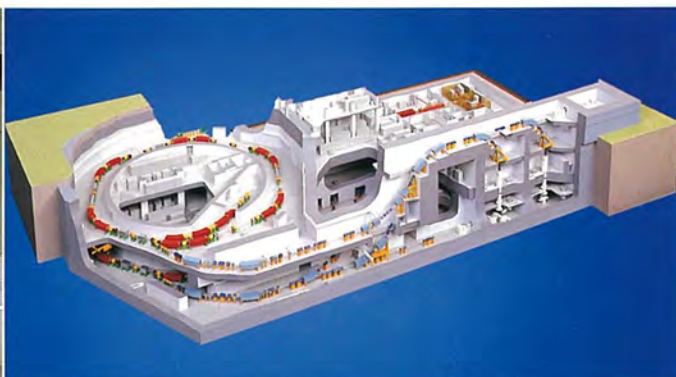


MITSUBISHI

三菱電機技報 Vol.69 No.2

特集 “重粒子線がん治療装置”

'95 2



特集 “重粒子線がん治療装置”

目次

特集論文

重粒子線がん治療開始に当たって	1
平尾泰男	
重粒子線がん治療装置の現状と将来	2
平尾泰男・速水和大	
科学技術庁放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置 (HIMAC) の概要	8
河内清光・上田孝寿	
HIMAC 用高エネルギービーム輸送システム (HEBT システム)	14
溝田 学・吉田克久・小川博嗣・山田 聡・高田栄一ほか	
HIMAC 用 HEBT システムの電磁石と電源	18
溝端正隆・寺本昭好・豊田秀男・三田村政則・小川博嗣・野田耕司	
HIMAC 用 HEBT システムの真空系とプロファイルモニタ	23
取越正己・原口正文・別所和典・北村寛樹・小川博嗣・山田 聡・高田栄一	
HIMAC 用 HEBT システムの制御システム	28
高仲政雄・桜井正良・松浦 潤・小久保光洋・河野俊之・小川博嗣・山田 聡	
HIMAC 用治療・照射システム	34
上田和宏・坂本豪信・正木敏煥・曾我文宣・金井達明・遠藤真広	
HIMAC 用重粒子線治療・照射機器	40
坂本豪信・岸本 健・坂元 学・金井達明・遠藤真広・荻原伸一	
HIMAC 用重粒子線照射位置決め装置	45
東 誠一・隈 昭一郎・野村和章・遠藤真広・荻原伸一	
HIMAC 用全系制御システム	50
高仲政雄・内海雅文・山下嘉久・松村 寧・河野俊之・小川博嗣・高田栄一	
表面生成型負水素イオン源	54
原田 久・山本雄一	
RFQ ライナックのビームシミュレーション	60
田中博文・中西哲也	
イオンシンクロトロン設計コード	65
吉田克久・石 慎浩	

普通論文

量販系広域営業情報システム “MOLDIS” の革新	69
平松信之・新好正太郎・守政隆司	
中国地方建設局浜田工事事務所納め “道の駅” 情報ターミナルシステム	74
大石将之・森本邦明・井上勝雄・深川友賀	
東北電力 (株) 納め地中線管理設計システム	79
滝口祐二・三国俊晴・岩上克義・高橋正一・森田淳士	
Z 形コントロールセンタ	87
石川雅廣・金藤 悟・森 雅克・水口尊敬・樋熊利康	
オブジェクト指向モデリングによるエレベータ天井設計支援システム	93
市岡洋一・中村守雄・山宮茂樹・田中純治・久木田庄司	
超低電圧動作 4 ビットマイコン M34560M6-XXXFP	99
中島豊勝・大内収一郎・牧野裕太・早岡 洋・吉本輝紀	
携帯機器制御用 16 ビットマイコン M37734E8L/M8LXXXHP	104
本郷勝信・巖名潤一・笹原裕司・沖 達哉・松見治彦	

特許と新案

「画像診断装置」「微量イオン検出器」	109
「超電導コイル」	110

スポットライト

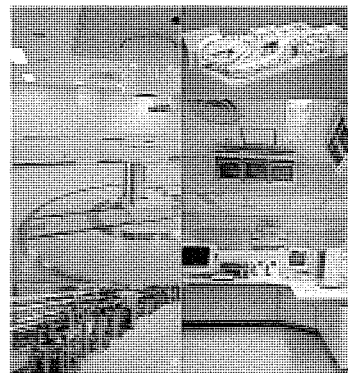
重粒子線がん治療照射用多葉コリメータ装置	111
三菱ばね操作形真空遮断器 “MELVAC” VF-8C/13C 形 VCB	112
中国電力 (株) 柳井コンバインドサイクル発電所納め 異容量スプリット巻線変圧器	(表 3)

表紙

重粒子線がん治療装置と主なシステム

放射線医学総合研究所納め重粒子線がん治療装置は、長さ120m×幅65mの建物に収納され、ふかん (俯瞰) 模型 (右上) に見るように、その2/3 (約20m) は地下に埋もれている (緑色部地上)。

重粒子線は、俯瞰模型の右上褐色部で生成され、左側の円形加速器 (赤色) で治療に必要な高エネルギーに加速され、高エネルギービーム輸送系 (左下、俯瞰模型の下部黄色部) に導かれ、照射ライン (俯瞰模型の右下白色部) を経て、治療照射室 (左上、上部円筒先端の開孔部が重粒子線出口であり、その下に治療台が見える。) に入射される。右下には治療照射制御室のディスプレイ、展望窓からの治療室入口扉等を示す。



三菱電機技報に掲載の技術論文では、国際単位 “SI” (SI 第 2 段階 (換算値方式) を基本) を使用しています。ただし、保安上、安全上等の理由で、従来単位を使用している場合があります。

アブストラクト

重粒子線がん治療装置の現状と将来

平尾泰男・速水和夫

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.2～7 (1995)

1993年12月、科学技術庁放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置(HIMAC)が、全照射コースへのビーム誘導を実現し、完成した。三菱電機側は、その取りまとめ会社を務めた。

先端技術を結集した HIMAC の重粒子線治療では、従来の放射線治療法では難しいとされる①線量の患部への集中照射、②放射線感受性の高い臓器障害の防止、③放射線抵抗性の難治性がんへの優れた効果の発揮等が追求される。ここでは重粒子線がん治療の現状と将来を概観する。

HIMAC 用 HEBT システムの制御システム

高仲政雄・桜井正良・松浦 潤・小久保光洋・河野俊之・小川博嗣・山田 聡

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.28～33 (1995)

高エネルギービーム輸送システム(HEBT システム)の制御システムは、CRT 等を伴う制御卓操作で、制御を可能とする上位制御系と、機器個々とのインタフェースから成る下位制御系で構成されている。

装置上位レベルから機器個々の下位レベルに、オペレータは制御卓上の操作で一括運転・停止、装置構成機器の個別操作が可能である。照射系と交信しながら、照射系にビームを供給する。

科学技術庁放射線医学総合研究所

重粒子線がん治療装置(HIMAC)の概要

河内清光・上田孝寿

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.8～13 (1995)

科学技術庁放射線医学総合研究所に建設されたHIMAC は、ヘリウム、炭素、ネオン、シリコン、アルゴン等の重粒子線を、身体を表層から最大30cmの深さにあるがん組織まで照射し治療できる。

HIMAC は、入射システム、主加速器システム、高エネルギービーム輸送システム、治療・照射システム(水平のみ、水平・垂直両方、垂直のみ照射可、の3治療室)及び全系制御システムから構成される。

HIMAC 用治療・照射システム

上田和宏・坂本豪信・正木敏煥・曾我文宣・金井達明・遠藤真広

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.34～39 (1995)

重粒子線がん治療装置(HIMAC)治療・照射システム(治療・照射系)の照射仕様と照射方法の概要を示し、実際の機器構成と基本動作までを述べた。特に、治療・照射系では、シンクロトロンで加速された細い重粒子線を治療に使用できるように照射野を拡大平坦(坦)化し、患部の位置に応じて照射深度を制御して、周囲の正常組織を避けて三次元的に広がった患部に重粒子線を照射する。また、被ばく(曝)を最小にする遮へい(蔽)についても言及した。

HIMAC 用高エネルギービーム輸送システム(HEBTシステム)

溝田 学・吉田克久・山本雄一・太田完治・小川博嗣・山田 聡・高田栄一・野田耕司・須藤美智雄

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.14～17 (1995)

重粒子線がん治療装置(HIMAC)では、二つのシンクロトロンからのビームはコースを切り換えて、治療室と実験室に供給される。その配給の部分で、高エネルギービーム輸送システム(HEBT システム)が担っている。システム設計では、特にビーム光学系について、要求仕様と設計思想をまとめた。また、シミュレーション等を行う計算機コードを用いて基本仕様、構成機器の配置等を決定した過程について記述している。

HIMAC 用重粒子線治療・照射機器

坂本豪信・岸本 健・坂元 学・金井達明・遠藤真広・蓑原伸一

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.40～44 (1995)

重粒子線がん治療装置で切れのよい治療を実現するためには、最大の治療効果を発揮するように重粒子線の照射方向・照射範囲・照射線量を決定する治療計画装置で立案されたとおりの治療ビームを患部に照射しなければならない。

治療計画装置で作成された治療データが実際の治療機器を動作させるまでの手順、高度な三次元治療を実現するために必要なビームライン機器の詳細仕様、機器配置、基本動作について紹介する。

HIMAC 用 HEBT システムの電磁石と電源

溝端正隆・寺本昭好・豊田秀男・三田村政則・小川博嗣・野田耕司

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.18～22 (1995)

高エネルギービーム輸送システム(HEBT システム)は、水平5コースと垂直2コースで総延長240m、高さ20mの立体的なビームラインで構成されている。

電磁石や電源にはコース切替時間短縮及び磁場データ精度向上の要求があり、励磁方式の改良や評価装置開発などを行った。また、据付け・アライメント等の現地工事には、垂直ビームラインへの対応や作業合理化を考慮した新工法を適用した。これらの内容について紹介する。

HIMAC 用重粒子線照射位置決め装置

東 誠一・隈 昭一郎・野村和章・遠藤真広・蓑原伸一

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.45～49 (1995)

重粒子線は、患部をピンポイント攻撃できる特長を持っており、照射される患部を正確に重粒子線が到達する位置に合わせなければならない。このことは、患部が治療計画装置であらかじめ決められた位置に設定されて初めて十分な治療効果が発揮できることを意味している。患者を正確に治療計画装置で決められた治療位置に設定するための位置決め装置の詳細仕様、動作方法、位置決め検証、治療計画装置との照合方法を紹介する。

HIMAC 用 HEBT システムの真空系とプロファイルモニタ

取越正己・原口正文・別所和典・北村寛樹・小川博嗣・山田 聡・高田栄一

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.23～27 (1995)

重粒子線を治療室まで輸送するビーム輸送系には、ビーム損失を最小にするための真空装置と、目的の場所に正確に輸送するためのビームモニタが必要である。放射線医学総合研究所に納めたビーム輸送系では、総延長約240mの真空ダクトを全平均圧力 1.3×10^{-4} Pa 以下に維持している。また、ビームプロファイル及び強度を測定し、必要に応じてビーム損失場所を特定し、ビーム輸送を円滑に行うことができた。

HIMAC 用全系制御システム

高仲政雄・内海雅文・山下嘉久・松村 寧・河野俊之・小川博嗣・高田栄一

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.50～53 (1995)

加速器系3サブ制御系の上位にある全系制御システムでは、各サブ系下の機器個々の制御は行わず、サブ系装置ごと又は3サブ系装置全体の一括運転・停止の制御が行われる。加速器運転操作と治療運転操作の分離を図るため、治療・照射制御系とはできる限り粗結合とする設計方針で製作された。HIMACの運転に際して放射線上の安全が確保できるようなインタロックが組まれている。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 28~33 (1995)

The Control System for HIMAC's HEBT System

by Masao Takanaka, Masayoshi Sakurai, Jun Matsuura, Teruhiro Kokubo, Toshiyuki, Kohno, Hirotsugu Ogawa & Satoru Yamada

The high-energy beam transport (HEBT) system for the Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) is equipped with a high-level control system comprised of a control console with CRTs and rotary encoders and a low-level control system that manages individual equipment. Similar procedures and interfaces are used to control all HEBT equipment, from high level to extremely low level. Adopting the status-supervision concept, the operator can start or shutdown the entire HEBT system, or simultaneously operate individual constituent units. The control system and irradiation system exchange signals while the HEBT system supplies a beam to the irradiation system.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 2~7 (1995)

Current Status and Future Trends in Heavy-Ion Accelerators for Cancer Treatment

by Yasuo Hirao & Kazuo Hayami

In December 1993, the Science and Technology Agency's National Institute of Radiological Science completed preparations for using its Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) for treating cancer patients. Mitsubishi Electric served as the prime contractor for the project. HIMAC will overcome several disadvantages of previous medical accelerators. It is capable of focusing radiation precisely on the diseased site, thereby avoiding damage to radiation-sensitive organs. It can also treat cancers that resist conventional radiation therapy. This article surveys the current status and future trends in heavy-ion radiation therapy for cancer treatment.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 34~39 (1995)

The HIMAC Cancer Therapy and Irradiation System

by Kazuhiro Ueda, Hidenobu Sakamoto, Toshiaki Masaki, Fuminori Soga, Tatsuki Kanai & Masahiro Endo

The article reports on the concepts, equipment configuration and basic operation of the Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) therapy and irradiation system. This system receives a narrow beam of high-energy ions extracted from a synchrotron ring, then spreads and flattens the beam and adjusts treatment depth for the tumor. Heavy-ions are delivered to the tumor position with three-dimensional control over the shape of the irradiation target, so that healthy peripheral tissue is protected from exposure. The article also discusses the shielding walls used to minimize incidental radiation.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 8~13 (1995)

The HIMAC at the Science and Technology Agency's National Institute of Radiological Science

by Kiyomitsu Kawachi & Koju Ueda

The article describes the Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) constructed at the Science and Technology Agency's National Institute of Radiological Science. The HIMAC is capable of irradiating deep-seated tumors as deep as in soft tissue up to 30cm below the skin using beams of helium, carbon, neon, silicon or argon ions. The HIMAC consists of an injector; a main accelerator; a high-energy beam-transport system; a therapy and irradiation system with three therapy rooms for horizontal irradiation, horizontal and vertical irradiation, and vertical irradiation; biological and physical irradiation system; and control systems that manage four sub-systems and the overall system.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 40~44 (1995)

Equipment for the HIMAC Cancer Therapy and Irradiation System

by Hidenobu Sakamoto, Takeshi Kishimoto, Manabu Sakamoto, Tatsuki Kanai, Masahiro Endo & Shin'ichi Minohara

The Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) cancer therapy and irradiation system must control the heavy-ion beam so that the direction, target size and dose of the applied radiation match the values suggested by the therapy planning equipment. The article describes the method used to convert data from the therapy planning equipment to actual equipment-control commands. It reports on the beam-line equipment layout, basic operations and detailed specifications required to achieve sophisticated three-dimensional control of therapy effects.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 14~17 (1995)

HIMAC'S HEBT SYSTEM

by Manabu Mizota, Katsuhisa Yoshida, Yuichi Yamamoto, Kanji Ohta, Hirotsugu Ogawa, Satoru Yamada, Eiichi Takada, Kouji Noda & Michio Sudo

The high-energy beam transport (HEBT) system is responsible for switching the path of ion beams extracted from the two synchrotron rings of the Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) for supply to treatment rooms or test chambers. Mitsubishi Electric was responsible for the design concept and requirement specifications for the HEBT's beam optics. The article describes the design process for beam parameter fitting using computer programs and simulations.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 45~49 (1995)

Irradiation Position-Control Equipment for the HIMAC

by Seichi Higashi, Shoichi Kuma, Kazuaki Nomura, Masahiro Endo & Shin'ichi Minohara

Use of heavy-ion beams to mount a pinpoint attack on unhealthy tissue requires that the target tissue be placed in the precise location specified by the therapy planning equipment. The article reports on the detailed specifications, positioning mechanism, position verification method and the interface with the therapy planning equipment.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 18~22 (1995)

Features of HIMAC's HEBT System

by Masataka Mizobata, Akiyoshi Teramoto, Hideo Toyota, Masanori Mitamura, Hirotsugu Ogawa & Koji Noda

The high-energy beam transport (HEBT) system for the Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) has a three-dimensional beam line that is 20m high, providing five horizontal and two vertical courses with a total length of 240m. Improvements to the exciter system for the electromagnets enables rapid switching between beam courses while a specially developed evaluation unit provides more precise magnetic field data. New construction methods suited to the vertical beam line were adopted to simplify beam alignment and other maintenance tasks.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 50~53 (1995)

The HIMAC High-Level Control System

by Masao Takanaka, Masafumi Utsumi, Yoshihisa Yamashita, Yasushi Matsumura, Toshiyuki Kohno, Hirotsugu Ogawa & Eiichi Takada

The high-level control system of the Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) manages three accelerator control sub-systems. It has been designed so the operators at the console of the high-level system cannot control the components of the three accelerator sub-systems (injector, synchrotron and HEBT), but they can start/shutdown the sub-systems individually and collectively. In order to separate accelerator control from irradiation control, the high-level control system has been designed for least-possible coupling with the irradiation system. Beam-supply information is exchanged for each irradiation session, and the system is equipped with interlocks to ensure beam safety.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 23~27 (1995)

The Vacuum System and Profile Monitor for HIMAC's HEBT System

by Masami Torikoshi, Masafumi Haraguchi, Kazunori Bessho, Hiroki Kitamura, Hirotsugu Ogawa, Satoru Yamada & Eiichi Takada

The vacuum system of the high-energy beam transport (HEBT) system assures that the ion beam of the Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) reaches the treatment room with minimum transport loss. The vacuum duct for HEBT sustains a vacuum better than 1.3×10^{-4} Pa over the beam line's entire 240m length. The beam monitor ensures that the beam is at its correct location. It assists smooth system operation by measuring the beam profile and strength, and specifies where to dump excess beam current when necessary.

アブストラクト

表面生成型負水素イオン源

原田 久・山本雄一

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.54～59 (1995)

1992年から1993年にかけて、陽子線を利用するための負水素イオン源を設計・製作した。試験を行った結果、最大電流値20mAを達成し、規格化エミッタンスは1.6～1.9 $\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ (ビーム電流が8～13mAのとき)が測定され、目標性能が十分に達成されることを確認した。

東北電力(株)納め地中線管理設計システム

滝口祐二・三国俊晴・岩上克義・高橋正一・森田淳士

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.79～86 (1995)

地中配電設備の管理・設計業務を効率化する目的で、地中線管理設計システムを東北電力(株)と共同で開発し、納入した。このシステムはEWSによるクライアント／サーバ方式を採用し、地図情報処理・CAD技術を活用して、地中線設備の工事図面作成から工事費の積算、図面・台帳の管理まで一貫処理できる。既存ホストシステムともデータ連携し、円滑な業務処理を可能としている。業界標準のソフトウェアを活用し、データベースとGUIに特長を持った拡張性の高いシステムになっている。

RFQライナックのビームシミュレーション

田中博文・中西哲也

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.60～64 (1995)

既存のシミュレーションコードを使って電極パラメータを最適化するプログラムを開発した。このプログラムは、加速効率及び通過効率の重み付けによって所要の最適パラメータを得る。 C^{4+} を核子当たり1 MeVまで加速する200MHz-RFQの例では、96%の通過効率で0.89MV/mという高い加速効率を得た。エネルギー可変型高周波四重極(RFQ)では、可変方法及びシミュレーション結果を示した。 P^{1+} の計算例では、エネルギーを1.1～2 MeVまで可変にできることが分かった。

Z形コントロールセンタ

石川雅廣・金藤 悟・森 雅克・水口尊敬・樋熊利康

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.87～92 (1995)

生産プラントのCIM化・省人化に向けたシステムのコンピュータ統括管理化のニーズに対応するZ形コントロールセンタを開発し、平成5年4月に市場投入した。この製品は①データリンク機能、監視・制御・保護・表示機能の充実、②シーケンス変更への対応を容易にしたプログラマブルなシーケンス機能、③データ蓄積機能による運転状態・履歴のデータバンク化、④コントロールセンタ全体の状態・履歴・故障情報等を集中監視するモニタリングシステムなどを実現したものである。

イオンシンクロトロンの設計コード

吉田克久・石 楨浩

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.65～68 (1995)

イオンシンクロトロンの物理研究以外の医療等に利用することが考えられている。その設計のためのケーススタディ(イオンの入射・高周波捕獲及び加速・取り出し等)を効率的に行うため、上流設計コードRINGを開発した。粒子の軌道計算には、ハミルトン力学系のシンプレクティックな性質を保存する積分方法を用いているため、長時間にわたる現象のシミュレーションにおいても信頼性が高い。この論文において、このコードの概要と使用例を示す。

オブジェクト指向モデリングによる

エレベータ天井設計支援システム

市岡洋一・中村守雄・山宮茂樹・田中純治・久木田庄司

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.93～98 (1995)

現在エレベータの設計にコンピュータは欠かせないが、更に設計品質向上・期間短縮・効率向上を図るには、コンピュータによる製品の構造検討から製図などまでを統合的に支援するシステムが必要である。このほど、支援システムのパイロットシステムとして、三菱乗用エレベータの平面光天井をオブジェクト指向技術でモデル化し、構造検討を自動／対話で行い、製図を自動で行うシステムを開発・実用化した。

量販系広域営業情報システム“MOLDIS”の革新

平松信之・新好正太郎・守政隆司

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.69～73 (1995)

消費者ニーズの多様化が進む今日において、販売店ではメーカに対する多品種少量の発注形態が増加している。当社の量販系広域営業情報システムでは、このような発注形態における販売店の業務効率化支援、商品の注文に対する即納・即答体制の確立を目的として、①商流・業務形態別のネットワーク接続、②ビジネスユニット別の要求機能実現、③オンラインサービスの向上、等による広域オンラインシステムの革新を図ったので、システムの概要とシステム技術の一端を紹介する。

超低電圧動作4ビットマイコン M34560M6-XXXFP

中島豊勝・大内収一郎・牧野裕太・早岡 洋・吉本輝紀

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.99～103 (1995)

バッテリー駆動の小型携帯機器向けに、電池1本で動作可能な超低電圧動作4ビットマイコンを開発した。低電圧時の動作速度は世界最高レベルであり、0.9～3.6V時に最大50kHz、1.1～3.6V時に最大1MHzの性能を達成した。

開発のポイントは、トランジスタのしきい値を大幅に下げることによって低電圧・高速化を実現し、ゲート酸化膜の薄膜化によって消費電力を低減させたことである。

中国地方建設局浜田工事事務所納め “道の駅”情報ターミナルシステム

大石将之・森本邦明・井上勝雄・深川友賀

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.74～78 (1995)

“道の駅”は、駐車場・トイレ等の休憩施設と地元市町村の地域振興施設を一体化した複合多機能型休憩施設で、国道沿いに整備されつつある。この“道の駅”に設置される情報ターミナルシステムは、道路交通情報等を的確に分かりやすく提供することを目的として256色カラー動画の大型LED情報板を用い、登場するキャラクタによるアニメーション表示や、明るいBGMで、情報を提供している。

携帯機器制御用16ビットマイコン

M37734E8L/M8LXXXHP

本郷勝信・巖名潤一・笹原裕司・沖 達哉・松見治彦

三菱電機技報 Vol.69・No.2・p.104～108 (1995)

携帯電話等の携帯機器制御用16ビットマイクロコンピュータM37734E8L/M8LXXXHPを開発した。開発に当たり電池駆動を前提に、低電圧動作だけでなく、低消費電力化を考慮した。特に、待ち受け時間の延長に効果があるスタンバイ時の低消費電力化を図るため、時計用発振回路内蔵等、発振回路周辺の工夫を行った。また、機器の小型化のために外付け部品の削減も考慮した。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 79~86 (1995)

An Underground Facility Management and Design System for Tohoku Electric Power Co., Inc.

by Yuji Takiguchi, Toshiharu Mikuni, Katsuyoshi Iwakami, Shoichi Takahashi & Atsushi Morita

Tohoku Electric Power Co., Inc. and Mitsubishi Electric have jointly developed an information system to support efficient management and design of underground power-distribution facilities. The system employs a RISC workstation that operates in a client-server configuration. Mapping and CAD technology were used to provide integrated support for most information-intensive operations: construction plans for underground facilities, estimation of construction expenses, and managing map data and registration. The system is linked to an existing main-frame system.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 87~92 (1995)

A Z-Type Control Center

by Masahiro Ishikawa, Satoru Kanetou, Masakatsu Mori, Takahiro Mizuguchi & Toshiyasu Higuma

Mitsubishi Electric has developed a Z-type control center that supports computerized management of CIM facilities with distributed control systems. Introduced in April 1993, the system implements a central monitoring system with data-link functions. Features include monitoring, control, protection and display functions, programmable controller functions that allow changes in sequencing, and data logging of operation records.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 93~98 (1995)

An Elevator-Car Ceiling-Design Support System with Object-Oriented Modeling

by Yoichi Ichioka, Morio Nakamura, Shigeki Yamamiya, Junji Tanaka & Shoji Kukita

Computers are now essential elevator-design tools; however, development of high-quality designs within short production cycles requires an integrated design support system for upstream processes such as structural design to downstream processes such as drawing. Mitsubishi Electric recently developed a pilot system for the overall design of elevator-car ceilings of its Accel AI passenger elevator series. The system employs object-oriented modeling of ceilings with automatic or interactive structural design and automated drawing.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 99~103 (1995)

The M34560M6-xxxFP Ultralow-Voltage 4-Bit Microcomputer

by Toyokatsu Nakajima, Shuichiro Ouchi, Yuta Makino, Hiroshi Hayaoka & Teruki Yoshimoto

Mitsubishi Electric has developed an ultralow-voltage 4-bit microcomputer for handheld electronic equipment designed to operate on a single battery cell. The device achieves world-class speed for its supply voltage, offering 50kHz performance on a 0.9~3.6V supply and 1MHz performance on a 1.1~3.6V supply. High-performance low-voltage operation was realized by dramatically lowering the transistor threshold voltage. A very thin-gate oxide layer reduces power dissipation.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 104~108 (1995)

M37734E8L/M8LxxxHP : 16-Bit Microcomputers for Handheld Electronic Equipment

by Katsunobu Hongo, Jun'ichi Iwana, Yuji Sasahara, Tatsuya Oki & Haruhiko Matsumi

Mitsubishi Electric has developed the M37734E8L/M8LxxxHP, 16-bit microcomputers for cellular phones and other handheld electronic equipment. They were designed for low-voltage operation and low power dissipation to enable efficient battery operation. The standby current was reduced by developing on-chip circuitry for the clock oscillator and other peripheral circuits. This has also reduced use of external components, allowing smaller equipment designs. The article describes how the power dissipation and external component count were reduced.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 54~59 (1995)

A Negative Hydrogen-Ion Source

by Hisashi Harada & Yuichi Yamamoto

In 1992 and 1993, Mitsubishi Electric designed and produced a negative hydrogen-ion source for use with proton-beam equipment. Testing showed a maximum current of 20mA, and specific emittance of $1.6 \sim 1.9 \pi \text{ mm. mrad}$ with $8 \sim 13 \text{ mA}$ beam current, which are well above the performance targets.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 60~64 (1995)

Beam Simulation for an RFQ Linear Accelerator

by Hirofumi Tanaka & Tetsuya Nakanishi

Existing simulation code was used to develop a program that optimizes specific electrode parameters by imposing acceleration efficiency over transmission efficiency, allowing use by designers without extensive experience. The design of a 200MHz radio-frequency quadrupole (RFQ) linac for accelerating C^{++} ions to 3MeV was optimized by the program. It achieved excellent acceleration performance of 96% transmission efficiency at 0.89MV/m. The article also discusses the variation method and simulation results for a variable energy RFQ linac. Calculations for P^{++} ions showed that energies from 1.1~2MeV could be obtained.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 65~68 (1995)

An Ion Synchrotron Design Program

by Katsuhisa Yoshida & Yoshihiro Ishi

Ion synchrotrons have promising applications in medical and other commercial settings as well as in physics research. Mitsubishi Electric has developed a program to facilitate efficiency studies on processes such as ion injection, radio-frequency capture and acceleration, and beam extraction. The integration method used in the particle-orbit calculations maintains the symplectic characteristic of Hamilton dynamics making it possible to simulate long-term phenomena reliably. The article introduces this program and several of its applications.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 69~73 (1995)

Innovations in MOLDIS, a Wide-Area Mass-Marketing Sales Information System

by Nobuyuki Hiramatsu, Shotaro Shin'yoshi & Takashi Morimasa

With consumer needs diversifying, more sales companies are shifting toward order-based systems that take advantage of manufacturers' small-lot multi-variant production capabilities. Mitsubishi Electric's mass-marketing wide-area sales-information system has been upgraded to allow sales companies to place this type of order easily, with a quick response. These improvements include: constructing a network for businesses serving multiple markets, answering the needs of each business unit, and increasing availability of on-line services. The article introduces the system operation and technologies.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 69, No. 2, pp. 74~78 (1995)

An Information Display System for "MICHINO EKI" Highway Rest/Tourism Facilities

by Masayuki Oishi, Kuniaki Morimoto, Katsuo Inoue & Yuka Fukagawa

Roadside rest/tourism facilities that combine parking, toilet and rest facilities with the promotion of local tourism are currently being constructed along Japan's national highways. Information display systems at these facilities provide drivers with easily assimilated information covering road-traffic conditions and related areas. Mitsubishi Electric has developed a system that features a large 256-color LED screen, animated characters to dramatize scenes and lively background music.

重粒子線がん治療開始に当たって

本年はX線発見100年となる。このことはX線がん治療100年をも意味している。1896年初めには、アメリカ、ドイツ、フランスでX線を用いた治療が開始されている。以来100年の間に、様々の開発が行われ、今やX線は診断・治療に不可欠のものとなった。

当初のX線管は、電子加速器が種々開発されるたびに次々と新しい発生源としてとって代わられて今日に至っている。電子ライナックの進歩によって、回転ガントリに組み込まれた高エネルギーX線装置は驚くべき普及度を示している。我が国においても三菱電機㈱の果たした役割は大きい。

一方、近年コンピュータ技術と結び付いたX線CT、MRIなど診断機器の進歩は著しく、極めて高度の三次元診断画像が得られるようになった。そして、この診断技術の進歩を最大限活用する治療法が切望されるようになった。

しかしながら、はじめに記したように、この100年間放射線の主流はX線であり、本質的に何らの進歩もしていない。これは放射線医学界の責任というよりも物理工学界・産業界に負うところが大きいと考えている。荷電粒子線の

科学技術庁
放射線医学総合研究所
所長 平尾 泰男



体内飛程の末端に発生するエネルギー付与の鋭いピークを用いる可能性は、既に1946年、第二次大戦の直後に物理学者R・ウイilson博士によって示唆されていた。ようやく近年になって、陽子線や重粒子線の臨床試行が積み重ねられ、陽子線はアメリカ・ロマリング大学で専用施設が稼働し、重粒子線専用施設（HIMAC）は放射線医学総合研究所で稼働しようとしている。この臨床実績が認められるにつれて、高度診断の必要性はますます高まり、また、重粒子線医療施設の重要性もますます高まるであろう。

HIMACの設計・建設に当たって、三菱電機㈱は取りまとめ役として幾多の困難を乗り越えて、見事に完成させる大役を果たされた。今後は、その普及にも一層の努力を払われることを期待してやまない。そして、全人類に最良のQuality of Lifeをもたらす日の来るのを切望している。この計画は政府の“対がん10カ年総合戦略”の一環として実施されたものであり、関係された諸氏に心から感謝の意を表するとともに、その責任の重大さをひしひしと感じている。

重粒子線がん治療装置の現状と将来

平尾泰男*
速水和大**

1. ま え が き

1993年12月、科学技術庁放射線医学総合研究所(以下“放医研”という。)で重粒子線がん治療装置(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba: HIMAC)が、全照射コースへのビーム誘導を実現し、完成した。三菱電機(株)は、その取りまとめ会社を務めた。ここに、重粒子線がん治療装置特集を組み、HIMACの概要を紹介するとともに、重粒子線がん治療装置の現状・将来をまとめた。

日本におけるがん死亡者数の推移を見ると、社会の高齢化の進展とあいまって、年々増加し、1981年にはそれまで第1位であった脳卒中を抜いてトップとなり、なお上昇している。がん患者数は1993年現在、約91万人(内、男44.3万人、女46.5万人)に上っている。入院・外来患者数などを基に推計されている⁽¹⁾。1990年と比べると全体で約15.7万人増加している。

このようながんのすう(趣)勢に対抗するために、政府は1983年“対がん10カ年総合戦略”を策定し、がん研究を総合的かつ重点的に推進することにした。

当時、重粒子線は、その線量集中力の優秀性のみならず、従来、放射線抵抗性とされてきた難治性がんにも優れた効果を発揮することが、臨床研究で明らかになりつつあった。

重粒子線によるがん治療に対して積極的な利用を計画していた放医研に、この総合戦略の重要課題の一つとして、“放医研重粒子線がん治療装置”の建設が認可された^{(2)~(5)}。

ここでは、がん人口動態、がん治療方法の現状、放射線治療法と特徴、粒子線(重粒子線、陽子等)治療法の普及状況と治療効果、粒子線治療施設の建設計画等を記述して、粒子線治療の現状と将来を概観する。

2. がん人口動態

1993年の日本の総人口は、124,043千人で、総死亡数は829,797人、そのうち全がん死亡数は、223,727人(約27.0%)と推計されている⁽⁶⁾。将来の予測では、2015年で見た場合、総人口では、1991年と比べて約1.04倍(129,450千人)と予測されている。全体として変化は少ないが、65歳以上の年齢で見ると、約2.18倍(27,266千人、全人口の約21.1%)と予測されている⁽⁷⁾。がんの部位で若干の傾向の違いはあるが、がん死亡者数は、40、50歳代で徐々に増えて60歳代で急増し、80歳代近くでピークになる傾向を示す⁽⁸⁾。

部位別のがん死亡率の男女の年次推移を図1に示す⁽⁸⁾。

“胃がん”は男女共に多く、1991年には男ではがん死亡の22.5%、女では19.7%を占めている。次いで多いのは、男女共に“肺がん”で、男はがん死亡の20.8%、女は11.5%を占めている。従来多かった“胃がん”や“子宮がん”の死亡率は減少傾向にあり、早期診断・早期治療等の医療技術進歩の効果と考えられている。

2015年の予測では、部位別の順位は、肺がん、胃がん、結腸がん、肝がん、と推計されている⁽⁷⁾。なお、既に平成5年上半期には、男では“胃がん”を抜いて“肺がん”がトップになっている⁽⁹⁾。

3. がん治療方法の現状

従来のがん治療法の特徴比較を表1に示した⁽¹⁰⁾。がん治療方法には、外科療法(手術)、放射線治療法、化学療法(薬物療法)等があり、これら単独又は幾つかの方法が併用されている。がん治療方法に関する国立がんセンターの統計によると⁽⁸⁾、図2に示すように、1991年では、外科療法単独が全体の48.2%、化学療法単独が13.8%、放射線治療法単独

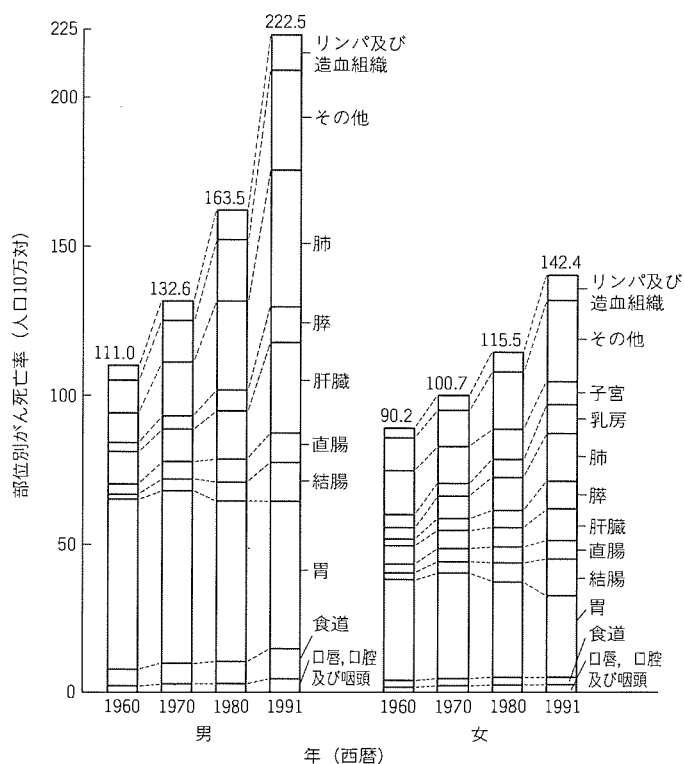


図1. 部位別に見たがん死亡率の男女の年次推移⁽⁸⁾

が5.1%で、これら単独療法のみで67.1%を占める。そのほかは、二つ以上の治療法併用型であり、放射線治療法との併用型は10.4%を占め、放射線治療法全体では15.5%になる。なお、1975年では放射線治療法のみが4.7%で、併用型が21.5%であった。放射線治療法単独では増加傾向を示し、併用型は半分に減少している。すなわち、放射線治療法のみで最大限の効果を上げる方法が確立され、併用から期待される治療効果もかなり明らかになり、効率的に治療が実施されてきた結果と考えられる⁽¹¹⁾。

4. 放射線治療法と特徴

高エネルギー X 線、コバルト γ 線、電子線等の治療装置が導入されて、放射線治療は著しく進歩を遂げたが、更なる飛躍のために、次の課題の克服が必要になっている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

- (1) 患部に照射される放射線の線量分布の改善
- (2) 放射線感受性の極めて高い臓器に対する障害の軽減
- (3) 放射線抵抗性の強い難治性がんに対する治癒(癒)率の改善

図3に、放射線の種類の分類例を示した。上記課題を解決するための放射線としては、広義の重粒子線(粒子線)が挙

げられる⁽¹³⁾。粒子線には、中性子線、陽子線、 π 中間子線、狭義の重粒子線(重イオン)等がある。このうち、重イオンは、課題である線量分布、放射線感受性及び生物学的効果に関して後述するように、X 線、電子線より優れた性質を持っている。

図4は、各種粒子線の入射エネルギーと水中での飛程との関係を示している。なお、飛程とは入射粒子線が物質中で停止するまで走る距離である。人体の組織は、骨等を除けば水と等価と見なすことができるので、図4のデータから人体組織で進入可能な長さとし、ビームエネルギーの関係をj知ることができる。人体組織の厚みとしては、日本人の体格を考慮して最大厚みとして30cmが適当と言われているが、その飛程を持つ粒子線のエネルギーは、ヘリウム(陽子もほぼ同じ)、炭素、ネオン、シリコン及びアルゴンのそれぞれに対して、約230MeV/u、約430MeV/u、約600MeV/u、約750MeV/u及び約800MeV/uである。すなわち、各粒子線を治療に使用するには、最大このエネルギーまで加速する必要がある。なお、MeVは粒子線の運動エネルギーの単位であり、/uは、“原子核の核子当たり”の意味で用いられる。

加速器から出射された粒子線ビームは、単にそのまま治療室に導入されるのではなく、ビーム断面を拡大したり、その一部のみを通過させて他をカットしたりして、患部に合った大きさに調整され、がん治療に供される。

4.1 線量分布

重粒子線、陽子線等に共通する特徴は、その優れた線量分布制御性にあり、いずれもγ線や電子線に比べて正常組織の被ばく(曝)を減少させ、病巣に集中させることができる。これは、前記した課題(1)に対する解答を与えてくれる。端的な例はブラッグピークであり、図5に示す⁽³⁾⁽¹⁰⁾⁽¹⁴⁾。

表1. がんの治療法⁽¹⁰⁾

	外科療法	放射線療法	化学療法
適 応	●主として早期がん。 (0～I期のがん) ●局所	●主として早期がんから 局所進行がん。 (II～III期までのがん) ●局所	●主としてIV期の転移が ん及び白血球。 ●全身
長 所	●早期がんの場合、根治 (99%)可能。 ●早期がんの場合、再発 の可能性が少ない。	●機能欠損が少ない。 ●早期がんの治療成績は 外科療法と同等。 ●再発の可能性が少ない。	●延命効果がある。
短 所	●病期、部位、宿主条件 (年齢、合併症)により 適応に限界あり。 ●放射線に比べて機能欠 損、生命の危険及び再 発の可能性が大。	●放射線障害あり。 (急性、晩発)	●副作用が強い。 (全身性) ●根治性が低い。 ●晩発性の副作用(化学 発がん)の可能性あり。
費 用	低	中	高

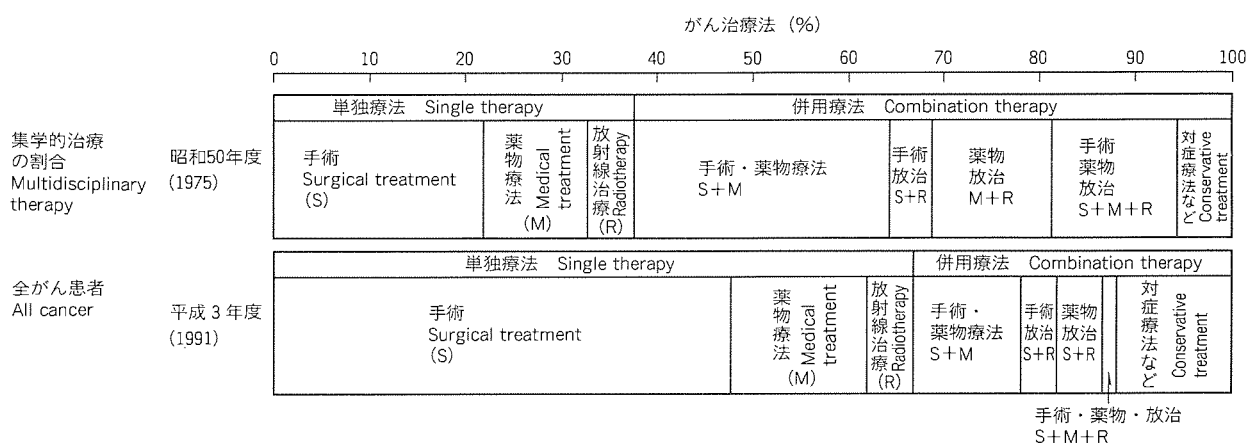


図2. がん治療法(国立がんセンター病院, 初発症例: 昭和50年度・平成3年度の比較)⁽¹¹⁾

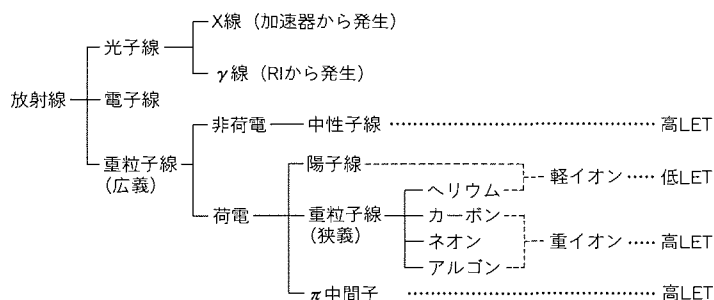


図3. 放射線の種類 (13)

γ線や速中性子線の線量分布は、身体表面近くで最も強く、深く進むに連れて減弱する。このことは、深部のがんを治療する場合、それに至る途中経路の正常組織が障害を受けやすく、また、図中の“がん病巣”よりもっと深部にまで影響を与えてしまう。これに比べて、陽子線や重粒子線は、表面からピークの直前まで平坦な線量を示し、ピーク（ブラッグピークと呼ばれる。）を経て、線量がほぼ0になっている（この位置までに粒子線は停止する）。すなわち、重粒子線又は陽子線のエネルギーは、ブラッグピークの位置で集中的に与えられ、治療ではこの部分が、がんの患部に一致するように照射される。深さが深いほど、それに応じてブラッグピークも深い所に生じる必要があるが、これは粒子線の運動エネルギーを大きくすることで可能である。このようにして、粒子線の特性を利用することにより、正常細胞の損傷を極力少なくすることが可能となる。

4.2 放射線感受性

がん細胞は、細胞の条件によって放射線に対する感受性の度合いが異なる。感受性の種類を以下に記す⁽¹⁵⁾。

(1) 分裂をしている組織（例えば、皮膚、リンパ線、血液）は感受性が高く（すなわち、効果が大きい）、分裂していない組織（例えば、筋肉、神経）は感受性が低い。

(2) がん細胞に含まれている酸素に依存して放射線への感受性が異なる場合がある。この効果は放射線の種類に大きく依存する。図6右側には、この酸素感受性を酸素増感比、OER (Oxygen Enhancement Ratio) で示してある。酸素濃度の低い、頑固ながん細胞に対してはOERの小さい粒子線ほど、効果的な治療ができる⁽¹⁰⁾。

この効果は、課題(2)に対する解答を与える。

4.3 生物学的効果

重粒子（π中間子・速中性子によって発生する二次粒子を含む。）は、その飛程端末の付近の軌道に沿って電離密度が高いので高LET (Linear Energy Transfer: 線エネルギー賦与の意) 放射線と称せられ、生物学的効果比、RBE (Relative Biological Effectiveness) が大きい。RBEは、放射線の生体に対する作用の程度を表し、放射線治療では、この値が大きいほどがん患部の殺傷能力が高い⁽¹⁰⁾。これに対して、陽子線やヘリウムの生物学的効果比は光子線や電子線と

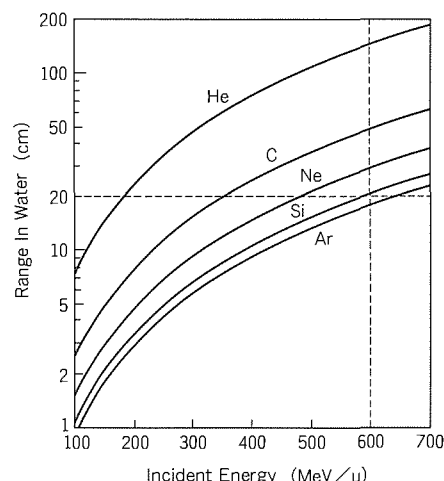


図4. 各種粒子線の入射エネルギーと水中での飛程 (4)

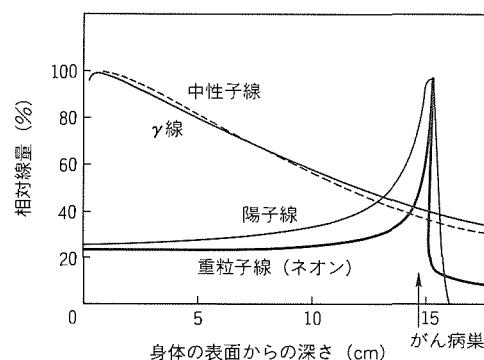


図5. 各種放射線の生体内における線量分布 (10)

ほぼ同じで、低LET放射線と呼ばれる^{(3) (13) (14)}。

なお、高LET放射線は、前記した課題(3)の解答となる。代表的な粒子線のRBEは、図6の左側に示す⁽¹⁰⁾。

5. 粒子線治療の治療効果

5.1 治療の歴史

粒子線治療は、1938年にローレンスバークレー研究所で速中性子線治療を始めたのが世界初であった。重粒子線による治療は、1975年から同研究所で開始された。

一方、国内では、放医研が1970年ヴァンデグラフによる速中性子線治療を開始、1975年サイクロトロンによる速中性子線治療を開始、1979年同装置による陽子線治療を開始している。また、筑波大学陽子線医学利用センターでは、1983年に高エネルギー物理学研究所の陽子シンクロトロンから供給される250 MeVの陽子線による垂直ビームラインを使った臨床応用が開始された^{(14) (16)}。欧米では、併用、又は転用で数多く陽子線治療が試行されているが、1990年には、アメリカのロマリング大学で世界で初めての陽子線治療専用施設が出来、1993年末現在、約680人の治療が行われた。1993年には、放医研で重粒子がん治療装置が完成し、1994年6月から治療が開始された。

5.2 治療実績

表2には、世界の粒子線治療施設と現在までの治療患者総数が示してある。表中には、陽子線、 π 中間子及び重粒子の区別、治療期間等も併記してある。陽子線治療施設が16、 π 中間子治療施設が3、重粒子治療施設が2、となっている。なお、放医研の重粒子線治療施設は、表6の計画の方に掲載しており、ここには記載していない。図4の飛程で見たよう

に、陽子線の場合、身体の部位に限定されることなく治療できるには230 MeV/u 必要になるが、この条件を満たす施設は4施設ある。180 MeV/u から200 MeV/u の範囲の装置は、人体組織の厚さで20 cm 程度まで治療が可能であるが、この範囲の装置は約5台ある。重粒子の施設2台は、がん治療専用施設ではないが、ネオン程度までの重粒子によ

る、がん治療には十分なエネルギーを持っている。

粒子線による治療実績を、陽子線、重粒子線及び π 中間子の患者数で見た場合、表2からそれぞれ、12,951、2,487 及び1,047 人となっている。治療結果については、陽子線治療は表3に、重粒子線治療は表4に示した。

表3の陽子線治療の例は、筑波大学陽子線医学利用研究センターの場合であり、1983年から高エネルギー物理学研究所のシンクロトンからの500 MeV 陽子線を250 MeV に下げて使用している。患者の総数は、252人に達しており、局所治癒率は、75%以上に達している。

表4の例は、ローレンスバークレー研究所の治療の場合である。表中には、局所制御成功率が示してあり、鼻いん(咽)頭・副鼻腔しゅよう(腫瘍)、耳下せん(腺)腫瘍、前立腺がん及び悪性肉腫に、Neイオンが有効であることを示している。なお、この施設は、主たるユーザであった核物理研究にとって旧式化している上に、老朽化もあり、1991年シャットダ

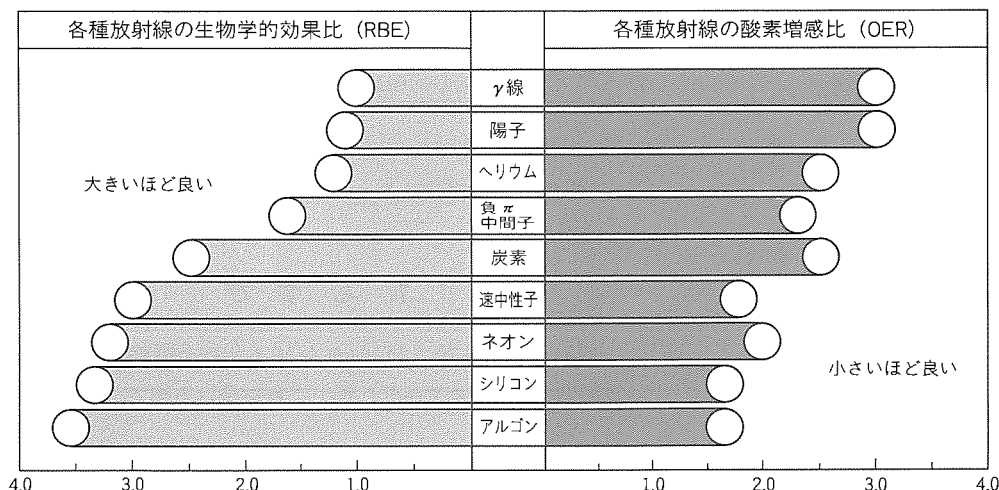


図6. 各種放射線の生物学的効果比(RBE)及び酸素増感比(OER) ⁽¹⁰⁾

表2. π^- ・陽子・重イオン治療施設と患者数 ^{(13) (14) (17)}

国名	場所	粒子, エネルギー (MeV)	患者数 (人)	治療期間	備考
米 国	バークレー	p, 740	30	'55~'57	休止
	バークレー	He, 920	2,054	'57~'91	休止
	バークレー	C, Ne, 500	433	'75~'91	休止
	ハーバード	p, 160	6,010	'61~'93	
	ロマリンド	p, 250	682	'90~'93	医用専用
	ロスアラモス	π^- , 800	230	'74~'82	休止
	インディアナ	p, 200	1	~'93/12	サイクロトロン
カナダ	バンクーバー	π^- , 520	314	'74~'93	
ロシア	モスクワ	p, 200	2,550	'69~'93	
	ドブナ	p, 680	84	'64~'74	一時休止
		p, 680	24	'87~'93	
日本	セントペテルスブルグ	p, 1 GeV	719	'75~'91	
	千葉	p, 80	86	'79~'93	
英国	筑波	p, 250	354	'83~'93	
	クラックブリッジ	p, 62	463	'89~'93	
フランス	ニース	p, 90	216	'91~'93	
	オルセイ	p, 200	235	'91~'93	
スイス	フィリゲン (PSI)	p, 72	1,363	'84~'93	
	フィリゲン (PSI)	π^- , 590	503	'80~'93	
ベルギー	ルバンラヌーボ	p, 65	21	'91~'93	
スウェーデン	ウプサラ	p, 185	73	'57~'76	一時休止
		p, 185	34	'88~'92	
南アフリカ	N.A.C.	p, 200	6	~'93/11	
1993年末 治療患者数 (人)	π^- (負中間子) ビーム		1,047		
	p (陽子) ビーム		12,951		
	He, C, Neイオンビーム		2,487		
	全種類 合計		16,485		

注 π^- のエネルギーは、一次ビーム、pの運動エネルギーである。
イオンビームのエネルギーの単位は、MeV/uである。

ウンされた。

表5に、主要ながんに対する重粒子線治療の特徴を示した。すい臓がん及び脳腫瘍は、速中性子や陽子線では治療が困難で、重粒子線治療による局所治癒への期待が大きく、直腸がん及びぼうこう(膀胱)がんは、重粒子線によって機能保全が期待されており、肺がん及び肝臓がんは、重粒子線によって治療の適用が拡大すると期待されている。

6. 粒子線治療施設の建設計画

表6には、世界の粒子線治療施設の建設計画が示してある。表では、重粒子線治療施設は、4施設があがっている。その

表3. 筑波大学の陽子線治療結果(1993年7月集計)⁽¹⁴⁾

部 位	患者数	局所治癒率 推定 (%)	3 年 生存率	後遺症
皮 膚	8	7 (87.5)	87.5	0
脳				
グリオーム	17	5 (29.4)	18.5	3
髄膜腫など	14	12 (85.7)	75.0	0
頭 頸 部	21	14 (66.7)	73.3	0
肺	21	15 (71.4)	45	1
食 道	28	22 (78.6)	53.8	4
肝 臓	70	59 (84.3)	41.4	3
胃	5	3 (60.0)	61.0	0
腎 臓	5	2 (40.0)	60.0	0
子 宮	26	21 (80.8)	80	3
膀 胱	19	14 (73.7)	86	2
前 立 腺	8	8 (100.0)	86	0
小 児 腫 瘍	6	5 (83.3)	75.0	0
そ の 他	4	3 (75.0)	100.0	1
合 計	252	190 (75.4)		17 (6.7%)

うち、放医研は1994年6月臨床試行を開始した。ダルムシュタット(GSI)は、既に1994年4月現在加速器装置本体は稼働しており、1996年臨床開始の予定である。兵庫県は1994年度末に建設開始、1998年度運転開始の予定で、イタリアのNOBARAは、1996年建設開始、2000年運転開始の予定である⁽¹⁷⁾。

一方、陽子線の計画では、200 MeV 付近の設備が9台、他は60から70 MeV で4台、エネルギー不明が2台ある。200 MeV 付近の装置のうち、7台は1995から1998年に治療開始する予定になっている。米国では、現在、治療中の設備で200 MeV 級が3台あり、計画中の設備が3台(1996から1998年に運転開始)ある。日本では、筑波大学の計画が1台ある。

7. む す び

1994年度から第二期“対がん10カ年総合戦略”が、“がん克服”に向けてスタートした。これを受ける形で、放医研の

表4. ローレンスバークレー研究所における
Neイオン治療成績(J.R.Castro, MD.⁽¹⁸⁾による)

部 位	Neイオン	X 線
鼻 咽 頭		
副 鼻 腔	14/16 (67%)*	(21%)
耳 下 腺	11/14 (79%)	(28%)
前 立 腺	12/13 (92%)	(60%)
悪 性 肉 腫	21/36 (58%)	(28%)

注 * 左側の数値は治癒患者数であり、右側の数値は照射対象数である。
()内は局所治癒率である。

表5. 主要ながんに対する重粒子線治療の特徴⁽¹⁰⁾

	がんの種類	病気の特徴	現在の状況	重粒子線によって期待される治療効果
速中性子や陽子線では治療が困難なもの	すい臓がん	発見されるのが遅い。	十分な線量を与えるのが困難。	周辺臓器の障害が減少し、局所治癒の可能性。
	脳腫瘍	正常組織の保護が重要。	十分な線量を与えるのが困難。	脳障害が減少し、局所治癒は向上する。
速中性子線より更に治療効果が上がるもの	頭頸部がん	機能保全が重要。	放射線損傷に問題がある。	局所治癒が向上し、障害は10%以下に減少。
	食道がん	発見されるのが遅い。	十分な線量を与えるのが困難。	放射線障害は著しく減少。治癒は向上する。
	骨軟部組織肉腫	放射線感受性が低い。	局所治癒は改善したが、まだ障害が強い。	障害が少なく、四肢の切断は不要になる。
	子宮頸がん	放射線治療の適応。	局所治癒は改善したが、まだ障害も多い。	局所治癒よりは改善し、障害も減る。
陽子線よりも更に治療効果が上がるもの	下垂体腫瘍	移転しにくい。	約6割の症例に著効。	最も効果的な治療法となる。
	前立腺がん	限局したがんが多い。	約40%の症例が手術不要。	手術の必要はほとんどなくなる。
重粒子線治療による臓器の機能保全が期待されるもの	直腸がん	機能の保全が最重要。	手術による治療。機能障害が問題。	機能保全に期待。
	膀胱がん	機能の保全が最重要。	膀胱の機能障害が問題。	局所治癒の向上と、機能保全に期待。
重粒子線によって治療の適応が拡大するもの	肺がん	発生件数が増加。	進行がんのみ対症的放射線治療。	早期肺がん治癒の向上と、機能保全に期待。
	肝臓がん	発生件数が増加。	手術で助かる症例が出てきた。	手術より機能保全が良い。

表 6. 世界の陽子・重粒子線治療施設の建設計画 (13) (14) (17)

国 名	場所又は施設名	エネルギー (MeV)	開始 予定	備 考
米 国	アメリカ陽子線開発会社 (APDC)	p, 250	1996	
	ハーバード (NPTC/MGH)	p, 200	1997	
	マサチューセッツ	p, 230	1998	1995製作開始
ロ シ ア	ノボシビルスク	p, 180~200	1995	ライナック方式
	モスクワ (ITEP)	p, 200	1996	
日 本	放医研 (HIMAC)	重粒子, 800MeV/u	1994	4月から臨床試 行開始
	筑波大 (PMRC)	p, 250	—	
	兵庫県	重粒子, 320MeV/u	1998	1994設計開始
英 国	クラップブリッジ	p, —	—	既設施設の増設
カ ナ ダ	バンクーバー (TRIUMF)	p, 72	1994	
ド イ ツ	ユーリッヒ (KFA)	p, —	1997	COSY
	ベルリン	p, 72	1995	サイクロトロン
	ミュンヘン	p, 64	1995	サイクロトロン
	ダルムシュタット	重粒子 1 GeV/u	1996	加速器本体は, 既に完成
イ タ リ ア	NOVARA	重粒子, 400MeV/u	2000	銀行がスポンサ ーとなって建設
	FIRENZE	p, 250/300	1999	同上
ス イ ス	ポールシェラー研究所 (PSI)	p, 200	1994	
オ ラ ン ダ	グローニンゲン (KVI)	p, 200	1997	
ポーランド	KRAKOW	p, 60	?	

