



JP0050189

KEK Report99-5

JHF-99-4

JAERI-Tech
2000-003



大強度陽子加速器計画

2000年2月

日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構
共同推進チーム

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。
入手の間合わせは、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、お申し越してください。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, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

大強度陽子加速器計画

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター
日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構
共同推進チーム*

(2000年1月4日受理)

大強度陽子加速器を用いた科学技術の総合的展開を図るために、日本原子力研究所（以下「原研」という。）と高エネルギー加速器研究機構（以下「機構」という。）は、原研の中性子科学研究計画と機構の大型ハドロン計画を共同で推進している。

本報告書は、原研と機構によって策定された中性子科学研究計画と大型ハドロン計画の加速器及び実験施設を原研の東海研究所に建設する統合計画（大強度陽子加速器計画）の提案書である。最初英文で作成された提案書に若干の訂正を加えて日本語版にした。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

※古坂 道弘*・日野竜太郎・池田裕二郎・池添 博・今里 純*・久野 良孝*
三宅 康博*・宮武 宇也*・水本 元治・森 義治*・向山 武彦・永江 知文*
永嶺 謙忠*・永宮 正治*・新村 信雄・野村 亨*・大山 幸夫・笹本 宣雄
澤田 真也*・柴田 徳思*・高野 秀機・高崎 稔*・渡辺 昇・山崎 良成*
横溝 英明

*：高エネルギー加速器研究機構

The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators

The Joint Project Team of JAERI and KEK*

Center for Neutron Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 4, 2000)

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) and the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) are promoting the joint project integrating both the Neutron Science Project (NSP) of JAERI and the Japan Hadron Facility Project (JHF) of KEK for comprehensive studies on basic science and technology using high-intensity proton accelerator.

This document describes the joint project prepared by the Joint Project Team of JAERI and KEK to construct accelerators and research facilities necessary both for the NSP and the JHF at the site of JAERI Tokai Establishment.

It was originally written in English and translated into Japanese with some corrections.

Keywords : Joint Project, High-Intensity Proton Accelerator, Spallation Neutron Source, Particle Physics, Nuclear Physics, Hadron, Neutrino, Neutron Science, Structural Biology, Material Science, Muon Science, Exotic Nuclear Beams, Nuclear Waste Transmutation

※M.Furusaka*, R.Hino, Y.Ikeda, H.Ikezoe, J.Imazato*, Y.Kuno*, Y.Miyake*,
H.Miyatake*, M.Mizumoto, Y.Mori*, T.Mukaiyama, T.Nagae*, K.Nagamine*,
S.Nagamiya*, N.Niimura, T.Nomura*, Y.Oyama, N.Sasamoto, S.Sawada*,
T.Shibata*, H.Takano, M.Takasaki*, N.Watanabe, Y.Yamazaki*, and H.Yokomizo

*: High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

目次

| | |
|------------------------------------|----|
| 1 統合計画の概略..... | 1 |
| 1.1 世界最高の陽子ビーム出力..... | 1 |
| 1.2 原研の中性子科学研究計画とKEKの大型ハドロン計画..... | 1 |
| 1.2.1 原研・中性子科学研究計画..... | 2 |
| 1.2.2 KEK・大型ハドロン (JHF) 計画..... | 3 |
| 1.3 統合計画の加速器と科学..... | 4 |
| 1.4 組織..... | 6 |
| 1.5 国際的な役割..... | 7 |
| 1.6 建設地の選定..... | 8 |
| 2 実験施設と実験プログラム..... | 9 |
| 2.1 原子核・素粒子物理..... | 9 |
| 2.1.1 はじめに..... | 9 |
| 2.1.2 原子核物理学..... | 11 |
| a. ハイパー核スペクトロスコピー..... | 11 |
| b. 核内のベクター中間子..... | 12 |
| c. ハイペロン核子散乱..... | 13 |
| d. ハドロン・スペクトロスコピー..... | 13 |
| 2.1.3 素粒子物理学..... | 14 |
| a. K 中間子稀崩壊..... | 14 |
| b. 基本的対称性の破れ..... | 15 |
| c. レプトン・フレーバー非保存探索..... | 15 |
| d. ニュートリノ振動..... | 16 |
| e. 中性子を使った基本物理..... | 17 |
| 2.1.4 まとめ..... | 18 |
| 2.2 中性子科学..... | 21 |
| 2.2.1 はじめに..... | 21 |
| 2.2.2 中性子科学..... | 22 |
| a. 中性子科学の概要..... | 22 |
| b. 構造生物学..... | 24 |
| c. 柔らかい物質..... | 25 |
| d. 物質科学..... | 26 |
| e. 工業利用..... | 28 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 2.2.3 中性子施設..... | 29 |
| a. 中性子施設の概要..... | 29 |
| b. 中性子強度とパルス構造..... | 30 |
| c. 中性子源 R & D | 31 |
| d. スペクトロメータ設計の指針 | 32 |
| e. 利用者支援 | 33 |
| 2.3 ミュオン科学..... | 35 |
| 2.3.1 はじめに..... | 35 |
| 2.3.2 構築される施設..... | 36 |
| 2.3.3 凝集系研究のためのミュオンスピン探針..... | 37 |
| 2.3.4 超低速 μ^+ ビーム源とその応用..... | 38 |
| 2.3.5 ミュオン触媒核融合とミュオン原子..... | 39 |
| 2.4 エキゾチック核ビームによる科学 | 42 |
| 2.4.1 はじめに..... | 42 |
| 2.4.2 代表的な研究課題..... | 43 |
| a. 中性子過剰核による核反応機構の研究 | 43 |
| b. 超重元素の研究..... | 43 |
| c. 不安定核のミュオニック原子..... | 44 |
| d. 天体核物理学 | 44 |
| e. 重元素に対する迅速分離による化学 | 45 |
| f. 物質科学..... | 45 |
| 2.5 核変換技術..... | 47 |
| 2.5.1 はじめに..... | 47 |
| 2.5.2 核変換システムの概念..... | 48 |
| 2.5.3 加速器駆動システム..... | 50 |
| 2.5.4 加速器駆動システム実証の技術課題..... | 52 |
| 2.5.5 加速器駆動システム技術開発のための基礎・工学実験施設..... | 53 |
| 2.5.6 実験の意義と内容..... | 57 |
| 2.5.7 加速器駆動システム開発の動向と国際協力..... | 60 |
| 3 加速器 | 63 |
| 3.1 はじめに..... | 63 |
| 3.2 加速器方式 | 64 |
| 3.3 リニアック | 68 |
| 3.4 ラティス設計 | 76 |

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| 3.4.1 50 GeV シンクロトロン..... | 76 |
| 3.4.2 3 GeV シンクロトロン..... | 79 |
| 3.5 シンクロトロンのための研究開発 | 82 |
| 3.6 おわりに | 86 |
| 4 放射線対策 | 89 |
| 5 将来計画 | 91 |
| 5.1 第二期計画の目的..... | 91 |
| 5.2 加速器..... | 91 |
| 5.3 実験施設の増強例..... | 94 |
| 5.3.1 第二期計画における原子核・素粒子物理..... | 94 |
| 5.3.2 第二期計画における中性子科学..... | 95 |
| 5.3.3 第二期計画におけるミュオン科学..... | 97 |
| 5.3.4 第二期計画における加速器駆動核変換実験施設 | 98 |

CONTENTS

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | OVERVIEW OF THE JOINT PROJECT | 1 |
| 1.1 | THE HIGHEST BEAM POWER IN THE WORLD | 1 |
| 1.2 | ORIGINAL PROPOSALS AT JAERI AND KEK | 1 |
| 1.2.1 | <i>Neutron Science Project at JAERI</i> | 2 |
| 1.2.2 | <i>Japan Hadron Facility (JHF) Project at KEK</i> | 3 |
| 1.3 | ACCELERATORS AND SCIENCE IN THE JOINT PROJECT | 4 |
| 1.4 | ORGANIZATION | 6 |
| 1.5 | INTERNATIONAL RESPONSIBILITY | 7 |
| 1.6 | SITE SELECTION | 8 |
| 2 | RESEARCH FACILITIES AND PROGRAMS | 9 |
| 2.1 | PARTICLE AND NUCLEAR PHYSICS | 9 |
| 2.1.1 | <i>Overview</i> | 9 |
| 2.1.2 | <i>Nuclear Physics</i> | 11 |
| a. | Hypernuclear Spectroscopy | 11 |
| b. | Vector Mesons in Nuclei | 12 |
| c. | Hyperon-Nucleon Scattering | 13 |
| d. | Hadron Spectroscopy | 13 |
| 2.1.3 | <i>Particle Physics</i> | 14 |
| a. | Rare K Decays | 14 |
| b. | Studies of Fundamental Symmetries | 15 |
| c. | Lepton Flavor Violation | 15 |
| d. | Neutrino Oscillation | 16 |
| e. | Fundamental Physics with Neutrons | 17 |
| 2.1.4 | <i>Summary</i> | 18 |
| 2.2 | NEUTRON SCIENCE | 21 |
| 2.2.1 | <i>Introduction</i> | 21 |
| 2.2.2 | <i>Neutron Science</i> | 22 |
| a. | Overview of Neutron Science | 22 |
| b. | Structural Biology | 24 |

| | | |
|-------|---|----|
| c. | Soft Matter | 25 |
| d. | Materials Science | 26 |
| e. | Industrial Applications..... | 28 |
| 2.2.3 | <i>Neutron Facility</i> | 29 |
| a. | Overview of Neutron Facility..... | 29 |
| b. | Neutron Intensity and Pulse Structure..... | 30 |
| c. | Neutron Source R&D | 31 |
| d. | Guide Line for Spectrometer Design..... | 32 |
| e. | User Support Program | 33 |
| 2.3 | MUON SCIENCE | 35 |
| 2.3.1 | <i>Overview</i> | 35 |
| 2.3.2 | <i>Facility Proposal</i> | 36 |
| 2.3.3 | <i>Muon Spin Probe for Condensed Matter Studies</i> | 37 |
| 2.3.4 | <i>Ultra-Slow μ^+ Source and Its Application</i> | 38 |
| 2.3.5 | <i>Muon Catalyzed Fusion and Muonic Atoms</i> | 39 |
| 2.4 | SCIENCE WITH EXOTIC NUCLEAR BEAMS | 42 |
| 2.4.1 | <i>Overview</i> | 42 |
| 2.4.2 | <i>Some Research Subjects</i> | 43 |
| a. | Reaction Mechanism of Neutron-rich Nuclei..... | 43 |
| b. | Study of Superheavy Elements..... | 43 |
| c. | Muonic Atoms of Unstable Nuclei | 44 |
| d. | Nuclear Astrophysics | 44 |
| e. | Atom-at-a-time Chemistry for Heavy Elements | 45 |
| f. | Materials Science | 45 |
| 2.5 | NUCLEAR WASTE TRANSMUTATION..... | 47 |
| 2.5.1 | <i>Overview</i> | 47 |
| 2.5.2 | <i>Concept of Transmutation System</i> | 48 |
| 2.5.3 | <i>Accelerator-Driven Transmutation Plant</i> | 50 |
| 2.5.4 | <i>Technical Issues for Demonstration of ADS</i> | 52 |
| 2.5.5 | <i>Experimental Facilities for ADS Technology Development</i> | 53 |
| 2.5.6 | <i>The Purpose and Contents of the Experiment</i> | 57 |
| 2.5.7 | <i>International Collaboration for ADS Development</i> | 60 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3 | ACCELERATOR | 63 |
| 3.1 | INTRODUCTION..... | 63 |
| 3.2 | ACCELERATOR SCHEME..... | 64 |
| 3.3 | LINAC..... | 68 |
| 3.4 | LATTICE DESIGN..... | 76 |
| 3.4.1 | <i>50-GeV Synchrotron</i> | 76 |
| 3.4.2 | <i>3-GeV Synchrotron</i> | 79 |
| 3.5 | RESEARCH AND DEVELOPMENT FOR THE SYNCHROTRONS..... | 82 |
| 3.6 | CONCLUSION..... | 86 |
| 4 | RADIATION SAFETY | 89 |
| 5 | FUTURE EXTENSION OF THE PROJECT | 91 |
| 5.1 | PURPOSE OF THE PHASE 2 UPGRADE..... | 91 |
| 5.2 | ACCELERATORS FROM 1 MW TO 5 MW..... | 91 |
| 5.3 | EXAMPLES OF OTHER UPGRADES..... | 94 |
| 5.3.1 | <i>Particle and Nuclear Physics at Phase 2</i> | 94 |
| 5.3.2 | <i>Neutron Science at Phase 2</i> | 95 |
| 5.3.3 | <i>Muon Science at Phase 2</i> | 97 |
| 5.3.4 | <i>Experimental Facilities for ADT at Phase 2</i> | 98 |

1 統合計画の概略

1.1 世界最高の陽子ビーム出力

ここで提案する計画では、素粒子物理、原子核物理、物質科学、生命科学、原子力工学の分野において最先端の研究を行うため、世界最高の陽子ビーム強度を持った加速器群を建設することをめざす。本計画は、文部省高エネルギー加速器研究機構（KEK）と科学技術庁所管の日本原子力研究所（原研）との両者によって議論されてきたものであり、両者が共同で提案するものである。これまで、KEKは大型ハドロン計画（JHF 計画）を提案してきており、また、原研は中性子科学研究計画（NSP）を提案してきた。この新しい「統合計画」は、これら二つの提案に基づいている。なお、加速器群は原研・東海研究所に建設される。

世界の加速器科学は、二つの方向へ進んでいる。一つはビームエネルギーの最先端を目指す方向であり、例えば、LEP（100GeV の電子と 100GeV の陽電子の衝突型加速器）、RHIC（核子当たり 100GeV の金ビーム同士の衝突型加速器）、LHC（7TeV 陽子と 7TeV 反陽子の衝突型加速器）、等が例として挙げられる。これらの加速器の主目的は素粒子物理における新粒子の探索である。もう一つの方向は、より高いビーム出力を目指す方向である。新しく建設される加速器の多くはこの方向を目指しており、一例として、大強度放射光を生成するための大強度電子加速器が挙げられる。陽子加速器では、大強度のビームによって、K中間子、中性子、ミュオン、ニュートリノ、反陽子、短寿命核などの多くの種類の二次粒子を生成することができる。これらの大強度二次粒子は、例えばニュートリノ振動やCP対称性の破れなどの、非常に稀な事象の測定に用いることができる。さらに、これらの二次粒子によって原子核物理や素粒子物理以外の科学や工学の研究を進めることができる。たとえば、a) 中性子やミュオンを用いた物質科学や生命科学、b) 放射性廃棄物中の長寿命核の加速器駆動核変換技術の研究、c) 短寿命核を用いた天体物理の研究、などである。本計画は、ビーム出力の最先端を目指す方向において世界をリードするものである。

1.2 原研の中性子科学研究計画とKEKの大型ハドロン計画

統合計画について述べる前に、この計画の基となった二つの計画について述べる。

1.2.1 原研・中性子科学研究計画

原研の中性子科学研究計画は、世界最大強度の核破砕中性子源と研究施設を建設して、基礎科学とともに、原子力発電の結果生ずる長寿命核種を加速器駆動未臨界炉で核変換する技術の開発を目的とした計画である。主要施設は、超伝導陽子線型加速器（リニアック）、中性子散乱研究のための 5MW パルス中性子源、および、加速器駆動核変換技術、中性子物理、材料照射、核破砕放射性イオン（RI）ビームを用いた原子核科学などのための実験施設である。

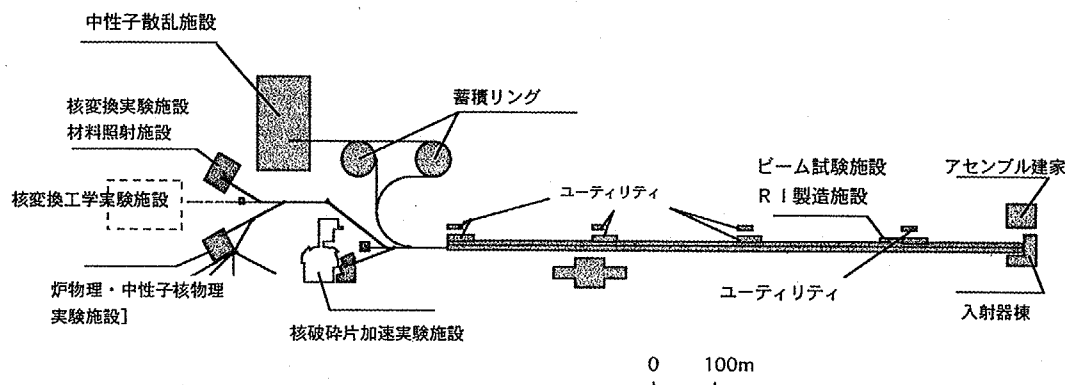


図 1.1 原研・中性子科学研究計画の施設配置概念図

初期のビームはパルスビームであり、ビーム出力は 1.5MW (1.5GeV, 1mA) であるが、二期計画として超伝導線型加速器を増強して直流モードで 8MW、パルスモードで 5MW の強度を持つものとする。二期計画においては加速器駆動核変換技術の実証研究のために熱出力 30MW の試験施設もあわせて建設する。

大電流加速器を建設する際の技術的課題は主に低エネルギー部分にあるので、原研は 1990 年以降、イオン源、RFQ (電気四重極リニアック)、および DTL (ドリフトチューブリニアック) の開発研究を行ってきた。最近のビーム試験では、ピーク電流 150mA のイオン源と 2MeV の RFQ を用いて 8% のデューティーで 70mA のピーク電流を達成することができた。また、低エネルギー部分 (2MeV から 100MeV) の DTL の試作機を製作し、大電力試験や高デューティー (50%) 運転の試験を行った。また、高エネルギー加速部には超伝導線型加速器を開発しており、最近超伝導空洞を製作し 2.2K での試験に成功した。

核破砕中性子源の開発も重要な技術的課題である。1MW ビーム用にタンタルを用いた固体ターゲットを開発中である。5MW ビームのターゲット用には水銀ターゲットを用いる予定であり、ターゲット部の設計が進行中である。系の熱流動試験のための水銀循環装置を製作した。また、日本・欧州・米国の国際協力により、米国ブルックヘブン国立研究所の AGS 陽子加速器を用いて、水銀ターゲットの流動的な

特性やニュートロニクス的な特性に関する実験を開始した。

加速器駆動システム（ADS）は原子力の新たな可能性を開くユニークな技術である。特に、原子力発電によって生ずる高レベル放射性廃棄物中のマイナーアクチノイド（Np、Am、Cm）を核変換するためには、ADS は非常に有望なシステムである。未臨界モードで運転される ADS には、燃料組成において融通性が高いことや、臨界事故に対して余裕があることなど、設計上のゆとりや安全上の特徴がある。これらの特徴により、長寿命核種の核変換を行うための安全かつ効果的な方法として、ADS は臨界炉と比べて有利なシステムとなる可能性がある。中性子科学研究計画においては、中規模のシステムによる ADS 技術の実証を行う。

図 1.1 は施設のレイアウトである。陽子リニアック含む主要な施設は 2007 年の完成を目指す。

1.2.2 KEK ・ 大型ハドロン（JHF）計画

大型ハドロン（JHF）計画は、ハドロン科学を推進することを目的とした KEK の次期加速器計画である。加速器群は、200MeV 陽子リニアック、3GeV 陽子シンクロトロン（PS）、50GeV 陽子シンクロトロンからなる。これらの加速器群は、原研の中性子科学研究計画の場合と同様、これらのエネルギー領域において世界最高のビーム強度を目指したものである。例えば、3GeV PS と 50GeV PS の平均電流はそれぞれ 200 μ A と 10 μ A である。3GeV PS は繰り返し周波数 25Hz の速い繰り返しの加速器であり、ビーム強度は 0.6MW である。50GeV PS は 0.7 秒の遅い取り出し時間を含め一周期 3.4 秒であり、ビーム強度は 0.5MW である。計画の作成にあたっては、建設

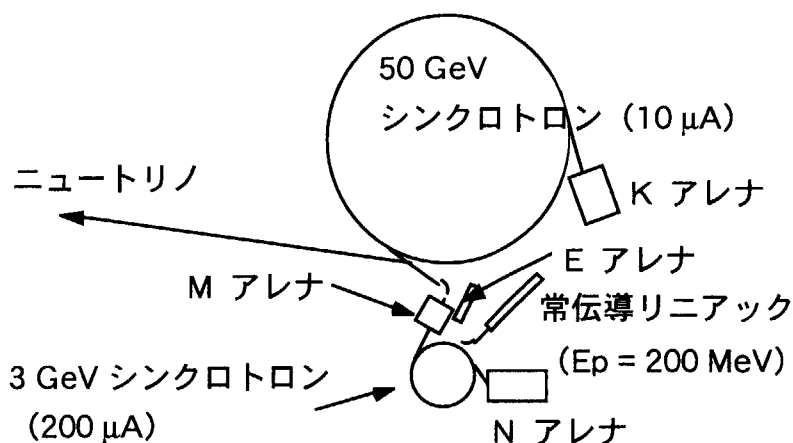


図 1.2 KEK ・ JHF 計画の施設配置概念図

費を削減するために、KEK の既存の基盤施設を最大限利用するように計画された。例えば、3GeV PS は現存の 12GeV 陽子シンクロトロンのトンネル内に設置される。

また、現在のニュートリノビームラインは 3GeV PS から 50GeV PS までのビーム輸送ラインとして利用される。

上記の加速器群によって生成される一次ビームと多岐にわたる二次ビームを用いることにより、高エネルギー物理から物質科学までの広い範囲にわたる科学研究が展開される。研究領域は、K アレナ、N アレナ、M アレナ、E アレナと呼ぶ四つの領域に分けられる。これらの領域の内容は、それぞれ、K 中間子やニュートリノビームを用いた科学（原子核・素粒子物理）、中性子を使った科学（物質科学）、ミュオンを使った科学（ミュオン科学）、不安定核ビームを使った科学（原子核物理と天体物理）である。K アレナは 50GeV PS からの陽子ビームを用い、他のアレナは 3GeV PS からのビームを用いる。

元来、JHF は現存の 12GeV PS の原子核・素粒子物理分野のユーザ、500MeV ブースタを利用する中性子・ミュオン分野のユーザ、それに東京大学原子核研究所のユーザの強い要望に基づいて提案されたものであった。しかしながら、JHF が完成した時には全世界中の研究者にオープンな施設となり、日本のみならず世界のユーザに開放する。実際、JHF 計画に対し興味を持ち支持する声が年々高まってきている。

図 1.2 は施設のレイアウトである。

1.3 統合計画の加速器と科学

統合計画で提案されている研究の内容については 2 章で詳しく述べる。ここでは、加速器群の構成およびそこで行われる研究の概略を述べる。

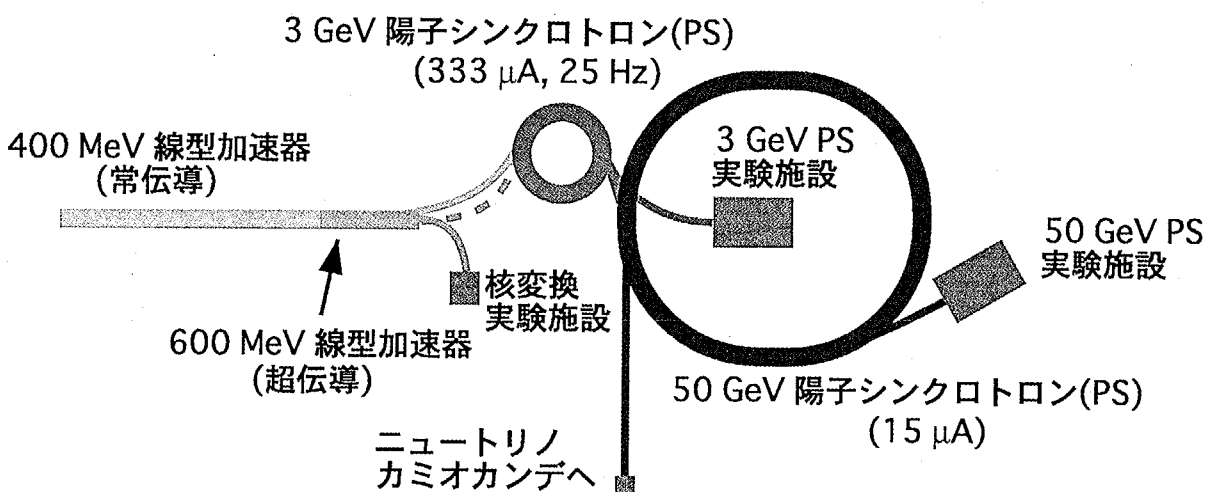


図 1.3 第一期計画の加速器の配置概念図

計画は第一期と第二期に分けられる。第一期の加速器構成は、

- 1 400MeV 常伝導リニアック
- 2 400MeV から 600MeV までの超伝導リニアック
- 3 3GeV、333 μ A (1MW) の陽子シンクロトロン (PS)
- 4 50GeV、15 μ A (0.75MW) の陽子シンクロトロン (PS)

である。これに加えて、第二期では、数 GeV 領域で 5MW の陽子ビーム強度を達成することが企画されている。第二期計画においてどのような加速器構成とするかは、第一期の加速器を建設し、性能評価を行った上で最終的に決断する。5章においてこの増強に関して詳しく述べる。図 1.3 は第一期の加速器群の基本的な構成である。

第一期の建設手順について細かいことを述べると、まず、400MeV リニアックを 3GeV 陽子シンクロトロンへの入射器として用いる。しかし、600MeV 超伝導リニアックを安定して運転できるようになれば、これを 3GeV シンクロトロンへの入射器とする。

世界の主な陽子加速器

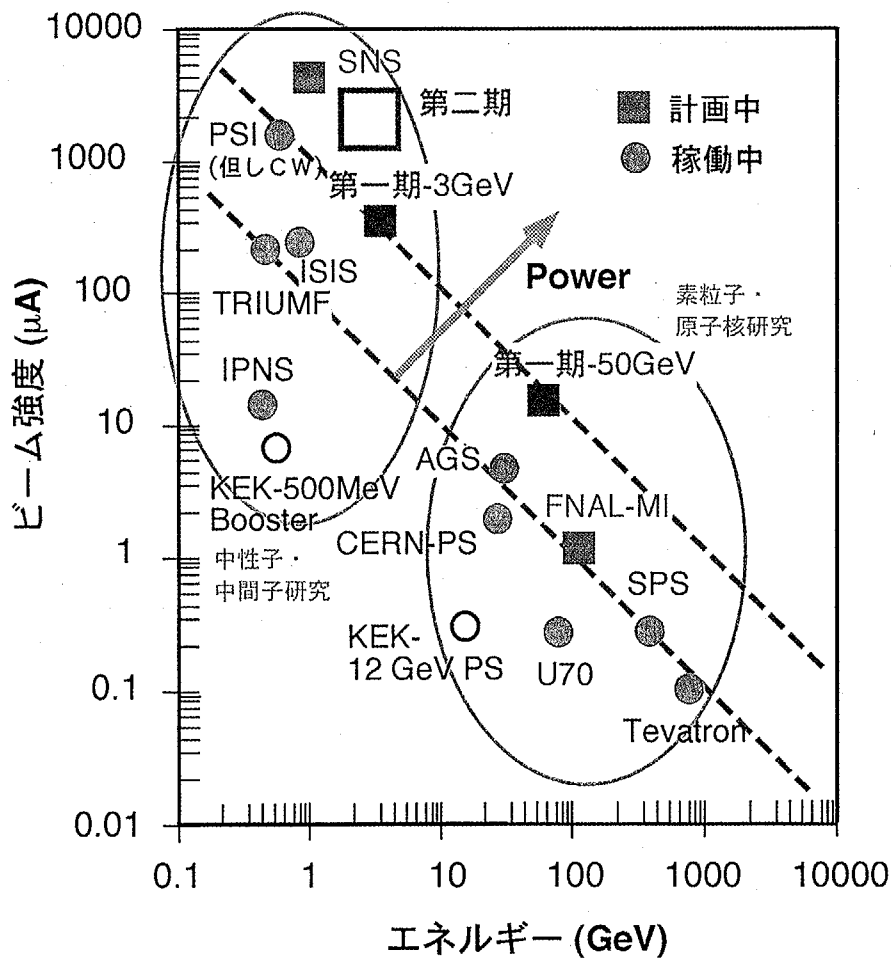


図 1.4 統合計画で達成されるビーム強度

50GeV PS では K 中間子ビーム、反陽子ビーム、ハイペロンビームおよび一次ビームを用いた原子核・素粒子物理の実験を行う。K 中間子ビームによって核物質中にストレンジ粒子を持ち込むことができ、これによって、ストレンジ粒子を不純物として注入した核物質を研究することができる。この他にも、CP 対称性の破れを測定する $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 反応などの K 中間子の稀崩壊の測定、スーパーカミオカンデ検出器を用いての ν_μ から ν_τ へのニュートリノ振動の測定、なども企画されている。

3GeV PS は 50GeV PS に対するブースターシンクロトロンを果たすが、それに加えて、1MW の強度を持つビームを作り出すよう設計した。このビームを用いて、原子核・素粒子物理、固体物理、物質科学、構造生物学といった分野の研究が精力的に展開する。これらの中で代表的なのは、陽子による原子核破碎反応で発生する中性子を用い、物質科学や構造生物学の研究である。中性子は磁気能率を持っているが電荷を持たないため、物質の磁氣的性質の研究が展開できる。また、中性子は水素原子とほとんど同じ質量を持つので、物質中での水素原子の位置や動的な振る舞いを敏感に測定することができる。生物細胞中の水素原子の役割には多大な興味もたれており、これらの研究においては中性子ビームは決定的な役割を果たすと考えられる。中性子以外に、ミュオンビームも重要である。ミュオンビームによって μ SR (ミュオン・スピン・回転/緩和/共鳴) やミュオン触媒核融合をはじめとした物質科学の研究を行うことができる。また、 $\mu N \rightarrow e N$ 反応の研究などの素粒子物理の実験も考えている。さらに、3GeV PS によって生成される短寿命核ビームによって原子核物理、天体物理の研究を進めることも計画されている。これら 3GeV PS からのビームを用いた研究に加えて、大電流 600MeV リニアックは加速器駆動核変換技術の開発研究に用いる。

これらの研究は第一期計画における強度のビームを用いても飛躍的に進展するが、特に中性子科学の分野では、より大強度のビームを用いることによって、さらに進んだ研究を行うことが可能となる。このため、第二期計画としてビーム強度を 5MW に増強する。第二期計画については 5 章で詳しく述べる。図 1.4 において本計画のビーム強度と世界の他の加速器との比較をした。

1.4 組織

この統合計画は原研・中性子科学研究計画と KEK・JHF という二つの既存の計画を基盤にしたものである。このため、本統合計画を策定するために、原研と KEK の双方による組織を設置した。この組織は、平成 11 年 10 月より図 1.5 に示すような組織に移行した。

「合同協議会」は数週間に一度会議を持ち、組織、この委員会の下に設ける各グループの作業内容や人員配置、さらに予算計画などの、統合計画に関する主要な

協議を行う。共同推進チームにおいては、永宮正治がチームリーダーとなり、横溝英明がサブリーダーとなる。共同推進チームには八つのワーキンググループを設ける。「推進会議」は原研、KEK、ユーザーコミュニティの代表者によって構成される。

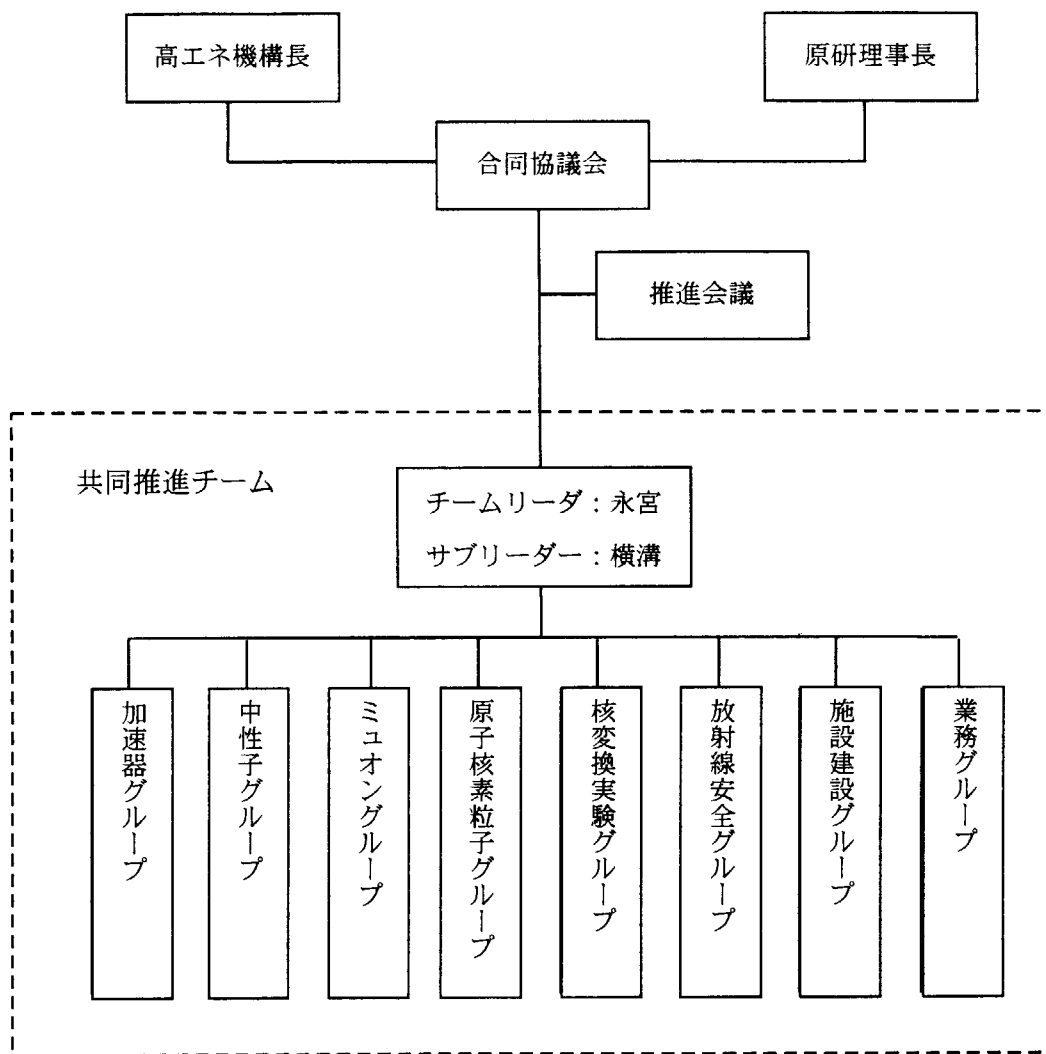


図 1.5 平成 11 年 10 月より約 1 年間の推進体制。建設正式開始時にはさらなる変更を加える。

1.5 国際的な役割

21 世紀には、日本が加速器科学の分野で世界の主導的役割を担うことが期待される。この観点から、本統合計画は、世界中の科学者から大きな期待がよせられている。たとえば、中性子源に関する OECD（経済協力開発機構）メガサイエンスフォーラムでは、アジア・太平洋、ヨーロッパ、北米の三地域にそれぞれ先進的な中

性子源を建設するよう提言されている。北米では 2MW の陽子加速器の建設を目指して SNS 計画が開始されており、ヨーロッパでは ISIS の 0.16MW 中性子源に続く 5MW の ESS 計画が議論されている。本統合計画はこれら二つの将来計画と比肩するものであり、完成すれば世界の中性子科学の三つの主要センターの一つとなる。

