無停電）電源装置から給電する。主要系統としては、

・水銀冷却系
・ターゲット１次冷却系
・減速材系
・ターゲットケーシング冷却系
・ヘリウムベッセル冷却系
・生体遮蔽体冷却系
・線源台車冷却系
・使用済みターゲット冷却系
・ヘリウムパージ装置
・２次冷却系Ⅰ及びⅡ
・３次冷却系
・運転制御用機器

がある。無停電電源装置の連続通電は定格で10分間とし、その間に非常用ディーゼル発電機（3500kVA、2基）を立ち上げて、常用電源復旧まで、非常用発電機から給電を行う。管理／非管理区域換気空調系等については、常用電源喪失時には非常用発電機から給電を受ける。

（4）　換気空調系

本系統は、中性子散乱実験施設内管理区域の室内を換気することにより所定の室温及び室圧（大気に対して負圧）に維持し、施設外へ放射化された空気が流出するのを防ぐ管理区域換気空調系と、中性子散乱実験施設内の非管理区域の室内を換気することにより所定の室温に維持することを目的とした非管理区域換気空調系に大別される。これらの暫定的な設計条件は次の通りである。

室温度条件　　通常時／非常時　10～40℃

室圧力条件　大気に対し-8～-20mmAq

処理対象室／換気風量

（a）　管理区域換気空調系：150,000m^3/h

管理区域換気空調機械室、減速材設備室、反射体取扱関連室、機器置場及びメンテナンス室、重水関連設備室、１次冷却水循環系及び２次冷却水循環系機械室、ターゲット取扱関連室、マニュピレータ操作室、排水設備室、ターゲット等の保管設備関連室他

（b）　非管理区域換気空調系：43,000m^3/h

非管理区域換気空調機械室、電源盤室、バッテリ室、電源設備室、D／G室

なお、運転員、研究員、作業員用の居室、データ処理室、制御室等は個別に空調を行うこととし、中性子ステーションについては防塵対策等を施して換気扇による換気を行うものとする。

4.2 核破砕ターゲットの研究開発

4.2.1 ターゲットニュートロニクス

ターゲット開発におけるターゲットニュートロニクスの役割は、優れた中性子源コンセプトを提案し、高性能中性子源を実現するための性能評価や工学的な観点から設計に必要なデータを提供すること、さらに中性子性能を向上させるために新しいシステムの創出を行うことにある。

（1） ターゲット・モデレータ・反射体モデル

5 MW 核破砕中性子ターゲットシステムは、GeV オーダーの高エネルギー陽子を入射させ核破砕反応を引き起こすターゲット、反応によって得られた中性子を必要なエネルギーに減速し中性子ビームを引き出す減速材（モデレータ）及び反射体等から構成される。Fig. 4.15 に現在提案しているターゲット・モデレータ・反射体の概念を示す[1]。液体金属ターゲット（水銀）をメインにして、水冷固体ターゲットをバックアップとして準備することとし、保守点検性を考慮してターゲットには水平に陽子ビームが入射する方式を採用した。このため、ターゲットは水平に設置し、中性子性能を左右するモデレータはウイング配置となる。４個のモデレータのうち冷中性子用結合型プレモデレータ付き水素モデレータ（高強度・高分解能）２個をターゲットの上部に、また熱及び熱外中性子用の非結合モデレータ（共に高分解能）計２個をターゲット下部に配置した。この配置では図中のターゲットの上に示した速中性子の軸方向分布（1.5GeV 陽子入射の計算及び実験結果）のピークの近傍にできるだけ接近させて２つのモデレータを配置した。非結合型モデレータはビーム放射面を除いてデカップラー（B_4C）で囲み、また、それらのモデレータからのビーム取り出し孔の周りにも同様の熱中性子吸収物質でライニングした。反射体の材料と大きさの選択は中性子強度、パルス特性及びモデレータの核発熱に対しても大きな影響を持つため、減速反射体として最も高い性能が期待されるベリリウム（Be）、SNQ や ESS でも採用が考えられている非減速反射体としての鉛（Pb）の両者について検討した。ニュートロニクス計算には高エネルギーハドロン輸送コードNMTC/JAERI及び低エネルギー粒子輸送コードMCNP4Aを用いた。計算モデルでは、均一矩形分布（48 μ A/cm^2）の 1.5GeV 陽子ビームを水銀（Hg）ターゲットに水平入射させた。中性子強度を評価するために、点検出器を各々のモデレータの中性子ビーム放出面からの距離 2m の位置に設けた。

（2） 中性子性能の評価

中性子源施設として特に注目すべきは冷中性子ビーム強度である。ニュートロニクス計算によって得られたターゲット・モデレータ・反射体システムの冷中性子ビーム強度を外国の計画で予想される値と比較すると、ビーム出力 MW 当たりで Fig. 4.16 (a)[2]の如くになる。本計画におけるこの標準モデル Pb 反射体及びプレモデレータ付き結合型液体水素モデレータ（Coupled H_2 mod. with premod.）から得られる冷中性子ビームスペクトル強度は、Los Alamos の LANSCE Upgrade

計画（160 kW）[3]で期待される値と同程度であり、Be反射体を使用する場合にはそれ以上の強度が得られる。このように、大規模中性子源にもかかわらず中規模中性子源と同じ効率が得られることは注目に値する。一方、Fig.4.16(b)に示すようにPb反射体はBe反射体と比較して同等なパルスピーク値、より狭いパルス幅、短い減衰時間を与え、優れたパルス特性を示す。ただし、Be反射体はFOM(Figure of merit)がパルス当たりの時間積分強度に比例する実験にとっては大きな利得となるという長所を有している。

また、陽子ビーム及びターゲット形状、ターゲット寸法の変化（水銀冷却流路の確保）、ターゲット・モデレータ間距離の増加等の冷・熱中性子ビーム強度に及ぼす影響について調べ、ターゲット及び冷モデレータの工学的成立性並びにそれらの設計裕度について検討した。その結果、冷・熱中性子ビーム強度は、評価した範囲（縦/横比 = 0.17～0.69）[1]の陽子ビーム及びターゲット形状の変化にほとんど影響されないこと、水銀冷却流路に係わるターゲット横方向の寸法増加による強度の減少割合は比較的小さいことなどがわかった。この成果によりターゲットの工学設計は大きな自由度を得ることができ、設計が大きく展開する端緒となった。

（3） モデレータの核発熱

5MWの中性子源施設では、とくに液体（超臨界）水素モデレータは中性子収率の観点から水素温度の上昇を3K程度に抑制し、モデレータ容器構造の強度維持の観点から沸騰等を抑制して過大な圧力変動の発生を防ぐ必要がある。このためには、工学設計の基礎となる核発熱の詳細なデータを整備し、同時に、中性子性能を犠牲にすることなく核発熱を軽減できる方策を提案することが重要である。

Table 4.5に示すように非結合型液体水素モデレータ内の核発熱は約4kWと高く、結合型液体水素モデレータではプレモデレータにより相当に低減されているものの[5]、700cm^{3}程度のモデレータ容器内でkWの発熱を生じている。発熱密度の分布を解析した結果では、ターゲットに近接した領域でモデレータ内の水素の発熱密度は16W/cm^{3}に達する。Table 4.6に原研の5 MW核破砕中性子源と海外の大強度中性子源における液体水素モデレータの主要諸元を示す。原研のモデレータは高い中性子性能を確保するためにターゲットに近接して設置することから、容器体積当たりの発熱量が極めて大きいことがわかる。現在、非結合型液体水素モデレータの除熱（超臨界水素の循環）を確実に行い、沸騰開始等に関わるホットスポットの発生を抑制するため、後述するように流動を最適化する工学研究開発を進めている。

（4） 中性子性能向上を目指した先進的
モデレータの開発

モデレータの工学的開発の負担を低減するには、中性子強度を維持しつつ核発熱を低減する新しい優れた概念の創出が必要である。

（a） 拡張型プレモデレータ
(Extended Premoderator[6])

中性子散乱施設では、1.5 GeVの扁平陽子ビームを扁平なターゲットに入射することから、発

生中性子は前後方向及び横方向にも広がった分布になる。このため、液体水素モデレータの直下にしか底部プレモデレータが存在しない標準モデルでは、冷中性子ビーム取り出し面からプレモデレータを経由しない速中性子が大量に入射する可能性がある。そこで、冷中性子強度の増加と同時に核発熱の低減を目指して、Fig.4.17 に示すようにプレモデレータを反射体中のビーム取り出し孔に沿って延長する方法を新たに提案した。

Fig.4.18 に標準モデル、拡張型プレモデレータ付きモデルの冷中性子ビーム強度、パルス特性、発熱密度の変化を底部プレモデレータの厚さをパラメータにして示す。モデレータの核発熱は底部プレモデレータの厚さとともに単調に減少するが、冷中性子ビーム強度には 2.5 cm 厚の辺りに最適な厚さが存在すること、パルス特性（半値幅及び減衰時間）は厚さとともに緩やかに劣化することなどが分かる。一方、底部プレモデレータを中性子ビーム取り出し方向に 10 cm 拡張させると（Bottom extended PM)、冷中性子強度は増加し、核発熱も明らかに減少している。さらに、プレモデレータの拡張を底面だけでなく、ビーム取り出し孔の側面、天井にまで拡大させると（Full extended PM)、さらに高い冷中性子強度と、さらなる核発熱の低下が得られた。しかも、このように優れた性能がパルス特性を劣化させることなく実現できる可能性が示されている。そこで、標準プレモデレータと full extended の場合のパルス波形とピーク強度を比較した。Fig.4.19 にその結果を示す。半値幅にも指数関数的減衰部分にも全く差違が見られず、拡張型プレモデレータが極めて優れた概念であることがわかる。

Full extended premoderator を用いた場合の陽子ビーム出力 1 MW 当たりの時間積分冷中性子ビーム強度を、世界最高強度の原子炉中性子源である ILL(Institute Laue Langevin) の新しい冷中性子源（second cold source）から得られるビーム強度の 1/4 値と比較した結果を Fig.4.20 に示す。1 MW で ILL の 1/4 に匹敵し、5 MW では時間積分冷中性子強度が 1.25 倍と ILL を凌駕することができることを示しており、これは科学の広い分野で多くのブレークスルーが期待できるレベルであると言える。

（b） 高分解能熱中性子用モデレータの開発研究

一方、熱中性子用モデレータについては、前述したように核発熱の極めて大きい非結合型超臨界水素モデレータを当面の開発目標に掲げている。このモデレータの使命は短パルス熱中性子であるため、計算機による最適化研究には次のような困難がある。先ず、冷中性子用のプレモデレータ付結合型液体水素モデレータの場合に比べ時間積分強度が著しく弱いこと、十分狭いエネルギーバンド幅の中性子のパルス時間分布を調べるには一定の統計を得るのにさらに長い計算時間が必要なことが挙げられる。そこで、新たに時間焦点法（time focusing method）を導入して飛行時間によるパルス波形へのぼけの影響を受けないようにした。この方法は実験ではよく用いられる方法で、広いバンド幅を採用しても最終的に求める物理事象に支障がない場合に用いられる。ここではエネルギー幅を十分狭く選び、それぞれのエネルギービンに入って来る中性子の飛行時間スペクトルを別々に蓄積し、エネルギーが少しづつ異なるために生ずる飛行時間の違いをオフラインで補正した後、全バンド幅について積分する方法である。Fig.4.21 は結合型・非結合型液体水素モデレータの低エネルギー（2.0～2.2 meV、バンド幅 10 %）でのパルス特性を時間焦点法をかけない場合とかけた場合について比較したものである。図にみられるように、歴然たる

差が理解できる。このようにして出来るだけ広いエネルギーバンド幅をとり、時間焦点法により計算機実験の分解能を落とすことなく、必要な統計精度でパルス特性を検討出来る段階に近づいており、工学設計に必要な詳細データを早晩提供できるものと考えている。

（5） 今後の課題

これまでのニュートロニクス計算により、現システムにおける中性子性能が評価され、工学設計に必要な基礎データを提供した。今後の主要課題として以下の項目が挙げられ、現在、これらの解決等を図り、最高性能の中性子源を得ることを目指して研究開発を進めている。

（a） 複合反射体や非結合型反射体を含めた反射体の最適化
（b） 反射体の冷却水を考慮したニュートロニクス計算
（c） モデレータ容器の発熱
（d） 反射体、デカップラー、バルク遮蔽の内側領域の発熱
（e） 液体（超臨界）水素、固体・液体メタン等の最新の使用温度での散乱断面積の整備
（f） NMTC/JAERI の 3 GeV 以上への対応

参考文献：

（1） Watanabe, N. et al.: JAERI-Tech 98-011(1998).
（2） Watanabe, N. et al.: to be published in Proc. AccApp'98 (Gatlinburg, TN, USA, Sept. 20-23, 1998).
（3） Ferguson, P. D. et al.: Proc. ICANS-XIII (PSI, Villigen, Switzerland, Oct. 11-14, 1995) 510.
（4） Watanabe, N. et al.: to be published in Proc. ICANS-XIV (Starved Rock Lodge, Utica, Illinois, June 14-19, 1998).
（5） Watanabe, N. et al.: to be published in Proc. Int. Workshop on Cold moderators for Pulsed Neutron Source (Argonne, Sept. 28-Oct. 2, 1997).
（6） Watanabe, N. et al.: to be published in Proc. ICANS-XIV (1998).

4.2.2 固体ターゲットの開発

ラザフォード・アップルトン研究所（英）の核破砕中性子散乱施設ISISなどで広く使用されている固体ターゲットは、タングステンなどの重金属製の板（プレート）を約1～2mmの隙間を設けて多数重ね合わせ、この隙間(冷却流路)に冷却水を流して冷却する並列冷却流路群構造である[1]。このような構造の固体ターゲットに4.2.1項で述べた矩形、一様強度分布の陽子ビームが入射したときの発熱密度分布をFig. 4.22に示す。図は1.5MWと2.5MWの陽子ビームが入射したときの計算結果で、発熱密度のピーク値は陽子ビームが入射する近傍で生じており、1.5MWでは788W/cc、2.5MWでは1310W/ccであった。

このように高い発熱密度を多冷却流路で効果的に除去するには、流量配分の偏差をできるだけ小さく（均一化）しつつ高い熱伝達性能を維持する必要がある。流量配分を均一化するには冷却

水流速をできるだけ低くすることが望ましいが、一方で低流速で十分な熱伝達性能を確保できるように伝熱促進を図ることが要件である。ターゲット冷却流路のように水を使用した狭い流路の伝熱促進の実験例はほとんどないため、ターゲットを模擬した伝熱面に高さ0.2mmの矩形リブを設けた片面加熱の矩形狭隘流路を製作し、冷却水のレイノルズ数（Re、流速の無次元数）、リブピッチなどをパラメータにして設計データを整備してきた。その結果、リブのピッチ（P）と高さ(k)の比が10の場合には、温度境界層が発達した領域では平滑流路の熱伝達率（Dittus-Boelter式）よりも２倍以上向上し、熱伝達率を無次元化したヌセルト数(Nu)を用いて次の実験式を導出した[2]。

$$Nu=0.416Re^{0.57}$$

一方、温度境界層が発達するまでの温度助走区間の熱伝達率は、流路の等価水力直径(De)と加熱開始点からの距離(L)を用いて、次式でよく表すことができた[3]。

$$Nu=277(1+(L/De)^{-2.3})$$

上記の結果を基にして、タングステンを用いたターゲットプレート内の冷却及び構造強度特性の評価を行った。このとき、Fig.4.22に示した発熱密度分布よりも20%大きい値を用い、ターゲット入口温度50℃、入口圧力2MPaの条件で評価した。

Fig.4.23にリブ付きタングステンターゲット板厚方向の熱応力・温度分布を示す[4]。図は発熱密度がピークに達する領域を対象にして、ターゲット板厚を6mm、冷却水の流速は1.5MWでは5m/s、2.5MWでは7m/sとしたときの結果である。Fig.4.23に示した解析結果は、いずれも設計条件である許容応力120MPa、許容温度200℃を十分に満たしている。これらと同じ結果をリブのない平滑面のターゲットで実現するには、1.5MWの場合でも10m/sの流速を与える必要があり、リブを設けることで流速を約半分に低減することができるため、並列冷却流路群の流量配分の偏差がより小さくなり、簡便な案内羽根などの流量分配機構でより一様な流量配分を実現できるものと考えられる。このようにリブ付きターゲット板を用いることにより、第Ｉ期の条件である1.5MWの陽子ビームには十分に対応でき、また、本解析結果から2.5MWという非常に高い陽子ビーム条件下でも設計条件を満たしていることから、将来の高出力化にも固体ターゲットが対応できる可能性があると考えられる。

これらの結果を踏まえて設計した核破砕固体ターゲットの構造をFig.4.24に示す。幅100mm、全長200mm、厚さ6～40mmのタングステン板を1.2mmの隙間を設けて重ね合わせ、この隙間に冷却水（重水）を流してターゲット材を冷却する構造である。この構造で、陽子ビーム入射部近傍におけるターゲットプレート群内の冷却水の体積割合は20%以下であり、水による中性子吸収の影響を極力を抑制するようにしている。また、固体ターゲットプレートの両側に設置されているマニホールド部の断面積もできるだけ小さくしつつ、必要な流量を効率よく分配できるように、陽子ビーム入射部側は並列に設置したターゲットプレート冷却流路群をワンスルーで冷却する方式、それよりも後流側は並列冷却流路群をシリーズに接続する折返し流路方式にしている。なお、ターゲット容器は二重構造とし、内側容器に亀裂等を生じたときにターゲットプレート冷却材の外部漏えい防止と崩壊熱除去のために、内側容器の外周には重水冷却壁を設けてある。ターゲット容器の寸法は、概略で幅400mm、高さ140mm（陽子ビーム入射部）、全長が1000mmである。

材料照射データの整備、伝熱促進の高度化等を図りながら、さらに検討を進めていく予定である。

参考文献：

（1） 日野：日本機械学会第75期通常総会講演会、東京、514-515(1998).
（2） Shafiqul,Md. et al.: J. Nucl. Sci. Technol, Vol.35, No.9, 671-678(1998).
（3） 日野他：第11回熱工学シンポジウム、横浜(1998).
（4） 須々木他：1998原子力学会秋の大会、福井工大、A26(1998).

4.2.3 水銀ターゲットの開発

（1） ターゲット構造

中性子散乱実験施設用ターゲットの開発では、最終的に3.3mA（出力5MW）運転用の水銀ターゲットを開発して供用する計画である。水銀ターゲットの開発では、水銀による構造材のエロージョンの低減、パルス状陽子ビーム入射時にターゲット容器内で生ずるホットスポットの抑制と瞬時発熱に起因する容器固体材料中の応力波、並びに液体水銀中の圧力波により容器に発生する応力の低減などの課題がある。これらの課題に対処するためのターゲット構造として、エロージョン低減のために水銀流速を低くするとともに、ホットスポットの発生を抑制できるように、陽子ビームに対し水銀の流れがクロスするターゲット構造の概念を独自に提案した[1,2]。

Fig.4.25にクロスフロー型水銀ターゲット構造の概念例を示す。本構造では、固体ターゲットと同様に外側に重水冷却壁を有する二重容器構造とし、発熱の大きいビーム窓の冷却は中性子効率等の観点から重水で行い、水銀はターゲット材としての機能に限定した。このため、流路断面積が大きく取れることからエロージョンに影響を及ぼす水銀流速を低く抑えることができ、また、流路を構成する案内板(Bladed-Frame)が構造材を兼ねることにより高い容器構造強度を実現し、圧力波による応力に耐えられるという利点を有する。ターゲット容器はSUS316製で、その寸法は概略で幅400mm、高さ140mm（陽子ビーム入射部）、全長が1000mmである。水銀の流量配分が陽子ビームによるに軸方向発熱分布と相似になるように、案内羽根（Blade Flow Distributor）形状及び配置を最適化する。

この構造の容器内流動解析結果をFig.4.26に示す。解析には3次元汎用熱流動解析コードSTAR-CDを用いた。水銀の流速は容器入口で1m/sとしている。米国SNS計画やヨーロッパESS計画の水銀ターゲットでは、陽子ビームによる核発熱が極めて大きいビーム窓近くに大きな再循環流領域が形成されるが、本構造では、ビーム窓近傍では完全に再循環流が抑制されているのがわかる。

5MW陽子ビーム入射時の3次元容器内温度分布の解析結果をFig.4.27に示す。ターゲット入口水銀温度は50℃、入口平均流速は1m/s、ターゲット内での総発熱量は約3MWである。水銀の局所最高温度は先端コーナ部で生じ、1m/sという比較的低流速にもかかわらず260℃と水銀の沸点よりも約100℃低い結果が得られ成立性の見通しがついた。解析は容器境界を断熱条件で行っており、容器外側は重水冷却されるのでコーナー部の水銀温度はさらに下がるものと考えられる。今後は、二重容器構造をモデル化して容器構造材の温度、熱応力分布等を明らかにするとともに、水銀が

パスル状に加熱される際に生じる圧力波による応力変動を合わせて検討し、構造強度の観点から容器各部の厚さ等について評価する予定である。

（2） 水銀ターゲット容器の熱衝撃解析[3, 4]

水銀ターゲットでは、パルス状陽子ビーム入射に伴う圧力波の発生及び容器壁の熱衝撃により容器には過大な応力を発生する可能性が極めて高い。これらの抑制及び低減対策を検討するために、発生する圧力波と熱衝撃波、及びそれらが重合した応力波の挙動を解析的に調べた。

Fig.4.28に示すように、陽子ビームは50Hzの断続パルスでターゲットに入射する。陽子ビームパルスの入射時間は1パルス当たり1μsである。この陽子ビームパルス入射により、1パルス当たり45kJ程度の熱が狭い領域で瞬時に発熱する。そのため容器入射部や液体水銀中の核破砕反応領域では熱膨張が温度上昇に追いつかず圧縮場を形成し、その後圧力波・応力波として周囲に伝搬する。発熱密度分布は、前述したニュートロニクス解析結果を基に、軸方向は指数関数、半径方向は矩形の一様分布でフィッティングした。このとき、水銀温度は1パルス当たり約20℃上昇する。

解析モデルは、応力波の挙動を把握するという観点から、容器材質は実機と同じSUS316、寸法は厚さ2.5mm、直径20cm、長さ120cmの円筒状とし、陽子ビーム入射部は半球殻状とした。このモデルを用いて、陽解法による有限要素法構造解析コードで解析した。このとき、容器内の水銀をCAX4R要素（軸対称4節点ソリッド）、容器をSAX1（軸対称2節点シェル）でモデル化し、水銀と容器は接触条件で連結した。このため、流体と固体は接触した場合は連続体として、非接触の場合は不連続体として力が伝達されることになる。

半球殻頂部から軸方向に沿っての各位置における周方向膜応力の時刻歴をFig.4.29に示す。Z=0cmの半球殻頂部の最大膜応力は約110MPaである。円筒部での最大膜応力はZ=10cmのところで生じ、約120MPaである。半球殻頂部からの距離Zが遠くなるに従い応答が遅れ、同時に応力値も低減している。ちなみに、ターゲット容器の応力波伝搬速度は$\sqrt{(E/\rho)}$≒5000m/sであり、容器の半径10cmを進むのに約20μsを要する。Z=10cmでの応答の遅れが約20μsであることから、ビーム外径からの距離約10cmを進むのに要する時間とほぼ一致している。今後の構造設計では、ターゲット直径、長さ、板厚等の最適化をはかり、寿命を推定するための損傷評価法の開発を目指す計画である。

（3） ターゲット構造材の熱衝撃試験[5, 6]

ターゲット容器の健全性を評価するうえで、陽子及び中性子照射による材料強度の変化とともに、圧力波や熱衝撃による容器の損傷、すなわち容器に生じる微小亀裂の発生と拡大挙動の解明が重要である。そこで、短パルスレーザー（ルビーレーザー）を用いた容器材料の熱衝撃試験を計画し、その第一ステップとして、試験により計測したひずみと、ABAQUS Explicitによる解析結果を比較して、応力波伝ぱに対する解析モデルの妥当性を検証した。

Fig.4.30に示すように、試験では、波長674.3nm、パルス幅約50ns、ビーム強度1 J/pulse、ビーム半径約5mmのルビーレーザーを、直径30mm、厚さ1mmのSUS316L製のディスク表面中央に照射した。その裏面中央のひずみを、ゲージ長0.2mmの箔ひずみゲージ、及び応答周波数200kHzの動

ひずみアンプにより計測した。

応力変動の解析に当たって、先ず、応力波伝ぱ解析の温度入力条件を決定するために、熱伝導解析をABAQUS/Standardにより行った。ルビーレーザーのSUS316Lへのエネルギー吸収率を40%、加熱半径5mm、レーザーパルス幅50nsとし、加熱深さを50μmとして解析し、加熱部の温度はレーザーパルス幅である50nsで最大の50.5℃に達し、その後ほぼ一定となった。この温度解析結果を基に、応力波伝ぱ解析をABAQUS/Explicitにより、軸対称シェル要素で行った。

Fig.4.31に計測したひずみの時刻歴及び解析結果を示す。加熱部境界で発生した引張の応力波がディスク中央まで伝ぱする時間は、SUS316L中の応力波の伝ぱ速度と伝ぱ距離（伝ぱ速度；5500m/s、伝ぱ距離；5mm）から、0.9μsと推定される。試験結果及び解析結果は、ともに照射後約1μsに引張ひずみの最初のピークを示し、両者の伝ぱ特性は一致した。しかし、ひずみの振幅値は試験結果よりも解析結果の方が大きく、この原因として、計測に用いたひずみアンプの応答周波数特性、及びレーザービームの形状の影響が考えられる。高精度に高周波成分を計測するために、アンプを必要としない半導体ゲージ等を用いるとともに、レーザー条件を変えて、熱衝撃を受ける材料の損傷を評価する予定である。

参考文献：

（1） Hino,R. et al.: to be published in Proc. ICANS-XIV(Starved Rock Lodge, Utica, Illinois, June 14-19, 1998).
（2） Kaminaga,M. et al.: to be published in Proc. ICANS-XIV (1998).
（3） Kikuchi,K. et al.: to be published in Proc. ICANS-XIV (1998).
（4） Ishikura,S. et al.: to be published in Proc. ICANS-XIV (1998).
（5） 粉川他：1998原子力学会秋の大会、福井工大、A28(1998).
（6） Kogawa,H. et al.: to be published in Proc. 3rd Int. Symposium on Impact Engineering 1998 (ISIE '98) (シンガポール)

４．２．４　冷減速材の開発[1, 2]

核破砕ターゲットシステムでは、ターゲットで発生する大強度中性子を実験に適したエネルギーレベルに減速させる減速材の開発が重要である。特に、冷・熱中性子領域で使用する超臨界水素減速材（以後、冷減速材と呼ぶ）は、高い中性子パルス性能、中性子収率等を確保するために、容器にアルミ合金を用いてコンパクトな薄肉・扁平構造にし、水素温度の上昇を３Ｋ以内に抑制する必要がある。

従来の減速材容器にはA6061、A5083のアルミ合金が広く用いられている。比較的新しいアルミ合金であるA2014は減速材容器への使用実績はないが、ロケットの燃料タンクの材料として用いられてる。Fig.4.32に超臨界水素に接する冷減速材容器（120×120×50mm、板厚3mm、曲率半径180mm）の応力分布をABAQUS/Standardで解析した結果を示す。超臨界水素条件（1.5MPa、20K）の下で、外表面には最高99MPa、内表面には最高112MPaの応力を生じている。ここでA6061、A5083及びA2014の許容応力はそれぞれ63MPa、68MPa及び110MPaであり、解析値が許容応力を

上回っているために容器厚さを厚くするか曲率半径を小さくする必要がある。特にA6061とA5083はA2014に比べ許容応力が約40%低いため、現構造では容器厚さを5mm以上にする必要がある。しかし、前述したように容器厚さが厚くなるほど中性子透過率が減少して中性子収率が低下するため、容器厚さは可能な限り薄くすることが望ましい。

一方、中性子収率や構造強度に大きな影響を与える局所的な水素温度の上昇を抑制する方策を検討するために、減速材容器内における超臨界水素の流動状況、特に噴流挙動について、水による予備流動実験と流動解析を行った。実験装置は、タンク、ポンプ、流量計から成る水ループに減速材模擬試験体を接続した構成である。減速材模擬試験体はアクリル製で、内径60mmの円筒管に内径25mmの円管を挿入して減速材容器の衝突噴流部を模擬している。流れの計測には、レーザー流速分布計（PIV）を用い、実験はほぼ大気圧、室温条件で行った。

Fig.4.33に試験体入口流速が3m/sのときの流速分布の測定結果と解析結果を示す。このとき、内管下端（噴流口）と外管底面のギャップは、10mmである。測定結果は、PIVシステムで1s間隔で連続的に計測した100枚のベクトルマップを時間平均したものである。噴流口から出た水は底面に衝突して、外管の壁面に沿って上方へ流出するが、このとき、内管の壁面近傍で再循環流が生じており、その領域は底面から約50mmの高さまでである。この高さは減速材内容器の約半分に相当し、この領域の発熱密度が高いため、ホットスポットを生じる可能性がある。このために超臨界条件を失って沸騰を生じると、圧力波等により容器が破損するおそれがある。

上記実験条件で熱流体解析コードSTAR-CDを用いて解析した結果は、約50mm高さの再循環流領域の存在を示し、実験結果とよい一致を示している。ただし、今回の実験は噴流出口でのレイノルズ数が約84,000であり、実機よりも一桁小さいので、高レイノルズ数領域の実験を実施し、コードのさらなる検証をはかり、熱的な課題を解析的に明らかにしていく予定である。

これらの結果を踏まえて、従来の冷減速材構造を改良した新しい構造を提案した。その概要をFig.4.34に示す。発生応力に耐えるように容器外面には微小フレーム、内面には支持板を設置し、また、再循環流領域の抑制を図るために内管に吹き出し孔を設け、吹き出しによる噴流流量の減少で容器底面での熱伝達率が低下しないようにツイストテープにより強い旋回流を噴流に与えて高い熱伝達率を維持するようにしている。今後はこの構造の成立性をさらに検討していく予定である。

参考文献：

（1） Aso, T. et al.: to be published in Proc. ICANS-XIV (Starved Rock Lodge, Utica, Illinois, June 14-19, 1998).

（2） 麻生他：機械学会第76期全国大会、東北大、475-476(1998).

Table 4.1 Neutron instruments connected to neutron beam-lines

NO.	測定器名称	分解能等	略　称	中性子エネルギー領域		
				thermal region	Cold region	Epithermal region
1	小角散乱装置	生物用、低分解能	Biology SANS		○	
2	小角散乱装置	生物用、高分解能	Biology SANS		○	
3	小角散乱装置	物質科学用、低分解能	SANS		○	
4	小角散乱装置	物質科学用、低分解能	SANS		○	
5	極小角散乱用２結晶回折計		DCD	○		
6	反射率計		Reflectometor		○	
7	反射率計		Reflectometor		○	
8	反射率計		Reflectometor		○	
9	液体・ｱﾓﾙﾌｧｽ用回折装置		SANDLAS type			○
10	液体・ｱﾓﾙﾌｧｽ用回折装置		Glass & Liquid			○
11	液体・ｱﾓﾙﾌｧｽ用回折装置		Glass & Liquid			○
12	単結晶回折計	生命科学用	Biology SXD	○		
13	単結晶回折計	物質科学用	SXD	○		
14	散漫散乱用回折計		D7 type	○		
15	粉末回折装置	高分解能	HRPD	○		
16	粉末回折装置	高分解能	HRPD	○		
17	粉末回折装置	中分解能高強度	HIPD	○		
18	粉末回折装置	特殊環境用	SEPD	○		
19	残留応力測定用回折装置		Residual stress	○		
20	高分解能非弾性散乱装置	direct giometry型	MAPS type	○		
21	高分解能非弾性散乱装置	direct giometry型	MARI type	○		
22	高分解能非弾性散乱装置	direct giometry型	Epithermal chopper			○
23	高分解能非弾性散乱装置	direct giometry型	IN5 type		○	
24	高分解能非弾性散乱装置	inverted giometry型	LAM-D type	○		
25	高分解能非弾性散乱装置	inverted giometry型	IRIS type		○	
26	高分解能非弾性散乱装置	inverted giometry型	IN10 type		○	
27	高分解能非弾性散乱装置	inverted giometry型	TFXA	○		
28	高分解能非弾性散乱装置	eV分光器	eVS			○
29	熱中性子三軸型分光器		TAS	○		
30	冷中性子三軸型分光器		Cold TAS		○	
31	スピンエコー装置		Spin Echo		○	
32	スピンエコー装置		Spin Echo		○	
33	RI試料用分光器		Hot Sample	○		
34	干渉計		Interferometer		○	
35	超冷中性子発生装置		UCN		○	
36	素粒子・核物理用装置		PEN type			○
37	素粒子・核物理用装置		Nucl. phys.			○
38	未定１		A			○
39	未定２		B			○
40	未定３		C	○		
41	未定４		D		○	

Table 4.2　Specification of neutron scattering facility

項　目		内　容
主体構造		鉄筋コンクリート造り
階 数		地下1階、地上4階
建家寸法	高 さ	地上 約30m、地下 約15m
	幅	約156m
	奥行き	約115m
床面積	コールド	実験室等　4,376m^2 、電気室　554m^2 、機械室　1,788m^2
	ホット	実験室等　16,725m^2 、機械室　3,805m^2
	合 計	27,248m^2
特殊設備	クレーン	ターゲットステーション用：100トン　1基、 5トン　3基 中性子ステーション用　　：30トン　3基
	エレベータ	人荷用（700kg）1基
	機器搬入	シャッター（幅7m、高さ5m）4
電気設備		三相200V　4MW 、三相400V　6MW 単相200V/100V　約1MW 非常用電源　7MW
空調設備		夏25℃　冬22℃　湿度60%
給排水設備		上水 10m^3/h　濾過水 5m^3/h 排水 低レベル 5m^3/h、一般 5m^3/h

Table 4.3-1 Room list of neutron scattering facility (2nd - 4th floor)

フロア	室　名　称	床面積 (m^2)	階　高 (m)	室容積 (m^3)	管理区分
屋　上	エレベータ機械室	53		158	管理
	通路	22	3.0	65	管理
地上４階	非管理区域換気空調機械室（給気）	389	7.0	2,720	非管理
	非管理区域換気空調機械室（排気）	315	7.0	2,205	非管理
	管理区域換気空調機械室（排気）	560	6.5	3,640	管理
	通路	351		2,282	管理
	階段室	40		257	管理
	機器搬出入口	13	6.5	81	管理
	通路	92		645	非管理
	階段室	15	7.0	103	非管理
	機器搬出入口	22	7.0	152	非管理
	エレベータ室	8	7.0	54	非管理
地上３階	制御室	389	7.0	2,720	非管理
	減速材冷却設備室	350	6.5	2,275	管理
	反射体取扱室（機器搬出入室(1)）	1,325	7.0	21,840	管理
	電源盤室（A）	158	段有り	1,001	非管理
	バッテリ室（A）	28	2.5	70	非管理
	電源盤室（B）	152	段有り	965	非管理
	バッテリ室（B）	28	2.5	70	非管理
	反射体取扱操作室（1）	28	8.5	235	管理
	機器置場（1）	331	6.5	2,150	管理
	機器置場（2）	144	6.5	936	管理
	機器メンテナンス室	144	10.2	1,469	管理
	燃料ディタンク室（A）	19	6.0	113	非管理
	排気管室（A）	7	6.0	42	非管理
	給気フィルタ室（A）	9	6.0	53	非管理
	燃料ディタンク室（B）	19	6.0	113	非管理
	排気管室（B）	7	6.0	42	非管理
	給気フィルタ室（B）	9	6.0	53	非管理
	通路	357		2,319	管理
	階段室	86		557	管理
	機器搬出入口	25		163	管理
	通路	126		883	非管理
	階段室	15	7.0	103	非管理
	エレベータ室	8	7.0	54	非管理
地上２階	データ処理室（1）	105	段有り	735	非管理
	居室（1）	156	7.0	1,092	非管理
	D／G制御盤室（B）	30	7.0	210	非管理
	出入管理関係設備室	283		1,979	管理
	電源設備室	252	7.0	1,764	非管理
	重水関連設備室	369	6.5	2,399	管理
	休憩室（2）	143		645	非管理
	休憩室（3）	71		319	非管理
	データ処理室（2）	198	4.5	891	非管理
	データ処理室（3）	180	4.5	810	非管理
	居室（2）	162	4.5	729	非管理
	居室（3）	192	4.5	864	非管理
	居室（4）	197		886	非管理
	通路	30	6.5	195	管理
	階段室	75		488	管理
	機器搬出入口	25		163	管理
	通路（非管理：ｷﾞｬﾗﾘ用通路(1)含）	665		3,818	非管理
	ギャラリ用通路（2）	278		829	非管理
	階段室	73		461	非管理
	機器搬出入口	18	7.0	123	非管理
	エレベータ室	8	7.0	54	非管理

Table 4.3-2 Room list of neutron scattering facility (1st floor and basement)

フロア	室名称	床面積 (m^2)	階高 (m)	室容積 (m^3)	管理区分
地上１階	中性子ステーション（１）	1,687	段有り	27,734	管理
	中性子ステーション（２）	2,645	段有り	45,687	管理
	中性子ステーション（３）	2,840	段有り	60,323	管理
	中性子ステーション（４）	636	14.5	9,215	管理
	資材置場（１）	473	4.0	1,892	管理
	換気空調機械室(中性子ｽﾃｰｼｮﾝ用)	441	4.0	1,763	管理
	資材置場（２）	270	4.0	1,080	管理
	実験準備室（１）	248	4.0	990	管理
	実験準備室（２）	682	4.0	2,728	管理
	実験準備室（３）	420	4.0	1,681	管理
	展示室（１）	84	7.0	588	非管理
	展示室（２）	172		772	非管理
	ロビー（１）	195	7.0	1,365	非管理
	ロビー（２）	203	4.5	911	非管理
	従業員出入口	78		546	非管理
	出入管理設備室（１）	113	7.0	788	管理
	出入管理設備室（２）	120	7.0	840	非管理
	出入管理設備室（３）（階段室含）	157		1,102	管理
	出入管理設備室（４）	233	7.0	1,628	管理
	休憩室（１）	47	7.0	331	非管理
	Ｄ／Ｇ室（Ａ）	109	14.5	1,577	非管理
	Ｄ／Ｇ室（Ｂ）	109	14.5	1,577	非管理
	Ｄ／Ｇ制御盤室（Ａ）	30	7.0	210	非管理
	１次冷却水循環系機械室（１）	306	6.5	1,989	管理
	１次冷却水循環系機械室（２）	236	6.5	1,532	管理
	機器搬出入室（１）	111	10.3	1,055	管理
	機器搬出入室（２）	328	4.5	1,476	管理
	機器搬出入室（３）	293	段有り	1,316	管理
	機器搬出入室（４）	228	4.5	1,024	管理
	機器搬出入室（５）	56	14.0	441	管理
	反射体メンテナンス室	58	10.3	597	管理
	反射体取扱操作室（２）	101	段有り	1,035	管理
	ターゲット台車取扱室	89	11.0	974	管理
	ターゲット台車メンテナンス室	102	11.0	1,119	管理
	ターゲット移送室	110	段有り	1,213	管理
	マニュピレータ操作室（１）	18	11.0	197	管理
	マニュピレータ操作室（２）	30	11.0	333	管理
	ターゲット取扱操作室	152	14.0	2,132	管理
	ターゲット取扱スペース	182	14.0	2,548	管理
	ターゲット搬出入室	97	14.0	1,075	管理
	マニュピレータメンテナンス室	278	4.5	1,249	管理
	通路（管理）	172		1,117	管理
	階段室（管理）	75		488	管理
	機器搬出入口（管理）	25		163	管理
	通路（非管理）	363		2,540	非管理
	階段室（非管理）	73		508	非管理
	機器搬出入口（非管理）	18	7.0	123	非管理
	エレベータ室	8	7.0	54	非管理
地下１階	２次冷却水循環系機械室	236	5.8	1,367	管理
	排水設備室（１）	517	5.8	2,997	管理
	排水設備室（２）	369	5.8	2,140	管理
	ターゲット・反射体保管エリア	697	5.8	4,042	管理
	保管設備操作室（通路含）	1,916	段有り	1,374	管理
	通路（管理）	237		1,095	管理
	階段室（管理）	189		268	管理
	機器搬出入口（管理）	46		145	管理
	合計	27,248			

Table 4.4-1 Specifications of main components and auxiliary installations in target system

設備名	項　目	仕　様	
ターゲット本体	型式 設計温度／圧力 冷却材入口／出口温度 冷却材流量 ビーム入力 ビーム寸法	二重容器型 200℃／1.0 MPa 50／56.5℃ 120 m^3/h 1.5MW $80^W \times 55^H$ (mm)	二重容器型 200℃／0.5 MPa 50℃／151℃ 50 m^3/h 5.0 MW $100^W \times 68.8^H$ (mm)
ターゲット１次冷却系	冷却材 冷却材入口／出口温度 除熱量／冷却材流量	重水 50℃／56.5℃ 0.9 MW／120 m^3/h	水銀 50℃／151℃ 2.6 MW／50 m^3/h
液体水素減速材系	冷却材 運転温度／圧力 熱負荷／冷却材流量	液体水素 18 K(-255℃) 減速材容器入口／1.5 MPa 6.0 kW／15 m^3/h	
水減速材系	冷却材 運転温度／圧力 除熱量／冷却材流量	軽水 20℃／0.7 MPa 9.0 kW／4.0 m^3/h	
生体遮へい体冷却系	冷却材 運転温度／圧力 除熱量／冷却材流量	空気 20℃／-8～-20 mmAq 220 kW／16,800 m^3/h	
ビームライン冷却系	冷却材 運転温度／圧力 除熱量／冷却材流量	ヘリウムガス 40℃／0.2 MPa 16 kW／1,100 m^3/h at 60℃, 0.2 MPa	
線源台車冷却系 （陽子ビーム窓冷却系、生体遮蔽体冷却系含）	冷却材 運転温度／圧力 除熱量／冷却材流量	重水 50℃／0.5 MPa 900 kW／50 m^3/h	
ターゲットケーシング冷却系 （反射体冷却系含む）	冷却材 運転温度／圧力 除熱量／冷却材流量	重水 50℃／0.5 MPa 670 kW／65 m^3/h	
ヘリウムベッセル冷却系	冷却材 運転温度／圧力 除熱量／冷却材流量	ヘリウムガス 40℃／0.2 MPa 150 kW／6,600 m^3/h at 60℃, 0.2 MPa	
２次冷却系	冷却材 冷却材温度／圧力 除熱量／冷却材流量	軽水 35℃／大気圧 12,000 kW／1,500m^3/h	
冷水系 　水減速材系 ヘリウムベッセル冷却系	冷却材 運転温度／圧力 冷却材 運転温度／圧力 除熱量／冷却材流量除	軽水 12℃／大気圧 ヘリウムガス 40℃／0.2 MPa 150 kW／6,600 m^3/h at 60℃, 0.2 MPa	
冷水系 　水減速材系 　生体遮へい体冷却系 　建家換気空調系	冷却材 運転温度／圧力 除熱量／冷却材流量	軽水 12℃／大気圧 4,000 kW／670 m^3/h	
使用済ターゲット冷却系	冷却材 運転温度／圧力 除熱量 冷却材流量	軽水 40℃／0.5 MPa（ポンプ出口） 1,500 kW 200 m^3/h	
３次冷却水系	冷却材 冷却材温度	軽水 30℃	

Table 4.4-2 Specifications of main components and auxiliary installations in target system

設備名	項　目	仕　様
ヘリウムパージ装置	冷却材 運転温度／圧力 流量	ヘリウムガス 50℃／1 MPa 4 N m^3/h
反射体	材質 寸法	ベリリウム $1200^{L}\times800^{W}\times1600^{H}$
生体遮へい体	鉄　厚さ 総重量 コンクリート　厚さ 総重量	前:5500mm（陽子ビーム入射側）、後:6500mm、横:5000mm、上:6000mm、下:3000mm 6000ton 周辺:1000mm、上:1000mm、下:2000mm 1200ton
ターゲット台車	構造 寸法　鉄遮へい体 冷却系機器 総重量 駆動源	前方に鉄遮蔽体， 後方にターゲット１次冷却系を設置 $1400\sim1900^{W}\times1500\sim4000^{H}\times6600^{L}$（mm） $3500^{W}\times4000^{H}\times7000^{L}$（mm） 250ton 電動
中性子ビームポート	本数	32 本
中性子ビームシャッタ	方式 材質 寸法 駆動方式 配置 保守	パイプ上下型 炭素鋼＋コンクリート $300^{W}\times3200^{H}\times1500^{L}+400^{W}\times2200^{H}\times1000^{L}$（mm） 油圧シリンダによる上下駆動 ヘリウムベッセル付近に設置 ユニット毎上方に引き抜く
ターゲット台車取扱室 遠隔操作機器	（ＭＳマニピュレータ） 本数 揚重荷重	 10 本（2 本/鉛ガラス窓） 約 20kg
	（パワーマニピュレータ） 本数 揚重荷重	 2 本 約 90kg
	（クレーン） 形式 揚重荷重 台数	 XY 型天井クレーン 5 ton 1 台
使用済ターゲット保管設備	場所 保管個数	使用済ターゲット保管エリア ターゲット及び減速材　約 50 個
電気設備	高圧受電設備 ３相 200V ３相 400V 単相 200V/100V	11,000 kVA 4,000 kVA 6,000 kVA 890 kVA

Table 4.5 Total energy deposition in cryogenic moderators

Moderator	Moderator size (cm^3)	Reflector	Premoderator	Heat depositon (kW)
Coupled H_2	12 x 12 x 5	Pb	PM (2.5 cm)	2.79
Coupled H_2	12 x 12 x 5	Be	PM (2.5 cm)	2.06
Coupled H_2	12 x 12 x 5	Pb	Full (2.5 cm) *	2.28
Decoupled H_2	10 x 10 x 5	Pb	non	3.95

*A fully extended PM with 3.5cm thick bottom PM

Table 4.6 Comparison of important parameters of cryogenic moderators in various neutron sources

	ISIS	HFIR	ANS	SNS	JAERI*
Energy deposition (total, kW)	0.4	0.6+1.4	15+15	2	3.95
Moderator volume (liter)	1.06	0.5	30	1	0.5 (1)
Average power density (kW/liter)	0.4	1.2	1	1	7.9
Volumetric flow rate (liters/sec)	0.5	1	5.5	1	2
Temperature rise (K)	1.1	3	2.3	1.5+1.5	2.9 (5.8)

*The values for pulsed spallation source for a decoupled H_2 moderator. Our values is for the case of decoupled H_2 in Table 4.4. The values in parenthesis are for the case of 1 liter moderator volume.

This is a blank page.

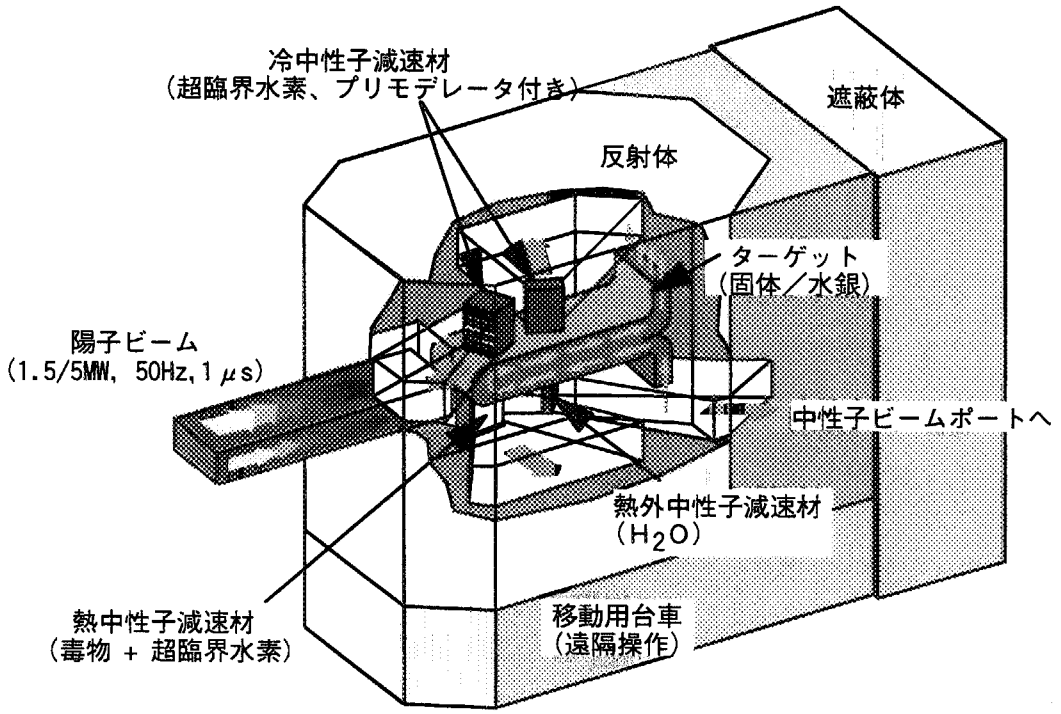


Fig. 4.1 Concept of target system

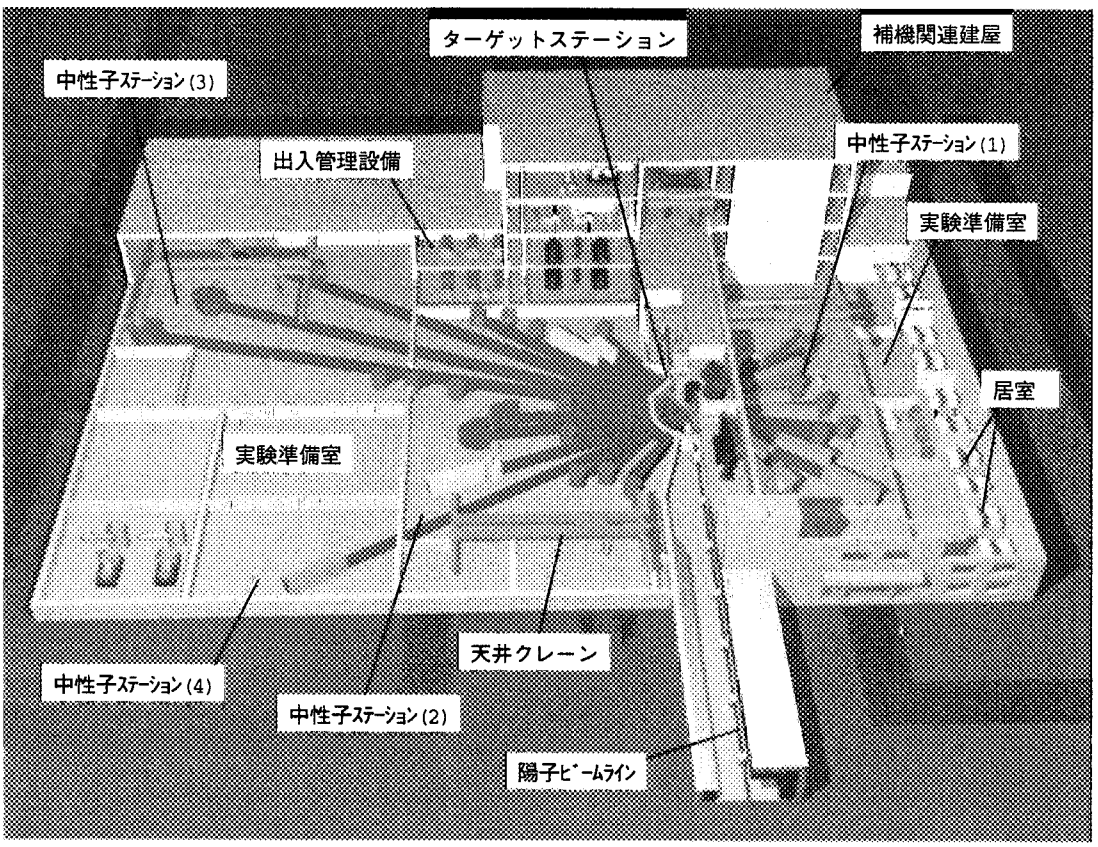


Fig. 4.2 Cutaway view of neutron scattering facility

This is a blank page.

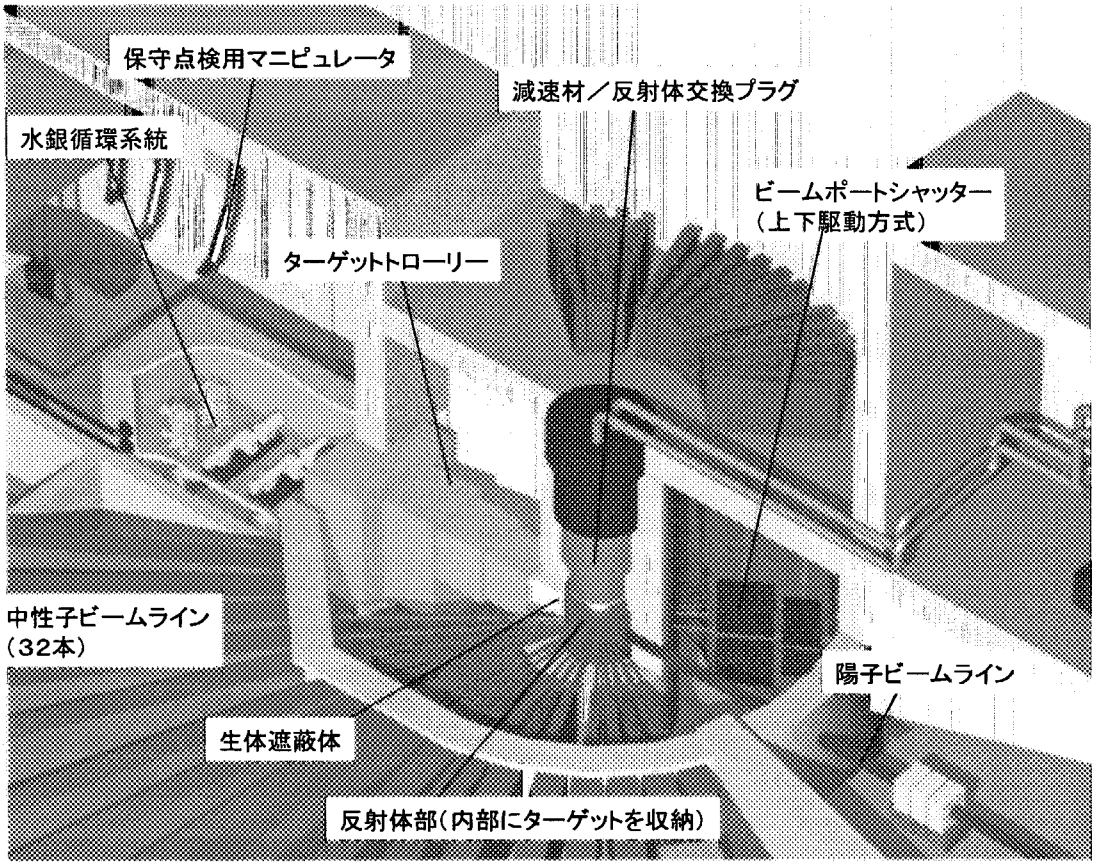


Fig. 4.3 Cutaway view of target station

This is a blank page.

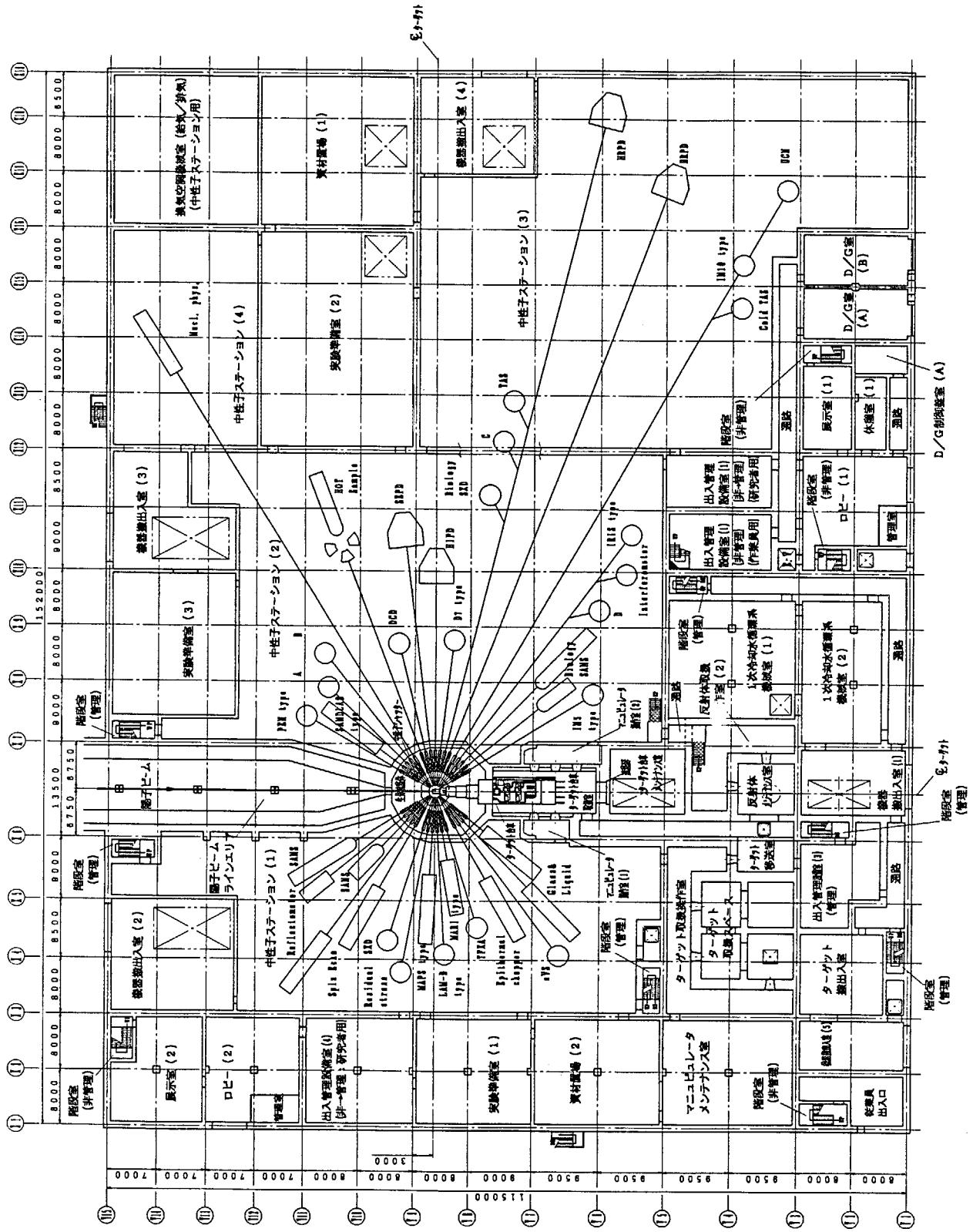


Fig. 4.4 Layout of 1st floor

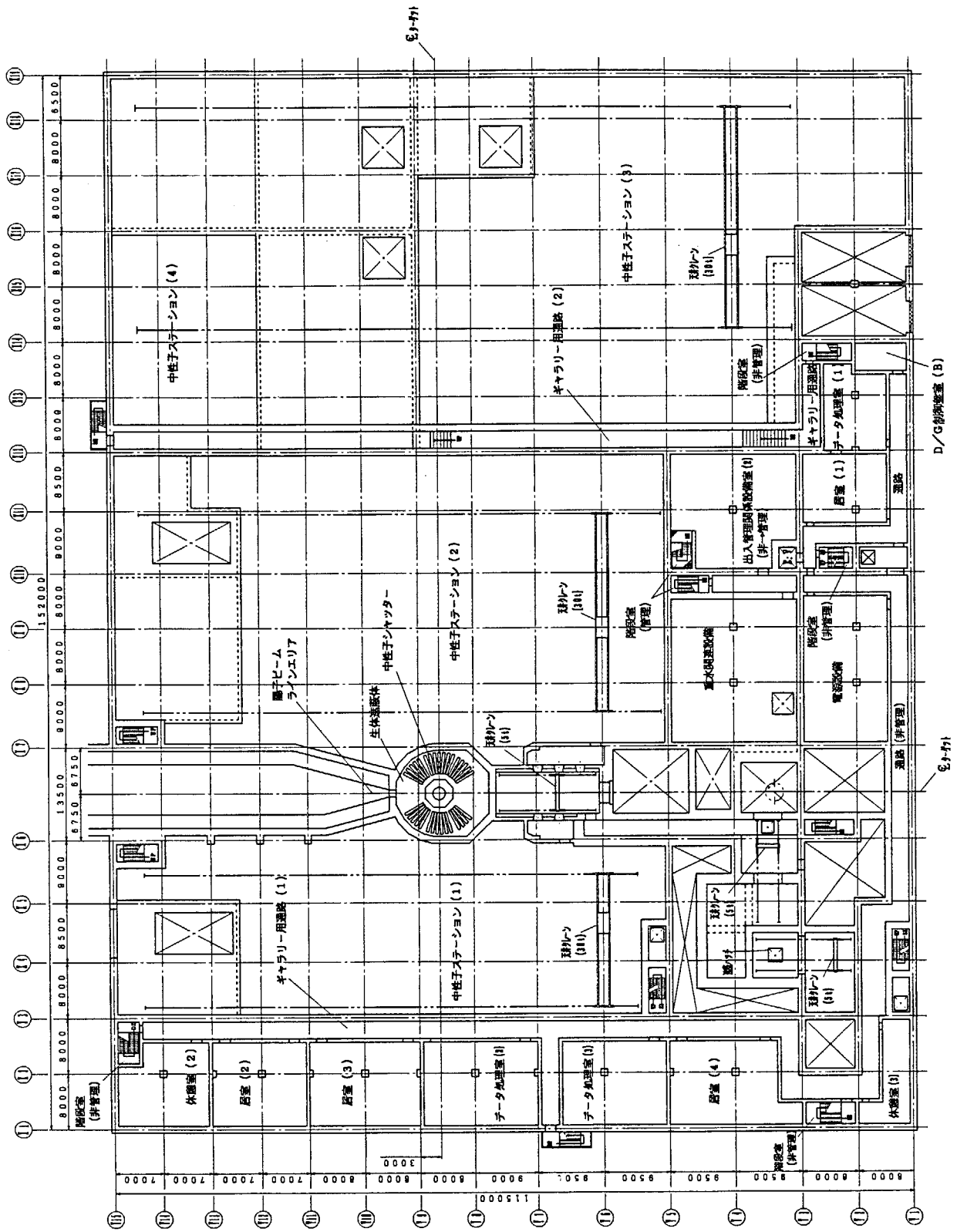


Fig. 4.5 Layout of 2nd floor

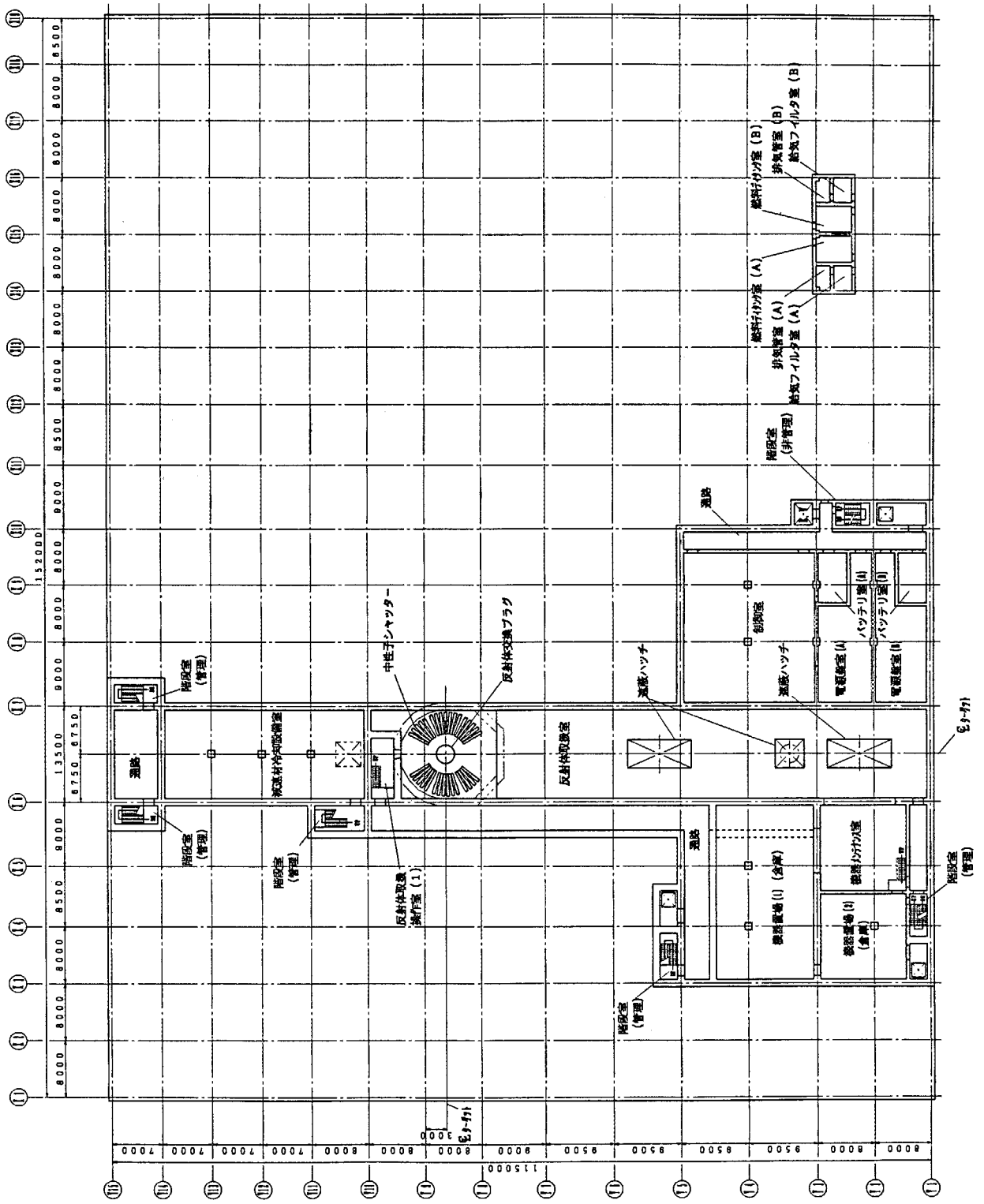


Fig. 4.6 Layout of 3rd floor

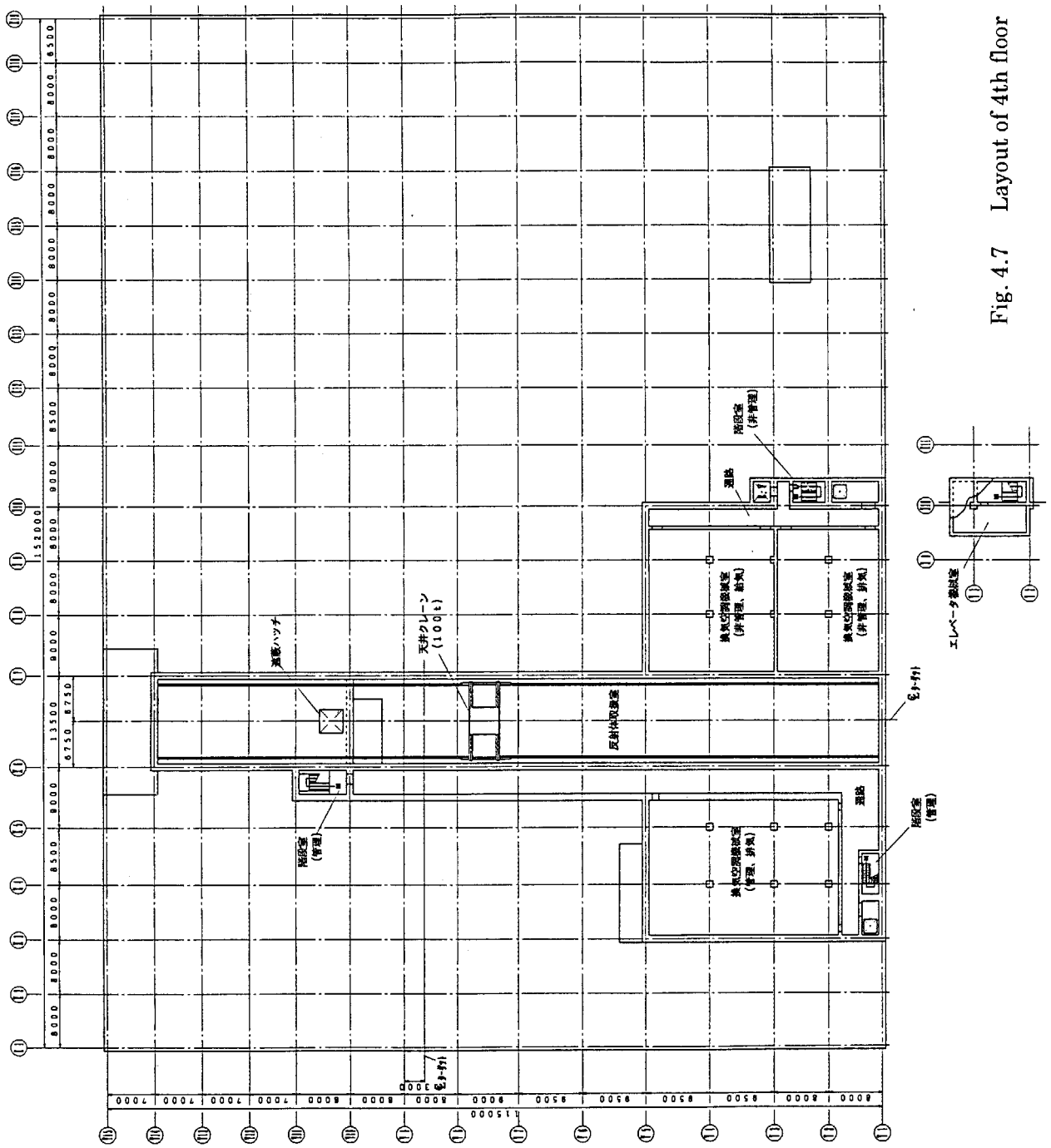


Fig. 4.7 Layout of 4th floor

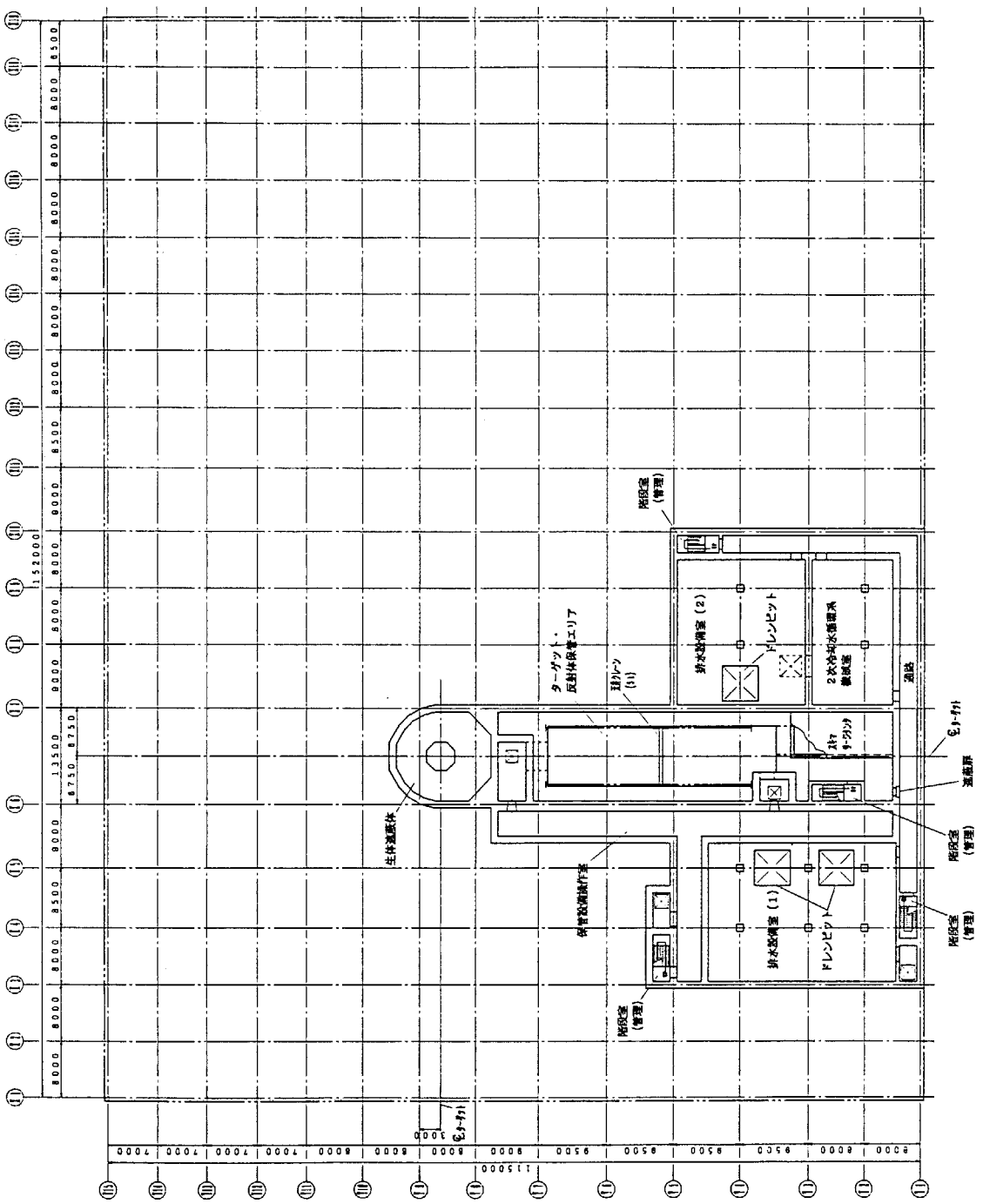


Fig. 4.8 Layout of basement

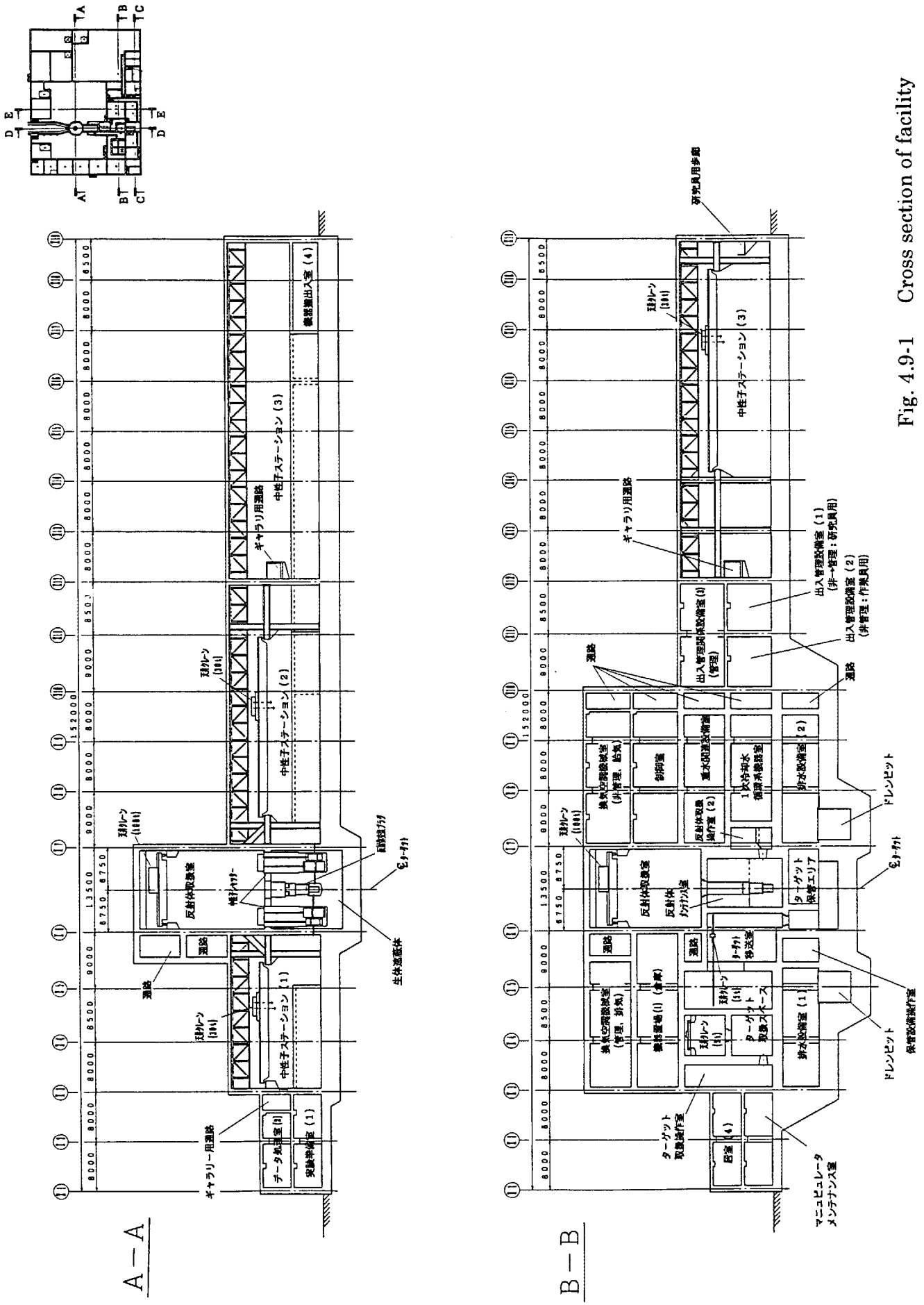
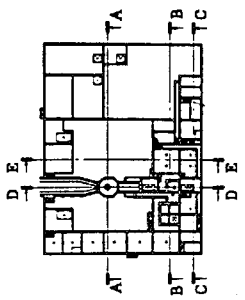


Fig. 4.9-1 Cross section of facility



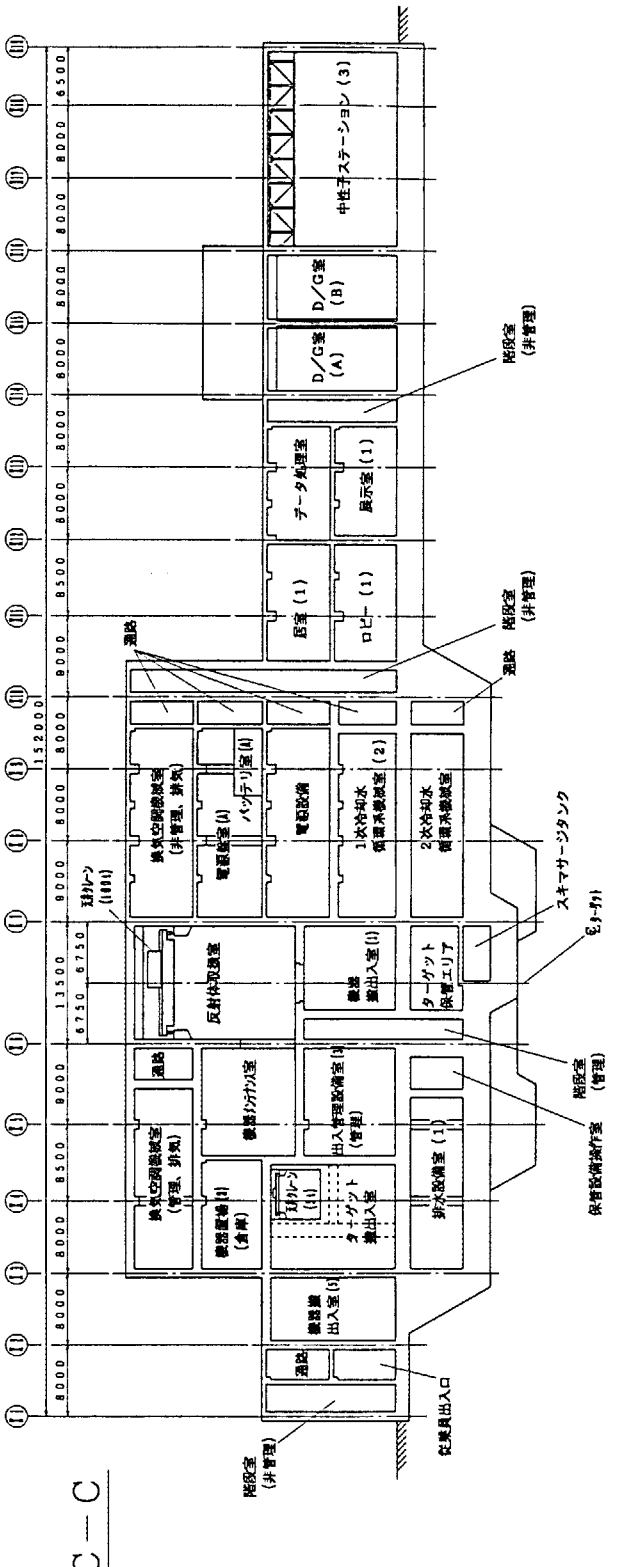
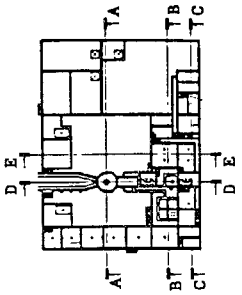
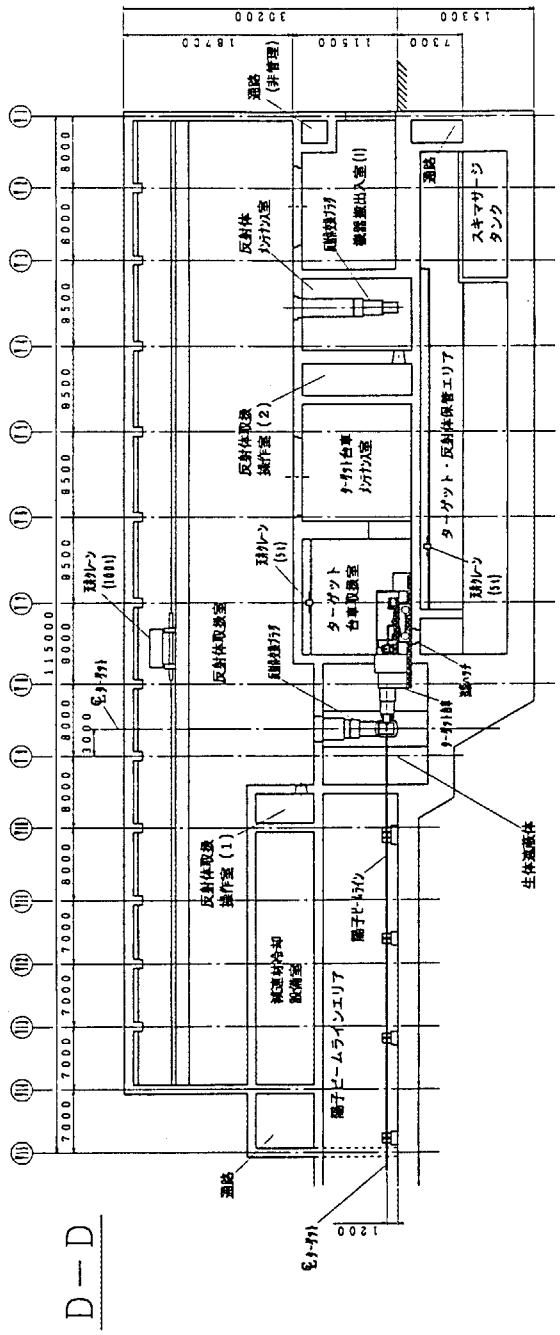


Fig. 4.9-2 Cross section of facility





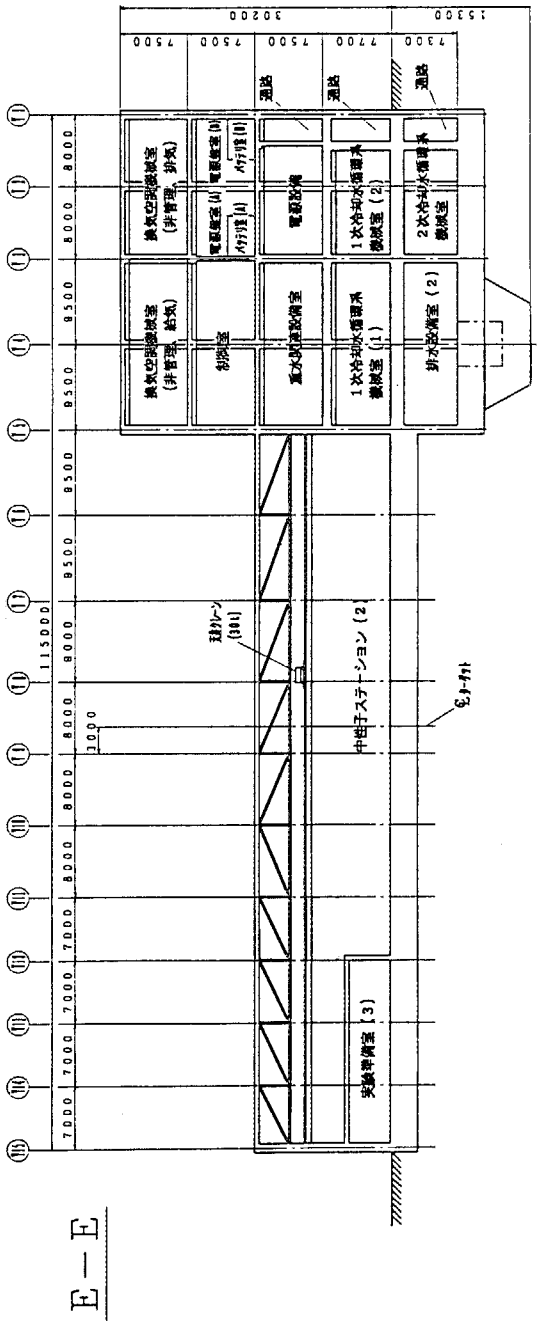


Fig. 4.9-3 Cross section of facility

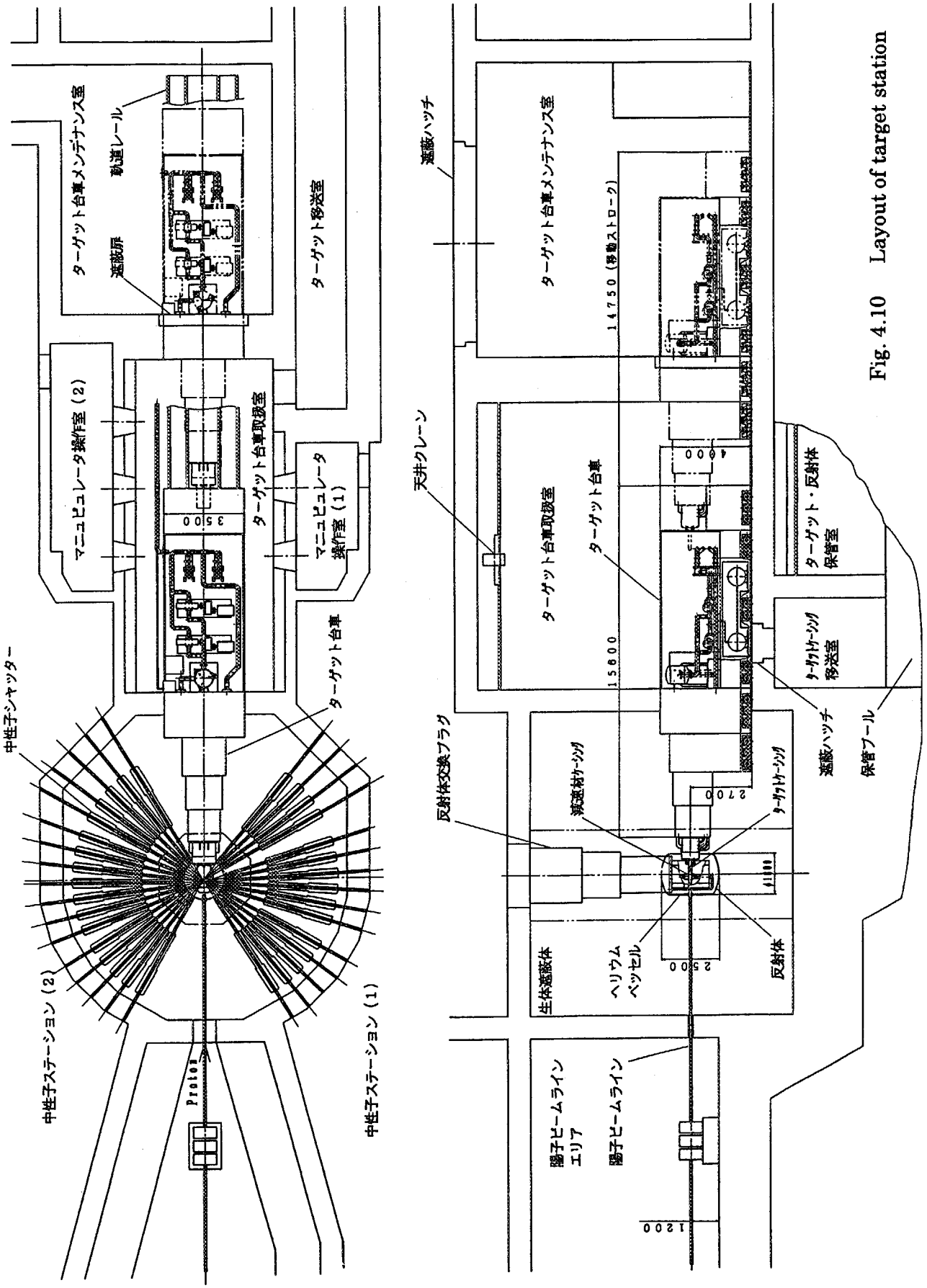


Fig. 4.10 Layout of target station

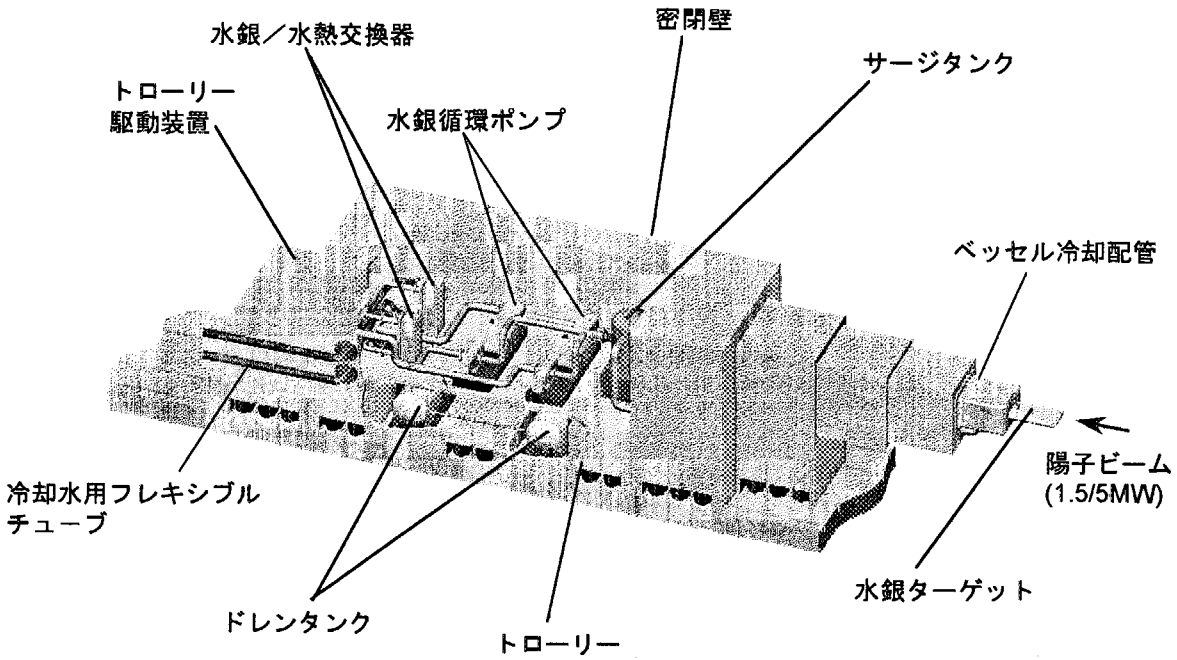


Fig. 4.11 Concept of target trolley

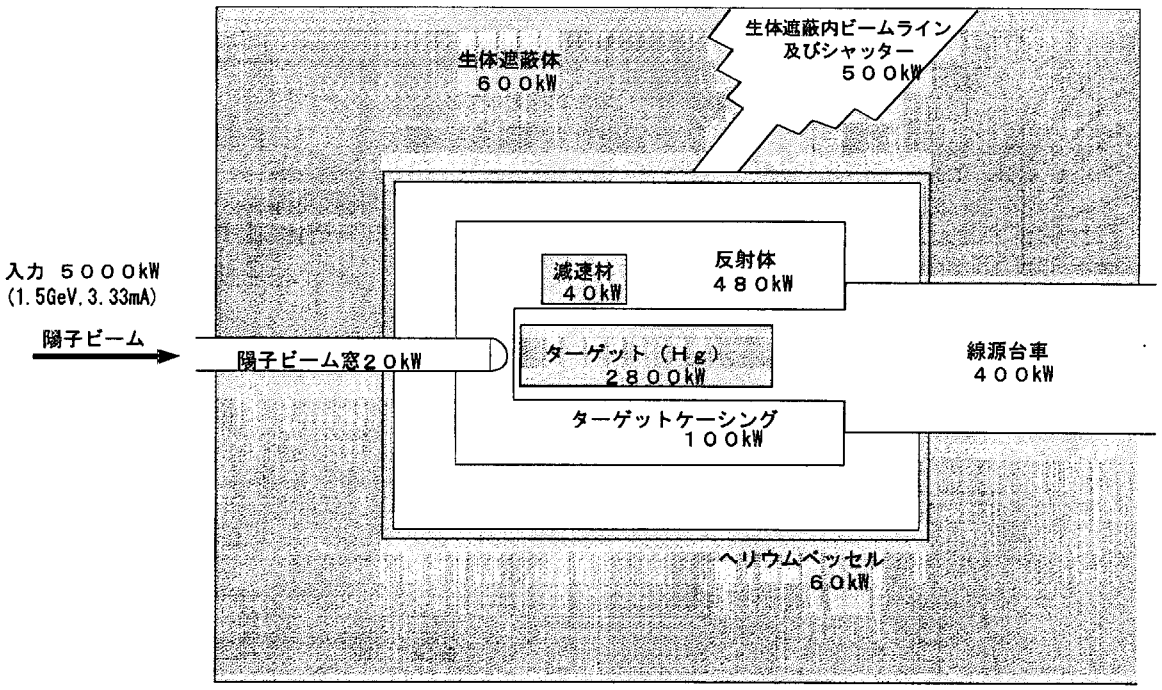


Fig. 4.12 Heat deposition in target system

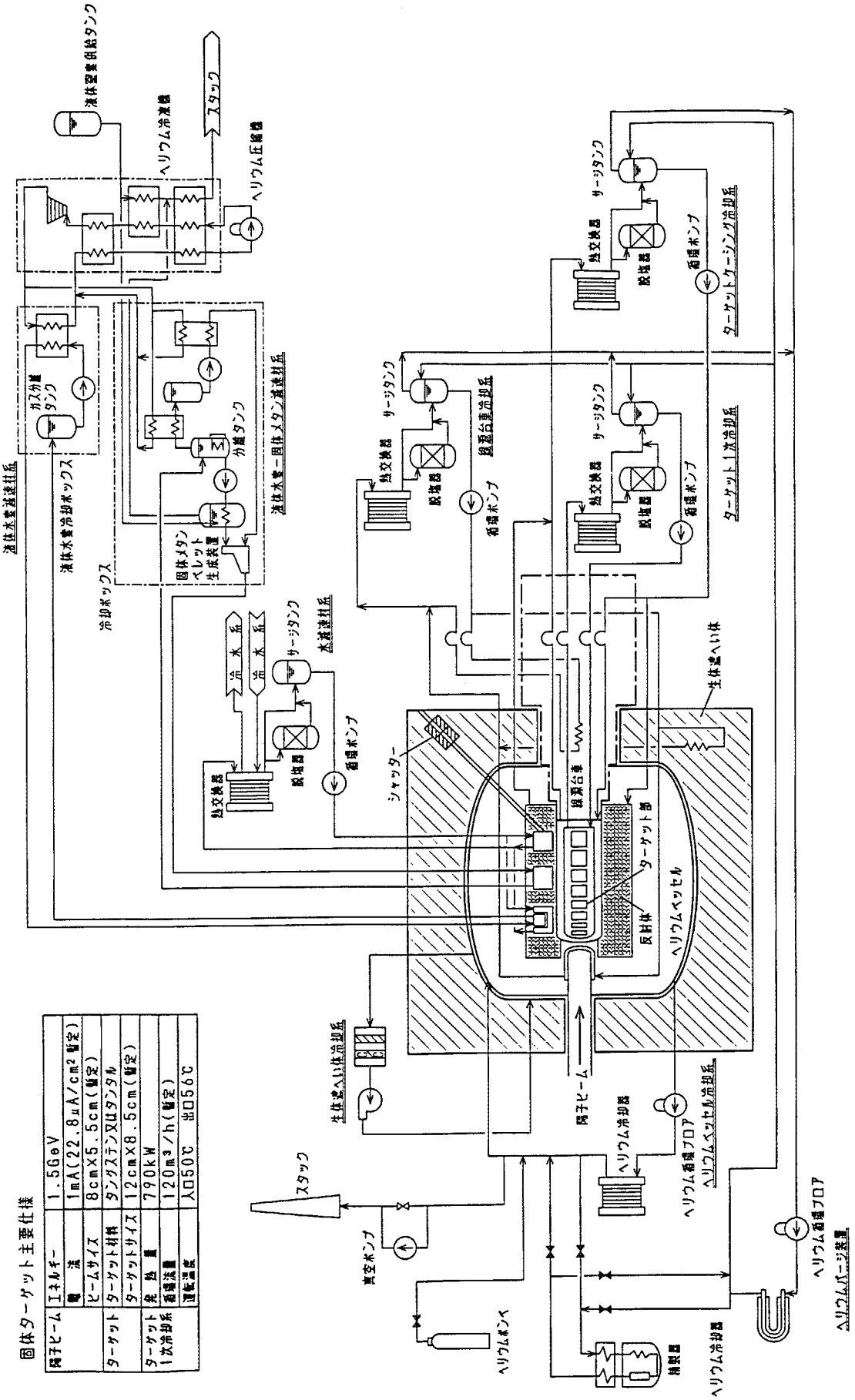


Fig. 4.13 Cooling circuits for solid target system

液体ターゲット主要仕様

陽子ビーム	エネルギー	1.5GeV
	電　流	3.3mA(48μA/cm²)
	ビームサイズ	10cm×6.88cm
ターゲット	ターゲット材料	水　銀
	ターゲットサイズ	14cm×9.88cm
水銀冷却系	発 熱 量	2500kW
	循環流量	50m³/h
	運転温度	入口50℃　出口200℃