注 pは、陽子を意味し、重粒子は、ヘリウム、炭素、ネオンのフルストリップイオンを意味する。

重粒子線がん治療施設では、同年6月から本格的な臨床試行に入り、同年8月現在3人の治療照射が成功(裡)に終わった。今後、年間1,000人の治療照射を目標に体制が整えられる。世界的には、本文で見たように、今後、年ごとに、粒子線によるがん治療開始が続き、施設の大幅な増加が期待され、治療施設建設に対する期待は大きいものがある。

参 考 文 献

- (1) 厚生省：平成5年患者調査 (1994-12)
- (2) 平尾泰男：重粒子線がん治療装置，放治システム研究，4，No.2，81~84 (1987)
- (3) 平尾泰男：HIMAC計画，放射線医学総合研究所 (1993)
- (4) 河内清光：重イオン加速器の医学利用計画，日本原子力学会誌，29，No.12，29~33 (1987)
- (5) 河内清光：21世紀のがん治療を目指す HIMAC，放射

線科学，33，No.1，2~10 (1990)

- (6) 厚生省人口問題研究所：「日本の将来推計人口」平成3年6月推計
- (7) 富永祐民・青木国雄・花井 彩・栗原 登：「がん・統計白書」ーり患/死亡/予後ー篠原出版 (1993)
- (8) 財がん研究振興財団：がんの統計 (1993)
- (9) 財厚生統計協会：厚生 の指標，1994年1月号
- (10) 科学技術庁放射線医学総合研究所：重粒子がん治療装置 HIMACーがん治療の期待を担ってー (1993)
- (11) 柄川 順 編著：がん放射線治療マニュアル，中外医学社，367~385 (1992)
又は癌・放射線治療法，篠原出版，205~219 (1988)
- (12) 放射線医学総合研究所：放医研における「対がん10カ年総合戦略」ーがん本態解明からがん克服へーへの取り組み，放射線科学，36，No.9，324~330 (1993)
- (13) 辻井博彦，辻 比呂志，奥村敏之：重荷電粒子線治療画像医学プロGRESSシリーズ4，放射線腫瘍学・免疫核医学[別冊]，中山書店，95~114 (1993)
- (14) 福本貞義：粒子線癌治療の現状，日本原子力学会誌，35，No.10，885~890 (1993)
- (15) 宮本忠昭：癌治療における放射線療法役の役割ー現状と展望ー，放射線利用研究会報告書 医学利用グループ，日本原子力産業会議 (1989)
- (16) 筑波大学粒子線医科学センター：“粒子線医科学センター10年の歩み” 昭和55年4月~平成2年3月
- (17) 河内清光：第6回定例研究会「第一回国際ハドロン治療シンポジウムの報告」に関する講演 (1994-2)，日本原子力産業会議 (放利研・医学利用グループ)
- (18) Castro, J. R.: 2nd European Particle Accelerator Conference, Nice, 1, 369 (1990-6)

科学技術庁放射線医学総合研究所 重粒子線がん治療装置(HIMAC)の概要

河内清光*
上田孝寿**

1. ま え が き

科学技術庁放射線医学総合研究所(以下“放医研”という。)では、“対がん10カ年総合戦略”の重要課題の一つとして世界最初の医療専用の重粒子線がん治療装置(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba: HIMAC)の建設に取り組んできた。

1984年度から概念調査を、さらに1988年11月に建設を開始し、1993年12月には、全コースへのビーム誘導を実現して完成した。1994年3月には施設使用許可が下り、以来、臨床試行のための基礎実験を進め、6月には治療照射が開始された。

HIMAC 建屋は、建設省関東地方建設局の下で、(株)日建設計・(株)開発設計の2社の設計共同企業体で設計、(株)大成建設・(株)銭高組・(株)鉄建の3社から成る共同企業体が建設した。

HIMAC 本体では、放医研の下で三菱電機(株)を主契約会社として、住友重機械工業(株)、(株)東芝及び(株)日立製作所の4社で分担し、現在、我が国が持つ最高の加速器技術を結集して製作された。三菱電機(株)は、幹事会社を務め、①建屋への要求事項、②4社間の取合条件・共通仕様・総合工程の調整、③現地総合組合せ試験、④ビーム試験工程の調整等の取りまとめを行うとともに、高エネルギービーム輸送システム(以下“HEBT (High Energy Beam Transport) 系”という。)、治療・照射システム(以下“治療照射系”という。)、全系制御システム(以下“全系制御系”という。))及び冷却水システム(以下“冷却水系”という。)を担当した。なお、主加速器システム(以下“主加速器系”という。)の電磁石等の据付け工事は、日本建設工業(株)が実施した。

2. 建屋と装置の配置

敷地面積 約180 m × 100 m の内、約120 m × 65 m の面積に装置の建

屋が建てられ、地下2階及び地上2階建てである。図1は、HIMAC 全体の鳥瞰(瞰)図である。

図では、地下2階のイオン源室から始まり、RFQ (Radio-frequency Quadrupole Linac) 及びアルバレイナック(以下“DTL” (Drift Tube Linac) という。)を収納している線形加速器室で終わる入射系、入射ビーム輸送システム(以下“入射ビーム輸送系”という。)で始まり、地下1・2階の主加速器電源室・シンクロトロン I・II と続き、出射ビーム輸送システム(以下“出射ビーム輸送系”という。)で終わる主加速器系、地下2階の HEBT 系、物理汎用照射室、二次ビーム照射室、地下1・2階にわたって配置された垂直ビームラインを経由して治療照射室の入口まで続く HEBT 系、治療照射室 A・B・C、生物照射室、待合室等で代表される治療照射系が続く。

図にはないが、地上1階には、HIMAC 全体の運転・制御を管理する加速器制御室、変電設備、冷却水系等を管理する設備制御室、建屋回りの漏えい放射線量を監視する安全管理室等が設けられている。地下1階には、入射系電源室、HEBT 系電源室等がある。

3. 重粒子線がん治療装置 (1) ~ (6)

3.1 基本的な考え方

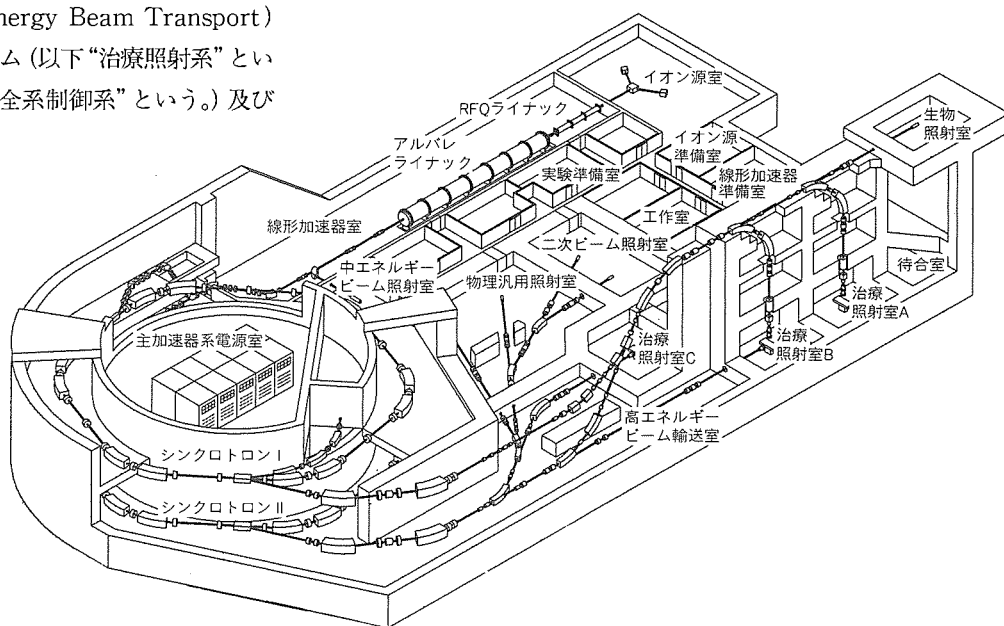


図1. HIMAC全体鳥瞰図

HIMAC システム設計・製作では、次の点を重視した。

- (1) HIMAC は医療専用装置であり、患者への誤照射の防止、ビーム異常時の緊急停止等の人命にかかわるインタロックは、高い信頼性を持たせ、安全性を高める。
- (2) HIMAC は、多種多様の患者を能率良く治療するため、基礎研究用の加速器に比べて、はる(遙)かに厳しい安定性・再現性が必要である。
- (3) 重粒子加速器としては開発要素を少なくし、できる限り信頼性の高い既存技術の積み重ねによって構成する。
- (4) 保守・運転を容易に行えるよう可能な限り自動化する。
- (5) 長期間にわたって最高水準の利用施設であるために、性能向上への拡張性をできるだけ残すように構成する。

3.2 仕様

がん治療装置としての仕様を表1に示す。

- (1) HIMAC で使用する重イオンは、質量数40のアルゴンに至る比較的に軽い重イオンである。
- (2) 重イオンのエネルギーは、シリコンの体内飛程 30 cm を最大と考えて 800 MeV/u とし、ヘリウムの飛程 10 cm を考慮して、最低エネルギーを 100 MeV/u とし、その間は連続可変とする。
- (3) 加速器及びビームラインの各部におけるビーム強度を表

表1. HIMACのがん治療装置としての仕様

重粒子線の種類	ヘリウム～アルゴン
飛程	30 cm (軟組織中)
照射線量率	5 Gy/min
照射野	φ22cm
照射方向	水平、垂直方向

表2. HIMACの加速器としての仕様

イオンの種類	ヘリウム～アルゴン
最大エネルギー	800 MeV/u
最小エネルギー	100 MeV/u
ビーム強度	2×10^9 pps/リング (炭素)
デューティファクタ	20 %/リング
繰返し率	0.5 Hz/リング

2に示す。表中の強度は、1台のシンクロトロン (0.5 Hz 運転) を運転した場合である。上下リングを同時運転した場合には、表中の2倍の強度 (1 Hz 運転) が得られる。

3.3 入射系

入射系の、イオン源、RFQ 及び DTL を以下に記す。その仕様は表3に、図2には全体配置を示した。

3.3.1 イオン源

重イオンを生成するイオン源としては、PIG (Penning Ion Guage) イオン源と ECR (Electron Cyclotron Resonance) イオン源の2種類が用意してある。

PIG イオン源は、構造が簡単で信頼性に富み、他のイオン源に比べて安価である。比較的、軽い重イオン生成に適している。イオン衝撃によって陰極が消耗し、寿命が短いことが欠点だったが、アーク電源をパルス化し、無用なイオンの生成と陰極の消耗を抑え、長寿命化した。

表3. 入射系の仕様

重粒子線の種類	$^4\text{He} \sim ^{40}\text{Ar}$
電荷質量比	$\geq 1/7$
イオン源の種類	PIG&ECR
高周波の周波数	100MHz
繰返し率	最大 3 Hz
デューティファクタ	最大 0.3 %
アクセプタンス	$0.6 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (規格化)
RFQ	
入射/出射エネルギー	8 / 800 keV/u
ペーンの長さ	7.3 m
空洞の直径	0.59 m
最大表面電界強度	205 kV/cm (1.8 Kilpatrick)
ピーク高周波電力	260 kW (70 %Q)
DTL	
入射/出射エネルギー	0.8 / 6.0 MeV/u
全長	24 m (3 個のRF空洞)
空洞の直径	2.20 / 2.18 / 2.16 m
平均軸上電界強度	1.8 / 2.2 / 2.2 MV/m
シャントインピーダンス	31 ~ 46 MΩ/m
最大表面電界強度	150 kV/cm (1.3 Kilpatrick)
ピーク高周波電力	840 / 830 / 770 kW (75 %Q)
収束磁石配列	FODO (最大 5.1 kG/cm)
出射ビームエミッタンス	$\leq 1.5 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (規格化)
運動量分散	$\leq \pm 1 \times 10^{-3}$

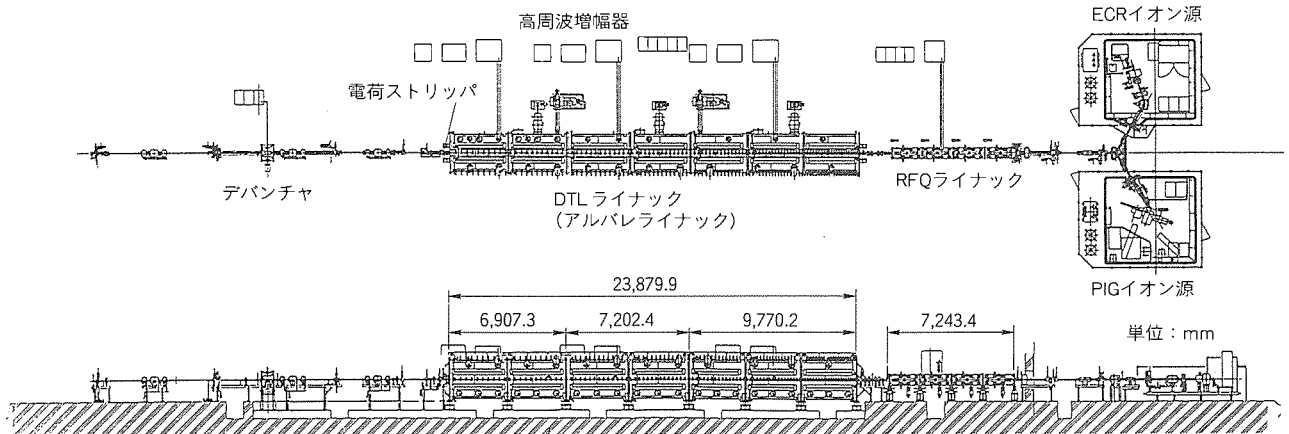


図2. 入射系の全体配置

ECR イオン源は、PIG イオン源に比べて高い電荷数のイオン生成に適しており、動作の安定性、保守の容易さ等で PIG イオン源に比べて遙かに優れている。

それぞれのイオン源は、少なくともヘリウムからアルゴンまで所定の性能が得られることが確かめられている。なお、片方のイオン源が RFQ ヘイオンを供給している場合、他のイオン源は待機状態にある。

3.3.2 RFQ

イオン源で生成されたイオン（荷電質量比 1/7 以上に限定）は約 8 keV/u で出射され、分析電磁石で質量及び運動量を分析して、RFQ に入射される。

RFQ は約 8 keV/u の入射イオンを約 800 keV/u まで加速することができ、構造は普通の型式の四極ベーン型であ

り、軸方向に 4 タンクに分離されている。ベーンは、円筒状加速空洞のタンク内に正確に固定される。タンク及びベーンの材質は、それぞれ銅めっき軟鋼及び純銅である。加速空洞直径及び全長は、それぞれ約 0.6 m 及び 7.3 m ある。加速空洞の共振周波数は、100 MHz に選択されている。

3.3.3 DTL

RFQ からのビームは、各種ビームモニタ、四極電磁石、ステアリング電磁石等を介して DTL に入射される。DTL 直径及び長さは、それぞれ約 2.2 m 及び 24 m あり、空洞は三つの部分に分割されている。DTL では、荷電質量比 1/7 以上の重イオンを 800 keV/u から 6 MeV/u に加速する。このライナックから出射されたイオンは、荷電変換器でフルストリップ状態になり、各種ビームモニタ、デバンチャ等を通り、主加速器系に導入される。

3.4 主加速器系

2 台のシンクロトロンから構成される主加速器系は、入射ビーム輸送系、シンクロトロン（以下、その形状から“リング”という。）及び出射ビーム輸送系から構成される。表 4 には主加速器系の仕様を、図 3 にはリングの基本配置を示す。

3.4.1 入射ビーム輸送系

この系は、DTL からビームを受け、2 台のリングの交互運転に同期させて、上下リングにビームをスイッチングしている。上下にビームを振り分ける電磁石は、回転半径 0.6 m、60° 偏向の積層電磁石（最大磁場強度は 1.4 T で 6 MeV/u に対しては 1.2 T である。）である。その電源は、140 ms の立上げ及び立下げ時間を持ち、フラットトップ出力電流の安定度は 1×10^{-4} 以下であり、その時間は 3 ms 以上である。

この系では、それぞれのリングの入口のツイスパラメータを多重入射光学の条件に整合するように調整できる。ビーム運動量及び荷電質量比は、プロファイルモニタ及びスリット

表 4. シンクロトロンの主要パラメータ (5) (6)

最大磁気剛性率	9.75 Tm
入射エネルギー	60 MeV/u
出力エネルギー	100~800 MeV/u
軽イオンの最大強度	10^{11} ppp
繰返し率	0.3~1.5 Hz
入射エミッタンス (水平/垂直)	264/26.4 π mm · mrad
出力の運動量分散	$\pm 0.3 \%$
入射ターンの数	40
荷電質量比 (Ar^{18+})	0.5
真空度	5×10^{-7} Pa
ラティス構成	FODO
周 長	129.6 m
周 期 数	6
周期当たりのセル数	2
長/短直線部の長さ	5.0/0.8 m
最大剛性率時偏向磁場強度	1.5 T
最大剛性率時四極磁場こう配	7.4 T/m
ベータトロンのチューン数	3.75/3.25
固有のコロマトシニティ	-3.90/-3.99
冷却系の熱負荷	5.4 MW

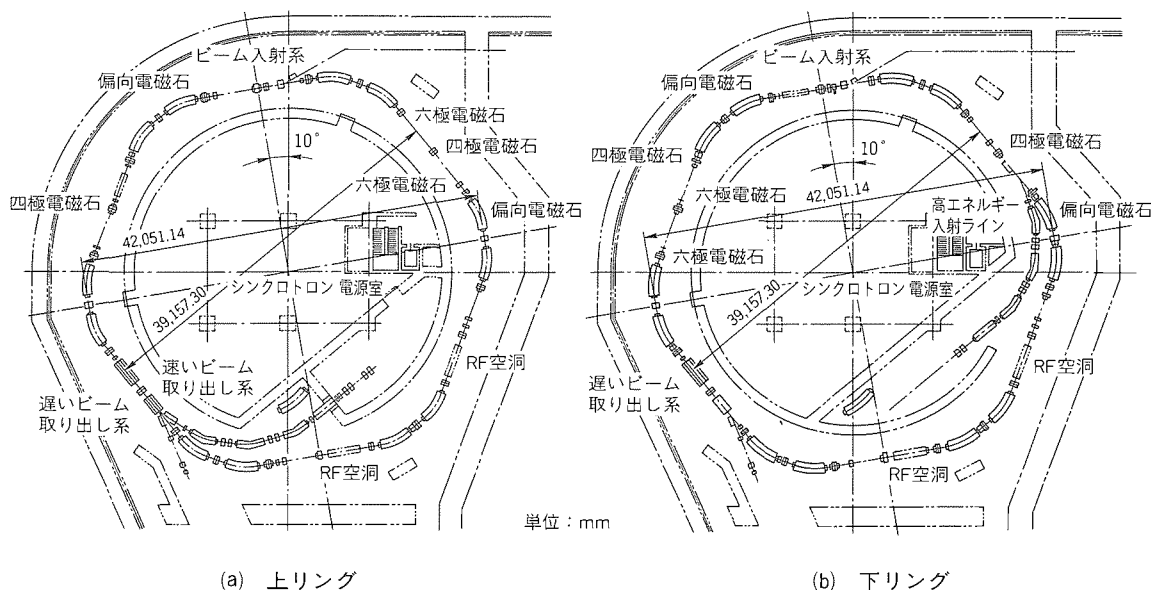


図 3. リングの基本配置

でビーム軌道を確定し、そのときの振り分け電磁石の磁場強度を NMR 磁場測定器を使って測定し、決定される。このため、ビームの輸送のため調整及びリング内でのビームチューニングが容易である。

3.4.2 リング

リングは、FODO 収束構成の関数分離型である。1 個のリングは、12 個の偏向電磁石、12 個の収束四極電磁石及び 12 個の発散四極電磁石から構成されている。リングの回転対称性は 6 に選択されている。機器配置では、引出し部の長直線部の発散四極電磁石の発散距離を十分に確保した。

リングのチューン設計値は、水平方向で 3.75、垂直方向で 3.25 である。偏向電磁石の磁場値を使用する RF 加速用磁場クロック (B クロックという。) の発生には、リングと同じ偏向電磁石をリングとは別に 1 台、モニタリング用として設置してある。

2 個のリングは、多重入射チャンネル及び遅い取り出しチャンネルを持つ。上リングは、遅い取り出し用と同じ長直線部に速い取り出しチャンネルを持つように設計されている。速い取り出しビームは、リングの内側に引き出される。この上リングから速い取り出しビームを受けるため、下リングは速い入射チャンネルを持つ。水平方向の閉軌道ひずみは、12 個のステアリング電磁石でフラットトップまでその時々で補正される。RF 加速空洞は、リング当たり 1 台設けてある。

3.4.3 出射ビーム輸送系

これは、それぞれのリングからの遅いビーム取り出しビームを HEBT 系に輸送する役割を持つ。62 本のワイヤから成るプロファイルモニタは、取り出しビームの中心位置を制御するために設置されている。プラスチックシンチレータ内

蔵のカウンタが、ビームのリップルをモニタし、リップルを補正するのに設けられている。早いビームシャットがこの輸送系に設置されており、HIMAC のグローバルインタロックシステムを介して、下流へのビームの ON/OFF に使用される。HEBT 系に出射される前のビーム調整はこのビームシャットで止めて行われる。

3.5 HEBT系

この役割としては、次の内容がある。

- (1) 水平及び垂直方向、両方向においてビームの性能を保存しながら、治療照射室に誘導する。
- (2) 下リングの水平ビーム及び上リングの垂直ビームは、互いに独立に、別々の治療照射室で患者へ照射できる。
- (3) 治療照射室 B では、異なるエネルギーのビームで、一人の患者へ水平及び垂直、両方向の同時照射ができる。
- (4) 上下リングのエネルギーが同一の場合、上下リングからのビームを垂直ビームラインで重ね合わせて、同一の治療照射室での垂直ビーム照射に供することができる。
- (5) 切替時間 5 分程度で、ある治療照射室から他の治療照射室にビームを切り換えることができる。

図 1 の下部から右上がりに HEBT 系は配置されており、水平ビームラインは図 4 に示したが、治療照射室 B、治療照射室 C、物理汎用照射室及び二次ビーム照射室 (計画) から成る。垂直ビームラインは図 5 に示したが、地下 1 階及び地下 2 階、両方のラインがあるが、両者は途中で合流し、生物照射室、治療照射室 A 及び治療照射室 B に導かれている。水平ビームラインのビームエネルギーは $100 \sim 800 \text{ MeV/u}$ に、垂直ビームラインは $100 \sim 600 \text{ MeV/u}$ に選択してある。治療照射室 B では、水平・垂直ビームが同時に照射可

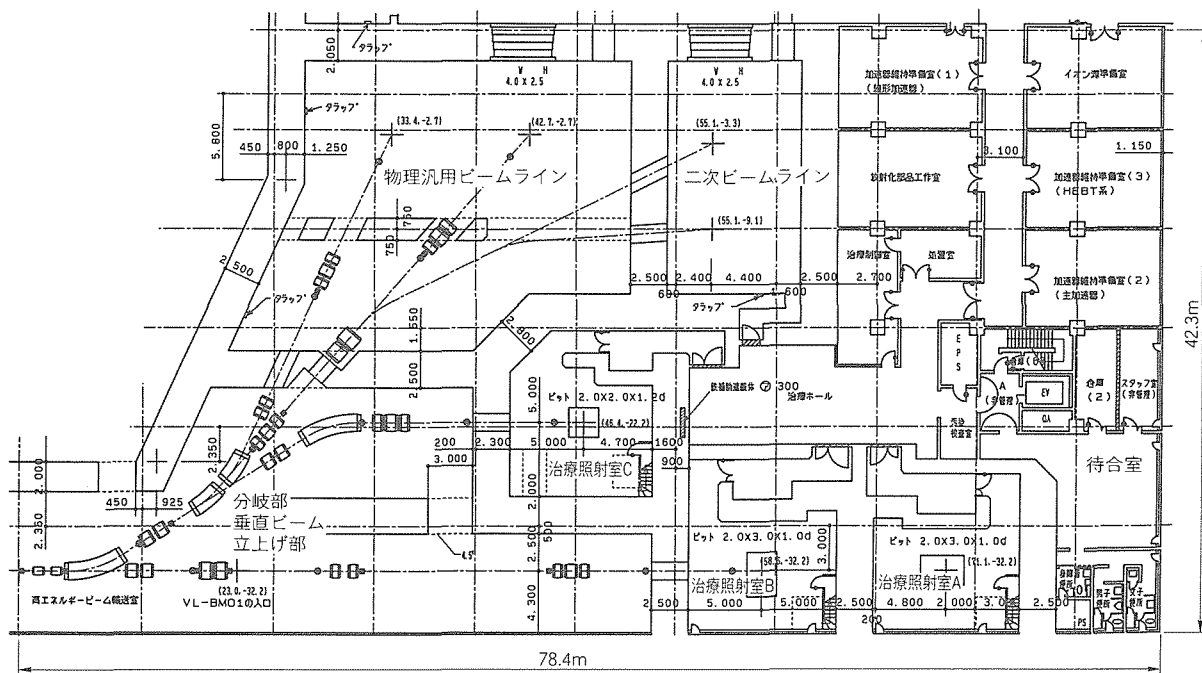


図 4. 水平ビームライン配置

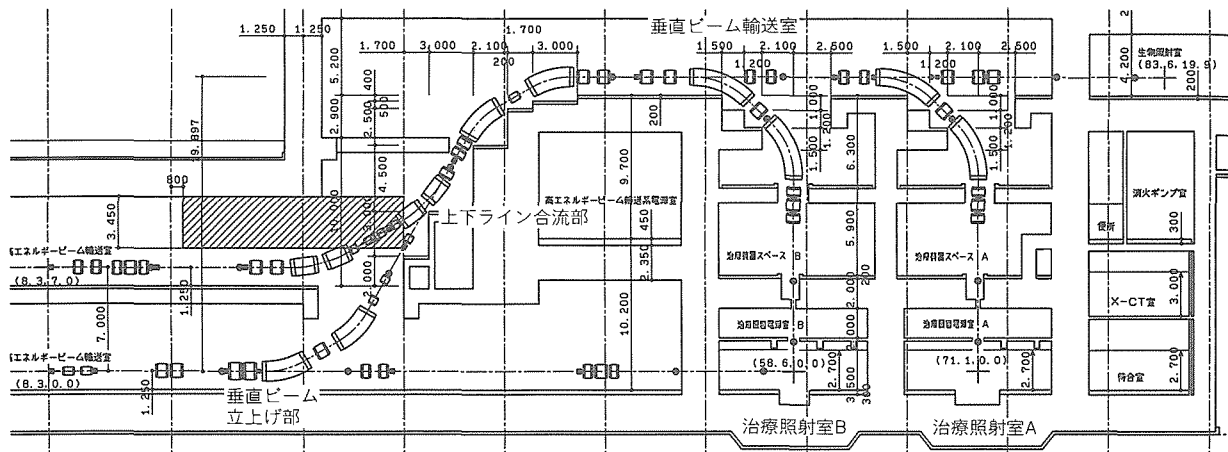


図5. 垂直ビームライン配置

能である。二次ビーム照射室では、上流で生成された放射化ビームを診断や治療に利用する。

なお、水平・垂直同時照射では、地下1階のビームラインと地下2階のビームラインとが合流する点にある偏向電磁石をパルス励磁することによって実現可能となる。

3.6 治療照射系

治療照射室 A, B 及び C に入射するビームは、次の仕様を持つ。図6には、治療照射室 B のビームの終端部と治療台近傍の構成が示してある。

- (1) 治療照射室のアイソセンタでのビーム位置の再現性は、 $\pm 2.5\text{mm}$ 以内に設計されている。
- (2) 最大の照射野の大きさは、直径 20 cm であり、その照射野内では、 $\pm 2\%$ の一様性を持つ。

照射治療室に入射するビームは、HEBT 系と治療照射室とを分離している壁中に埋め込まれた中性子シャッターを通過する。中性子シャッターは、HEBT システムで発生した中性子、 γ 線等が、治療照射室に不必要に入射するのを防止する。治療開始前、ビームは、この中性子シャッターのすぐ上流にあるビームシャッターで止められ、その上流のビーム位置・サイズ測定用プロファイルモニタを利用して、ビーム位置等の微調整、位置確認等を行う。一方、医療スタッフは治療照射室の患者位置決め等の治療前準備を行う。

照射線量の測定では、正及び副のイオンチェンバを設けてモニタリングの信頼性を上げ、安全性を確保した。この2台のチェンバは、モジュール及び電子回路において、完全に互いに独立しているので、どちらかのカウンタが使用不能になっても、照射線量測定が可能である。照射野内のビーム強度一様性は、平たん度モニタを使用して監視される。

治療照射系の装置は、治療照射室ごとに設けられた治療制御計算機の下で運転・制御される。これらの計算機は、全系ランを通じて全系制御系に連結されている。

装置はがん治療が目的であるが、人為的な誤照射の防止、患者の安全・保護等に万全を期すことも装置に課せられた重

要な機能の一つである。できるだけ多くのありそうな事象を予想して設計されたグローバルインタロックシステムは、誤照射、装置の誤動作、ビーム強度異常、患者の位置変化時の緊急対応等に対する患者保護の役を果たす。このインタロックシステムは、ハードウェア及びソフトウェアで二重系を構成している。

3.7 全系制御系

入射系、シンクロトロン、HEBT 系及び治療照射系は、それぞれ独立した制御系を持っており、これらは、イーサネットで接続され、全系制御系で統括運転・監視される。全系制御系は、冷却水系及び放射線安全監視システムも監視している。各系の制御系は、主計算機及び幾つかの下位計算機から成るが、主計算機は、主にマンマシンインタフェースとファイルサーバとして使用される。装置の運転パラメータは、主計算機のパラメータファイルにセーブされ、次に同じ条件で運転する場合、参照データとして呼び出し、運転を再現させ、効率良い運転ができる。なお、治療照射系以外の各系は加速器制御室で、治療照射系は治療照射室の近くのコンソールで運転・制御される。

3.8 冷却水系

この設備は、HIMAC を構成する入射系、主加速器系、HEBT 系及び治療照射系のそれぞれの機器に所要の冷却水を供給し、機器から発生する熱を除去することによって、各機器の運転を維持することを目的とした設備である。イオン源・主加速器・HEBT 系の電源系用 (A 系統)、線形加速器室系統 (B 系統)、入射・主加速器・照射・HEBT 系の系統 (C 系統)、の3系統がある。B 系統の供給水温度 (普通水・純水の2種類) は、 $25 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ に制御される。

A 系統、B 系統及び C 系統の水量は、それぞれ、 $8.25\text{m}^3/\text{min}$ (純水)、 $4.38\text{m}^3/\text{min}$ (普通水) 及び $9.64\text{m}^3/\text{min}$ (純水) である。なお、B 系統は、 $0.82\text{m}^3/\text{min}$ (純水) である。

4. ビーム調整

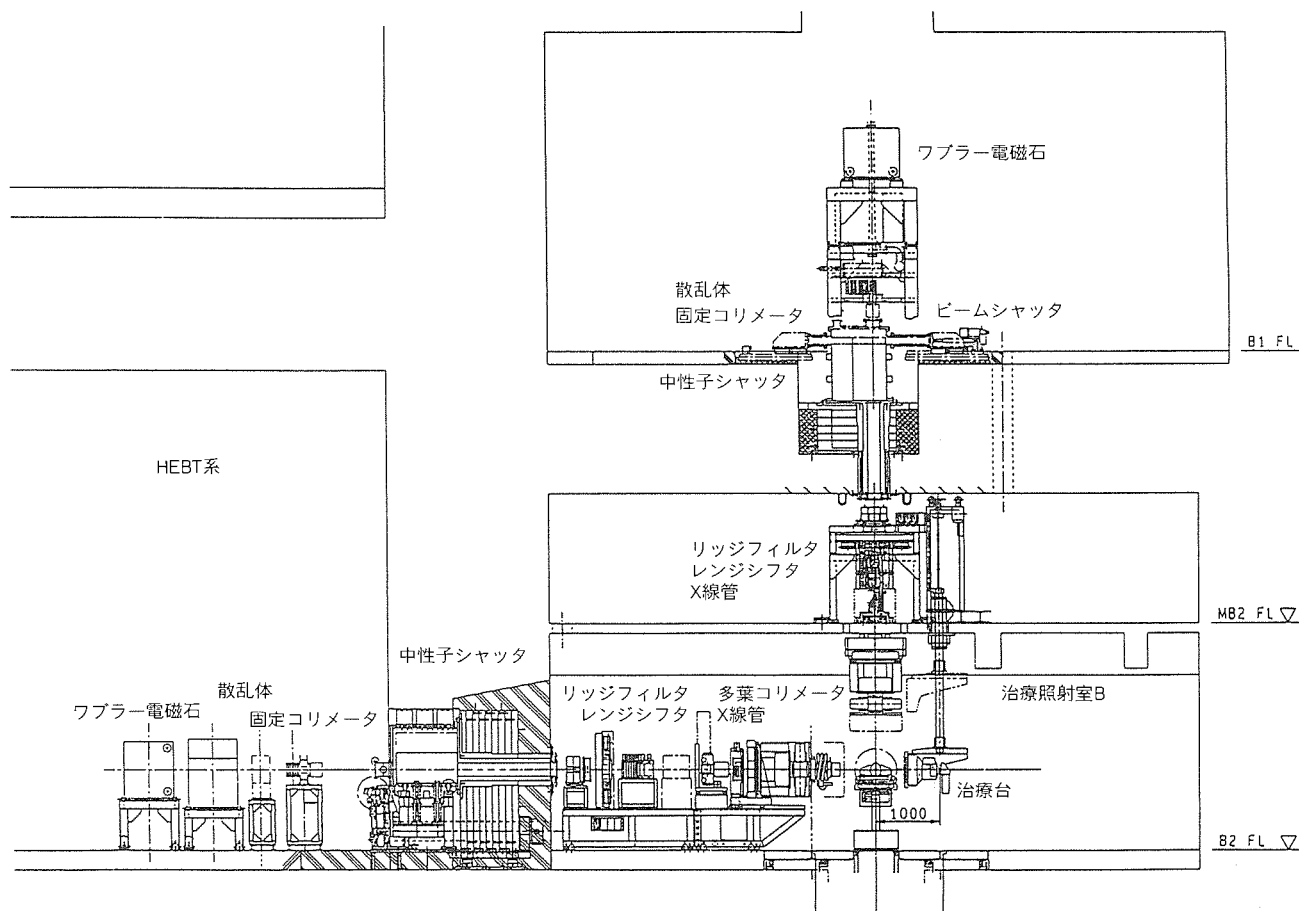


図 6. 治療照射室 B の治療照射装置の配置

ビーム調整は、1993 年 3 月開始の入射系のビーム調整と同年 11 月開始の主加速器系より下流側の調整、の 2 期に分けて行われた。なお、初めの加速粒子は、ヘリウムで行われた。この結果、入射系は同 3 月中旬に RFQ 加速に成功し、3 月下旬 DTL 加速に成功している。主加速器系は、11 月中旬にスタートし、12 月初めにビーム取り出しを実現し、同中旬には全ビームコースへのビーム誘導に成功した。リングへの入射後、1 か月で全コースへのビーム誘導を完了した。年が明けて、2 月中旬には施設放射線安全検査を終了し、2 月中旬には、炭素で 430 MeV/u (人体軟組織、約 30 cm 深さにブラックピークができるエネルギー) に加速成功、約 4 か月でビーム調整を終えた。世界に例のない早さである。

5. む す び

1984 年度の概念設計開始から数えると、実に 10 年の歳月が流れた。それに比べて、完成後、ビームが出るまでの期間の短さは、放医研関係各位の研究成果の現れであるとともに、関係各社の技術力の現れと考えられる。

放医研では 1994 年 6 月に初めての患者への治療照射が開始され、治療が順調に進んでいる。

HIMAC の運転制御・ビーム調整でメーカーの御指導に御尽力いただいた、大阪大学・核物理研究センター 佐藤健次

教授 (元 放医研・医用重粒子物理工学第二研究室長) に深く感謝の意を表す。また、このプロジェクトを長期間にわたり促進していただいた千代田興産(株)藤田彪太東京支社長に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 平尾泰男：放治システム研究，4，No.2，81～84 (1987)
- (2) 河内清光：放射線科学，33，No.1，2～10 (1990)
- (3) 河内清光：日本原子力学会誌，29，No.12，1087～1091 (1987)
- (4) 河内清光：重粒子線がん治療装置 HIMAC 建設の状況，第 21 回日本アイソトープ・放射線総合会議，B 640 (1994-2)
- (5) Kenji, S. : Proc. the NIRS International Workshop on Heavy Particle Therapy and Related Subjects, 23～35 (1991-6)
- (6) Division of Accelerator Research in NIRS : Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba — A Design Summary & Update — , NIRS-M-89, HIMAC-001 (1992-12)

HIMAC用高エネルギービーム 輸送システム(HEBTシステム)

溝田 学* 太田完治*** 高田栄一++
吉田克久** 小川博嗣+ 野田耕司++
山本雄一* 山田 聡++ 須藤美智雄+

1. ま え が き

高エネルギービーム輸送システム (High Energy Beam Transport System, 以下“HEBT 系”という。) は, シンクロトロンからのビームを受け, 水平照射治療室, 垂直照射治療室, 水平垂直照射治療室, 生物照射室, 汎用・物理実験室等へ導くビームラインをいう。この系に要求される機能と役割は, 主加速器で取り出されたビームを, それぞれの照射施設で求められる性能に適合させるために, ビーム強度, 質を損なうことなく高い信頼性と安全性をもって輸送することである。また, それを前提として照射室へのラインの短時間の切換えや, 各様々な運転 (種々の核種やエネルギーの連続可変) への対応が要求される。

これらの要請を実現するためには, ビーム光学系設計や運転制御の在り方について, 保守性や経済性を考慮しながら設計していかなければならない。

この論文では, HEBT 系の各構成機器の基本仕様を決定するビーム光学系の設計に重点をおいて記述し, 構成機器の詳細⁽¹⁾⁽²⁾と制御システム⁽³⁾については後述する。

2. 基 本 構 想

2.1 要 求 仕 様

地下1階と地下2階の上・下のシンクロトロンリング (以下“リング”という。) から取り出されたビームは, それぞれ取合い点 B1 と B2 において HEBT 系に引き渡される。B1 で受けたビームは垂直治療室 (治療室 A, B) と生物照射室へ, B2 で受けたビームは水平治療室 (治療室 B, C), 物理汎用コース 1, 2 及び前記の垂直治療室と生物照射室へ導かれる。上・下のリングからのビームは, 水平照射と垂直照射による同一患者への同時照射, 又は二人の患者への同時照射を実現する。

また, ビームコースを切り換えて目的の照射室に導くために要する時間を可能な限り短く (約 5 分以内) しなければならない。

(1) 主加速器系との取合い条件

非規格化アクセプタンスは, 水平・垂直方向共に $10 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ とし, 運動量幅は $\pm 0.2\%$ とする。また, twiss parameter は, $\beta = 1 \text{ m}$, $\alpha = \eta = \eta' = 0$ (x, y 共) とする。ビームエネルギーは最高で 800 MeV/u 。

注 HIMAC: 科学技術庁放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置

(2) 照射系との取合い条件

照射位置におけるビームサイズが上記アクセプタンスで, 半径 5 mm 以内の円で中心位置の変動と再現性が $\pm 2.5 \text{ mm}$ 以下。twiss parameter で表現すると $\beta = 2.5 \text{ m}$, $\alpha = 0$, $\eta = \eta' = 0$ (x, y 共)。

2.2 設 計 思 想

設計に当たっては, 以上の要求仕様を満たし, 信頼性や安全性を追求するためにシステム全体にわたって特に以下の点を考慮している。

- (1) ビーム調整を容易にするためビームラインは, 偏向部をダブルアクロマティックで構成し, 直線部では常にエネルギー分散をゼロにした。
- (2) ビームの合流, 分岐点では, twiss parameter が同じになるように構成し, 偏向電磁石の励磁, 消磁のみで (四極電磁石の励磁を変えることなく) ビームコースを切り換えられるようにした。分岐点の偏向電磁石の磁場は, 常に NM R でモニタされる。消磁は逆励磁用の電源を用いて, 残留磁場をキャンセルする方法をとった。
- (3) 構成要素である電磁石, その電源, 真空ダクト, 排気系, モニタ等, 仕様は可能な限り統一化された。

3. 全体構成と各部機能

3.1 配 置 設 計

HEBT 系は, 上下二つのリングの取合い点 B1 点及び B2 点から各照射室にいたる。図 1 に HEBT 系のビームライン機器の配置を示す。

下リングからのビームは, 偏向電磁石での分岐によって, 水平ビームコースと垂直ビームコースのすべての照射室へ導くことができる。また, 上リングからのビームは垂直ビームコースの垂直照射系と生物実験室に導くことができる。しかも, 上リングからと下リングからは合流して垂直ビームコースを形成している。

水平方向の照射点の配置は, 各照射系のシールド壁を含めた必要なスペーシングにより, 決定される。また, 垂直方向については, 照射点でのビームサイズの検討では電磁石の磁場とボア径の物理的な制限を考慮した。垂直ビームラインでは, ① 散乱体及びワブラー電磁石の配置, ② 照射野で所要の大きさを得るための空間長を考慮して, ビームを持ち上げるための必要最小高さが決定され, この治療装置の建屋の高さ (地下の深さ) の決定要因となっている。

3.2 ビーム光学系設計

光学系の設計に当たっては、まず、光学軌道解析コード“MAGIC”を主な手段として用いた。MAGICは、東京大学原子核研究所や高エネルギー物理学研究所⁽⁴⁾等で設計コードとして使用実績のあるプログラムである。ここでは、その入力フォーマットが簡単であることや解への集束が早いことから輸送系の設計に適用した。この線形軌道解析を進め偏向電磁石と四極電磁石の配置と励磁を決定した。これらの磁石類について、ビームの最大エネルギーである800 MeV/u（コースによっては600 MeV/u）が通る系について、安定した最大磁束密度を確保するため偏向電磁石について曲率半径をそれぞれ6.5 mと5.0 mとして配置し、四極電磁石についてはその最大磁場こう配が15 T/mを超えないよう拘束条件を設定した。

解析のフローチャートは、以下のとおりである。

- (1) 取合い点と照射点との相対的な配置の決定
- (2) 偏向系の配置

偏向系は、ダブルアクロマティックな系にユニット化したもの、分岐・合流点に置かれる単独の偏向電磁石、コースどりのための単独の偏向電磁石等に分類される。

- (3) 四極電磁石の配置と励磁量の決定

前述の設計思想を満足する物理的に実現可能な配置と励磁量の目安がつかない場合は(1)に戻り再配置を行う。

- (4) 最適化

(3)までのステップで電磁石の工学上の解は無限に存在するが、全体を見直してビームサイズの縮小化（電磁石のギャップとボア径と有効磁場領域の縮小）と四極電磁石のビーム方向長さの縮小化とを念頭に、最適化された解を追求する。

次に具体的に、各照射室までの特徴を述べる。

3.2.1 垂直ビームライン及び水平ビームライン (B点から)

- (1) B2で受けたビームの垂直ビームラインへの立ち上げ及び生物照射系への偏向部は、2台の30°偏向電磁石と四極電磁石によるアクロマティックな60°偏向ユニットを用いた。
- (2) B2で受けたビームの水平ビームラインへの振り分け及び治療室Cへの偏向部は、32.5°偏向電磁石を用いた。
- (3) B1で受けたビームの垂直ビームラインへの合流立ち上げ部は、将来診断用の β -崩壊核種を生成するための2次ビームの生成と分離を行うことを考慮しており、将来のターゲット位置への絞り込みを行っている。また、垂直系への合流点は、パルス電磁石を用いており、分割して小型化し15°偏向電磁石とした。このことにより、上下のリングから交互に同一点に照射したり、将来の上リングから2次ビームを作り診断して即座に下リングからのビームによる治療を実現することが可能となっている。

3.2.2 水平治療コース

- (1) 治療室B、Cの2室に水平治療コースを設置した。いずれも最高800 MeV/u対応にしている。

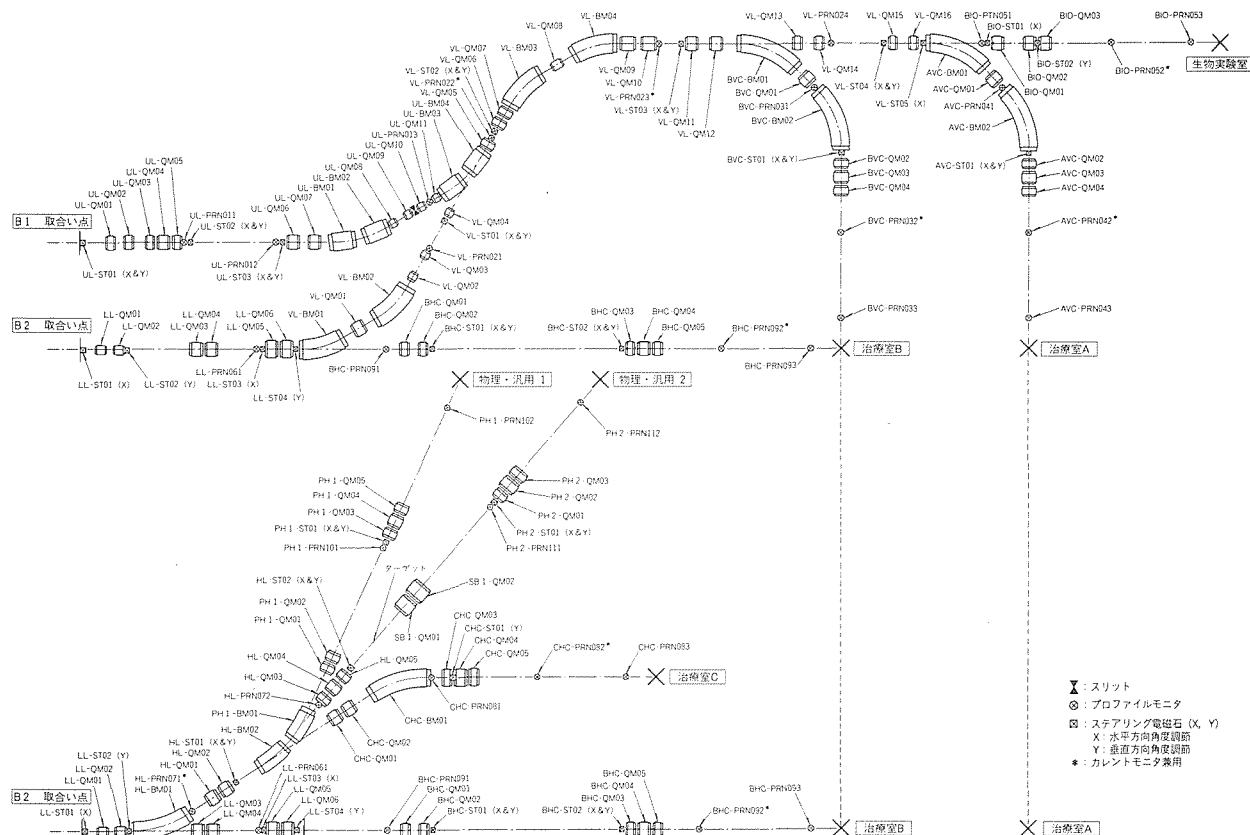


図1. 放射線医学総合研究所HEBT系ビームライン機器配置

(2) コース最後の四極電磁石とアイソセンタ間の距離は、11.8mを確保した。その間にはワブラーや多葉コリメータ等の照射系の機器が挿入される。

3.2.3 垂直治療コース

- (1) 治療室 A, B の 2 室に垂直治療コースを設置した。いずれも最高 600 MeV/u 対応にしている。また、最も高い位置を走るビームラインの延長上に生物照射室を設けた。
- (2) 治療室への偏向部は、2 台の 45°偏向電磁石と四極電磁石によるアクロマティックな 90°偏向ユニットを用いた。
- (3) 上記偏向部への入り口は、その間の直線部を π セクションといわれる位相の進みが 180°のビーム光学系にしており、両入り口における twiss parameter を同一にした。
- (4) コース最後の四極電磁石とアイソセンタ間の距離は、10.0mを確保した。その間にはワブラーや散乱体、多葉コリメータ等の照射系の機器が挿入される。
- (5) 治療室 B では、水平照射と垂直照射のアイソセンタは同じ位置に選んであり、同一患者への垂直水平同時照射が可能となっている。

3.2.4 物理・汎用コース

- (1) B2 で受けたビームを 32.5°の偏向電磁石を通し、さらに、16.25°の偏向電磁石を 2 台用いて分岐し、物理・汎用 1

と物理・汎用 2 にビームを供給している。ここでは照射点において $\eta = 0$, $\eta' \neq 0$ としている。いずれも最高 800 MeV/u 対応にしている。

- (2) 物理・汎用コース 2 への途中には、将来の 2 次ビームコースのための空間と、そのときのターゲットの位置にビームを絞るよう四極電磁石を用意している。

ビーム解析した結果の一例 (B1 点～治療室 A まで) として、図 2 に twiss parameter を、図 3 にそれに対応するビームサイズを示す。

3.3 ビームライン構成要素の仕様決定

3.3.1 ビームの変動要因と対策

HEBT 系では、長い距離をビームの用途に従った方向に輸送するとともに、治療計画に合わせて迅速に切り換えねばならない。距離が長い分関与する構成要素 (電磁石) の数が多く、その個々の機器、例えば電磁石では誤差の発生が避けられない。電磁石の精度及び電磁石設置精度の善し悪しは、ビームの軌道や形状に設計値からのズレとなって現れる。電磁石誤差で寄与する因子としては、以下のものがある。

●電磁石単体の磁場誤差の影響

●アライメント誤差によるもの

電磁石単体の磁場誤差には、電磁石の材料の不均一性・機

械的寸法誤差・励磁電源の安定度から起因するもののほかに、特にコース変更による分岐電磁石の残留磁場が考えられる。アライメント誤差は、上下・左右・前後の位置ズレと 3 軸での回転誤差に分けられる。

ビーム形状のズレは、主に四極電磁石の磁場設定誤差によって起こるが、この誤差は電磁石の励磁特性を事前に測定することにより、小さくすることができるので比較的容易である。一方、ビーム軌道のズレは電磁石のアライメント誤差や偏向電磁石の磁場誤差に敏感である上、アライメント誤差を輸送系の建設後に修正することは容易でない。このため、ステアリング電磁石 (小型の偏向電磁石) とビーム位置モニタを用いた軌道補正が必要となる。また、ここで補正を行うに当たっては、ビーム位置モニタの分解能が大きく影響することも付け加えておかねばならない。

軌道誤差に寄与するアライメント誤差には、以下のものがある。

●四極電磁石の横方向の位置誤差 (ΔX , ΔY)

●偏向電磁石の位置誤差

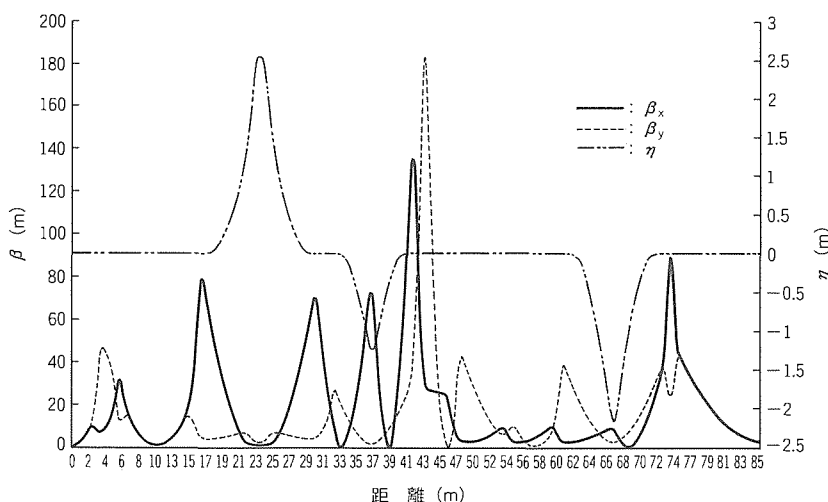


図 2. ベータatron関数と分散関数

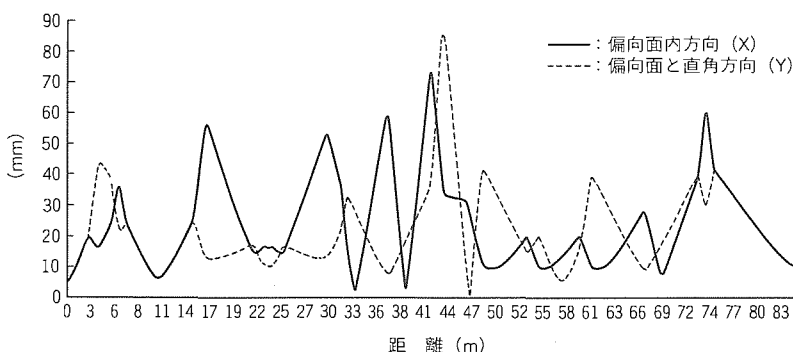


図 3. ビームサイズ全幅

表 1. 電磁石の統計誤差

	四極電磁石	偏向電磁石
Δx (mm)	0.3	0.3
Δy (mm)	0.3	0.3
Δz (mm)	1.0	1.0
$\Delta \theta_x$ (mrad)	0.2	0.2
$\Delta \theta_y$ (mrad)	0.2	0.2
$\Delta \theta_z$ (mrad)	0.5	0.2
磁場誤差 (%)	0.1	0.1

(ΔX , ΔY , ΔZ)

● 偏向電磁石の回転

($\Delta \theta_x$, $\Delta \theta_y$, $\Delta \theta_z$)

3.3.2 ステアリング電磁石とビーム位置モニタの仕様

軌道補正は最終的な治療室のアイソセンタだけでなく、輸送系のビーム透過効率が低下しないように、輸送系全体にわたって行わなければならない。そこで、ステアリング電磁石とモニタの仕様は、当社が開発した軌道解析コードを使ってシミュレーションを行い、機器の単体仕様及び配置(総数)を決定した。

ビーム輸送系の設計段階では、電磁石の設置誤差や磁場の設定誤差は不確定な量なのでこれらを統計誤差として扱う。計算する際に用いた誤差分布の幅は、稼働中の加速器の実績から表1に示した値を仮定した。

これらの誤差の様々な組合せに加え、取合い点(B点)での初期位置の誤差も考慮してビーム軌道のズレを計算し、効率的なステアリング電磁石と位置モニタの設置場所及びステアリング電磁石の磁場強度を決定した。

計算例として、水平治療室Cまでのビーム輸送系の軌道補正後の軌道誤差を図4に示した。

記号“△”と“▽”は、それぞれ水平・垂直方向のステアリング電磁石を表す。記号“|”は、ビーム位置モニタを表し、位置分解能として±1.5mmを仮定した。

全体にわたって計算した結果、ステアリング電磁石に必要とされるキック角は、一部を2.0mradとする以外1.0mradであれば十分であることが分かり、このことと合わせ機器の仕様はステアリング電磁石の設置場所のビームサイズ(ダクトサイズ)により、3種類にグルーピングすることにした。

上記は、シミュレーションによって全ラインにわたっての軸ズレをいかに抑えるかを目指した結果であるが、特定のポイントのビーム位置を効率良く調整するためにはそのポイントの上流でビームの位相進みが90°(又はその奇数倍)の位置でキックするのがよい。したがって、アイソセンタの上流には機器の干渉がなくこの条件から大きくずれない場所にもステアリング電磁石を置いた。

3.3.3 真空容器内径

真空容器の内径を決定するに当たっては、前述のシミュレーションの結果によってビームの中心軸がどの程度ゆらぎ、ステアリング電磁石とプロファイルモニタによる調整でどの

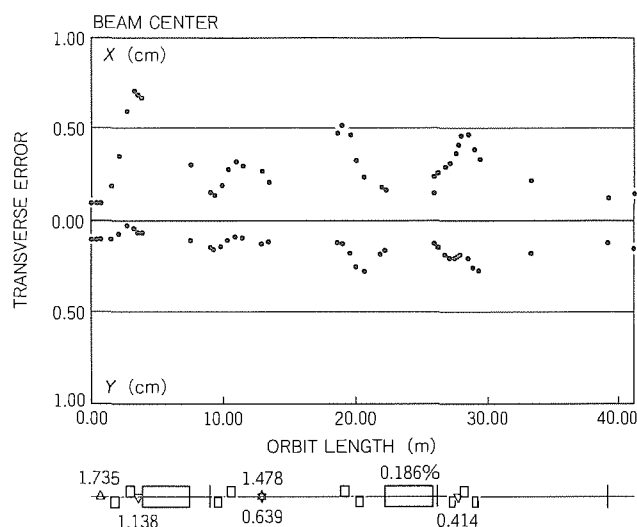


図 4. B2～治療室Cにおける補正後の軌道誤差

程度に抑えられるかを検討した。

すべてのコースにわたって中心軸のゆらぎは±5mm以内に納められることが分かり、ビーム軌道解析のサイズに加えマージンとして10mmを加えたものを真空ダクトの必要サイズと設定した。この値を基に真空容器の統一化により、実際のダクトサイズを算出している。

4. む す び

今回の HIMAC の HEBT 系は、限られた空間内をビームラインが複雑に分岐・合流する輸送系であり、その光学系の設計に当たっては、一部のパラメータを変化させることがすべてのコースのパラメータに影響を及ぼすため、最適化には何回もの試行錯誤が必要であった。

今後、治療装置としての加速器の建設が各地に計画され、今回の HIMAC のような加速リングから複数の治療室へ粒子線を配給するようなシステムの要求が増加していくと思われる、今後の発展に期待している。

参 考 文 献

- (1) 溝端正隆, 寺本昭好, 豊田秀男, 三田村政則, 小川博嗣, 野田耕司: HIMAC 用 HEBT システムの電磁石と電源, 三菱電機技報, **69**, No.2, 156~160 (1995)
- (2) 取越正己, 原口正文, 別所和典, 北村寛樹, 小川博嗣, 山田 聡, 高田栄一: HIMAC 用 HEBT システムの真空系とプロファイルモニタ, 三菱電機技報, **69**, No.2, 161~165 (1995)
- (3) 高仲政雄, 桜井正良, 松浦 潤, 小久保光洋, 河野俊之, 小川博嗣, 山田 聡: HIMAC 用 HEBT システムの制御システム, 三菱電機技報, **69**, No.2, 166~171 (1995)
- (4) 鎌田 進: 加速器の原理と設計, 高エネルギー加速器セミナー OHO '85, 1-35 (1985-9)

HIMAC用HEBTシステムの 電磁石と電源

溝端正隆* 三田村政則*
寺本昭好* 小川博嗣***
豊田秀男** 野田耕司†

1. ま え が き

主加速器で加速されたビームを各照射室に誘導する HEBT 系は、水平面で照射する水平照射 5 コース及び鉛直上方から下方に照射する垂直照射 2 コースで構成され、上下 2 台のシンクロトロンによる水平垂直同時照射も可能としている。ビームラインは総延長 240 m あり、垂直の照射を実現するため高さ約 20 m の立体的な構成となっている。

電磁石及び電磁石を励磁する電源は、ビームラインを構成する主要機器でビームの軌道を制御して各照射室にビームを誘導する機能を持っている。図 1 に HEBT 系の地下 2 階から垂直系ビームラインへの 60° 立ち上がり部を示す。

ここでは、HEBT システムの電磁石と電源について、特徴、電磁石・電源の機能、構造、設計、試験、現地工事（電磁石の搬入、据付けなど）等について述べる。

2. HEBTシステムの電磁石・電源の特徴

(1) 治療照射は、ビームコースの切換えにより、順次治療室にビームを誘導することによって行われるが、各治療室の利用効率を高めるために、短時間（5 分程度）でビームコースを切り換え、ビームの停止時間をできるだけ短くすることが要求される。この要求を満たすため、次の方式を採用した。

(a) 初期化時間の短縮

注 HIMAC：科学技術庁放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置
HEBT：高エネルギービーム輸送システム

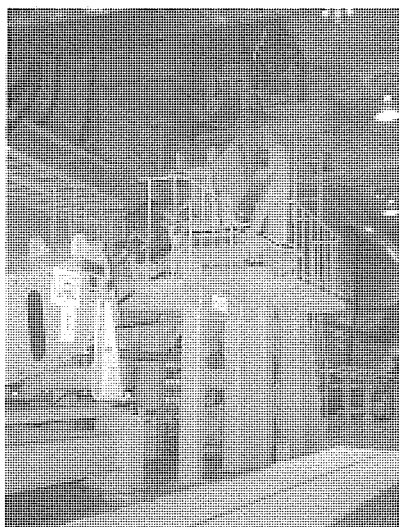


図1. 垂直系ビームライン立ち上がり部

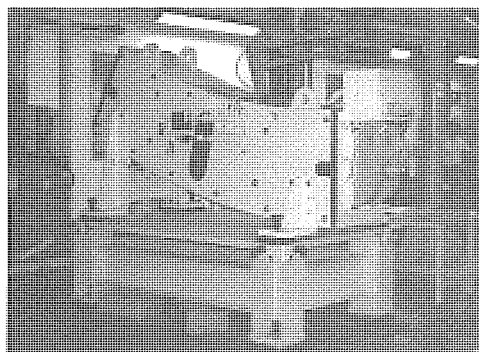


図2. 垂直系偏向電磁石

電磁石は、鉄心の磁気ヒステリシスの影響で同一励磁電流でも、それまでの履歴（磁化状態）によって磁場は同一にはならない。そのため、通常最大電流励磁を数回繰り返して履歴を常に同一とする初期化操作を行うが、磁場の整定も必要であり時間がかかるという問題がある。今回、初期化パターンに関する検証試験を行い、最大電流励磁回数を 1 回として必要な磁場精度を実現できる初期化パターンを求め適用し、また偏向電磁石の高精度な磁場設定を確実にするために各電磁石に NMR 磁場測定器を設置した。

(b) 逆励磁による残留磁場の消去

ビームコース分岐点の偏向電磁石を無励磁としてビームを直進させるとき、残留磁場によってビーム軌道が変化する。今回、残留磁場の消去法として逆励磁を適用し、時間の短縮を図った。内容は 4.2 節に示す。

(2) 垂直照射を行うため、従来の研究用加速器にはない大規模な垂直ビームラインを導入し、電磁石類の据付け、アライメント方法を変更した。内容は 5.2.1 項及び 5.3 節に示す。

3. 電 磁 石

3.1 電磁石の種類と機能

HEBT 系で使用される電磁石には 3 種類があり、これらの機能について説明する。

(1) 偏向電磁石

偏向電磁石は、ビーム軌道の方向を制御する機能を持ち、ビーム軌道に垂直な断面内で、一様な磁場を発生する。HEBT 系には合計 16 台の偏向電磁石があり、例として図 2、表 1 に垂直系立ち上がり部の偏向電磁石と諸元を示す。

(2) 四極電磁石

四極電磁石はビームの発散・収束を制御し、長距離のビーム輸送でビーム径を適当な範囲に保つ機能を持つ。ビーム軌道中心の磁場がゼロで軌道中心からの距離に比例した磁場を発生する。HEBT 系には合計 69 台の四極電磁石があり、例として図 3、表 1 に四極電磁石と諸元を示す。

(3) ステアリング電磁石

ステアリング電磁石は、偏向電磁石や四極電磁石の磁場の誤

差によって発生するビーム軌道の変形を修正するために用いられる。HEBT 系では38台のステアリング電磁石を配置している。

3.2 構造

電磁石は、磁気回路を形成する鉄心部と磁気回路に起磁力を与えるコイル部で構成される。

(1) 鉄心

HEBT 系の電磁石は直流励磁され、磁気余効が小さいこと、残留磁場が小さいこと、高磁場まで使用可能であること等の要求があるため、鉄心は不純物を抑えた純鉄に近い材料の厚板から削り出して製作した。なお、上下シンクロトロンからのビームの合流点にある偏向電磁石は、交流励磁されるのでけい素鋼板の積層鉄心とした。

(2) コイル

偏向電磁石、四極電磁石は起磁力が大きいため導体は無酸素銅の中空導体（ホローコンダクタ）とし、直接水冷することによって電流密度を大きくとりコイルの小型化を図っている。なお、ステアリング電磁石は起磁力が小さいので、空冷コイルとしている。

3.3 設計

電磁石はビームエネルギーに応じて磁場を変える必要がある。特に、垂直系の偏向電磁石は磁場の变化範囲を0.59～1.62 Tとして最大磁場を高くとり、軌道半径を5,000 mmとして小型化を図った。磁場範囲が鉄心の非飽和領域から飽和領域に及ぶため、計算コード（JMAG 2D）によって磁場变化範囲で仕様を満足するような磁極詳細形状を求めた。

表1. 電磁石の諸元例

	偏向電磁石	四極電磁石
磁 場	1.62 T	18 T/m
間げき(隙)長/ボア径	56 mm	60 mm
磁 極 長	2,618 mm (偏向角30°)	375 mm
電 流	941 A	380 A
冷 却 水 量	29 ℓ/min	2.4 ℓ/min
質 量	8.5 t	190 kg

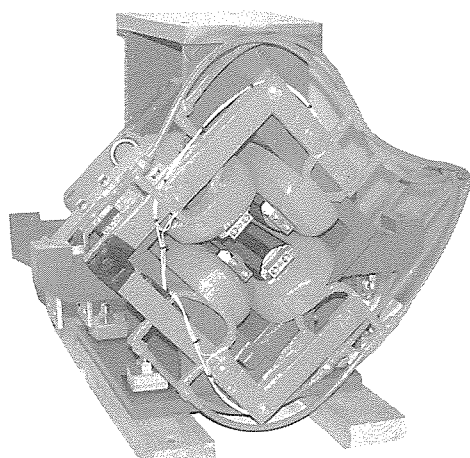


図3. 四極電磁石

図4は偏向電磁石の磁場一様性の計算例と実測値の比較を示したもので、よく一致している。四極電磁石は、それぞれの配置位置のビームサイズと磁場強度によってグルーピングを行い、6種類に統一して製作の合理化を図った。磁極の詳細形状は偏向電磁石と同様に磁場解析を行い決定した。

3.4 磁場測定

磁場データ精度の向上を図るため電流と磁場強度の関係の測定において、偏向電磁石については（磁場×有効磁場長）-励磁電流特性、四極電磁石については（磁場こう配×有効磁場長）-励磁電流特性の測定を行った。また、励磁電流の変更時には初期化パターンを入れて、実機の励磁と同じ手順とすることにより、実機条件との違いによる誤差をなくすようにした。以上の計測の高精度化及び計測・データ処理の自動化を図るために、磁場測定装置の整備・開発を行って適用した。図5及び表2は偏向電磁石用磁場測定装置、図6及び表3は四極、六極電磁石等の多極電磁石用磁場測定装置の構成と仕様である。

4. 電磁石電源

4.1 電磁石電源の構成

HEBT 系電磁石電源は、偏向電磁石電源13台、四極電磁石電源56台、偏向電磁石補助コイル電源3台、ステアリング電磁石電源38台、偏向電磁石逆励磁電源7台の大小とりまぜ計117台の直流安定化電源によって構成されている。各種電源の代表仕様例を表4に示す。

4.2 電磁石電源の特徴

HEBT 系電磁石電源は、トランジスタシリースレギュレータ方式を用いた直流安定化電源であり、それ自体は従来の安定化電源と変わりはないが次の2項目の特徴がある。

(1) 逆励磁電源の設置

残留磁場除去のため通常行われる励磁電流方向の反転を繰り返しながら、電流値を最大電流から次第に減少させゼロとして鉄心の磁化の状態をなくす消磁法は時間がかかるという問題点がある。ビームコース分岐点の偏向電磁石7台につい

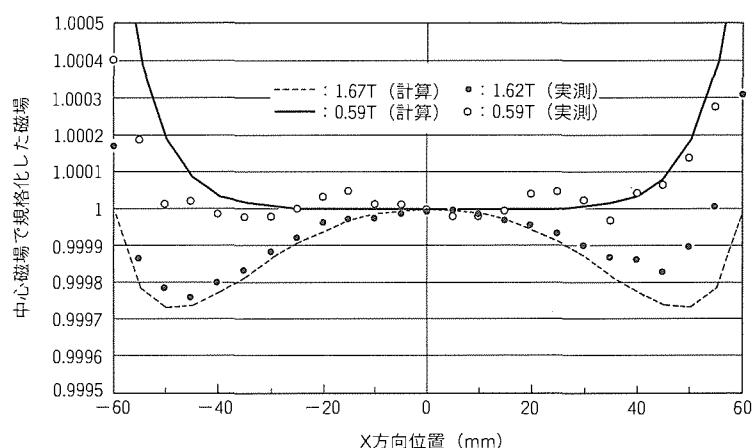


図4. 磁場分布の計算値と実測値の比較

て図7に示すように、残留磁場を打ち消すための逆励磁電源を個別に設置し、制御系から別途送信される運転指令信号により、磁場を零とする微少の逆励磁電流を流通する方式を採用し、時間の短縮を図った。逆励磁に必要な電流は、実機電磁石の磁場測定によって求めた。