また、OECD メガサイエンスフォーラムの原子核物理部会においては、日本が提案した JHF 計画の重要性が強調され、世界のコミュニティーや研究機関に対して JHF での科学を推進するために協力関係を築くよう勧告している。本統合計画が完成すれば、ハドロン物理の世界的拠点となり、ヨーロッパ、アメリカ、アジアからの多くのユーザーが実験のためにやってくることになるであろう。

長寿命核種の核変換技術としての加速器駆動システム (ADS) は、高レベル放射性廃棄物管理の高度化技術として、近年、多くの国において研究開発が行われるようになってきた。特にフランスを中心とするヨーロッパの国々における研究活動が活発であり、スペイン、イタリア及びフランスの科学技術担当大臣を巻き込んで ADS 実証炉建設の検討を始めた。米国エネルギー省は、軽水炉使用済み燃料の処理に ADS を用いる大規模な ATW 計画の検討に着手した。

本統合計画における加速器駆動核変換実験施設は、この分野における世界最初の施設となり、ADS に関心を持つ国々が協力して技術開発を行う場を提供することになる。

今後、アジア・オセアニア地域における科学技術分野において、日本はこれまで以上に大きな役割を果たすことが必要となる。本統合計画には、これらの地域の研究者からも大きな期待が寄せられており、これらの地域の研究者がこの計画における施設を用いた研究に参加し易いように、特に配慮するつもりである。

1.6 建設地の選定

本計画における加速器群及び研究施設は原研東海研究所に建設する。

ビーム強度 1 MW の加速器や研究施設については KEK つくば地域でも建設は可能である。しかし、核燃料を取り扱う核変換実験施設や本計画の最終目標であるビーム強度 5MW の加速器および中性子散乱実験施設の運転維持には、原子炉級の経験やインフラストラクチャーが必要になる。原研東海研究所には、複数の研究用原子炉、放射性廃棄物処理施設等があり、これらの建設、運転維持の経験が長年にわたり蓄積されている。これらの点を考慮して本計画の建設地を決定した。

2 実験施設と実験プログラム

2.1 原子核・素粒子物理

2.1.1 はじめに

古代ギリシャの昔から、自然の真理を探究するのは、人類の本能的な欲求であった。原子核・素粒子物理学は物質の根源は何であるかを極微のスケールで探究していく基礎科学である。すなわち、物質の究極の構成要素は何であるか、どのような力がそれらを結びつけているか、などについて研究を行っている。また、最近、原子核・素粒子物理学の研究対象であるこのミクロの世界が、宇宙の起源と深く関連していることもわかってきた。

原子核・素粒子物理学における研究手段として、たとえば、非常に精密な観測を行う方法、エキゾチックな状態を作り出して研究する方法、未観測の現象を探索する方法、などがある。これらの方法で研究を遂行するためには、大強度の粒子ビームが必須である。この「統合計画」での 50-GeV 陽子シンクロトロン（以下簡単のため 50-GeV PS という）は、このような研究を可能にする大強度陽子加速器である。50-GeV PS からの 15 μA のビーム強度の一次ビームやその一次ビームから作り出される多彩な二次粒子ビームを使って、原子核・素粒子物理学の様々な重要な研究を行うことができる。一次ビームとしては陽子や重イオン、二次粒子ビームとしては π 中間子、K 中間子、ハイペロン、ニュートリノ、ミュオン、そして反陽子などが含まれる。50-GeV、15 μA という陽子ビームを使うことによって、このエネルギー領域で世界最高強度の二次粒子ビームを生成することができる。

50-GeV PS は、原子核・素粒子物理学者たち、特に日本のハドロン研究の物理学者たちが永い間待ち望んでいた計画である。日本では、高エネルギー加速器研究機構において、1976 年より 12-GeV 陽子シンクロトロン加速器（12-GeV PS）が運転されているが、その陽子ビームはわずか 0.3 μA という低い強度であった。このように低いビーム強度にもかかわらず、日本の研究者はたゆまぬ努力を続けて、これまで多くの成果をあげてきた。しかし、世界と並ぶトップクラスの研究を続けるのは、もはや困難になってきたといわざるをえない。また、12-GeV PS は、加速器自身が古くなっており、その寿命がくるのも時間の問題である。研究者は、現在の 12-GeV PS での研究を更に発展させるために、よりエネルギーが高くよりビーム強度の高い加速器をと、強い要求をし続けてきた。統合計画は、この願いを叶えるものである。また、世界的に見ても、1993 年のカナダ、TRIUMF の KAON 計画の中止以降、唯一

の新たな高強度ハドロン研究施設の建設計画として、国際的に非常に熱い注目を浴びている。

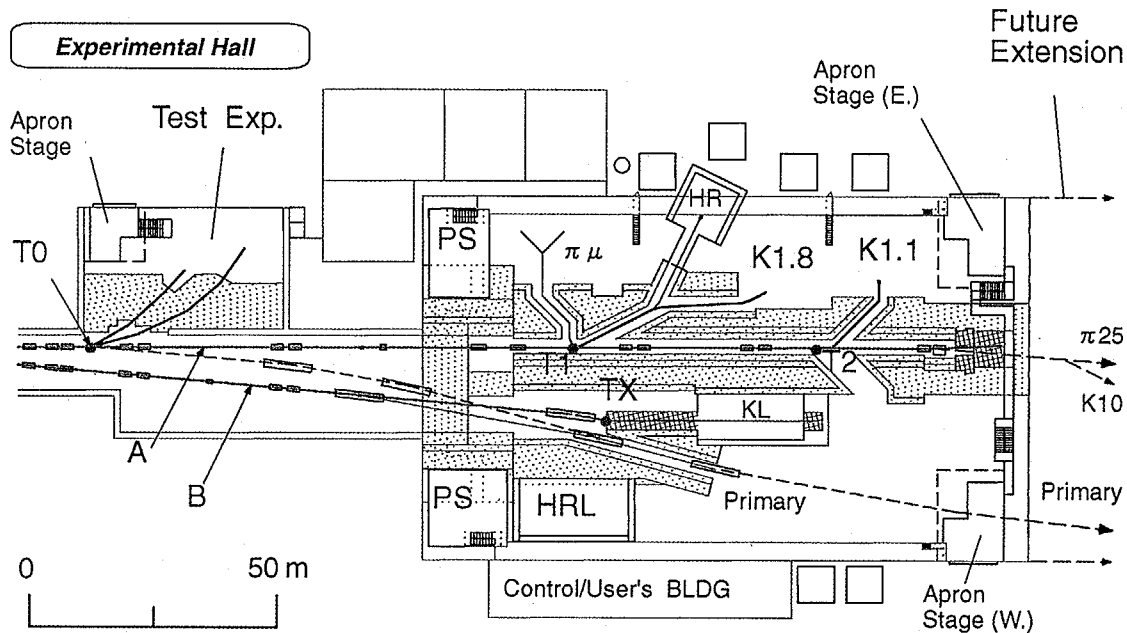


図 2.1 50-GeV PS での実験室レイアウト

50-GeV PS の研究プログラムは、原子核・素粒子物理学の幅広い分野を網羅している。それらは、たとえば、(1) K中間子や π 中間子による原子核物理、(2) 一次ビームを使った原子核物理、(3) K中間子やミュオンを使った素粒子物理、(4) ニュートリノ長基線振動実験、などである。以下、ここでは、いくつかの研究課題例を紹介するが、詳細については、他の研究レポートを参照されたい[1]。

表 2.1 50-GeV PS での二次粒子ビームラインの設計値

| name of beam channel | K1.8 | K1.1 | KL |
|--|---|--|--------------------------------|
| Momentum range (GeV/c) | 1.0 ~ 2.0 | 0.5 ~ 1.1 | 1~8 |
| Acceptance(msr•%) $\Delta\Omega \cdot \Delta p/p$ | 10 | 30 | $\Delta\Omega=6.8\mu\text{sr}$ |
| Length (m) | 40 | 25 | 20 |
| Particle separation | 2-stage DC | 2-stage DC | none |
| Average beam intensity (@ 1×10^{14} pps) | $K^-(1.8): 1.5 \times 10^7$ $pbar(1.8): 6 \times 10^6$ | $K^-(1.1): 1.5 \times 10^7$ $K^+(0.8): 1 \times 10^7$ | $K_L(2.0): 4 \times 10^8$ |
| Production angle (degree) | 6 | 5 | 10 |

図 2.1 は、50-GeV PS のビームを使った実験エリアのレイアウト案である。二つの一次ビームライン (図中で A と B)があり、A ラインには K 中間子や π 中間子など

の大強度二次粒子ビームを作り出す K1.8 と K1.1 という二つのビームラインと、低エネルギーの π 中間子やミュオン用の $\pi\mu$ ビームラインがある。Bラインには、中性K中間子二次ビームラインや一次ビームそのものを使う実験エリアが準備される。表 2-1 に、計画されている二次粒子ビームラインの性能をまとめてある。これらのラインのビーム強度は、世界最大となる。それぞれの実験エリアは将来の拡張可能性を考慮に入れて設計される。現在のレイアウトは予備的なものであり、今後、国内外の研究者から提案される個々の実験の必要性によって、配置などを変更することもある。

2.1.2 原子核物理学

原子核物理学には多くの最前線のトピックがあるが、重要な研究動機の一つは、「核表面から核物質へ」という言葉で象徴的に表わすことができる。これは、「核物質学」ともいうことができる[2]。核子などのバリオン（重粒子）の大きさは、原子核内の核子間の距離とほぼ等しい。そのため、核子（バリオン）が原子核の内部でも核子（バリオン）としての特質を保っているのかどうか、ということが、原子核物理の大きなテーマの一つとなっている。核物質の研究とは、言い換えると、このように未知の領域である原子核の内部を研究するものである。

a. ハイパー核スペクトロスコピー

ハイパー核（人工的にバリオンの一種であるハイペロンを注入した原子核）のスペクトロスコピーによって、核深部に束縛された状態の研究が可能となる。ここでは、ハイペロンの質量、磁気モーメントなどの性質が、真空中からどのように変化するかを詳細に研究することができる。しかし、図 2.2 にあるように、これまでのハイパー核の実験データは、質的にも量的にも、通常の原子核のデータに比べると、非常に限定されている。これは主として、実験に利用できるビームの強度が弱かったことによる。したがって、「統合計画」での高強度 K 中間子ビームを使うことにより、このハイパー原子核の分野は飛躍的に発展することが期待される。ここで、二つの異なる発展の方向が考えられる。一つはストレンジネス $S=-2$ のハイパー核の研究で、 Ξ ハイパー核[3]、二重 Λ ハイパー核、そして H ダイバリオンなどを含む。もう一つは、ストレンジネス $S=-1$ のハイパー核（たとえば Λ ハイパー核）の高分解能核分光で、ハイパー核の励起状態からのガンマ線を測定することにより可能となる。1.8 GeV/c の K ビームを使って、(K, K⁺)反応により、 $S=-2$ のハイパー核を生成することができるし、また、K1.1 ビームラインの 0.8-1.1 GeV/c の K のビームを使って、 $S=-1$ のハイパー核を大量に生成することができる。

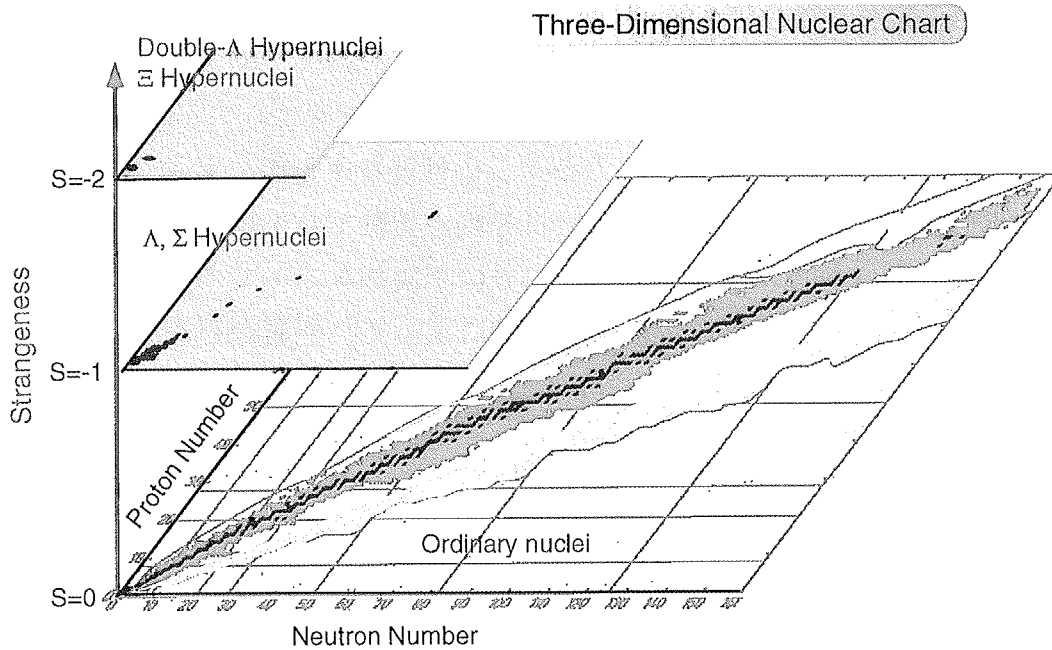


図 2.2 陽子数、中性子数、ストレンジネスによる3次元核チャート

b. 核内のベクター中間子

原子核の深部を研究する別の手段は、 ω 、 ϕ 、 J/ψ などのベクター中間子を原子核に注入することである。そこでは、「カイラル対称性の破れの部分的回復」といわれる核物質効果が期待されており[4]、ベクター中間子などの質量が核内では変わるだろうと考えられている。図 2.3 に、原子核物質の温度と密度とともに、この

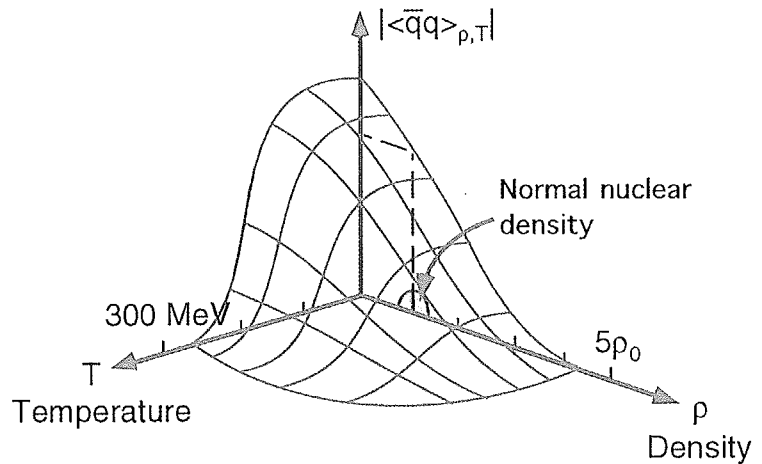


図 2.3 核内でのベクター中間子の質量変化の核物質温度と密度への依存性

質量変化がどのように変わるかという理論的予測を示す。核内でのベクター中間子の質量を測定する有力な方法は、ベクター中間子の崩壊で生じた二つのレプトンを測定することである。これは、レプトンが生成後に核内核子からの影響を受けず、ベクター中間子の質量の情報を正しく引き出すことができるからである。一般に、ベクター中間子を生成するのに中間子などの二次粒子ビームが効果的であるし、 J/ψ 中間子を核内に作り出すためには、反陽子ビームが適切である。また、将来、重イ

オンビームが利用できるようになれば、高密度核物質の研究も進展するであろう。

c. ハイペロン核子散乱

フレーバー SU(3)のバリオン・バリオン相互作用を理解するためには、核子・核子散乱だけでなく、ストレンジネスの自由度を取り入れたハイペロン・核子散乱も測定する必要がある。このハイペロン・核子散乱では、たとえば、 $\Lambda+p$, Σ^+p , Σ^-p , $\Xi+p$ などの散乱断面積を測定することが考えられる。しかし、これまで図 2.4 に示すように、ハイペロン・核子散乱のデータは統計精度的にも測定された運動量域的にも非常に不十分であった。1-2 GeV/c の大強度 π 中間子、K 中間子ビームが利用できるようになれば、ハイペロン・核子散乱の重要な実験が遂行されるようになる。

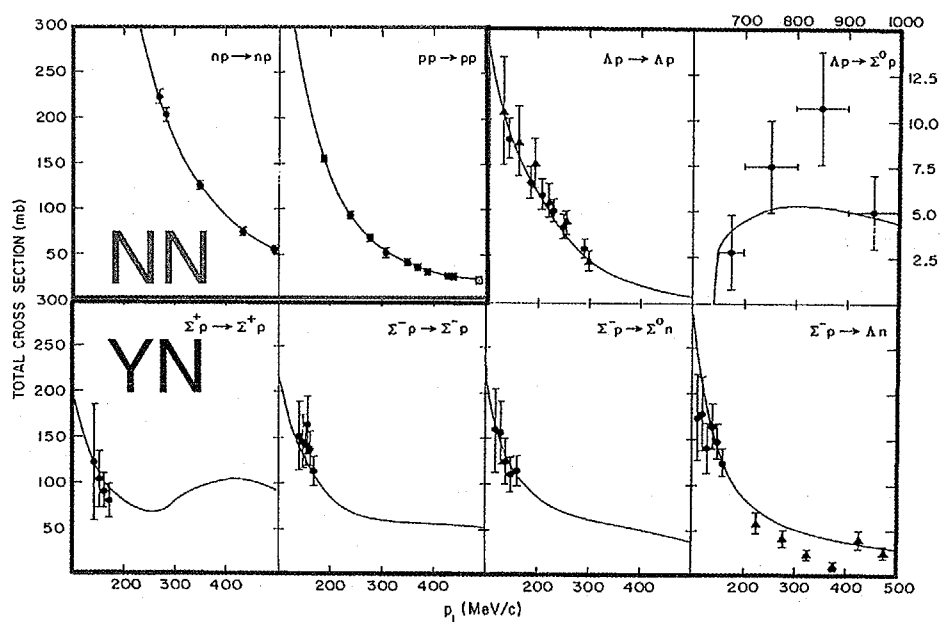


図 2.4 核子核子散乱 (NN 散乱) とハイペロン核子散乱 (YN 散乱) の実験データの現状比較

d. ハドロン・スペクトロスコピー

ハドロン・スペクトロスコピーは、量子色力学 (QCD) の強結合を研究する上で、非常に重要である。目標の一つは、グルーオンの自由度を含む未発見のエキゾチックなハドロンを探索することである。特に、その中でも、グルーボールの探索は最も興味深い。というのは、格子ゲージ理論が、スカラー・グルーボール(0^{++})の存在を 1.5 から 1.8 GeV/c² の質量領域に 100 MeV/c² の質量幅で予測しているからである[5]。また、テンサー・グルーボールは、2.0 GeV/c² 以上に予測されている。エキ

ゾチックな中間子をこれまでの実験よりさらによく通常の間接子と判別するためには、 4π 型の大立体角の測定器が必要であり、多重粒子軌跡判別と粒子識別などの能力が不可欠である。その測定器と 50-GeV PS からの大強度 K 中間子ビームを使って、これまでの最良の実験データを二桁以上の精度で改善することが期待される。さらに、反陽子ビームを使って、(狭いエネルギー幅の状態として予測される) チャームクォークを含むハイブリッドの探索などの重要な実験も可能になる。

2.1.3 素粒子物理学

素粒子物理学の標準理論は、これまでの実験結果をすべて矛盾なく説明することに成功している。しかし、標準理論は不完全な部分が多々あり、次世紀の素粒子物理学で最も重要な研究課題は、「標準理論を超える新しい物理」の手がかりを発見することである。50-GeV PS では、大強度の粒子ビームを用いた高精度フロンティア実験の研究を目指し、この重要な課題に挑戦する。これは、高エネルギー・フロンティア実験とは、別の方向からの意義あるアプローチである[6]。

a. K 中間子稀崩壊

K 中間子稀崩壊の研究により、標準理論の小林・益川クォーク混合行列(以下 CKM 行列という)を精密に研究することができる。特に、クォーク・フレイバーが変化する電荷が変わらない K 中間子崩壊 (FCNC 過程という) が非常に有用であることが知られている。たとえば、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊では $|V_{td}|$ を、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊では $\text{Im}V_{td}$ (Wolfenstein パラメータ表現での η パラメータ) などの CKM 行列要素を決定す

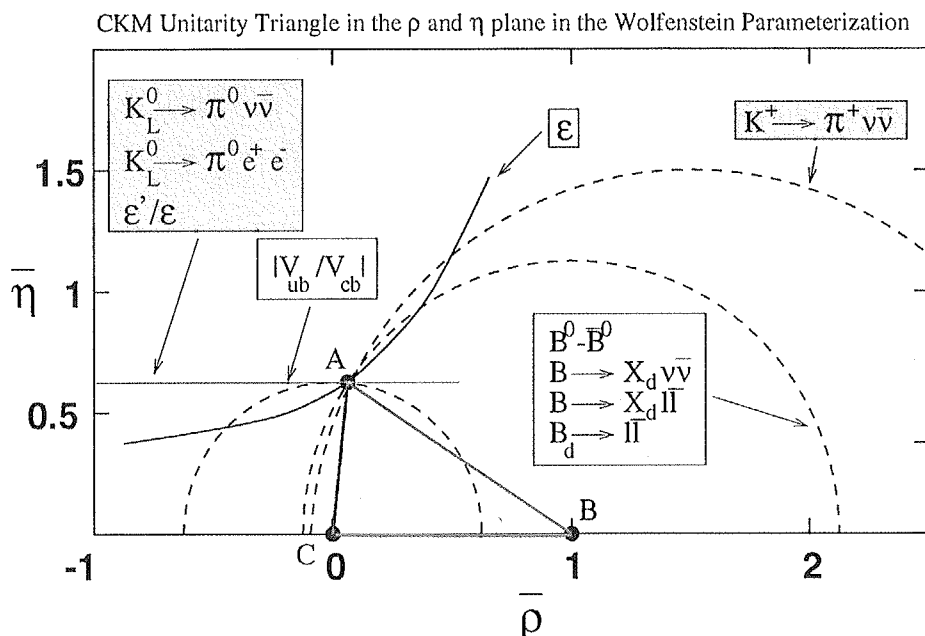


図 2.5 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊とユニタリティー三角形の関係

ることができる。図 2.5 に示すように、(B 中間子崩壊からの情報とともに) これらは CKM 行列のいわゆるユニタリティー三角形を決定するうえで重要である。特に、この 2 つの K 中間子崩壊モードでは、長距離相互作用が小さく、実験結果から CKM 行列要素を評価する際の理論的な不確定さが無いので、標準理論を精度良くテストすることができる。さらに、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は、(その行列要素で CP 対称性を破る) 直接 CP 非保存によって起こるので、CP 非保存の精密研究に最適である。また、他の K 中間子崩壊では、カイラル摂動理論などの低エネルギーでの量子色力学 (QCD) のテストをおこなうこともできる。

b. 基本的対称性の破れ

CP 非保存の新しい探究は、宇宙初期のバリオン非対称生成と深く関わっている。しかし、中性 K 中間子で発見されている (CKM 行列に起因する) 標準理論の CP 非保存の大きさでは、宇宙のバリオン生成を説明するのに十分ではないかもしれないと言われている。それゆえ、標準理論以外の全く新しい CP 非保存の機構の存在が推測されていて、新しい CP 非保存現象 (または、CPT 不変性を過程すれば T 非保存) を探索するのは非常に重要と考えられている。そのような可能性の一つは、たとえば、T 非保存量である $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 崩壊でのミュオン横偏極 (P_T) の探索などがある。もし、T 非保存があれば、 P_T はゼロでない有限の値を持つことになる。他に $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ 崩壊でのミュオン横偏極の探索もある。

CPT 非保存の探索も興味ある研究である。大強度の K_L^0 ビームを利用することにより、 $K_L^0 \rightarrow 2\pi$ 崩壊測定 of 精度を向上することができ、CPT 非保存を表わすパラメーターである $(\phi_{+-} - \phi_{00})$ と $(\phi_{+-} - \phi_e)$ を高精度で決定することができるであろう。

c. レプトン・フレーバー非保存探索

1947 年以來の長い歴史において、レプトン・フレーバー非保存 (以下 LFV という) 探索実験のこれまでの進展には驚くものがある。それに加え、理論的にも近年、LFV への関心はますます高まってきた。それは、標準理論を超える理論として候補にあがっている超対称性大統一理論 (SUSY-GUT) [7] が、ミュオン LFV 過程に対して、将来観測可能なほどに大きな崩壊分岐比を予言していることによる。代表的なミュオン LFV 過程は、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 、 $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ 崩壊、そして $\mu^- + N \rightarrow e^- + N$ 転換などである。超対称性理論では、トップ・クォークの質量が重いいため、レプトンの超対称性パートナーであるスレプトンの混合が大きくなり、観測可能なほどのミュオン LFV 過程を誘起すると推測されている。さらに、SUSY-GUT 以外にも、もし右巻きニュートリノの湯川結合が十分に大きい場合には、太陽ニュートリノや大気ニュ

ニュートリノなどで示唆されているニュートリノの混合が、ミュオン LFV 過程を引き起こすという超対称性理論の予測もある。図 2.6 に示すように、これらの予言値は、現在の実験上限値の一桁または二桁下であり、将来、実験的に検証できる可能性が非常に大きい。「統合計画」でのミュオン LFV 探索は、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 、 $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$ 崩壊で 10^{-15} 、 $\mu^- + N \rightarrow e^- + N$ 転換で 10^{-18} での分岐比を目標として目指す。このようなミュオン LFV 過程を実験するためには、大強度ミュオン・ビーム源が必要である。これを達成するために、生成標的に置かれた高磁場ソレノイド磁石による π 中間子・ミュオン捕獲、位相空間回転などの方法が現在検討されている。

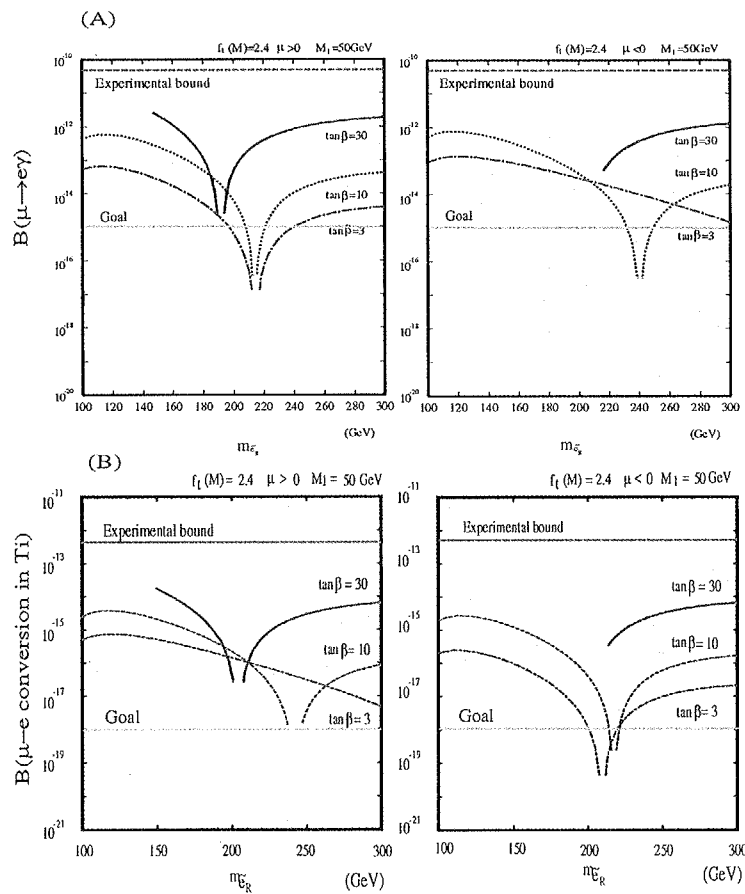


図 2.6 SU(5) SUSY-GUT 理論での (a) $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ と (b) $\mu^- + \text{Ti} \rightarrow e^- + \text{Ti}$ の分岐比の予測値

d. ニュートリノ振動

ニュートリノが有限な質量をもっているという幾つかの実験的ヒントや証拠がある。それらの一つは、スーパー・カミオカンデ・グループが報告した大気ニュートリノ振動である[8]。その大気ニュートリノでの質量と混合を確認するために、つくばの KEK 12-GeV 陽子シンクロトロンから神岡のスーパー・カミオカンデ測定器に向けてニュートリノ・ビームを照射するニュートリノ長基線振動実験 (K2K) が

すでに開始している。この実験では、生成時にはミュオン・ニュートリノであったビーム内に、250kmの飛行後に、電子ニュートリノが現れる、またはミュオン・ニュートリノの一部が消えてしまうなどの現象を観測することを目指している。しかし、ニュートリノ質量と混合を完全に理解するためには、さらなる包括的実験が必要となる。可能性のある実験としては、たとえば、タウ・ニュートリノの出現を観測することや、3成分ニュートリノ振動観測などがある。このような実験を遂行するためには、

高強度かつ高エネルギーの

陽子ビームが必要となり、50-GeV PS が最適である。もし運悪く現在行われている K2K 実験で振動の徴候が発見できなかつたとすると、大気ニュートリノ振動に対応するニュートリノ質量領域のうち (K2K 実験ではテストできない) 小さいニュートリノ質量差領域を探索することが必要となる。この場合、50-GeV PS で行う新しいニュートリノ振動実験としては、タウ・ニュートリノ生成を探すためにさらに遠い距離に新しい測定器を置くか、ニュートリノ・エネルギーをさらに下げミュオン・ニュートリノ消滅を精度良く観測する、などの実験を考えることになる。ともかく、実験中の K2K の結果に依らず、50-GeV PS の高いビームパワーは、将来、ニュートリノ振動実験を推進するために非常に有効であることは疑いない。それによってレプトン物理は大幅に進展するであろう。

e. 中性子を使った基本物理

中性子は自然の基本特性を調べるのに有効な中性電荷の粒子である。以下に可能な研究テーマの例をあげる。(1) 電気双極子モーメント測定：中性子の電気双極子モーメントは CP 非保存量で標準理論ではほとんど零に等しいが、その探索は標準

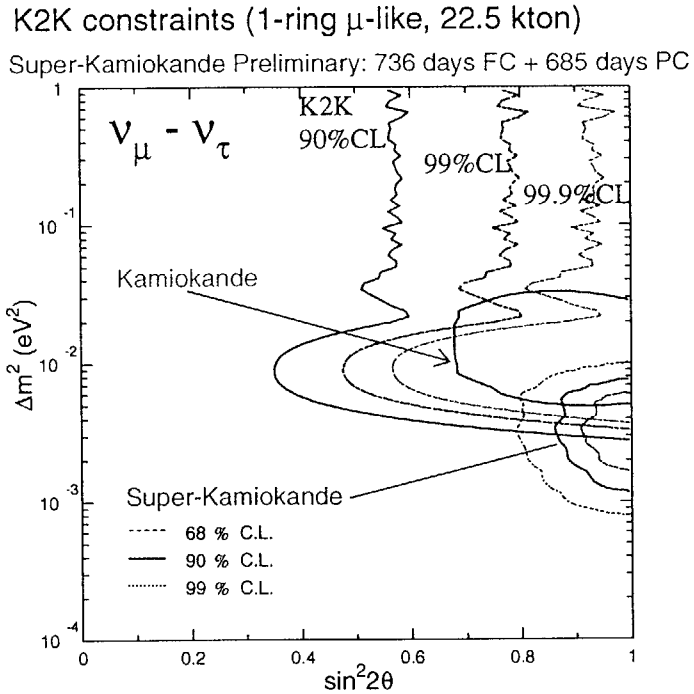


図 2.7 ニュートリノ質量差 (Δm^2) と混合 ($\sin^2 2\theta$) の 2 次元関係。K2K 実験での $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ニュートリノ振動での目標値とスーパーカミオカンデでの実験結果をそれぞれ 90%信頼度、99%信頼度、99.9%信頼度で示してある。

理論以外の新しい理論モデルの検証という意味で非常に重要である。実験感度をあげるためには、より大強度の極低温中性子源 (UCN) が必要となる。超流動ヘリウムを減速材として使用したスポレーション中性子源では、UCN の強度が向上することが知られており、検討を続けている。(2) 中性子での T-非保存探索：偏極中性子散乱での T-非保存量を偏極原子核ターゲットと組み合わせて探索をする。中性子散乱においてパリティ非保存の効果の増加が観測されたので、T非保存量の増幅効果も期待されるかもしれない。(3) 中性子の寿命測定：中性子の寿命測定は原子核吸収反応の測定とともに宇宙初期での核生成の研究に有効である。(4) 中性子ベータ崩壊：中性子のベータ崩壊の精密測定から g_V と g_A などの結合定数を測定できる。(5) 中性子の電荷測定：中性子干渉計をつかって中性子の電荷が正確にゼロであるかを調べることができる。これらの研究は、主として 3-GeV PS を使って行われる。

2.1.4 まとめ

50-GeV PS での実験をすべて網羅することはとてもできないが、幾つかの原子核・素粒子実験の例を参考として表 2-2 に示してある。

表 2.2 原子核・素粒子実験の例

Nuclear Physics

| | Topics | Motivation | Goal |
|-----------------------------|--|--|--|
| Strangeness nuclear physics | Λ -hypernuclear spectroscopy | Precise studies of Λ -hypernuclei | $\Delta E \sim 2$ keV resolution by γ -ray spectroscopy |
| | S=-2 hypernuclei | Ξ -hypernuclei, $\Lambda\Lambda$ -hypernuclei, search for H particle | |
| | Hyperon-nucleon scattering | Study of YN interaction Flavor SU(3) | Collect Λp , Σp , Ξp data as in NN data |
| | KN interaction | Measurement of Σ_{KN} | |
| | Charmed-hypernuclei | Production of Λ_c hypernuclei | |
| Chiral symmetry | Vector mesons in nuclear medium | Restoration of chiral symmetry | ϕ , ρ , J/ψ in nuclear medium (dilepton) |
| Structure function | Nucleon and nuclear structure function | Quark-gluon (parton) distribution | Low Q^2 , high x region |
| Hadron spectroscopy | Exotic searches | Search for glueball and hybrid | |
| | Antiproton beam | Energy region above LEAR | |
| | Normal baryon/meson spectroscopy | QCD confinement (DGL theory etc.) | Complete SU(3) baryon/meson spectra |
| Heavy-ion physics | High-density matter | Search for QGP | |
| | Multi-strangeness fragments | Search for S<-2 strangeness matter | |
| Atomic physics | Anti-hydrogen physics | Precision spectroscopy, CPT test | |

Particle Physics

| | Topics | Motivation | Goal |
|------------------------------|---|--|---|
| Rare K decays | Study of $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ decay | Determination of CKM matrix element ($ V_{ud} $) | About 100 events. $B(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) \sim 9 \times 10^{-11}$ is predicted. |
| | Search for $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ decay | Determination of CP-violating phase (η) in CKM matrix | About 1000 events. $B(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \sim 3 \times 10^{-11}$ is predicted. |
| | $K \rightarrow \pi \gamma \gamma$, $K \rightarrow \pi \pi \gamma$ | Test of chiral perturbation theory | |
| Fundamental symmetry | Search for P_T in $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ decay | Search for T violation | $P_T < 10^{-4}$ |
| | Δm_K in $K \rightarrow \pi \pi$ | Search for CPT violation | $\Delta m_K / m_K \sim 10^{-18}$ |
| Muon lepton flavor violation | Search for $\mu^- + N \rightarrow e^- + N$ | SUSY-GUT SUSY and heavy ν_R | $B(\mu^- + N \rightarrow e^- + N) \sim 10^{-18}$ with PRISM beam |
| | Search for $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ and $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$ | SUSY-GUT SUSY and heavy ν_R | $B(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) \sim 10^{-15}$ $B(\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+) \sim 10^{-15}$ |
| Neutrino physics | Neutrino oscillation | Determination of neutrino mass and mixing | $\Delta m^2 < 10^{-3}$ (for long-baseline) |
| | Neutrino scattering | Determination of electroweak form factors | |

参考文献

- [1] JHF Report Series, See details in the home page at <http://www-jhf.kek.jp/>.
- [2] S. Nagamiya, Proceedings of the 14th International Conference on "Particles and Nuclei (PANIC)", Williamsburg, Virginia, U.S.A., May, 1996, eds. C.E. Carlson and J.J. Domingo (World Scientific, Singapore, 1997), p.180.
- [3] K. Ikeda et al., Prog. Theor. Phys. 91, 747 (1994).
- [4] W. Weise, Proceedings of the International Workshop on "Physics with 50 GeV PS", JHF-Supplement-18, Institute for Nuclear Study, Univ. of Tokyo, Eds. T. Fukuda, H. Hamagaki and S. Nagamiya, April 1996, p.19.
- [5] D. Weingarten, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 34, 29 (1994).
- [6] For instance, see Y.Kuno and L.S. Littenberg, Proceedings of "International Workshop on JHF Science (JHF98)", Eds. J. Chiba et al., March, 1998, vol.1, p.149.
- [7] R. Barbieri, L. Hall, and A. Strumia, Nucl. Phys. B445, 219 (1995); J. Hisano, T.Moroi, K. Tobe, and M. Yamaguchi, Phys. Lett. B391, 341 (1997).
- [8] Y. Fukuda et al., Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 81, 1562 (1998).