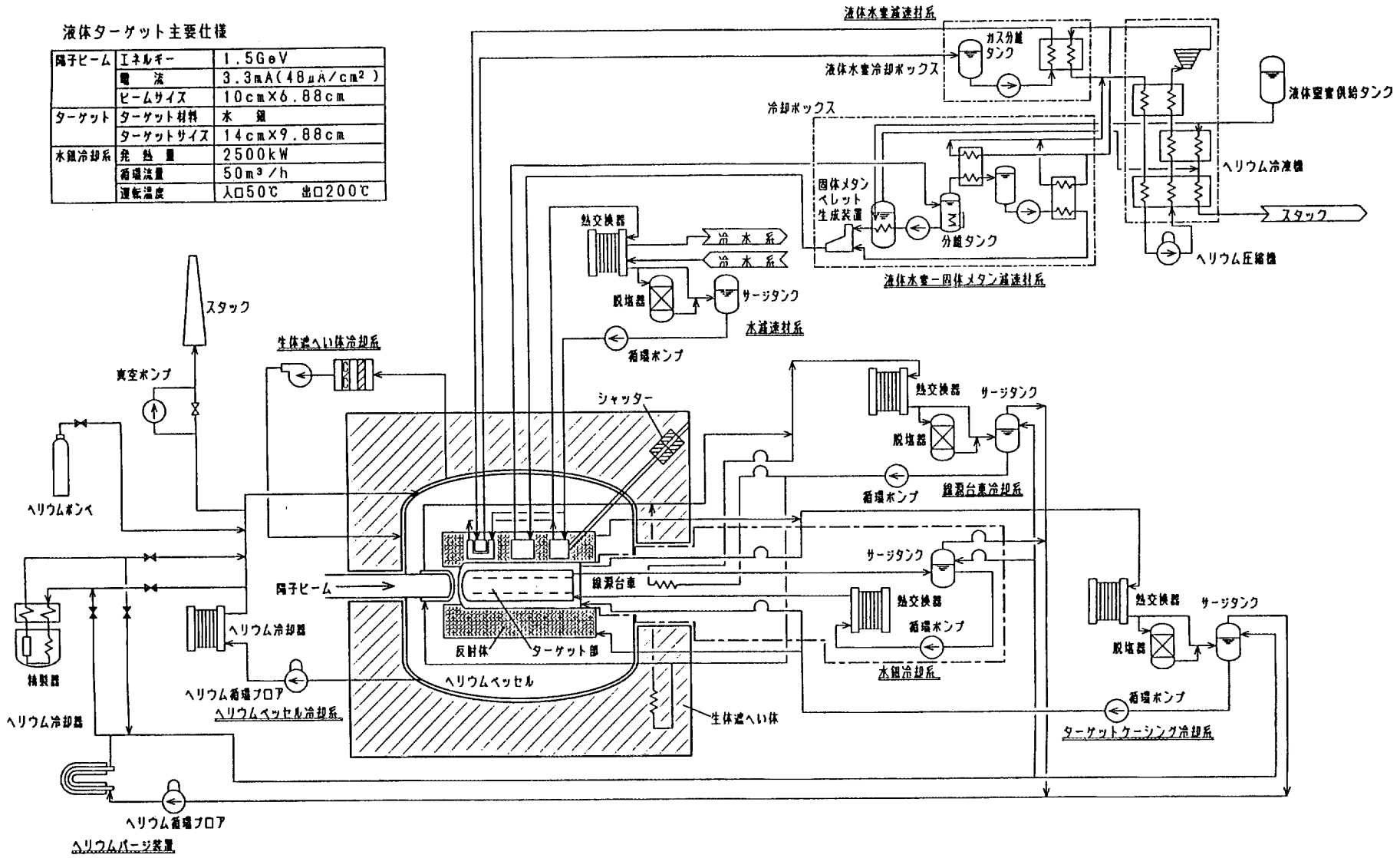


Fig. 4.14　Cooling circuits for mercury target system

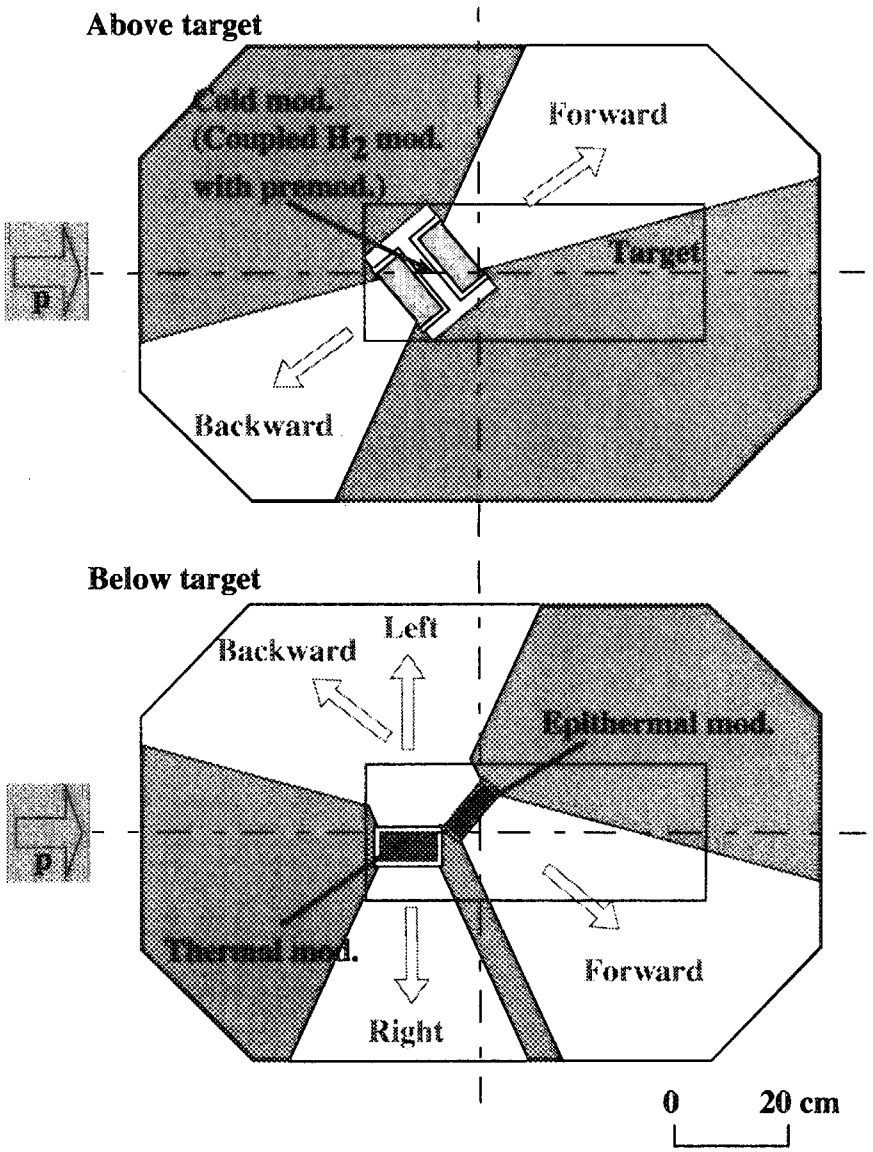


Fig. 4.15 Layout of target-moderator-reflector system

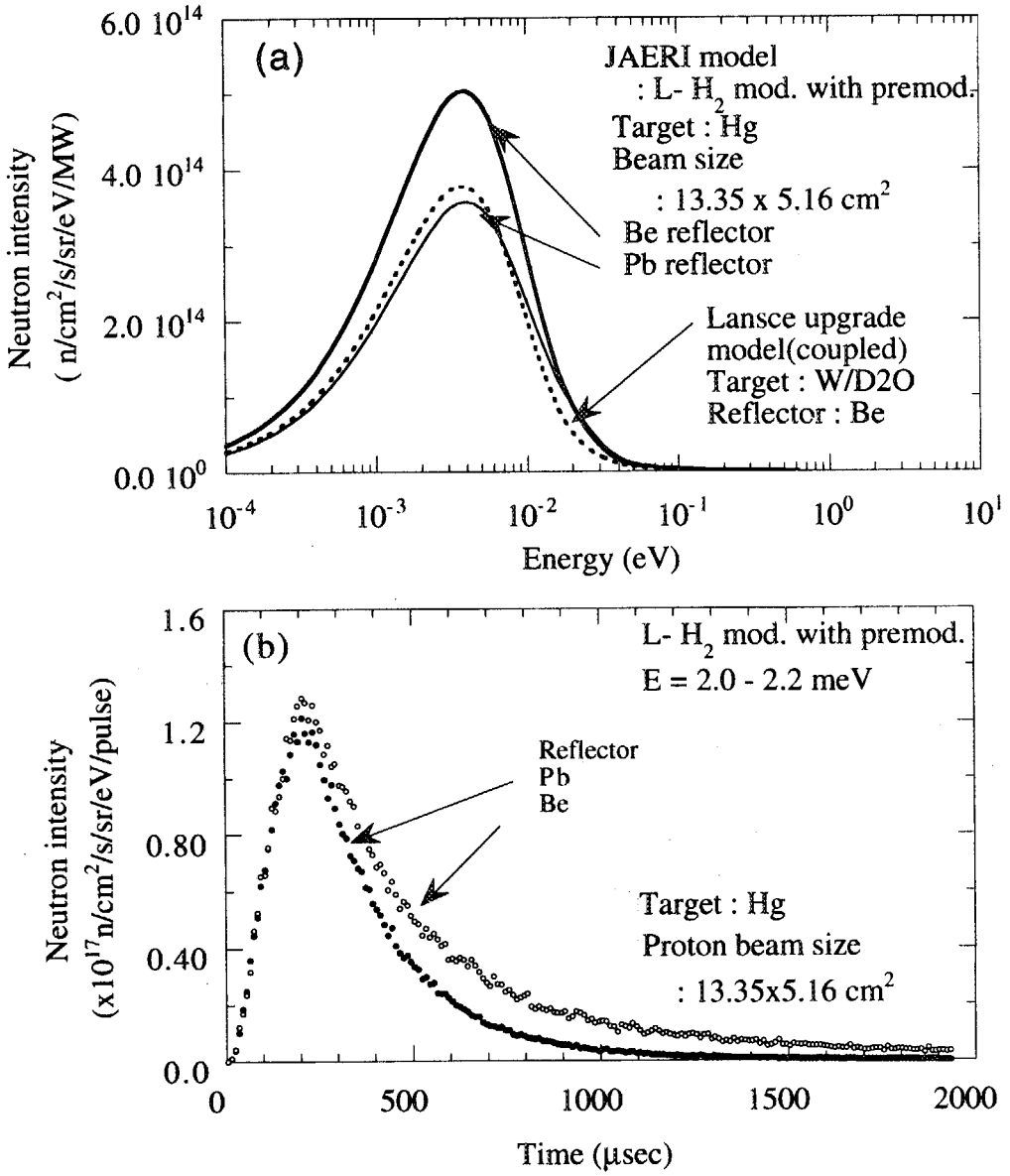


Fig. 4.16 Neutron spectral intensities (a) and pulse shapes (b) from a coupled H_2 moderator

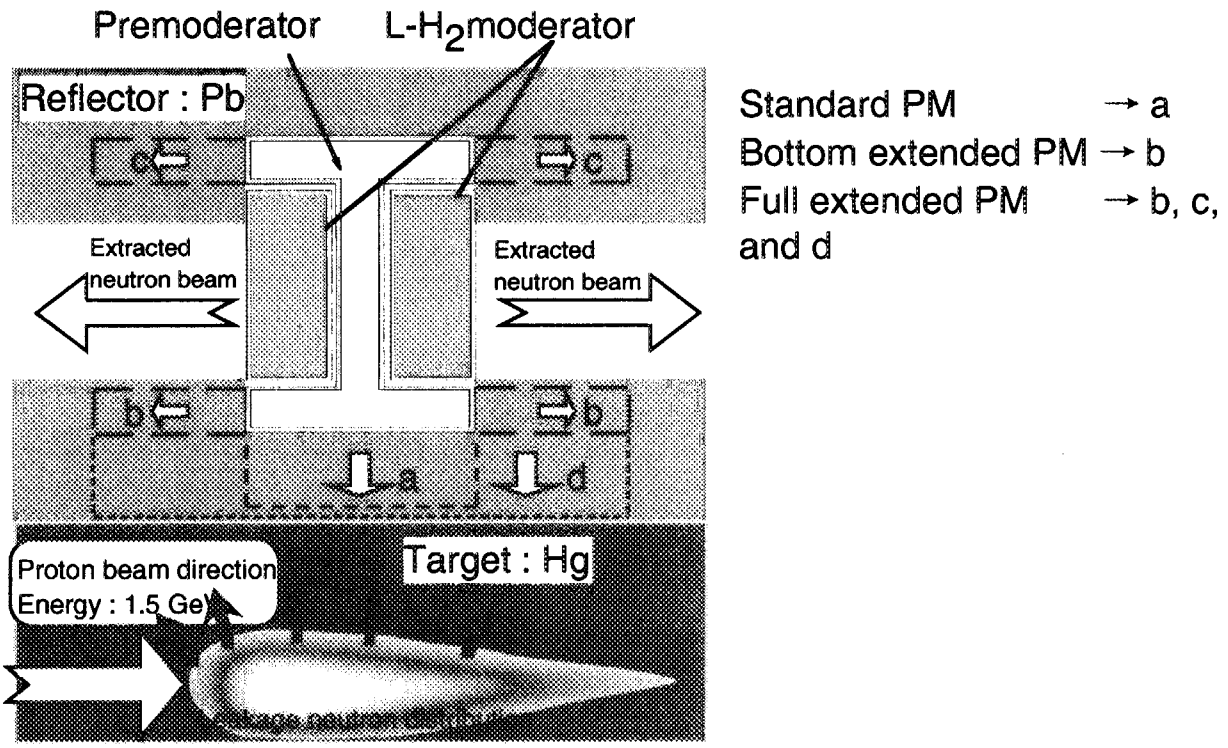


Fig. 4.17 Model of fully extended coupled H_2 moderator

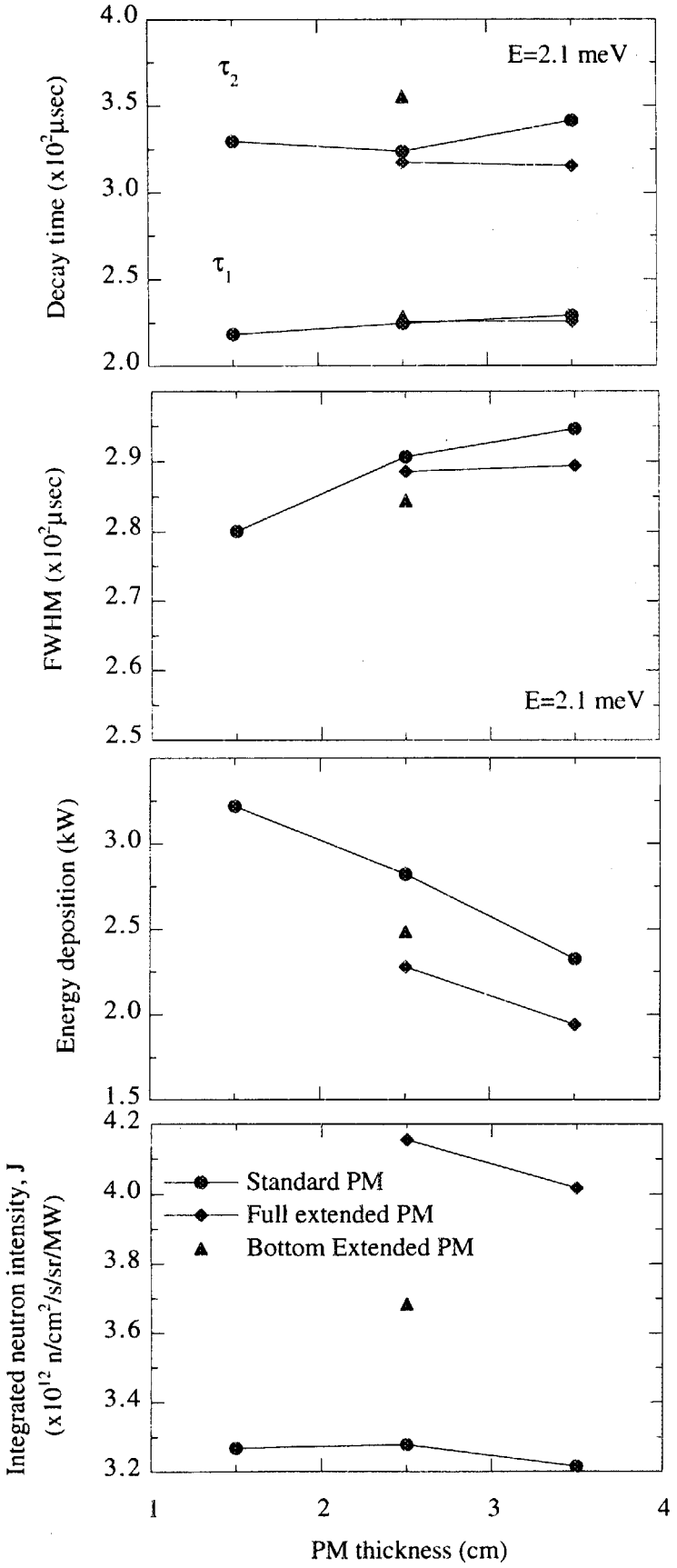


Fig. 4.18 Premoderator thickness dependence of integrated neutron intensity (J), energy deposition, FWHM and decay time

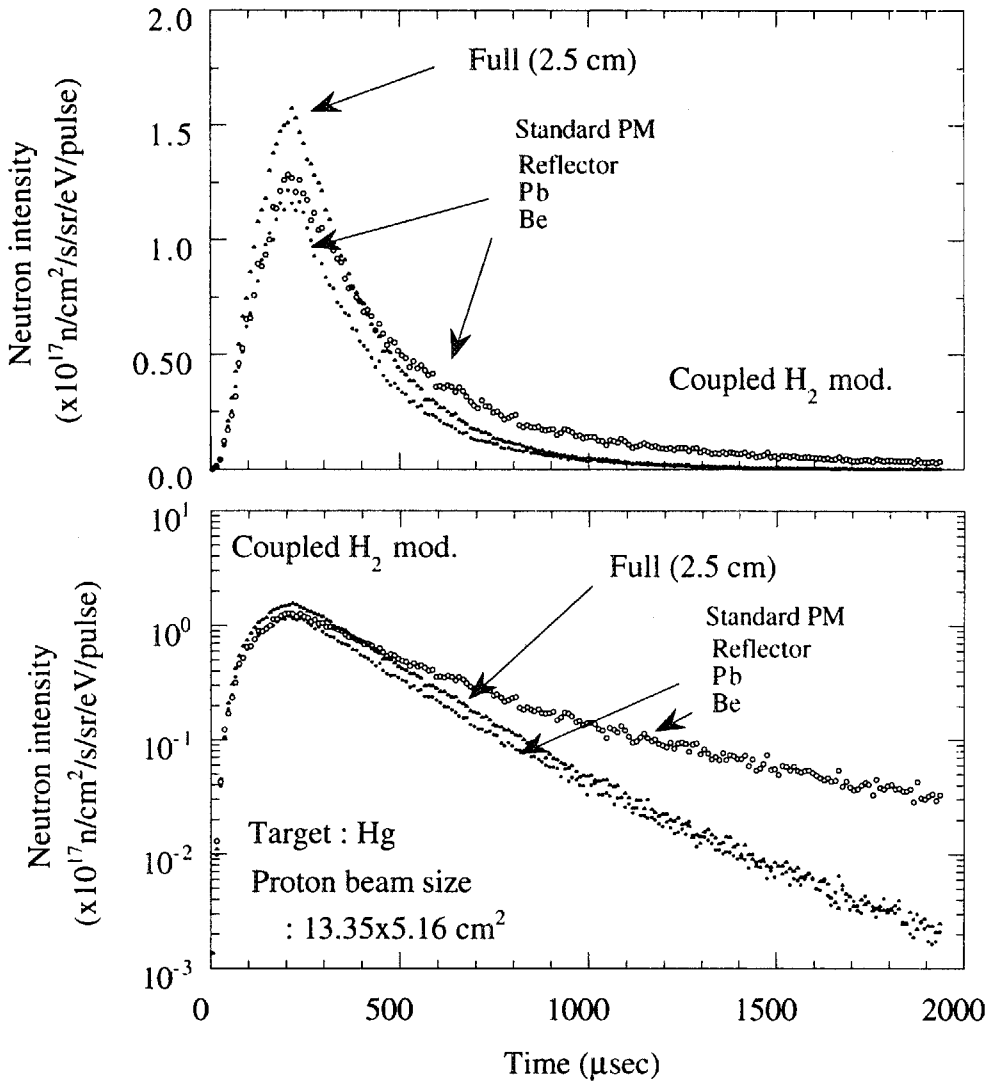


Fig. 4.19 Comparison of pulse shapes of cold neutrons from a coupled H_2 moderator in various case at 2.0-2.2 meV

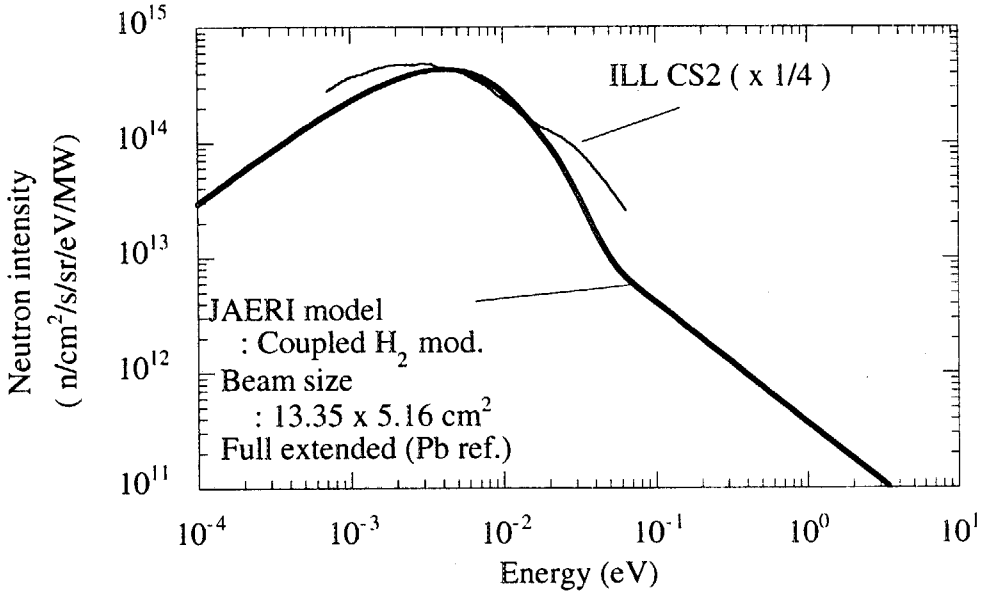


Fig. 4.20 Comparison of neutron spectral intensities from moderator

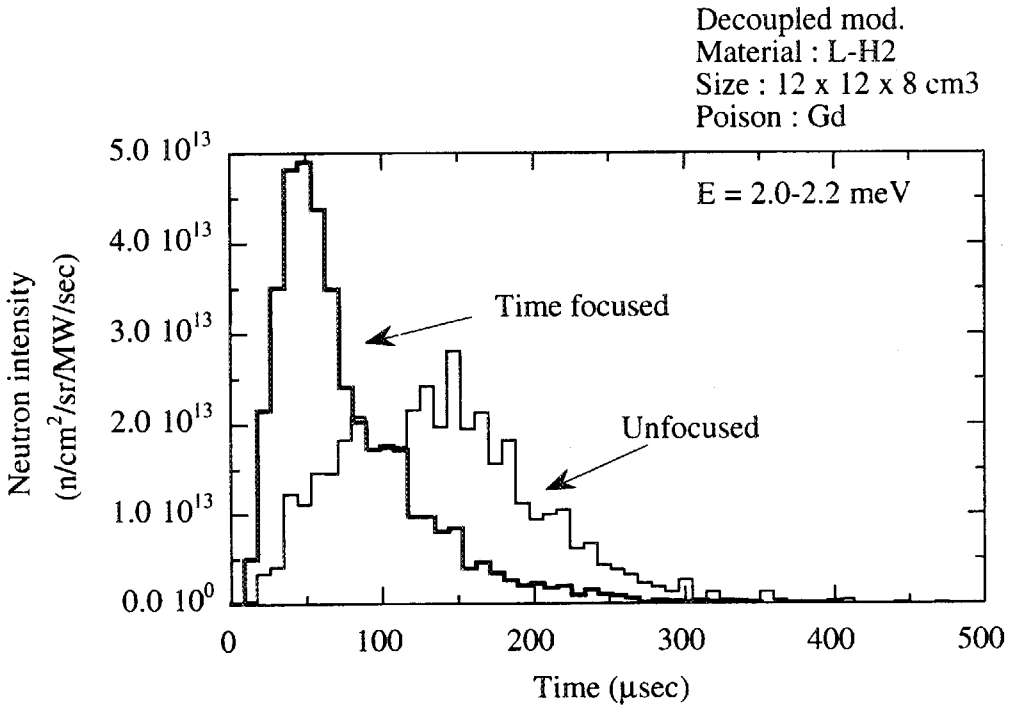


Fig. 4.21 Effect of time focusing of time distribution from decoupled moderator

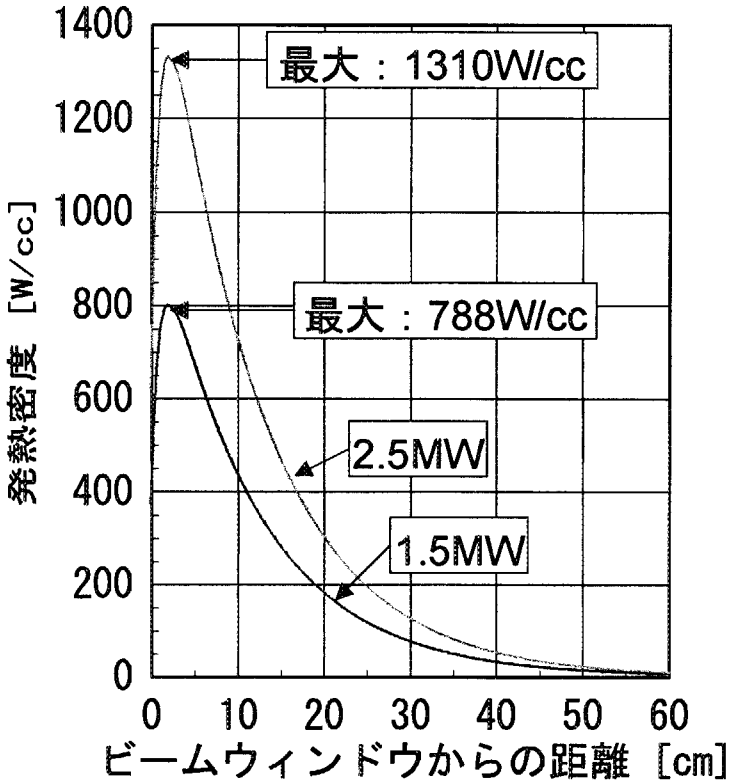


Fig. 4.22 Heat deposition in solid target

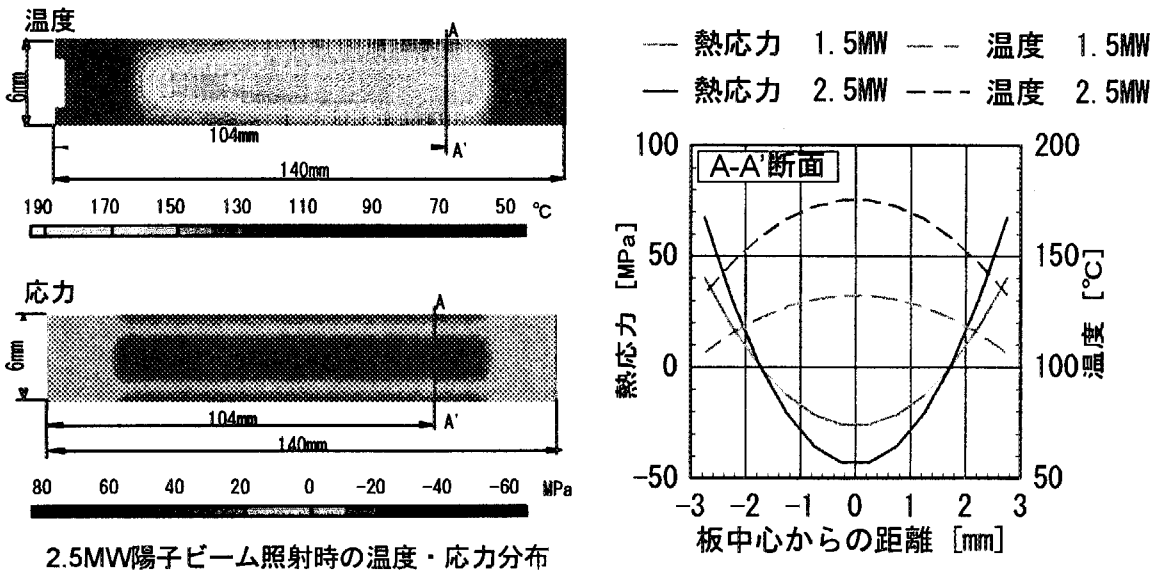


Fig. 4.23 Stress and temperature distributions in solid target

This is a blank page.

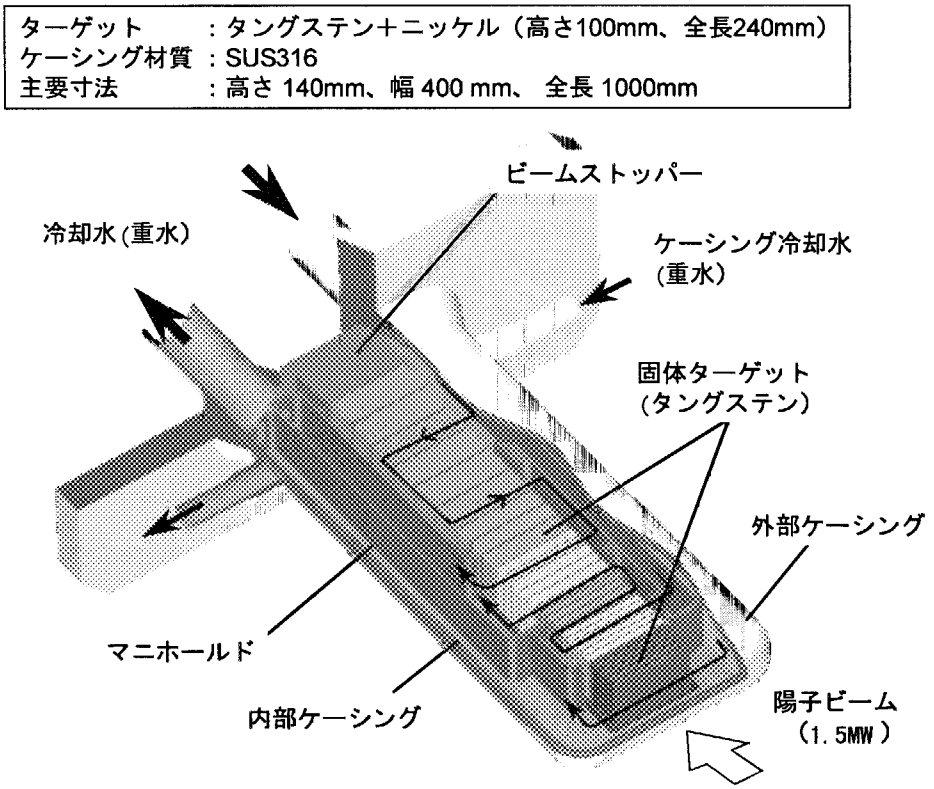


Fig. 4.24　A concept of solid target

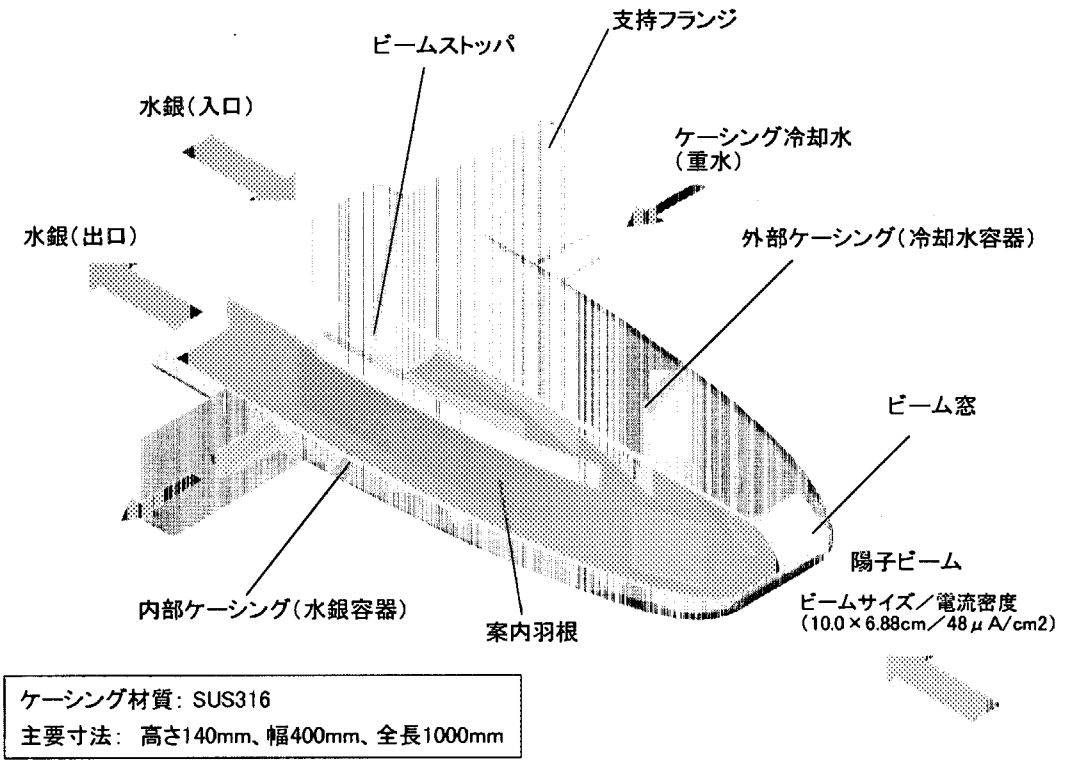


Fig. 4.25　A concept of cross-flow type mercury target with blade distributors

This is a blank page.

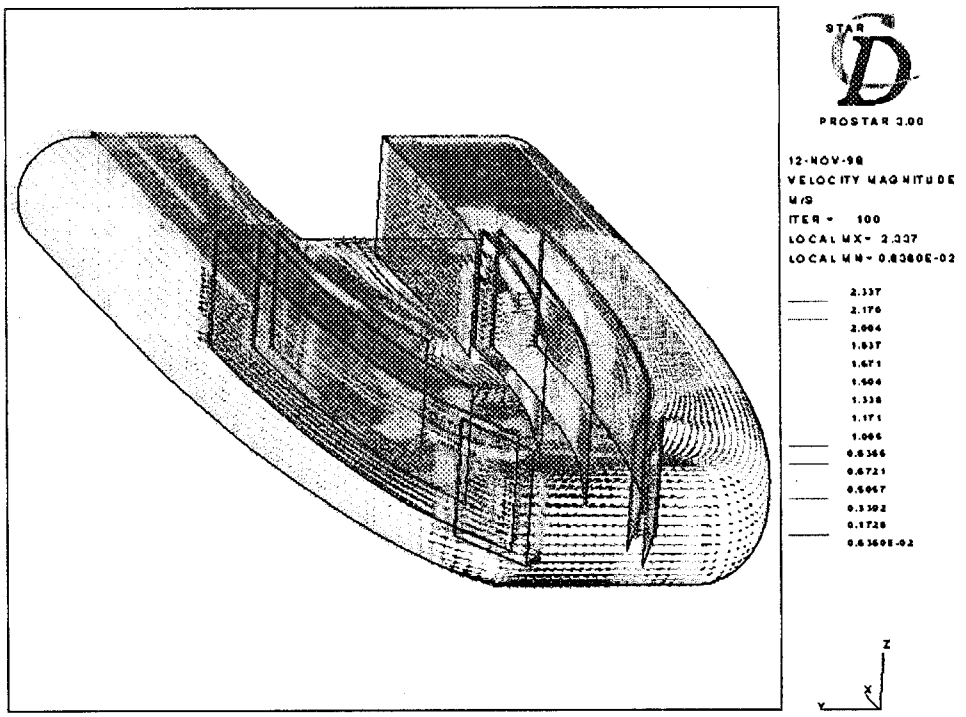


Fig. 4.26 Analytical result of flow patterns in mercury target with blade distributors

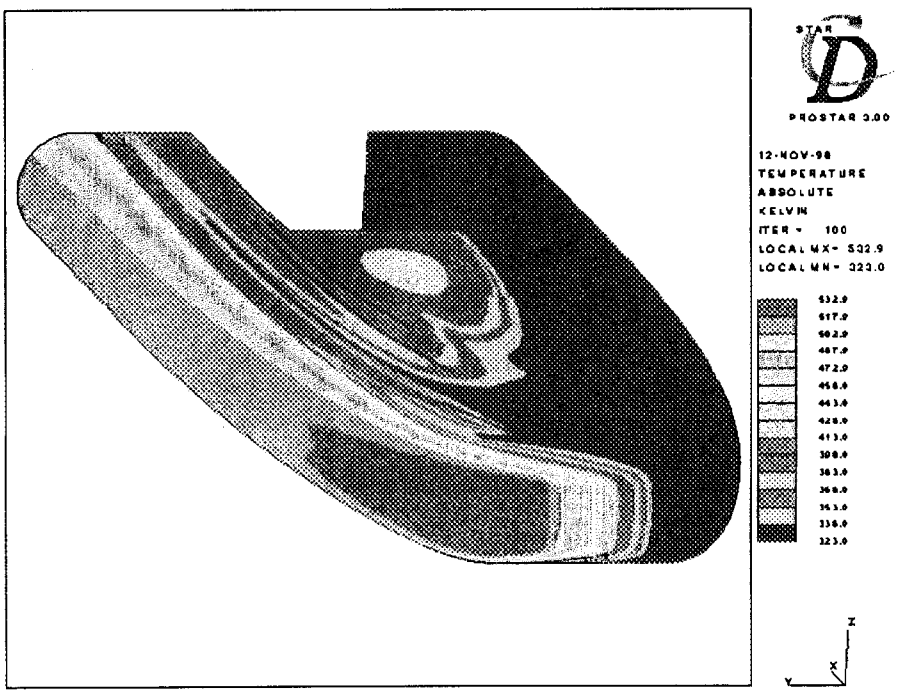


Fig. 4.27 Analytical result of temperature distribution in mercury target with blade distributors

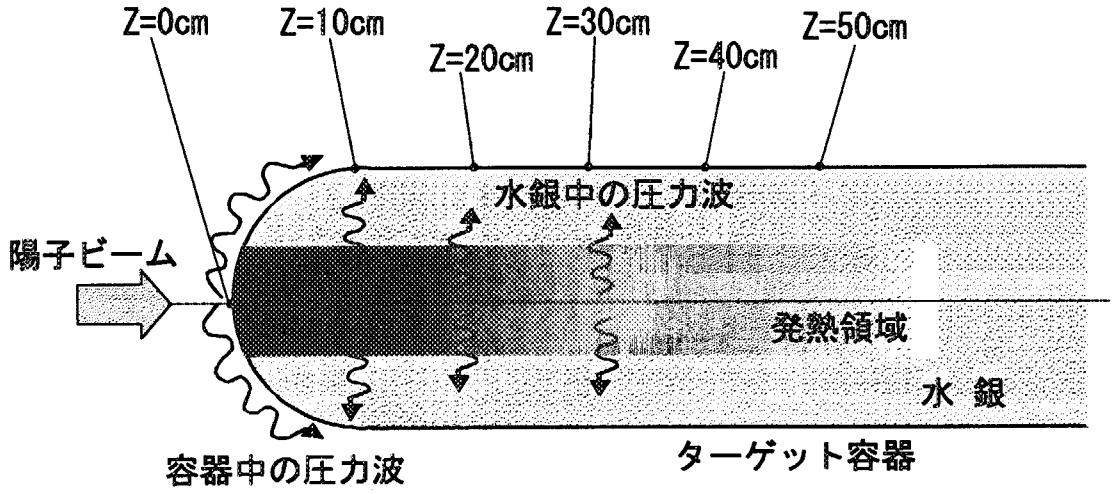


Fig. 4.28 Pressure and stress waves generated in target container

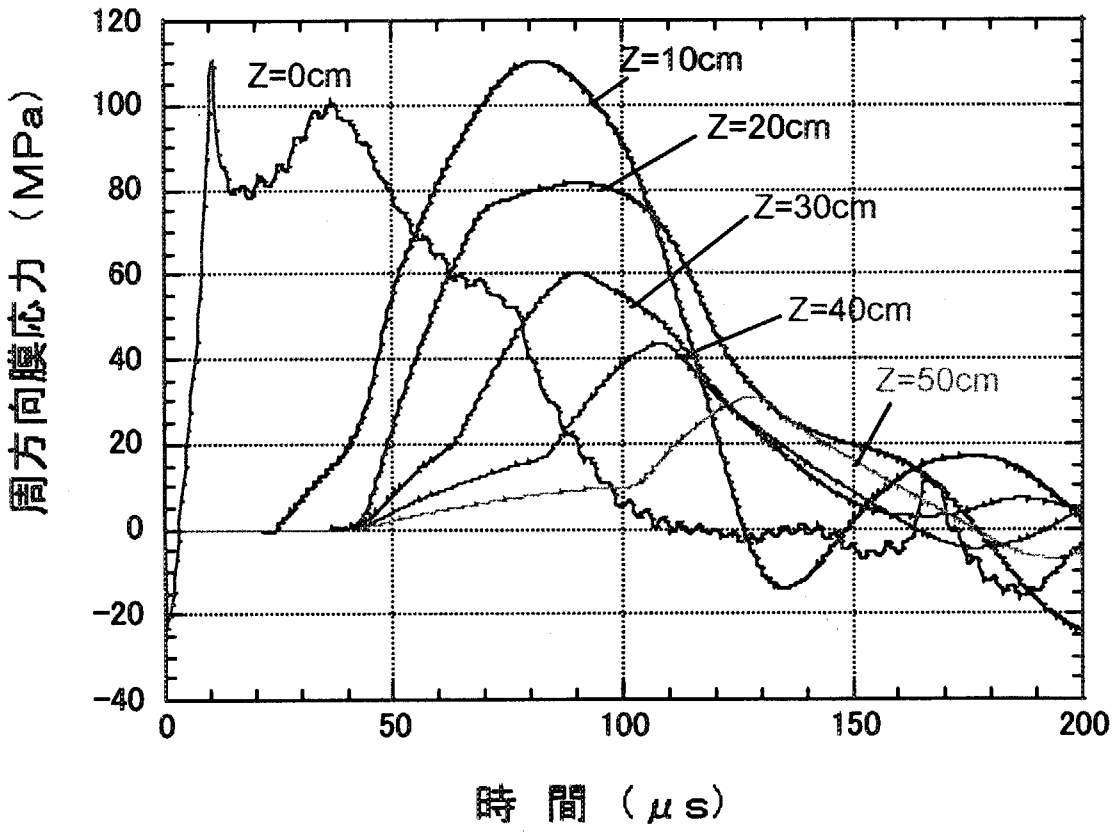


Fig. 4.29 Analytical results of meridian stress propagation

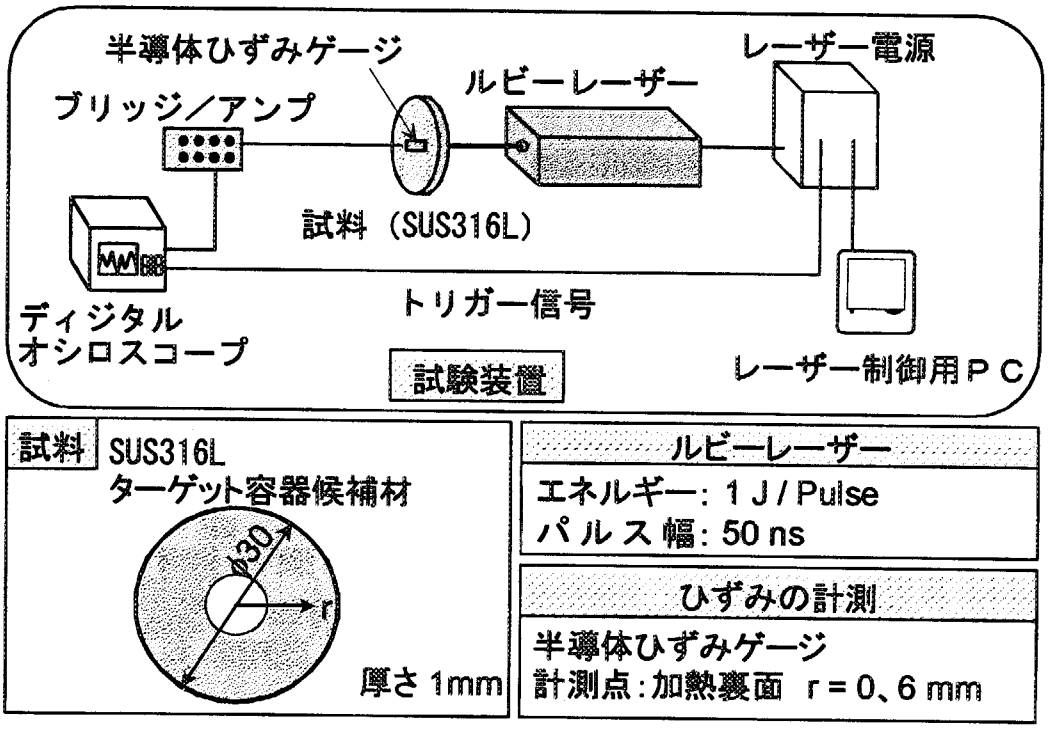


Fig. 4.30 Thermal shock test apparatus with pulsed laser beam

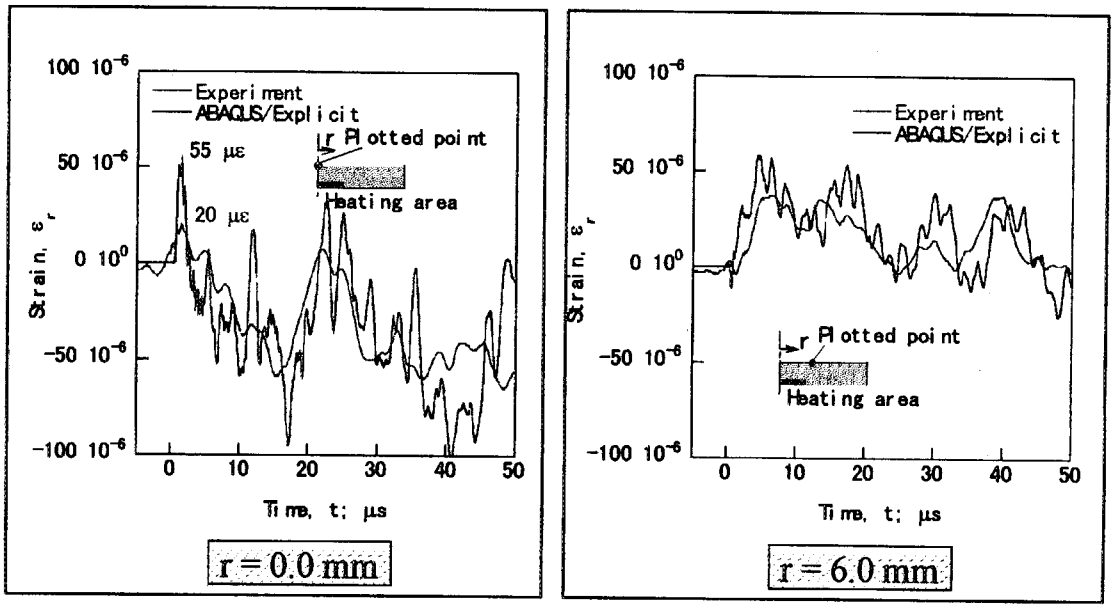


Fig. 4.31 Analytical and measured strains generated by thermal shock

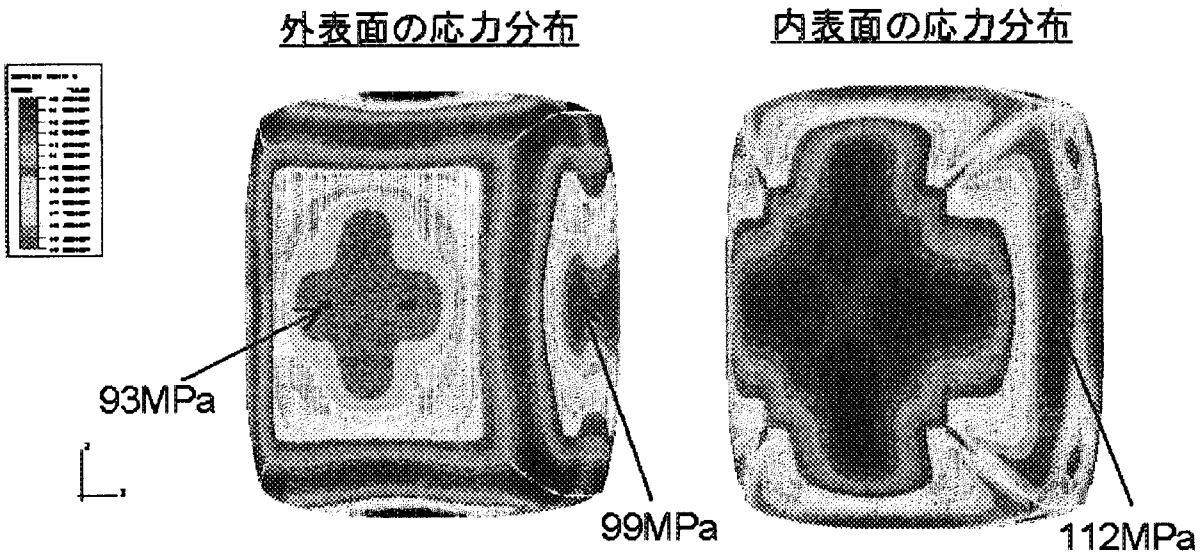


Fig. 4.32 Analytical results of stress distributions in moderator vessel under 1.5MPa and 20K

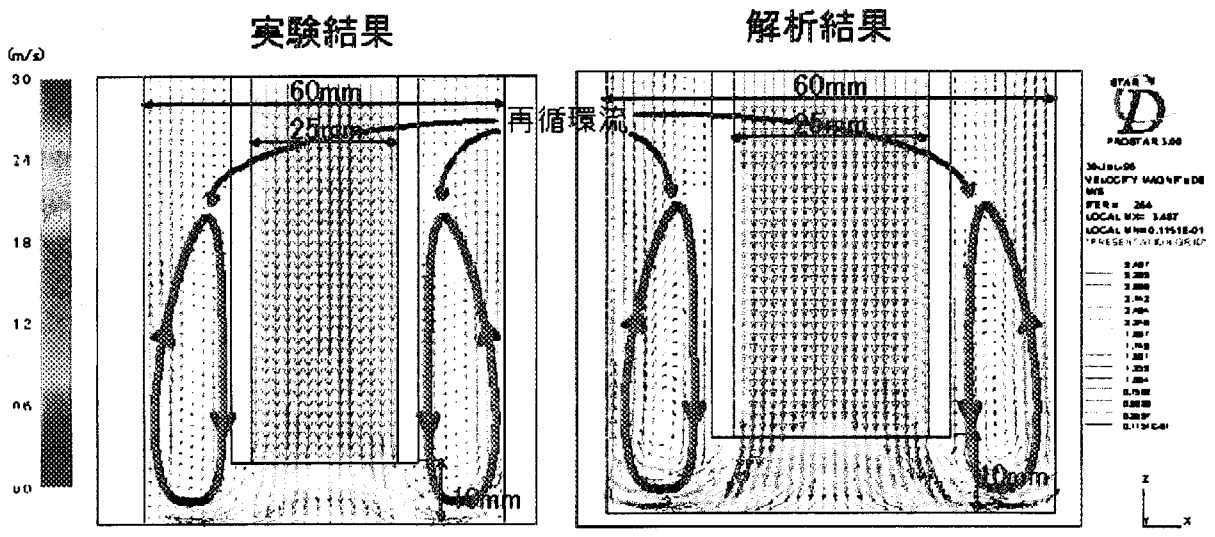


Fig. 4.33 Measured and analyzed velocity distributions in simplified moderator vessel under water flow conditions — 3m/s of jet velocity from inlet pipe

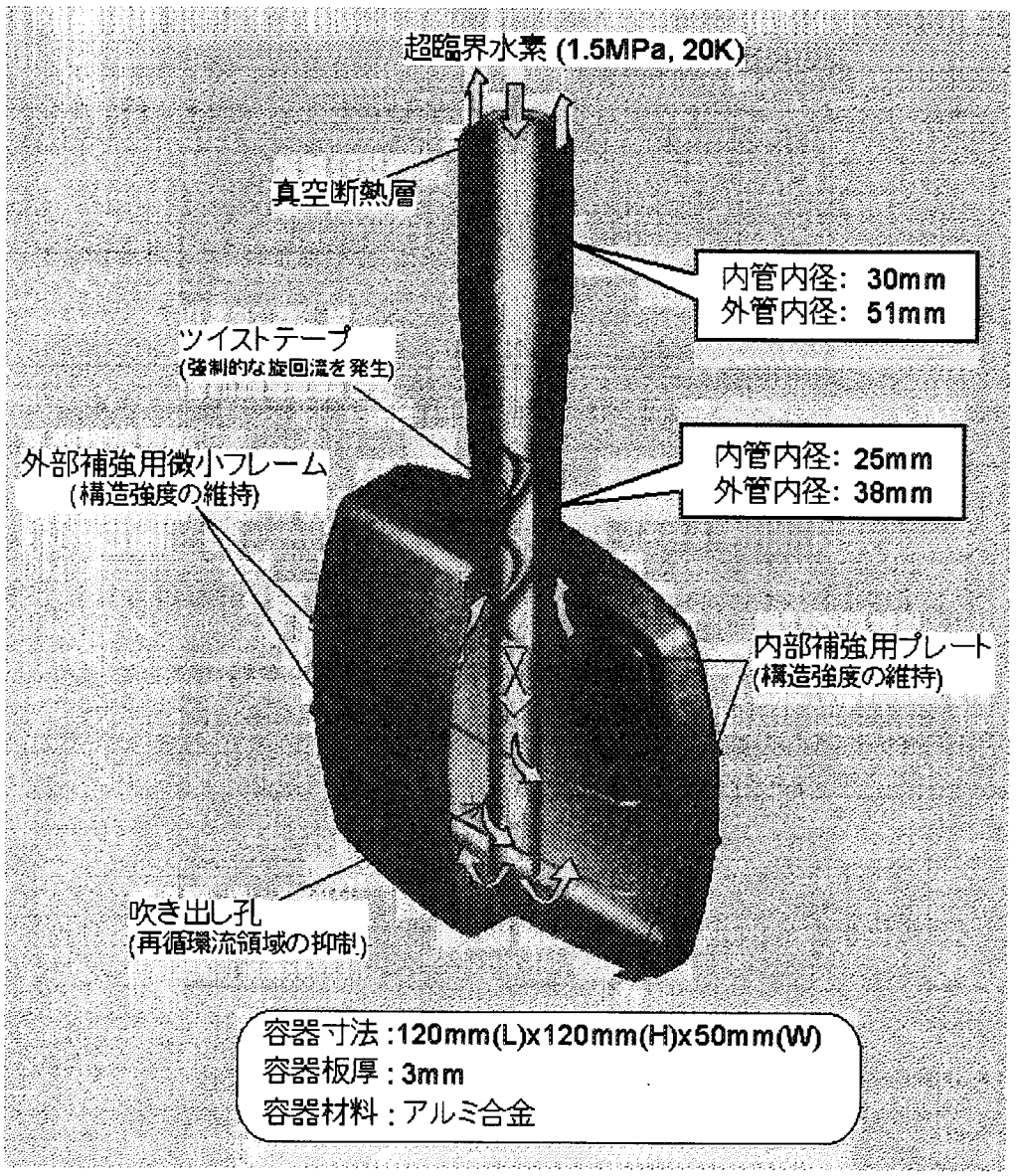


Fig. 4.34 Improved concept of cold source moderator

5．基礎工学実験施設

原研では、1998年に中性子利用による基礎科学の革新的な進展と加速器駆動消滅処理技術の開発を目指した「中性子科学研究計画」を開始した。大強度陽子加速器の開発はこの計画における主要開発課題として、また、群分離・消滅処理研究開発は中性子利用研究の一環として行うこととなった。

群分離・消滅処理(P-T)研究の目的は、高レベル放射性廃液(HLW)中の長半減期核種のインベントリー低減により、HLW 最終処分に伴う長期的放射性リスクを低減及び HLW 管理の安全性向上と合理化である。そのため、対象核種としては、第1に MA (Np, Am, Cm)、第2に Tc-99、I-129を、長半減期、放射性毒性、地層処分の負担軽減、工学的実現性等を考慮して選定した。

原研における P-T 研究は、階層型核燃料サイクル概念を中心とし、長半減期核種を 99.9% 以上分離回収するための湿式群分離法と、高い消滅効率を目指した消滅処理専用システムの研究開発を目標に進めてきた。階層核燃料サイクルは、群分離・消滅処理と商業サイクルを分離したものであり、消滅処理はすべて独立サイクルで行い、商業サイクルへ影響を与えないし、FBR 導入スケジュールの影響も受けない概念である。

（1）加速器駆動未臨界炉の設計研究

核破砕核反応のみで消滅処理するシステムでは、数 100 mA の非常に大きなビーム電流が必要であるばかりでなく、プラント全体のエネルギー収支が負になる。このため、核破砕ターゲットの周囲を MA 未臨界炉心で取り囲み、未臨界炉心内の核分裂反応により MA を消滅処理する ハイブリッド型のシステムとした。未臨界炉心は専焼高速炉と同様に、MA を燃料の主成分とする高速中性子体系である。これによって、加速器ビーム電流を数 10 mA 程度に減少し、また加速器電力を自給できるようにした。

消滅の高効率化のために、MA の直接核分裂を目指した硬いスペクトルを有する消滅処理専用システムとして、加速器駆動未臨界炉 (ADS)を提案し、P-T サイクル MA 処理割合 99.5% 及び現行軽水炉 10 基分以上の MA 処理能力を設計目標とした。

ADS の炉設計を実施し、上記の目標値を満足する炉心概念を得た。その主な性能は、 MA 消滅量 (kg/GWt/y) が 354～366 kg、サポートファクターが 10～14 基 (33 GWd/t 燃焼 PWR、5年冷却時の MA 量)、正味消滅率 ((消滅量-漏れ量)/消滅量) が～99.5% である。

（2）加速器駆動システムの開発課題

加速器駆動システムの設計には、中間エネルギーMeV 領域における信頼性の高い核データ及び計算コードが必要とされる。現状のデータ及びコードを用いて、概念検討及び成立性研究における概略評価が可能である。詳細な設計においては、より高い精度が必要となってくる。もし、システムのエネルギー収支に±2% の精度が必要であるとすると、核破砕中性子収率を±2% 以内の精度で予測する必要がある。崩壊熱及び放射能の評価に必要な核破砕生成物収率や材料の放射化及び照射損傷の評価に必要な中性子エネルギースペクトルの高エネルギー成分の予測の不確かさ

は現状ではかなり大きいと考えられている。

大強度陽子ビームの入射により、ビーム窓、ターゲット及びターゲット周りの構造部分は高陽子束、高中性子束に照射される。これらの材料は照射損傷を受け、機械的性質及び寸法安定性が劣化する。照射損傷は、粒子エネルギー及び粒子束の面から通常の原子炉より厳しいものとなる。したがって、これらのコンポーネントについては、より頻繁な交換が必要とされよう。

大強度の陽子ビームにより、ターゲット内に大きな発熱が生じる。ターゲットの冷却は、炉心燃料の場合と同様に、重要な課題である。

未臨界炉心は、中性子実効増倍係数が1未満であり、ターゲットをもつことを除けば、臨界炉心と基本的に同じ概念が採用できる。未臨界であることにより、炉心設計の自由度はより大きくなる。大きな違いの一つは、ビーム窓強度の面から未臨界炉心の運転圧力が比較的低く制限されることである。このため、1次冷却材として水やガスを用いることは実際的に非常に困難となる。液体金属冷却の未臨界炉心では、液体金属冷却高速炉のために開発された既存の技術を利用できる。

入射陽子ビームが変動したり、トリップすることは不可避である。ビーム強度の時間的変化は、燃料及び炉内構造に過大な熱衝撃や熱疲労を与える可能性がある。炉心の設計においては、これらの問題に対する十分な検討と対策が必要とされよう。

加速器で駆動される未臨界システムは、反応度事故のリスクの点で、明らかに優れている。未臨界システムは、通常の臨界炉のスクラム系では対応できない急速な反応度添加に耐えることができる。これは、出力暴走による事故が起こりえないという点で重要である。

加速器駆動システムの冷却喪失事故については、臨界炉の場合と大きな違いはない。したがって、臨界炉に信頼性の高いスクラム系が必要であるように、加速器駆動システムには信頼性の高いビーム遮断系が必要である。同様に、信頼性の高い崩壊熱除去系が必要とされる。

ここでは、加速器駆動未臨界炉ハイブリッドシステムの開発に必要なデータベースを取得するとともに技術の実証を行うための種々の実験施設: ターゲット熱流動実験施設、材料照射試験施設、中性子核物理実験施設、炉物理実験施設、消滅処理実験炉について検討した結果及び関連研究開発状況を報告する。

5．1　ターゲット熱流動実験施設

加速器駆動システムでは、加速器と未臨界炉心のインターフェイスとなるターゲットや原子炉バウンダリを構成する陽子ビーム窓のような全く新しいコンポーネントが炉内に組み込まれる。本実験施設では、ターゲット熱流動実験装置を用いて、これらの新しいコンポーネントのモックアップ試験を行い、計画中の消滅処理実験炉や加速器駆動消滅処理プラントの設計及び許認可に必要なビーム窓、ターゲット、構造材の照射データや設計手法検証のためのデータの取得、運転データの蓄積等を行う予定である。そのため、本実験装置では、現在提案しているナトリウム冷却の実用加速器駆動消滅処理プラント（熱出力 800 MW、陽子ビーム強度 1.5 GeV - 40 mA）のターゲット及びビーム窓部を模擬し、冷却材にナトリウムを使用することにより、機器の信頼性、安全性、耐久性等を具体的に実証していく。陽子ビームのエネルギーは、実用プラントの陽子ビーム条件を 1.0 GeV～1.5 GeV に設定することを考慮し、1.5 GeV とした。陽子ビームの電流密度は逐次増力し、最終的に実用加速器駆動消滅処理プラント規模の電流密度（30～40 μ A/cm^2)で試験を行う。運転モードは、加速器の開発状況に合わせ、第一期ではパルスビーム（ビーム出力 1.5 MW）、第二期には各種冷却系統の増力を行い、連続ビーム（ビーム出力 5 MW）での試験を行う。本試験施設に必要な陽子ビームの仕様を以下にまとめた。

エネルギー	1.5 GeV
ビーム出力	5 MWb（最大）
周波数	連続ビームまたは数 10Hz 以上（暫定値）
デューティー	10 - 100 %（暫定値）
稼働率	60%/年

本節では、第一期に計画しているパルスビームでのターゲット熱流動実験装置の概念及び実験施設の設備仕様、配置検討の結果をまとめた。

5．1．1　ターゲット熱流動実験施設での主な試験項目

●陽子ビーム窓開発のための照射データベース構築及び新材料の研究
- 熱膨張・弾性変形・クリープ・照射成長データの取得
- ビーム窓候補材の照射損傷試験
- 構造健全性の試験・実証
- ビームトリップ時のビーム窓過渡応答・熱サイクル疲労試験
- 起動・停止・緊急停止時の材料温度過渡応答試験
- ビーム窓破損時のスクラム及びビームライン真空保持試験

●ターゲット及び炉心構造材選定のためのデータベースの整備及び材料開発
- 熱膨張・弾性変形・クリープ・照射成長データの取得

・各部の構造健全性の実証
・計算コード・パラメータの妥当性の検証
・構造材・冷却材照射損傷試験
・ターゲット材の照射損傷試験
・冷却材内核破砕生成物除去試験

●熱流動・構造設計手法検証のためのデータ取得
・ターゲットアセンブリの熱流動試験
・各部の除熱性能の実証
・構造材の熱流動試験
・冷却材及び構造材の熱衝撃試験
・構造材・冷却材熱サイクル疲労試験
・模擬ダクトレス燃料集合体を用いた冷却材流動特性試験

●工学利用加速器の運転特性の検証、成立性の実証
・加速器運転安定性の実証
・加速器ビーム制御及び計測試験

●加速器駆動システム概念成立性・安全性の実証

5．1．2　ターゲット熱流動実験装置の構成

ターゲット熱流動実験装置は、装置の運転及び維持・管理のための設備、陽子ビームライン、陽子ビームダンプ等と共に、ターゲット熱流動実験施設内に配置される。

ターゲット熱流動実験装置では、加速器駆動消滅処理プラントのターゲット部及びビーム窓部を模擬し、ナトリウムを用いてターゲット及びビーム窓の冷却を行うことにより、ターゲット、ビーム窓及び構造材に関するモックアップ試験、照射データの取得等を行う。装置中央には、実用プラントと同一構造を持つターゲットアセンブリを配置し、ターゲット外周部には、実用プラントの反射体に相当する遮蔽アセンブリを配置する。両アセンブリはターゲット容器内に収容され、ナトリウムにより冷却される。以下に実験装置の主な構成機器について概説する。

ターゲット熱流動実験装置の概念図を Fig.5.1.1 に示す。実験装置は、ターゲットを収容するターゲット容器、ターゲットから発生する放射線と熱の遮蔽及びターゲット交換機能を有する遮蔽プラグ、ターゲット交換及び移送機能を有するターゲット移送装置、メンテナンス時にターゲット容器内へのアクセスを可能にするための陽子ビームマグネット回転台車、ターゲット容器内から取り出したターゲットアセンブリ等に付着したナトリウムを洗浄するためのターゲット洗浄装置等から構成される。

ターゲット容器は、アセンブリの支持及び1次冷却材をターゲット内部に誘導するターゲットケーシング、ターゲットアセンブリ、ターゲットから放出される粒子を遮蔽する遮蔽アセンブリ及びガードベッセルから構成される。

ターゲットケーシングは、1次冷却材をケーシング下部から流入させ、ターゲットアセンブリ

内部を通過した後、上部から流出可能な構造としている。容器上部はカバーガスとしてアルゴンガス雰囲気とし、ナトリウムの酸化防止・冷却材の温度変化に伴う圧力の調整を行う。

ターゲットアセンブリは1次冷却材を案内するエントランスノズル、ターゲットを支持する6角形ラッパ管、アセンブリ交換時に使用するハンドリングヘッドから構成される。6角形ラッパ管に収容するターゲットの構造は、加速器駆動消滅処理プラントで使用するターゲットアセンブリと同じ構造、即ち多層有孔ディスク構造とした。ターゲットアセンブリ及び後述の遮蔽アセンブリをFig.5.1.2に示す。

遮蔽アセンブリは、ターゲットアセンブリの周囲に配置する。主な形状は、ターゲットアセンブリと同一であるが、ラッパ管内にはステンレス製の遮蔽体が配置される。本アセンブリは、必要に応じて各種計測器を内蔵した計測用アセンブリや模擬燃料アセンブリと交換して使用できる構造とした。

遮蔽プラグは、運転時に発生する放射線と熱を遮蔽し、ターゲット容器内のカバーガス等のバウンダリを形成すると共に、アセンブリ交換のための2軸回転プラグ等の機器を所定の位置に位置決め・支持する。アセンブリの交換は、ターゲット案内管とドアバルブで構成されるターゲット取出口から行う。取り出したアセンブリは、ターゲット移送装置により、アセンブリに付着したナトリウムを除去するターゲット洗浄装置に移送される。移送装置は取扱対象をナトリウム蒸気雰囲気で取り扱う交換機Aと、取扱対象物を非ナトリウム蒸気雰囲気で取り扱う交換機Bで構成し、交換機Aは、内部がナトリウム蒸気雰囲気であること及びナトリウムを予熱するため、アルゴンガスブロア及びアルゴンガス加熱器で温度制御を行う。交換機B内部は非ナトリウム蒸気雰囲気であり、空気ブロア及び空気冷却器でターゲットを強制的に冷却する。

5．1．3　ターゲット熱流動実験施設内設備仕様

ターゲット熱流動実験施設では、陽子ビーム入射により発熱したターゲットをナトリウムを用いて冷却する設備を配置する。主な系統について以下に概説する。

1次ナトリウム冷却系は、ターゲットで発生する熱を除去するために、ナトリウムをターゲット部に循環、供給することを目的とする。系統は2系統構成とし、通常時は2系統並列に運転し、停止時は1系統のみで崩壊熱を除去する。系統の主要構成機器は、1次ナトリウム系電磁ポンプ、1次ナトリウム系冷却器、ナトリウム中の不純物を除去するコールドトラップ、エコノマイザ、1次ナトリウムダンプタンク等である。1次ナトリウム系電磁ポンプで昇圧されたナトリウムは、ターゲット容器の底部に送られ、ターゲットアセンブリ内を上昇し、ターゲットを冷却する。ターゲットを冷却したナトリウムは、1次ナトリウム系冷却器に流入し、2次ナトリウム冷却系で冷却された後、再び1次ナトリウム系電磁ポンプに戻る。ターゲット容器内のナトリウムの一部はオーバフロー管を介して1次ナトリウムダンプタンクに流入し、エコノマイザで冷却された後、コールドトラップで不純物を除去後にターゲット容器に戻る。

2次ナトリウム冷却系は、1次ナトリウムの冷却を行うために、1次ナトリウム系冷却器に冷却用のナトリウムを循環、供給することを目的とする。系統は2系統構成とし、通常時は2系統

並列に運転する。系統は、２次ナトリウム系電磁ポンプ、除去した熱を大気に放出する空気冷却器、２次ナトリウム系の圧力変動を抑制する２次ナトリウム系サージタンク、コールドトラップ、エコノマイザ、２次ナトリウムダンプタンク等で構成される。

アルゴンガス系は、１次ナトリウム系及び２次ナトリウム系機器のナトリウム自由液面に、カバーガスであるアルゴンガスを供給し、起動、停止時のナトリウムの温度変化による圧力変動の抑制、ナトリウムの酸化防止を行うことを目的とする。系統は１次ナトリウム冷却系機器のカバーガス系としての１次アルゴンガス系、２次ナトリウム冷却系機器のカバーガス系としての２次アルゴンガス系から構成し、それぞれ１系統構成とする。

使用済みターゲット冷却系は、使用済みターゲットの崩壊熱を除去するために、使用済みターゲット保管庫内を空気冷却することを目的とする。系統は１系統とし、外気を除塵する外気処理装置、外気を保管庫に送風する送風機、排気フィルタ装置、排気をスタックより排気する排風機及びこれらを結ぶダクト系から構成される。

５．１．４　施設配置の検討

ターゲット熱流動実験施設建屋の概念配置検討を実施するに際して、以下に示す条件を考慮し概念配置検討を行った。

（１）出入管理室等の出入管理関係設備は地下１階に配置する。
（２）故障・誤操作等により陽子ビームを遮断不可能となった場合、振分け電磁石を用いて陽子ビームを捨てるため、ビームダンプを設置する。
（３）陽子ビームラインは、地表面より地下 6.5m の位置とする。
（４）使用済みターゲットは空気冷却とする。

上記条件を考慮した施設の全体構成図を Fig.5.1.3 に示す。建屋内に設置する部屋は、ターゲットの取扱性及び冷却・換気設備等の配置を考慮して配置した。建屋の構成は４階層とし、地下に２階、地上に２階（一部３階）の構成とした。

５．１．５　具体化への課題

ターゲット熱流動実験装置では、以下の課題について、各設備の取合いを含めた総合的な検討が必要である。

（１）ターゲット容器
ターゲットアセンブリ構造の具体化、ナトリウム流動試験に基づく合理的なターゲット容器の構造検討が必要。その際、耐震性、ナトリウム取扱方法、ドレン方法、メンテナンス方法を含め総合的な検討が要求される。また、ターゲットアセンブリの遠隔操作方法の具体化も必要である。

（2）遮蔽プラグ

ターゲットアセンブリ構造、ビームライン、ターゲット容器構造等の詳細検討及び遮蔽プラグの構造検討が必要である。

（3）ターゲット移送装置

ターゲット取出方法、ナトリウム取扱方法、ドアバルブ等の構造検討が必要である。

（4）陽子ビームマグネット回転台車

陽子ビームマグネット構造、陽子ビームライン接続方法等の検討が必要である。

（5）ターゲット洗浄装置

ターゲット取扱方法、ターゲット洗浄装置の構造検討が必要である。

（6）その他

1）ナトリウムの取扱方法、防護手段等の具体化

2）各種機器のメンテナンス方法の具体化

3）陽子ビーム窓の構造、材質、耐久性、メンテナンス方法及び構造検討

4）各機器の耐震強度設計、高温強度設計の設計基準の整備

また、施設全体については、以下の項目について、今後検討が必要である。

（1）各設備仕様の具体化

（2）冷却設備及び換気空調設備等の機器構造設計の具体化

（3）遮蔽必要壁・スラブ厚の詳細遮蔽設計

（4）機器荷重条件を整備し、建屋強度及び躯体構造の具体化

（5）建物設計・各設備設計の具体的な検討結果による詳細配置

（6）ターゲット検査のためのホットセル室の検査内容に基づく具体化

（7）総合的なターゲット熱流動実験施設建屋の詳細機器配置

ターゲット熱流動実験装置及び実験施設の技術検討課題それぞれ Fig.5.1.4、5.1.5 にまとめた。

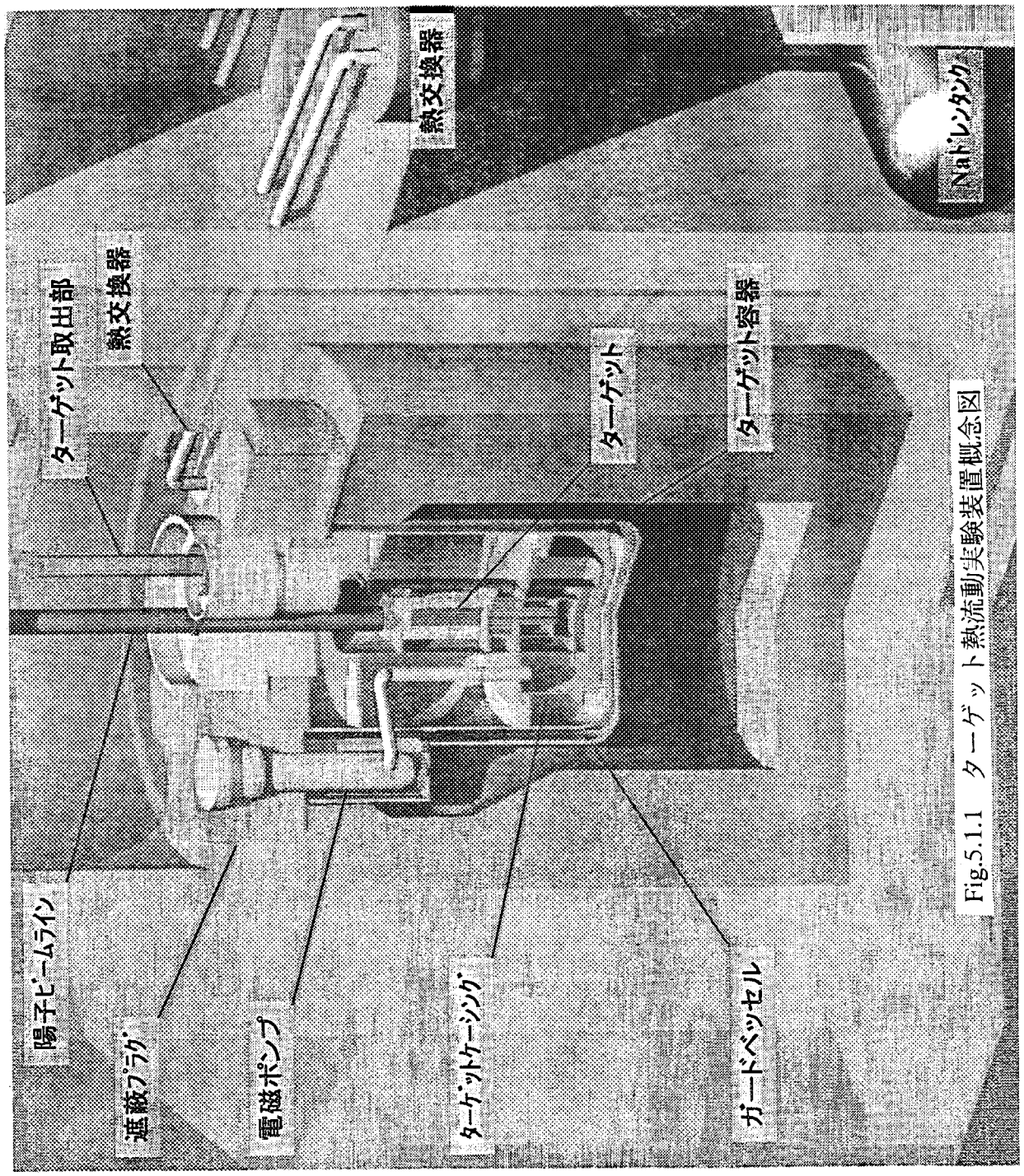


Fig.5.1.1 ターゲット熱流動実験装置概念図

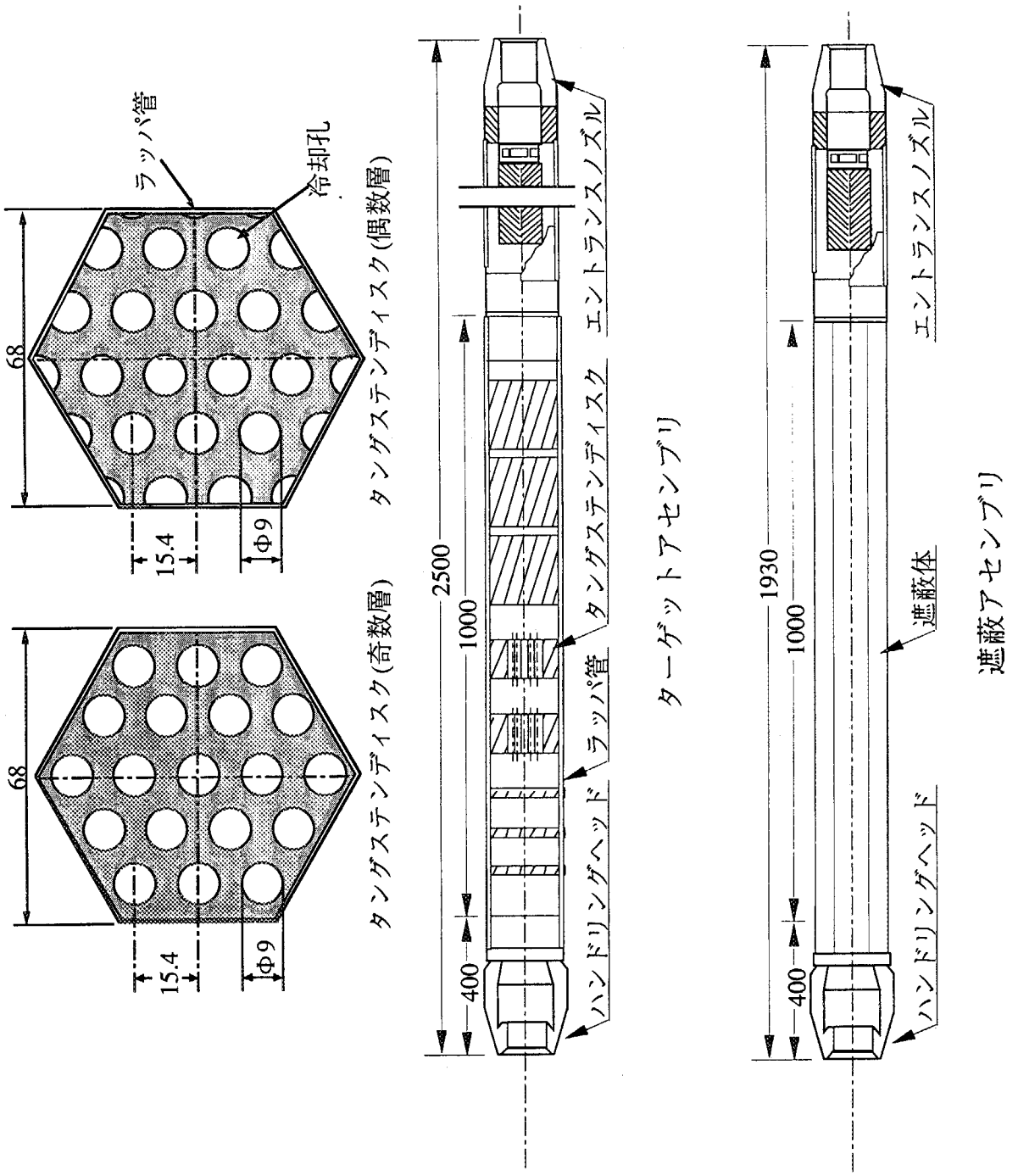


Fig.5.1.2 ターゲット及び遮蔽アセンブリ概念図

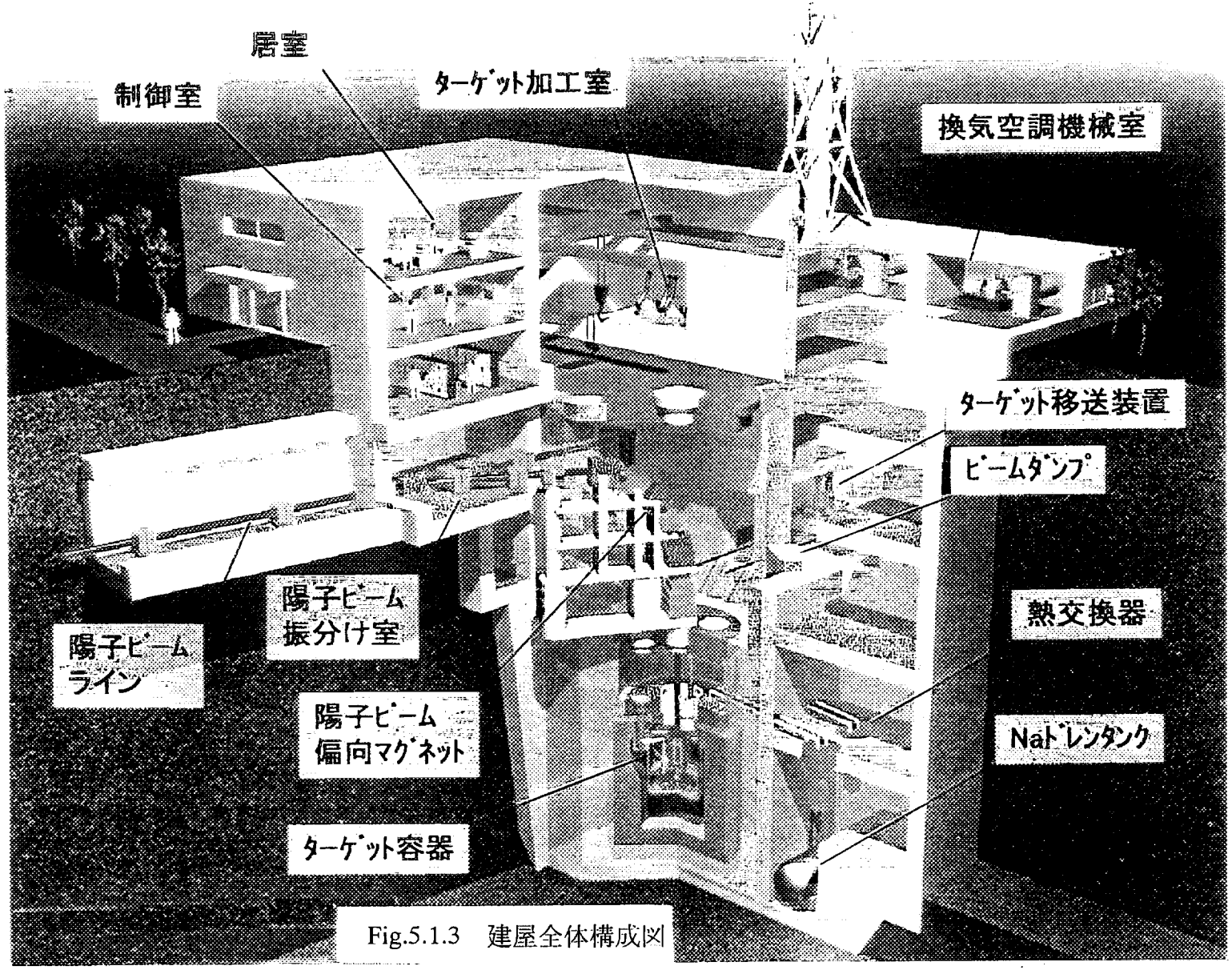


Fig.5.1.3　建屋全体構成図

This is a blank page.