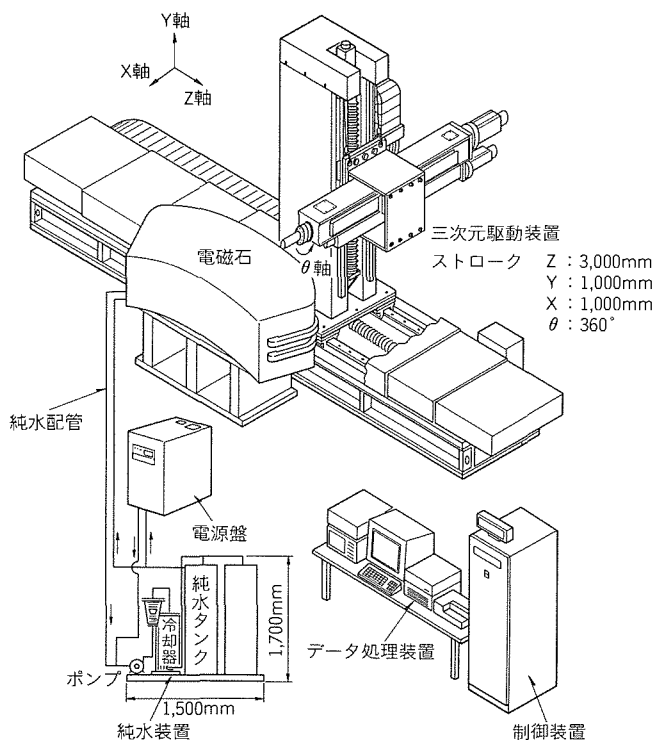


図5. 偏向電磁石用磁場測定装置

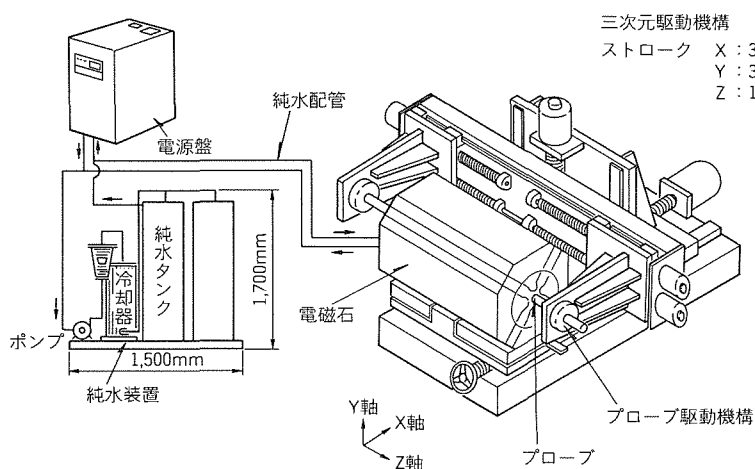


図6. 多極電磁石用磁場測定装置

表3. 多極電磁石用磁場測定装置の仕様

項目	仕様
軸数	5
位置決め精度 (mm)	0.03
再現性 (mm)	0.01
磁場測定精度 (%)	0.01
多極成分測定機能	あり

表4. 各種電源の定格例

電源名称	定格電流	定格電圧	安定度/電流リップル
偏向電磁石電源	1,100A	106.0V	$\pm 2 \times 10^{-4} / 8h$
四極電磁石電源	439A	36.5V	$\pm 5 \times 10^{-4} / 8h$
偏向電磁石補助コイル電源	$\pm 38A$	$\pm 18.0V$	$\pm 1 \times 10^{-3} / 8h$
ステアリング電磁石電源	$\pm 10A$	$\pm 19.0V$	$\pm 1 \times 10^{-3} / 8h$
偏向電磁石逆励磁電源	22A	4.0V	$\pm 1 \times 10^{-3} / 8h$

(2) 電源の校正データ自動測定装置の開発・適用

電源の校正データを自動測定できる装置を開発し、偏向電磁石電源13台に適用した。この装置は測定時間と測定回数を入力することにより、電源の設定値に対する実出力値のリニアリティを含む精度測定(校正)データを、測定時間内の安定度を含めて自動測定するもので、単発で測定していた従来の方法に比較して信頼性が格段に高いものとなっている。この装置の構成と測定処理の概要を各々図8、図9に示す。

4.3 電磁石電源の特性例

HEBT系電磁石電源の特性例として890A, 113V定格の偏向電磁石電源の出力値校正データ及び出力安定度の測定結果を表5、図10に示す。なお、出力値校正データ中、実電流換算値が、前記校正データ自動測定装置による測定結果である。

5. 据付けとアライメント

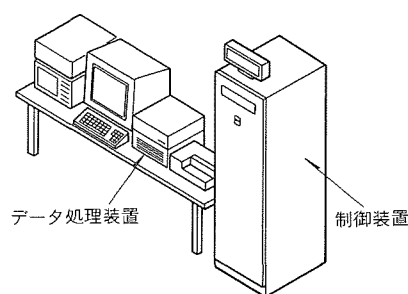
今回、新しく適用した方法を中心に紹介する。

5.1 基準点の設置

電磁石のアライメント(精密位置調整)の基準点として、水平面内の位置の基準を示すベンチマークと高さ方向の基準を示すレベルマークを設置した。三菱電機(株)は入射系、主加速器系、HEBT系、照射系に共通の全系基準点及びHE

表2. 偏向電磁石用磁場測定装置の仕様

項目	仕様
軸数	4
位置決めスピード (m/min)	3,500
位置決め精度 (mm)	0.03
再現性 (mm)	0.01
磁場測定精度 (%)	0.005



BT 系内の副基準点を設置した。ベンチマークは広い範囲に分散しており、順次基準点を移し変える方法では誤差の累積や計測技能差の影響が大きい。誤差を最小として分散させることができ、かつ技能差の影響が小さい方法として、三角測量を拡張した網平均による方法を適用した。この方法の手順は、

- (a) ベンチマークを概略設計位置に設置する。
- (b) ベンチマーク間の長さや角度を測定する。
- (c) 最小 2 乗法によって設計値に対する誤差の評価を行う。
- (d) 誤差値に基づき、各ベンチマークの位置を調整する。

上記手順で (b), (c), (d) の繰り返しによって最大誤差を 1 mm 程度とすることができた。

5.2 据付け・配線・配管工事

今回適用した新工法、合理化策等について以下に述べる。

5.2.1 電磁石の一体組立て、据付け

電磁石は磁極ギャップ中に真空ダクトを取り付ける必要があるが、垂直系の電磁石は現地据付け状態での分割及びダクト取付け作業が困難である。そのため、搬入可能な大きさで共通架台構造として、あらかじめ工場内で電磁石・ダクトの

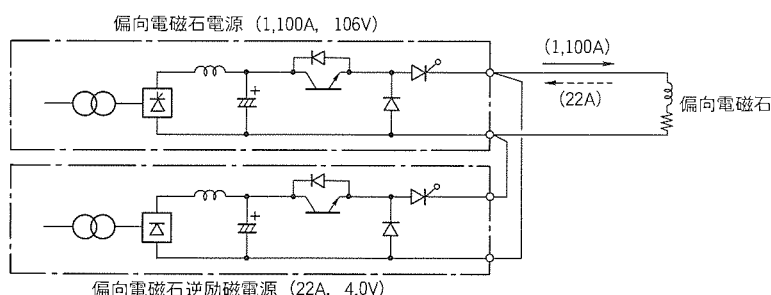


図 7. 偏向電磁石逆励磁電源の接続

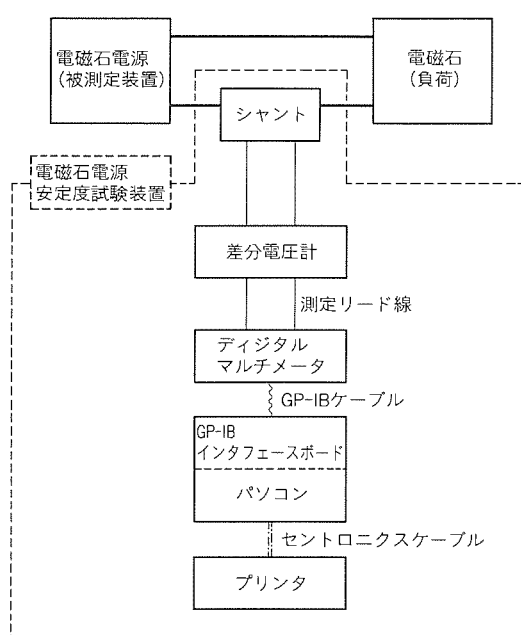


図 8. 校正データ自動測定装置の構成

取付け、共通架台上の電磁石の相互アライメントを完了し、現地には完成したユニットを搬入することで現地における据付け、組立て、アライメント等の作業の合理化を図った。

5.2.2 電力ケーブル、冷却水配管のサイズ選定

(1) すべての電磁石用電源ケーブルは、遮へい壁（厚さ 2.5 m）を貫通布設した。実際の貫通穴と同じ仕様のケーブル通線穴で検証試験を行い、最適な布設方法と低減率を求め適用した。

(2) 電磁石用電源ケーブル、電磁石・電源の冷却水配管の最適サイズの選定を電算化し、処理時間を短縮するとともに設計精度を向上させた。

5.2.3 新工法の導入

現地施工の合理化を図るために導入した新工法を以下に紹介する。なお、これらの新工法導入に当たって事前に検証試験を行った。

(1) 電磁石等の据付けに機械力導入

(a) エアパレットによる電磁石の搬送

揚重設備（天井クレーン等）のない建屋内（地下 2 階）に、十数トンの電磁石を複数台据え付けるため、搬送路の状態・

架台の構造等を考慮して各種工法を検討し、施工・安全両面で最適な方法として“エアパレット工法”を導入した。この工法による搬送状況を図 11 に示す。

(b) ローラコンベヤによる電源盤の搬送

揚重設備のない建屋内（地下 1 階）に、2 ～ 3 トンの電源盤 数十面を同一の部屋に据え付け、かつ同一日に十数面を安全に搬入するため“ローラコンベヤ工法”を導入した。この工法による搬送状況を図 12 に示す。

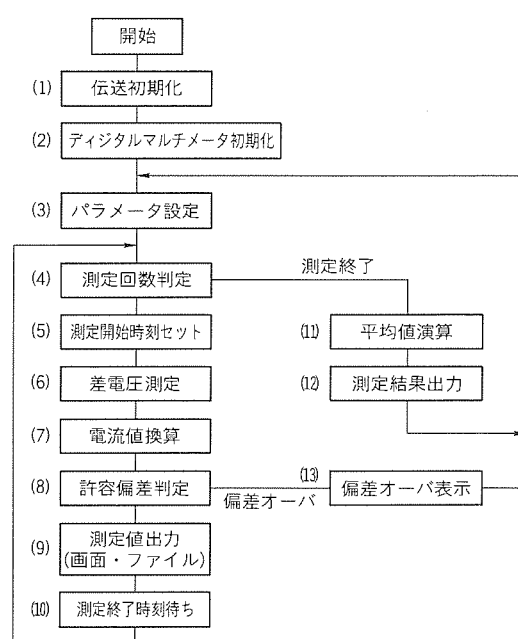


図 9. 校正データ自動測定装置の処理フロー

表 5. 出力電流校正データ例

出力電流校正

890	A	校正用シャント		2.0	V				
				1,100.0	A				
設定値 (H)	遠隔設定値 (A)	実電流値		実電流HEX 換算値 (H)	DPM読み (A)	電流モニタ値 (V)	設定誤差 1 (%)	読取誤差 2 (%)	モニタ誤差 3 (%)
		シャント電圧値 (mV)	換算値 (A)						
7FFF	890.0	—	889.955	745A	890.0	5.930	-0.005	0.005	-0.051
5FFF	667.5	—	667.465	5742	667.5	4.447	-0.004	0.004	-0.047
3FFF	445.0	—	445.001	3A2D	445.0	2.963	0	0	-0.062
1FFF	222.5	—	222.566	1D18	222.5	1.480	0.008	-0.008	-0.064
0666	44.5	—	44.658	5D6	44.5	0.293	0.018	-0.018	-0.080
							(参考値)	(参考値)	(参考値)

注 誤差：1 設定値に対する実電流の誤差＝(シャント換算値－遠隔設定値)／FULL遠隔設定値×100
 誤差：2 実電流に対するDPM読取りの誤差＝(DPM読取り－シャント換算値)／FULLシャント換算値×100
 誤差：3 実電流に対する電流モニタ値の誤差＝(電流モニタ値－シャント換算値／150)／(FULLシャント換算値／150)×100

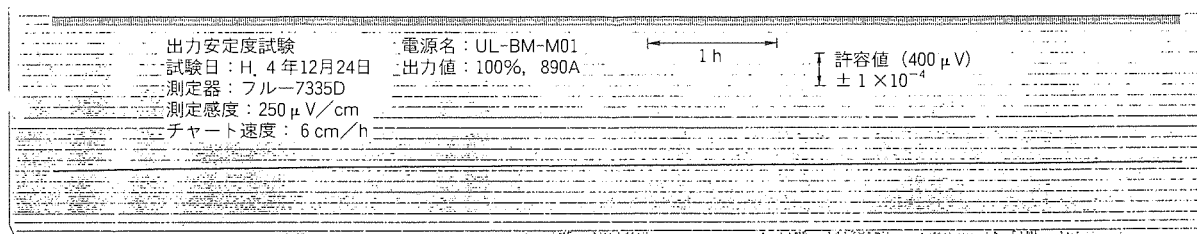


図10. 安定度測定データ例

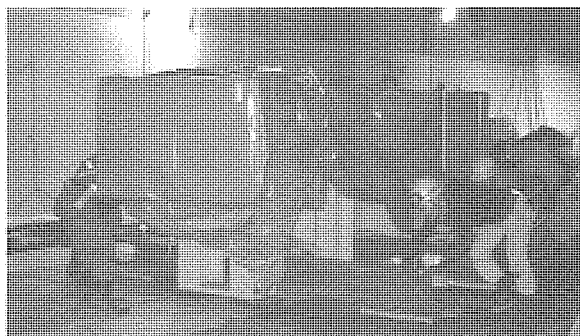


図11. エアパレットによ電磁石の搬送状況

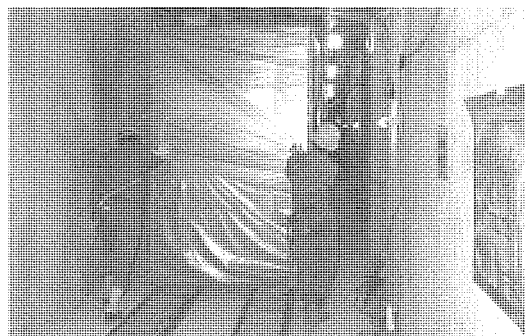


図12. ローラコンベヤによる電源盤の搬送状況

(2) 配管施工，端末処理の省力化

冷却水配管は，一般配管用ステンレス鋼管 (SUS 管) が採用されており，現地溶接が困難かつ細い枝管が非常に多いため，各種工法について検討を行い最適の方法として“圧縮型継手工法”を導入した。

低圧動力ケーブルの端末処理は，機器側端子への取付ボルトで同時に端末処理 (かしめ) ができ，品質・施工面共に従来より改善された方式である“サイトロック” (アイルランド製) を採用した。

5.3 アライメント

水平系ビームラインの電磁石は，従来とほぼ同じ方法で，高さ方向の位置はレベルマークを，水平面内の位置はベンチマークを基準として独立に調整した。垂直系の電磁石 (水平面との角度は 30°, 60°, 90°) のアライメントについては

次の方法を適用した。

- (1) ビームラインに対して直角方向の位置，ビームラインに対する角度，ビームライン周りの回転は，電磁石の両サイドの基準ピンを，ベンチマークを基準としてビームラインに平行に電磁石の両サイドに設けた視準ラインに，セオドライトを使用して調整した。
- (2) ビームライン方向の位置は，インサイドマイクロメータにより，順次調整した。

6. む す び

HEBT システムの電磁石と電源の特徴，設計，試験，据付け等についてまとめた。今回の経験を生かすとともに，H IMAC の実際の運転データを反映して，今後，より完成度の高いシステム構築を目指したいと考える。

HIMAC用HEBTシステムの 真空系とプロファイルモニタ

取越正己* 北村寛樹** 高田栄一+
原口正文** 小川博嗣***
別所和典** 山田 聡+

1. ま え が き

イオン源・入射器・主加速器(シンクロトロン)で加速されたイオンビームは、高エネルギービーム輸送ラインを経て、治療照射室、生物照射室、物理汎用照射室等に導かれる。

ビーム輸送中、大気との散乱によって失われるビームを最小にするために、通常ビーム輸送ラインを真空に保つ必要がある。HIMACにおいても、加速器からこれら照射室までの数十～100 mの距離にわたり真空ダクトを設け、内部を常時高真空に保っている。

また、ビーム輸送を円滑に行うために、ビームモニタを輸送ラインに沿って配置し、ビームプロファイル・位置・強度の測定や、ビーム損失の検出を行う。重粒子線のビーム強度は、数十 pA であるため、いずれも高感度のモニタが要求される。

以下では、真空系及びビームモニタ系の機能・特徴・動作特性、また HIMAC での稼働状況について報告する。なお、ビームモニタ系の動作特性に関しては報告済み⁽¹⁾のため、ここでは省略する。

2. 真 空 系

2.1 真空系の概要

HEBT 系のビーム輸送ラインは、ビームを通さないときの平均圧力が 1.3×10^{-4} Pa 以下になるように排気されている。ビーム輸送ラインは、1 コース当たり約 30～80 m で全 10 コースあり、総延長は約 240 m になる。各ビームコースは、ゲートバルブで 15 の排気ブロックに分割されている。真空排気は各排気ブロックに設置された排気速度 1,50 l/s のターボ分子ポンプ(以下“真空排気ユニット”という。) 16 台で行い、各ブロックごとに独立に真空排気できる。ゲートバルブの開閉と真空排気ユニットの起動・停止及び圧力の監視は、現場制御盤と制御室で行うことができる。

2.2 真空系の役割

大気中を高速で走るビーム粒子は、大気的气体分子と衝突・散乱し、失われていく。このためビーム輸送ラインを真空にして残留ガスを減らし、ビーム損失を減らし、また散乱によるビームの広がりを抑え、治療に適したビームを供給する。

2.3 構 成

HEBT 系の真空排気系統を図 1 (a), (b) に示す。HEBT 系のビーム輸送ラインは、ステンレス鋼製真空ダクトで構成

されている。ビーム輸送ラインは、全 14 台のエラストマシールのゲートバルブで分割し、真空保持できる。また、真空ダクトの端部は、ビームを大気中に取り出すために、アルミニウム製ビーム取り出し窓で仕切られている。

2.4 真空系の特徴

圧力分布計算により、ビームを通さないときの真空ダクト内の平均圧力が 1.3×10^{-4} Pa 以下になるように、真空排気ユニットの最適配置を行った。

真空ダクトの材質は、ステンレス鋼(SUS 316) 製とし、各々はフランジ接続されている。真空ダクトの断面形状は、円形を基本としたが、偏向電磁石部はそのギャップを小さくするため、また四極電磁石部はボア径を小さくするためにく(矩)形断面とした。フランジには外径 152 mm のコンフラットフランジを統一的に採用した。図 2 に真空ダクトの外観を示す。

真空排気にはターボ分子ポンプ(真空排気ユニット)を使用し、真空排気ユニットは機側と現場制御盤及び制御室から起動・停止ができる。真空排気ユニットを図 3 に示す。

圧力の監視には、低真空用にピラニ真空計、高真空用にコールドカソード真空計を使用している。これらのデータは、圧力のモニタだけでなく、排気装置の起動停止のシーケンス制御、またゲートバルブのインタロック信号としても使用されている。

各ビームコースの分岐にはゲートバルブを取り付け、全 15 のブロックに分けた。各ブロックには少なくとも 1 台の真空排気ユニットを設け、各コース独立に真空排気ができる構成とした。

ビームダクト端部のビーム取り出し窓には、口径 71 mm で厚さ 0.1 mm の純アルミニウムの薄板を付けている。

2.5 データ通信及び制御

真空排気ユニットの起動・停止とゲートバルブの開閉及び圧力の監視は、4 か所に設けられた現場制御盤で制御できるとともに同制御盤を通して制御室から遠隔制御・圧力監視及び状態監視ができる。4 台の現場制御盤は、光ケーブルでリンクされ、上位計算機と接続されている。これら制御ブロックの概略を図 4 に示す。

2.6 真空系の現状

注 HIMAC：科学技術庁放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置

HEBT：高エネルギービーム輸送システム

真空系の現状を以下に記す。

(1) 真空排氣時間

図5に排気ブロック BHC で大気圧から真空排気初期のポンプヘッドでの圧力の時間変化を示す。排気開始60分後に 1.5×10^{-4} Pa 以下となり、当初目標の 1.3×10^{-3} Pa 以下を満足した。

(2) 到達壓力

図1に連続真空排気して3か月後のポンプヘッドでの圧力を示す。圧力は $1.9 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5}$ Paであり、ピームなしでの圧力仕様値 1.3×10^{-4} Pa以下を満足した。












3. ビームモニタ

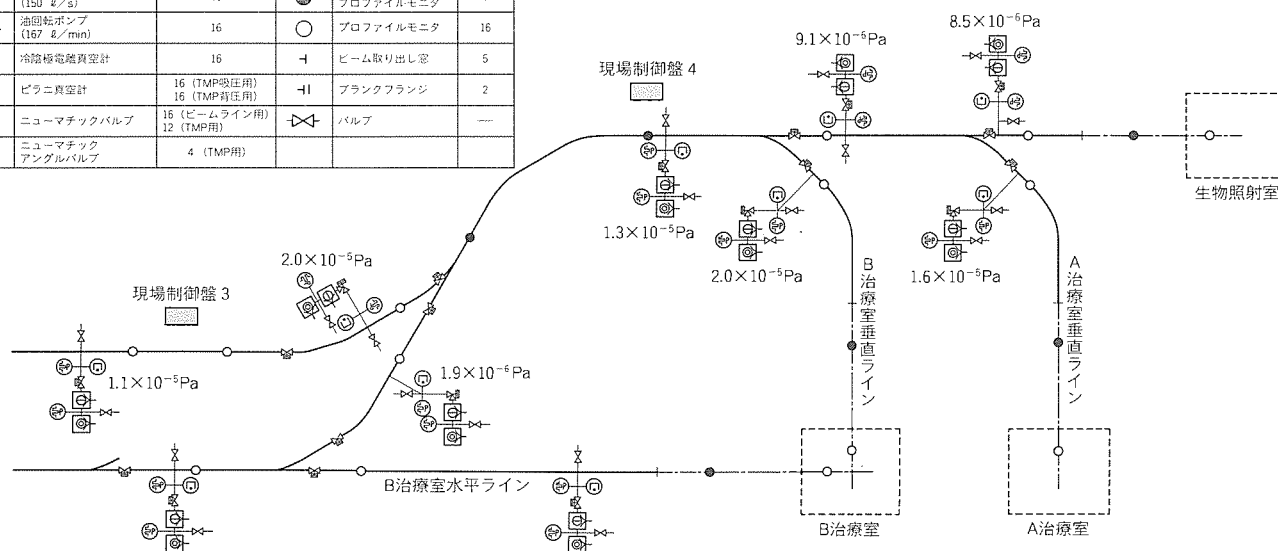
3.1 ビームモニタの概要

ビームモニタとして、ビームのプロファイル・位置を測定するプロファイルモニタ、ビーム強度を測定する強度モニタ及びビーム損失を検出するロスモニタの3種類に関して報告する。

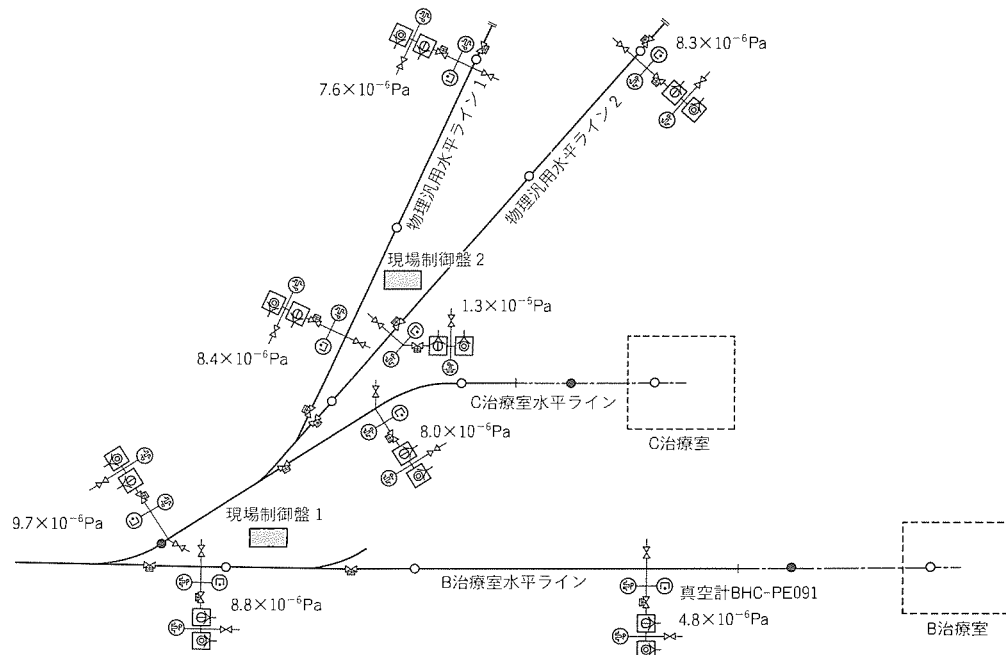
HEBT 系のプロファイルモニタは29台配置し、そのうちの8台に強度モニタが併置されている。19台は真空ダクトに組み込まれており、残り10台は大気中に設置されている。

記号説明

記号	名称	台数	記号	名称	台数
	クーパ分注ポンプ (TMP) (150 ℓ/分)	16		強度モニタ機器 プロファイルモニタ	8
	油断転ポンプ (167 ℓ/min)	16		プロファイルモニタ	16
	冷卻機電氣室計	16		ビーム取り出し窓	5
	ビーム真空計 16 (TMP吸圧用) 16 (TMP背圧用)	16 16		ブラックフランジ	2
	ニューマチックバルブ	16 (ビームライン用) 12 (TMP用)		バルブ	----
	ニューマチック アングルバルブ	4 (TMP用)			



(a) 垂直ライン



(b) 水平ライン

圖 1. 真空排氣系統

ロスモニタは、大気中の任意の場所に取り付け可能である。

3.2 ビームモニタの役割

ビームを、真空ダクト中を通して長距離にわたりビーム損失を少なく輸送するために、



図2. 真空ダクト

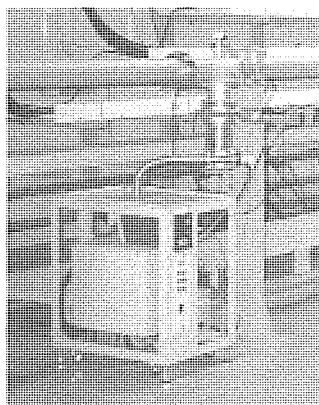


図3. 真空排気ユニット

- (1) ビームの位置とその形状
- (2) 輸送中のビーム強度の変化
- (3) ビーム損失(ロス)の発生箇所

を測定し、必要に応じてビームの軌道や形状を修正する。こ

のような手順を繰り返し、最終的にビームを標的位置に、目標とする大ききで輸送することができる。

3.3 仕様と設計

ロスモニタを除くモニタは、事前のビーム光学計算によるシミュレーションを用いて、ビーム調整に最も有効な場所に設置した。図1にモニタの設置位置を示す。

重粒子ビームは、強度範囲が $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^{11}$ 個/秒と広く、プロファイルモニタとして広いダイナミックレンジを持つ多線比例計数管をセンサとして採用した。このセンサはXとY方向にそれぞれ32本のワイヤを持ち、各ワイヤからの電離信号を集め、プロファイルを構築する。図6にプロファイルモニタのセンサ部を示す。

強度モニタには、大きな出力信号を得るために、平行平板電離箱を採用した。ビーム損失を少なくするために、陰極面は細いワイヤで構成した。

プラスチックシンチレータと高電子増倍管の組合せで構成されたロスモニタは、真空

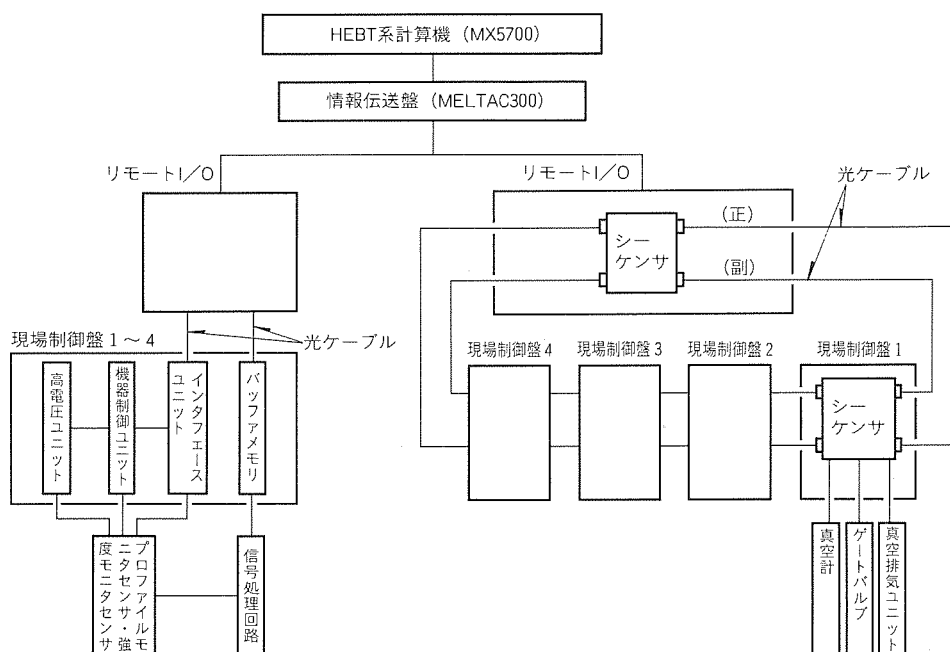


図4. 信号処理系ブロック図

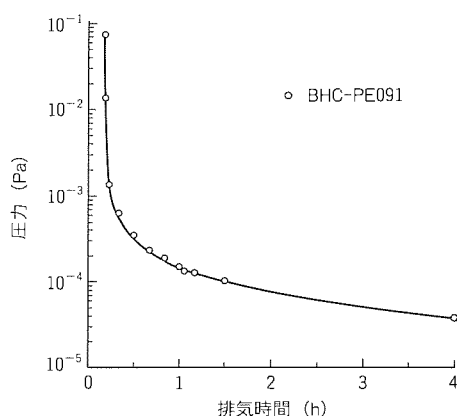


図5. 真空排気後の圧力変化

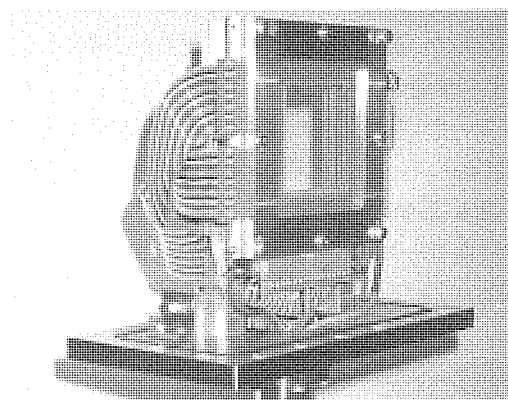


図6. ビームプロファイルモニタセンサ

表 1. ビームモニタの特徴

プロファイルモニタ	
センサタイプ	多線比例計数管
有効照射領域	64mm×64mm
信号ワイヤ本数	32本/X面, Y面
信号ワイヤ間隔	2 mmピッチ
対象とするビーム強度 (800MeV ⁴ Heビーム換算強度)	$1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^{11}$ pps
目標増幅率	5,000倍
強度モニタ	
センサタイプ	平行平板電離箱
有効照射領域	φ100mm
信号電極面数	2 面
対象とするビーム強度 (800MeV ⁴ Heビーム換算強度)	$1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^{10}$ pps
増幅率	1 倍
ロスモニタ	
センサタイプ	プラスチックシンチレータ + 光電子増倍管
シンチレータ寸法	50mm×50mm
対象とするビーム強度	規定なし

ダクト近傍に置いて、散乱及び2次ビームを検出する。

ロスモニタを含めたモニタの特徴を表1に示す。

3.4 構 成

ロスモニタを除くモニタは、通常はビーム軌道外に待避されているが、使用時はビーム軌道上に挿入される。

プロファイルモニタは、全29台設置されており、そのうち8台に強度モニタが併置されている。19台は真空ダクトに直結して設置されている。大気中に置かれた10台のうち、強度モニタ併置の5台は、治療室と加速器室を隔てる中性子シャット手前に置かれ、治療室入射直前のビーム位置と、その強度を測定する。残り5台は治療照射室内に置かれ、治療照射のための最終ビーム位置調整に用いられる。

プロファイルモニタは、ビーム位置を正確に測定する必要から、±0.5 mm以下の位置精度で据え付けられた。図7に参考例として、真空ダクトに直結されたモニタ外観を示す。

ロスモニタは、ビーム調整初期のみ使用する目的で、取り外しが容易で、自由に取付位置を変更できる構成とした。

3.5 データ通信及び制御

プロファイル及び強度モニタは、4か所に設けられた現場制御盤を通して、上位計算機から遠隔制御また状態監視ができる。図4に制御系統を示す。

モニタのデータは出力最大10 Vを、11ビットにデジタル変換されている。モニタに高電圧を供給している直流高圧電源は、12ビットデジタルで電圧制御されている。

モニタデータは、ビームが主加速器から取り出されるごとに更新される。これらデータは制御室に画面表示され、画面は2秒ごとに更新される。

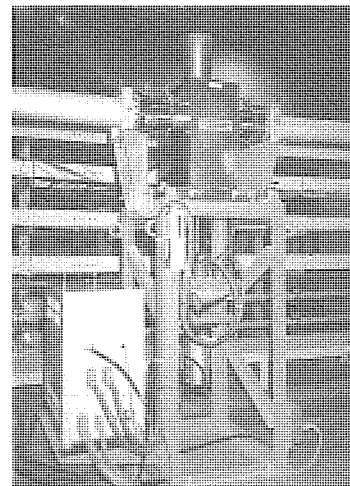


図 7. ビームプロファイルモニタ

ロスモニタについては、アナログ信号をオシロスコープで測定し、計算機には入力していない。

3.6 開発及び試験

事前の試作機として、放射線医学総合研究所(以下“放医研”)と共同でプロファイルモニタと強度モニタを試作し、検証試験を実施した。総合試験は、工場内でのX線照射試験、及び放医研のサイクロトロンを用いた陽子ビーム照射試験を行った。この結果、プロファイルモニタについては、開発目標の5,000倍の信号増幅率を達成し、ビーム強度に関し広いダイナミックレンジを持つことを確認した。

実機29台については総合試験とし、工場内でX線照射試験を実施して動作確認した⁽¹⁾。

3.7 HIMACでの使用例

HIMACでは平成6年3月までの実績として、230 MeV/uの⁴Heビーム及び同290 MeV/u、430 MeV/uの¹²Cビームの加速・取り出しが行われた。これらビームに対するモニタの動作例を以下に示す。

3.7.1 プロファイルモニタ

粒子数が10⁴個/秒程度の低強度のビームでも、プロファイルは測定できることが確認できた。

ビーム調整時には、図8に示すようなビームプロファイルを制御画面上で確認しながら、必要機器を操作する。画面の中央が真空ダクトの中心に対応するため、ビームの位置調整が容易に行える。また、プロファイルをガウス分布と仮定して、最適化曲線をフィットしてビームの大きさ(広がり)を求めることで、計算値との比較が可能となる。図9に290 MeV/u¹²Cビームを上リングから治療照射室手前までビーム輸送した場合の、ビームサイズの実測値と計算値の比較を示す。

プロファイル測定 of 電荷積分時間を調整することにより、約300 ms間のビームの取り出し中のビームプロファイルの変化を測定することも可能である。

3.7.2 強度モニタ

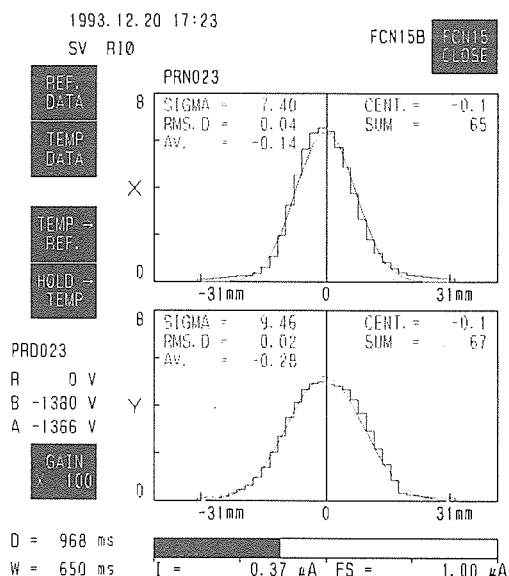


図8. ビームプロファイル及び強度の表示例

測定対象範囲として $1 \times 10^7 \sim 3 \times 10^9$ 個/秒のビーム強度で使用している。測定結果は、図8のプロファイルの下部に横棒で表される。出力は数十 pA から数十 μ A にわたるため、4段階のアンプゲインを設けフルスケールで 0.1 ~ 100 μ A のダイナミックレンジをとった。

出力値をビーム強度に対応させるためには、出力値を測定感度で割る必要がある。測定感度はビームの核種やエネルギーで異なるため、測定に先立ってファラデーカップの測定値と比較し、感度の規格化を行った。測定感度の実測値は、計算値とほぼ一致した。

3.7.3 ロスモニタ

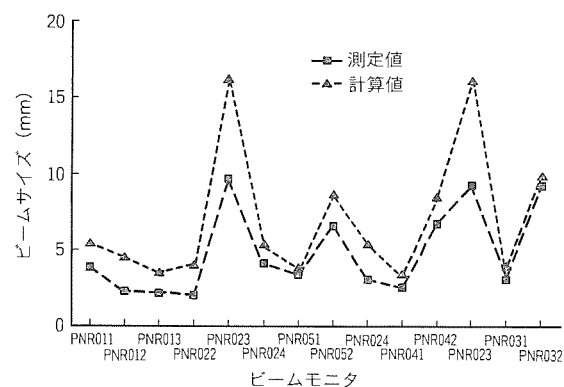
図10にロスモニタによる漏れビームの測定例を示す。この例は、偏向電磁石 LL-BM01 直前の、上流側から向かって右①、左②、下③に置いたロスモニタの出力例を示す。図中②のみ出力が見られることから、ビームが真空ダクトの左側に当たっていることを示している。

ビーム調整初期の運転条件等が不明確なときに、簡単に任意の場所で使用できるため、固定型のビームモニタの補助として有用である。

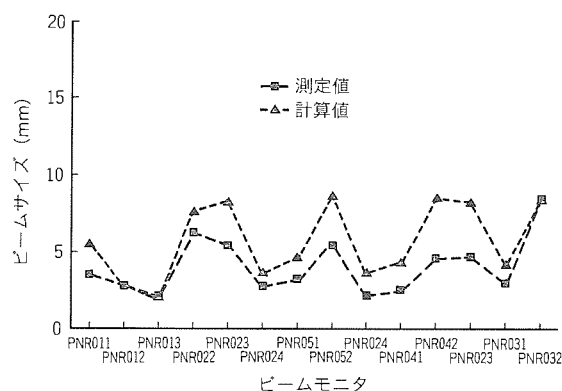
4. む す び

総延長約 240 m の真空ダクトという“道”を、ビームモニタという“目”で確かめながら、ビームを治療室アイソセクターまで輸送できた。

真空ダクト内は、平均圧力 1.3×10^{-4} Pa 以下を維持している。また、ビームモニタでは低強度ビームでも鮮明にプロ



(a) ビームサイズ (X)



(b) ビームサイズ (Y)

図9. ビームサイズの測定値と計算値の比較

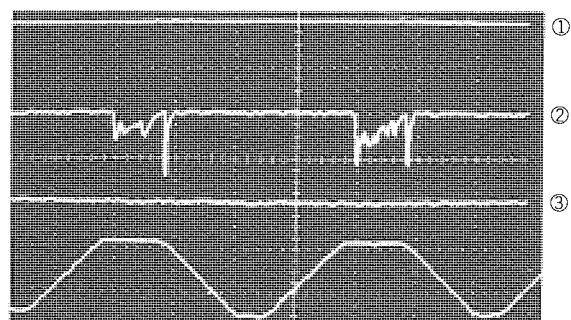


図10. ロスモニタ出力例

ファイルを見ることができた。このビーム輸送システムは、更に低強度のより重い核種のビームでも、十分輸送可能である。

参 考 文 献

- (1) 取越正己, 溝端正隆, 三田村政則, 上田孝寿, 小川博嗣, 山田 聡: 重イオンビームモニタ, 三菱電機技報, 68, No.2, 163~167 (1994)

HIMAC用HEBTシステムの 制御システム

高仲政雄* 小久保光洋*** 山田 聡+
桜井正良** 河野俊之+
松浦 潤** 小川博嗣++

1. ま え が き

HEBT システム (以下“HEBT 系”という。)の制御システムは、①制御卓でのオペレータ操作により、HEBT 系装置の運転・制御を可能とする。そのための情報を集中管理する上位制御系と②HEBT 系の機器個々とのインタフェースをつかさどる下位制御系とによって階層的に構成される。

オペレータは、制御卓での運転シーケンス起動操作により、HEBT 系装置全体を運転・停止したり、機器個別操作によって系内のどの機器でも個別に操作することができる。HEBT 系固有の制御卓操作としては、照射系と交信しながら照射系にビームを供給する操作がある。

2. 上位制御系

HEBT 系の上位制御計算機システムは、全系の制御計算

機システム⁽¹⁾と同様であり、本体はMELCOM 70 MX 5700 II (主記憶容量32M バイト)である。周辺機器等は、数量が違うものの全系と同じ構成になっている。

外部I/Fとしては、全系 LAN, PIO 以外に下位制御系用データウェイ (型名 MDWS-60), 照射系の線量モニタからの HEBT 系へのデータ収集のための LAN (計測 LAN), 電磁石の磁場測定のための GP-IB がある。

HEBT 系制御系計算機システムのハードウェア構成を図 1 に示す。

2.1 制 御 卓

制御卓としては、HEBT 系では上リングからのビーム輸送系用と下リングからのビーム輸送系用の制御卓 2 式がある。それぞれは、表示用のタッチパネル付き 20 インチ CRT 2 台、

注 HIMAC：科学技術庁放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置
HEBT：高エネルギービーム輸送システム

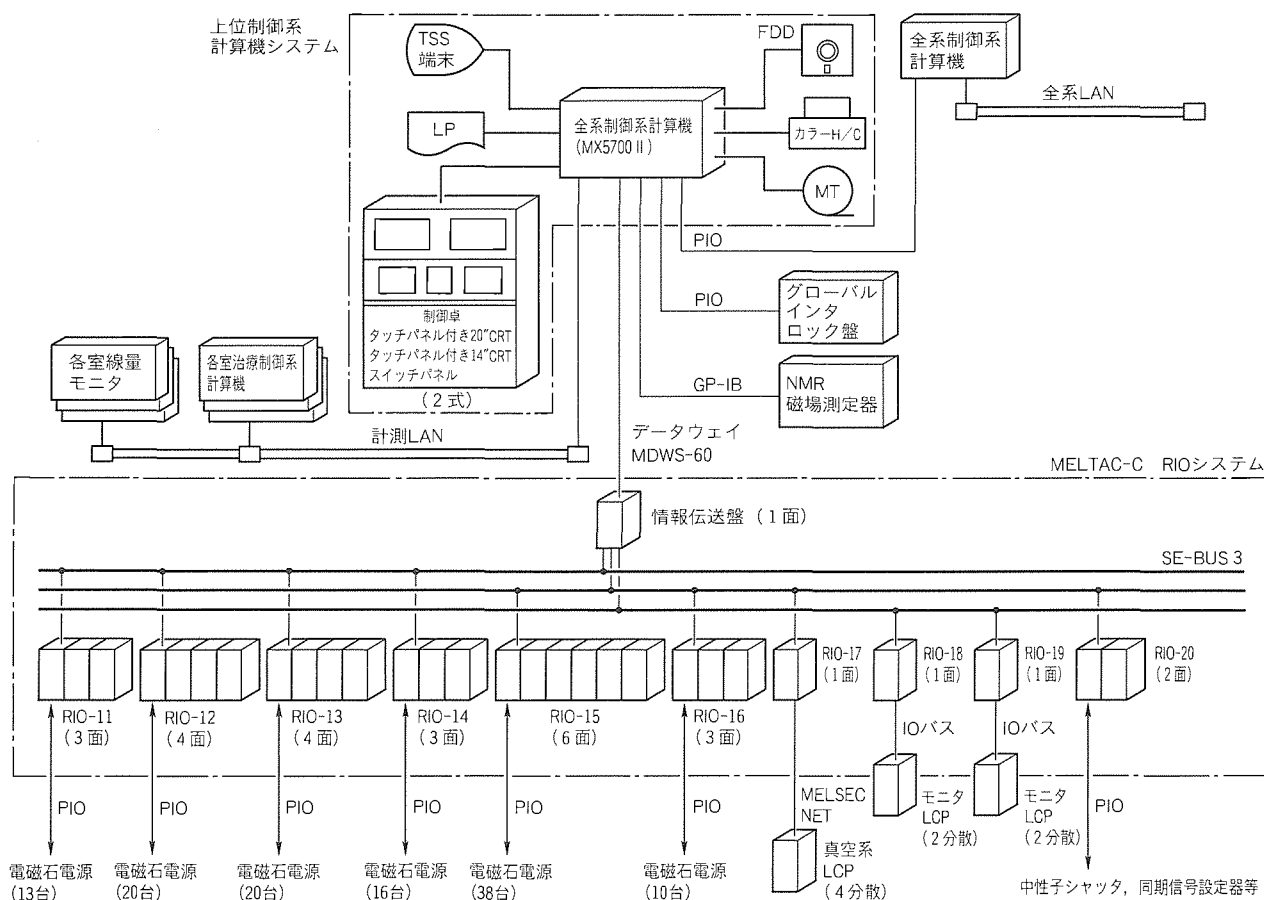


図 1. 制御系のハードウェア構成

操作のタッチパネル付き14インチCRT2台とスイッチパネルで構成されている。スイッチパネルには、20インチCRT画面のハードコピー開始ボタン、タッチパネルからの入力の受付禁止スイッチ、HEBT系の装置全体を停止させる一斉停止ボタンとロータリエンコーダ3台が組み込まれている。このロータリエンコーダ3台と14インチCRTの組み合わせで、任意機器3台までの設定値の出力操作が制御卓上で可能である。この特集での“HIMAC用全系制御システム”⁽¹⁾の図3に示されているように、HEBT系の卓には、さらにインタホン、オシロスコープ、カラービデオモニタ等が収納された列盤がある。

2.2 応用ソフトウェア

HEBT系を始めとする加速器3サブ系(ほかに、上流側の入射器系、主加速器系)に統一された機能として、上位制御系には下記機能を持った応用ソフトウェアが用意されている。この機能を実現する画面表示方法、操作方法等も統一されている。

2.2.1 状態監視機能

加速器系内の状態を把握する対象として、次の4レベルが設けられている。

レベル1：上リングからのビーム輸送系、下リングからのビーム輸送系

レベル2：ビーム輸送系を構成する各グループ(同期系、輸送路系、真空系、ビームモニタ系)

レベル3：グループを構成する各ブロック

レベル4：ブロックを構成する個々の機器

各レベルとも、その状態は以下の共通の8種類のステータスを用いて把握される。

- (1) “Ready”：電源投入前の状態でその対象全体が遠隔制御の下で電源投入条件が整っているビームを遮断し得る状態、又は相当の状態
- (2) “ON”：その対象全体に電源が投入された状態、ビームを出し得る状態、又は相当の状態
- (3) “Fault”：いずれかの機器(真空排気系を除く。)に電源トリップにつながる異常が発生した状態
- (4) “Not Ready”：電源投入前の状態で、遠隔制御の下でいずれかの機器に電源投入条件が整っていない状態
- (5) “Local On”：現場制御の下で機器の電源が投入された状態
- (6) “ON 中”：ONシーケンスが実行中の状態
- (7) “OFF 中”：OFFシーケンスが実行中の状態
- (8) “Null”：直下位レベルでの対象すべてがシーケンス対象から外されている状態

ただし、“Local On”はレベル4にしか適応されず、“ON 中”、“OFF 中”と“Null”はレベル4には適応されない。

レベル4の“Fault”、機器軽異常、LANエラー、機器アクセスタイムアウトエラー等の発生時、20インチCRTの

最下位行に各々のアラームメッセージが表示される。

ブロックごとに、全機器の状態一覧表示、“Not Ready”又は“Fault”の機器の一覧表示、アラームメッセージの時系列一覧表示が、20インチCRTにオペレータ操作で得られる。

CRT上に表示される対象セルは、その状態“Ready”、“ON”、“Fault”、“Not Ready”、“Local On”、“ON 中”、“OFF 中”、“Null”に対応し、それぞれ緑、黄、赤、青(文字：白)、青(文字：黄)、黄ブリンク、緑ブリンク、白で表示される。

20インチCRTにはHEBT系構成機器の配置が図2(a)のような図形が表示される。

2.2.2 運転シーケンス機能

HEBT系の装置をフルターンキー的に運転・停止できるように、その運転・停止のシーケンス機能が上位制御系に用意されている。シーケンス処理の対象としては、前述のレベル1、レベル2、レベル3のいずれかを選ぶことができる。

“Ready”と“ON”について次の説明を加える。

“Ready”とは、シーケンス対象の構成機器のうち制御下にある電源が“Ready”又は一部電源が“ON”の状態、全体として休止状態にあることである。ただし、構成機器を遠隔制御するための制御系機器と真空排気系機器は、必ずしも電源オフ状態である必要はない。“Ready”で運転条件設定操作が可能である。

“ON”とは、シーケンス対象の構成機器のうち制御下にある全電源が“ON”の状態、運転条件“イオン、エネルギー、使用コース”に対応した所定のパラメータが各機器に設定されている状態のことである。この“ON”で運転条件の変更操作、コース切換操作と停止操作が可能である。

レベル1の“ON”の下で、加速器装置側のビーム調整が行われる。照射室直前の中性子シャッタの開閉権利が加速器側制御系にある場合は(すなわち、照射系制御系にその権利がない場合)、照射室へのビーム誘導調整も可能である。

照射系でビームの使用を開始するための通常の手続きとして、HEBT系制御系から照射系制御系へのビーム調整終了の通知・ビームシャッタ中性子シャッタの開閉権利の譲渡の操作が行われる。照射系でのビーム使用を終了するための手続きとしては、照射系制御系からの照射終了通知又はシャッタの開閉権利の返還がある。この手続きは、HEBT系固有のものであり、上流側の2サブ系には存在しない。

シーケンス処理に伴って、対象の状態は図3に示されるように移行する。

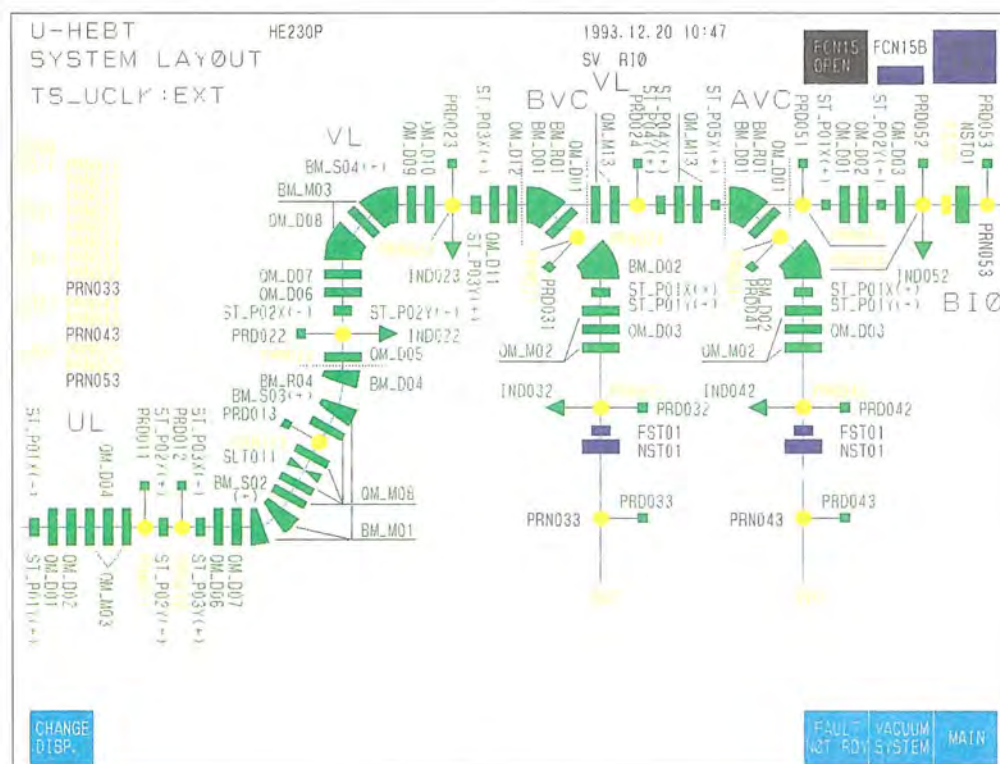
(1) “Ready”から“ON”

“Ready”時に制御卓操作でオペレータが運転条件“イオン種、エネルギー、使用コース等とシーケンス対象”を決定する。すなわち運転条件設定操作を行うと、計算機上でONシーケンスが起動され、レベル4の“Fault”が発生すること

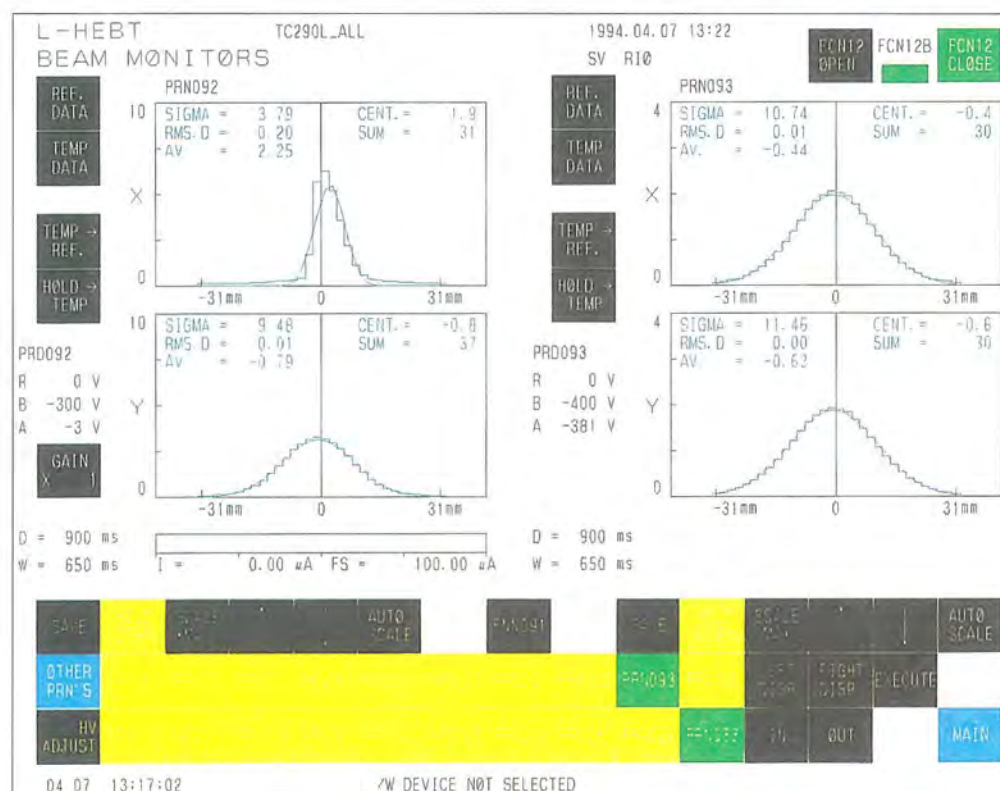
なくシーケンスが終了すれば、シーケンス対象の状態は“ON”に移行する。

(2) “ON”から“ON”

“ON”時に制御卓上で“運転条件”の変更を行うと、ONシーケンスが起動され、レベル4の“Fault”が発生することなくシーケンスが終了すれば、状態は新しい運転条件の“O



(a) 機器配置画面



(b) ビームモニタ表示画面

図2. ハードコピー出力例

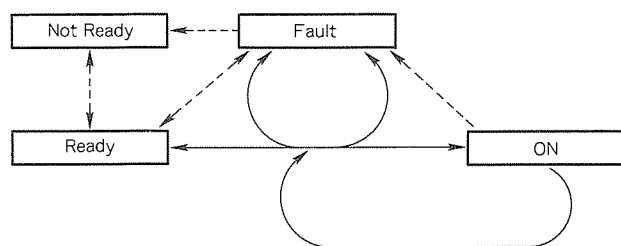


図 3. 運転シーケンスの下での状態移行

N”に移行する。又は、新たな“コース”を選択する。すなわちコース切換操作をすると、コース切換シーケンス (ON シーケンスの一部) が起動され、その下でビームコースは、現“コース”から新“コース”へ切り換わる。

(3) “ON”から“Ready”

“ON”時に制御卓で停止操作を行うと計算機上で OFF シーケンスが起動され、シーケンスが終了すれば“Ready”の状態に移行する。

(4) “Fault”への移行

上記のいずれでもシーケンス処理中にレベル 4 の“Fault”が発生すれば、シーケンス終了後状態は“Fault”に移行する。

2.2.3 機器操作機能

ブロック選択、機器選択操作を経て、電磁石の磁化初期化開始操作、電源の安定度チェック開始/停止操作を含んだ機器単体操作が制御卓で可能となる。

ロータリエンコーダを用いたパラメータ設定操作が、上・下リングからのビーム輸送系ごとに同時に任意機器の 3 パラメータまで可能となっている。

図 2 (b) に示すビームモニタ画面では、調整用基準データと測定データが同時に表示される。基準データは、各運転条件下ビーム調整が上手に行われた場合の測定データを記録したものである。

2.2.4 データログ機能

データログ機能としては、機器が出力する数値データの時間推移を把握するため、データトレンド画面が用意されている。ここでは、4 枚分のトレンド表示 (1 枚につき、任意の 8 個のデータが任意の設定周期で収集されたもの) がなされる。

2.2.5 運転パラメータファイル管理機能

運転条件ごとに、各機器へ設定すべきパラメータの一式をファイルとして記録 (SAVE)、読み込み (LOAD)、設定 (SET)、複写、削除する操作が制御卓で可能である。記録 (SAVE) は、各機器に設定されているパラメータを、その機器の所属ブロック名、機器名等を付加してキャラクタ形式で記憶媒体にファイルとして記録するものである。ファイルの内容の修正・編集は、必要ならば OS の下でオフラインで

エディタを用いて行われる。

2.2.6 ユーザ機器アクセス機能

上記の機能を実現する加速器制御プログラム (すなわち、制御卓操作プログラム) は、HIMAC 装置完成前に製作されている。加速器の運転・研究等の進ちょく (捗) に伴って、ユーザが独自の方法でデータ収集、解析、制御を新たに行う必要性が出てくると期待される。それに対応するために、ユーザが勝手に使用できる CRT 画面とその画面を作るプログラム (又はプロセス) がユーザに開放されている。同時に、ユーザが機器に自由にアクセスできるように、機器記号名を用いてアクセスできる機器アクセスサブルーチン (マンマシンデバイスのものを含む。) も開放されている。

2.2.7 全系制御系支援機能

全系制御卓での操作によって結果的には、サブ系での制御卓操作から運転シーケンスが起動される等の同等の制御が HEBT 系制御系の支援の下でなされる。全系制御系に状態監視情報としてレベル 1 とレベル 2 のステータスが全系に伝送される。

3. 下位制御系

下位制御系は、図 1 に示されるように、上位制御系と HEBT 系機器 (電磁石電源約 120 台、真空系機器・ビームモニタ等約 200 台) との間のインタフェースをつかさどりリモート入出力 (RIO) システムと LCP システム (Local Control Panel: 制御盤) から構成される。RIO システムは、機器群近辺に分散配置された RIO ユニットとその上の情報伝送盤から構成され、高速のデータウェイを用いて多重伝送を行いケーブル量の削減を図っている。

RIO システムは、三菱電機 (株) が原子力発電所の周辺設備の制御用に開発した制御装置のうちの MELTAC-C シリーズで、下記の特長を持っている。

- (1) 各種データウェイを用いて有機的に他装置との接続が可能
- (2) 充実した自己診断機能
- (3) フレキシブルなシステム構築が可能

3.1 下位制御系の階層構成

3.1.1 コミュニケーション部 (情報伝送盤)

HEBT 系計算機とのインタフェース用データウェイとしては MDWS-60 が、一方、MELTAC-C システムの制御用データウェイとしては SE-BUS 3 が用いられている。情報伝送盤は、これらの異なったデータウェイのゲートウェイの役割をしている。それは、さらに MELTAC-C (特に RIO ユニット) の状態監視を行い、異常発生時には上位制御系に異常ステータスを通知する機能を持っている。

3.1.2 RIO ユニット

RIO ユニット (以下“RIO”という。) は、機器との入出力の方法としては以下の 3 種類の方法を持っている。

(1) RIOにおけるPIO入出力

RIOに実装したPIOにより、機器との入出力を行う。電磁石電源の入出力の大部分に使用されているこの入出力は、ON/OFF等の操作指令出力、電磁石の励磁電流等の設定値出力、電磁石電源の異常状態等のステータス入力と電磁石電源の励磁電圧値/電流値等の数値入力である。設定値出力/入力についてはアナログ信号で入出力を行うと雑音混入のおそれがあり、電磁石電源の制御としては好ましくないため、ディジタル8～15ビットパラレルで入出力を行う。

(2) PIO拡張による入出力

ビームプロファイルモニタ等の制御・監視は、ビームライン近傍でも実施するため、その現場にLCP(現場制御盤)を設けている。このLCPでは、複数の機器の制御・監視を行っているため、PIOをRIOに実装し、ハードワイヤード接続する代わりに、PIO部分を拡張してLCPに設置して入出力を行う。この拡張は“I/Oバス”方式と呼ばれている。

I/Oバスは、MELTAC-Cシリーズの末端に属するもので、フィールドに設置されたりモータ入出力装置(スレーブ)を用いて機械装置等と入出力を行い、RIOに設置したマスタカードとの間でシリアル通信を行うものである。このマスタカードは、RIOに複数枚設置することが可能であり、1枚のマスタカードで最大62枚までのスレーブをコントロールすることができる。

(3) MELSECNETによる入出力

真空系機器は、制御系装置異常時にも運転を実施する必要があるため、その設置現場に専用の制御盤(真空系LCP)を設けている。このLCPの制御装置として汎用のシーケンサ(MELSEC-A)を使用し、RIOとLCP間をMELSECNETで接続し、多重伝送による入出力を行う。

3.2 処理の高速化

MELTAC-Cでは、CPUとして高速の32ビットCPU(i80386)を採用し、ソフトウェアの基本構成としてOSを用いないシングルタスク処理とすることで処理の高速化を図っている。

RIOでの機能分散を次の10分散とし、各分散当たりのCPU負荷を少なくし、高速応答を可能としている。

- 電磁石電源の制御 : 6分散
- 真空系機器の制御 : 1分散

- ビームプロファイルモニタ等の制御 : 2分散
- その他の機器の制御 : 1分散

3.3 データウェイ

HEBT系の制御系では、各階層間を表1に示す高速のデータウェイで接続することにより、処理速度の低下をきたすことなくケーブル量を大幅に削減している。

3.4 ソフトウェア

MELTAC-Cは、ソフトウェアの100%検証を行うためにOSを用いないシングルタスク方式のプログラム構成である。その主な機能の概要を以下に記す。

3.4.1 データ受信・転送処理

(1) 情報伝送盤データ受信処理

上位計算機からのデータは、MDWS-60経由で情報伝送盤へITメッセージ送信で出力される。情報伝送盤ではこのデータを漏れなく受信し、SE-BUS3経由でRIOに送出する。

この処理は、データ受信時の割り込みをトリガとして起動され、10ms以内に完了する。このとき、データの取りこぼしをなくするために次の対策がなされている。

- 上位計算機からのデータ送出時間間隔は10ms以上とする。
- ファイルの伝送を伴う場合には、データ受信時に受信応答を返送する。

(2) 情報伝送盤-RIO間データ転送処理

情報伝送盤からSE-BUS3経由でRIOへ、データはサイクリック伝送で送信される。この間でデータの消失を防ぐために、情報伝送盤とRIO間でハンドシェイクを行いながらデータ伝送が行われている。ただし、コンテンション方式等の通信回線の確立から解放までを含む通常のハンドシェイクを用いると伝送時間がかかるので、RIOは情報伝送盤からデータを受信し、この受信データイメージをそのまま情報伝送盤に返送する。情報伝送盤は、送信データイメージと受信データイメージを比較してデータの送信完了を判断する。

(3) RIO-LCP間データ転送処理

RIOからLCPまでのデータウェイ(MELSECNET・IOバス)では、一定周期 T_1 でデータ更新を行う通信方式が採られている。一方、LCP側では一定周期 $T_2(>T_1)$ でデータウェイへのアクセスが行われる。データの消滅を防ぐため

表1. データウェイ

データウェイ 項目	MDWS-60	SE-BUS3	MELSECNET	I/Oバス
伝送媒体	同軸ケーブル	光ファイバケーブル	光ファイバケーブル	光ファイバケーブル
伝送速度 (Mbps)	15.36	2	1.25	1
通信方式	サイクリック伝送、 ファイル伝送、 ITメッセージ伝送	サイクリック伝送	サイクリック伝送	ポーリング/ セレクトイング方式