2.2 中性子科学

2.2.1 はじめに

中性子は物質科学の研究を行うための理想的なプローブであって、科学・技術の様々な分野で重要な役割を果たしている。しかしながら、第三世代の放射光のX線に比べると現在の中性子源の線源強度はかなり弱い。さらに問題なのは、中性子源に対する需要は伸び続けているにもかかわらず、世界中にある研究用原子炉、パルス中性子源の数は、21世紀に入って大きく減ると予想されていることである。これは「中性子ギャップ」とも呼ばれている。21世紀は環境問題等の観点から物質科学、生命科学を発展させることがますます重要になっていくのは間違いない。中性子源はそのために不可欠なものであり、新しい中性子源を建設するための努力を今すぐにでも始めなければならない。

このような事態を解決するための一つの試みは、アメリカ合衆国のオークリッジ国立研究所で立案された「先進的中性子源計画 (ANS)」である。熱出力 330 MW の研究用原子炉を建設しようとしたが、残念ながら建設コストの問題で予算化されることなくプロジェクト自体が消えてしまった。一方、陽子加速器を用いた中性子源としては、現在世界最高性能である 0.16 MW の陽子ビーム出力を基にした英国ラザフォード・アップルトン研究所の ISIS (アイシス) パルス中性子源がある。これは陽子シンクロトロン加速器を用いたパルス状の中性子ビームを発生する核破砕型中性子源である。この施設により、パルス中性子源には中性子飛行時間法により、広いエネルギー・運動量 ($Q-\omega$) 空間にわたって詳細に様々な物質の散乱関数を得ることができる等、多くの利点があることが証明されてきている。このような中で、最近の加速器技術の進展は著しく、ISIS を大きく上回る数 MW の陽子ビーム出力を持つ加速器が建設できる可能性が出てきた。このような陽子シンクロトロン加速器、あるいは蓄積リングから取り出された高出力陽子ビームを用いたパルス中性子源が建設できれば、これまでにない高性能の中性子源が実現可能となる。例えばこのような中性子源は、現在世界で最高性能を誇るヨーロッパ共同のラウエ・ランジュバン研究所 (ILL、フランス) の 57 MW 熱出力の原子炉に比較し、約二桁高いピーク中性子束が出せる[1]。このような中性子源が実現できれば、未来の科学技術を発展させていく上で他に代わる物のない有力な研究手段となるであろう。

振り返ってみると、日本では東北大学の電子線形加速器を用いて、1960年代には世界に先駆けてパルス中性子実験を始めている。さらに1980年にはKEKにおいて利用者に開かれた世界初の短パルス核破碎型中性子源が運転開始となり、またISISが建設された後には、日英中性子散乱協力事業の下で中性子分光器をISISに建設している。1987年には大型ハドロン（JHF）計画の一施設として、0.6 MW（1.2 MWに増強可能）の陽子ビーム強度を持つNアレナ・パルス中性子施設をKEKに建設する案が提案された[2]。一方原研においては、1960年より研究炉を中心に利用が始まり、1990年には冷中性子を持つ改造3号炉が完成し、非常に多くの利用者グループがこれを利用するようになってきている。このような需要がますます増大しているため、新しい中性子施設を建設したいという要望は膨らむ一方である。これに対応して、1994年には中性子科学研究計画の主要な施設として5 MWのパルス中性子源を建設するという計画が提案されている[3]。

1998年からこれら二つの計画を統合する事が検討されはじめ、この提案を出すに至っている。この統一チームには、これまでにパルス中性子施設を設計、建設、利用するための経験が着々と蓄積されてきており、十分に数MW級のパルス中性子源を建設するための実力がある[4,5,6]。逆に21世紀の科学・技術のフロンティアを切り開くためにどのような要求があるかを調査した結果、5MW級のパルス中性子源施設が必要不可欠であることも明らかになっている。さらに、このような施設が緊急に必要であるという要求もかなり強い。そこで、これまで世界中で経験のないMW級のパルス中性子源を建設、運転するための経験を段階的に積むために踏むべきステップとしての意味もあり、1MWのパルス中性子源を建設することにした。ただし、その後5MWまで増強するに当たっては、そのための研究に支障のある利用休止期間を最低限にする必要がある。一方、この統合計画中性子源は、OECDのメガサイエンスフォーラムにおいて、アジア・オセアニア、ヨーロッパ、北アメリカの世界の三拠点の一つとして位置づけられている[7]。

2.2.2 中性子科学

a. 中性子科学の概要

中性子は非常にユニークな研究手段の一つであり、物質のミクロな構造や

ダイナミックスを測定する上で欠かせない物である。これは、1994年にブロックハウス教授とシュル教授が1950年頃に中性子回折・散乱の基本的手法を確立したことによりノーベル物理学賞を受賞していることに象徴的に反映されている。それ以来、中性子散乱は物質の動的な性質を探るための標準的手法と認められており、特に凝集体の研究において非常に多くの成果が得られている。最近の研究成果、例えば高温超伝導、磁性体の量子効果等々を見ると、非常に広いエネルギー・運動量空間にわたって広がっている散乱を観測することが重要であることが分かる。この計画で実現されるパルス中性子で初めて可能になる高い中性子束は、このような観測可能領域を広げたり、あるいはエネルギー、運動量等に関する分解能をこれまでになく上げることができ、このような分野の発展に大きく寄与することが期待されている。さらに、このような高中性子束を用いることで日常的に偏極中性子を用いた測定が可能になり、磁性体の研究はいうに及ばず、生体分子、高分子などの分野に大きな進歩が期待できる。また、中性子は透過力が強いため、超高圧、極低温、超高磁場、あるいはこれらの組み合わせなど特殊環境下での測定に向いており、物質がその新しい性質を見せてくれるのではないかと期待されている。

統合計画中性子施設の実現で最も発展が期待されるのは構造生物学の分野であろう。現在の中性子源ではなかなか困難であるが、統合計画が実現すれば、蛋白質、DNAその他の物質のなかの機能的に重要な役割を持つ水素、あるいはこれを取り囲む水和水の位置の決定が容易にできるようになるであろう。また、中性子非弾性散乱による振動状態の解明は、それらの機能解明に大きな役割を演じるであろう。

高分子、液晶、コロイドなどは非常に複雑な形態をとり、基礎科学の上からも、工業的利用という意味からも大きな注目を浴びている。このような複雑な系を研究するためには非常に広い Q - ω 空間での測定が不可欠で、それには当然このような計画で実現される高い中性子束が不可欠である。偏極中性子の利用は構成要素である水素の非干渉性散乱から来るバックグラウンドを下げたり、あるいはスピンコントラスト変調法を使うことで、得られる情報の質を圧倒的に良くすることができる。

中性子の工業利用もまた重要なテーマである。新材料開発には組成、温度、圧力などを系統的に変化させて材料評価をする事が不可欠であり、強い中性子線源が必要である。また、透過力の優れた中性子を利用して、中性子ラジオグ

ラフィーを行うことにより、ジェット機のタービンブレード等のようなものの内部構造の写真の実際の使用条件下で非破壊的に撮ることができ、安全性の向上に貢献できる。

中性子はまた基礎物理の研究にも役立つが、それについては素粒子原子核の章で触れられている。

b. 構造生物学

21世紀は生命科学の時代であり、構造生物学はその基礎と位置づけられる。中性子は生体高分子の水素原子の位置を決めることができるだけでなく、その機能に深く関わっている水素や水の振動状態の情報を得ることができるという意味で重要なプローブである。そのような中性子の利点は原理的な話としては理解されているが、これまではそれほど多くの実例があるわけではない。それは現在得られる中性子強度があまりに弱いからであるが、それにもかかわらず重要な成果が中性子散乱により得られている。統合計画中性子施設は、5MW施設の完成時には現在のJRR-3Mに比べ、ピーク中性子強度で約1,000倍の中性子強度が得られることが期待されており、21世紀の生命科学に大きなインパクトを与えるであろう。

中性子小角散乱法では比較的分解能の低い情報しか得られないにもかかわらず、そのような手法でしか得られない情報がある。結晶化しない生体物質、あるいは、シャペロン誘起蛋白折り畳み構造などのように溶液中では結晶中とは違った構造を持つような物の場合である。糖蛋白の研究では、機能に関わる糖の役割をきちんと理解する必要があり、中性子コントラスト変調法による研究が行われているが、糖と蛋白のコントラストが小さいために現在の中性子束では測定がなかなか困難で、統合計画中性子施設の高中性子束が不可欠である。

膜蛋白の系では中性子反射計の測定が有望であり、例えば水面上に広がった膜の中に蛋白質がどのように入り込んでいるかを知ることが出来る。

蛋白質、薬品デザインを念頭に置き、結合や会合などをコントロールする重要な相互作用を理解するためには、水素原子や、水原子の位置を含めた結晶構造を正確に決められなければならない。中性子を用いた単結晶構造解析の手法はこのような場合に威力を発揮する。例えば正方晶系を持つニワトリの卵白リゾチーム蛋白について、原子炉に設置された 1nm 分解能の中性子準ラウエ装置によりイメージングプレート検出器を用いて測定され、157 個の結合された

水分子、696 個の水素、264 個の重水素の位置が確定されている。このような高分解能の結晶構造決定の仕事は製薬、農学、バイオテクノロジーの各分野において、これからますます重要になって来るであろう。さらに次世代の中性子源が完成すれば、ほとんどの重要な蛋白質に関しそのような構造決定ができるようになるであろう。

蛋白質の振動状態はその機能と深く関連しており、中性子非弾性散乱によりそのダイナミクスを研究することで、有用な情報を得ることができると考えられている。これまでは個々の原子の動きしか見えない非干渉性非弾性散乱しか研究されてきていないが、干渉性非弾性散乱を測定することができれば、離れた 2 つの原子が相互にどのような相関を持って動いているかを見ることができ、情報量は格段に増える。しかしながら、そのような散乱は弱いので、偏極中性子を用いて、中性子スピン反転／非反転過程により非干渉性散乱と干渉性非弾性散乱を分離し、実効的バックグラウンドを下げる必要がある。十分な強度を持った偏極中性子を得るためには、統合計画中性子施設のような高中性子束が不可欠である。

c. 柔らかい物質

統合計画の 5MW ステージでは、間違いなく世界最強の中性子施設になり、微量試料での測定、非常に速い構造形成の測定、さらには非常にゆっくりとした揺らぎの測定など、新しい現象を追求することが可能になり、物質科学の様々な分野で新しい世界を開くことは間違いない。ここでは、高分子、液晶、コロイド系など柔らかい物質に関し、統合計画で可能になる新しい研究について述べる。

高分子、液晶などは 10-100 nm にわたる様々な空間スケールにおいて非常に美しい高次構造を取る。これは乱雑になろうとするエントロピーと規則的になろうとするエンタルピーとの微妙なバランスの上でできる構造である。それらの構造はズリ流、電場、磁場など、小さな外場にたいしても反応するため、柔らかい物質に様々な機能をもたす。このようなことに関する研究は、構造とその形成過程の解明をるところから始まり、基礎科学の面からも産業への応用の面でも重要な課題の一つである。現在でもこのような問題意識で研究が行われてきているが、現在利用可能な中性子強度が余り強くないため、その研究対象は限られたものになっている。

例えば液晶は電場によりかなり速い構造変化を起こすが、このような外場に対する早い反応の研究は実用とも絡み、今すぐにでも行いたいものである。これは非常に短い時間間隔の実時間中性子小角散乱測定ができれば研究できる。さらに高次構造の形成過程に関してもそのような手法は非常に有効であり、1MW ステージからその研究がはじめられる。

相分離過程を通じた構造形成過程では、小さくて遅い密度揺らぎが重要な役割を担っていることが知られている。現在の中性子源では、密度揺らぎに関する情報が得られる散乱関数 ($S(Q, \omega)$) を、その時間変化まで含めて観測するのはほとんど不可能である。5 MW 施設が完成すれば、エネルギー分解能の高い ($\Delta E = 1 \mu\text{eV}$) 小角散乱領域 ($Q \sim 0.1 \sim 1 \text{ nm}^{-1}$) での密度揺らぎの測定から、このような構造形成にかかわる密度揺らぎの解明ができるようになるであろう。

接着、表面への「濡れ」等のように、柔らかい物質の表面や界面における現象には興味深いことがたくさんある。中性子反射の測定はこのような表面での構造研究に有用な情報をもたらしているが、今のところ使われているのは主として鏡面反射の情報に限られている。1 MW ステージでは、非鏡面反射の測定により表面での高分子の規則構造や、液晶の二次元的な情報を得ることができる。さらには実時間測定をすることにより、液層の表面での規則化過程を研究したり、高分子の界面付近での他の相への侵入状態などの研究をすることができる。

中性子反射率と中性子スピンエコー型小角散乱の組み合わせで表面での柔らかい物質の密度揺らぎを測定するような研究は、5 MW ステージで可能になる高中性子束がなければできない。このような装置が可能になれば、低次元での構造と揺らぎに関する新しい研究分野が切り開かれるのは間違いがないであろう。

d. 物質科学

最近の凝集系の物理のトピックの一つは、高温超伝導体の機構に深く関わっている可能性の高い、スピン-電荷分離による新しい量子状態の存在の可能性が出てきたことであろう。この現象は低次元系の量子効果に特徴的なものである。このような視点で、関連した系について集中的な研究が行われ、新しい物質が数多く合成されてきている。これらを理解するための試みが進んできて

おり、今後証明して行くべき幾つかの新しい物理概念が提案されてきている。これがうまくゆけば、産業への応用ができる新しい材料を作り出す上での助けにもなるであろう。そのようなものとしては、低次元系の量子スピン励起やスピン-パイエルズ転移、スピン・ラダー・システム、高温超伝導体におけるスピンドYNAMIXと超伝導の関係、巨大磁気抵抗、モット金属絶縁体転移など、強相関電子系と呼ばれるものが該当する。このようなものはスピン、電荷、格子、あるいは電子の軌道モーメント相互作用の間の複雑な相関関係の上に成り立っており、なおかつ静的な現象ではなく、基本的に動的な性格のものである。そのような新しい現象の理解には、広いエネルギー・運動量空間に広がっている非常に弱い散乱の測定が不可欠である。これまでのように、平衡状態の中である特別な相互作用だけが現象を決めていたのとは対照的である。つまり、このような測定には、様々な分光器により偏極中性子を用いて広いエネルギー・運動量空間を測定する必要があり、それには統合計画中性子施設のような強力な中性子源が必要不可欠である。

アモルファス、ガラス、高分子あるいはフラクタルシステムといった複雑系に関しては、色々な意味での普遍的な性質があるのではないかと、様々な分野から注目を浴びている。このような複雑系は、単純に個々の原子や分子の動きからだけでは理解できず、従来とは違った意味での集団運動が重要な役割を担っているのではないかと考えられている。つまり、このような複雑な系を理解するためには、いわゆる「還元主義」的な手法だけではうまくゆかず、そのような集団運動を記述するための新しい概念が必要である。そのためには系の運動状態を、非常に広いエネルギー・運動量空間で理解する必要がある。例えばトンネリング現象のような低いエネルギーから、分子動力学あるいはもっとエネルギーの高い現象である原子の反跳現象のようなものまで広い時空相関にわたって広がっている静的・動的な相関を測定する必要がある。しかし、現在の中性子源の強度では、そのような測定は困難であることもあり、この分野の研究は余り進んでいない。統合計画中性子施設で可能になるような高中性子束があれば、このような測定が可能になる。また、この分野の研究には、運動量変化の小さい部分で大きなエネルギー変化を測定する、いわゆる「ブリルアン散乱領域」の測定が不可欠であるが、現在の中性子源では中性子束が低いため、中性子の運動力学的な制約を反映し、そのような測定は困難である。統合計画中性子施設では、このような領域まで測定可能になる。

水素は我々の身の回りで最もありふれた物の一つであり、生体高分子、高分子、誘電体、金属など、様々な物質の中で重要な役割を担っている。水素はそれを取り巻く様々な原子に取り囲まれて存在しており、その振る舞いはその化学的環境や、周りの原子の配置、対象性に大きく依存している。水素は非常に大きな中性子散乱断面積を持っており、かつ、同位体である重水素とは符号の異なった散乱長を持つため、水素を含む物質の研究には中性子は非常によい手段となっている。

e. 工業利用

20世紀の科学技術は人類の生活を著しく向上させたが、70年代頃からの公害問題を契機に環境問題に取り組む必要性が指摘され、改善に向けて様々な技術開発が行われた。とりわけ最近では地球規模の環境問題とあいまってエネルギー革命への期待が急速に増してきている。太陽光発電、二次電池を利用した蓄電プラントや ZEV（ゼロエミッション自動車）への期待が特に高く実用化研究が活発に行われている。このようなクリーンテクノロジーをささえる材料は、バイオテクノロジー関連の生物材料はもちろん、非生物材料においても、水素やリチウムなどの軽元素がその材料の機能の主役であるといえる。中性子は原子番号に依存しない散乱断面積を持つため、軽元素のプローブとして最も適したものであり、これらの材料開発に欠かせない。

中性子はその他の様々な分野の工業利用にも役立っている。結晶（磁気）構造解析がその基本であり、たとえば、電子、磁気デバイス、エネルギーデバイス、生体高分子、化学材料などの結晶構造に使われている。さらに、小角散乱や中性子反射法を用いて高分子、ゲル、多相の合金などの形態学的な構造の解析をする事が出来る。新材料は非平衡状態でしか得られなかったり、他の結晶の中に微量の相としてだけ存在したり、極端条件下でなければ合成できなかつたりするために、ごくわずかな量しか得られないことが多い。そのような物質の解析のためには強力中性子源が不可欠である。

最近発展してきた方法として残留応力解析の手法がある。これは、例えば原子炉の圧力容器、ジェットタービンエンジン、鉄道レール、あるいは構造材料のように大きな物の内部を細いビームで走査することにより、局所的な格子定数の分布から、残留応力の分布を調べる物で、クラックなどの前兆現象を見つけることが出来る。例えば、照射された原子炉の圧力容器の残留応力解析は

原子力工学の立場から大きな意味を持っている。同様な手段として中性子で透過写真を撮る中性子ラジオグラフィがある。このような目的のためには非常に平行性の良い中性子線が必要で、このためには強力中性子源が必要不可欠である。その他にも即発ガンマ線分析、中性子共鳴吸収などの手段を用いると微量分析が可能なることから環境物質の分析への適用が期待される。

2.2.3 中性子施設

a. 中性子施設の概要

ISIS (英) のような現在稼働中のパルス核破砕中性子源 (PSNS) の成功から類推すれば、現在のものより著しく高いピーク中性子束や時間平均中性子束が得られる、5MW の JSNS が一旦建設されれば、多くの科学や技術の分野でブレークスルーが生まれるのは確実である。技術的な観点からは、1 μ sec 以下の短いパルス幅を持つパルス状陽子ビームを供給する加速器システムは、10 年以内に実現することが保証されねばならない。中性子発生ターゲットに関しては、数年以内で設計製作を行おうとしているところであり、そのターゲットは高出力の陽子ビームに耐え、しかも、適正な効率で中性子を発生できるものである[1]。

図 2.8 は 5 MW への増力をした後の、中性子散乱実験室の配置概念図を示している[1,8,9]。水平陽子ビーム入射を採用し、入射側と反対側に保守設備を配置した。30 台以上の中性子スペクトロメータが設置され、ビームラインは熱外中性子、熱中性子、冷中性子にほぼ等しく分配される。ターゲット装置は完全に中性子ビーム実験室から分離され、放射線管理を独立にできるよう設計されている。

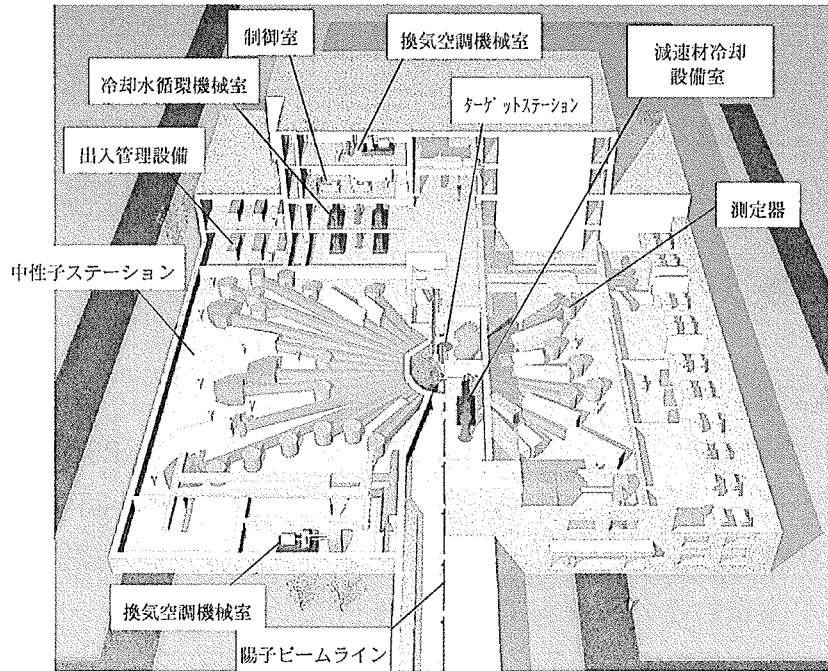


図 2.8 中性子散乱実験施設の概念図

b. 中性子強度とパルス構造

ターゲットと減速材と反射体の配置は 5MW の段階で、図 2.9 に示すように、技術的妥当性に加えて、明るさと鋭い時間構造を同時に持つ中性子ビームを取り出せるよう、最適化した。ターゲットは加速器の増力の一つの候補である 5 GeV シンクロトロンからの陽子ビームにも適合するよう設計されているが、中性子生成の空間分布のエネルギーによる変化は小さいので、ターゲットと減速材の配置は第一期の 3 GeV 陽子ビームに対しても問題なく使用できる。

減速材については、新たに提案した高強度・高分解能の冷中性子を供給する、2つの等価な最大拡張型前置減速材付き超臨界水素減速材と、それぞれ一つの高分解能熱中性子

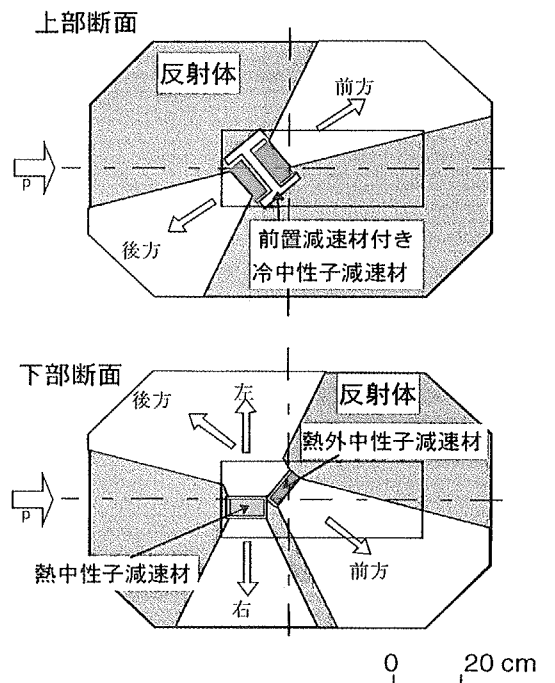


図 2.9 減速材の配置

用非結合型水素減速材および高分解能熱外中性子用非結合型室温軽水減速材を採用した。全ての減速材が最大の中性子輝度を持つ非常に狭い場所に設置されるような配置をとることで、全ての減速材が同時に最大強度の中性子を供給できることになる。このとき、隣り合う減速材の間での干渉がないことは計算で確認されている。

5MW の冷中性子の場合には、平均中性子束強度は、図 2.10 に示すように ILL (仏) に比べ同程度か、若しくはより優れている。さらにピーク中性子束では、JRR-3M 研究炉より千倍、また世界最大の ILL や ISIS (英) の百倍に達する。

c. 中性子源 R & D

第 1 段階として、最大 2MW まで耐えるターゲットと液体水素を用いた冷減速材の概念設計が行われた。図 2.11 は原研が提案し、現在、概念検討中のクロスフロー型の水銀ターゲットを示す。また、図 2.12 はバックアップとして検討している重水冷却の固体ターゲットの概念を示しており、ISIS のターゲットに比べ、熱伝達が微小突起で促進されるよう改善したものである。

ターゲットシステムの技術課題は 5MW を目指した設計作業の中から抽出され、次のグループに分けられている。すなわち、(1) 熱衝撃/圧力波に対する構造健全性、および材料強度の照射劣化等、(2) 容器から周囲への水銀または冷却材の漏洩のような異常事象を避けるための安全性能、(3) 遠隔操作装置を用いて保守ができることを保証すること、である。

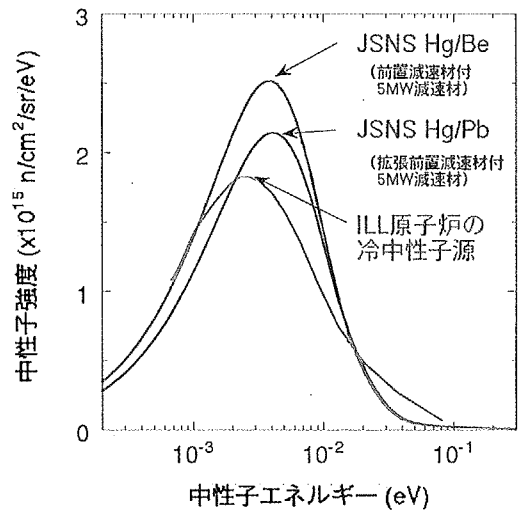


図 2.10 5MW での時間平均冷中性子強度の比較

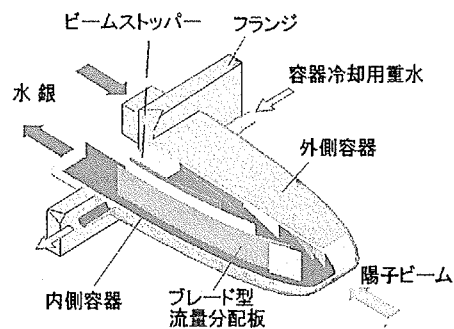


図 2.11 クロスフロー型水銀ターゲットの概念

これらの課題を解決するため、熱流動や構造強度等の設計解析に加え、次のような装置による R&D が行われている。これらは、(1) パルスレーザー装置による熱衝撃試験装置、(2) 圧力波を模擬した衝撃試験装置、(3) 限界熱流束、微小突起による熱伝達促進および容器内流速分布を調べる水ループ装置、(4) 15リットル/分までの最大流量で異常時のシステム安全性を調べる水銀ループ等である。さらに、ブルックヘブン国立研究所の AGS 施設を用いた水銀ターゲット模擬実験、すなわち、核破碎ターゲット実験 (ASTE) 国際協力と、ポールシェラー研究所の SINQ を用いた材料の陽子ビーム照射実験が将来のターゲット開発に向けて進行している。これらの R & D 活動から、現在の水銀と固体のターゲットの概念が 1MW まで、さらには 2MW まで適用できるものと期待されている。しかしながら、5MW 運転に対しては、さらなる R&D 努力に委ねられる。

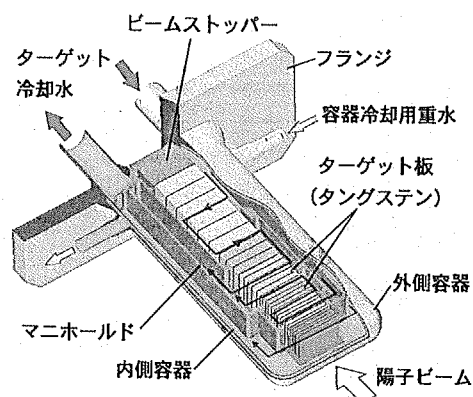


図 2.12 熱伝達促進を取り入れた固体ターゲット概念

d. スペクトロメータ設計の指針

パルス中性子法では、当然、低いバックグラウンドで高い計数率を持つ、高分解能で広いエネルギー運動量空間範囲が求められる。従って、大強度のパルス中性子源 (PSNS) でのスペクトロメータは以下の特徴を最大にするよう設計すべきである。

運動量エネルギー空間での十分良い分解能は、装置の重要な要因であるが、それを達成するためには強度が大幅に犠牲になる。MW 級の施設は、適正な強度で高分解能を十分に実現できる。放射光散乱に匹敵するか、それ以上の分解能の装置を設計できるであろう。

広い Q- ω レンジは、大立体角検出器を用いるパルス中性子散乱の特徴であるが、量子揺らぎや短距離相関からの広く分布した弱い信号を観測するには欠かせないものでもある。MW級中性子源はここでも、中性子の運動学的制約から非常に難しい、適正な分解能での高いエネルギーの中性子を用いたブリルアン散乱領域の研究を行うには不可欠である。

微小体系の観測は、最初に創られるのは微量でしかないような新物質の第1段階での研究だけでなく、クラックの周囲の応力や希釈溶液のような本質的に微小な系の研究にまで拡張を可能にする。

非常に短い実験時間は、極限環境の開発と同様、物理的变化や化学反応の動力学研究（実時間スペクトロスコピー）を可能にし、温度、圧力、濃度、磁場、電場等の関数として系統的な研究を可能にする。

高い信号対雑音比は、パルス中性子源の当然の結果である。

e. 利用者支援

中性子施設は、国外利用者を含め外部に十分に開放され、そこでは多数の科学者が短期に滞在し多岐にわたる研究を行う。従って、実効的かつ実際的な方法で施設を設計するためには、中性子源というハードウェアだけでなく、実験課題の選択法、大学との装置開発や研究交流、旅費支援、利用者教育、さらには、試料準備から周辺機器整備、データ解析にわたり、成果を得るために必要な支援を行うための人的資源等を考慮すべきと考えている。利用者への実験支援は、日本では今のところ貧弱である。実験支援体制の充実の本計画を成功させるためにハードウェアと同等の重要性を持つものであるから、綿密かつ大胆な体制づくりが必要である。

参考文献

- [1] N. Watanabe, M. Teshigawara, H. Takada, H. Nakashima, Y. Oyama, T. Nagao, T. Kai, Y. Ikeda and K. Kosako, "A Conceptual Design Study of Target-Moderator-Reflector System for JAERI 5MW Spallation Source", Proc. 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source (ICANS-XVII), June 14-19, 1998, Illinois, USA (1998).
- [2] M. Furusaka and H. Ikeda, "Overview of the Spallation Neutron-Source Project at JHF", Proc. 2nd Int. Topical Meeting on Nuclear Application of Accelerator Technology, Sept. 20-23, 1998, Gatlinburg Tennessee, USA (1998) 345.
- [3] N. Watanabe, M. Teshigawra, H. Takada, H. Nakashima, Y. Oyama, T. Nagao, T. Kai, K. Kosako, R. Hino, S. Ishikura and T. Aso., "JAERI 5MW Spallation Source Project", Proc. 2nd Int. Topical Meeting on Nuclear Application of Accelerator Technology, Sept. 20-23, 1998, Gatlinburg Tennessee, USA (1998).

- [4] Ed. H. Ikeda and M. Furusaka, "Proceedings of the International Workshop on Science in Neutron-Arena of JHP", (March 26-27, 1996, KEK, Tsukuba).
- [5] Ed. M. Furusaka and Y. Endoh, "*Science in Neutron-Arena of JHP*", KEK Report 95-19 (1996) (In Japanese).
- [6] Ed. Y. Yamada et al. "Next Generation Neutron Scattering at Neutron Science Center Project in JAERI", *JAERI-Review 96-0-19 (1996)*, (in Japanese).
- [7] Report of "*OECD Megascience Forum*", (20 August 1997, University of Toronto).
- [8] Y. Oyama, R. Hino, N. Watanabe, M. Mizumoto and T. Mukaiyama, "Status of Neutron Scattering Facility in JAERI Neutron Science Project", *Proc. 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source (ICANS-XVII)*, June 14-19, 1998, Illinois, USA (1998).
- [9] R. Hino, M. Kaminaga, T. Aso, H. Kogawa, S. Ishikura, A. Susuki, A. Terada, H. Kinoshita and K. Haga, "Spallation Target Development at JAERI", *Proc. 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source (ICANS-XVII)*, June 14-19, 1998, Illinois, USA (1998).