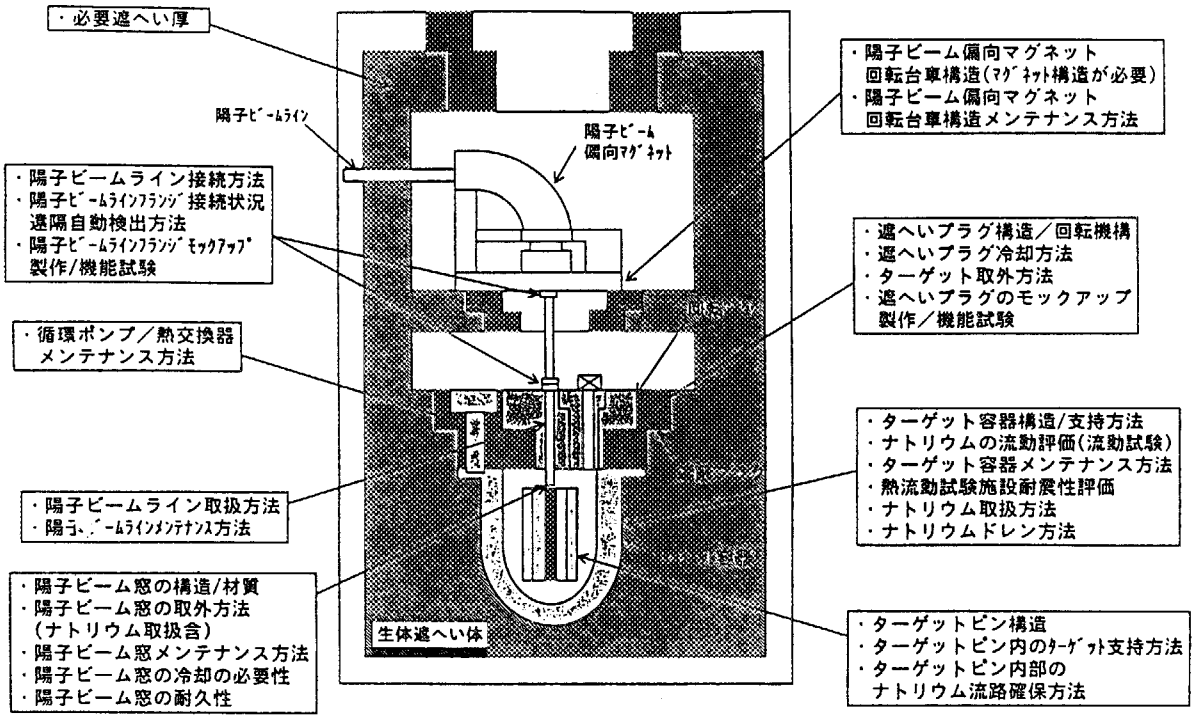


Fig.5.1.4　ターゲット熱流動実験装置に関する技術的課題

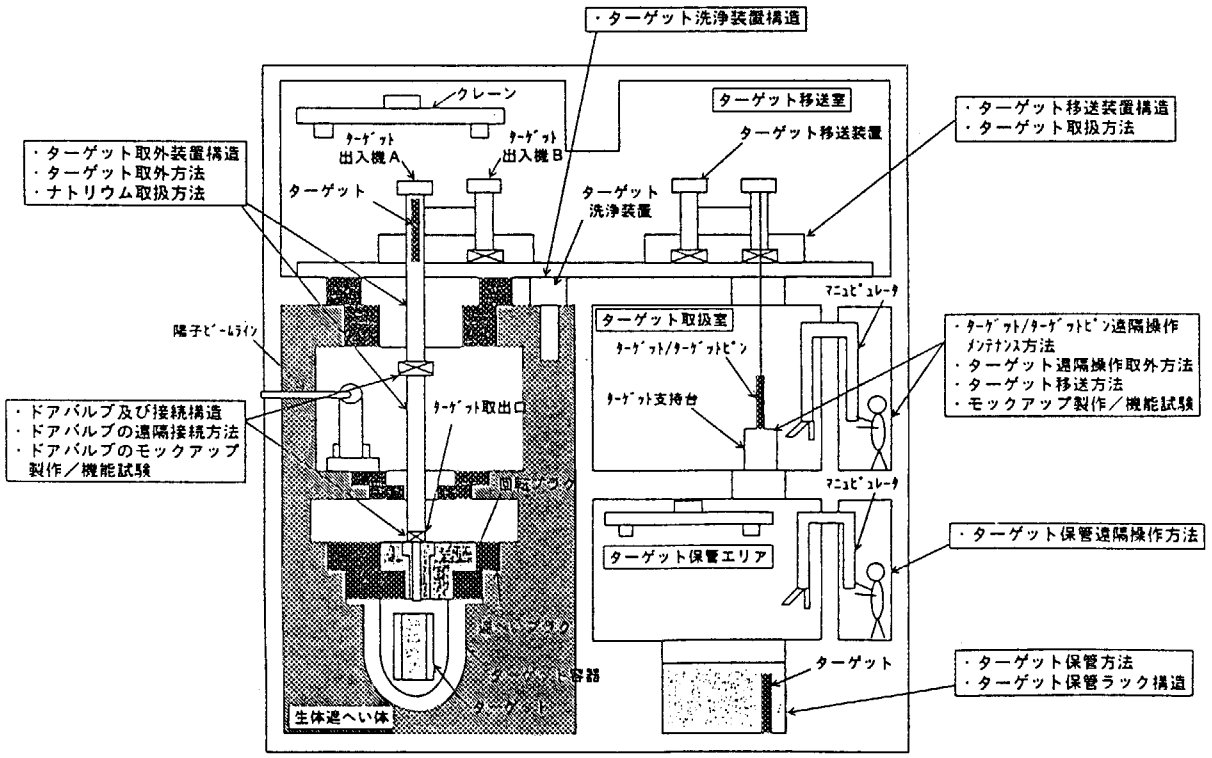


Fig.5.1.5　施設内の機器に関する技術的課題

5．2　材料照射試験施設

5．2．1　核破砕中性子照射場

核破砕中性子は、数百 MeV の高エネルギーまでに及び極めて幅広い中性子スペクトルを持ち、陽子ビームの大電流化により極めて高い中性子束を発生できる特徴を備えている。さらに、照射場への接近性が良いこと、中性子発生条件の制御性が良いこと等から材料照射損傷の基礎研究等から原子力システム用材料の研究開発等までの幅広い材料照射研究での利用が期待される。

核破砕中性子による照射場の特性はターゲット形状及びその周囲の配置等により異なる。水冷却のターゲットを考えた場合、材料としてはタングステンやタンタル等が考えられる。以下に、中性子照射場としての特徴を述べる。

（1）中性子エネルギースペクトル

高エネルギー陽子による核破砕によって生成する中性子のエネルギースペクトルはターゲットの種類により多少異なるが、d－T 反応や重陽子ーリチウム（d－Li）ストリピング反応を利用する中性子源の中性子スペクトルに比べ、そのエネルギー幅が広く、高エネルギー部は数百 MeV にまで及ぶが、平均エネルギーは比較的低く、数 MeV 程度以下である。Fig.5.2.1 に鉛ターゲットに 1.5GeV の陽子ビームを入射した場合の中性子スペクトルと他の照射用中性子源で得られる中性子スペクトルの比較を示す。核破砕中性子スペクトルのエネルギー幅は極めて広いが、そのピークエネルギーは 1MeV 程度であり、材料照射試験に必要な中性子束という観点では、高速炉の中性子スペクトルを少し硬くしたスペクトルである。

核破砕中性子源では、発生する中性子以外に高エネルギー中性子との反応で生成する陽子、ミューオン等の 2 次粒子、γ線が発生する。また、高中性子束領域では減速した 1 次陽子が混入してくる。従って、その影響について考慮をする必要があるが、これらの陽子やγ線の線束は中性子に比べ桁違いに低い。

（2）中性子束分布

核破砕中性子源の特徴は他の加速器型中性子源に比べ、中性子発生効率が高いことである。Fig.5.2.2 に直径が 5cm と 10cm の円柱形状の長さ 80cm のタングステンターゲットに 1mA の陽子ビーム（ビームスポット直径;2cm）を入射させた場合について、ターゲット周囲での中性子束強度を図示した結果を示す。但し、ターゲット注の冷却水の体積割合を 40%としており、実際より少し多いため中性子の生成密度が低めに出ることに注意する必要がある。中性子束の高い領域はターゲットの軸方向（ビーム方向）に沿ってビーム入射面に近い領域であり、中性子束が $2x10^{14}n/cm^2.s$ 以上の試験体積は各々約 2 リットル及び約 0.7 リットルである。また、$10^{14}n/cm^2.s$ 以上の領域はどちらも約 10 リットル以上になる。一方、弾き出し損傷量については、各々の中性子束に対しておおよそ 5dpa/y 及び 2dpa/y が対応する。

このように細いターゲットでは高い中性子束領域が得られるが、全中性子生成量は太いターゲ

ットの方が多い。材料照射には高い中性子束が要求されるので、細いペンシル型と呼ばれるターゲットが用いられる。ターゲット径を細くすれば利用可能な最大中性子束・最大損傷率を上げることは可能であるが、ターゲットの前面入射面の材料損傷とともに1次陽子の照射場への混入が増える。

（3）材料損傷パラメータ

材料照射効果という観点では、中性子束、中性子照射量、スペクトル等ばかりでなく、これらが材料に直接（1 次的に）及ぼす効果である材料損傷パラメータ（すなわち、弾き出し損傷率、ガス状核変換生成物生成率等）が重要である。

核破砕中性子のスペクトルは核分裂型のスペクトルに加えて、その強度は MeV 領域に比べ 2 桁程低いが数百 MeV までの高エネルギー成分をもっている。このため、中性子の弾き出し効率は核分裂炉のそれに比べ大きい。また、核分裂で得られる中性子のエネルギーを越える領域では、He 等のガス状核変換生成物生成の反応断面積が大きくなってくるので、生成 He 量が増え、He/dpa が高速炉照射に比べ大きくなる。（但、HFIR では、ステンレス鋼中の Ni の熱中性子吸収反応、He 生成反応の 2 段反応により多量の He が生成する。）Fig.5.2.3 に核分裂炉、d－T 型中性子源（FNS、RTNS）、d－Li 型中性子照射施設（IFMIF）、核融合炉及び本材料照射施設における Fe 中の He 生成率と弾き出し損傷率との関係を比較して示す。この図より、核破砕中性子照射施設である本施設は核融合炉と核分裂炉との中間的特性を持つことがわかる。

（4）発生中性子の時間構造

「中性子科学研究計画」における大強度加速器の陽子ビーム加速モードは第 1 期ではパルス運転（1.5GeV、1mA）が、第 2 期では連続ビーム運転が検討されている。

第 1 期のパルスビーム加速モードでは、マクロ構造として 50Hz、2ms の幅のビームが取り出され、更にその各々のパルスはナノ秒程度のパルス幅と間隔のミクロ構造（ビーム休止時間は 8ms となる。）が想定される。一方、連続ビーム運転では、ナノ秒程度のミクロ構造を有するパルスビームがマクロ構造を持たず連続的に加速される。

パルス加速モードで材料照射を行う場合、発達する照射損傷組織や照射効果にはパルス照射効果を考慮する必要がある。すなわち、生成する点欠陥の寿命（温度により異なるが、400℃付近のステンレス鋼中の格子間原子の寿命は 10^{-6}s 程度、空格子の寿命は 10^{-1}s 程度である。）を考慮すると 10^{-6}s 程度よりも長いビーム休止期間があると点欠陥の濃度が連続ビーム照射の場合とは異なり、その結果、連続照射により形成される損傷組織とは異なった損傷組織の発達や照射効果が生ずると言われている。一方、連続ビーム運転では、ミクロ構造によるビーム休止時間が点欠陥の寿命より十分に短いので、連続ビーム照射の場合と同様の損傷組織となると考えられる。原子力システムではその使用条件が一般的に連続ビーム照射であり、従って、損傷効果を実証するには、その材料の照射は連続ビーム運転（ビームの休止期間がμ秒以下）で行う必要がある。

一方、照射によって生成する点欠陥や励起についての過渡的挙動等の照射損傷基礎過程に関し

ては、高い強度のパルス照射により、これらの挙動が容易に測定可能となり、照射損傷基礎研究の発展につながると予想される。（この場合、研究対象に依存するがナノ秒レベルのパルス幅が望まれる。）

（5）照射場への接近性等

本施設のような加速器型中性子源を用いる材料照射施設では、原子炉のように炉心照射場に持ち込む際の安全規制を受けない上、照射場への接近性も高く、装置の耐照射性及び生体遮蔽等が確保されれば、種々の照射実験を行うことが可能である。このため、原子炉では実施できなかった繊細な照射実験（極低温照射等を含む）や高度なその場実験が実施できる。（高速炉では周囲の Na の温度が 400℃程度なので、低温での照射は特別な低温照射設備が必要となり大きな照射体積等を確保するのは困難。）

5．2．2　中性子照射施設の検討

（1）施設概念

中性子照射施設の検討を行うために、以上の中性子場特性を基に施設概念の構築を行った。材料照射施設は、大強度陽子加速器により加速した陽子ビームを核破砕用の金属ターゲット（W、Pb 等）に導き、核破砕中性子を多量に発生させ、種々の材料照射研究を行う。このため、材料照射施設は中性子発生用の金属ターゲット及び照射試験のための照射セル等を配置する照射ターゲット室が施設の中心である。これに、ターゲットアセンブリー保守、試料照射装置と照射キャプセルの解体・組立て等を行うホットセル、使用済みターゲット貯蔵室、試料照射装置及び照射済キャプセル等貯蔵室、計測・実験制御室、実験準備室等から構成される。但し、照射後の試料の測定試験は、照射後試験施設へ移送して行うものと考えこの施設の中には含まない。

照射ターゲット室は高エネルギー陽子と中性子を遮蔽するためターゲット・照射セルを鉄遮蔽体で取り囲んだものを想定する。照射セルは必要最小限の大きさにし、遮蔽体の大きさ及びその放射性物質の生成量等を極力抑える。また、試料照射装置（遮蔽プラグの先端に照射キャプセルが取り付けられる）の交換が容易で、計装照射及びその場実験のための各種計装・制御装置へのアクセスが良い必要がある。試料照射装置は遠隔操作で照射ターゲット室から上部へ引き上げ、試料照射装置及び照射キャプセル解体・組立て用ホットセルで遠隔操作で解体を行う。照射キャプセルの装荷については、キャプセルの試料照射装置への組込みをホットセルで行い、遠隔操作でテストセルへ装荷する。また、計装照射及びその場実験のための各種計装・制御は計測・実験制御室及びホット計測室で行う。

以上の施設概念を基に施設の検討を進めた。Fig.5.2.4 にその施設概念を示す。

（2）ターゲット及び照射ターゲット室の検討

1）ターゲット

重照射施設用ターゲットでは以下の特性を持つターゲットが必要である。

①硬いスペクトルを持った最大中性子束を発生する

目的によってスペクトルを調整する必要がある。例えば、加速器駆動炉や消滅処理システムと核融合炉材料では、照射に適当なスペクトルは異なるであろう。

②高中性子束領域の有効利用体積が大きいこと

③稼働率50%以上を確保できる寿命と保守性の確保

これらの条件と、先に述べた中性子照射場特性とから、ターゲット構造を検討した。

ターゲットは、構造を簡単にするため固体ターゲットで水冷却を考えることとし、ISIS 型の固体ターゲットの径を細くした、Fig.5.2.5 に示すような冷却面を交互に持つプレート積層型の構造について冷却性能の検討を行った。この概念について必要な流路構造と流速を評価した。ステンレス鋼における照射損傷条件からの類推として 400℃以下を運転温度とし、Fig.5.2.6 に示すようにターゲット前面で 5mm 厚さのタングステンプレートに対し流路2.5mm に流速 5m/s で、温度を 400℃以下にできることを確認した。

ターゲットの周りには照射に必要なスペースを確保し、全面を鉄の遮蔽体で取り囲む構造とした。ターゲットは側面の遮蔽体を台車構造にし、それにターゲットを固定して、冷却配管類は遮蔽体のなかを通す構造とした。この遮蔽体台車を引き抜いた状態で、ターゲット先端部がホットセル構造の場所に位置するようにし、そこでターゲットの解体保守を行えるようにした。このような構造はISIS のターゲット保守方式と類似のものを想定した。

2）実験配置

円柱型ターゲットにまたがるように、近接して照射キャプセルを設置し、その中に照射試料、環境制御のための He ガスによる冷却・雰囲気ガス制御用配管、また、パルスではその場測定のための信号線を引く。これらは遮蔽体プラグを通して挿入される。

これらに必要な実験装置として以下のものが考えられる。

①温度雰囲気制御装置

②ガス雰囲気制御装置

③極低温冷却器

④各種計測機器

電気計測、光計測、音響計測等

3）ターゲット室の構造

構造はターゲットを鉄遮蔽体で取り囲み、ターゲット台車を水平に引き抜くとともに、照射装置を付けた遮蔽プラグが上から挿入される。また、照射用気送管や陽子ビーム導管と真空窓が遮蔽体内に設置される。この時、遮蔽体重量とその放射化を極力抑えるため照射ターゲット室を必要最低限の大きさにする。

遮蔽体構造では、NMTC/JAERI と MCNP-4A による計算では、約４ｍの鉄遮蔽で１Sv/h まで線量を落とすことができることが分かった。しかし、放射線従事者レベルまで落とすには更に 5 桁遮蔽する必要がある。このためには、鉄を追加するよりはコンクリートで遮蔽す

るのが効率的であり、鉄遮蔽の外側で 1/E スペクトルを仮定すると 1/10 減弱距離を 20cm として、1mのコンクリートで外周を囲むことになる。更に 40cm のコンクリートを追加すれば、一般公衆に対する許容レベルまで線量を下げることができる。

以上の条件を総合した概念を Fig.5.2.7 に示す。ターゲット台車の引き抜き方向については、この横方向以外にビーム方向に抜くことも考えられる。試料照射装置がターゲットに馬乗りになる配置では、ビーム方向に引き抜く方が照射試料挿入と独立して操作ができるので、今後その配置も検討する。

（3）冷却設備

ターゲット、照射装置、遮蔽体、閉じこめベッセル等では中性子による核発熱の発生が予想される。従って、これらには冷却が必要であり、照射試料がヘリウムガス冷却・加熱を行うほかは、水冷却を行う。Fig.5.2.8 に全体冷却系統図を示す。図のターゲット冷却系では放射線分解した水を再結合させるため再結合器を入れるとともに、全冷却系はカバーガスとしてヘリウムを用いる。

（4）保守方式

施設の保守で重要なのは、ターゲット周りの保守である。これには、ターゲットアセンブリーと照射装置の遠隔保守である。Fig.5.2.9 に保守スキームの概念を示す。

ターゲットは台車ごと取扱室に引き抜かれ、マニュピレータでターゲットアセンブリーと冷却配管をはずし、使用済みターゲットアセンブリを保管キャプセルに収納して、保管設備に送る。保管設備は、Fig.5.2.10 に示すように空冷の保管庫であり、使用済みターゲットを入れたキャプセルは保管庫内のキャプセルに収納保管する。

試料照射装置はクレーンで上に引き抜き、照射試料取扱室で横転させマニュピレータで照射キャプセルを取り外す。照射キャプセルは、ホットセルに移して分解、加工して試験試料として、施設外のホット実験室へ搬出する。

（5）その他の付帯設備

以上の施設のほか、材料照射施設では以下の設備及び実験室等が必要である。

1）管理区域内設備

①ホットセル

照射材料取り扱い用セル

照射材料加工用セル

運搬容器への移送用セル

ターゲットアッセンブリー加工用セル

②照射材料取り扱い室

③ホット機械室

④ターゲット貯蔵室

⑤照射治具等貯蔵室

2）非管理区域内設備

(1)計測・実験制御室

(2)実験準備室

(3)照射プラグ運転・遠隔操作制御室

（6）施設配置図

以上を総合して、建屋配置の概念検討を行った。Fig.5.2.11 及び 5.2.12 に示す立断面図及び平面図は、施設合理化のために消滅処理ターゲット熱流動試験施設と建屋を共有した場合を想定した概念図である。主クレーンは扱える限度として５０トンを想定した。揚程は消滅施設との共有のために、照射プラグを引き抜くのに必要である以上に高くなっている。その他、特徴としてはホットセルを縦に３層に設置し、上下に放射化物の移送ラインを取っている。

５．２．３　まとめ

材料照射施設の概念検討を行った。検討の結果、遮蔽施設規模、冷却設備規模の概要を把握することができた。この施設概念を基に、今後検討すべき作業項目を整理したのが Table 5.2.1 のＷＢＳ（Work Breakdown Structure）である。これだけの項目について詳細仕様とともにそのコストを評価し、全体としてコストパフォーマンスの最適化を図らねばならない。

ここで得られた概念では、遮蔽体及びターゲットシステムは ISIS の 160kW 中性子散乱施設の 10 倍の 1.5MW 規模のものとなるが、減速材システムが無い分シンプルなターゲットである。しかし、照射プラグは巨大な遮蔽体を伴う重量構造であり、これを避けるため、ターゲット台車を共有する考えもあるかもしれない。この場合ホットセルもターゲット保守用と共有できる可能性があるが、ターゲット本体と照射サンプルの放射化量は相当異なると思われるので、放射能レベルを区別したセルを２段階に別途用意することが必要であろう。

いずれにしろ遠隔保守については、ターゲット保守、サンプルの装荷、治具への脱着、照射プラグの構造等を含んで今後更に検討していくことが必要である。

Table 5.2.1 Work Break-down Structure (WBS) list for material irradiation facility construction (1/2)

1.設計管理			
2.中性子照射施設	2.1 ターゲットセル	2.1.0 中性子物理設計	2.1.0.1 ターゲット発熱
			2.1.0.2 ターゲット形状最適化
		2.1.1 ターゲット構造	2.1.1.1 ターゲットアセンブリ 2.1.1.1.1 熱流動設計 2.1.1.1.2 構造強度設計
			2.1.1.2 1 次冷却系
		2.1.2 ベッセル	2.1.2.1 ヘリウムベッセル (シール構造)
			2.1.2.2 陽子ビーム窓ｱｾﾝﾌﾞﾘ
		2.1.3 遮蔽体	2.1.3.1バルク遮蔽構造体
			2.1.3.2 プラグ構造体
			2.1.3.3 ヘリウム循環系
			2.1.3.4 一次冷却系（軽水）
	2.2 ビーム輸送系	2.2.1 ビーム成形磁石系	
		2.2.2 ビーム輸送系	
		2.2.3 ビームライン遮蔽	
	2.3 照射試料取扱設備	2.3.1 試料照射シナリオ	
		2.3.2 試料挿入プラグ	
		2.3.3 試料温度制御系	
		2.3.4 試料遠隔取出システム	
		2.3.5 試料取扱ホットセル	
	2.4 保守設備	2.4.1 保守シナリオ	
		2.4.2 ターゲット保守遠隔操作セル	
		2.4.3 廃棄物取扱設備	
		2.4.4 マニュピレータ	
	2.5 ユーティリティ	2.5.1 二次冷却系	
		2.5.2 ヘリウム供給系	
		2.5.3 ドレイン	

Table 5.2.1 Work Break-down Structure (WBS) list for material irradiation facility construction (2/2)

	2.6 安全管理システム	2.6.1 放射線管理モニター	
		2.6.2 インターロック	
		2.6.3 冷凍機／高圧ガス	
		2.6.4 排気設備	
		2.6.5 廃棄物保管設備	
	2.7 制御システム	2.7.1 ターゲット	
		2.7.2 トロリー	
		2.7.3 照射条件制御	
	2.8 計測装置	2.8.1 基本計測系	
		2.8.2 レイアウト	
		2.8.3 サンプル交換技術	
	2.9 建屋設備	2.9.1 建屋レイアウト	
		2.9.2 特殊設備	
		2.9.3 電気設備	
		2.9.4 空調排気／排水設備	
		2.9.5 非常用設備	
	2.10 ビームダンプ		

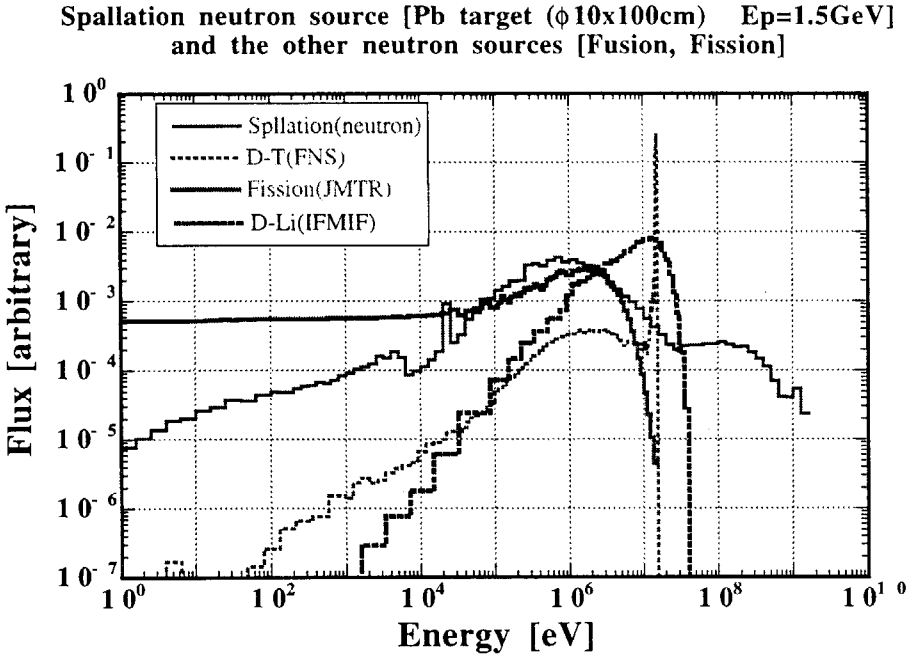


Fig. 5.2.1 Comparison of Neutron spectra obtained from various neutron sources

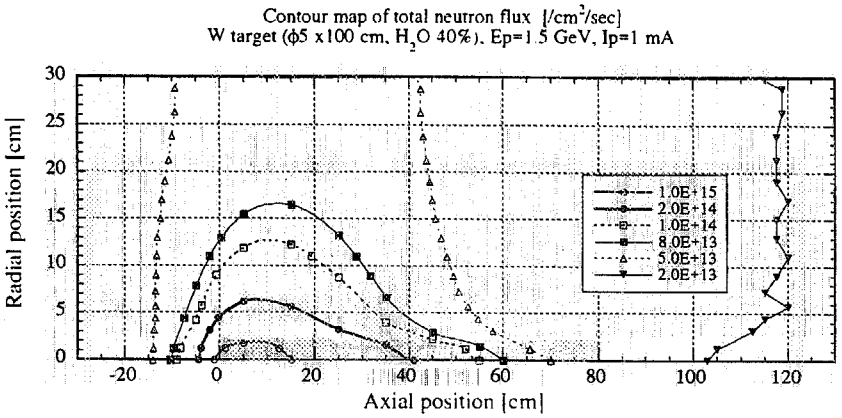


Fig. 5.2.2(a) Neutron flux distribution around the cylinder target with a diameter of 5 cm

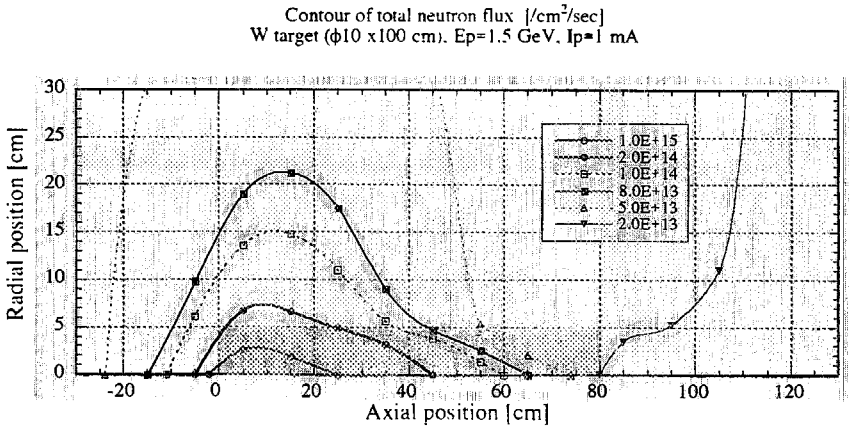


Fig. 5.2.2(b) Neutron flux distribution around the cylinder target with a diameter of 10 cm

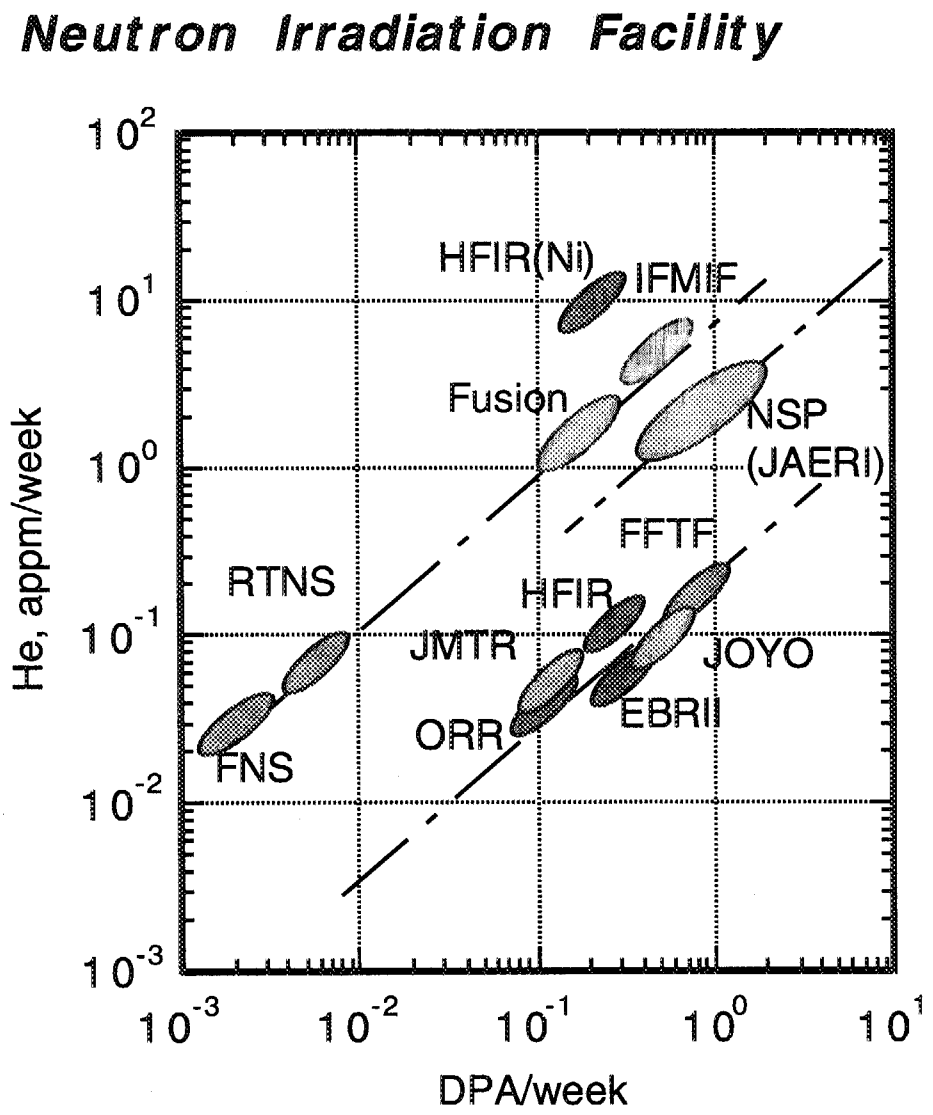


Fig. 5.2.3 Comparison of He production rate as a function of dpa rate among various neutron sources

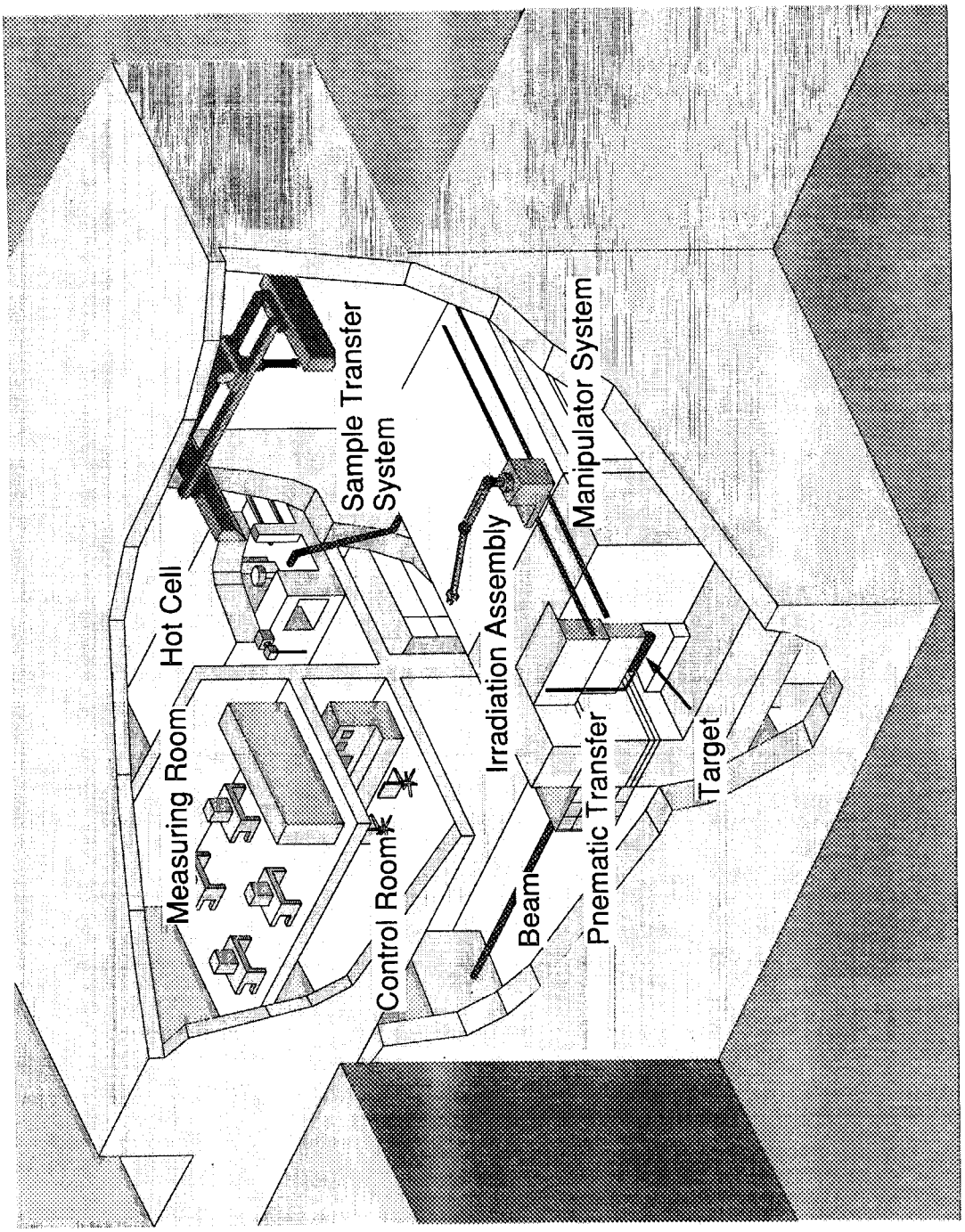


Fig. 5.2.4 Concept of material irradiation facility

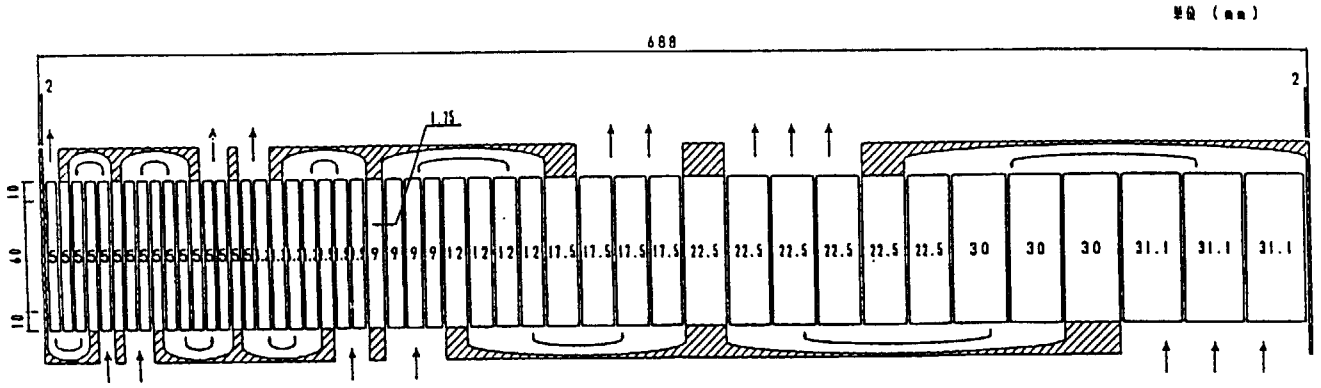


Fig. 5.2.5 Concept of target assembly

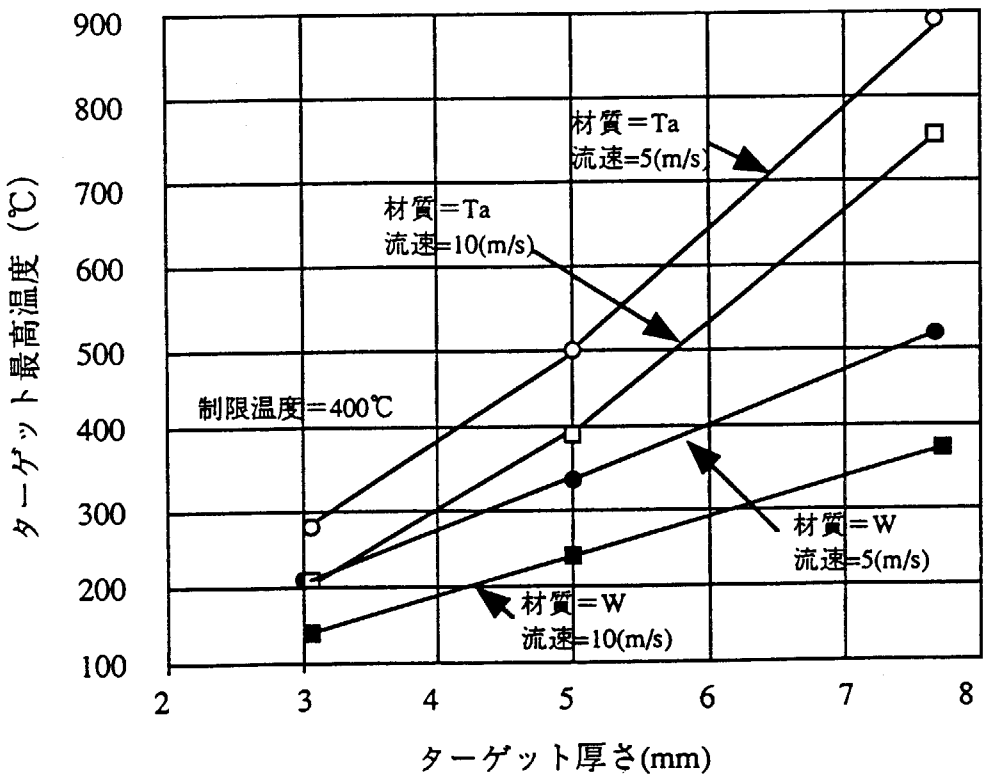


Fig.5.2.6 Peak temperature in various target plates as a function of plate thickness with respect to coolant flow rate change

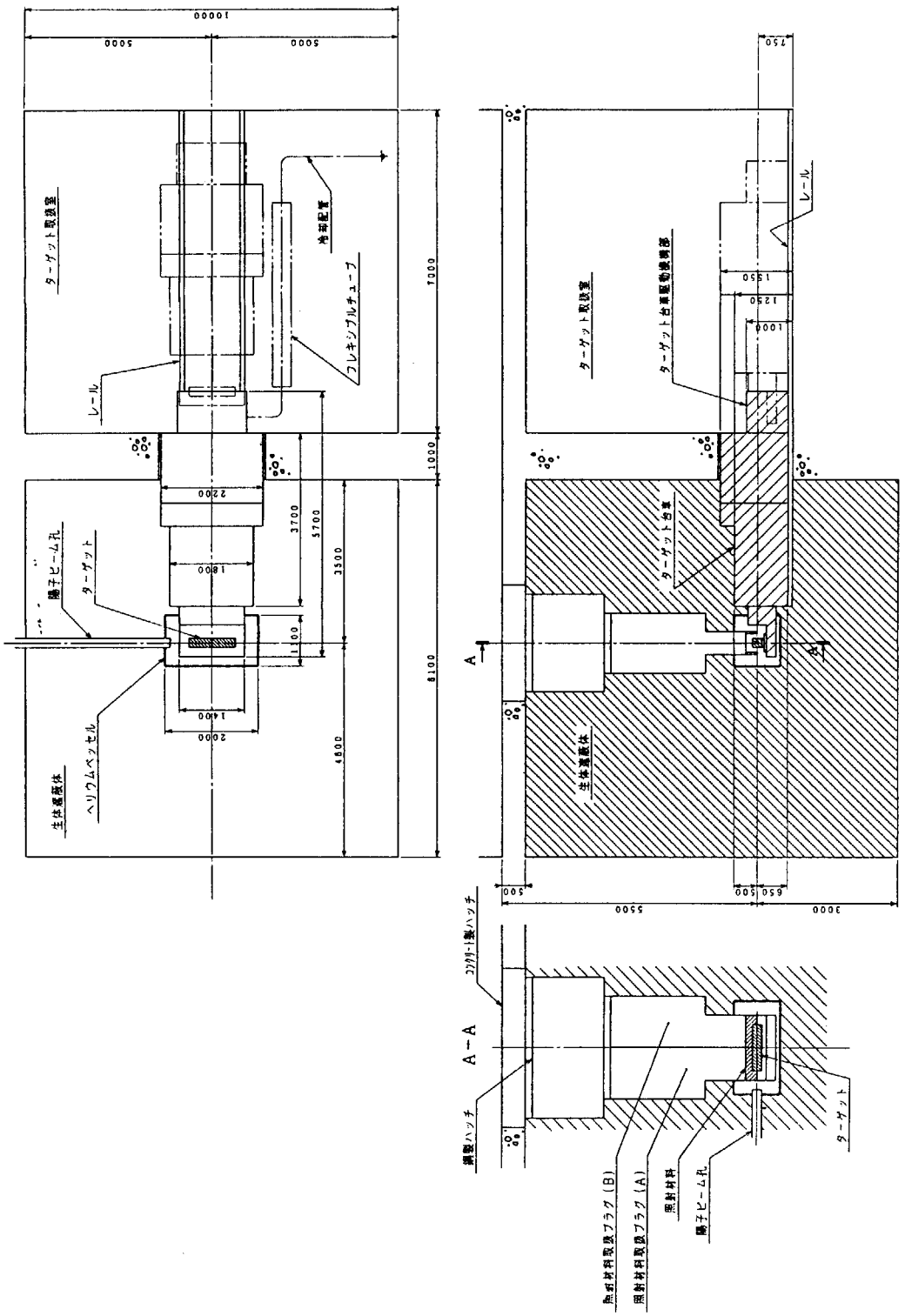


Fig.5.2.7 Concept of target cell structure

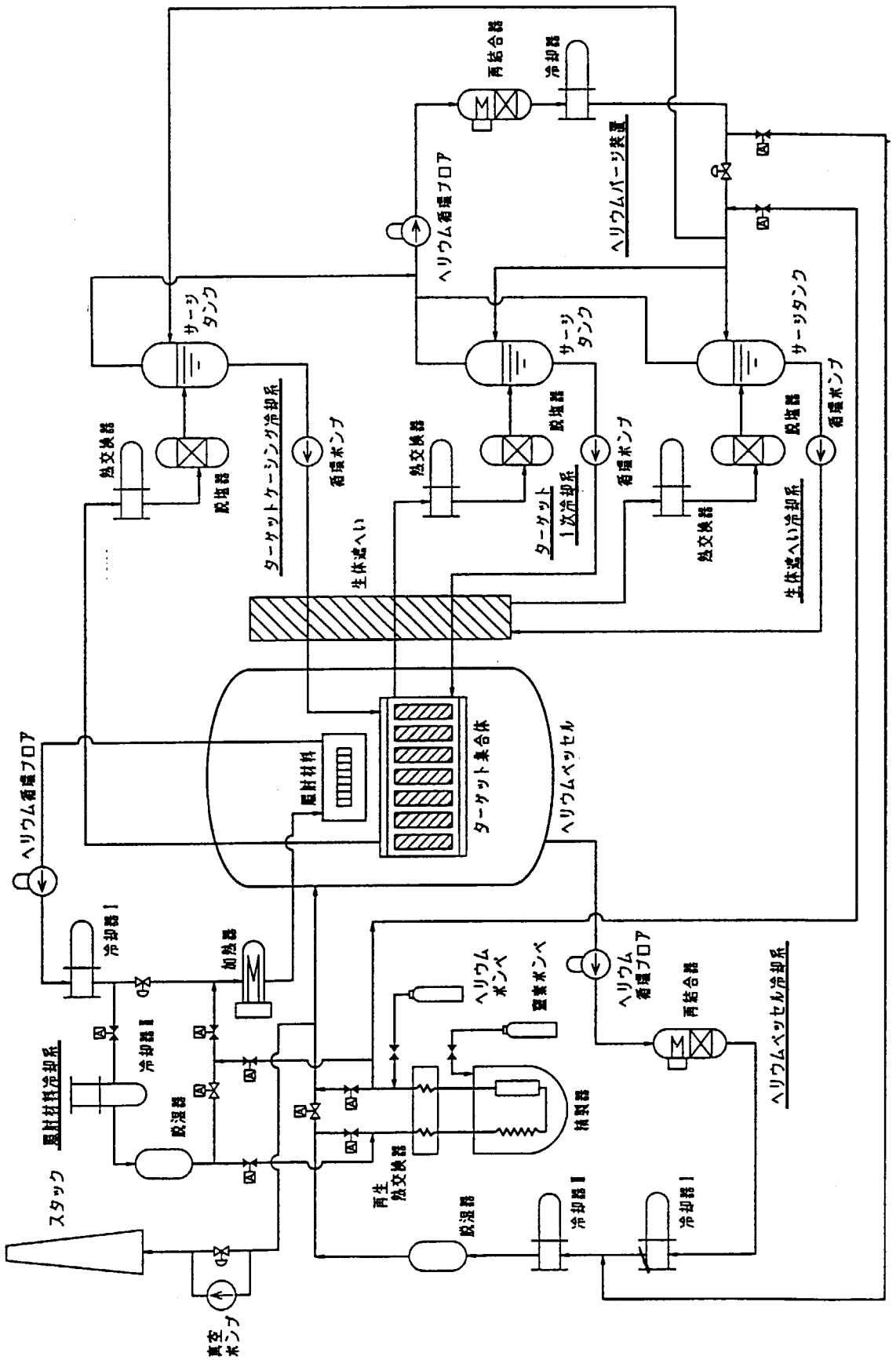


Fig.5.2.8 Schematic diagram of cooling systems for target and related components

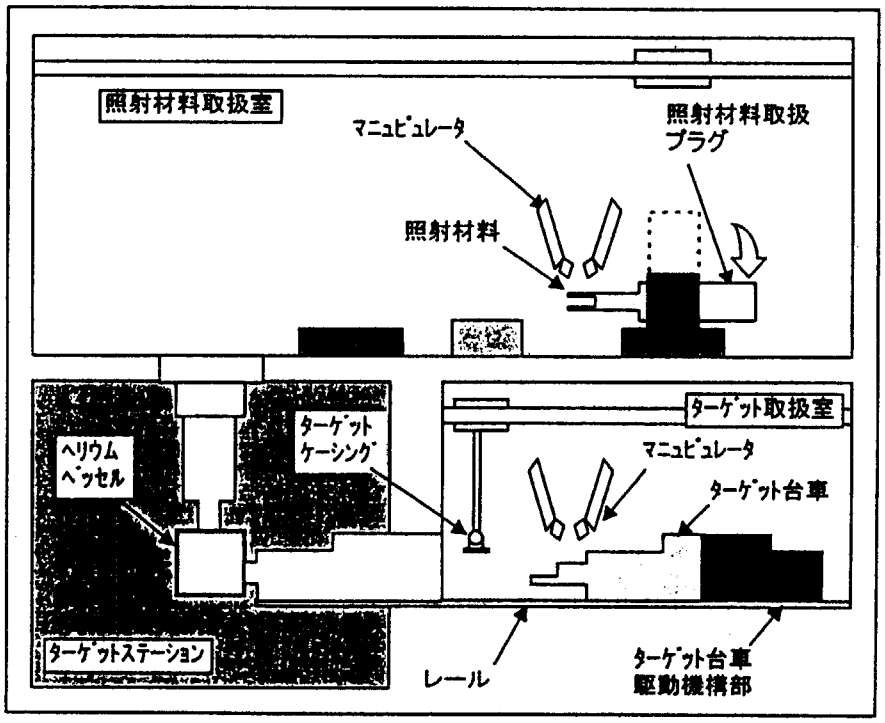


Fig.5.2.9 Concept of maintenance scheme for a target and a irradiation device

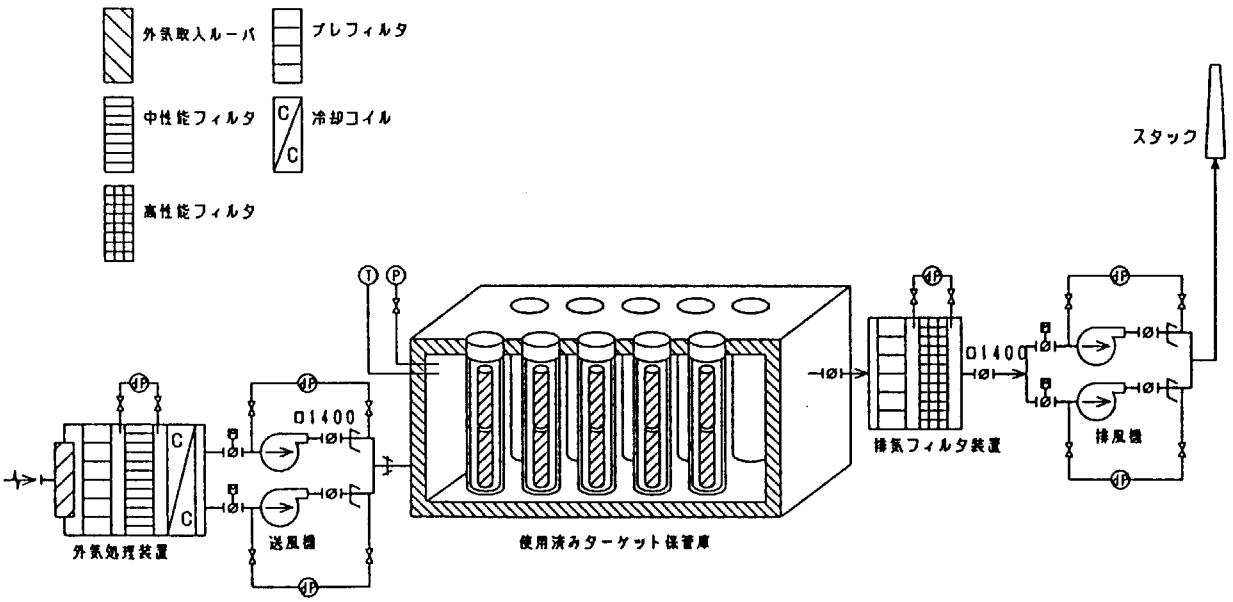


Fig.5.2.10 Concept of storage of used targets

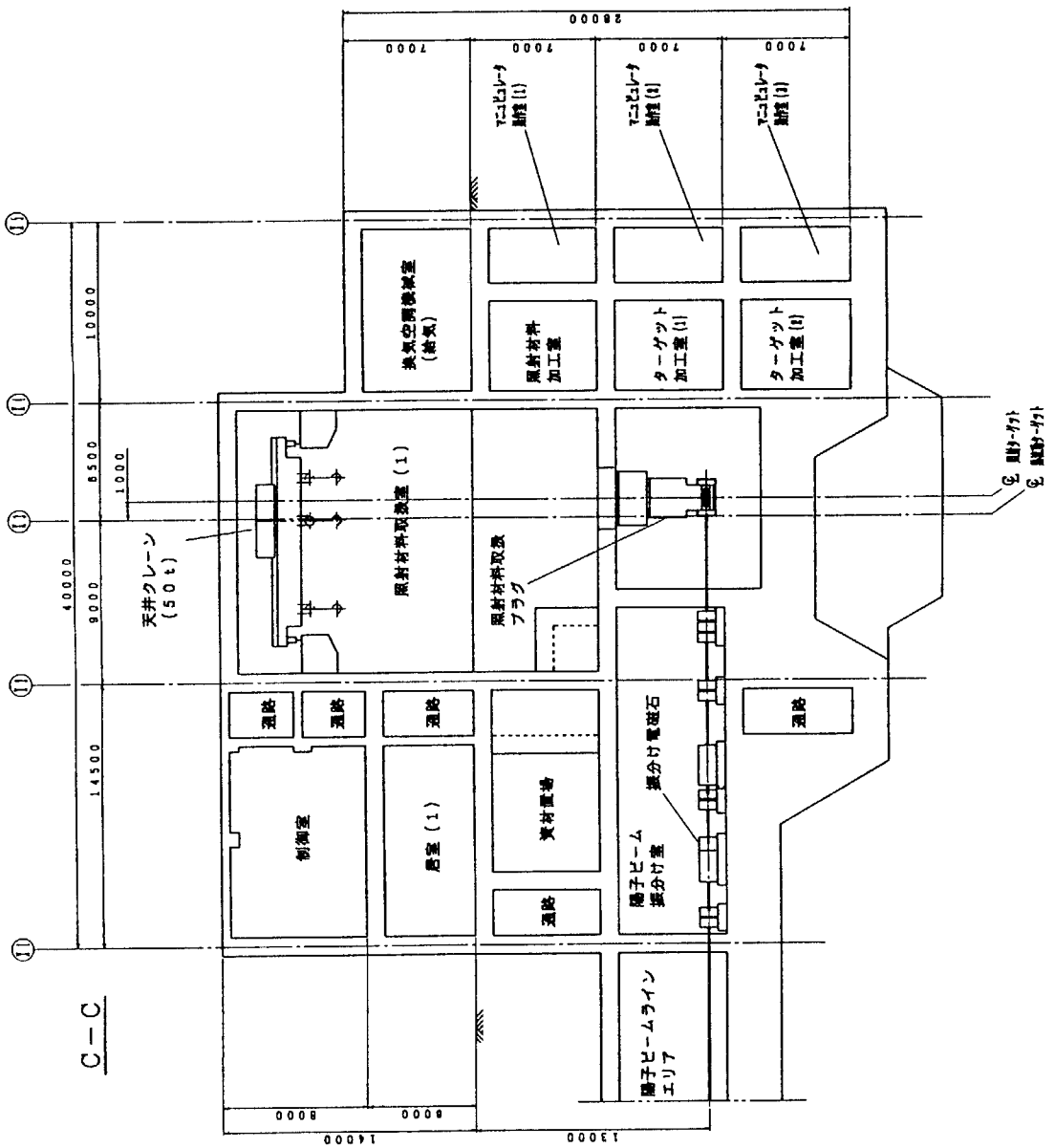


Fig. 5.2.11 Vertical plan of a material irradiation facility

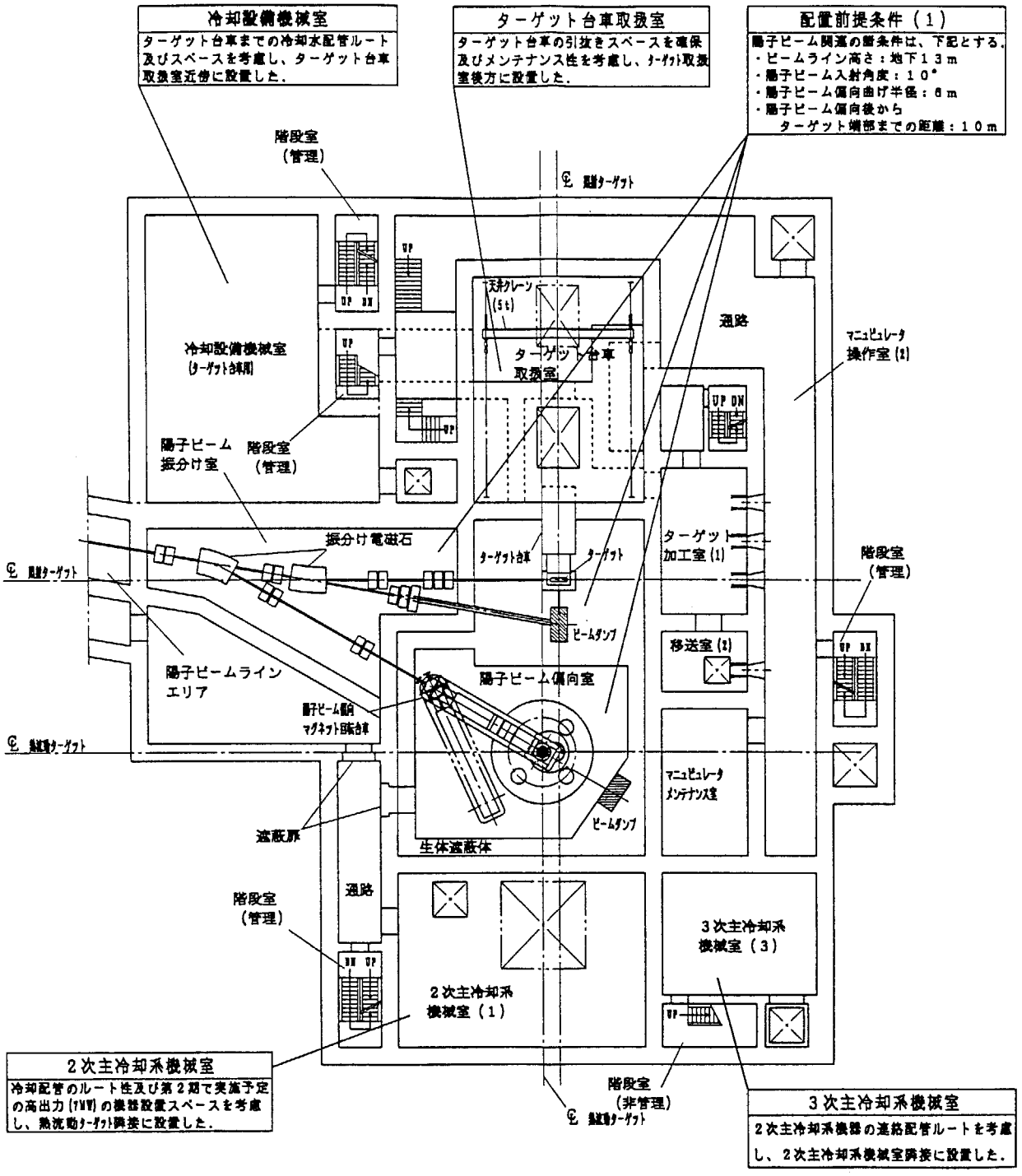


Fig. 5.2.12 Floor plan of a material irradiation facility (B2)

5．3 中性子核物理実験施設

5．3．1 研究目的

中性子核物理実験施設では、大強度でかつ GeV に至る高エネルギー中性子ビームを用いて、多角的な実験研究を推進する。電荷を持たない中性子の特性を生かし、物質を構成する有限多体系である原子核現象についてより定裏的な理解を深化させ、物質の基本的な構造や動的様相の解明、核変換や元素合成機構等の統一的な解明を目的とした研究を行う。同時に、加速器駆動型消滅処理システムに係わる核データの開発・整備を目的とした実験的研究を行う。

5．3．2 核破砕中性子核物理研究施設の現状

これまでに行われている数百 MeV から GeV 領域の中性子核物理に係わる研究として、米国ロスアラモス研究所の WNR 施設におけるエネルギー 800MeV までの陽子入射核破砕中性子実験がある。その他、中性子断面積実験として 150MeV 電子加速器中性子源である Geel の JELINA を用いた核データ実験がある。Uppsala では 150MeV までの陽子を用いた p-Li 疑似単色中性子源を用いて中性子断面積の測定を行っている。日本では、陽子サイクロトロンビームを用いた研究施設が幾つか存在し、主に p-Li 反応を用いた疑似単色中性子核データ実験が行われている。しかしながら、いづれも、中性子エネルギーが 150MeV 以下に限定されており、それ以上のエネルギー領域での研究は殆ど存在しない。このように数百 MeV から GeV 領域での中性子核物理を目的とした中性子源は決定的に不足してる。以上の現状から、原研の中性子核物理研究施設の実現により、今後、系統的な研究が大きく進展することが期待できる。

5．3．3 中性子核物理研究施設の特長

Fig.5.3.1 に原研が提案する施設で得られる核破砕中性子源スペクトルを示す。中性子核物理研究施設では GeV 領域まで高強度の中性子束が実現できる。このため、他の実験施設と比較して、極短パルス（180ps）による超高分解能測定、高中性子束による極微量試料を用いた実験、及び 1.5GeV までの広範なエネルギー領域での統一的な測定が可能となる。

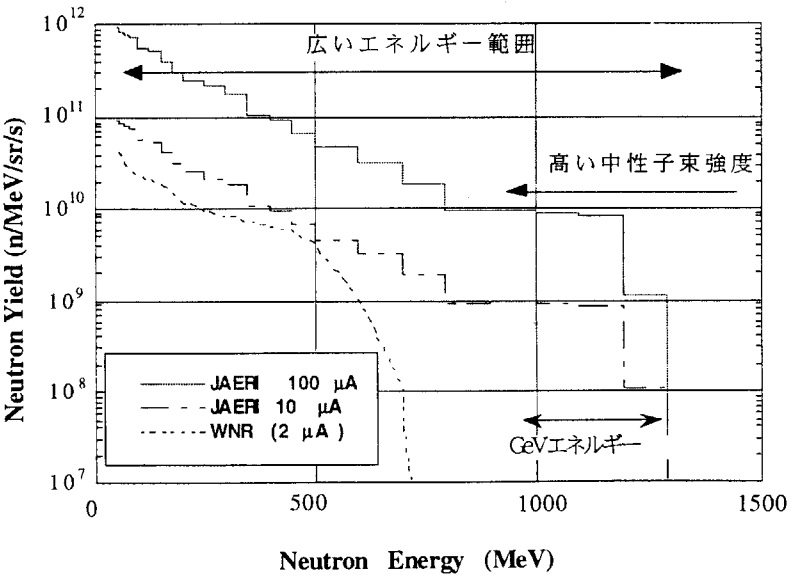


Fig.5.3.1 大強度陽子入射核破砕中性子源スペクトル

5．3．4 研究テーマ

（1）基礎科学研究

1）超高分解能中性子スペクトロスコピーにより、sub-threshold 核分裂断面積における中間構造の研究で新たな局面が開かれ、超重元素の安定性とも密接に関係する vibrational resonance や spin isomer、更に、非常に変形した原子核の存在様式を解明する。

2）MeV 領域で見られる全断面積の揺らぎの精密な測定により、高励起エネルギー準位における原子核の準位密度に関する系統的な情報を基に原子核存在様式を解明する。

3）原子核共鳴の研究を進め、クリスタルボールを用いたスピン依存の捕獲ガンマ線スペクトルの測定等により、原子核構造に関する詳細な研究を行う。Fig.5.3.2 に LANSCE/WNR に設置されているガンマ線測定用クリスタルボール検出器を示す。

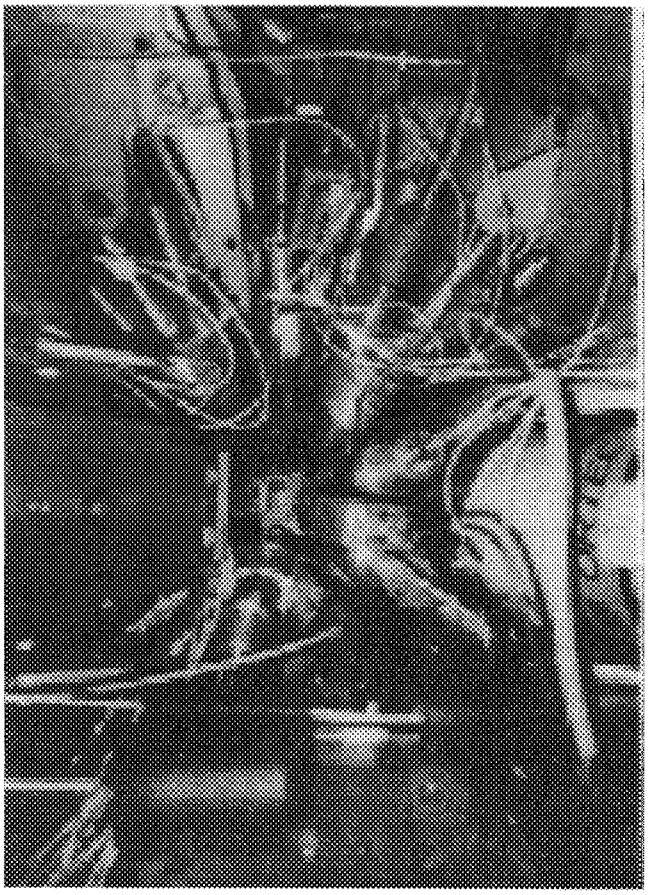


Fig.5.3.2　LANSCE/WNR に設置されているガンマ線測定用クリスタルボール検出器

4）高強度核破砕中性子源により、ナノグラム程度の試料で、不安定核やデータの極めて乏しいマイナーアクチノイドの中性子捕獲断面積や核分裂断面積の測定を行い、元素合成・変換プロセスの理解を決定的に高める。

5）高エネルギー状態の核分光測定により、中性子過剰核（中性子スキン又はハロー）/欠損核領域や超重元素領域、超変形核領域等のこれまで未知とされてきた原子核物理の飛躍的な発展が期待できる。

6）0 から 1.5GeV までの広範囲のエネルギーの中性子により、多重モード核分裂機構の変遷、核分裂障壁の核温度・角運動量依存性、前平衡過程との競合等、核分裂機構の理解が進む。さらに、核分裂片の質量数、電荷、エネルギー、角度分布を詳細な観測により、核分裂障壁上での遷移状態についての新たな情報が得る。

7）中間エネルギー核分裂を詳細に研究することで核子多体系における viscosity、すなわち２体衝突によるエネルギー散逸機構について新しい知見が得る。

（2）高度な中性子核反応データを必要とする新たな原子力応用技術

1）加速器駆動消滅処理研究に必要な中間エネルギー領域における核データを系統的に測定し、現在の核反応計算コードの不確定性を減少させシステム設計の高度化が期待できる。

2）医学利用として治療・診断用 RI 製造に必要な核反応断面積、放射能生成率を精密に測定する。

3）高エネルギー粒子線のドシメトリー手法の高度化を図る。

4）高中性子束ビームを利用して中性子励起γ線レーザーのポンピング（例えば、^{57}Co の中

性子捕獲に続く陽子放出生成する ^{57}Fe の離散レベルからγ線を放出させる。）を用いた中性子核励起レーザーの概念を実証する。

5）高エネルギー密度のアップコンバージョン型γ線レーザー用準安定核生成率を調べる。

以上の研究を有機的に進め、今後の新たな原子力の展開が期待できる分野での技術基盤を開拓する。

5．3．5　施設概念検討

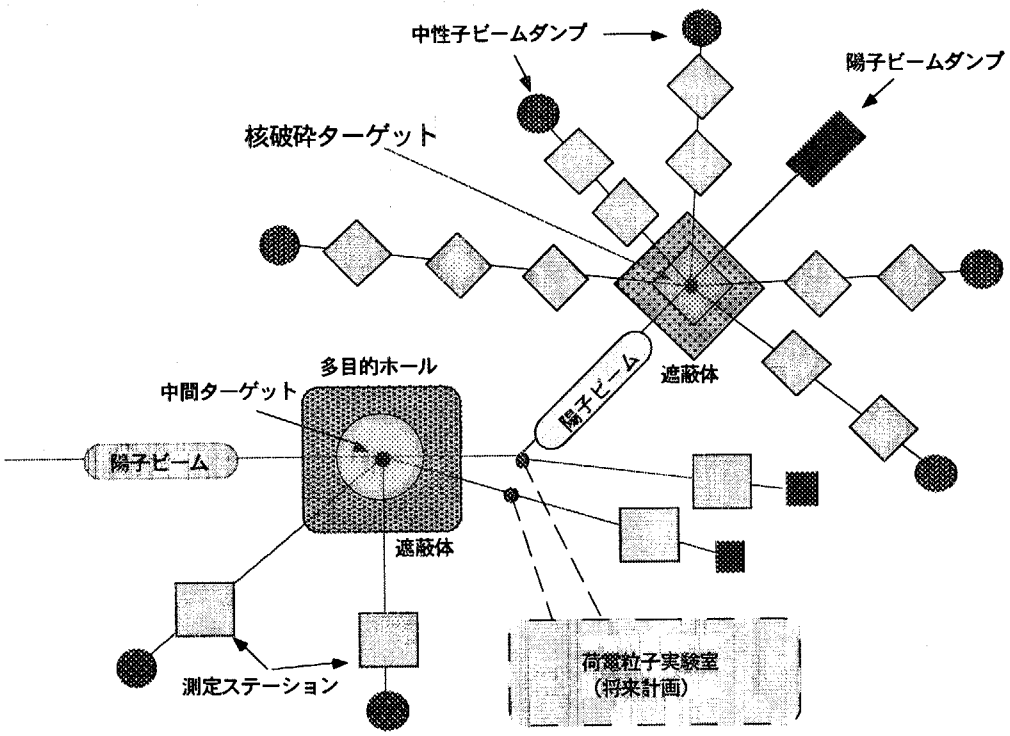


Fig.5.3.3　核物理研究施設の概念図

（1）始めに

中性子科学研究計画に含まれる研究施設の中で、中性子核物理研究施設では、高エネルギー中性子の飛行時間法による実験を基本とする。極短パルス、低電流、高繰り返し周波数という特色のあるパルスを使用する。本施設ではさらに発生する陽子、パイ中間子を用いる実験も予定している。これまでに、「中性子核物理研究施設」における核破砕ターゲットシステムについての概念検討を行った。

Fig.5.3.3 に示した核物理研究施設の概念は、１次陽子ビーム及び２次中性子利用の２つの施設として構成されている理想的レイアウトである。本検討では核破砕中性子ターゲットを中心とする２次中性子利用施設を対象とする。

（2）検討内容

中性子核物理研究施設では、陽子加速ライナックよりのマイクロパルス構造をそのまま使用し、かつ、繰り返し 0.1~1 MHz、電流値は最大 100 μA 程度のパルスモード運転を行うことを想定

した。このようなパルスから高エネルギー中性子を効率よく、確実にかつ安全に発生するために、

・核破砕ターゲットの構造、発熱量および冷却システム、
・得られる中性子、陽子、π中間子のエネルギースペクトル、強度、時間構造、
・遮蔽体の基本構成、
・コリメータの基本構成、
・ビームシャッターの基本構成、
・ビームダンプの基本構成、
・減速材付きターゲットシステムの可能性、

についての検討を行った。この検討のために、下記の作業項目を実施した。

1）高エネルギー発生ターゲットの基本検討

ロスアラモスのWNRにおける核破砕ターゲット（タングステン、直径3cm、長さ7.5cm）を参照にして、幾つかの形状のターゲットを想定し、核内カスケード・蒸発・低エネルギー中性子輸送コードNMTC/JAERIを用いて、中性子、陽子、π中間子のエネルギースペクトル、強度、時間構造を幾つかの角度について計算した。さらに発熱量を計算し、冷却システムについての検討を行った。ターゲット材質についても、ニュートロニクス、除熱、材料強度、冷却材との共存性等の観点から検討を行った。また、残留放射能の計算も行った。

2）遮蔽基本検討

1）で検討した中性子発生ターゲットを含むバルク遮蔽体の基本構造（材質、厚さ等）を検討した。本遮蔽体には、ビームダンプ用及び実験用貫帳孔が数本程度あけられるので、これに伴うコリメータ、ビームシャッター、荷電粒子をクリアリングマグネットの概念検討を行った。

3）ビームダンプの基本検討

中性子核物理研究施設に導入される陽子ビームは中性子発生ターゲットを通過した後最終的にはビームダンプで全てのエネルギーを消費する。ビームダンプは実験装置にバックグラウンドとならないよう中性子、ガンマ線等の粒子を極力漏洩しない構造で、かつ陽子ビームによる熱を効率よく除去する必要がある。このようなビームダンプの基本構造についての概念検討を行った。

4）ターゲット交換用マニュピュレータシステムの概念検討

ターゲットステーションは放射化するため使用後の機器交換には遠隔操作が必要となる。このためのターゲット等交換用マニュプレータシステムについての概念検討も行った。

5）施設全体の概念検討

上記の検討をふまえて、ターゲット、遮蔽体内構造、遮蔽体、中性子飛行管、コリメータ、ビームダンプ、遠隔操作機器を含む概念図を作成した。 Fig.5.3.4 に示すように、ターゲットステーション、ビームダンプ、遮蔽体中性子飛行管、測定ステーション、中性子ダンプ等が配置される。

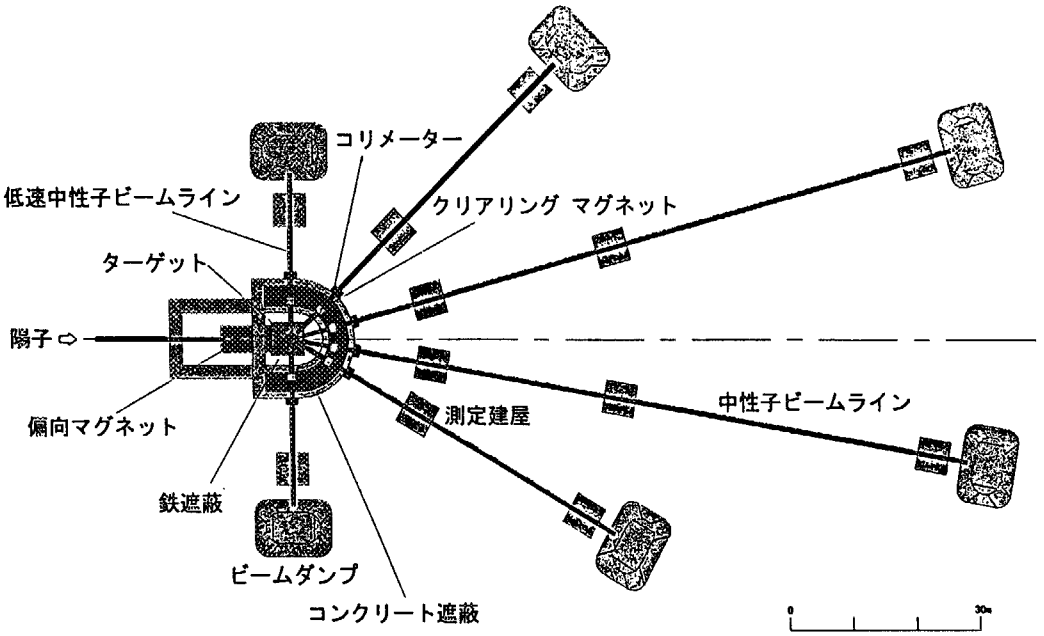


Fig.5.3.4　中性子核物理研究施設基本レイアウト

概念検討に基づく中性子核物理研究施設の鳥瞰図をFig.5.3.5に示す。中性子ビームライン端には環境に対する十分な遮蔽を行うため土盛りによるダンプが設置される。

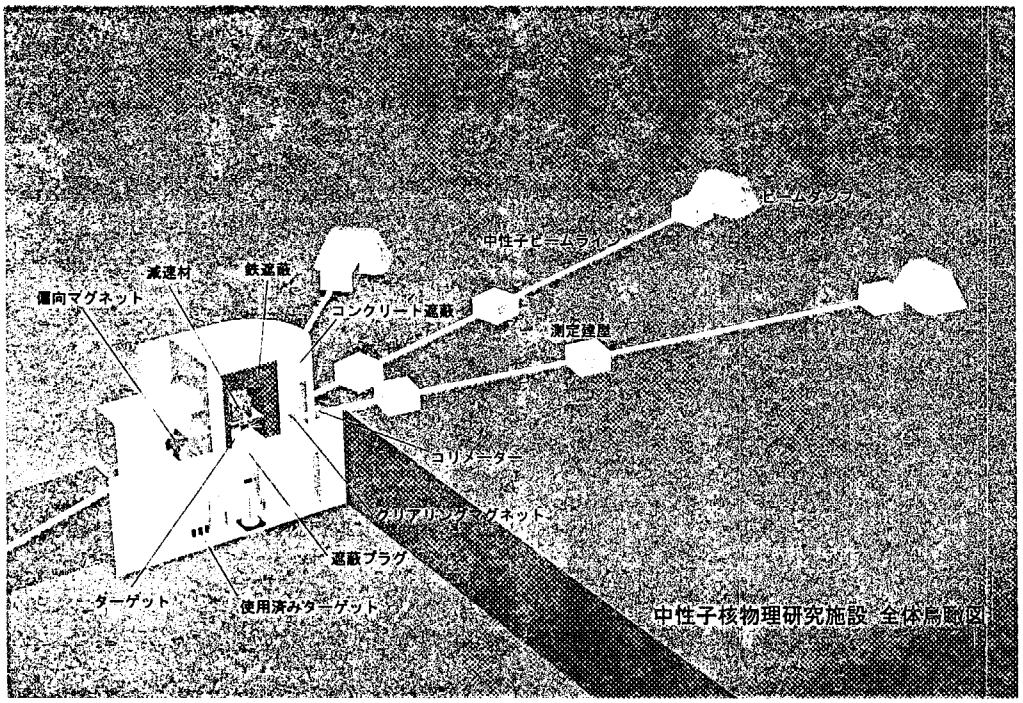


Fig.5.3.5　概念検討に基づく中性子核物理研究施設の鳥瞰図

Fig.5.3.6にNMTC/JAERIで計算された、タンタルターゲットで発生する中性子の内、角度１０度、４５度、９０度方向に放出される中性子スペクトル束を示す。角度１０度の前方方向のスペクトルは入射陽子エネルギー1.5GeVに近い高エネルギー成分が多い。角度が高くなるに従って高エネルギー成分の割合が減少する。異なる角度のスペクトルの特長を生かした実験が期待できる。

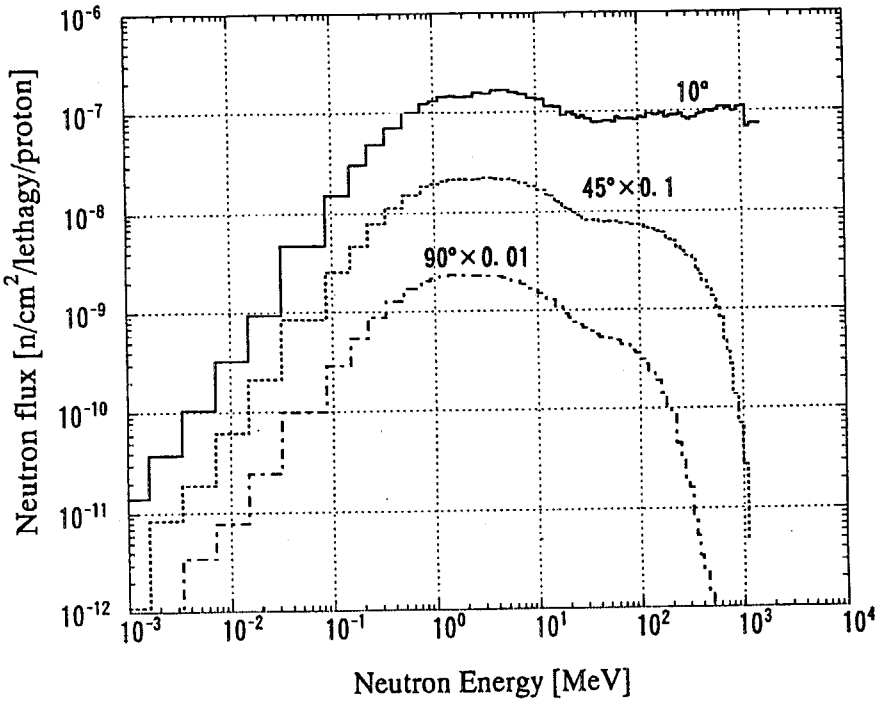


Fig.5.3.6　中性子のエネルギースペクトル（測定位置=10m）

５．３．６　高エネルギー中性子発生ターゲットの基本検討

（１）発生粒子のエネルギースペクトル等の評価

中性子核物理研究施設では飛行時間測定法を基本とした様々な実験が計画されている。そこで、核破砕ターゲットシステムにおいて、発生する荷電粒子のエネルギースペクトル及び中性子エネルギースペクトルとTOFスペクトルを評価した。

１）計算条件

陽子ビームエネルギー	：1.5 GeV
陽子ビーム形状	：ペンシル型
陽子ビーム強度	：100 μA
ターゲット	：タンタル(^{181}Ta)
ターゲット密度	：16.4g/cm^3
寸法	：タンタルのみの場合(3 cm ϕ x　7.5 cm) 除熱用冷却水付きの場合 (3 cm ϕ, Ta = 2 mm x 36 + 3 mm x 1 , Water = 1mm x 36)
発生粒子の放出角度	：入射ビームラインより $10^o \pm 5^o$, $45^o \pm 5^o$, $90^o \pm 5^o$
ヒストリー数	：３０万
その他	：ターゲット以外の領域は全て真空とした。

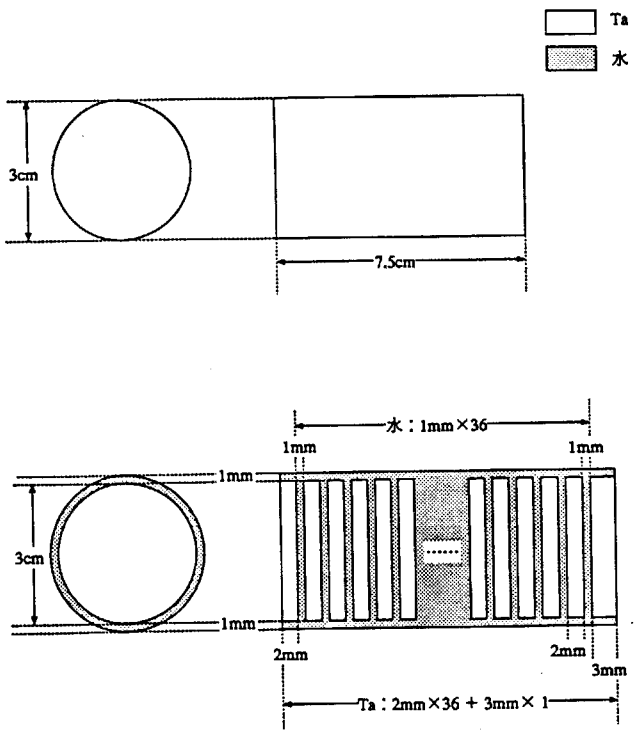


Fig.5.3.7 水冷却ターゲットの断面

Fig.5.3.7 に除熱用冷却水付きのターゲット断面を示す。

2）計算項目

(a) 陽子、中性子、$\pi^{\pm}$中間子のエネルギースペクトル

(b) ターゲット中心より 10m, 50m, 100m 離れた地点における中性子の TOF スペクトル

3）計算コード

LAHET 及び MCNP を用いた。20MeV 以下の中性子断面積に JENDL3.2 を用いた。

LAHET：陽子、$\pi^{\pm}$中間子、及び 20MeV 以上の中性子

MNNP ：20MeV 以下の中性子

4）計算結果

(a) エネルギースペクトル

測定唖置が 10m の中性子のエネルギースペクトルは既に Fig.5.3.3 に示した。その他の位置及び角度のスペクトルも同様な形状を示した。

(b) 中性子の TOF スペクトル

チャンネル幅が 10 nsec、電流が 100μA の場合の測定位置（10m)での角度１０，４５，９０における中性子の TOF スペクトルを Fig.5.3.8 に示す。

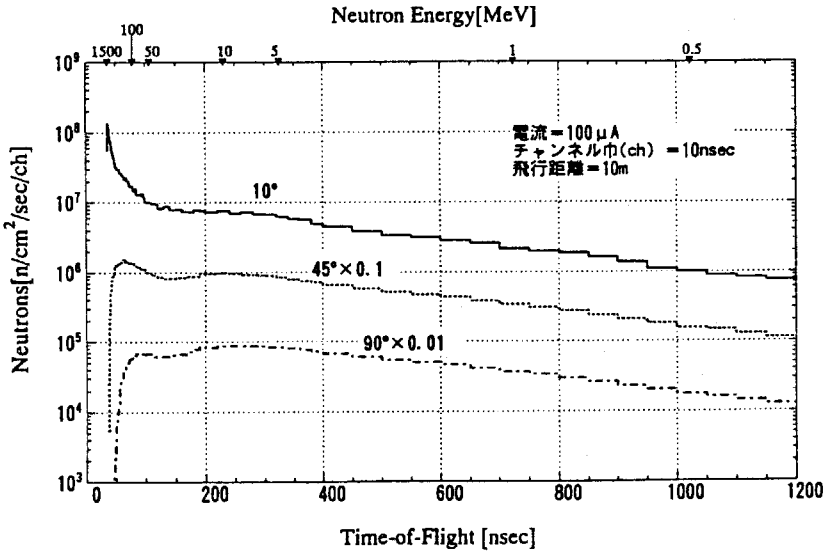


Fig.5.3.8 位置１０ｍでの中性子の TOF スペクトル

(c) １チャンネル当たりの中性子束とエネルギーの関係

１チャンネルを 10nsec とした場合の、１チャンネル当たりの中性子束とエネルギーの関係は以下の様に与えられる。

ここで、中性子のエネルギー E が飛行時間 T により、

E=f(T) ---------- （１）

の関数で表せるため、解像度 R は、以下により算出した。

R = dE/E = (f(t+dT)-f(T))/f(T) ----- （２）

上式において、dT がチャンネル幅を示す。

（２）式は、相対論的なエネルギー領域 Er と非相対論的なエネルギー領域 Enr において、それぞれ以下のように表すことが出来る。

Er = mc2(1/((1-d2)/c2T2)-1/2)

Enr = 1/2 x m c2 (d2/c2T2)

上式に於いて、mは中性子の静止質量、ｃは高速、ｄは飛行距離を示す。

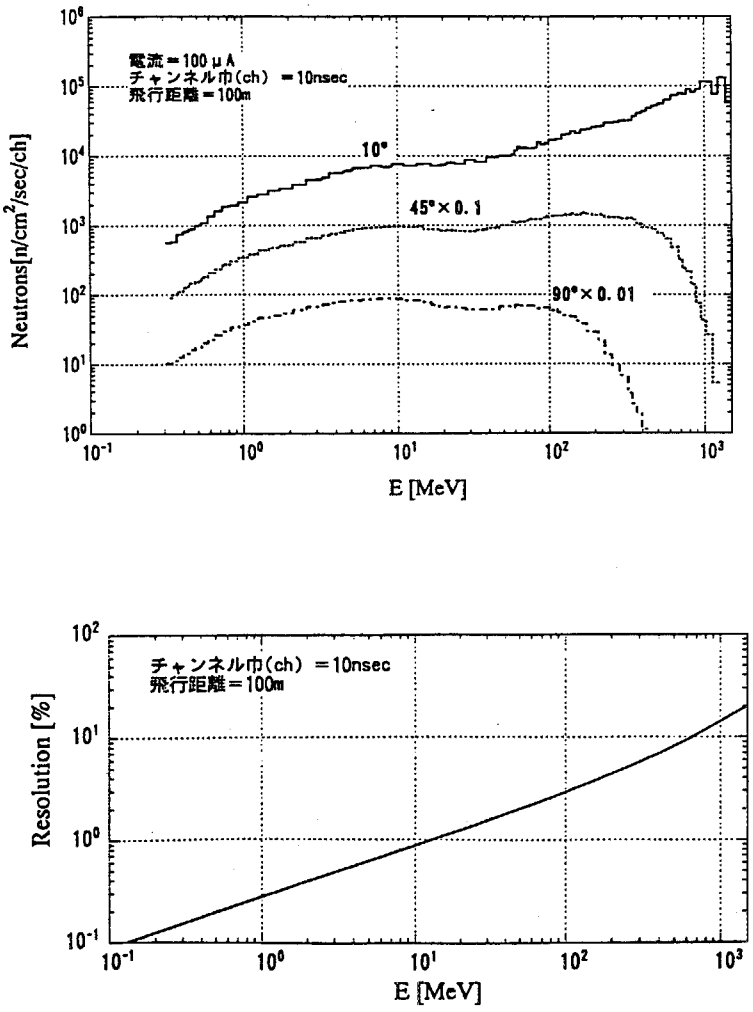


Fig.5.3.9 中性子飛行距離 100 m でのエネルギースペクトルと分解能

Fig.5.3.9 に中性子飛行距離とエネルギー分解能の関係を図示する。このように、飛行距離は測定のエネルギー分解能に影響を与えるため、実験によって最適な飛行時間を得るように様々なレイアウトをもつ施設設計が重要となる。

(d) 除熱用冷却水付きターゲットからの発生中性子のエネルギースペクトルを Fig.5.3.10 に示す。測定位置は 100m とした。比較のためにに、冷却水が無い場合のスペクトルを点線で、冷却水がある場合を実線で示した。冷却水による減速の効果により、全ての角度について、中性子フラックスがやや軟らかくなることが明らかになった。

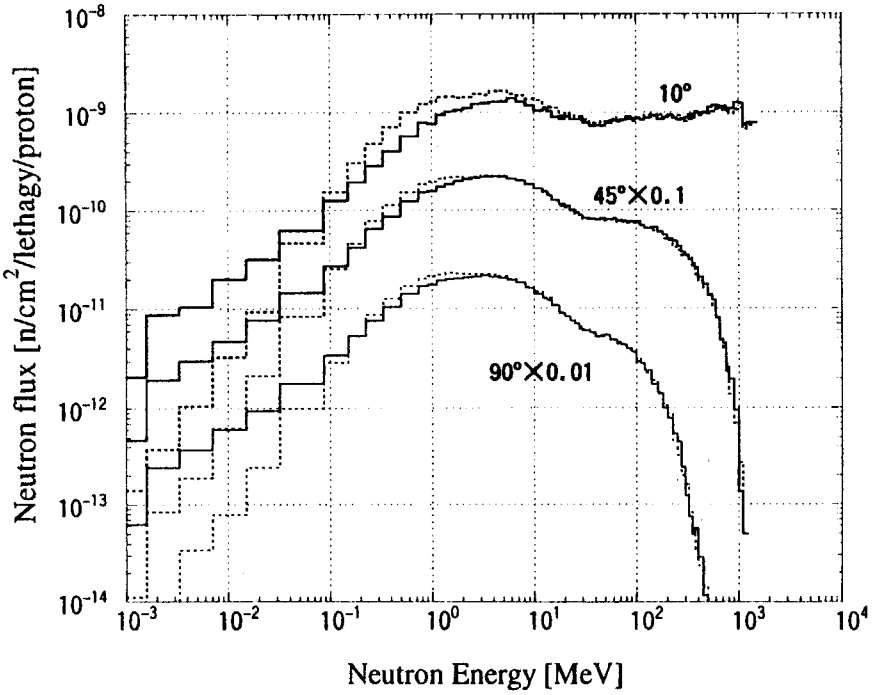


Fig.5.3.10　水冷却ターゲットから放出される中性子のエネルギースペクトル

以上発生中性子に関して得られた知見をまとめると、

1）20MeV 以上
冷却水がある場合と無い場合で、中性子のフラックスはほとんど変わらない。

2）10~20MeV
10° 方向の中性子に関しては、冷却水がある方がそうでない場合に比べて、フラックスが減少し始める。これは、10o 方向の方がターゲット内（の水）の透過距離が長いためである。