表 2. データ伝送平均所要時間

単位: s

伝送経路 (入力時の伝送方向は反対)	入 出 力	ロータリエンコーダ操作	入力・表示
制御卓 → 計算機 → MDWS-60		0.10	0.10
MDWS-60(送) → MDWS-60(受)		0.01	0.12
MDWS-60 → 情報伝送盤 → SE-BUS 3		0.03	0.15
SE-BUS 3(送) → SE-BUS 3(受)		0.015	0.015
SE-BUS 3 → RIO → 機器		0.135	0.135
—		計0.29	計0.52

にRIOでは一定時間 $T_3 (> T_2)$ 同一データを出力し続ける。この処理は、RIO 内部のタイマカウンタを用いて実現されている。

3.4.2 シーケンス処理

下位の制御装置として高速の32ビットCPUを使用したこと、及び機能分散化を図ったことによって処理時間に余裕が生じた分、付加機能として励磁電源の初期化処理を実施している。

電磁石の磁場設定の再現性を良くするために、その励磁電源に電流を設定する前に磁場のヒステリシス曲線の閉ループ処理(初期化)を電源に対して実施する。上位計算機からの初期化の情報(最大電流値、最小電流値、ループ回数、1ループの所要時間)と実施指令を受けて、RIOは電磁石電源に対して初期化処理出力を行う。初期化中断指令で処理の中断を可能としている。

4. 上位制御系と下位制御系間のデータ転送時間

制御卓でのロータリエンコーダ操作から励磁電源へ電流値を設定するまでの所要時間と、全RIO下の全機器の状態(値入力を含む。)をRIOで入力して上位計算機へ転送後、制御卓にその一部を表示するまでの所要時間が、表2に示すようにそれぞれ平均 約0.29s, 0.52sとなる下位制御系、伝送システム等が設計された。

5. 同期制御システム

がん治療装置全体のおおもとの同期信号は、主加速器系の同期信号発生器で作り出され、他のサブ系に分配されている。その信号、いわゆるイベント信号(1周期内の特定事象が起きるタイミングを定める信号)を受信した各入射器系、HEBT系及び照射系の同期信号設定器は、自サブ系内で必要と

される同期信号をそのイベント信号に同期して生成出力する。

HEBT系の同期信号設定器は下記の機能を持っている。

- (1) 上・下ビーム輸送系用のイベント信号、又は同期信号設定器内部で生成される周期信号のいずれかに同期して、同期信号を出力する。
- (2) 同期信号としては、1 μ s単位で最長 約1分のゲート時間と遅延時間が設定可能なゲート信号10種類が出力される。
- (3) 各ゲート信号の出力は、TTLレベルのものと波長830nm付近の光によるものがある。

これらの信号は、ビームモニタでの計測、ビーム輸送路の周期内切換え、オシロスコープの同期等に使用されている。光信号は、光ファイバケーブルで伝送され、機器近傍で電気信号に変換され使用される。

6. む す び

制御卓での操作性は、CRT等のマンマシンデバイス上の表現方法・入力方法と、オペレータの操作の熟達度合に依存する。オペレータや研究者の経験熟達に伴って、操作卓での現在の表現方法や入力方法以上のもの、すなわち新たなソフトウェアが求められるようになるであろう。

今回、用意されたユーザ機器アクセス機能が活用されて、オペレータや研究者にとってより操作性の高い、親和性のある制御系、個々の研究者の特異性をも満足し得る制御系が今後実現されることを期待する。

参 考 文 献

- (1) 高仲政雄, 内海雅文, 山下嘉久, 松村 寧, 河野俊之, 小川博嗣, 高田栄一: HIMAC用全系制御システム, 三菱電機技報, 69, No.2, 188~191 (1995)

HIMAC用治療・照射システム

上田和宏* 曾我文宣⁺
 坂本豪信** 金井達明⁺
 正木敏煥*** 遠藤真広⁺⁺

1. ま え が き

重粒子線は、シャープなブラッグピークを持つ放射線で、正常組織をほとんど傷つけず、がん組織を集中的に照射することが可能である。治療・照射系は、光速近くに加速された重粒子線を治療に供せるよう照射野を平たんに拡大し、治療部位の深度に合わせて重粒子線の照射深度（飛程又はレンジ）を調整し、がん患部の形状どおりに照射制御するのが、その役割である。HIMACには三つの治療室があり、治療室Aは垂直照射ビームラインを、治療室Cは水平照射ビームラインを持つ。治療室Bは、垂直照射ビームラインと水平照射ビームラインを持ち、同時照射も可能でHIMACのハイライトとなっている。

照射ビームラインの構成機器は、科学技術庁放射線医学総合研究所（以下“放医研”という。）が中性子線治療や陽子線治療の経験から、重粒子線による理想に近い放射線治療をするために検討されたものを、技術的に実現したものである。従来の放射線治療では全く姿を見せなかった各種ビームライン機器を、昭和61年の“詳細設計”でフィジビリティを追求し、イメージを定着してワブラー電磁石や多葉コリメータ装置といったキーデバイスの開発を進め、要求どおりの性能を達成した。この結果、HIMACではmmオーダーの精度の治療が実現するであろう。

さらに、重粒子線治療では、患部の位置を同等精度以上に正確に確定する必要がある、2軸のX線TVシステムによる患者位置決め方法を、放医研の指導で開発を進め、所定の性能が達成できた。放医研で開発された治療計画装置から各患者の位置決め設定値と治療機器設定値が与えられるが、治療・照射系はこれに呼応して、患者を治療位置に誘導固定し、機器を設定して三次元照射を行うことができる。以下に重粒

注 HIMAC：科学技術庁放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置

子線の治療照射方法とビームライン機器の概要を述べる。

2. 照射方法と機器構成

重粒子線治療は、極大照射線量を与えるブラッグピークや拡大ブラッグピーク（Spread Out Bragg Peak：SOBP）が正確に患部をヒットするように重粒子線を制御して行う。治療照射の目標仕様は表1のように与えられた。これを実現する方策の概要を表2に示す。

加速エネルギーと照射深度との関係を図1に示す。飛程30cmに必要な重粒子線の加速エネルギーは、例えば炭素で約500MeV/uである。図2にブラッグピークの、図3にSOBPの各々の物理線量の実測例を示す。

三次元形状のがん患部に対して照射する方法を図4に模式的に示す。重粒子線進行方向の底部形状は、補償フィルタ（ボラスとも呼ばれる。）を患者の前に設置し、重粒子線の到達深度を調整する。最深度の第1層（この層をスライスという。）を照射するときには、補償フィルタの上流にある多葉コリメータ装置の重粒子線通過部形状を#1の位置に設定する。第2スライスを照射するときには、多葉コリメータ装置の形状を#2の位置に設定する。第1スライスから第2スライスへの移動は、第1スライスへの照射線量が規定の線量になったことを線量モニタで確認して行う。重粒子線の照射深度を変更するには、多葉コリメータ装置の更に上流にあるレンジシフト装置の厚さをスライス間の厚さに相当する分だけ厚くする。この際、必要があればワブラー電磁石の通電電流を変えて照射野及び平坦度を調整する。順次スライスを上層に移して最上層に達すると、今度は順次スライスを逆に下層に移して往復照射を行う。このように最下層～最上層への移動、最上層～最下層への移動をスイープという。スライスとスイープとはそれぞれ最大40、10回に設定されている。

二次元照射法を模式的に図5に示す。SOBPの幅が患部

表1. 重粒子線治療の目標仕様

項 目	目 標 仕 様	実 現 方 法
照 射 粒 子	He, C, Ne, Si, Ar	イオン源で粒子変更
照 射 深 度	最大30cm（水相当厚）	加速器エネルギーによって調整 レンジシフト装置によって調整
照射野平坦度	φ22cm以下の照射野で±2%以内	ワブラー電磁石と散乱体装置によって調整
照射輪郭精度	5mm以下	多葉コリメータ装置と患者コリメータ
照射線量精度	±5%以下 φ7cm球の均質物体（水相当）に対して	三次元／二次元の照射方法
治療照射時間	5 Gy・1を1分で照射	加速器出力電流によって調整

表 2. 二次元照射と三次元照射

照射方式	二 次 元	三 次 元
照射方法	ブラッグピークを患部厚に 応じて拡大 (SOBP) 連続で1回照射	患部をスライスに分け、それ ぞれ形状を特定する 繰り返し往復照射(スイープ)
使用機器	リッジフィルタ装置 標準レンジシフト装置 患者コリメータ (又は多葉コリメータ装置)	リッジフィルタ装置 高速レンジシフト装置 多葉コリメータ装置 (ワブラー電磁石)

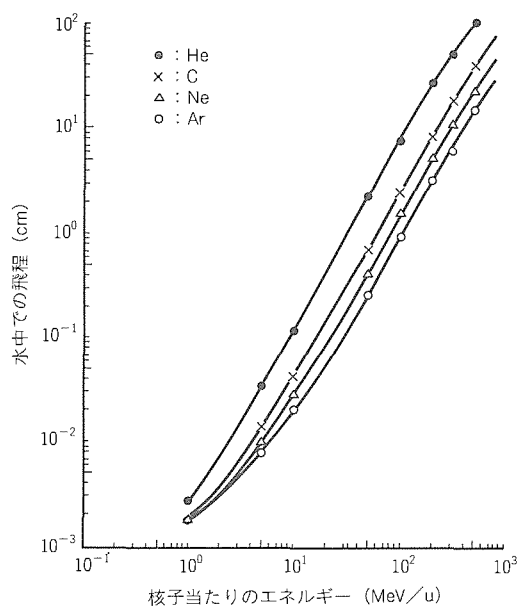


図 1. 水中での飛程

の厚さに相当する。患部の照射形状は静的に患者コリメータで決められるが、多葉コリメータ装置を用いても構わない。図 3 に示す SOBP の物理線量の実測値は平坦ではない。これは、それぞれの到達深部 (すなわち重粒子線の加速エネルギー) での生物学的効果を考慮していないもので、生物学的効果を入ると平坦な吸収線量分布となっている。これは実は三次元照射のスライスごとの線量分布においても同様である。生物学的効果は、実際の治療を目的とした生体照射では極めて重要な因子で、生物と医学を結ぶキーワードであり、細胞実験などを通じてデータが蓄積されている。この三次元/二次元照射方法は、重粒子線の特性を考慮した照射方法で、現行の X 線や電子線の放射線治療方法とは大いに異なっている。

患者の治療位置固定や機器設定の諸元は、治療計画装置を与えるが、これも現行の X 線、電子線治療計画装置とは大いに異なっている。重粒子線はいわばハイテクの放射線であり、これに呼応して、照射方法も照射ビームラインの構成も治療計画装置も位置決め方法も新しいものになっている。放射線治療の決定版として期待を集めるゆえである。

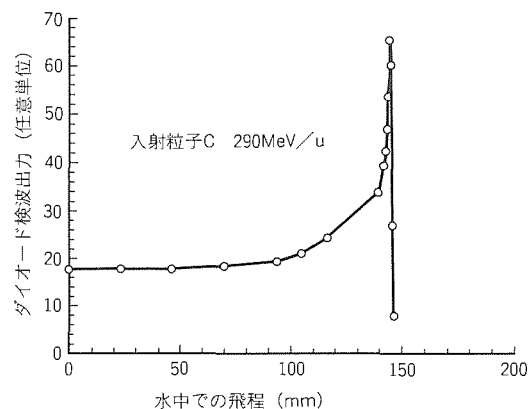


図 2. ブラッグピーク

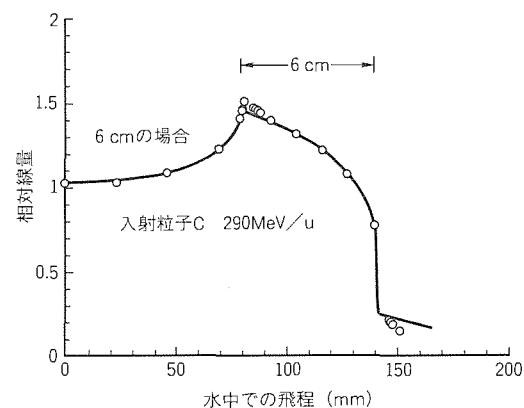


図 3. 拡大ブラッグピーク (SOBP)

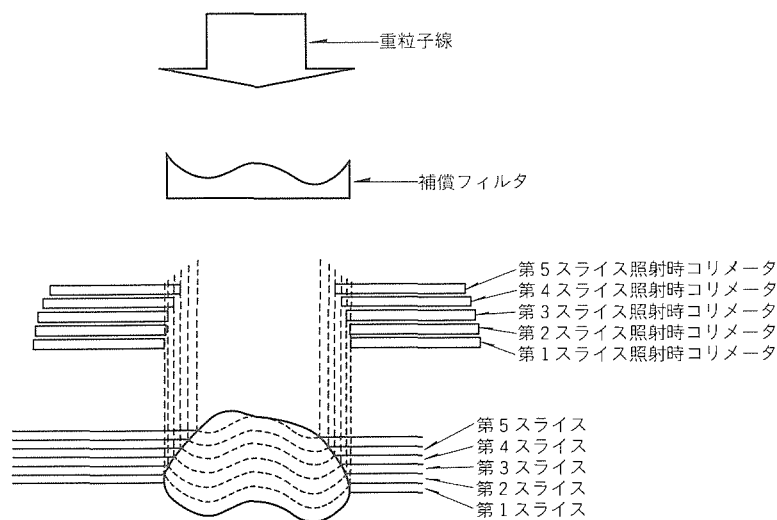


図 4. 三次元照射

治療室 B の水平及び垂直照射ラインの機器配置と構成を図 6 に示す。治療台付近の様子を図 7 に示す。治療室 A の垂直照射ライン、治療室 C の水平照射ラインも各々治療室 B の対応する物と同じである。

重粒子線は、高エネルギービーム輸送系の端部 (アルミ窓で高真空が保たれている。) を離れると空气中に放出される。ワブラー電磁石と中性子シャッター装置の中は粗い真空にして

ビーム散乱の増大を防いでいる。表3に構成機器とその機能をまとめる。以下の章でこれらの詳細を述べることにする。

3. 照射野の拡大と平坦化

加速器から治療・照射系に輸送されてくる重粒子線は、標準仕様として2秒に1回のパルスビームで、パルス幅は400

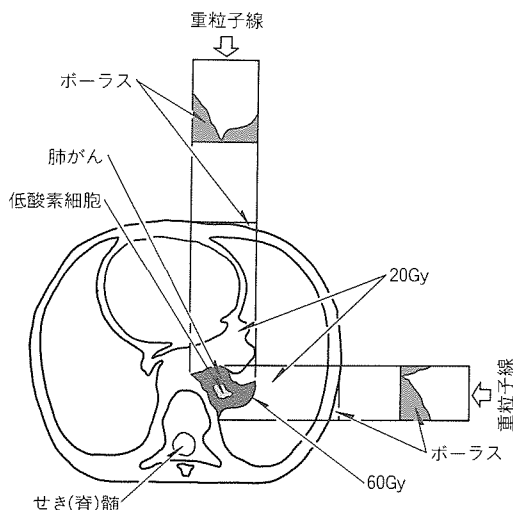


図5. 二次元照射

msである。このパルス幅の中で瞬時に重粒子線強度は変化したり、シンクロトロン電源リップルに由来する強度リップルを含む可能性がある。空間分布も均質ではない可能性もある。照射位置（アイソセクタ面）で、照射ビームの平面分布のうち治療に使用する中央領域が $\pm 2\%$ 以内の平坦領域を確保するために、次の方法を採用している。

重粒子線自身の空間分布が照射に影響する度合いをできるだけ小さくするために、アイソセクタ面でビーム径が最小になるように高エネルギービーム輸送システム（HEBT）で調整する。照射野拡大はワブリング法による。ワブリングとは、重粒子線を円形に走査する方法でオシロスコープでリサーチ波形を作るのと同じ原理である。ワブリングの実際は、水平方向偏向磁石と垂直方向偏向磁石をそれぞれ位相差を 90° の正弦波電流で励磁することで行う。平坦領域を作るために積極的に散乱体を使用する。散乱体通過後の重粒子線は若干のエネルギーを失うが、ガウス分布の散乱広がりを持つ。これをワブリングして広い平坦領域を形成する。具体的な検討結果は以下のとおりである。

(1) 重粒子線の散乱

治療・照射系の垂直ビームライン上の散乱に寄与する物質の構成を図8に示す。基本的に空気中を通過して患者に照射

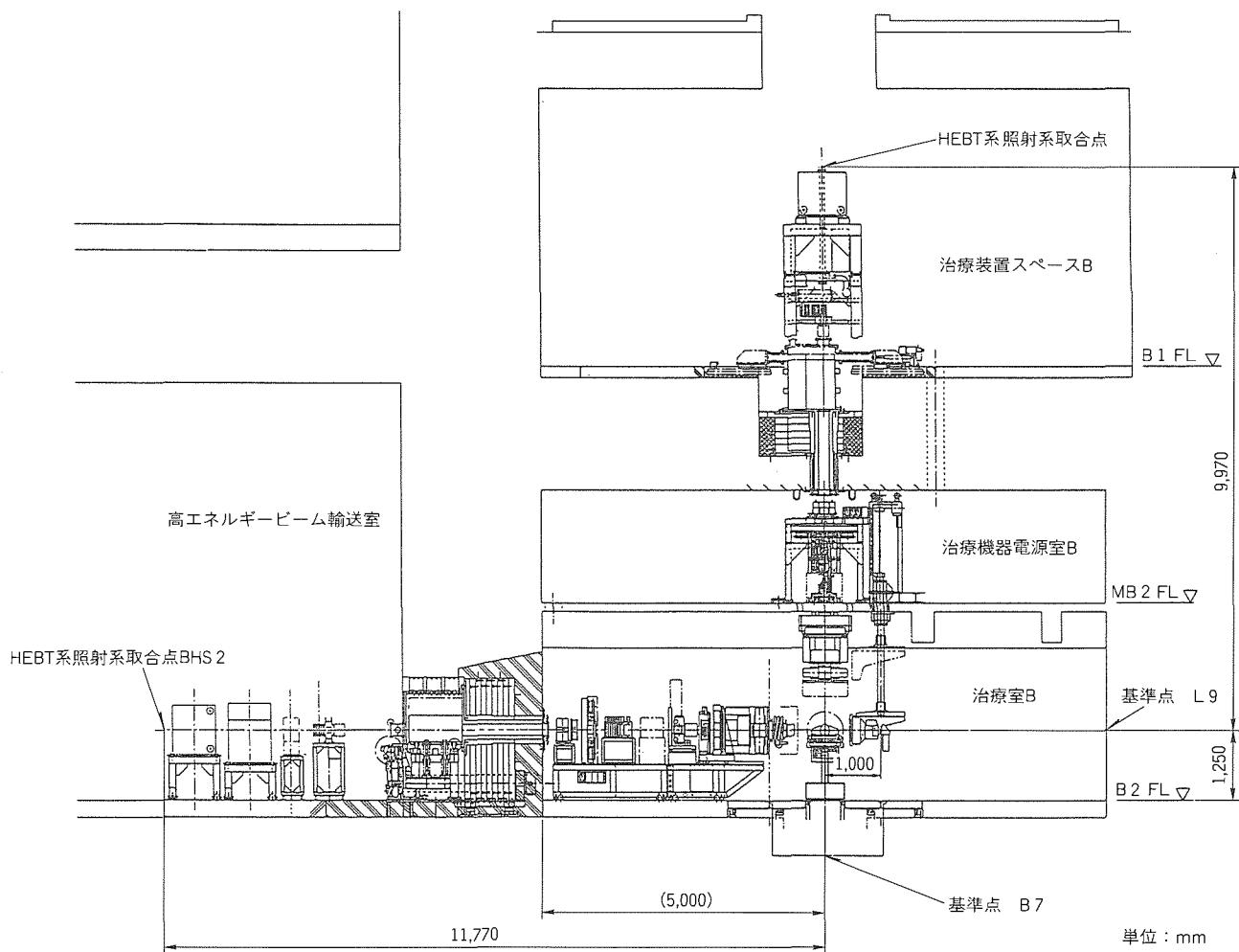


図6. 治療室B照射ライン

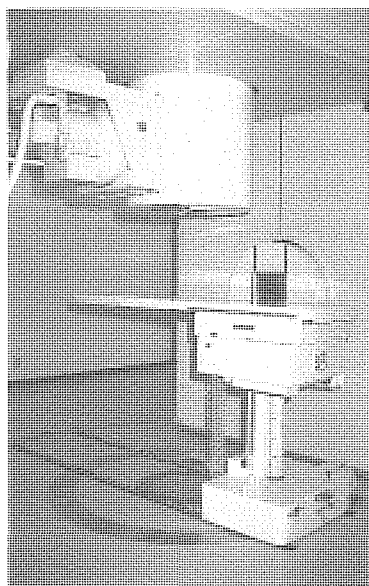


図 7. 治療室内部

されるので、重粒子線は多層の散乱を受けてくる。シミュレーション結果を図 9、図 10 に示す。 σ はガウス分布で $1/E$ となる半値半幅である。散乱体厚が増すとエネルギーの減少があり、これも併せて示している。

(2) 重粒子線の平坦化

散乱を受けたガウス分布が広がった重粒子線をワブリングすると、ほとんど平坦化した重粒子線にすることができる。この様子を図 11 に示す。図は半径方向の広がりを示したもので、 R_0 はワブリングの半径を示し、 r_{\max} は平坦度 $\pm 2\%$ 以内の照射野半径を示す。 σ は上記と同じである。ワブラー電磁石の諸元を表 4 に示す。

4. 照射深さ制御

体内の標的(がん組織)に重粒子線を照射して治療する場合の体内に到達するブラッグピークの深さは、重粒子線の種類とその入射時のエネルギーによって決まる。重粒子線の進行方向の患部以外の正常組織への影響を極力抑えるために、体内での標的の位置に合わせて深部方向の到達深度を調節しなければならない。この目的のために用いる装置がレンジシフト装置及び補償フィルタである。さらに、レンジシフト装置には重粒子線照射中に設定値を変化させないもの(二次元型の標準レンジシフト装置)と設定

表 3. 構成機器と機能

構成機器名	機 能
ワブラー電磁石 (X) (Y)	正弦波電流で励磁し、(X) (Y) で 90° 位相差を持つことでビームを円形に走査する。重粒子線通過部分は、FRP製の真空ダクトで構成され、空気の散乱と放射化を防ぎ、カプトン窓を持つ。
プロファイルモニタ (I)	高エネルギービーム輸送系のビーム調整に用いる。照射時はビームライン外に退避する。
散乱体装置	ワブラー電磁石で円形走査されたビームを散乱させ、照射点で平坦なビームにする。粒子エネルギーによって厚さを変える。散乱体は鉛とタンタルである。
F コリメータ	治療室直前に設置し、散乱体や上流の真空窓等で散乱されたビームをカットする。材質は黄銅である。
F シャッター装置	治療室直前に設置し、プロファイルモニタ (I) でビーム調整するときに用いる。放射化量を少なくするため、材質はアルミである。
中性子シャッター装置	F シャッター等で治療室外でビームを吸収停止させるときに発生する中性子等が、治療室内で作業する医師等が実効線量限度を越えて被ばく(曝)しないためのシャッターである。実効で鉄95cmの厚さがあり、ビーム照射時に開ける。治療室の遮へい構造の一部となり、放射線安全管理システムの一部を構成している。空気の放射化を防ぐために全体が真空構造で、カプトン窓を持つ。
リングコリメータ装置	ワブラー電磁石と散乱体で広げられたビームにはすそ(裾)野があり、照射領域からはずれる不要なビームを持つ。不要なビームをカットするのがリングコリメータである。照射野に応じて、大、中、小のサイズを選択できる。
正線量モニタ	照射線量を制御する基準となるモニタ。ビームライン上固定である。
リッジフィルタ装置	SOBP作成する。7個を装着して、選択して使用する。患者対応となり、ID番号で管理する。深溝の洗濯板状である。
標準レンジシフト装置	照射深度を調整する。厚さはバイナリに変化できる。
高速レンジシフト装置	照射深度を調整する。くさび状の板2枚を独立・高速に動作させて所定の厚さに設定することが可能である。三次元照射に用いる。
プロファイルモニタ (II)	ビームスポットの調整に用い照射時はビームライン外に退避する。
平坦度モニタ・副線量モニタ	ビームの平坦度の測定と、正線量モニタのバックアップを行う。正線量モニタ不動作のときに、副線量モニタが機能を補完する。プロファイルモニタ (II) と同一架台上にあり、ブランクと合わせて三つのいずれかを選択する。
X 線 管	患者位置決め用のX線TVの線源である。ライトロカライザと同一架台上にありブランク位置と合わせて三つのいずれかを選択する。
ライトロカライザ	患者照射野を可視的に見る装置である。レーザ光を用いレンズで光源点を散乱体位置に合わせている。
4枚羽根コリメータ装置	多葉コリメータの遮蔽体にビームが当たり、放射化するのを最小限にするためと裾野のビームのカットに用いる。材質はアルミである。
多葉コリメータ装置	リーフ幅6.5mm、23対で構成した高速可動のコリメータで材質は鉄である。三次元治療のときにはビーム照射中に照射野を変化させる。4枚羽根コリメータと連結構造で必要に応じ回転と前後進できる。
患者コリメータ	患者コリメータは患者ごとに異なる。多葉コリメータの先につけたホルダに装着できる。
補償フィルタ	患部の最下層の形状にビーム到達深度を合わせるために患者ごとに異なるフィルタであり、ホルダに装着して用いる。
治 療 台	前後、左右、上下と回転、ピッチング、ローリングの6つの自由度を持ち、患部をビームの照射のしやすい方向に設定可能である。

値を変化させるもの(三次元型の高速レンジシフト装置)とがある。

二次元型の標準レンジシフト装置は、図 12 に示すように重粒子線の進行方向に直角に照射野全体を遮るように置いた一様の厚さのルサイト(アクリル)板で構成される。ルサイト板の厚さは9種類用意し、それらの組合せで任意の厚さが設定できるよう構成されている。ルサイト板は各々独立にモータで照射領域内に出し入れでき、治療制御計算機から遠隔

で所望の厚さが得られる組合せのルサイト板を設定する。標準レンジシフト装置の仕様は表5のとおりである。

三次元型の高速レンジシフト装置は、図13に示すように重粒子線の進行方向に直角に照射野全体を遮るように置いたくさび形のルサイト板2枚で構成される。高速レンジシフト装置の厚みは、2枚のルサイト板の厚さの和となる。くさび形のルサイト板は、各々独立にACサーボモータで高速で照射野内に出し入れでき、重粒子線通過領域の厚みをルサイ

ト板の重なり量で連続的に変えることができる。治療制御計算機から遠隔で所望の厚さが得られる位置にルサイト板を設定する。高速レンジシフト装置の仕様は表6のとおりである。

補償フィルタは、図14に示すように重粒子線の体内でのブラッグピークの深さを、患者ごとに治療部位に合わせて調節するもので、人体と等価な密度を持つ材質で患部の深さ方向の形状に合わせて作られる。したがって、これは患部の形状が変わる都度製作しなければならない。

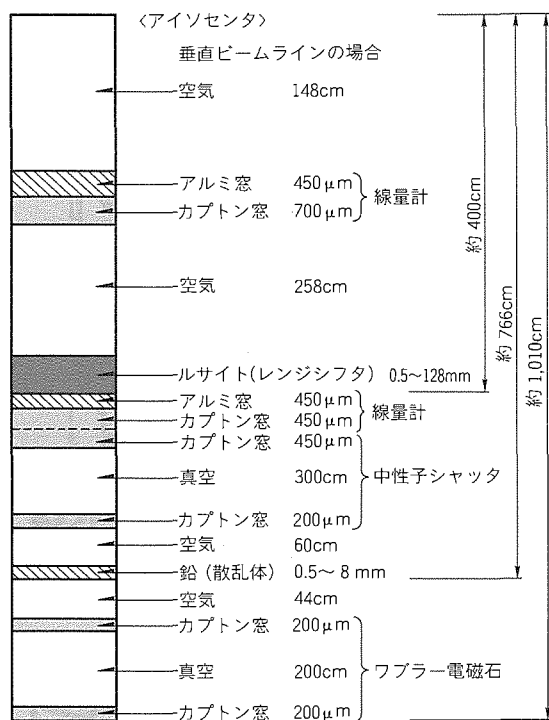


図8. ビームライン上の散乱媒質

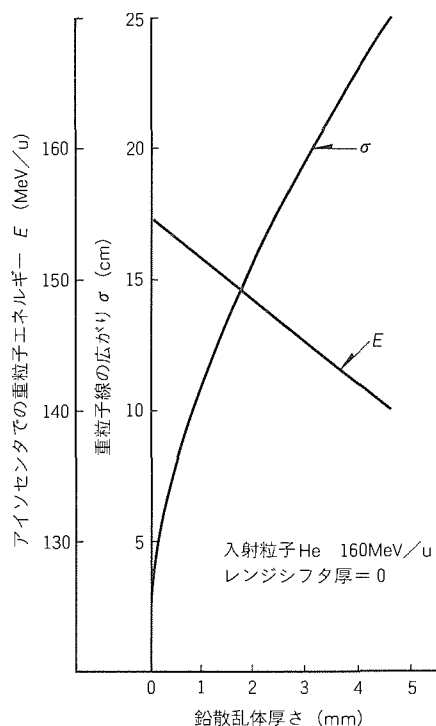


図9. アイソセンタでのビームの広がりエネルギー (Heの場合)

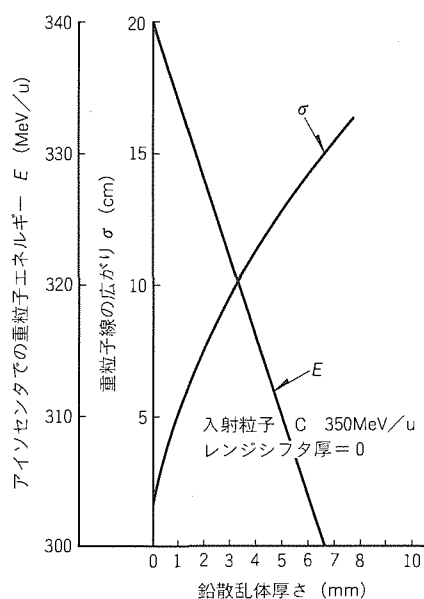


図10. アイソセンタでのビームの広がりエネルギー (Cの場合)

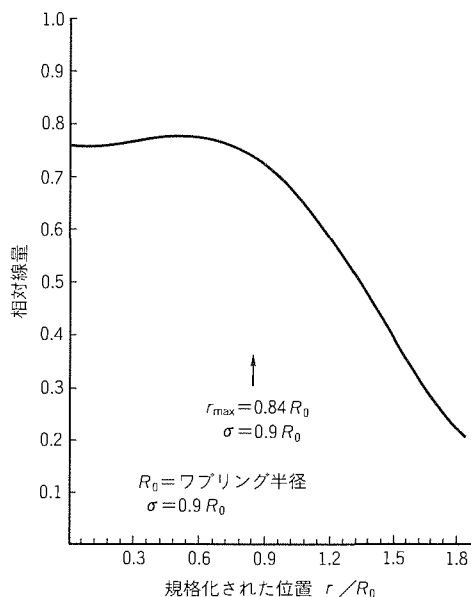


図11. 線量分布

表4. ワブラー電磁石

有効長	640 mm
機械長	750 mm
磁極長	550 mm
磁極幅	220 mm
ギャップ長	110 mm
ギャップ磁場	0.2 T
磁場均一度	0.0 1
起磁力	2.1×10^4 AT
インダクタンス	0.91 mH
励磁周波数	60 Hz

表 5. 標準レンジシフト装置

ビーム照射領域	φ180 mm以上
ビーム軸出入り時間	5 s以下
設定精度	± 2 mm以下
ビーム軸との直交精度	±0.5°以下
ルサイト板の厚み	0.5 mm
	1.0 mm
	2.0 mm
	4.0 mm
	8.0 mm
	16.0 mm
	32.0 mm
	64.0 mm
	128.0 mm

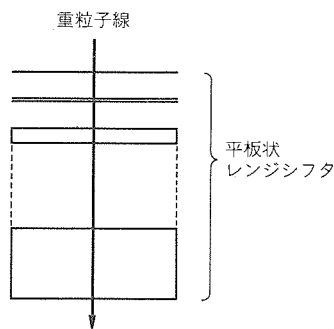


図12. 標準レンジシフト装置

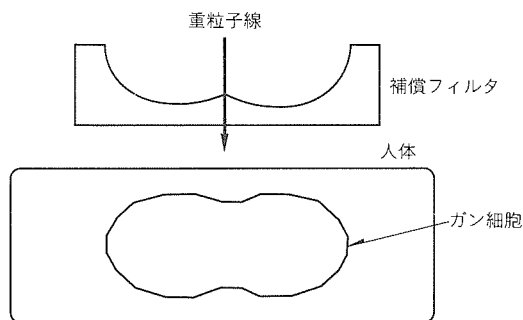


図14. 補償フィルタ

5. 放射線遮蔽

各治療室は、室外の高エネルギービーム輸送室で発生する中性子線やγ線及び他の放射線から室内を守るために2.5 m厚のコンクリート壁に囲まれている。重粒子線導入部のコンクリート壁には通過孔があり、この部分の遮へい（蔽）を別個に設けるために中性子シャッタ装置がある。遮蔽材に鉄（又はステンレス）を用い、実効遮蔽厚は95 cmである。中性子シャッタ装置は、真空中で移動する遮蔽体と真空チェンバとで構成され、設置部分のコンクリートの遮蔽厚き補助のために鉄製の遮蔽ブロックで補強されている。中性子シャッタ装置の外形を図15に示す。既に述べたように、中性子シャッタ装置の上流にはFシャッタ装置・F コリメータが設置されており、重粒子線調整時に発生する中性子線も遮蔽する。

散乱され広がった重粒子線のすそ（裾）野部分は治療には不要であり、患者からできるだけ上流でカットするため、リングコリメータ装置が設置されている。同様の配慮が多葉コリメータ装置（遮蔽体は鉄）の放射化を少なくするためにも、4枚羽根コリメータ装置が設置されている。リングコリメータ装置、4枚羽根コリメータ装置はいずれも20 cm厚のアルミ材が基材である。

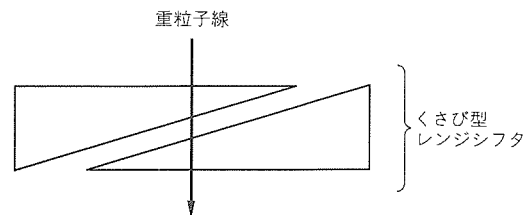


図13. 高速レンジシフト装置

表 6. 高速レンジシフト装置

ビーム照射領域	φ180 mm以上
くさび形形状	底辺750 mm
	高さ75 mm
最小設定厚さ	20 mm以下
最大設定厚さ	130 mm以上
移動速度（厚さ換算）	27 mm/s以上
加速度（厚さ換算）	1.4 m/s ² 以上
設定精度（厚さ換算）	±0.125 mm以下

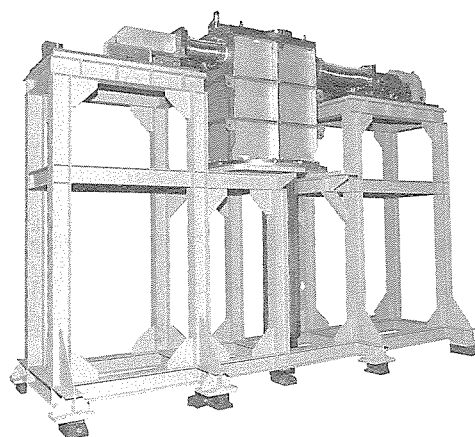


図15. 中性子シャッタ装置

6. む す び

新しい放射線治療システムとして HIMAC の治療・照射系が完成した。設計検討から開発、試作、本設計などを経て、機器製作、据付け、調整まで実に7年の研さん（鑽）を必要とした。

それ以前の放医研での諸先生方の基礎研究や初期の研究開発を含めるとこれに倍するものと思われる。しかし、重粒子線治療が本格化するのは多分これからと言えるのではないだろうか。今後、幾多の治療経験が積みまれていき、それらを基にして改良が指向されて、より完成度の高い治療機に進化していくことを念じている。

HIMAC用重粒子線治療・照射機器

坂本豪信* 金井達明***
 岸本 健** 遠藤真広+
 坂元 学** 荻原伸一+

1. ま え が き

重粒子線治療には、患部全体を一度に照射する二次元治療と、患部を複数の領域に分割して各々の患部を個別に照射する三次元治療とがある。二次元治療は、重粒子線照射中に治療機器の設定値を変更しないので実用化されているが、三次元治療は重粒子線照射中に治療機器設定値を変更し、分割された各患部に最適な条件で放射線を集中できるので実用化が急がれていた。

ここでは、重粒子線を照射するための治療データのの流れと治療機器の詳細性能及び基本動作について、特に、重粒子線照射中に治療・照射機器の設定を変更する三次元治療で安全性を考慮した機能について述べる。

2. 治療データの流れ

治療計画装置は、重粒子線治療の司令塔の役割を果たす装置で、照射方向や治療機器を動作させるすべての指示を治療データとして治療・照射系に送ってくる。治療実施記録を収集管理して治療効果を判定するのも治療計画装置である。

二次元及び三次元治療データは、重粒子線の種類とエネルギー、照射野の大きさ、到達距離調整値、重粒子線の絞り、ブラッグピークの大きさ、照射線量で構成される。機器設定データは、治療計画装置から照射管理計算機を経由して治療制御計算機に送られ、更に VME 計算機及びシーケンサ (MELSEC) へ転送され、照射機器制御が行われる。図 1 に計算機の接続関係を示す。

照射管理計算機は、治療計画装置とのデータ授受のほかに、治療室 3 室と生物実験室及び四つの実験ビームラインの照射スケジュールを管理し、照射野拡大に使用されるワブラーシステムの運用、加速器制御系とインタロック信号や制御データの授受を行っている。ワブラーシステム以外の機器制御データは、治療室ごとに整理され、各治療室の治療制御計算機に送られる。治療制御計算機は、機器データを VME 計算機及びシーケンサに照射線量を線量モニタに送る。治療制御計算機は、設定された機器が治療計画装置で決めら

れたデータと一致しているか照合を行う。VME 計算機及びシーケンサは、照射機器の設定制御を行う。線量モニタは、設定された線量が照射されたときに、重粒子線の照射を停止させる信号を加速器制御系に送るとともに、実際に照射された線量を正確に計測する。

治療終了後には機器の動作記録と照射線量を VME 計算機・シーケンサ・線量モニタから収集し、照射実施記録を作成して照射管理計算機経由治療計画装置に送る。三次元治療の場合、VME 計算機及びシーケンサは、重粒子線照射中に設定値を変更する機器のログをとっており、治療計画装置どおりの照射が実行できたか確認できる。

3. 照射機器配置

照射機器は、上流側から下記のように順次設置している。治療室の外にはワブラー電磁石、プロファイルモニタ (I)、散乱体装置、F コリメータ、F シャッタ装置、中性子シャッタ装置が配置されている。治療室内にはリングコリメータ装置、正線量モニタ、リッジフィルタ装置、標準レンジシフト

注 HIMAC：科学技術庁放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置

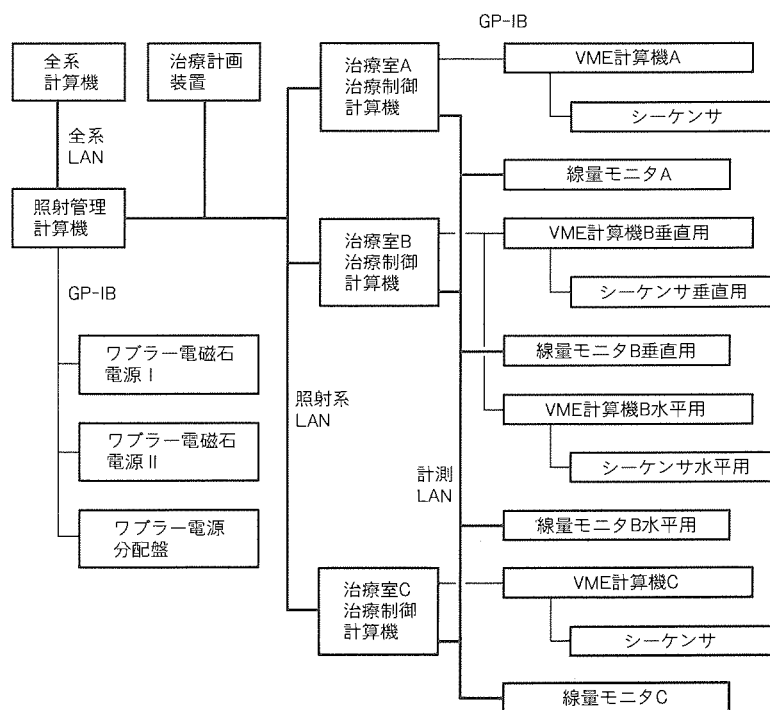


図 1. 計算機接続

装置、高速レンジシフト装置（治療室 B の水平のみ）、副線量・平坦度モニタ、プロファイルモニタ（II）、4 枚羽根コリメータ装置、多葉コリメータ装置、補償フィルタ、患者コリメータが配置されている。

照射機器の電源及び制御装置のうち、ワブラー電磁石電源とワブラー電源分配盤とが中地下 2 階のワブラー電源室に、VME 計算機及びシーケンサが同じく中地下 2 階の照射系機械室に設置されている。

照射機器以外に治療室には、室内操作卓、治療台、治療部位を指示するレーザポインタ及びライトローカライザ、位置決め用 X 線 TV 装置、照合用 X 線 CT 装置、患者監視用の ITV 装置が設置されている。線量モニタ校正のために、温度計及び気圧計が線量モニタ付近に設置されている。

照射管理計算機は、治療室が見渡せる地下 2 階の治療制御室に、治療制御計算機は各々の治療室出入口の治療ホールに、位置決め計算用に位置決め計算機を治療室内の迷路途中に設置している。患者の来所管理用に磁気カードリーダを治療受付及び待合室に設置している。

治療・照射系の機器は、計算機同士は LAN（イーサネット）で、計算機とワブラー電磁石電源、ワブラー電源分配盤、VME 計算機、温度計、気圧計は GP-IB で、磁気カードリーダは RS-232C で接続されている。VME 計算機は X 線 TV 画像及び ITV 画像処理にも利用されている。治療室 A の機器接続を図 2 に示す。

4. 機器詳細性能

4.1 照射野拡大ビーム平坦化装置

重粒子線は、細いビームに絞られ治療室まで運ばれてくるので、患部に合わせて平坦性を保って重粒子線を拡大する装置がワブラーシステムと散乱体装置である。

(1) ワブラーシステム

ワブラーシステムは、重粒子線を進行方向を軸に回転させ、照射領域を広げる。ワブラー電磁石電源は、全治療室のワブ

ラー電磁石に通電できるように、ワブラー電源分配盤を経由して供給先を切り換える。三次元治療では、重粒子線の飛程（以下“レンジ”という）変更のためにレンジシフトをビーム軸に入れるので、重粒子線の散乱条件が変化し、照射野内の平坦度が変化するので重粒子線回転半径を変更する必要がある。ワブラーシステムの性能を表 1 に示す。

(2) 散乱体装置

重粒子線の回転だけでは照射野の所要平坦性は得られないので、散乱効果を利用して重粒子線のガウス分布の半値半幅 σ を大きくするために散乱体を通過させる必要がある。散乱体装置は、バイナリ型の 8 種類の平板状散乱体から構成され組合せを変えることで段階的に散乱厚さが変更でき、各々独立に AC 誘導モータでビーム軸に直線状に出し入れできる。散乱体装置の性能を表 2 に、外形形状を図 3 に示す。

4.2 レンジシフト装置

レンジシフト装置は、重粒子線のエネルギーを吸収し、レンジを変化（シフト）させる。レンジシフト装置には、二次元治療用の標準レンジシフト装置と、三次元治療用の高速レンジシフト装置とがある。

(1) 標準レンジシフト装置

標準レンジシフト装置は、厚さの異なるバイナリ型の 9 種類の平板状レンジシフトから構成され、組合せを変えることで段階的にレンジが変更でき、各々独立に AC 誘導モータでビーム軸に直線状に出し入れできる。照射前にあらかじめ治療計画装置で決められたレンジ厚が設定される。標準レンジシフト装置の外形形状を図 4 に示す。

(2) 高速レンジシフト装置

表 1. ワブラーシステムの性能

ワブラー電磁石	
ギャップ長	110 mm
巻 数	20 ターン
定格電流	707A _{rms}
定格磁場	0.2T
定格周波数	60 Hz
最大偏向角	1.0°
冷却水流量	30 ℓ/s
ワブラー電磁石電源	
最大電磁石電流	850A _{rms}
定格周波数	57 Hz
定格出力電圧	400V _{rms}
出力方式	並列共振方式

表 2. 散乱体装置の性能

有効直径	130 mm
厚さ・材質	0.1/0.2/0.4/0.8 mm タンタル 1.6/3.2/6.4/12.8 mm 鉛
質 量	40 kg
消費電力	200W

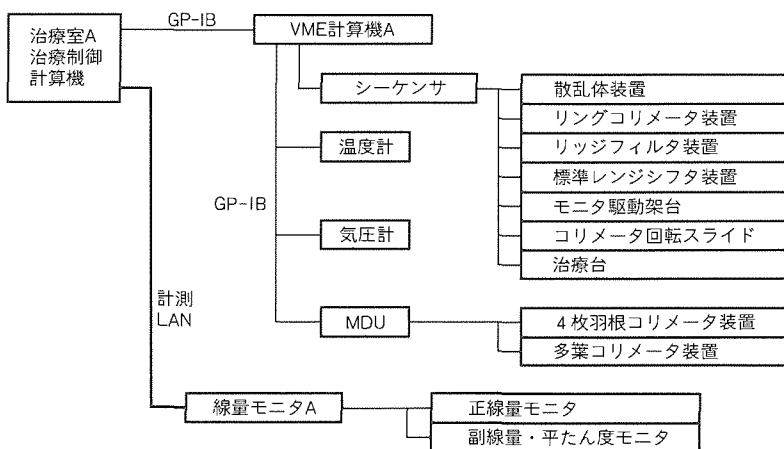


図 2. 治療室A機器接続

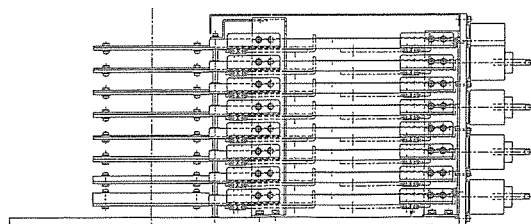


図 3. 散乱体装置

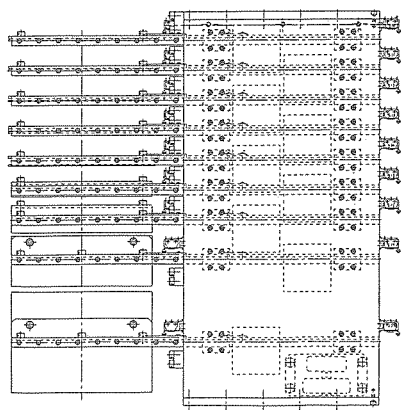


図 4. 標準レンジシフト装置

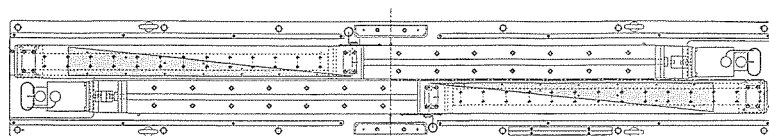


図 5. 高速レンジシフト装置

高速レンジシフト装置は、くさび(楔)形断面の2枚のレンジシフトから構成され、重ね合せ量を変えることで連続的にレンジが変更でき、2枚同時にACサーボモータで高速でビーム軸に直線状に出し入れできる。三次元治療では、照射部位に対してレンジシフト厚を設定変更しなければならないのでデータ転送による時間のロスが発生しないように、すべてのレンジシフト設定厚データをあらかじめシーケンサに送っている。レンジシフトの移動を速やかに行うために、線量モニタからのトリガ信号を直接シーケンサに入力して、次の設定厚に駆動制御している。治療を中断したときにも、継続して治療が行えるようレンジシフトの移動記録をとっている。高速レンジシフト装置の外形状を図5に示す。

4.3 絞り装置

治療に使用しない周辺の重粒子線をカットし、コリメートする装置が絞り装置であり、患部の形状に合わせて重粒子線の照射野を整形するもので、リングコリメータ装置、4枚羽根コリメータ装置、多葉コリメータ装置から構成される。

(1) リングコリメータ装置

リングコリメータ装置は、治療に使用しない外縁の重粒子線を治療室上流でカットするための装置である。アルミ製の遮へい(蔽)基材に黄銅製の3種類のドーナツ状のビーム通

表 3. リングコリメータ装置の性能

有効通過径	50/100/160 mm
厚さ	100 mm
材質	黄銅
取付台厚さ	200 mm
取付台材質	アルミ合金
質量	290 kg
消費電力	500W

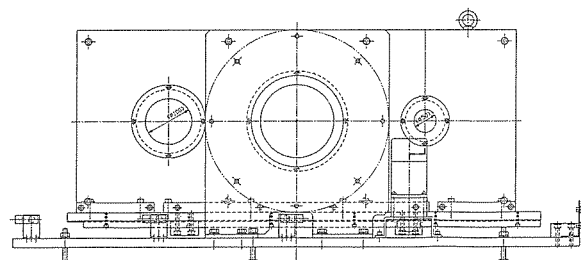


図 6. リングコリメータ装置

表 4. 4枚羽根コリメータ装置の性能

有効照射野	220 mm×220 mm
羽根厚さ	200 mm
全閉時遮蔽領域	φ500 mm
羽根材質	アルミ合金
羽根駆動速度	15 mm/s
コリメータ回転速度	0.5 r/min
質量	600 kg
消費電力	500W

過孔の絞りを設けてあり、照射野に合わせて大中小を選択しビーム軸にAC誘導モータによって直線状に出し入れする。リングコリメータ装置の性能を表3に、外形形状を図6に示す。

(2) 4枚羽根コリメータ装置

4枚羽根コリメータ装置は、多葉コリメータ装置の遮蔽体の放射化を防止する装置であり、X軸Y軸2組4枚のアルミブロックの羽根から構成され、各羽根独立にステッピングモータでビーム軸に直線状に出し入れできる。羽根の位置は、ロータリエンコーダでモニタされており、任意位置に停止できる。多葉コリメータ装置と一体でビーム軸回りの回転とビーム軸に沿ってのスライドとが可能である。回転スライドともステッピングモータで駆動され、ロータリエンコーダでモニタされており、任意位置に停止できる。4枚羽根コリメータ装置の駆動・制御は多葉コリメータドライブユニット(MDU)で行う。4枚羽根コリメータ装置の性能を表4に、外形形状を図7に示す。

(3) 多葉コリメータ装置

重粒子線の照射形状を患部の外形に合わせる多葉コリメータ装置は、二次元及び三次元治療いずれにも使用されるが、対向した46枚の遮蔽体(リーフと呼ばれる。)で構成され、

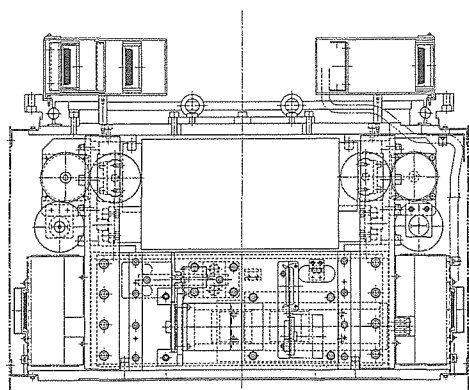


図 7. 4 枚羽根コリメータ装置

表 5. 多葉コリメータ装置の性能

有効照射野	φ220 mm
リーフ遮蔽領域	150 mm×220 mm
リーフ移動範囲	-55~110 mm
リーフ配列ピッチ	6.5 mm
リーフ枚数	23×2 枚
リーフ移動速度	80 mm/s
リーフ停止精度	±0.5 mm
リーフ材質	鉄
リーフ遮蔽厚さ	70 mm
リーフ厚さ	140 mm
リーフ断面構造	2 段階付き構造
リーフ間すきま	0.25 mm以下
質 量	350 kg
消 費 電 力	1,000W

各リーフは独立にステッピングモータでビーム軸に直線状に出し入れできる。各リーフはロータリエンコーダでモニタされ、任意位置に停止できる。重粒子線を患部に合わせて最終的に絞り、照射野のきれを良くするためにはリーフが患部に近い方がよいので、多葉コリメータ装置は前述した 4 枚羽根コリメータ装置とともに回転スライドできる。

多葉コリメータ装置の駆動・制御は MDU で行い、照射部位に対してリーフ位置を設定変更しなければならないのでデータ転送による時間のロスが発生しないように、46 枚すべてのリーフ設定データを送る。MDU の CPU は、各リーフのモータドライバであるリーフドライブコントローラ (LDC) に各々のリーフ設定位置データを送る。LDC は、1 個で対向リーフ 2 枚の制御を行い、リーフの現在位置をモニタしながらモータを駆動するので、対向するリーフが衝突するデータのときには、衝突しない位置で停止させることができる。

三次元治療では、照射野変更のたびに高速でリーフを設定しなければならず、設定予定の全リーフデータをあらかじめ送っており、線量モニタからのトリガ信号を直接 LDC に入力して駆動制御している。リーフ設定に万が一にもエラーが

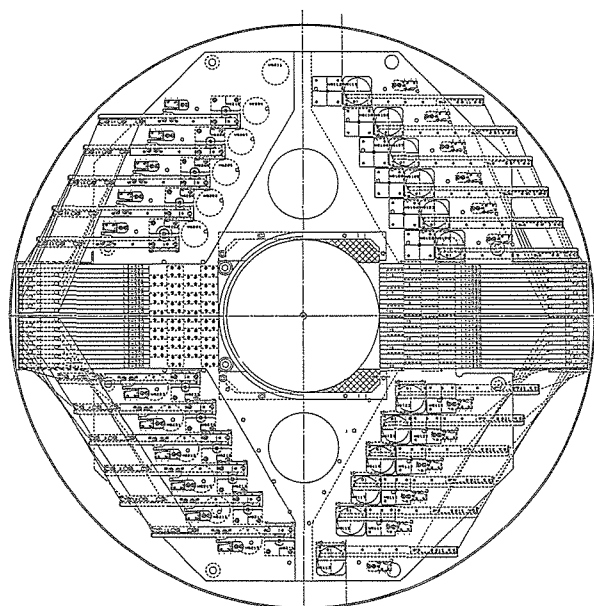


図 8. 多葉コリメータ装置

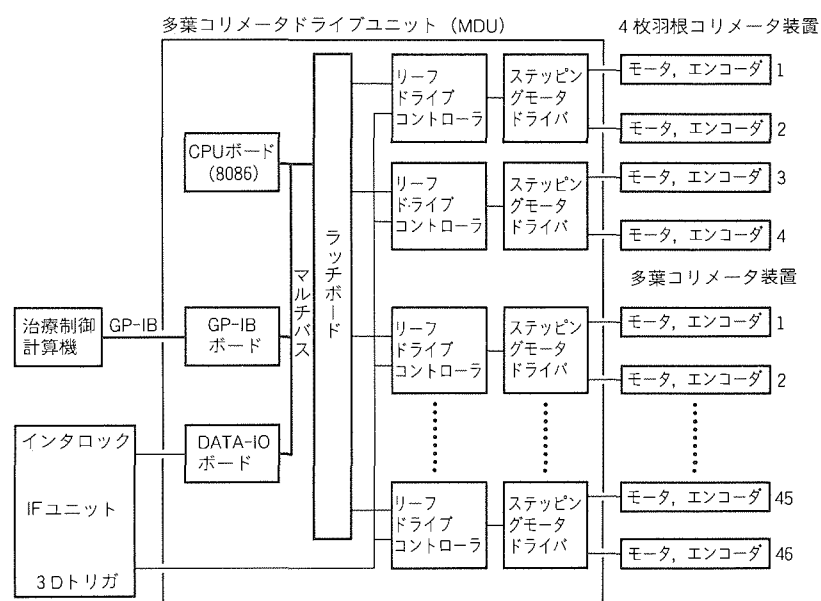


図 9. 多葉コリメータ装置の制御回路ブロック図

発生したときには、ビームを切るインタロック回路に直接信号を送って患者を保護する。治療を中断したときにも、継続して治療が行えるよう LDC でリーフ移動記録をとっている。多葉コリメータ装置の性能を表 5 に、外形形状を図 8 に、制御回路ブロック図を図 9 に示す。

4.4 リッジフィルタ装置

リッジフィルタ装置は、ブラッグピークを患部に合わせて重粒子線進行方向に広げるための装置で、8 個のリッジフィルタホルダを搭載したロータリテーブルを、AC 誘導モータでエンドレスに回転駆動してビーム軸に任意ホルダを停止させることができる。ホルダはロータリテーブルから容易に交換できるように抜き差し可能である。

ホルダに取り付けられるリッジフィルタは、重粒子線の一

表6. リッジフィルタ装置の性能

ホルダ装着数	8
有効照射領域	180 mm×180 mm
材 質	アルミ合金
回 転 速 度	3 r/min
質 量	140 kg
消 費 電 力	100W

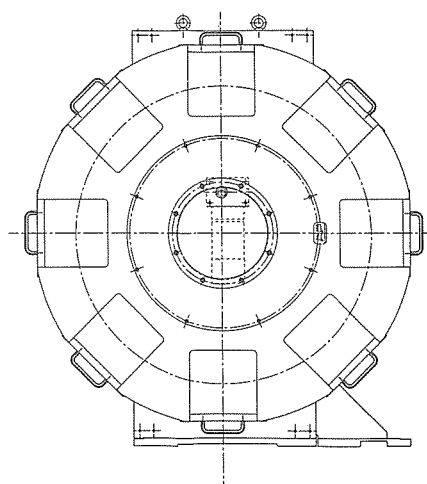


図10. リッジフィルタ装置

部のエネルギーを吸収することでエネルギーに幅を持たせ、幅の狭いブラッグピークを患部の大きさに広げ、重粒子線進行方向の線量分布を平たんにする。リッジフィルタは、概略三角形断面のアルミ合金製三角柱で1個のホルダに36本装着されている。ワイヤカットの放電加工機を用い超精密加工でリッジフィルタは製作された。リッジフィルタ装置の性能を表6に、外形形状を図10に、ホルダ装着時のリッジフィルタ外形形状を図11に示す。

4.5 線量モニタ装置

照射線量監視装置である線量モニタには、正副モニタ方式を採用しており、正モニタが異常になった場合にも副モニタによって過大線量が照射されない構成となっている。正・副線量モニタは同じ構造の電離箱方式で、重粒子線通過によって高電圧を印荷した空間に発生するイオン電流値を周波数に変換し、カウンタで計測して放射線量に変換する。治療制御計算機は、治療計画装置から送られてきた照射線量を線量モニタのカウンタの値に変換し、線量モニタに設定する。治療開始とともに照射線量をカウントし、設定されたカウント値になると照射停止信号を発信し、重粒子線が治療室に導入されないようインタロックを働かせるとともに、患部に照射された線量を正確に計測する。副線量モニタには照射される重粒子線の平たん度を計測する平たん度モニタが併設されており、照射中の重粒子線平たん度を常時監視している。

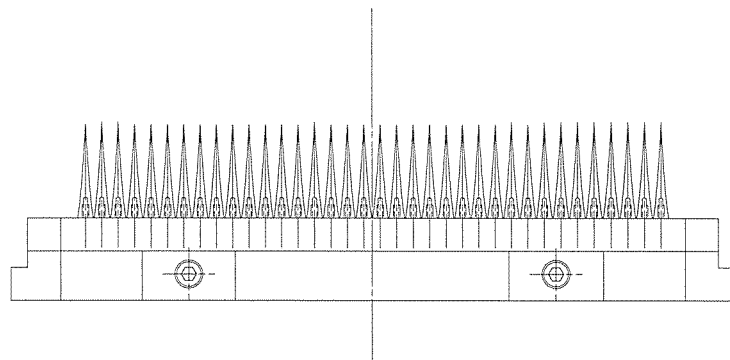


表7. 線量モニタ装置の性能

正・副線量モニタ	
有効電極径	150 mm
電極間げき(隙)	10 mm
電 極 材 質	アルミはく(箔)
電 極 数	1
印 可 電 圧	2,000V
入 射 窓 径	220 mm
平たん度モニタ	
有効電極径	150 mm
電 極 間 隙	20 mm
電 極 材 質	アルミ箔
電 極 数	25
印 可 電 圧	2,000V
入 射 窓 径	220 mm

三次元治療では、個別の治療部位(スライスという。)に対する照射線量相当のカウント値をすべて前もって持っておき、各々のスライスへ規程の線量が照射されると線量モニタは次のスライスのカウント値を設定し、順次患部全体が照射できるようにする。あるスライスが照射されると次のスライスが照射できるよう線量モニタからワブラー電磁石電源、高速レンジシフト装置、多葉コリメータ装置に設定変更のトリガを送る。線量モニタの性能を表7に示す。

5. む す び

放射線治療は、生活の質(Quality of Life: QOL)の変化が少なく、がん治療等に広く利用されるようになってきている。患部に放射線を集中照射できる可能性の高い重粒子線は、体内深部がん治療のエースとして大いに期待されている。

世界唯一の医療専用重粒子線治療施設である HIMAC により、がんの撲滅に向けての着実な一歩が今踏み出されたところである。特に三次元治療は、より高精度の治療を実現する方法であり、今後とも治療計画装置、治療・照射機器、線量計測システムが一体となって研究開発が進められていき、実用化が図られることになる。

HIMAC用重粒子線照射位置決め装置

東 誠一* 遠藤真広***
 隈 昭一郎* 養原伸一***
 野村和章**

1. ま え が き

重粒子線は、ブラッグピークの位置で線量を集中的に付与するので、患部が正確に重粒子線の飛程（レンジ）に相当する位置になれば治療が実施できない。患部（ターゲット）の位置と大きさが決められ、周囲臓器の位置によって治療に使用する重粒子線の種類と入射方向とが決定されることになる。治療方法が決定されると、治療計画装置で体表面から患部の最深部までのレンジ等の治療データが計算される。

治療計画したときと同じ位置にターゲットを設定することを位置決めと呼び、ターゲットの中心を治療中心（アイソセンタ）に設定するのみならず、患者全体の体位及び周囲臓器の位置まで合わせる必要がある。治療計画どおりにターゲットが位置決めされ、患部の形状やレンジが計画値どおりであるかの照合も必要になる。高精度の位置決めを可能とする方法及び装置の仕様、並びに位置決め操作について報告する。

2. 位置決め装置

位置決め装置は、計算機システム、治療台、画像撮影装置等から構成されており、治療計画装置で治療の詳細データが決定されたとおりに患部を重粒子線の治療中心に設定するた

めの装置である。位置決めに必要な機器の接続関係を図1に示す。

患者の体位を再現する方式として、患者体内の特異点（ランドマーク）を参照点として用い、治療計画作成時と同じ位置に再現する体内ランドマーク法が採用されている。体内のランドマークを検出する装置として X 線 TV 装置を利用する。位置決めを迅速に実施するため、X 線 TV 像はフィルムではなく VME 計算機でデジタル化され、計算機処理される。

治療計画装置で治療データを決定したときの患者の体位を再現するために、患者の体位が把握できる基準点を患者の体内に設ける。この基準点はランドマークと呼ばれ、治療室で画像を撮影したときに容易に判定できる患者体内の骨の部分を選んだり、必要があれば体内に金属を埋め込んで設けることもある。治療計画装置からは画像の中心を原点としたランドマークの座標をもらう。

位置決めの手順を図2に示すが、概略は以下のとおりである。患者を治療室に誘導し、位置決め及び治療中に動かないよう治療計画のときに使用した患者固定具で固定して治療台に乗せる。固定具表面に付けられた印を参考にして、治療室の壁面等に取り付けられたレーザポイントで粗設定を行い、