2.3 ミュオン科学

2.3.1 はじめに

ミュオン科学で建設される実験施設では、JHF/NSP統合計画における3GeV/333 μ A陽子ビームを用いて、大強度のパルス状ミュオンや他の素粒子が生み出され、主としてこのパルス状ミュオンを用いて以下に述べるような様々な分野での学際科学研究が行われる。

- 1) 精密測定による素粒子ミュオンの諸性質の解明や、稀崩壊現象を探索するミュオン基礎物理。
- 2) ミュオン触媒核融合とその新エネルギー源利用としての展開。
- 3) 敏感な微視的磁気プローブとしてのミュオンを用いた様々な新物質における物性研究。
- 4) 生命科学・医学への実用化が期待されるミュオンを用いた非破壊元素分析。

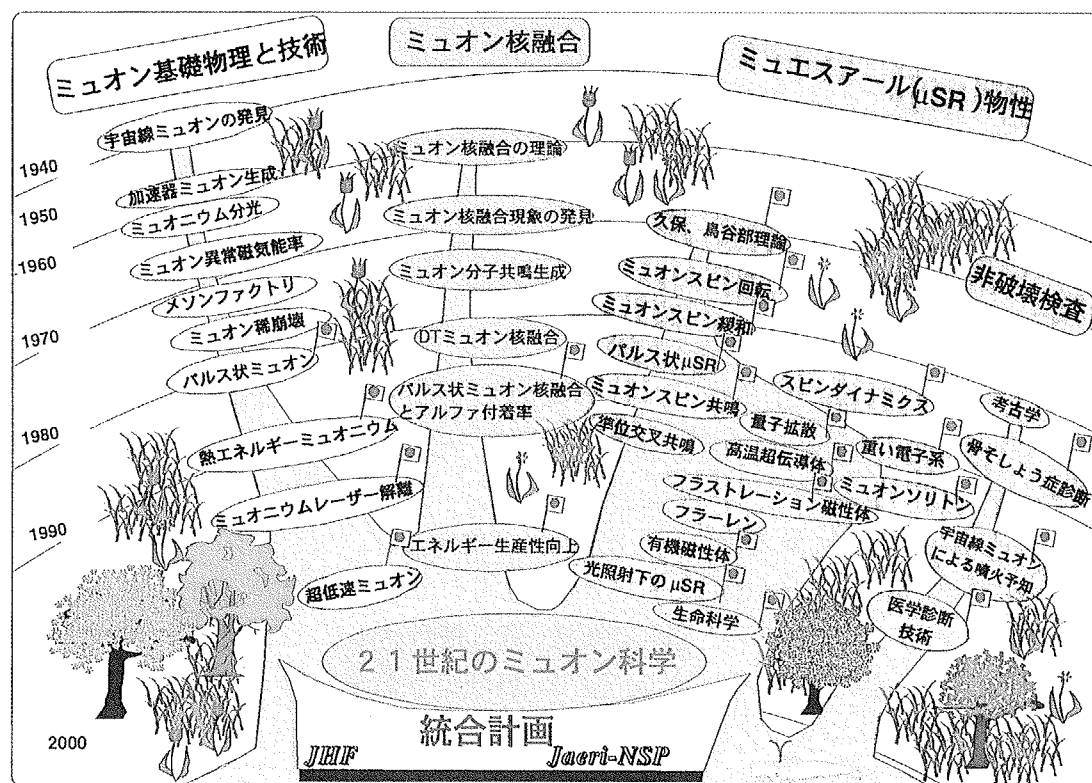


図 2.13 ミュオン科学研究の歴史的発展の経緯。日本のグループの先導的な仕事が強調されている。

ミュオン科学研究の歴史的発展の経緯は図 2.13 に要約され、この中では日本のグループの先導的な仕事が強調されている。来たる 21 世紀には、統合計画で世界最高強度のミュオンビームを得ることにより、これらのすべての研究領域において大きな進展が期待される。

2.3.2 構築される施設

ミュオン科学で建設される実験施設は 3GeV 陽子ビームによりパルス状ミュオンを生成することを主な目的としている。強度のみでなくその性質においても最高のビームを生成するための先端的なビームチャンネルの設計が現在進んでいる。ミュオン科学施設は、短寿命核施設と中性子科学施設の間に位置し、中性子源に向かう陽子ビームライン上に串刺し状に 10-20mm 厚の 2 種類のパイオン生成標的が設置される。現在提案されているレイアウトを図 2.14 に示す。また 2 次ライン設計の主要な部分は以下のように要約される。

i) keV 超低速正ミュオンビーム

高温に熱したタングステン箔から真空中に蒸発してくるミュオニウムをパルス状レーザーを用いて共鳴イオン化することによって超低速 μ^+ ビームが得られる。毎秒 $10^4 \mu^+$ 個の大強度の keV ミュオンや、更に低速の正ミュオン源への道が開かれている。

ii) 4MeV 表面正ミュオンビーム

一次陽子ライン上に設置された標的内で発生した正パイオンが標的中で崩壊して正ミュオンが生成される。このうち最大 4MeV のエネルギーを持ち、標的表面近傍から飛び出してくるミュオンが表面ミュオンである。ビーム時間構造に合わせた正確なパルス形状のキッカー電磁石により、毎秒 $10^7 \mu^+$ 個の強度の 1 バンチのビームが同時に別々の実験エリアへ分配される。従来、物性研究のためには表面ミュオンビームが用いられてきた。

iii) 10-100MeV 崩壊ミュオン正・負ビーム

一次陽子ライン上に設置された標的中で生まれたパイオンを取り込み、長い超伝導ソレノイド中に閉じこめながら飛行させ、ミュオンに崩壊させる。毎秒 $10^7 \mu^\pm$ 個の崩壊ミュオン (μ^\pm) が供給される。キッカー電磁石により単一バンチのビームパルスの取りだしが可能になる。

iv) 超高強度正・負ビーム

ミュオン基礎物理や、いくつかの応用物理実験においては毎秒 $10^{10} \mu^\pm$ 個もの超高強度のミュオンビームを必要とする。それに対応するために空間・運動量両方に大きなとりこみ立体角 (アクセプタンス) をもつビームチャンネル

の設計が進行している。高磁場の超伝導パイオン捕獲系がパイ中間子生成標的に隣接して設置され、超伝導ソレノイドを用いた崩壊ミュオンチャンネルが接続される。予算的に一次計画として実現されることは容易ではないが、そのような大型の超伝導磁石システムの構築によりミュオン科学に更なる発展がもたら

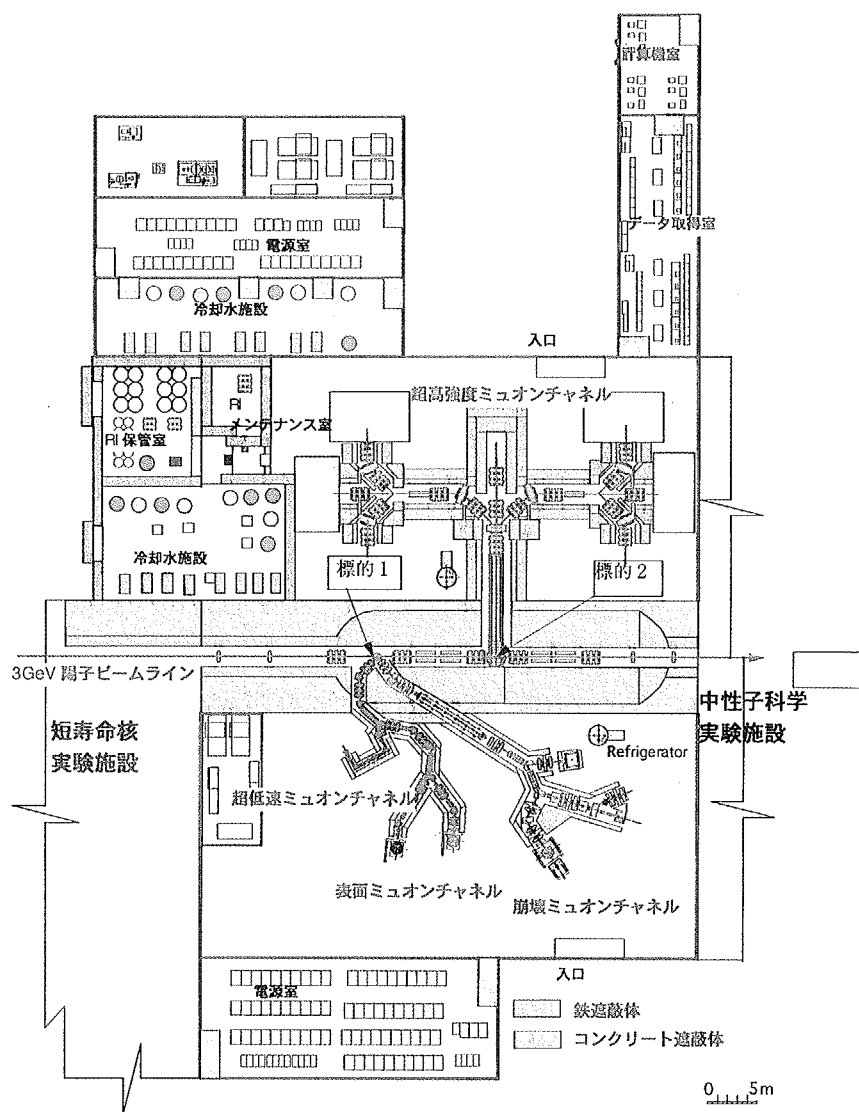


図 2.14 ミュオン科学実験施設の概観図

されるであろう。

2.3.3 凝集系研究のためのミュオンスピン探針

物質中に注入されたミュオンは微視的な内部磁場の鋭敏なプローブ（探針）として振る舞う。表面ミュオンや後方崩壊の μ^+/μ^- ビームでは 100%のスピンの偏極が、また超低速ミュオンについては 50%の偏極が得られる。ミュオン崩壊

に伴う電子/陽電子の非対称性の時間発展を観測することにより、局所磁場とその揺らぎを研究することができるが、これは μ SRとして知られている。1ボーア磁子の常磁性スピンの揺らぎを観測する典型的な時間スケールは 10^{-9} ~ 10^{-5} s であるが、これは中性子散乱 ($<10^{-9}$ s) と NMR ($>10^{-5}$ s) の間にある。このユニークな時間スケールと微視的プローブであるというミュオンの性質により、 μ SRは磁性[1]、高温超伝導[2]、臨界現象における揺らぎ等、様々な研究分野に応用されてきた。

加えて、物質中においてはミュオン自身がユニークでかつエキゾチックな存在であり、新しい現象を作り出している。正ミュオン及びミュオニウム（水素原子の陽子をミュオンで置き換えたもの）は質量が1/9と軽い陽子・水素原子の同位体として振る舞い、一方負ミュオンは電子の200倍の質量を持った重い電子として振る舞う。

物質中での正ミュオンの振る舞いはそれ自身で興味深い研究対象である。金属、半導体、絶縁体といった結晶中でのミュオン・ミュオニウムの量子拡散は一つの典型的な例である。そこでは粒子は量子トンネル効果により結晶中の占有位置間を移動していく。量子拡散の最も特筆すべき側面は、温度の低下とともに拡散が高速になるという形で現れるが、これは熱拡散と対照的である。この現象ははじめ金属中の正ミュオンについて観測され、最近ではイオン結晶中のミュオニウムでも観測された[3]。一般的に固体結晶中に置かれた原子は元の結晶格子と強く相互作用するために格子を歪ませたポーラロン状態という原子—格子の複合状態（金属中では更に電子の衣を被っている）を形成し、原子は動きにくくなる。しかしながら、そのようなポーラロン状態も有限なトンネル確率を持つために、原子のジャンプ確率（拡散率に比例）は温度の負のべき乗に比例することが予想され、それが実際に様々なホスト結晶中のミュオニウムについて実験的に観測されている[4]。

物質中の μ^+ によって引き起こされるいくつかの化学的な現象に目を転ずると、導電性高分子の μ SRによる研究により、ミュオンがホストの高分子に付着した後、それによって生成された常磁性電子の分子上の並進運動をミュオンが敏感に捕らえる事が明らかになった[5]。最近では、チトクロームCやミオグロビンといった蛋白質中の高速な電子伝達が μ SRにより初めて研究された。異なる温度での測定により、分子鎖にそった電子の高速な運動が温度によらないのに対し、鎖間の拡散においてはおそらく構造転移に起因すると考えられる大きな変化を示す事が明らかになった[6]。

2.3.4 超低速 μ^+ ビーム源とその応用

ミュオン科学施設で得られる高強度低速ビームの有利な側面と、超低速ビ

ームの侵入深さが非常に浅いという特徴の組み合わせにより、いろいろな種類の新しい実験が可能になる。超低速ミュオンは物質の表面・表面近傍に停止させることができ、さらには低いエミッタンス（ビームの拡がり小さく、エネルギー揃った）の故に加速したときに単色性に優れたミュオンビームが得られる[7]。従って、分子ビームエピタキシー法（MBE法）で人工格子の薄膜を成長させながら、またイオン銃で様々な原子のイオンを打ち込みながら、ミュオンをプローブとして用いることにより、多機能物質の開発などに寄与する事が可能となると期待される。また、高強度の超低速ミュオンビームにより金属表面の触媒反応といった表面上の水素の反応をシミュレートする事ができるようになると期待される。

超低速ミュオンは、基礎物理、素粒子物理並びに核物理にも多大な貢献をすることが期待されている。大強度の keV 正ミュオンから変換された大強度の熱ミュオニウムは、精密な QED の検証を行うには最も純粋で適した系である。さらに、それはミュオニウムから反ミュオニウムへの変換現象の探索にも用いられる。また低速ミュオンを GeV のエネルギーに加速してミュオン-原子核の弾性散乱実験に使おうという計画や、更に TeV にまで加速して $\mu^+\mu^-$ の衝突実験に使おうという提案がなされている。これらの様々な研究の可能性は、統合計画においてより精力的に追求されるであろう。

2.3.5 ミュオン触媒核融合とミュオン原子

負の電荷をもつミュオンは、物質中であたかも“重い電子”の様に振る舞う。その負のミュオンを重水素と三重水素を一様に混ぜた中に入射すると、2つの原子核を引きつけて、 $d\mu$ というミュオン分子を形成する。電子の代わりにミュオンが原子核を結合しているミュオン分子中では、電子の約 200 倍というミュオンの重さのため、その2つの原子核の距離は、通常の分子に比べてはるかに小さくなる。そこで、容易に核融合が起こる。いったん核融合反応が起こるとミュオンは自由となり、再びミュオン分子を形成、核融合反応を繰り返していく。ミュオンは、核融合反応の“触媒”としての役目を果たし、その 100 万分の 2.2 秒という短い寿命の間に 100 回以上の核融合反応を起こすことが知られている[8]。

パルス状ミュオンビームを用いたミュオン触媒核融合の研究には2つの大きな特徴がある。第1に、三重水素の崩壊による膨大なバックグラウンドノイズの中から、微弱な信号を拾い出すことができる点である。KEK 中間子科学研究施設(KEK-MSL)ではパルス状ミュオンを用いてミュオンが α 粒子に付着したときの X 線の観測に成功した[9]。これは、高密度で、しかも三重水素の混合比が高い重水素・三重水素系での最初の例である。

第2に、ビームパルスに同期して外的な摂動をパルス的に与え、標的の重水素・三重水素の状態を容易に制御できることである。

統合計画のミュオン科学実験施設で活用できる非常に高い強度のミュオンビームにより、様々な画期的な研究に取り組むことが可能となり、エネルギー生産への“ブレークイーブン”（ミュオン粒子を生成させるのに必要なエネルギー以上のエネルギーを核融合反応より得ること；1つのミュオン粒子で300回以上の核融合反応が起これば良いとされている）の実現も遠い夢ではない。ミュオンが α 粒子に付着する確率をいかに減らすか、付着してもミュオンをいかに効率よく α 粒子から分離させるかが、鍵となる。

安定原子核の電磁気的な性質は、以前よりミュオン原子を用いて研究されてきた。しかし、短寿命の原子核に関しては、その電荷分布さえもわかっていない。このような新しい分野の研究は、大強度の負ミュオンビームと統合計画の短寿命核実験施設で得られる不安定核のビームを組み合わせることににより、初めて実現できるものである。

大強度の負ミュオンビームは、ミュオンによる非破壊分析といったミュオン原子の応用分野などにも大きな可能性をもたらす。ミュオン原子の特性X線を測定することにより、物質中に含まれる微量元素を定量できる。すでに、骨のなかのカルシウムの量を測定することにより、骨粗鬆症の診断に応用しようとする試みがなされてきた。統合計画の実現によりこの手法の実用化が期待されている。

参考文献

- [1] Y.J. Uemura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 45, 583 (1980).
- [2] See, for example, N. Nishida *et al.*, J. J. Appl. Phys. 26, L799 (1987): More recent activities are reported in the Proc. 7th Int. Conf. Muon Spin Rotation, Relaxation, & Resonance, Nikko, 1996 (Hyperfine Interactions 104-106, 1997).
- [3] For a recent review, see, for example, R. Kadono, Appl. Magn. Reson. 13, 37 (1997).
- [4] R. Kadono *et al.*, Phys. Rev. Lett. 73, 2724 (1994).
- [5] K. Nagamine, K. Ishida, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 55, 2209 (1984)
- [6] K. Nagamine *et al.*, RIKEN Review 20, 51(1999)
- [7] K. Nagamine, Y. Miyake, K. Shimomura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 74, 4811 (1995)
- [8] See, for example, C. Petitjean, Nuclear Physics A543, 79c (1992).

[9] K. Nagamine T. Matsuzaki, K. Ishida, Muon Catalyzed Fusion 5/6, 289 (1990/91).

2.4 エキゾチック核ビームによる科学

2.4.1 はじめに

この章では、ISOL（オンライン質量分析装置）による再加速方式を採用したエキゾチックな短寿命核ビーム利用実験施設計画について解説する。この方式によって、短寿命な不安定核種をゼロエネルギーから核子当り 9 MeV にまで加速した高品質・高強度ビームとして利用できる。施設の目的は、原子核物理、核化学、 β -崩壊を利用した基礎科学、天体核物理学および短寿命核ビーム(RNB)を利用する学際的な科学領域において新しい研究分野を切り開くことにある。

3 GeV PS からのビームライン上にある施設の平面図を図 2.15 に示した。3 GeV 陽子ビームと適当な標的との間の核破碎反応、多重破碎反応あるいは核分裂反応により生成された様々なエキゾチック原子核は、ISOL によって質量分離され、数種類の重イオン線型加速器によって再加速される。加速器は、分割同軸型 RFQ(SCRFQ)線型加速器, 2 台のインターデジタル-H型線型加速器(IH1 と IH2)[1]、さらに超伝導(SC)線型加速器[2]からなっている。本計画は、高エネルギー加速器研究機構田無分室において今までに達成されてきた様々な技術的開発を基礎にしている。実際、ISOL や SCRFQ, IH1 線型加速器は、開拓研究として建設されすでに稼働している。また、SC 線型加速器についても日本原子力研究所東海研究所において現在稼働中であり、これらの装置は本施設が完成した時点で移設する予定である。したがって、新たに建設すべき主な装置は IH2 線型加速器だけである。

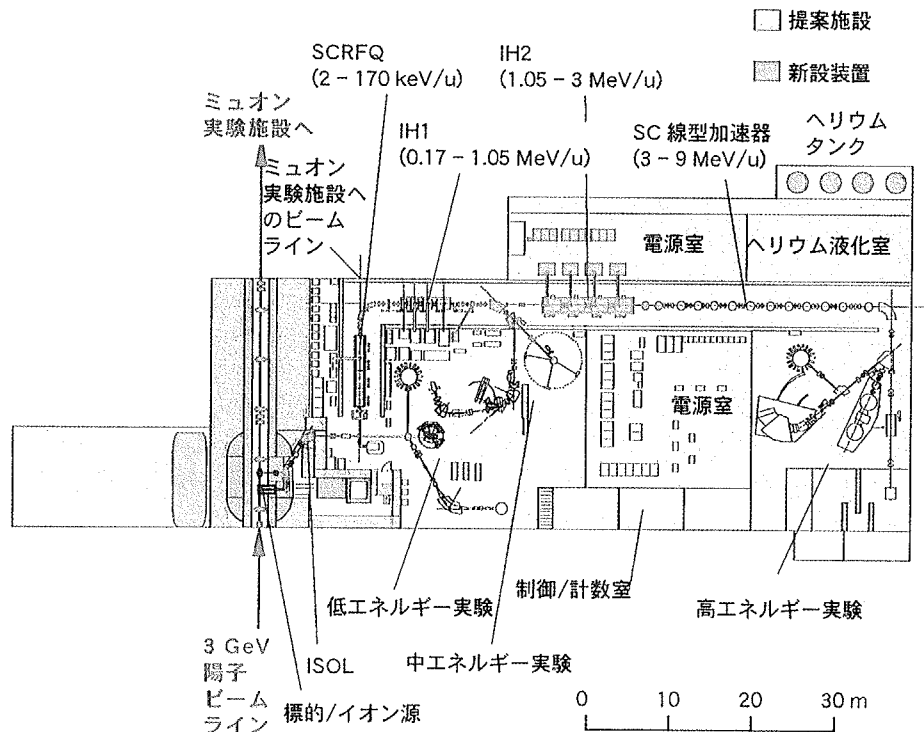


図 2.15 エキゾチック核ビーム施設の概念図

この施設の主な仕様を表 2-3 にまとめた。IH1、IH2、SC 線型加速器の加速エネ

ルギーは可変になっており、核子当り 0.17 MeV から 9 MeV までの任意のエネルギーを選択出来る。また、パルス偏向電磁石を使って ISOL および加速器からのビームを同時に異なる実験装置へ供給し、施設の利用効率を高めることが出来る。

この施設では、あらゆる種類の標的核と短寿命核ビームとの原子核反応が可能となるので、超重元素探索や天体核物理における R-過程核の研究、短寿命核による天体核反応率の直接測定などの、エキゾチック核が関与する核反応機構や核分光を行ううえで強力な手段を提供する。さらに、ミュオン施設や核破碎中性子源施設との結合によって、エキゾチックなミュオニック原子や不安定核による中性子捕獲反応の研究が世界で初めて可能となる。

表 2-3 施設の主な仕様

| | | |
|----------|-----------------|--|
| 一次ビーム | エネルギー、強度 | 3 GeV, 333 μ A(最大) |
| 生成標的 | ビームロス | 5 kW 以下 |
| ISOL | 質量分解能 | 9000 |
| | SCRFQ への入射エネルギー | 2 keV/核子 |
| SCRFQ | 周波数、加速エネルギー | 26 MHz, 134-172 keV/核子 (質量/電荷 \leq 30) |
| IH1 | 周波数、加速エネルギー | 52 MHz, 0.17-1.05 MeV/核子 (質量/電荷 \leq 10) |
| IH2 | 周波数、加速エネルギー | 104 MHz, 1.05-3 MeV/核子 (質量/電荷 \leq 7) |
| SC 線型加速器 | 周波数、加速エネルギー | 130 MHz, 3-9 MeV/核子 (質量/電荷 \leq 4) |

2.4.2 代表的な研究課題

a. 中性子過剰核による核反応機構の研究

弱く束縛された中性子を持つ中性子過剰核が標的核に近づくと、フェルミ表面の中性子は標的原子核の方へ容易に移動可能となる。この現象は、衝突しつつある二つの原子核間での「中性子の流れ」のきっかけになると考えられている。「流れ」はビームと標的の原子核との間に漏斗状のつながり（ネック）を形成するので、核反応障壁近傍での融合反応の増加を惹き起こすであろう[3]。本施設では、この新しい核反応機構の存在を本格的に調べられる。核反応障壁近傍での融合反応の増大は、中性子過剰核による超重元素生成においても極めて重要な研究課題である。

b. 超重元素の研究

現在知られている最大の原子番号は $Z=112$ 番で、理論的に予言された陽子の魔法数 $Z=114$ 番に近づいている[4]。しかし図 2.16 に示すように予言されている中性子の新しい魔法数 $N=184$ からみると既知の原子核が持つ最大中性子数は $N=165$ であり、未だ約 20 ほど中性子数が足りない状態にある。中性子過剰核ビームの使用によって初めてこの状況を打開できる。ここで、複合核における中性子数の増加による融合核の生き残り確率の増大、核反応障壁近傍での融合反応断面積の増大の可能性が重

要である。これらの寄与により、安定核ビームと比べてビーム強度の弱い短寿命核ビームを用いることによる実験の困難が克服されるであろう[5]。用いる反応系の候補としては、 $^{238}\text{U}(^{60}\text{Cr}, 2n)^{296}116$ が考えられる。 ^{60}Cr ビームの期待される強度は加速効率を5%として 10^8 個/秒以上である。

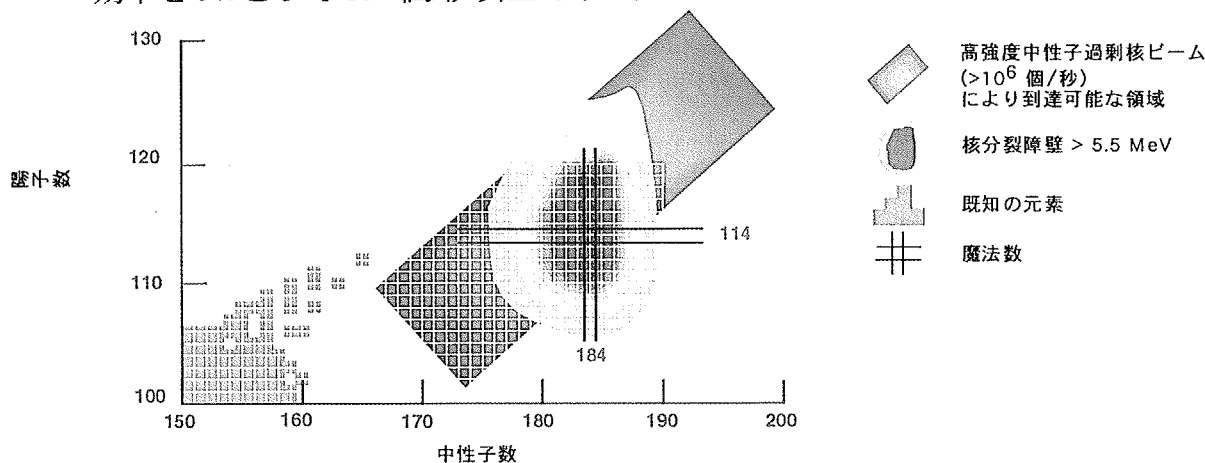


図 2.16 既知の重元素および超重元素の予言領域を示す核図表

c. 不安定核のミュオニック原子

ミュオニック X-線分光は、X-線の転移エネルギーが原子核の大きさによって大きく変化することから、核の荷電半径測定の強力な手段となっている。物質中に打ち込まれた負ミュオンは大きな原子番号の原子に捕獲されやすい性質がある。したがって同一の固体重水素膜中にミュオンビームと短寿命核ビームを止めれば、放射性ミュオン原子が形成される。ミュオン触媒核融合実験に用いられている固体重水素フィルムを使って、そこで生成されたミュオニック重水素を減速させて上記の条件を達成する計画である [6]。 10^{10} 個/秒のミュオンビームを仮定すると、二重閉殻核の ^{56}Ni , ^{132}Sn のミュオニック原子をそれぞれ 10^8 個/秒, 10^2 個/秒生成できる。

d. 天体核物理学

高温の星における不安定核の水素-及びヘリウムによる燃焼は、軽い元素の合成過程を理解するうえで重要である。本実験施設では、 $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$, $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)$, $^{19}\text{Ne}(p, \gamma)$ 等の上記の燃焼過程に関係する星の中での反応率を直接測定することが、出来る。また、ほとんど知られていない中性子過剰核の基本的な性質、すなわちその寿命や質量、崩壊様式などの性質は、中重元素や重い元素を生成する R-過程が起こる星の条件を探るうえで基本的に重要な情報である。これらの性質は、RNB それ自身の分光学的研究や、RNB を用いた核反応による研究、たとえば、 $^{81}\text{Ga}(d, ^3\text{He})^{80}\text{Zn}$ 反応による ^{80}Zn の質量決定などを通じて明らかに出来る。 ^{80}Zn の質量決定の場合、この施設では、 ^{81}Ga ビームの強度は 10^{5-6} 個/秒と期待できるので、上記の反応が起こる率は、40-400 イベント/時間である。

e. 重元素に対する迅速分離による化学

超アクチノイド元素では、周期律表上の軽い同族元素から推定した周期的な化学的性質が、元素が束縛する軌道電子の相対論的效果によって大きくずれることが予測されている。実際に 104 番元素よりさらに重い元素での相対論的效果を調べるためには、それらの化学的挙動を同族の軽い元素のそれと詳細に比較するとともに相対論的分子軌道計算との比較を行うことになる。中性子過剰な RNB により生成した超アクチノイド元素の迅速分離 (Atom-at-a-time) による化学が必要である。ここでは、化学反応が迅速に平衡状態に達し、得られた化学的挙動を少数原子に対しても統計的に扱えるような化学的分離法が用いられる。気体あるいは液体によるクロマトグラフィー法によってこのような化学が開ける。

f. 物質科学

物質内部の磁場や電場勾配、打ち込み場所、結晶中での格子欠陥や不純物の振る舞いなどの性質を調べるうえで、物質中に打ち込まれた放射性のイオンは、高感度のプローブとなる。これらの性質は、摂動角相関 (PAC)、 β -核磁気共鳴法 (NMR)、メスバウアー分光、放出粒子のブロッキング、熱拡散等の様々な手段によって測定出来る。RNB を使うことによって、実験の条件に最適な、極めて高純度な元素の選択と、崩壊様式、寿命、打ち込みエネルギーやビーム強度の選択が可能となる。たとえば、図 2.17 に示すように打ち込みエネルギーを自由に変えることで、任意の打ち込み深さの設定が可能である。

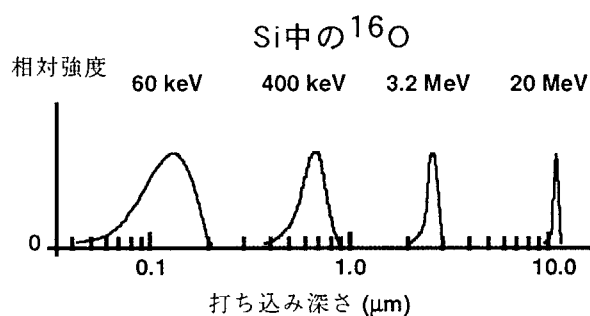


図 2.17 可変エネルギーによるシリコンへの酸素の打ち込み像の計算結果。参考文献 [7]。

参考文献

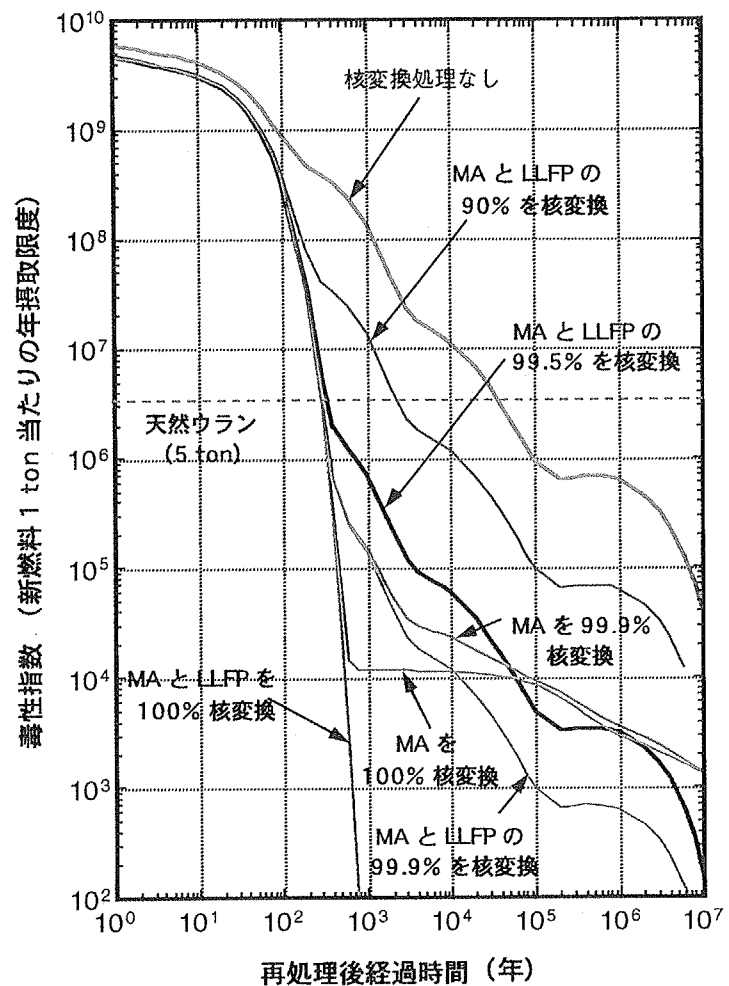
- [1] S. Arai et al., Nucl. Instr. Meth. **B70** (1992) 414.
- [2] S. Takeuchi et al., Nucl. Instr. Meth. **A287** (1990) 257.
- [3] P.H. Stelson, Phys. Lett. **B205** (1988) 190.
- [4] 最近、 ^{48}Ca 等の中性子数の比較的多い安定核ビームの使用により、 $^{289}114$ 及び $^{293}118$ 核の発見が報告された。しかしこれらの核においてもなお、中性子数は魔法数より約 10 個小さい。
- [5] T. Nomura, Proc. of Tours Symp. on Nuclear Physics III, eds. M. Arnould et al. (1998 The American Institute of Physics) p. 29.
- [6] P. Strasser et al., Phys. Lett., B368 (1996) 32 and private communication.
- [7] H. Haas, Proc. of the 18th INS Int. Conf. On Physics with High-Intensity Hadron Accelerators, eds. S. Kubono and T. Nomura (World Scientific, Singapore, 1991) p.133.