3）100keV~10MeV
全ての方向について、冷却水のない場合に比べて中性子フラックスが減少する。

4）100keV 以下
すべての方向について、冷却水のない場合に比べて中性子フラックスが増加する。

5．3．7　残留放射能の評価

（1）全ビーム損失に対する飽和放射能の評価

Barbier の評価式によれば、1GeV 以上の陽子ビームに対するビームダンプ等での放射化量 A_{sat} は次式で評価できる。

$A_{sat}=6.3\times10^{12}$ Bq/kW

本ターゲットシステムの最大電圧は 1.5GeV、最大電流は 100μA であるから、その出力は 150kW となる。したがって、飽和放射能は、

$A_{sat}=6.3\times10^{12} \times 150 = 9.5\times10^{14}Bq=2.6\times10^{5}$ Ci　となる。

（2）ターゲットメンテナンスルームの遮蔽壁厚

放出されるγ線エネルギーを Ta の 1.25MeV と仮定すると、その Sv 係数は、

Sv/Bq=0.347BSv·m^2/MBq/h

である。1.25MeV のγ線に対する普通コンクリートの線量当量減衰係数は 5.19×10^{-2}(cm^{-2}/g)、コンクリートの密度を 2.35g/cm^3 とすれば、線減衰係数は、

0.1219/cm

となる。ターゲットを点線源とみなすと、コンクリート遮蔽厚さを 1.3m とすれば、遮蔽の背面での線量当量率は 2.04 μSv/h となり、管理区域境界の線量当量率の制限値である 6μSv/hr 以下となる。

5．3．8　発熱率の評価

HETC-KFA2 コードを用いてターゲットの発熱量を評価した。

（1）計算条件

陽子ビーム：　エネルギー：1.5 GeV
　　ビーム電流：100 μA
ビーム形状：　・ペンシルビーム
　　・一様円柱ビーム（ビーム半径：0.5 cm, 1.0 cm, 1.5 cm）
ビーム入射方向：　ターゲット軸に水平に入射
ターゲット　材質：　タングステン
　　形状：　円柱（φ3×7.5 cm）

（2）計算コード

計算コード：　HETC-KFA2（50 万イベント）

計算で考慮した発熱過程

- 陽子、π中間子、μ粒子による電離エネルギー損失
- 蒸発粒子(d,t,He-3, α)によるエネルギー付与（全運動エネルギーを生成位置で付与させた。）
- 反跳核の運動エネルギー（全運動エネルギーを生成位置で付与させた。）
- 20MeV 以下のπ^0 中間子、中性子および γ線による発熱は無視した（20％程度）。

（3）計算結果

計算結果の内、円板の温度上昇の時間変化を Fig.5.3.11 に示す。また、発熱密度分布の最大値をビーム形状別に以下にまとめる。

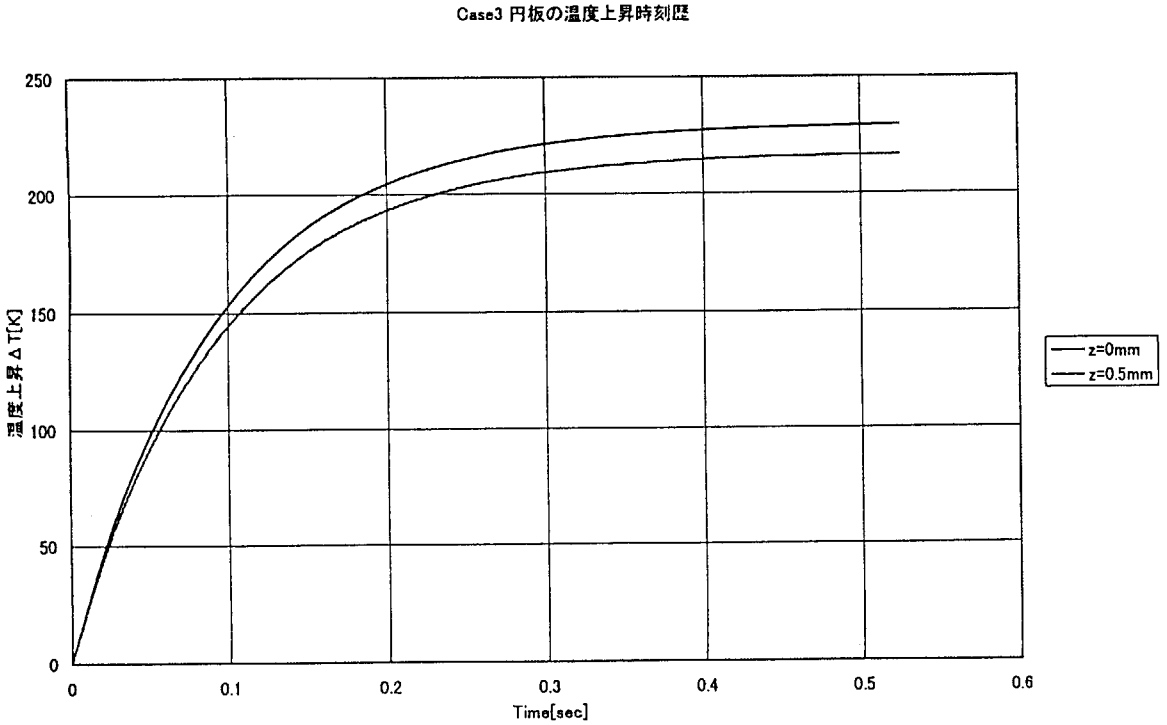


Fig.5.3.11　円板の温度上昇の時間変化

発熱分布最大値

ビーム形状

ペンシルビーム	5,495 [W / cm^3 / 100μA]	(r= 0-0.5 cm, z= 0.5-1.0 cm)
円柱ビーム		
半径 0.5cm	5,266 [W / cm^3 / 100μA]	(r= 0-0.5 cm, z= 0.5-1.0 cm)
半径 1.0cm	1,422 [W / cm^3 / 100μA]	(r= 0-0.5 cm, z= 0.5-1.0 cm)
半径 1.5cm	667[W / cm^3 / 100μA]	(r= 0-0.5 cm, z= 0.5-1.0 cm)

（4）安全率

発熱密度の計算では 20MeV 以下の中性子とπ^0 中間子およびγ線による発熱（約 20％程度）が無視されている。これらのエネルギーが全てターゲットに付与されることはないが、適当な安全率を設定する必要がある。

5．3．9　バルク遮蔽体の概念検討

ここでは、ターゲットステーション建屋の遮蔽構造を前節までの解析結果から決定する。前章で検討した中性子線源強度および遮蔽厚さはビームが全てターゲットおよびビームダンプ中で止められた状態（フルストップ）に対応する。この場合でもターゲットステーション建屋表面で先に示した線量基準を満たす遮蔽厚さを評価する。

なお、ここで評価するのは遮蔽が十分に施された場所の線量であり（バルク遮蔽）、遮蔽欠損部等の詳細な評価（ストリーミング評価）は詳細設計の後に別途行わなければならない。

鉄とコンクリートの価格差、重量差から可能な限り鉄よりもコンクリートを使用するのが望ましい。一般に、高エネルギー中性子による線量は主に鉄で減衰し、コンクリート中では厚さ１ｍ以降の減衰は緩やかになる。したがって、まず十分な厚さの鉄で高エネルギー中性子を減衰させた上でコンクリートにより低エネルギー成分を減衰させる。このために、鉄を内側に、コンクリートを外側にした遮蔽構造とする。

コンクリートの厚さは、検討の範囲の最大値である２ｍと固定し、以下の鉄遮蔽体の厚さを設定した。

（鉄遮蔽体厚さ）

陽子ビーム前方方向	4.0 m
側方	3.6 m

ターゲットやビームダンプから漏れ出る中性子束は、その自己遮蔽効旺のためにビーム方向に対して 15~25 ° の方向で最も高い。この方向の中性子の遮蔽には鉄 4.2 m＋コンクリート 2 m が必要である。前方に 4m の鉄遮蔽を設ければ、この方向の透過距離は 4.0(m)／cos(25°)=4.4(m) と、上記の必要厚さを満たす

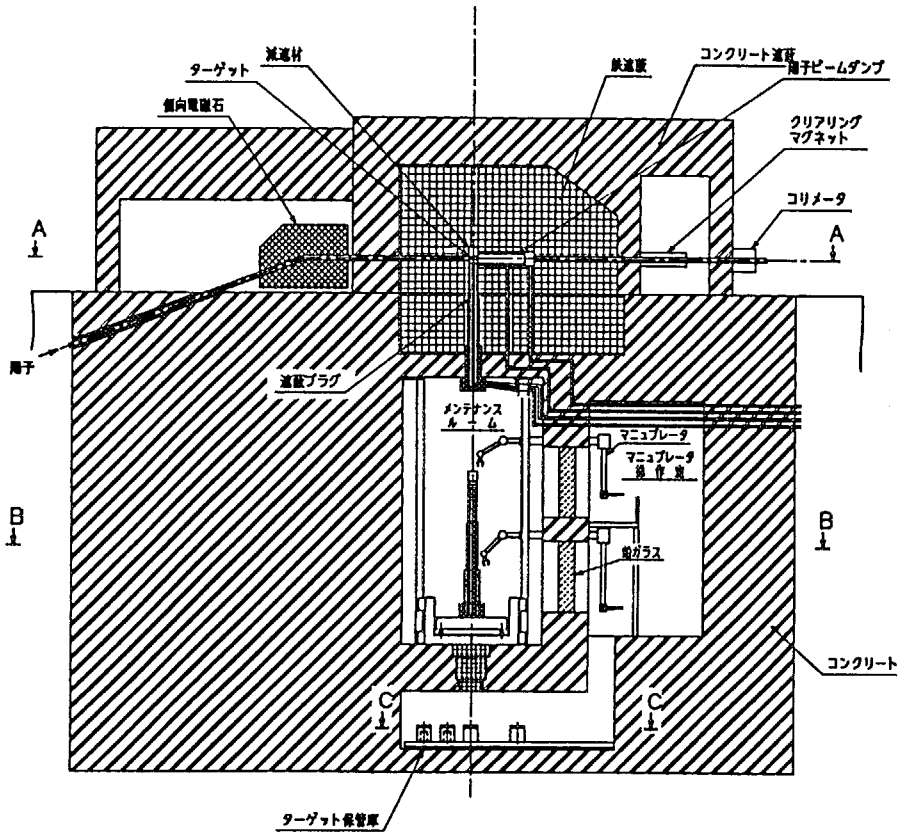


Fig.5.3.12　ターゲットステーションの遮蔽構造

ターゲット下部に遮蔽プラグを設け、遮蔽プラグ毎、地下のターゲットメンテナンスルームに引き込んで、遠隔操作にてターゲット交換等のメンテナンスを行う。放射化したターゲットを取り扱うターゲットメンテナンスルームとマニュプレータ操作室との間の隔壁はコンクリート

1.3m で十分である。上記の検討から設定したターゲットステーションの遮蔽構造を Fig.5.3.12 に示す。

5．3．10　中性子ビームダンプの遮蔽検討

5．3．6で求めた、測定建屋位置での中性子スペクトルから線量当量を求めると下記の通りとなる。

位置	線量当量率（Sv/h）
距離 100 m、10° 方向	3.5
距離 50 m、45° 方向	14.1
距離 10 m、90° 方向	204.5

距離 10m での中性子線量を管理区域境界の基準値(6μSv/h)まで下げるには、約８桁の減衰が必要である。土盛により中性子ビームダンプを作るとした場合に必要な厚さは、土中での中性子の減弱距離を 117(g/cm^2)として、約 2.2kg/cm^2 に相当する厚さが必要である。土の密度を 2g/cc と仮定すると、これは約 11 m の厚さに相当する。仮に乾燥した砂であるとすると、その密度は 1.13g/cm^3 程度であるから、この場合は約 20 m の厚さが必要である。

また、距離 100 m の位置は敷地境界に近接すると考えられる。したがって、この点では敷地境界の線量限度として、目標値である 50μSv/y を考える。週 50 時間運転を仮定すると年間運転時間は 2,555 時間であり、線量基準は 0.02μSv/h となる。上記の 3.5Sv/h の線量当量率をこの基準まで減衰するには、やはり約８桁の減衰が必要である。したがって、距離 100 m の位置でも 20 m 程度の厚さの土盛が必要となる。

5．3．11　ビームシャッターの遮蔽性能評価と概念検討

（1）概念検討

加速器運転中に全ての中性子ビームラインからの中性子を常に実験に使用しているわけではない。従って使用していない中性子ビームラインからの中性子は，中性子ビームライン内に設置されるビームシャッターによって，遮蔽される。ここではビームシャッターの方式ついて概観しその中で最も適当であると考えられる円盤回転型の構造概念について検討を行う。

押しつぶし型（KENS タイプ）

本方式は「高エネルギー研究所中性子散乱施設（KENS）」において用いられている方式であり，シャッターを中性子ビームライン内に単に降ろすことによって遮蔽を行う。本方式の概念図を Fig.5.3.13.1 に示す。この方式のシャッターには以下の特徴がある。

「閉」の位置の時に中性子ビームライン周辺にボイド空間が出来ない。
単純な上下機構を考えればよいので，作成・調整等は容易である。
シャッタ「閉」時に生じる上方のボイド空間はかなり上方に出来るため実質的な遮蔽欠損にならない。

インナーコリメータやガイドをシャッター部分に入れることは不可能である。

パイプ上下型（IPNS Upgrade タイプ）

本方式は米国 Argonnne National Laboratory(ANL)にある「upgrading ANL's Intense Pulsed Neutron Source (IPNS Upgrade)」で検討されている方式である。シャッターの胴体内にパイプを設置し，「開」の位置では中性子ビームがパイプ内を通過するようにシャッターを上下させる。本方式の概念図を Fig.5.3.13.2 に示す。この方式のシャッターには以下の特徴がある。

インナコリメータやガイドをシャッター部分に挿入することが可能である。
単純な上下機構を考えればいいので，作成・調整は容易である。
内部にコリメータ等を入れた場合その位置の微調整を行う必要がある。
「閉」の位置でビームライン下にボイド空間が生じる。

円盤回転型（SNQ タイプ）

本方式はスイス Paul Scherrer Institute(PSI)にある「The spallation neutron source SINQ」で用いられている方式であり，円盤型のシャッターの胴体内にパイプを設置し，「開」の位置では中性子ビームがパイプ内を通過するようにシャッターを回転させる方式である。本方式には 1 個の円盤ではなく複数個の小型の円盤を連動させて回転させる方式（小型円盤連動回転型）がある。それぞれの概念図を Fig.5.3.13.3 及び Fig.5.3.13.4 に示す。この方式のシャッターには以下の特徴がある。

シャッターが閉じた位置でほとんどボイド空間が生じない。
インナコリメータやガイドをシャッター部分に挿入することが可能である。
回転機構であるから重力に逆らわず開閉できる。
駆動機構が故障したときに開いたままになる恐れがある。（上下機構では重力でシャッターを閉めることができる。）
機構が複雑になる恐れがある。

水銀注入型

本方式は中性子ビームラインに水銀を流し込む方式である。概念図を Fig.5.3.13.5 に示す。この方式のシャッターには以下の特徴がある。

機械的な駆動機構を必要としない。
水銀の中性子遮蔽能力は良くない。
毒性の高い液体を取り扱う必要がある。
密度が高いため中性子ビームラインの支持が困難である。
大量の水銀が必要となる。

機械的なシャッターの場合、材料としては「炭素鋼または重コンクリート：ANL IPNS Upgrade」や「炭素鋼＋コンクリート：「ISIS」等が使われている。そのため必然的に相当な重量となる。また、遮蔽の観点からは周辺の遮蔽体や中性子ビームライン内にボイド空間が発生しない方が望ましい。従って、重力に逆らわず開閉できボイド空間が発生しない「円盤回転型」が最も適切であると考えられる。

構造概念

方式として「円盤回転型」の内，１個のシャッターの重量が軽くて済む「小型円盤連動回転型」を採用する。構造を決める上で、前提条件にもとづいて検討した構造概念図をそれぞれ Fig.5.3.13.1~5 に示す。

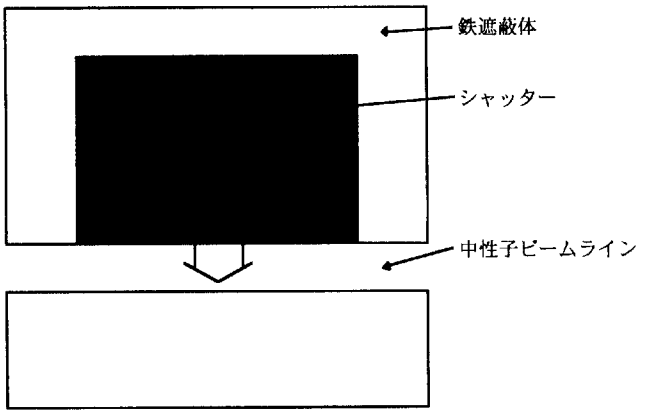


Fig.5.3.13.1　ビームシャッター概念図（押しつぶし型）

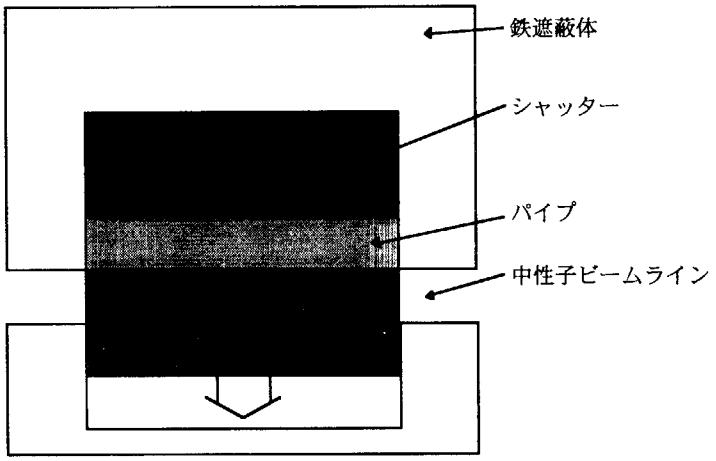


Fig.5.3.13.2　ビームシャッター概念図（パイプ上下型）

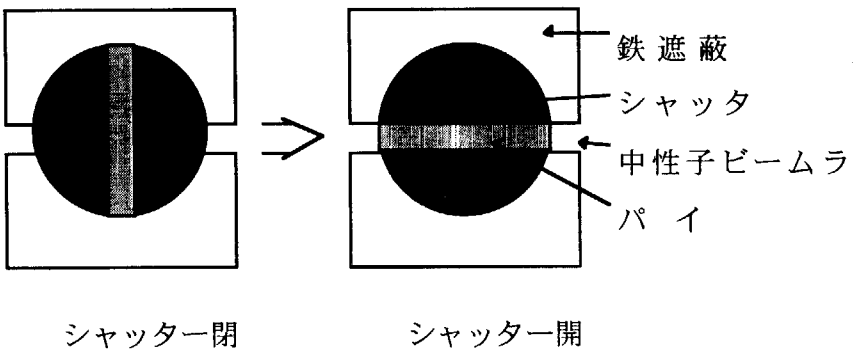


Fig.5.3.13.3　ビームシャッター概念図（円盤回転型）

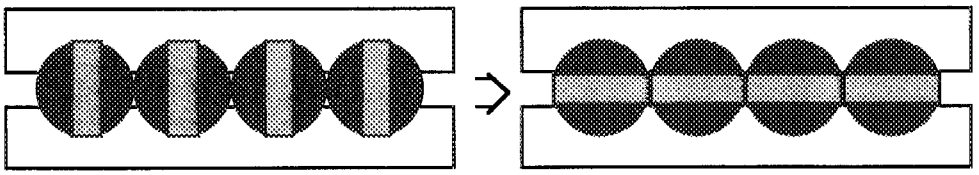


Fig.5.3.13.4　ビームシャッター概念図（小型円盤連動型）

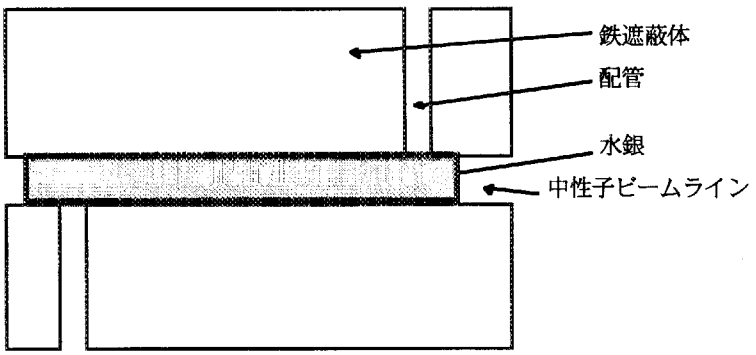


Fig.5.3.13.5　ビームシャッター概念図（水銀注入型）

（2）遮蔽性能評価

ビームシャッター部の遮蔽性能評価を、前節でコリメータの遮蔽評価を行ったのと同様に、2次元 Sn 計算を用いて行った。ビームシャッターはバルク遮蔽体の鉄遮蔽体部分のみを閉じるものである。したがって、鉄の部分の穴が塞がれた場合の線量当量を計算し、バルク遮蔽による線量当量減衰と比較した。

コリメータ（長さ５ｍ）後端での、計算された遮蔽体内側からの線量当量減衰は約１２桁であり、コンクリート厚にして約１ｍ程度の追加射影をビームシャッターが閉じた時にコリメータ（長さ５ｍとする）の後ろに施せば、バルク遮蔽部の線量と同程度になる。

５．３．１２　高エネルギー核破砕中性子ビームのコリメータ特性の検討

（1）目的

中性子核物理実験施では、飛行時間法を基本測定技術として多様な高エネルギー中性子核反応に関する実験を行う。実験施設の設計では、核破砕ターゲット系と共に中性子コリメータの特性評価が重要である。飛行時間法では時間原点となるターゲットでの発生源中性子のスペクトルが

測定場所まで保存されることが極めて重要である。しかしながら、ターゲット遮蔽体に組み込まれる１次コリメーター、飛行中の２次コリメータ、測定場所に入射する唖置での３次コリメーターなどとの散乱・吸収などの中性子相互作用により入射スペクトルと飛行時間との相関が失われることがある。従って、極力源中性子スペクトルが保存され、中間コリメーター物質・材料による擾乱を押さえて、かつ、バックグラウンドの低いよく制限された入射中性子ビームを実現するために、想定される条件での中性子コリメータ特性を詳細に検討し、設計に反映させることが必要である。

本検討では、これまでの中性子核物理実験施設検討で得られた核破砕源中性子特性とターゲットステーション構造を踏まえて、中性子コリメーターの構造の最適化、飛行中性子ビーム特性、測定位置での入射中性子特性等について詳細な検討を行うことを目的とする。

（２）検討内容

これまで検討した中性子核物理実験の核破砕中性子ターゲットステーションの概念をもとに、ここで検討する中性子飛行管及び測定室の概念配置を Fig.5.3.14 にコリーメータの構成とともに示す。本検討では、ターゲットステーションで発生した高エネルギー核破砕中性子が測定室に至るまでに飛行間中に設けられた各コリーメータを通過して行く過程における中性子スペクトルの変化、散乱線の影響を定量的に計算し、実設計における最適化のためのベースを系統的に評価する。

２－１）検討対象

中性子核物理研究施設（NPF)では、最大 1.5 GeV, 100 μA の陽子ビームをタンタル等のターゲットに入射させて生じる核破砕中性子を利用して、GeV 領域から MeV 領域までの中性子核反応断面積を測定する施設である。ターゲットを中心とした 10 m~100 m の長さの中性子飛行管を複数有し、コリメートされた中性子ビームを用いて飛行時間法（TOF）により対象とするエネルギーを取り出し、標的核との反応により発生する粒子、放射線を測定し断面積を求める。従って、NPF における中性子コリメーターの性能評価は極めて重要である。また、この施設では最大出力 150 kW の大出力ターゲット核破砕中性子源でもあり、中性子飛行管はその遮蔽欠損ともなる。従って、コリメーターを含む中性子ビーム飛行管の設計は遮蔽及び周辺環境放射線安全性の観点から高い評価精度が要求される。

コリメーターには、ターゲット及びその遮蔽体からなるターゲットステーションコリメーター、中性子飛行管、中間コリメーター、及び、標的物質及び測定機器が設置される測定ステーションでの最終コリメーターがある。（Fig.5.3.14）参照

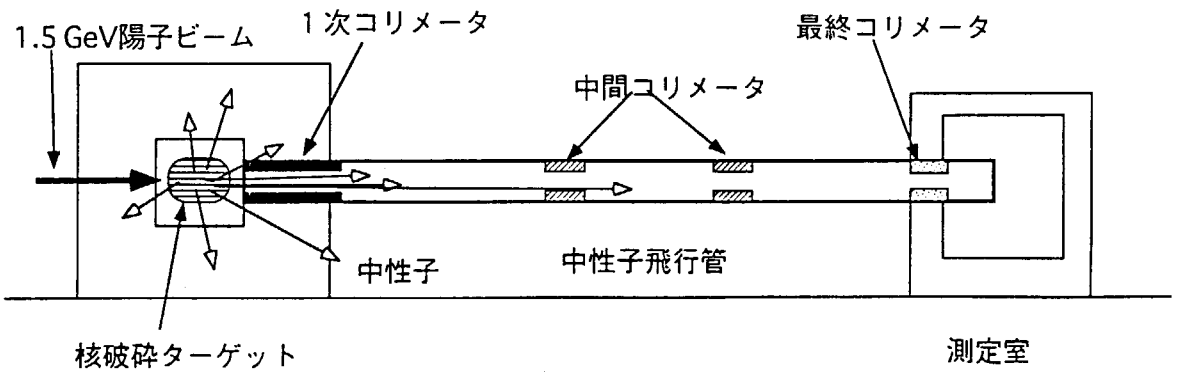


Fig.5.3.14　中性子飛行管、コリーメータの構成及び測定室の概念配置

2－2）ターゲットステーションコリメーター

ターゲットステーションのコリメーターは、中性子飛行管による遮蔽体の欠損を補うことが主な役割である。コリメーターのターゲットからの距離は、ターゲットステーションの外径程度(10m) である。

2－3）中性子ビームライン中間のコリメーター

長い飛行管には、中性子ビームライン中間にコリメーターが設置され、最終コリメーターに入射する中性子ビームプロファイルを整える。

（3）計算条件

3－1）計算コード

入射中性子ビームエネルギー範囲により、以下の2種類の方法を用いて中性子輸送計算を行った。

入射中性子エネルギー	計算方法	計算コード、中性子断面積
~400 MeV	2次元 Sn 法	DORT(1), HIRO-86R(2)
20~1500MeV	モンテカルロ法	HERMES(3)

HERMES コードシステムでは、20MeV 以上の中性子輸送計算に核内カスケードコード HETC-KFA2 を、減速の結果生ずる 20MeV 以下の中性子及び2次ガンマ線の計算に MORSE-CG コードを用いた用いた。なお、MORS-CG の計算では多群断面積ライブラリーとして、HIRO-86R を用いた。
いずれの計算でも、20MeV 以下の中性子の非弾性散乱や捕獲反応で生じる2次γ線についても、中性子ーγ線結合計算により評価した。

3－2）計算モデル

コリメーターを2次元RZ形状モデルで表して一般化し、下記の量をパラメーターとした計算を行うことにより、ターゲットステーション、中性子ビームライン、測定ステーションに設置されるコリメーターのコリメーション性能及び遮蔽性能を同時に評価する。

・口径 (ID)　　：50mm, 100mm, 200mm
・外径 (OD)　　：600mm
・長さ (L)　　：500mm, 1000mm, 1500mm

HERMES コードを用いたモンテカルロ計算では、計算時間の制約により、長さについては、1500mm の場合についての計算を行い、入り口から 500mm, 1000mm のコリメーター出口の線束を近似した。
Sn 計算では、各長さのコリメーターをそれぞれモデル化し、コリメーター外側の 1cm 厚も空気中での中性子束・ガンマ線束を用いて線量等量率を評価した。

3－3）材質

コリメーターの材質は、鉄またはポリエチレンの単一層とした。コリメーション性能（反射成分）に関しては単一層でも十分に評価可能である。コリメーション性能と遮蔽性能を両立させるための多重層コリメーターに関しては、単一層の遮蔽計算結果を重ね合わせて評価する。

3－4）線源

コリメーターの外径 600mm に対して、ターゲットからのコリメーター開口部までの距離は最短（ターゲットステーションコリメーター）で約 10m、最長でも 100m である。従って、ビームとコリメーター中心軸とのなす角度は最大でも tan-1(0.6m/10m)=3.4° にしかならない。この線源ビーム広がりを Sn 法で表すには、S30 分点相当の非常に詳細な角度分点が必要である。また、HETC では散乱角 5° 以内程度の前方散乱は、Pauli-blocking により精度良く取り扱うことは難しい。これらの使用する計算コードの精度を考慮すると、線源モデルでビームの広がりを考えても、コリメーター出口の線束分布に有意な影響は与えないと考えられる。すなわち、現実的に、コリメーター入射底面には一様・平行なビームが入射していると考えることができる。このため、線源条件はコリメーター底面に一様・平行なビームが入射しているとして取り扱った。線源中性子エネルギーは、1, 10, 20, 100, 400, 1500MeV の 5 点とした。

3－5）計算のケース

（1）2次元 Sn 法(DORT+HIRO-86R)

パラメーター	量	ケース数
中性子エネルギー	1, 10, 20, 100, 400 MeV	5
材質	鉄、ポリエチレン	2
コリメーター内径	50, 100, 200 mm	3
コリメーター長さ	500,100, 1500 mm	3

（2）モンテカルロ法(HERMES)

パラメーター	量	ケース数
中性子エネルギー	100, 400, 1500 MeV	3
材質	鉄、ポリエチレン	2
コリメーター内径	50, 100, 200 mm	3
コリメーター長さ	1500 mm	1

3－6）計算詳細条件

3－6－1）2次元 Sn 法

（1）角度分点と散乱角展開次数

長さ 1500mm、開口部半径 50mm のコリメーターの場合、コリメーター入り口から出口を見込む角度は、わずかに 1.9°(cosq = 0.99945)である。従って、コリメーター入り口の中心から見

て、コリメーター内に少なくとも１本以上の角度分点が入ることを条件として、上方にバイアスした S315 分点（上方 280 分点=S56、下方 35 分点=S10）を用いた。散乱角展開次数は HIRO-86R に含まれる散乱マトリックスの最大(P5)とした。

（２）収束精度

各メッシュ点のスカラー束で 1%以内とした。

３－６－２）モンテカルロ法

（１）入射中性子数（ヒストリー）

HERMES を用いたモンテカルロ計算では、入射中性子数（ヒストリー数）を以下の通りとした。

エネルギー領域	ヒストリー数
20MeV 以上	１００万
20MeV 以下	１０万

（ただし、ポリエチレンでは２０万）

20 MeV 以下の計算(MORSE)で HETC のヒストリーが少ないのは、MORSE の線源となる中性子が、核反応により入射中性子当たり１０個程度生成されるため、1/10 のヒストリー数でも 20 MeV 以上と同等の統計が得られるためである。

なお、ポリエチレンからの核破砕中性子発生はコンクリート及び鉄に比べて少ない。このため、MORSE の計算での統計精度を上げるように、入射中性子数（ヒストリー）が倍になるようにした。このとき、1500 mm 長さのコリメーター出口の中性子束に対する統計誤差(FSD)は、概ね以下の程度であった。

入射中性子エネルギー	エネルギー領域	FSD
1500 MeV	100 MeV<E<1.5 GeV	1~7 %
	20 MeV<E<100 MeV	7~10%
	E<20 MeV	数十%
400 MeV	100 MeV<E<40 0MeV	1~10 %
	20 MeV<E<100 MeV	7~20 %
	E<20 MeV	>50 %
100 MeV	100 MeV	2~3 %
	20 MeV<E<100 MeV	10~20%
	E<20 MeV	>50 %

コリメーター出口では直視成分がほとんどを占めるため、MORSE で計算する範囲まで減速される中性子の数は少なく、統計誤差が大きくなっている。コリメーター側面では数 10 keV のエネルギーまで、中性子束の統計誤差は 10 %以内である。

（２）中性子カットオフエネルギー

HETC で核内カスケードモデルで計算する中性子エネルギーの下限は 20 MeV とした。

MORSE で計算する中性子エネルギーの下限（カットオフ）は特に設けず、熱群(10-5 eV~0.414 eV)まで減速された中性子を計算しているが、計算時間の制約から、10 keV 以下に減速された中性子はほとんど計数されていない。

（4）計算結果及び検討

4－1）遮蔽性能の評価

コリメーター入り口と外面での中性子及び2次γ線による線量等量率の比を計算し、コリメーターの遮蔽性能を評価した。

4－1－1）線量等量率換算係数

DORT あるいは HERMES により計算されたコリメーター出口の線束分布に以下の線量等量率変換係数を乗じて、線量等裏量率分布を求めた。

（1）中性子

中性子エネルギー 20 MeV までは ICRP51 に掲載されている 1cm 深部線量等量を用いた。20MeV 以上については半無限平板ファントムでの最大線量当量を、エネルギー群の上限エネルギーについて内外挿して用いた。

（2）光子

HIRO-86R では2次ガンマ線のエネルギーは、最大 20MeV である。10 MeV 以下のエネルギー範囲の光子については、ICRP51 に掲載されている 1 cm 深部線量等量を、エネルギー群の上限エネルギーについて内外挿して用いた。また、10~20 MeV のエネルギー範囲については、半無限平板ファントムでの最大線量等量を用いた。

4－2）コリメーション性能の評価

4－2－1）エネルギースペクトル

コリメーター開口部での中性子スペクトルを、コリメーター材質、開口部の径及びコリメーター長さ毎に、入射中性子エネルギーをパラメーターとして求めた。

4－2－2）コリメーション性能

入射中性子エネルギー毎の、コリメーター開口部と周辺部での中性子束の比の分布をた中性子束は、コリメーター出口蔓での入射中性子エネルギーと同じ群の中性子の入射中性子束に対する比として検討した。なお、モンテカルロ法計算では、透過成分の計算に十分な統計精度が得られなかったため、ここでは Sn 法による計算結果（入射エネルギー 400 MeV 以下）のみを評価した。

20 MeV 以上の中性子に対しては、鉄のコリメーター性能が最も優れている。10 MeV では鉄とコンクリートはほぼ同等であり、1MeV ではポリエチレンが最も有効である。10 MeV の鉄及びコンクリート、1 MeV のポリエチレンでは、コリメーターの長さが 100 cm から 150 cm に伸びても、ほとんど周辺部の中性子束は変わらなくなることが明らかとなった。

5．3．13　施設統合概念検討

これまでの施設検討結果に基づいて、ターゲットステーションのレイアウトをさらに現実的な付属設備も含めて検討した。以下に、主要な仕様項目を示す。

（1）ターゲット仕様（形状、大きさ、電流強度、冷却等）

材料：タンタル（タングステン）

形状：円柱（ペンシル型：30 mm 直径、120 mm 長さ）

電流：最大 100 μA

冷却：水令

（2）ターゲット室仕様（床面積、高さ、遮蔽扉、迷路、クレーン等）

地上１階（ターゲット部、遮蔽体、ビームダンプ、最終偏向磁石
クリアリング磁石、コリメータ、ビームシヤッター）

建て屋床面積：50 m^2（外壁での投影で 100 m^2）

ターゲット部：3 x 3 x 4 m^3

ターゲットアクセスホール　1.5 m 直径

地下１階（ターゲット操作、メインテナンス、保管）

床面積：操作ホール：200 m^2

：保管庫　　：20 m^2

（3）実験項目：中性子飛行時間法による各種中性子核断面積測定
（前方に関しては Li ターゲットによる準単色中性子源も考慮）

（4）実験のためのスペース、設備仕様

TOF 測定ステーション　　（10、45、90 度）（20 m、50 m、100 m）

クレーン（2.9 トン）

広さ（各 50 m^2）

信号ケーブルラック、信号・通信ケーブル

TOF 飛行管、中性子束モニター

（5）保守のための設備（保守の方法、実験のアクセス）

ターゲット遠隔操作、保管庫

（6）廃棄物の種類

中性子発生核破砕ターゲット、陽子入射窓材料（定期的交換）

（7）保管設備（使用済みターゲット、燃料等）

使用済み個体ターゲット保管庫

標準線源保管庫（測定ステーション）

核分裂物質検出器保管庫

（8）ユーティリティ（電源負荷、冷却水等）

・　　ビームシャッター駆動

・クリアリングマグネット（各中性子飛行管について）

・最終偏極マグネット

・可動遮蔽体（必要であれば設置）

・ターゲット架台自動遠隔装置

・使用済みターゲット格納遠隔装置

・水冷用ポンプ

・給排気設備

・クレーン

・天井隔壁自動開閉装置

・陽子ビームモニター

・中性子発生モニター
・TV監視カメラ
・一般照明、電話
・ビームダンプ（水冷却）

（9）その他

中性子飛行管真空排気系
中性子測定ステーションの実験機器基本設備（電源、ラック）
信号ケーブル敷設
モニター系

以下に、中性子核物理実験施設の構造・配置に関する案として現在検討されている2例をFig.5.3.15.1～5.3.15.3及びFig.5.3.15.4～5.3.15.6に示す。

これ等の案は平行して検討を進めている消滅処理研究用炉物理実験施設との統合を基調として検討されたものである。従って、両施設で共通なユーティリティー等が最適になるような配置として構成されている。今後は、中性子科学研究計画の中で主要施設と整合性を取りつつ、更に詳細を検討し、施設の実現に向けて努力が必要である。

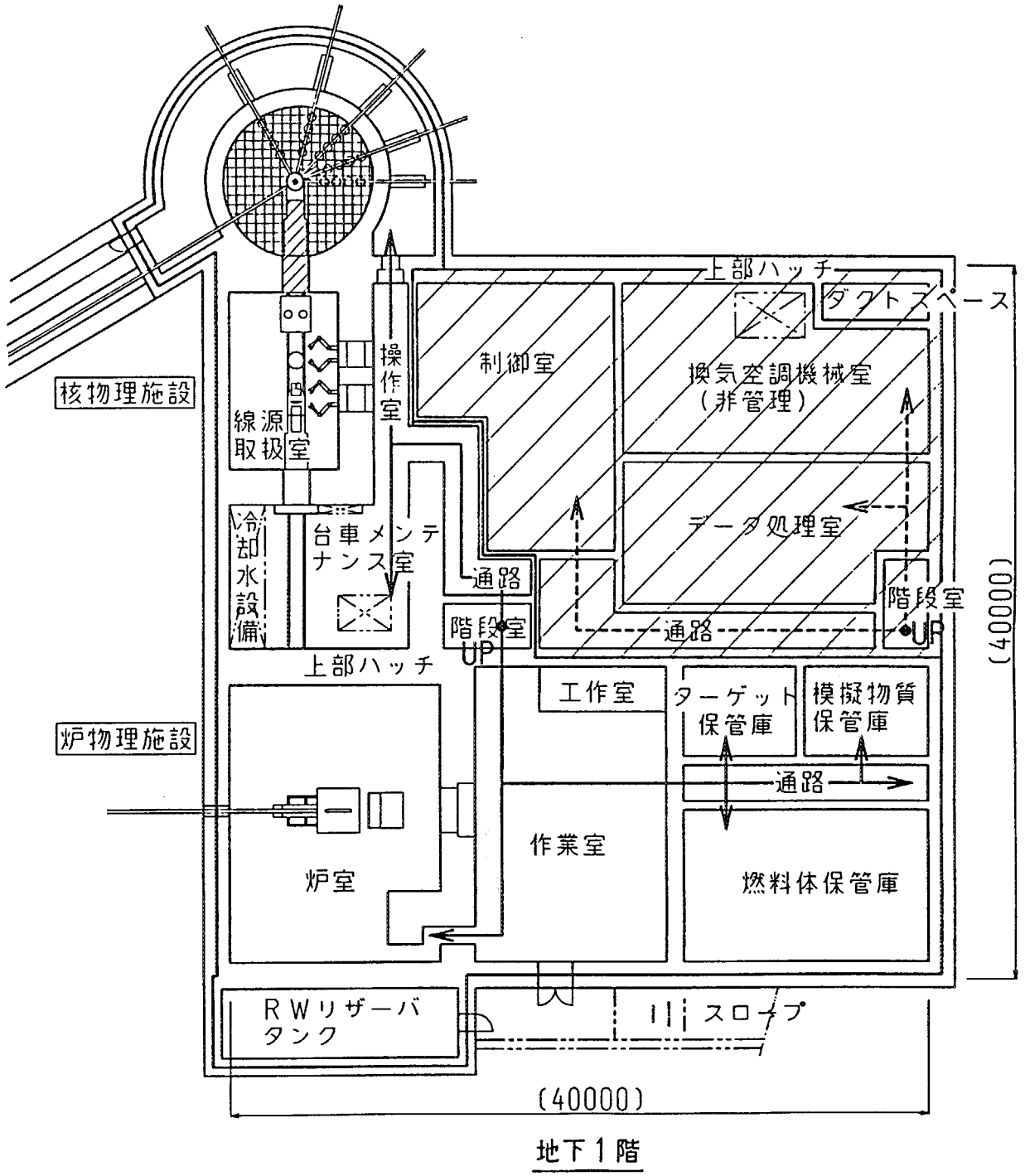


Fig.5.3.15.1 検討例1：（ターゲットステーション及び1階部の平面図）

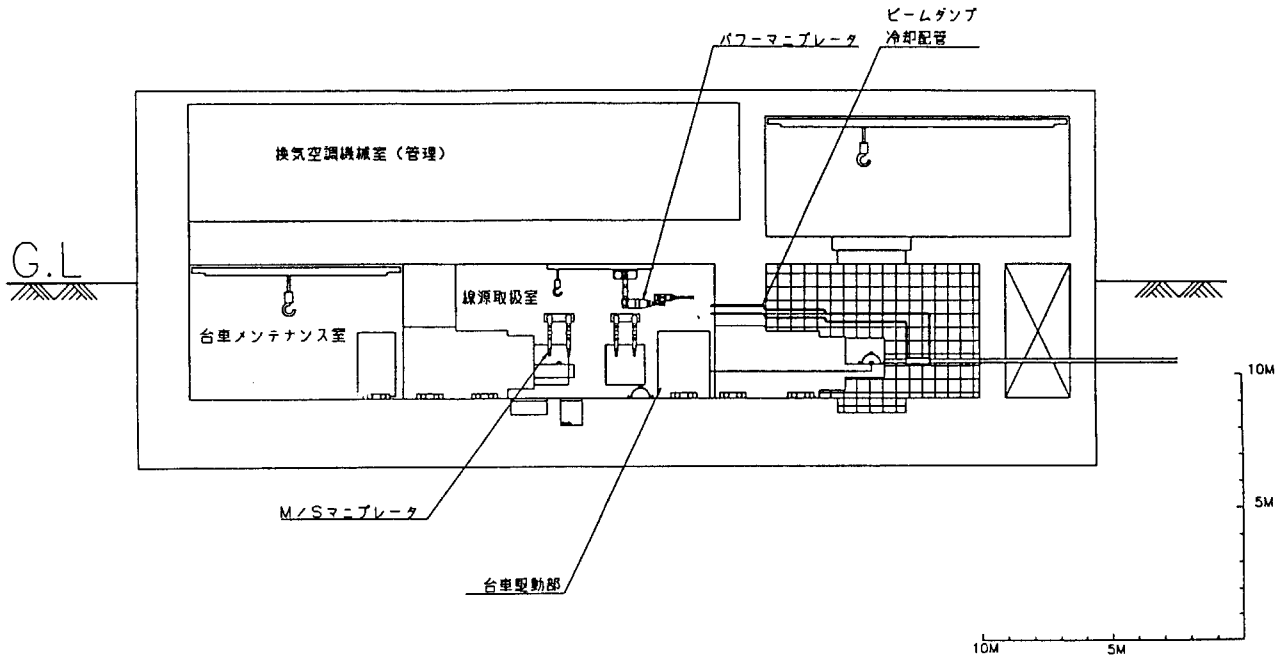


Fig.5.3.15.2　検討例１：（ターゲットステーションを含む垂直断面図）

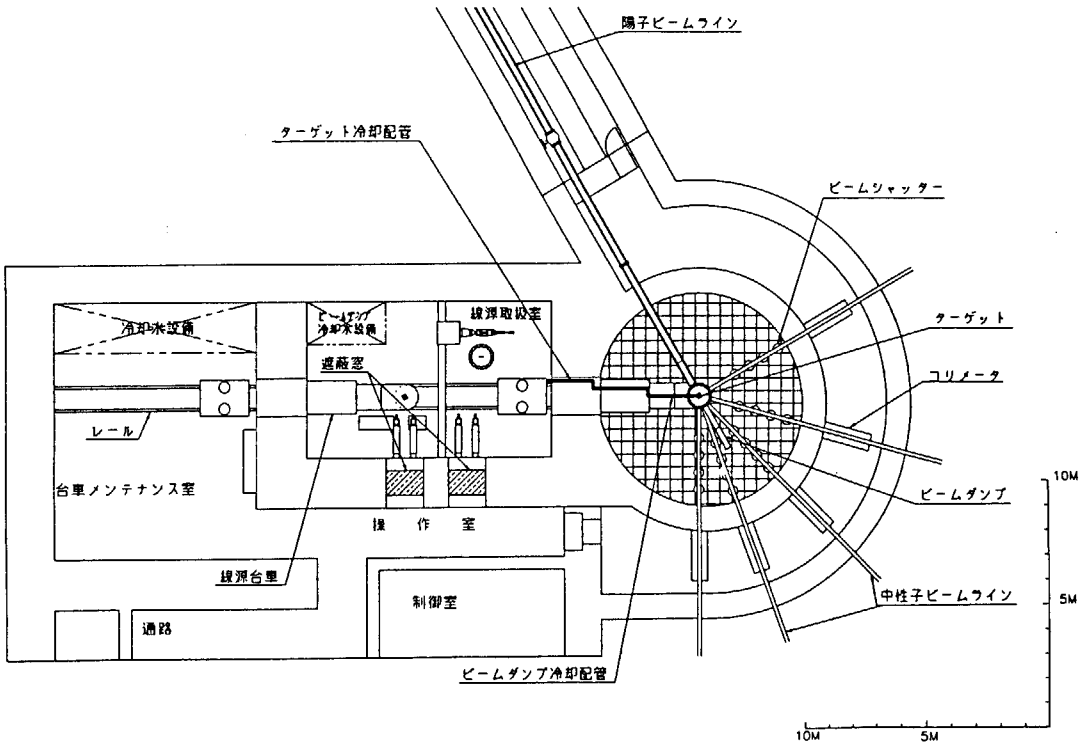


Fig.5.3.15.3　検討例１：（ターゲットステーションの拡大平面図、ターゲットハンドリング機構）

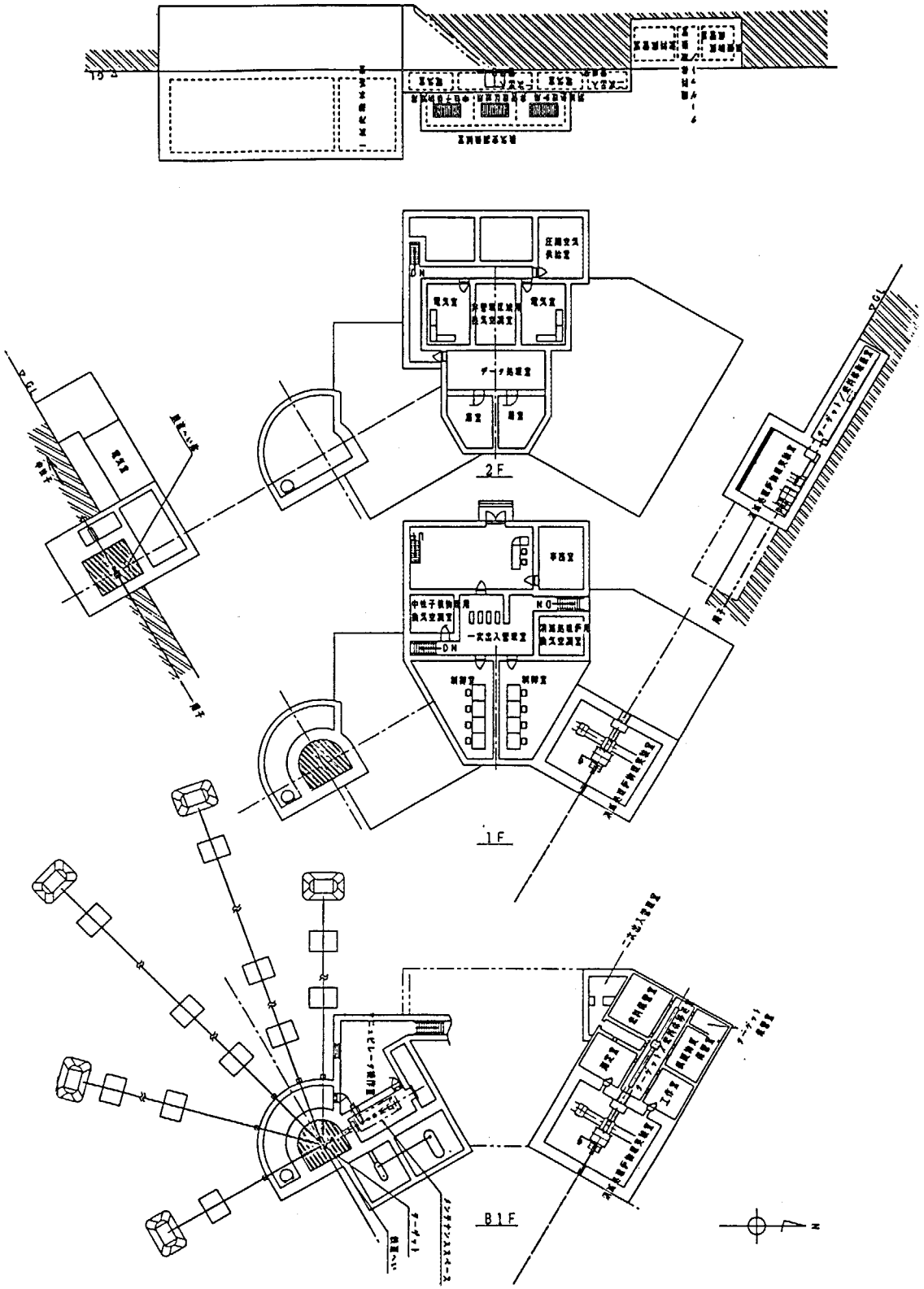


Fig.5.3.15.4　検討例２：（全体配置構成図）

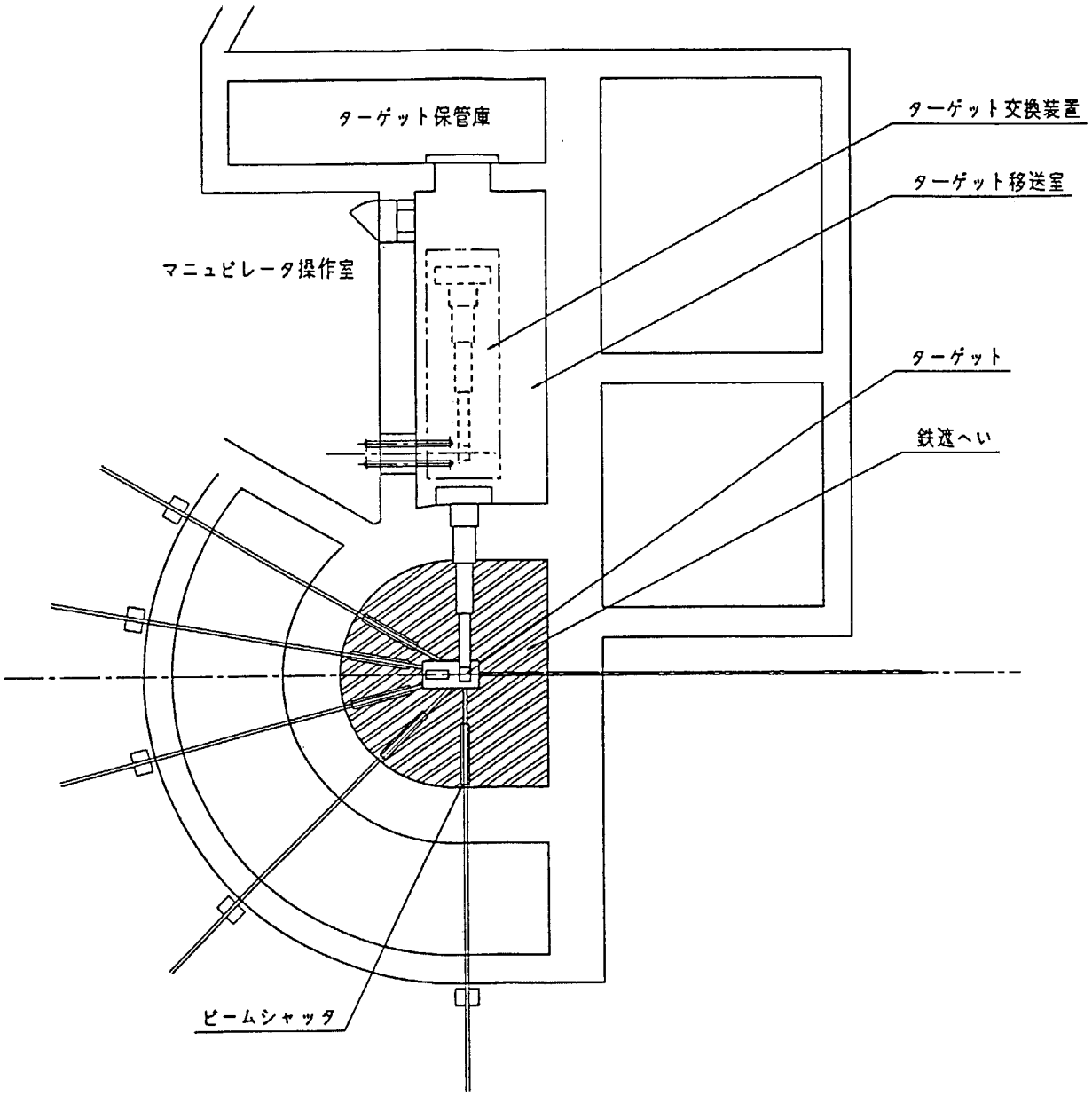


Fig.5.3.15.5　検討例２：（ターゲットステーション拡大平面図）

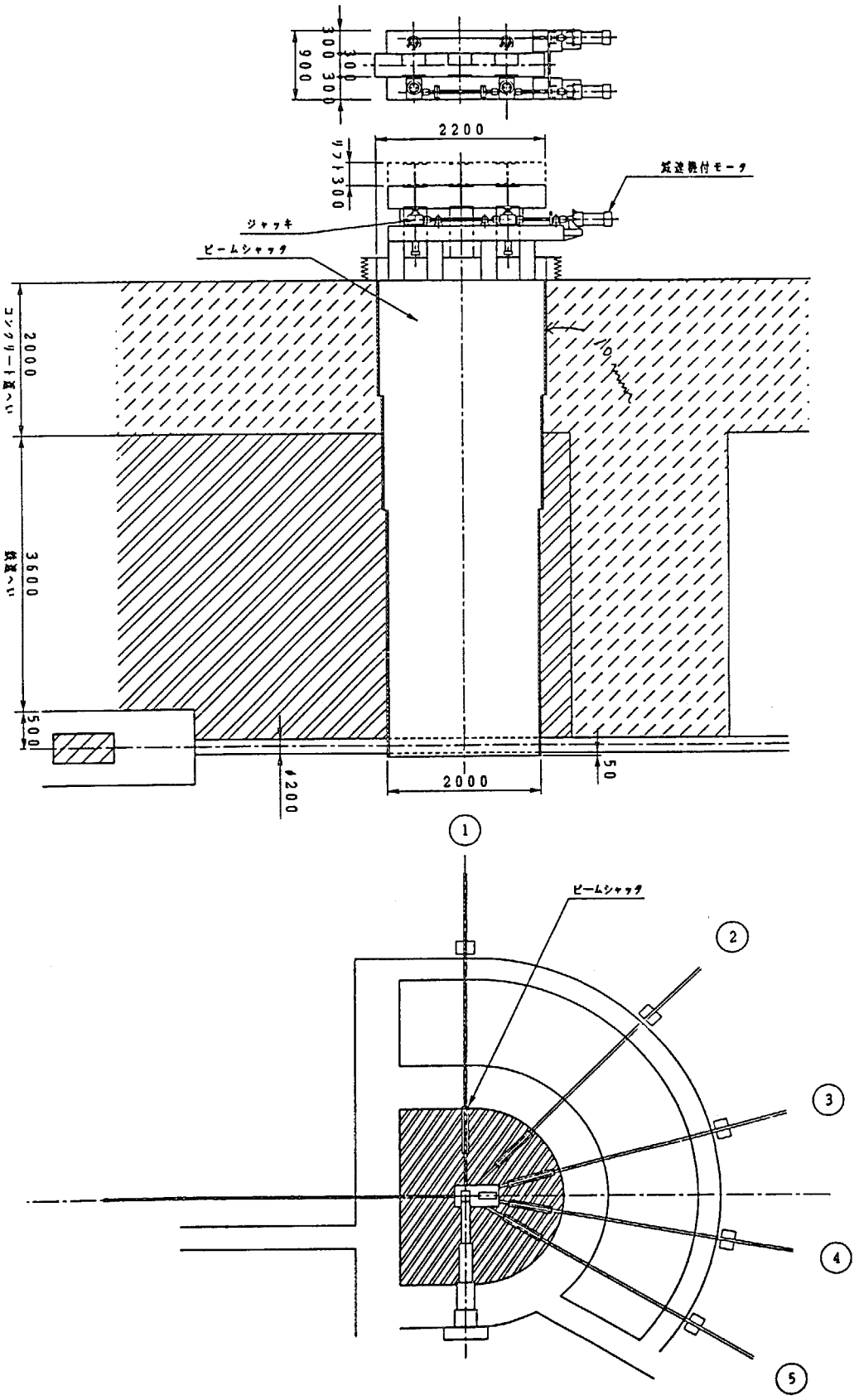


Fig.5.3.15.6　検討例２：（ビームシャッターとステーション配置）

5．4　消滅処理炉物理実験施設

5．4．1　はじめに

原子炉燃料再処理に伴って生み出される放射性廃棄物のうち、超長期に渡って有害無用の物質は原子炉もしくは加速器駆動炉を利用して消滅させることが、後の世代に対してマイナスの財産を残さないために望ましい。ＴＲＵを消滅させるのに原子炉がよいか加速器駆動炉がよいかの議論はシステムの成立性、経済性、安全性等の検討から総合的に判断されねばならない。本章では、加速器を利用してＴＲＵを消滅させるシステムを実現させることを目指した研究開発のうち、炉物理に関する実験を行う施設についてこれまでに行った検討の結果を記述する。

5．4．2　消滅処理に関する炉物理研究開発課題

（1）炉物理全体の問題

加速器利用ＴＲＵ消滅処理を実現するためには、一般の安全上重要な工学プラントの場合と同様に、まず第１に基盤研究開発が不可欠である。また、これらの研究開発の成果を総合化して組み上げた小規模から大規模までのモックアップ実験施設の運転によってシステムの成立性を検証することが求められる。加速器利用ＴＲＵ消滅処理システムの炉物理設計のための研究開発には次のような課題がある。

1）核データ・高エネルギー核反応

中・高エネルギー粒子の核反応、輸送に関しての実験を行い、粒子輸送計算コードを整備すること、並びに、消滅処理炉心のマイナーアクチナイド燃料や材料に関して、広範囲のエネルギー領域での核データを整備することが課題となる。

2）炉物理

炉心の出力分布、反応度、反応度温度係数、ＴＲＵ消滅率等の炉物理特性について合理的な設計を行うことが必要であり、設計・解析コードの計算精度を評価・検証することが必要である。

出力分布に関しては、一般に燃料体を始めとする原子炉構造体に過大な温度、応力、材料損傷が生じないようにという配慮から適正な設計が要求されるが、核分裂連鎖反応によって比較的穏やかな出力分布を自分で保つことのできる原子炉と違って、核破砕中性子源で駆動される未臨界炉心では出力分布が高いピーキングを起こすが、これを正確に予測できる技術が確立しているとはいえない。反応度に関しては、高い燃焼度が採れること、臨界事故を防止できること、所定の陽子ビーム強度によって炉の定格出力が得られること、長期間の運転を行う上で加速器ビーム強度の大幅な調整が要らないこと等の要求があり、このため、正確に反応度を予測できるとともにその反応度が燃焼に伴って極力変化しない燃料組成、炉心構成を決めることが課題となる。

本章ではこれらの炉物理的課題の解決に寄与する炉物理実験に絞って記述する。

（2）炉物理実験の必要性

消滅処理実験炉の核的特性の予測技術を確立するため、未臨界体系と適当な外部中性子源を用いて以下のような項目について炉物理実験を実施する必要がある。

1）反応度予測精度の検証

消滅処理実験炉では大きなビーム導入管ボイドや大きくて複雑な構造のターゲットが存在すること、材料に関してもこれまでの原子炉では経験の乏しいものがあること、また、かなり大きな臨界未満度で運転される。このため、反応度予測精度が十分に高いとはいえないので計画した強度の陽子ビームでは不足であったり、強すぎて入射できなくなる恐れがある。また、ターゲットや冷却材の反応度効果も正確に評価しないとターゲット交換時の安全性が確保できない。したがって、消滅処理実験炉の設計で採り入れられている材料、構造をモックアップした体系を構成して反応度予測精度を検証することが必要である。反応度は中性子源の有無に依存しない物理量であるからこの項目に関しては FCA を用いて実験することができる。

2）出力及び出力分布の予測精度の検証

消滅処理炉心の熱出力は臨界未満度または実効増倍係数(keff)と陽子入射率と中性子源スペクトル S(E, θ, r)によって決まる。後者は陽子1個あたりに生まれる中性子のエネルギー、角度、位置をパラメータとする複雑な分布関数であり、陽子エネルギーとターゲット材料・構造によって決まる。また、陽子ビームは数十センチ直径の広がりをもって入射されるから、入射ポイントにも依存する。S(E, θ, r)を精度良く求めることはモンテカルロ計算によっても容易ではない。陽子ビームを十分な厚さのターゲットに入射する核破砕実験によってこれを詳しく測定することは原理的には可能であるが、ターゲットで生まれた中性子は数百 MeV にも及ぶ高いエネルギー成分が含まれているし、非等方性をも含めて精度の高いデータを得ることは容易ではない。したがって、実際的にはターゲット表面に放射化試料を置いて中性子の反応率を調べたり、単純構成の炉心(積分)の中に対象とするターゲットを置き、陽子を入射して体系中での中性子束分布を測定することによってS(E, θ, r)を積分的に評価することが最も信頼性が高い。

消滅処理実験炉は高い未臨界状態で運転され、大型ボイド、局在ソース、局在中性子吸収をもつので、出力分布を正確に予測できることを検証することが必要である。このためには、詳細モックアップ炉心と核破砕中性子源を用いた実験が最も信頼性が高い。D-T 反応による 14 MeV 中性子源や Cf 中性子源を用いた実験では十分ではない。

3）漏洩中性子数の予測精度の検証

消滅処理実験炉の遮蔽設計のためには炉外に漏洩する放射線、特に高速中性子成分の評価が重要である。ターゲット中性子のうち高エネルギー部分の漏洩は遠地点での線量当量に寄与するので少量といえども確認が必要なのである。陽子ビーム入射部の大きなボイドからのストリーミングも正確に評価できなくてはならない。炉物理実験装置を使って遮蔽設計に使う線源項の評価精度を確認することができる。

4）パルスビーム、ランプビームに対する応答性の予測精度の検証

原研が開発する陽子加速器による消滅処理実験炉の駆動は、少なくとも当初はパルスビ

ーム入射によることが避けられない条件であり、高エネルギー成分を含む中性子のパルス照射を受けるシステムの安全性確保のため、早い過渡変化と空間高調波を伴う分布についての知見に基づいて実験炉構造の健全性を評価することが必要であり、この項目は実験炉詳細設計までに実施したい。FCA で短パルスの 14 MeV 中性子を投入する実験を行えば概念設計段階で役立つデータが得られるだろう。しかし、詳細設計検証用としてはやはり核破砕中性子源による実験データが要求される。このほか、は測定できない。比較的強いパルスビームを炉物理実験施設に投入すれば NUCEF の TRACY 並みに特別の冷却材ループを備えなくても燃料体固有の安全性まで試験することができる。

5）消滅処理特性の研究

この項目は実験炉の安全性には必ずしも直接に関係しないが、本来の研究開発目的である。中性子スペクトルと核分裂断面積が正確に分かっていない場合、消滅処理特性は着目する各種試料の反応率測定等によって検証することができる。核破砕中性子源を用いた炉物理実験施設での実験データが消滅処理特性の評価精度を担保する。実験項目としては、スペクトルインデックス、構造物の反応度価値、ウラン、プルトニウムサンプルのドプラー効果、マイナアクチナイド試料等の反応率、実効増倍係数、実効遅発中性子分率、冷却材ボイド係数、燃料溶融時の反応度変化、溶融塩燃料炉の燃料流動効果を含めた動特性等が挙げられる。

6）ハイブリッドシステムとしての運転の信頼性検証

消滅処理プラントの実用化に期待される加速器の信頼性は他の中性子科学研究目的の場合に比べて格段に高い。これはハイブリッドシステムとして大きな熱出力、大きな放射能インベントリー、高温等の厳しい条件で運転されるとともにコストパーフォーマンスの高さが要求されるからである。このような工学技術実証は本来、実験炉の目的である。炉物理実験装置と加速器を組み合わせたハイブリッドでも運転経験は有用である。将来は、実験炉を運転する前に加速器と原子炉プラントシミュレータとのハイブリッドでの運転経験も価値があろう。

以上の項目には属さないが、十分な炉物理実験の経験を通じて、炉心に与えるべき実効増倍係数が何処まで高くできるかをステップバイステップで追求して行くことができるので、この成果は、将来の消滅処理プラントにおける加速器の仕様に対する要求を下げ、経済性を向上することに資することができる。

5．4．3　炉物理実験装置の概念

Fig. 5.4.1 に装置全体の鳥瞰切開図を示す。

（1）集合体本体 (Fig. 5.4.2)

集合体は正方マトリクス管を積層して鋼製の固定枠で支持した構造とする。マトリクス管の中には燃料板、構造材模擬板、冷却材模擬板、反射体板等を装填したドロワが挿入される。集合体外形は正方断面直方体である。原則的には中央の４本または９本のマトリクス管は陽子ビーム入射ターゲットに用いられ、その外側は燃料体ドロワを装荷して炉心に、炉心の外側は反射体に使

われる。燃料体領域の一部は安全棒挿入に用いられる。

集合体寸法	高さ	1.8 m
	巾	1.8 m
	長さ	1.8 m

1）炉心

① 構造

燃料板、冷却材模擬板及び構造材模擬板等を装填したドロワをマトリクス管の中に装荷して炉心を構成する。装荷配置は実験計画によって変更できる。

② 燃料体の最大挿入量　3,500kg UO_2　620 kg ^{235}U

③ 主要な核的制限値

最大実効増倍係数	0.98
安全棒による停止時の実効増倍係数	0.95 以下

④ 主要な熱的制限値

最高熱出力　200 W（毎秒 200 ジュール）

2）燃料体（Fig. 5.4.3）

燃料材の種類	UO_2
形状	板状(燃料板)
	一辺 50 mm 正方形、厚さ 5 mm
ウラン濃縮度	20 wt%
被覆材の種類	SiC または、 Al (過度な汚染を防止する構造)

3）反射体

ステンレス鋼

固定式反射体とドロワを利用した移動式反射体からなる。

4）放射線遮蔽体

普通コンクリート　厚さ 2 m

建屋の壁を兼ねる

5）陽子ビーム(Fig. 5.4.4)

陽子ビームは集合体前面からビーム入射管等を用いてターゲットに入射される。

陽子エネルギー	1.5 GeV(加速器の設計に合わせる)
ビーム強度	平均 5 nA
ビーム入射方向	水平
陽子ビーム入射管	加速器の末端部、ステンレス鋼製
陽子ビーム入射補助管	アルミニウム製封じ切り真空管
陽子ビーム調整装置	(加速器施設側に設置)

ビ - ムダンプ、ビーム切替え回路は別途検討する。

6）ターゲット(Fig. 5.4.5)

ターゲットはターゲット板、冷却材模擬板、構造材模擬板を装填したドロワをマトリクス管に装荷して構成する。

材料　W、Pb-Bi、$PbCl_2$-UCl_3、NaCl-UCl_3、その他（ターゲット板）
形状　板状
被覆材の種類　W板以外はステンレス鋼被覆

（2）核燃料物質の取扱い施設及び貯蔵施設(Fig. 5.4.6)

燃料ドロワ移動、交換装置　1式
燃料ドロワ保管棚　1式
燃料板保管容器　1式
貯蔵能力　620 kg ^{235}U

（3）計測制御系統施設

1）核計装　中性子電離箱系　3系統
2）ビーム計装　2系統
3）温度計装　5系統
4）安全保護回路　1式

① 緊急停止

次の条件のいずれかが起こった時、ビーム停止、安全棒引抜き及び警報吹鳴を行う

ビーム高
中性子高
炉室扉開放
遮蔽扉開放

② 警報装置

次の条件のいずれかが起こった時、ランプ表示及び警報吹鳴を行う。

ビーム高
中性子高
温度高
計装異常

③ 連動装置

ビーム入射インターロック

次のすべての条件を満たさないと陽子ビームを集合体に入射できない。

炉室扉及び遮蔽扉が閉鎖されていること
圧縮空気圧が正常であること（バイパスあり）
安全棒が4本とも挿入されていること（バイパスあり）
ターゲットの固定状態が良好であること
核計装の動作が良好であること（バイパスあり）
中性子計数率が基準値以上であること（バイパスあり）
放射線管理モニター動作が正常であること
安全棒の制御電源が正常であること

（バイパスあり）：集合体を使わず、ターゲット単体で実験する場合この条件をバイパスすることができる。

炉室入室インターロック

次のすべての条件を満たさないと炉室に入室できない。

陽子ビーム入射停止状態がロックされていること

放射線管理モニターの動作が正常であること

安全棒挿入インターロック

次のすべての条件を満たさないと安全棒を集合体に挿入できない。

陽子ビームの入射が停止されていること

圧縮空気圧が正常であること（バイパスあり）

核計装の動作が良好であること（バイパスあり）

中性子計数率が基準値以上であること（バイパスあり）

放射線管理モニター動作が正常であること

5）制御設備(Fig. 5.4.7)

安全棒装置		4式
吸収体／燃料ドロワ置換式		
駆動速度	挿入時間	200秒／1本
	引抜き時間	0.5秒以上
反応度制御能力		4本当たり3 %Δk/k以上

集合体前面には安全棒駆動機構取付け架構が設けられる。(Fig. 5.4.8)

（4）放射性廃棄物の廃棄施設

1）気体廃棄設備

排風機、エアフィルタ、排気口

2）液体廃棄設備

手洗い、配管、サンプピット、廃液貯槽(3 m^3 x 2基)

（5）放射線管理施設

屋内管理設備

エリアモニタ、ダストモニタ、ハンドフットモニタ、サーベイメータ

屋外管理設備

スタックダストモニタ、周辺監視設備

（6）格納施設

鉄筋コンクリート耐火構造

寸法　東西 40 m、南北 40 m、地下1階、地上1階

設計圧力　　大気圧
漏洩率　　特に気密構造にはしない
遮蔽構造　　常時人の立ち入る区域との境界は壁厚２ｍ
　　地下構造部の外壁は壁厚約 50 cm
建て屋内の室･設備配置を Fig. 5.4.9 から Fig. 5.4.12 に示す。

（７）その他の附属施設

定常中性子源装置　　Am-Be　3 Ci　　1 式
パルス中性子発生装置　　パルス巾１μs、繰返し周波数１kHz、中性子発生数
　　10^6 n/パルス、中性子エネルギー 14 MeV
検出器
検出器駆動装置
実験用集合体装荷物
　　冷却材模擬板（Na、Pb - Bi）
　　構造材模擬板（鉄合金）
　　MA、FP 模擬板、溶融塩模擬体
　　実験用試料（Pu、Th、U 等）

５．４．４　実験方法

実験は以下の手順によって実施する。なお、これらを詳細化した運転・実験手引きを運転開始までに作成する。

（１）実験計画立案
（２）炉心構成書と陽子ビーム利用計画ならびに核計算評価
（３）実験調整会議（実験担当者、加速器運転係、放射線管理係、電気・機械施設係）
（４）計測制御系を含む施設点検、校正
（５）炉心構成作業
（６）実験用計測系準備
（７）運転前点検
（８）運転・実験
（９）運転中点検
（１０）測定終了
（１１）加速器陽子ビーム入射終了
（１２）運転終了
（１３）停止後点検

５．４．５　施設構造図面の説明

Fig. 5.4.1　消滅処理炉物理実験装置鳥瞰切開図

装置は炉室中央床面に設置する。燃料板等を装填したドロワ及びターゲットのドロワは背面から専用の交換装置を使って集合体に装荷する。陽子ビームは前面から装置本体中央部のターゲットに入射する。前面には安全棒装置を設置して、作業時の安全性を高めている。また、必要に応じてターゲットを冷却する設備も前面から取り付けられる。実験によっては線量率が高い時に集合体に接近する必要があるので作業時の被曝を低減するために生体遮蔽体を利用する。

Fig. 5.4.2　集合体本体概略図

集合体は正方断面を持つマトリクス管を積層し、周囲を鋼製枠で固定した本体部と、その前方に設置された安全棒装置取付け架構部からなる。マトリクス管には燃料体、ターゲット、反射体のドロワを装荷して炉心・反射体を構成する。炉心は、床、壁、天井からの中性子反射の影響を受け難いようにこれらから距離を保たれる。

Fig. 5.4.3　集合体本体断面図

集合体は 33 行、33 列のマトリクス構造を持ち、燃料板、ナトリウム板、等を装填した燃料体ドロワ、ターゲットドロワ及び反射体ドロワを水平方向に挿入できる。炉心領域は燃料ドロワの数量／配置によって調節できる。安全棒の挿入位置は集合体の最大実効増倍係数が 0.95 以下に抑制できる場所とする。各ドロワは地震等によって位置がずれないように簡便な方法によって固定する。

Fig. 5.4.4　燃料体及びターゲットドロワ概念図

燃料体は燃料板とナトリウム板、構造材模擬板をドロワに装填して構成する。板の種類、枚数比率は実験目的によって変更する。燃料板は 20%濃縮ウラン酸化物及び窒化物の焼結体である。表面は放射能汚染、酸化を抑制するための被膜を施す。ターゲットも燃料体と同様にドロワを利用して組み立てる。ターゲット物質候補材であるタングステンは単体で板状に仕上げる。Pb-Bi 及び Pb はステンレス被覆管等に収納する。温度センサー付きの板もある。

Fig. 5.4.5　陽子ビーム入射方法概念図

直径 52 mm のステンレス鋼製ビーム入射管はビーム入射補助管を介して集合体前面から炉心内部にあるターゲット表面まで届く。ビーム入射管は加速器の真空構造と 1 体となっている。ビーム入射補助管を外して集合体外部にターゲットを置けばターゲット単独での特性実験を行える。ビーム入射管及びビーム入射補助管の端部は陽子ビームが透過しやすいように薄板とする。

Fig. 5.4.6　燃料体交換装置

燃料ドロワやターゲットドロワはかなり重いので集合体への装荷・取出しには交換装置を利用する。交換装置は集合体背面にあって、自動制御により上下左右にドロワを移動させて所定のマトリクス位置に一致させる。ドロワは燃料貯蔵室、ターゲット保管室で調整、組み立て、移送台車を使って交換装置まで運ばれる。

Fig. 5.4.7　安全棒装置概念図

安全棒は可動式の燃料ドロワであり、実験中は炉心に挿入する。引き抜くことによって集合体の実効増倍係数を 0.95 以下に抑制できる。設置の主目的はターゲット交換時の安全性を確保するための反応度抑制である。なお、安全棒は炉心領域から急速に引抜ける構造とすることにより、燃料体装荷時の万一の臨界接近を防止するのにも役立てる。ワンロッドスタックマージンの考え方は採用しない。安全棒は 4 体あり、それぞれが独立の駆動装置によって駆動される。駆動源は圧縮空気及び電動機である。

Fig. 5.4.8　安全棒装置取付け架構

集合体のビーム入射側には安全棒装置の取付け架構を設ける。集合体との相対位置が狂わないことが必要であるので、ベース構造、架構とも、十分な剛構造とする。

Fig. 5.4.9　建屋地下１階平面図

陽子ビームは地下約 3 m の深さで水平に建屋に導かれる。建屋は地上１階地下 1 階の鉄筋コンクリート造りであり、中性子核物理実験施設と建屋を共有している。地階には炉室、作業室、制御室、核燃料貯蔵室、ターゲット、模擬物質保管室、非管理区域用換気空調機室等がある。炉室天井は高く、一階との間で吹き抜けとなっている。一階には測定室、出入り管理室、管理区域換気空調機室、電気室、事務室、玄関等がある。放射線管理区域に指定されるのは、非管理区域用換気空調機室を除く地階の全エリア及び一階の管理区域換気空調機室である。管理区域の空気はフィルターを通過し、モニターしつつ管理区域換気空調機室の排風機を使って屋上の排気口から建屋外に放出する。

５．４．６　設計検討結果

（１）炉心核設計検討

目的：実効増倍係数がおよそ 0.92 から 0.98 になる炉心構成を定め、安全棒、ターゲットの反応度価値等を求める。

計算結果

１）実効増倍率 0.98 の炉心及び 0.92 炉心の核特性(臨界計算)

	最大炉心 (ケース１１)	最小炉心 (ケース１２)
燃料体数	304 体	216 体
実効増倍係数	0.9777	0.9198
中性子束ピーキングファクタ	2.5	3.0
安全棒反応度価値約	−1.2%Δk	−1.5%Δk
ターゲット反応度価値	+1.1%Δk	+1.2%Δk

Fig. 5.4.3 に 実効増倍係数が 0.98 となった炉心の燃料装荷配置を示す。

２）中性子源問題としての炉心特性

ターゲット表面に 10 MeV 及び1 MeV の単色スペクトルならびに核分裂スペクトルの固定中性子源を仮定し、集合体内の核分裂反応率分布を算出した。

計算条件

・中性子源の線源強度分布は、径方向は一様、軸方向は余弦分布

・実効増倍率　　0.98(ケース 11)

結果

Fig. 5.4.13 及び Fig.5.4.14 に中性子源エネルギー分布をパラメータとした場合の ^{238}U 及び ^{237}Np の核分裂反応率分布を示す。

（2）炉物理実験装置の壁、床反射効果の検討

解析内容：炉物理実験装置本体と壁、床間の必要距離を評価するため、直径 1.9 m の鉄体系中心に置いた中性子源のエネルギー及び体系－壁・床間距離を変えた場合の、代表エネルギー中性子の空間分布を計算した。その結果、低いエネルギーの中性子に着目する実験を行う場合には、体系の外面に熱中性子吸収材を囲うことが必要であるが、高速中性子に着目する限り、遮蔽壁の位置は数 m あれば十分であることが分かった。Fig.5.4.15 及び Fig.5.4.16 参照。

（3）遮蔽検討

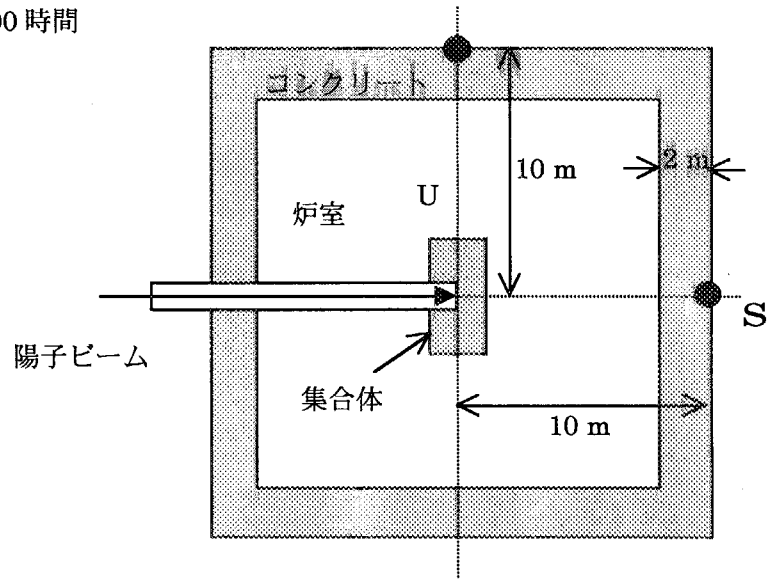
陽子ビームとターゲットによって発生する放射線に対するコンクリート壁の遮蔽能力を Moyer、 Thomas & Stevenson の式で、スカイシャイン線量は Thomas の式で評価した。ここでは炉心による減衰、核分裂効果を無視した。

陽子ビーム条件を次のように選んだ。

最大エネルギー：1.5 GeV

最大ビーム強度： 1nA=6.25×10^9 pps

装置稼働率： 年間 1000 時間



遮蔽効果評価点を示す図

遮蔽計算評価を行った結果は次の通りであった。

上図のU地点での線量　H= 47.2 μSv/h

上図のＳ地点での線量　H = 88.4 mSv/h

スカイシャイン線量　　H = 73 μSv/y

したがって、本施設の場合、炉心による減衰を考慮することが必要である。ターゲット単体を裸で使用する場合は炉心による減衰を期待できないので、運転時間の制限、または補助的な遮蔽を必要とする。

（4）陽子ビーム強度検討

零出力炉物理実験を実施するには炉心とターゲットを合わせて、定常出力Ｐ＝200 W くらいまでが保健物理的観点及び測定器の動作条件の観点から手頃であり、I＝4.6 (nA) が必要であることが分かる。このビームを得るには、加速器のパルス設計によるが、50 Hzのマクロパルス当たり1個のミクロパルスを取り出すこと必要と考えられる。

（5）建設コスト検討

3 社による概略コスト評価の結果を参考にして得た建設コストはおよそ 50 億円である。

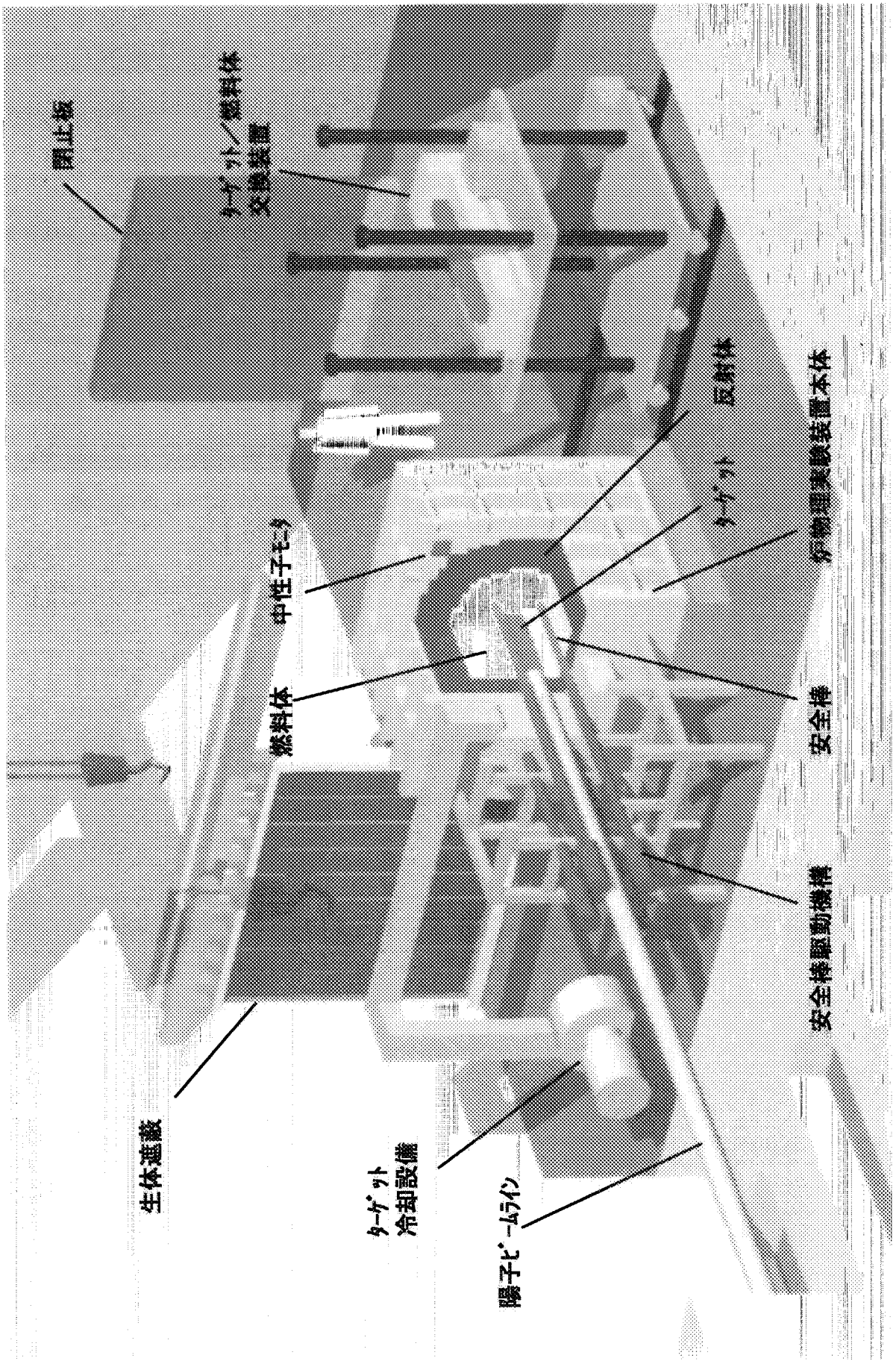


Fig. 5.4.1 消滅処理炉物理実験装置鳥瞰切開図

This is a blank page.