注 HIMAC：科学技術庁放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置

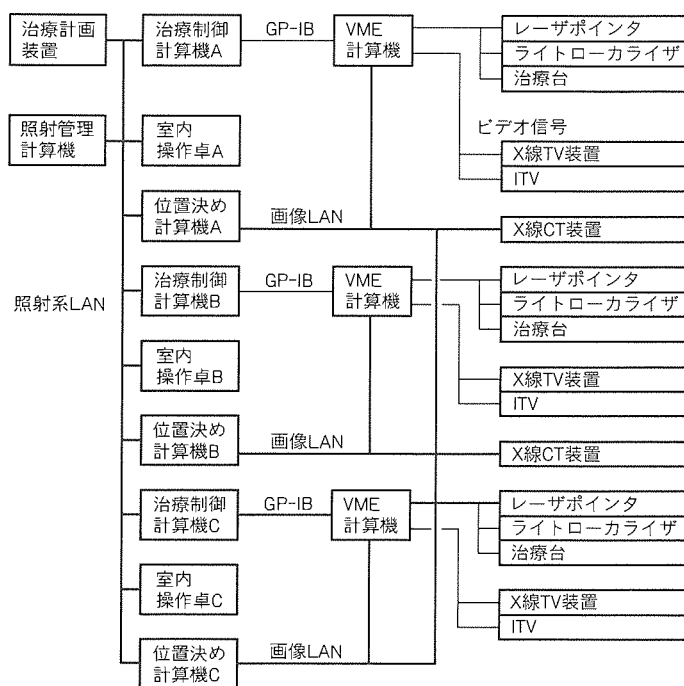


図1. 位置決め機器接続

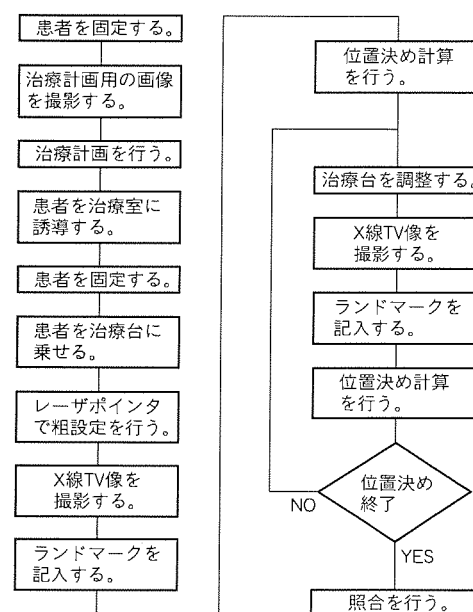


図2. 位置決めの流れ

精密設定のために X 線 TV 装置でランドマークがどの位置にあるか調べる。X 線 TV 画像は、胸部の X 線像と同じで撮影方向からの投影像になっているので撮影方向の深さ情報が得られない。深さ方向の情報を得るためには別方向から撮影した画像が必要になる。これは、三次元の物体を二次元の図面に表現するとき正面図・立面図・側面図のいずれか最低 2 枚の図面が必要なと同じ原理であり、異なった 2 方向から撮影すればよい。

得られた 2 枚の X 線 TV 画像から治療計画装置で決められたランドマークを探し出し、治療位置での座標を計算する。入力されたランドマーク座標が治療計画されたランドマーク座標と一致する治療台の移動条件を計算する。この移動条件に従って治療台を操作し、再度 X 線 TV 装置で画像を撮影する。再撮影された画像にランドマークを入力し、座標を計算する。ランドマークの座標があらかじめ規定された誤差範囲内にあれば位置決めは終了するが、誤差範囲外であれば誤差範囲内になるまで同じ操作を繰り返す。

患者の治療体位が決まると、患部が治療計画されたときと同じであるか照合する必要がある。患部の外形を位置決め画像に上書きし、治療計画どおりの位置にあるかどうか、アイソセンタまでのレンジが治療データと一致しているかを確認する。さらに、レーザライトローカライザで重粒子線と等価な光を照射して、照射野が一致していることとビームライン上に障害物がないことを確認する。レーザライトローカライザは、レーザポイントの機能と光照射野を形成するライトローカライザの機能とを兼ね備えており、レーザ光をレンズを用い光が治療ビームを模擬できるように拡大している。照合結果が良ければ治療に移ることができる。

照合終了後に患者の様子を ITV で撮影し、体位参照画像として VME 計算機に取り込んで位置決め計算機に送り、次回治療時の位置決めを円滑に実施するための参考にする。治療台の設定パラメータ、X 線 TV 画像、体位参照画像、ランドマーク座標等の全データは位置決め計算機から治療制御計算機を経由して治療計画装置に送られ、照射記録として残すとともに次回の位置決めの参考データとする。

3. 位置決め機器

位置決めを使用される機器の性能及び動作方法は、以下のとおりである。

3.1 治療台

治療台は、患者を乗せ患部を治療中心に設定するための装置である。治療室 A、治療室 B に設置される X 線 CT 兼用治療台と治療室 C に設置される座位・が(臥)位兼用治療台の 2 種類あるが同じ性能である。治療室 C の患者を乗せる座位用天板と臥位用天板とは交換可能になっている。重粒子線照射方向が固定であるので、入射方向に対して患部を治療計画と同じ状態に設定するためには、患者の体位を合わせる

必要があり、治療台は並進 3 軸と回転 3 軸の高い自由度を持つ。さらに、治療台に患者を乗せたままで、X 線 CT 装置で撮影できるように治療台全体がスライドできることが考慮された。

治療台は、ローテーション(全体回転)、ホリゾンタル(全体水平移動)を行うターンテーブル上に搭載され、ロング(天板長手方向)、ラテラル(天板短手方向)、パーティカル(上下動)、ピッチング、ローリングの合計 7 軸の移動機能を持つ。ホリゾンタルが手動である以外はすべて AC・DC サーボモータ、ステッピングモータによって駆動され、ロータリエンコーダで位置モニタされている。治療台の電動 6 軸の駆動はシーケンサ(メルセック)で制御され、室内操作卓に取り付けられたペンダントによって操作される。操作モードには、各軸の現在値を見ながら所定の位置へと移動させるマニュアルモードと、プリセットされた位置へと移動させる自動モードとがあり、いずれのモードもデッドマン型の操作で、駆動スイッチを押しているときのみ移動できる。治療台の現在位置は、治療室座標系に対する絶対位置と設定したい位置と現在値との差を選択して表示することができる。

移動速度は高速と低速とがあり、一定時間駆動スイッチを押していると自動的に低速から高速へと速度が切り換わる。自動モードのときは設定位置手前に来ると自動的に、マニュアルモードのときはスイッチを離したときに高速から低速へと切り換わり停止する。治療中に治療台の設定値が変化しないように、各軸にはブレーキを掛ける。治療台全体回転でターンテーブルを駆動する機構はピット内部に収容されている。治療台の性能を表 1 に、外形形状を図 3 に示す。

3.2 X線TV装置

表 1. 治療台の性能

項 目	性 能
ターンテーブル直径	3,450 mm
天 板 全 長	2,000 mm
天板非金属部長さ	960 mm
天板非金属材料	CFRP
天 板 幅	500 mm
ロング移動範囲	750 mm
ロング最高速度	50 mm/s
ラテラル移動範囲	±150 mm
ラテラル最高速度	20 mm/s
ピッチング移動範囲	±10°
ピッチング最高速度	1°/s
ローリング移動範囲	±10°
ローリング最高速度	1°/s
パーティカル床上移動範囲	750~1,250 mm
パーティカル最高速度	30 mm/s
ローテーション移動範囲	240°
ローテーション最高速度	2 r/min
ホリゾンタル移動範囲	2,230 mm
ホリゾンタル最高速度	手動

X線TV装置は、ターゲットの位置を確定するためのランドマークを三次元的に画像化するための装置である。X線管とX線検出器であるイメージンテンシファイア管(II管)及び高電圧発生装置、画像をビデオ信号にする制御装置から構成されている。患者に対してX線管と反対側の位置にあるII管でX線が検出され、制御装置でビデオ信号に変換される。X線TV装置の主な仕様を表2に示す。

ランドマークが広い領域に設定できるように、II管の口径は極力大きいものを選定している。X線は一点から照射されるので、撮影されるX線像は不均一に拡大されることから、X線管の焦点とII管との距離を大きくとって拡大率を下げるように設置位置を設計した。X線管の焦点から放出されるX線主線すい(錐)がII管中心を通るように設置され、この主線錐が重粒子線照射軸に一致するようアライメントされる。

三次元の位置を確定するためには少なくとも直交2方向からの撮影が必要で、1台は重粒子線のビームライン上に設置する。残りの1台は、X線の主線錐が治療の中心位置であるアイソセンタで交差するよう治療室に応じて設置場所が決められている。特に治療室Cでは、通常の臥位の治療体位のほかに座位の治療体位もとれるので、いずれの場合でもX線像が撮影できるように、3台のX線TV装置がアイソセンタを原点とする直交3軸を形成するように設置されている。X線管を同時ばく(曝)射しないようにインタロックを設け、X線TV装置用の高電圧電源の容量を下げる工夫をしている。各治療室ごとのX線TV装置の台数及び設置状

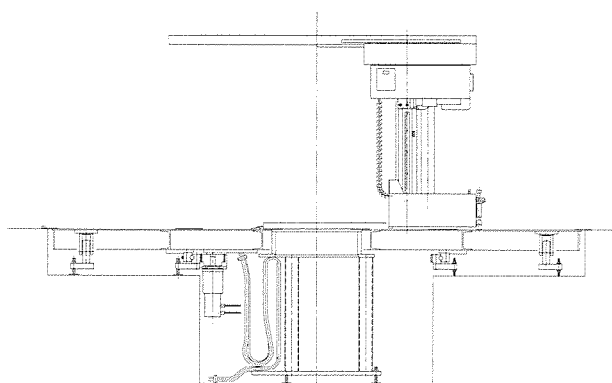


図3. 治療台

表2. X線TV装置

項 目	性 能
X線管電圧	150 kV (短時間)
	125 kV (長時間)
実効焦点寸法	0.3/0.8 mm
焦点アイソセンタ間距離	2,550 mm
II管アイソセンタ間距離	500 mm
II管視野	14インチ
X線TV表示サイズ	φ210 mm
X線TV表示真円度	4 mm以下

況を表3に、治療室BでのX線TV装置設定の状況を図4に示す。

患者を治療台に乗せ、粗設定した状態で撮影されたX線像は、X線TV装置からVME計算機にビデオ信号で送られる。ビデオ信号は、VME計算機で8ビットのデジタル信号に変換され、LANで位置決め計算機に送られる。

ビームライン上のX線管は、重粒子線照射の邪魔になるので治療時は退避させるために電動保持器に取り付けられている。この保持器にはレーザーライトローカライザも取り付けられており、X線管位置、ローカライザ位置、治療位置の3か所が選択可能で、位置決め計算機又は室内操作卓から設定できる。水平方向のX線を検出するII管は、位置決め以外では邪魔になるので電動保持器で設定退避でき、治療台下

表3. X線TV設置状況

場 所	台 数	方 向
治療室A	2 台	垂直ビームラインビーム方向
		治療台天板短手方向
治療室B	2 台	垂直ビームラインビーム方向
		水平ビームラインビーム方向
治療室C	3 台	水平ビームラインビーム方向
		鉛直方向
		水平ビームラインと同一水平面上で直交3軸を作る方向

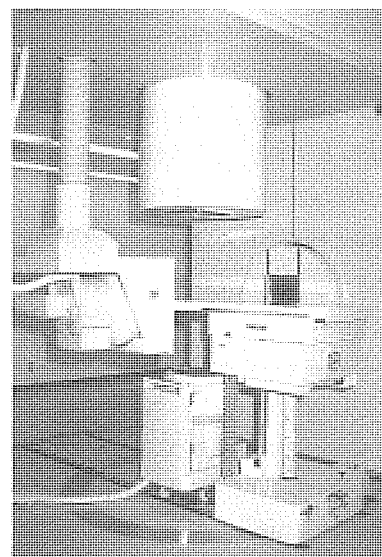


図4. X線TV装置

表4. 保持器性能

項 目	性 能
移動ストローク	1,585 mm (垂直方向X線管用)
	670 mm (水平方向X線管用)
	930 mm (水平方向II管用)
移 動 速 度	30 mm/s (X線管用)
	60 mm/s (II管用)
停止位置精度	±0.5 mm以下

に設置する II 管は手動で設定退避する。電動保持器の主な仕様を表 4 に示す。

3.3 計算機システム

X 線 TV 画像を使用して患者位置決めを行うので、位置決め計算機は画像全体を高速で扱える性能が必要となる。処理速度の速い CPU で、主メモリが大きく大容量の磁気ディスクが搭載できるワークステーションを選定した。位置決め計算機は図 1 に示すように、治療制御計算機、VME 計算機、X 線 CT 装置と 2 系統の LAN で接続されている。

画像 LAN は、位置決め及び照合のための画像を授受するためのもので、X 線 TV 装置から画像撮影のたびに、X 線 CT 装置から撮影した全画像データが一度に位置決め計算機に送られてくる。いずれの画像も 1 枚当たりの画素は 512×512 で、階調は X 線 TV 画像が 8 ビットで X 線 CT 画像が 16 ビットであることから、位置決めで発生する画像データ転送量は一人当たり 20 M バイト以上にもなる。さらに、位置決めで参照される画像が同じ量だけ転送される上、3 治療室で非同期に画像が撮影され転送されるので位置決め画像転送専用の画像 LAN を設けた。この画像 LAN は、治療室相互にデータ利用の便を図るためにすべてが結合されている。

照射系 LAN は、治療計画装置から位置決め参照画像を含んだ治療データが送られてくるとともに、治療のための制御情報や加速器運転情報が交信され、治療終了後の位置決め結果及び画像が位置決め計算機から治療計画装置へ送り返されるのに使用される。

患者が治療室へ誘導され治療台に固定され粗設定されると、X 線 TV 装置をセットし、位置決め計算機のタッチパネルに表示されたメニューに従って操作される。治療計画されたときの参照画像と撮影された位置決め画像とを同時に表示し、ランドマークをディジタイザから入力し、位置決め計算を行う。ランドマークの設定誤差を最小にする治療台の操作パラメータが計算され、治療台を制御するシーケンサに送られる。治療台を新しい位置にセットし、再度位置決め計算機のタッチパネルのメニューを操作して X 線 TV 画像を撮影し、位置決め計算を行い、位置決め完了を確認する。

位置決め計算機のシャットダウン操作を簡略にすることと瞬停対策とで自動シャットダウンを取り付けている。自動シャットダウンのキースイッチをオフにすると RS-232 C 経由で位置決め計算機にシャットダウンのコマンドを送り、位置決め計算機は自動的にシャットダウン操作を実行し、電源がオフされる。位置決め計算機の性能を表 5 に、操作卓の写真を図 5 に示す。

4. 位置決め S/W 機能

患者位置決めで使用されるソフトウェア (S/W) の機能を紹介する。

4.1 機器調整モード

位置決めで使用される II 管の特性を調べ、正確な位置決め計算ができるようにパラメータを設定するために使用される。X 線 TV 装置では II 管の特性で糸巻きひずみが発生し、II 管の中心から外側に向かってひずみが大きくなり、正方形の被写体を撮影したときには四隅の部分が互いに外側に引き延ばされた糸巻き形状になる。このようなひずみがあると、画面の位置で 1 画素当たりの長さが変わり、ランドマークの位置評価ができないので、糸巻きひずみ補正を行う。

II 管の糸巻きひずみ量を測定し、正方形がキチンとした正方形として表示されるよう II 管ごとに補正パラメータを計算する。II 管から VME 計算機経由で画像が送られて来るたびに糸巻きひずみ補正を施し、位置決め画像として表示する。1 画素当たりのサイズについても測定され、規程の寸法になるように併せて調整が実施される。糸巻きひずみ補正パラメータが最適かどうか定期的にチェックされるとともに、II 管を交換したときには再度パラメータを設定し直す。

4.2 ランドマーク法

治療計画された体位を再現するために、治療計画装置で入力されたマークと位置決め画像に入力された対応する点とを一致させるランドマーク法で位置決め計算を実施している。ランドマーク法による位置決めの手順は以下のとおりである。

X 線 TV 像は、扇状に広がる X 線で撮影されているので、表示された位置と実際の座標とは異なっており、入力されたランドマークの実座標を計算することから始まる。2 枚の

表 5. 位置決め計算機

装 置	性 能
C P U	46MIPS
C R T	19インチ
主 メ モ リ	32Mバイト
磁気ディスク	420Mバイト
入 力 装 置	タッチパネル
	A3ディジタイザ
インタフェース	LAN 2ポート
	RS-232C



図 5. 位置決め操作卓

X線TV画像で同じランドマークの画面座標を用い、アイソセンタを基準とする座標を計算する。入力されたすべてのランドマークを用い、基準となるランドマークとの差が最小となる並進回転マトリックスを計算する。この並進回転マトリックスを治療台駆動系固有の座標変換式を用いて治療台6軸の移動量に変換する。治療台移動量の情報は、位置決め計算機から治療制御計算機・VME計算機経由治療台駆動用シーケンサにまで送られ、室内操作卓のペンダントで周囲の状況を見ながら治療台を移動させる。位置決め計算に使用するランドマークは9点まで入力できる。

4.3 照合機能

患者の体位が治療計画の体位に設定された後、患部の位置を確認する操作を照合という。確認する項目は患部の外形形状、多葉コリメータ装置のリーフ開度である。参照画像と位置決め画像とを同時に表示し、治療計画装置で作成されたデータを参照画像と位置決め画像に上書きしてお互いに矛盾がないか確認する。まず、患部形状を上書きして照合し、次に多葉コリメータ装置のリーフ開度を上書きして患部の外形がリーフ開度の中に含まれるか照合する。

画面上での照合が済むと、多葉コリメータ装置を実際に操作して治療条件と同じリーフ開度を設定し、ライトローライザで光照射野を形成して患者体表面又は固定具表面の投光パターンを照合する。

患部中心までの重粒子線のレンジの照合が必要な場合には、患部がX線CT装置で撮影できるように移動させる。レン

ジの計算には物質の電子密度が必要であるので、X線TV画像では不十分で、X線CT画像を用いる。このとき、治療中心がX線CT装置の撮影中心に一致するように治療台の駆動パラメータを設定する機能を持っている。X線CT装置でレンジを計算するのに必要な画像を撮影し、位置決め計算機でX線CT画像を表示して、重粒子線の入射方向から患部の中心までのレンジを電子線密度を用いて計算し、治療計画されたレンジと同じか照合する。

5. む す び

線量分布がよい重粒子線治療では、正確な患者位置決めと照合とが不可欠な操作であることを述べた。患部への重粒子線の照射時間は、1～2分程度と短時間であるが、位置決めには10分程度はかかるので、重粒子線治療を円滑に進めるためには、位置決め照合の時間短縮が必要となる。患部がせき(脊)髄等の重要臓器付近にある場合には位置決めの精度を上げる必要もでてくる。より多くの人に重粒子線治療の恩恵に浴してもらうためには、位置決め時間を含めた治療時間の短縮が必要である。X線TV装置による位置決めが行われているが、レンジの照合や患部が直接分かるX線CT装置を使用した位置決め照合が時間の短縮と高精度化のために必要となる。X線CT装置による位置決めが開発されていくことにより、重粒子線治療が広く行き渡っていくことを願ってやまない。

HIMAC用全系制御システム

高仲政雄* 松村 寧⁺ 高田栄一⁺⁺
内海雅文** 河野俊之⁺⁺
山下嘉久*** 小川博嗣⁺⁺⁺

1. ま え が き

HIMAC は、がん治療装置の機能分担をする加速器系 3 サブ系（入射器系、主加速器系、HEBT 系）と照射系から構成されている。その制御システム（以下“制御系”という。）としては、サブ系を直接制御するために各サブ系制御系を、加速器系 3 サブ系を一括制御するために全系制御系を、それぞれ配している。あるサブ系から他のサブ系の機器へのアクセスは原則として許されていない。例外として上流側サブ系のビームシャッタの開閉は、全系制御系経由でのアクセスができる。

全系制御系では3サブ系装置一括又はサブ系装置ごとの運転・停止の制御を行い、サブ系下の機器単位の制御は行わない。照射系と全系・加速器3サブ系との関係はできる限り粗結合とするとの設計方針の下、双方間では互いの運転ステータスの伝達と治療照射のビーム供給開始・停止にかかわる通信が主になされている。全体のハードウェアは、図1に示されるような構成である。

加速器系 3 サブ系の制御系は、住友重機械工業(株)、(株)日

注 HIMAC：科学技術庁放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置
HEBT：高エネルギービーム輸送システム

立製作所と(株)東芝、三菱電機(株)によって各々製作されたが、制御卓上の画面表示、操作と卓形状等に関しての統一が加速器3サブ系間でなされている。さらに、プログラムの開発環境も統一がなされている。

ここでの制御系記述は、三菱電機(株)が直接製作担当した全系制御系、HEBT 系制御系と照射系制御系のうち、全系制御系に限る。HEBT 系と照射系制御系については、それぞれこの特集の“HEBT システムの制御システム”⁽¹⁾と“HI MAC 用重粒子治療・照射機器”⁽²⁾で記述されている。

2. 計算機システム

全系制御系の計算機システムは、計算機本体 (MELCOM 70 MX 5700 II, 主記憶容量 32 M バイト), マンマシンデバイスと MT/FDD 等の外部周辺装置, 外部とのインタフェース (I/F) 部から成り立っている。

計算機本体の OS は、UNIX とリアルタイム処理 (OS60) 用 OS から成る。UNIX 側ではソフトウェア開発、ファイル処理が実行され、OS 60 側ではリアルタイム応答が要求される外部との I/O 処理が主になされる。

マンマシンデバイスとしては、オペレータが操作及び監視するための制御卓に組み込まれたタッチパネル付き 20 イン

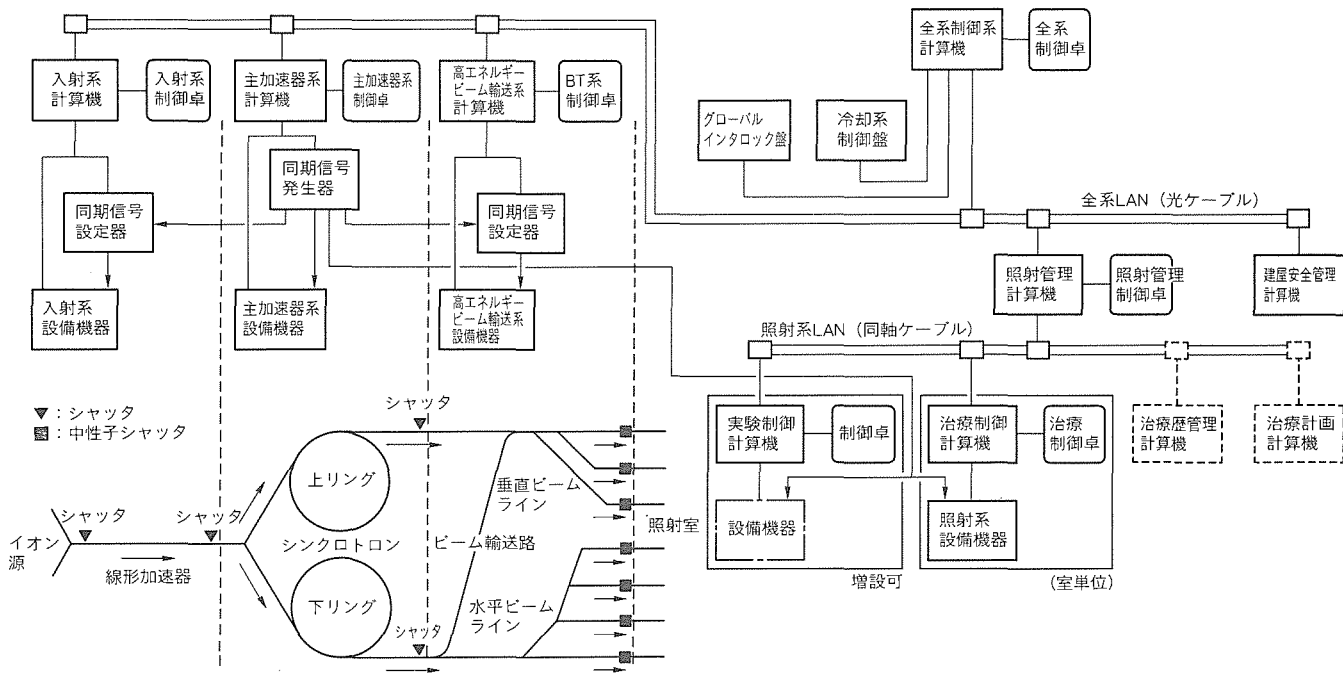


図 1. HIMACの制御システム

チ CRT, タッチパネル付き 14 インチ CRT, 及びプログラマが作業するためのタイムシェアリングシステム (TSS) 端末がある。外部周辺装置としては、固定ディスク (容量 1.4G バイト), バックアップ等に使用する磁気テープ装置, フロッピーディスクドライブ, 20 インチ CRT 画面用のカラーハードコピー装置, ラインプリンタ等がある。

外部 I/F としては、各サブ系との間で情報の授受を行うためのローカルネットワーク (全系 LAN), 各サブ系の特殊ステータスとグローバルインタロック (GI) 信号を入力したり、全系の異常ステータスを GI 盤に伝えるためのプロセス I/O (PIO) がある。

全系制御系計算機システムのハードウェア構成を図 2 に示す。

3. ローカルネットワーク (全系 LAN)

全系制御系と各サブ系制御系は LAN によって接続され、サブ系制御系間同士の伝送は論理的に許されていない。全系制御系とサブ系制御系の双方が、物理的かつ論理的に LAN に接続しているときだけデータ伝送が許される。LAN 接続状態にあるか否かのステータス情報が常時双方間に PIO で取り交わされている。

LAN のアクセス方式は CSMA/CD 方式、プロトコルは TCP/IP, 伝送速度は 10Mbps である。アプリケーション間通信は、SOCKET を用いた通信である。

全系と各サブ系で計算機機種 (MX, VAX, HP) が不ぞろいであることから生じる不都合を克服するために、次の対策が講じられている。

- (1) 伝送データのコードは、ASCII に限る。
- (2) 浮動小数点のデータはキャラクタ形式で伝送する。
- (3) バイト順の違いは、全系制御系でのバイト入替え処理で対応する。

4. 制 御 卓

全系の制御卓は、加速器の各サブ系制御卓と同一規格で製造され、上段に表示用のタッチパネル付き 20 インチ CRT 2 台、下段に操作用のタッチパネル付き 14 インチ CRT 2 台、及びスイッチパネルを盤面に組み込んだものである。

スイッチパネルには、20 インチ CRT 画面のハードコピーの開始ボタン、タッチパネルからの入力受付禁止スイッチ、加速器装置全体を停止させる一斉停止ボタンが組み込まれている。

図 3 は全系と HEBT 系の制御卓の鳥かん (概) 図であり、図 4 は加速器制御室である。

5. 応用ソフトウェア

以下の機能を持った応用ソフトウェアが、全系制御系に特に加速器 3 サブ系装置全体を一括制御するために用意されて

いる。

5.1 状態監視機能

全系制御系で状態監視の対象となるものは、加速器各サブ系で状態監視の対象とされている 4 レベルのうち、原則として上位 2 レベルまでである⁽¹⁾。

- (1) 入射器系, 上リング系, 下リング系, 上リングからのビーム輸送系, 下リングからのビーム輸送系及び冷却系の各系
- (2) 上記系を構成する各グループ

サブ系制御系が全系 LAN へ接続終了したとき、状態変化時等に、これらのステータスがサブ系から全系に伝送される。全系からは、照射系を含む他のサブ系へそれらは転送される。

グローバルインタロックの作動状態、建屋側安全管理系の各扉の開閉状態等については、機器レベルで表示、状態監視が行われる。図 5 のように、グローバルインタロック作動状態が CRT に表示される。

5.2 運転シーケンス機能

全系での制御卓操作によって結果的には、サブ系での制御卓操作から運転シーケンス⁽¹⁾が起動されるなどの同等の制御が各サブ系制御系の支援の下でなされる。

5.3 運転パラメータファイル管理機能

運転条件ごとの全系運転パラメータファイルは、各サブ系制御系で設定すべき運転パラメータファイルで構成される。全系運転パラメータファイルを記録 (SAVE), 読み込み (LOAD), 設定 (SET), 複写, 削除する操作が制御卓で可能である。

この場合、サブ系のファイルは、全系からの指令によって

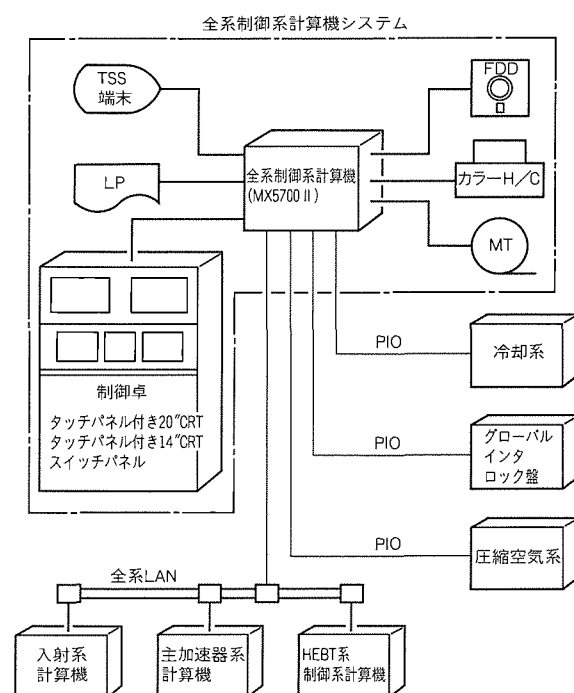


図 2. 全系制御系の計算機システム

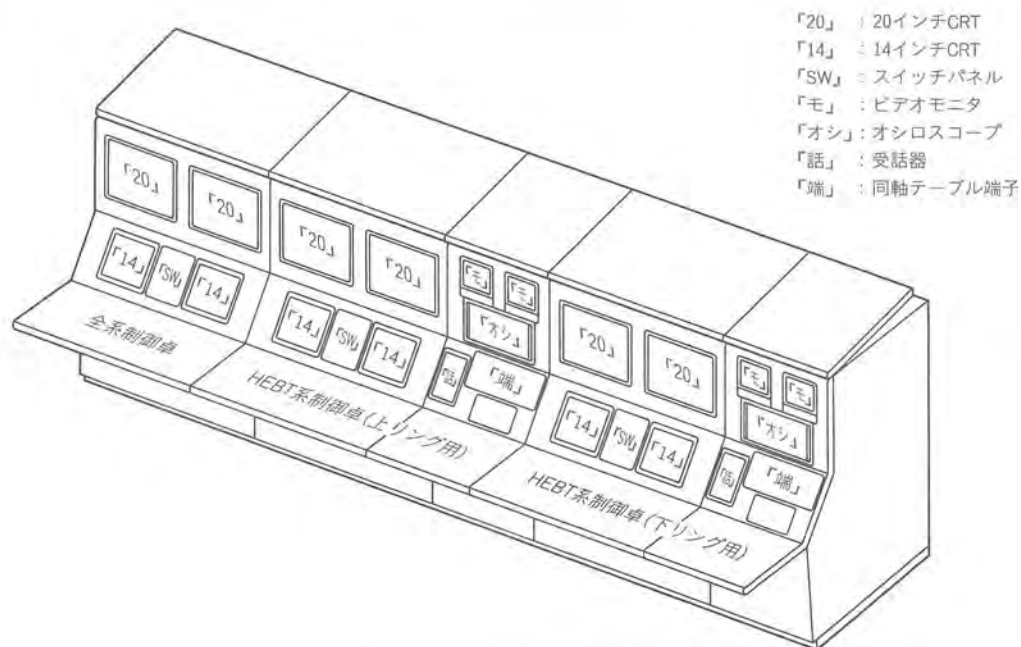


図3. 全系及びHEBT系の制御卓



図4. 加速器制御室

各サブ系制御系で作られる (SAVE) が、サブ系の勝手に削除することは許されていない。

5.4 照射系制御系との関係

照射系でのビーム照射に伴う、ビームシャッタ、中性子シャッタの開閉権利等に関する HEBT 系と照射系間の交信は、すべて全系制御系を介して行われる。下流側サブ系から上流側サブ系機器へのアクセス (ビームシャッタの開閉等) は、必ず全系制御系経由で行われる。したがって、入射器系の単独運転時を除き、全系制御系が立ち上がっていない、又は全系 LAN に接続されていない状態ではイオン源からビームを出すことは許されていない。

6. グローバルインタロック

ここで言うグローバルインタロックとは、この HIMAC 施設においてビームを加速するための、又は照射系にビームを供給するための環境条件や治療照射条件が成立していない場合に、ビームの有無にかかわらず加速器装置の途中でビー

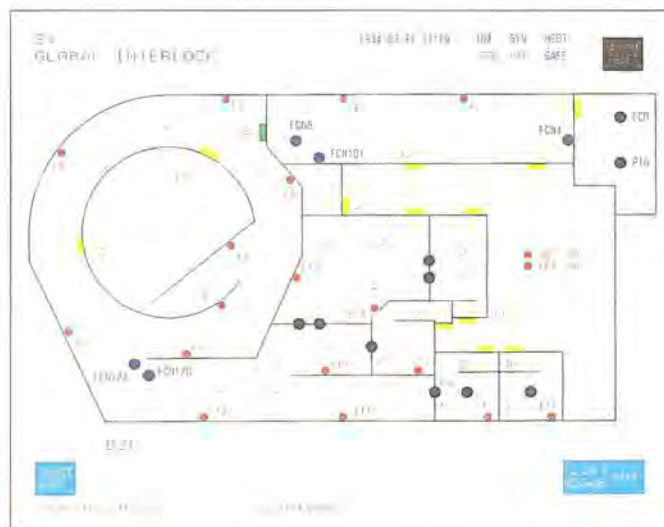


図5. グローバルインタロック表示画面
(ハードコピー出力から)

ムを遮断したり、場合によってはビームの発生までも止める措置を講じるシステムのことである。

このシステムは、条件成否の検出部、何処でビームを遮断するかを決めるロジック部と作動点から構成されている。条件成否の検出先は、施設全体に及んでいるので、このシステムは“グローバル”と名付けられている。

6.1 フェールセーフ

このインタロックの一部に万が一不都合が生じた場合でも、ビーム遮断措置又は発生停止措置が必ず講じられるような安全保証機構 (フェールセーフ) として、以下の方法がこのシステムに採られている。

(1) 検出部

1 か所での条件成否の検出方法として、同一の検出器 (相

当)を2台以上用いる方法,又は別種類の検出器を2台以上用いる方法が採用されている。各機器から成否の信号がロジック部へ送られる。特に,信号線が多い場合は,送出側でのOR集約化後(必要があればロジックを組んだ後)そのOR信号が2本で出力されている。重要な検出信号の場合は,それ自身から同一信号が2本出力されている(信号の二重化)。いずれの場合も,その1本はリレー接点信号,他の1本は光信号であり,各々で信号伝達の確実性と高速性を確保している。

(2) ロジック部

ロジック部としては,電気回路で構成されたものと,その補助として計算機上の演算処理(電気回路と同一ロジックを持つ。)によるものがある(ロジック部の二重化)。計算機への入力信号は,電気回路部の入力信号を分岐したものである。ロジック自身も,入力信号が二重化されている部分では二重化されている。電気回路ではその一方はリレー回路(シーケンサを含む。)相当,他方はTTL相当のロジック回路基板で構成されている。双方のロジック部から作動点への出力はそれぞれ個別信号線経由と全系LAN-サブ系制御系-インタフェース経由でなされる。

(3) 作動点

1か所の作動点として,重要な箇所では別種類のものが2台以上用いられている。そのうちの主作動点が正常に作動しなかった場合は,その直上流側の作動点が作動する,それも作動しなかった場合は更に上流へとさかのぼ(遡)るロジックがロジック部に組まれている。

6.2 環境条件

ビームを供給するための条件が破れる要因として,次のものがある。

- (1) 加速器室,照射室の扉が開けられる,又は室内に人が居る。
- (2) 室内にある停止スイッチが押される。
- (3) 上位計算機,下位計算機,励磁電源等に異常が発生する。
- (4) 照射室のビーム入口の中性子シャッタが不要に開いてい

る。

- (5) グローバルインタロックの信号線が断線している。
- (6) 回路部が非受電状態である。

6.3 治療照射条件

治療照射を行う条件が成り立たなくなる要因として,次のものがある。

- (1) 治療照射が終了する。
- (2) 照射系制御卓上の緊急遮断スイッチ,治療中断スイッチが押される。
- (3) 照射系機器に異常が生じる。

6.4 作動点機能

インタロックの作動点では,ビームを遮断する,又はビーム発生を止める下記の方法が採られている。

- (1) ビーム輸送路上のビームシャッタを閉じる。
- (2) 主加速器のビーム取り出し用機器を停止させる。
- (3) イオン源からビームを出さない。
- (4) 加速器サブ系の全励磁機器を停止させる。

7. む す び

加速器制御系は,設計思想,制御技術及び機能仕様を総合して具体化される。この制御系は,加速器系と治療制御系との間を粗結合にし,互いに独立に運転制御出来る部分を多くするという基本的な考えと,治療装置としての安全面を確実にするという両面を満たすように構築されている。今後,実用に供され,より良い制御系が生れてくることを期待する。

参 考 文 献

- (1) 高仲政雄,桜井正良,松浦潤,小久保光洋,河野俊之,小川博嗣,山田聰: HIMAC用HEBTシステムの制御システム,三菱電機技報,69, No.2, 166~171 (1995)
- (2) 坂本豪信,岸本健,坂元学,金井達明,遠藤真広,蓑原伸一: HIMAC用重粒子線治療・照射機器,三菱電機技報,69, No.2, 178~182 (1995)

表面生成型負水素イオン源

原田 久*
山本雄一**

1. ま え が き

イオン源は重粒子の発生源であり、加速器全体で得られるビーム強度に大きく影響する。このため、イオン源の性能は加速器の構成など基本的なシステム設計の上で重要なパラメータとなる。しかしながら、計算的手法によってイオン源の性能をあらかじめ予測することは困難であり、設計、運転方法に関しては経験への依存度が必然的に高いのが現状である。さらに、従来のイオン源では運転性と保守性が必ずしも産業・医療の利用者にとって満足のいくものではなかった。この点において、科学技術庁放射線医学総合研究所、高エネルギー物理学研究所を始めとする国立研究所を中心に近年着実な進歩が得られている。

当社では、1992年から1993年にかけて、高エネルギー物理学研究所の指導の下に負水素イオン源の開発を行った。開発の主たる目的は、シンクロトロンへの入射器としてイオン源の十分なビーム強度と品質を実証することにある。機種としては、表面生成型負水素イオン源を選定した。理由としては、リナック又はタンデム式静電型加速器との組合せにより、シンクロトロンへの入射器として多目的に利用できることと、イオン源の簡単な改造によって負の重イオンも生成可能なことが挙げられる。

イオン源には様々な種類が存在し、プラズマの生成法、プラズマの閉じ込め方、イオンの荷電化方法などによって分類される。表面生成型負水素イオン源とは、以下のことを特徴とするイオン源である。

- 水素ガス中にアーク放電を起こすことによってプラズマを生成する。
- 永久磁石を使った多極カスプ磁場によってプラズマの閉じ込めを行う。
- 金属表面にセシウムを吹き付け、仕事関数を低下させた状態で負イオンへの変換を行う。

このタイプの表面生成型は、加速器の分野では1980年ごろ、米国のバークレー研究所で採用され⁽¹⁾、ロスアラモス研究所⁽²⁾及び高エネルギー物理学研究所(KEK)⁽³⁾⁽⁴⁾で同時に高性能化が進められた。それぞれの研究所の頭文字からイオン源はBLAKEと命名されている。20年前まではmA級のビーム電流さえ速く及ばなかったが、BLAKEの登場によってセシウムの効果的な利用法が開発され、20 mAを超える電流が実現可能となった。

KEKではBLAKEを原型とした、BLAKE-IからBLAKE-Vまでの方式の異なる五つのタイプのイオン源が開発され、そのなかでBLAKE-Iは、KEKの陽子シンクロトロン施設“PS”において1987年ごろから定常運転を行っており、現在まで安定に負水素ビームを供給している。

今回開発した機種は、BLAKE-Iに基づいて変形したもので、図1にイオン源の概略構成を示す。ここでは新型のものをBLAKE-Mということにし、測定試験の結果について報告する。

2. 負イオンを使う理由

負のイオン源を選定した理由としては、シンクロトロンにおける入射方法が簡略化されることと、既に述べたようにタンデム式静電型加速器との組合せによって様々なイオンビームが作れることにある。

入射に関する利点は、主加速器がシンクロトロンの場合、入射に必要な機器構成と手順が簡略化されることにある。リング内のビームを増やすためには、多回転入射の手法により、リングに何周分かのビームを入射させる。通常、 H^+ の状態が入射した場合、リング内を周回しているビームと入射されるビームの双方を、ほぼ同一軌道に乗せることになる。別方向から来る2本の H^+ ビームをほぼ同一軌道に乗せるためには図2に示すようにセプタム磁石と呼ばれる特殊な機器が必

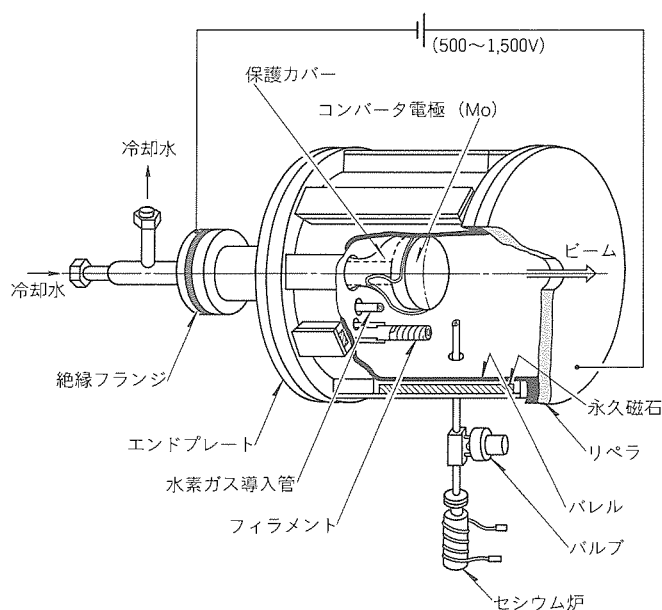


図1. BLAKE-Mの概略構成

要である。このようにセプタム磁石を用いても2本のビームを全くの同一軌道に乗せることは原理的に不可能である。これに対し、 H^- を使用した場合、セプタム磁石のような特別なものは不要となり、しかも周回ビームと入射ビームを同一軌道に乗せることが可能となる。 H^- はシンクロトン入口においてフォイルを通過させることで H^+ へ変換される。

BLAKE イオン源では H^- 以外のイオン種を生成することも可能で、そのためには次の交換を行う。

- コンバータを出力したいイオン種の材質に交換する。
- イオン源内部のガスを水素からキセノンに交換する。

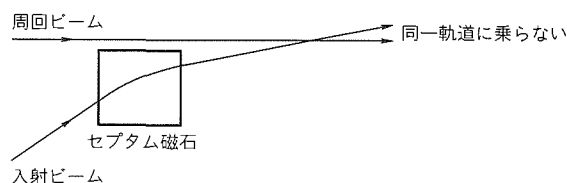
希望する負イオンがエネルギー的に形成可能であれば、以上の変更によって水素より重い負イオンが出力され、ターゲットが比較的スパッタを受けやすい物質の場合、出力ビームは数 mA 以上が得られる。下流のタンデム型静電加速器と組み合わせることで加速されたイオンビームを比較的コンパクトな方式で実現できる。タンデム方式では加速用のマイクロ波は不要となり、したがって異なるイオン種に応じてマイクロ波を同期させる必要がないといった利点がある。このようなタンデム方式によって得られるビームは分析用、又はイオン注入などの産業向けに応用される。

3. BLAKE-Mの特長と目標性能

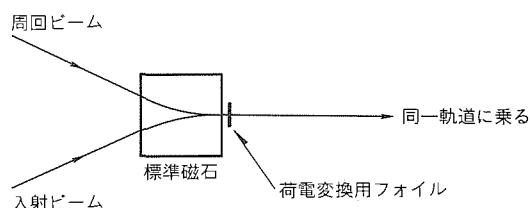
BLAKE-I は図3に示すように、円筒状をしたイオン源の曲面部分からビームを出す構造となっている。これに対し、BLAKE-M では端部の平板部分からビームを出すように改造した。この構造ではフィラメント、コンバータ等の部品がすべて取り外し可能な1枚の端板に取り付けられ、フィラメント等の寿命部品の保守が容易となる。イオン源の下流側の取り合い面も曲面でなく平板となり、据付けが容易となる。

基本形状の変更以外では BLAKE-M の特長は次のとおりである。

- (1) 閉じ込め用磁場の永久磁石として、防せい(錆)性・加



(a) H^+ 入射の場合



(b) H^- 入射の場合

図2. H^+ 入射と H^- 入射の比較

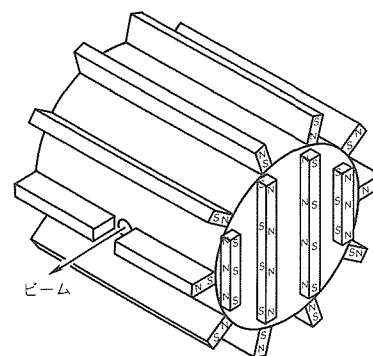
工性に優れたプラセオジウム系磁石を採用した。

- (2) コンバータの保護カバーが分割可能で保守が容易となる。
- (3) コンバータ位置が可変であり、フィラメントに対する位置の最適化が可能である。
- (4) コンバータヘッドが交換可能である。

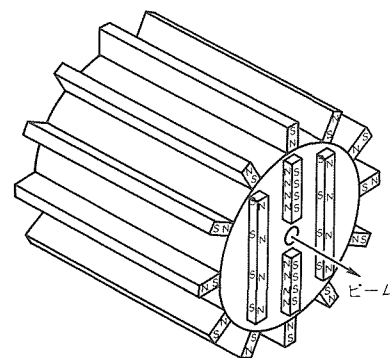
BLAKE-Mの目標とする性能を表1に示す。

4. 表面生成型負水素イオン源の動作原理

イオン源内には水素ガスが 0.133Pa (10^{-3}Torr)程度で保たれている。高温に熱せられた2本のフィラメントから熱電子が発生し、フィラメントとイオン源本体の間に印加されたパルス電圧により、アーク放電を起こす。アークの規模はおよそ150V, 30Aである。イオン源のほぼ中心に配置されたコンバータと称する金属表面には700Vの負電圧が印加され、周りのプラズマから正イオンが引き寄せられる。コンバータ表面には仕事関数が低くなるようにセシウムの薄い層があらかじめ形成されており、表面上の H^+ イオンはセシウムの働きにより、 H^0 又は CsH などに変換される。その一部は更



(a) BLAKE-I



(b) BLAKE-M

図3. 磁石配置とビーム取り出し方向

表1. 負水素イオン源の目標仕様値

イオン源ビーム強度	10 mA (がん治療用には3 mA)
90%エミッタンス	$1.5\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
ビームパルス幅	200 μs
繰返し	20 Hz

に電子を与えられ、 H^- イオンとなる。生成された H^- イオンは、コンバータの負電位によって面に垂直に加速され、エネルギー700Vのビームとなる。このビームはイオン源から出力され、下流の加速電極によって更に30kVまで加速される。図4に各電極部の電位関係を示す。

負イオンの生成においてコンバータ表面の状態は重要な要素であり、セシウムの効果は層の厚み、又は表面の酸化膜の状態などに左右される。セシウム原子がコンバータ表面を満遍なく覆う量の半分程度の状態が最適とされており、半原子層と呼ばれる。しかし、実際にはセシウム層の厚みを運転時にモニタすることは困難で、この点では運転の経験を要する。セシウムは、セシウム炉に貯蔵され、ヒータによって熱せられる。そこで発生したセシウム蒸気は、金属管を通してコンバータ表面へ向かって吹き付けられセシウム層を形成する。コンバータ表面のセシウム量は、セシウム炉の温度で決まる蒸気圧とプラズマによるスパッタのバランスによって決

定される。

5. 機器配置

図5にテストベンチの機器配置を示す。イオン源出口には永久磁石が配置され、イオン源から放出される電子は除去される。イオン源からはプラズマ中の電子が放出され、その量はイオンビームの電流に比べて2けた程度高いため、電子除去が不十分な場合は下流の機器に熱的な、又はノイズ面での支障をきたす。引き出された負水素ビームは、アインツェルレンズによってファラデーカップへ集められビーム強度測定が行われる。真空チャンパの終端にはスペクトロメータ用の電磁石が配置され、ビーム中の不純物の測定が可能となっている。

6. イオン源の運転

BLAKE-Mの運転時に調整可能なパラメータは、アーク電流、コンバータ電圧、セシウム温度、フィラメント温度、ガス流量の五つである。これらのパラメータを変化させることで、異なった条件の下で運転可能であるが、ビーム出力を比較する上では、通常のイオン源の場合ビーム電流をアーク電流で規格化して行う。しかし、表面生成型では、アーク電流以外にも“コンバータへ流れる電流”(これをコンバータ電流と称する。)が存在する。このため、ビーム出力をアーク電流で規格化すべきか、コンバータ電流で規格化すべきかは必ずしも自明でないが、図6に示すデータによると、ビーム電流の相関はアーク電流ではなく、コンバータ電流に対して強い。したがって表面生成型でのビーム強度比較では、コンバータ電流が基準となることが理解できる。

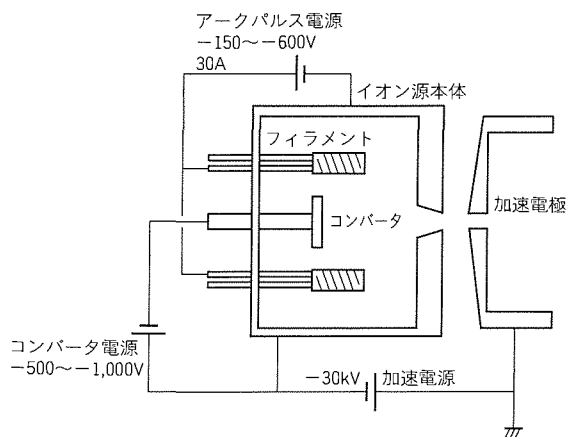


図4．各電極間の電位関係

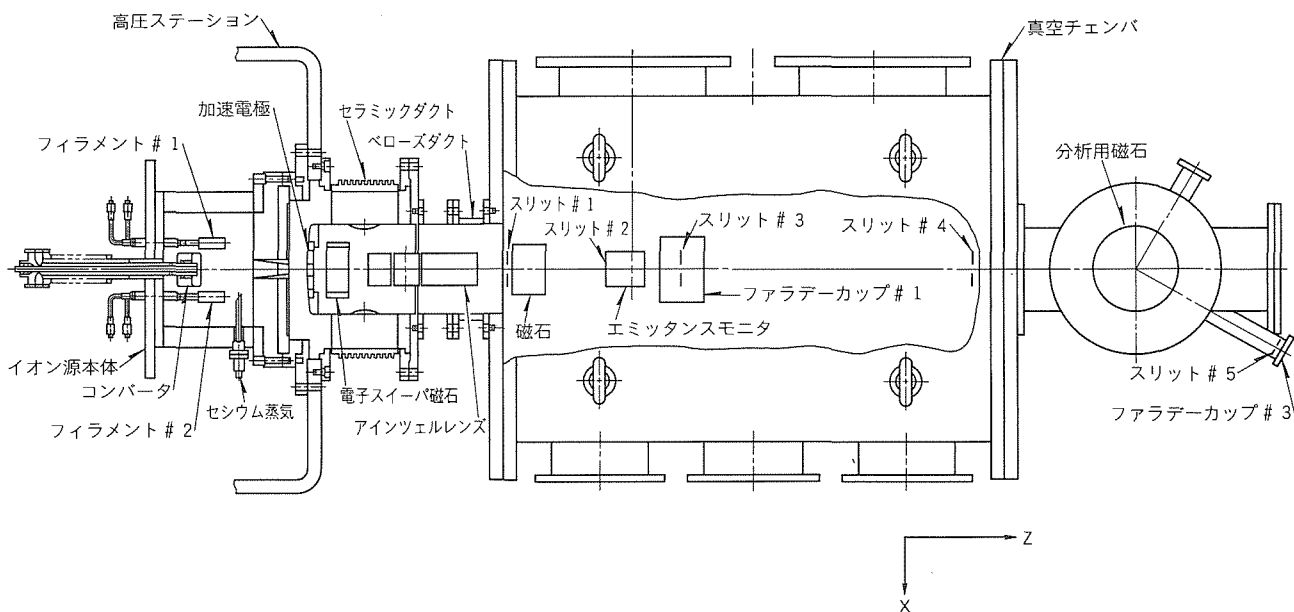


図5．テストベンチ機器構成配置

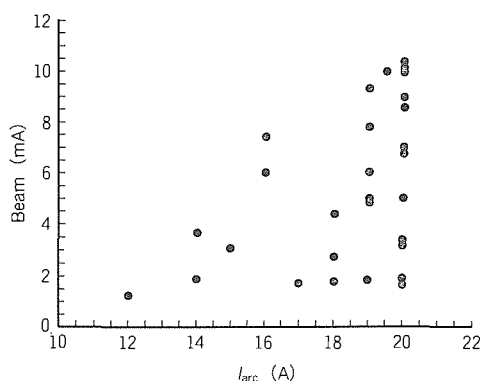
7. 測定

ここでは試験で測定されたエミッタンス、ビーム中の不純物、コンバータ径の影響について述べ、ビーム電流の総合評価を行う。

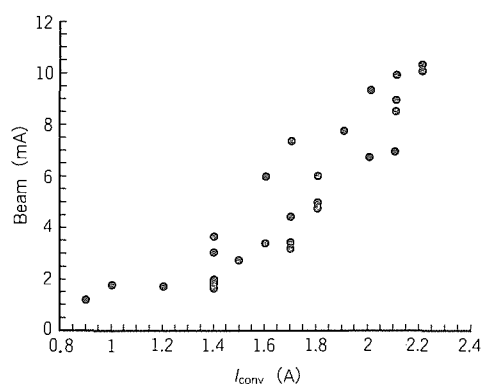
7.1 エミッタンス測定

図7にエミッタンスの測定例として、位置 X と発散角 X' の空間におけるビーム分布を示す。エミッタンスの領域は、単純なだ(楕)円形ではなく、アインツェルレンズによる光学系の収差を表している。実際には光学系で収差が起らないようにビーム輸送系を設計するが、今回は汎用テストベンチを利用したため、そのような条件は得られなかった。したがってここでは、イオン源自体のエミッタンスの評価として、ちょう(蝶)形領域の面積を使用する。

エミッタンス測定は二つの方法で行った。一つはスリット1本に対して測定用に多チャネルのコレクタを用いるマルチコレクタ法であり、これに対するマルチスリット法では、測定用コレクタは1チャネルのみで、上流に多数のスリットを使用する。測定の結果、マルチコレクタ法では二次電子の抑制が不十分であり、測定面で発生する二次電子によってチャネル間で干渉を起こすことが判明した。このため、マルチコレクタ法による X' 分布はマルチスリット法のデータに比べ、



(a) アーク電流



(b) コンバータ電流

図6. ビーム電流のアーク電流とコンバータ電流との相関関係

常に1.6倍の幅を示した。

図8にはエミッタンスの測定値を示す。マルチコレクタ法による測定も含まれているが、その値は乗数 1.6 を用いて補正してある。

測定されたエミッタンスの値は、次のような傾向を示すことが分かった。

- (1) エミッタンスは引出し電圧を上げることで悪化する。引出し電圧が46 kVにおけるエミッタンスは、通常の35 kVでの値に比べて20%以上悪い。
- (2) エミッタンスは、ビーム電流値の増加に対しては緩やかな増加傾向を示す。
- (3) コンバータ電圧及びコンバータ径を変化させて測定したエミッタンスは誤差の範囲内で一致する。

BLAKE-Mにおけるエミッタンスの原因として、これらの観測と照らし合わせ、次の要因について考えた。

- (a) コンバータの取付角度又はその他部品のアライメント精度、アパーチャにおける非線形的なレンズ効果等
- (b) コンバータ表面処理の凸凹により生じるエミッタンス
- (c) アパーチャとコンバータ径の位置関係(アクセプタンス)によるエミッタンス

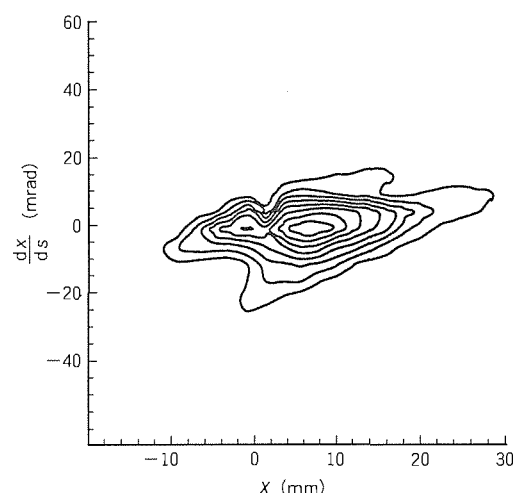


図7. エミッタンス測定で得られた H^- ビームの位相空間

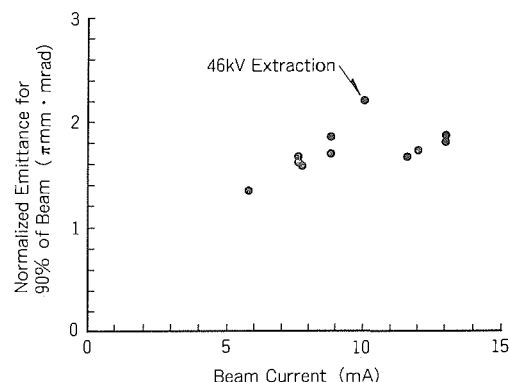


図8. ビームの90%を含むエミッタンスの測定結果

(d) 空間電荷力

(e) プラズマのイオン温度

(a)から(d)のいずれかを主たる原因として計算した場合、測定値と計算値が大幅に食い違ってしまいか、又は計算値がコンバータ電圧に依存するなどの不都合が生じる。これに対しエミッタンスの要因が(e)であるとすれば、測定値の数値的裏付けが得られる。通常、0.133 Paの水素プラズマ中のイオン温度は1eV程度であるとされ、この温度における直径50mmのコンバータによるエミッタンスは $1.63 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ という値が計算され、測定値とよく一致する。

一方、データに見られる電流値への依存性については、電流を増強した際にプラズマ温度が上昇することが影響していると考えられる。エミッタンスがコンバータ電圧に依存しないという点でもデータを説明することができる。問題は、イオン温度によるエミッタンスはコンバータ直径に比例するはずであるのに対し、測定ではコンバータ直径への依存性が見られなかったことである。実際には、コンバータ直径にエミッタンスが依存しないとする説明は考えにくく、これについては、プラズマ温度の上昇が原因であると考えられる。コンバータを小さくした場合、ビーム生成の面積が縮小するため、フィラメントパワーとアークパワーの増強によって補強するので、これによってプラズマ温度の上昇を招き、エミッタンスが減少しないと解釈している。

以上のことから BLAKE-Mのエミッタンスは、プラズマ温度によって必然的に生じる程度であり、その他の要因からの寄与は少ないものとされる。

7.2 不純物測定

イオン源から出力されるビームには H^- 以外の不純物が含まれる。不純物の多くは、 H^- がイオン源出口付近のガスにより、電子をストリッピングされて生じた中性粒子 H^0 である。そのほかにはイオン源内残留ガスに含まれる炭素、酸素及びその化合物が負イオンとして出力される。これら不純物の量を調べ、ビームに占める H^- 割合を確認する必要がある。入射器設計の際には、イオン源と加速器部分の間に磁石による分析部を設けるので、不純物の混入は運転に関してはほとんど支障がない。

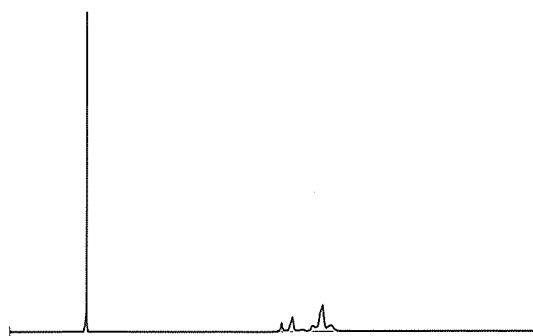


図9. 電磁石スペクトロメータによる不純物測定の一例

テストベンチ下流のスペクトロメータで測定した質量スペクトルの例を図9に示す。横軸は質量の平方根に比例し、ピークの高さは相対的ビーム強度を表す。最も左側にある高いピークが H^- に相当する。その他の成分については、ピーク位置をフィッティングした結果、質量が12, 13, 16, 17となり、それぞれ C^- , CH^- , O^- , OH^- に相当すると思われる。なお H^0 は中性であるため、ここでは測定されない。

コンバータ電圧が700Vの定格運転ではビーム中の不純物が20%程度と測定されたが、不純物の割合はイオン源の運転パラメータにかなり敏感であることが分かった。最も著しい傾向は図10に示すように、コンバータ電圧に伴って不純物の割合が増加することである。これは不純物がコンバータ表面から発生することを示している。

7.3 コンバータ寸法への依存性

コンバータヘッドを交換し、直径30mmの特性を直径50mmのものと比較した。エミッタンスがコンバータ径に依存しないことについては既に述べた。ここでは、コンバータ面積を変えたときのビーム強度の変化を調べ、直径50mmのコンバータ面積が有効利用されているかについて述べる。

ビーム出力は、単純にはコンバータヘッドの面積に比例して得られると考えられる。測定データによるとビーム電流1mAを得るために必要なアーク電流は図11に示すように、

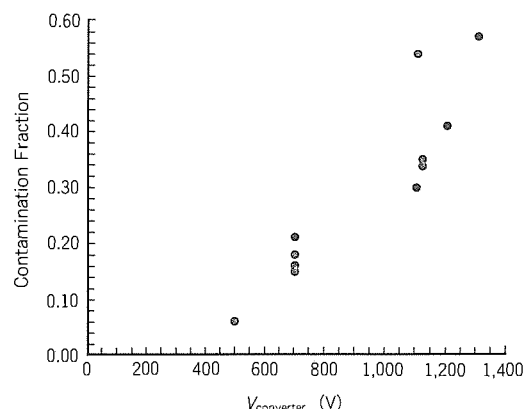


図10. 不純物とコンバータ電圧の相関関係

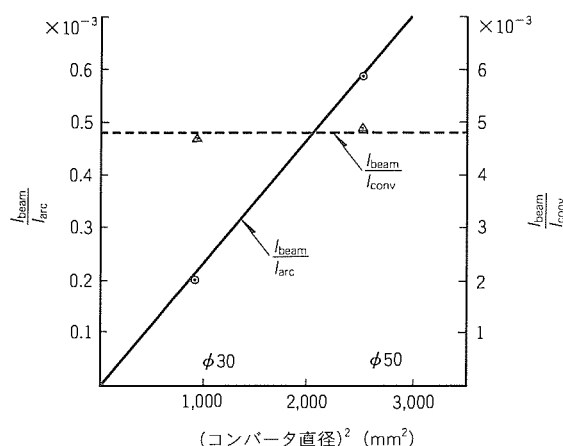


図11. コンバータ直径に対する電流値のスケールリング

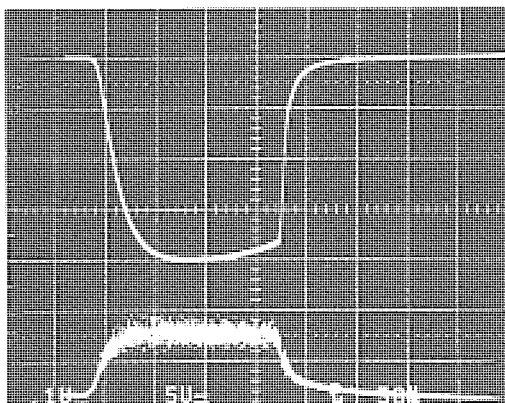


図12. ビーム電流20 mAにおけるビームパルス波形(上)と電子電流波形(下)
(横軸目盛りは50 μ s, 縦軸目盛りは5 mA(上)と100 mA(下))

表2. BLAKE-Mイオン源で得られた性能
(ビーム電流13 mAにおける測定に基づく)

①	最大ビーム電流	20 mA (②~④測定時は13 mA)
②	ビーム中のH ⁻ の比率	0.8
③	90%エミッタンス	1.9 π mm \cdot mrad
④	X, Y方向1.5 π mm \cdot mrad 内に含まれるビームの割合	0.72
⑤	②~④を満たす イオン源ビーム強度	7.5 mA

注：⑤は②~④に基づき全電流13 mAに対して算出した値

コンバータ面積に比例する。さらに、コンバータ電流1 A当たりのビーム電流はコンバータ面積に対して一定であり、上述の単純比例則に従う。

電流値がこのようにコンバータ面積に対してスケーリングすることから、直径50 mmのコンバータにおいても表面のほぼ全域がイオン生成に有効利用されていると考えられる。

7.4 ビーム強度

上述の測定は、ビーム電流が13 mA以下の状態で行ったが、ビーム調整を行った結果、ビーム強度を20 mAまで上げることが可能であった。20 mAにおけるビームの波形を図12に示す。イオン源から出力される電子電流を下のトレースに示す。