2.5 核変換技術

2.5.1 はじめに

原子力利用における重要な課題の一つは高レベル放射性廃棄物（HLW）の処理処分の問題である。この問題に対処するわが国の基本方針は、他の原子力利用主要国と同様に、地層処分である。地層処分では HLW を安定な形態に固化した後、冷却のため 30 - 50 年間貯蔵し、最終的に地下数百 m の安定な深地層中に埋設する。これは人工及び天然のバリエーにより HLW を隔離して、放射性物質の生物圏への回帰を避ける技術である。HLW には半減期の非常に長い核種が含まれているために、このような慎重な管理が必要になる。これに対して、HLW を分別し、半減期の特に長い核種を核反応により短半減期や安定核種に変換する分離変換（群分離・消滅処理）技術に関する基礎的な研究開発が行われている。原子力委員会が「群分離・消滅処理技術開発長期計画（オメガ計画）」を策定（1988 年）し、さらに、わが国の提案により経済協力開発機構 / 原子力機関（OECD/NEA）のもとで「分離変換技術に関する情報交換プログラム」が発足した（1989 年）ことが一つの契機となって、分離変換技術に関する関心が各国において高まった。

現在、オメガ計画は日本原子力研究所、核燃料サイクル開発機構及び電力中央研究所が協力して進めている。オメガ計画のフェイズ 1 では、種々の概念を評価し、必要な技術を開発す



LLFP: 半減期が 30 年以上の核分裂生成物

使用済み燃料: 燃焼度 33 GWD/MT、3 年冷却
再処理: U、Pu の回収率 99.9%

図 2.18 分離変換による長半減期核種の放射性毒性の低減

するための基礎的な研究と試験を行い、フェイズ 2 では、技術の工学的試験や概念の実証を行うことになっている。現在、原子力委員会のもとで、オメガ計画のこれまでの成果と今後の進め方についての検討が 2000 年 3 月までの予定で行われている。

2.5.2 核変換システムの概念

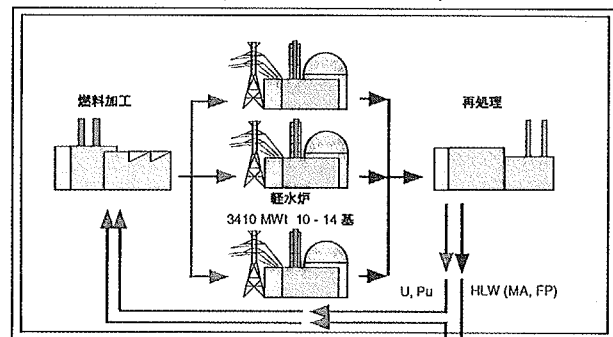
産業活動に伴う廃棄物に対して、「環境への有害物質の放出量の極少化」は社会的な要求であり、すでに産業として成熟し、さらに今後何世紀にも亘って基幹エネルギーとしての地位を期待される原子力もまた例外ではない。長寿命核種の分離変換技術により廃棄物処分場の有害物質のインベントリーを大幅に低減することができ、処分場の潜在的リスクの大幅な低減が図れる。

分離変換技術の目的は HLW 中の長寿命放射性核種のインベントリーを大幅に減少させることにより、超長期にわたる放射性リスクを軽減させることである。分離変換技術の効果を HLW の潜在放射性毒性を指標として図 2.18 に示す。同図は、軽水炉使用済み燃料を再処理して発生する HLW (燃料 1 トン当たり) の放射性毒性 (単位: 年摂取限度) の再処理後の経年変化を、分離変換をする場合としない場合について示している。3.5% 濃縮ウラン 1 トンを製造するためには天然ウランが 5 トン必要である。分離変換をしない場合には、HLW が原材料 (天然ウラン 5 トン) の毒性のレベルに崩壊するまでに約 4 万年が必要であるが、HLW に含まれる長寿命核種であるマイナアクチノイド (MA) と長寿命核分裂生成物 (LLFP) の 99.5% を分離変換することにより、この期間は約 300 年に短縮される。

MA は高速中性子による核分裂反応を利用して核変換することができる。テクネチウム 99 及びヨウ素 129 などの LLFP は熱中性子の捕獲反応を利用して安定核種に核変換することができる。

分離変換を含む燃料サイクルシナリオには 2 つの概念がある。一つは先進型燃料サイクル概念

第 1 階層燃料サイクル (商用発電炉燃料サイクル)



第 2 階層燃料サイクル (核変換燃料サイクル)

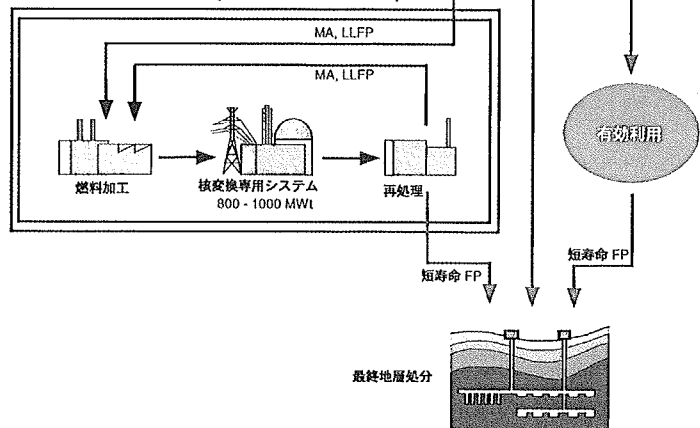


図 2.18 階層核燃料サイクルの概念

であり、発電用高速増殖炉を核変換に用いる。他の一つは原研が提案している階層核燃料サイクル概念 [1] であり、これは図 2.19 に示すように、発電炉用燃料サイクル (第 1 階層) とこれに付設した核変換燃料サイクル (第 2 階層) から構成される。

階層核燃料サイクルにおける核変換専用システムとして、原研は加速駆動未臨界システム (ADS) を提案し、研究開発を進めてきた。MA を主成分とする燃料の炉心では硬い中性子エネルギースペクトル、高中性子束を達成することができるので MA の核変換に効率的かつ効果的である。MA 燃料の臨界炉心では、冷却材ボイド反応度やドップラー反応度が悪化し、さらに遅発中性子割合が減少するなど安全性の問題が生じる。一方、未臨界炉心を用いる ADS では、これらの問題が緩和され、設計の自由度も増す。

核変換燃料サイクルでは HLW に含まれる長寿命核種のみを取り扱うので、発電炉燃料サイクルと比べてその規模は非常に小さい。このため効率的に核変換を行うことができる。発電炉用燃料サイクルで核変換を行う場合には、発電用高速増殖炉導入が前提となり、また中性子線量率と崩壊熱の高い MA 混合燃料を取り扱うために燃料サイクル全体に放射線遮蔽の強化が必要になり、経済性の問題が生ずる。

表 2-4 は階層核燃料サイクルと先進型核燃料サイクルで核変換を行う場合のそれぞれのシステムの特性を比較したものである。

表 2-4 階層核燃料サイクルと先進型核燃料サイクルの比較

| | 階層核燃料サイクル | 先進型核燃料サイクル |
|-----------|---|---|
| 特徴 | 商業炉燃料サイクルと核変換燃料サイクルは相互独立に進化可能な概念。商業炉燃料サイクルは、経済性、安全性、Pu 利用技術の最適化を追求。核変換燃料サイクルは、処分概念の単純化、処分技術の最適化を追求。 | 酸化物燃料高速炉 (MOX-FBR) が発電炉として開発されることが大前提。 |
| 核変換炉 | 加速器駆動専焼システム (ADS) <ul style="list-style-type: none"> ・核変換サイクルで MA を集中的に取り扱う ・核変換性能の向上：硬いスペクトル、MA 主成分窒化物燃料 ・すべての発電炉体系に適応可能 | 酸化物燃料高速炉 (MOX-FBR) <ul style="list-style-type: none"> ・発電用 FBR サイクルに MA を広く分散して処理 ・発電用 FBR 燃料に MA を 5% 混合して核変換 ・将来の発電炉体系は高速炉に限定 |
| MA の核変換特性 | MA の変換量 約 360 kg/GWt/y | MA の変換量約 50 kg/GWt/y |

2.5.3 加速器駆動システム

原研は加速器駆動核変換システムの概念設計研究を行なってきた [2]。現在のシステム設計では、熱出力約 800 MW の核変換システム 1 基で電気出力 1000 MW の大型軽水炉約 10 基から発生する MA の処理をサポートする。

原研の分離変換技術開発では、加速器駆動システムコードシステム ATRAS [3] の開発、窒化物燃料及び燃料サイクル技術の開発 [4]、HLW を 4 元素群に分離する群分離プロセスの開発 [5] を行っている。また、核データ [6, 7] 及び燃料物性データなどの分野でいくつかの基礎的研究プログラムを進めている。

現在、加速器駆動核変換システムは、鉛・ビスマス冷却オプションを第 1 候補としている。加速器駆動システムでは、鉛・ビスマスは冷却材と核破碎ターゲット物質の二つの役割を果たす。また、中性子エネルギースペクトルをより硬くできるとともに、正のボイド反応度係数を避けられる可能性がある。さらに、化学的に不活性であるため、冷却材漏洩時の安全性に対し、特に好ましい。鉛・ビスマス冷却材は、鉛冷却材と比べて、システム運転温度をかなり低くすることができ、材料の腐蝕等の問題が緩和される。

鉛・ビスマス冷却加速器駆動炉システムの設計は、現在の液体金属冷却高速増殖炉及び旧ソ連の原子力潜水艦用鉛・ビスマス冷却炉の技術に基づいている。

燃料には窒化物を用い、核変換燃料サイクルに高温化学処理を採用している。窒化物燃料は金属なみの高い熱伝導度と酸化物なみ

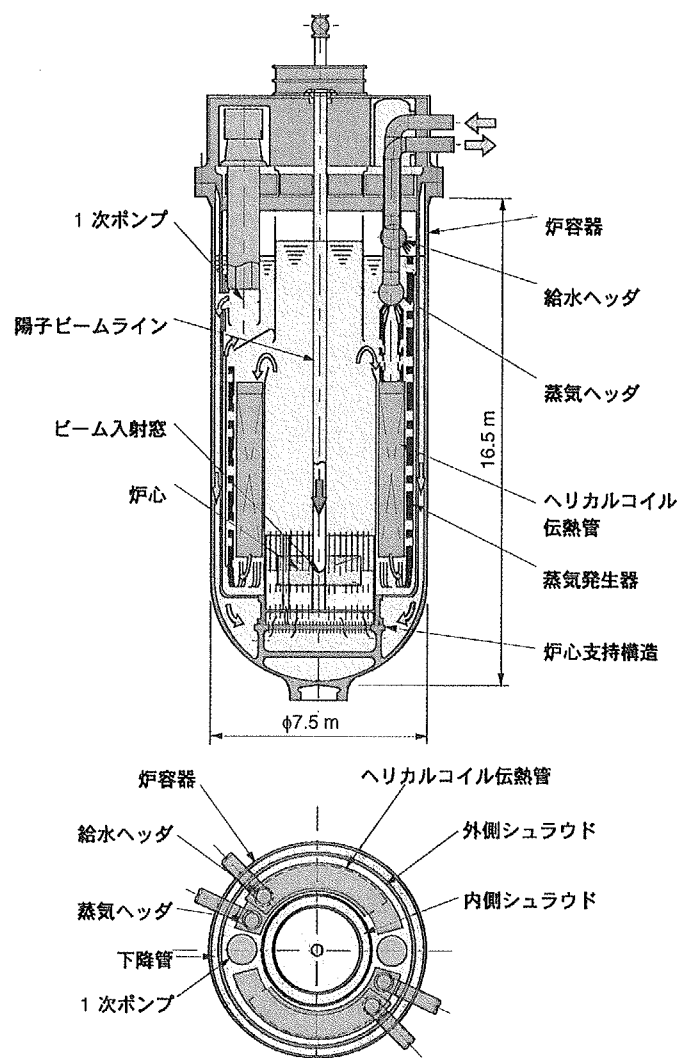


図 2.20 鉛・ビスマス冷却加速器駆動核変換システムの概念

の高い融点をもつこと、「コールド・フューエル」概念を採用できること、MA の安定な化合物であること、高温化学処理が可能であること、MA 核変換に適した硬い中性子スペクトルをもった炉心を構成するのに役立つことなどの利点を有する。研究開発は、燃料物性データベース、燃料製造技術、燃料処理技術の 3 分野からなり、関連基礎データベースの拡充、要素技術の開発を行っている。

1.5 GeV、約 20 mA の陽子ビーム入射により、実効中性子増倍係数 k_{eff} が 0.95 のターゲット/炉心は約 800 MW の炉心熱出力を発生する。プラントの稼働率を 80% とした時、MA の変換量は約 250 kg/y となる。プラント熱効率を 30% としたとき、240 MW の電気出力が得られる。加速器効率を 40% とすれば、1.5 GeV-20 mA の加速器の運転に必要な電力は 75 MW である。このことは、このシステムが十分にエネルギーを自給可能であるだけでなく、電力生産も可能であることを意味している。さらに、鉛・ビスマス冷却材では、ボイド反応度係数を負にすることができるため、未臨界度をより浅くできる可能性がある。未臨界度は必要な加速器規模とも密接に関連するため、その検討は重要課題である。

鉛・ビスマス冷却加速器駆動システム概念図を図 2.20 に示す。表 2-5 にシステムの主要諸元を示す。

表 2-5 鉛・ビスマス冷却加速器駆動システムの主要諸元

| | |
|--|--|
| 炉心熱出力 | 800 MW |
| 炉心高さ | 1000 mm |
| 炉心半径 | 1200 mm |
| 実効中性子増倍係数 k_{eff} (初期/最大/最小) | 0.95/0.95/0.93 |
| 線出力密度 (最大/平均) | 520/300 W/cm |
| 出力密度 (最大/平均) | 310/180 MW/m ³ |
| MA/Pu 装荷量 | 2500/1660 kg |
| 燃料 | (MA, Pu)N, ZrN 初期 Pu 含有率: 40%, ZrN: 不活性マトリックス N-15 濃縮 |
| 燃料ピン ピッチ/直径 | 1.5 |
| 冷却材温度 (入口/出口) | 330/430 °C |
| 冷却材速度 (最大) | 2 m/s |
| 冷却材ボイド係数 | -4.8% dk/k |
| ドップラー係数 | $-3.7 \times 10^{-4} T dk/dT$ |
| 燃焼反応度変化 | 1.8 % |
| MA 変換率 | 500 kg/cycle (20 %/cycle) |
| サイクル長 | 600 day |

2.5.4 加速器駆動システム実証の技術課題

大強度陽子加速器と未臨界炉心を組み合わせたハイブリッドシステムである加速器駆動システムの開発は各国で進められているものの、まだ実現されていない。加速器駆動システム実現のためには、まず核破碎中性子源により未臨界炉心が核分裂反応を持続し、安定な出力で運転できることを実証する必要がある。

このような加速器駆動システムの原理的な実証が必要であるほかに、加速器駆動核変換システムには、図 2.21 に図示するように、いくつかの特有の技術開発課題があり、未臨界炉物理、核変換特性、システムの運転及び制御、ターゲット熱流動、ビーム入射窓材料照射、高エネルギー放射線遮蔽など多くの分野にわたっている。

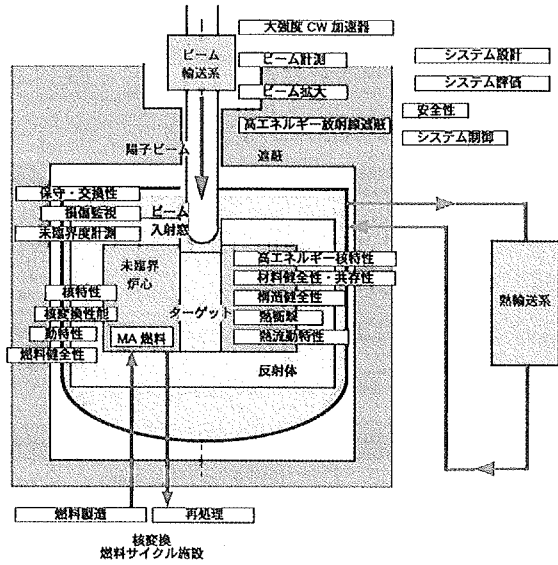


図 2.21 加速器駆動核変換システムの技術課題

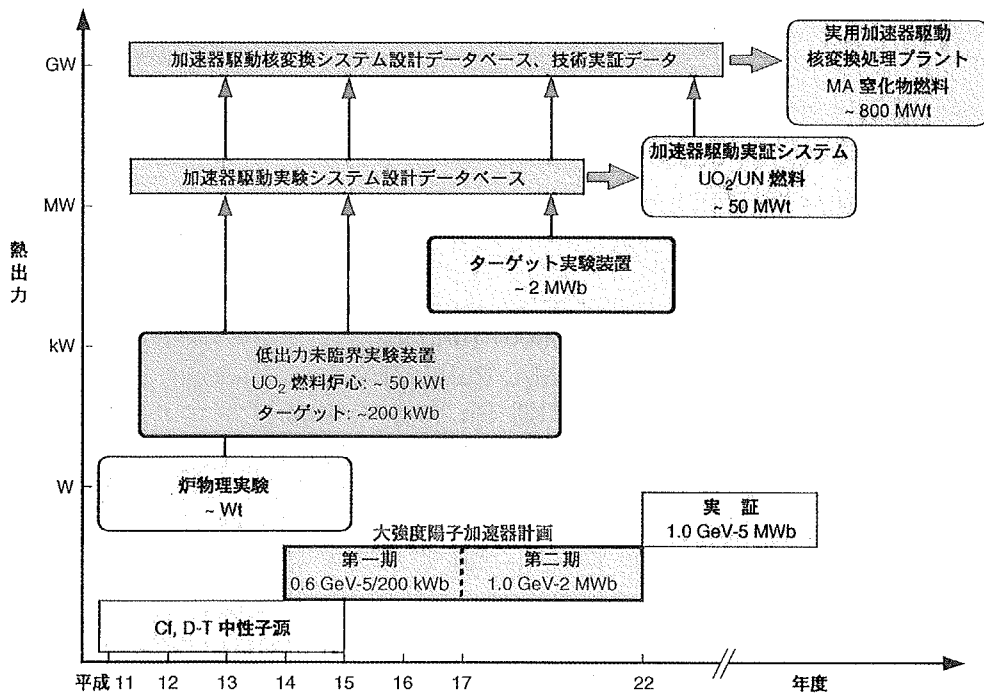


図 2.22 加速器駆動核変換システム開発のための実験施設計画

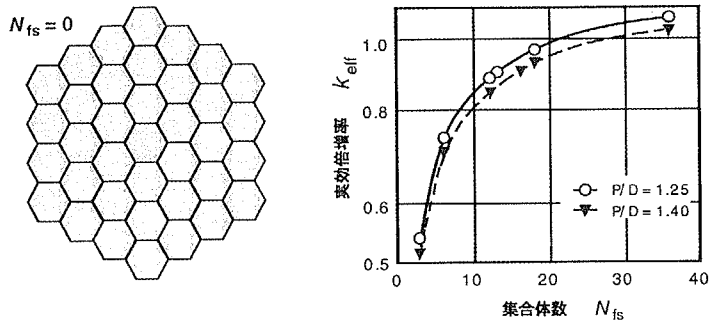
最重要技術課題の一つはビーム入射窓の開発であり、高い圧力差と熱応力、照射損傷を受けるため、その構造健全性を確保することは設計上非常に重要な工学課題である。また、鉛・ビスマスなどの重金属をターゲット/冷却材に用いるシステム

では、材料の腐蝕、壊蝕の定量的評価が設計上重要な課題である。

これらの課題を克服するため、加速器駆動システム基礎・工学実験施設を建設し、低出力未臨界実験、システム運転・制御実験、ターゲット実験等を実施する。低出力未臨界実験では核変換反応率比及び反応率分布、中性子スペクトル、空間及び時間依存中性子束、高エネルギー中性子の影響、未臨界度の測定を行なう。システム運転・制御実験では、ビーム出力の制御、制御方式、ビームトリップの影響、再起動運転、保守性及び交換性の実証を行う。ターゲット実験では、熱流動特性の実験、ビーム入射窓の材料照射等を行う。また、ビームダンプを利用して、高エネルギー放射線遮蔽の実験を行う。これらの実験を通して、実験炉の設計に必要な基礎工学データを取得する。

加速器駆動核変換システム開発のためのシナリオを図 2.22 に示す。このシナリオに示すように、得られる加速器ビーム出力及び運転モードに従って、段階的に実験計画を進める。この実験計画の第一期及び第二期は、この統合計画の枠組み内で計画されている。それ以降の 50 MWt 規模の実験システム計画は、現在のところ、統合計画の範囲外である。

この実験計画に加えて、設計・評価研究及び燃料、材料、分離など加速器駆動核変換システム開発に関連する分野の技術開発のためのプログラムも並行して進める計画である。



2.5.5 加速器駆動システム技術開発のための基礎・工学実験施設

基礎・工学実験施設を検討する際の重要な事項は、約 50 MW 熱出力の加速器駆動実証システムに向けた段階的かつ合理的な実験計画及び各フェイズでの利用可能な加速器ビーム条件に適合させるとともに、建設コストの削減を図ることである。

また、実験の汎用性を考慮した設計とする。例えば、図 2.23 に概念的に示すように、低出力未

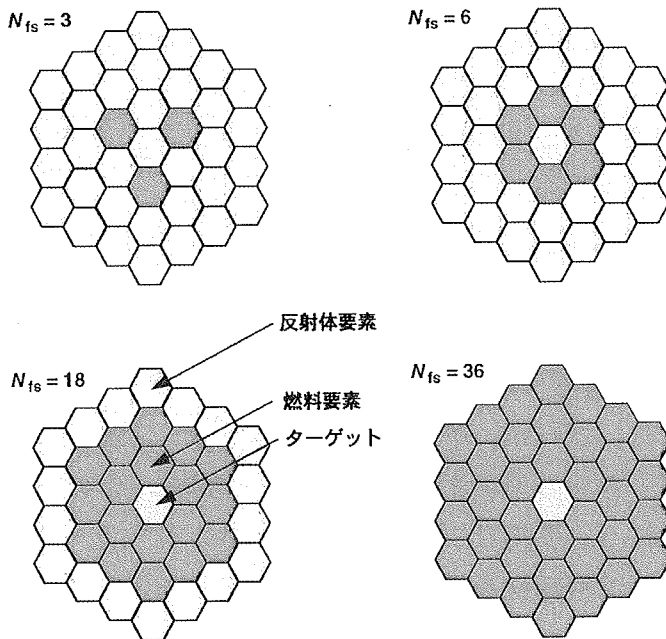


図 2.23 炉心のレイアウトと未臨界度

臨界実験装置では様々な炉心レイアウトをとることができるようにする。20% 濃縮酸化ウラン燃料の燃料サブアセンブリ 18 体からなる炉心の最高実効中性子増倍係数 k_{eff} は 0.9 程度であり、装荷する燃料要素の数及び配置をさまざまに変えることにより、実効中性子増倍係数を広範囲に変えることができるようにする。

さらに、第一期のシステム設計は可能な限り既存の技術に基づいて行なうこととする。

(1) 低出力未臨界実験装置

低出力未臨界実験装置は、20% 濃縮酸化ウラン燃料を用いて中性子実効増倍係数 0.90 程度の高速中性子スペクトル体系とする。ターゲット領域は、固体の鉛またはタングステンとし、交換可能な構成とする。炉心の最大熱出力（定常）は約 50 kW である。

入射ビームは、エネルギー 600 MeV、繰返し数 25 Hz（最大）のパルス状ビームで、最大ビーム出力（定常）は 5 kW である。ピーク電流は変えずにパルス幅（最大 0.5 ms）を変更することにより 0.2 kW までビーム出力を下げる事ができる。さらに、中間パルスの取出し可能なキッカーマグネットを設置することにより、微小出力（数 W）レベルのビーム入射を可能とする。また、比較のための定常中性子源（カリフォルニウム 252 中性子源及び D-T 中性子源）を設置できる構成とする。

実験装置の概念を図 2.24 に示す。炉心構造は、燃料インベントリ、除熱性能、汎用性の観点から、ピンインブロック型を採用している。集合体は六角断面のマトリックス（ピッチ 244 mm）61 体からなり、全体で幅 2.4 m、高さ 2.1 m、奥行き 2.0 m である。炉心中心のマトリックスには鉛あるいはタングステンのターゲットサブアセンブリが、そのまわりの 18 体（2 層）のマトリックスには燃料サブアセンブリが、さらにそのまわりの 42 体（2 層）のマトリックスには反射体アセンブリが装荷される。燃料サブアセンブリには 1 体当たり 91 本の燃料棒を装填し、燃料棒間の隙間には冷却材を模擬する鉛を充填する。この構成で、中性子実効増倍係数は約 0.90 であるが、燃料組成等の変更により可変であり、約 0.95 まで上げることができる。

数 kW 以上の熱出力で運転する場合には、炉心の強制冷却が必要であり、冷却には大気圧の空気を用いる。熱出力が 50 kW のとき、冷却空気流量 $0.85 \text{ m}^3/\text{s}$ とす

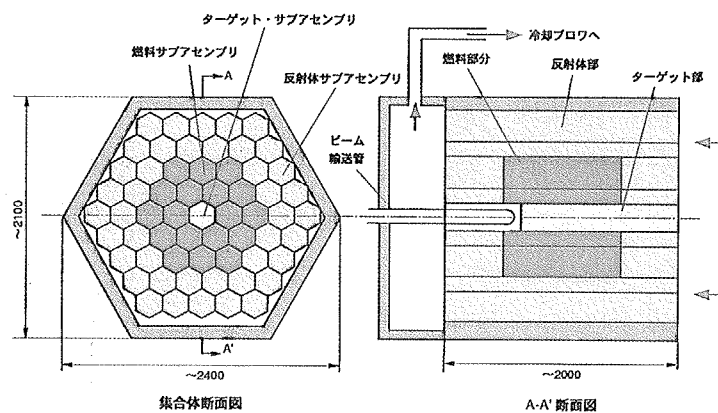


図 2.24 低出力未臨界実験装置概念図

ると、冷却空気の温度上昇は約 50℃ となり、燃料の最高温度は約 250℃ となる。

表 2-6 に、各フェイズにおける核変換実験システムと提案している実規模システムの最大炉心熱出力規模を示す。

表 2-6 実験システムと実用システムの炉心熱出力規模

| | 加速器ビーム | 燃料 | 炉心熱出力 |
|--------|---|---------------------|------------|
| 実験システム | | | |
| 第一期 | 0.6 GeV, 25 Hz pulse 約 0.008 mA (約 0.005 MW) | UO ₂ | 約 0.05 MWt |
| 第二期 | 約 1 GeV, 25 Hz pulse 約 0.008 mA (約 0.005 MW) | UO ₂ | 約 0.05 MWt |
| 実証 | 約 1 GeV, CW ~5 mA, | UO ₂ /UN | 約 50 MWt |
| 実用システム | 約 1 GeV, CW 約 40 mA, | (MA, Pu, Zr)N | 800 MWt |

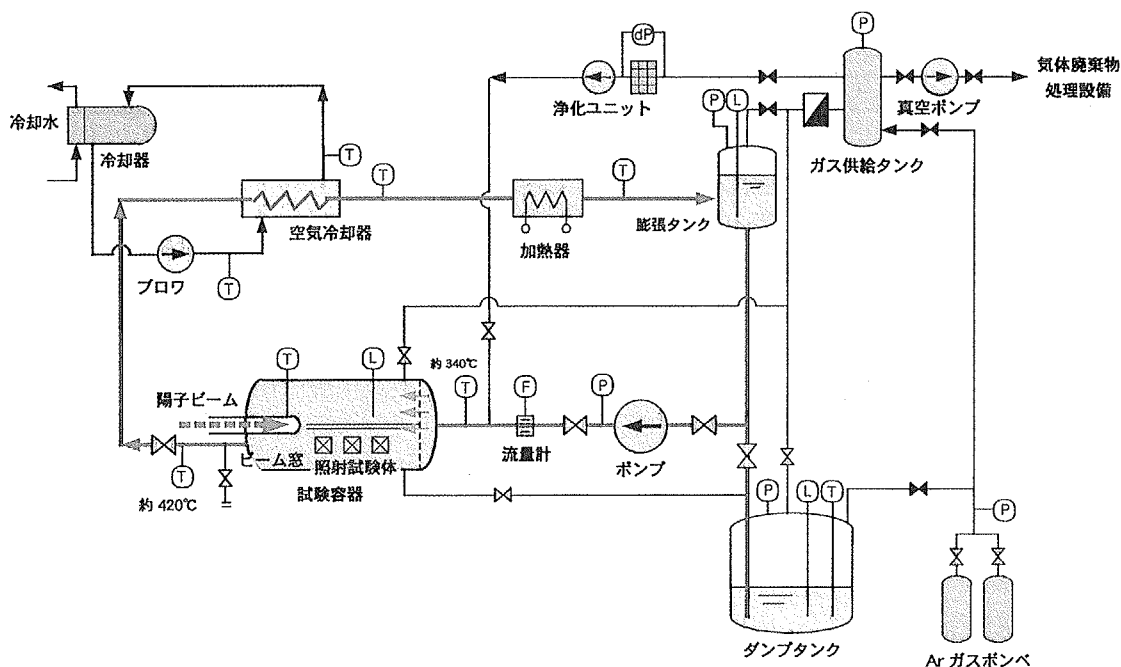


図 2.25 ターゲット実験鉛・ビスマスループ概略系統構成

(2) ターゲット実験装置

第一期において、0.2 MW までのビーム出力でターゲット実験装置を用いて予備的な実験を行う。第二期では、最大ビーム出力 2 MW の実験を計画しているため、第一期の 0.2 MW (最大) ターゲット実験装置の設計では、2 MW へのアップグレードの可能性に配慮する。

ターゲット物質には液体の鉛・ビスマス共融合金を用い、強制循環によって除熱を行う。Fig. 2.25 に、鉛・ビスマスループ概略系統構成の概念を示す。系統は、試験容器、空気冷却器、加熱器、膨張タンク、ダンプタンク、循環ポンプ、アルゴンガス系、空気冷却系、計装制御系等から構成される。試験容器は、核破碎ターゲット及びビーム入射窓の小規模なモックアップ及び照射試験片を収容する。ターゲット、ビーム入射窓等で発生した熱は、強制循環する鉛・ビスマス冷却材により空気冷却器に輸送され、2次空気冷却系を経て、冷却水系あるいは大気に放熱する。鉛・ビスマスの流量は $0.1 - 0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度であり、試験容器の入口及び出口温度はそれぞれ約 $340 \text{ }^\circ\text{C}$ 及び約 $420 \text{ }^\circ\text{C}$ である。

表 2-7 実験システムと実用システムのターゲット熱出力規模

| | 加速器ビーム |
|--------|---|
| 実験システム | |
| 第一期 | 0.6 GeV, 25 Hz pulse 最大 0.3 mA (最大 0.2 MW) |
| 第二期 | 約 1 GeV, 25 Hz pulse 約 2.0 - 3.3 mA (約 2 MW) |
| 実証 | 約 1 GeV, CW 約 5 mA, |
| 実用システム | 約 1 GeV, CW 約 40 mA, |

第一期では、エネルギーが 600 MeV 、平均電流 0.3 mA (最大)、繰返し数 25 Hz のパルス陽子ビームを用いる。第二期では、エネルギーが 600 MeV あるいは 1 GeV 、平均電流 3.3 mA (最大)あるいは 2.0 mA (最大)、繰返し数 25 Hz のパルス陽子ビームを用いる。

表 2-7 に、各フェイズにおける実験装置のターゲットと提案している実規模システムのターゲットの熱出力規模を示す。

(3) 実験施設建屋

実験施設建屋の概念を図 2.26 (平面図) 及び図 2.27 (立面図) に示す。建屋は地上1階、地下1階で、 $55 \text{ m} \times 33 \text{ m}$ 程度の規模を想定している。実験施設の主要装置である低出力未臨界実験装置、ターゲット実験装置、ビームダンプならびに冷却系機器、保管室等は地下に設置する。陽子ビーム輸送系の深さは地下約 8 m である。

建屋規模の縮小と遮蔽体積の低減のため、実験装置へのビーム入射はいずれも水平方向とした。

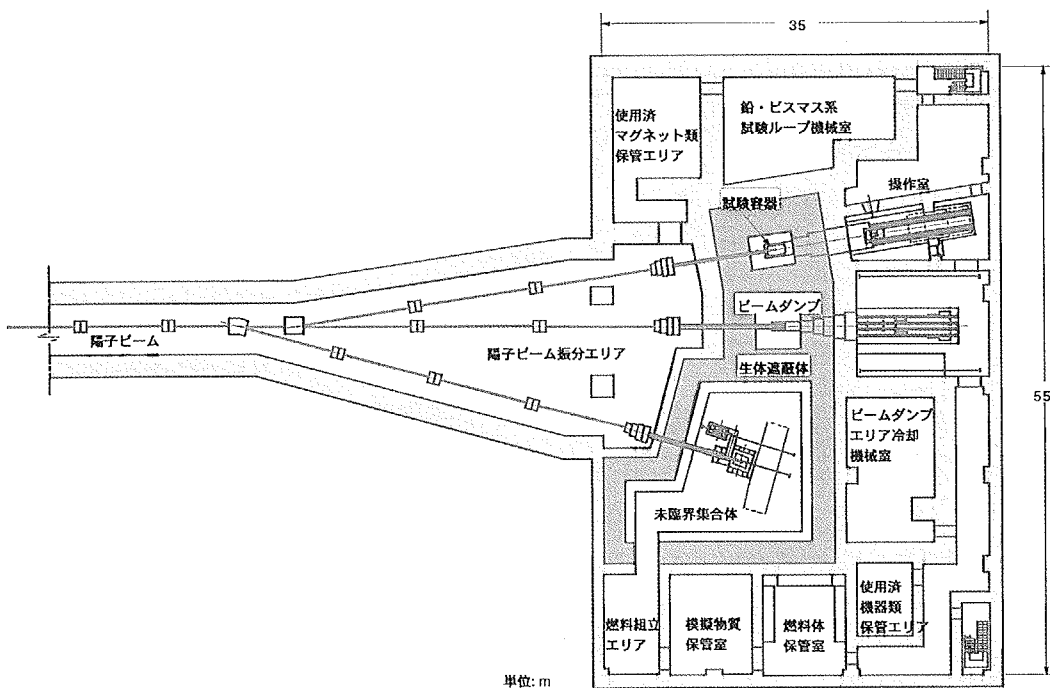


図 2.26 実験施設建屋概念 (平面図)

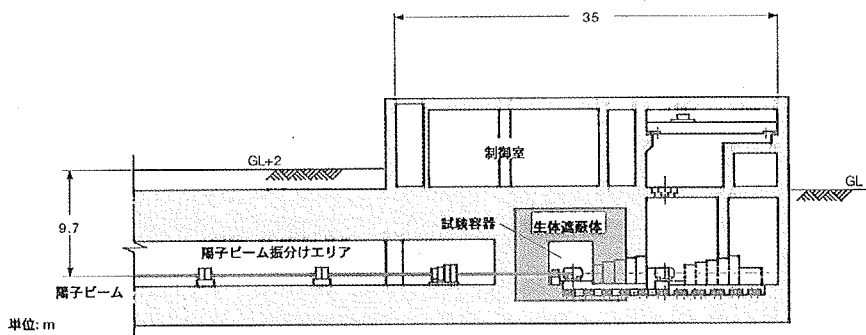


図 2.27 実験施設建屋概念 (立面図)

2.5.6 実験の意義と内容

統合計画の第一期における主な実験項目を表 2-8 に示す。各実験項目の意義及び内容を (1) から (3) に記述する。

表 2-8 主要実験項目

| 第一期 ADS 基礎実験 | | |
|--|------------|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • 未臨界炉物理 • 運転及び制御 | 低出力未臨界実験装置 | MA、LLFP 核変換反応率比及び分布 中性子スペクトル 空間及び時間依存中性子束 高エネルギー中性子の影響 未臨界度 ビーム出力調節、フィードバック制御系 ビームトリップの影響と再起動運転 ビーム輸送系、ビーム窓の保守・交換性 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 熱流動 • 核破碎 • 材料照射 | ターゲット実験装置 | ビーム窓 中性子束、スペクトル ビーム窓用材料 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 遮蔽 | ビームダンプ | 単層、多層透過 複雑形状 |

(1) 低出力未臨界実験

低出力未臨界実験は、核破碎中性子源で駆動される高速中性子未臨界体系について、核破碎中性子導入の影響に関する実験、加速器駆動システムの運転・制御性に関する実験を実施し、基礎工学的なデータを取得することを目的とする。これらの項目に関する実験は、加速器駆動システムの研究開発を概念の検討及び基礎物理データの収集の段階から工学的実証段階へ進めるために必要なステップである。但し、体系が未臨界であること、冷却材が異なること、体系中心にターゲット領域及びビーム入射窓があることの 3 点の相違が炉物理特性に及ぼす影響については、高速炉臨界実験装置 FCA を用いた実験及びフランス原子力庁 (CEA) との研究協力による MASURCA を用いた MUSE 実験から検討することが可能である。

核破碎中性子源で駆動される実効中性子増倍係数が 0.9 程度の未臨界増倍体系では、10 MeV 以上の高エネルギー中性子の割合は相対的に少なく、大部分の核分裂反応は 10 MeV 以下のエネルギーの中性子によって起きる。また、核破碎中性子のエネルギースペクトルは、高エネルギーのテール部分を除けば、核分裂中性子のそれとほぼ相似である。このため、体系全体としては高速中性子未臨界体系への核破碎中性子導入の影響はそれほど大きくない。したがって、この観点からは、カリフォルニウム 252 や D-T の中性子源で模擬することが可能であるといえる。

一般に、中性子源がない場合の実効中性子増倍係数 k_{eff} と中性子源がある場合の実効増倍係数 k_s は異なる。中性子源がある場合の実効増倍係数 k_s は単純ではなく、中性子源の種類、位置、中性子源及びその近傍領域の組成、形状等によって変わり、核破碎中性子源の場合には入射陽子エネルギーに依存する。これは、入射陽子エネルギーの変化により中性子源の空間分布、エネルギースペクトル等が変化するためである。したがって、未臨界炉心の絶対的な中性子束や出力を精度良く予測

するためには、中性子源がある場合の実効増倍係数（あるいは実効中性子源強度）を高精度で求める必要がある。

核破碎中性子導入の影響に関する実験では、高エネルギー粒子の挙動及び核破碎中性子源の空間、方向、エネルギー分布の影響に関するデータを取得する。これらのデータは、カリフォルニウムあるいは D-T、D-D 中性子源を用いた FCA 及び MASURCA の実験では取得できない。具体的には、MA（ネプツニウム 239、アメリシウム 241、アメリシウム 243）及び LLFP（テクネチウム 99、ヨウ素 129）などの核変換反応率比及び反応率分布の測定、中性子エネルギースペクトルの評価、パルス状中性子源による中性子束の時間依存空間分布測定、未臨界度の評価、ターゲットの位置、組成（鉛、タングステン）、形状依存性等の評価を主な実験項目とする。中性子源の種類の影響を比較するために、カリフォルニウムあるいは D-T、D-D 中性子源を用いた実験も行う。