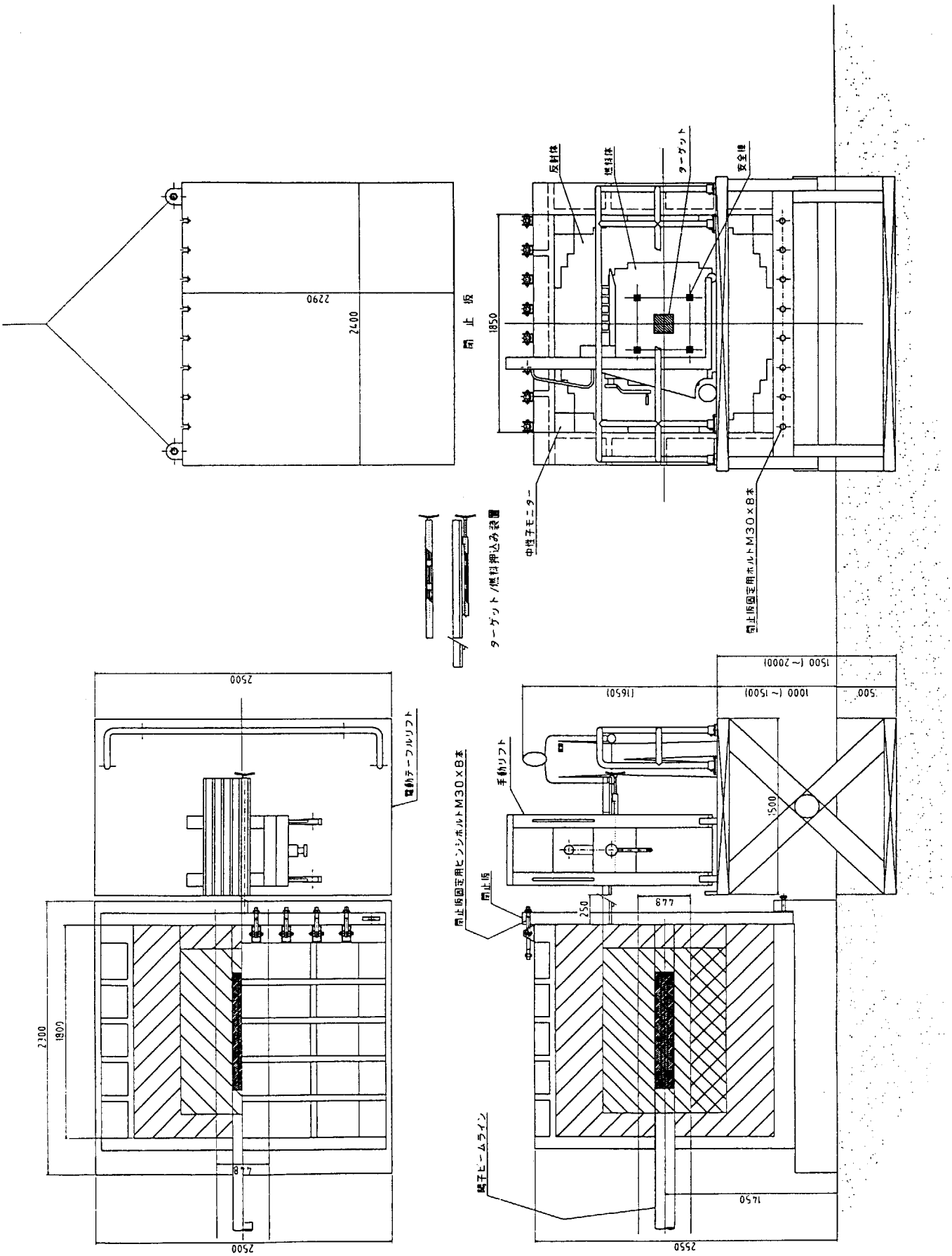


Fig. 5.4.2 集合体本体概略図

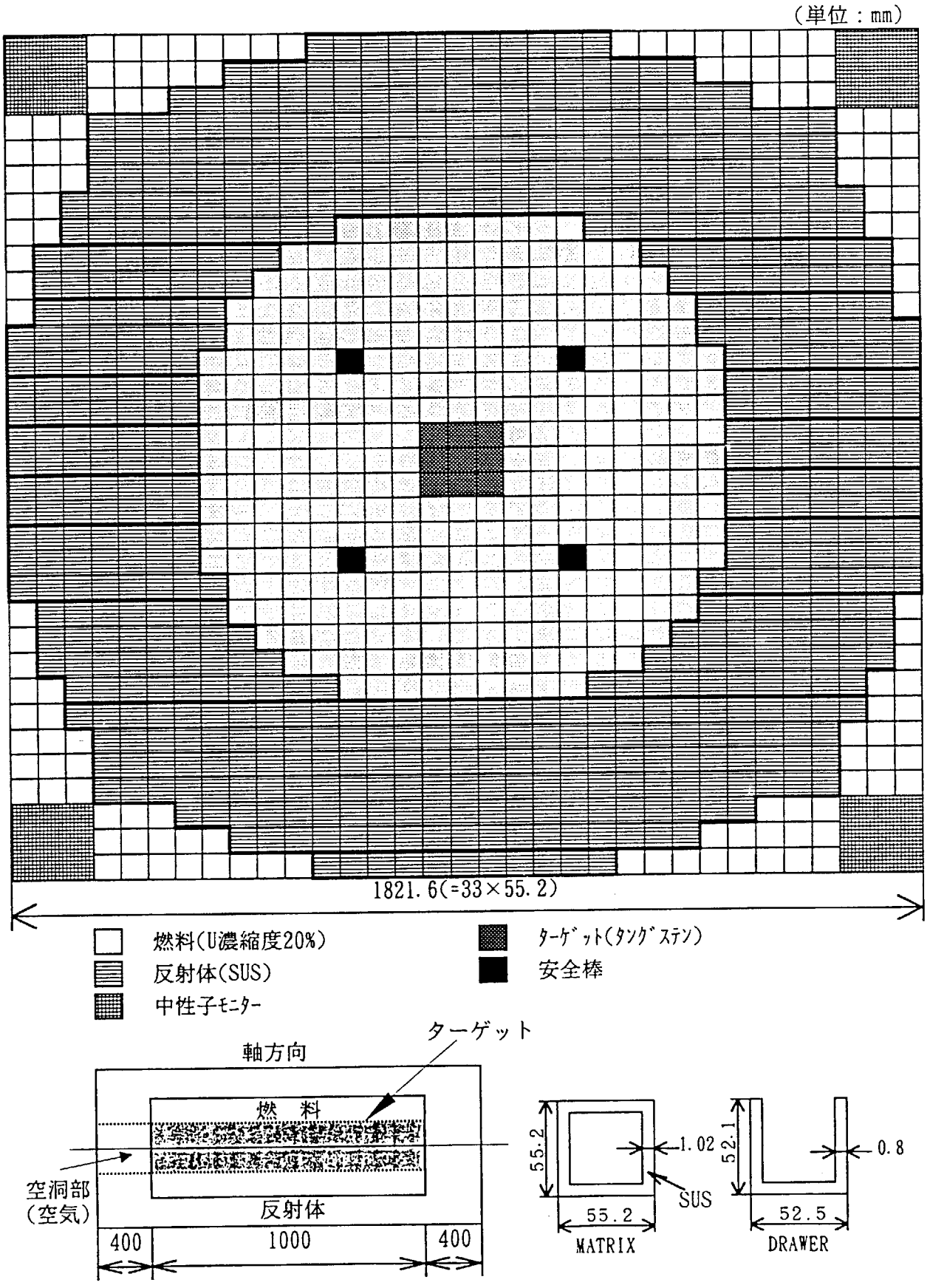


Fig. 5.4.3　集合体本体断面図

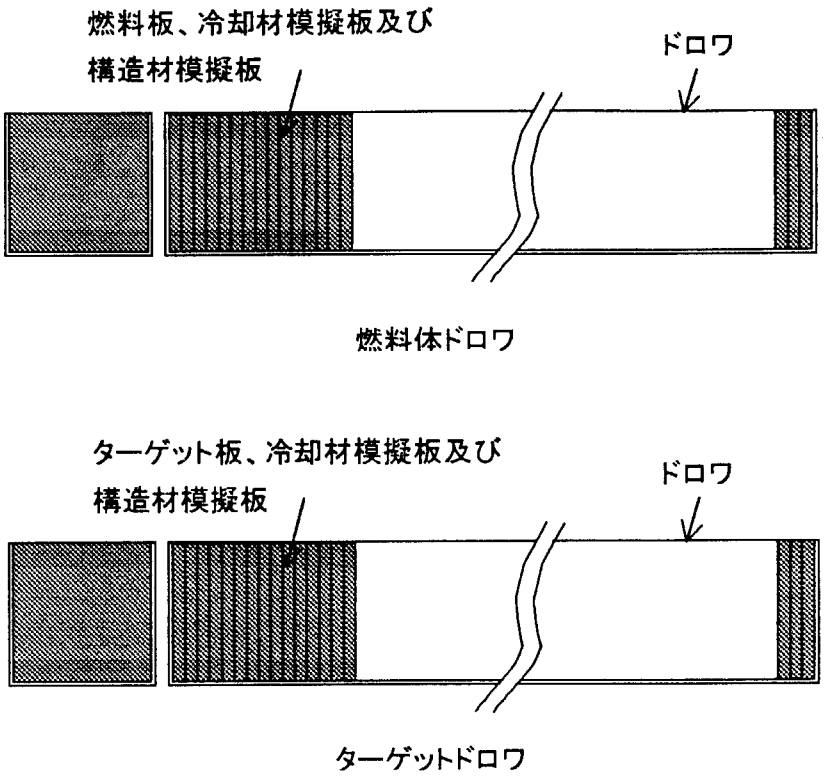


Fig. 5.4.4 燃料体及びターゲットドロワ概念図

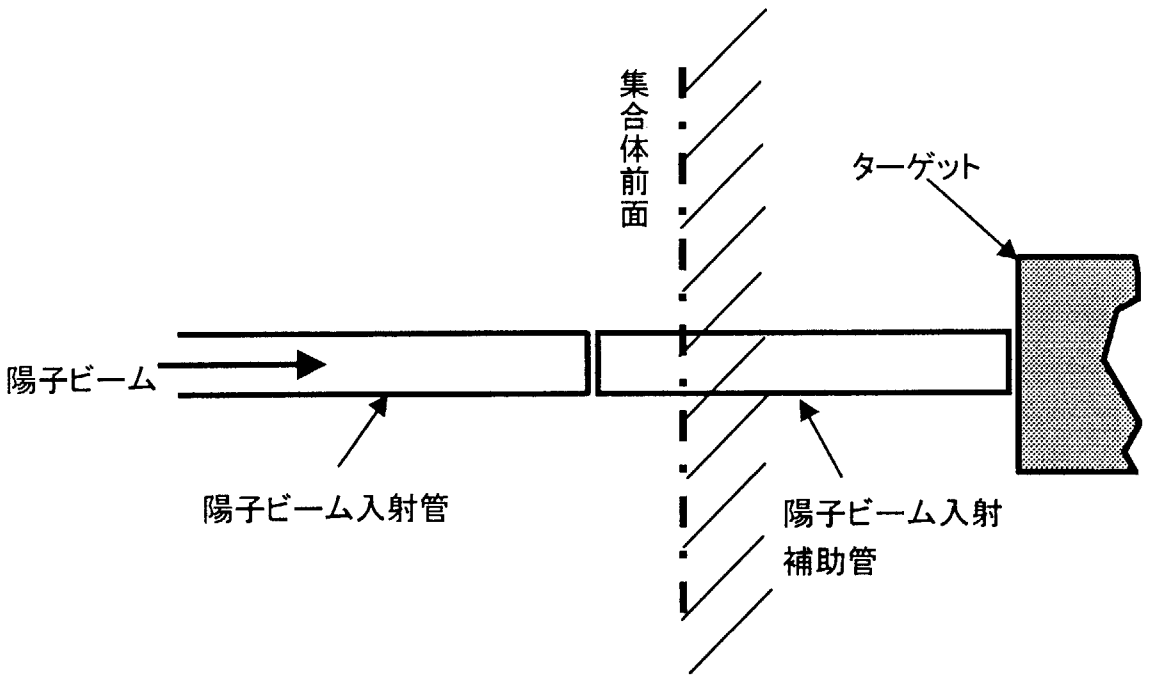


Fig. 5.4.5 陽子ビーム入射方法概念図

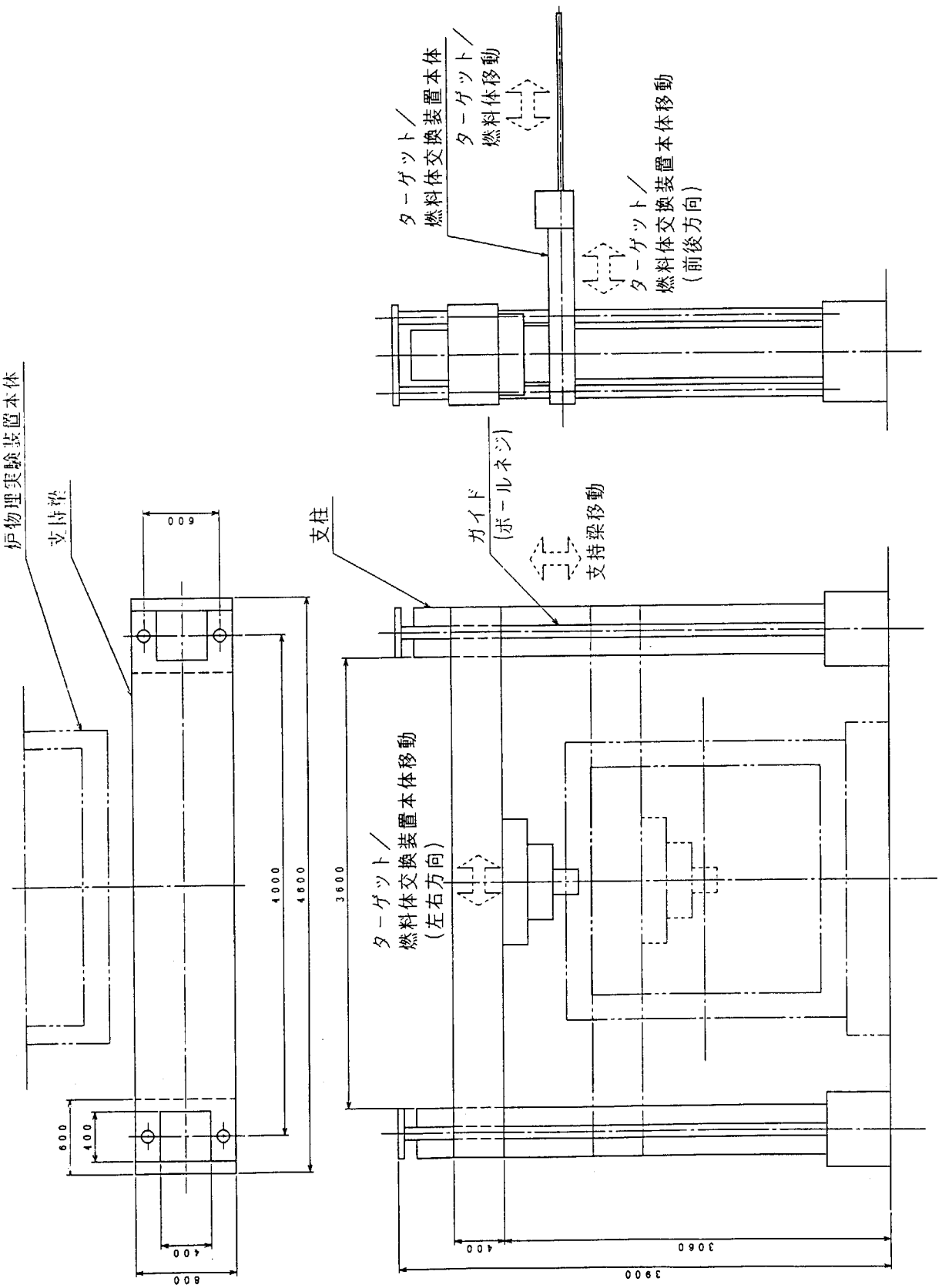


Fig. 5.4.6 燃料体交換装置

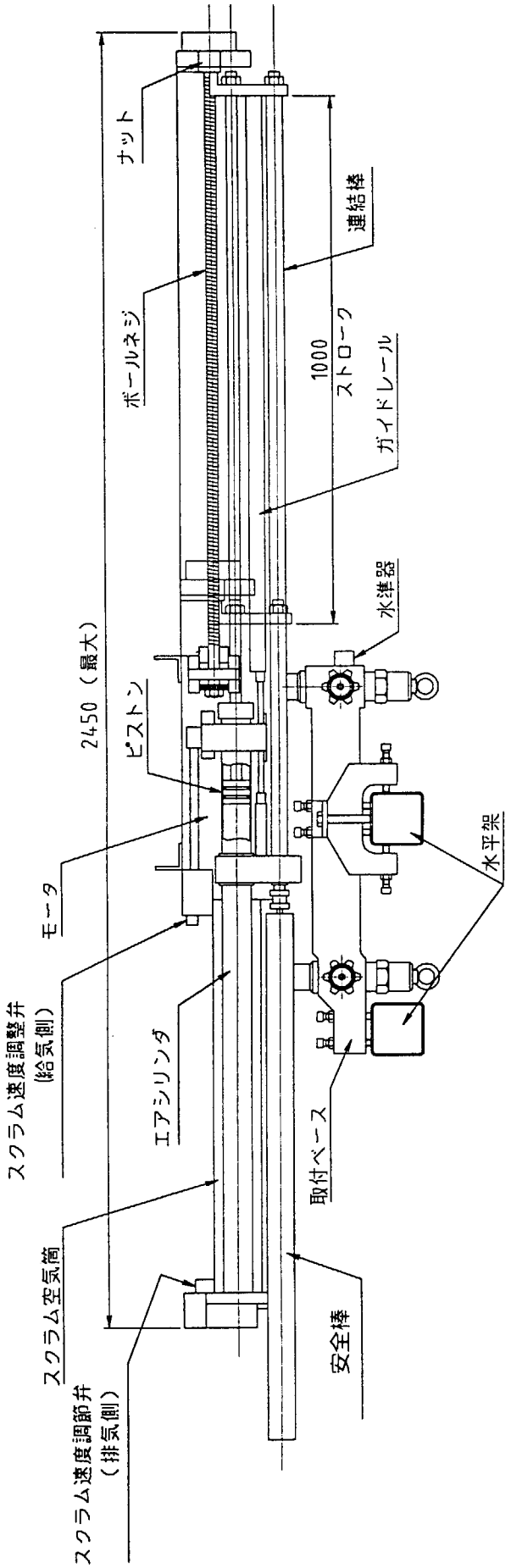


Fig. 5.4.7　安全棒装置概念図

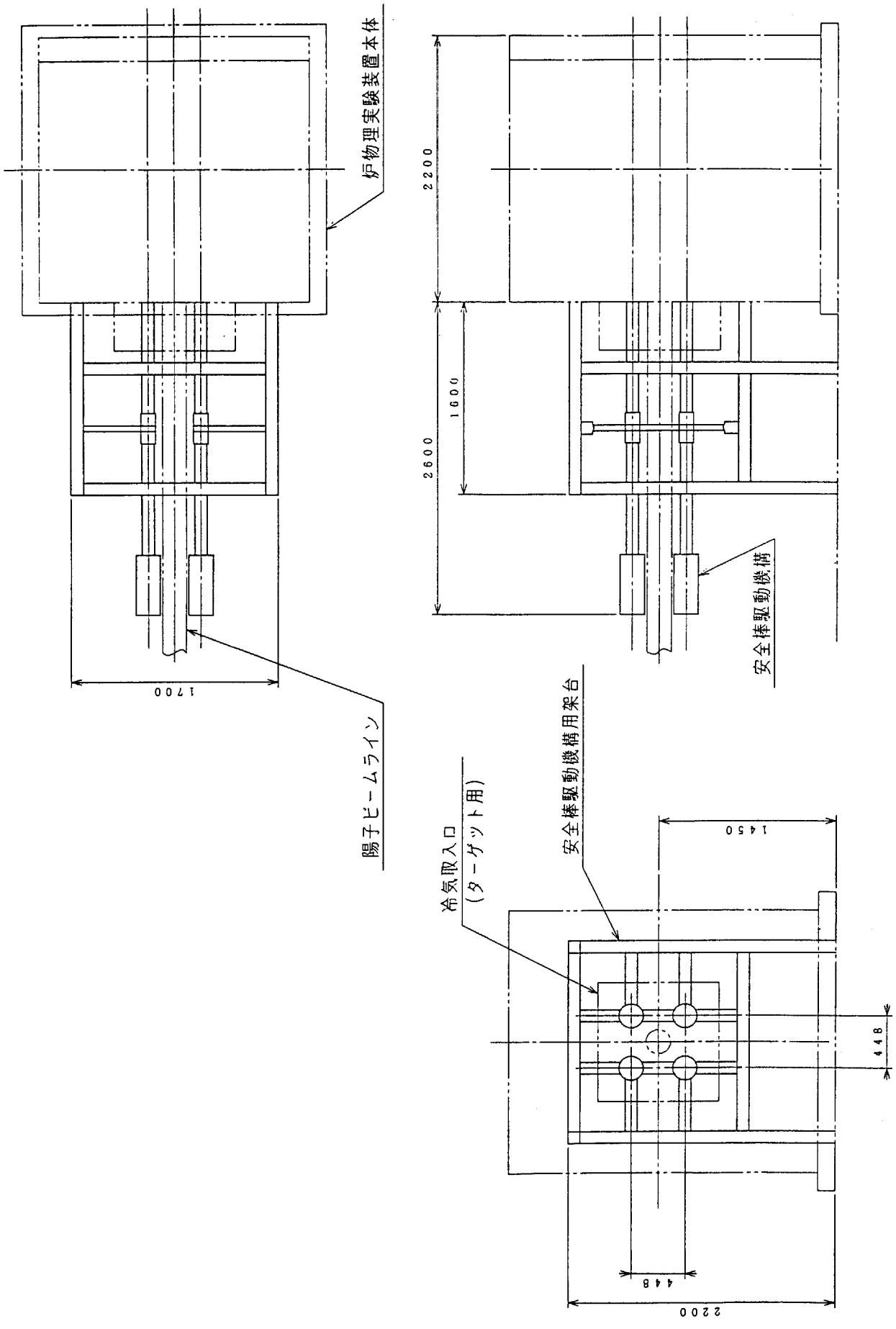


Fig. 5.4.8 安全棒装置取付け架構

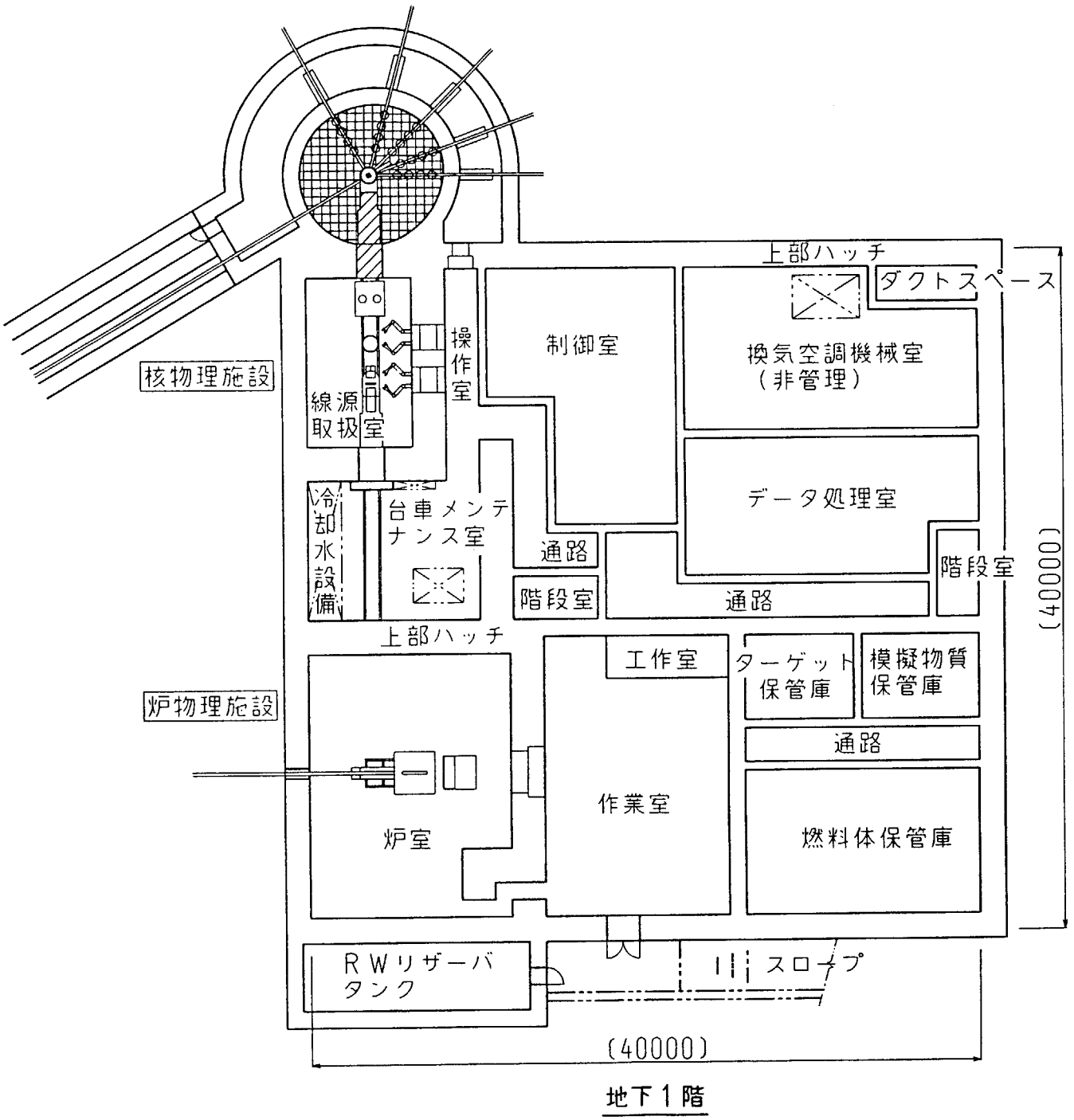


Fig. 5.4.9　建屋地下1階平面図

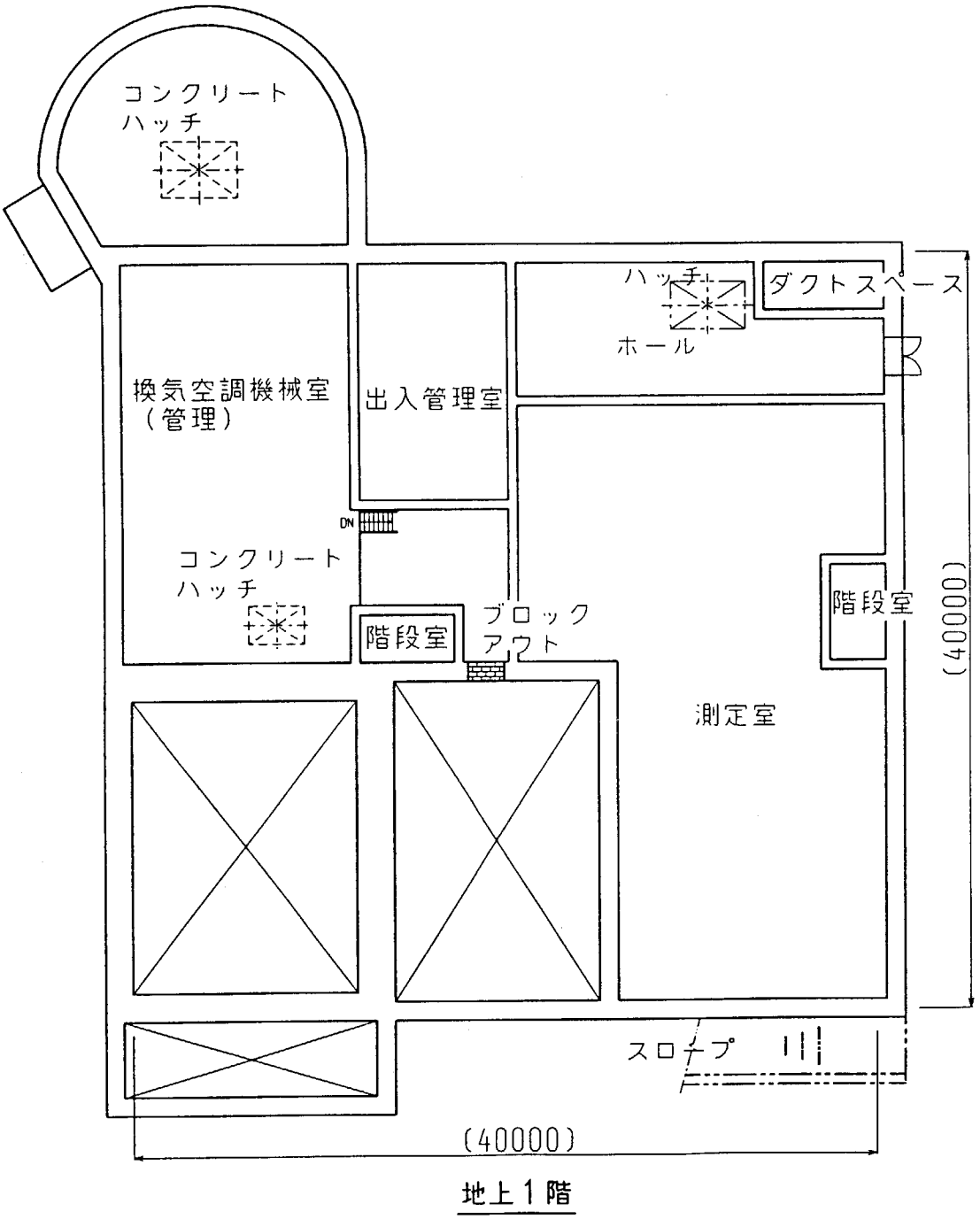
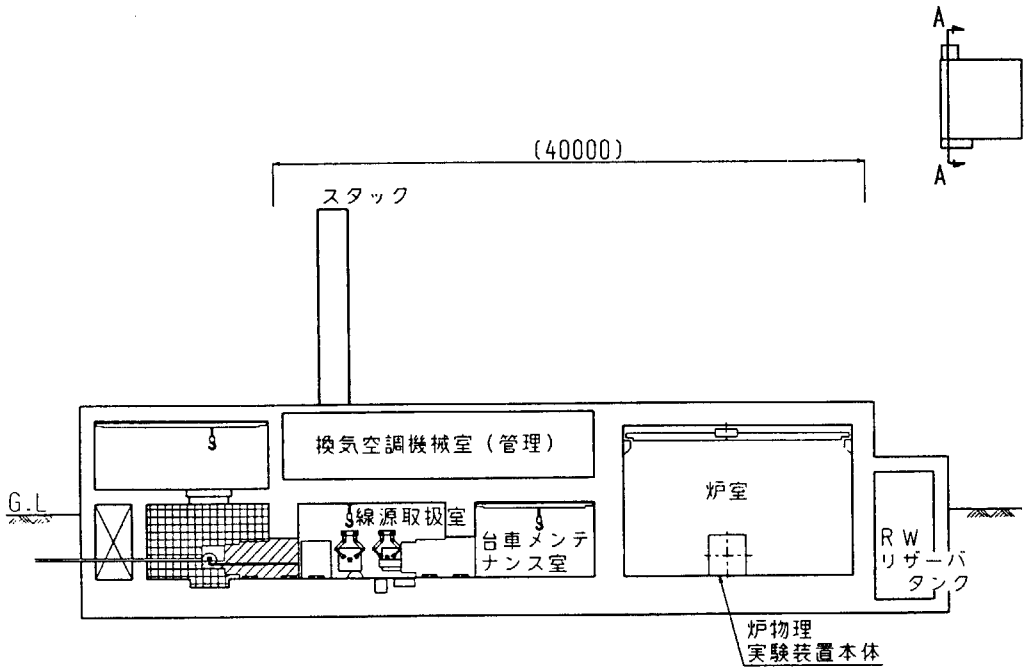
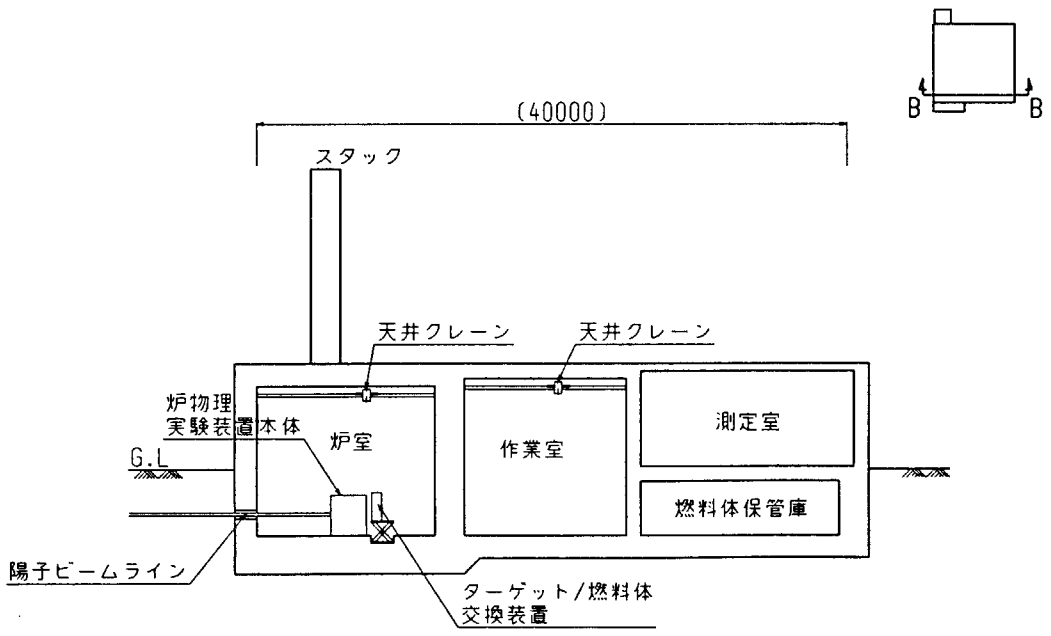


Fig. 5.4.10　建屋１階平面図



A－A断面

Fig. 5.4.11　建屋南北立面図



B－B断面

Fig. 5.4.12　建屋東西立面図

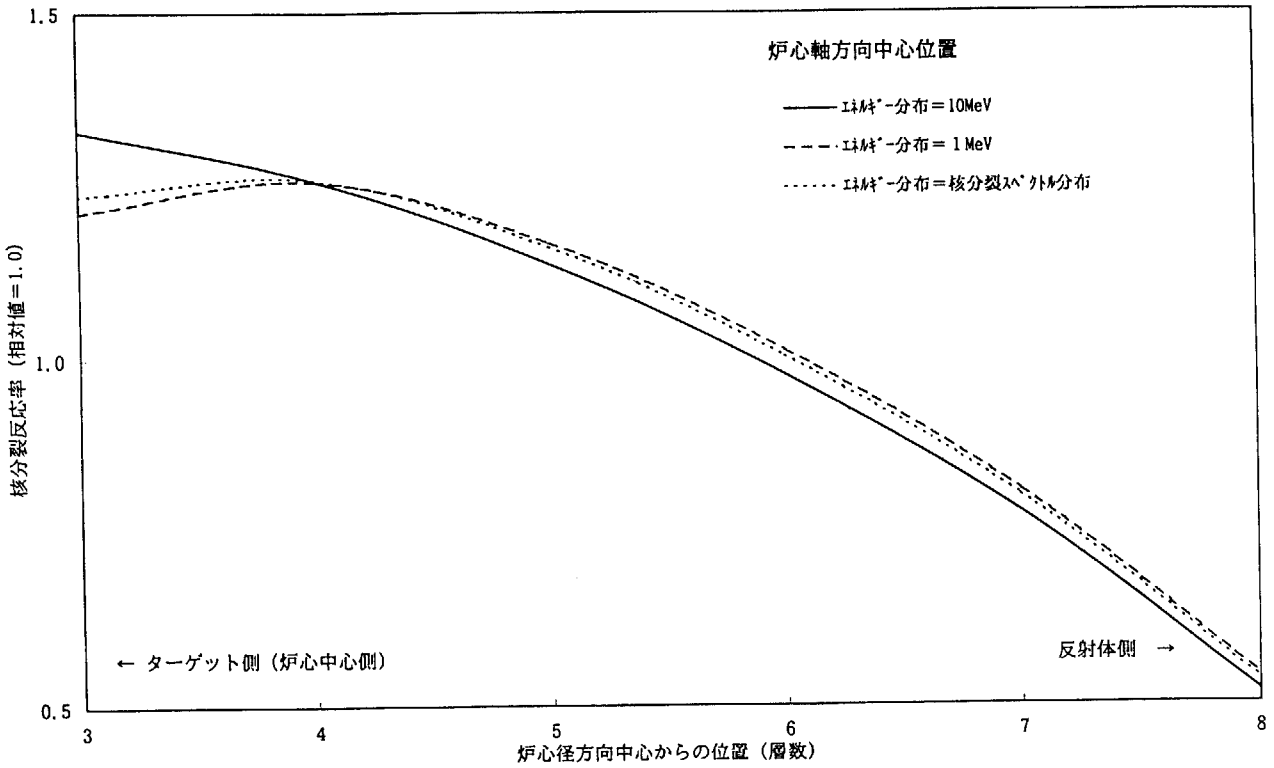


Fig. 5.4.13 径方向核分裂反応率分布（中性子源エネルギーの影響；^{238}U）

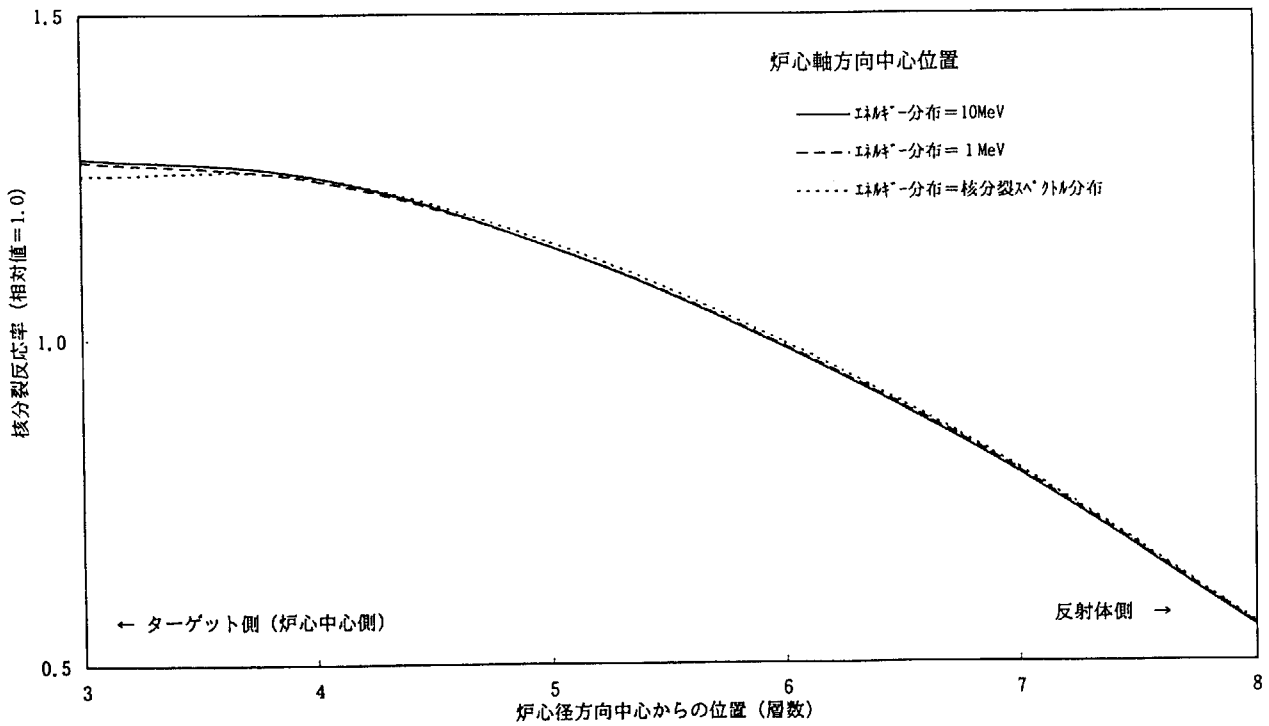


Fig. 5.4.14 径方向核分裂反応率分布（中性子源エネルギーの影響；^{237}Np）

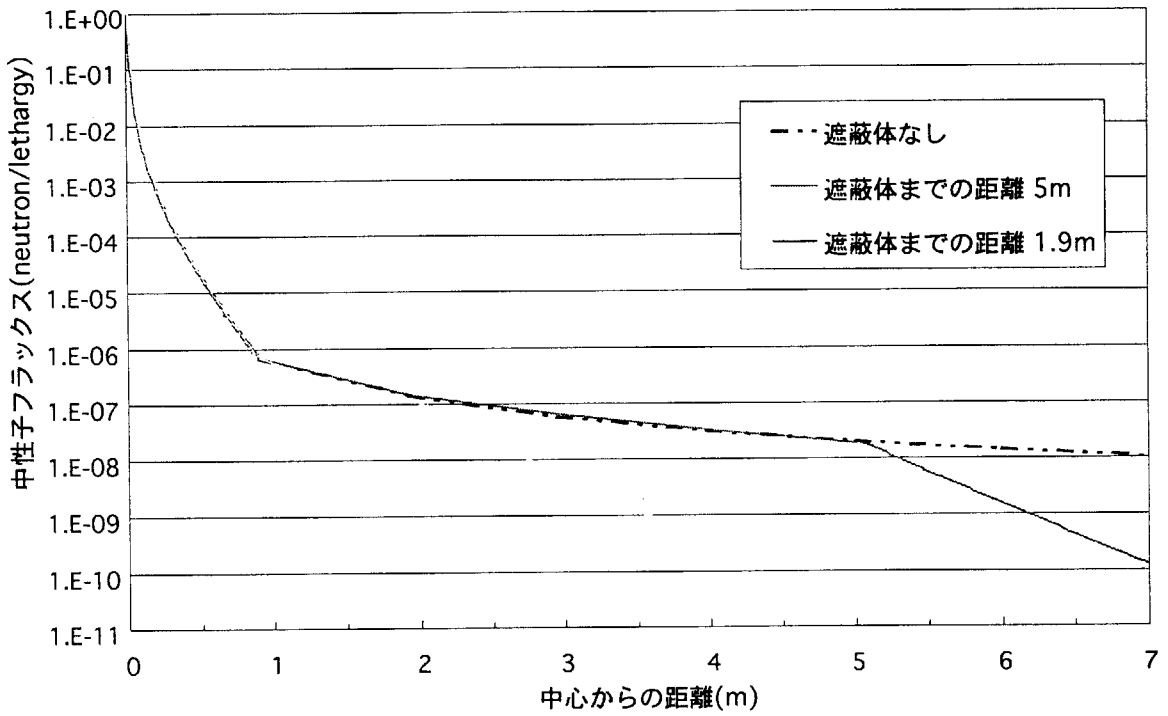


Fig. 5.4.15　200 MeV 中性子入射時の炉室速中性子束分布

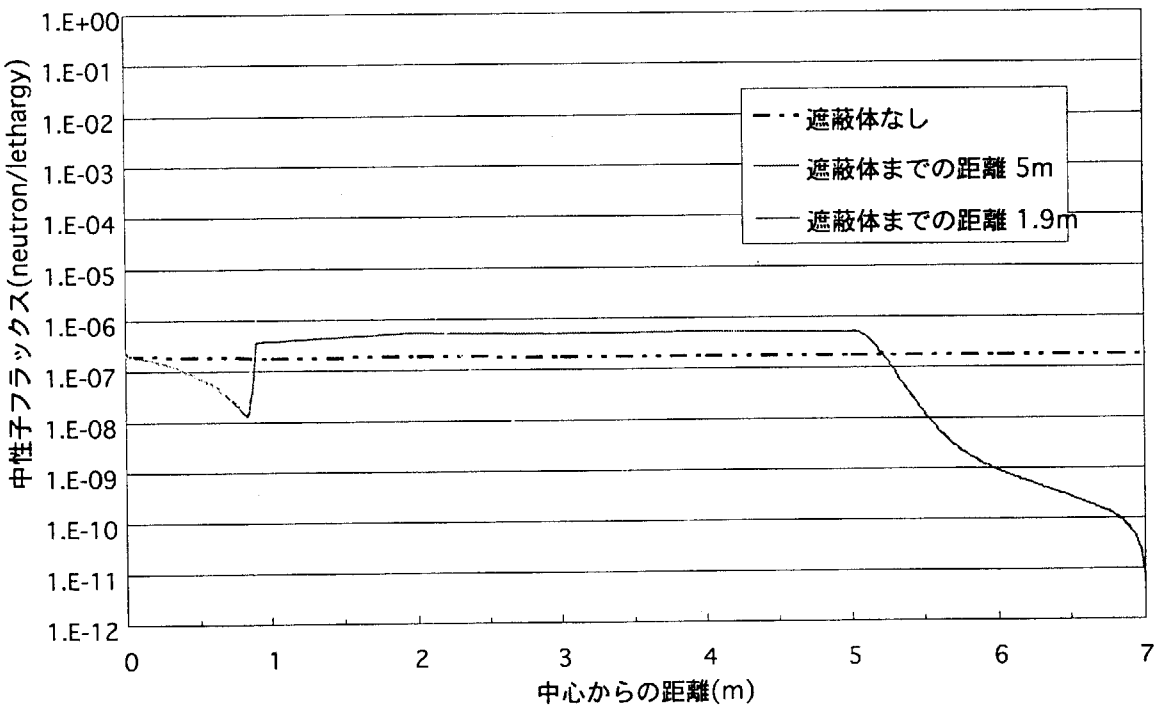


Fig. 5.4.16　200 MeV 中性子入射時の炉室熱中性子束分布

5．5　消滅処理実験炉

5．5．1　はじめに

原研でこれまで検討を行ってきた加速器駆動消滅処理システムは、現行のナトリウム冷却高速炉技術に基づいた固体燃料システム概念と将来オプションとしての溶融塩システム概念である。固体燃料システム概念を Fig. 5.5.1 に示す。このシステムは、中心に設けたタングステンターゲット領域とその周りを囲む MA 燃料領域から構成され、各領域は液体ナトリウムによって冷却される。炉心の中性子増倍率は 0.93～0.95 程度であり、1.5 GeV－40 mA の陽子ビームにより 800 MW 程度の熱出力を発生する。これにより、大型商業炉 10 基から排出される MA（年間 250 kg）を消滅処理することができる。また、炉心で発生した熱を回収して発電を行うことにより、加速器を駆動するための電力を自給できるだけでなく、外部に電力を供給する事ができる。

このように加速器駆動消滅処理システムは、従来の原子炉とは異なる新しい概念のシステムであり、Fig. 5.5.2 に示すような従来の原子炉システムには見られないいくつかの新しい技術課題がある。消滅処理実験炉の位置付けは、基礎的な概念成立性の実証がなされた後の、技術的成立性を実証するためのものである。従って、消滅処理実験炉では、技術課題解決に向けた研究開発を進めるとともに、技術的成立性の実証、MA 消滅処理性能の実証を行う。さらに工学的実証及び実用化に向けて必要となる実験データの取得・蓄積と技術基盤の確立を図る。

5．5．2　実験項目

消滅処理実験炉における実験及び開発項目には以下のものが挙げられる。

- 未臨界炉心モックアップによる工学的基礎データの取得
- MA 燃料照射データ・消滅処理の実証
- システム安全性の検証
- 加速器駆動システム計測・制御系の技術
- 未臨界炉心核設計コードの開発・検証

消滅処理実験炉での実験は大きく 2 期に分けて計画されている。第 1 期では、熱出力 30 MW の体系をウラン酸化物燃料を用いて構築し、第 2 期ではこれを熱出力 60 MW に拡充し燃料もウラン窒化物を用いるものとする。30 MW ウラン酸化物燃料未臨界炉心では、システムとしての技術的成立性、安全性及び MA 消滅処理性能を実証するシステムレベルでの総合的な実験を行う。また未臨界炉心の工学的データ、MA 燃料照射特性データの取得、核・熱・構造・燃料設計コードの検証・整備を行うとともに、加速器駆動システム計測・制御、保守等の基礎技術を確立する。60 MW ウラン窒化物燃料未臨界炉心では、サブアセンブリレベルで MA 窒化物燃料の照射実験を行い、MA 燃料照射健全性、消滅性能の評価及び燃焼特性の実証を図る。

5．5．3　施設仕様・概要

すでに述べたように原研でこれまで検討を行ってきた加速器駆動消滅処理システムは、現行のナトリウム冷却高速炉技術に基づいた固体燃料システム概念と将来オプションとしての溶融塩システム概念である。消滅処理実験炉では、技術的基盤のある固体燃料システム概念を主要研究開発対象とする。消滅処理実験炉の全体概念図を Fig. 5.5.3 に示す。以下では、消滅処理実験炉の施設仕様と概要について述べる。

5．5．3．1　炉心

消滅処理実験炉では、小規模・小出力のターゲット／未臨界炉心システムを用いて、システムレベルでの核的特性、MA 燃料照射、計測・制御等に関する技術的成立性及び MA 燃料消滅性能を実証する実験を行う。炉物理及び燃料照射の観点から、中性子スペクトル条件を模擬する必要がある。実用消滅処理システムでは、MA 燃焼率は年間約 10%である。これを合理的な期間内で実証するためには実験炉において年間数%程度の MA 燃焼率を達成する必要がある。このため、炉心の中性子束を実用システムの 1/10 程度より高くする必要がある。ここで、システムのスケールは炉心の構成、燃料組成と中性子増倍係数で決まるので、実験炉に必要な熱出力が導かれる。燃料を 20%濃縮ウラン、中性子増倍係数を～0.93、MA 燃焼率を年間 1%（140 日照射）とすると、少なくとも 30 MW の炉心の熱出力が必要となり、ビーム出力は約 2.3 MW になる。従って、消滅処理実験炉の基本的な仕様は、実用消滅処理システムに近い中性子増倍率～0.93 と 30 MW 程度の熱出力のウラン酸化物燃料（20%濃縮）燃料未臨界炉心に MA 窒化物燃料ペレットあるいは燃料ピンを装荷し、出力約 2.3 MW の CW ビームを用いる。また実用消滅処理システムでは窒化物燃料を用いるので、実験炉は将来的に燃料をウラン窒化物（20%濃縮）とし、炉心熱出力を 60 MW 程度、ビーム出力を 4.5 MW 程度に増強する。

以上の観点から検討した、ウラン酸化物燃料を用いた炉心の構成図を Fig. 5.5.4 に示す。燃料は、これまで十分な使用実績のあるウラン酸化物ペレットを用いることとし、濃縮度は 20%のものを用いる。炉心の実効増倍率は～0.93 で、炉心高さ 100 cm、炉心半径は約 50 cm である。また核破砕ターゲットは、実用消滅処理システムと同じ固体タングステンを用い、炉心中央に半径約 10 cm のターゲット領域を設ける。また炉心外周部には、ステンレス鋼からなら径方向反射体領域を設ける。消滅処理実験炉（熱出力 30 MW）の中性子束は、ピーク位置及び炉心平均でそれぞれ 7.8×10^{14}、4.0×10^{14} n/cm^2·s であり、実用消滅処理システム（熱出力 800 MW）のそれぞれの値 8.0×10^{15}、4.4×10^{15} n/cm^2·s と比較すると、目標とした実用消滅処理システムの約 1/10 程度のレベルを満足していることが分かる。

炉心を構成する燃料集合体及びターゲット集合体を Figs. 5.5.5、6 に示す。高速炉の燃料集合体は通常ラッパ管に納められた構造をしているが、消滅処理実験炉では Fig. 5.5.5 に示すようにダクトレス集合体を用いる。燃料集合体は、85 本燃料ピンと 6 本のタイロッドを正三角状に配列し、グリッドスペーサーによってピッチを保ちつつ束ねられる。実用消滅処理システムで用い

る燃料要素の主成分は MA であり、これらの核種のα崩壊による発熱を効果的に除熱する必要がありこのためにラッパ管のないダクトレス集合体を用いることとしている。消滅処理実験炉の燃料はウラン酸化物であり除熱の問題はないが、要素技術の開発という観点から実用消滅処理システムと同じダクトレス集合体を用いることとした。消滅処理実験炉の燃料及び炉心の主要な仕様を Table 5.5.1 に示す。

ターゲット集合体の構造も実用消滅処理システムで用いるものとほぼ同じ構造のものを用いる。ターゲット集合体は、Fig. 5.5.6 に示したように 3 種の厚さの異なる（1.5 cm、7.0 cm、12.0 cm）タングステン板で構成され、実質的な長さは燃料と同じ 100 cm である。このようにビーム入射方向から徐々に厚さを厚くする構造は、ターゲットから放出される中性子の軸方向分布と集合体内発熱分布をできるだけ平坦化する目的で採用した。また、各タングステン板には冷却用のナトリウムが流入するための流入孔があいているが、高エネルギー粒子のストリーミングを抑えるため、隣接するタングステン板で流入孔が互い違いになるように配される。

５．５．３．２　炉内構造及び炉心廻りの構造

炉心部の概念をもとに、冷却性、ナトリウムバウンダリ等の観点から炉心支持構造及び原子炉容器構造を検討し、Fig. 5.5.7 に示すような構造とした。1 次冷却材、入口配管から炉内に流入した 1 次系ナトリウムは、炉内壁に沿って下降し、炉心支持構造内の高圧プレナム部に流入する。炉心及びターゲットへの冷却材の流れは、高圧プレナムから連結管のスリットを経て各集合体のエントランスノズルに導かれる。反射体への流れは、高圧プレナムから一部の流れを低圧プレナムに導き、ここで連結管を介して反射体エントランスノズルに導かれる。炉心部へ導かれた流れは、上方へ向かい、炉心、ターゲットを冷却したあと、ビーム窓を冷却して上部プレナムに至り、出口ノズルを経て出口配管に導かれる。

原子炉容器はオーステナイト系ステンレス鋼の直径 2.6 m、高さ約 8 m の下部半球殻付き竪型円筒容器であり、ルーフスラブから直吊りしている。また、第 4 紀層立地を想定し、地震条件は緩いものとして原子炉容器には下部振止めは設けないこととした。冷却材の流出入方式は、PWR と同様のサイドエントリ方式とし、出入口ノズルを原子炉容器の上方に設けている。これは、入口ノズルを下部に設置するとガードベッセルが複雑な形状になること、また上部流出入方式としてルーフスラブから出入口配管を差し込むと原子炉容器の径が増大することを避けるためである。従って、原子炉容器の中に内筒を設け、この内筒により入口側と出口側領域を仕切ることとしている。また原子炉容器外側には冷却材ナトリウム漏洩防止のためにガードベッセルを設ける。また実験炉支持構造は生体遮蔽コンクリートを兼用した形となる。消滅処理実験炉では、炉容器構造は従来の高速炉に比べ、格段に簡素化、軽量化しており耐震上は十分な強度で支持できるものと考えられる。また、炉容器は上部蓋（プラグ）部で支持し、ガードベッセルとは支持部を分けることができる。

消滅処理実験炉の炉容器構造廻りは、加速器系との取合構造、補助設備、各種取扱設備等が複雑に施設される。Fig. 5.5.8 に原子炉の支持構造（構築物）、陽子ビーム入射系、ビームダン

プ、ビーム遮断系等の原子炉構造廻りの構造を示す。消滅処理実験炉は、加速器によって未臨界炉を制御・運転するため、従来の高速炉のように制御棒による運転制御は行わない。従って、炉心上部機構、制御棒及び制御棒駆動機構が不要なため消滅処理実験炉の炉心上部構造も従来の高速炉に比べて簡略化されたものとなっているが、加速器からの陽子ビームラインが炉心上部中心軸から炉心部内に食い込んだ形で挿入される。

陽子ビーム入射系は炉容器に近い側から見て、ビーム入射窓、ビームパス、ビームエキスパンダ、4 極マグネット、偏向マグネット、4 極マグネットから成る。ビーム窓は高エネルギー陽子・中性子による高照射を受けるので定期的な交換が必要なので、この部分の長さをできるだけ短くするため、炉上部プレナムは Fig. 5.5.8 に示されるように浅くしている。このため、燃料・ターゲット交換時には、炉上部蓋部は対象集合体の全域をアクセス出来る概念としている。しかし、炉上部が浅いプレナムとなっているため、この空間で燃料を水平方向に移動させることはできない。従って、燃料・ターゲット交換は炉上部から直動型で行うことになる。このような概念とするためには、炉上部プラグにキャスク付交換装置を設置し、この装置が位置決めできるようにしておく必要がある。

ビーム窓が破損したとすると、ビームライン側は真空なので冷却材ナトリウムがビームラインに侵入する。この場合、冷却材バウンダリの破損は言うに及ばず財産保護的観点からも加速器側の損失は膨大で、その影響をできるだけ小さくする必要がある。このためビームライン途中にビームライン遮断弁を設けている。しかしながら、ビームストップあるいはビームライン遮断には、ビーム窓破損の迅速な検出が不可欠であるがこれは容易ではない。この他、ビーム窓を 2 重化する方法、ビームライン途中に仕切り弁を設ける方法等が考えられるが、十分な安全性・信頼性を確保するためのビーム窓構造等の詳細設計が必要である。

ビーム窓の定期交換のためビームラインは分割し、移動できる構造としている。ビームラインの分割は、ビーム窓、ターゲット、燃料等の交換時にに炉上部に必要空間が得られるように行う。そのために陽子ビーム入射系は、ビーム窓部、緊急遮断弁敷設ビームパス、ビームエキスパンダ／4 極マグネット部、偏向マグネットの各部に分けている。各部は真空フランジ等で接続されており、燃料等の交換時にフランジ部で切り離し、偏向マグネット等の水平移動装置を常設しておく。移動は炉から遠い部位から順に行う。当該部の遮蔽コンクリート等も必要により分割しておく。これらの移動のための、クレーン、自走モータ等も敷設しておく必要がある。

消滅処理実験炉の原子炉廻り構造を決定する上で重要となるのが原子炉遮蔽構造である。本施設では、一般的な高速炉の遮蔽に加えて高エネルギー陽子・中性子の遮蔽も考慮する必要がある。遮蔽設計の目標値を満足するためには遮蔽体を追加することであるが、遮蔽体を大きくすることは直接プラントの建設費の上昇につながるため、経済的に合理的なプラントを実現するには、きめ細かな評価が必要となる。予備的な遮蔽解析の結果、消滅処理実験炉の遮蔽では、20 MeV 以上の中性子及びその 2 次γ線の線量当量の評価が重要となることが分かった。従来の原子炉プラントにおける中性子源は実質的に核分裂のみであることを考えると、加速器駆動炉の遮蔽構造は従来の原子炉プラントとは大きく異なることになる。遮蔽体としてコンクリートを考えた場合、遮蔽体外側での線量当量が 6μSv/hr 以下となる最小の遮蔽体厚さの概略値は炉心径方向で約 10

m、炉心底部で約 15 m となることが分かった。炉心上部遮蔽については、消滅処理実験炉では炉心中央に炉心上部より加速器ビームラインが挿入されており、炉心上部遮蔽を評価するにはこのストリーミング効果を考慮する必要があり、原子炉上部構造の詳細化とともに今後詳細な評価が必要となる。なお、ビームの曲げ半径は約 5 m であるが、炉廻りの遮蔽コンクリート厚さが膨大であるため、ビーム曲げにより施設を膨大化することにはなっていない。

5．5．3．3　冷却系及び補助系設備

消滅処理実験炉の除熱系統は主冷却系、補助冷却系（崩壊熱除去系）から成り、Fig. 5.5.9 に示す概念構成となっている。消滅処理実験炉の冷却系の施設概念を検討する上での前提条件は下記の通りとした。

熱出力（設備容量／定格出力）	60 MWt / 30 MWt
出入口温度（定格）	430 / 330 ℃
1 次系流量（定格）	1.63×10^{6} kg/h　(60 MWt)
冷却系統	1 ループ

消滅処理実験炉の熱出力は 30 MW であるが、既にのべたように将来的に 60 MW に拡充することを考慮して、冷却系の設備容量は熱出力 60 MW で検討した。また前節で述べた予備的な遮蔽解析の結果から、原子炉廻り及び加速廻りのコンクリート遮蔽体の必要厚さは 10 m として検討した。

主冷却系は 1 ループによる系統構成であり、冷却材にナトリウムを使用することから中間冷却系（2 次系）を設ける。原子炉容器出口側のホットレグ配管中の高温ナトリウムは中間熱交換器に流入し、2 次側ナトリウムと伝熱管を介して熱交換する。ここで除熱された低温ナトリウムは、ミドルレグ配管を通って 1 次主循環電磁ポンプで加圧され、コールドレグ配管を通って再び原子炉容器内に入る。中間熱交換器で 1 次系ナトリウムと熱交換した 2 次系ナトリウムは 2 次主冷却系配管に流入するが、熱交換器を出た 2 次主冷却系配管は、格納容器を貫通して原子炉建屋内の空気冷却器に入り、フィン付きチューブの伝熱管を介して外気にて冷却された後、2 次主循環電磁ポンプで加圧されて再び中間熱交換器に戻る。

主冷却系に関わる補助系統としては、ナトリウム液面上を不活性化するための 1 次及び 2 次アルゴンガス系、系統中のナトリウム純度を許容値内に維持するための 1 次及び 2 次純化系、系統内のナトリウムをドレン及び充填するための 1 次及び 2 次充填ドレン系並びにナトリウムの凍結を防止するための各系統予熱保温設備等がある。

本施設では、原子炉容器及び加速器系に対する遮蔽厚が膨大となるため、格納容器内の主冷却系設備はコンクリートの中に埋め込んだ構造とし、極力格納容器の寸法を縮小するものとした。このため、炉容器、中間熱交換器、1 次系主循環電磁ポンプ及び配管類はコンクリート内に埋め込まれた構造となる。機器・配管の廻りには、コンクリートを冷却するため窒素ガスの冷却パス

を確保するものとした。主配管等は熱膨張による変位量を考慮して、配管とトンネル間の隙間寸法を計画する必要がある。主冷却系をコンクリートに埋め込んだ形とした場合に、各機器のメンテナンス性能は極端に悪くなるため今後この点を考慮した詳細検討が必要となる。また、主配管のサポート及び地震スナバ等の据え付け用のスペース及び供用中検査用のマンホール等を考慮した配管トンネル構造とする必要がある。

補助冷却系は、崩壊熱除去系として炉容器内に浸漬型熱交換器を直接挿入し、炉内で 2 次側ナトリウムと熱交換を行う。空気冷却器、2 次系配管を有し、伝熱中心差を高く取ることで自然循環による冷却を行う。また本系統にも予熱保温設備が必要である。

5．5．3．4　全体設備概要

これまでに述べた各機器の概略仕様を基に、消滅処理実験炉の全体プラント設備を検討した。Table 5.5.2 に消滅処理実験炉のプラント主要仕様を示す。原子炉建屋は、地下 5 階、地上 3 階建ての鉄筋コンクリート造りとし、建屋寸法は 45.6 m×43.8 m×H41.9 m（基礎盤厚除く）である。原子炉建屋内配置を Figs. 5.5.10～12 に示す。格納容器はコンクリートに埋め込まれた矩形鉄筋コンクリート製であり耐圧性はライナ裏側の鉄筋コンクリートを受け持つ構造である。格納容器内は、遮蔽及び機器・配管類の支持を兼ねたコンクリートで充填した構造である。極力格納容器の寸法を縮小するため、主冷却系設備（中間熱交換器、1 次系主循環電磁ポンプ及び配管類）はコンクリートの中に埋め込んだ構造とし。機器配管類の廻りには、コンクリートを冷却するための窒素ガスの冷却経路を確保した。配置図面上の上方には陽子加速器系のビーム入射系を配置した。格納容器床面上には、原子炉上部遮蔽のためのコンクリートブロックを設置する。燃料交換やメンテナンスの際の炉心上面へのアクセスを考慮し、この上部遮蔽は分割し移動可能なものとする。

格納容器の右方向には、非放射性機器・設備を配置するものとして 2 次主冷却系の空気冷却器及びそれらの補助系と電気設備関係並びに非放射性の補機類を配置するものとした。格納容器の左側方向には、燃料取扱設備、廃棄物処理系設備等の放射性機器設備類を配置するものとして、管理区域区分を明確に分割配置するものとした。放射線管理区域区分の概念を Fig. 5.5.13 に示す。

5．5．4　研究・開発課題

消滅処理実験炉の建設に向けて、各部概念の詳細化を図る必要があるが、今後特に以下の事項に留意した検討を行う必要がある。

・原子炉構造各部仕様の詳細化

原子炉構造各部概念について、構造評価・熱流動評価を踏まえて仕様を明確化する。特に基本概念に影響する構造設計として、下記の検討を行う必要がある。

① システム過渡応答の検討

加速器によって運転される消滅処理実験炉は、従来の高速炉プラントとは異なったシステム過渡応答になると考えられる。特に起動・停止、緊急停止時のシステム応答について検討を行っていく必要がある。

② ビーム入射窓構造の具体化

加速器駆動炉が従来の原子炉プラントと最も異なる点は、加速器ビーム入射系の存在である。中でも炉心上面蓋を貫通し、炉心内部に挿入されるビーム入射窓は高エネルギー陽子・中性子の高照射場にさらされるため、この構造・熱流動特性を把握し構造の具体化を図ることが重要となる。また、ビーム入射窓破損時の対策として、ビームライン仕切構造等を具体化していく。

③ 炉心伝熱流動特性の把握

消滅処理実験炉では、実用消滅処理システムの要素技術開発の観点からダクトレス集合体を使用する。ダクトレス集合体は、集合体の移送、解体及び製造にさいしてのα崩壊熱の冷却除熱の点では有利であるが、炉心における流量配分が困難になること、集合体としての剛性がラッパ管型集合体に比べて劣ることなどが短所となる。また、ある割合の冷却材が集合体周囲に流れてしまって、有効流量が相対的に小さくなる。従って、炉心内での伝熱流動特性を詳細に評価しておく必要がある。また、ダクトレス集合体では、ラッパ管がないため炉心支持板上面が高圧となり、従来の高速炉のようなハイドロリックホールドダウン力を確保することは難しい。フリースタンディングの炉心構成要素が浮き上がらないようにするためには、ハイドロリックホールドダウン力に代わる炉心構成要素の下向き力を炉内構造として検討する必要がある。

④ 液面近傍の構造検討

消滅処理実験炉の原子炉構造は、出入口ノズル共に原子炉容器上方に取り付けて原子炉容器の径を増大させない構造として、PWR のような内筒と原子炉容器を繋ぐ出口ノズルを設定している。この熱変位を緩和するため内筒上部に大口径ベローズを採用し、冷却材入口側の低温高圧部と炉心出口側の高温低圧部を仕切っている。このため、本ベローズには熱膨張変位差、圧力差の厳しい荷重条件が課せられることになる。従って、その構造成立性の見通しをつけるとともに、供用中検査方法についても予め検討しておく必要がある。

・消滅処理実験炉の詳細遮蔽解析

予備的な遮蔽解析の結果、消滅処理実験炉の遮蔽には従来の原子炉プラントと比べて大規模な遮蔽が必要であることが分かった。原子炉廻り構造の具体化には、消滅処理実験炉の詳細な原子炉廻りの遮蔽構造、特に炉上部に陽子ビームラインが存在するため、上方へのストリーミング効果を考慮したより詳細な遮蔽構造を検討する必要がある。さらに実験炉原子炉構造各部、冷却系をより具体化する上で、原子炉廻りの遮蔽構造を視野に入れたシステム概念を構築する。

・炉上部概念の詳細化

消滅処理実験炉概念をより具体化する上で、炉上部の各設備機器について仕様を明らかにし、定期的に交換が必要となるビーム窓・燃料集合体交換手順等を具体化していく。

・計測系・安全系概念の確立

実験炉の安全シナリオに基づき、計測系・安全系についても具体化を図る。特に炉心未臨界度モニター、ビーム入射窓破損検出系等は加速器駆動炉における安全性を確保するために重要となる。

5．5．5　まとめ

高レベル放射性廃棄物を安全に処理処分する技術を確立することは、今後原子力の開発・利用を進めていくうえできわめて重要な課題である。大強度加速器を用いた加速器駆動消滅処理技術の開発は、放射性廃棄物の処理処分法に新たに有望で有力なオプションを与えるものである。しかしながら、加速器消滅処理の実現には多くの技術的課題の解決が必要である。このため、原研の中性子科学研究計画において、加速器駆動消滅処理システムの様々な工学的実験を行うことにより加速器駆動消滅処理システムの実現に向けた研究開発を行っていく。本稿では、中性子科学研究計画のもとで建設が予定されている消滅処理実験施設のうち消滅処理実験炉の概略仕様について述べた。

Table 5.5.1　消滅処理実験炉の主要炉心パラメータ

炉心熱出力	30 MW（第 1 期）／60 MW（第 2 期）
炉心実効増倍率	0.93
炉心高さ	1000 mm
直径	960 mm
燃料ピン直径	5.4 mm
燃料ピンピッチ	7.14 mm
燃料	ウラン酸化物（第 1 期） ウラン窒化物（第 2 期）
濃縮度	20 %
被覆材厚さ	0.3 mm（SUS316 製）
集合体形状	ピンバンドル型
集合体対面距離	68.0 mm
集合体当たり燃料ピン	85 本
初装荷ウラン重量	約 3200 kg

Table 5.5.2　消滅処理実験炉のプラント主要仕様

炉出力（設備容量）		60 MWt
炉型式		陽子入射高速炉型
陽子ビーム入射法		上部から垂直入射
入射ビーム		1.5 GeV　～1.5 mA（～2.3 MWb）
プラント型式		ループ型炉
主冷却系	ループ数	1 ループ
	構成	1 次系、2 次系、空気冷却系
	冷却材	ナトリウム
運転サイクル		1 年
冷却材流出入方式		サイドエントリ方式
漏洩時冷却材保持		ガードベッセル方式
崩壊熱除去方式		熱交換器炉内浸漬型直接炉心冷却系
燃料交換方式		直動式
燃料出入方式		移送キャスク

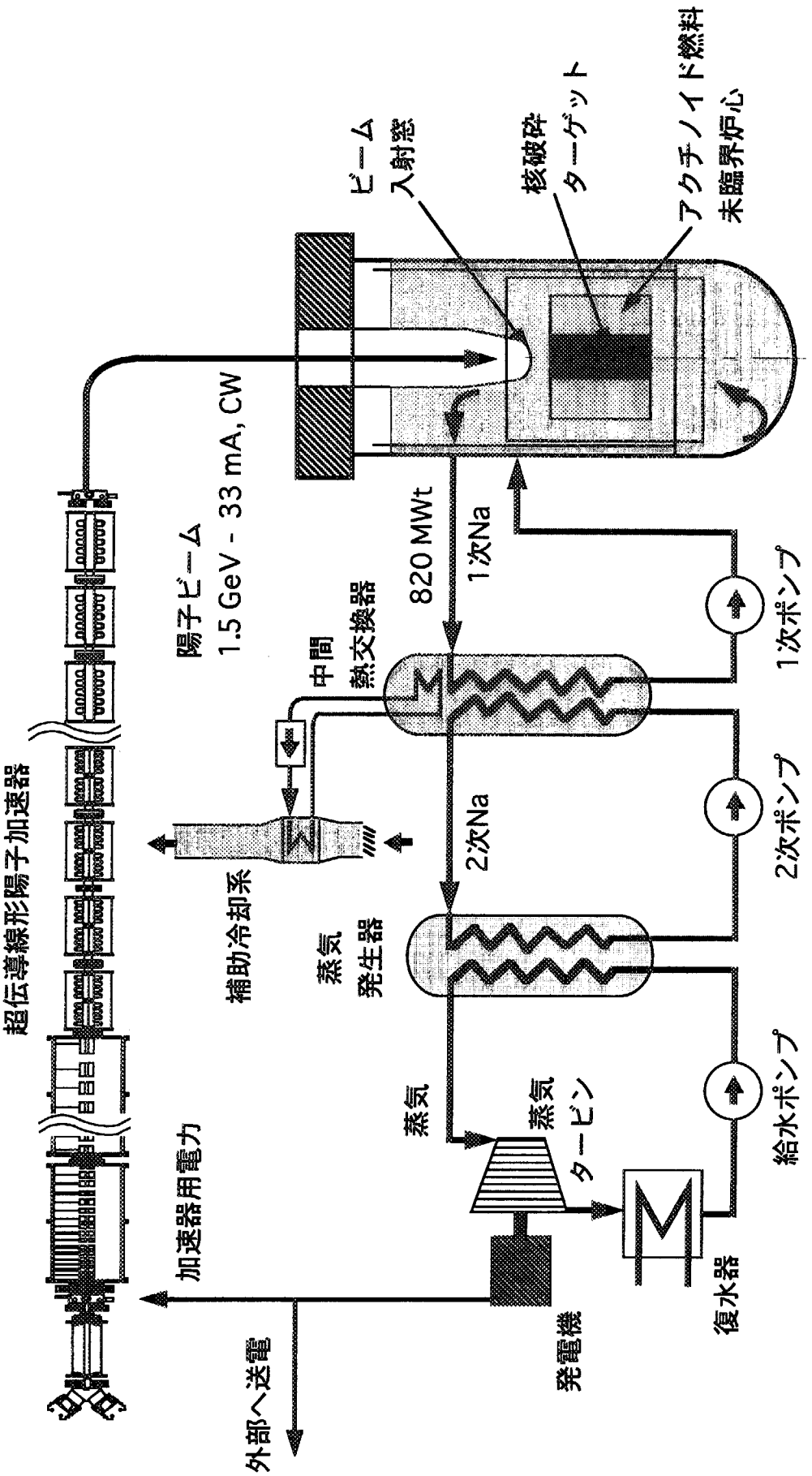


Fig.5.5.1　加速器駆動消滅処理システムの概念

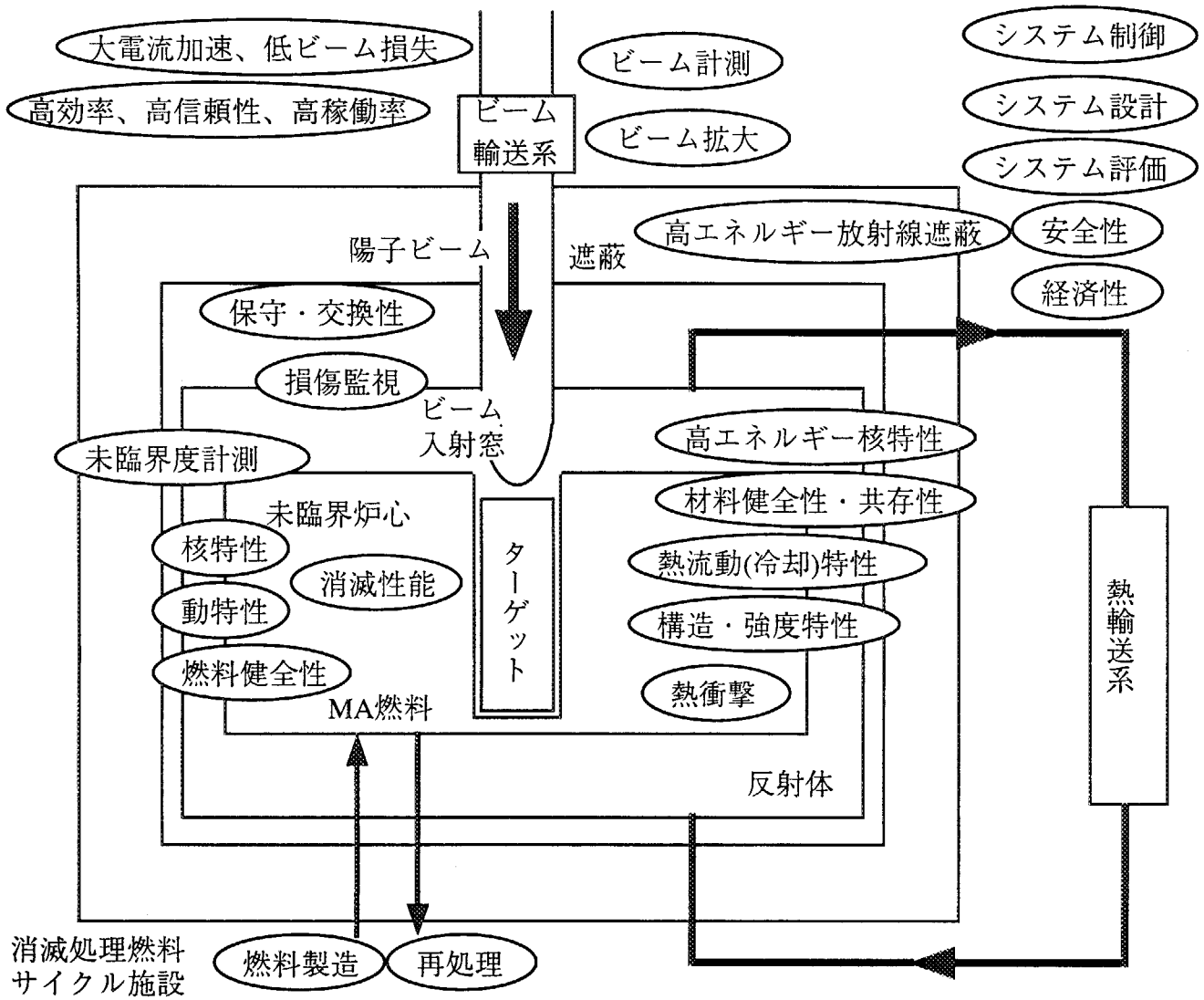


Fig.5.5.2　加速器駆動消滅処理システムの技術課題

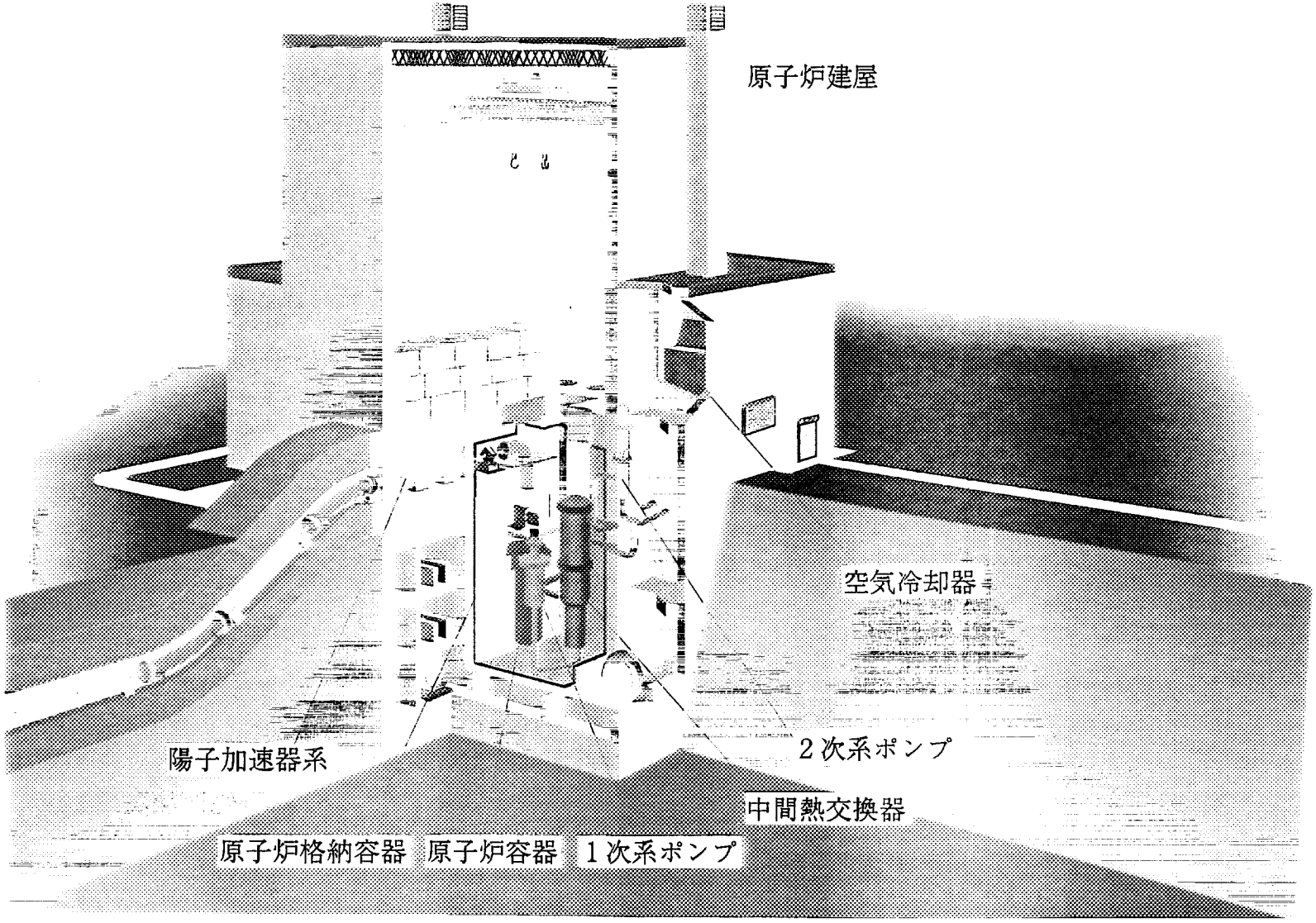


Fig.5.5.3　加速器駆動消滅処理実験炉概念図

This is a blank page.