実際に加速器で使用するビーム量は、最大電流値から不純物を差し引いた値である。表2にエミッタンス及び不純物を考慮にいたれたビーム電流を示す。13 mA時の測定では10.4 mAのH⁻が得られ、20 mAに対して同じビーム純度を適用すれば16 mAとなる。さらに、ビームに対してエミッタ

ンス1.5 π mm \cdot mrad以下であることを要求すれば、ビーム強度は3割減となり、7.5 mA (13 mA出力時) が実際に利用可能なビームとなる。20 mAで運転した場合には、この値を更に上回るビーム電流が得られる。

例として、陽子がん治療装置の入射器に要求される仕様と比較した場合、H⁻ビーム強度3.7 mA、エミッタンス1.5 π mm \cdot mrad (20ターン入射を仮定) であり⁽⁵⁾、BLAKE-Mの性能はこの要求を十分に満足するものである。

8. む す び

表面生成型の負水素イオン源 BLAKE-Mを設計、製作した。ビーム試験を行った結果、20 mAのビーム電流が得られ、8 mAにおける規格化ビームエミッタンスは1.6 π mm \cdot mradと測定された。エミッタンス、ビーム純度も十分高品質なビームが得られ、応用例としてがん治療装置の入射器を考えた場合にも十分仕様を満たす性能が得られた。

ここで述べた BLAKE-Mイオン源に関する成果は、高エネルギー物理学研究所との共同研究によって得られたものである。同研究所の森 義治助教授と高木 昭助手には貴重な御指導をいただいたことを厚く感謝する。

参 考 文 献

- (1) Ehlers, K. W., Leung, K. N.: Self-extraction Negative Ion Source, Rev. Sci. Instrum., **51**, 721 (1980)
- (2) York, R. L., Stevens, R. R., Jr.: A Surface-type Negative Hydrogen Source using Cesium, AIP Conf. Proc., No.111, 410 (1984)
- (3) Takagi, A., Mori, Y., Ikegami, K., Fukumoto, S.: Recent Progress on the Cusp H⁻ Ion Source at KEK, IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-32**, 1782 (1985)
- (4) Mori, Y., Alton, G. D., Takagi, A., Ueno, A., Fukumoto, S.: Multicusp H⁻ Ion Source at KEK, Nucl. Instrum. Meth., **A273** (1988-5)
- (5) Endo, K., Muto, K., Akisada, M., Kitagawa, T., Inada, T., Tsuji, H., Maruhashi, A., Hayakawa, Y., Takada, Y., Tada, J.: Tsukuba Medical Proton Synchrotron, KEK-Preprint 89-168, Presented at the International Heavy Particle Therapy Workshop, Villigen, Switzerland (1989)

RFQライナックのビームシミュレーション

田中博文*
中西哲也**

1. ま え が き

高周波四重極ライナック (以下“RFQ ライナック”という。) は、そのコンパクト性から多くのイオン加速器の初段部に使用されている⁽¹⁾。今後、医療用イオン加速器でも入射器として使用されるケースが多いであろう。また、高エネルギーイオン注入器としても注目されている。

RFQ ライナックは、高周波電界だけでビームを集束し、かつ加速する。さらに、直流ビームを高効率でバンチしながら加速することができる。これらの機能を最適化するためには荷電粒子のシミュレーションが不可欠である。計算機コードは既に開発されているが、最適化するためには入力パラメータを変えて多くの計算を繰り返す必要がある。筆者らは、これら既存のプログラムを使ってパラメータを最適化するプログラムを開発した。

この論文では、既存のプログラムによるビームシミュレーションの概要を紹介した後、筆者らが開発した最適化プログラムについて述べ、実際の設計例を紹介する。また、最後に電極電圧を変えることで達成されるエネルギー可変型 RFQ ライナックのシミュレーション結果についても述べる。

2. RFQライナック及びシミュレーションの概要

RFQ ライナックの代表的な電極形状として、4 ヴェイン型が挙げられる⁽²⁾。これは図1に示すように4枚のヴェインを90° 間隔で配置し、四重極電界を発生させることで荷電粒子を集束する。さらに、ビーム軸方向に波打たせた形状とすることで軸方向電界を発生させ、加速することができる。

このように電極形状は単純でないため、電界分布を与える式は複雑である⁽²⁾。また、直流ビームを効率良くバンチしながら加速するためには、ビーム軸に沿った電極パラメータの変化のさせ方が重要であり、簡単には計算できない。このため、ビームシミュレーションコードが開発された。

計算機コードとして代表的なものは、米国ロスアラモス国立研究所で開発された PARMTEQ である⁽²⁾。このコードの入力データは、ビーム軸に沿った何点かの電極パラメータ (例えば図1の a , m) 及び同期位相である。この入力データを基に、まず同期粒子が各セルを通過する間の位相の進みが所定の値になるように、繰返し計算でセル長を求める。これにより、各セルのすべてのパラメータが決まる。そして最

後にセル内での電界の各成分を求め、粒子の軌跡を計算する。

PARMTEQ で満足できる結果を得るためには、入力データが適切でなければならない。RFQ の用途によって大電流加速が必要な場合と、電流値は無視して加速効率をできるだけ上げたい場合とがある。各々に適した結果を得るために、幾つかの PARMTEQ 入力データ作成プログラムが開発されている。例えば、高い加速効率を得るための GENRFQ^{(3) (註1)}、大電流加速のための RFQUIK などがある。これらのプログラムと組み合わせて使うことにより、比較的容易に電極パラメータを設計することができる。また、シミュレーション結果が実験結果とよく一致することは既に実証されている。

3. 電極パラメータ最適化プログラムの開発

3.1 背 景

電極パラメータ設計には、PARMTEQ 及びその入力データ作成プログラム GENRFQ などが必要であることは前章で述べた。しかしながら、GENRFQ の入力データにも最適化が必要なパラメータが多数存在し、電極形状を決定する過程で多くの条件でのビームシミュレーションが必要となる。また、最適化を行うために、RFQ に関する高度の知識

(注1) 現科学技術庁放射線医学総合研究所医用重粒子運転室山田室長が開発。

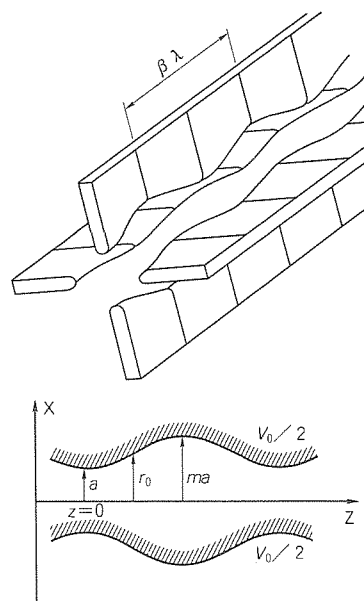


図1. 4 ヴェイン型電極形状

が必要とされる。

3.2 最適化プログラム

当社では、PARMTEQ、GENRFQ を基本として、それに最適化ルーチンを付加した電極パラメータ最適化コード PARMOPT を開発した。ある評価関数を設定し、最適化するパラメータの範囲と初期パラメータを指定すると、評価関数が最小となる電極パラメータが導出される。PARMOP Tを用いると、電極設計にかかる時間、手間が大幅に短縮される。以下にその概要について説明する。

3.2.1 最適化パラメータ

RFQ の設計の際、電極を幾つかのセクションに分けて考える。GENRFQ では次の六つのセクションに分けている。

- (1) RADIAL MATCHER：RFQ のアクセプタンス (粒子の入射可能領域) の時間的な変動を補正する部分
- (2) SHAPER：セパトロクス (粒子が安定に加速可能な領域) を形作る部分
- (3) PREBUNCHER：イオンビームを急速にバンチ化させる部分

表 1. 最適化の変数

パラメータ	略 号
PREBUNCHER入り口出口の β の比	β
PREBUNCHER入り口出口の最大発散係数 Δ_{rf} の比	Δ
BUNCHERでの集束係数	B
BUNCHERでの最大発散係数	Δ_{rf}
SHAPERの長さ	zs
PREBUNCHER入り口の位相	ϕ

表 2. 最適化の評価値

評 価 値	最適化の方向	目 標
通過効率 T_r	高く	90%以上
電極長 L	短く	1.4 m/MeV以下
波打ち曲率半径 ρ_z	大きく	10 mm以上
m 最大値 m_{max}	小さく	2.5以下

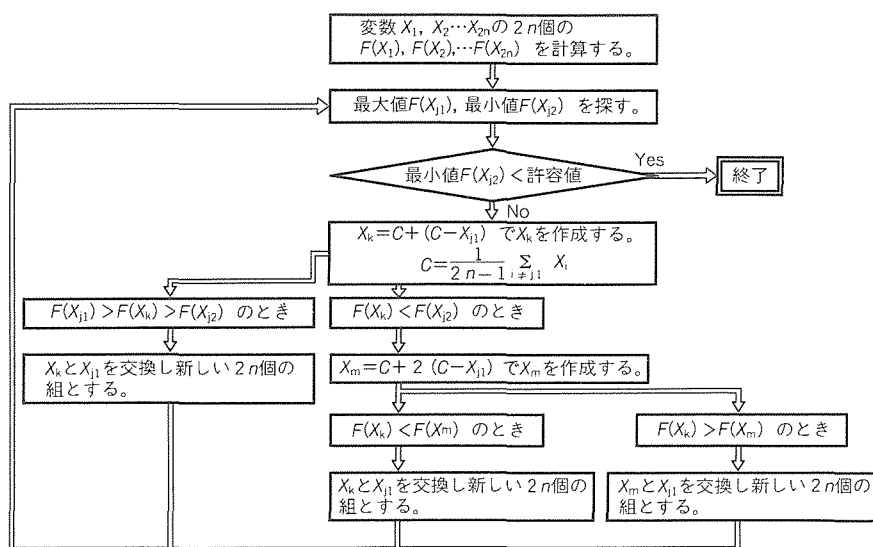


図 2. 最適化のアルゴリズム

- (4) BUNCHER：同期位相を最終の値まで変化させる部分
- (5) BOOSTER：モジュレーションを最大値まで変化させる部分
- (6) ACCELERATOR：最終エネルギーまで加速を行う部分

各セクションには多数のパラメータが存在するが、最適化が必要なパラメータはPREBUNCHERとBUNCHERセクションに集中している。最適化が必要と考えられる6個のパラメータ(表1)を抽出し、PARMOPTに組み込んだ。

3.2.2 評価関数

RFQ の設計では、イオンビームの通過効率 (T_r) の増大、電極長 (L) の短縮を目指した最適化を行う。どのような仕様のRFQを設計するかで、どちらの項目を重要視するかが決まる。例えば、電極部に衝突したときに放射化しやすい粒子を加速する場合には、多少電極長を犠牲にして通過効率の高い電極形状とする必要がある。

また、電極のビーム軸方向の波打ちの曲率半径 ρ_z は、小さ過ぎると製作上の問題が生じる⁽⁴⁾。さらに、モジュレーション係数の最大値 (m_{max} 値) も、大き過ぎると電界の高次成分がビームに悪影響を及ぼす。

PARMOPT では、上記の四つの値を評価値として電極形状の最適化を行う(表2参照)。最適化の度合いを定量的に表す指標として、次式の評価関数を設定した。

$$f = c_1(100 - T_r) + c_2L + c_3/\rho_z + c_4m_{max}$$

ここで、 c_1, c_2, c_3, c_4 はユーザが与える定数である。例えば、できるだけ長さの短いRFQを設計する場合には c_2 の値を大きくする。PARMOPT では上式の最小値を計算する。

3.2.3 最適化手法

制約条件がある多変数 (n 変数) 関数の最小値を導出する図2のようなアルゴリズムを用いて最適化を行う。通常、30 回程度の繰返し計算で最終解が得られる。

さらに、次のような最適化手法の改良を考えている。

- (1) 現行の最適化手法は、局所的な最小値に集束してしまうため、初期パラメータが適切でないと大域的な最小値を発見できない。大域的な最小値を探す最適化手法、例えば、シミュレーテ

表 3. 4 ヴェイン型RFQの設計仕様

イオン種	$e \geq 1/3$
入射エネルギー	35keV/u
出射エネルギー	1 MeV/u
周波数	200 MHz
電流	H_2^+ で 3.0 emA C^{4+} で 0.8 emA
規格化エミッタンス	1 π mm · mrad

ッドアニーリング⁽⁵⁾等の手法を組み込む。

(2) 電極の製作誤差等に対する評価を定量的に扱える最適化手法を考える。

4. 4 ヴェイン型200MHz RFQへの適用例

4.1 基本パラメータ

前章で記述した最適化プログラムを用いて、表3の仕様のRFQライナックの電極形状の最適化を行った。設計仕様パラメータの電流値は H_2^+ で3.0emA、 C^{4+} で0.8emAで、比較的低電流であり、GENRFQを用いた最適化が適用できる。

表1の6個の変数以外のパラメータは、他の研究機関のRFQの製作実績から表4のように決定した。

4.2 最適化結果

表1の6個の変数の初期条件や評価関数の c_1 等の係数を変化させながら最適化プログラムで計算した結果を表5に示

表4. 固定パラメータ

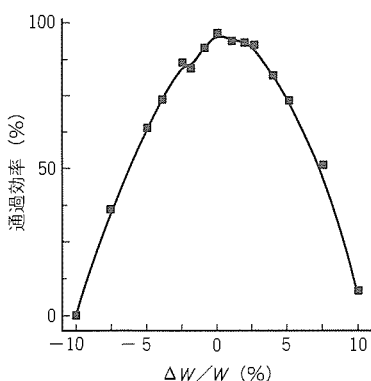
パラメータ	値
初期／最終同期位相	$-90^\circ / -30^\circ$
最大電界強度	1.8 キルバトリック値
RADIAL MATCHER長	12 セル
BOOSTER部の最小アパーチャ余裕	1.1

表5. 最適化の結果 (変数及び評価値)

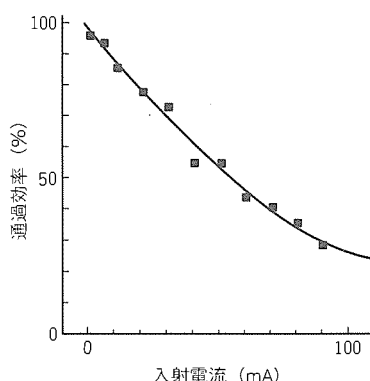
case	β	Δ	B	Δ_{rf}	zs	ϕ	Tr	ρ_z	L	m_{max}
1	1.0484	0.1650	4.6023	-0.06489	9.8452	-89.0000	98	2.8377	382.84	1.9065
2	1.0577	0.1573	4.2374	-0.06960	9.8485	-88.2734	96	2.4579	340.86	1.9864
3	1.0565	0.1578	4.3040	-0.08544	9.8438	-88.4186	96	1.9998	337.74	1.9173
4	1.0637	0.1492	3.9473	-0.07499	9.7933	-87.9045	91	2.0308	314.02	2.0342
5	1.0652	0.1622	3.9286	-0.06262	9.8287	-87.6922	93	2.5022	323.60	2.0903

表6. 通過効率 (入射エネルギー, 電流値を変化させたとき)

ケース	電流 0 emA	$\Delta W_{in}/W_{in} = +5\%$	$I_{in}=10emA$	前2項組合せ
2	96	70	88	76
3	96	74	86	81
4	91	71	86	71
5	93	74	87	71



(a) 入射エネルギー W



(b) 入射電流

図3. 入射エネルギー W 及び入射電流に対する通過効率

す。通過効率を上げるためにはヴェイン長を長くしなければならないことが分かる。しかし、最も通過効率の高い(98%)ケース1でも、加速電圧は0.79MV/mと高く、適切な最適化ができていると考える。

ユーザは、これらの結果から用途に応じて必要な結果を選べばよい。ここでは、加速効率を優先するとして次のような基準でケース3を選んだ。ケース1以外はほぼ同程度のヴェイン長であり、入射エネルギー及び空間電荷効果に対するアクセプタンスを最適パラメータ決定の基準に用いる。具体的には入射エネルギーが+5%, C^{4+} の入射電流値が10emAにおける通過効率を計算した結果、ケース3の通過効率が最も高かった(表6参照)。

ケース3は、通過効率が96%と高いにもかかわらず、加速効率は0.89 MV/mと高い。それ以外のパラメータも所定の性能を満足している。図3に入射エネルギー及び入射電流に対する通過効率の関係を示す。どちらも良好な特性であることが分かる。図4にビーム軸に沿ったビームプロファイルを示す。なお、PARMTEQの出力は、ワークステーションの汎用グラフィックツールであるPV-WAVE上で製作した。

以上の結果から、最適化したRFQは良好な特性を示すことが分かった。

5. エネルギー可変型RFQライナック

5.1 エネルギー可変方法

RFQライナックをイオン注入器として使用する場合は、出射エネルギーを可変にする必要がある。この章では、まず一般的な高周波ライナックでエネルギーを可変にする方法を述べた後、RFQライナックにおける方法を述べる。

高周波ライナックでエネルギーを変える方法としては次の2方式がある。

- (1) 運転周波数を変える。
- (2) 電極電圧を変える。

一般的に用いられる方式は(1)である。ライナックは、同期加速が基本原理であり、粒子がセルから次のセルまで進む間に高周波位相が 2π (RFQの場合 π)だけ進むようにセル長は設計される。

この場合のセル長は、 $\beta\lambda$ (同 $\beta\lambda/2$) である。ここで、 $\beta = v/c$ 、 λ は運転周波数の波長である。したがって、 λ を変えるとそれに反比例して β が変わることになる。エネルギーは β^2 にほぼ比例する。しかし、この方式は加速空洞の構造が複雑になるなどの問題がある。この方式では、周波数の可変範囲さえ分かればエネルギーの可変範囲は分かるので、シミュレーションは必要ない。

通常のライナックでは、(2)の方式を用いてエネルギー可変とすることはできない。位相振動の原理により、電極電圧を変えても各セルで加速電圧が一定となるように同期位相が変わるためである。電圧を位相振動しなくなる $V_0 \cos \phi_s$ 以下にすると、粒子は加速・減速を繰り返す。その結果として、加速されずに出射されるか電極に衝突して失われる。ここで、 V_0 は電極間電圧の設計値、 ϕ_s は同期位相の設計値である。位相振動数が約 1 以下のライナックでは、加速と減速を等しく受けたいため、入射位相や電圧によってエネルギーを変えることができる。

RFQ ライナックでは位相振動を多数回行う。しかし、バンチングのために ϕ_s を -90° から -30° 程度までビーム軸に沿って変えるため、電極電圧の変化によってエネルギーが変わる。つまり、電圧によってセパトリクスが消滅するセルが異なり、消滅したセル以降では正常な加速はされないためである。しかし、セパトリクスが小さくなって消滅する

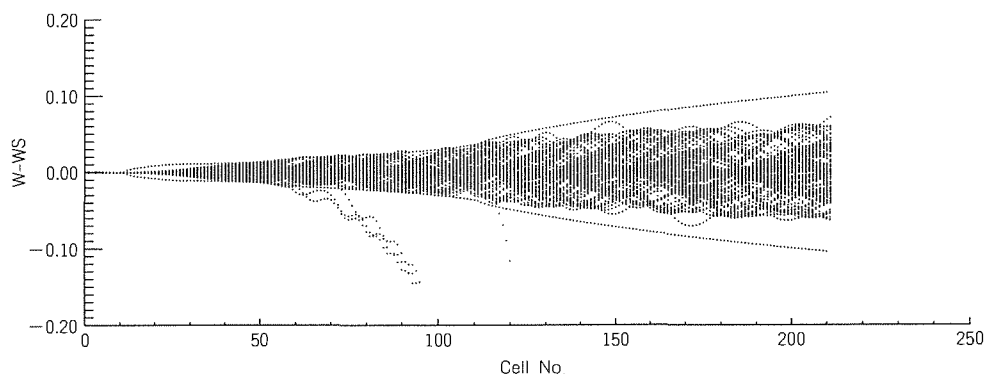
までの間に、セパトリクス内に捕獲していた粒子を徐々にこぼしていくために、出射ビームのエネルギーの広がりが大きい。

この問題を解決するために筆者らは分離電極型 RFQ ライナックを提案した。この方式は、一つの加速空洞を高周波的に 2 分割し、各々の電極電圧を独立に制御できるようにしたものである。例えば、電極をバンチャ部と加速部に分離した場合、バンチャ部では正常な加速を行い、加速部でのみセパトリクスを消滅した運転ができる。したがって、加速部の電圧制御を行うことで、エネルギーの広がりを大きくすることなく出射エネルギーを変えることが可能である。

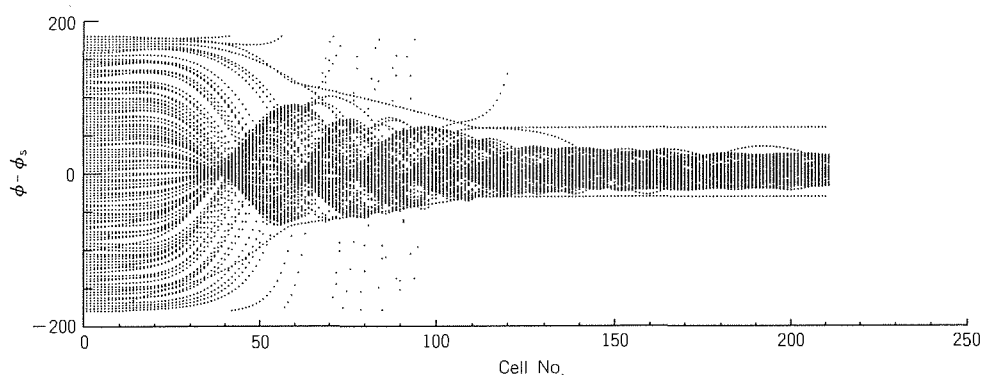
この方式は、すべてのタイプの RFQ ライナックに適用できる。Split Coaxial RFQ ライナック⁽⁶⁾に適用した例を図 5 に示す。空洞は rf 仕切板で 2 分割され、垂直ヴェインは仕切板に接触しており、水平ヴェインは仕切板から離す。切り離れた水平ヴェインの間隔をできるだけ短くするために、仕切板は水平ヴェイン付近で薄くしている。仕切板に高周波が侵入できないような穴を多数あければ、真空的には一つの空洞として扱える。

5.2 計算結果

次に計算例を述べる。計算は GENRFQ 及び PARMTEQ で行い、加速効率をできるだけ上げるために GENRFQ 出力の m と ϕ_s を多少変更した。結果を表 7 に示す。図 6 は



(a) W-WS (MeV.) vs. Cell No.



(b) $\phi - \phi_s (^\circ)$ vs. Cell No.

図 4. PARMTEQ の出力例

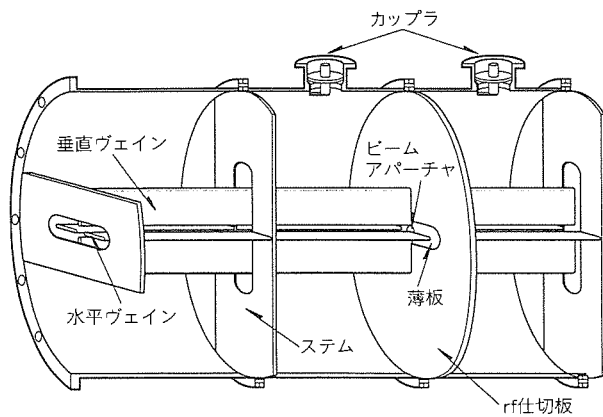


図 5. Split Coaxial RFQ 空洞を 2 分割した例

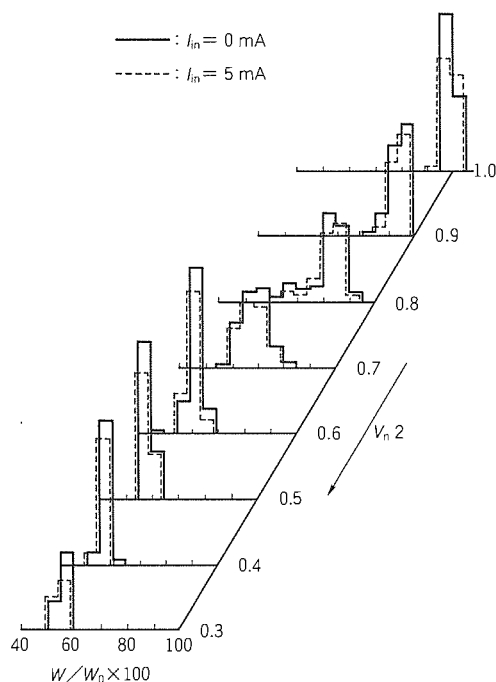


図 6. 加速部の電極電圧 ($V_n/2$) を下げたときの出射ビームのエネルギー分布 ($V_n/2$ は相対値, $W_0=1.96$ MeV)

加速部の電極電圧を下げたときの出射ビームのエネルギー分布である。エネルギーの減少に対してその広がりは大きくならないことが分かる。同図には入射電流 5 mA 時の結果も示しているが、分布の広がりはない。また、分離電極間ギャップの影響を検討した結果、30 mm 程度のギャップがあっても、通過効率にはほとんど影響を与えないことが分かった。

表 7. エネルギー可変型 RFQ の計算例

イオン種	$^{31}\text{P}^{1+}$
運転周波数 (MHz)	25
入射エネルギー (MeV)	0.062
出射エネルギー (MeV)	1.1~1.96
規格化エミッタンス (mm · mrad)	0.8π
バンチャ部電極長 (m)	1.7
加速部電極長 (m)	1.0
集束係数 B_0	4.7
最大発散係数 Δ_{rf}	-0.125
同期位相 ϕ_s (°)	-90 → -15
電極間電圧 (kV)	115

すなわち、放電的にも問題ない設計ができる。

6. む す び

RFQ 電極パラメータ設計のための最適化プログラム及びエネルギー可変型 RFQ について述べた。今後、初期値に関係なく最適なパラメータが得られる方法を開発していく。また、エネルギー可変型については、モデル空洞によって高周波的分割法の詳細検討を行う。

参 考 文 献

- (1) Schriber, S. O. : Present Status of RFQS, IEEE Trans. on Nuclear Science, **NS-32**, No.5, 3134 ~ 3137 (1985)
- (2) Crandall, K. R., Stokes, R. H., Wangler, T. P. : RF Quadrupole Beam Dynamics Design Studies, Proceedings of 1979 Linac Accelerator Conference, 205 ~ 216 (1979)
- (3) Yamada, S. : Buncher Section Optimization of Heavy Ion RFQ Linacs, Proceedings of 1981 Linac Conference, 316 ~ 318 (1981)
- (4) Tokuda, N. : Progress in Low β , Low q/A RF Q's at INS, Workshop on Post-Accelerator Issues at the Isospin Laboratory, Berkeley (1993)
- (5) Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. Jr., Vecchi, M. P. : Optimization by Simulated Annealing, Science, **220**, No.4598 (1983)
- (6) Arai, S. : Analysis of a Multi-module Split Coaxial RFQ, 東京大学原子核研究所技術レポート, IN S-T-464 (1986)

イオンシンクロトロンの設計コード

吉田克久*
石 禎浩**

1. ま え が き

イオンシンクロトロン(以下“シンクロトロン”という。)は、陽子や炭素等のイオンを高エネルギーまで加速するための装置である。シンクロトロンは、物理学の研究装置として開発されたため、近年までその設計は装置を使用する研究機関の専門家が行っていた。また、装置も大規模なものが多かった。近年、シンクロトロンの出力イオンビームを物理研究以外の医療等に利用することが考えられるようになってきた。そのような分野では、信頼性・操作性の高い小型のシンクロトロンをその設計段階からメーカーが行うことが要求されている。このような工業製品としてのシンクロトロンを設計するためには、概念設計時に様々なケーススタディを行ってシステムの最適化を図る必要がある。これらの作業を効率的に行うためにシンクロトロンの設計コード RING を開発した。

この論文では、この開発コードの概要とそれを用いたシンクロトロンの設計例について述べる。

2. 設計コードの概要

シンクロトロンの最適設計を行うためには、設計コードはシンクロトロンの動作をできるだけシミュレートできるものでなければならない。また、多数のケーススタディを効率良く行うためには、入出力データの処理作業を簡素化して、設計者が計算結果の検討に集中できることが必要である。

ここでは、このような条件に基づいて開発した設計コードの概要を示す。まず、設計コードの基本的な機能である粒子軌道計算について述べ、次に設計コードの主要な機能について述べる。

2.1 三次元の粒子軌道計算

シンクロトロン内の粒子の運動を記述するために、座標系としてねじれ率が零の Frenet-Serret 座標系を用い、独立変数として設計軌道長 s とする。基準粒子の運動量が一定という条件のもとで三次元の粒子軌道を計算するために、粒子のハミルトニアン $H(x, y, \tau, p_x, p_y, p_\tau; s)$ として

$$H = -\frac{eA_s}{p_0} - \frac{p_\tau}{\beta} - \delta - (1 + \delta) \frac{x}{\rho} + \frac{p_x^2 + p_y^2}{2(1 + \delta)} + \frac{p_x^2 + p_y^2}{2(1 + \delta)} \frac{x}{\rho} - \frac{e(p_x A_x + p_y A_y)}{p_0(1 + \delta)} \quad \dots\dots(1)$$

を採用している。ここで、 e , p_0 , β , ρ はそれぞれ電荷、基準運動量、光速で規格化した速度及び座標系の曲率半径

である。また、正準変数 (τ , p_τ) は、それぞれ基準粒子に対する飛行時間差とエネルギー差に比例した量、 δ は運動量偏位である。 A_x , A_y , A_s はベクトルポテンシャル \vec{A} の成分

$$A_x = \hat{e}_x \cdot \vec{A} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$A_y = \hat{e}_y \cdot \vec{A} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$A_s = \left(1 + \frac{x}{\rho}\right) \hat{e}_s \cdot \vec{A} \quad \dots\dots\dots(4)$$

を表す。 A_x , A_y は、三次元磁場を考慮する場合に零でない値をとる。この設計コードでは、三次元磁場として偏向電磁石と四極電磁石の漏えい磁場を考慮することができる⁽¹⁾⁽²⁾。なお、二次元磁場としては、20 極までのノーマル及びスキュー多重極成分を考慮することが可能である。

高周波加速空洞の作用は、粒子が空洞を通過する際にその正準変数 (τ , p_τ) を

$$\tau^f = \tau^i \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$p_\tau^f = p_\tau^i + A \sin\left(\frac{\omega}{c}(\tau - \tau_0)\right) + B \quad \dots\dots\dots(6)$$

に従って変換することで表す。ここで、 ω , c はそれぞれ高周波の角周波数と光速、 A , B は定数である。

式(1)に基づいた軌道計算には、ハミルトン力学系のシンプレクティックな性質が保存される積分方法を用いているため、イオンシンクロトロンのように長時間にわたる現象のシミュレーションが必要な場合にも信頼性の高い計算を行うことができる。また、偏向電磁石内の設計軌道が曲率を持っていることに起因する非線形効果を考慮することができるため、曲率半径の小さな偏向電磁石を用いた小型シンクロトロンの設計検討を行うことが可能である⁽³⁾。

2.2 縦方向の粒子軌道計算

イオンビームの高周波捕獲や加速を検討するために、空間電荷効果を考慮した縦方向の一次元軌道計算を行うことが可能である。空間電荷ポテンシャル V_{sc} は、イオン群(バンチ)の縦方向の分布から

$$V_{sc} = e\beta c \frac{h^2}{R} \frac{d\lambda}{d\phi} \frac{gZ_0}{2\beta\gamma^2} \quad \dots\dots\dots(7)$$

で計算される⁽⁴⁾。ここで、 h , R , λ , ϕ , γ は、それぞれハーモニク数、シンクロトロンの平均半径、バンチの線密度、高周波位相及びローレンツ因子である。また、 g は形状因子で、 $Z_0 = 377 \Omega$ である。線密度 λ は、多数の粒子からなるバンチを模擬した粒子分布をバンチがシンクロトロンを

1周するごとに計算して求める。

2.3 主要な機能の紹介

シンクロトロン構成機器には、① 偏向電磁石と四極電磁石、② 入射器で加速された低エネルギービームを取り込むための入射機器、③ 高周波加速空洞、④ 六極電磁石等の

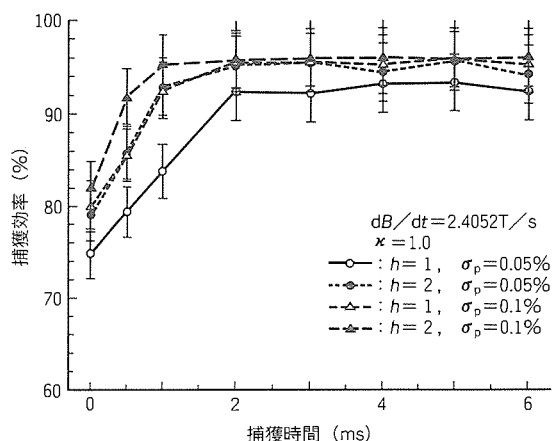


図 1. 捕獲効率と捕獲時間の関係

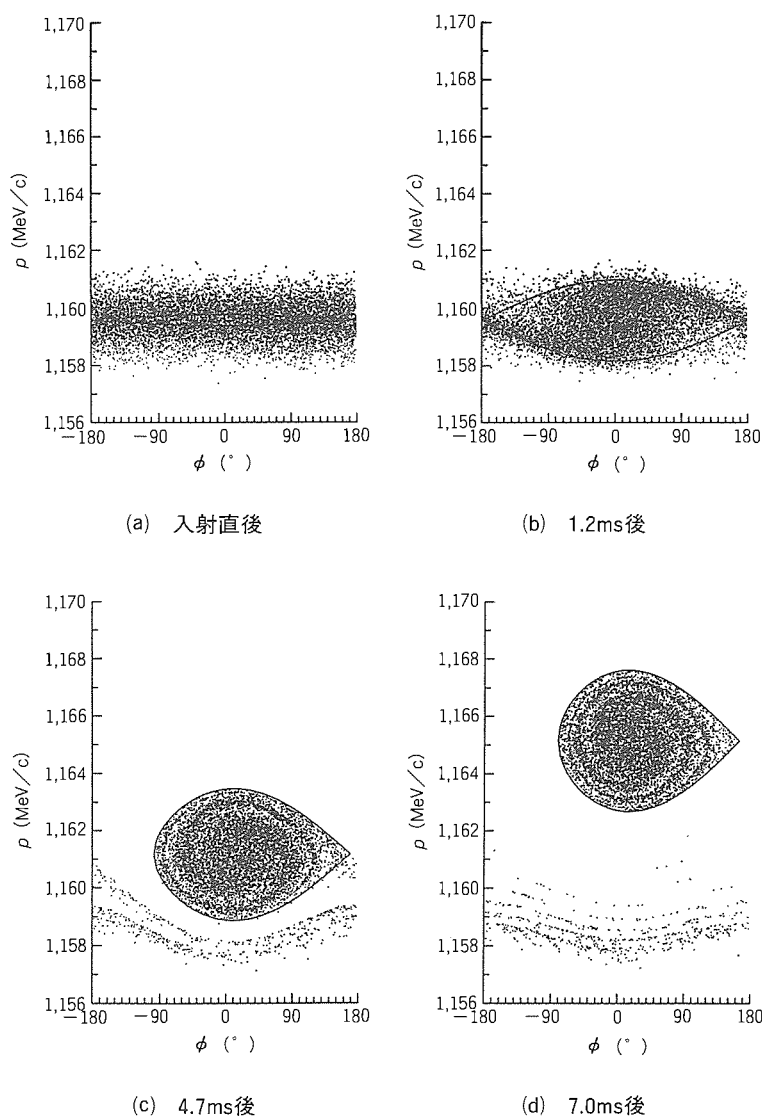


図 2. C^{6+} の高周波捕獲

多重極電磁石、⑤ 高エネルギービームを取り出すための出射機器、⑥ 軌道補正電磁石、⑦ ビームモニタ、⑧ 真空機器などがある。この設計コードは、粒子軌道計算によるビームダイナミクスの検討やビームの入出射及び加速のシミュレーションを行って、上記の⑧ 以外の機器仕様や運転シナリオを決定するために用いることができる。例えば、入出射のシミュレーションでは各種電磁石の強さの時間的変化を、加速のシミュレーションでは加速電圧と周波数及び偏向磁場の時間変化を任意に与えてビーム効率等を計算することにより、これらのプロセスの最適化が可能である。

設計作業を効率的に行うために、チューンやバンパ軌道の設定、電磁石誤差の発生、クロマティシティや閉軌道誤差の補正、高周波加速や $1/3$ 整数共鳴を用いたビーム取り出しのパラメータ設定等が簡単な入力コマンドで行えるようになっている。また、主要な計算結果は、パソコン上のグラフィックアプリケーションを用いて容易に図示することが可能である。

この設計コードは、標準的な FORTRAN で書かれているため多くの計算機環境で動作可能であり、UNIX, VAX-VMS 及び IBM-MVS で利用できる。

3. シンクロトロンの設計例

2章で概説した設計コードを用いたシンクロトロンの設計例について述べる。この装置は、入射器で 5 MeV/u まで加速された p , He^{2+} , C^{6+} をそれぞれ $70 \sim 230 \text{ MeV}$, $50 \sim 230 \text{ MeV/u}$, $50 \sim 320 \text{ MeV/u}$ まで加速する。ここでは、シンクロトロンの主要構成要素である高周波加速機器と出射機器の仕様決定の際に行った計算の紹介をする。

3.1 高周波加速

シンクロトロンに入射された直流イオンビームは、高周波空洞の加速電場によってバンチングされ(高周波捕獲)、それに続く偏向電磁石の磁場の増加に従って所定のエネルギーまで加速される。加速のシナリオは、加速中に高周波バケットの面積 $(\Delta E/h\Omega - \phi)$ が変化しないように設定する。ここで、 Ω , ϕ はそれぞれイオンの周回角速度と高周波位相である。高周波捕獲は、高周波電圧を加速開始時の値まで直線的に断熱増加させる“断熱捕獲法”を採用する。

イオンの捕獲効率と捕獲時間の関係を C^{6+} について計算した結果を図 1 に示した。この例では、高い捕獲効率を得るためには 2 ms 以上の捕獲時間が必要である。イオン捕獲の様子を図 2 に示した(図には高周波バケットも同時に示している)。高周波バケット全体に C^{6+} が捕獲されていることが

分かる。

偏向電磁石の磁場に、

$$\Delta B(t) = \Delta B \sin(2\pi f_{\Delta B} t + \phi_{\Delta B}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

の時間的変動が加わった場合の捕獲・加速効率を計算した結果を図3に示した。図の点線は、入射時におけるシンクロトロン運動量アクセプタンス ($\Delta p/p = \pm 0.5\%$) を、縦棒は高周波バケットの高さを表す。フラットベースでの磁場変動の振幅 $\Delta B/B$ が 0.2% ($\Delta B = 3 \times 10^{-4} \text{ T}$) {3Gs} あると効率が50%程度まで低下することが分かる。なお、 $\Delta B/B = 0.1\%$ ($\Delta B = 1.5 \text{ Gs}$) の場合には90%以上の効率が得られる。

空間電荷効果を考慮した場合の陽子捕獲の様子を図4に示す。空間電荷の影響で陽子が高周波バケット全体に取り込まれていないことが分かる。このときの捕獲効率は70%である。図4の粒子分布から計算した空間電荷ポテンシャル V_{sc} を図5に示した。

3.2 ビーム出射

設定エネルギーまで加速したビームは、ベータトロン振動の $1/3$ 整数共鳴 ($3\nu_x = 5$) を利用してシンクロトロンからゆっくり取り出す。小さなエミッタンス (水平方向) の出射ビームを得るために、セパトリクスを重ね合わせた取り

出しを行う。この方法は、CERNのLEARで用いられているものである⁽⁵⁾。

2系統の出射用六極電磁石を用いた場合のセパトリクスを図6に示す。この図は、偏向電磁石と四極電磁石の磁場強度を弱めていくとセパトリクスがその面積を減少させながら直線に沿って出射チャンネルに近づいていく様子を示している。出射セプタム側に伸びているセパトリクスの枝がほぼ重なっていることが分かる。

シンクロトロンから電流強度が一定のビームを取り出すためには、電磁石の磁場を ν_x が適切な変化率で $5/3$ に近づくように変化させなければならない。周回ビームの運動量分布 f 及び水平方向の位相空間における粒子分布 g が一様であると仮定すると、 $\varepsilon = \nu_x - 3/5$ の変化率は $3\nu_x = 5$ の共鳴の幅 b とビームの線型チューンスプレッド $\Delta\nu_x$ の大小関係から以下のように決められる。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} \propto \begin{cases} 1/\varepsilon & b > \Delta\nu_x \\ \text{const.} & b \ll \Delta\nu_x \end{cases}$$

このシンクロトロンでは $b > \Delta\nu_x$ なので、 ε の変化率は $1/\varepsilon$ に比例させる必要がある。偏向電磁石と四極電磁石の磁場強度を時間の $1/2$ 乗で減少させた場合と直線的に減少させた場合の出射ビーム強度の時間的変化を図7に示した。

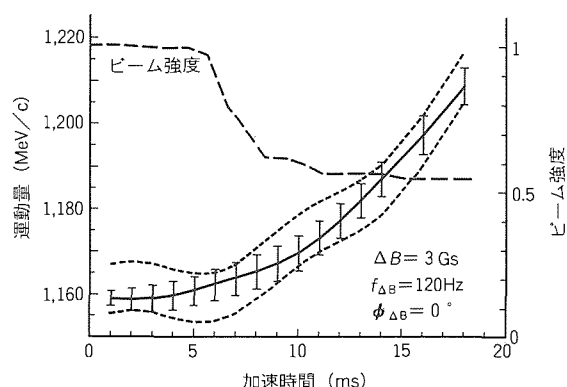


図3. 捕獲・加速効率に対する偏向磁場の変動の影響

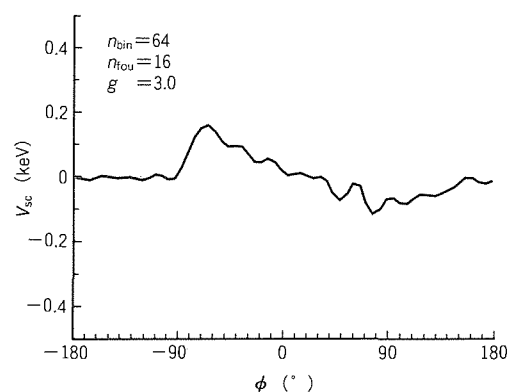


図5. 陽子バンチ内の空間電荷ポテンシャル

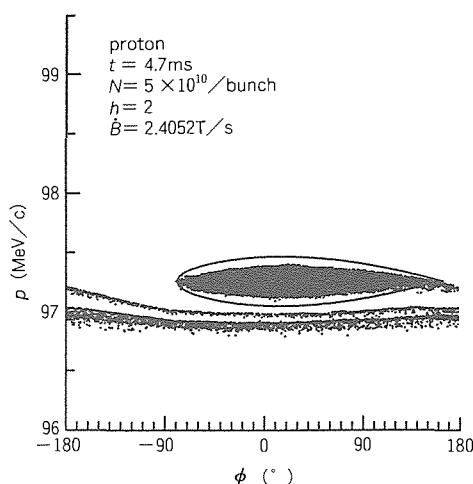


図4. 空間電荷効果を考慮した場合の陽子分布

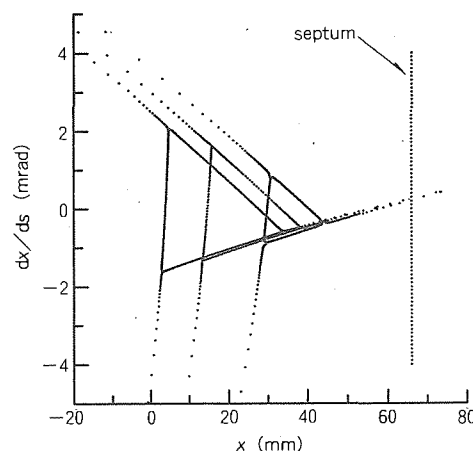
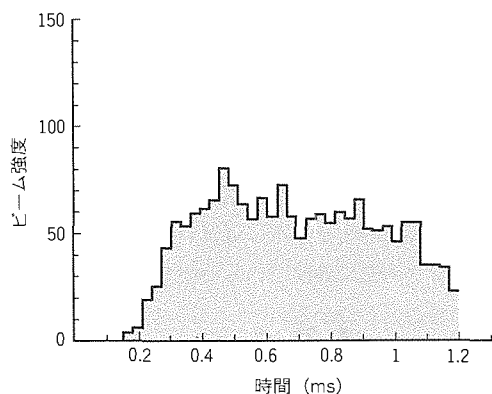
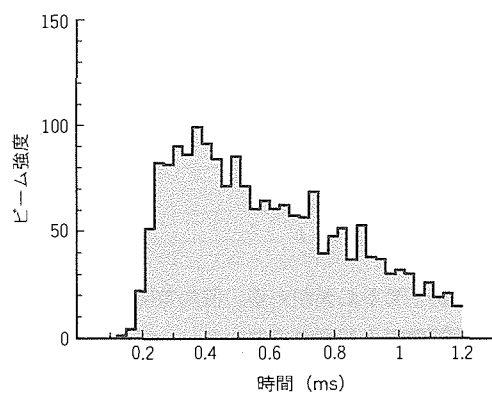


図6. $1/3$ 整数共鳴のセパトリクス



(a) CASE-1



(b) CASE-2

図7. 出射ビーム強度の時間的変化

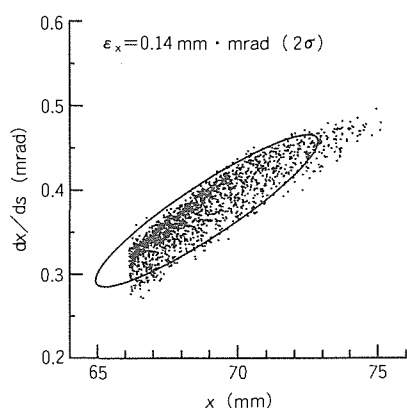


図8. 出射ビームの水平方向の位相空間分布

このシミュレーションでは、 f を放物線分布、 g を一様分布と仮定した。電磁石の磁場を直線的に減少させた場合には、一様な出射ビーム強度が得られないことが分かる。

出射チャネル入口における出射ビームの位相空間分布（水平方向）を図8に示す。図には粒子分布の二次までのモーメントから計算したビームだ（楕）円も示した。出射ビームの水平方向のエミッタンスが非常に小さいことが分かる。図9に出射ビームの空間分布を示した。

ここでは、 g が一様分布で電磁石の電源リップルや高次の磁場成分がない理想的な場合の結果を示した。

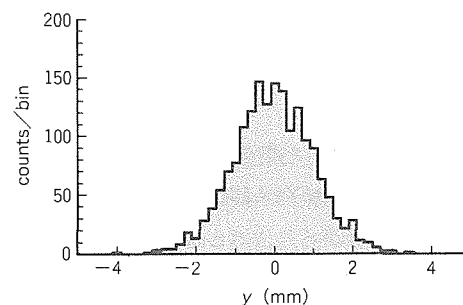
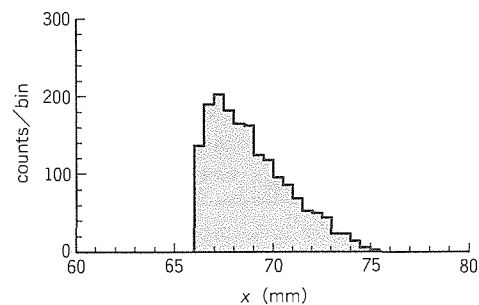


図9. 出射ビームの空間分布

この設計コードでは、入射のシミュレーションから予想される g と電磁石誤差を考慮した検討を行うことが可能である。

4. む す び

イオンシンクロトロン最適設計を効率的に行うために開発した設計コードの概要を述べ、その使用例としてビームの高周波加速と共鳴を利用した遅い取り出しの検討結果を示した。

今後、この設計コードをイオンシンクロトロンの概念設計時に適用して完成度の高いシンクロトロンの開発に努める。

参 考 文 献

- (1) Douglas, D., Forest, E., Servranckx, R. V.: A Method to Render Second Order Beam Optics Programs Symplectic, IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-32**, No.5, 2279 (1985)
- (2) Forest, E.: Leading Order Hard Edge Fringe Fields Effects Exact in $(1 + \delta)$ and Consistent with Maxwell's Equations for Rectilinear Magnets, SSC-142 (1987-10)
- (3) 吉田克久, 山本雄一: 円型加速器のラティス設計ツール, 三菱電機技報, **65**, No.11, 1100~1105 (1991)
- (4) Khiari, F. Z., Luccio, A. U., Weng, W. T.: Simulation of Proton RF Capture in AGS Booster, EPAC, 779 (1988)
- (5) Hardt, W.: Ultraslow Extraction out of LEAR, PS/DL/LEAR Note 81-6 (1981)

量販系広域営業情報システム“MOLDIS”の革新

平松信之* 新好正太郎* 守政隆司*

1. ま え が き

MOLDIS (Mitsubishi On Line Distribution Information System) は昭和47年に当社量販品ビジネスの統一営業情報システムとして稼働し、以来、販売店・販売会社・代理店・支社・配送センター・製作所等をネットワークで統合した広域営業情報システムとして、受発注業務・配送業務・在庫管理等において効果を上げてきた。現在では、当社売上げの約50%をカバーする大規模オンラインシステムとなっている。

一方、消費者ニーズの多様化が進む今日において、量販系製品(表1)を取り扱う販売業務は、ますます多様化・複雑

表1. ビジネスユニットと製品群

ビジネスユニット	製品群
家電系	エアコン、TV、VTR等
産業機器系	シーケンサ、インバータ等
自動車系	電装品、カーオーディオ等
デバイス系	ディスプレイモニタ、液晶等
海外系	輸出製品
半導体系	メモリ、マイコン等

化が進んでいる。このような環境下では、当社の量販系広域営業情報システムである MOLDIS についても、ビジネスユニットごとのきめ細かいサービスを迅速・的確に行うためのシステム革新が急務となった。

本稿では、先ず最初に MOLDIS の概要について、次に主題となるシステム革新における基本テーマごとの実現方策について、最後に更なる課題と今後の展開について述べる。

2. MOLDISの概要

2.1 MOLDISのねらい

多数の消費者・販売会社へのカスタマーサービスの向上、及び量販品ビジネスにおける総合営業力のより一層の強化を図るために、MOLDIS では次に示す4項目の内容をねらいとしている。

- (1) 販売店、販売会社等からの注文に対して、タイムリな配送サービス、及び出荷状況・納期・流通在庫・生産計画等のタイムリな情報提供によるカスタマーサービスの向上
- (2) 販売店・販売会社・代理店から支社・製作所までの受注処理業務のシステム化による、受注処理業務及び配送業務の効率化

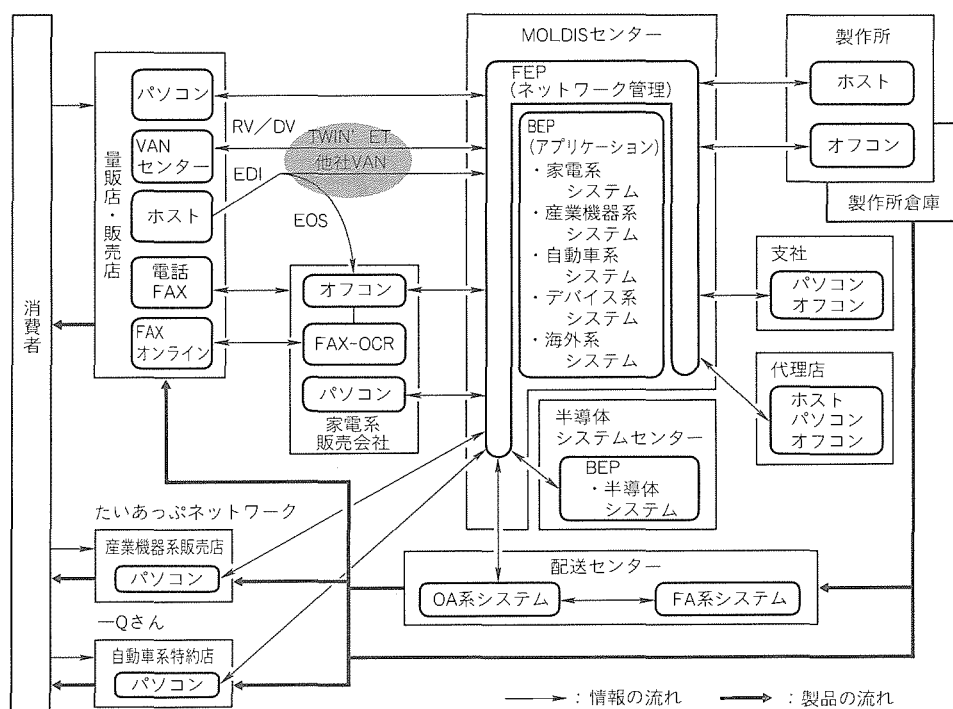


図1. MOLDISの構成

- (3) 流通過程在庫の適正配置、販売活動のための品ぞろえと流通過程の総在庫の削減
- (4) 受注処理により収集・蓄積できる受注・出荷情報等を生産部門へ、生産・補給・在庫情報等を販売部門へそれぞれタイムリに提供し、生産の弾力性と販売力強化を図るための活用

2.2 システム構成とネットワーク

MOLDIS は、基幹処理を行うホストシステムと製作所・支社・販売会社・代理店・配送センター等の固有業務処理を行う端末システムから構成される階層・分散処理型のオンラインシステムである。

図1にシステム構成を示す。

2.3 システム機能

システム機能は、システムの効率性と利用者の利便性向上を図るために、表2、表3に示すリアルタイム処理とバッチ処理に分類している。

2.4 システム稼働状況

運営状況・稼働状況の主なポイントは次のとおりである。

- (1) 原則として毎月第2日曜日(定期保守)を除き、土・日曜日、祝・祭日を含め毎日運転(オンラインサービスは7:00～20:00)
- (2) 入出力件数は、入力件数が25～30万件/日、出力件数が40～46万件/日
- (3) マスタ登録件数は、得意先マスタが約23万件、製品マスタが約17万件等
- (4) レスポンスは、通常の受注処理で3秒程度で処理結果を回答
- (5) 端末拠点は、全国で約800拠点あり、約2,800台の端末を接続

3. MOLDISシステム革新

3.1 MOLDISシステム革新のねらいとテーマ

近年、販売ネットワークが多様化するにつれて、ビジネスユニットごとの要求に相違が出てきており、ビジネスユニット共通の機能を維持しながら固有の要求に対応していくことが困難になりつつあった。このためシステム構造・プログラム構造・EDP処理方式等の各階層における質的向上を図った新しい仕組みの下で、各ビジネスユニットごとの販売業務支援・営業実務の一層の効率化などをねらいとして、平成元年4月にMOLDISシステム革新のプロジェクトを発足させた。その後、各ビジネスユニットごとに順次展開し、平成6年2月の半導体システムの稼働により当初の計画を完了した。

このプロジェクトは、次の4項目を目的とした。

- (1) 各ビジネスユニットごとの要求機能を的確に実現する仕組みを作る。
- (2) 各ビジネスユニットごとの要求機能実現に迅速に対応できる柔軟性と拡張性のある仕組みを作る。
- (3) 恒常的にシステムの性能維持、サービスの向上を図れる仕組みを作る。
- (4) システムの信頼性向上を図る仕組みを作る。

全体計画におけるテーマと実現方策は図2に示すとおりである。以下3.2項で、実現方策に対する詳細と展開について個別に紹介する。

3.2 テーマ別の実現方策

3.2.1 ビジネス別システムへの分割

代理店ルートを商流形態とする産業機器系と販売店・販売会社を商流形態とする家電系では、発注方式や納品書等が異なり、従来の単一システムではきめ細かいサービスの実現が困難であった。そこで、今後の各ビジネス固有のニーズに迅速・的確な対応を図っていくために、MOLDISのシステム構造を、ビジネスユニット又は複数ビジネスユニットグループ等の単位で再構成し、ビジネス別システムへの分割を実施した。主な対応としては、図3に示すようにモジュールを機能別に分割し、共通インタフェースの下で独立システムの構

表2. リアルタイム処理機能

基本機能	概要
受注(戻入)	在庫引き当て、出荷指示、オーダ登録、ほか
注残オーダ管理	オーダ変更、オーダ取消し、ほか
出荷管理	出荷指示、出荷取消し
オーダ・在庫照会	注残オーダ照会、流通在庫照会
その他	価格管理、納期回答、RV(リアルタイムVAN)、ほか

表3. バッチ処理機能

基本機能	概要
注残オーダ処理	在庫引き当て、出荷指示、ほか
EDI取引	EDIデータ受信・変換
在庫管理	自動発注(発注点管理)、ほか
データ収集・分配	計上データ収集・分配、営業情報分配、ほか
その他	マスタメンテナンス、ジャーナル整理、価格管理、納期回答、レポート配信、ほか

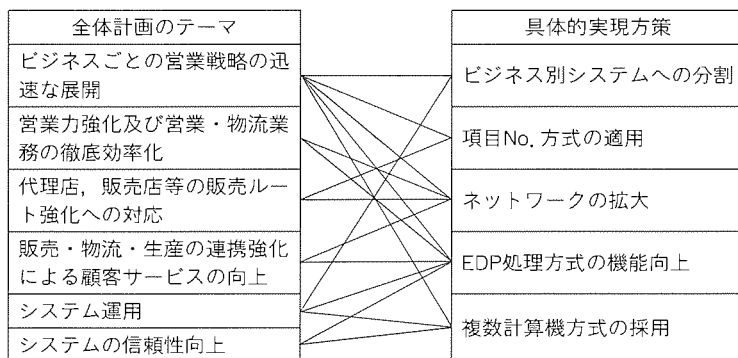


図2. テーマと実現方策

成を可能とした。

主な実現効果として、次を挙げることができる。

- 複数ビジネスユニットにまたがる仕様調整が減少
- ビジネスに見合ったビジネスユニット独自仕様の実現
- ビジネス別の同時併行開発が可能
- システム変更時の非対象ビジネスユニットへの影響が減少

これにより、ビジネスユニットごとのきめ細かいサービスを実現するシステム環境を整備した。

3.2.2 項目No. 方式の適用

MOLDIS のオンライン リアルタイム処理では、一定時間内に大量のオーダーを効率的に処理するために、非会話型の通信方式 (APP 間通信方式) を採用している。この方式はビジネスユニットごと又は端末拠点ごとの要望に沿った入出力項目の運用が可能であるが、これまでは固定フォーマットによってデータの送受信を行ってきたため、独自項目の編集やデータの二次加工が困難であった。これを解決するため、伝送される全項目にユニークな番号を与え、この項目の番号とともにデータを送受信する方式 (項目 No. 方式) を適用した。項目 No. 方式の伝送データ構造を図 4 に示す。

実現効果としては、必要な項目を自由に取り出して加工することが容易となるため、ビジネスユニットごと又は端末拠点ごとに固有の帳票が作成可能となった。一方、アプリケー

ションの開発についても、入出力設計や確認テストが簡易化され、ホスト側、端末側ともに開発負荷が軽減されるため、改訂に対する迅速な対応が可能となった。

3.2.3 ネットワークの拡大

はじめに述べたように、消費者ニーズの多様化が進む今日では、販売店における発注業務や発注オーダーの管理業務もますます多様化・複雑化が進んできた。そこで、発注業務の省力化やオーダー管理業務のサポートとして、ネットワークを販売最前線へ拡大・接続し、発注処理や在庫・オーダー情報の照会をオンラインでサービスする仕組みが必要となった。

しかし、当社におけるビジネスユニットごとの商流・業務形態を考慮した場合、すべて同じ形態でネットワークを拡大することは適切ではないため、次のような方法でネットワークを拡大した。

(1) 端末前出しによる拡大

“たいあつぷネットワーク” (産業機器系)

“一Q さん” (自動車系)

ルートセールスを基盤とする産業機器系などでは、販売ルートとの関係を更に密接なものとするために、販売店や特約店 (二次客先) へ端末を前出しすることによってネットワークの拡大を図った。

実現方式としては、MOLDIS の端末を販売店・特約店へ設置し、受発注を行う方式で、ネットワークの拡大を容易に

するため、システム変更時に端末側アプリケーションの改修を伴わない会話型通信方式 (MFS^(注1) 直結方式) を採用した。さらに、新たな機能としてあいまい (曖昧) 検索機能、在庫照会連動発注機能等を追加し、ユーザ側での操作性を向上した。

(2) 休日・夜間オンラインサービス

“FAX-OCR” (家電系)

販売店でのオンラインサービス向上をねらいとし、販売店に設置された通常の FAX による当社製品の発注と在庫照会を可能とした。販売店ではオーダーを FAX-OCR 用の用紙に記入の上、販売会社に FAX を入れるだけでよく、処理結果は送信元の FAX に出力される。

販売会社には OCR リードを接続した三菱オフィスサーバ “M80” が設置されており、読み取ったデータを変換して MOLDIS ホストに自動送信する。このシステムは販売会社でのデータ変換を自動的に行うため、休日・夜間における発注と照会が可能となった。

(3) 他社ネットワークシステムとの接続 (家電系)

一方、家電系では取引相手の発注形態 (センター一括発注や店舗ごとの発注等) に合わせた多様なオンラ

(注 1) “MFS” は、米国 IBM Corp. の端末画面の制御機能である。

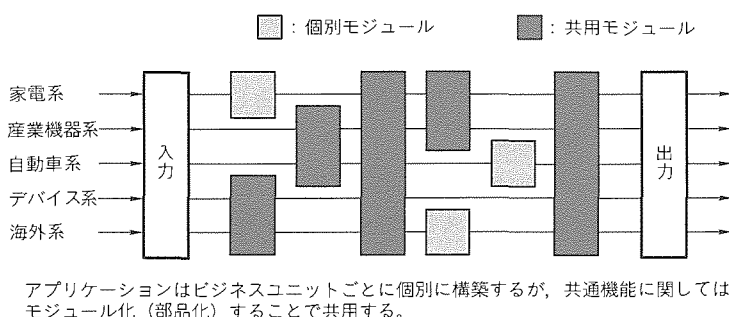


図 3. モジュール構成

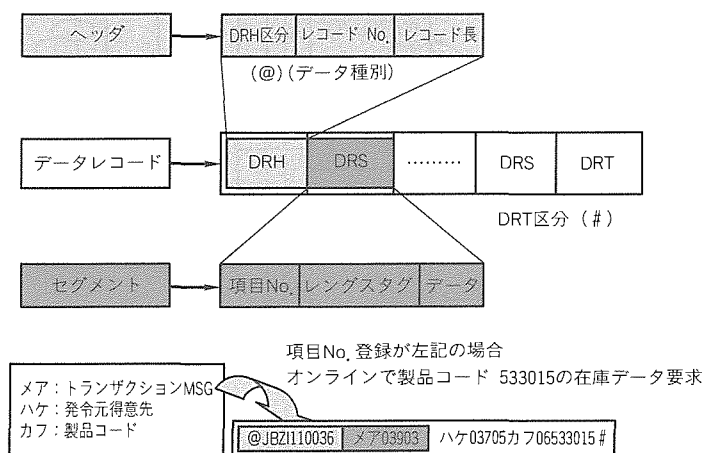


図 4. 項目No. 方式伝送データ構造

イン接続の実現が必ず(須)である。

(a) 家電系販売会社 M80 オンライン取引 (EOS)

量販店又は VAN センターのホストから発注されたデータを、ファイル伝送方式で販売会社の M80 で受信し、データのフォーマットを変換後、MOLDIS オンラインに投入する。データ変換を M80 側で行うことにより、量販店側の要求仕様に合致した納品書の作成を実現している。

(b) MOLDIS オンライン取引 (EDI)

量販店又は VAN センターのホストから発注されたデータを、ファイル伝送方式で直接 MOLDIS ホストに受信する。ファイル伝送の Protokol としては EIAJ, JCA などの手順に対応しており、量販店からの一括発注など大量データ授受に効果を発揮している。

(c) 量販店 VAN (RV) / 電材 VAN (DV)

量販店及び電材店の各店舗に設置された端末と MOLDIS を、TWIN'ET^(注2) 経由でネットワーク接続した。これによって各店舗からの発注・在庫照会処理をオンラインリアルタイム方式で実現可能とした。

以上のようなネットワークの拡大により、販売最前線のデータ収集が実現され、最新情報の把握と販売情報の精度向上が図られた。これによって販売とリンクした生産を行うための情報を得ることが更に可能となり、即納・即答体制が整備された。

3.2.4 EDP 処理方式の機能向上

このようなビジネスユニットごとに異なる要求機能を実現するために、次のような EDP 処理方式を採用した。

(1) プログラムの構造化

アプリケーション処理における共通処理をサブルーチンとして構造化することにより、アプリケーションプログラム開発・保守の省力化と信頼性の向上を図った。

構造化の対象としては、①データ通信処理、②データベース処理、③その他補助機能、があり(表4参照)、①と②ではデータ通信とデータベース関連の処理を業務アプリケーションから切り離し、独立したモジュール構造とした(概念図を図5に示す)。