加速器駆動システムの運転・制御性の検証に関する実験では、所定の未臨界炉熱出力を陽子ビームの出力を調整することによって安定に維持できることを実証するとともに、加速器のビームトリップ時や立上げ時のシステムの応答に関する総合的な試験を行う。

加速器駆動システムでは、起動時、ビームトリップ時、ビーム再立上時等に、急激な事象の過渡変化が予想されている。このため、これらの事象への対処方法の開発及び実証は不可欠である。ビームトリップ回復後の再立上時には、未臨界炉心体系の温度変化に伴う反応度が印加されるため、トリップの前後で出力が変化すると考えられる。したがって、未臨界炉心の温度係数のデータを取得し、予測精度を検証することが必要である。

実験は、最大出力 50 kW 時、燃料最高温度約 250 °C、出入口冷却空気温度差約 50 °C で行ない、エネルギー増倍率を実測する。加速器と低出力未臨界実験装置の核計装、各種プロセス計装を連動させた制御を試みる。これにより、定常状態で安定な運転ができること、ビーム出力の調整によって所定の熱出力を維持できることを実証する。また、過渡時（起動時、ビームトリップ時、ビーム再立上時など）のシステムの応答に関する総合的な試験を行う。これにより、過渡時におけるシステム全体の良好な制御ができることを実証する。さらに温度変化に伴う燃料のフィードバック反応度の影響を観測し、温度係数の予測精度の検証を行う。中性子束レベル等の核計装のほかに、陽子ビーム出力、燃料温度分布、冷却空気の流量、温度、圧力、線量当量率などを計測する。

(2) ターゲット実験

ターゲット実験では、主として、ビーム入射窓の機能試験、液体鉛・ビスマスターゲットの構造特性試験及び熱流動特性試験、ビーム入射窓及び燃料集合体候補材料の液体鉛・ビスマス中での照射試験を行う。さらに、鉛・ビスマスターゲット

中での核破砕生成物の生成量及びループ中での分布データの取得、鉛・ビスマスタージェットの基本的な核特性（中性子収量、スペクトル等）等の測定も行う。

加速器駆動システムの核破砕ターゲット及びビーム入射窓は、加速器と未臨界炉心のインターフェースを構成する従来の原子炉にはない構成要素である。核破砕ターゲット及びビーム入射窓の構造材料は高温、高発熱密度、高陽子・中性子束の非常に厳しい条件におかれる。ビーム入射窓は、加速器側の真空とシステム冷却材の運転圧力との間の圧力境界を構成するため、システムの安全の面からもっとも重要な構造である。陽子ビームによる発熱及び照射損傷、鉛・ビスマス冷却材による圧力差、腐食等はビーム入射窓の構造健全性、寿命に大きな影響を与える。

ビーム入射窓の構造健全性を評価するために、運転中のビーム入射窓の温度分布及び熱伝達分布、ターゲット内の温度分布、流速分布、圧力分布等を正確に予測することが重要である。また、通常運転中の強制循環/除熱特性とともに、低流量あるいは強制循環喪失時の冷却性能を評価するために、鉛・ビスマス冷却材の自然循環/対流除熱特性のデータが必要である。さらに、ビームトリップなどのビーム強度の急激な時間変化は、構造材料に急激な温度変化（熱衝撃）を与え、熱疲労の原因となる。このため、ビーム過渡時のターゲット及びビーム入射窓の熱的挙動を把握することが安全性の面から非常に重要である。

液体鉛・ビスマス冷却材とした原子炉は、旧ソ連が潜水艦用原子炉として開発・運転した実績をもっており、現在も数多くの熱流動及び材料腐食試験用の液体鉛・ビスマスループが稼動している。我が国をはじめとして、ロシア以外の国では、原子力分野での液体鉛・ビスマス冷却材を使用した経験はなく、材料の腐食等に関するデータは極めて少ないのが現状である。したがって、液体鉛・ビスマス冷却材中で使用される核破砕ターゲット、ビーム入射窓及び燃料サブアセンブリーの候補材料について、陽子・中性子照射下での共存性に関する設計データベースを構築することが不可欠である。

第一期では出力 200 kW までのビームを入射して、鉛・ビスマスの熱流動、ビーム窓候補材料の照射、鉛・ビスマスタージェットの基本的な核破砕特性などに関する予備的な実験を行なう。最大ビーム出力 200 kW の第一期において、次期の 2 MW 鉛・ビスマスタージェットの設計及び建設に必要なデータを取得する。ターゲット実験には、エネルギーが 600 MeV、平均電流 0.3 mA (最大)、繰返し 25 Hz のパルス陽子ビームを用いる。

2.5.7 加速器駆動システム開発の動向と国際協力

国内においては、原研以外では、京都大学原子炉実験所が KEK と協力して、学術振興会の支援を得て基礎実験の計画を作成している。

国外では、特に、フランスにおいて 1991 年に成立した放射性廃棄物管理の研究

に関する法律のもとで、分離変換技術研究開発に関する総合的な長期プログラム SPIN が、ヨーロッパの多くの研究所との協力のもとで、精力的に推進されている。高速増殖原型炉スーパーフェニックス炉の閉鎖決定以降、フランスを初めヨーロッパにおいては加速器駆動核変換技術の研究開発が盛んに行われている。フランスでは原子力庁 (CEA)、国立科学研究センター (CNRS) や企業が協力して加速器駆動核変換技術の研究開発を進めている。原研と CEA は、ADS の研究開発を含む分離変換技術の分野において協力を行なっている。

ベルギーでは、原子力研究センター (SCK/CEN) が MYRRHA プロジェクトを提案し、ADS の開発、材料照射及び医療用アイソトープ生産を目的とした熱出力 70 MW 規模の ADS の建設を目指している。

スイスのポール・シェラー研究所 (PSI) の核破砕中性子源 SINQ を用いた鉛・ビスマスターゲットに関する共同実験が計画されている。

イタリア、スペイン、フランスの科学技術担当大臣のもとで前 CERN 所長のルビア教授をリーダーとするグループは 2015 年建設開始を目的に加速器駆動原子力システム (エネルギー増幅器) 実証装置の設計研究を行っている。

米国では、エネルギー省の主導でロスアラモス国立研究所 (LANL) とアルゴンヌ国立研究所 (ANL) 等が協力して、加速器駆動核変換技術 (ATW) 開発計画に関する報告書を作成し、1999 年 11 月に議会に提出した。

ロシアでは、国際科学技術センター (ISTC) プロジェクトのもとで、多くの研究所が ADS 開発に関する研究を行なっている。ロシアの物理・動力工学研究所 (IPPE) で製作している鉛・ビスマスターゲット (1 MW) を LANL の LANSCE 施設に本年度末までに設置し、その後コールド及びホットのループ試験を行なうことが計画されている。

その他チェコや、アジアでは韓国や中国においても ADS の開発研究が行われている。これら加速器駆動核変換技術研究開発計画の内、チェコと中国を除いた各国の計画では、何れも中性子源ターゲット及び冷却材として液体鉛・ビスマスを採用している。

加速器駆動核変換技術研究開発に関しては、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)、国際科学技術センター (ISTC) などの国際機関も活発な活動を行っている。

加速器駆動核変換技術研究開発計画においては、効率的でコストエフェクティブな開発を進めるという観点から国際協力が極めて重要である。

本統合計画により、加速器駆動核変換実験施設が予定通りに完成すれば、世界最初の実験施設となり、国際的な共同実験計画の場を提供できることができる。

参考文献

- [1] T. Mukaiyama, "Importance of the double strata fuel cycle for minor actinide transmutation", Proc. 3rd OECD/NEA Int. Information Exchange Mtg. on P-T, Cadarache (1994).
- [2] T. Takizuka et al., "Studies on accelerator-driven transmutation systems", Proc. 5th OECD/NEA Int. Information Exchange Mtg. on P-T, Mol (1998).
- [3] T. Sasa et al., "Accelerator-driven Transmutation Reactor Analysis Code System - ATRAS -", JAERI-Data/Code 99-007 (1999).
- [4] T. Ogawa et al., "Nitride Fuel Cycles on Pyrochemistry", Proc. Int. Conf. Future Nuclear Systems, "Global '97" (Yokohama, 1997).
- [5] M. Kubota et al., "Development of Partitioning Process in JAERI", Proc. 3rd OECD/NEA Int. Information Exchange Mtg. on P-T, Cadarache (1994).
- [6] T. Nakagawa et al., "Nuclear Data for OMEGA Project", Proc. 3rd OECD/NEA Int. Information Exchange Mtg. on P-T, p. 371 (Cadarache, 1994).
- [7] T. Mukaiyama et al., "Actinide Integral Measurements in FCA Assemblies", Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Basic and Applied Science, Vol. 1, p. 483 (Santa Fe, 1985).

3 加速器

3.1 はじめに

多くの科学技術分野で陽子ビームの大強度化がますます求められている。核破砕中性子研究施設がその良い例であろう。例えば、我が国の中性子科学研究計画 (Neutron Science Project, NSP) を始めとして、米国の核破砕中性子源 (Spallation Neutron Source, SNS) 計画や欧州の欧州核破砕中性子源 (European Spallation Neutron Source, ESS) 計画においてはその最終目標として数 MW の強度を提案している。しかしながら、現在の加速器技術の水準では、その達成は至難の業と言わねばならない。とりわけ、大強度加速器技術の更なる発展には、以下のような理由からビーム実験が必須の要件である[1]。

高エネルギー陽子のビーム強度は実際には以下のようにして決まってしまう。すなわち、ビーム損失がある値、典型的には $2 \sim 3 \text{ nA/m/GeV}$ を越えると加速器の運転を止めねばならないのである。ビーム損失がこの値を越えると加速器の残留放射能が強すぎて、人が近寄れず、加速器の修理、点検が不能になる。このような極めて小さい量のビーム損失はビーム・ハローによって引き起こされるが、その生成機構は理論的には解明されつつあるものの、実験的検証は未だ緒に付いたばかりである。すなわち、このレベルのビーム損失は未だ定量的に予言することはできない。また残念なことに、このようなハロー生成機構の実験的研究を行うには、現存の高エネルギー陽子加速器のビームの質は十分とは言えないのである。以上が、現在の技術の粋を集めた加速器を新たに設計、建設し、その運転、ビーム実験などの経験を通じて初めて、MW をはるかに越えるような加速器が可能であると主張する理由である。

こうして、統合計画は二期に分けて整備されることとなった。第一期でも、種々の分野で、現状をはるかに越える科学技術の発展が期待できる。一方、加速器科学、技術の観点からも、1 MW のパルス中性子源を含む第一期の加速器複合体は、新たに開発された加速器技術が存分にその真価を発揮できる、理想的な試験場となる。そこで得られる加速器実験の結果は、第一期の 1 MW を越え、第二期の数 MW のパルス中性子源へと増強されるに際し、十分に反映されることとなる。具体的には、第二期の加速器の方式の選択は、第一期の加速器の設計、建設、運転、ビーム実験をもとに決定される。第二期については 5.2 節で詳述する。

どのような加速器においても、加速器に要求される詳細なビームのパラメータが決定されて初めてその最適な設計が可能となる。ビームのエネルギーと電流のみでは加速器の最適化には不十分であって、ビームの時間構造ももう一つの重要なパラメータである[1]。2.1 節で述べたように、原子核や素粒子物理学の実験に 50 GeV のビームが使われるが、一般的には測定器の不感時間を最小にするという観点から、長パルス、高デューティ・ビームが望ましい。しかし、ある場合、例えば、長基

線タウ・ニュートリノ出現実験の場合には、数 μs の短パルスが要求される。このような理由から、50 GeV リングからのビーム取り出しには、遅い取り出しと速い取り出しの両方が用意される。第一期のビームに要求されるパラメータを表 3.1 に示す。

最適設計はまた、ビーム力学および加速器の主要構成要素の最近の発展を採り入れて初めて可能になる。すなわち、加速器技術に大きな進展があると最適設計自体が変わってくる。世界中の研究機関、中でも KEK および原研でこの間行われてきた大強度陽子加速器のための研究開発の結果は、ここで提案されている加速器設計に最大限活かされている。そのため、次節以降、設計提案を記述するに当たっては、研究開発の結果も同時に記述してある。

表 3.1. 第一期の加速器に要求される性能

| | エネルギー | 電流または ビーム出力 | パルス長 | 繰り返し |
|------------|----------------|--------------------|-------------------|--------------|
| 素粒子・原子核実験 | 50 GeV | 15.6 μA | long pulse | high duty |
| ニュートリノ振動実験 | 50 GeV | 15.6 μA | short pulse | high duty |
| 中性子散乱実験 | > 0.5 GeV | 1 MW | < 1 μs | ≤ 50 Hz |
| 核変換実験 | ≥ 0.6 GeV | 0.05 MW | long pulse | high duty |

3.2 加速器方式

50 GeV 主シンクロトロンは原子核・素粒子実験施設に 15.6 μA のビームを 0.3 Hz の繰り返しで供給するが、そのためにはいずれにしても数 GeV の入射器が必要である。このとき、ビーム不安定性や空間電荷効果を最大限軽減するという観点から入射エネルギーは高い方が望ましい。数 GeV というエネルギーを考えると、速い繰り返しのシンクロトロン (RCS) の方が、リニアックよりも建設費は断然安価である。数 GeV の RCS には数 100 MeV の入射リニアックが当然必要であり、このように、加速器の現基本方式は、原子核・素粒子物理学の要請に応えるという観点から選択された。

2.2 節で詳述されているように、1 μs オーダーのパルス長の核破碎中性子ビームはより長いパルスや CW の中性子ビームよりも格段に有用である。不幸なことに、イオン源からの陽子ビームは要求されるビーム強度よりも何桁も小さい。この理由によって、リニアックのビームはリングに入射しなければならず、このリングの周回時間が当の 1 μs オーダーであり、必要な数の陽子がリングに貯まるまで、入射し続けることとなる。中性子生成標的には速い取り出しでビームを取り出すわけである。こうして、それが貯蔵リング (SR) であれ、シンクロトロン加速器であれ、いずれにしてもリングがパルス中性子源に必要なならば、そのために 50 GeV シンクロトロンへのブースター RCS を共用するというのはまことに合理的な選択である。中性子源からの要請に応えるには 25 Hz へと RCS の繰り返しをあげる必要があるにしてもである。

次なる問題はこの RCS およびリニアックのエネルギーを決めることである。RCS にとってもリニアックにとってもそのエネルギーを上げることはビーム出力を上げるという意味で有利なことではあるけれども、それはともに建設費、運転費を上げることとなる。RCS のエネルギー 3 GeV、リニアックのエネルギー 400 MeV という組み合わせは 1 MW の陽子ビーム出力を得るための費用を最低にするという観点から選択されたものである。現方式は基本的には原子核・素粒子物理実験とパルス中性子実験からの要求の両方を満たすために選ばれたものではあるけれども、この選択は核破碎中性子源単独にとってもほぼ最適に近いと信じてよい理由を持っているわけである。この件に関しては、5.2 節でビーム損失の問題の考察と関連してより明確化されるであろう。

この統合計画のもう一つの特徴は加速器駆動核変換システム(ADS) のための加速器技術および標的技術の開発を含むことである。ADS に対しては陽子ビームのエネルギーは最低 600 MeV が必要であり、またそれは少なくとも 1 ms のオーダーの長パルスビームでなければならない。400 MeV の常伝導 (NC) リニアックからのビームを超伝導 (SC) リニアックに入射して 600 MeV まで加速し、ADS に導く。将来の連続運転リニアックにとっては SC リニアックは最重要技術課題の一つであるが、SC リニアックのパルス運転は連続運転より難しいから、その成功は最も困難な技術課題の一つが解決されたことを意味することとなる。一方、第一期においてこの 600 MeV ビームを RCS に入射しない理由は、将来の数 MW パルス中性子源への増強計画との関連において 5.2 節で詳述する。

こうして、第一期の統合計画加速器複合体は 50 GeV 主シンクロトロン、3 GeV RCS、400 MeV 常伝導リニアック、400 MeV から 600 MeV への超伝導リニアックから構成される (図 3.1 参照)。50 GeV シンクロトロンは 0.3 Hz の繰り返しで 15.6 μ A のビームを供給する一方、3 GeV RCS は数 100 ns のパルス幅、25 Hz の繰り返しで 333 μ A のビームを供給する。リニアックは 50 Hz の繰り返し、500 μ s のビーム幅で 1.3 mA のビームを供給する力を持っている (すなわち、尖頭電流 50 mA、2.5 %のデューティ)。

50 GeV のビームは遅い取り出しで K 粒子稀崩壊やハイパー核などの実験を行う実験ホールへ導かれる。また、ニュートリノ振動実験のためには速い取り出しが行われる。この長基線実験には、原研東海研敷地から 250 km 離れたところにあるスーパーカミオカンデ測定器が使用される。3 GeV RCS からの 1 MW のビームには速い取り出しが行われ、3 個の生成標的へと導かれる。それらはそれぞれパルス核破碎中性子実験、ミュオン実験、短寿命核実験のために一つのビームラインに沿って 1 列に並べられる。600 MeV のリニアックビームは 0.8 MW のビーム出力を持ち、専ら ADS の基礎実験に供されるが、第一期においてはそのビーム出力は十分すぎるほどある。

負水素イオンは体積生成型イオン源で生成されるが、その繰り返し、パルス幅、尖頭電流はそれぞれ 25 Hz、500 μ s、53 mA であって、NC リニアックで 400 MeV ま

で加速される。そうして、電荷交換薄膜を通して RCS へと入射される。RCS のビーム径方向位相空間の大きなアクセプタンスは、空間電荷効果を最小にするために万遍なくビームで満たされる。ビーム進行方向位相空間については、三角関数的に変化する磁場が自動的に同じような効果をもたらす。入射されるビームにおいては、リングの 1.34 MHz 加速高周波で受け入れることのできない位相のビームは予めリニアックの方で間引きされており、そのためビーム進行方向にはすべてのリニアックからのビームを受け入れることができる。このように、従来の断熱捕獲法では避けることのできなかつたビーム損失の問題を解決している。リング内の 2 個のバケツはこのようにして 500 μ s かけてビームで満たされる。

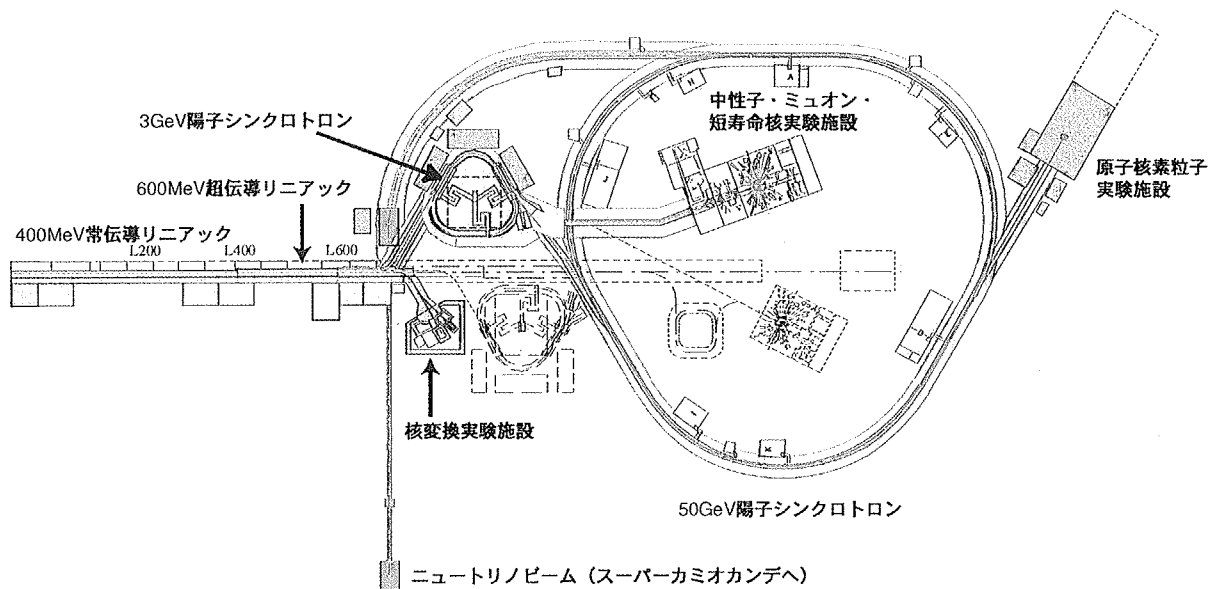


図 3.1 統合計画加速器複合体の配置。破線の施設は将来の増強時に整備される。

四極磁石や偏向磁石の磁場は 25 Hz という速い周期で三角関数的に振動する。集束四極磁石のセット、発散四極磁石のセット、偏向磁石のセットはそれぞれ別々の共振回路網で駆動され、一つの共振回路網ですべての磁石を駆動するのと比較して多くの調整機能を有する。ここで、500 μ s という入射時間は、25 Hz の周波数で三角関数的に変化する磁場がビームを受け入れることのできる時間である。各周期で 8×10^{13} 個の陽子が加速される。

こうして速く振動する磁場によって加速された 2 個のバンチは 50 GeV のシンクロトロンに 4 回入射され、その結果、図 3.2 に示されるように 8 個のバンチ (3.2×10^{14} ppp) となって加速されていく。2 個のバケツは速い取り出し用のキッカーが立ち上がるに十分な時間があるように開けておいてある。1 回の加速サイクルを図 3.3 に示す。0.12 秒の入射の後 1.9 秒かけて 50 GeV まで加速し、遅い取り出しの場合にはそこで 0.7 秒かけてビームを取り出すこととなる。1 回の周期は減速時間 0.7 秒を加えて 3.42 秒で終わることとなる。

第一期の加速器複合体は JHF の加速器と共通点が多いので、詳細は JHF の加速器の設計研究報告[2-5]を参照願いたい。主たる相違は、統合計画のリニアックがずっと強力であり、第二期に多くの可能性を残すところにある。また、リニアックの高エネルギー部即ち 400 MeV から 600 MeV に超伝導空洞(SCC)を採用したことは特筆すべきであろう。

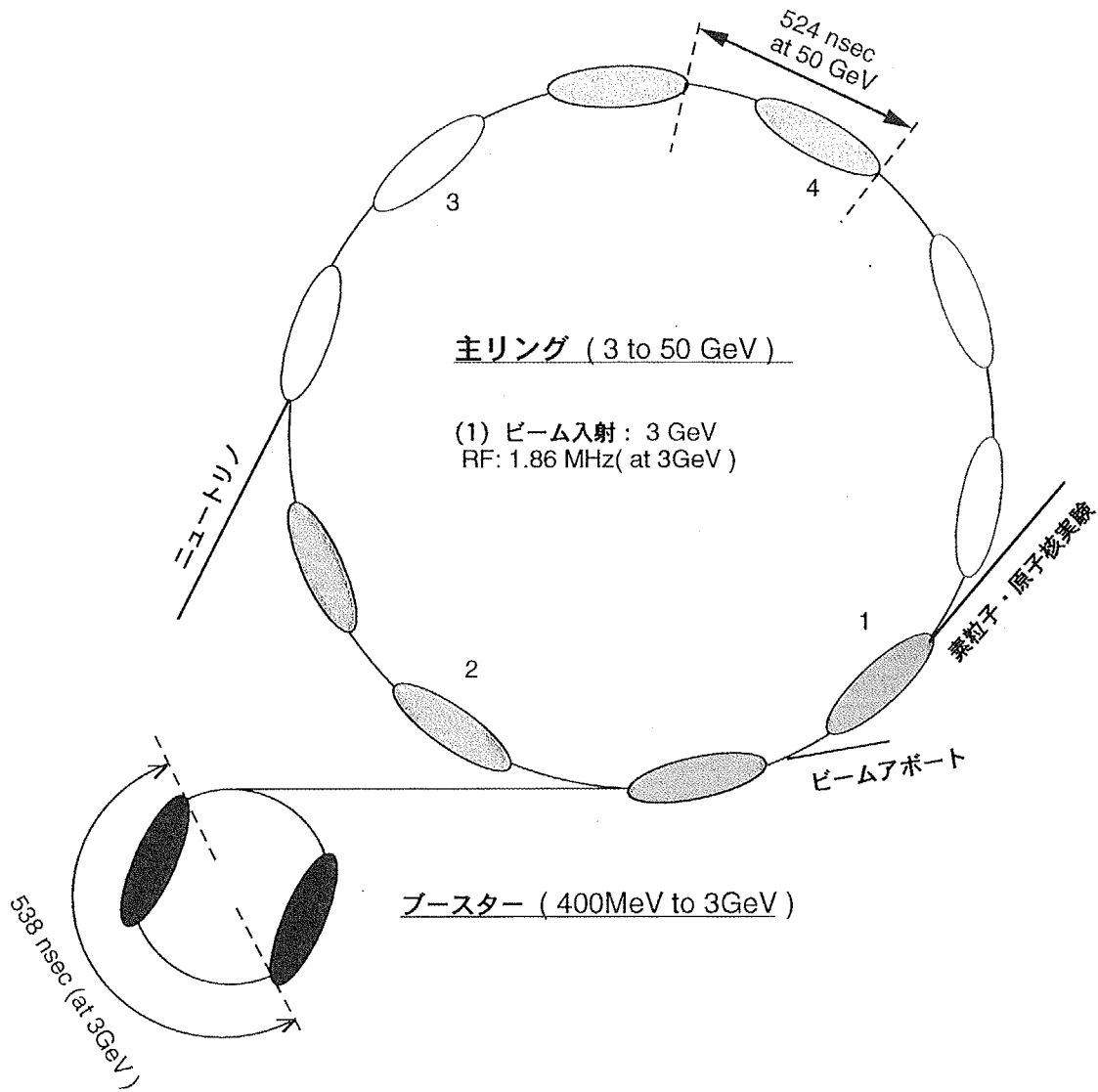
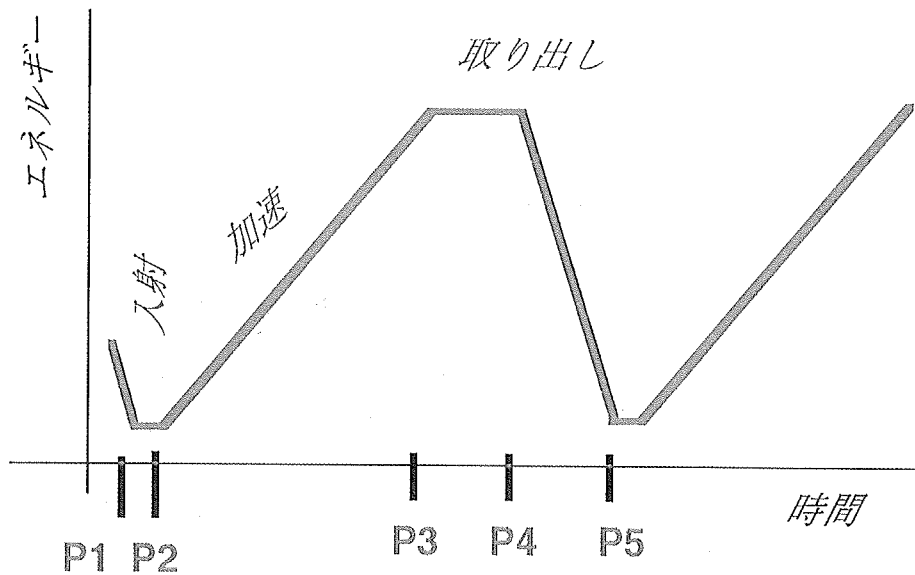


図 3.2 RCS から 50 GeV リングへの入射方式



| | |
|----------------|--------------|
| P1 - P2(入射) | 0.12 s |
| P2 - P3(加速) | 1.9 s |
| P3 - P4(取り出し) | 0.7 s |
| P4 - P5 | 0.7 s |
| 合計 | 3.42 s |
| 50GeV での遅い取り出し | |
| デューティ | 0.20 |
| 平均ビーム電流 | 15.6 μ A |

図 3.3 50 GeV リングの典型的な加速サイクル

3.3 リニアック

図 3.4 に NC リニアックの加速方式を表 3.2 にその主要パラメータを示す。3.2 節で述べたように、リニアックは二つの使命を持っている。即ち、その第1は RCS に入射することであり、第2は直接 ADS にビームを送ることである。ここで提案されている加速方式は、KEK および原研を始めとしてその他の研究機関での最近の開発研究結果に立脚している。

KEK での開発研究はもともとの大型ハドロン計画(JHP)[6]の 1 GeV リニアックのためになされたものである。JHP とは 1 GeV のリニアックと蓄積リング（ビーム圧縮リングでもある）からなる加速器複合体をその基盤設備としていたものであった。その成果は以下のように纏められる。

- 1) 体積生成型負水素イオン源は、セシウムなしで尖頭電流 16 mA、規格化 90 % エミッタンス 0.5 π mm•mrad を達成した。

- 2) 2個のソレノイドからなる低エネルギービーム輸送系(LEBT)を新たに最適化[7]。その最適化においては、種々のLEBTの方式を慎重に3次元解析し幾何収差を採り入れた解析を行った。また、ビーム試験では非常に強い空間電荷中和効果が見られ、その結果LEBT全般にわたって、高輝度が維持されていた。
- 3) エネルギー 3 MeV、周波数 432 MHz の高周波 4 極(RFQ)リニアックに対しては新たに π モード安定化ループ(PISL)[7,8]という電磁場安定化法が発明された。このPISLの採用でRFQとしての世界最高エネルギーが達成された。しかし、透過率に関してはその理論値が95%であったのに、わずか82%しかなかった。この理由は現在調査中。
- 4) エネルギー 5.3 MeV、周波数 432 MHz のドリフトチューブリニアック(DTL)[9]。ここでは、永久磁石(NdBF_e)の4極磁石が使われていた。その大電力試験は設計値よりもさらに50%高いところで行われた。負水素ビームによるビーム試験は現在進行中であるが、その尖頭電流は9.6 mA しかなく[10]、この悪い透過率については現在調査中。
- 5) 環結合構造(ACS)型空洞[11]の世界初の大電力試験。これは理論、実験両面にわたり、この構造の高周波特性を徹底的に研究した結果可能となったものである。
- 6) 5.5 MW のLバンド高周波源。これはパルス幅 600 μ s、繰り返し 50 Hz というものであり、クライストロンは巨大な線型変調器[12]によって駆動されている。

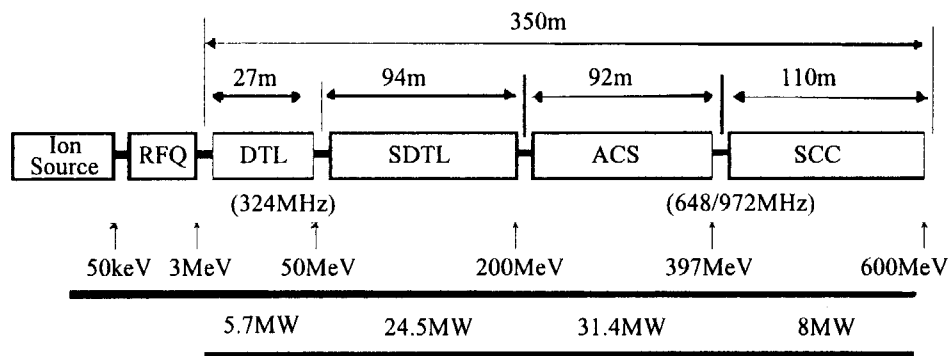


図 3.4. 600-MeV リニアックの加速方式。20 m 長のマッチングセクションがSDTLとACSの間に挿入される。

表 3.2. 600-MeV リニアックの主要パラメーター

| | |
|--------------------------|-----------------------------|
| エネルギー | 600 MeV |
| 繰り返し | 25 Hz |
| ビームパルス幅 | 500 μ s |
| 間引き率 | 56 % |
| RFQ, DTL, SDTL の周波数 | 324 MHz |
| CCL の周波数 | 972 MHz |
| 尖頭電流 | 50 mA |
| リニアック平均電流 | 625 μ A |
| 間引き後の平均電流 | 350 μ A |
| 全長 | 350 m (393 m ディバンチャー付き) |
| <u>H⁻イオン源</u> | |
| 方式 | 体積生成型 |
| 尖頭電流 | 53 mA |
| 規格化エミッタンス (90%) | 1.5 π mm \bullet mrad |
| 引き出しエネルギー | 50 kV |
| <u>RFQ</u> | |
| エネルギー | 3 MeV |
| 周波数 | 324 MHz |
| <u>DTL</u> | |
| エネルギー | 50 MeV |
| 周波数 | 324 MHz |
| 集束4極磁石 | 電磁石 |
| タンク全長 | 27 m |
| タンク数 | 3 |
| <u>SDTL</u> | |
| エネルギー | 200 MeV |
| 周波数 | 324 MHz |
| タンク全長 | 66 m |
| タンク数 | 31 |

表 3.2. 400-MeV リニアックの主要パラメーター (続き)

ACS

| | |
|-------|---------|
| エネルギー | 397 MeV |
| 周波数 | 972 MHz |
| タンク全長 | 68 m |
| タンク数 | 32 |

SCC

| | |
|---------------|-----------------|
| エネルギー | 600 MeV |
| 周波数 | 648 または 972 MHz |
| タンク当たりのセル数 | 7 |
| モジュール当たりのタンク数 | 2 |
| クライオモジュール数 | 21 |
| クライオモジュール全長 | 110 m |

高周波源 (324 MHz)

| | |
|------------------------|--------|
| クライストロン数 (RFQ 用を含む) | 20 |
| 飽和高周波電力 (1 クライストロン当たり) | 2.5 MW |
| 全高周波尖頭電力 | 27 MW |

高周波源 (972 MHz)

| | |
|------------------------|-------|
| クライストロン数 | 9 |
| 飽和高周波電力 (1 クライストロン当たり) | 5 MW |
| 全高周波尖頭電力 | 31 MW |

高周波源(SCC 用)

| | |
|------------------------|--------|
| クライストロン数 | 21 |
| 飽和高周波電力 (1 クライストロン当たり) | 0.6 MW |
| 全高周波尖頭電力 | 8 MW |

原研での研究開発は NSP の 1.5 GeV リニアック[13]に対して行われてきた。このリニアックはその高い平均電流によって特徴づけられる。大強度で高デューティを確保するために RFQ、DTL とともに 200 MHz という低い周波数を採用している。この研究開発の成果は以下のように纏められる。

- セシウムを使ってであるが、尖頭電流 21 mA の負水素イオン電流が 33 mA/cm²

- の電流密度、デューティーファクター 5% で得られた[14]。
- 2 MeV の RFQ リニアックは 10% (ビームパルス幅 1ms、繰り返し 100 Hz) のデューティーで 70 mA の陽子尖頭電流を加速した。1% のデューティーでは (ビームパルス幅 1ms、繰り返し 10 Hz) 100 mA の尖頭電流を加速した[15]。
- DTL の最初の 9 セル部を大電力試験し、20% および 50% のデューティーに対しそれぞれ 2 MV/m、1.7 MV/m の加速電場が得られた。
- 600 MHz の SCC の開発は KEK との密接な協力で推進されてきた。なかでも、図 3.5 に見るように $\beta = 0.5$ (β は粒子の速度の光速に対する比) の加速構造に対し、8.8 MV/m という世界最高加速電場を達成できたことは特筆すべきである (最大表面電場 44 MV/m に相当) [16]。ここでは、電解研磨法など KEK のトリスタンで開発され使用された表面処理法が応用されている[17]。