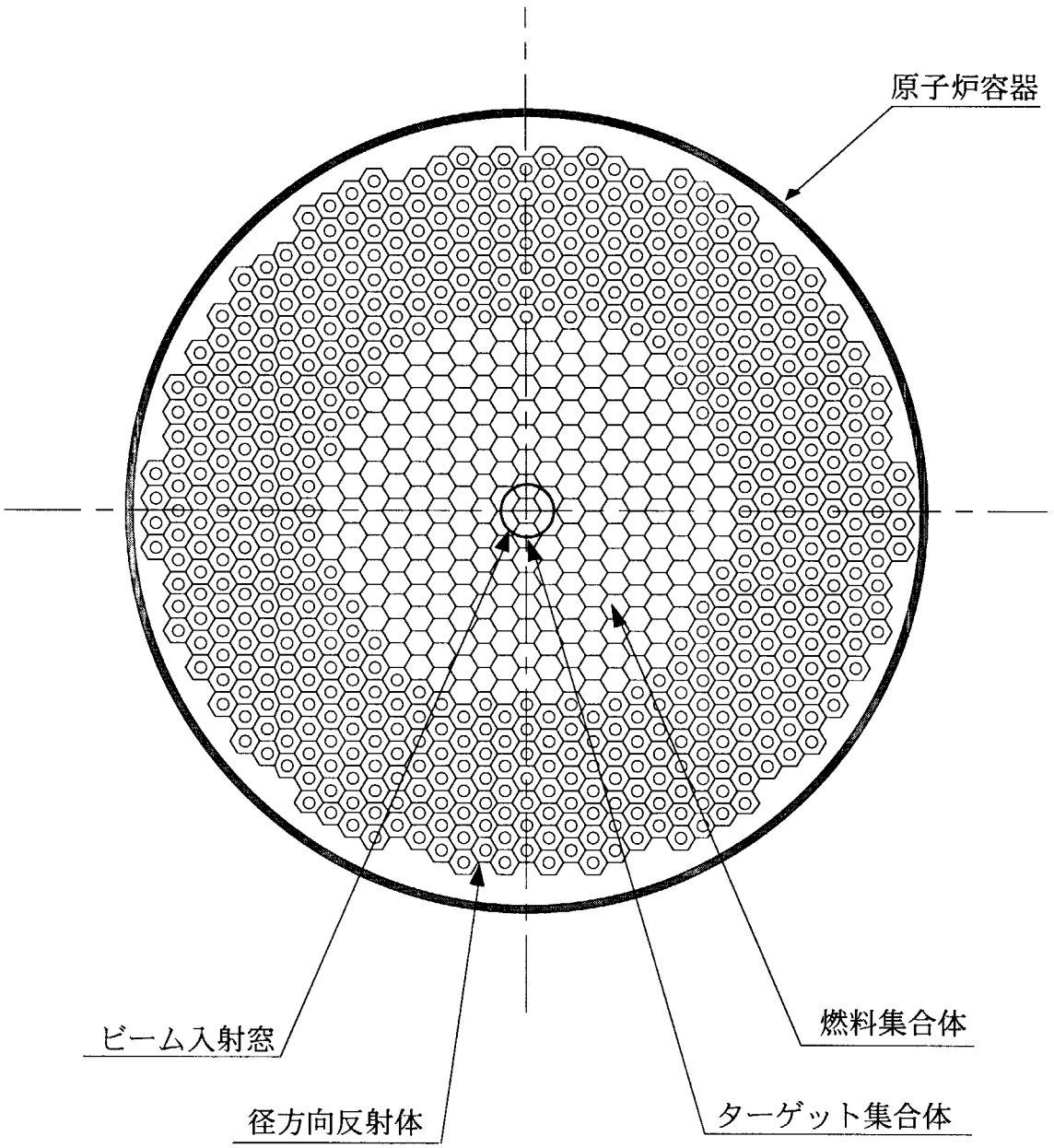


Fig.5.5.4 消滅処理実験炉の炉心配置

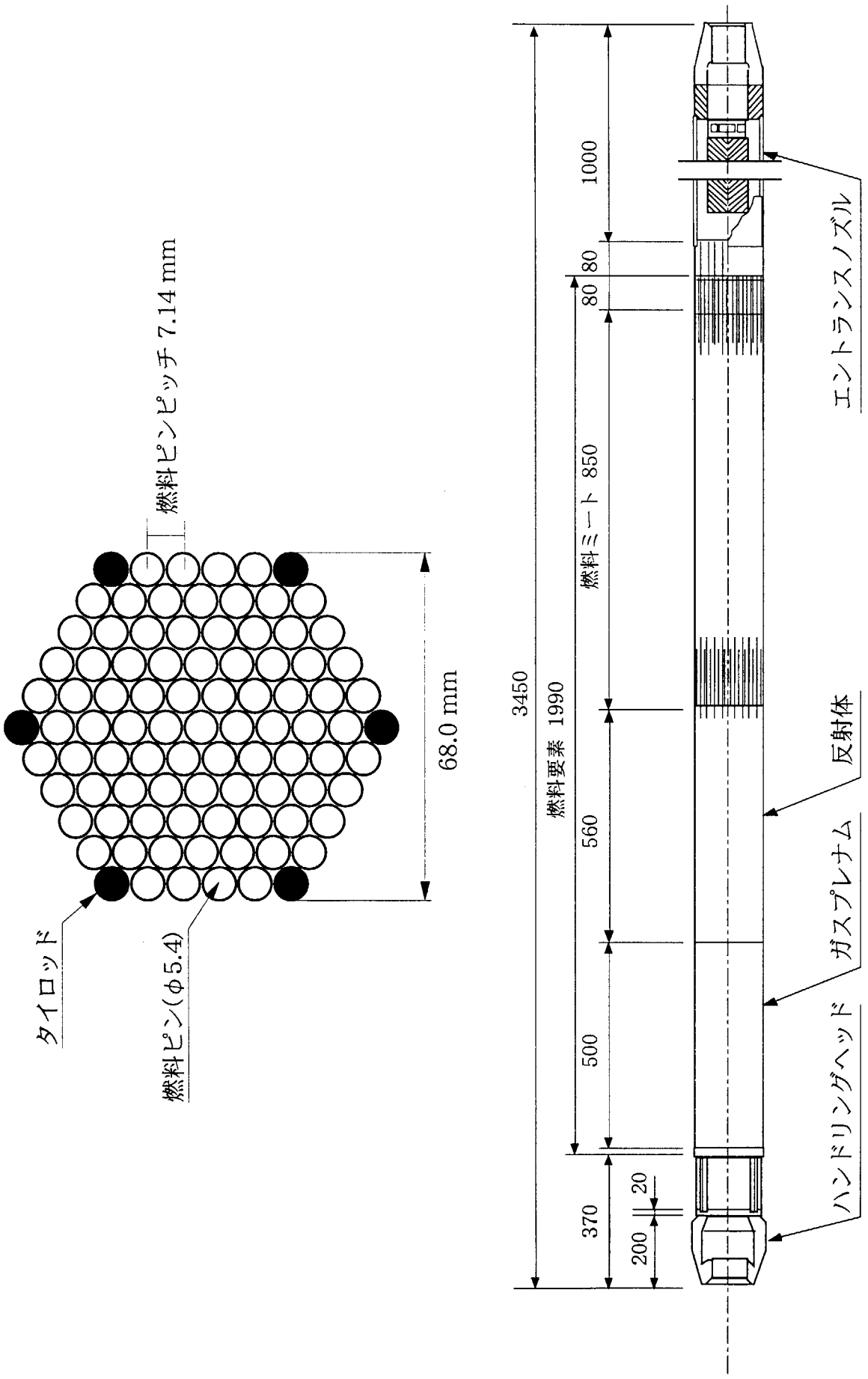


Fig.5.5.5 燃料集合体構造図

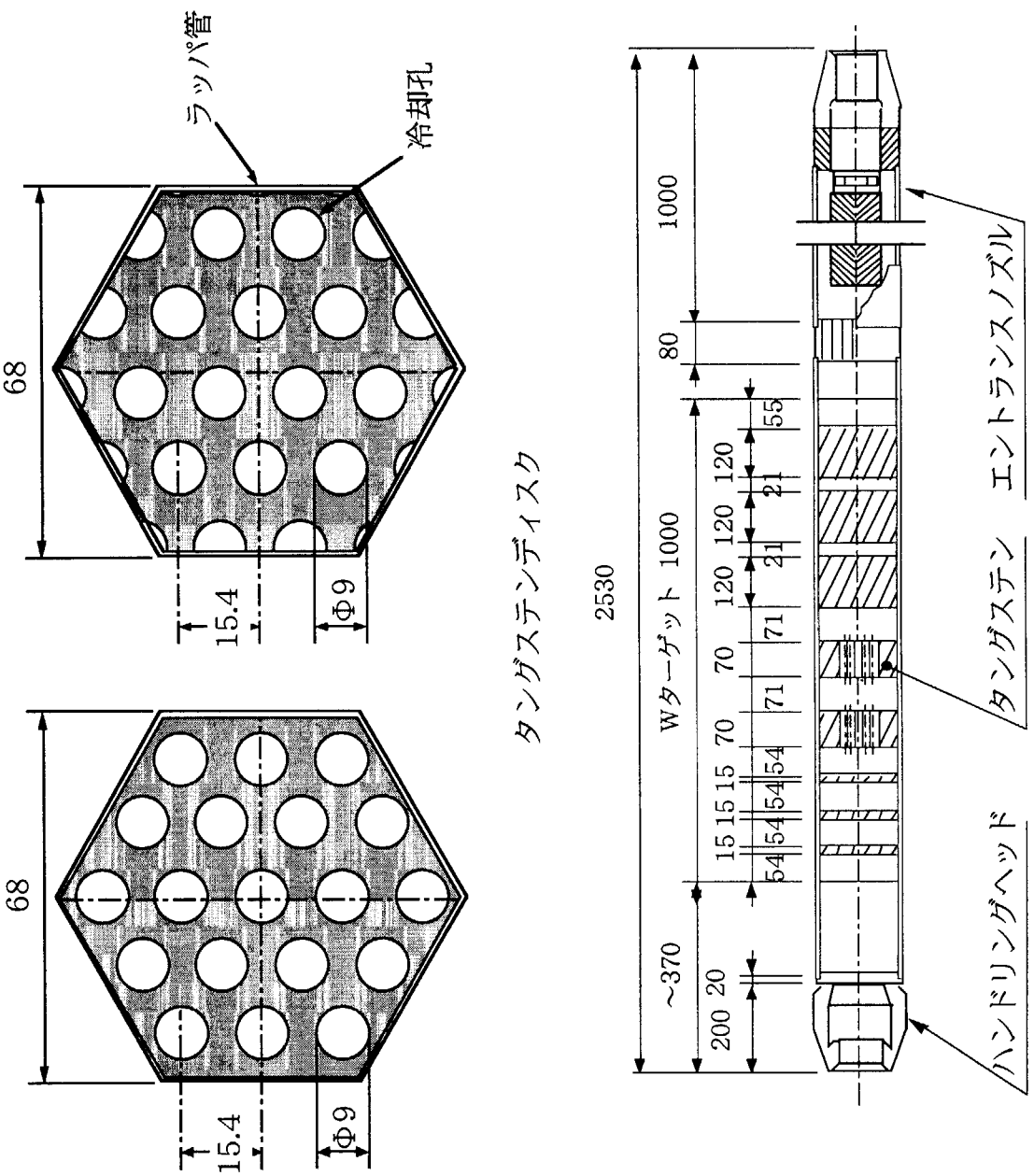


Fig.5.5.6 ターゲット集合体構造図

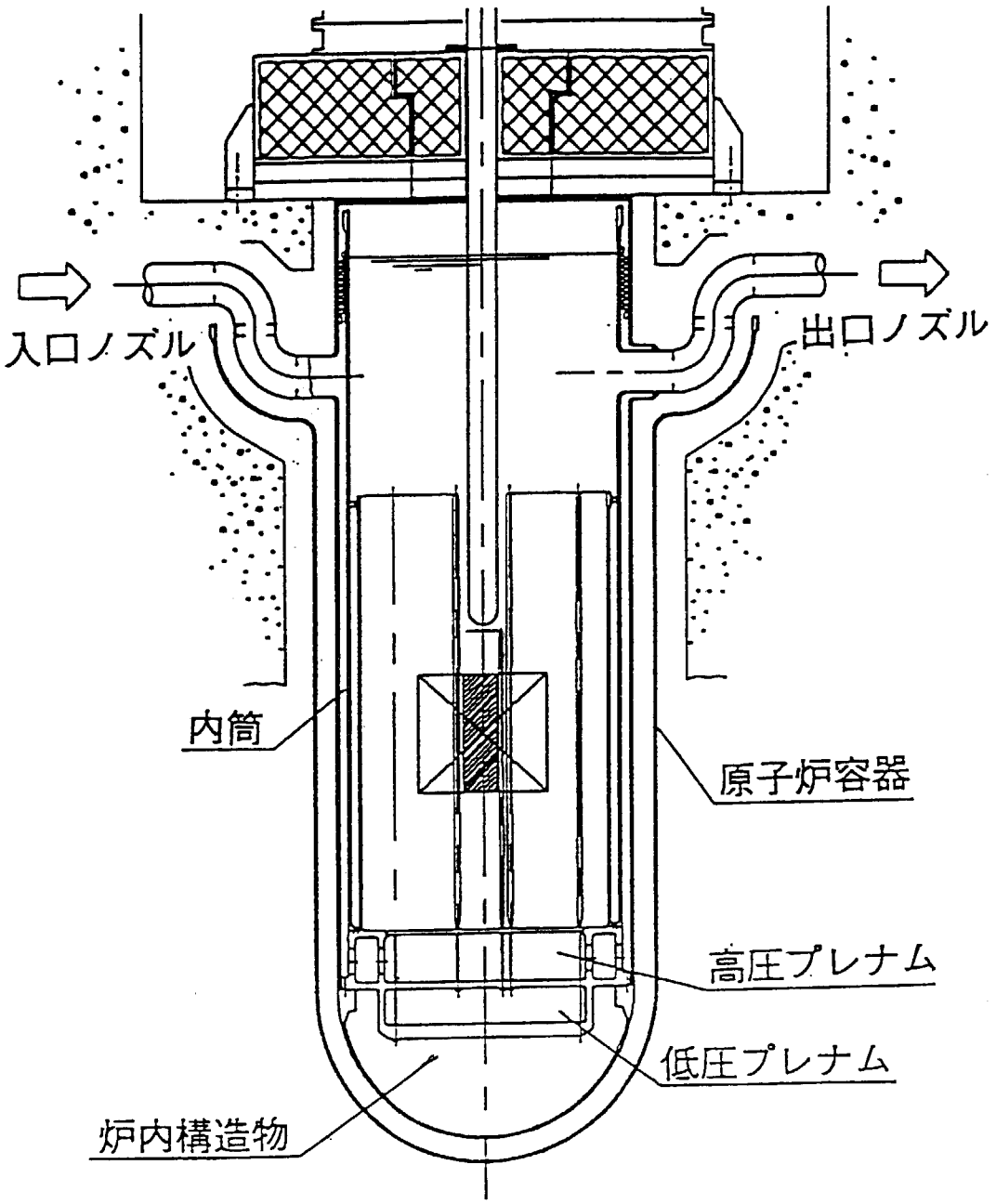


Fig.5.5.7　消滅処理実験炉の原子炉支持構造及び原子炉構造概略図

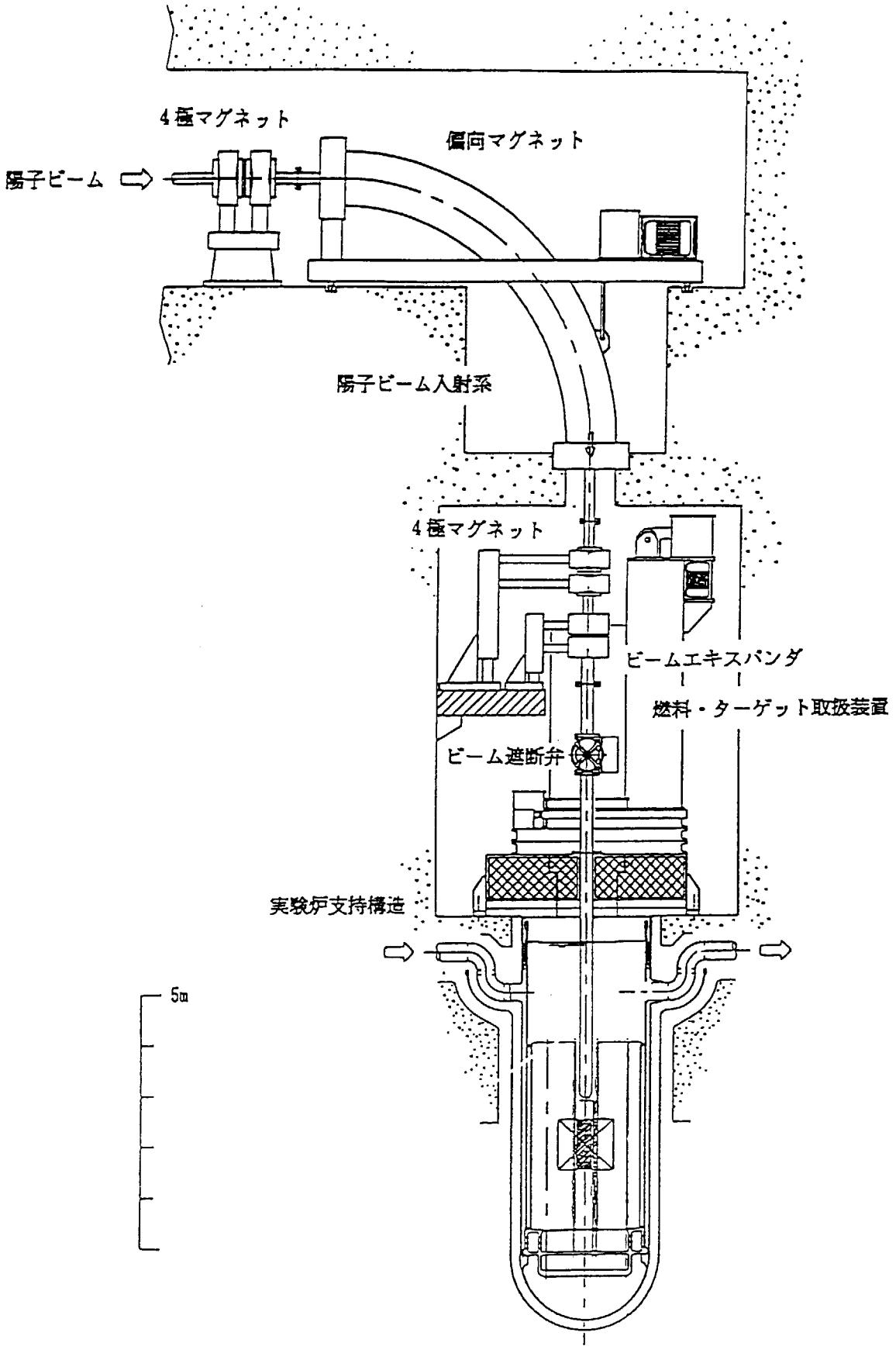


Fig.5.5.8　消滅処理実験炉の炉心廻り構造概略図

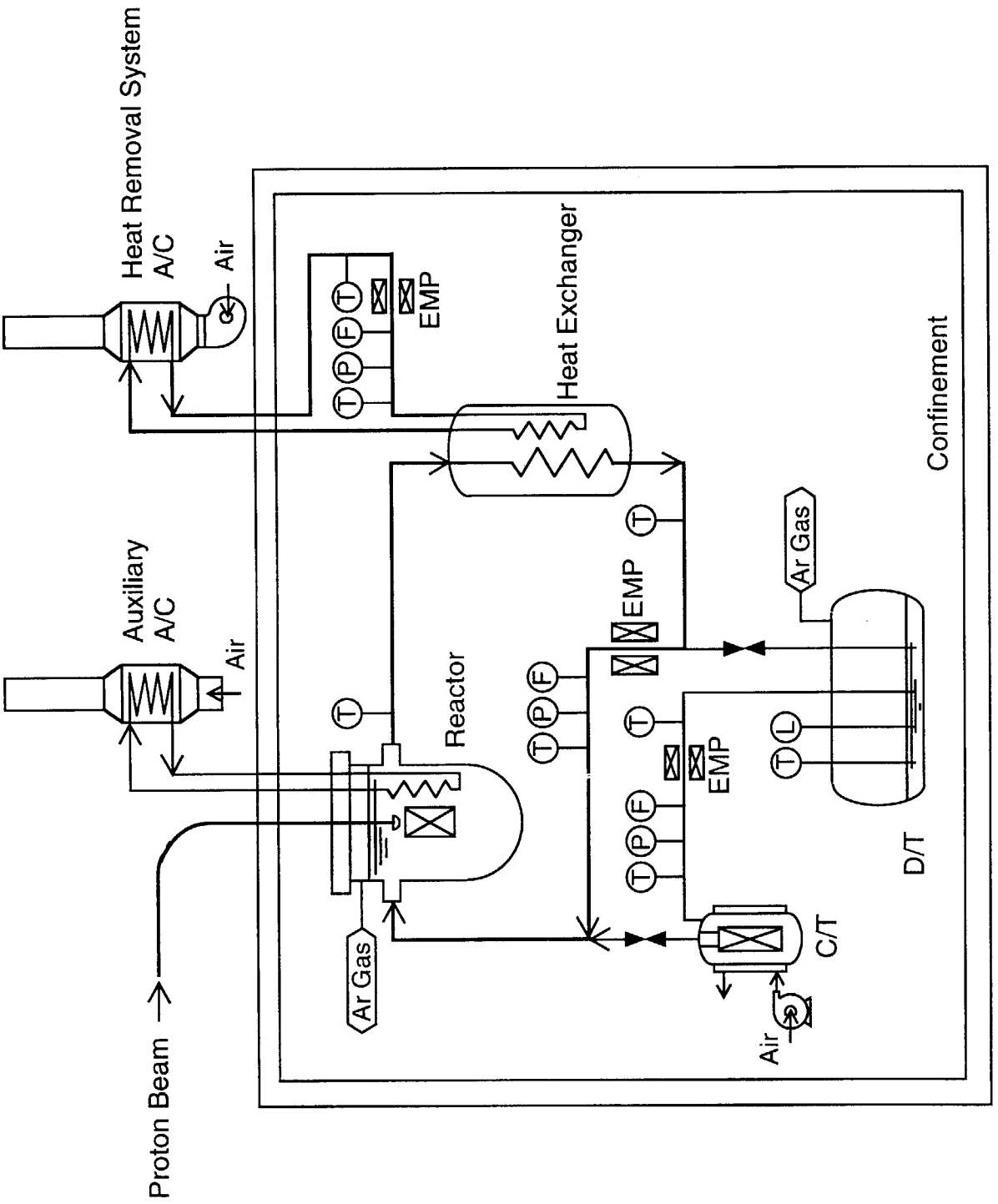


Fig.5.5.9 消滅処理実験炉の冷却系統図

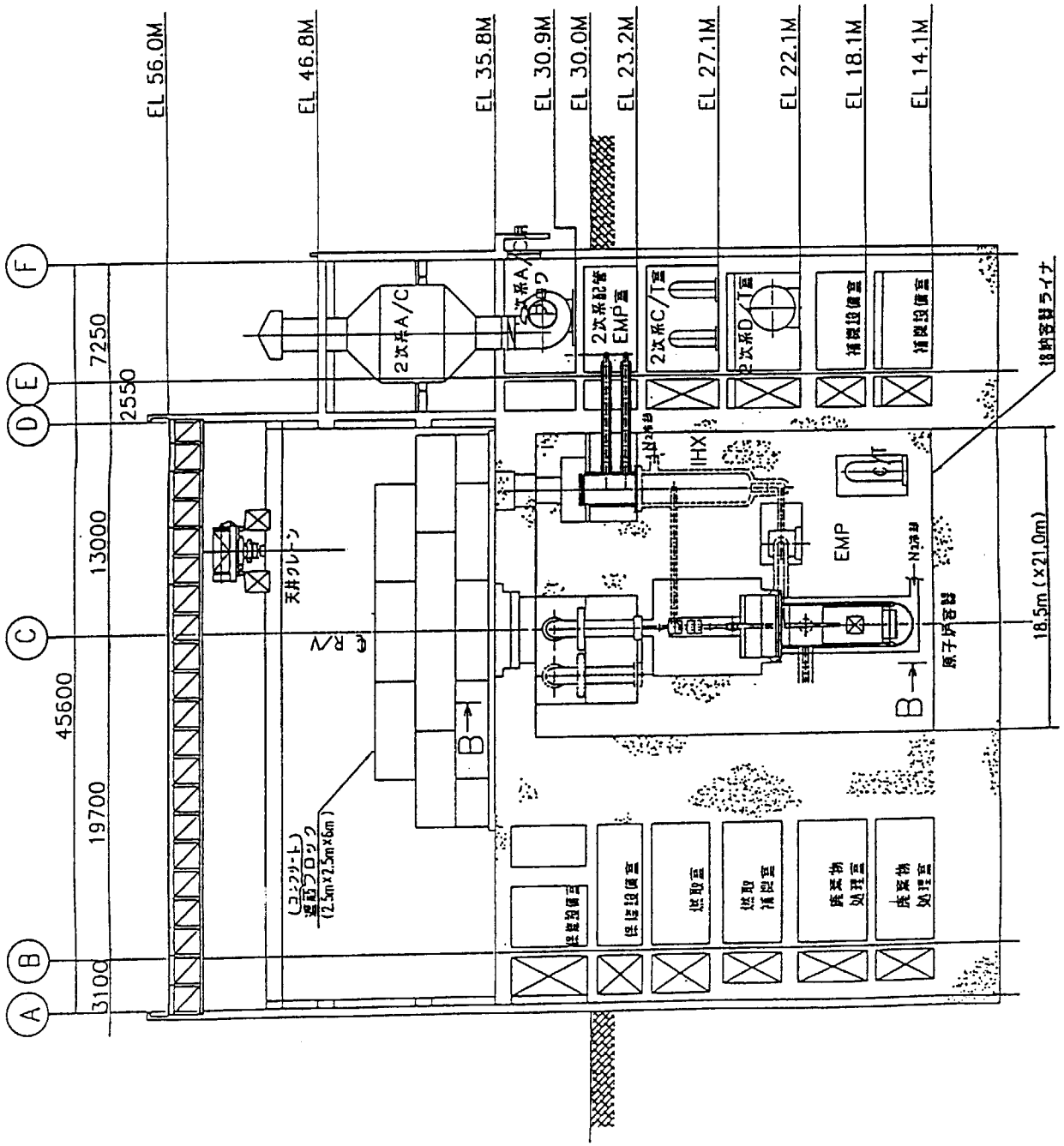


Fig.5.5.10 消滅処理実験炉原子炉建屋全体配置概念図（断面 A-A'）

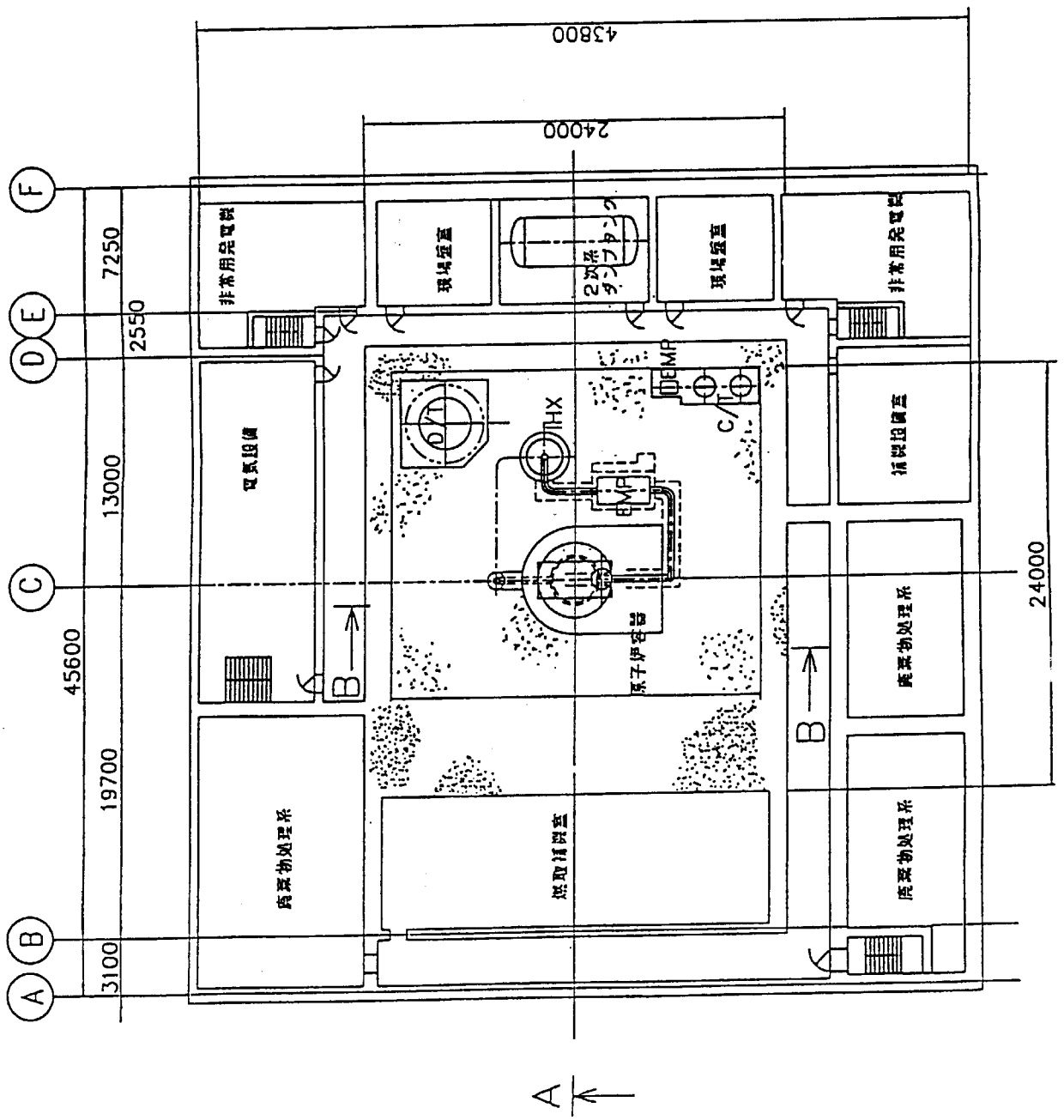


Fig.5.5.11　消滅処理実験炉原子炉建屋全体配置概念図（EL22.1M）

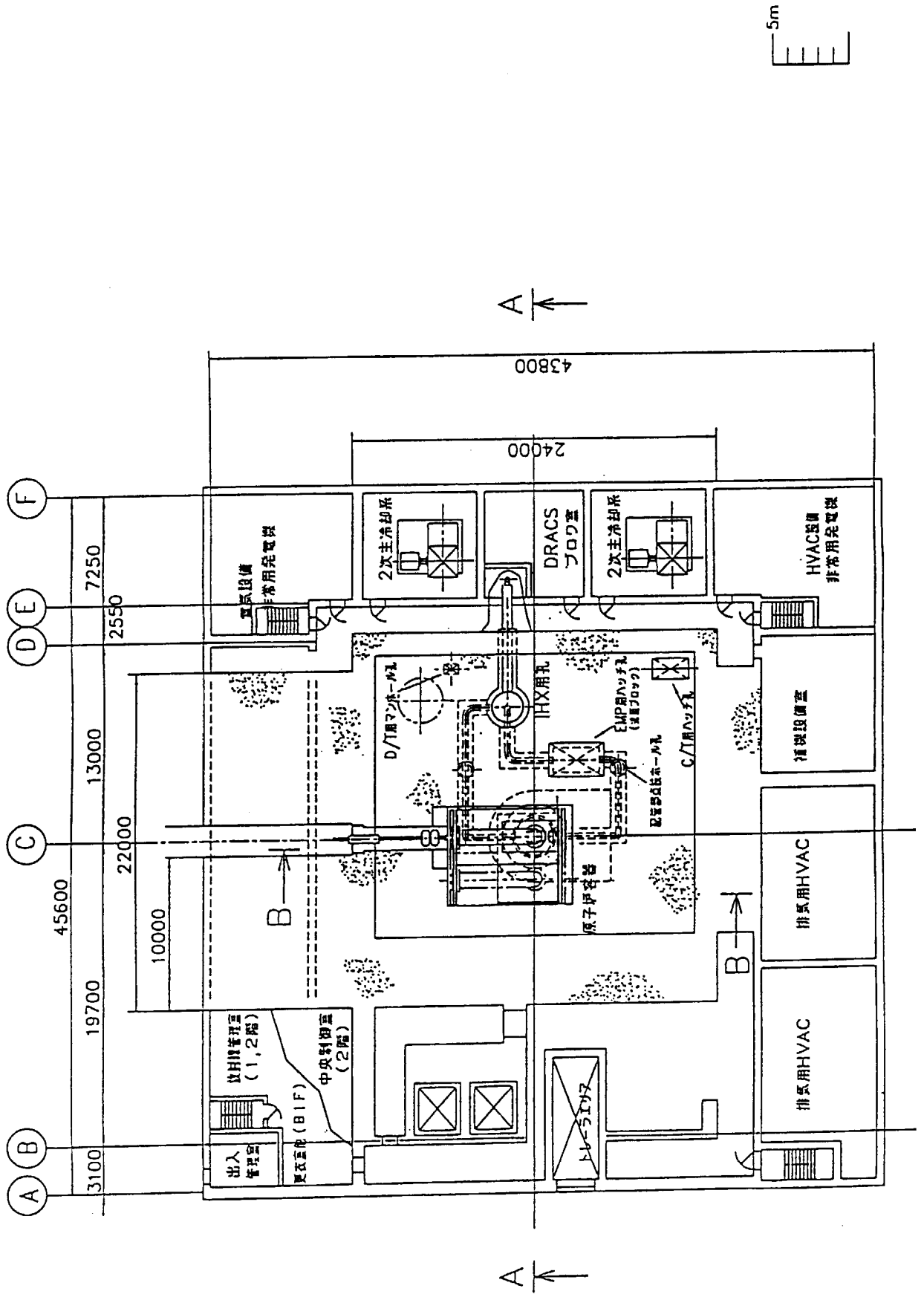


Fig.5.5.12　消滅処理実験炉原子炉建屋全体配置概念図（EL30.9M）

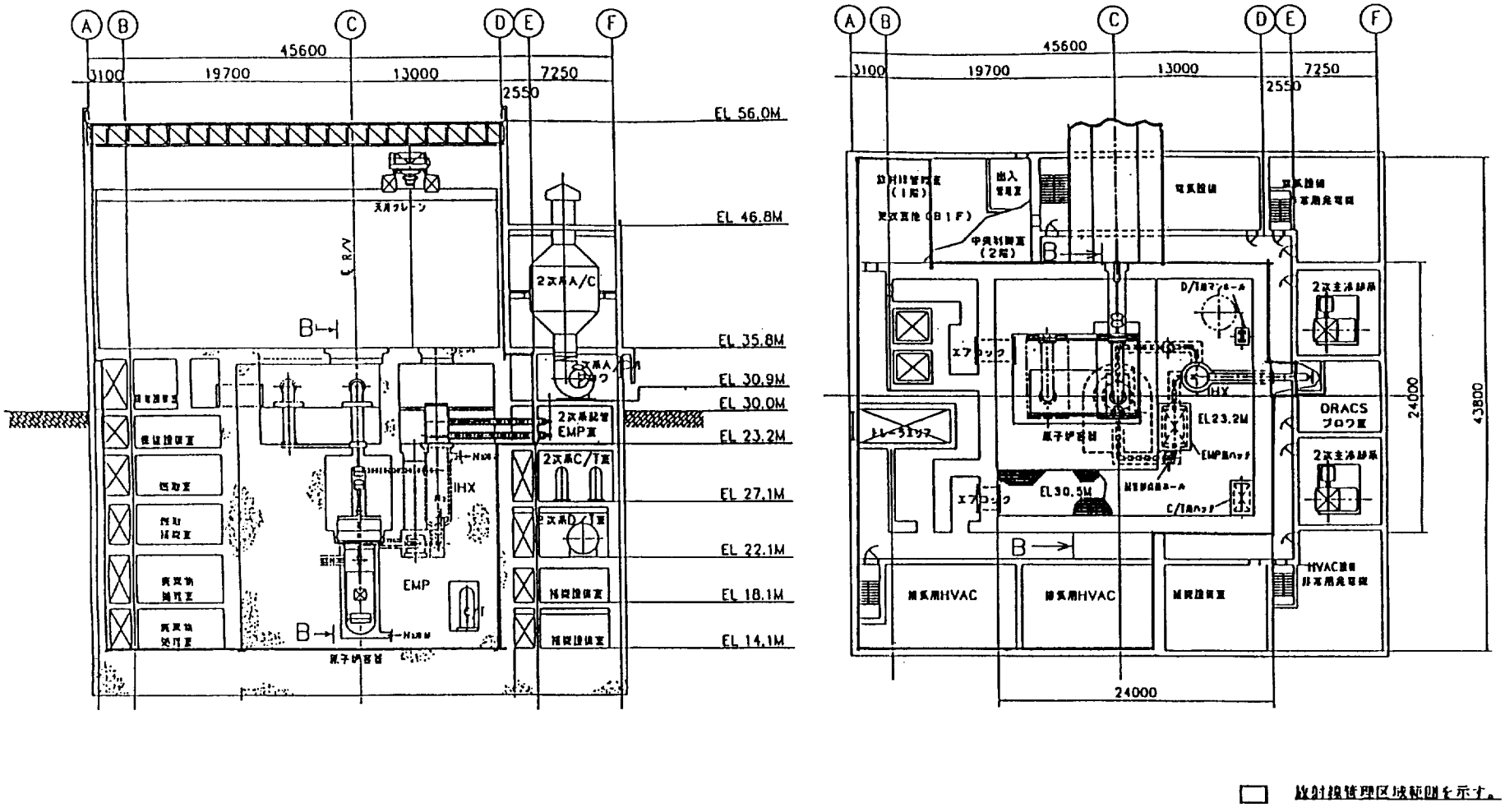


Fig.5.5.13 消滅処理実験炉放射線管理区域範囲の概念図

5．6　関連研究開発

（1）コード開発・データベース整備

米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) との協力及び国際科学技術センター (ISTC) プロジェクトによりマイナアクチノイド (MA) 核種の核データ測定を行った。また、2001 年に公開することを目指して JENDL アクチニドファイル (89 アクチニド核種、20 MeV まで) 及び JENDL 高エネルギーファイル (122 核種、3 GeV まで、陽子及び中性子) の整備を進めている。MA の中性子断面積データの評価のために FCA において中性子スペクトルを系統的に変化させた一連の積分実験を行ない、核データ精度の検証を行った。鉛体系による核破砕積分実験を高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の施設を利用して実施し、高エネルギーデータの取得及び計算コードの精度検証を行った。

燃料物性データ整備については、MA 窒化物の熱伝導度、蒸発挙動、MA 合金系の相関係及び合金化挙動等のデータを取得した。

専焼高速炉設計コードシステム ABC-SC 及び液体金属冷却高速炉心過渡挙動解析コード、核破砕シミュレーションコード NMTC/JAERI、加速器駆動消滅処理核設計コードシステム ATRAS の開発を進めた。

（2）燃料の開発

MA を主成分にする金属燃料では Am と Np の２つの金属相が形成されることが状態図測定から分かり、その熱的性質から高出力密度が達成できないことが明らかになった。このため窒化物系燃料を第 1 候補として、MA 燃料サイクル技術の開発を進めている。窒化物燃料は固溶性、組織安定性に優れており、また熱伝導率が大きく、融点も高い。また、コンパクトな乾式再処理法 (高温化学再処理) を採用することができる。窒化物燃料の溶融塩電界再処理を中心とする消滅処理燃料サイクル概念の検討を進めた。酸化物の炭素熱還元法によって高純度の Pu、Np 窒化物を生成した。これまでに JMTR において窒化物燃料の照射実験を実施し、現在常陽で照射実験を行っている。

（3）群分離技術研究開発

高レベル放射性廃液を対象として、超ウラン元素 (TRU) 群、テクネチウムー白金族群、ストロンチウムーセシウム群及びその他の 4 群に分離する 4 群群分離プロセスの開発を進めた。TRU 群の分離では、DIDPA を使用する抽出分離プロセスを、テクネチウムー白金族元素群の分離では脱硝沈殿法を、ストロンチウムーセシウム群の分離では無機イオン交換体カラム分離法をそれぞれ開発し、二次廃棄物発生量が少なく、安全性や経済性に優れた原研独自の群分離プロセスを構築した。このプロセスの高レベル実廃液試験及び化学工学的予備試験を実施している。

（4）加速器駆動システム研究開発の動向

1）チェコ

チェコ共和国は加速器駆動消滅処理技術に関する国の研究開発計画を開始した。この計画にはNuclear Physics Institute、Nuclear Research Institute plc.及びSkoda Nuclear Machinery Ltdが参加している。LR-0実験炉を利用してフッ化物溶融塩を用いた未臨界集合体の試験を行うLA-0プロジェクトを提案している。

2）フランス原子力庁 (CEA) のプロジェクト

フランスの群分離・消滅処理研究開発計画 (SPIN計画) のもとで加速器駆動消滅処理研究開発のためCEAはISAAC計画を開始した。この計画の主な分野は、大強度加速器、コード・データの開発・整備・検証、ターゲット技術、未臨界増倍システム、システム研究であり、未臨界システムの炉物理特性を確認するための高速臨界実験装置MASURCAにおけるMUSE実験及びカスケードコード検証のためのSATURNEにおける核破砕実験も含まれている。システム研究から、消滅処理には階層型燃料サイクル概念にもとづく専用システムがもっとも効果的であり、またこれには加速器駆動システムが最適であるとされている。CEAは加速器駆動システムの実証を行うため、実験システムHADRONの建設を提案している。HADRONでは高濃縮U/高富化Pu燃料を用いて実効増倍係数0.95の未臨界高速炉心を構成し、2 - 5 MWの陽子ビーム駆動によって熱出力50 - 100 MWを発生する。Na冷却/Pb冷却、U-Pu燃料/Th燃料/MA燃料、酸化物燃料/金属燃料などさまざまな技術オプションの検討を行っている。

最近、フランス国内の加速器駆動消滅処理の分野の研究開発を調整、推進するためにフランス国立科学研究センター (CNRS)、CEA及びフランス電力庁 (EdF) によってGEDEON研究グループが設立された。

フランスのトリチウム生産プロジェクトTRISPALにおいて、600 MeV-40 mAのCW陽子加速器の研究開発が行われている。

3）韓国原子力研究所 (KAERI) のHYPER計画

KAERIは1992年から消滅処理の研究を開始しているが、最近、加速器駆動システムの研究に関する長期計画HYPERを設立した。この計画では、1997年から2001年の間に主要基盤技術を開発し、2006年までに小規模の試験施設の設計を行うことを予定している。また、1 GeV-20 mAの陽子加速器の開発を目標とした韓国の多目的線形加速器開発計画KOMACが開始された。

4）ロシア

加速器駆動消滅処理に関してロシアは豊富な人材、優れた技術、施設を有している。現在、原子力産業省の提唱している群分離・消滅処理研究計画に多数の研究機関が参加しているが、全体として研究開発は統一性、整合性に欠けている。

この分野のほとんどの活動は国際科学技術センター (ISTC) の国際プロジェクトの枠組みのなかで進められている。

5）スウェーデン

加速器駆動消滅処理システム研究プロジェクトの推進、調整を行うために、Charmers 工科大学、王立工科大学、Stockholm 大学 Manne Sigbahn 研究所、Uppsala 大学により研究グループが設立された。ここでは、システム研究及び成立性の検討を行っており、またいくつかの国際協力を進めている。

6）スイス ポール・シェラー研究所 (PSI)

PSI では、加速器駆動消滅処理に関して ATHENA 実験及び解析的研究を行っている。ATHENA 実験では、PSI サイクロトロンからの 0.6 GeV 陽子をアクチノイドのターゲットに入射し、高エネルギー核分裂モデル検証のためのデータを取得している。解析的研究は消滅処理特性の検討、有効性の比較等を目的としている。

7）米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) の ATW プロジェクト

LANL は ADTT プログラムのもとで、消滅処理、Pu 燃焼、発電への応用を目指して加速器駆動システムの研究を進めてきた。このプログラムのなかで消滅処理を目的としたサブプロジェクトが ATW である。最初に提案された ATW は高熱中性子束でのいわゆる 2 段階反応を利用して MA を消滅処理するユニークな概念であった

最近になって、ADTT プロジェクトは熱中性子を用いる初期の概念を放棄し、消滅処理を目的とした Pb-Bi 冷却金属燃料の高速中性子システムへと方針を変更した。

LANL は加速器駆動システム実験計画 LIFT を提案している。このなかで、Pb-Bi のループ流動・腐食実験及 LANSCE の 1 MW ビームを用いた液体 Pb-Bi ターゲットの実験を行い、さらに熱出力ー5 MW のターゲット/ブランケットの実験を行うことが計画されている。

米国は、加速器によるトリチウム生産プロジェクト APT を進めており、1996 年から設計と技術実証が開始された。1.6 GeV-250 mA の CW 超伝導線形陽子加速器の開発及び LANSCE を用いた材料照射実験、要素技術開発等が行われている。

8）米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL)

BNL は、FFTF と同様の Na 冷却酸化物燃料の未臨界高速炉心をもつ加速器駆動システム PHOENIX の概念を提案している。このシステムは Pu、MA 及び I-129 の消滅処理を目的とし、実効増倍係数が 0.9 - 0.95 の未臨界炉心は 1.6 GeV-104 mA の陽子ビーム駆動により熱出力 3600 MW を発生する。

9）英国

英国は、米、仏と同様に加速器によるトリチウム生産のプロジェクトを進めている。3 年間のフィージビリティー研究が終了し、次の 3 年間で大強度加速器 (ー35 MW) の入射部開発等の R&D を進める。

１０）ベルギー

SCK/CEN を中心とした医療用ラジオアイソトープ製造を目的とした加速器駆動システムの研究開発プロジェクト ADONIS は MYRRHA プロジェクトに進展した。このプロジェクトでは、より多目的の小型原型加速器駆動システムを目指した研究開発が進められている。

１１）欧州合同原子核研究機関 (CERN) の EA プロジェクト

CERN では、ThU 燃料サイクルにもとづいたエネルギー生産を目的として、「エネルギー増幅器 (EA)」と名付けた加速器駆動システムの研究開発が積極的に進められている。当初の設計は加圧軽水冷却熱中性子システムであった。現在のシステム概念は、1 GeV-12.5 mA のサイクロトロンで駆動される酸化物燃料高速炉心をもつものになっている。実効増倍係数が 0.98 の炉心は熱出力 1500 MW を発生し、液体鉛の自然循環によって冷却される。最初の実証 EA プラント用には、サイクロトロンでなく超伝導線形加速器オプションが考えられている。

CERN では、EA 概念の成立性を実証するための実験 FEAT を行った。この実験では 3600 kg の天然 U アセンブリを 1 - 3 GeV の陽子ビームを照射し、発熱の測定を行った。また、長寿命 FP の消滅処理を目的とした実験 TARC を開始した。

スペイン Aragon 自治州に建設を計画している実証システム研究のための国際コンソーシアム LAESA を設立し、200 MeV 単段サイクロトロン駆動 100 MW 熱出力のシステムの検討を行っている。

１２）経済協力開発機構/原子力機関 (OECD/NEA) プログラム

OECD/NEA では、加速器駆動消滅処理に関連したいくつかの会議を開催している。また、特に加速器駆動システムが対象とする中間エネルギー領域に重点をおいて、核データライブラリーの作成、計算コードのベンチマーク等の活動を行っている。

１３）国際原子力機関 (IAEA) プログラム

IAEA では、加速器駆動システムに関するステータスレポートを作成した。このレポートは、各国で進められている加速器駆動システム研究開発の現状、システム概念等をオーバービューしている。また、「トリウム燃料サイクルの可能性」に関する調整研究プログラムのもとで加速器駆動システムのベンチマークを行っている。加速器駆動システムに関する技術委員会会議を開催した。

１４）欧州委員会 (EC) プロジェクト

加速器技術が原子力安全に与える影響を評価する EC のプロジェクト IABAT が進められている。このプロジェクトでは、加速器駆動システムのシステム研究、加速器技術の評価、燃料サイクルの放射性毒性及び核不拡散性の検討、核データ及び材料データの取得等が行われる。欧州の多数の研究機関及び大学がこのプロジェクトに参加している。

6．基盤技術

6．1　ニュートロニクス

6．1．1　コード開発

（1）高エネルギー粒子輸送計算コード

核破砕ターゲットの核設計では、中性子発生源となる高エネルギー陽子と核破砕ターゲット構成原子核との核反応及びこれによって生成する様々な粒子の挙動を正確に把握し、中性子発生、発熱分布、残留核分布等の物理量を精度良く予測することが必要である。これまで、核破砕中性子源の核設計では、高エネルギー粒子輸送コードとエネルギーが20MeV以下の中性子・光子輸送コードを接続した計算コードシステムが用いられている。前者は 20 MeV 以上のエネルギー領域の核反応及び粒子輸送をモンテカルロ法で取り扱うものであり、JENDL 等の評価済み核データに基づく断面積データを用いることなく、原子核内の素過程（核子・核子または核子・中間子衝突）の断面積を用いて核反応をシミュレーションする。従って、軽水炉・高速増殖炉の核設計に用いられるコードとは異なる。

高エネルギー粒子輸送コードは、1960年代に米国で NMTC (Nucleon-Meson Transport Code)[1] として開発、公開された。その後、各研究所においてコードの改良、整備が進んだ。NMTC の開発の流れとは別に CERN では FLUKA コード[2] が開発・整備されているが、一般公開はされていない。Fig.6.1.1にオリジナルのNMTCを基にしている主要な高エネルギー粒子輸送コードの開発の変遷を示す。現在、最も盛んに整備活動を行っているのはロスアラモス研究所（LANL）であろう。この他、ロシアにおいても独自にコード開発は進められてきた。原研では、中原らが NMTC コードを導入し、これを拡張・整備して NMTC/JAERI コード[3] とした。現在の核破砕ターゲットの核設計では、Fig.6.1.2に示すように NMTC/JAERI コードと MCNP4A コード[4] を接続したコードシステムを用いている。

NMTC/JAERI コードについては、近年の中・高エネルギー領域の核反応過程研究、新しい

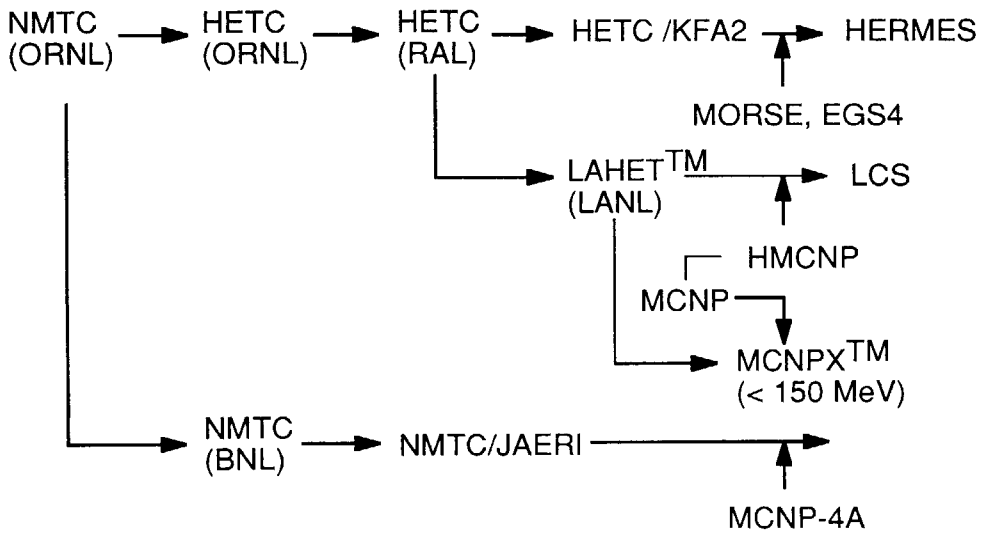


Fig.6.1.1　主要な高エネルギー粒子輸送コードの開発の変遷

データベースの整備活動を通じて得た知見に基づいて、これまでに次に示す改良を行ってきた。

1）従来の計算コードで用いられていた核子・原子核反応断面積について、入射エネルギーに依存しない幾何形状断面積が用いられていた。しかしながら、100 MeV 以下のエネルギー領域では核子・原子核反応断面積は入射エネルギーに強く依存するため、これをNMTC/JAERI で取り扱えるように、断面積データ（全断面積、弾性散乱断面積、弾性外散乱断面積）を整備し、コードに組み込んだ。

2）原子核の平均場の効果として、反射・屈折及び媒質効果を考慮した核子-核子散乱断面積を取り入れることによってNMTC/JAERIの核反応計算に用いられている核内カスケードモデルの 200 MeV 以下のエネルギー領域の計算精度を向上させた。

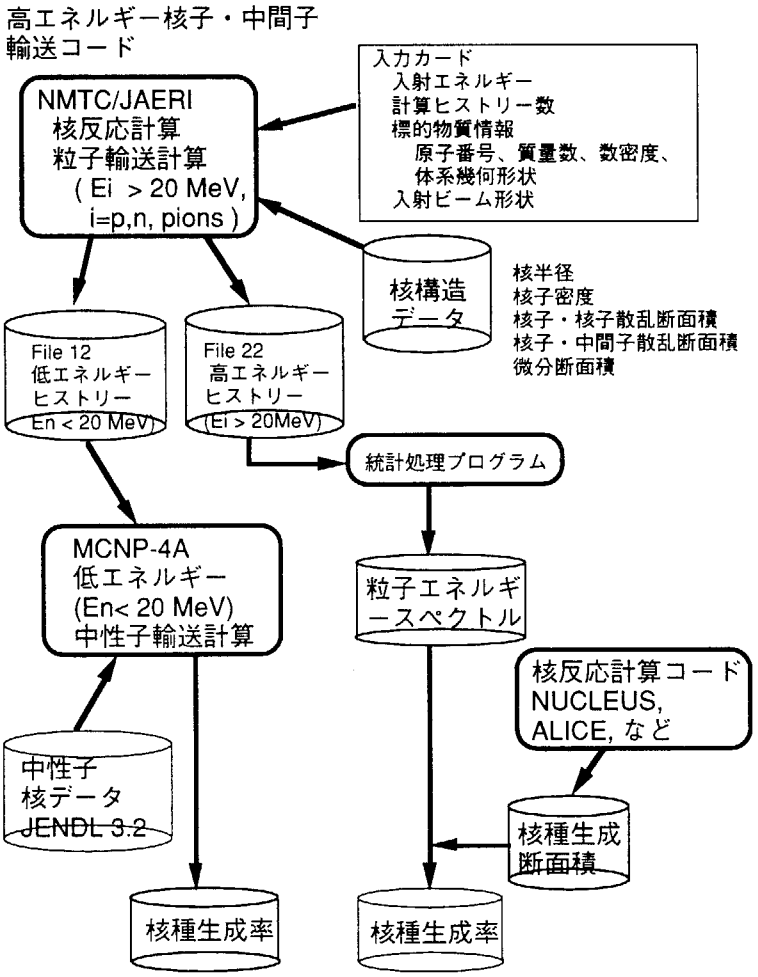


Fig.6.1.2 NMTC/JAERI-MCNP4A コード システムの計算の流れ

3）計算機の急速な発達により、ワークステーションでも十分高速な演算が可能となっている。このため、上記した物理的側面のほかに、 NMTC/JAERIをUNIX 上で実行できるように調整し、新しい機能として多重配列システムを用いた結合型幾何形状記述方式を導入すると共にインポータンスサンプリング手法をコードに組み込んだ。

4）4）中性子エネルギースペクトル、発熱率及び核種生成率等の物理量をヒストリーファイルを編集することなく求めるために、タリー機能を導入した。

5）核反応におけるγ線放出率評価モデルの組み込み、タリー機能の追加を行った。

6）NMTC/JAERIコード を MCNP4A コードと接続して用いる場合に両コード用の入力データが必要となるほか、出力も別となり、煩雑となるため、これらを統合したコードシステムとしての利便性を向上させた。

7）また、以上に加えて、核破砕中性子源ターゲットのように複雑な体系の幾何形状入力補助のため、幾何形状確認ツールの整備を進めている。

（2）誘導放射能計算コードの開発

核破砕中性子利用施設の設計では、高エネルギー陽子を用いて照射する核破砕ターゲットの誘

導放射能、崩壊熱等を評価することは、放射線安全、廃棄物管理の観点から重要である。核破砕生成核種の崩壊生成解析を行うコードとしては、ORIHETコード、CINDER'90 コード等が開発・整備されているが、一般公開されていない。

このため、核種の崩壊生成解析コード DCHAIN2 を基にして、核種に関する最新の崩壊データを中性子反応断面積データを加えて、核破砕核種の崩壊特性を計算できるように改良したコード DCHAIN-SP を完成させた。本コードでは、NMTC/JAERI 97 コードによって評価された核種生成率を入力とし、崩壊系列における核種の崩壊生成をBeteman 法で解く。DCHAIN-SPは、EAF-3.1, FENDL/D-1等の評価済み核データファイルの他、Table of Isotope 等のデータ集を基に、番号原子が 1 ～ 103 の範囲の3139 種類の核種に対する半減期、崩壊系列、崩壊エネルギー等の崩壊データベースを整備し、これらの核種の放射能量 、崩壊熱が計算できる。これらの核種のうち、 2181 種類については、放出γ線エネルギースペクトルデータを格納しており、残留核からのγ線スペクトルも計算できる。ここで、 735 核種の13005 種類の反応について、FENDL/A-2データファイルの中性子反応断面積データを用いて、体系中に形成される 20 MeV 以下の中性子場による反応で他の核種に変化することも考慮される。Fig.6.1.3に核破砕ターゲットの誘導放射能計算の流れを示す。

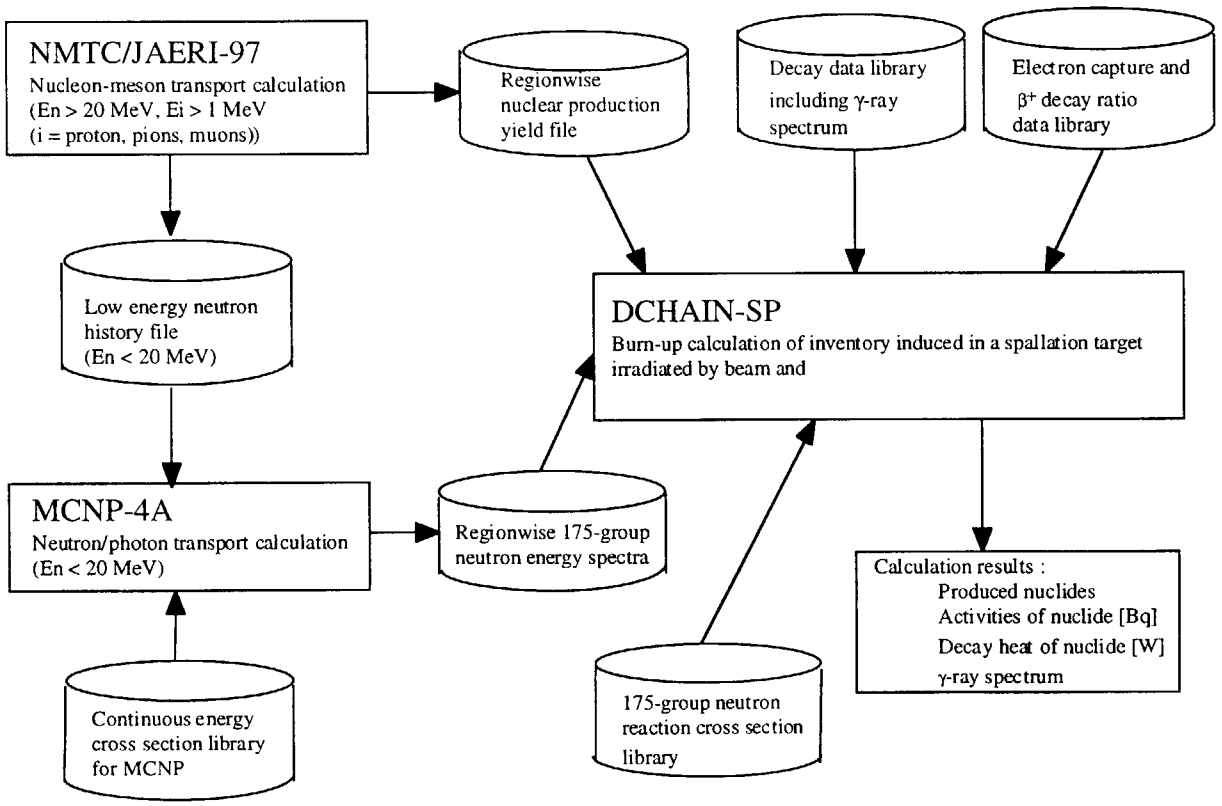


Fig.6.1.3 核破砕ターゲットの誘導放射能計算の流れ

DCHAIN-SP を中心とした本計算コードシステムは、中性子科学研究計画における各施設の安全性評価の基準として用いることを想定しており、現在、一般公開に先だってコードシステム、データライブラリーの妥当性テストを実施している。

参考文献

1）Coleman W. A., Armstrong T. W.: "The Nucleon-Meson Transport Code NMTC", ORNL-4606, (1970).

2）Fasso A., Ferrari A., Ranft J., Sala P. R.: "FLUKA: Performance and Applications in the Intermediate Energy Range", Proc. Of Third Specialists' Mtg. on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities (SATIF-3), SENDAI, Japan, 12-13, May, 1997, OECD Documents, 287 (1970), and references therein.

3）Nakahara Y., Tsutsui T.: "NMTC/JAERI A Code System for High Energy Nuclear Reactions and Nucleon-Meson Transport Code", JAERI-M 82-198, (1982), [in Japanese].

4）Briesmeister J. F. (Ed.) : "MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A", LA-12625 (1993).

6．1．2　高エネルギー粒子実験

（1）目的

前節で述べたように、核破砕中性子源の核設計では中性子ソースタームの評価のために、高エネルギー核子・中間子輸送コードを用いて 20 MeV ～数 GeV のエネルギー領域における核破砕反応及び粒子輸送計算を行う。

このエネルギー領域では、実験的研究の進展により次第にデータが生産されてきているが、データ数はまだ不十分であり、理論計算に負うところが大きい。詳細な核設計を行うためには、精度良い高エネルギー核子・中間子輸送コードが必要である。積分実験では、核破砕ターゲット及び未臨界炉心と核的に性質が似た物質からなる体系を用いた積分実験等により、核破砕反応及び核破砕中性子に関するデータを取得し、高エネルギー核子・中間子輸送コードの精度の検証、高精度化を行うことを目的とする。微分実験では、主に単色エネルギー中性子源を用いて、施設設計で重要となる核反応断面積を系統的に測定しデータベースの蓄積を図ることを目的とする。

（2）実験方法

1）核破砕積分実験 [1, 2]

実験に用いた鉛体系の概要図をFig.6.1.4に示す。鉛体系は直径 60 cm、長さ 100 cmで、陽子は直径 10 cm、長さ 20 cm の陽子入射孔を通って鉛体系内部のターゲット（直径 16 cm、長さ 30 cm）に垂直に入射される。体系には軸方向及び径方向の異なる位置に入射軸と平行に、検出体ペレットの挿入孔が作られている。実験条件は次のとおりである。

実験施設：高エネルギー加速器研究機構（KEK）ブースタービームダンプ室
検出体ペレット：アルミ、鉄、ニッケル、銅、ニオブ、金、鉛
検出体ペレット形状：直径8 mm、長さ1～5 mm
陽子ビーム：500 MeV
ビーム強度：～ 1.5×10^{12} 陽子／パルス、パルス幅、約 50 nsec
ビーム形状：（近似）ガウス分布、
　　半値幅（水平方向約 17 mm、垂直方向約 20 mm）
投入陽子数：2×10^{14}～2×10^{15} 個／実験

照射後約３０時間冷却した後、Ge 検出器を用いて検出体ペレットのγ線スペクトルを測定する。γ線スペクトル解析コード BOB 等を用いて測定データを解析し、ピーク面積を求め、半減期による減衰、Ge 検出器のピーク検出効率、サムピーク等の補正を行い、検出体ペレット中の核種生成率を求める。

２）核破砕中性子エネルギースペクトル測定[3)]

核破砕中性子エネルギースペクトル測定の概要図をFig.6.1.5に示す。実験条件は次のとおりである。

実験施設：KEK 12 GeV 陽子シンクロトロン施設、π２ビームライン
入射陽子エネルギー：0.5 GeV、1.5 GeV
ターゲット：鉛
寸　法：縦 15cm、横 15cm、厚さ 20cm
測定方法：飛行時間法
検出器：NE-213 有機液体シンチレータ、（直径12.7 cm、厚さ12.7 cm）
　　NE-102A プラスチックシンチレータ　（VETO 検出器）
　　PILOT-U プラスチックシンチレータ　（入射粒子弁別検出器）
測定角度：15°、30°、60°、90°、120°、150°
飛行距離：1.5 m (15° のみ)、1 m

中性子とγ線によるパルスの立ち上がりと減衰に差が生じることを利用してこれらを弁別する（ゲート積分法）。中性子の飛行時間スペクトルを基に、検出効率、バックグランド成分等を補正する事によってエネルギースペクトルを導出する。ターゲットが厚いために、エネルギーが低い中性子についてはターゲット内で散乱を起こす確率があり、これにより飛行時間がゆらぎ、正確なエネルギーが得られない可能性がある。飛行時間誤差を除くために、波高分布データをアンフォールディングすることにより、スペクトルを求める。

３）TIARA における単色中性子微分実験[4, 5)]

TIARA における中性子測定の概要図をFig.6.1.6に示す。実験条件は次のとおりである。

実験施設：原研・高崎研 AVF サイクロトロン照射施設（TIARA）HB-1 コース
入射陽子エネルギー：68 MeV、（220 MeV C 粒子、100 MeV α粒子）
ターゲット：金、カーボン、銅、（ニオブ、アルミ）
寸　法：縦 3.0cm、厚さ 0.6 cm （金）、 0.73 cm （銅）、3.1 cm （カーボン）
測定方法：飛行時間法
検出器：BC-501A 有機液体シンチレータ、（直径12.7 cm、厚さ12.7 cm）
測定角度：0°、7.5°、15°、30°、45°、60°、90°、120°
飛行距離：5 m (0° ～60°)、2.5 m (60° ～120°)

同様に中性子とγ線を弁別し、中性子の飛行時間スペクトルを基に、検出効率、バックグランド成分等を補正する事によってエネルギースペクトルを導出する。２）の実験に比べてターゲットが充分薄いため、低エネルギー中性子の飛行時間のゆらぎはない。

（３）実験解析

実験の解析にはNMTC/JAERI-MCNP4A コードシステムを用いる。核破砕積分実験の解析計算では、鉛体系をR－Z座標系の2次元円筒とし試料挿入孔として半径方向 1.5 cm 幅、長さ 2.5 cm の円環領域を取り、飛跡長評価法によって中性子束を計算した。ここで、試料と挿入孔の間に生ずる空隙についても計算では考慮した。中性子束の計算では、20 MeV 以上の粒子輸送計算をNMTC/JAERI を用いて行い、次に20 MeV 以下の中性子輸送計算を連続エネルギーモンテカルロコード MCNP-4A を用いて行った。計算ではビーム形状を水平方向、垂直方向共に半値幅 1.75 cm のガウス分布とし 100 万個の入射粒子数についてヒストリーを求めた。

反応率の計算のために、核種生成断ñ積として20 MeV 以下については評価済みデータライブラリ JENDL ドシメトリファイル に収納されている値を、20 MeV 以上のエネルギー領域については、ALICE-F コードによる計算値を各々用いた。

中性子スペクトルの解析計算では、陽子ビームの形状は直径 1 cm の円形とし、ターゲットを中心に半径 80 cm の球面を設定し、ビーム入射方向に対して 0 ～ 150° の間の各データ測定角度の法線方向に対して垂直な幅 12.7 cm の平面 を横切る中性子数を求めて、中性子スペクトルを算出した。

（4）結果

1）核破砕積分実験

Fig.6.1.7 に鉛ターゲットを装荷した鉛体系における ^{nat}Ni (n,p)^{58}Co 反応（しきい値、1 MeV）の反応率空間分布を示す。反応率は3桁の範囲で取得した。NMTC/JAERI コードと MCNP4A コードを接続した計算を行い、実験と比較すると両者は非常に良く一致した。

Fig.6.1.8 に鉛ターゲットを装荷した鉛体系における ^{197}Au (n,4n)^{194}Au 反応（しきい値、23 MeV）の反応率空間分布を示す。この場合については、実験よりも計算はかなり低い値を示すことがわかった。この傾向は ^{27}Al(n, α) ^{24}Na（しきい値、3.2 MeV）、 ^{93}Nb(n,2n) ^{92m}Nb（しきい値、9 MeV）等の反応率空間分布でも系統的に見られる。

ターゲット部分を鉛からタングステンに置き換えた体系を用いた実験も行っており、計算と実験には同様な傾向が見られることを確認した。不一致の原因としては、20 MeV 以上の領域の核種生成断面積の精度が十分に検証されていないので、この不確定性が一つ、現段階では計算コード（NMTC/JAERI）の中性子スペクトル予測精度の問題に起因する点が大きいと考えられる。コードについては、20 ～ 80 MeV のエネルギー領域の輸送計算に用いている断面積（全断面積、弾性散乱断面積）の検討及び核破砕反応計算モデルの見直しを行っている。

2）核破砕中性子エネルギースペクトル測定

Fig.6.1.9 に 15x15x20 cm^3 の鉛ターゲットに 0.5 及び 1.5 GeV 陽子を入射した場合の中性子エネルギースペクトル解析結果を示す。これまでの NMTC/JAERI-MCNP-4A コードシステム による計算（点線）は 15° ～120° の全ての測定角度で 20 ～80 MeV のエネルギー領域において実験よりもかなり低い値を与えている。このエネルギー領域の不一致は 4.1）で示した積分実験における高しきい値反応の実験と計算の不一致と定性的に一致している。不一致の原因として、鉛の輸送断面積の妥当性の問題、前平衡過程からの中性子放出率 予測精度の問題が挙げられる。

3）TIARA における中性子測定

Fig.6.1.10 に 68 MeV 陽子を金ターゲットに入射した場合の中性子エネルギースペクトル解析結果を示す。ここで、前平衡過程を考慮した NMTC/JAERI（3 STEP オプション）と原子核媒質

効果を考慮した核子一核子散乱断面積及び核子の反射・屈折を考慮した NMTC/JAERI（ISOBAR オプション）の２通りの計算を行った。3 STEP オプションの結果は 7.5° ～ 30° 方向の 20 MeV 以上のエネルギー領域で実験よりも数倍から 10 倍大きいが、45° ～ 120° 方向 については実験と良く一致する。一方、ISOBAR オプションの結果は 7.5° ～ 30° 方向の 10 ～ 35 MeV のエネルギー領域で実験よりも数十%中性子収量 が少ないけれども、3 STEP オプションの不一致を顕著に改善し、実験を良く再現している。これにより、数十 MeV 領域の陽子入射中性子生成に関する NMTC/JAERI-MCNP-4A コードシステムの計算精度は向上した。

（５）まとめ

中性子科学研究計画で提案している研究施設における核破砕ターゲット、ビームダンプ、の核設計並びに放射線遮蔽設計、加速器構成機器の放射化評価には、核破砕反応及び中・高エネルギー粒子輸送を正確に計算できるコードは必須である。今後も設計コードの精度評価及び改良に役立てる実験的研究を進めて行く。

これまでに数十 MeV ～ GeV のエネルギー領域の陽子を厚いターゲットに入射させて、核種生成率空間分布、中性子エネルギースペクトル測定を行い、このエネルギー領域の核破砕反応、核破砕中性子の輸送に関するデータを得た。また、これらのデータを用いて高エネルギー核子・中間子輸送コードについて輸送断面積、核反応計算モデルの改良を行い、コードの予測精度をある程度向上させることができた。

参考文献

1）Takada H., et al.: “Measurement of Reaction Rate Distributions in a Lead Assembly Bombarded with 500 MeV ProtonsÅh, Proc. of the 3rd Workshop on Simulating Accelerato Radiation Environments (SARE3), May 7-9 1997, KEK, Tsukuba, Japan, KEK Proceedings 97-5, pp.284-292, (1997).

2）Takada, H., Meigo, S.,Sasa, T., Tsujimoto, K.: “ Measurement and Analysis of Reaction Rate Distributions in A Lead Assembly Containing Tungsten Target with 500 MeV Proton BombardmentÅh, Proc. of 14th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, ICANS-XIV, June 14-19, 1998. Starved Rock Lodge, IL, (to be published).

3）Meigo, S., et. al.:"Measurements of Spallation Neutrons from a Thick Lead Target Bombarded with 0.5 and 1.5 GeV Protons", Joint Proc. of the 13th Mtg. of the Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources held at Paul Scherrer Institute, Oct. 11-14, 1995 and 4th Plenary Mtg. of the European Spallation Source Project, ESS, held at Weinfelden, Oct. 16-19, 1995, PSI-Proceedings 95-02, pp. 442-453 (1995).

4）明午、他：”厚いターゲットからの生成中性子スペクトル測定と解析”、研究会「高エネルギー中性子の挙動」、1996 年 3 月 5～ 6 日、東北大ラジオアイソトープセンター、原子核研究、Vol.41, No.3, pp.49-58, (1996).

5）高田：”核内カスケードモデルを用いた陽子入射実験解析”、研究会「高エネルギー中性子の挙動」、1996 年 3 月 5～ 6 日、東北大ラジオアイソトープセンター、原子核研究、Vol.41, No.3, pp.39-47, (1996).

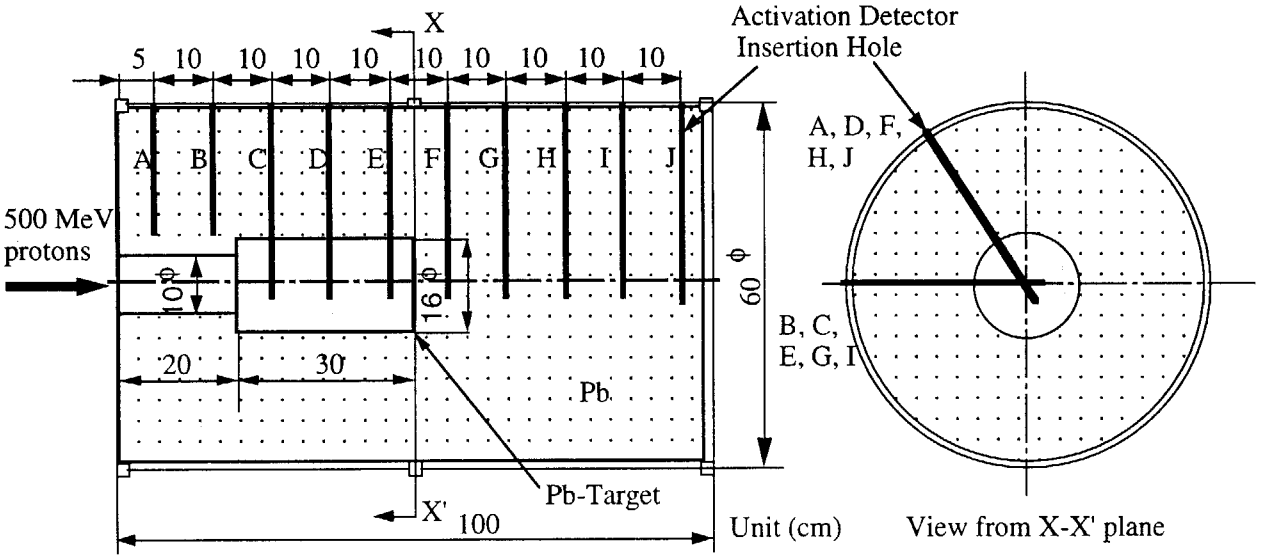


Fig.6.1.4　鉛体系の概要図

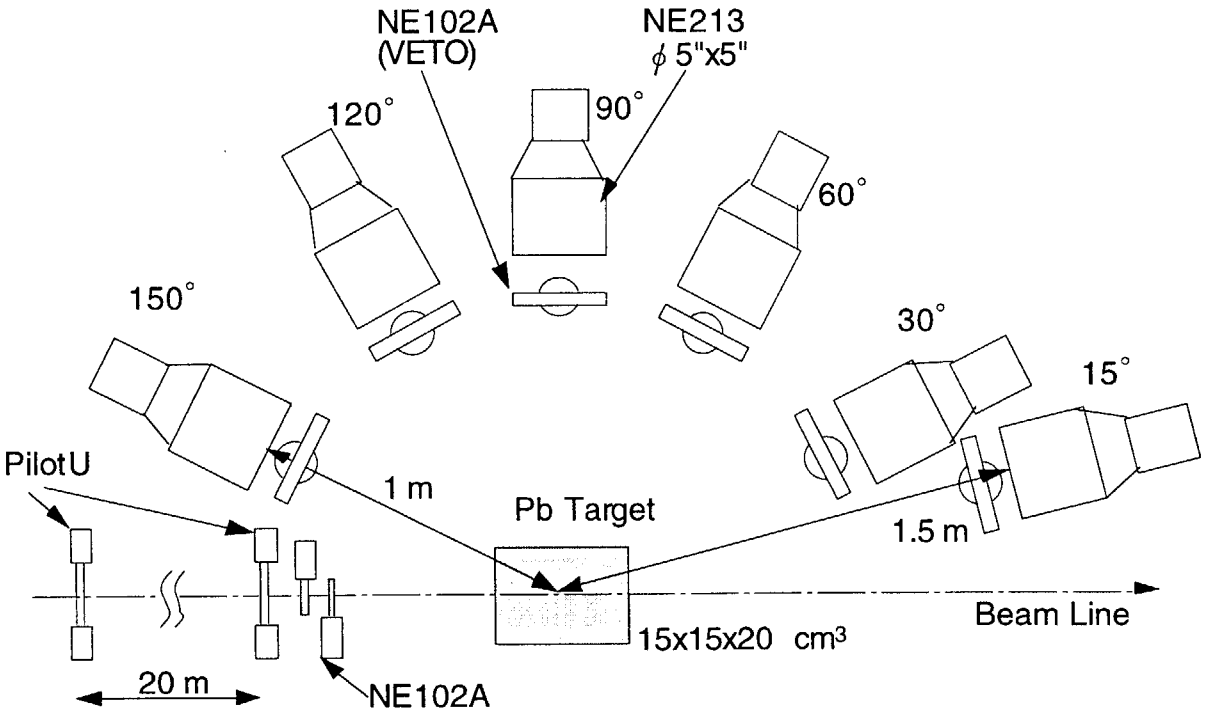


Fig.6.1.5　核破砕中性子エネルギースペクトル測定概要図

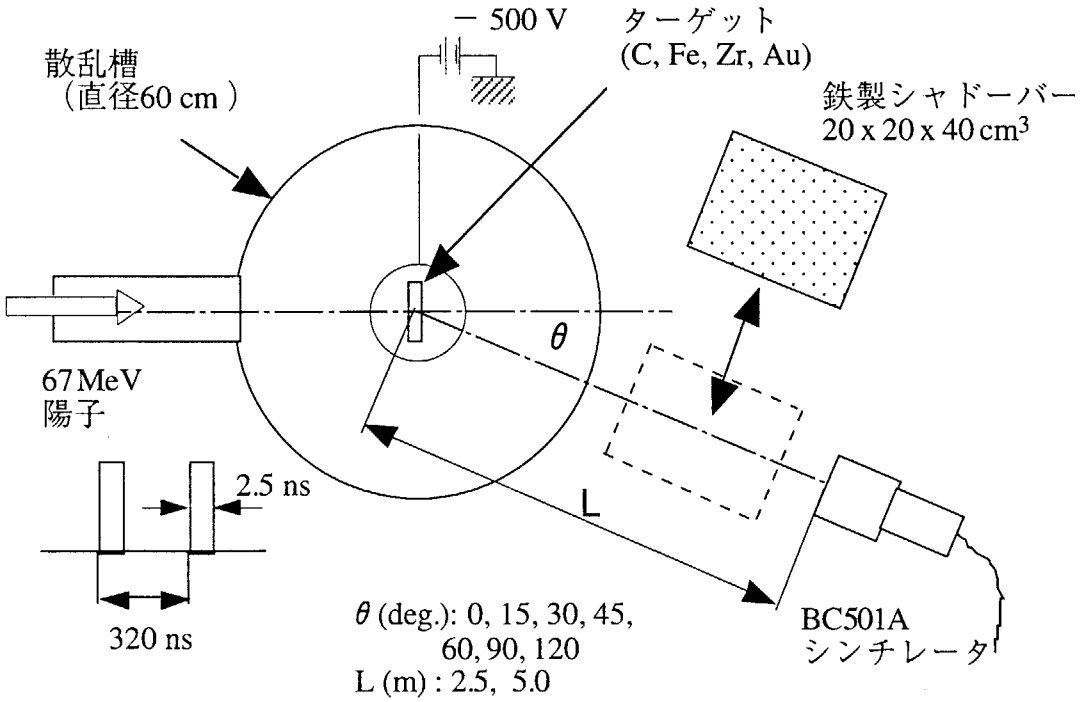


Fig.6.1.6　TIARA における中性子エネルギースペクトル測定概要図

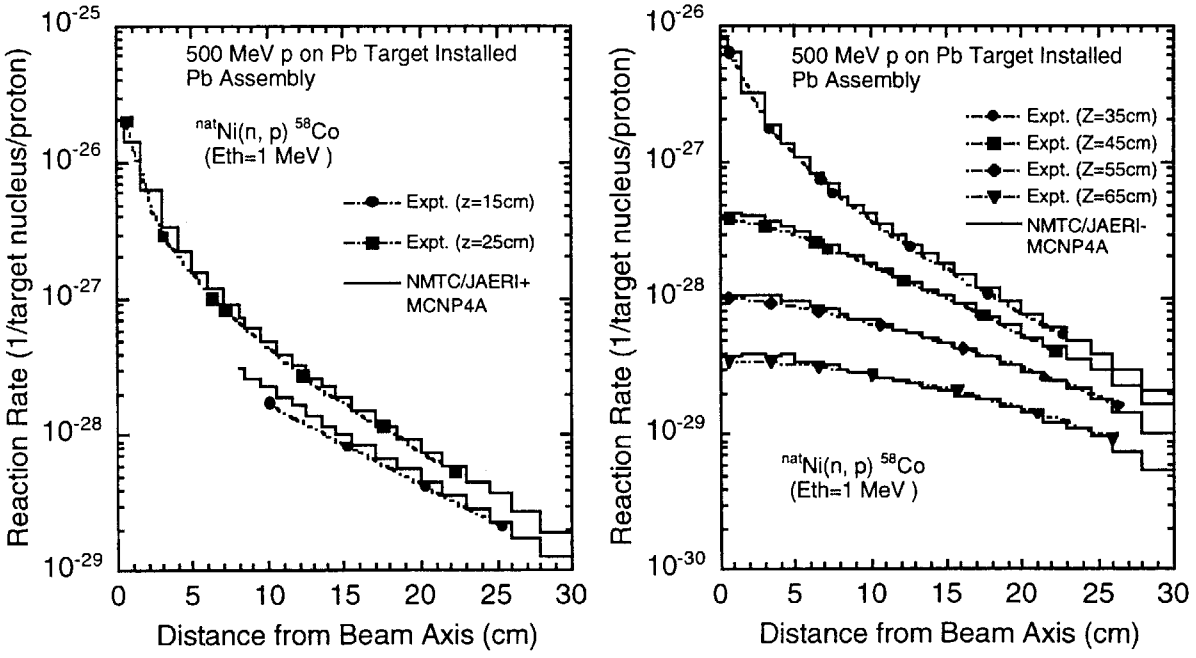


Fig.6.1.7　鉛ターゲット－鉛体系に 500 MeV 陽子を入射した場合の $^{nat}Ni(n,x)^{58}Co$ 反応率空間分布　黒印：実験値　実線：NMTC/JAERI-MCNP4A コードシステムによる計算値

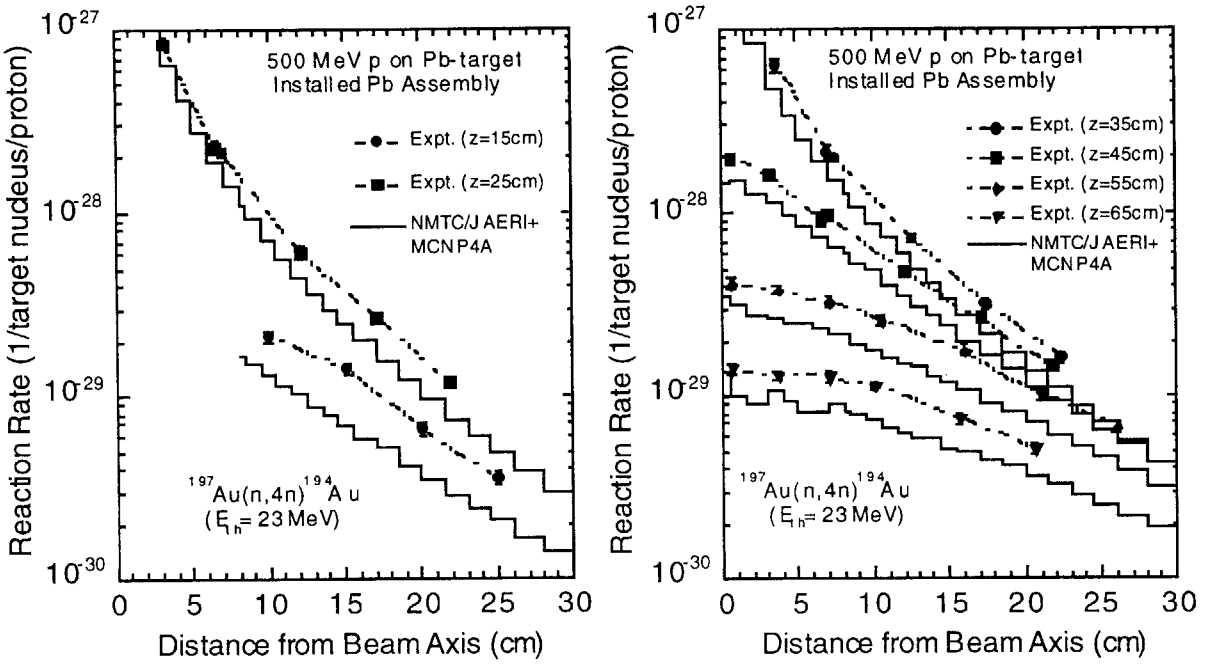


Fig.6.1.8 鉛ターゲット－鉛体系に 500 MeV 陽子を入射した場合の $^{198}Au(n,4n)^{194}Au$ 反応率空間分布。黒印：実験値、実線：NMTC/JAERI-MCNP4A コードシステムによる計算値

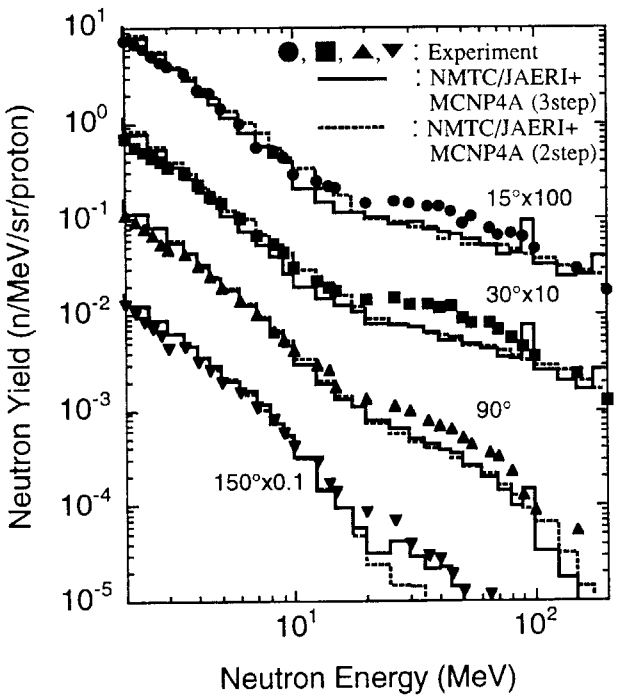


Fig.6.1.9 500 MeV 陽子を 15x15x20 cm^3 の厚い鉛ターゲットに入射した場合の 放出中性子エネルギースペクトル。黒印：実験値、実線及び点線：NMTC/JAERI-MCNP4A コードシステムによる計算値

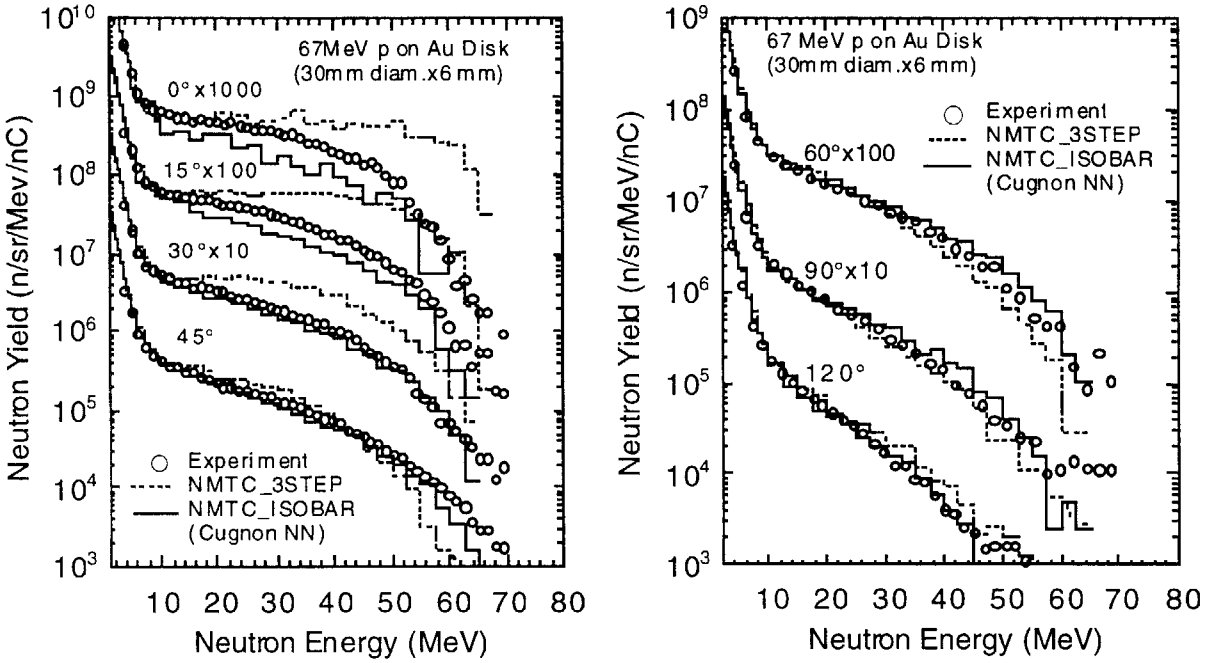


Fig.6.1.10　67 MeV陽子を厚い Auターゲットに入射した場合の中性子スペクトルに関する実験と計算の比較

○印：実験結果

点線：3 STEP オプションを用いた NMTC/JAERI-MCNP-4A コードシステムによる計算、

実線：ISOBAR オプションを用いた NMTC/JAERI-MCNP-4A コードシステムによる計算

6．1．3　AGS ターゲット国際共同実験

（1）AGS 実験の経緯と概要

中性子科学研究計画において最終目標としている 5MW 中性子散乱実験用中性子源の実現には、水銀が最も有力なターゲット材料として開発研究が進められている。水銀をターゲット材料として選択した場合の技術的課題として、i) 大強度陽子の入射に伴い発生するた局所的なエネルギー付与・温度上昇で発生する圧力波に対し、ターゲット構造が機械的設計基準値を満たすか否か、ii) 材料の劣化が適正な寿命予測の範囲であるか、iii) 入射陽子エネルギー 1.5GeV での中性子総発生率が妥当な範囲であるか、が重要である。しかしながら、これまでに十分な推定根拠を持ち合わせていない現状では大きな懸案として、今後の設計精度確保に影響を及ぼすことが指摘されている。設計に用いる計算コード並びにデータベースの妥当性の段階的検証は重要であり、系統的かつ精力的に研究を進めている。しかしながら、データベースの蓄積、新たな計算コードの開発には多くの労力と時間を要する。計画を限られた時間で効率的に達成させるには、模擬実験による主要な事象の積分評価の積み重ねと最終的には実規模環境を模擬できる場で懸案となる現象を積分的に実験し、総合的な評価を行うことが必須な要件である。

現在、EU, 米国で原研計画と類似の大出力中性子源の開発計画が進んでいる。全ての計画で水銀を第1候補材としてターゲットの設計開発が進んでいる。その中で、平成8年の初頭に、米国ブルックヘブン国立研究所にある AGS 陽子シンクロトロン加速器を用いて、懸案の水銀ターゲットに係わる熱的、機械的、核的現象に関する実験を協力して実施することについて、原研、

BNL及びEUの代表者間で検討され、計画が立案された。この実験計画をAGS実験と言う。AGS実験の要件として、1）パルス当たりの入射陽子強度が十分に高く、熱出力及び発生する圧力波を十分に観測できる、2）ターゲットを設置する場所として現在使用されていないブロックハウスと呼ばれている昔ニュートリノ実験場所を利用できる、3）BNLとしては、そこを次世代の中性子源施設として想定した計画を策定中である、こと等が揚げられる。この実験計画は、存在する環境を最大限利用した効率的なものとして、原研は積極的に支持し参加することとした。共同実験は日本、米国、EUが参加機関であるが、多国間の正式な国際協力の枠組みを作るに労力を避け、BNL（米国DOE）と原研との二国間協定を締結し（EUとBNLは協定が存在する）実質的な共同実験を開始することとした。

各参加極の基本合意を得て、平成9年6月に第1期の水銀ターゲット実験を実施した。本レポートでは、実験の概要と、これまでに得られた成果を中心に紹介するとともに、平成10年度に計画されている第2期実験計画の概要を紹介する。

（2）実験計画の策定と実施体制

3極の共同実施体制をFig.6.1.3.1に示す。参加機関は、原研（日本、KEK）、米国（BNL, ORNL）、EU（PSI, FZJ）で、それぞれの役割分担をTable6.1.3.1に示す。

実験には日本から8名、米国から7名、EUから3名が参加し、総計20名を超す人の協力で実施体制を確立した。

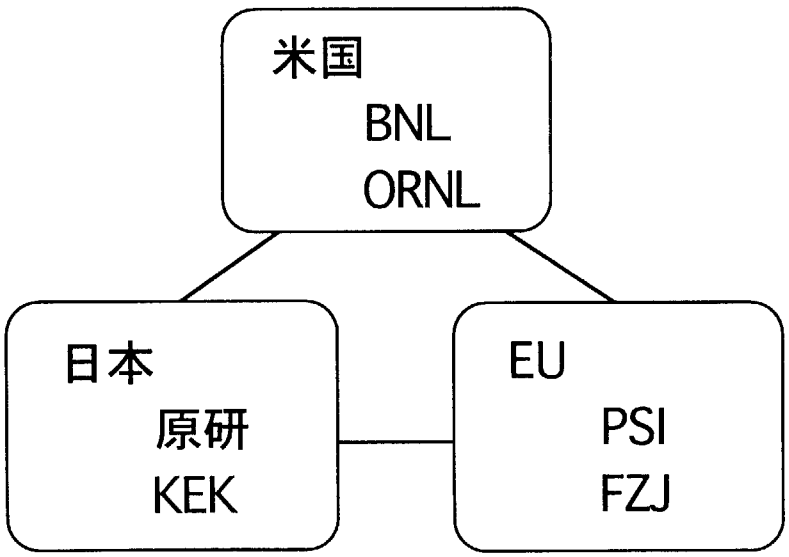


Fig.6.1.3.1　3極の共同実施体制

Table6.1.3.1　実験項目と分担機関

分担	機関	
AGS 加速器陽子ビーム、 実験環境整備	BNL	
ターゲット製作	FZJ	
水銀材料提供		
測定実験 　入射陽子ビーム診断 　圧力波 　エネルギー付与（発熱） 　ニュートロニクス	 原研, BNL 原研、PSI, ORNL FZJ/PSI 原研（KEK, ORNL）	
スポークスマン	日本 米国 EU	原研（渡辺昇） BNL (J. Hastings) PSI (G. Bauer)

（3）第一期実験の概要

実験は、水銀ターゲットに高エネルギー陽子を入射して核破砕反応による中性子発生、発熱及び圧力波を測定し、得られた結果を設計に資することを目的としている。本実験の特徴は、AGS 加速器の陽子ビーム強度が、計画しているターゲットの特性データとして直接設計に反映可能な範囲にあり、陽子エネルギーが 1.5 GeV から 24GeV まで可変であることである。実験には日本（6名）、FZJ、PSI（各1名）、ORNL（5名）、BNL（数名）が参加した。

水銀ターゲット容器は FZJ ユーリッヒで製作され、AGS の U ラインの下流にあるターゲットホールに設置された。陽子ビームエネルギーは 1.5, 7 及び 24GeV の3点で各々、（1）入射陽子ビームプロファイル、（2）放射化箔法による中性子発生特性、（3）レーザーストレインゲージを用いた圧力波測定を原研が担当し、その他（4）温度測定、圧力波測定及びピエゾ素子を用いた圧力波測定を FZJ と PSI が（5）オプティカルファイバー素子を用いた圧力波測定を ORNL が担当した。AGS の全マシンタイムは48時間と短縮され、かつ、事前のターゲットホールへのアクセスが制限されるという厳しい条件であったが、当初目標としたデータの測定を完了することができた。

1）AGS 陽子ビーム入射条件

Table6.1.3.2 に AGS 加速器から得られる陽子ビームの基本仕様を示す。 24GeV 陽子入射時に 22MPa(バブル発生無し）、54Mpa（バブル発生有り）の圧力の発生が予想される。この条件下の実験により、圧力波、核発熱、ニュートロニクス等の水銀ターゲット設計に最も重要な知見が得られることが期待できる。

Table6.1.3.2　AGS の陽子ビーム基本仕様

項目	基本仕様		
エネルギー(GeV)	1.5	7	24
陽子数／パルス	3.58×10^{12}	1.7×10^{13}	5.7×10^{13}
パルス周波数(Hz)		0.6(1.6 秒間隔) ＊	
出力／パルス(kJ)	0.86	18.8	221.2

＊１パルスに８バンチのミクロパルス（100ns バンチ幅、300ns 間隔)

2）水銀ターゲット

水銀ターゲットは内径 20 cm、長さ 130 cm、厚さ 2.5 mm のステンレス鋼 (SUS316) 容器に水銀を充填して構成した。陽子ビームが入射するターゲットの端部は半球構造である。ターゲットは、その中心軸に陽子ビームが照射されるように設置した。水銀の漏洩による被害を防ぐために、ターゲットを収納する外側容器を設けた。検出器の調整、出し入れ等のアクセスは外側容器の上部のアクリル製の蓋を取り外して行った。Fig.6.1.3.2 にターゲット構造と概略寸法を示す。

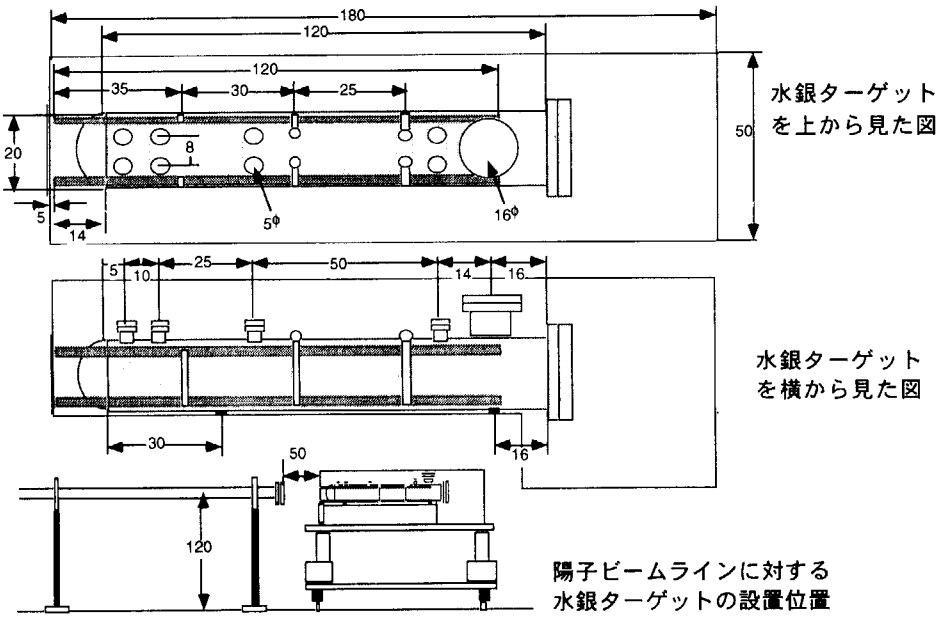


Fig.6.1.3.2 水銀ターゲット形状及び陽子ビームに対する配置

3）　ビーム強度とビームプロファイル

入射陽子ビームの強度及びプロファイルは実験データ評価の基本となる。そのために、複数の手法により測定を試みた。カレントトランスフォーマー(ＣＴ)及び２次電子放出チェンバー(SEC)は AGS 加速器施設に設置されている。これらから得られるデータは通常基準として用いられているが、今回の実験ではターゲット位置がモニターから 100m も下流に位置することと、その間に適切なビーム収束系がなくビーム発散等が予想されたので、ターゲット位置での確実な入射陽子ビームデータを測定することが不可欠であった。そのために、原研チームは１）イオンチェンバー、２）銅放射化法、及び３）アルミニウム・イメージングプレート法を採用して測定した。

・Cu 放射化箔：陽子照射された Cu 箔中に生成する ^{24}Na の強度を測定し、各エネルギー点における $^{N}Cu(p,x)^{24}Na$ 反応断面積から入射陽子数の総量を求める。

・マルチワイヤーチェンバー：電圧を印加した水平、垂直方向に各３２本のワイヤを格子状の電流強度の測定により、入射陽子ビームの空間分布及び絶対強度を求める。

・イメージングプレート(IP)：Al 箔中に生成する放射能から放出するγ線β線をイメージングプレートに露出し、得られた像の分布解析から、入射陽子のプロファイルを求める。

Fig.6.1.3.3 にビーム診断用モニターの配置を示す。

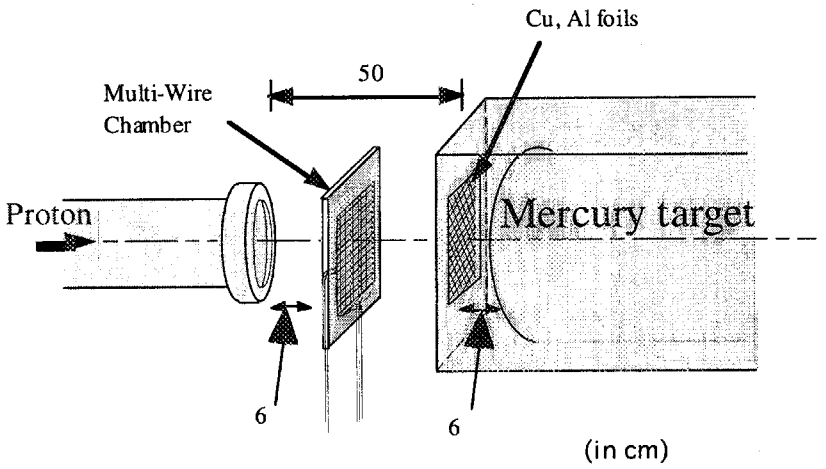


Fig.6.1.3.3　入射陽子ビーム診断系の配置図

Fig.6.1.3.4 に、7GeV 及び 24GeV 陽子エネルギー入射に対する放射化実験のための照射を行った時のイメージングプレート法で得られた陽子ビームプロファイルを示す。イメージングプレートを用いたプロファイル測定は、世界で初めての試みであったが、適当な冷却及び露出時間を調節することで鮮明なプロファイルが得られた。このデータは、実験解析の入力条件として重要な役割を果たす。

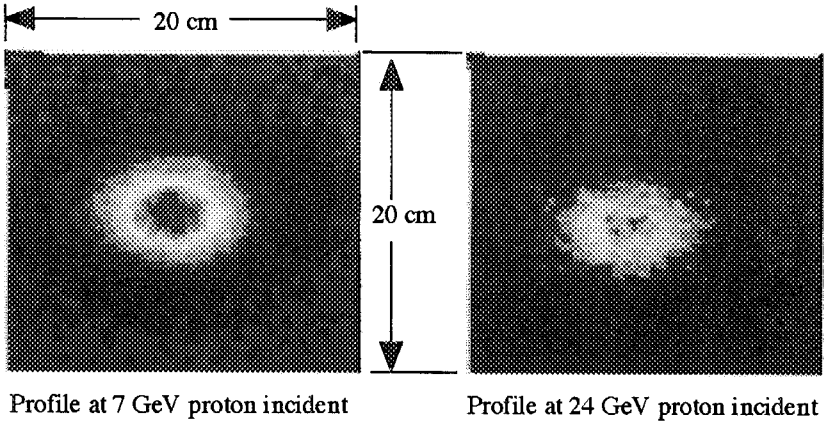


Fig.6.1.3.4　アルミニウムーイメージングプレートで測定した 7GeV 及び 24GeV の陽子ビームプロファイル

4）圧力波測定

AGS 実験において、陽子ビーム入射による圧力波により励起される容器の衝撃挙動を測定し、解析結果 と比較検討することにより容器の構造力学的評価を行った。

陽子ビーム入射に対する水銀ターゲット容器の機械的な高速応答を測定するために、レーザードップラー干渉効果 に基づくセンサーを考案した。このセンサーの特徴は、陽子ビーム入射時に生じる誘起電流及び核破砕反応に伴う放射線の影響を受けることなく、高速（～1MHz)応答を非接触で測定し得ることにある。水銀ターゲット容器は半球形状をした窓部(r=10cm,t=2.5mm)とシリンダー部(r=10cm,l=130cm,t=2.5mm)を溶接した容器内に液体水銀を充満した構造である。

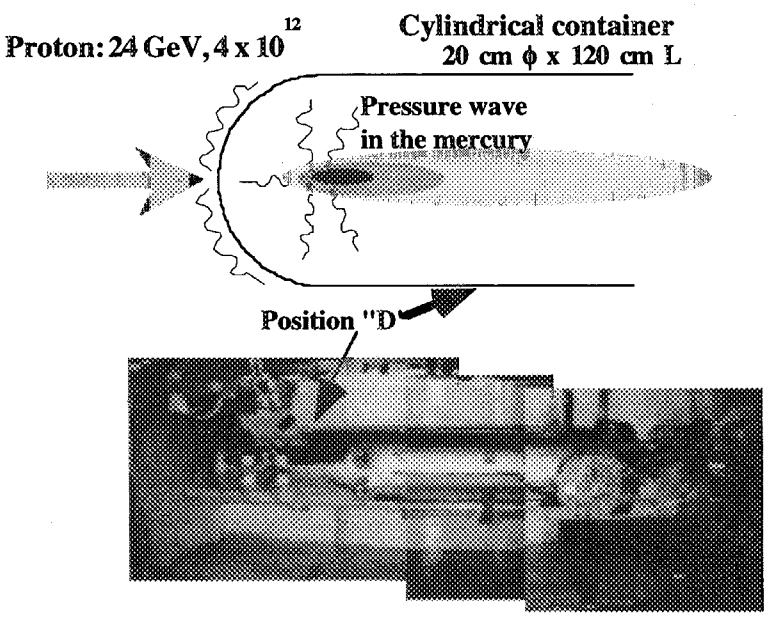


Fig.6.1.3.5 圧力波測定系配置

測定は窓部頂点から 30cm 軸方向に離れた場所で行った。解析は陽解法 FEM コード ABAQUS を用い、液体水銀はその体積弾性率と等価な値を持つ固体要素として扱い、水銀ターゲット容器との接触境界を有する。Fig.6.1.3.5 に水銀ターゲットの配置を示す。今回の AGS 実験における最高エネルギー、最高強度の陽子入射条件である 24 GeV, $5x10^{12}$n/pulse で測定した水銀ターゲット容器の衝撃応答