これによって、多様な通信形態に対しても業務アプリケーションを一本化できることや、データ

(注2) “TWIN'ET”は、NTTデータ通信㈱が提供する汎用のVANサービスである。

表4. 共通プログラムモジュール

DBIR	アプリケーションとのインタフェース変換 アプリケーション特殊処理(日付判定など) ロード/ダンプ/更新処理
DCIR	入出力インタフェース アプリケーション異常処理インタフェース プログラム間受渡し(PtoP)処理
補助機能	共通連番(注文No.など)採番処理 セキュリティ判定処理

ベース構造の変更やデータのフォーマット変更時の修正を、該当モジュールのみにとどめることを可能とした。

(2) メールボックス

製作所・支社・販売会社・代理店等の周辺システムとの送受信データを管理する仕組みとしてメールボックスを設置し、運営の効率化を図った。製作所などヘファイル伝送を行う場合や、ホスト側の蓄積データを端末側が必要な時点で受信する場合に利用している。

(3) ディレードオンライン処理の採用

大量のデータを扱うため、従来は夜間に行っていたバッチ処理の一部をオンラインサービスの時間帯に実施することによって、端末側で1時間ごとに最新のオーダ状況を確認することなどが可能になった。

3.2.5 複数計算機方式の採用

(1) FEP, BEP 方式の採用

MOLDIS ホスト計算機ではトランザクション管理とデータベース管理にIMS^(注3)を使用してきたが、オンライン時のロギング処理によるディスクへの入出力処理などがネックとなり、処理能力上の限界となってきた。こうした問題を解消するために、ネットワーク管理機能中心のFEP(Front End Processing)とアプリケーション機能中心のBEP(Back End Processing)にIMSを分割した。それぞれの役割は表5に示すとおりである。

これにより、ロギング処理の負荷を分散し、オンラインにおける処理能力を向上させた。また、BEP側にアプリケーション機能を集中させることにより、遠隔地(半導体システムセンター)へのBEP配置を可能とした(図1)。

(2) 障害対策

広域ネットワークを構成しているMOLDISにおいて、基幹処理を行うホスト計算機に障害が発生した場合の影響には計り知れないものがある。従来からホスト計算機の信頼性向

(注3) “IMS”は、米国IBM Corp.の商標である。

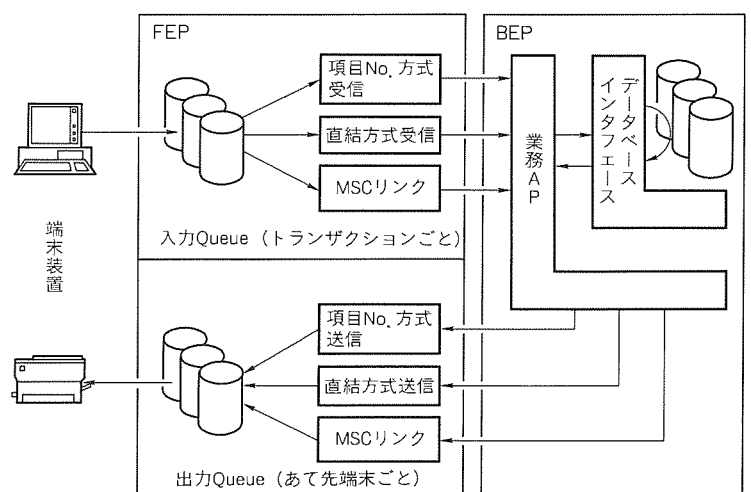


図5. モジュール化概念

表 5. FEPとBEPの役割

F E P	データ通信処理
	トランザクション管理 (振り分け)
	メッセージのフォーマット変換 (入出力時)
	回線制御処理 (オペレータインタフェース)
B E P	BEP障害時折り返し機能
	アプリケーション処理
	受注、照会などの業務処理
	ジャーナル処理 (アプリケーションログ取得)
	ディレードオンライン処理
	センター入力処理
	夜間バッチ処理
	ファイル伝送データ投入、抽出処理

上対策としてはデータベースの二重化やネットワークと一元化した統合監視運用などを行っているが、今後はホスト計算機本体の障害発生に対して、FEPのホットスタンバイやホスト計算機設置場所が災害に見舞われた場合を想定したバックアップセンターの設置を検討している。

(3) 開発・保守用計算機の設置

これまで、MOLDISのオンラインテストを実施する場合には、オンラインサービスを停止するか、又はオンラインサービスの時間外にテストを行ってきた。しかし、ネットワークの拡大に伴い、オンラインサービスを停止することなく端末の接続テストやシステム開発を行うことが必要となってきた。そのため、1台の計算機をPR/SM^(注4)によって論理的に分割し、通常運用と開発保守用のオンライン環境を分離す

(注4) “PR/SM”は、米国IBM Corp.の計算機論理分割機構である。

ることで、オンラインサービス時間にユーザの接続テストが実施可能となったほか、通常運用に対するセキュリティの向上を実現した。

(4) システム運用の効率化

複数計算機システムを実現するための自動監視機能や制御機能を追加することで、ホスト計算機システムの規模拡大に伴うオペレータの人員増を抑制した。また、計算機間でのハードウェア資源を共用するためのソフトウェアを導入し、システム間での排他制御を行っている。

4. む す び

以上述べたように、MOLDISのシステム革新により、商流・業務形態別のネットワーク接続、ビジネスユニットごとの要求機能実現、オンラインサービスの向上などを実現し、当社営業力強化及び販売店の業務効率化に向けたシステム環境が整備された。今後は運用状況を十分調査した上で、ビジネスユニット別の更なる個別要求を迅速・的確に実現し、システムの拡張及び安定稼働と効果創出の早期化を図っていくこととしている。

ネットワークの拡大によって、MOLDISホスト側における市場情報の充実が図れたが、情報を有効活用するための手段(EUC機能強化、基幹システムからのダウンロード、経営情報のデータベース化等)を整備し、ユーザ側での情報入手のリアルタイム化の促進や利便性向上を図ることが今後の課題として挙げられる。

中国地方建設局浜田工事事務所納め “道の駅”情報ターミナルシステム

大石將之* 森本邦明* 井上勝雄** 深川友賀**

1. ま え が き

近年の車社会の急激な進展に伴い、道路交通が増大し、女性や高齢者ドライバーが増加する中で、建設省では安全で快適な道路交通環境を確保する目的で、休憩施設と地域振興施設を一体化した新しいタイプの複合多機能型休憩施設（これを“道の駅”という。）を整備中であり、既に全国で175か所（平成6年8月4日時点）の“道の駅”が誕生している。このような背景の中で、中国地方に平成6年6月28日“道の駅ゆうひパーク三隅”が、また、同年7月12日“道の駅ゆうひパーク浜田”が相次いでオープンした（図1）。

本稿で紹介する“道の駅”道路情報ターミナルシステムは、この“道の駅”の三つの機能すなわち休憩機能・情報交流機能・地域の連携機能のうち、主に二番目の情報交流機能を実

現するものであり、来訪するドライバーに対し、種々のメディアを駆使して道路交通情報・地域情報等を分かりやすい形で提供している。

2. “道の駅”コンセプト

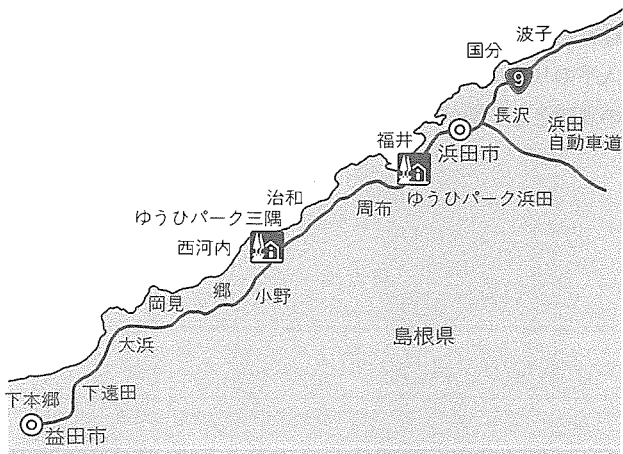
2.1 “道の駅”とは

“道の駅”は、道路を快適に利用することができるようにという発想から生まれたスポットである。すなわち、ドライバーには休憩のためのパーキングエリアとして、また、地域にとっては情報発信基地として、地域と道路をつなぐ“ふれあいの場”として期待されている。また、道路交通面からは、長距離のドライバーが増え、女性やお年寄りのドライバーが増えている中で、円滑な交通の“ながれ”を支えるための、駐車や休憩ができる快適な“たまり場”としての役割も重要視されている。

2.2 情報ターミナルコンセプト

この“道の駅”に設置する情報ターミナルの基本コンセプトは、図2に示すように“知る”“憩う”“遊ぶ”の三つから構成される。これらを大別すると、情報提供を主とした“知る”のメインシステムと“憩う”“遊ぶ”のオプションシステムの二つに分類できる。“知る”の領域はさらに、データ系の“分かる”と、映像系の“見る”，音声系の“聴く”の三つのレベルから成る。そして“遊ぶ”と、“憩う”のオプションシステムは、道路利用者に情報提供以外の付加価値を提供するサービスである。

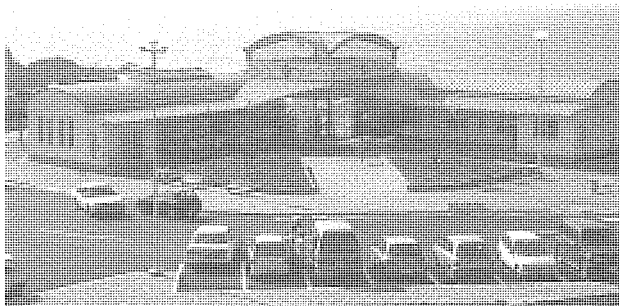
今回の“ゆうひパーク三隅”及び“ゆうひパーク浜田”では、“知る”の領域を中心に設計しており、データ系の“分かる”



(a) 今回オープンした“道の駅”



(b) ゆうひパーク浜田



(c) ゆうひパーク三隅

図1.“道の駅”

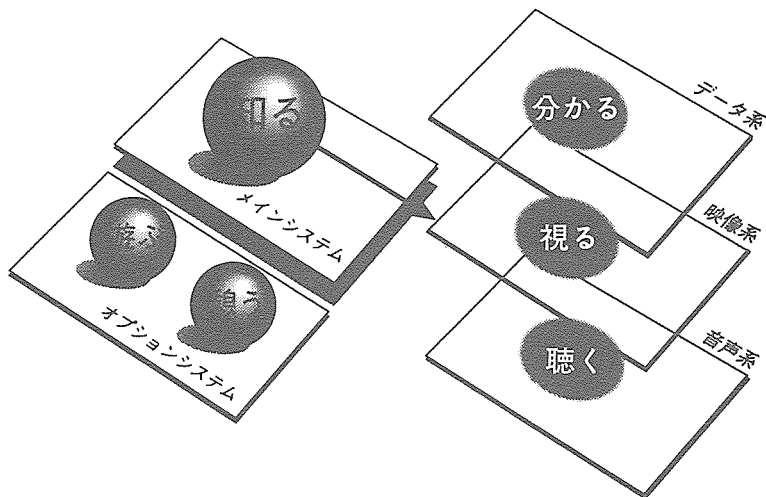


図 2. “道の駅” 情報ターミナルコンセプト

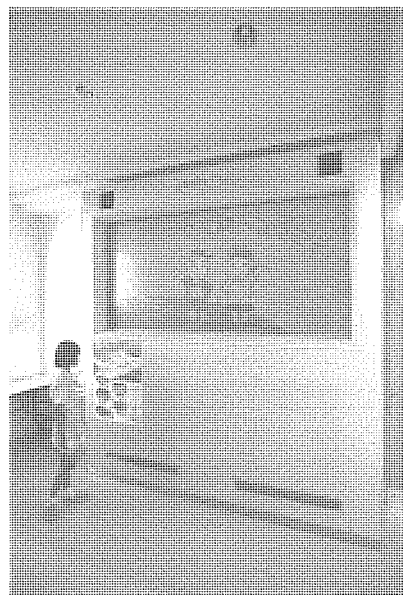


図 3. 道路情報パネル設置状況

にルートマップを、映像系の“見る”に道路情報パネルと各 CRT モニタを採用している。

3. 情報提供内容と情報の収集方法

3.1 情報提供内容

このシステムが提供する情報は、道路交通情報と、地域・その他情報に大別され、以下の情報提供を行っている。

(1) 道路交通情報

道路気象情報：雨量，積雪，気温，路温

路面情報：凍結，湿潤，積雪

トンネル警報：事故，火災，作業中，片側通行

道路規制情報：通行止め，チェーン規制，片側通行

気象警報：大雪，大雨，雪崩など

工事予告：工事予告

(2) 地域・その他情報

行政PR： “道路をまもる月間” “河川愛護月間” など

クイズ： 道路に関するクイズ

観光情報他： 地域イベント案内，観光案内 (将来) など

3.2 情報の収集方法

(1) 道路交通情報

浜田工事事務所管内の情報や中国地建管内の他事務所の情報は、既設の道路交通情報システム集配信装置にすべて入力されているので、この装置とオンライン接続をして情報を収集している。一方、道路規制情報，工事予告情報，気象警報などのオフライン情報は、その都度システムに手動入力している。

(2) CCTV 映像

浜田工事事務所管内の CCTV カメラ映像を情報ターミナル放映するために、光ファイバケーブルを事務所-ゆうひパーク浜田間に布設している。現在は、各 CCTV カメラと事務所の間が未接続のため放映されていないが、近い将来、接続し放映される予定である。



図 4. 道路情報コーナーと隠しカメラ (天井)

4. システムの特長

4.1 システムの特長

このシステムの特長を以下に示す。

(1) 大型 LED 情報板によるカラーアニメーション表示

今回採用した道路情報パネルは、16 階調 256 色のアニメーション機能及び音声・音楽出力機能を持っており、分かりやすく飽きのこない情報提供を可能としている (図 3)。

(2) 自由な映像編集機能と自動番組スケジュール機能

映像編集は MS-Windows^(注1) グラフィック上で、映像の入力・編集・登録が容易に行える。また番組作成機能により、当日の番組スケジュールを任意に設定又は変更が可能である。

(3) 分散処理システムによるフレキシブルな構成

事務所に設置した情報ターミナル制御装置・編集装置は、機能分散によるマルチ CPU 方式を採用しており、増設等に対して柔軟な対応ができる構成としている。

(4) 監視カメラによる道路情報コーナーの無人監視

(注 1) “MS-Windows”は、米国 Microsoft Corp. の商標である。

この“道の駅”情報ターミナルは無人運転となっている。そのため、セキュリティ対策と設備の運転監視及び道路情報コーナの状況監視等の目的で隠しカメラを設置し、事務所でモニタを行っている(図4)。

4.2 大型LED情報板による情報提供

このシステムの中心となるのは、大型LED情報板による

道路情報パネルである。この道路情報パネルは、“道の駅”を訪れる不特定多数の人々が親しみを持てるような情報の提供方法を目指した。具体的には“ゆうひパーク”を象徴したキャラクターが登場するアニメーション表示や、明るい雰囲気

のBGMを採用した。

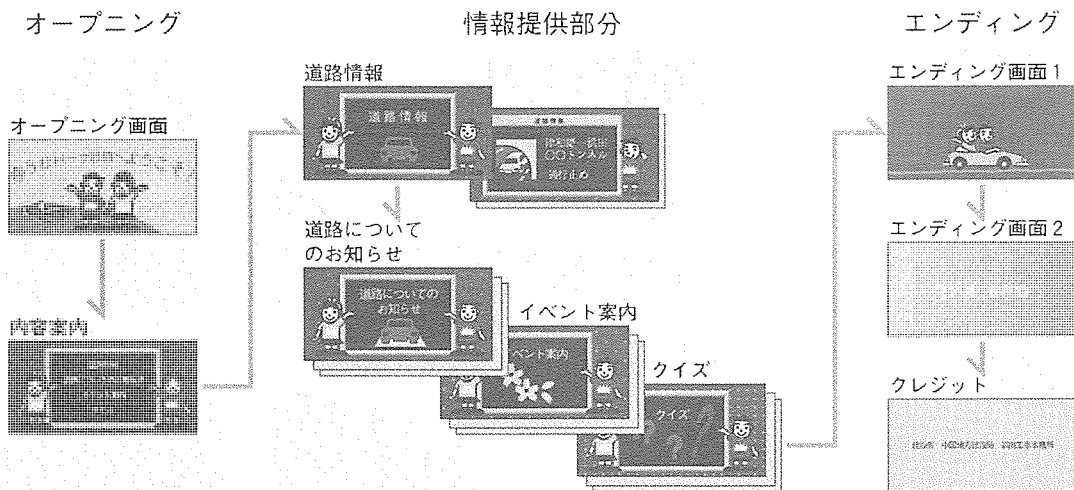


図5. 道路情報パネル表示制御フロー

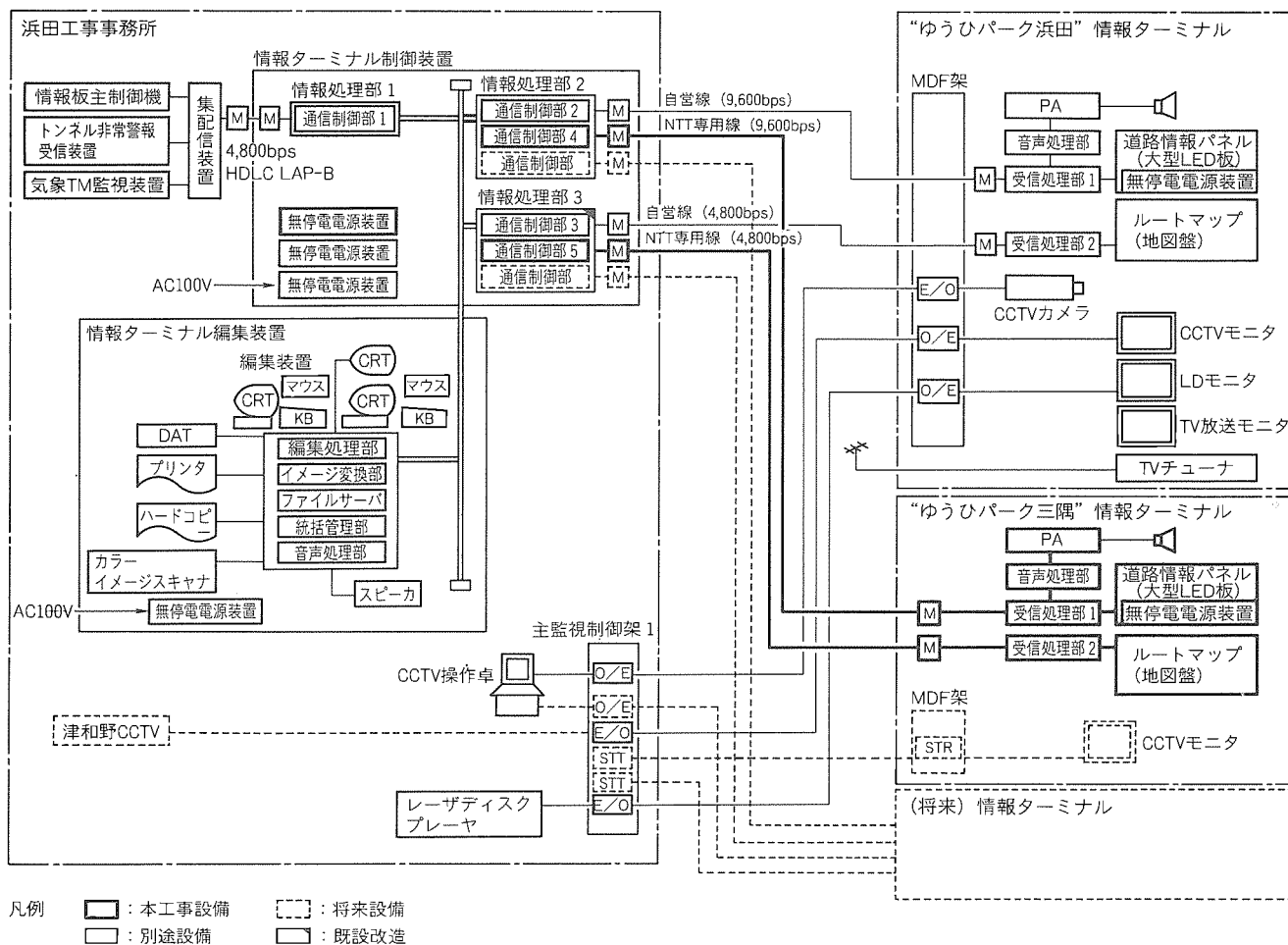


図6. システム構成

表 1. 情報ターミナル制御装置の仕様

機 能	既設道路情報システム集配信装置から道路情報板データ・道路気象データ・トンネル警報データ等の道路交通情報を受信し、LANを経由して情報ターミナル編集装置に送信する。また、情報ターミナル編集装置からの表示編集データを、道の駅情報ターミナルに送信する。			
構 成	(1)情報処理部 1 × 1 式 (2)通信制御部 2 × 1 式 (3)通信制御部 3 × 1 式	(4)LAN接続部 × 1 式 (5)LAN × 1 式 (6)モデム × 6 台	(7)無停電電源装置 × 1 台 (8)収納架 × 1 架	
形 状	屋内自立型 (W)630 × (H)2,300 × (D)660 (mm)			
通 信 仕 様	用 途	情報交換用	対道路情報パネル通信用	対ルートマップ通信用
	方 式			
	通 信 方 式	全二重通信	全二重通信	全二重通信
	通 信 速 度	4,800 bps	9,600 bps	4,800 bps
	通信制御手順	LAP-B (HDLC-BA)	無手順	無手順
	接 続 方 式	ポイントツーポイント	ポイントツーポイント	ポイントツーポイント

情報提供部分、エンディングの3部から成っている。

オープニングでは、画面に登場したキャラクターが語りかけることで視聴者の注意を引いた後、提供する情報の全体概要を知らせ、スムーズに次の画面につながるようにしている。

中心となる情報提供部分は、情報を、道路情報・道路についてのお知らせ・イベント案内・クイズの四つのカテゴリに分けた。道路情報では、このパネルの主目的である周辺道路に関する情報を提供する。各項目ごとにシンボルマークを作成し、表示エリアに文字情報と共に表示することで、道路状況を直感的に把握しやすいよう配慮した。キャンペーン、各地イベントなどの関連情報は、この後の、道路についてのお知らせ・イベント案内・クイズで提供される。以上の各カテゴリは、タイトル画面と内容画面がセットになっており、男の子と女の子のキャラクターが交互に内容を紹介したり、BGMを変えることで、カテゴリ間の移り変わりを明確にして、情報が混乱しないようにした。

エンディングは情報提供部分が終了した後、クイズの最後の画面につながって現われる。ここでもキャラクターがせりふ(台詞)をしゃべり、これによって一連の情報提供が終了したことを伝える。

5. システムの構成

5.1 システム構成

このシステムは、

情報ターミナルセンタ設備	1 式
情報ターミナル端末設備	2 式

から構成される。図 6 にこのシステムの系統を示す。

5.2 主要機器の機能と仕様

(1) 情報ターミナル制御装置

この装置は、既設道路情報集配信装置からの道路情報板データ・道路気象データ・トンネル非常警報等の情報を受信する機能と、情報ターミナル編集装置からの表示編集情報を情報ターミナル端末装置へ表示制御出力する機能を持っている。表 1 に仕様を示す。

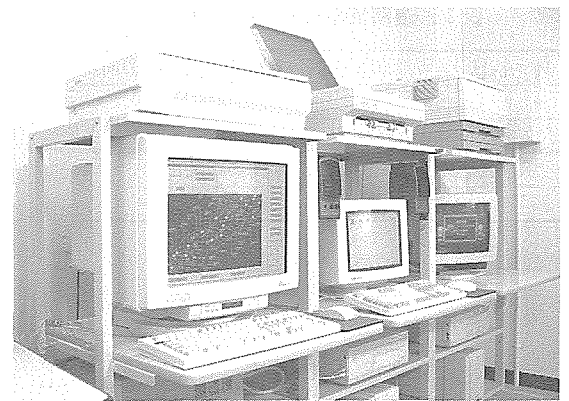


図 7. 情報ターミナル編集装置の外観

(2) 情報ターミナル編集装置

この装置は、下記の機能を持ち、システムの中核的役割を果たしている。

- (a) 集配信装置からの受信データのチェック・格納
- (b) 道路情報パネル表示制御データの編集・蓄積
- (c) ルートマップ表示制御データの編集・蓄積
- (d) カラーイメージスキャナ、マウス、キーボード等による道路情報パネル表示データの編集・登録・保存
- (e) ルートマップスクロール表示文章の編集・登録
- (f) 道路情報パネル表示制御スケジュール運転
- (g) システム管理及びシステムの異常監視処理

図 7 にこの装置の外観を、表 2 に仕様を示す。

(3) 道路情報パネル

幅 2m × 高さ 1m の大型 LED 情報板であり、512 × 240 ドットの分解能で、4.2 項で述べた情報提供を行う。表 3 に仕様を示す。

(4) ルートマップ

模式図化した道路地図上に“道の駅”周辺の道路や観光名勝地等を分かりやすく表示するとともに、現在の道路気象情報の数値表示やイベント情報のメッセージ表示を行う。また、通行規制区間においては、主要道路部に埋め込んだ LED が当該区間での警告表示を行えるようになっている。表 4 に仕

表 2. 情報ターミナル編集装置の仕様

機 能	情報ターミナル制御装置から送信されたデータを受信し、データの編集・作画・登録等を行う。情報ターミナルへの表示制御データを情報ターミナル制御装置へ出力する。また、システム全体の管理機能を持ち、CRT監視、記録処理等も併せ行う。			
構 成	(1)統括管理部 × 1 式 (2)編集処理部 × 1 式 (3)サーバ部 × 1 式 (4)イメージ変換部 × 1 式	(5)音声処理部 × 1 式 (6)DAT × 1 台 (7)CRTディスプレイ × 3 台 (8)キーボード、マウス × 2 式	(9)ハードコピー × 1 式 (10)プリンタ × 1 台 (11)カラーイメージスキャナ × 1 台 (12)LAN制御部 × 1 式	(13)卓 × 3 台 (14)無停電電源装置 × 1 台
形 状	OAデスク型 (3 台連結) (W)2,100×(H)1,190×(D)675 (mm)			
仕 様	1. 画像編集装置 ●語長 32ビット ●主メモリ 2. ハードコピー ●記録方式 熱転写方式 ●用紙サイズ A4 (カラー) 3. カラーイメージスキャナ ●用紙サイズ A4 ●解像度 300dpi 4. CRT ●表紙サイズ 19インチカラー ●解像度 1,280×1,024ドット 5. プリンタ ●記録方式 レーザプリンタ方式 ●用紙サイズ A4/B4 6. LAN ●ネットワーク方式 バス型 ●アクセス方式 CSMA/CD方式			

表 3. 道路情報パネルの仕様

本 体 寸 法	(W)2,055×(H)970 (mm) (LED面)
ド ッ ト 数	512×240ドット
表示文字数	(W) 32文字×(H) 15段
表 示 色	256色 (赤16階調×緑16階調)
図 形 表 示	アニメーション (動画, 静止画)

表 4. ルートマップの仕様

本 体 寸 法	(W) 3,190×(H) 2,700×(D)500 (mm)
スクロール文字表示部	12文字スクロール (120文字/1メッセージ)
テレメータ表示部	雨量 (mm/h) 路温 (°C) 積雪深 (cm) 路温状況 (凍結情報) 気温 (°C)
トンネル警報表示部	通常 (緑) 警報 (赤) 作業中 (だいたい)
LEDルート表示部	通常 (緑) 通行止 (赤) チェーン規制 (だいたい) 終日片側通行 (だいたい)

様を示す。

6. む す び

“道の駅”は、人と地域と道路がふれあう“にぎわいの場”である。その中で情報ターミナルシステムは、人と地域を結ぶ情報交流機能として、その役割がますます高くなっている。

今回のシステムでは、情報提供メディアとして大型 LED 情報板が採用されたが、大型プロジェクトによる情報提供方

式を採用している事例もある。情報提供メディアの差異はあれ、要は提供する情報提供ソフトが重要であると考え。

人に分かりやすく、的確に、かつ、飽きのこない魅力ある情報提供を行うためには、映像編集システムの充実とオープン後のソフト製作体制の確立が必要不可欠であり、今後の課題である。

終わりに、このシステム製作に際し種々御指導いただいた中国地方建設局浜田工事事務所の関係各位に謝意を表する。

東北電力(株)納め地中線管理設計システム

滝口祐二* 三国俊晴* 岩上克義** 高橋正一** 森田淳士***

1. ま え が き

近年の都市化及び地中化の進展や電力需要の増大に伴い、地中配電設備に関する設備管理、図面管理や工事設計などの業務が年々膨大かつ複雑化しており、従来からの手作業を主体とした業務処理では的確な設備運用や高度化する要請に対して、迅速な対応が困難になってきている。

1994年6月に東北電力(株)、東北情報ネットワークサービス(株)と三菱電機(株)との共同開発で、地中配電設備の管理・設計業務を大幅に効率化する目的で地中線管理設計システム(配電地中線マッピングシステム)を完成し、東北電力(株)仙台営業所に納入した。このシステムは、地図情報処理技術、CAD技術を融合し、地中配電線路の工事図面作成から工事費の積算、図面・台帳の更新までを一貫して処理するものである。システム構成としてはEWS(エンジニアリングワークステーション)を活用したクライアント/サーバ方式による分散構成となっており、ホストシステムとのオンライン関係も実現している。

以下にシステムの概要と特長を示し、大規模地図・図面情報を持つ地中設備管理・設計処理のシステム構成方法、データ管理手法、CAD設計と積算方式について要点を述べる。

2. システムの概要

地中配電設備は、布設図と各種台帳によって管理されている。これまで地中配電線工事は、工事箇所の現場調査を行い、得られた設計・工事情報を基に手書きで設計図面を作成し、資材費/工費を手作業主体で積算処理していた。

地中線管理設計システムは、管路、マンホール、機器、ケーブルなどの地中配電設備の工事図面を地図情報を基にした

布設図上でCAD設計し、資材費/工費の自動積算、工事図面と工事内訳書/資材内訳書の自動作成を行う。工事完了後は、竣工の翌日に布設図、設備台帳を自動更新し、最新設備図面の管理・検索ができる。

2.1 システムの位置づけ

配電部門で管理されている設備は、架空線と地中線に大別できる。架空配電線は面的な広がりを持ち設備数量も膨大で異動量も多いが、地中配電設備は、都市に集中しており架空配電設備よりも数量は少ない。しかしながら、工事設計に際して必要となる図面精度は高く、データ量も膨大である。また、工事内容が複雑で多岐にわたり、平面的な設計以外に設備の構造設計・土木設計・電気設計まで実施する必要がある。

地中線設備を管理するための布設図及び工事図は以下の特長を持っている。

(a) 布設図

A0サイズ、縮尺1/500(実距離500m×375mメッシュ)。地形図と管路・マンホール・機器・ケーブルなどの地中配電設備状態をシンボル化して表記

(b) 工事図

工事対象域に対し、既設設備も含めた各種配電地中設備を工事するための設計図。平面図・掘削図・縦断図・構造図・展開図などの複数図面で構成

配電地中線設備の工事設計業務の流れを図1に示す。このシステムは、設計・積算・設備管理までのトータルシステムとして業務支援するもので、以下の効果をねらっている。

(1) 地中線設計業務の省力化と効率化

- CAD設計による工事図作成の精度向上と効率化
- CAD設計情報を基にした自動積算展開による省力化
- ヒューマンエラー防止による積算処理の精度向上

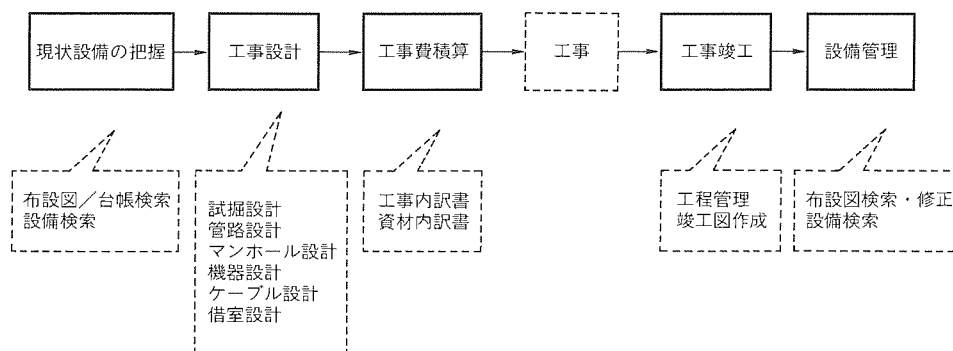


図1. 地中線工事業務フロー

(2) 図面・設備管理業務の一元化と省力化

- 図面・台帳の保管・修正の省力化
- ホスト設備管理情報との自動連係による精度向上
- 図面保管の省スペース化

(3) お客様サービスの向上

- 設備・図面の検索時間短縮と設備照会の迅速化

2.2 システム構成

このシステムは、小型・高性能な最新 EWS を用いて大容量の地図情報を高速で処理し、ユーザフレンドリなマンマシンインタフェースを提供する。

全体システムの概要を図 2 に示す。実業務に使用する営業所システムとは別に、保守運用箇所ハードウェアを設置している。営業所システムは、保守運用システムとホストシステムに接続しており、保守運用システムからは初期データの配信、オンライン保守が行える。また、ホストシステムとの連係機能により、設備・定数のデータ交換が可能である。

システムのハードウェア構成を図 3 に、主要機器仕様を表 1 に示す。ハードウェア構成の特徴を以下に示す。

(1) 最新 EWS によるクライアント／サーバ構成

サーバ側に設備・地形図などのデータベースを配置し、設計端末でマンマシン処理を行う。業界標準のソフトウェアによってクライアント／サーバ構成を実現しており、拡張・可搬性の高いソフトウェア構成となっている。サーバは設計端末機能を兼ねている。

(2) 広域ネットワーク構成の活用

FDDI, TokenRing, Ethernet^(注1)を介して、ホストシステム (4 Mbps) 及び保守運用システム (1.5 Mbps) と連係している。また、設計端末 1 台を別棟に設置し、FDDI 経由で LAN 間接続をしている。ホストシステムとはオンライン画面エミュレーション、設備・定数のファイル転送を行い、保守運用システムとは図面伝送、システムメンテナンスを行う。

(注 1) “Ethernet”は、米国 Xerox Corp. の商標

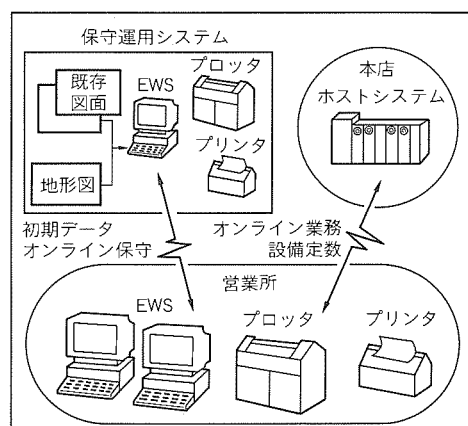


図 2. 全体システム概要

3. システムの特長

このシステムのシステム構成、処理方式は以下の特長を持っている。

3.1 最新 EWS と電力マッピングパッケージによるシステム構築

RISC アーキテクチャを搭載した最新の EWS を採用し、電力マッピングパッケージ (MD-map) 上に応用ソフトウェアを構築している。

(1) EWS によるシステム構築

小型・高性能の EWS でマッピングサーバ・設計端末を構成し、省スペース・省電力化を実現した。サーバ本体に小型・大容量ハードディスク (2 G バイト / ユニット) を内蔵し、大容量図面情報を管理している。特別な空調・電源設備を必要とせず、サーバを含めた全装置が通常の事務所環境で使用できる。

(2) MD-map によるポータビリティの高いソフトウェア業界標準の UNIX^(注2), X Window^(注3), OSF/Motif^(注4)

(注 2) “UNIX”は、X/Open Company Ltd. がライセンスしている米国及び他の国における登録商標

(注 3) “X Window”は、米国 Massachusetts Institute of Technology (MIT) の商標

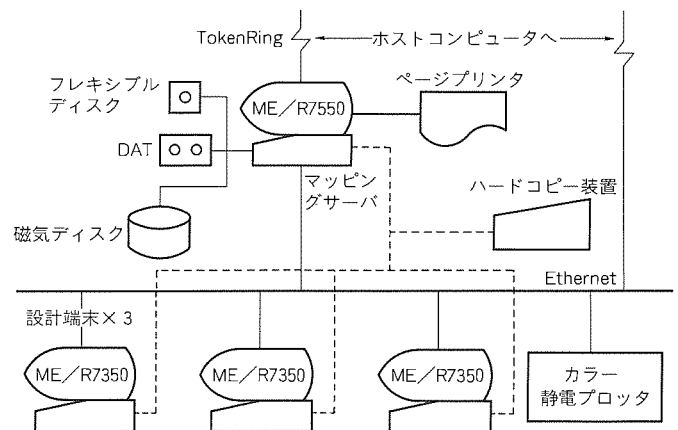


図 3. システム構成

表 1. 主要機器一覧

装置名	概略仕様
マッピングサーバ	ME/R7550 (クロック 99MHz) 主メモリ: 192M バイト, 磁気ディスク: 5.3G バイト 19 インチカラーモニタ DAT・FD ドライブ内蔵 自動シャットダウン装置 (無停電電源連動) 付き
設計端末	ME/R7350 (クロック 99MHz) 主メモリ: 128M バイト, 磁気ディスク: 1 G バイト 19 インチカラーモニタ 自動シャットダウン装置付き
カラー静電プロッタ	最大 A0 サイズ, 400dpi, シングルパス
ページプリンタ	B4/A4 サイズ, 240/300dpi
カラーハードコピー装置	A3 サイズ, 300dpi, 最大 1,670 万色 マルチプレクス付き

表 2. MD-map機能一覧

分 類	機 能	備 考
地図情報管理	DBアクセス	図面テーブル対象
	図形データの編集	
	座標変換	
	コミット・ロールバック処理	
設備データ管理	DBアクセス	設備テーブル対象
	設備ID管理	
	コミット・ロールバック処理	
設計情報管理	DBアクセス	設計テーブル対象
	設計テーブルアクセス (一時記憶)	
	図形の回転／切出し	
	コミット・ロールバック処理	
MDグラフィックス	グラフィックス ウィンドウ操作	
	グラフィックス DBアクセス	
	シンボルの定義登録	
共通コマンド処理	グラフィックス処理	
	ウィジェット処理	
	共通イベント処理	
	共通画面処理	
基 本 処 理	リソース管理	
	コード変換	
	排他管理	
	エラー管理	
	タイマ管理	
図 形 編 集	幾何計算	
帳 票 印 字	帳票印字	・LBPへの印字
	オーバーレイ定義	
図 形 印 字	制御	・プロッタへの印字
	プリミティブ出力	
排他制御支援	排他リソースの定義／専有／開放／リトライ	
自 動 配 置	引出線／付加文字の自動配置	
絵 柄 作 成	設備属性・台帳属性から図形を生成	
モジュール管理	バージョンチェック／配信	

及び汎用リレーショナルデータベース (SYBASE^(注5)) を採用した MD-map (表 2) 上に应用ソフトウェアを構築し、機能追加、ハードウェア拡張に柔軟に対応できる構成とした。階層化したソフトウェア構成を図 4 に示す。

(3) コンパクトなデータベース構成

データベースは、情報を最小限に格納してコンパクト化を図っている。設計処理では、設計件名当たりのデータ量が大きくなるが、EWS の高速性を活用して設計データには原則として既設データを持たない構造としている。また、図面の図形データ (プリミティブ) も極力保管しない工夫を行い、従来方式に比べて約 1 / 2 のデータ容量に圧縮している。

3.2 地中線設備・台帳データベースの構築と管理方式

表 3 及び表 4 に、地中設備管理・設計処理で取り扱う設備と図面の種類を示す。設備種類及び図面種類は多岐にわたり、データ量も膨大である。

(1) 設備・台帳属性からの図面自動生成

初期構築時には、極力少ない情報で多様な設備・図面データベースを構築する必要がある。

このシステムでは設備属性に設備座標を持たせ、属性情報から設備図面を自動

(注 4) “OSF / Motif” は、Open Software Foundation, Inc.の商標

(注 5) “SYBASE”は、米国Sybase Inc.の商標

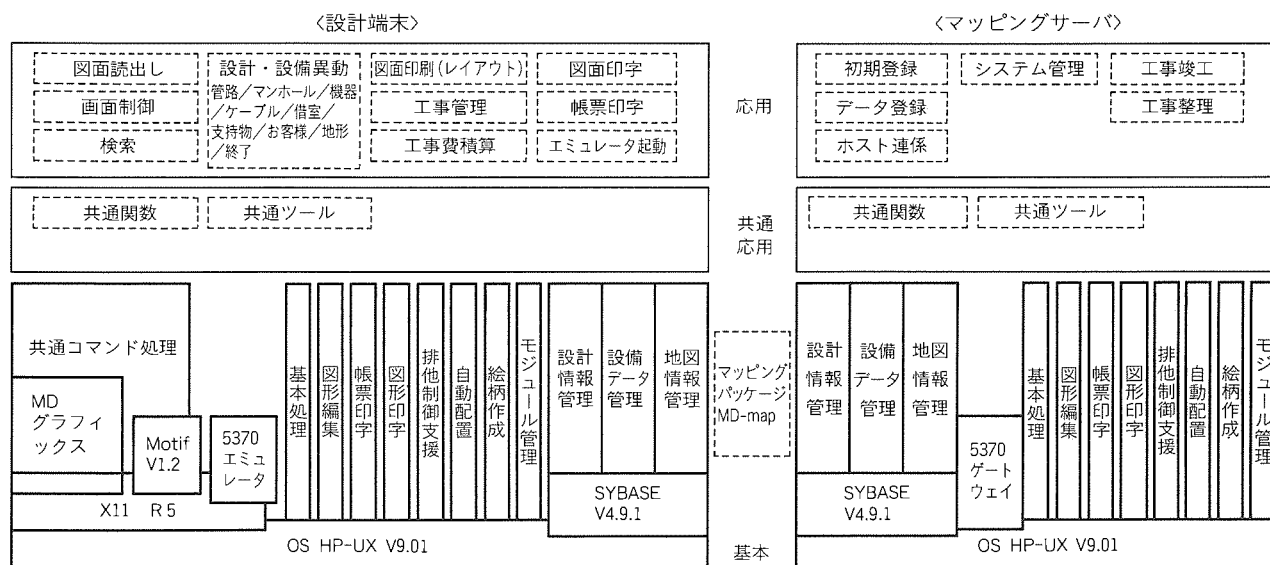


図 4. ソフトウェア構成図

生成して初期データを構築する。台帳類も属性と台帳属性(マンホールの本体・首の寸法値など)から自動生成する。設備図における引出し線の位置・設備番号などの付加文字位置、台帳図面の寸法線・寸法値の位置などは、すべてパッケージ機能で自動配置している。図5に生成した布設図例を示す。

(2) 工事設計データの管理方式

データのコンパクト化、データ不整合・欠損防止のため、性能とのトレードオフも考慮してデータベースを極力正規化(テーブル分け)している。Joinなどリレーショナルデータベース特有機能使用時の性能劣化を防止するため、テーブル

構造、インデックス定義及び検索方式の工夫とチューニングを行っている。

地中線工事は長期にわたるため既設設備が日々変化し、設計内容と既設設備とに不整合が生じることがある。したがって、工事図検索時、設計内容を正として既設・工事設計データをリカバリする方式をとっている。このため、工事図データとして設備異動分のみの図形データを保管し、既設設備・工事指示(注記・挿絵)の図形データ(プリミティブ)は排除している。

(3) 竣工時の設備・布設図自動更新

従来、工事がしゅん(竣)工すると費用処理が行われ、工事内容を人手で布設図に転記していた。このシステムでは工事設計データを用いて、工事内容を設備マスタ、布設図及び台帳マスタに自動反映する。全体のデータベース関連図を図6に示す。

3.3 対話形式設計・積算機能

設計・積算などのCAD業務効率化には、ビジュアルインタフェースが不可欠である。

(1) 平面設計

工事平面図は布設図を切り出して下図とし、この上に工事内容(設備異動の内容)を対話形式で記載(CAD)し作成する。作画においてはマルチウィンドウ、ラバーバンド、ドラッグ

表 3 . 設備一覧 (仙台営業所)

設 備 名	想 定 件 数
管 路	238,000
マンホール	3,600
配電塔 / キャビネット	2,040
変 圧 器	4,000
開 閉 器	6,400
低圧分岐装置	4,800
高圧ケーブル	64,000
低圧ケーブル	16,000
引込みケーブル	56,000
借 室	700

表 4 . 図面一覧

分 類	図 面 名	内 容	想定管理数
布設管理図	管路布設図	管路／マンホール／配電塔などの布設状況を地形図上に記載	500m×375m メッシュで58枚
	ケーブル布設図	上記で機器／ケーブルの布設状況を中心に記載	
マンホール台帳図	マンホール構造図	マンホール構造を三面図で記載	(マンホール基数)
	マンホール詳細構造図	上記をより実態に近く子細に記載したもの	
	管路口一覧	マンホールに接続する管路口の一覧	
	ケーブル一覧	マンホールに施設及びマンホールを通過するケーブルの一覧	
	マンホール展開図	マンホールの管路口・ケーブル・施設配電塔を記載	
借室台帳図	諸元一覧	借室の詳細情報を記載	(借室箇所数)
	借室図面	借室周辺状況，機器の平面配置図，単線結線図を記載	
試掘工事図	工事平面図	管路布設図上に工事内容を記載（＊１）	年間最大工事件数 300件
	試掘掘削図	掘削図／埋戻し内容を三面図で記載（＊２）	
管路工事図	工事平面図	（＊１と同じ）	
	管路掘削図	管路区間の自至２断面の掘削図／埋戻し内容を記載	
マンホール工事図	工事平面図	(工事マンホールに対し台帳図と同じ)	
	マンホール構造図		
	マンホール詳細構造図		
	マンホール展開図		
	マンホール掘削図	(＊２と同じ)	
機器・ケーブル工事図	工事平面図	ケーブル布設図上に工事内容を記載	
	ケーブル一覧	工事ケーブルの一覧	
借室工事図	諸元一覧	(工事借室について台帳図と同じ)	
	借室図面		

ングなどを活用して操作性を向上させている。設備属性の入力ではあらかじめ既定値を表示することで入力操作を削減させている(図7)。

(2) 構造・掘削設計

マンホールの構造・掘削設計では、マンホールの実形に合わせるため、三面図形式でのパラメトリック設計を可能としている。平面設計と同様、既定値寸法表示を行う(図8)。管路の掘削設計は自至の2断面について掘削図をパラメトリッ

ク設計で作成する(図9)。

(3) 縦断設計

縦断図は、工事平面図上で縦断ルートを指定し、管路の延長方向に沿って自動生成する。埋設深さの変更も、この図面上で行うことができる(図10)。

(4) 工事費積算

図11に自動積算のフローを示す。工事設計データから機械処理して、工事に必要な工費と資材を積算定数情報を基に自動展開し、帳票を作成する。

4. システムの機能

このシステムの機能について以下に示す。

4.1 機能構成

システム機能は、通常のユーザ(営業所工事担当者)が使用する対話機能メニューと、保守管理者が使用するシステム管理機能メニューの二つから構成される。システム機能構成を表5に示す。

4.2 業務別機能

(1) 設備検索

布設図検索には、索引図による図番指定、電柱略称(電力内設備管理ID)指定、電柱No.指定、目標名(設備設置場所の名称)指定の4種類の方法がある。表示中の布設図又は工事平面図の上で、マウス指定した設備の属性/台帳図面を検索し、表示・印字ができる。設備条件検索では設備ごとに検索条件を設定し、当該データを検索・抽出して、結果を一覧表に印字する。

(2) 登録図面変更

登録図面(布設図、台帳図、地形図)を対話形式で修正する。布設図変更機能には、設備属性と設備台帳を修正する機

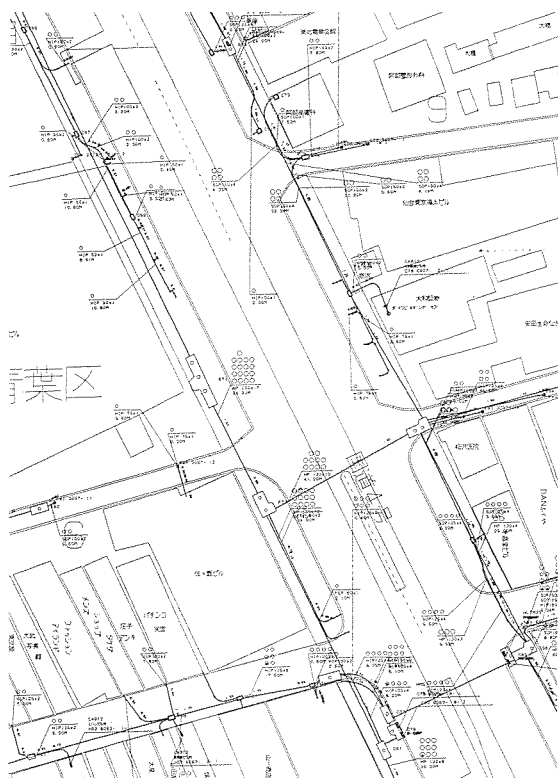


図5. 布設図例

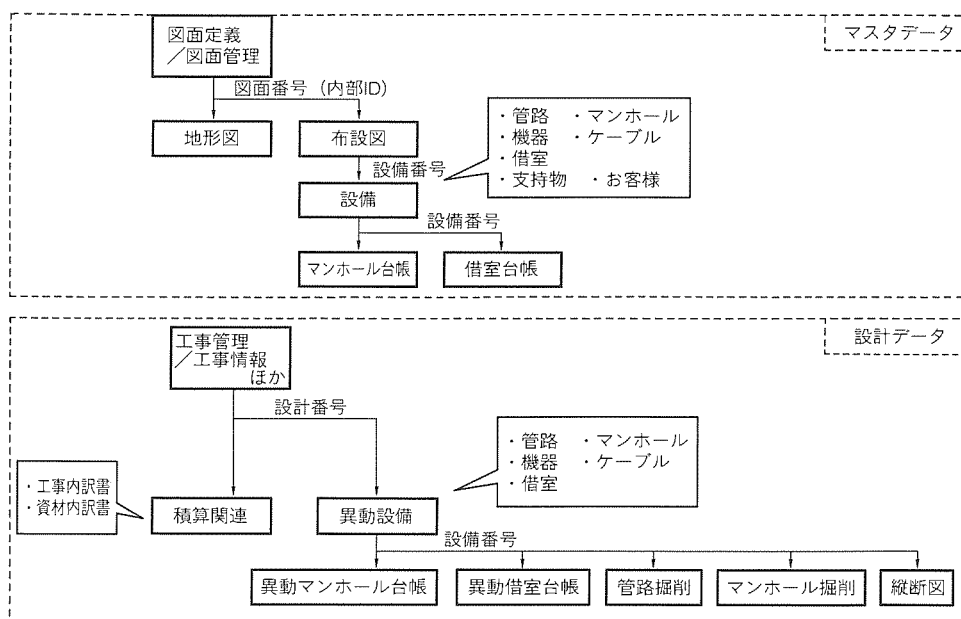


図6. データベース関連図

能があり、修正内容によって布設図上の当該設備図形・シンボルを自動修正する。地形図変更では、線や図形を追加・削除する。

(3) 工事管理

工事 No.，件名，工程情報，積算条件等の工事情報デー

タを登録・修正する。ある工事に対して竣工日が登録された場合、当該竣工日の夜間バッチによる工事竣工処理により、設計データをマスターデータベースに反映する。工事情報は当該工事が竣工された3か月後に自動削除する。

(4) 工事設計

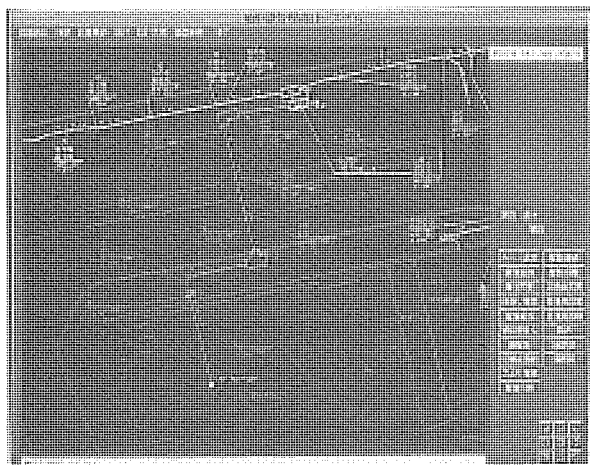


図7. 平面設計画面例

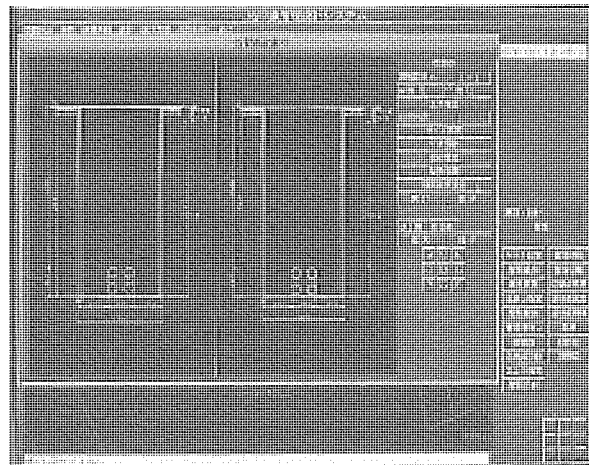


図9. 管路掘削画面例

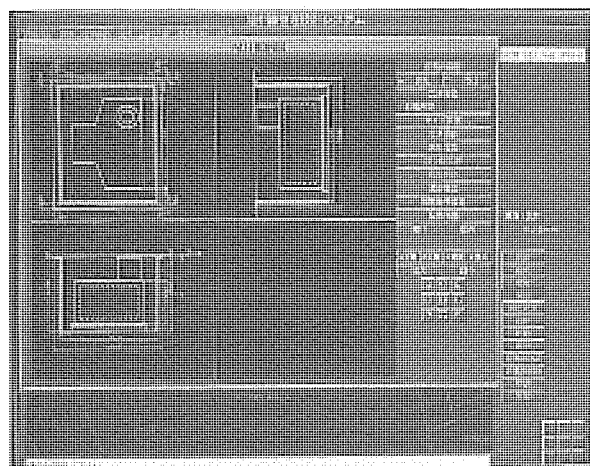


図8. マンホール掘削画面例

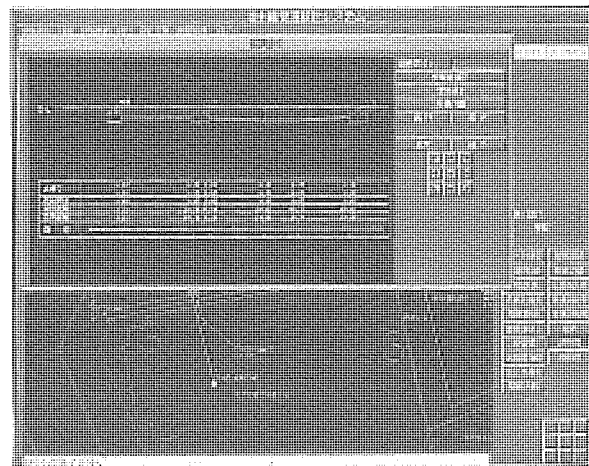


図10. 縦断設計画面例

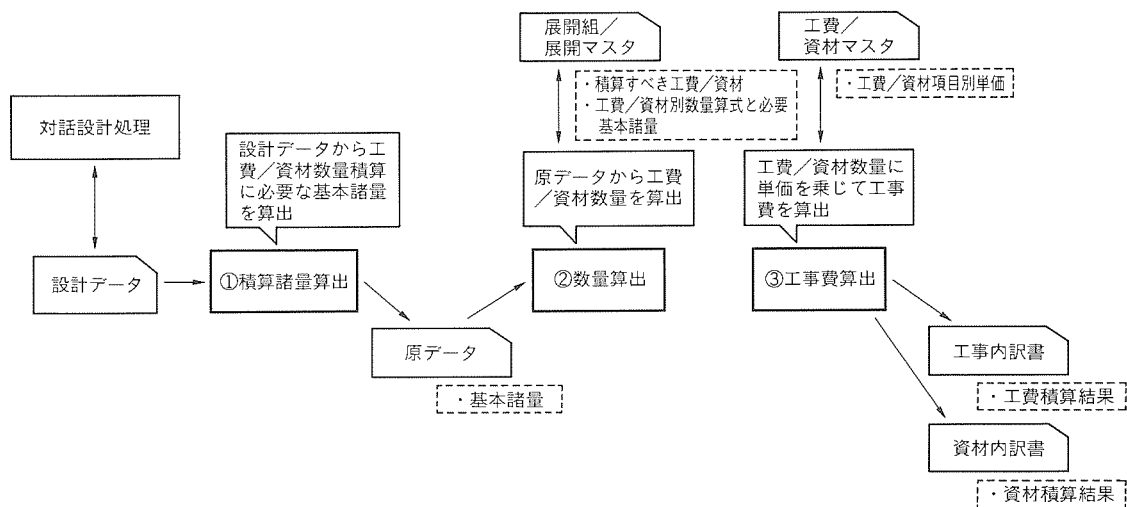


図11. 工事費積算フロー

表 5. 機能構成一覧

業 務 名 称		機 能 項 目		
対 話 機 能	設備検索業務	(1)布設図検索	(2)設備検索 ①属性表示 ②台帳図面表示	(3)設備条件検索・出力
	登録図面変更業務	(1)布設図変更 ①設備属性変更 ②台帳図変更	(2)地形図変更	
	工事管理業務	(1)工事情報登録 ①工事情報登録／訂正 ②工事図面読出し	(2)工事竣工処理 ／取消処理	(3)工事自動整理処理
	工事設計業務	(1)設計図切出し	(2)対話工事設計 ①試掘工事設計 ②管路工事設計 ③マンホール工事設計 ④機器工事設計 ⑤ケーブル工事設計 ⑥借室工事設計	(3)設計図出力 ①図面レイアウト編集 ②工事図面出力
	工事費積算業務	(1)工事費積算処理 ①内訳書生成処理 ②内訳書修正	(2)積算結果出力	
	ホスト連係業務	(1)定数データ連係	(2)設備データ連係	(3)ホスト業務エミュレーション
シ ス テ ム 管	初期登録業務	(1)地形図登録 ①専用フォーマット地形図データ ②IGESフォーマット地形図データ	(2)設備データ登録 (3)布設図生成処理	(4)台帳登録 ①マンホール台帳図データ ②借室台帳図データ
	システム管理業務	(1)定数登録・変更 (2)自動配信	(3)バックアップ／リカバリ	(4)システム支援ツール

表 6. ホスト連係処理

機 能 項 目	システムの特長
定数データ連係	ホストDBに登録されている定数データを“正”として、ホストから毎日ファイル転送される前日分の定数異動データにより、定数DBを自動更新する。 (ホスト側ftpファイル転送を利用)
設備データ連係	布設図修正、工事竣工によって発生した設備異動データを、ホストへ毎日ファイル転送する。ホストDBは同転送データによってDB更新を行う。 (EWS側ftpファイル転送を利用)
DB更新処理	ホスト-EWS間のDB整合性を保つために、上記定数連係と設備連係を一括で行う処理。ホストから転送された定数データによる定数DBの更新後、設備データの比較を行って、差異分のみ設備異動データとしてファイル転送する(リクエスト処理で行われる。)
メッセージ転送	定数/設備のデータ連係時、ホスト運用管理者にファイル転送状態(転送開始/終了、受信成功/失敗)を通知するため、ホスト上のシステム(IBM社: Netviewシステム)によってメッセージ転送を行っている。
ホストエミュレーション	ホスト(IBM)上で稼働中の配電関連システムがEWS上でも利用できるように、エミュレータ(5370JSX-II)を搭載している。 (上記Netviewによるメッセージ転送にも利用)。

工事設計は、設計開始時に工事領域を設定する設計図切出し機能と、各工事種類ごとの設計(図面作成)機能、及び同図面を編集し印字する機能で構成される。以下に各工事種類ごとの設計機能を示す。

(a) 試掘工事設計

試掘工事に対応し、試掘場所を示す平面図、試掘掘削図を作成

(b) 管路工事設計

管路布設ルートを示す平面図、管路区間ごとの掘削図・

縦断面図を作成

(c) マンホール工事設計

マンホール設置場所を示す平面図(管路工事平面図と共用)、マンホールごとの掘削図・展開図・詳細構造図を作成

(d) 機器工事図

配電塔/キャビネットの設置場所、及び同配電塔内に施設される機器(変圧器、開閉器、低圧分岐装置)を示す平面図を作成。設計時には各機器の接続状態を表す回路

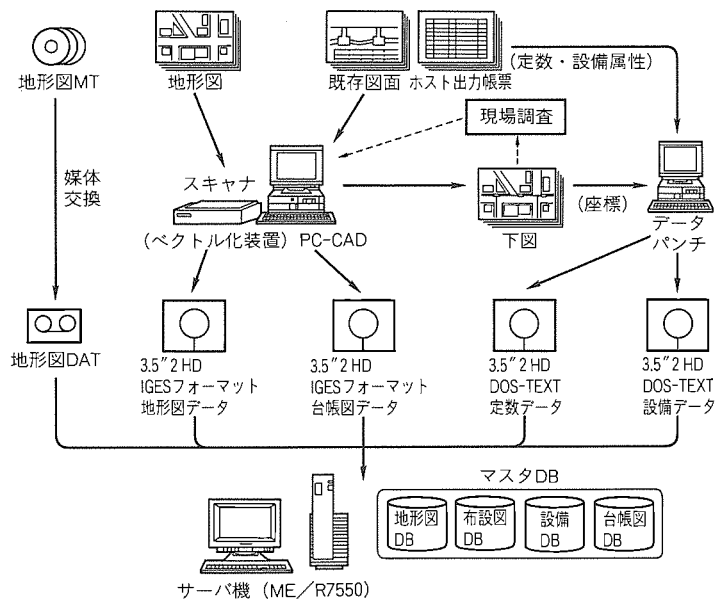


図12. 初期データ構築フロー

図を表示可能

(e) ケーブル工事設計

ケーブル布設状況 (ルート) を示す平面図 (機器工事平面図と共用) を作成

(f) 借室工事設計

借室の場所を示す平面図及び借室内平面図 (機器レイアウト図), 単線結線図を作成

(5) 工事費積算

工事設計で作成した各種図面を基に, 工費及び資材費を自動計算する。計算結果は画面で修正可能であり, その結果を5種類の積算帳票として印字出力する。

(6) ホスト連係

ホスト-EWS間で定数/設備データをファイル転送し,

データの整合性を確保する。ホストエミュレータを搭載しており, EWS上でホストシステムの提供するサービスを受けることができる。表6にホスト連係処理の特徴を示す。

(7) 初期登録

地形図登録機能は, このシステム専用フォーマットで作成されたMT媒体のデータ, 又は汎用CADシステムで作成したデータ (IGESフォーマット) を登録する。設備登録機能は, 既存図面 (工事竣工図面など) 及び既存システムによって各設備の属性と図面内の座標値をFDDから読み込み, 登録する。布設図データは, 登録したコードデータから自動生成する。設備台帳は, 汎用CADシステムで作成したデータ (IGESフォーマット) を登録する。

初期データ登録フローを図12に示す。

(8) システム管理

定数データの初期登録・修正, プログラム/データの自動配信機能, データベースのバックアップ/リカバリなど, システムの保守管理者が行う業務をサポートする。

5. む す び

このシステムは, 地図情報と地中配電線設備設計CADを融合したマッピングシステムであり, 平成6年10月から本格運用に入った。以降は順次機能拡張を進め, 主要都市に展開することを推進する。

このシステムの利用により, 業務の一層の効率化と迅速化を図るよう発展させていく所存である。

最後に, このシステムの開発に際し, 御指導, 御協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

Z形コントロールセンタ

石川雅廣* 金藤 悟* 森 雅克* 水口尊敬* 樋熊利康**

1. ま え が き

近年、生産プラントにおいては、CIM化・省人化に向けたシステムのコンピュータ統括管理 (Dispersion Control System : DCS) 化のニーズが急速に高まりつつある。また、プラントの長期連続運転を行うため電気設備の安定稼働が重要課題となっており、事故の未然防止、予知保全の要求もますます高まっている。