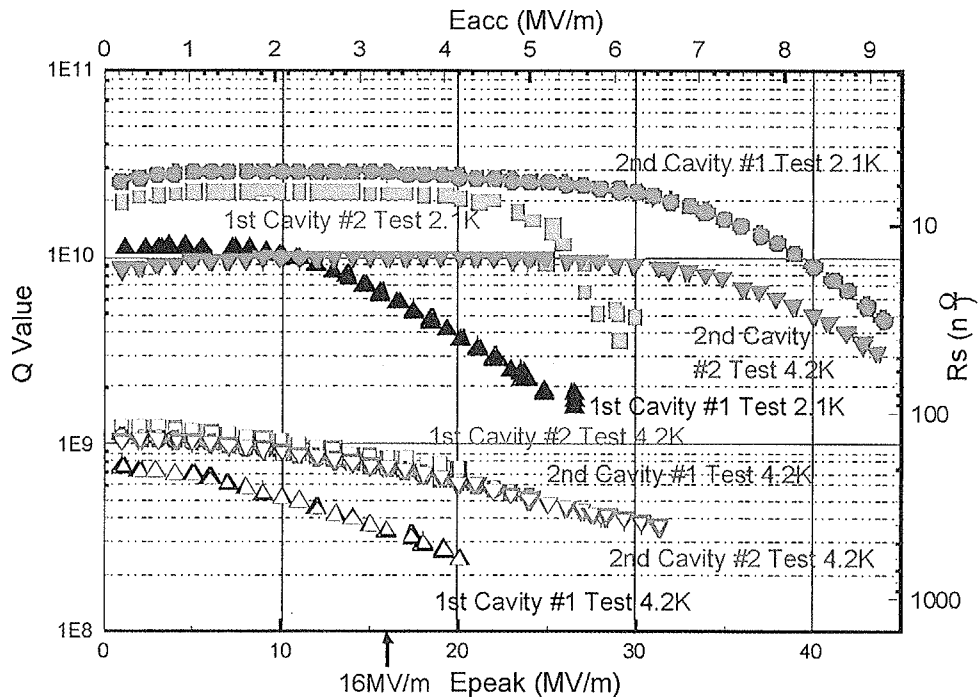


図 3.5 2 個の原型空洞の試験結果 ($\beta = 0.5$) ; 最大表面電場 (E_{peak}) の関数として Q 値をプロットしてある。

リニアックの設計は KEK および原研で行われた上記のリニアックの開発過程で培われた知見に基づいている。200 MeV までは基本的に JHF と同じ設計である。実際、KEK は 60 MeV までの建設を既に始めており、それは RFQ リニアック、DTL と SDTL の最初の 2 個のタンクからなる。これは統合計画にとっても最上流部としてそのまま使われる予定である。200 MeV から 400 MeV までは結合空洞リニアック(CCL) となる。その詳細設計は文献[2-4,18]を参照されたい。400 MeV から 600 MeV までは SC リニアックであって、原研での開発を基本とする。

一つの大きな問題はイオン源の将来到達しうる性能をいかにして予測するかで

ある。実際、我々の当初の予測に反して体積生成型 H-イオン源の輝度はかなり高いものであった。これは主として LEBT における空間電荷効果中和現象の結果である。可能な限り高い尖頭電流を望む一方、将来の開発によってどこまでそれが上がりうるかに確固たる回答がない以上、我々は将来の尖頭電流の増加に関し可能な限り対応可能な設計をしておく必要がある。

このことに関連して、セシウムの効果について一言述べておく必要がある。負イオン源の性能がセシウムの導入によって飛躍的に改善され、ビーム電流の増加ばかりでなくガス流量の削減やビーム電流値の安定性にも寄与していることが知られている。しかし、セシウムが化学的に活性なことから RFQ 内の放電が心配される。いづれにしても、セシウムの効果に関しては更なる詳細な研究が待たれる。

もとの JHF での RFQ の設計尖頭電流値は 30 mA であり、これでは 1 MW のビーム出力にとっては不十分である。上述した 60 MeV リニアックの一部としてこの 30 mA の RFQ の建設が始まっている。他の加速器の構成要素と異なり、RFQ の設計尖頭電流は非常にきわどいパラメーターであって、その設計値を上回った運転をしようとする、途端にビーム透過率が落ちてくる。それ故、設計値を大きく上回る運転は望めない。

そこで、以下の方針を採ることとする。普通、複雑な加速器システムのビーム電流は、数年かけてビームの実験研究を繰り返し、設計値に近づけていくというのが通常のプロセスであり、それは避けられないことでもある。特に、統合計画のような非常に意欲的な計画にとってはますますそうである。したがって、上記の 30 mA の RFQ を使って全加速器システムの試運転を開始するというのは合理的な計画であろう。

実際、この 30 mA を全加速器システムを通して加速していくことができるまでには多くのことを学ぶに違いない。例えば、RFQ から出てきたビームの性質を測定し、またそれがビーム損失にどのように影響を与えているかを見ることは非常に有用である。それにまた、RFQ の設計はいくつかの未解決の問題を抱えており、論争的となっている。その解決にはビームを使った実験が不可欠である。このような実験による問題解決の好例は、上述した 432 MHz の RFQ であろう。この RFQ のビーム透過率は設計値よりもかなり低かったのである。したがって、30 mA の RFQ を使った全システムの経験をもとに、尖頭電流 50 mA を目指す新しい RFQ の設計、製作を行うというのが我々の計画である。

第二期の運転では、デューティを上げていく必要がある。そこでは、加速構造の効率的冷却や放電の防止などいくつかの技術的問題が考えられ、それは製造技術の改善や大電力試験で一つ一つ解決していくしかない。新 RFQ リニアックの更なる増強には、NSP の高デューティ RFQ の開発経験が大きくものを言うであろう。

ビーム電流に対する対応可能性という観点から DTL のドリフトチューブ内の四極磁石は電磁石を選ぶしかない。永久磁石では、その磁場勾配を将来の尖頭ビーム

電流の増強に応じて調整していくことができないからである。一方、DTL の周波数については、エミッタンス増加の抑制という観点からは高ければ高いほどよいので、四極電磁石をドリフトチューブ内に装着できるという条件下での最も高い周波数という意味で 324 MHz を選んだ。

統合計画第一期においては上記 1) から 2) で述べた 5.3 MeV の試験リニアックと同じ型のイオン源、LEBT および RFQ リニアックを使う予定である（周波数は別として）。設計値より低いビーム透過率となった理由を十分に解明し、そうして得られた新たな知見をもとに改善された設計プログラムを使って、RFQ リニアックの再設計がなされる。上記の試験リニアックで得られたイオン源からのビーム輝度を使うと上述 3) の 432 MHz の RFQ リニアックのアクセプタンス $1.5 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ に対しても $3 \times 16 \text{ mA}$ の尖頭電流が十分に期待できる。これは既に要求される値にかなり近くなっている。

リニアックのもう一つの特色は 50 MeV 以上で分離型 DTL(SDTL)[19]を使用することであろう。このアイディアは 50 MeV 位から上ではもはや各ドリフトチューブ(DT)に四極磁石(QM)を装着する必要がないことから発している。DT から外に、したがってタンクの外に QM を出すことによって、DT の形、大きさが QM を装着するという縛りから開放され、シャントインピーダンスを最大にするために最適化することができることとなる。かくして、図 3.6 に示される如く SDTL のシャン

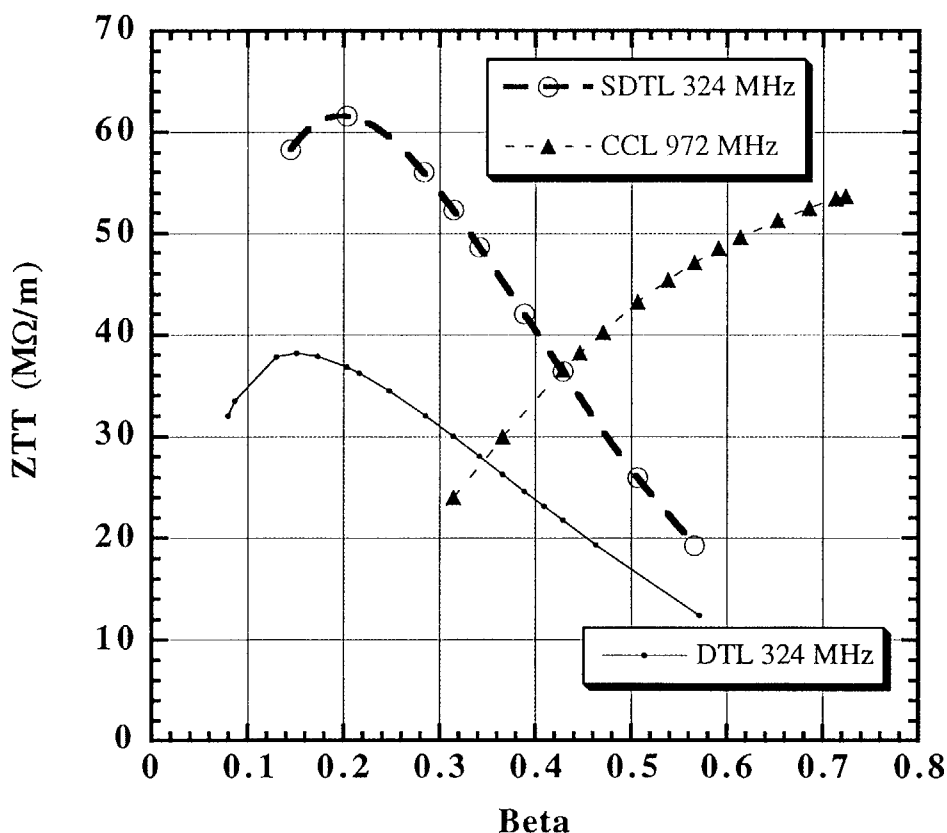


図 3.6 DTL, SDTL, ACS(図では CCL と書かれている)のシャントインピーダンス

トインピーダンスは従来の DTL に比較して 40 % から 65 % 大きくなる。

SDTL から後は CCL が使われるわけであるが、その周波数は 648 MHz か 972 MHz となる。CCL の中で最も有望な候補は ACS[11] であろう。ACS はその性能が非常にバランスがとれていて、シャントインピーダンスや結合係数は広く使われている側結合型空洞(Side-Coupled Structure, SCS)と同等でありながら、軸対称性を保持している点が特徴である。軸対称性はハローの発生を抑えるという観点から重要である可能性が指摘されている。ACS は、その周波数を 3/4 に下げねばならないことを除いて、開発が完了している。SDTL から CCL へ変えるエネルギーについてはもう少し検討が必要である。ビーム力学上およびコスト最適化という観点を十分考慮して決定されることとなる。

統合計画リニアックの決定的な特徴は 400 MeV 以上のエネルギーで SCC を使うことである(図 3.7 参照)。SCC はその大きなビーム管径と高い電力効率が特徴の、大強度加速器にとって有望な選択肢であって、前者はビーム損失の削減に、後者は運転費の削減に大きく寄与するはずである。電子や重イオンの加速には SCC リニアックがいくつか使われているものの、実際に運転されている陽子加速器で SCC が使われた例は未だない。電子リニアックと異なり、陽子の速度はその加速に従いどんどん増えていく。陽子リニアックの SCC は異なる β 値に対応していくつかのセクションに分割し、加速効率の保持とエミッタンス増の抑制に意を用いねばならない。

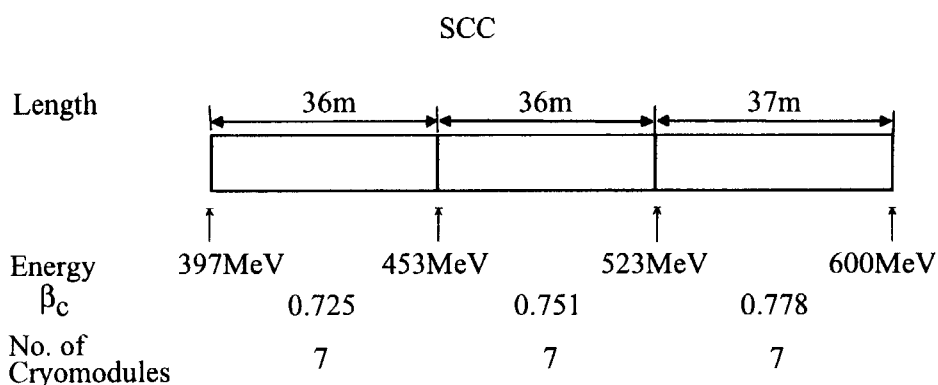


図 3.7 SC リニアックの主要パラメータ。

統合計画においては SCC はパルス運転されるので、電力の節約という大きな長所を失うこととなる[1]。しかしながら、統合計画のビームパルス幅は十分に長いので、建設費を含んだとしても、超伝導と常伝導の費用比較はかなり拮抗したものとなる。そうすると、SC の他の長所が注目されてくる[1]。すなわち、高い加速電場と大きな蓄積エネルギーであって、前者は短い加速器長にすることに寄与するし、後者は安定な運転に有利である。ここで強調しておきたいのは、従来は存在してい

た SC 技術の信頼性の問題は最近の精力的な研究開発によって多く解決されていることである。その典型的な例は図 3.5 に代表される上述の研究開発である。SCC 用の大電力入力カップラーに関する最近の成果は特筆すべきものがある[20]。

それにしても、最も開発を要する問題は SCC のパルス運転に伴う問題の克服であろう。ローレンツ力による離調、微小音響振動問題、加速電場の位相／振幅制御など、特に低エネルギー部ほど大きな問題となりうる。大きなビーム負荷の下でのパルス運転のためには、SCC の機械強度の改善やデジタルフィードバック、フィードフォワードを駆使した高度な高周波制御技術の開発などが特に意を用いるべき技術課題である。 $\beta = 0.6$ 用の 5 セル空洞からなる SC クライオモジュール（加速ユニット）の設計が終わり、パルス運転性能の試験を期して製作される。

RCS への入射に要求される極めて厳しい条件を満たすためには、非常に高い精度の位相／振幅制御が求められる。特に、 $\Delta p/p$ に対しては 0.1 % という精度が必要である。そのため、第一期においては、SCC リニアックを RCS への入射に使うことは想定しない。リング入射に必要な SCC リニアックの技術課題が十分に解決された後、中性子源の増強計画に組み込まれることとなる（5.2 節参照）。

3 MeV の RFQ の後に新しく考案された高周波チョッパーが装着される。チョッピング（間引き）も解決せねばならぬ難しい開発課題の一つである。今までのところ、満足すべきチョッパーは未だ実現していない。進行波型チョッパーは構造としては有望に見えるけれども、その電源は高周波チョッパーよりも難しいかもしれない。現在の高周波チョッパーの設計では、リニアック全体でのビーム損失を 1 % に抑えることのできる性能を持っている[21]。

このチョッパーに付随するスクレーパー系ですべての偏向ビームを止めることはそのビーム出力からしてとても不可能である。したがって、何らかの予備チョッピングが LEBT に必要である。ここでも、新しく考案された方法[22]に期待している。それは 3.5 節で詳述される新磁性材を応用して実現される誘導リニアックを使用して、ビームにエネルギー変調をかけようというものである。このシステムでは、RFQ のフィルター効果を最大限利用するのである。

3.4 ラティス設計

3.4.1 50 GeV シンクロトロン

50 GeV シンクロトロンの主要パラメーターを表 3.3 に掲げる。そのラティスは以下の要請を満たすべく設計されたものである。まず第 1 に、素粒子原子核物理実験ホールにビームの遅い取り出しを行うため～120 m 長の直線部を一つ必要とする。もう一つの～120 m 長直線部はニュートリノ実験のための速い取り出しと高周波加速のために使われる。さらに、入射とビームコリメーションのために～120 m 長の直線部をもう一つ用意する。第 2 の要請はトランジションのないリングとすることであって、そのためにはトランジション γ_T を虚数にする、すなわち運動量コンパクト

ション因子 α を負にする必要がある。この件については後にこの節で詳述する。第3は、ベータトロン振動の位相進みを 90° 以下にすることであって、これは自己空間電荷効果がビーム包絡面の変調と強く共鳴的に結合してしまうことを避けるためである。第4にできるだけ調整代を残しておくことである。すなわち、運動量コンパクトション因子 α はその代表値は -0.001 に設定してあるものの、 $1/v_x^2$ から -0.001 まで可変であるし、水平および垂直ベータトロン振動数(チューン)はそれぞれ $v_x=22\sim 22.8$ 、 $v_y=17\sim 23$ の間可変にしてある。

表 3.3. 50 GeV シンクロトロンの主要パラメーター

| | |
|-----------------|----------------------------------|
| ビーム強度 | 3.2×10^{14} |
| 繰り返し | 0.3 Hz |
| 平均ビーム電流 | 15.6 μ A |
| ビーム出力 | 0.78 MW |
| 全周 | 1567.5 m |
| 磁気剛性率 | 12.76 ~ 170 Tm |
| ラティスセル構造 | 3-セル DOFO x 8 モジュール + 3-直線部セル |
| チューンの代表値 | (22.3, 22.25) |
| 運動量コンパクト因子 | - 0.001 (虚数の γ_T) |
| 全セル数 | 93 |
| 偏向電磁石総数 | 96 (5.85 m) |
| 磁場強度 | 0.143 ~ 1.9 T |
| 四極電磁石総数 | 216 (0.86 - 1.96 m) |
| 最大磁場勾配 | 18 T/m |
| 加速周波数倍数 | 10 |
| 加速周波数 | 1.86 ~ 1.91 MHz |
| 平均周回ビーム電流 | 13.1 A |
| 高周波電圧 | 280 kV |
| 空洞当たりの高周波電圧 | 47 kV (ギャップ当たり 15.6 kV) |
| 空洞数 | 6 |
| 入射時のビームエミッタンス | 54 π mm \cdot mrad |
| 取り出し時のビームエミッタンス | 6.1 π mm \cdot mrad |

さて、虚数のトランジション γ_T というのはこのラティスの特筆すべき特徴である。

$$\Delta T/T = \eta (\Delta p/p)$$

によって定義されるはみ出し因子は一方

$$\eta = \alpha - 1/\gamma^2$$

によって与えられる。ここで、 T および p はそれぞれビームの周回時間および運動量である。シンクロトロン振動数はこの η の平方根に比例するからそれが0になった場合にはこの振動はもはや安定ではなく、ビーム損失を招きやすいのである。このような、 η が0となるエネルギーと γ の値は、それぞれトランジションエネルギーおよびトランジションガンマ (γ_T) と呼ばれる。従来型の FODO ラティスでは運動量コンパクション因子 α はだいたい $1/v_x^2$ で与えられるから、 γ_T はほぼ v_x に等しくなる。ここで、 v_x の典型的な値は、リングの平均半径 R をベータatron関数の平均値 β_{av} で割った R/β_{av} である。数 10 GeV の陽子リングの半径はだいたい 200~300 m であり、 β_{av} は 10 m のオーダーだから、 γ_T は間の悪いことにちょうど 20~30、すなわちトランジションエネルギーは 20~30 GeV となってしまう。これは数 10 GeV への加速途中でどうしても横切らざるを得ない値である。

運動量コンパクション因子 α は分散関数を偏向半径 ρ で割ったものの線積分であるから、いくつかの偏向磁石の所で分散関数を負の値にできれば、 α を負の値にできる。そのためにはいくつかの方法があるけれども、ベータatron関数に変調をかけるのはいろいろ弊害が多いので、図3.8に示すような偏向磁石を抜いてしまう方法をとることにした。ラティスの真ん中の2個の偏向磁石を抜いてしまうことによって、他の偏向磁石のところで分散関数が負の値をとるようになっている様子が分かるであろう。

四極磁石の整列誤差の標準偏差 σ を 0.3 mm とし、そこに 2σ 以上の誤差はないものと仮定して計算した COD を使うと、 $\Delta p/p = \pm 0.67\%$ に対して $81 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ のアクセプタンスが得られる。一方、ビーム力学的口径(dynamic aperture)は、色収差(chromaticity)補正のための六極磁石の非線形効果を取り入れたとしても、まだ $300 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ を確保している。これらは、想定されているエミッタンス $54 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ と比較して十分に大きな値である。しかしながら、このとき表 3.4 に示すような大きなビーム口径を必要とすることに注意しなければならない(ここでは 1 mm の COD を仮定してある)。

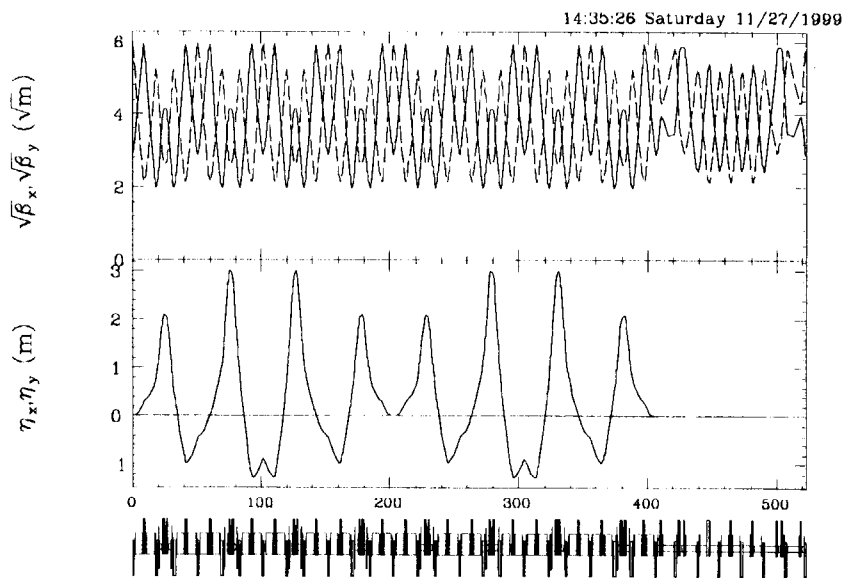


図 3.8. 50 GeV リングのベータートロン振幅と分散関数。実線は水平方向、点線は垂直方向のものである。分散関数も示してある。8 個のモジュールと 1 個の直線部とでリングの 1/3 周となっている。

表 3.4. 統合計画シンクロトロンのビーム口径

| | 水平方向 | 垂直方向 |
|----------------|--------|--------|
| 50-GeV シンクロトロン | | |
| 偏向磁石 | 120 mm | 100 mm |
| 四極磁石 | 120 mm | 120 mm |
| 3-GeV シンクロトロン | | |
| 偏向磁石 | 190 mm | 177 mm |
| 四極磁石 | 240 mm | 240 mm |

3.4.2 3 GeV シンクロトロン

3 GeV シンクロトロンの主要パラメータを表 3.5 に示す。ラティスの設計は以下の点を考慮に入れて行われた。まず第 1 に、取り出し系、入射系、高周波系のために十分に長い直線部を用意すること。なかでも、3 GeV ビームの取り出しには少なくとも 6 m の長さが必要である。一方、高周波空洞にはせいぜい 10 m の長さがあれば十分である。これは最近、新磁性合金を使った高加速勾配空洞が開発された結果である。第 2 に、このシンクロトロンは速い加速を繰り返すので、偏向電磁石の磁場強度をせいぜい 1.1 T に抑えたことである。同じ理由によって四極磁石の最大磁場勾配も 5 T/m に抑えてある。第 3 に、運動量コンパクション因子を調整して、トランジションエネルギーを取り出しエネルギー 3 GeV よりも高くしたことで

ある。こうすることによって、3 GeV リングをブースターとして使ったとき、ブースターと主リングの間で進行方向のマッチングがとりやすくなる。このようにしないときには、ブースターから取り出す寸前に高周波電場を急激に小さくしなければならず、難しい問題を抱え込むこととなる。

この設計のラティスは 50GeV リングと同じく 3 回対称である。曲線部は 2 個のモジュールからなっているが、各モジュールは 3 個の FODO セルの中で真ん中のセルの 2 個の偏向磁石を抜いたものである。このようにして、運動量コンパクション因子を調整可能にしてある。3 個の直線部はそれぞれ取り出し、高周波空洞、入射のために使われるが、入射部にはビームコリメーション系を用意することとなる。

ベータトロン振動の位相進みはここでも 90° 以下にするようにしてある。調整可能性もここでもまた、このラティスの重要な特性であり、チューンをその代表値 $\nu_x = 7.35$ と $\nu_y = 5.8$ のまわりに ± 0.5 も可変にしてある。トランジションエネルギーを高くするために、運動量コンパクション因子は 0.013 にしてある。ベータトロン振幅と分散関数を図 3.9 に示す。

表 3.5. 3 GeV RCS の主要パラメーター.

| | |
|-----------------|-----------------------------------|
| エネルギー | 3 GeV |
| ビーム強度 | 8×10^{13} ppp |
| 繰り返し | 25 Hz |
| 平均ビーム電流 | 333 μ A |
| ビーム出力 | 1 MW |
| 全周 | 313.5 m |
| 磁気剛性率 | 3.18 ~ 12.76 Tm |
| ラティスセル構造 | 3-セル1 DOFO x 2 モジュール + 3-直線部セル |
| チューンの代表値 | (7.35, 5.8) |
| 運動量コンパクト因子 | 0.013 |
| 全セル数 | 27 |
| 偏向電磁石総数 | 24 (3.05 m) |
| 磁場強度 | 0.27 ~ 1.1 T |
| 四極電磁石総数 | 60 (0.5m, 0.75 m, 1 m) |
| 最大磁場勾配 | 5 T/m |
| 加速周波数倍数 | 2 |
| 加速周波数 | 1.36 ~ 1.86 MHz |
| 平均周回ビーム電流 | 9 ~ 13.1A |
| 高周波電圧 | 420 kV |
| 空洞当たりの高周波電圧 | 42 kV (14 kV/ギャップ) |
| 空洞数 | 10 |
| 入射時のビームエミッタンス | 144 π mm \cdot mrad |
| 取り出し時のビームエミッタンス | 54 π mm \cdot mrad |

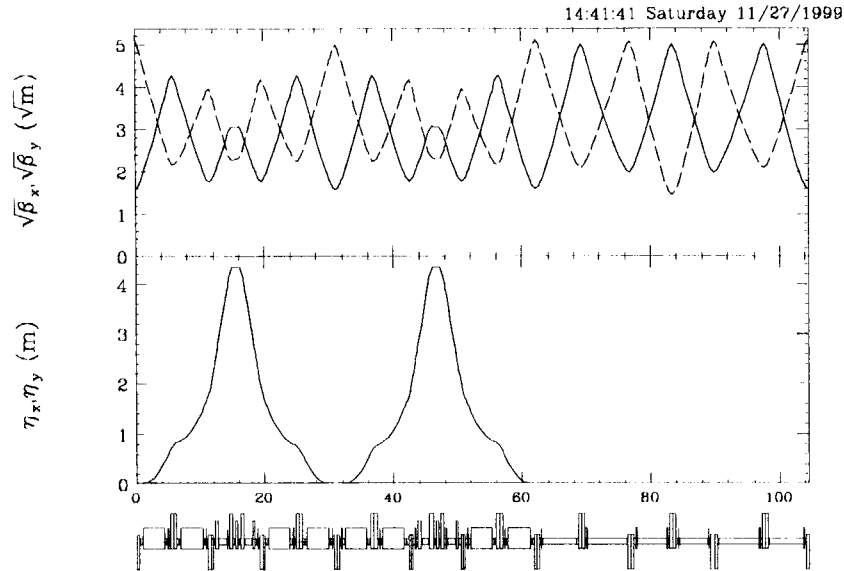


図 3.9. 3 GeV リングのベータートロン振幅と分散関数。実線は水平方向、点線は垂直方向のものである。分散関数も示してある。ここでは、リングの 1/3 周を示してある。

3.5 シンクロトロンのための研究開発

JHF の加速器のための研究開発計画は、その大強度ビームの加速にともなう種々の困難を克服するためのものである。それは以下の項目から成り立っている。

- 1) 高周波加速空洞
- 2) 50 GeV シンクロトロン用電磁石電源
- 3) 3 GeV シンクロトロン用電磁石電源
- 4) 3 GeV シンクロトロン用真空チェンバー

高周波加速系は極めて大きいビーム負荷に対しても安定に運転ができるものでなければならない。またそれは、速い加速を繰り返すために、高い加速勾配、少なくとも 10 kV/m、できればもっと高い加速勾配を生成できるものでなければならない。各シンクロトロンの周回電流はほぼ 10 A にも達するので、加速系はいかなるビーム不安定も抑えこむ機器を備えていなければならない。

50 GeV シンクロトロン¹⁾の電磁石電源がもう一つの開発項目である。というのは、無効電力をそのままにしておいたのでは、統合計画の電力系のみならず、原研東海研敷地内外の他の施設にも雑音として悪影響を及ぼすからである。

3 GeV シンクロトロン²⁾の電磁石電源については、次の点が課題となる。3.2 節で述べたように、3 種類の電磁石がそれぞれ各々の共振回路網で駆動される。したがって、この 3 個の系を同調させるには、精密な振幅位相制御が必要となる。特にその位相制御は難しい問題である。

また、3 GeV の RCS ではその 25 Hz という速い振動数のため、渦電流の悪影響を避けるには、セラミックスの真空チェンバーを使わざるをえない。その一方で、ビーム電流の高周波成分を遮蔽するために、銅片や銅メッキなど何らかの方法を用いる必要がある。RAL の ISIS ではすでにこのような真空チェンバーの量産に成功しているが、信頼性の高い量産技術の確立にはまだ努力を要するであろう。

統合計画の RCS は第一期においてさえ RCS としては極めて高いエネルギーと速い繰り返しによって特徴づけられる。この選択肢をとった場合に要求される加速の速さは従来のフェライトを使った空洞ではとても達成できるものではない。ましてそれに大きなビーム負荷があるときにはなお更である。フェライト材はその優れた透磁率と同調可変性のために陽子シンクロトロンでは広く使われているが、未だに以下の困難を抱えている。すなわち、

- 1) その飽和磁場がどちらかというといふと低いため、シャントインピーダンスに比例する μQf 値が動作磁場すなわち加速勾配を上げるにしたがって急激に低下してくる。そのやや低いキュリー温度と相まって（代表的には 100~200°C）、加速勾配の上限が約 10 kV/m に抑えられてしまう。
- 2) フェライトを使った空洞の同調をとるにはその透磁率を調整するわけであるが、そのためにはバイアス回路を使ってフェライトに直流磁場をかけねばならない。こうして出来上がった高周波系は、ビームから見ると非常に複雑で、大きなビーム負荷があるときには問題の解析が非常に困難となる。さらに悪いことに、バイアス電流に対する系の応答がしばしば遅すぎて、速い繰り返しについていけない場合もある。
- 3) Q 値が代表的には 20~30 と高いため、結合バンチ不安定性を引き起こす。大きなビーム電流の場合には、何らかの解決策が必要となる。

なかでも、問題 1) は深刻で、それは高エネルギー RCS を設計してみれば分かることだが、多くの直線部を用意して速い加速に備えねばならず、結果として大幅なコスト増を招くこととなる。

磁性合金 (MA) は、代表例として FINEMET が上げられるが、極めて有

望な素材であって、上記の問題を一挙に解決することが期待されている[23-25]。 μQf 値の高周波磁場依存性を代表的なフェライトの場合と図 3.10 で比較してある。フェライトの μQf 値が急激に低下していくのと対照的に FINEMET の場合には磁場の値の広い範囲にわたってほぼ一定である。高いキューリー温度 (570°C 程度) と冷却しやすいテーブ構造とが相まって、MA を使った加速空洞は高い加速勾配を実現するうえで有望に見える。しかも、高い μQf 値にもかかわらず、 Q 値は極めて低い (1 程度)。したがって、MA を使った空洞にあっては、同調機構が必要ではない。

このような MA を使った空洞の有用性を実際に示して見せるために、大電力試験や電子ビームを使ったビーム試験が繰り返された[23]。その中の一つは、実際に HIMAC のシンクロトロンでビーム加速試験が行われた[23,24]。高い加速勾配を得るうえでの潜在能力を試験するためには、MA の円板を水冷してその空洞に大電力を投入するというを行い、50 kV/m にも使用可能であることを示した[23]。これは、従来のフェライトの場合の数倍にも当たる。また、この値は MA そのものの限界ではなく、試験に使った高周波源の性能の上限値で決まったものである。

MA 空洞の極めて低い Q 値は障壁バケツへの応用に理想的である。そこで、もう一つの原型空洞が BNL の AGS に送られて取り付けられた。BNL で開発された空洞とともに、障壁バケツを実際に生成することにも成功した[25]。これは高エネルギー物理学日米協力の一環として行われたものである。

こうして積み重ねられた試験結果をもとに、RCS にも主シンクロトロンにも MA を使った空洞を採用することに決定した。それは、加速のためだけでなく、障壁バケツの生成のためにも、2 倍高調波空洞にも使用可能である。特に後者の二つの応用は、バンチング因子を改善することによって、空間電荷の問題および進行方向ビーム不安定性の問題を大きく改善するはずである。

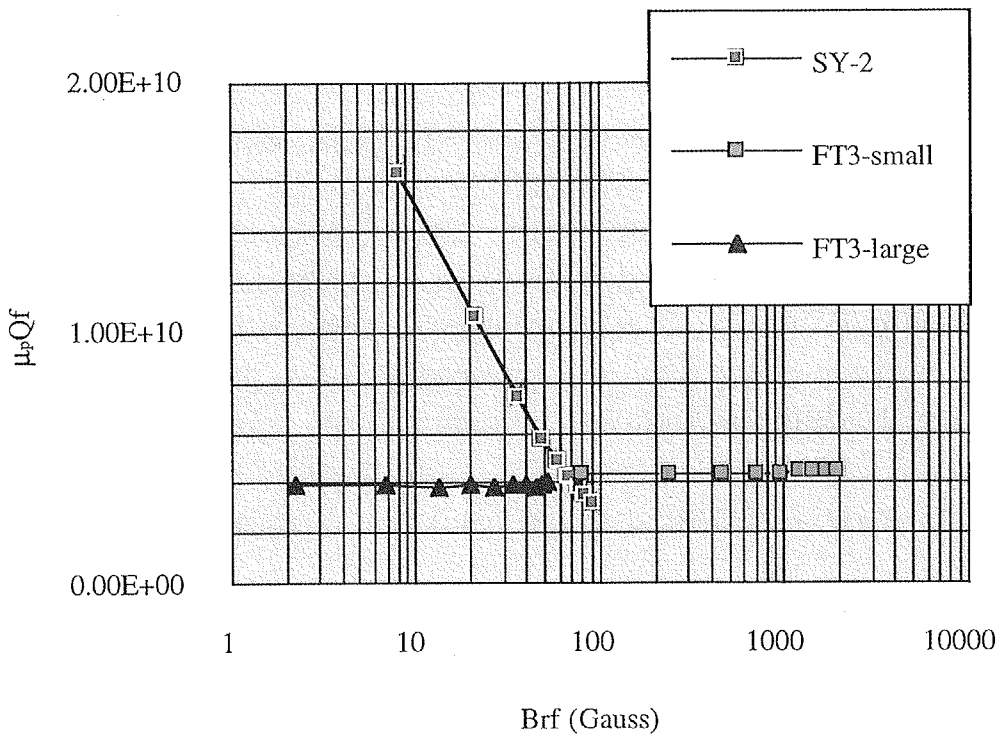


図 3.10 $\mu_p Q_f$ 値の高周波磁場依存性。代表的なフェライトコアと大きな FINEMET 片 (FT3-large) および小さな FINEMET 片 (FT3-small) の場合を比べてある。

50 GeV シンクロトロン of 電磁石電源には絶縁ゲート双極トランジスタ (IGBT) が使われる。このトランジスタはゲーティング時間が非常に速いうえで可変性に優れているので、有害な無効電力の回避に有用である。これもまた長く待ち望まれた機器ではあったのだが、大電力化 (3.3 kV, 1200 A) が達成されたのはごく最近である。大電力化のための開発は今でも続いているので、我々の電源に大量に使用することは十分に可能であろう。

3 GeV シンクロトロンのための共振回路網の原型モデルは 2 台実際に製作され性能試験に供された。試験結果では位相差を 1 mrad 以下に抑え込むことに成功した。これはベータートロンチューンの値に直すと 0.01 に相当する。

セラミックス真空チェンバーもいくつか製作され、材料およびガラス接着の信頼性の試験が行われた。また、セラミックスに金属面を生成しロウ付けするなど種々試験を行っている。

3.6 おわりに

3.5 節に記述したような研究開発を行ってきた結果、要求性能を満たす加速器の製作にかなり自信が持てる段階にまで来たといえる。しかし、ビーム損失の問題だけは別である。ほんの僅かのビーム損失でさえ、この種の大出力陽子加速器にあっては、大きな残留放射能を発生し、加速器の人間による修理、維持作業を不可能ならしめる。これは放射線遮蔽の問題よりも深刻であって、繰り返し述べてきたところである。いくつかの場所にビーム損失を局在化し、そこでは人間による修理維持不要の手だてを特に講じて、この問題に対処しようとしている。しかしいづれにしても、ビーム損失の機構は十分に解明されたとは言えず、それは統合計画において総力を上げて取り組まなければならない問題である。

ビーム試験や加速器の改善を通してこのようなビーム損失に関連する問題が解決可能であると期待して、加速器の将来の増強の可能性についても真剣に考慮している。詳細は 5.2 節で展開される。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki, "Design Issues for High-Intensity, High-Energy Proton Accelerators," Proc. 1996 Linac Conf., 592 (1996).
- [2] JHF Project Office, "Proposal for Japan Hadron Facility," KEK Report 97-3 (JHF-97-1), 1997.
- [3] JHF Project Office, "JHF Accelerator Design Study Report", KEK Report 97-16 (JHF-97-10), 1998.
- [4] T. Kato, "Design of the JHP 200-MeV Proton Linear Accelerator," KEK Report 96-17 (1997).
- [5] Y. Mori, "The Japanese Hadron Facility ", Proc. 1997 Part. Accel.Conf., 920 (1997).
- [6] Y. Yamazaki and M. Kihara, "Development of the High-Intensity Proton Linac for the Japanese Hadron Project," Proc. 1990 Linac Conf., 543 (1990).
- [7] A. Ueno et al., "Beam Test of the Pre-Injector and the 3-MeV H- RFQ with a New Field Stabilizer PISL," Proc. 1996 Linac Conf., 293 (1996).
- [8] A. Ueno and Y. Yamazaki, "New Field Stabilization Method of a Four-Vane Type RFQ," Nucl. Instr. Meth. A300, 15 (1990).