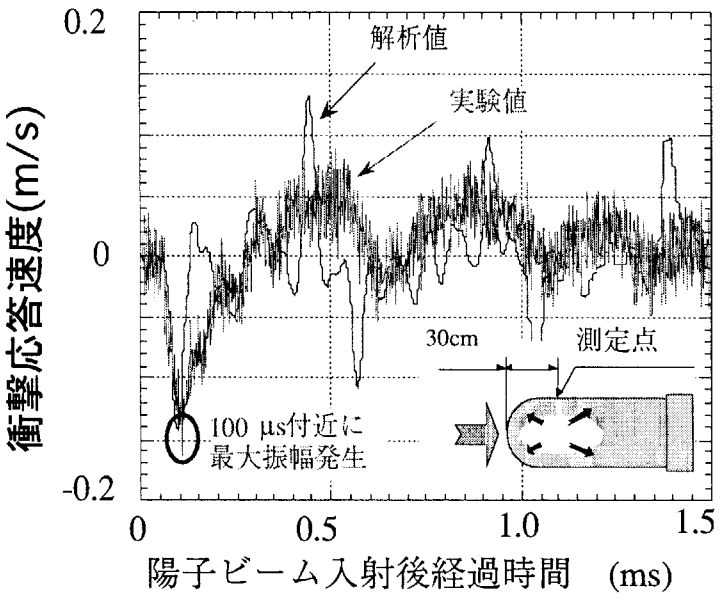


Fig.6.1.3.6 測定した容器構造体の衝撃応答

を Fig.6.1.3.6 に示す。ビーム入射後約 60μs から応答が検知され、100μs 後に最大振幅が生じる。解析はこの応力波の伝搬過程をおおむね再現できるが、それ以降の時間における高周波数成分の減衰挙動については十分予測できていない。

陽子ビーム入射に伴い発生する圧力波による液体水銀ターゲット容器構造の衝撃応答を初めて観測することに成功した。次年度に行われる AGS 実験に引き続き参加し、異なる陽子ビーム入射条件での衝撃応答データを取得すると共に、解析モデルの高度化を図る計画である。

5）中性子測定

陽子入射水銀核破砕反応に伴う中性子発生数及び中性子空間分布等の核特性は、中性子散乱実験用水銀ターゲットの核設計を進めるための基礎データとして極めて重要である。そこで、設計に用いる計算コード及び核データの妥当性を検証することを目的として、厚い水銀ターゲットに1.5, 7及び24GeVの陽子を入射し、核破砕反応で生成する中性子発生分布を種々の異なる感度を持つ放射化検出器で測定し、実験データを得た。

放射化検出器として、In, Al, Nb, Bi 等の 9 種類の高純度金属フォイル（ 2 x 2 cm^2、厚さ 0.1 ～1 mm）を用いた。放射化検出器はアクリル棒に装着して、これを半径方向に 90° 毎に位置を変えたターゲット側面の 4 ヶ所にビーム軸と平行に固定した。ターゲット及び放射化検出器を固定する棒の配置は 3． 2）項の

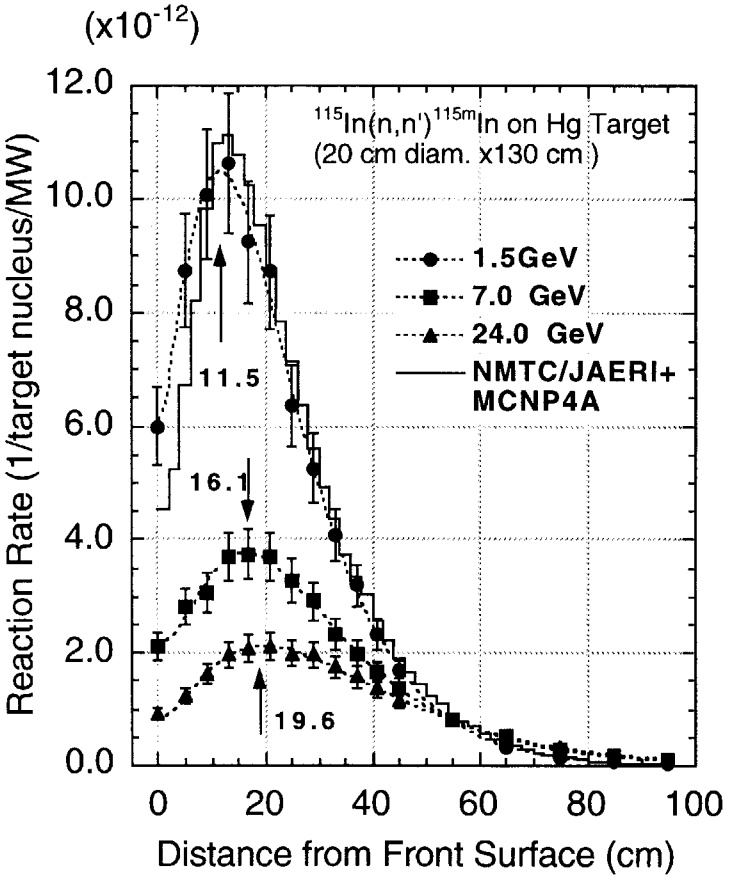


Fig.6.1.3.7 1.5, 7.0 及び 24.0 GeV 陽子で照射した水銀ターゲット側面における ^{115}In(n,n')^{115m}In 反応率分布

Fig.6.1.3.2に示されている。照射後、各々数時間の冷却の後、Ge 検出器を用いて放射化検出器に生成した種々の核種のγ線スペクトルを測定し、反応率を求めた。

本実験では、しきい値で0.4 ～60 MeV の範囲の種々の反応率を測定できた。Fig.6.1.3.7に $^{115}In(n,n')^{115m}In$（しきい値 0.4 MeV ）の反応率分布測定結果を示す。実験値の誤差は 12 % 程度であった。水銀ターゲットで発生する核破砕中性子は 1 MeV 付近にピークを有する蒸発スペクトル的な分布を有すると予測されるので、本反応率はその積分的強度に相当する。 各々の入射エネルギー毎の反応率を 投入電力当たりに規格化して比較すると、1.5 GeV 陽子入射の場合に最も強度が大きくなることがわかった。また、実験値をフィッティングした結果（図中の点線）、核破砕中性子強度分布は入射エネルギーが 1.5 GeV から 24.0 GeV に変化するにつれて、ピーク位置が入射面から11.5 cm から19.6 cmへと深くなること、ピーク半値幅が 29 cm から44 cm に拡がることがわかった。さらに、1.5 GeV 陽子入射について、NMTC/JAERI-MCNP4A コードシステムによる解析を行った結果、計算（図中の実線）は実験を概ね良く再現することもわかった。しきい値の高い放射化検出器の反応率についても同様な実験結果 が得られた。現在、陽子入射条件を始めとする実験データの詳細な検討とともに、NMTC/JAERI, HERMES, LCS等のシミュレーション計算コードの精度評価を進めている。

6）誘導放射能測定

In 箔を始めとする種々の放射化検出器材料中に生成した誘導放射能はドシメトリーのみならず誘導放射能計算コードの検証用実験データとして有用である。照射後の異なる冷却時間における放射能を可能な限り多く同定し、その強度を計算と比較することで現在使用可能な断面積、崩壊データの精度を評価できる。Fig.6.1.3.8に24GeV陽子入射実験で照射されたビスマス箔中に生成した様々な放射能から放出されたγ線スペクトルを示す。中性子エネルギーが高いため、多くの反応チャンネルが開き複雑なスペクトルが形成されていることが示されている。現在、実験データの処理を進めている。６．１．１の（２）項で紹介した原研が開発したDCHAIN-SPの検証に有効なデータである。

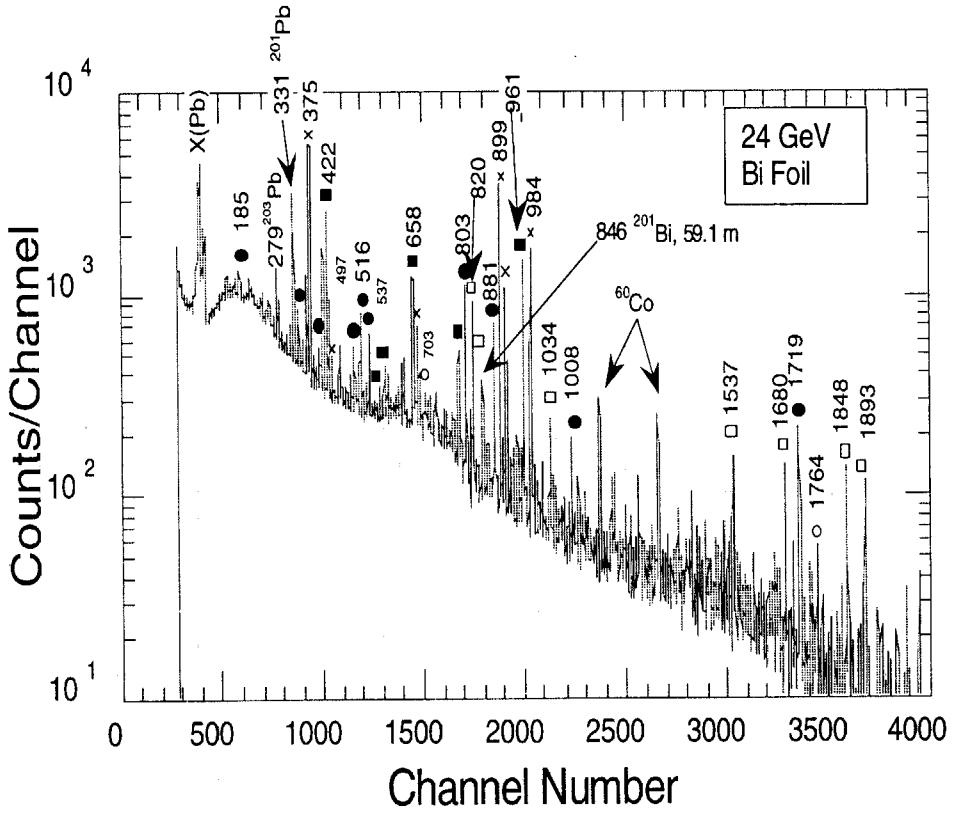


Fig.6.1.3.8　24GeV 陽子入射核破砕中性子で照射したビスマス箔中の誘導放射能から放出されたγ線スペクトル。照射後約3時間後、42分間 Ge 検出器で測定したスペクトル。

その他、第一期の実験で計画していたが実施出来なかった項目として、水銀中の陽子核破砕生成物及び核破砕中性子場での水銀中の誘導放射能測定がある。これらは水銀試料取り扱いに関する安全性要請の条件が明確で無かったためであり、今後の課題として取り組むこととした。

7）実験のまとめ

AGS ターゲット実験により、これまで以下の成果が得られた。

①入射陽子ビームプロファイルとその絶対値を測定する技術を確率した。

②エネルギーが 1.5, 7, 24GeV 陽子入射時のターゲット軸方向の中性子束分布をしきい値の異なる複数の放射化検出器で求めた。検出器の応答関数を用いた総中性子発生率を導出する予定である。

③24GeV 陽子入射実験において水銀ターゲット容器に発生する圧力波の測定に原研が世界で始めて成功した。

④また、PSI ・ FZJ チームが水銀中のエネルギー付与分布の測定に成功した。

今回の成果は、原研（日本）チームの技術的ポテンシャルのデモンストレーションであると共に、平成１０年度に予定されている第二期で実施する減速材付き中性子特性実験に向けて貴重な経験となったと考える。

（4）次期計画

AGS ターゲット実験は、今後も継続する予定である。第二期実験として、水銀裸体系の再実験及び鉛反射材を装荷した軽水減速材からの漏洩する減速中性子特性、減速材核発熱特性を測定する予定である。また、鉛体系について核計算コードのベンチマークとして中性子発生特性及び誘導放射能特性実験の実施も検討している。さらに、平成１１年度には核破砕放射線の遮蔽実験を第三期として計画している。

最後に、AGS 加速器がある米国ブルックヘブン国立研究所（BNL）の全景を Fig.6.1.3.9 に示す。



Fig. 6.1.3.9　BNL 研究所の全景

6．2　材料

6．2．1　はじめに

大強度加速器を用いた核破砕施設で使用されるターゲット材料の損傷評価を行い、寿命を予測することは、核破砕装置の性能を最大限に引き出し、定期的なターゲットの交換による計画的な施設の利用を推進するために重要である。陽子ビームを入射されるターゲット構造材料は、

・照射損傷：陽子、中性子による損傷
・熱衝撃：水銀内に瞬時に蓄積された熱によって生じる
・熱応力：陽子ビーム照射を受ける頂部で、ビームトリップにより繰り返される
・腐食：荷電粒子作用下で水銀と容器内面間で起こる
・エロージョン：水銀の流動による容器内面の減肉
・その他の機械的荷重：自重、地震により静的、動的に生じる負荷

を受けるので、それらがターゲットの破損に及ぼす影響を考慮し、寿命を適切に評価する必要がある。また、ターゲット容器の非破壊検査の方法を開発し、損傷を評価できれば、交換用ターゲットの製作に技術的な経験を継承することが可能となり、一層の信頼性のあるターゲット製作が可能となる。

Table6.2.1 に、各項目の研究スケジュールを示す。これまでに実施した照射損傷試験には高崎研の TIARA を用いたイオン照射実験がある。イオンビーム照射では、Ni の自己イオンをステンレス鋼に打ち込み、表面近傍の薄い層に限定はされるものの、弾き出し量 dpa による降伏応力の変化をナノインデンテーション技術を併用して測定可能なことを明らかにした。

PSI の SINQ では MARK-II ターゲットを用いた陽子照射試験を開始した。SUS316 の母材、溶接材を含む各種材料の合計 1545 個の試験片が照射中であり、平成 11 年末に照射が終了次第、照射後試験が開始されるので原研はこれに参加する計画である。引き続く MARK-III ターゲットを用いた照射計画には、新たに照射試料を用意して参画する計画である。

材料開発上、重要なことは、力学的に受ける負荷の特性を把握することにある。そのため、熱衝撃、熱応力の大きさを実験、解析で評価した。

AGS 実験では、1997 年の run-1 に引き続き 1998 年 11 月に実施した run-2 の試験でも 24GeV 陽子照射による熱衝撃の測定に成功した。今回はレーザードップラー圧力計による測定に成功し、約 4MPa 相当の動的圧力を検知した。試験結果の詳細な解析は今後実施される。

熱応力では、陽子パルスの入力による非定常熱応力解析を行い、マイクロパルス（50Hz, 1 マイクロ秒パルス）、ミリパルス（50Hz, 1 ミリ秒パルス）、連続ビームがターゲット頂部に与える負荷は非定常熱応力では差がないと結論された。今後も各種運転モードに対応した材料使用条件を評価し、材料開発、特にデータベースの作製に反映させる。

接合強度、非破壊検査では、高温高圧下での焼結と拡散を利用した熱間静水圧成形法（HIP 法）を用いた接合試験、及び超音波、レーザー、インデンテーション法などを応用した非破壊検査法の確立を図る計画である。腐食試験では、水環境における固体ターゲット材料の腐食、並びに水

銀環境におけるターゲット容器材料の腐食データを採取し、環境性能を評価する計画である。

6．2．2　照射損傷

（1）　材料照射の現状

材料の照射実験は、これまで ORNL の HFIR を使用した核融合炉構造材料の日米協力試験がある。このプログラムは核融合中性子環境で炉構造材料が受ける損傷を評価することを目的に 1984 年から通算 15 年、3 期にわたり継続されてきている。一連の照射試験では、高 dpa と高ヘリウム生成を図った重照射試験（最高 70dpa、He 量 4600appm）、並びに dpa 当たりのヘリウム生成量を核融合炉条件に合わせた中性子エネルギースペクトラム調整照射試験（最高 20dpa、He 量 300appm）よりなっている。照射した材料はオーステナイトステンレス鋼（SUS316）、フェライトマルテンサイト鋼（HT-9）、低放射化フェライト鋼（F82H）等がある。試験の詳細と成果は報告集にまとめられている。

また、国際熱核融合炉(ITER)で編纂されたデータ集 ITER (Ref. Material Properties Handbook) が刊行される予定であり、SUS316 鋼の照射後試験による材料特性も収録される。

大強度陽子ビームによる照射損傷を核計算コードにより評価した例によれば（1GeV、 1MW、60Hz)、ターゲット容器頂部で(電流密度 18.2μA/cm^2)、22.8dpa/年、1014appm He/年、10840appm H/年となっており、水素の生成量がヘリウムの場合の 10 倍にもなっている。1dpa 当たりのヘリウム生成量は 50appmHe/dpa である。一方、14MeV の中性子による核融合炉第 1 壁における照射損傷は、ヘリウム生成量で 1 4appmHe/dpa と評価されている。しかし、水素の生成量については格段の注意が払われてこなかったのが現状である。

今後の材料損傷研究によって、dpa により評価される損傷の実体の明確化、並びにヘリウムの影響、水素の影響に注意を払う必要があることが示唆される。現在、大強度陽子ビームによる照射損傷データが不足しており、寿命評価上、通常の機械的荷重に対する寿命評価に対してどの程度の減少率を見込めばよいのか、あるいは通常の機械的荷重に対する破損とは異なる新たな破損形式、例えば、水素脆性などを考慮する必要があるのかを含めて見極める必要がある。

陽子による照射損傷実験は、現在スイス PSI でスクリーニング試験が行われており、照射後試験により機械的性質が調べられ、貴重なデータを提供すると期待されている。試験は MARK-II ターゲットを用いて、1998 年 6 月に開始し、1999 年末に終了する予定である。SUS316 母材、溶接材を含め、Fe、Al、Zr、Ni、Ti、W、Mo 基の微小試験片、透過型電子顕微鏡（TEM）観察用試料の合計 1545 個が照射中である。原研もこの照射後試験に参加する計画である。さらに、2000 年から 2001 年にかけて MARK-III ターゲットを用いて照射試験が継続される計画になっている。また、PSI で計画されている in-beam 試験にも参画する計画である。

（2）　照射データの検討

水銀ターゲットの容器材料は、1.5GeV の陽子によってパルス状に照射されるとともに、核破砕による中性子にも曝される。運転温度は 200℃以下と考えられ、照射速度は最大 10^{-2}dpa/s と予想されている。さらに、材料内部には多量の核変換生成物が、とくに、He と H はそれぞれ 200、

2000appm/dpa 生成される。このような照射環境は、材料特性に多大な影響を及ぼす。一般には、照射により材料強度の増加、延性の低下、靱性の減少、スエリング、クリープによる寸法変化、照射誘起偏析による組成変化を生じる。したがって、ターゲット容器の寿命を推定するには、このような照射場での材料データの取得が必要である。

現在、核分裂炉による照射場では多くの材料の照射データが蓄積されているが、核破砕環境下での材料の照射データは、ほとんど見当たらない。そこで、初めに今までに得られている核分裂炉による照射データを整理、評価する。続いて、イオン加速器による核破砕条件を部分的に模擬した照射実験を行い、データを蓄積してターゲット用材料開発に必要なデータの評価、検討を行う。ターゲット容器材料の第一候補材であるオーステナイトステンレス鋼（316 鋼）の照射データは、主に高速炉材料用の 500℃前後、核融合炉用材料の 400℃以下の温度域で蓄積されている。ここでは核融合炉用材料の開発において取得された 316 鋼の照射材料データを検討する。

Fig.6.2.1 に照射量と引張特性の関係を示す。照射温度は 25～250℃である。0.2%耐力、引張強さは照射量とともに増加するが、数 dpa で飽和する。均一伸び、破断伸びに関しては、照射量とともに減少し、10dpa 以上では試験片ごとにばらつきはあるが数%まで減少する。Fig.6.2.2 は 3dpa まで照射した試験片の破壊靭性値と試験温度の関係を示したものである。破壊靭性値は照射により減少し、3dpa では 100MPa·$m^{1/2}$ に低下した。今後、高照射条件における破壊靭性の低下傾向を確認する必要がある。

ターゲット容器では、ビームトリップ及びパルス熱入力に起因する熱サイクルを受ける。パルス熱入力に対応してターゲット容器頂部の温度は 50Hz で変動するが、検討結果によれば、僅かな応力変動であり、寿命評価上、大きな損傷因子とはならない。一方、これまでに世界の高エネルギー加速器が経験したビームトリップの頻度は、その際に生じる非定常熱応力による疲労損傷が問題となるほど高いと予想されるため、寿命予測上、注意を払う必要がある。疲労特性に及ぼす照射の影響を Fig.6.2.3 に示す。照射データは、照射温度 470℃、冷間加工材で照射量 30～50dpa のものであるが、疲労寿命は照射により減少する。

（3） イオン照射

イオン照射では、希望の温度で材料の自己イオン、He 及び H イオンを同時に照射することにより、損傷量、核変換 He 及び H イオンの量を制御できるため、陽子照射条件を模擬することが可能である。また、中性子照射に比べ照射条件の制御が容易であり、照射材 の放射化が少ないという照射後検査上の利点がある。しかしながら、イオン照射による損傷領域は表面から数ミクロンと非常に狭く、その損傷領域内でも損傷量に分布を持つ。したがって、構造材の力学的特性データを評価するには無理があるが、微細組織変化は観察可能なため、陽子照射条件を模擬して、イオン照射を試みている。高崎研のトリプルイオンビーム装置を用いたイオン照射試験の概要と今までに得られた結果について示す。

核計算による ESS、SNS 及び原研の大強度陽子核破砕水銀ターゲットにおける計算例を参考にして、Table6.2.2 に示すようなイオン照射を実施する計画である。本年度に行った核融合炉用改良 316 鋼(JPCA)のイオン照射結果について以下に述べる。試験片は、JPCA の溶体化処理材と 15%冷間加工材で、形状は直径 3mm、厚さ 0.2mm の TEM 用試料である。試料は、バフ研磨、

研磨した後、12MeV の Ni イオンを用いて、200℃でイオン照射を行った。Fig.6.2.4 に、TRIM コードにより計算した Ni イオンによる弾き出し損傷量と注入された Ni イオンの分布状態を示す。損傷のピークは深さ約 2μm で約 30dpa であり、注入された Ni イオンのピークは損傷のピークより若干深く Ni イオン量は約 0.7at%である。Fig.6.2.5 にナノインデンテーション法により得られたイオン照射材の圧子の押込深さ(d)と荷重/押込深さ(L/d)の関係を示す。縦軸を L/d で表しているので測定された曲線の傾きは硬さのディメンジョンになる。金属材料の硬さと降伏応力は比例するので、曲線の傾きは降伏応力に対応する。測定された結果を比較すると、冷間加工材の傾きは溶体化処理材の傾きより高くなっており、曲線の傾きにより降伏応力を推定する方法の妥当性を示している。また、イオン照射により両試験片とも傾きが大きくなっており、イオン照射による降伏応力の増加が確認できた。核破砕照射条件を模擬したイオン照射により降伏応力の変化を推測することが可能となったと結論される。

6．2．3　熱衝撃

（1）　圧力波

大強度のパルス状陽子ビームを水銀ターゲットに入射すると、物質中の陽子が通過した経路で瞬時に熱が発生し、熱衝撃が起こると予測される。発熱過程は核反応というよりむしろ電子散乱で起こり、1 次粒子として入射した陽子の電子励起によるエネルギー損失、1 次陽子が核破砕を起こして生成する 2 次荷電粒子の電子励起によるエネルギー損失及び 2 次的に発生するγ線の電離過程により主に生じる。

核破砕反応、中性子減速、熱衝撃等の実験的研究を行う国際共同実験計画下で実施した熱衝撃実験で、熱衝撃を受けたターゲット容器の変形速度をレーザードップラー測定器により測定することに成功した。実験で用いたターゲット容器（Fig.6.2.6）の大きさは直径 20cm x 長さ 1.3m x 厚さ 2.5mm、形は円筒形の頂部（陽子入射部）に半球を溶接したガスボンベ型である。材料はステンレス鋼であり、容器の全体積は約 40L の水銀で満たされている。陽子は左側から入射位置に入る。

測定結果を Fig.6.2.7 に示す。2 回目のパルス入射でもほぼ同一の測定結果を得たので、波形の再現性も確認できた。同時に示した計算結果は、原研が提案したモデルによるシミュレーション結果である。100μs における速度の値が-0.15m/s でシミュレーション結果とほぼ一致し、その後も測定値と傾向が一致していることから、陽子ビーム入射時にターゲットに生じた熱衝撃が、圧力波を発生させ、容器を変形させたことを裏付けたと結論される。シミュレーション結果から容器は 10MPa の応力を受けたと評価可能であり（Fig.6.2.8）、圧力波による応力の繰り返しは疲労寿命評価上、損傷として考慮する必要がある。この場合、パルス間隔 20 ms の間に圧力波が充分に減衰するかという問題がある。例えば 1 パルスにつき 10 回の繰り返しがあると想定すると、絶え間なくパルスを打ち込む場合、1 日で 4.32×10^7 回の繰り返し負荷を受けることになる。疲労損傷Dは疲労限度以下の応力による疲労損傷も考慮した修正マイナー則により評価可能である。σ_i の応力が繰り返された時の疲労寿命を N_i、実際に繰り返される回数を n_i とする。

$$D=\sum_i \frac{n_i}{N_i} \qquad \cdots 1$$

ここで陽子照射材の SN（応力-破損繰り返し数）曲線が必要であり、応力波の繰り返しに対する破損回数を評価する必要がある。現在、陽子照射データは見あたらないが、冷間加工した JPCA（SUS316）の中性子照射後に実施された低サイクル疲労試験データによれば、430℃、30-50 dpa の条件では全歪み 0.2% における破損繰り返し数は 10^7 回程度であり、照射により１オーダ以上低下している。陽子照射による損傷は、中性子照射におけるヘリウムボイドの生成の他にその約 10 倍と予測される水素の生成があるため、照射中性子エネルギーレベルの相違をも含めてその影響を見極めることが今後の課題になる。

今後の実験計画としては、

・熱衝撃に伴う水銀圧力の評価

・ターゲット容器頂部の変形評価

が挙げられる。特に、液体水銀のモデル化には、水銀中を伝播してきた圧力波が負圧から正圧になると水銀中にキャビテーションが発生する可能性があること、及び圧力波による容器の変形を評価する場合に容器と水銀との力学干渉、ターゲットの構造減衰を考慮する必要があろう。

（2）ホプキンソン棒による衝撃実験

AGS 実験による熱衝撃波の測定で明らかになったように、水銀ターゲット容器は、物質中の音速で伝播してきた応力波を繰返し受ける。衝撃的に力を受ける材料の変形挙動は、必ずしも通常の材料試験で得られる挙動とは一致しないことが分かっている。そのため、高速変形を高精度に測定し得るホプキンソン棒式衝撃荷重付加装置を製作し、容器材料および液体水銀の衝撃特性について調べる計画である。

Fig.6.2.9 に計画している装置の概要を示す。Striker Bar の衝突による生じる Input Bar 中の圧縮応力パルスは、試験片（体）、Output bar 中を順次伝播する。衝撃波の大きさ、負荷速度、負荷持続時間は、Striker Bar の衝撃速度、その長さにより制御可能である。また、Input Bar 及び Output Bar の長さにより測定対象時間が決定される。一方、引張応力下での挙動を計測するには、Output bar 自由端で圧縮応力が反射し位相反転により生じた引張応力波を用いる。このとき、試験片（体）には、過度な圧縮応力が作用することを防止するための Split Collar が試験片外周部に取り付けられる。このことにより、Striker Bar の衝突による生じる圧縮応力パルスは、試験片に負荷することなく Split Collar を通過して Output Bar に伝播する。これらの試験により、材料の高速変形応答、材料と水銀との高速変形応答に伴う連成効果を調べる予定である。

６．２．４　熱応力

陽子ビーム照射に伴い材料中で発熱が起り、熱応力が発生する。熱応力は、材料の冷却条件、力学的拘束条件により大きく変化する。従い、熱応力による材料の損傷を評価するため、実際に

生じる応力の大きさ、繰り返し周波数を知る必要がある。そこで、マイクロパルス、ミリパルス、連続ビームによるターゲット窓の熱構造解析を行った。ビームのパルス長さとビーム停止時にターゲット窓部に生じる非定常温度及び非定常熱応力と半球部（直径 12.85ｃｍ）＋円筒形ターゲット（長さ２ｍｘ直径 12.85ｃｍ）に半径 4.68ｃｍの矩形プロファイルの陽子ビームが、次の条件で入射したとき、ターゲット窓部の発熱密度は 1067W/cm^3 であった。

Beam power:	5 MW
Power frequency:	50 Hz
Beam intensity:	1.5 GeV (3.3 mA)
Beam pulse duration:	1 μs
Beam profile: Rectangular:	4.68 cm radius
Beam density:	48 μA/cm^2
Target size:	12.85cmϕ x 2000cmL

従い、１パルスあたりの発熱密度ΔQ は 21.3J/cm^3 となる。今、単位体積当たりの発熱量 21.3 J を一定とする。この発熱が

・ 1μs(マイクロパルス)、

・ 1ms（ミリパルス）、

・間欠なく連続的に起こる（連続ビーム）

場合に生じるターゲット窓部温度上昇、熱応力を以下に検討する

Fig.6.2.10 は発生熱量とその時間変化を示す。マイクロパルス、ミリパルス、連続ビームの発熱量の比は 1000：1：0.05 となるが、単位時間当たりの積分値は一定であり、発生熱はいずれのビームでも同一となる。

ターゲト窓部が、水銀及び水により冷却されるとした Fig.6.2.11 に示す流動条件を仮定し、Fig.6.2.12 に示すターゲット窓部の半球部を軸対称構造モデルにより非定常熱応力計算を行う。

Figs.6.2.13、14、15 に温度解析結果を示す。マイクロパルス、ミリパルスではパルス発熱により温度も振動している。しかし、温度の変動幅、履歴とも差はない。計算では、5s 後にスクラムしてビームを停止させた。連続ビームとの比較でも、連続ビームでは温度振動がないことは当然だが、温度履歴もパルスビームとほとんど変わらない。

Figs.6.2.16、17、18 にターゲット半球頂部の板厚方向非定常熱応力を示す。１が外側（水冷側）5 が内側（水銀側）である。パルス熱入力により生じる応力振動が見られるが、その幅は数 MPa の僅かな量であり弾性範囲であれば、いずれのビームでも寿命に及ぼす影響は極めて小さい。

熱衝撃の大きさは発熱量、比熱 C_p、密度ρによって表される瞬時温度変化に依る。

$$\Delta Q/C_p/\rho \qquad \ldots 2$$

今、Fig.6.2.10 に示すようにマイクロパルス、ミリパルス、連続ビームでは瞬時の発熱量の大き

さが1000:1:0.05なので、ほぼこの比に従って圧力波の大きさは減少する。かつ連続ビームではスクラムが無い限り反射波以外の繰り返しは起こらない。従って、マイクロパルス、ミリパルス、連続ビームがターゲット頂部に与える負荷は非定常熱応力では差がない。圧力波マイクロパルス＞＞ミリパルス＞連続ビームの順で少ないことが結論される。

Table 6.2.1 研究スケジュール

研究項目	H10	H11	H12	H13	H14
照射損傷	イオンビーム照射*	イオンビーム照射	イオンビーム照射	イオンビーム照射	イオンビーム照射
		照射後材料試験**	照射後材料試験**	照射後材料試験**	照射後材料試験**
	照射試験***	照射試験***	照射試験****	照射試験****	照射試験****
熱衝撃	AGS 実験	AGS 実験	AGS 実験		
	レーザー照射	レーザー照射	レーザー照射	レーザー照射	レーザー照射
	ホプキンソン棒試験計画作成	ホプキンソン棒試験	ホプキンソン棒試験	ホプキンソン棒試験	ホプキンソン棒試験
熱応力	解析評価	解析評価	解析評価	解析評価	解析評価
		接合試験	接合試験	接合試験	接合試験
腐食、エロージョン		腐食試験	腐食試験	腐食試験	腐食試験
非破壊検査		開発試験	開発試験	開発試験	開発試験

*高崎研、TIARA 使用

**PSI

*** PSI、Target -MARKII

**** PSI、Target –MARKIII(計画中)

Table 6.2.2　TIARA におけるイオン照射計画

項　目	試験条件	H10	H11	H12
核破砕模擬条件下での He、H の影響 ・微細組織 ・力学的特性（硬さ等）	照射温度：200、300℃ 照射量：～50dpa He/dpa=200 H /dpa=2000	━		
He/dpa の影響 ・微細組織 ・力学的特性（硬さ等）	照射温度：200、300℃ 照射量：～50dpa He/dpa=50～400		━	
H/dpa の影響 ・微細組織 ・力学的特性（硬さ等）	照射温度：200、300℃ 照射量：～50dpa H/dpa=500～4000			━

Ｈ１３年度以降については、試験結果を評価後、Ｈ１２年に計画立案する。

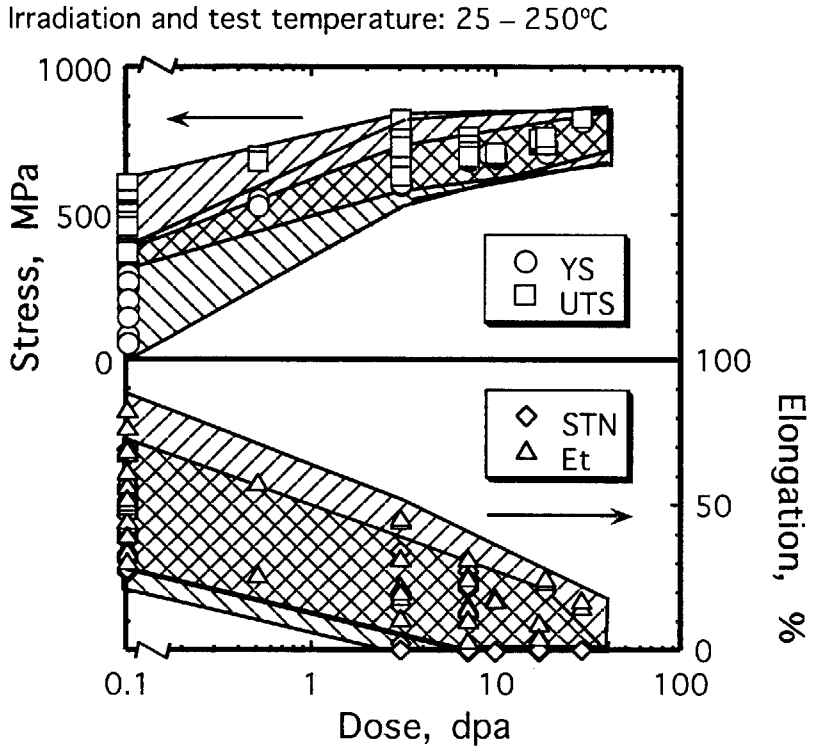


Fig.6.2.1 照射量と引張り特性の関係

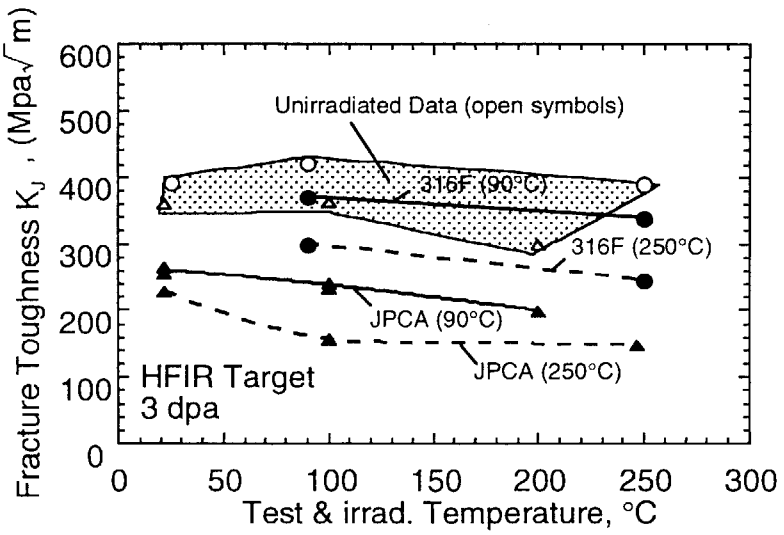


Fig.6.2.2 316鋼の破壊靱性と照射温度の関係

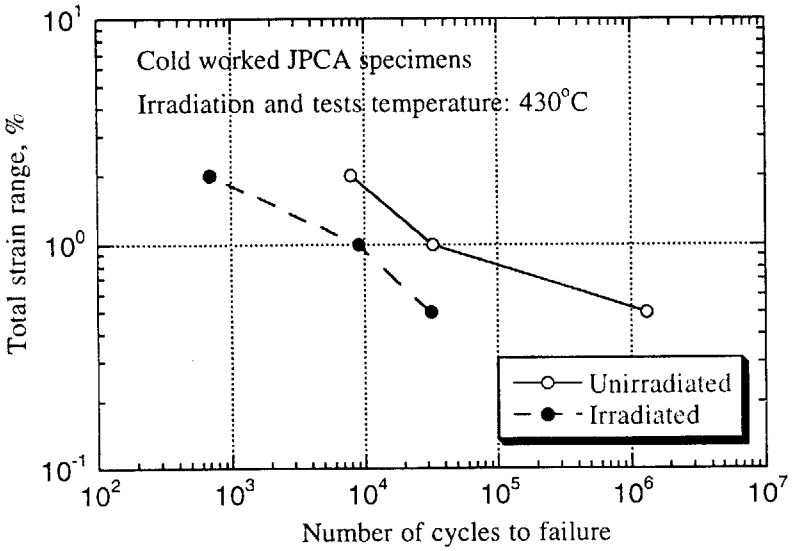


Fig. 6.2.3 疲労特性に及ぼす照射の影響

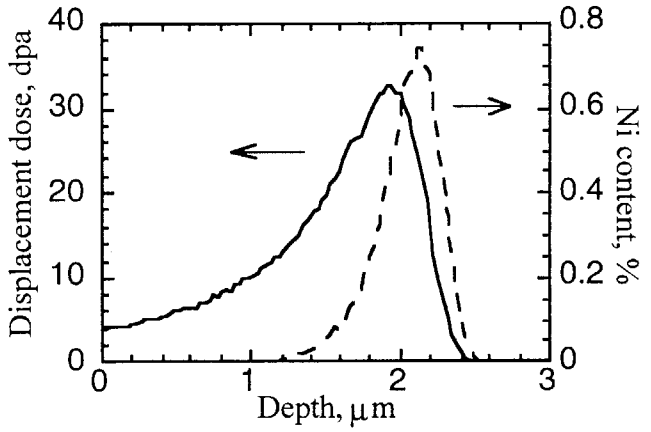


Fig.6.2.4 計算によるNiイオン照射材における表面からの損傷量と注入Niイオンの分布状態

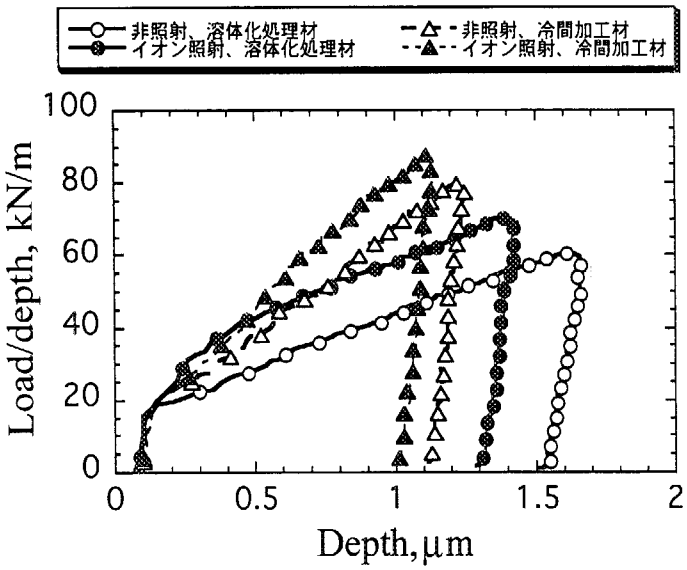


Fig.6.2.5　イオン照射材（JPCA 材）の圧子の押込深さ(d)と荷重/押込深さ(L/d)の関係

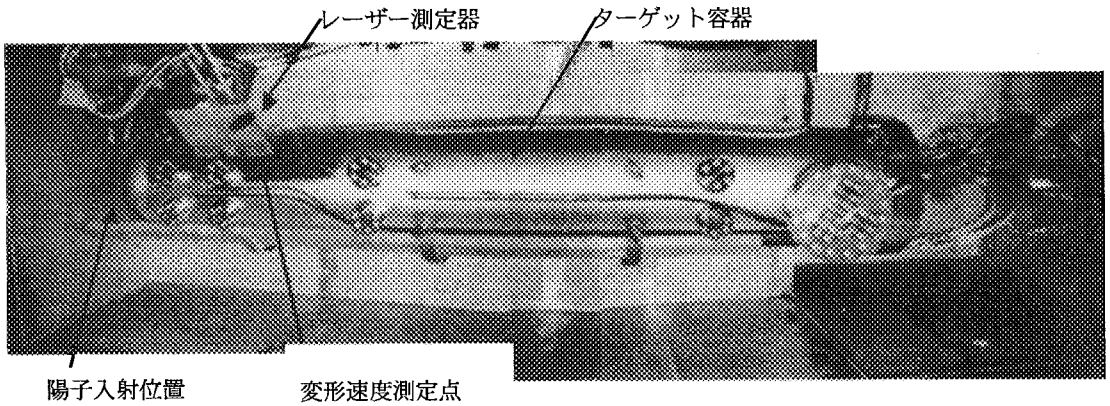


Fig.6.2.6　ターゲット容器外観図

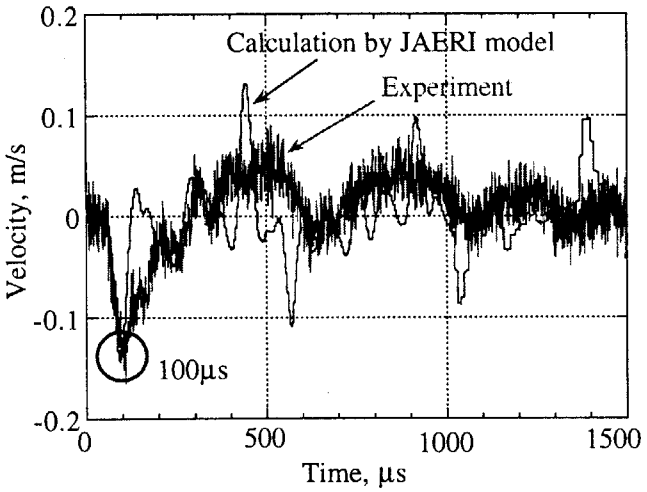


Fig.6.2.7 ターゲット容器変形速度測定結果

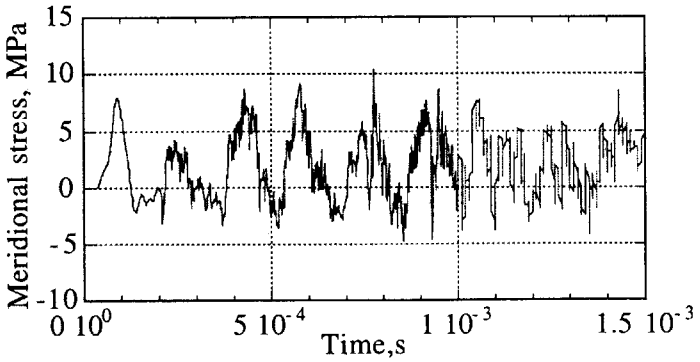


Fig. 6.2.8 レーザー測定点における子午線方向応力の評価結果

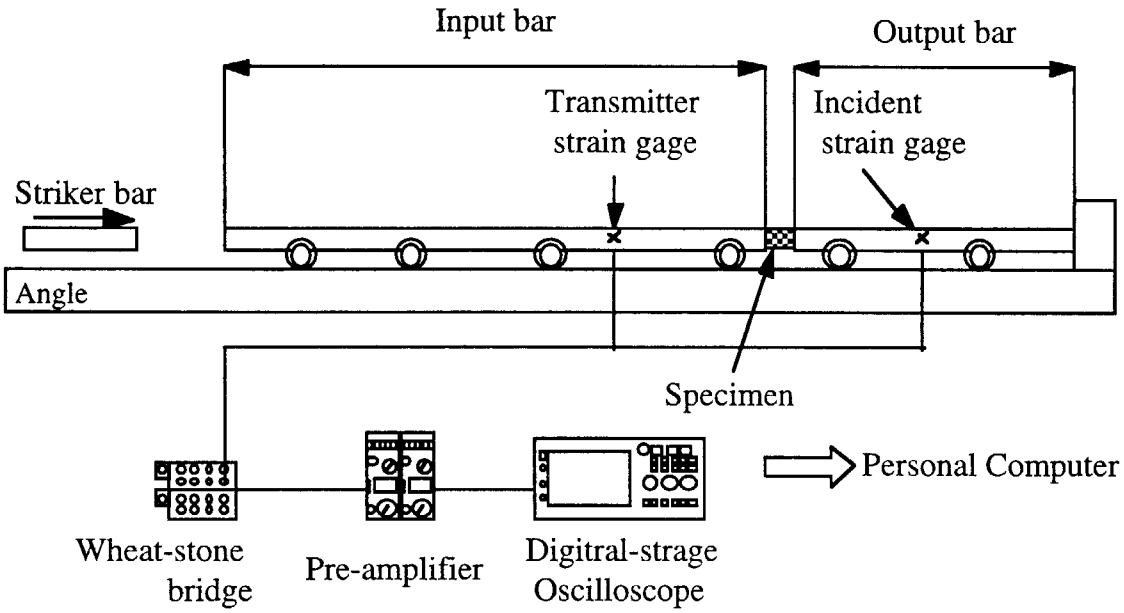


Fig.6.2.9　ホプキンソン棒衝撃荷重負荷試験装置

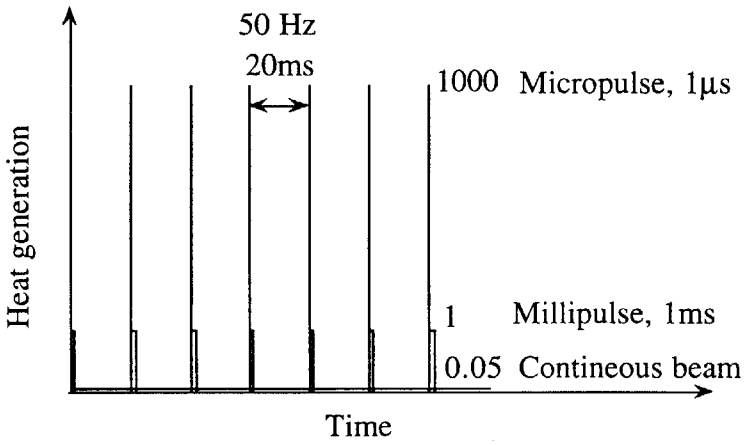


Fig.6.2.10 ビームの入射による窓部材料中の発生熱量と時間変化

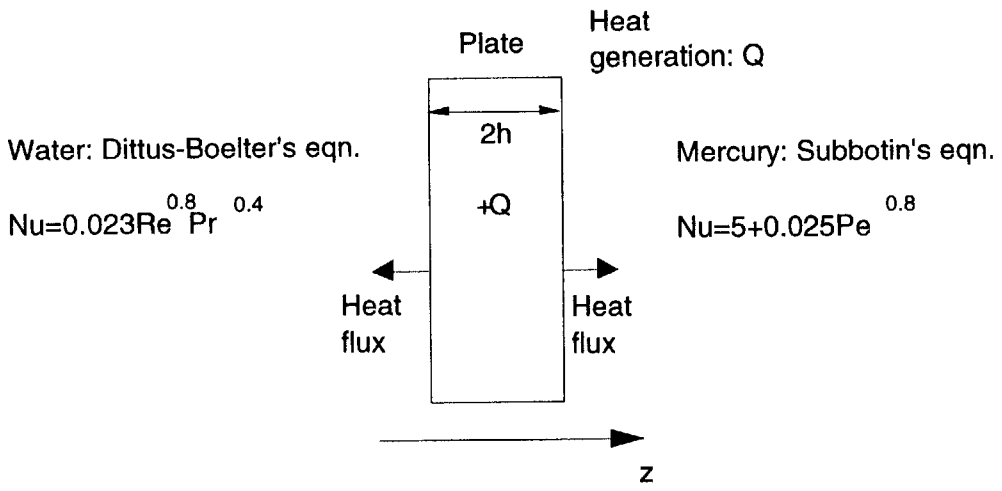


Fig.6.2.11　容器窓の冷却モデル

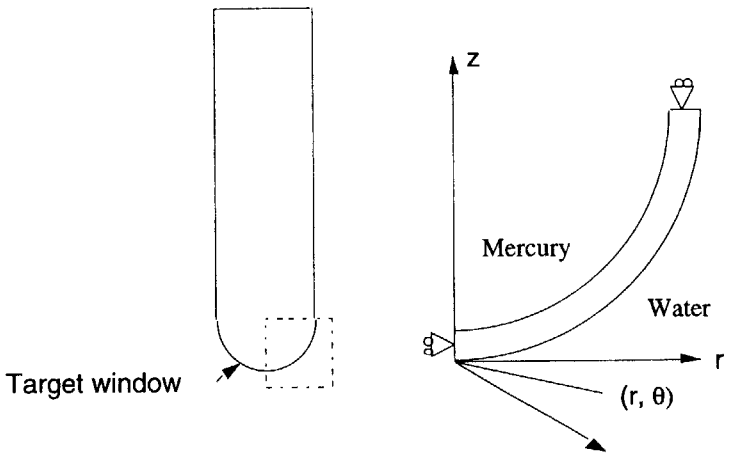


Fig6.2.12　解析モデル

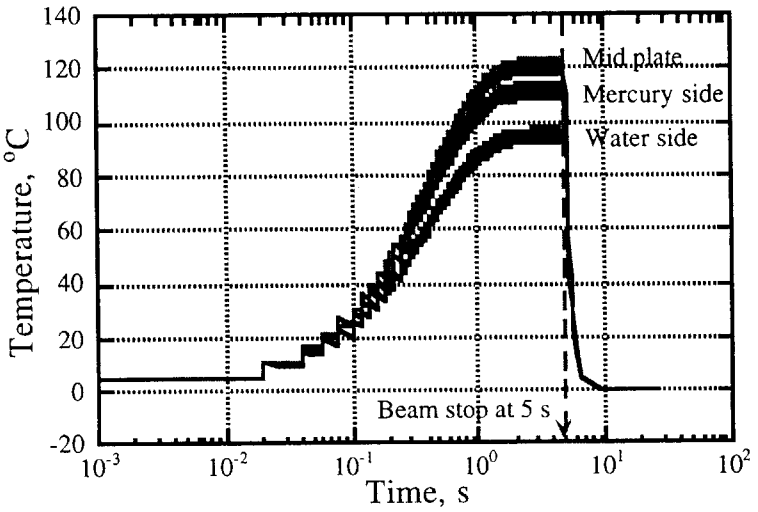


Fig.6.2.13　マイクロパルスによる温度履歴

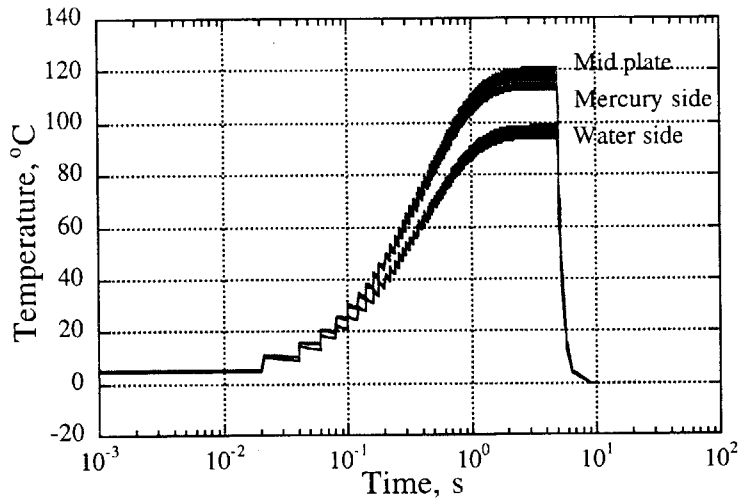


Fig.6.2.14　ミリパルスによる温度履歴

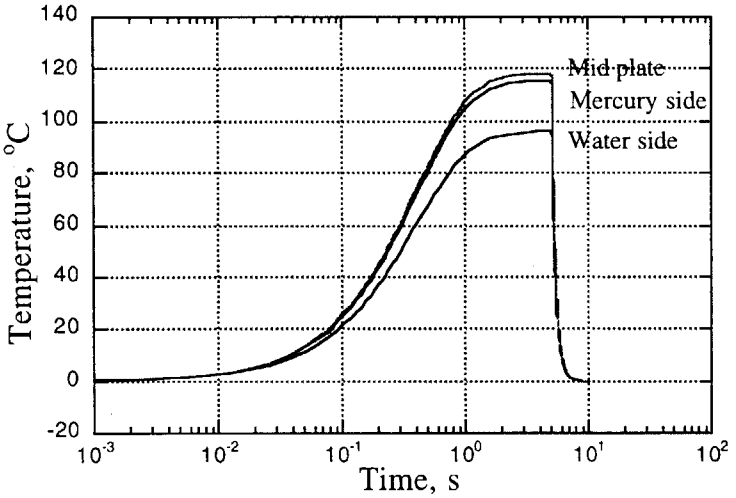


Fig.6.2.15　連続ビームによる温度履歴

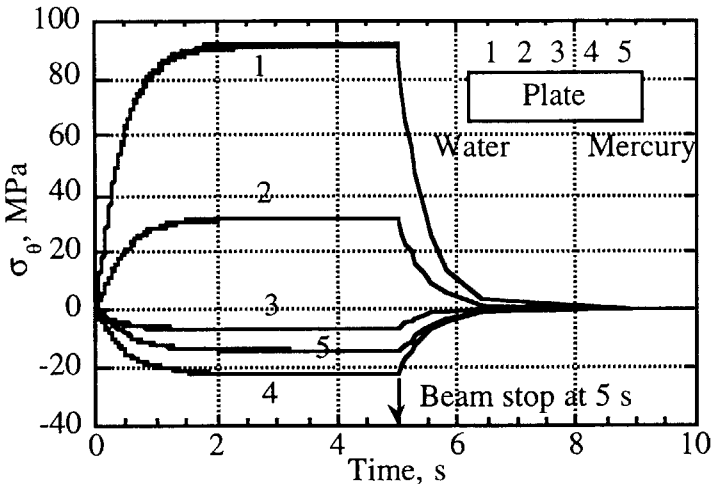


Fig.6.2.16　マイクロパルスによる板厚方向非定常熱応力

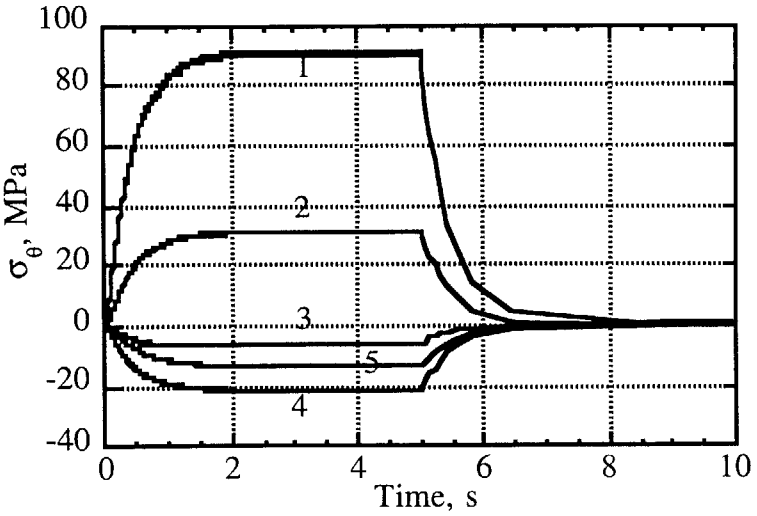


Fig.6.2.17　ミリパルス板厚方向非定常熱応力

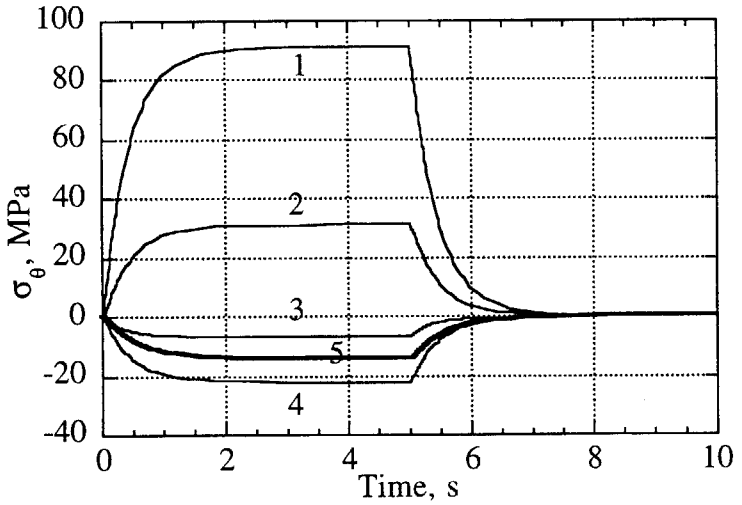


Fig.6.2.18　連続ビーム板厚方向非定常熱応力

6．3　中性子利用技術

6．3．1　高性能スーパーミラー及び応用機器の開発研究

（1）スーパーミラーの意義と課題

低速中性子を効率よく輸送、分岐、集束、単色化、偏極化する技術を開発することができれば、

1）中性子源で発生する中性子を実験装置までより効率よく輸送することが可能となり、中性子強度を実質的に増加させることができる。

2）中性子のエネルギー、運動量、スピン状態を精密制御することによって、中性子回折散乱実験、中性子ラジオグラフィ、即発ガンマ線分析などの分野でさらに高度な情報を得ることが可能となる。

これらによって、２１世紀における生命科学、物質科学、環境科学研究に新たな展開を開くことが期待される。しかし、中性子は、電荷を持たず、磁気モーメントも非常に小さいため、荷電粒子のように容易に制御することは困難である。本研究では、低速中性子の示す顕著な波動性に基づいたスーパーミラー等の中性子光学デバイス開発を実施している。スーパーミラーは、Fig.6.3.1.1 に示すとおり、屈折率の異なる物質（Ni および Ti 等）を対層とした金属多層膜で、これらが模擬する人工結晶格子の間隔を可変とすることで、広い波長領域の中性子を大きな角度でブラッグ反射するものである。

現在、ＪＲＲ－３M原子炉等の中性子源では、ニッケルの全反射現象を応用した中性子導管が用いられている。スーパーミラーを中性子導管に応用すれば、ニッケルの全反射臨界角（0.1°/Å）を m 倍に増加させることができ（mQ スーパーミラーと呼ぶ）、導管出口では m^2 の中性子強度の増加が見込まれ、中性子利用実験において、10 倍以上の飛躍的な中性子強度の増加が可能となる。

高性能スーパーミラーの開発は、多数の薄膜から構成される金属多層膜を原子層オーダーでいかに精度良く成膜するか、という作成技術にかかる。しかし、中性子散乱長密度のコントラストが強く、幅広く利用されている Ni/Ti 多層膜の場合では、Ni の(111)面への強い柱状成長に伴う界面粗さ及び Ni/Ti 間の界面拡散による多層膜構造の乱れが、中性子反射率を低下させることが問題と指摘されてきた。本研究ではこれまでに、１）電子ビーム蒸着法を用いた酸化層形成法による結晶粒低減及び Ni/Ti 界面拡散の低減化技術の開発、２）イオンビームスパッタリング法を用いた NiC/Ti 化合物多層膜の形成による界面粗さの低減及び中性子散乱長密度の増加技術の開発を実施し、ニッケル全反射臨界角の２～３倍の臨界角を持つ多層膜スーパーミラーの開発に成功している。現在、さらに多層膜ミラーの界面粗さを低減する技術開発を実施し、世界的に開発目標となっている４Q スーパーミラーの開発を進めている。

（2）イオンポリッシュ法による Ni/Ti スーパーミラーの高反射率化

イオンビームスパッタリング法で成膜した Ni/Ti 多層膜の界面粗さをさらに低減するため、イオンポリッシュ法の適用技術開発を実施した。イオンポリッシュ法は、低エネルギーの Ar^+イオンビームを成膜直後の Ni 又は Ti 膜に照射し、その界面粗さを研削するものである。薄膜表面

の山部分に位置する結合力の弱い原子にイオンビームを照射することによって、スパッタによるはじき飛ばし、拡散による低ポテンシャルの谷部分への移動を促し界面粗さを低減する（Fig.6.3.1.2 参照）。

実験は、Ni/Ti 多層膜をイオンビームスパッタリング法を用いて成膜直後に斜入射で低エネルギーの Ar^+イオンビームを照射する。この際、Ar^+イオンビームの照射時間（0～1310sec）、加速電圧(100V、300V、600V)、入射角度（10°, 45°）をパラメータとして、Ni/Ti 多層膜（周期長 100Å、10 対層）を作成し、X 線回折により Ni/Ti 界面粗さを評価した。一例として Fig.6.3.1.3 及び Fig.6.3.1.4 にイオンポリッシュ時間をパラメータとして Ni 層又は Ti 層をポリッシュした場合の Ni/Ti 多層膜（d=120Å, N=10 対層）のX線反射率プロファイルを、Fig.6.3.1.5 にフィッテング法による界面粗さ評価結果を示す（加速電圧 100V、入射角度 10°）。これらの実験の結果、Ni 層のみをイオンポリッシュした場合、最適条件として、照射時間 69s、加速電圧 100V、入射角度 10° が得られ、Ni/Ti 多層膜の界面粗さを従来の 7Å から 3.5Å の世界最小粗さに低減することに成功した。また、Ti 層でも界面粗さを 4.0Å に低減することができたが、明確な照射時間、加速電圧、入射角度に対する依存性は認められなかった。Photo.6.3.1.1 に同試料について行った透過型電子顕微鏡による断面観察結果を示す。イオンポリッシュによる界面粗さ低減の効果が明確に認められるとともに、Ni の(111)面への柱状成長がより顕著に現れることが確認された。

これらの最適イオンポリッシュ条件を基に、極短周期 Ni/Ti 多層膜モノクロメータ（d=20Å、50 対層）を Ni 層のみをイオンポリッシュして作成し、X線回折により界面粗さを評価した結果、多層膜全体にわたって 3.0Å の極めて小さい界面粗さが得られていることが判った。この結果は、ニッケルの４倍の全反射臨界角をもつ NiC/Ti 多層膜スーパーミラーについて、90%以上の中性子反射率の作成を可能とするものでる。

（３）今後の計画

イオンポリッシュ法の適用技術開発の成功により、Ni/Ti 多層膜ミラーの極短周期化が可能となった。今後は、本技術をもとに４Qスーパーミラー（最小周期長 72 Å 、膜層数 1000 層）、周期長のさらに短い d=20Å 程度の極短周期スーパーミラーなどの作成技術開発を進め、１）非球面を応用した中性子集束導管、２）超冷中性子発生用スーパーミラー反射鏡、３）中性子マイクロビームの開発を実施する。また、上記非偏極ミラーの他に、イオンポリッシュ法を偏極スーパーミラーの開発に応用し、高性能偏極素子の開発を行う。

最終的には、これらの中性子ビーム制御機器を、大強度核破砕中性子源等のビームラインに適用することによって、ビームラインにおける中性子強度のさらなる増加、独創的な中性子利用研究の進展に資する計画である。

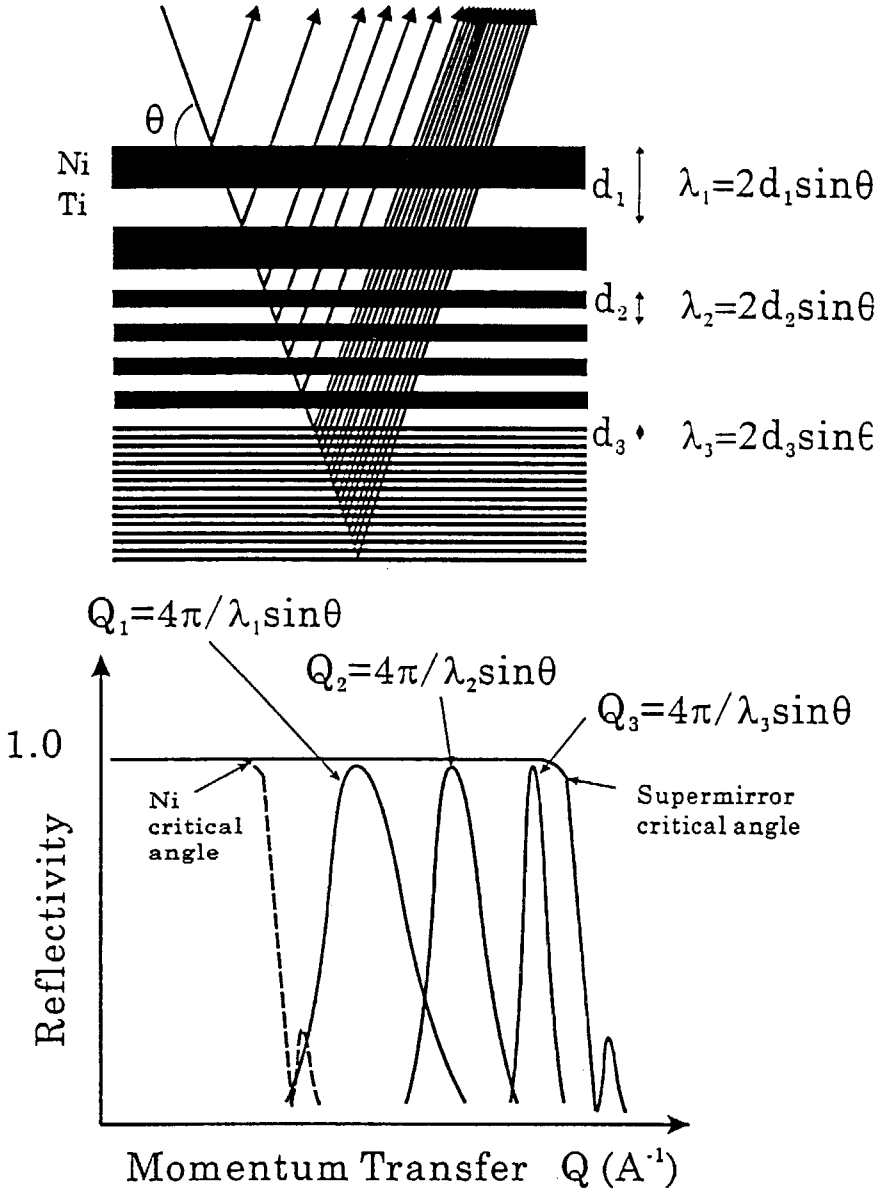


Fig. 6.3.1.1 Concept of multilayer supermirror

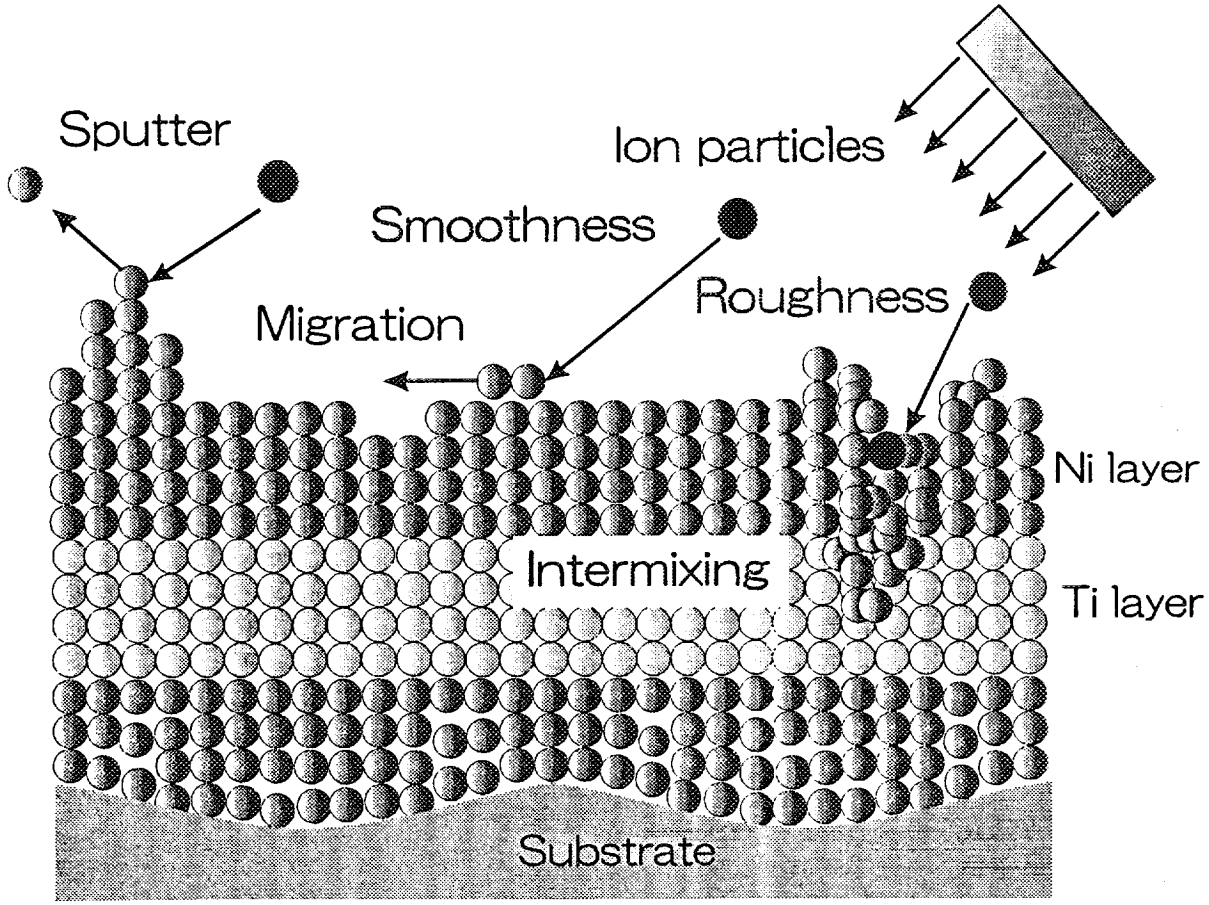


Fig. 6.3.1.2 General process of ion polishing

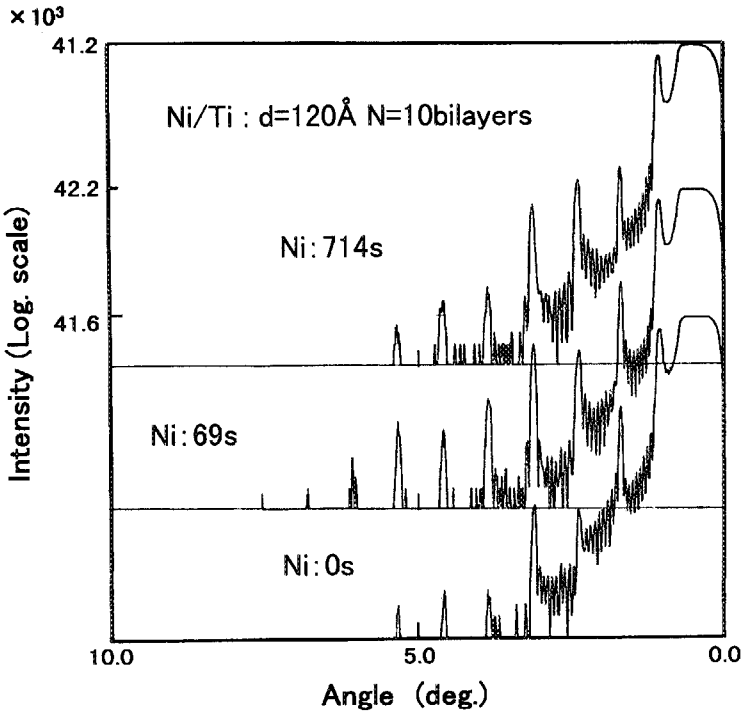


Fig.6.3.1.3 Cu Kα reflection profiles of Ni/Ti multilayers having ion-polished Ni layers with variable ion polishing times

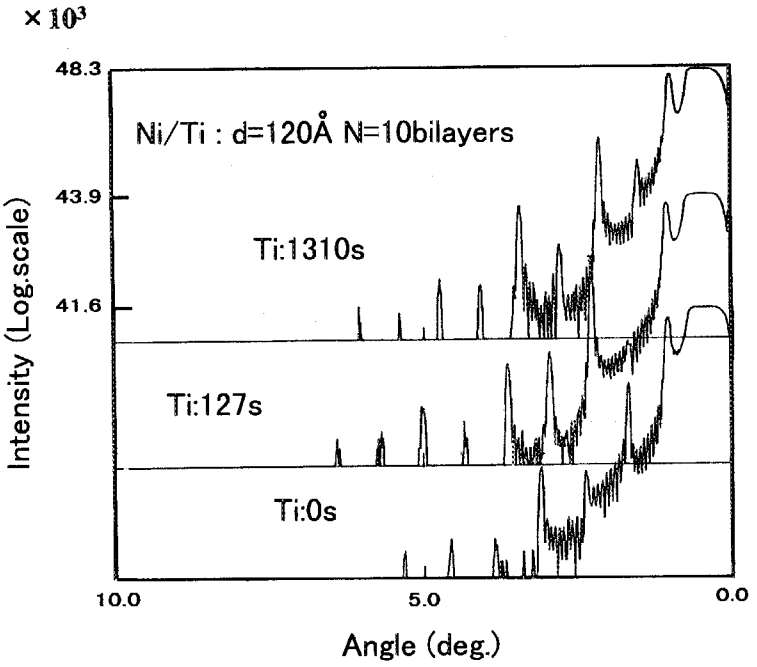


Fig.6.3.1.4 Cu Kα reflection profiles of Ni/Ti multilayers having Ti layers ion-polished with variable polishing times

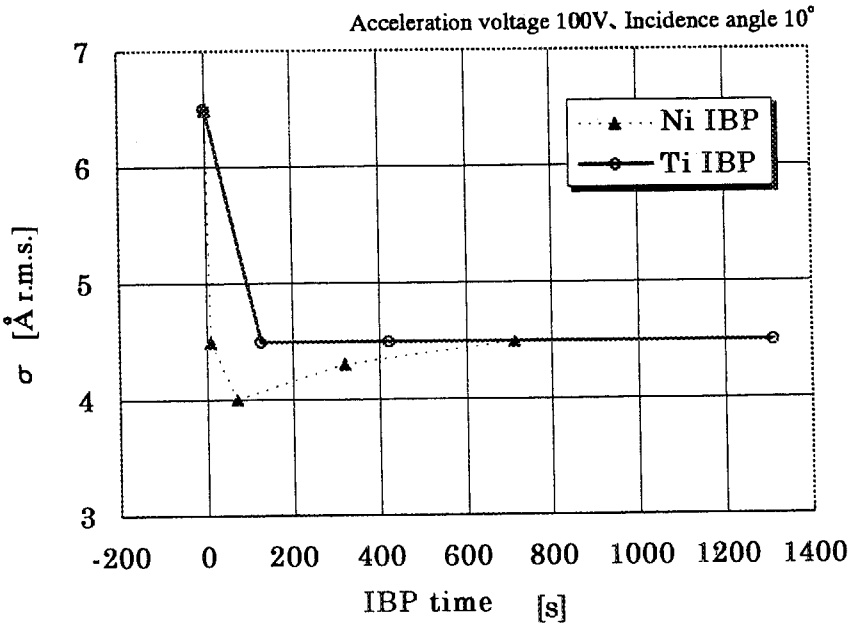
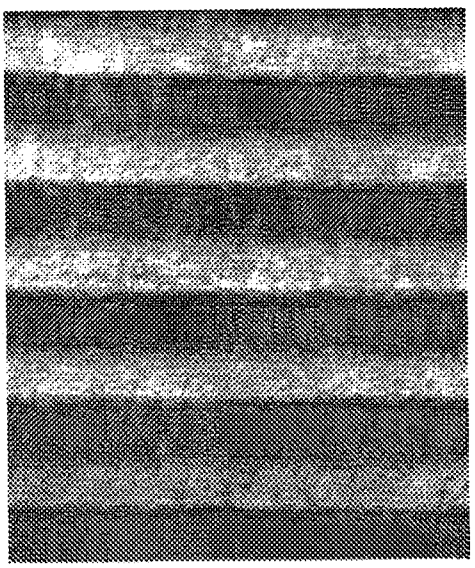
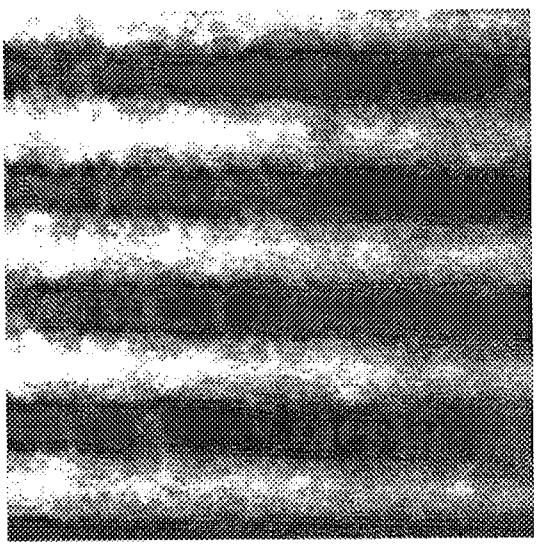


Fig. 6.3.1.5 Evaluated interface roughness σ of the Ni/Ti multilayers with ion-polished Ni layers and ion-polished Ti layers for various ion-polishing times



Ni/Ti multlayers with Ni layers ion-polishedat optimal ion conditions (polishing time:69s、 acceleration voltage:100V、incidence angle 10°)



Ni/Ti multilayers without ion-polishing

Photo. 6.3.1.1 TEM images of Ni/Ti multilayers (d=100Å,10bilayers) with ion-polished Ni layers and without ion-polishing.

6．3．2　中性子ラジオグラフィにおける開発研究

中性子ラジオグラフィは中性子ビームをプローブとして物質の透過像を得る手法であり、広範な研究領域で応用されている。これまで中性子源として研究用原子炉 JRR-3M を用いた熱中性子ラジオグラフィ装置(JRR-3M TNRF)において撮像系を中心とした開発研究及び応用研究を行ってきた。中性子ラジオグラフィで可視化される対象は研究目的により数十ミクロン台の空間分解能を必要とするリチウム電池、植物の根及び茎・花等地上部からミリ秒を切る時間分解能を要求する高速流動現象まで多岐にわたってきており、研究内容の高度化に対応してそれぞれ可視化対象に応じた撮像技術の開発が不可欠となっている。単一の撮像システムにおいて高空間分解能と高時間分解能の両立は極めて困難であり、さらに両者が同時に必要とされることが少ないことから、それぞれの性能に特化したシステムの開発を進めている。

（1）高空間分解能化

1）冷却型 CCD カメラと蛍光コンバータを用いた撮像システム

平成9年度までに冷却型 CCD カメラと蛍光コンバータを暗箱中でレンズカプリングにより光学接続した高解像撮像が可能なシステムを完成させ、さらに本システムとコンピュータ制御可能な回転台を組み合わせて3次元 CT を可能とするシステムを構築した。本システムで f105mm のレンズを使用した場合、画像上の1画素の一辺の長さが蛍光コンバータ上の 80μm に相当する高解像撮像が可能である。本システムで撮像された画像には CCD チップの放射線感受性が高いことに起因して発生するホワイトスポットノイズが観察された。このためノイズ補正法として中央値フィルタに改良を加えたインテリジェントフィルタを考案し、本フィルタを用いて効果的にノイズ補正ができることを実験により確認した。本システムはカーネーションの花の乾燥過程における3次元 CT、軽水炉燃料を模擬したロッドバンドル内二相流の3次元可視化に応用され成果を挙げている。

本システムのように蛍光コンバータとテレビカメラをレンズカプリングにより光学接続する撮像システムでは最終的な画像の空間分解能は蛍光コンバータで決定され、既存の NE426 相当の蛍光コンバータでは 100μm 程度と報告されている。これに対して上述の撮像システムの光学系においては、蛍光コンバータ上で CCD チップ1画素の一辺に相当する長さが従来の蛍光コンバータの有する空間分解能より小さくなり、蛍光コンバータの高空間分解能化を図らない限り解像度の向上は望めない。このため、高空間分解能化を目指した蛍光コンバータの開発として蛍光材の塗布量をパラメータとした薄型の蛍光コンバータを試作し、塗布量と解像度との関係を調べた。その結果、解像度は塗布量との相関が大きく、塗布量を減少させることにより空間分解能を向上できることが分かった。[5)]

2）FOP 接続型 CCD カメラの開発

これまでは冷却型 CCD カメラと蛍光コンバータを用いた撮像システムにより高空間分解能化を進めてきたが、レンズを用いて蛍光コンバータ上の画像を拡大撮影する場合、撮影視野が狭くなる程、発光のカメラへの伝達過程における損失が増加することから、これに代わる光学接

続方法としてファイバーオプティックプレート(FOP)上に蛍光材を直接塗布しカメラに直接接続する撮像システムの開発を開始した。開発研究項目は Fig. 6.3.1 に示すとおりであり、平成１１年度は蛍光材として Gd_2O_2S(Tb)を使用し発光強度及び解像度に関して最適塗布厚さを実験により求める。さらに FOP 端面の加工により蛍光材の発光を効率良く FOP に伝えるための接合技術の開発を行う。

（２）高時間分解能化

京都大学との協力研究によりJRR-3M熱中性子ラジオグラフィ装置(第２撮影室熱中性子束：1.5 x 10^8 n/cm^2s) において毎秒 1,000 フレームを超える高速度撮像の可能性が示された[6]のを受けて、高速度撮像システムの開発を開始した。導入した高速度ビデオシステムは、フルフレームモード時で最高毎秒 4,500 フレームでの撮像が可能であり、高速流動現象の可視化・観察等、事象の推移が速いものに対して特に有効である。さらに高速度撮像に伴う画像輝度の不足を補うためイメージインテンシファイヤを付加した。本システムは既に、高速増殖炉の新型蒸気発生器の開発に関連して溶融金属と水との直接接触伝熱現象の可視化、核融合炉のプラズマ対向機器、核破砕中性子源のターゲット開発に関連して矩形流路内沸騰二相流のボイド率計測、TMI 事故に関連して模擬溶融炉心の下部ヘッド内流動可視化、蒸気爆発の粗混合状態における溶融金属挙動の可視化等に応用され多数の成果を挙げている。

高空間分解能化の場合と同様にシステムの最終的な時間分解能は、イメージインテンシファイヤの応答特性が無視できるとすれば蛍光コンバータの残光時間で決定される。NE426 相当の蛍光コンバータは ^{6}LiF 粒子と ZnS(Ag)粒子を混合しバインダーを用いて基板に塗布したものである。このため蛍光コンバータの時間分解能は ZnS(Ag)の残光特性に依存する。ZnS 系の蛍光体では Fe, Ni, Co の鉄族元素が少量（～10ppm）でも含まれているとこれらの非発光中心へのエネルギー伝達により、本来の蛍光（ピーク波長：450 nm）が抑制される。本作用は蛍光体の長い残光を取り除き短残光にする目的で応用可能である。このため蛍光コンバータの短残光化を目的として ^{6}LiF:ZnS(Ag)を組成とする蛍光コンバータにキラー物質として Ni を微量添加したものを製作した。(Fig. 6.3.2 参照)　蛍光コンバータの仕様は塗布サイズ 10cm x 10cm で ZnS(Ag,Ni)平均粒径：3.6μm、^{6}LiF 平均粒径 5.6μm であり、混合比は ZnS(Ag,Ni)/^{6}LiF=6/4(重量比)とし塗布重量は45mg/cm^2とした。Niの添加量はパラメータとし0ppm, 0.5ppm,1.0ppm, 2.0 ppm の４種類を試作した。製作に際し 254nm の紫外線励起による残光(450 nm)特性及び発光量の測定を行った。Fig. 6.3.3 に４種の蛍光コンバータの残光特性を、Fig. 6.3.4 に４種の蛍光コンバータの発光スペクトルを示す。両グラフからキラー物質の添加により残光特性の改善及び発光量の低下が確認された。本結果は紫外線励起によるものであり、実際の蛍光コンバータでは ^{6}LiF と中性子との(n,α)反応によるα粒子及びTにより ZnS(Ag)が励起され発光していることから平成１１年度は中性子ビームを用いた性能測定試験を行う予定である。さらに短残光化を目指して赤外線照射による強制消尽法の開発を進める。

参考文献

1) Matsubayashi M., et.al.: "High resolutiion static imaging system using a cooled CCD camera," Nucl. Instr. and Meth. A377 (1996) p107.
2) Matsubayashi M.,et.al.: "High resolution static imaging system in JRR-3M neutron radiography facility," 5th World Conference on Neutron Radiography, June 17-20, 1996, Berlin.
3) Nakanishi T.M., et.al.: "CT imaging of water in carnation flowe," Nucl. Instr. and Meth. A (for publication).
4) Takenaka N.,et.al.: "Three-dimentional void fraction measurement of two-phase flow in a rod bundle by neutron radiography," 5th World Conference on Neutron Radiography, June 17-20, 1996, Berlin.
5) Tsuruno A. ,et al.: "Development of fluorescent converter for fine neutron radiogaraphy," 2nd Top. Meet. on Neutron Radiography System Design and Characterization, Nov. 12-18, 1995, Shonan.
6) Hibiki T., et.al.: "Visualization of fluid phenomena using a high frame-rate neutron radiography with a steady thermal neutron beam," Nucl. Instr. and Meth. A351(1994) p.423.