- [9] F. Naito et al., "RF Characteristics of a High-Power Model of the 432 MHz DTL," Proc. 1994 Linear Accel. Conf. (1994).
- [10] F. Naito et al., Proc. 1998 Linac Conf.
- [11] T. Kageyama et al., "Development of Annular Coupled Structure," Proc. 1994 Linear Accel. Conf. 248 (1994).
- [12] S. Anami et al., "A Long-Pulse Thyristor-Switched Modulator for the JHP Proton Linac," Proc. 1990 Linear Accel. Conf. 174 (1990).
- [13] M. Mizumoto, "A High Intensity Proton Linac Development for the JAERI Neutron Science Project", Proc. 1998 Linac Conference, Chicago, USA, 1998
- [14] H. Oguri et al, "Development of an Injector Section for the High Intensity Proton Accelerator at JAERI", Sixth European Particle Accelerator Conference, Stockholm, Sweden, 1998
- [15] K. Hasegawa et al., "Development of a High Intensity RFQ at JAERI", Jour. Of Nulc. Sci. and Tech. Vol.34, No.7,p622-627, (1997)
- [16] N. Ouchi et al., "Development of Superconducting Cavities for High Intensity Proton Accelerator at JAERI", Proc. 1998 Applied Superconducting Conf., Palm Desert, USA, 1998, to be published.
- [17] K. Saito et al., "R&D of Superconducting Cavities at KEK" Proc. Of the 14th workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan, p635 (1989)
- [18] K. Hasegawa et al., "System Design of a Proton Linac for the Neutron Science Project at JAERI" Jour. of Nulc. Sci. and Tech. Vol.36, No.5, (1999), to be published
- [19] T. Kato, "Proposal of a Separated-Type Proton Drift Tube Linac for Medium-Energy Structure," KEK Report 92-10 (1992).
- [20] S. Mitsunobu et al., "High Power Test of the Input Coupler for KEKB SC Cavity", Proc. 7th Workshop on RF Superconductivity, 735 (1995).
- [21] W. Chou et al., "Design and Test of a Beam Transformer as a Chopper" Proc. 1999 Part. Accel. Conf., THDR4 (1999).
- [22] T. Kato and S. Fu, "MEBT Design for the JHF 200-MeV Proton Linac", Proc. 1998 Linac Conf., MO4012 (1998).
- [23] Y. Mori et al., "A New Type of RF Cavity for High Intensity Hadron Accelerators with Magnetic Alloy", Proc.1998 European Part. Accel. Conf., p229 (1998)

- [24] C. Ohmori et al., "High Field-Gradient Cavities Loaded with Magnetic Alloys", Proc. 1999 Part. Accel. Conf., THAL1 (1999).
- [25] M. Fujieda et al., "Magnetic Alloy Loaded RF Cavity for Barrier Bucket Experiment at the AGS", Proc. 1999 Part. Accel. Conf., MOP81 (1999)..

4 放射線対策

大強度陽子加速器施設に対する放射線対策のガイドラインを示した。主な項目は、バルク遮蔽、土壌の放射化及び冷却水と空気の放射化である。

バルク遮蔽に対する条件は、遮蔽体表面、事業所境界におけるスカイシャインの寄与、遮蔽体外側の土壌と接する場所などにおける線量率を基準以下することである。放射線管理区域の常時人の立入る場所は放射線障害防止法に基づき、 $20\mu\text{Sv/h}$ とする。放射線管理区域の境界の線量も法に基づき 1.3mSv/3M とする（予定されている法改正を考慮した）。但し 3 ヶ月の時間は管理区域境界の外側にいる人の実際的な時間とする。事業所境界では、加速器施設の全ての寄与をあわせて $50\mu\text{Sv/y}$ とする。これは法の基準の 5% である。この値は原子力施設で採られている値と同じである。土壌の放射化に対する対策は、地下水を飲んだ人の被ばくが $10\mu\text{Sv/y}$ を超えないように定める。この被ばく量は事業所境界外側に居住する一般人に対する法の基準の 1% であり、自然の放射線による被ばくに比べて無視できる量である。境界を流れ出る地下水の放射化をこのようにするには遮蔽外側の線量率で 23mSv/h 以下にする必要がある。この値は点状のビーム損失のときで、ビームラインや加速器のリングなど一様なビームロスを仮定している場所では 2.3mSv/h とする。 23mSv/h の線量による土壌の放射化は、1 日以上半減期を持つ核種の濃度が 3.7Bq/cm^3 に対応している。

加速器施設において加速器機器やビームライン機器を人の手で保守する場合、作業員の被ばくを考えるとビーム損失は、 1W/m とする必要がある。この値は KEK の 12GeV 陽子シンクロトロンを経験から与えられた値である。加速器の入射や出射部のようにビーム損失の多いところは局所遮蔽を講じるなど別に考える。遮蔽設計はこのビーム損失を基にして行い、実際の運転時にはビーム損失をモニターするビームロスモニターでこの値を担保するようにする。 3GeV 及び 50GeV のリングは全周でのビームロスが加速電流の 0.1% を超えないこととする。この値は 1W/m に比べ十分低い値である。加速器リングの遮蔽はこの値を基に設計する。

冷却水の放射化は場所により大きく異なる。ビームダンプや 2 次粒子生成用ターゲットの冷却水は放射化が大きい。冷却水中のほとんどの放射能はイオン交換樹脂で除去することができる。但し、トリチウムは除去できずに、運転時間と共に濃度は増加する。したがって、放射化の大きい箇所冷却水は処理して保管する。電磁石や高周波空洞の冷却水は、現在仮定しているビーム損失であれば KEK 12GeV 陽子シンクロトロンと同程度と予想され、定期的に測定し、排水基準より十分低い値に希釈して公共下水へ排水する。

加速器やビームライントンネル内の空気は強く放射化される。空気中に生成される核種は短半減期核種であるので、運転中は排気することなくトンネル内に保持する。作業者がトンネル内に立入る必要のある時に排気する。ビームダンプや 2 次粒子生成用ターゲットの周辺の空気中には、強い放射線のために化学的に活性な物質が生成され、放射化された機器表面を腐食し、汚染の原因となるので十分注意した設計が必要である。

5 将来計画

5.1 第二期計画の目的

第二期計画の主な目的は、加速器のビーム強度を 1MW から 5MW に増強し、核変換(消滅)処理および中性子散乱の研究を飛躍的に進展させることである。この章では、5MW 達成のための加速器の二つの可能性について、これまで行ってきた検討結果を述べる。

2.2 節で述べたように、大強度中性子ビームは中性子科学、特に構造生物学の分野において決定的な役割を果たす。5MW、あるいはそれ以上のビーム強度は中性子科学にとって必要となるものである。また、5MW のビーム強度を達成することにより、核変換技術の R&D をさらに進めることができる。

5.2 加速器

第一期の設計作業においては、第二期への加速器の増強可能性について常に念頭においた作業が進められてきた。ここで「増強可能性」とは、第一期に製作された加速器機器のほとんどが、増強時にその一部として使用可能であることを意味する。

核破碎中性子源の増強にとって可能な選択肢のいくつかを議論するに当たって、統合計画加速器複合体がパルス核破碎中性子源としてかなりユニークなものであることを指摘しておく必要がある。本統合計画においては、数 GeV のシンクロトロンは、50 GeV の大強度加速器へのブースターとして、いづれにしても必要である。しからば、そのブースターを大強度パルス中性子源として（また、ミューオン源としても）使わない手はない。これが、中性子源として RCS (Rapid Cycling Synchrotron) という選択肢をとった理由である。一方、MW 級パルス中性子源を目指す別の選択肢としては、ESS や SNS で採用されているリニアックと蓄積リング (SR) の組み合わせが上げられる。どちらがより望ましい選択であるかは種々議論のあるところである。本計画の第一期では、SR ではなく RCS を採用した。1MW 級の場合、RCS の長所は以下の点に見られる [1]。

- (1) RCS ではビームを加速するので、ビームエネルギーは SR の場合より高くなる。そのため、一定のビーム出力を得るには、RCS ではビーム電流がビームエネルギーの比だけ小さくてすむ。
- (2) 一方、リングへの入射エネルギーは、RCS の場合、SR より低く設定することが可能である。従って、RCS の入射に伴うビーム損失によって引き起こされる残留放射能は、ビーム損失量が同じならば、SR への入射よりも少なくすむ。たとえば、400 MeV の陽子によって引き起こされる残留放射能は 1 GeV のその約 1/3 である。

この二つの長所によって、第一期の加速方式における入射時の残留放射能は 1 GeV のリニアックと SR を使う場合に比べ約 1/10 ですむのである。現在の技術では、薄膜片による荷電変換を伴う H 入射を使わざるを得ない。その過程でのビーム損失は避けがたい。もし

これが残留放射能を生じる主たる原因であって、またこうして生じた残留放射能がビーム強度を決定する主たる要因である場合には、RCS 方式の方が SR 方式よりも有望となる。

もちろん、RCS 方式は SR 方式に比較していくつかの短所も持っている。それは[1]、

- 1) RCS 方式はビームを速く加速するために多くの大電力高周波空洞を必要とする。
- 2) 速く変化する磁場によって渦電流が誘起されることのないようにセラミックス真空チェンバーを使わねばならない。このときはまた、ビームによって誘起される電磁場が有害な効果を引き起こすことのないように、高周波遮蔽しておく必要がある。
- 3) ビーム電流の空間電荷による制限が厳しい。
- 4) SR のよりも RCS の方がビームの滞在時間が長い。

これらが、ESS や SNS が SR 方式を採用している理由である。

増強計画は第一期を通じて得られる実験結果に基づいて選択される。その結果、もし、RCS 方式の方が SR 方式よりも有望であると判明した場合には、第一期の RCS を 6 GeV へと増強し、5 MW のビーム出力のためには、もう 1 個 6 GeV の RCS を建設する。各 RCS は 25 Hz で運転され、中性子生成標的は 2 個の RCS からビームが射ち込まれることから 50 Hz で運転されることとなる。

もし結果が逆であった場合には、リニアックのエネルギーを 1 GeV 以上に増強し、2~3 個の SR を建設することとなろう。1 番目の SR にビームが入射された後、最後の SR への入射が完了するまで 1 番目の SR にビームは蓄積されている。その後、この 2 個または 3 個の SR からのビームが合流される。この選択肢は NSP で採用されていた[2]。

図 3.1 で分かるように、統合計画においては、RCS および SR のどの選択肢も可能であるように加速器が配置されている。統合計画で想定されている増強計画の選択肢を表 5-1 にまとめた。

最善はこの二つの両極端の間にあるかもしれない。たとえば、もう少し低いエネルギーの RCS を使い、その一方では入射エネルギーを上げるなどである。この場合、第一期で建設される 600 MeV の SCC リニアックは有用である。もし SCC リニアックにおいて $\Delta p/p$ をはじめとして RCS への入射に十分なビーム性能が達成され、かつまた 400 MeV よりも高い入射エネルギーが望ましい場合には、SCC リニアックから RCS への入射もありうる。6 GeV というのは RCS にとっては高すぎるエネルギーであるか、もしくは非常に高価であるかもしれない。このような場合には、RCS の増強は 4 GeV または 5 GeV に止めるべきかもしれない。そのような選択肢も表 5-1 に示した。

ここで注意すべきは、RCS のエネルギーを 2 倍にするには入射時間は半分にしなければならない点である。三角関数的に変化している磁場においてその最小値からのずれの許容限界時間が半分になるからである。したがって、何か特別な方法で[3]、磁場の変化を三角関数からずらしてもっと長く入射できるようにするといった工夫が必要となろう。

もう一つの可能性はファネリング法であるかもしれない。それは、2 機の RFQ からのビームを合流させる方法である。その場合、RFQ リニアックの周波数は DTL の半分が選ばれる。この方法が選択された場合、NSP のために開発されてきた RFQ の技術[3]が大いに活

用できる。この方法は SR 方式の場合にも必要かもしれない。というのは、空間電荷効果で誘起されるラティスの共鳴のため、入射時間がここでも長すぎるからである。

表 5-1 リニアックとリングの可能な増強計画

| RCS または SR | | | | リニアック (56% チョッピング) | | | | |
|------------|-------|----------|--------|--------------------|----------|-------------|-------|----------------|
| ビーム 出力 | エネルギー | 繰り返し | 全数 | エネルギー | 尖頭 電流 | パルス幅 | 繰り返し | 平均 電流 a) |
| 1.0 MW | 3 GeV | 25 Hz | 1 | 400 MeV | 50 mA | 500 μ s | 25 Hz | 333 μ A |
| 5.0 MW | 6 GeV | 25 Hz b) | 2 | 400 MeV | 60 mA | 500 μ s | 50 Hz | 833 μ A c) |
| or | | | | | | | | |
| 5.0 MW | 1 GeV | 50 Hz | 2 or 3 | 1 GeV | 60 mA | 3 ms | 50 Hz | 5 mA |
| or | | | | | | | | |
| 5.0 MW | 4 GeV | 25 Hz b) | 2 | 600 MeV | 60 mA | 750 μ s | 50 Hz | 1.26 mA c) |

- a) 平均電流は尖頭電流とパルス幅と繰り返しとチョッピング率 56%の積で与えられる。
 b) この繰り返しは各 RCS のものである。中性子生成標的ににおいては繰り返しは 50 Hz となる。
 c) RCS の電磁石電源の底部は長くする必要がある。

50 GeV リングの増強計画については、二つの選択肢を検討した。すなわち 1) 加速速度の増加と 2) 障壁バケツ法[5]を使った空間電荷力の削減である。主リングの当初の加速サイクルの繰り返しは遅い取り出しの場合 0.29 Hz、速い取り出しの場合 0.37 Hz であるが、ラティス磁石自身は遅い取り出しの場合 0.55 Hz、速い取り出しの場合 0.89 Hz までの速い繰り返しに対応できるように設計してある。こうして平均電流は遅い取り出しで 15.6 μ A から 30 μ A へ、速い取り出しで 19.9 μ A から 47.9 μ A へと増強される。ここで、繰り返しを上げたことによるラティス電磁石電源の電力の消費は僅か 30 %にとどまる。それは、フライホイール発電機システムを導入したことのためである。

障壁バケツによるビーム捕獲は、電荷密度を減少させ、チューンのずれを減らすことになる。この方法の入射におけるもう一つの長所は、従来のバンチ対バケツの対応に比較して、望むだけの回数、ブースターからのビームを入射することができることである。入射回数はむしろ進行方向の運動量の広がりによって制限される。もし、ブースターからの入射回数が現行の 4 回から 16 回へ増やすことができれば、平均電流は 43 μ A へと増加するはずである（遅い取り出しの場合）。この値が現行の電流の正確に 4 倍でないのは、加速サイクルの周期が障壁バケツ法の断熱的性格から長くなってしまっているからである。さらにもし、繰り返しの増加と、障壁バケツ法の両方を同時に採用することができるならば、平均電流は遅い取り出しの場合で 74 μ A、速い取り出しで 111 μ A へと増加させることができる。

- [1] Y. Yamazaki, "Design Issues for High-Intensity, High-Energy Proton Accelerators," Proc. 1996 Linac Conf., 592 (1996).
- [2] T. Adachi et al., "Dual Frequency Magnet Exciting System with a Flat-Top Field for a Rapid-Cycling Synchrotron", Part. Accel. 29, 139 (1990).
- [3] K. Hasegawa et al., "Development of a High Intensity RFQ at JAERI", J. of Nulc. Sci. and Tech. 34, 622 (1997).
- [4] M. Kinsho et al., "A Conceptual Design of the Proton Storage Ring for the Neutron Science Projects at JAERI", Proc. of 1998 European Particle Accelerator Conference, 844 (1998).
- [5] M. Fujieda et al., "Magnetic Alloy Loaded RF Cavity for Barrier Bucket Experiment at the AGS", Proc. 1999 Part. Accel. Conf., MOP81 (1999).

5.3 実験施設の増強例

1MW から 5MW への増強の主目的は中性子科学と核変換技術の研究開発であるが、増強は他のすべての施設においても必要とされるものである。こういった増強についての共同推進チーム内での議論は今だ不十分なものではあるが、この節では増強の可能性のいくつかを例として述べる。

5.3.1 第二期計画における原子核・素粒子物理

第二期計画において 50GeV PS の増強が実現することによって、原子核・素粒子物理の研究は広範囲にわたってより進展する。以下に第二期計画において考えられている計画のいくつかを紹介する。

1. 陽子ビームの増強

第二期においては、50GeV PS の平均陽子ビーム電流は、約 $74\mu\text{A}$ (第一期は $15\mu\text{A}$) となる。このビーム電流の増強は、(1)繰り返し周波数を上げることと、(2)入射の際にバリアケットと言う方法を使って空間電荷効果の影響を押さえること、によって実現される。この増強によって、ビーム出力は約 3.7MW となる。ちなみに、現在の AGS (米国ブルックヘブン研究所) は 0.1MW、Main Injector (米国フェルミ国立研究所) は 0.15MW である。第二期が実現すると、これらの既存加速器の 25 倍のビーム強度を得られることになる。このような大強度のビームを使うことによって、「大強度フロンティア」でこれまでに見たこともないような世界を探究することができるようになる。特に、ニュートリノ実験にとってはビーム強度の増加は非常に重要である。

2. 陽子ビームのデューティファクターの改善

繰り返し周波数をあげるかわりに陽子ビームのデューティファクター (加速周期の中でビームが出ている時間の割合) を改善して、全体としては事象数を保存しながら瞬間的に発生する事象数を減らすことができる。これは、繰り返し周波数を変えずにビームが出ている時間を延ばすことによって実現する。この方法は、稀崩壊を観測する実験や原子核物理分野

の実験など「同時観測」を行う実験に有用となる。このような実験では、本来は同じ事象から生じた別の粒子を同時に観測したいのであるが、単位時間当たりの事象数がある瞬間に大きくなってしまうと別の事象からの粒子が偶然に同時に検出されてしまう、という害が生じる。このようなことができるだけ生じないようにするためにデューティファクターを改善する。例えば、繰り返し周波数 0.46Hz、ビーム電流 $24\mu\text{A}$ に対して、デューティファクターを約 40%（第一期では約 20%）にすることができる。

3. 重イオンビームと偏極陽子ビーム

陽子ビームに加えて、第二期では重イオンビームを 50GeV PS で加速することも検討される。重イオンビームによる高密度原子核物質の研究は原子核物理における重要な研究テーマの一つである。また、高密度核物質内でのベクター中間子の質量の研究も興味ある研究主題である。これまでも指摘されてきたことであるが、核子当たりのエネルギーが 20GeV から 50GeV の重イオンビームを用いると高密度核物質を効果的に生成することができる。50GeV PS での重イオンビームのエネルギーはちょうど核子当たり 20GeV から 25GeV となり、理想的である。また、BNL-AGS の偏極陽子ビームよりさらに高いエネルギー領域を探究すると言う観点から、50GeV の偏極陽子ビームも非常に興味深い。

4. 実験室の拡張

第二期においては、より多くのビームラインを設置し、かつより多くの実験を進めるために、50GeV PS の実験ホールを二倍以上に拡張する必要がある。第一期ではわずか二本の一次ビームラインが計画されているだけだが、これだけでは全く不足である。一次ビームラインと同様に、二次ビームラインの増設も必要である。この実験室の拡張は、個々の実験装置が大型化し、実験終了までの期間が延びてきているために必須である。また、高エネルギー（10GeV/c 以上）二次ビームラインを設置するには第一期の実験ホールは短すぎ、そのためにも実験ホールの拡張が必要である。

5. 50GeV PS における新実験施設

将来の新たな実験施設の候補として考えられているものに、反陽子蓄積リングがある。これは、50GeVPS によって生成された反陽子を減速し、確率冷却法によって冷却する施設である。この分野は CERN の LEAR で開拓されたが、LEAR はまもなく運転を終了するので、本計画においてこのような施設を建設することが国際的に強く求められている。ここでの研究テーマは、陽子・反陽子の相互作用、反陽子の消滅反応を使った中間子分光、反水素原子の研究、などである。また、ハドロン分光のために反陽子を LEAR よりも高いエネルギーまで加速する、という可能性もある。

5.3.2 第二期計画における中性子科学

提案している中性子散乱施設の最終目標は 5MW 核破砕パルス中性子源を建設し、大強度中性子ビームを得ることである。これは後述する理由のために可能な限り強力な中性子ビ

ームが要求されるからである。また、OECD メガサイエンスフォーラムの議論により、この中性子源は、米国の SNS 計画、欧州の ESS 計画と共に、世界の三つの領域に建設されるべき次世代中性子源の一つとして、アジアオセアニア地域の拠点と位置づけられている。したがって、第一期の施設は、この最終ゴールに向けて 5MW 運転が可能になるように設計されている。

本施設を用いて大きく発展することが期待されている構造生物学は、生理機能を原子・分子構造学的観点から理解する目的のために、最も強力な中性子ビームを必要とする。活性分子の腕部分のヒンジ運動のようなたんぱく質の動力学は、生理機能と強い相関を持っており、干渉性非弾性散乱実験によって観測できる。また、偏極中性子を用いることで、中性子のスピン反転・非反転を観測することが可能になり、水素原子の干渉性散乱から非干渉性散乱を分離できる。これらの測定には、現存の高中性子束原子炉で得られるよりピーク強度で千倍高い中性子束強度が要求される。これは 5MW 核破砕中性子源で得られるより、さらに十倍高い中性子束に相当する。したがって、このような研究領域では、5MW が現在の技術的限界であるとしても、5MW を越えるパルス核破砕中性子源が本質的に求められているのである。

もちろん他の研究領域でも、5MW 増力による高中性子束の恩恵がある。例えば、液体や気体の表面あるいは界面における非弾性散乱の研究、化学反応や緩和現象の時間変化の研究、スピン選択バンド間遷移、非秩序系のスピン波のブリルアン散乱領域の研究、ミクロ集合体やたんぱく質などの半巨視的分子の動力学、電子軌道整列の構造と動力学（軌道波）の観測、バルク物質内の同位体を区別できるスピン依存のエネルギー分析ラジオグラフィ、励起状態の構造と動力学の研究等々、これら全てが 5MW の強力中性子ビームで可能となる。これに加えて、微小な試料物質の構造、機能を研究することができるという大きなメリットもある。新物質が発見されるときには、往々にして微小な試料しか得られないことが多い。しかし、中性子散乱の手法は、少量しか試料が得られないという制約のために研究に寄与できないことがしばしばであった。5MW 中性子源は、このような場合に、その応用範囲を物質科学に対して大幅に拡大するものである。

以上述べたように、中性子はミクロの視点から物質の振舞いを究極的に理解するために不可欠のプロブである。物質の性質と機能はその原子構造と動力学を測定することによって究明される。また、中性子は物質とは非常に弱い相互作用しか行わない。そのため物質の内部まで観測することができ、観測による擾乱を与えずに、他の手段に比べ信頼できる結果を提供することができる。しかしながら、相互作用が弱いということは、一面有用ではあるが、逆に 1MW 中性子源ですら、観測に制限を与えることになっている。従って、高強度中性子源、即ち 5MW が実現されれば、スピン偏極利用も加えて、中性子の有用性が飛躍的に高まる。そのことは、ひいては現在不可能な科学領域にまで研究を拡大することになり、21 世紀の新しい科学の進展に大きく寄与する。

このような 5MW を目指した中性子散乱施設の増強シナリオは以下のように考えられている。

1 ターゲットの増強

5MW 陽子ビームに対しては、液体金属ターゲットが絶対に必要である。なぜなら、固体ターゲットは照射損傷により一ヶ月も保たないと思われるからである。本計画におけるターゲットの開発戦略は1) 第一期で 1MW レベルのビームを用いて、液体ターゲットシステムが 5MW へ増力可能であることを確認し、2) ターゲットケーシング材等の材料照射効果のデータを集積することにある。3) さらに、液体ターゲットシステム概念に致命的な問題が生じたときに備えてバックアップシステム、即ち固体ターゲットを準備する。

2 生体遮蔽体の拡張性

第一期の施設設計では基本的には 5MW 運転を想定して設計する。しかし、ターゲットステーションの遮蔽体は第一期では 1MW 運転に対して設計を行う。これは、遮蔽体のコストが非常に高いのと同時に、要求される遮蔽厚さにまだ不確定要素があるからである。さらに、第一期で設計した遮蔽体について、1MW 運転で遮蔽性能を確認し 5MW で必要な追加遮蔽体を正確に評価する。この追加分は、ターゲットベッセル内に若干の空間的余裕を持つことで対処できると考えられる。

3 散乱実験室の拡張

散乱実験室に対しても、建物構造は中性子ビームラインの必要に応じて可能な構造と建物周辺の空間的余裕に配慮しておく。同時に、もし利用者の要望と科学的な重要性がさらに高まれば、第2ターゲットステーションの可能性を議論することになるであろう。そのための用地は確保されておかねばならない。

5.3.3 第二期計画におけるミュオン科学

超高強度ミュオンチャネルは、ミュオン科学一期計画において、部分的に建設されるが、その多くは第二期計画で実現される予定である。

空間的にも運動量的にも大きなとりこみ立体角（アクセプタンス）を持つ高磁場の超伝導パイオン捕獲系が、パイ中間子生成標的に隣接して設置される。さらに超伝導ソレノイドを用いた崩壊ミュオンチャネルが接続され、毎秒 $10^{10} \mu^\pm$ 個もの超高強度のミュオンビームが生成される。そのような大型の超伝導磁石システムの構築によりミュオン科学に大きな発展がもたらされる。

超高強度ミュオンを用いて、大強度の超低速ミュオンを作り出すことができれば、将来さらに加速して GeV 領域のミュオン-核電磁散乱の実験のためのミュオン源として、そしてさらには TeV $\mu^+\mu^-$ 衝突実験、次世代のニュートリノ源として用いられるであろう。これらの将来の応用に対する可能性を追求する研究が統合計画で実現されるミュオン科学施設において精力的に進められる。

また、この超高強度ミュオンビームが実現した暁には、ミュオン触媒核融合のヘリウム原子付着率を下げる為の実験が可能となる。即ち、ミュオン触媒核融合の起こった後にヘリウム原子に付着したミュオンが再び解放され、ミュオン触媒核融合サイクルに貢献するという、所謂“ミュオン再活性化”現象を活用する。一つ斬新なアイデアとして大強度ミュオンビームのもとで、 $(\alpha\mu)^+$ イオンが他のミュオンによる核融合反応でできた α^{++} イオンと衝突す

ることにより、“ミュオン再活性化”を起こさせるという新しい実験が挙げられる。

5.3.4 第二期計画における加速器駆動核変換実験施設

大強度陽子加速器計画の第二期では、第一期のADSの原理的な実証を目的としたADS基礎実験に引き続き、主要課題の技術的な実証を目指してADS工学実験を行う。表5-2に第二期における主な実験項目を示す。

表5-2 第二期の主要実験項目

| 第二期ADS工学実験 | | |
|--|------------|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • 未臨界炉物理 • 運転及び制御 | 低出力未臨界実験装置 | <ul style="list-style-type: none"> 第一期と同じ 第一期と同じ |
| <ul style="list-style-type: none"> • 熱流動 • 核破碎 | ターゲット実験装置 | <ul style="list-style-type: none"> ビーム窓及びターゲット 中性子束、スペクトル、発熱分布 核破碎生成物 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 材料照射 • 精製 | | <ul style="list-style-type: none"> ビーム窓及び燃料集合体用材料 反応生成物除去、酸素濃度制御 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 遮蔽 | ビームダンプ | 第一期と同じ |

第二期計画では、最大出力 2 MW までのビームを用いて、ターゲットの工学的実験を行う。このために第一期の 0.2 MW (最大) ターゲット実験装置をアップグレードするか、あるいは第二期に新たに 2 MW のターゲット実験装置を製作する。2 MW ターゲット実験には、1 GeV - 2.0 mA、25 Hz のパルスビームを用いることを想定している。

2 MW ターゲット実験では、流動鉛・ビスマスターゲットの構造特性の試験及び熱流動特性の試験、核破碎特性の試験、核破碎生成物生成・移行の評価、ビーム窓及び燃料サブアセンブリー用候補材料の照射試験、精製系の試験、鉛・ビスマスループ主要機器特性の試験、保守・交換性の試験、ビーム窓及びターゲットの設計概念の確認、信頼性と安全性の確認を行う。さらに、将来の実証システムの開発のための技術基盤として、鉛・ビスマスターゲットの設計、建設及び運転の経験を蓄積する。

加速器駆動システムの開発では、鉛・ビスマスターゲットのオンビーム実験が最重要かつ最優先の課題と考えられており、現在 MW 規模の実験計画が進められている。米国の LANL の ATW プロジェクトでは 800 MeV 陽子リニアックを用いて 2001 年に鉛・ビスマスターゲット照射実験を予定しており、またフランス CEA は PSI の SINQ ターゲットステーションに鉛・ビスマスターゲットを 2004 年に設置して、600 MeV サイクロトロンからの CW 陽子ビームによる照射実験を行うことを計画している。これらの実験はいずれも、ビーム出力は約 1 MW、鉛・ビスマスループの運転温度は最高 340℃ 程度、照射期間は 1 年である。

これらの実験計画の条件に対して、数 10 MWt ないし 100 MWt 規模の実証システム

で想定されている運転条件での試験を行うには、2ないし5 MWのビーム出力、430℃ないし530℃の運転温度、1ないし2年程度の照射期間が必要である。このため、第二期計画のターゲット実験装置は、実証システム級の運転条件を含む、あるいは外挿できる条件を達成できることを目標とし、最大ビーム出力2 MW、最高運転温度430℃、照射期間1年以上で設計を行う。さらに、専用のターゲット実験設備として、広範な実験条件を設定できると、多数の試料を照射できることなど実験上のフレキシビリティを配慮する。

第二期のターゲット実験では、これまでに例のない強力なビームを用いる。このため、ターゲット実験装置の設計、建設及び運転に必要なデータを可能な限り蓄積、整備しておく必要がある。このため、オフビームでの鉛・ビスマスループ実験を進めることはもとより、第一期の0.2 MWビームを用いた予備的なターゲット実験によって、必要なデータの収集、経験の蓄積を行ない、2 MW鉛・ビスマスターゲットシステムの成立性の確認を行う。また、LNAL及びCEAの鉛・ビスマスターゲット照射実験計画に参加してデータの入手を行うなどの国際協力を通して効率的な研究開発を進める予定である。

また、第二期のターゲット実験装置は世界でもっとも出力が大きく、専用のターゲット実験設備となるため、各国の加速器駆動システムプロジェクトに優れた共同実験の場を提供するとともに、研究開発の国際協力の重要な拠点となる。

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量 | 名称 | 記号 |
|-------|--------|-----|
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質 | 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 | 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 | °C | |
| 光度 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照射度 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 放射能 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量等量 | シーベルト | Sv | J/kg |

表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=1.60218×10⁻¹⁹J
1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

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 |
| バール | bar |
| ガリ | Gal |
| キュリー | Ci |
| レントゲン | R |
| ラド | rad |
| レム | rem |

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m
1 bar=100kPa=10⁵Pa
1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²
1 Ci=3.7×10¹⁰Bq
1 R=2.58×10⁻⁴C/kg
1 rad=1cGy=10⁻²Gy
1 rem=1cSv=10⁻²Sv

表5 SI接頭語

| 倍数 | 接頭語 | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 ¹⁸ | エクサ | E |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P |
| 10 ¹² | テラ | T |
| 10 ⁹ | ギガ | G |
| 10 ⁶ | メガ | M |
| 10 ³ | キロ | k |
| 10 ² | ヘクト | h |
| 10 ¹ | デカ | da |
| 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ⁻¹⁸ | アト | a |

(注)

- 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, 1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 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。
- 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。
- E C関係理事会指令では 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 1Pa·s(N·s/m²)=10P(ポアズ)(g/cm·s)

動粘度 1m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

| 圧 | MPa (=10bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg(Torr) | lbf/in ² (psi) |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062×10 ³ | 145.038 |
| 力 | 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 ³ | 1 | 8.59999×10 ⁷ | 3412.13 | 2.65522×10 ⁶ | 2.24694×10 ²⁵ |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279×10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759×10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272×10 ¹⁹ |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072×10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515×10 ²¹ |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616×10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506×10 ⁻³ | 1 | 8.46233×10 ¹⁸ |
| | 1.60218×10 ¹⁹ | 1.63377×10 ²⁰ | 4.45050×10 ²⁶ | 3.82743×10 ²⁰ | 1.51857×10 ²² | 1.18171×10 ¹⁹ | 1 |

1 cal= 4.18605J (計量法)
= 4.184J (熱化学)
= 4.1855J (15°C)
= 4.1868J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS(仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499W

| 放射能 | Bq | Ci |
|-----|----------------------|---------------------------|
| | 1 | 2.70270×10 ⁻¹¹ |
| | 3.7×10 ¹⁰ | 1 |

| 吸収線量 | Gy | rad |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

| 照射線量 | C/kg | R |
|------|-----------------------|------|
| | 1 | 3876 |
| | 2.58×10 ⁻⁴ | 1 |

| 線量当量 | Sv | rem |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