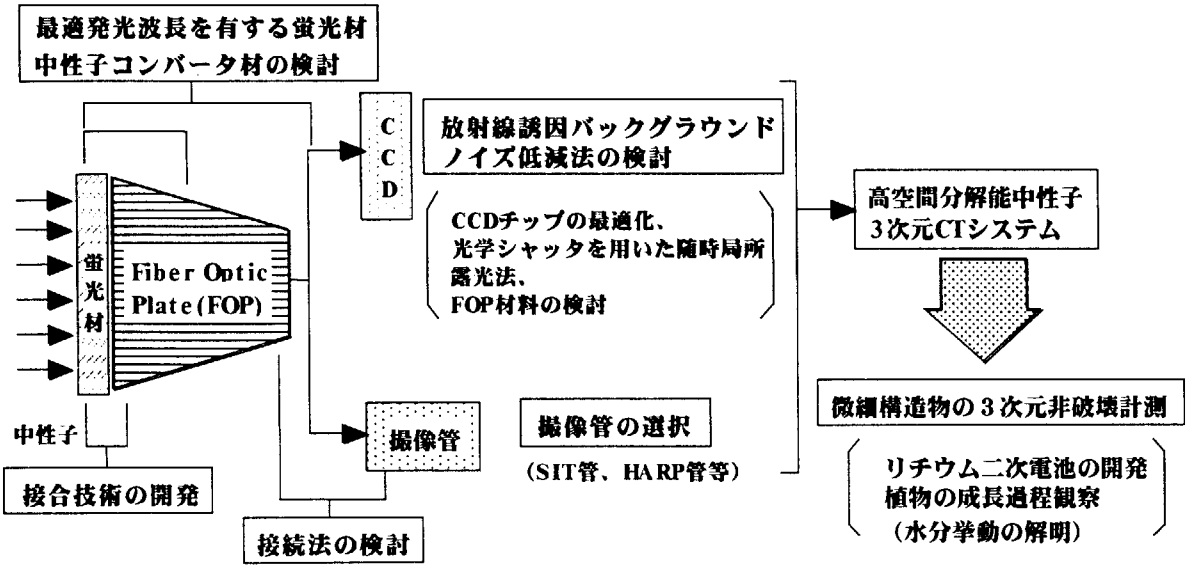


Fig. 6.3.1 FOP 接続型 CCD カメラの開発

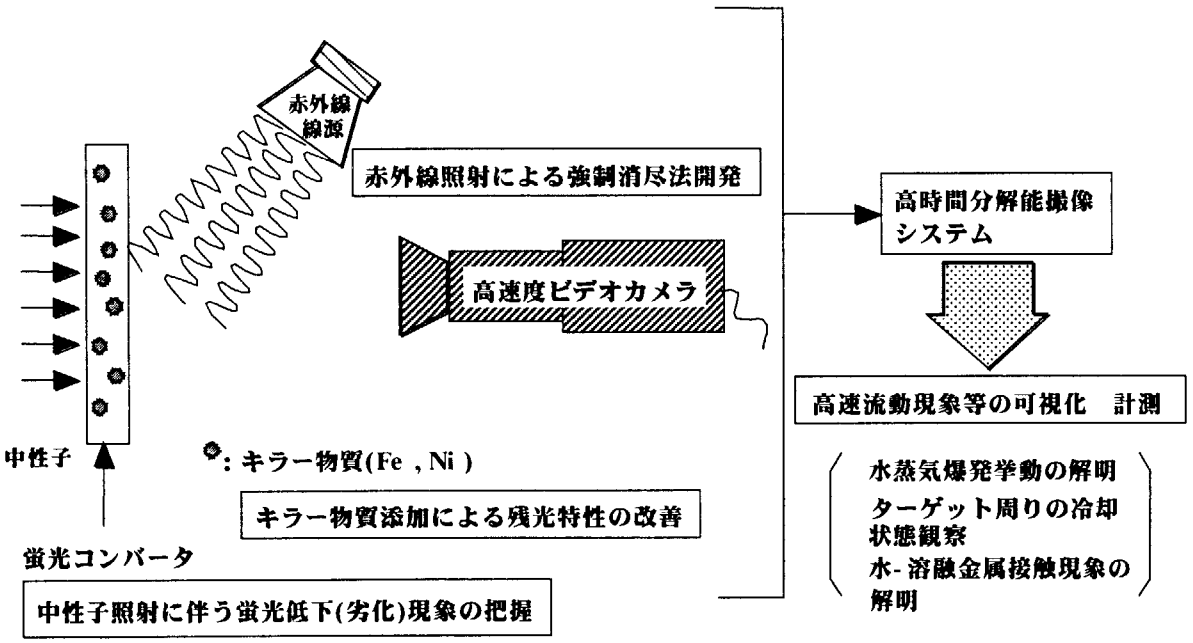


Fig. 6.3.2 短残光蛍光コンバータの開発

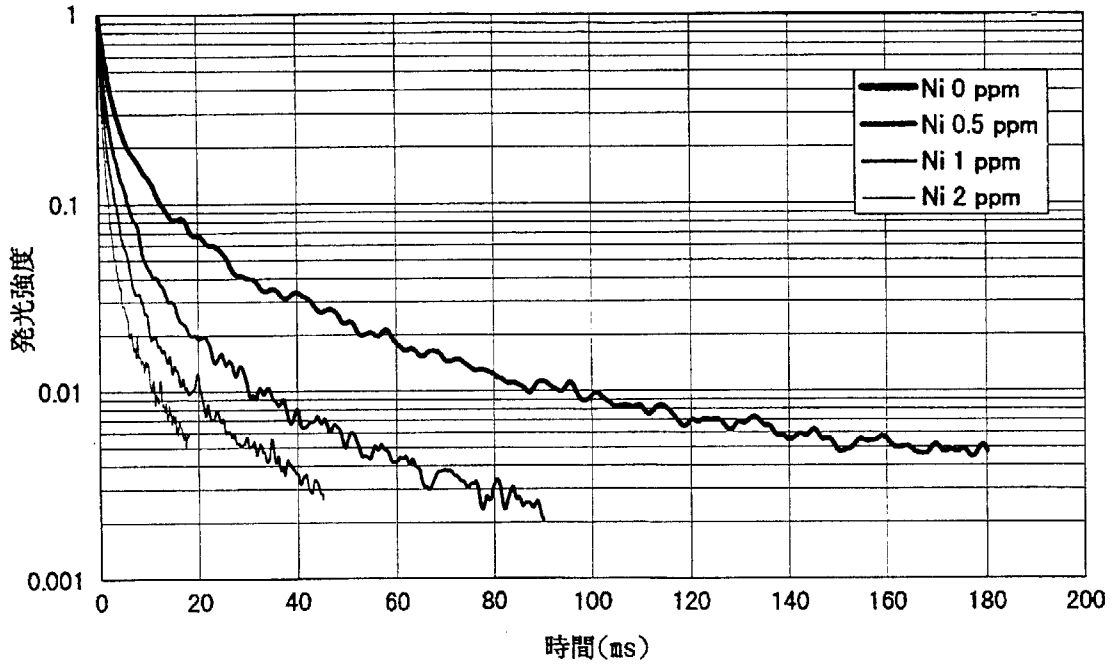


Fig. 6.3.3 UV(254 nm)励起による残光(450 nm)特性

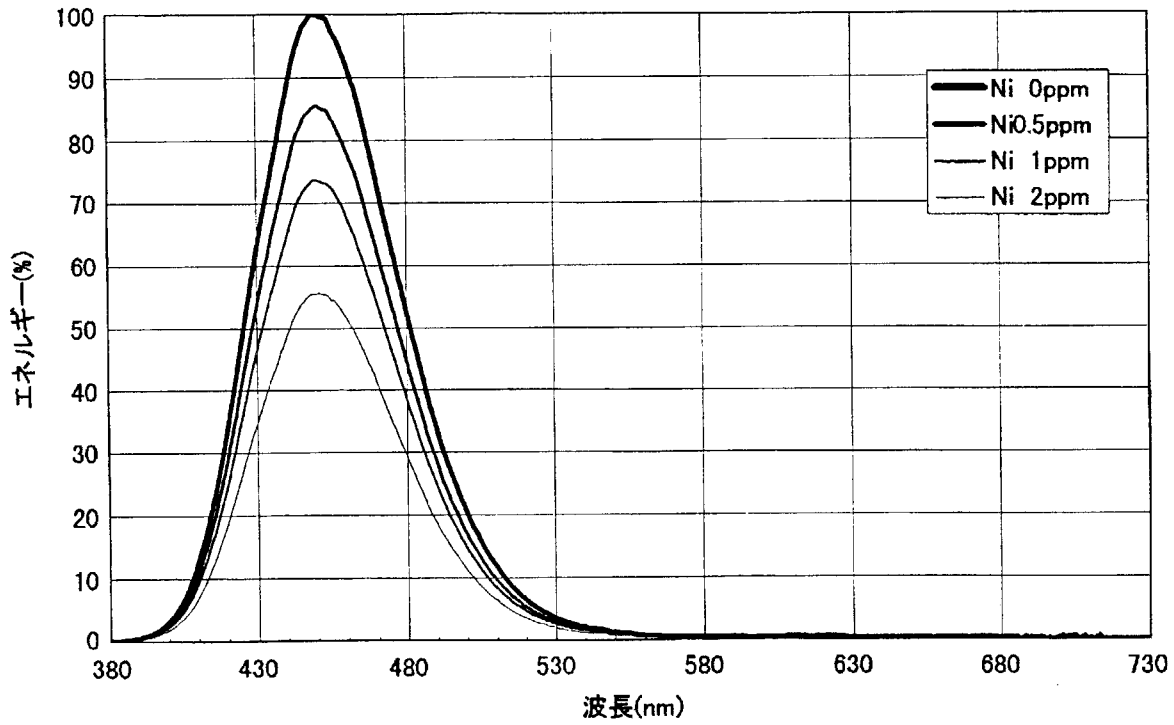


Fig. 6.3.4 UV(254 nm)励起による発光スペクトル

6．4　ＲＩイオン源

6．4．1　はじめに

スポレーションＲＩ科学を進めるために計画しているＲＩビーム加速施設（核破砕片加速施設）では、核反応で生成した不安定核種（ＲＩ）の中から特定質量のＲＩを同位体分離器（Isotope Separator On-Line : ISOL）により選択し、後段加速器で目的のエネルギーまで加速する。この施設では、後段加速器には既存のタンデム加速器とブースターの使用を予定している。また、加速する不安定核は、ウランやトリウムの核分裂反応ならびに核破砕反応で生成する中性子過剰核に着目している。ここでは、これらＲＩの同位体分離に用いるイオン源に係わるＲ＆Ｄについて述べる。

まず、核破砕反応で生成したＲＩのイオン源から引き出されるビーム強度を考えてみる。これは、陽子加速器から得られるビーム強度ϕ、標的物質の原子数N、着目したＲＩの生成断面積σ、標的物質からイオン源への移行率ε_1、イオン化効率ε_2およびイオンの引き出し効率ε_3に依存する。また、ＲＩが標的物質およびイオン源内に留まる時間が長い場合、標的内ならびにイオン源内で核崩壊が進み、引き出されるビーム強度が減少する。すなわち、ＲＩの物理的半減期を$T_{1/2}$、滞留時間をt_{del}で表すと、ビーム強度$I(ions/s)$は次式で近似できる。

$$I = N\sigma\phi\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 \exp[-\ln 2 \frac{t_{del}}{T_{1/2}}]$$

これより、標的物質およびイオン源のＲ＆Ｄで考慮すべきことは、生成核のイオン源への効率よい迅速な移送と高いイオン化効率をいかに達成するかである。また、後段加速器としてタンデム加速器を使用するので、効率よい負イオンの生成も重要なＲ＆Ｄ項目である。ここで、滞留時間は標的からの拡散時間とイオン化室内での付着時間と考えられており、温度が高いほど短い。また、生成核を効率よく移送するには、標的室ならびに標的室とイオン化室を結ぶ移送管およびイオン化室を均一に高い温度に保っておくことが重要であることを特筆しておく。

6．4．2　イオン源の選択：FEBIADおよび表面電離負イオン源

ウランの核分裂および核破砕反応で生成する、中重核の負イオン生成に着目すると、周期表でVIIA族元素のCl, Br, Iは電子親和力E_Aが3eVであることから、LaB_6をイオン化面とした表面電離負イオン源でほぼ100%、E_Aが2eV程度のVIA族のSe、Teでは最大16%の効率が期待される。その他の元素にはFEBIAD（Forced Electron Beam Induced Arc Discharge：低圧放電型）イオン源で正1価のイオンとして引き出し、荷電変換により負イオンに変換する方法が最適と考えられる。すなわち、周期表でIVA族（Ge,Sn,Pb）、VA族(As,Sb,Bi)、IB族（Cu,Ag,Au）元素のイオン化効率はFEBIADイオン源では約20~50%と報告されている（Fig.6.4.1参照）。これら元素の1価正イオンを1価負イオンに変換する効率は、E_Aが1eV程度より高いことから、10~20%と見積もられる（Fig.6.4.2参照）。したがって、イオン化効率と荷電変換効率を考慮すると、Sn, Sb, Geなどは2~4%の引き出し効率が期待される。以上の評価か

ら、本施設では、Br, I, Se, Te のイオン化には表面電離負イオン源を、Ge, As, Sn, Sb, Cu, Ag などのイオン化にはFEBIAD イオン源を選択した。

つぎに、イオン化室内滞留時間を評価する。FEBIAD イオン源では、1500K～2000Kの温度範囲で、壁への付着時間を除けば滞留時間は約$0.5M^{1/2}$ms （Mはイオンの質量）と計算されている 。壁への付着時間は、イオン化され引き出されるまで繰り返す壁との衝突回数と吸脱着に係わるエントロピーΔH_a（ｅＶ）と温度で決まる。イオン化室内を2000K程度の温度に加熱した場合、ΔH_aが５ｅＶ以下のＧａ，Ａｇ，Ｓｎ，Ｓｂ，Ａｕ，Ｂｉ，Ｃｕでは１回あたりの付着時間は0.1ms、ΔH_aが5.8ｅＶのＡｓでは約１秒と評価される。また、より高い温度：2200Kでは、Ａｓの付着時間は50ｍｓと大幅に短縮する。このように、イオン化室を高温にできるFEBIAD型イオン源では、これら核種のイオン化室滞留時間は0.1秒以下と評価でき、核崩壊によるビーム強度の損失を少なくすることができる。表面電離型負イオン源内での滞留時間は、LaB_6 の反応性が高いことから、イオン化面との付着時間が長く、1600～1700KでＩ　～２秒、　Ｂｒ～20秒と報告されている。より短い滞留時間とするにはより高い温度～1800Kまで昇温する必要がある。

６．４．３　標的／イオン源の配置

現在考えられる標的とイオン源の配置を模式的にFig.6.4.3に示す。これは、ＣＥＲＮのＩＳＯＬＤＥと呼ばれるオンライン同位体分離器で使用されているものである。この場合、入射する陽子ビーム強度は平均で２μＡ程度を使用している。イオン源はＦＥＢＩＡＤ型、標的はウラン炭化物を約 100ｇ装着できる構造である。Fig.6.4.3 に示した標的とイオン源の構成では、ＲＩは標的から熱拡散で離散し、移送管中を移動しイオン化室へと導かれる。

標的からの生成物の拡散ならびに移送管表面（Ｔａ表面）との付着時間は、イオン化室内の滞留時間と同様、分離ビーム強度に影響する。付着時間は、先に述べたように、移送管を2000～2200Kの温度に保つことにより短くできる。拡散速度は、標的（この場合ウラン炭化物を候補とする）の組成と密度により大きく左右される。報告によれば、ウラン炭化物の粒径を細かくし温度を2300Kに昇温することで、比較的拡散時間が長いアルカリ元素を約５秒の滞留時間で引き出している。したがって、図示した標的とイオン源の配置では、Ｇａ，Ｓｎなどの核種が生成してからイオンとして引き出されるまでの時間は数秒と見積もられる。

６．４．４　陽子ビームの標的／イオン源への入射

大強度、大電流の陽子ビームを、高電圧上に設置した標的／イオン源へ入射する場合、高電圧電位に保たれた同位体分離器と地上電位間での放電防止と標的物質の飛散防止を図る必要がある。そこで、陽子ビームラインと高電圧上に設置するイオン源を切り離す配置を取り入れる。すなわち、陽子ビームを一度空気中に取り出し、再び真空に保たれたイオン源に入射する。しかしながら、イオン源を高電圧電位に保ったまま陽子ビームを入射すると、陽子ビームにより空気が電離され放電を引き起こす。そこで、ＩＳＯＬの加速電圧を、パルスで送られた陽子ビームが入

射する直前にｏｆｆにし、通過後ｏｎにするパルス運転法を取り入れる。この方法は、ＩＳＯＬＤＥで実用化されており、実際パルス幅2.4μｓの１ＧｅＶ陽子ビームの入射35μｓ前に加速電圧をｏｆｆし、入射後20～30ms経過した後ｏｎにしている。このような運転方法を採用することにより、安定した分離が達成できるとともに、標的物質のビームラインへの飛散等も避けられる。さらに、標的／イオン源の遠隔操作（ロボット）による着脱機構が容易になる。

より大電流の陽子ビームを使う場合、ガスジェット搬送法による生成核のイオン源への移送を検討している。ガスジェット搬送法の移送効率は、ウランの陽子誘起核分裂で生成する核分裂生成物に対して約60%の効率を実験的に確認している。移送された核分裂生成物のイオン化には、搬送ガスや搬送に用いるクラスター等が大量にイオン源内に導かれるため、ＦＥＢＩＡＤイオン源より電流が取れるＢｅｒｎａｓ－Ｎｉｅｒ型イオン源の開発を検討する。

６．４．５　今後の計画：荷電変換効率とイオン化効率の測定

ウランの陽子誘起核分裂で生成する中重核の、分離効率と荷電変換効率の測定を行うため、ＦＥＢＩＡＤイオン源と荷電変換装置の整備を進めてきた。今後、これらの装置を使い、ウランの陽子誘起核分裂で生成する核種の分離効率と荷電変換効率の測定を進める。ここで、標的物質の最適化では、ウラン炭化物の組成の違いによる生成核の放出率を明らかにする。荷電変換効率の測定では、分離イオンの加速エネルギーと変換効率の関係、ＭｇまたはＣｓの蒸気密度と変換効率の関係等を明らかにする。また、荷電変換後のビームエネルギーの広がり：エミッタンスの測定も予定している。これら実験データは、イオン源ならびに荷電変換装置の最適化と実機の設計に反映させる。これらＲ＆Ｄは、既存のオンライン同位体分離器（ＪＡＥＲＩ－ＩＳＯＬ）と、タンデム加速器から得られる陽子ビームを用いて進める。

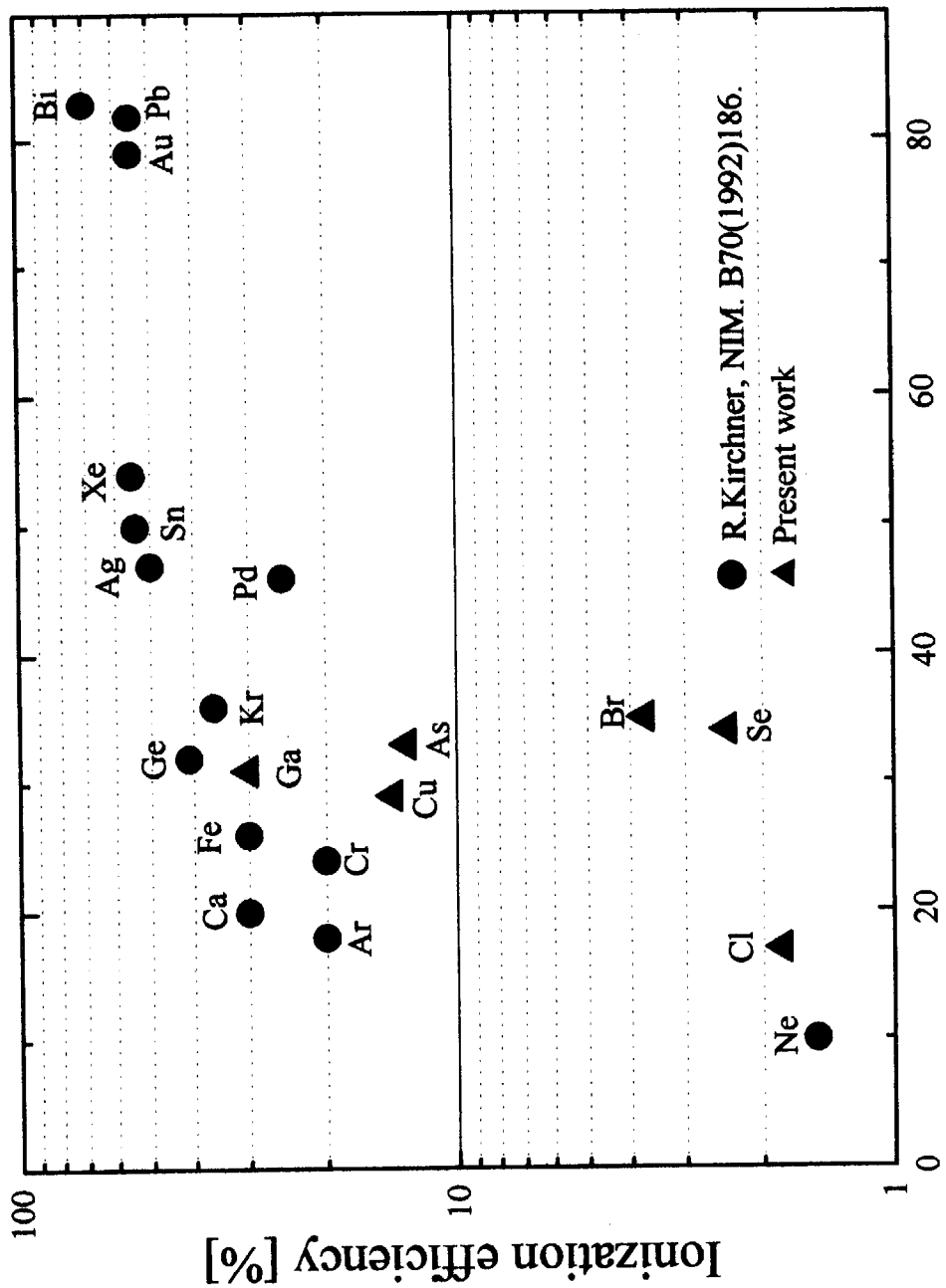


Fig.6.4.1 Ionization efficiency of various elements by FEBIAD ion source

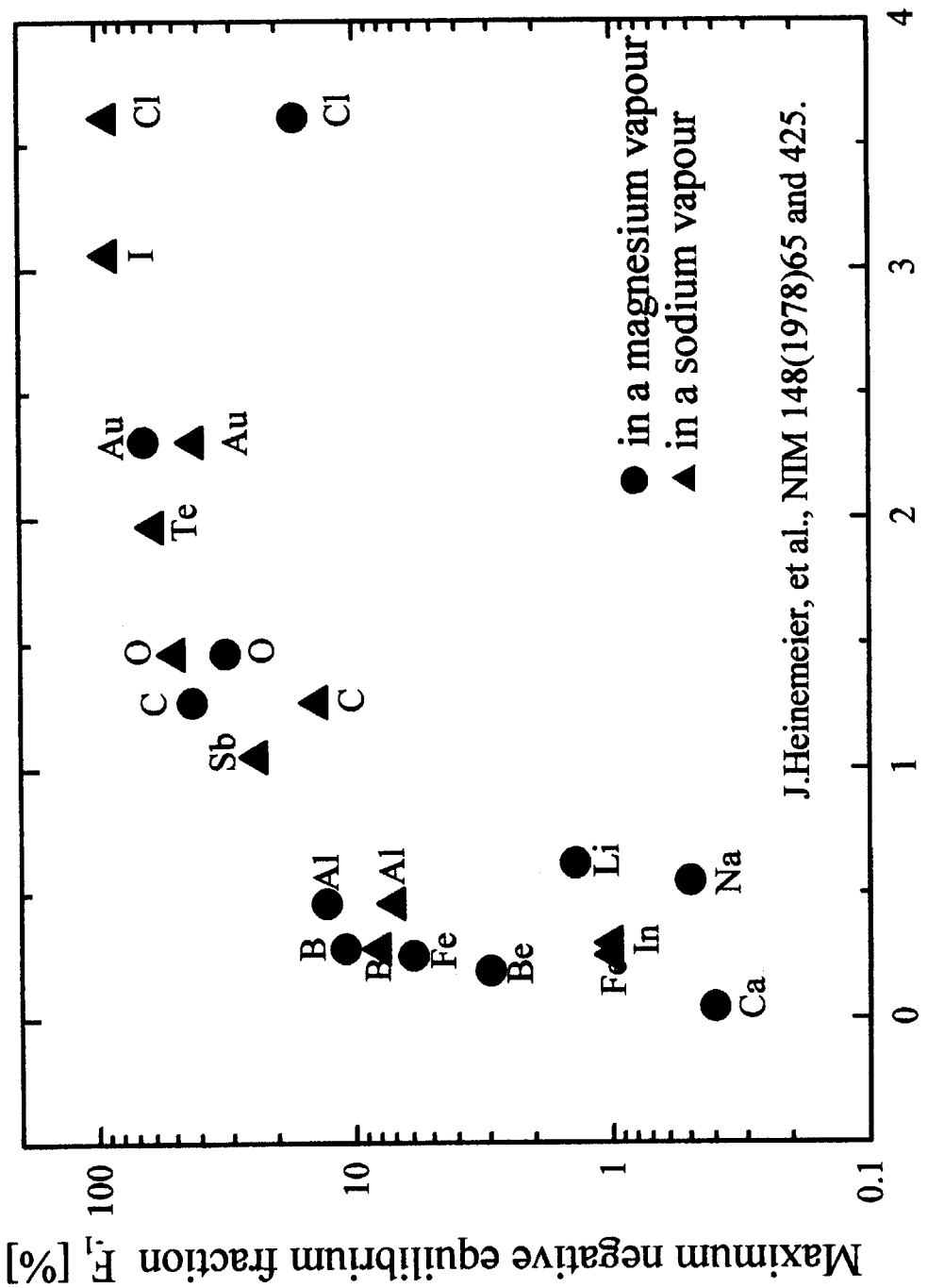


Fig.6.4.2 Charge exchange efficiency and electronic affinity

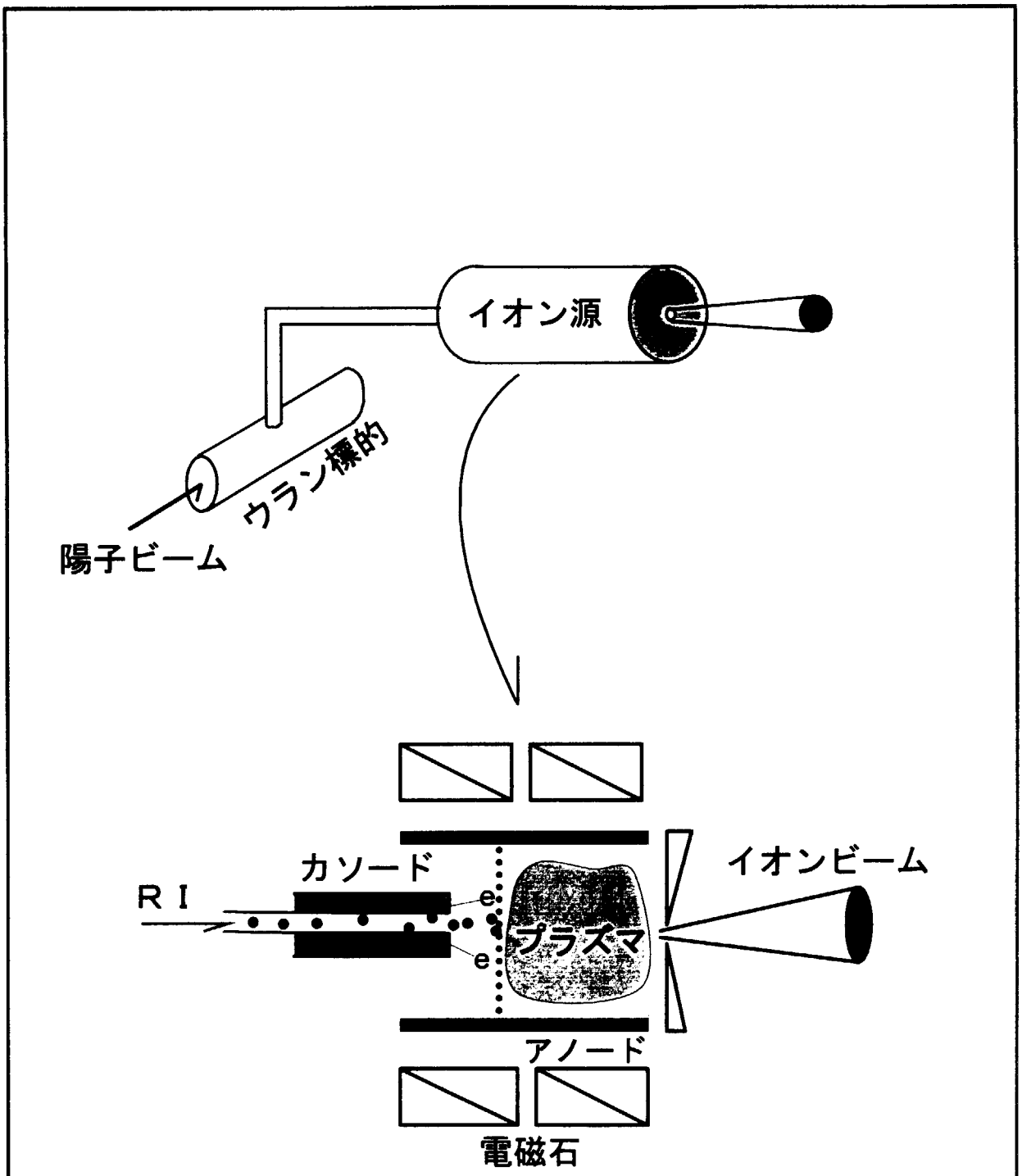


Fig.6.4.3 FEBIAD ion source and target arrangement

６．５　ビームロスモニタ

大強度陽子加速器の遮へい設計や加速器の運転モードに密接に係る加速部のビームロスモニタの開発を進めている。加速される陽子ビームが大強度であるため、加速部でのビームロスモニタには、これまでにない性能が要求される。

６．５．１　使用目的

大強度陽子加速器用ビームロスモニタの使用目的を以下に述べる。

まず、大強度陽子加速器の安全性の面から検討する。大強度の陽子ビームがコントロールを失い直接加速管に当たる場合あるいはビームスピルが起こる場合、加速管の損傷、加速管内での真空度の劣化、そして加速管及びその周辺機器の放射化等を引き起こす。このため、このような大強度陽子ビームのロスを加速管周辺に設置したビームロスモニタにより常時監視することが不可欠である。

次に、大強度陽子加速器の製作コスト面から検討する。なんらかの原因により大強度の陽子ビームロスが生じた場合、加速管及びその周辺に配置された機器類からは、高速中性子及びガンマ線などが発生し放射線線量率が急激に上昇する。このため、加速器施設の周辺部での放射線線量の法令基準値を守るため遮蔽体が使用される。高強度のビームロスを想定してこの遮へい設計を行う場合、加速ビームの停止に時間がかかると遮へい体の厚さを厚くすることが要求される。製作コストの面からはその厚さをできるだけ削減する必要があり、短時間に陽子ビームを停止できる装置とすることにより放射線線量率を法令基準値以下とすることを担保することができる。

また、大強度陽子加速器の性能の善し悪しを決める大きな要因として高品質の陽子ビームを作り出すことがあげられる。ビームの高品質化を行うには、微少なビームスピルの検出を行い加速器の運転にフィードバックすることが不可欠である。高感度なビームロスモニタによりビームスピルを監視することによりこれを実現することができる。

６．５．２　開発の必要性

上記で述べたように大強度陽子加速器の運転管理には信頼性の高い高性能なビームロスモニタが不可欠である。大強度陽子加速器用ビームロスモニタに要求される性能をまとめると以下となる。

最も重要な性能は、ビームロスモニタの不飽和特性である。これは、大強度のビームロスが生じた場合にも、検出器が飽和し発生したビームロス量がわからなくなることを防止することが、加速器運転の安全性・信頼性に直結しているためである。

高速応答性も重要な性能である。大強度陽子加速器が数１０ｍｓ間隔でのパルス運転をしている場合を考えると、コントロールを失いビームロスを引き起こした際、次の加速ビームを停止するためには、１０ｍｓ以下でビームロス量を検出し停止判定を行うことが不可欠となる。

また、高品質の陽子ビームを得る上では非常に微少なビームロスをモニタする必要がある反面、

上記で述べたように加速ビームがコントロールを失って大きなビームロスを生じた事態を想定すると大強度のビームロスをモニタする必要があり、ビームロスモニタには高ダイナミックレンジ化が不可欠となる。つまり、6桁以上変化するビームロスを測定することになる。

一方、加速器が大型化し加速管の総延長距離も数１００m以上と長くなるため、ビームロスモニタの長距離センシング化も不可欠である。また、効率良いビームロス検出器の最適な配置も必要となる。

さらに、上記でも述べたようにビームロスにより発生する放射線線量を確実に把握するためにビームロスモニタの高信頼性化が不可欠であり、その重要な要素であるモニタの耐環境性および耐放射線性の確保がビームロスモニタの開発になくてはならない要素技術となる。

６．５．３　新ビームロスモニタ

以上に述べてきた性能を満足するには、これまで加速器に用いられてきた電離箱型等を中心としたビームロスモニタではなく新しい考え方に基づくビームロスモニタを開発する必要がある。このため、以下に示す考え方に基づくビームロスモニタの開発に着手した。

ベースとなる考え方は、最も重要な性能である検出器の不飽和特性を確保するため積分法を用いた検出器を利用すること、もう一つの重要な性能である高速応答性について従来から用いられている方法（微分法）の高速化により対応することの２点である。つまり、瞬間的に発生する大きなビームロスをモニタする場合、通常用いられている検出法では検出器が飽和してしまい計測が不可能となるのでこれを解決するため積分型検出法を導入すると共に、微分法を用いてこの積分法の実時間性、高速応答性等の欠点を補う方法である。また、両者を最適化することによりビームロスの広いダイナミックレンジでの計測も可能となる。

このため、２つの方法を並行して動作する検出方法としてＸ線あるいは中性子のイメージング検出器として使用されているイメジングプレートを用い、その放射線検出媒体である輝尽性蛍光体に輝尽性蛍光（積分モード）と即発蛍光（微分モード）があることに着目した微分・積分型ビームロスモニタを考案した。

本ビームロスモニタの検出原理を以下に述べる。

イメージングプレートは、検出媒体として輝尽性蛍光体を用いており、励起光を照射することにより放出される輝尽性蛍光を検出し蓄積された放射線信号として読み取る。一方、輝尽性蛍光体は電離放射線に対して同時に即発蛍光も観測することができる。微分・積分型中性子モニタはこの２つの蛍光モードを利用し、検出するケース毎に蛍光モードを使い分けることにより実現する。通常は即発蛍光モード（微分モード）で常時モニタしており、ビームロスが生じて即発蛍光モードが飽和した場合には輝尽性蛍光モード（積分モード）で蓄積された放射線信号を読み取ることになる。

６．５．４　基礎実験

本微分・積分型ビームロスモニタの成立性を確認するため基礎実験を行った。基礎実験に使用

した測定装置のブロック図をFig.6.5.1 に示す。イメージングプレートとしては中性子用 BAS-ND を使用し背面の支持シートを直径6mmだけ取り除いて裏面から輝尽性蛍光を検出可能とした。その背後に、輝尽性蛍光及び即発蛍光波長である 390nm を中心波長とする光学フィルタ置き通過してきた蛍光を光電子増倍管で検出する。一方、基準パルス発生器とこの基準信号と同期した2つの遅延付パルスジェネレータを用いて、半導体レーザーを駆動しパルスレーザー光を発生させるタイミングと輝尽性蛍光及び即発蛍光を検出するタイミングを作り出す。半導体レーザーは波長が 635nm でレンズ透過後の出力が2mWの性能のものを使用した。この測定系でレーザーをパルス的に照射しながら時分割で輝尽性蛍光と即発蛍光を分離し検出することを試みた。時分割測定のタイミング図を Fig.6.5.2 に示す。レーザーのパルス時間幅を 2.5μs とし、蛍光を取り出すときのそれぞれのゲート幅を 2μs とした。繰り返し周波数は 100kHz である。このとき 9μs 遅延して即発蛍光を読み出すと輝尽性蛍光読み出し用レーザー励起光の影響をほとんど受けないことがわかった。Fig.6.5.3 に2つのモードに対する中性子線源（Am-Li）による中性子照射量（照射時間）と計数値との関係を示す。両者とも中性子照射量に比例している。

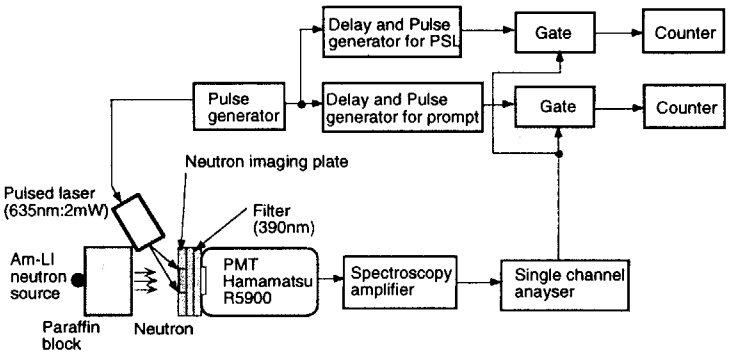


Fig.6.5.1 Schematic diagram of an experimental equipment with a time sharing detection method of PSL and PL from an imaging plate

この結果、イメージングプレートの輝尽性蛍光と即発蛍光を時分割で読み出すことが可能でありかつ中性子照射量と計数値が比例関係にあることを確認できた。

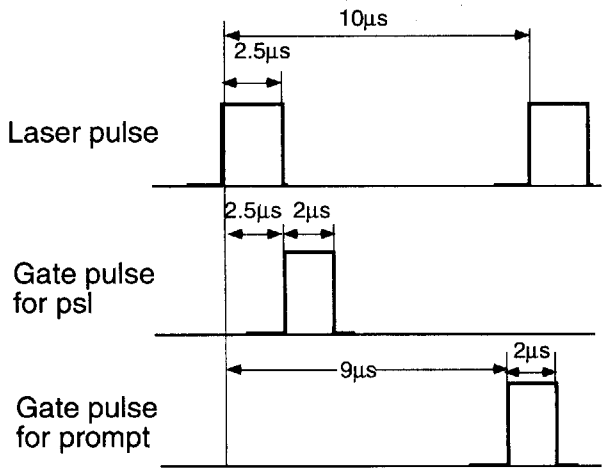


Fig.6.5.2 Timing relation for a time sharing detection of PSL and PL from an imaging plate

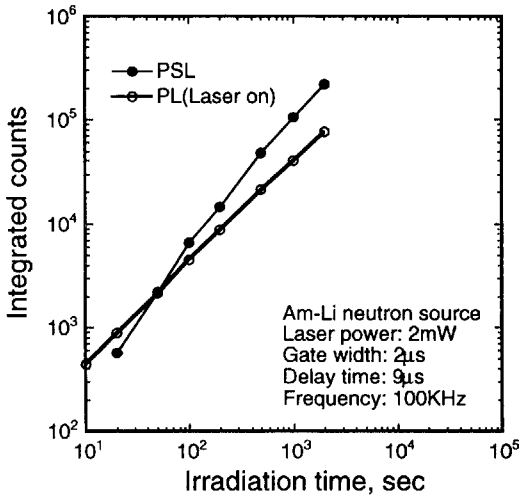


Fig. 6.5.3 Neutron detection characteristics for PSL and PL mode obtained by an Am-Li neutron source and an experimental equipment

6．5．5　ビームロスモニタ装置への今後の展開

大強度陽子加速器のビームロスモニタ装置へ開発した方法を適用し、モニタシステムとして装置を完成するには、以下に述べる様々な要素技術をひとつひとつ解決してゆく必要がある。

ひとつは、大強度陽子加速器の加速管から発生するビームロスが高速中性子と高エネルギーガンマ線であることからこれらの放射線に対応した検出系にすることが必要がある。中性子については、市販されている中性子イメージングプレートが熱中性子用であることから高速中性子から熱中性子に減速するためのモデレータの最適化が必要となる。ＭＣＮＰ計算コードを用いてモデレータ材料の有力候補である鉛についての最適化計算等を試みる予定である。中性子イメージングプレート自体も高性能・高速化のためには検出媒体となる新しい輝尽性蛍光体の開発、高速中性子を直接検出可能な中性子コンバータの開発等も必要となる。また、中性子検出器自体としての最高の性能を得るためには検出器の形状の最適化も必要となる。高速中性子への応答特性については、高崎研ＴＩＡＲＡに設置されている高エネルギー準単色中性子場での応答実験等による評価を予定している。一方、ガンマ線についても高エネルギーであることから低エネルギー化しイメージングプレートに有感になるようななんらかの工夫が必要となるため、今後開発を進める。

ひとつは、本方法をリモートセンシング可能な検出装置に展開する必要があることである。このため、レーザー等を用いたレーザー励起系及び光ファイバを用いた蛍光のリモート検出系の開発を行う必要がある。

また、上記２つを組み合わせてビームロスモニタ装置として動作させる場合、色々なパターンでのビームロスが可能となるため、運転モードに合わせた最適な検出モードを選択することが可能となる。このため、さまざまな検出モードを容易に選択できる検出・制御システムを構築する必要がある。

さらに、高品質の陽子ビームを確保するには、加速管全体のビームロスをモニタすることが必要となるため、本方法を光ファイバ等を用いて長距離検出型ビームロスモニタに対応させる必要もある。

最終的に大強度陽子加速器のビームロスモニタ装置とするには、Fig. 6.5.4 に示すように加速管のビームスピルの起こり易い場所でビームロスをモニタするためのポイント型検出器と長距離検出型ビームロスモニタとの組み合わせ及び最適配置を考慮してシステム構築を行う必要がある。

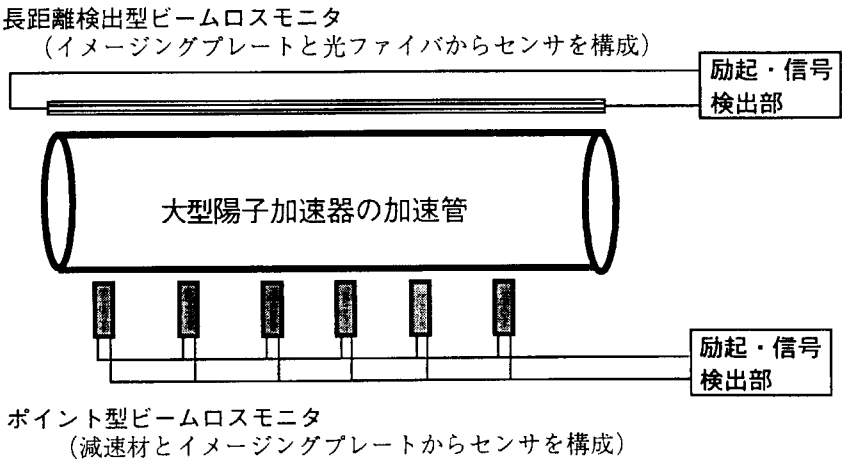


Fig.6.5.4　Schematic diagram of a beam loss monitor system using time sharing detection method of PSL and PL developed for a high intensity proton accelerator

7．放射線安全設計

7．1　はじめに

中性子科学研究施設は、1.5GeVの陽子線形加速器と、加速器から1次ないしは2次ビームの供給を受ける複数の実験施設から構成される加速器複合体であり、遮蔽設計を含む放射線安全評価及び放射線安全管理システムは複雑なものにならざるを得ない。Fig. 7.1は、中性子科学研究施設に対する、放射線安全評価に係る管理区域区分、放射線安全評価項目、必要とする安全管理設備の全容を概念的に図示したものである。本論に入る前に、この図を用いて、本施設における放射線安全確保のための基本的な考え方を以下に述べる。

本施設が設置される東海研究所の事業所境界の内側に、本施設を取り囲んで一般区域、警戒区域、管理区域（人が常時立ち入る区域(以下、「常時立入区域」と言う)、立入制限区域、立入禁止区域）が、それぞれ放射線レベル等の基準に応じて設定される。加速器やターゲットが収納される加速管室やターゲット室は立入制限区域となり、加速器の運転中は、人が入室できないように、また、人が入室中は運転できないように、インターロックシステムにより厳重に出入管理が行なわれる。厚い遮蔽壁で囲まれた立入制限区域の外側は常時立入区域であり、許可された者だけが、出入管理設備のある出入口から常時立ち入ることができる。インターロックシステムには、立入制限区域、常時立入区域それぞれの境界に設置する放射線モニタの一部も接続される。立入制限区域内にはビームスピルモニタが設置され、想定レベルを超えるビーム損失が発生すると、インターロックシステムを介して直ちに加速器を停止することができる。

管理区域から排出される気体廃棄物は、ガスモニタ等により基準値以下であることを確認した後、排気設備を通して建屋外に放出する。また、放射化した水を含む管理区域からの液体廃棄物は、一部は、施設内もしくは事業所内に保管廃棄し、残りは水モニタ等により基準値以下であることを確認した後、排水設備を通して施設外に放出する。

施設からの漏洩放射線による一般公衆の被ばく線量は、事業所境界におけるスカイシャインと直達線の合計線量から決められる。事業所境界での線量が管理目標値を超えないように、十分な遮蔽を管理区域内に設置する。すなわち、本施設の遮蔽体は、バルク遮蔽計算やストリーミング計算により、施設内の作業者のみならず、一般公衆の放射線安全確保の観点から決定されるものである。本施設の管理区域の立入制限区域、常時立入区域の各境界、ならびに事業所境界に放射線モニタを設置し、それぞれの場所で放射線レベルを常に監視して、放射線安全の確保に努める。

平成 9 年度に、放射線安全評価全般を検討することを目的として、中性子科学研究センターに放射線安全検討グループが設けられた。同年度に本グループは、中性子科学研究施設の放射線安全評価上考慮すべき技術的課題の検討を行なった。さらに、遮蔽設計の予備計算を実施し、本施設に必要な遮蔽設備の概略のイメージを把握するとともに、詳細遮蔽設計における問題点の検討を行なった。平成 10 年度は、放射線安全対策の基本方針案を策定するとともに、遮蔽設計手法及び核データ等の検討、遮蔽設計及び放射線管理に対する基準の検討、放射線安全管理システムの基本概念の検討を行なった。

第 7 章は、平成 9, 10 年度に放射線安全検討グループにおいて検討を行ない、成案を得た放

射線安全評価に関する検討内容について記述したものである。ただし、ここに記載した放射線安全対策の基本方針や遮蔽設計、放射線管理の諸基準等は、あくまで中性子科学研究センターが提案する案の段階であり、これらは日本原子力研究所共通の基準に加え、本施設特有の基準を付加したものである。そのため、日本原子力研究所全体としての整合性をとる必要があり、今後、関連部署による検討、使用施設運転委員会等の審議を経て正式に承認される性質のものである。

7．2　放射線安全上の技術課題

中性子科学研究施設は、放射線安全性の観点から以下に示す重要な特徴を有している。

（1）陽子の加速エネルギーは 1.5GeV であり、この陽子が中性子、光子をはじめ様々な二次放射線を発生させる。とりわけ中性子は、非常に高いエネルギー成分を含むため、極めて厚い遮蔽壁を必要とする。しかし、既存の核データ、遮蔽パラメータや設計計算コードは、深層透過問題に対し十分な精度検証がなされているとはいえず、データ整備／評価、コード適用性の拡張、改良もしくは新たな信頼できる計算システムの確立が必要となる。

（2）加速陽子ビームは、8MW という大出力に達し、ターゲット、ビームダンプ等で発生する放射線は極めて強くなるので、合理的な遮蔽設計が特に望まれる。また、大強度ビームの損失は、周辺機器、冷却水及び室内空気等の放射化の原因となり、機器のメインテナンス及び排気管理上の課題をもたらす。さらに、土壌や地下水の放射化及びスカイシャインの評価も問題となる。これら大強度ビームによる放射化は、従来の加速器施設と比較してはるかに多量の放射性廃棄物を生むこととなるので、前もって十分な対策の検討が必要である。

（3）加速器は総延長１ｋｍにも及び、その周りに複数の利用系施設が配置されるため、これら全体が広く分布した放射線源となる。したがって、建設サイトの地勢・気象を綿密に考慮した上で、個々の施設のみならず施設全体として、事業所隣接地域に対する影響評価を行うことが必要となる。

このように、中性子科学研究施設は、世界的に未経験な大規模なものであり、放射線安全上多くの技術的課題を含んでいる。したがって、施設の建設、施設の円滑で効率的な運用を実現するためには、その施設の基本構造、運転及びメインテナンスならびに利用の方法を十分に把握した上で、全体の安全性に対する考え方、安全性確保のための方針を、設計の前段階において明確にしておくことが不可欠である。重厚な遮蔽設備が必要不可欠なことから、施設全体のコストに占める遮蔽の割合は大きく、合理的な放射線安全設計の持つ意義は大きい。

個別の課題について検討した結果の要点を以下にまとめた。

7．2．1　陽子ビーム損失

大強度陽子加速器施設では、異常時はもとより、定常運転時においても陽子ビーム加速中及び輸送中のビーム損失は重要な課題である。なぜなら、ビーム損失により加速器機器が放射化し、

保守、修理、交換のための接近性（Hands on Maintenance性）を困難にし、また、室内空気の放射化をもたらすため、高性能フィルターを介してもこれらの空気を施設外に直ちに放出することが不可能となるからである。本施設においては、既設の加速器施設の経験等を参考にしながら、Hands on Maintenance性を実現できるように、当面は平均的なビーム損失を1 nA/m（1.5 W/m）以下とすることを目標とする。放射線管理の観点からは、ビーム損失量が想定レベルよりも高くなった場合には、ビームスピルモニタの指示値に基づいて加速器を停止する等の措置が重要である。ビームスピルモニタは、測定のダイナミックレンジが広く、廉価なシステムであることが望ましい。

7．2．2　建屋内空気の放射能汚染

加速管室の空気は、加速器運転中のビーム損失による陽子や中性子によって放射化されたガスや微粒子を含むようになる。この空気汚染は保守等のための加速器機器への接近性を著しく困難にし、また、ガス状放射性物質は、高性能フィルターを使っても環境への放出管理基準値以下に保つことは難しい。この問題を解決するためには、ビーム損失を低減化することが基本であるが、これ以外に、空気の室内滞留時間を長く取れる換気設計としたり、ビーム損失が特に大きい機器周辺の空気だけは、局所排気によって放出までの時間を更に遅らせたり、局所的に密閉構造にしたり、運転中はヘリウムガスで置き換える等の方法を検討することが必要である。必ずしも放射線の問題ではないが、放射線によって空気中にオゾンや NOx が生じる。これらは人体のみならず機器にとっても有害であり、十分な対策が必要である。

7．2．3　土壌、地下水の放射化

高エネルギー加速器施設では、原子炉施設では評価の対象外であった事項が検討対象となる。その一例が、ビーム損失による土壌及び地下水の放射化の問題である。地下に埋設する施設外壁部への人の立入りはありえないから、そこでの線量当量は問題にはならない。しかし、これら放射化した土壌や地下水の安全評価は必要となる。土壌、地下水の放射化量を、無視しうるレベルまで低減するためには、大きなビーム損失を受ける機器の床下に、十分な厚さの鉄やコンクリートの遮蔽体を設置することが必要である。

7．2．4　保守性

機器、部品の調整、修理及び交換のために、加速器や各種実験装置に接近して Hands on Maintenance ができるような設備構造の設計を行なうことが、ビーム損失低減化の技術開発と共に重要である。ビームダンプ、ターゲットのように必然的に放射線強度が極めて高くなる機器への接近は不可能であり、最初から遠隔操作作業を行えるような設計とすべきである。

7．2．5　インターロック

人の安全性を確保するため、十分に検討されたインターロックシステムを、機器保護のインターロックとは独立して、構築することが重要である。このシステムはフェイルセーフの原則に則った設計でなければならず、原則として、書き換え可能なコンピューターソフトを介在させないハードワイヤーで構成すべきである。また、インターロックは、同一系統や同種の機器だけでかけることのないよう、多重化のシステムとすることが不可欠である。

7．2．6　放射線安全評価手法

中性子科学研究施設のほとんどすべての領域において、非常に厚い遮蔽体が必要とされている。したがって、これらの遮蔽設計をするための計算手法は、深層透過計算に対して高精度を保証できるものでなければならない。しかし、現状では種々の手法の間で減衰率において無視できない差異が存在する。また、放射化量の計算は、機器の Hands on Maintenance の成立性を左右するほどの重要性を有するものであるが、最近、詳細計算コード SPD が開発された。この放射化量計算は、深層透過計算と共に、計算精度の検証作業はこれからである。一方、ダクトストリーミング、スカイシャイン計算については、高エネルギー領域への適用性の拡張が必要である。

7．2．7　放射性廃棄物の評価と管理

ビーム損失に伴って機器が放射化するので、耐用年数を過ぎたものは、放射性廃棄物として処理することが必要である。中性子科学研究施設で問題となる放射性廃棄物は、（1）ターゲット等の高レベル放射性廃棄物と、（2）破損したマグネット等の大型放射性廃棄物である。高線量率のものに対しては十分な遮蔽／冷却能力のある安全な保管廃棄設備を確保する必要があり、また、大型放射性廃棄物は十分な広さの保管場所が必要であることから、設計段階からの放射性廃棄物の評価は重要である。

7．3　放射線安全対策の基本方針

放射線安全対策の基本方針を、一般公衆への対策と施設の運転、保守中の作業者への対策に分けて以下に記述する。

7．3．1　周辺公衆の放射線安全

事業所境界における線量当量限度は、法令により 250 マイクロシーベルト／3 月（1 年間に 1mSv）以下と定められている。しかし実際の管理目標値は、ALARA(as low as reasonably achievable)の精神に則り、法令値の 1/20 の年間 50 μSv 以下とすることを基本方針とする。

（1）この目標値を満足するために、施設には十分な遮蔽設備を設けるとともに、本施設の主要部分は地下に設置する。

（2）地下の施設周辺の土壌、地下水が管理目標値を超えて放射化することを防止するためし、事業所外に流出する事を防止するために、加速器、散乱実験室など線量が特に高くなるところには、十分に厚い遮蔽体を設置する。
（3）加速器の運転により施設内の空気は放射化されるが、生成する核種のほとんどが短寿命核種である。そこで運転中は施設外への空気の排出を極力抑制し、運転停止後一定の冷却時間を経過した後、放射性物質の減衰を待って、高性能フィルターを通して施設外に排出する。
（4）加速器機器の一次系冷却ループは閉ループ系とする。高放射化冷却水系はそれ以外の冷却水系とは別系統とし、交換等を行った冷却水は施設外に排出せずに、原則として保管廃棄する。また、低放射化冷却水系からの水は、一定期間毎に安全を十分に確認した上で、一般排水とともに施設外に排出する。

7．3．2　作業者の放射線安全

放射線作業に従事する者に対しても、法令による基準を遵守するだけでなく、ALARA の精神に則り、被ばく線量を低く抑えるよう施設の設計をし、かつ、運転管理をすることを基本方針とする。この方針に従って、以下に示す放射線安全対策を施す。
（1）外部被ばくを低減するための遮蔽設備、内部被ばくを防止・低減するための排気設備、作業環境を監視するための放射線モニタリング設備等の放射線防護設備を設ける。
（2）管理区域の区分は、東海研究所放射線障害予防規定等に定める基準に従うものとする。
（3）管理区域境界等における放射線レベルにより、運転中の加速器を停止させるインターロックシステムを設ける。
（4）ID カード、扉電気錠、パーソナルキーなどによるインターロックの多重化により、また、放射線レベル等によるインターロックにより出入管理を行なう。
（5）高線量率となる区域では、保守作業を極力遠隔操作により行なう施設設計とする。
（6）運転中は施設外への空気の排出を抑制する方式とするため、加速管室における空気中の放射性物質や、空気中のオゾン、NOx 等を除去するために空気浄化装置を設置する。

7．4　遮蔽設計の予備検討

中性子科学研究施設の遮蔽設計を実施する上で、使用する計算手法及びパラメーター、計算上の仮定等、事前に十分な検討をしておく必要のある事項が多数ある。そこで、本研究施設を構成する陽子線形加速器、蓄積リング、中性子散乱実験施設の 3 主要施設に対して予備的な遮蔽計算を実施し、遮蔽設計上の問題点の検討を行なった。

7．4．1　Moyer モデルと減弱パラメータの検討

高エネルギー陽子加速器のバルク遮蔽計算に広く使用されている Moyer モデルは、考慮すべ

き中性子線源の大部分が 100MeV 以上の場合、その減弱距離が一定であることに着目して、1 群扱いで遮蔽体外側の線量当量を計算する方法である。簡単な経験式に基づく方法であり、施設遮蔽の概略を把握する上で極めて有用な手段である。予備検討では、まず、Moyer モデルで使用されるパラメータの調査検討を行なった。また、低エネルギー領域の計算に適用される Tesch の式、O'Brien の式の検討も行なった。

定常運転時の陽子ビーム損失による線状線源の条件で、普通コンクリート、土、鉄及び重コンクリートについて、KEK の減弱パラメータを用いた場合の Moyer の式、Stevenson のパラメータを用いた場合の Moyer の式、Tesch の式、O'Brien の式による計算値の比較を行なった。その結果、ここで考慮したすべての遮蔽体について、KEK のパラメータによる Moyer の式が、減衰は一番緩慢であり、深い透過位置において最も安全側の結果を示すことが分かった。Tesch の式と O'Brien の式の関係は、両者の減衰傾向はほぼ同じで、O'Brien の式が数倍高めの結果を与えている。点状線源の場合でも同様の傾向が得られた。Fig. 7.2 に、1.5GeV の陽子が損失を受けた時に発生する中性子の、普通コンクリート中における線量当量率減衰の計算例を示す。本図は、1nA/m のビーム損失による線線源を仮定した時の、普通コンクリート中での線量当量率の減衰傾向を、上で述べた各種計算手法で計算した結果を比較したものである。KEK のパラメータと Moyer の式の組み合わせによる計算は、その他の計算結果に比べて、線量当量率の初期値は最も小さいが、減衰割合が最も緩やかであるため、透過が進むに連れて線量当量率は逆転し、５ｍを超える位置では最も安全側の結果を示すようになる。Moyer の式で用いた KEK のパラメータと Stevenson のパラメータの減衰割合を比較すると、約 6m の透過距離で一桁以上の差が生じていることがわかる。

７．４．２　バルク遮蔽計算

次に陽子線形加速器、蓄積リング、中性子散乱実験施設について、1nA/m のビーム損失割合を仮定して、KEK の減弱パラメータによる Moyer の式を用いて、2m の鉄と 12m の土壌からなる遮蔽体外側の線量当量を計算した。それらの計算値を用いて、遮蔽体外側を常時立入区域境界(7.7μSv/h)、一般区域境界(0.15μSv/h)（これらの基準値は KEK の基準に倣ったものであり、暫定値である)、及び事故時(100mSv/事象)のそれぞれの基準を満足するに必要な遮蔽厚さを評価した。その結果、加速管周辺の遮蔽体で 5～8m、ビーム出射部で 10～14m、ビームダンプについては 13～16m 必要であることが分かった。これらの結果は普通コンクリートに換算しての値であるが、実際の遮蔽設計では、普通コンクリート以外の遮蔽材などを組合わせて、合理的で最適な遮蔽設計を図ることが重要である。

７．４．３　土壌、地下水の放射化計算

本施設の主要部分は地下に設置されるため、施設周辺の土壌、地下水の放射化が問題となる。これらの放射化計算を、土中の中性子エネルギースペクトルを 1/E と仮定して行なった。土壌、地下水の放射化濃度限度をそれぞれ、3.7Bq/g、60Bq/cm^3（平成 9 年度当時の暫定値であり、現

時点では粒子、水ともに 3.7Bq/g を想定－７．６．５（３）に後述）として、この基準を満足するために必要な遮蔽厚さを評価した。Fig. 7.3 に、計算結果の一例として、1.5GeV の陽子ビーム損失を 1nA/m（線状線源）と仮定した場合の、コンクリート厚さの関数として表した土壌及び地下水の放射性物質濃度減衰を、飽和放射能濃度(Bq/g)で示す。この図から、土壌の放射性物質濃度の管理基準値を 3.7Bq/g にとると、この基準を満足するために必要なコンクリート厚さは 1m 弱で良いことが分かる。

７．４．４　スカイシャイン計算

事業所境界のスカイシャイン線量の計算は、Stapleton の式を用いて行なった。スカイシャイン計算に用いる地表面での線源は、次の 3 種類の線量当量率に相当する（$1/E + 1/E^2 + 1/E^3$）とした。（１）地表面までにコンクリート 2m と土 10m がある場合、（２）地表面を常時立ち入り可能な管理区域境界とした場合、（３）地表面を一般区域境界とした場合。計算の結果、線源条件（１）、（２）の場合、事業所境界の年間線量基準の 50μSv/y を超える結果が得られ、（３）の一般区域境界条件にすると基準を満足することが分かった。線源条件（１）で事業所境界での基準値を超えるのは、ビームダンプや蓄積リング入出射部等、特定の箇所の真上の地表面で線量当量率が一般区域の基準値を大幅に超えているからである。

７．５　放射線安全評価法の検討

中性子科学研究施設全体の遮蔽設計を整合性の取れたものとするためには、遮蔽設計に使用する計算手法と核データライブラリを可能な限り統一し、かつ、設計計算を通してそれらを最後まで固定しておくことが必要である。このような観点から、遮蔽設計項目毎に必要とする核データを含む計算手法の検討を行なってきた。以下にそれらの検討結果を示す。

７．５．１　線源計算

ハドロンカスケード反応により生成する中性子の線源計算は、カスケード計算コード NMTC/JAERI を用いることを原則とする。中性子線源は、陽子ビームエネルギー、ターゲット物質、ターゲット形状をパラメータとして、角度依存のエネルギースペクトルの形で求め、その結果をデータベース化する。データベース化した線源を共通データとして、加速器施設を含む全ての研究施設の遮蔽設計計算に統一的に使用する。これらの線源の使用計算コードに適した形式への変換プログラムは、別途用意する。

線源のエネルギー範囲は、最大でビームエネルギーの 1.5GeV までを考慮する。400MeV までは、HILO-86 ライブラリーのエネルギー群構造に準拠し、400MeV から 1.5GeV の領域では 100MeV 刻みの構造とする。

７．５．２　遮蔽計算手法

平成９年度に Moyer モデルを用いて、施設全体の概略遮蔽計算を実施し、施設遮蔽のイメージを把握すると共に、遮蔽設計上の問題点の摘出を行なった。今後、これらの結果を踏まえて詳細遮蔽設計の段階に移行するが、必要とする計算ケース数が膨大となるため、そこで使用する計算コードあるいは計算式は、許容できる計算精度の範囲内でできるだけ簡易で計算時間のかからないものとし、モンテカルロ法によるシミュレーションコードの使用は、簡易計算の精度検証や、中性子ターゲット等特定の計算対象に限定することを原則とする。

（１） バルク計算（透過計算）

バルク遮蔽計算コードとして、１次元 ANISN と PKN-H を併用することとし、ANISN を主コード、PKN-H を補助コードと考える。計算に使用する核定数ライブラリーは、MACRO-JD により JENDL-3.2 を処理して新たに作成する HILO-86 形式のマクロ断面積ライブラリーとする。

（２） ストリーミング計算

１） ダクトからのストリーミング

中性子散乱実験施設を例に取ると、多数の大口径ダクトが遮蔽壁を貫通することから、遮蔽体外部での漏洩放射線はバルク透過成分のほかに、ストリーミング成分及びそれと同等以上の遮蔽欠損部透過成分が考えられる。そのため、ストリーミング計算においては、これら２種類の成分の計算を対で考慮することとする。

中性子と２次ガンマ線のストリーミング計算を簡易計算コード DUCT-II で、ダクトにおける遮蔽欠損部の中性子透過計算を PKN-H コードで行う。DUCT-II コードは現在 400MeV までの計算に対応できており、平成１０年度中にエネルギー上限を３GeV まで拡張する予定である。

２） 迷路からのストリーミング

DESY で開発された半経験式である Tesch の評価式が、中性子とガンマ線を統一的に取り扱えるという観点から、本評価式の仕様を考える。

（３） スカイシャイン計算

ガンマ線と、中性子及び２次ガンマ線のスカイシャイン計算を、簡易計算コード SHINE－II を用いて行う。ただし、現在の本コードの中性子上限エネルギーが 14MeV であるため、この上限を今年度中に３GeV まで拡張する予定である。

半経験式を使用するのであれば、線源中性子スペクトルが不明の場合、$1/E + 1/E^2 + 1/E^3$ の中性子線源スペクトルを仮定した Stapleton の評価式が適している。設計手法として簡易計算コードか半経験式かの選択は現時点では未定である。

（４） 放射化計算

計算対象毎に、個別の計算方法を使用する。

1）機器

NMTC+SPD(SPCHAIN の改訂版)による詳細計算と、陽子ビーム単位出力当たりの空間線量当量の経験式を併用する。ここで、SPD は、核破砕反応に伴う放射化計算を行なうコードであり、陽子ビーム照射時間、冷却時間の関数として、核破砕生成物によるガンマ線スペクトル、放射性物質強度、核発熱等の計算を計算できる。今後、ベンチマーク計算による精度評価が必要である。

2）中性子ターゲット

NMTC+SPD による詳細計算とする。ターゲット及びその周辺に配置される減速材、反射材からなる多重構造を考慮する必要から、経験式の適用は不適当である。

3）土壌、地下水

土壌中での中性子の平衡スペクトルを、既存の施設からの漏洩中性子スペクトル実測値から判断して安全側に 1/E と仮定し、評価点において線量当量に相当する中性子束を推定する。その中性子束に放射化断面積を掛けてエネルギー積分することにより放射化量を評価する（KEK 方式)。

4）冷却水、空気

陽子ビーム単位出力当たりの飽和放射能パラメータ（IAEA/Technical Reports Series No.283, 1988）を用いた方法を使用する。

7．6　放射線安全管理基準等

7．6．1　所内の関連規定等

放射線安全については、東海研究所放射線障害予防規定、東海研究所原子炉施設保安規定、東海研究所核燃料物質使用施設等保安規定、東海研究所少量核燃料物質使用施設等保安規程、東海研究所放射線安全取扱手引に従うものとし、中性子科学研究センターの施設に特有なことを原則として検討する。

7．6．2　法令

（1）加速器（放射線発生装置）の使用

陽子線形加速器、陽子シンクロトロン(蓄積リング)、中性子散乱実験施設等については、

1）放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法令に基づき、使用の許可を取得すること

2）労働安全衛生法令に基づき届け出が必要である。

（2）核燃料物質の使用

1）核変換利用研究施設：

核変換利用研究施設は、未臨界集合体であることから、核原料物質、核燃料物質及び原子

炉の規制に関する法令に基づき、核燃料物質の使用許可を取得することが必要である。この時、原子炉等規制法施行令第十六条の二施設に該当するときは、施設検査の受験及び保安規定の制定が義務づけられる。

ただし、核燃料物質、核原料物質、原子炉及び放射線の定義に関する政令第三条（原子炉）の解釈について、核変換利用研究施設が、原子炉施設に該当するか否かについて、規制当局の判断を仰ぐ必要がある。

2）その他の核燃料物質使用施設：

核破砕ＲＩビーム研究施設、ＲＩ利用研究施設等において使用する核燃料物質については、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法令に基づき核燃料物質の使用許可の取得又は国際規制物資の使用の届出（濃縮ウラン並びにプルトニウムを使用しない場合で、かつ、年間使用量がウランについては、３００グラム、トリウムについては、９００グラム以下の場合）を行う必要がある。

7．6．3　安全審査

（1）国の許認可に係る安全審査

放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法令に基づき中性子科学研究センターに係わる加速器施設の使用の許可を申請した場合、大型の加速器施設であることから、技術的安全審査が放射線安全技術顧問会に委ねられる可能性が大きい。原子炉等規制法施行令第十六条の二施設に該当する場合は、加工・使用安全技術顧問会において審査される可能性が大きい。

（2）原研内における安全審査

原研の東海研究所放射線障害予防規定等に基づき、原子炉等安全審査委員会、使用施設等運転委員会の安全審査を受ける必要がある。

（3）原子力安全協定に係る地元説明

「原子力施設周辺の安全確保及び環境保全に関する協定書」（「原子力安全協定」と言う）等に基づき、所在町村（東海村）並びに茨城県に中性子科学研究施設の増設に関して説明し、了解を得る必要がある。

7．6．4　施設の区域分け

（1）　管理区域

東海研究所放射線障害予防規定等に定める基準に従って、管理区域を第1種及び第2種管理区域に区分する。さらに管理区域を下記の3種類の区域に分け、施設の設計、管理の合理化に努める。

1）　常時人が立ち入る区域

東海研究所放射線障害予防規定等に定める基準（例；被ばく線量当量が１mSv/週以下の区域）に従うものとする。

2） 立入制限区域

東海研究所放射線障害予防規定等に定める基準（例；線量当量率が２５μSv/h以上の区域）に従うものとする。

3） 立入禁止区域

東海研究所放射線障害予防規定等に定める放射線作業届の提出に係る基準（例；線量当量率が１０mSv/h以上の区域）に該当する区域。

（2） 警戒区域

東海研究所放射線安全取扱手引に定める基準（２０μＳｖ／週を超える区域）に従うものとする。

７．６．５ 基準

（1） 施設設計に係わる基準

1） 遮蔽物に係る線量当量限度

遮蔽設計の目標値は、線量当量限度等の二分の一、即ち安全係数を２とする。線量当量限度等は、ICRP1990年勧告に基づき、改正される法令の値（予測値）とする。

イ）遮蔽物に係る線量当量限度

A．管理区域内（１ｍＳｖ／週）［設計目標値 ０.５ｍＳｖ／週］

① 人が常時立ち入る区域

作業時間 ４０時間／週（＜１２.５μＳｖ／ｈ）

② 立入制限区域（施錠管理又は作業時間管理の必要な区域）

a. 作業時間 ５時間／週（＜１００μＳｖ／ｈ）

［例 :天井裏、地下ピット等の点検作業、ダクト等貫通孔の表面］

b. 作業時間 ２０時間／週（＜２５μＳｖ／ｈ）

［例 :排風機室、冷却機器室、機械室等の点検作業］

③ 立入禁止区域（施錠管理並びにインターロックの必要な区域）

a. 運転中の加速管室

b. 作業時間が、５時間／週で０.５ｍＳｖを超える区域

(b-1) 平均的線量当量率（＞１００μＳｖ／ｈ）

［例 :高周波ダクトスペース、運転停止中の加速管室等］

(b-2) 局部的線量当量率（＞１０ｍＳｖ／ｈ）

［例 :冷却ガス貫通孔、放射化電磁石等］

B． 事業所境界（５０μＳｖ／年）［設計目標値１２.５μＳｖ／３月］

滞在時間 １６８時間／週（＜０.００５７μＳｖ／ｈ）

ただし、法令の値は２５０μＳｖ／３月である。

ロ）管理区域境界に係る線量当量（１.３ｍＳｖ／３月）

［設計目標値０．６５ｍＳｖ／３月］

a. 通路、道路、天井裏、空調ダクト等区域

滞在時間　　５時間／週（＜１０μＳｖ／ｈ）

b. 会議室、機械室、倉庫等区域

滞在時間　２０時間／週（＜２．５μＳｖ／ｈ）

c. 事務室等居住区域

滞在時間　４０時間／週（＜１．２５μＳｖ／ｈ）

（２）　空気中並びに排気又は排水に係る放射性同位元素濃度等の基準

空気汚染の評価がなされていない現状では、施設設計の観点からは，甚だ漠然としている。したがって、今後、放射化解析の進展に伴い、加速器の運転パターンと排気方法の選択など具体的な安全評価が必要となる。

１）　空気中の放射性同位元素濃度

線形加速器等を収納している加速管室においては、粒子状物質を可能な限り濾過する設備を設けるとともに、ここからクライストロン施設等（管理区域）に漏洩する汚染された空気は、放射性同位元素の空気中濃度を濃度限度の二分の一以下とすることの出来る換気設備を設ける。（ただし、サブマージョン核種以外は、加速管室で濾過されていること）

２）　排気中の放射性同位元素濃度

３月平均濃度が施設出口で法令に示す濃度限度以下又は事業所境界で、年間５０マイクロシーベルト以下とする能力を有する排気設備を設ける。

３）　排水中の放射性同位元素濃度

３月平均濃度が施設出口で法令に示す濃度限度以下であり、かつ、トリチウム、炭素１４、コバルト６０、セシウム１３７等の核種については、東海研究所放射線障害予防規定に定める年間放出管理基準値を超えない能力を有する排水設備を設ける。

（３）　土壌並びに地下水の放射化に係る基準

［設計目標値　3.7 Bq/ｇ］

（放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する告示第１５号第１条に示す規制免除濃度の二十分の一）

（４）　施設管理に係わる基準（線量当量率、排気、排水、表面汚染密度）

東海研究所放射線障害予防規定等に定める基準に従うものとする。

（５）　個人被ばく管理に係わる基準

東海研究所放射線障害予防規定等に定める基準に従うものとする。

７．７　放射線安全管理施設

安全管理設備として放射線モニタ，入退室管理システム、インターロックシステム等を設置する。これらのシステムは、互いに補完し、更に加速器制御系やユーティリティー制御系と関連して、加速器施設に係わる作業者の安全並びに環境への影響を最小限に留める構成とする。

７．７．１　放射線モニタ

加速器施設特有の放射線場（パルス状、高エネルギー、高線量率、放射線レベルの変動等）を考慮し、モニタ機器の開発・製作並びに配置を行う必要がある。インターロックの一部を構成する放射線モニタについては、放射線損傷等に配慮し、また、信頼性向上のため部品の選択には十分留意する。

（１）　屋内放射線モニタ

１）光子モニタ

加速管室等運転中に高線量率（＞１０ｍＳｖ／ｈ）になると予測される区域については、運転中の監視は行わず、管理区域境界等に設置する光子モニタで監視する。運転停止後に作業者が入室する場合は、事前に自動走行サーベイ車等により測定を行ない、安全を確認する。

２）中性子モニタ

加速管室等運転中に高線量率（>10mSv/h）になると予測される区域については、運転中の監視は行わず、管理区域境界等に設置する中性子モニタで監視する。ただし、レムレスポンスモニタと高エネルギー中性子モニタを一部の区域で併用する。

３）塵埃モニタ

放射化した空気（窒素１３、酸素１５等）の影響を受けずに、塵埃放射能のみ監視を行う方式を採用する。

４）ガスモニタ

トリチウム、窒素１３、酸素１５等の核種が、濃度限度以下の検出限界で監視できるモニタの開発を行なう。

５）手足衣服汚染検査モニタ

加速器施設において生成される放射性核種には、電子捕獲崩壊するものが多く含まれることから、これらの核種の表面密度を測定できるモニタを採用する。

６）ゲートモニタ

放射化された加速器部品等の管理区域外への持ち出しを防止するため、主要な出口にゲートモニタの設置を検討する。

７）サーベイメータ

管理区域の主要な出入り口に、線量率測定用、汚染検査用サーベイメータを配置する。

（２）　屋外放射線モニタ

屋内放射線モニタと同様の考え方に基づき、設計・制作を行う。屋外に設置する光子及び中性子モニタについては、周辺の放射線施設を考慮し、その配置を検討する。

1）光子放射線モニタ
2）中性子放射線モニタ
3）塵埃モニタ
4）ガスモニタ

7．7．2　入退室管理システム

放射線施設（使用施設、貯蔵施設、廃棄施設）で働く作業者の安全を確保するために、入退室管理を行う。入退室管理システムは、特に、加速管室等（放射線発生装置使用室）において、作業者の入室時における、運転による不慮の過剰被ばくを防止するため、インターロック設備の一部を構成する。システムは、下記の項目から構成する。

（1）　ＩＤカード装置

管理区域等への入退室管理にＩＤカードを使用する。ＩＤカードの採用に当たっては、以下の様な機能を持たせる。

1）線形加速器棟、中性子散乱施設棟のように施設ごとに分散設置し、及び情報の処理を行ない、中央で全体管理を行う。
2）それぞれの施設には、複数の出入り口が存在するが、任意の出入り口からのアクセスを管理出来る機能を持たせる。
3）ＩＤカード及び読み取り装置（リーダー）は、既に一般産業界で導入されている製品から、信頼性が高く、ＩＤカードについては携帯に支障が無く、単価の安いものを選択する。管理区域の入退室管理については、、線量計とＩＤカードの一体化を検討する。
4）加速器施設特有の電磁波ノイズに対して、保護対策を十分行なう。

（2）　扉及び鍵管理装置

扉及び鍵管理装置は、加速管室等の機器搬入口の扉などの重要な鍵の管理を行い、運転前の鍵返却確認並びに運転中の解放を防止するためのインターロックの一部を構成する。鍵管理装置へのアクセスは、ＩＤカード方式を採用する。

（3）　自動表示装置

加速器（放射線発生装置）の運転状態を作業者に知らせるため、使用室の出入り口に運転表示灯を設置する。この表示灯は、インターロックと連動し、原則として運転中は赤色（立入禁止）、待機中（準備中）は黄色、停止中は緑色とする。

7．7．3　人の安全に係るインターロックシステム

インターロックシステムは、フェイルセーフを念頭に機器の設計・検討を行い、シーケンサーを除き、原則としてハードワイヤーで構成する。作業者の安全確保に極めて重要な機器については、異なる動作原理に基づくセンサーにより機器の動作確認が行なえるようにし、また、信頼性向上のための多重化を行う。シーケンサーについては、自己診断機能を有する製品を採用し、下記の様な項目を処理する。インターロックシステムの概略構成をFig. 7.4に示す。

（1）定められた手順以外の操作による加速器（放射線発生装置）の運転の禁止。
（2）運転中の加速管室等への作業者の入室禁止。
（3）危険性のある機器から作業者の保護。
（4）加速器運転モード等の情報処理。

1） 非常停止ボタン

加速管室等に、非常停止ボタンを設置し、閉じ込め事故を防止する。加速管室等に設置する機器、通信ケーブルについては、放射線損傷に十分留意し、部品等の選択を行う。

2） パーソナルキー

パーソナルキーは、加速管室（放射線発生装置室）等への入室時に各個人が携帯する。パーソナルキーは、ＩＤカードを使用しキーボックスから抜き取り、入り口扉を開錠する。加速管室等への入室中はたえず携帯し、入室中の運転を防止する。キーボックスは加速管室等への入り口扉毎に設置する。加速管室等の扉（作業者用通路扉）は、IDカードとパーソナルキーの二重開錠方式とする。

7．7．4　その他の設備

1） 非常脱出口

インターロック区域に非常脱出口を設置する。非常脱出口は、停電、火災時等にも短時間で操作でき、確実に危険区域から脱出可能な機能を有するものを採用する。その他、通常の出入口扉は、サムターン方式とし、非常時には容易に脱出できる機能を有するものを採用する。

7．8　まとめ

7.2で今後検討すべき技術的課題を7項目に分類して述べた。世界最高性能の大強度陽子加速器施設であることに起因するこれらの課題のうちで、ある物は既存の技術で対応が可能、または現在の技術の延長線上に解決策があり、あるいは解決が極め難しいものも含まれている。そこで、実現可能性の観点からこれらの技術的課題について検討を行い、「まとめ」に代えることとしたい。

（1）陽子ビーム損失：

現時点では、既存の高エネルギー陽子加速器施設での経験を参考に、1.5W/mのビーム損失を

仮定して、施設の遮蔽設計を実施する計画である。上記基準値以下のビーム損失の実現性がポイントであるが、そのためには、低ビーム損失加速器の開発と並行して、応答性の早い高信頼度のビーム損失モニタの開発が不可欠である。ビーム損失モニタは既存施設で稼働中のものも有り、これらを改良して本施設の大強度ビームの放射線環境に適用できる可能性はある。

（2）建屋内空気の放射性物質汚染：

濃度限度を大幅に超えると推定される、主として短寿命核種からなる放射化空気は、スタックから屋外へ放出する前に、施設内の滞留時間を長く取ることにより、その放射能を減衰させることが必要となる。また、施設内で発生するオゾンやNOxの対策は、化学的または物理的吸着装置の設置により、相当程度解決が可能であると考えられる。

（3）土壌、地下水の放射化：

大強度陽子加速器からなる本施設において、土壌、地下水の放射化は安全対策上重要な問題の一つである。土壌、地下水の放射化を安全上無視しうるレベルまで下げるためには、ビーム損失低減化のための技術開発と併せて、予測される大きなビーム損失箇所周辺への十分な遮蔽の設置が重要である。遮蔽を十分厚くとることが課題の解決になるとすれば、この問題は経済性の問題でもある。

（4）保守性：

ビームダンプやターゲットなどビーム損失を減らしようのない箇所での保守作業では、遠隔操作による作業を考えざるを得ず、施設設計の最初からそのことを考慮に入れておくべきである。現在のロボット工学の技術では、本施設における複雑な放射線作業に耐えうるロボットの実現は、極めて困難と考えられる。

（5）インターロック：

加速器施設における人の安全に係るインターロックシステムは、ハードウェア、ソフトウェアとも技術的には確立していると考えられる。既存の高エネルギー加速器施設における経験からインターロックが満たすべき要件は明白であり、さほど困難な問題はないと考えられる。

（6）放射線安全評価手法：

高エネルギー中性子の深層透過問題において、モンテカルロコード、S_Nコード、Moyerモデル等の簡易計算手法による計算結果の間に無視できない差異が依然として存在する。今後は、合理的な最適設計を目指して、ベンチマーク実験解析を通して、より高精度な計算コードの改良を行なっていく必要がある。放射化計算については、詳細計算コードSPDの改訂が完了したので、本コードの精度評価作業を急ぐ必要がある。

（7）放射性廃棄物の評価と管理：

中性子科学研究施設において発生する高レベル、大型放射性廃棄物の定量的評価が施設設計段階から必要であるという指摘は重要である。これらの放射性廃棄物の対策は、東海研究所の廃棄物処理施設において処理、保管廃棄するなり、本施設独自の保管施設を設置することにより解決が可能であると考えられる。

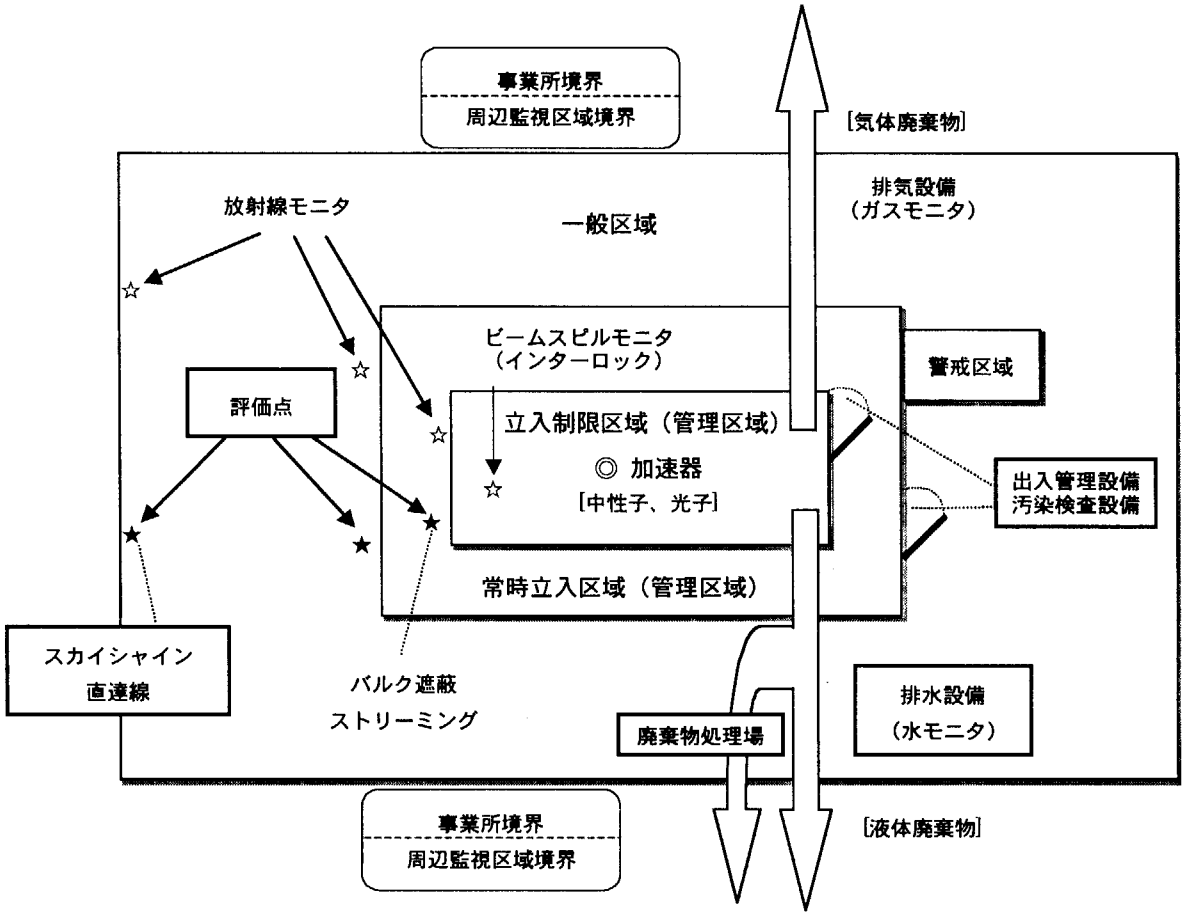


Fig. 7.1　中性子科学研究施設の放射線安全評価シナリオと安全管理設備

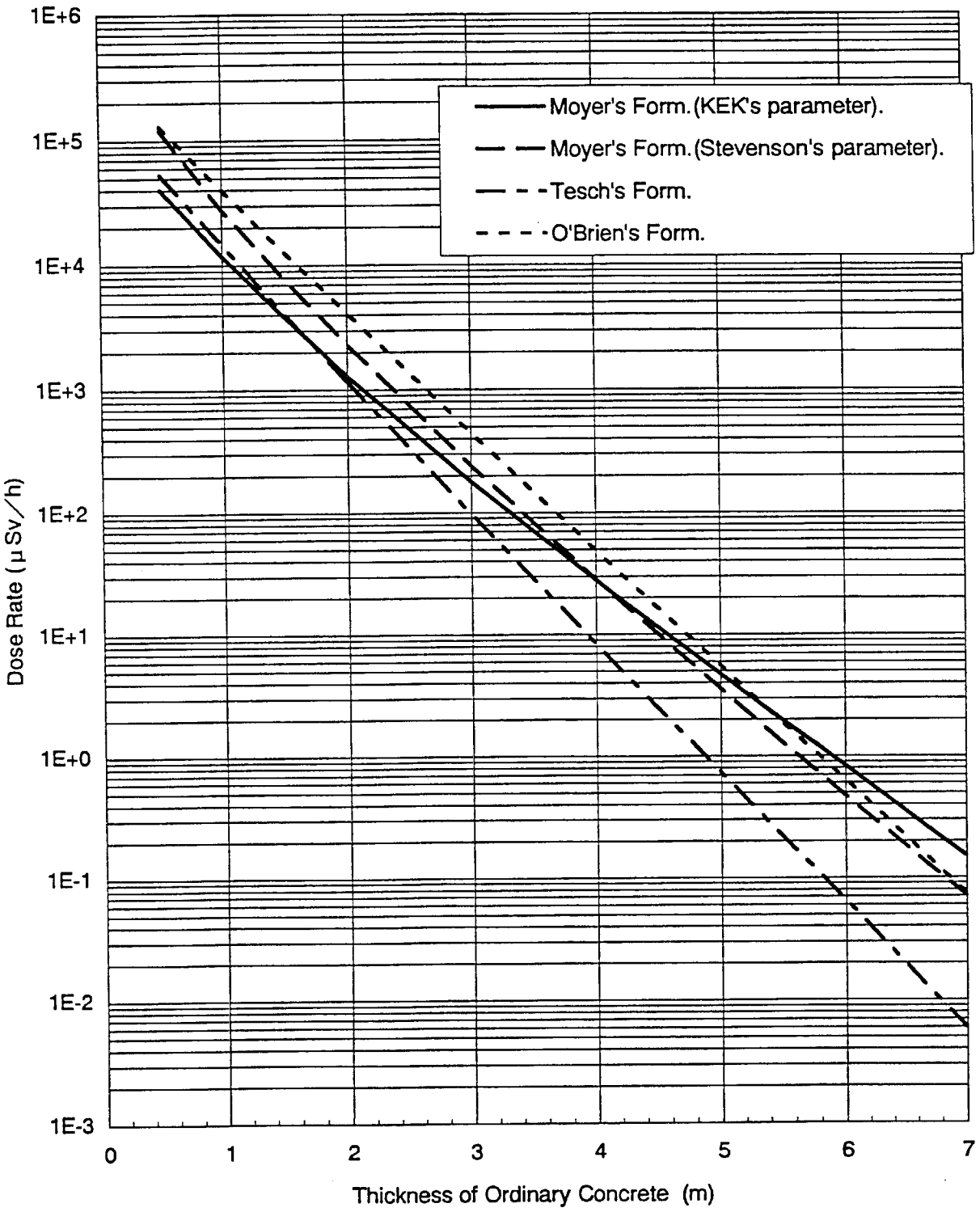


Fig. 7.2　1.5GeV陽子の１nA/mビームロスで発生する中性子線状線源による普通コンクリート中の線量当量率減衰分布

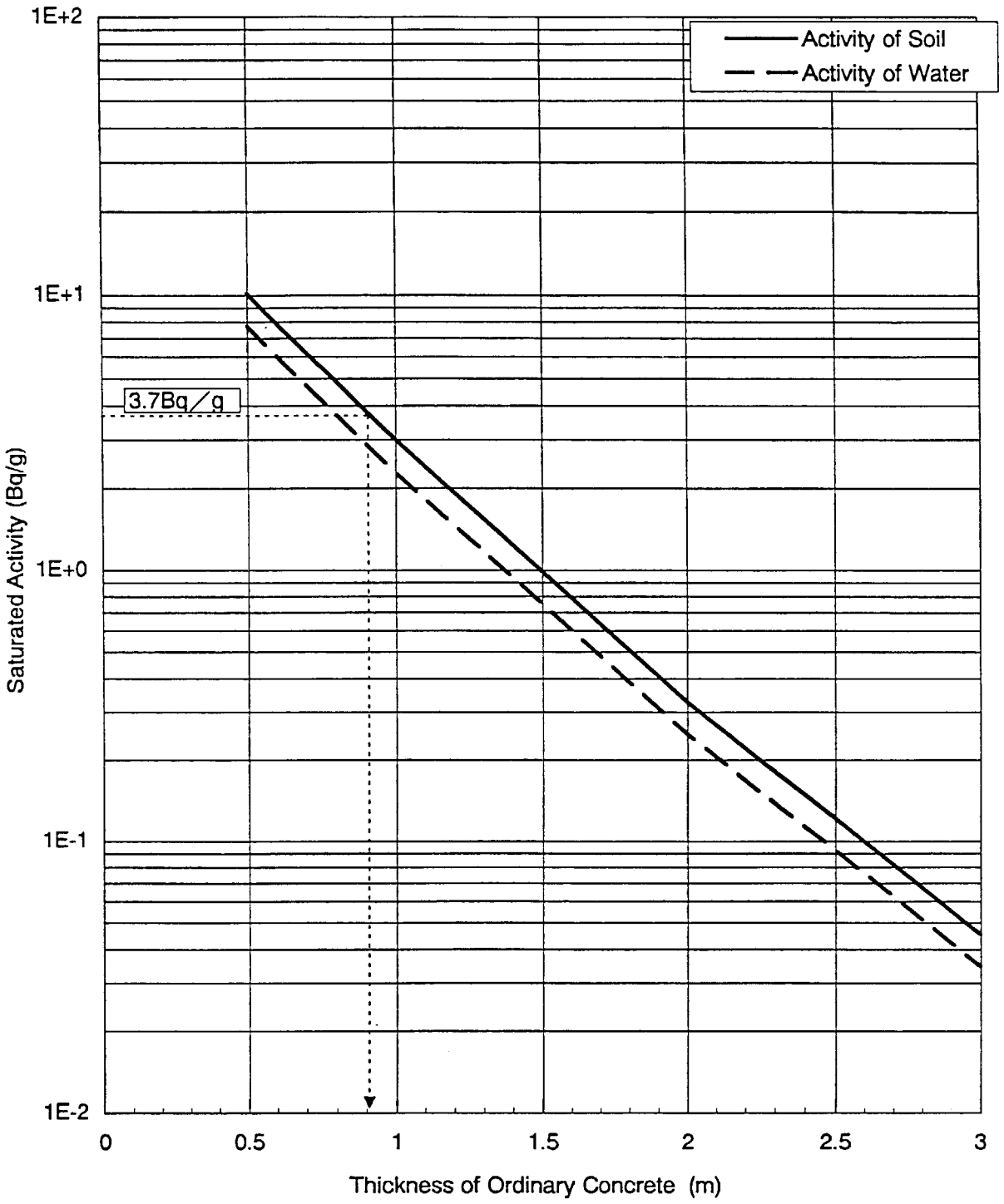


Fig. 7.3　1.5GeV陽子の１nA/mビームロスで発生する中性子線状線源による土壌及び地下水の放射能濃度と普通コンクリート厚さの関係

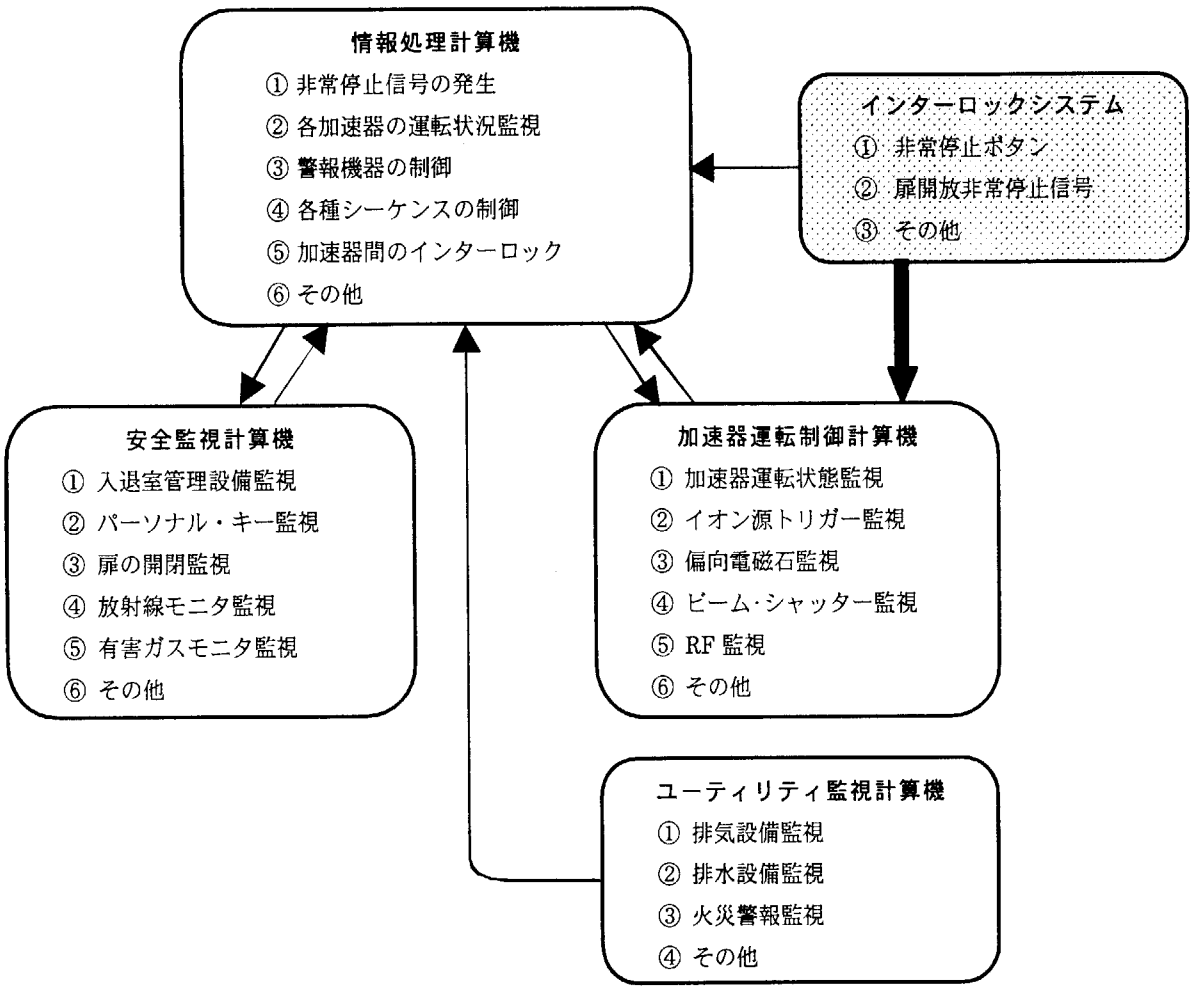


Fig. 7.4　人の安全に係わるインターロックシステム構成概略図

8．編集後記

本報告書は、原研の「中性子科学研究計画」と文部省高エネルギー加速器研究機構の「大型ハドロン計画」との施設統合構想が提案された時期に執筆を決定し、できるだけ多くの成果をできるだけ迅速に纏め上げることを目指して担当者間で分担を決めて実施した。出来上がってみると、編集局の力不足もあって、章間に記述の精粗が揃っていなかったり、体裁の統一が不充分であったり、また、十分に迅速に完成できたとも言い難い。しかしながら、技術的内容についてはこれまでに得られた主要成果を網羅している。今後、本報告書に基づいて内外に広くご議論を戴き、検討をさらに深めることによって、21 世紀初頭に物質科学等の基礎分野と消滅処理技術等の工学技術開発のため、高性能の中性子科学研究施設コンプレックスが実現されることを祈念したい。

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 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

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·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
線量当量	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 = 0.1 nm = 10^{-10} m

1 b = 100 fm^2 = 10^{-28} m^2

1 bar = 0.1 MPa = 10^5 Pa

1 Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2

1 Ci = 3.7 × 10^{10} Bq

1 R = 2.58 × 10^{-4} C/kg

1 rad = 1 cGy = 10^{-2} Gy

1 rem = 1 cSv = 10^{-2} Sv

（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(=10 bar)	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 = 4.18605 J（計量法）

= 4.184 J　（熱化学）

= 4.1855 J（15 °C）

= 4.1868 J（国際蒸気表）

仕事率　1 PS（仏馬力）

= 75 kgf·m/s

= 735.499 W

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）

中性子科学研究計画における研究開発