このような中で、コントロールセンタも単なるモータの集中制御装置としてだけではなく、プラント全体の中で製造管理の情報源としての役割を担うようになり、分散制御システムの推進役を果たすまでになっている。

このたび当社では、データリンク機能、監視・制御・保護・予知保全の各機能を充実し、プログラマブルなシーケンス機能・表示を実現するなど、従来の製品を更に発展させたZ形コントロールセンタ (図1) を製品化した。

本稿ではこのZ形コントロールセンタの製品及び開発の概要について紹介する。

2. 製品の特長・仕様

下記に、Z形コントロールセンタの特長を示す。

(1) コンパクトで高機能なマルチコントローラ EMC-Z (Electronic Multiple Motor Controller Type Z)

監視・制御・保護・表示・設定の高機能化を図るとともに、運転履歴メモリ機能で保全データの収集を容易にした。また、プログラマブルなシーケンス機能で柔軟な対応ができる。さらに、伝送装置を一体形で収納し、大幅な小型化を実現した。

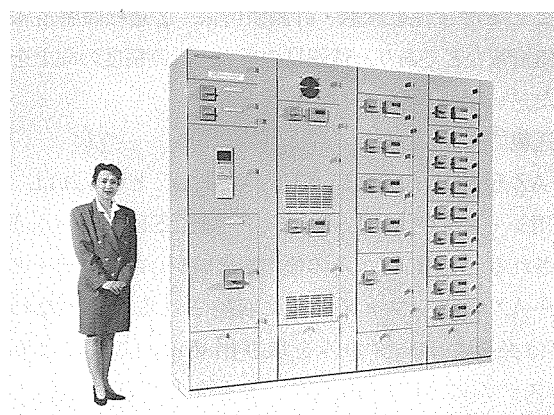


図1. Z形コントロールセンタ

(2) グレードアップした CDL (Control Center Data Link) 伝送装置

伝送情報量の拡大、計測精度の向上を図るとともに、子局間の直接伝送、一斉始動、グループ始動/停止等の伝送機能の向上を実現した。

(3) 使いやすさと高収納を実現

前後面のユニット段積み数を同一にし、要素機器の複合化、コンパクト化、ワイドレンジ化を図り、主回路配線も単純にしたことによって使いやすさとユニット高収納構造を実現した。

(4) 運転監視、予知保全に向けてのモニタリングシステム

コントロールセンタ及びその周辺の電気設備を常時状態監視するだけでなく、予知保全のための情報を提供するシステムで、運転監視と保全の合理化を実現した。

表1にZ形コントロールセンタの一般仕様を示す。

3. EMC-Z

3.1 コンパクト化と表示設定機能向上

(1) コンパクト化

EMC-Zは、操作表示部と本体、伝送インタフェースが別々であった従来のEMC-Vに対し、新開発の伝送プロセッサと高密度実装、キー操作入力設定、液晶画面による集中表示によって、大幅なコンパクト化 (体積比60%減) を実現した (図2)。

(2) 表示・設定の機能向上

図2に示すようにバックライト付き液晶画面を採用し、表示内容を充実するとともに、メニュー選択によるスイッチ操作で設定・確認を容易にした。表2にEMC-Zの機能仕様を示す。

表1. Z形コントロールセンタの一般仕様

項 目	仕 様
適 用 規 格	JEM, JIS, IEC
適用箱体保護構造	標準IP20, 防じん(塵)IP41, 屋外形IPW33
絶 縁 電 圧	AC 660V
定格最大電流	AC 4,000A
定格短時間電流	標準50kA0.5秒, 最大75kA1.0秒
耐 電 圧	AC 2,500V
適用最大容量	電源ブレーカ2,000A, モータスタータ300kW (440V)
引出可能容量	90kW 380V~440V, 45kW 200V~220V
外 形 寸 法(mm) W×D×H	630×550×2,300

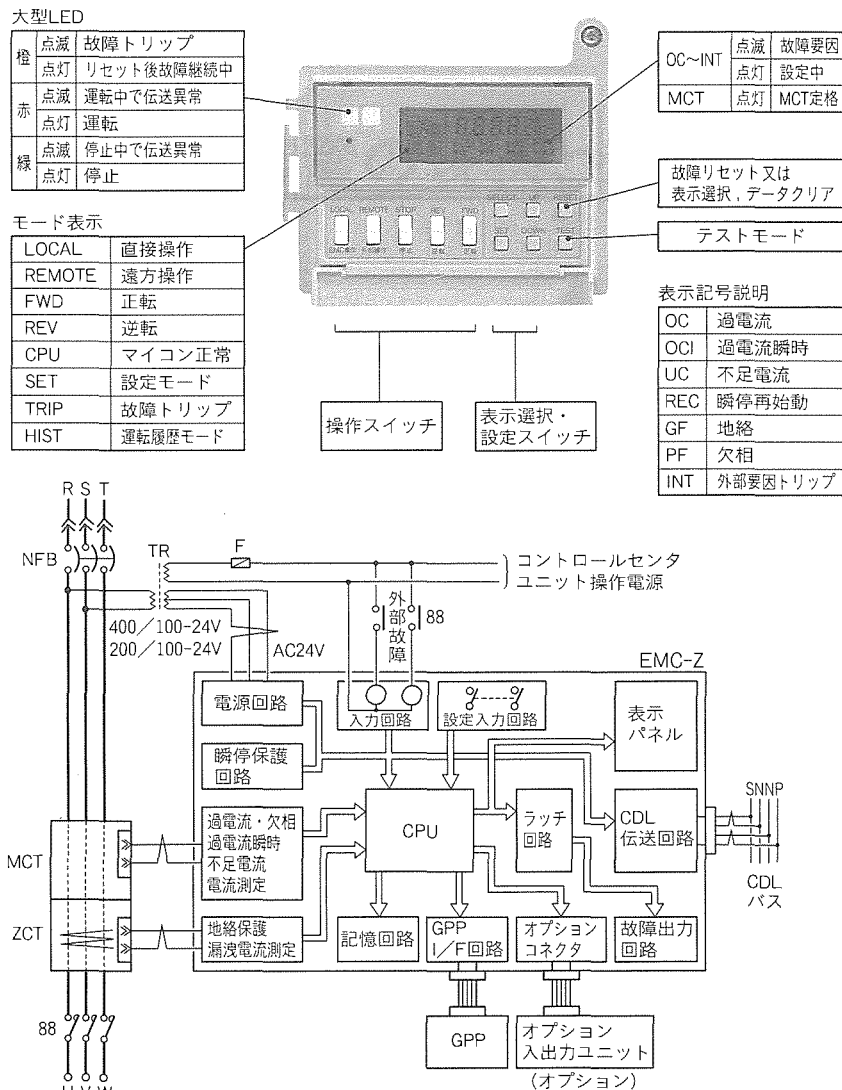


図2. EMC-Z形マルチコントローラ

3.2 シーケンス機能搭載

従来は、ユーザ仕様に対応して補助リレー、タイマの接点を接続してユニットシーケンス回路を構成していたが、EMC-Zではプログラマブルシーケンス機能を内蔵し、内部接点をプログラムによって自由に組み合わせて回路を構成することができる。これにより、仕様変更への柔軟な対応、設計手配の省力化、ユニット内配線の削減及び試験の自動化等を実現した。

3.3 運転履歴データメモリ機能

EMC-Zは、運転履歴情報を記憶することでいつでも液晶表示することができ、また、その内容を上位システムに伝送することを可能とした。これによって運転管理が容易になり、設備部品の点検、部品の交換など保守を効率良く計画的に行え、事故を未然に防止することができる。さらに、設備の異常時は故障要因が表示されるため、原因究明の迅速化と停止時間の縮小化を実現できる。運転履歴情報の内容を表3に示す。

3.4 CDL-Z形信号伝送装置

(1) 伝送プロセッサ

三菱コントロールセンタはCDL形信号伝送装置によって配電分野におけるネットワーク化を実現し、工事費の削減、工期の短縮、システム化に貢献してきた。今回、Z形コントロールセンタでは新たに伝送プロセッサを開発し、EMC-Z内に内蔵することで小型化・高機能化を実現した。主な伝送データとしては①運転状態・計測値情報、②運転履歴情報、③設定値情報などであり、情報量の拡大、計測精度の向上を実現した。

(2) 伝送親局

MS-AZ形CDL伝送親局(以下“MS-AZ”という。)は、三菱汎用シーケンサMELSEC(以下“MELSEC”という。)に装着される。EMC-Z、その他の端末局からの伝送データは、MS-AZのバッファメモリに収納される。このため、ユーザは必要なデータのみを取り出せる。これにより、上位システムにMELSECNET等を介して伝送運転・保守管理の近代化が可能となった(詳細は4章)。

(3) オプション伝送機能

表 2. EMC-Zの機能仕様

計測	運転状態情報	正転、逆転、遠方、直接、NFB-ON、NFB-トリップ、CPU正常
	運転電流	0～1,270%（8ビット）
	漏洩電流	0～1,270mA（8ビット）
故障	故障要因	OC、OCL、UC、GF、PF、INT
	トリップ電流	0～1,270%又は0～1,270mA（8ビット）
設定	設定電流	40～110%
	MCT定格	16種類
	過電流プレアラーム動作電流	OFF、50～115%
	過電流動作時間	OFF、1～64s
	蓄熱特性	コールド、ホット
	過電流始動時ロック時間	0～63s
	地絡感度電流	OFF、30～1,000mA（6種類）
	地絡動作時間	0.1s、0.3s、0.8s
	過電流瞬時動作電流	OFF、50～900%
	過電流瞬時動作時間	0.2～9.0s
	不足電流動作電流	OFF、30～80%
	不足電流動作時間	1～9s
	欠相動作不平衡率	OFF、40%、60%
	瞬停再始動補償時間	OFF、0.5～3.0s
	瞬停再始動時限	0～63s
	シーケンス回路番号	0～FF
	伝送局番	0～40H
	孫局設定	0～31
	一斉同報グループ番号	0～7

表 3. 運転履歴情報

運転履歴	運転時間	0～327,670h
	正転開閉回数	0～327,670回
	逆転開閉回数	0～327,670回
	トリップ回数	0～255回（瞬停は含まない）
	平均電流	0～1,270%（8ビット）
	最大電流	0～1,270%（8ビット）
	最小電流	0～1,270%（8ビット）
	過電流トリップ回数	0～15回
	欠相トリップ回数	0～15回
	地絡トリップ回数	0～15回
	過電流瞬時トリップ回数	0～15回
	不足電流トリップ回数	0～15回
	外部要因トリップ回数	0～15回
	瞬停再始動回数	0～15回
	EMCエラーコード	0～15

今回の伝送システムでは更に、使いやすさ、拡張性を追求するために下記の伝送機能を実現した。

- シーケンサ及び伝送親局がなく、EMC-Zと機側操作盤内の端末局とで直接交信ができる小規模プラント用のシステム
- 一斉同報による一斉始動/停止、及びグループ始動/停止
- 親局・伝送バスの二重化、バスのループ化による伝送の冗長化
- 伝送波形シミュレータ

CDL伝送の信頼性確保のためには、様々なネットワーク

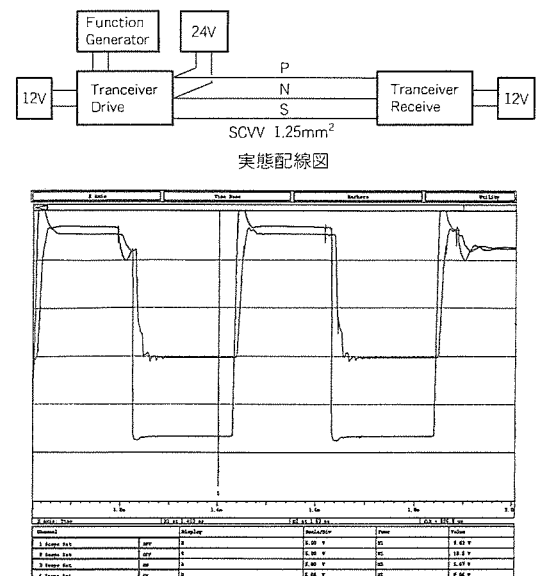


図 3. 伝送シミュレーション

形態での実機評価を行う必要がある。しかし、実プラントにおける機器の配置や配線の形態は様々で、実機を使っでの試験ではすべてを網羅できない。そこで、計算機上に伝送信号のシミュレータを新たに構築し、シミュレーションによる実機での伝送試験を補完することで、効率的な伝送信頼性確認を実現した。

シミュレーション例を図3に示し、また、伝送ネットワーク全体システムを図4に示す。

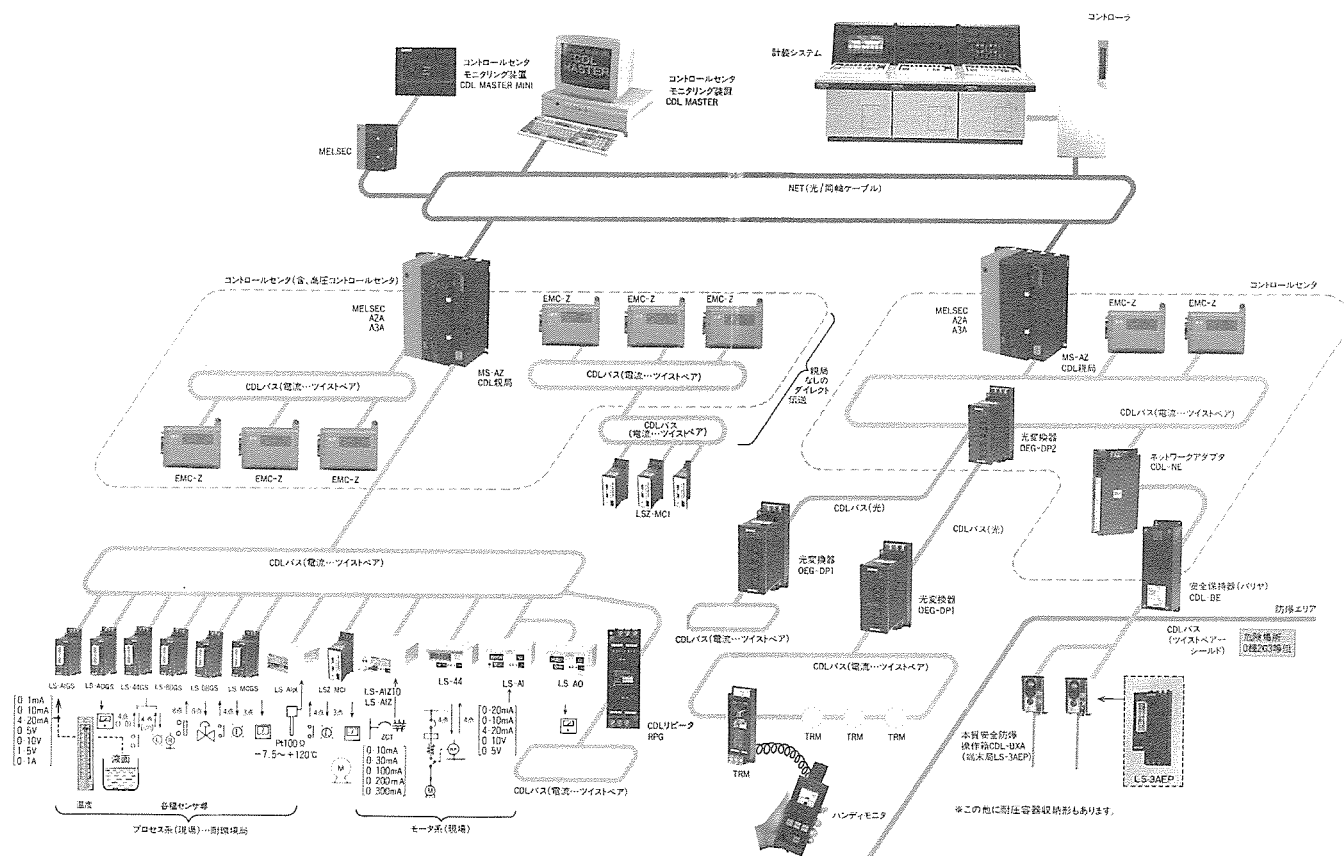


表 4. CDL MASTER機能一覧

項 目	機 能 概 要
状態表示	負荷の運転状態・計測値 負荷電流のプレアラーム
運転履歴	累積運転時間・コンタクト開閉回数・故障回数 負荷電流の最大・最小・平均値
EMC設定表	EMC-Z保護機能設定値 整定電流・過負荷・過電流瞬時・不足電流・地絡・欠相・ 瞬停再始動設定値
個別負荷状態表示	運転状態・故障要因 負荷電流・漏洩電流・トリップ電流 運転履歴・EMC-Z保護機能設定値 MCT定格・CDL伝送局番
故障負荷リスト	故障発生中の負荷を一覧表示
ロードレコードグラフ	リアルタイムトレンド 全負荷の2分間の負荷電流を表示 停止中はデータサンプリングを中止
トレンドグラフ	ヒストリカルトレンド データ収集点数：8点 収集データ選択：負荷電流／漏洩電流 データ記録期間：1日～4か月
アラームボックス	最新の故障発生負荷を全画面にメッセージ表示
運転状況リスト	全負荷の運転状況・運転実績
EMC-Z保護リレー設定表	全負荷のEMC-Z保護機能設定値・MCT定格・CDL伝送設定
故障記録リスト	負荷の故障発生記録
日報リスト	全負荷の負荷電流を毎時収集し、作表
月報リスト	全負荷の負荷電流・漏洩電流・運転時間を1回／日 収集し、作表 データ収集時刻の指定可能

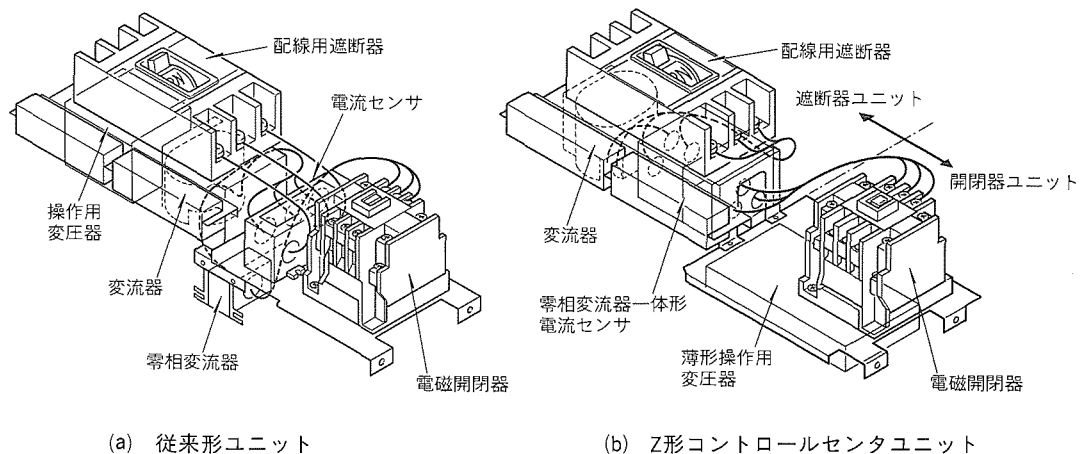


図 5. ユニット構造比較

開発を実施した(図6)。

操作変圧器を薄形構造として電磁開閉器裏面に配置し、さらに、電流センサと零相変流器を一体化した。また従来、表示部・本体部・伝送部が別々であったマルチコントローラを一体化したことで、ユニットの実装効率を向上させ配線作業も容易になった。電流センサは設定スイッチの切り換えによって測定電流域を変更できるワイドレンジ形で、負荷容量の変更はバンド幅の中で容易に対応できる。

6. 製造合理化

6.1 ユニット組立て一貫生産ラインの構築

Z形コントロールセンタのユニット構造を図5に示す。従来ユニットとは異なり電磁開閉器以外の主回路機器がすべて配線用遮断器側に集中配置され、ユニットベースを2分割することで主回路機器で構成する遮断器ユニットと制御回路機器で構成する開閉器ユニットに分割できる。さらに、表示操作機器で構成されるデバイスパネル部分(又はEMC-Z)を合わせた三つのサブユニットに分割される構造とし、部分組立てをすることで図7に示すタクト生産によるユニット一貫生産ラインを構築した。

6.2 EMC-ZシーケンスソフトウェアのCAD/CAMシステム

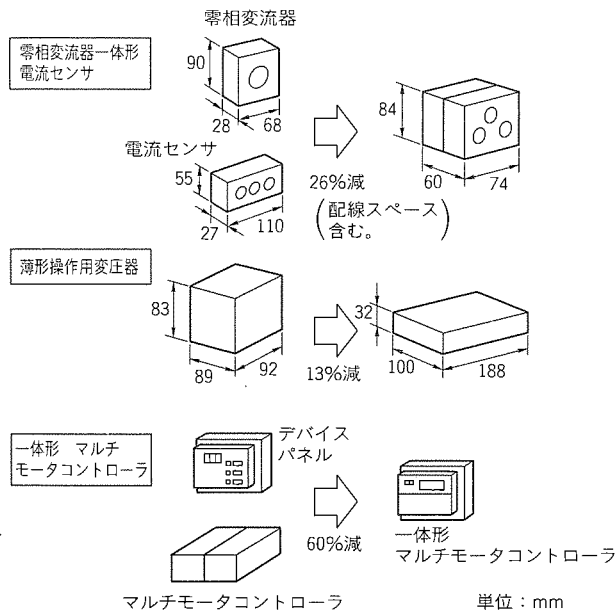


図 6. 要素機器開発例

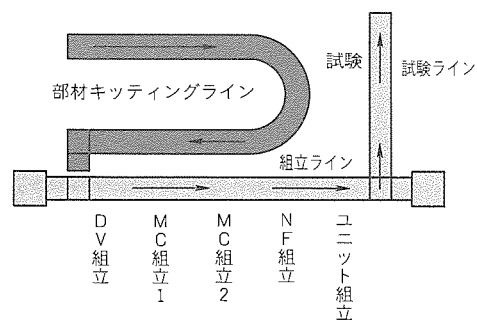


図 7. ユニット生産ライン

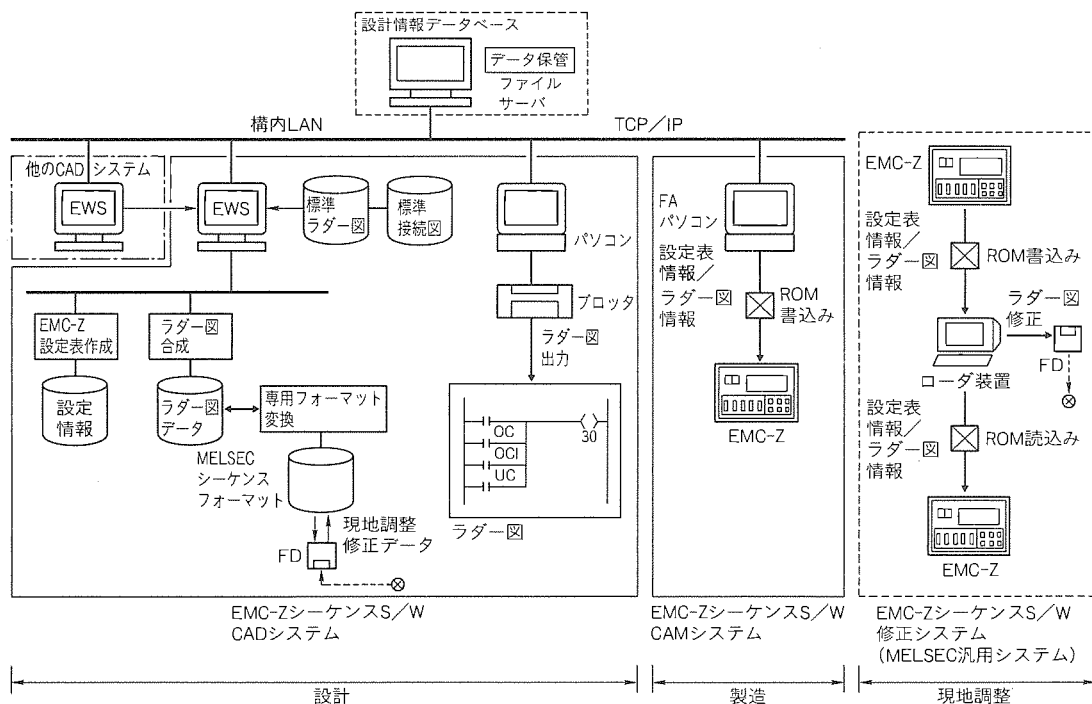


図 8. EMC-Zシーケンスソフトウェア (S/W) のCAD/CAMシステム

Z形コントロールセンタに搭載する EMC-Z のソフトウェア生産支援 CAD/CAM システムを図 8 に示す。

このシステムは、EMC-Z の設定表作成、ラダー合成、MELSEC のシーケンスフォーマット変換、各種図面の出力機能を持つ CAD システムと、EMC-Z のシーケンスソフトウェア、設定値情報を直接実機のメモリ (ROM) に書き込む CAM システムとで構成されている。工場内には構内 LAN が設置され、エンジニアリングワークステーション (EWS) やパソコンなどが LAN によって接続されており、設計だ

けでなく製造においても、これらのデータが利用され情報の一元化を実現した。

7. む す び

プラント運用の高度化に伴い、コントロールセンタはますます高度なシステム化が求められるとともに、負荷制御・保護方式の革新による高機能な次世代製品の要求が高まるものと予想される。今後、更なる要素開発・製品開発を行っていく予定である。

オブジェクト指向モデリングによる エレベータ天井設計支援システム

市岡洋一* 中村守雄* 山宮茂樹** 田中純治* 久木田庄司***

1. ま え が き

近年の情報システム技術の進展には目を見張るものがある。現在、エレベータの設計にはCADを始めとした様々な設計支援システム⁽¹⁾が用いられているが、今後、更にエレベータの設計効率や品質の向上と期間の短縮を図るには、新しい情報システム技術を用いて設計支援システムを再構築する必要がある。

従来の設計支援システムは、製図や手配帳票作成といった設計の部分部分を支援するものであった。しかし今後のシステムは、設計検討など設計の上流から製図や手配帳票作成など下流までを、統合的に支援するものでなくてはならない。

このほど、このようなエレベータの統合設計支援システム構築に向け、そのパイロットシステムとして“三菱乗用エレベータアクセル AI”の平面光天井の構造検討からその製図までを支援するシステムを開発・実用化した。その開発のねらいとシステムの概要を紹介する。

2. プロダクトモデルによる

統合設計支援システムの構築

プロダクトモデルとは、製品の形状のみならず、その属性情報をコンピュータで扱えるようにしたものである。近年このプロダクトモデルにより、製品の設計から製造までを統合的に支援するシステムの研究や開発⁽²⁾が広く行われるようになっていく。エレベータの設計支援システムにもこのプロダクトモデルの考え方を取り入れ、エレベータの設計を統合的に支援するシステムを構築しようと考えている。

2.1 エレベータの設計

エレベータは同じ製品でも、納めるビル構成や顧客の要求によって仕様が異なってくる。そのためエレベータは、下記のように製品ごとの開発設計と受注ごとの受注工事設計とで設計されている。

(1) 開発設計

開発設計では、図1に示すように製品仕様を満たす標準図面や基準資料が作成される。この標準図面は、エレベータを納めるビルの構成や顧客の要求が受注ごとに違っても、図面の選定やそのパラメータの設定によって、それに適した製品が製作できるようにした図面である。ま

た基準資料は、仕様ごとに選定すべき標準図面の番号や設定すべきパラメータの値を示したものである。なお、仕様によっては標準図面は作成しないで、その設計手順だけを基準資料に示す場合もある。

(2) 受注工事設計

受注ごとの仕様を“工事ごと(毎)仕様”という。受注工事設計では、まず基準資料を参照して、工事毎仕様に対応する標準図面の選定とそのパラメータの設定が行われ、その図面番号とパラメータの値を記載する品目表という手配帳票が作成される。また、標準図面に含まれない仕様については、基準資料に示された設計手順に沿って、設計者がその仕様を満たすよう標準図面を修正して“工事毎図面”を作成する。エレベータはこの工事毎図面、及び品目表に記載された番号の標準図面とそのパラメータの値とによって製作される。

2.2 プロダクトモデルシステム

前述のエレベータの設計をオブジェクト指向的にとらえると、その開発設計はエレベータの製品クラスライブラリの作成であり、受注工事設計はそのクラスライブラリを使ったインスタンス化である。

このようにみると、エレベータの受注工事設計を統合的に支援するシステムは、下記のようなオブジェクト指向プロダクトモデルシステムが適している。

(1) オブジェクト指向プロダクトモデルシステム

このシステムは、図2に示すようにエレベータの構成や機器を設計手順も含めて、オブジェクト指向モデリングしたプロダクトモデルを中核に構成する。このプロダクトモデルに工事毎仕様を与え、インスタンスすなわち“工事毎モデル”

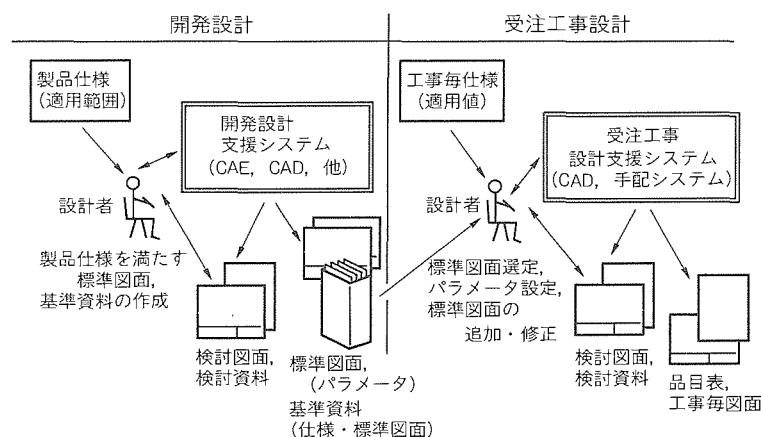


図1. エレベータの設計

を生成する。設計者はこの工事毎モデルを評価して、工事毎仕様のうち実現されていないものがあれば、それが満たされるようモデルを修正する。仕様が満たされた工事毎モデルが出来上がれば、このモデルから工事毎図面や品目表を自動作成する。

このようなプロダクトモデルシステムは、次のような効果を発揮するものとする。

(a) コンピュータという仕組みを活用することで、従来の

標準図面に比べ広範囲の標準化が可能である。

(b) プロダクトモデルに含まれていない仕様が要求された場合は、検討や評価がしやすいモデルを修正することでそれを満たす設計ができる。

(c) 修正したモデルから、図面や手配帳票が自動的に作成できる。

(2) プラットホーム選定

前述のプロダクトモデルシステム構築には、プラットフォームが必要である。三次元 CAD システムをカスタマイズしてそのプラットフォームとすることも考えられるが、そのカスタマイズには相当の開発が伴う。そこで、下記の特長を持った米国 ICAD 社の知識ベースエンジニアリングシステム IMPAKT を導入して、そのプラットフォームとすることにした。

この IMPAKT は、三次元形状プロダクトのオブジェクト指向モデリングを可能にするもので、属性操作が LISP ベースの宣言型言語 IDL (IMPAKT Design Language) で記述できる。

(3) パイロットシステムの開発

プロダクトモデルシステムは、従来のシステム概念を大きく変えるものである。そこで、まず仕様によって構造が大きく変

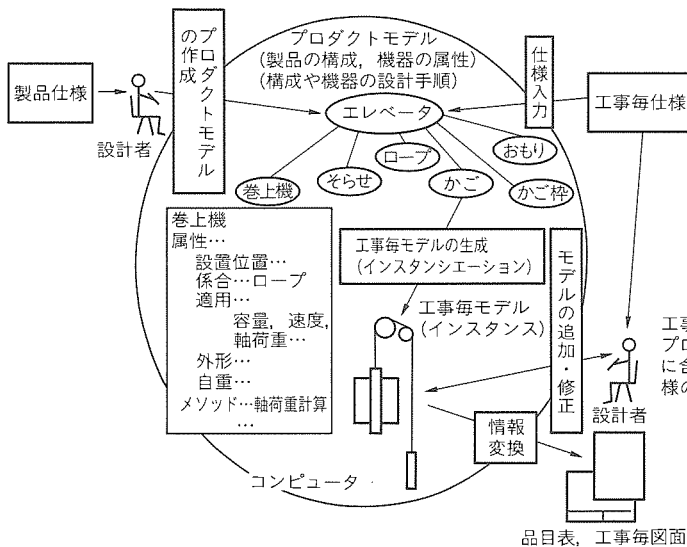
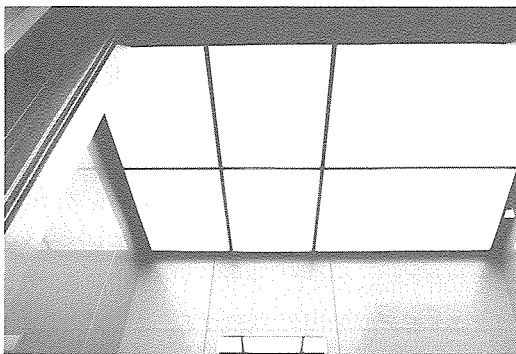


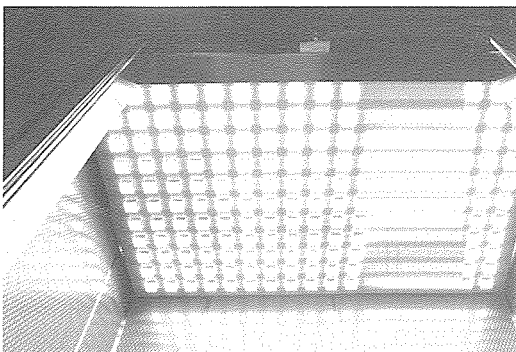
図2. プロダクトモデルシステム



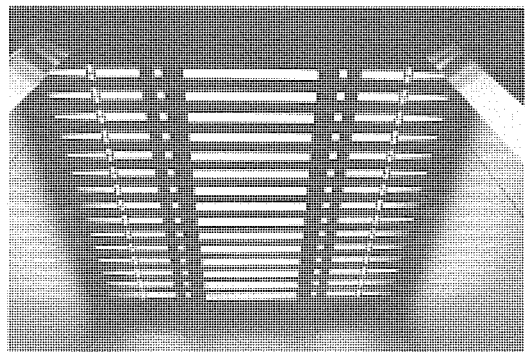
格子目地形（六分割）



格子目地形（九分割）



アクリルブロック形



アートブロック形

図3. 平面光天井

化する平面光天井の設計を対象としたパイロットシステムを開発し、実用化することにした。

3. エレベータの天井とその設計

プロダクトモデルシステムのパイロットシステムが対象としたエレベータの天井とその設計について述べる。

3.1 平面光天井

エレベータの天井は、エレベータのデザインにおいて大きな役割を担っている。エレベータのかご室の雰囲気は、天井

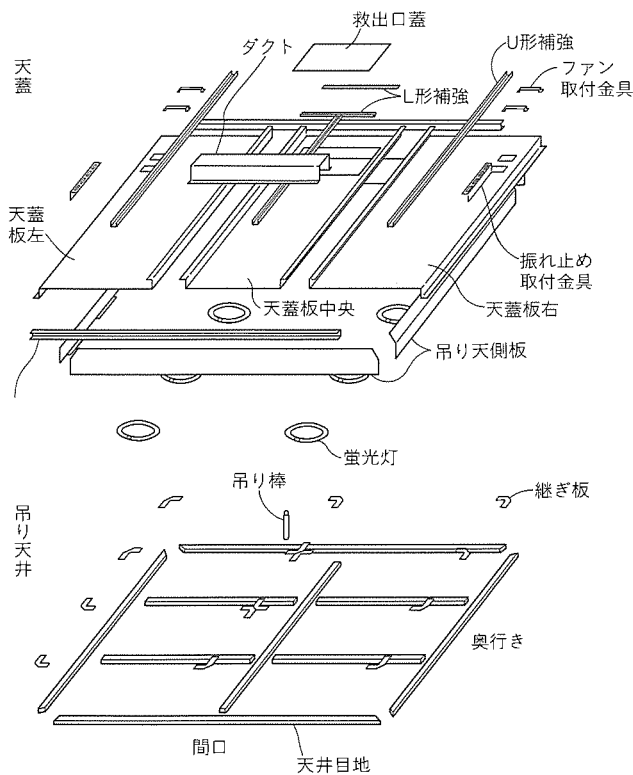


図4. 平面光天井格子目地の構造

の意匠によって決まるといっても過言ではない。当社は、オーダ形エレベータ“アクセル AI”の天井として図3に示すような平面光天井シリーズを発売し、好評を得ている。

(1) 平面光天井のデザイン・機能

この平面光天井シリーズは、ビルのデザインや顧客の好みに合わせられるように、格子目地形、アクリルブロック形、アートブロック形など数種類の基本形を備えている。いずれの形の天井も、かご室が快適な雰囲気となることをねらったものである。また、エレベータの天井は、デザインとしての役割のほか、エレベータとしての機能を幾つか備えている。ちなみに天井は、かご室を構成する上部強度メンバであるのはむろんのこと、その中にはかご室の換気を行う換気扇や万に備えた救出口などが設けられている。

(2) 平面光天井の構造

前述のようなデザインと機能を持った平面光天井は、乗客の目にふれるつ(吊)り天井部分と、かご室の強度を支えるとともに上部に救出口や換気扇、下部に蛍光灯や非常灯などを取り付けた天がい(蓋)部分とに分けられる。図4は格子目地形天井の部材構成を示す。天蓋部分の部材構成は図に示すように、剛性を確保するための三つのパネルからなる天蓋板と、それらの四周に配置された四つの側板で構成される。また、天蓋部分の下方に配置された吊り天井部分は、天蓋部分の四周の側板に格子状に配置された複数の天井目地で構成され、天井目地の上には化粧パネル(図示せず)が置かれるようになっている。

3.2 平面光天井の設計

前述のような構造の平面光天井は、仕様によって構造が大きく変わる。したがって、標準図面をあらかじめ作成して、その選定やパラメータの設定で設計するのは難しい。そこで従来は、受注ごとに構造検討を行い、工事毎図面を作成して設計をしていた。

(1) 平面光天井の仕様と構造

(a) 間口・奥行きによる構造の変化

平面光天井はオーダ形エレベータ用の天井である。オーダ形エレベータは受注ごとにかご室の間口・奥行きが異なり、それに伴って、天井の間口・奥行きも違ってくる。

平面光天井は構造が複雑なため、その間口・奥行きが変わると、構造そのものから部材の形状や数、部品の種類まで変わってくる。

(b) オプションによる構造の変化

エレベータには、オプションとしてオートアナウンスやファン速度調節機能が付加されることがある。それらが付加されると、天井にはオートアナウンス用のスピーカやファン速度調節器を取り付ける必要がある。

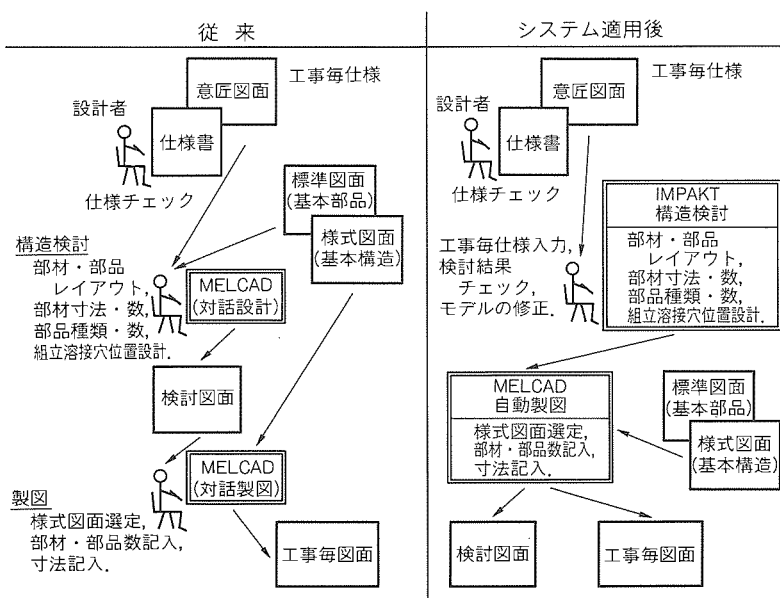


図5. システムの機能

これらを取り付くと光天井の構造は変化する。

(2) 受注ごとの構造検討と工事毎図面の作成

このように、仕様によって構造が大きく変化する平面光天井は、開発設計においてすべてにつき標準図面を作成するのは難しい。そこで従来は図5に示すように、仕様によって変化する部材や部品については標準図面を作成しておき、変化する構造や部材については受注ごとに当社製の機械構造設計CAD、MELCADを用いて構造設計を行っていた。この構造設計では、まず設計者が工事毎仕様を見てMELCADで構造検討図面を作成する。次に設計者はこの検討図面を参照して、基本構造だけを図面にした様式図面から検討図面に合ったものを選定し、それに部材の寸法や部材・部品間の寸法を記入して工事毎図面を作成していた。

4. エレベータの天井設計支援システム

エレベータの受注工事設計を統合的に支援するシステムのパイロットシステムとして、前述のような平面光天井の設計を支援する下記のようなシステムを開発・実用化した。

4.1 システムの機能

図5に示すように、このシステムは平面光天井の受注工事設計における構造検討と工事毎図面の作成を支援するものである。

(1) 構造検討の自動化・対話化

今回プロダクトモデルシステムのプラットフォームとして導

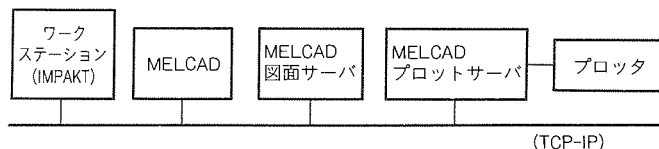


図6. ハードウェアの構成

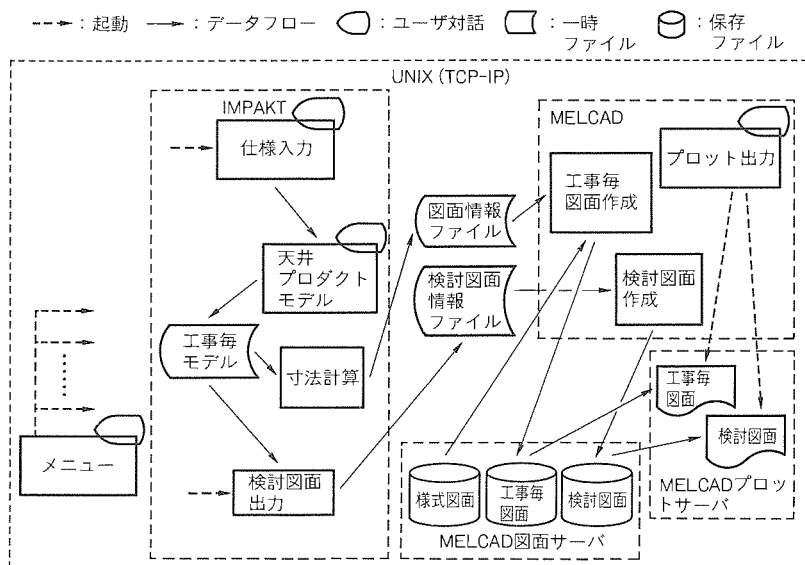


図7. ソフトウェアの構成

入した IMPAKT の上に、格子目地形、アクリルブロック形、アートブロック形の三種の平面光天井プロダクトモデルを作成して構造検討を自動化・対話化した。システムは設計者が天井の間口・奥行き、各種オプションの有無など工事毎仕様を入力すると、その仕様の天井に必要な部品・部材の選定、それらのレイアウト、部材寸法の計算、組立溶接穴の位置設計などを行い、工事ごとの天井モデルを生成する。設計者はこのモデルを IMPAKT のブラウザでチェックし、工事毎仕様を満たしていないところや、構造的に問題があるところを修正する。

(2) 工事毎図面の自動作成

IMPAKT で生成された工事ごとの平面光天井モデルから、その構造に対応した様式図面を選定し、それに必要な部材・部品の数量やそれらの組立寸法を記入して工事毎図面を作成する。

4.2 システムの構成

前述の機能を実現するため、システムのハードウェアとソフトウェアは下記のように構成した。

(1) ハードウェアの構成

図6に示すようにハードウェアは、IMPAKT を実装したワークステーションを、各種 MELCAD サブシステムを接続している UNIX TCP-IP のプロトコルのネットワークに接続して構成した。

(2) ソフトウェアの構成

ソフトウェアは図7に示すように、UNIX をシステム全体のプラットフォームとし、その上に IMPAKT と MELCAD を載せて下記のように構成した。

(a) IMPAKT

IMPAKT をプラットフォームとしたソフトウェアは、

- ①工事毎モデル生成に必要な仕様入力プログラム、②平面光天井をオブジェクト指向モデリングした天井プロダクトモデル、③そのプロダクトモデルで生成された工事毎モデルから工事毎図面作成に必要な情報を抽出する寸法計算プログラム、④工事毎モデルを三平面に投影して検討図面を作成する情報を作成する検討図面出力プログラムから成る。また、この寸法計算プログラムと検討図面出力プログラムの出力は、一次ファイルを経由して MELCAD に転送するようにした。

(b) MELCAD のソフトウェア

MELCAD には IMPAKT から転送された情報に基づき、様式図面を MELCAD 図面サーバから読み込んで工事毎図面を作成するプログラムと、工事毎モデルを三平面に投影した検討図面を作成する

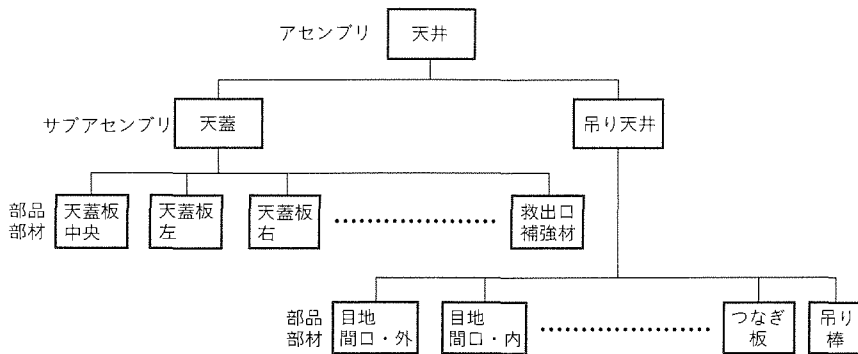


図 8. 平面光天井モデルの構成

プログラムが設けられている。

(c) UNIX のソフトウェア

メニューは構造検討から工事毎図面作成まで、ユーザが必要とする支援機能をメニューから選ぶものである。これは IMPAKT や MELCAD の起動を必要とすることから、UNIX を直接プラットフォームとして作成した。

4.3 平面光天井プロダクトモデル

天井プロダクトモデルは、図 3 に示した三つの形の平面光天井をオブジェクト指向モデリングした。

(1) モデルの構成

図 8 に格子目地形のモデルの構成を示す。モデルは平面光天井を自然に把握ができるように三層構成とした。最下層の天蓋板や救出口補強材などの部品・部材は、複数の平面光天井モデルの間で流用を図るために、それ自身では他の部品・部材との関係は扱わないようにした。したがって、部材・部品の相互の関係属性は、すべて天蓋、吊り天井及び最上位の天井で扱った。

(2) 部材・部品モデル

平面光天井モデルの開発は、格子目地形のものから始めた。図 9 にその天蓋板右やダクトなど部品・部材を示す。これらの部品・部材は、格子目地形のモデルに引き続き開発したアクリルブロック形、アートブロック形のモデルで流用を図った。

(3) モデルの記述

モデルは、図 8 に示した部材・部品やサブアセンブリを各々一つのオブジェクトとして、IDL で記述して作成した。図 10 に天蓋板左のオブジェクトの記述の一部を示す。このオブジェクトは、外部からその幅や高さが与えられると、図に示された形状の天蓋板左を生成するものである。また、ファンの取付け穴もこのオブジェクトの属性の一つで、その大きさや位置が IDL で記述してある。IDL は宣言形言語であるため、その記述は仕様書を書くような記述になっている。

4.4 ユーザインタフェース

このシステムは、平面光天井を設計しようとするユーザを、下記のようなインタフェースで支援する。

(1) メニュー画面

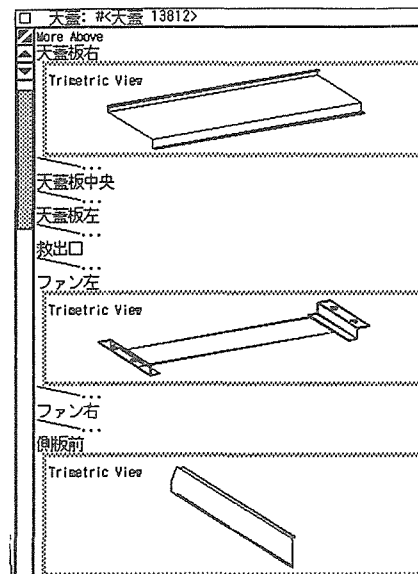


図 9. 平面光天井の部品・部材モデル

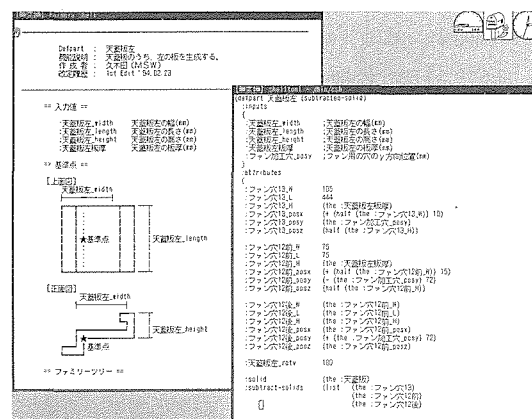


図 10. モデルの記述

構造検討や工事図面作成、検討図面作成など、システムが持つ支援機能の選択と、設計しようとする平面光天井の形の入力を行うものである。図 11 にこのメニュー画面を示す。

(2) 構造検討画面

図 12 は構造検討画面である。その右側は、構造検討に必要な平面光天井の間口・奥行きやかごのドアの形名など、工事仕様をユーザが入力する部分である。仕様のうち幾つかの中から選ぶものはプルダウンメニューとし、通常値が変わらないものはデフォルト値が設定してある。その左側は構造検討結果部分である。システムは、工事仕様に沿った天井の構造検討が完了すると、ここに工事ごとの天井モデルを表示する。ユーザはこの画面を見て、必要に応じてモデルを修正する。

今回開発した天井プロダクトモデルでは、天井面積が小さくなると蛍光灯が救出口に干渉する場合もあるので、その修正が可能ないようにしてある。工事毎天井モデルに問題がない場合、又はモデルの修正が完了した場合には、メニュー画面に戻る。そこでユーザは、工事毎図面作成や、必要ならば検

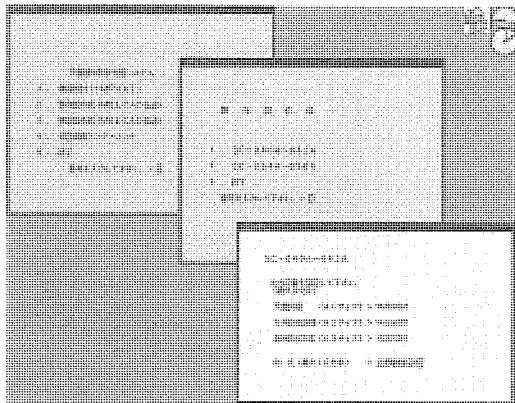


図11. メニュー画面

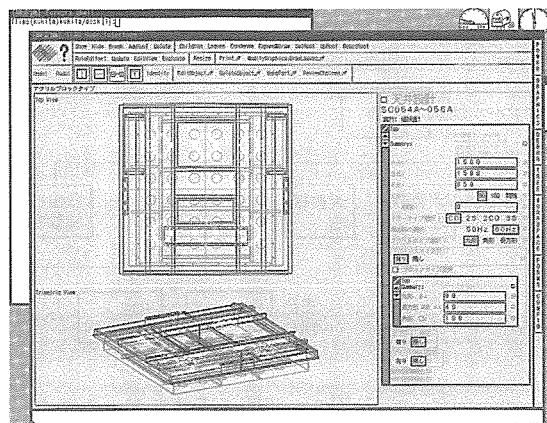


図12. 構造検討画面

討図面作成メニューを選んで、それらを実行させる。

(3) MELCAD 画面

図12は構造検討の結果に基づき MELCAD で作成された格子目地形の工事毎図面である。ユーザはこの図面を MELCAD の画面上、又はプロットしてチェックを行い出図する。また、非常に特殊な仕様の場合には、メニューを選んで検討図面を作成し、それを MELCAD で修正して、その特殊な仕様を満たす天井を設計することもできる。

4.5 開発体制・手順

製品設計に密着したこの種のシステムは、情報システム開発者、いわゆるシステム屋と製品設計者との間の溝をなくしないと成功しない。そこでこの開発においては、設計者が作成した平面光天井の設計手順書に基づき、設計者とシステム屋でプロトタイピングを繰り返し、両者の溝を取り除いてシステムの開発を推進した。また、システムの運用に必要なドキュメントは、その管理が確実になされるよう図10に示すように極力ソースプログラムのコメントとして作成した。

4.6 開発の成果

このシステムは、開発完了後、実際の平面光天井の設計に適用され、下記のような効果を上げている。また、このパイロットシステムが効果を上げているということは、エレベータの設計を統合的に支援するシステムとしてオブジェクト指向プロダクトモデルシステムが適している一つのあかし(証)である。その証を得たこともこの開発の大きな成果である。

(1) 平面光天井設計時間の大幅削減・期間短縮

- (a) 標準仕様範囲の天井設計では、70～80%の設計時間削減ができた。
- (b) 準標準範囲(標準仕様範囲外であるが、基本構造は標準仕様のものと同じ。)の天井設計では、50～60%の設計時間削減ができた。

(2) 設計品質の向上

従来、この天井の設計は、設計者によって設計品質にばらつきがあった。システム適用後は、天井プロダクトモデルに

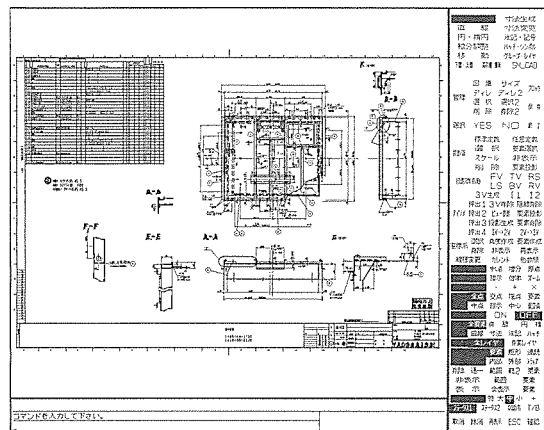


図13. MELCAD画面

ベテランの設計者の設計手順が盛り込まれているので、その品質は高いところで均一化された。

5. む す び

この開発によって、エレベータの設計支援にはオブジェクト指向プロダクトモデルシステムが適していると判断できるようになった。今後は、天井からさらにエレベータ全体に向かって、かご全体、エレベータ機械システム全体と、その適用を拡大していきたい。そのためには、設計者だけでプロダクトモデリングを可能にするようなツールも必要であろう。まだ課題は多いが、読者諸氏のご指導を仰ぎながら、エレベータトータルプロダクトモデルシステムの構築に向けまい(邁)進する所存である。

参 考 文 献

- (1) 増田隆広, 木村宣仁, 小林和士: 昇降機, ビル管理システムの開発・設計へのCAEの活用, 三菱電機技報, 67, No.10, 969～973 (1993)
- (2) 木村文彦: コンカレントエンジニアリングと仮想生産, 電気学会誌, 113, No.3, 183～187 (1993)

超低電圧動作 4 ビットマイコン M34560M6-XXXFP

中島豊勝* 大内収一郎** 牧野裕太*** 早岡 洋* 吉本輝紀*

1. ま え が き

バッテリー駆動の携帯用機器は小型化・軽量化の方向に発展してきた。これに伴って、搭載されるバッテリー本数も削減され、より低電圧で動作するマイコン、より低消費電力化されたマイコンが望まれている。特に、超小型の携帯用機器では電池1本で動作させる場合もあり、1.2V以下の低電圧領域で動作するマイコンが必要になる。このようなシステム側の要求にこたえるため、M34210M2-XXXGPとM34211M4-XXXGPを既に開発・量産化している。このマイコンは、720シリーズの4ビットCPUをコアとして、1.1～3.6V時に最大50kHzで動作する低電圧動作マイコンである。

今回、携帯用機器の更なる小型化・軽量化に加え、高機能化・高性能化の要求にこたえるため、4500シリーズの4ビットCPUをコアとした超低電圧動作マイコンM34560M6-XXXFPを開発した。このマイコンは、0.9～3.6V時に最大50kHz、1.1～3.6V時に最大1MHzの動作を可能にし、大幅な性能向上を達成した。機能的には、4500シリーズのM34540M8-XXXFPを母体に、マスクROM、RAM、タイマ、シリアルI/Oなどを1チップに集積したものである。図1にM34560M6-XXXFPのチップ写真、図2にブロックレイアウト図を示す。また、従来製品からの位置づけを図3に示す。

2. 開発のポイント

これまでマイコンを含む半導体製品は、高機能化・高性能化の方向に発展してきた。この二つの目的は、より微細化されたプロセスを用いることによって、ある程度は解決するこ

とができた。ところが、近年、携帯機器用品に多数の半導体が使用されるようになり、高機能化・高性能化に加え低電圧化・低消費電力化の要求が強くなってきている。

低電圧化と低消費電力化は比例関係にあるが(電源電流は電源電圧に比例するため、低電圧化すると自動的に低消費電力化される。)、低電圧化と高性能化(スピードアップ)は比例しない。低電圧化すれば性能は落ち、性能を重視すれば低電圧化できない。

M34560M6-XXXFPの開発に当たり、このような相反する目標を解決するために、新たに検討した技術ポイントを以下に示す。

2.1 専用プロセスの開発

0.9～3.6V時に最大50kHz、1.1～3.6V時に最大1MHzの低電圧高速動作を実現するために、専用のプロセスを開発した。このプロセスは、1.0μm高性能シリコンゲー

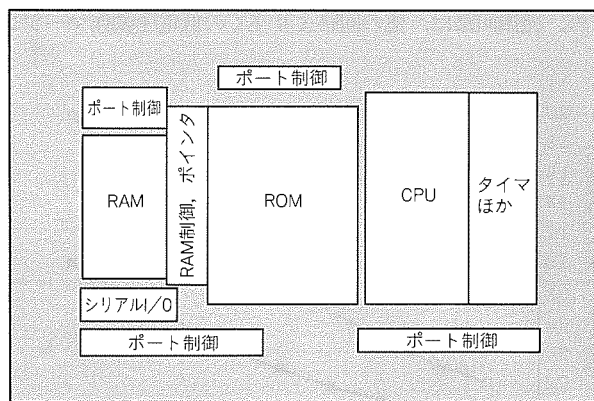


図2. ブロックレイアウト

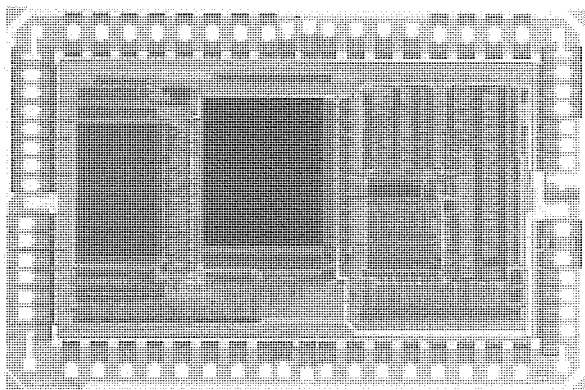


図1. M34560M6-XXXFPチップ写真

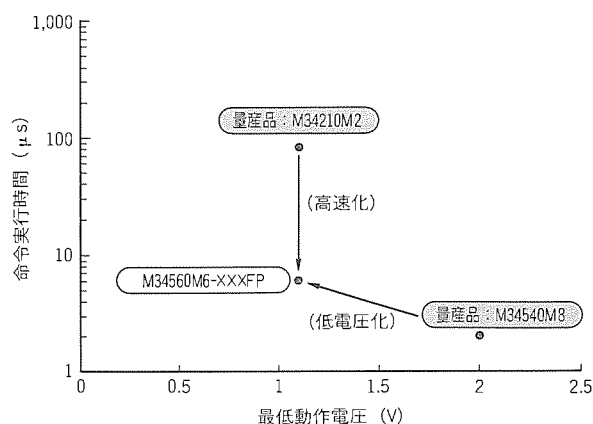


図3. 低電圧マイコンの技術トレンド

ト CMOS プロセスを母体として、超低電圧領域での性能を向上させるためにトランジスタのしきい値を大幅に小さくした。ただし、単純にしきい値を小さくしたのではトランジスタのオフ時のサブスレショルド電流が増加し、その結果、マイコンの電源電流が増加してしまう。今回は、このサブスレショルド電流の増加を抑えるため、ゲート酸化膜の薄膜化を行った。この結果、単純にしきい値を下げた場合に比較し、約 1/5 に電流を低減することができた。また、トランジスタの駆動能力に関しては、0.9 V 時に約 5 倍の性能を得ることができた。

図 4 に従来プロセスと比較した結果を示す。これは、N チャネルトランジスタのゲートとドレインを短絡し、ゲート-ソース間電圧に対するソース-ドレイン間電流を比較したものである。

2.2 内部電源直接駆動

従来製品に引き続き、昇圧回路を用いずに電源端子に加えられる電圧で、内部回路を直接駆動する方式を採用した。これによって昇圧するための専用端子が不要になり、端子数を節約することができる。また、外付けの昇圧用コンデンサも不要であり、周辺部品点数を削減することができた。図 5 に電源駆動方式の比較を示す。

2.3 発振回路

発振回路が動作しない限りシステムクロックが発生しないため、発振回路は、他の回路より多くの低電圧動作マージン

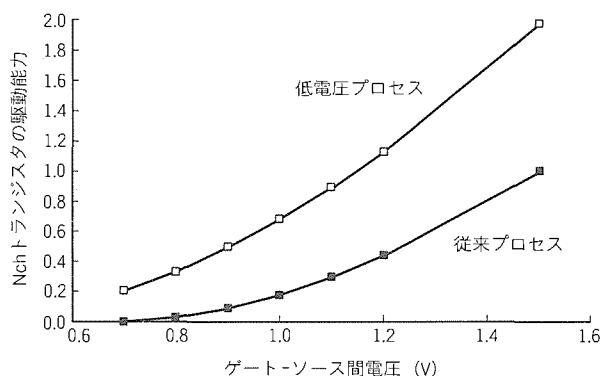


図 4. 超低電圧マイコン用プロセスと従来プロセスの比較

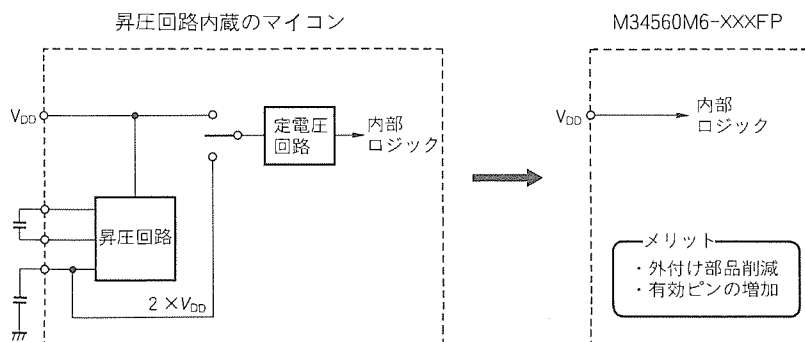


図 5. 電源駆動方式の比較

を持つ必要がある。しかし、発振回路が動作を開始するとき、発振バッファは電源電圧の約 1/2 にバイアスされた状態になるため、電源電圧 $> (V_{tp} (\text{P チャネルトランジスタのしきい値の絶対値}) + V_{tn} (\text{N チャネルトランジスタのしきい値の絶対値}))$ の条件でしか動作できない。したがって、発振回路の最低動作電圧は $(V_{tp} + V_{tn})$ 以下にはならず、他の論理回路より動作可能電圧が高くなってしまふ。

今回は発振回路の動作マージンを上げるために、通常の N チャネルトランジスタよりも更にしきい値の低い、低しきい値 N チャネルトランジスタを採用した。この結果、確実に他の回路ブロックより低電圧で動作させることが可能になった。

2.4 評価・解析技術

試作品が期待どおりに出来上がっていることを確認するために、評価を実施する。評価結果が期待値と異なる場合は、その原因を解析する必要がある。一般的には EB テスタ (電子ビームテスタ) を用いて不具合を特定するのが効率的であるが、このマイコンのように 0.9 V を保証する場合は、主に評価・解析する領域が 0.9 V 以下になり、EB テスタで電位の差を判別するのが困難になる。

M34560M6-XXX FP では、LSI テスタを用いた不良解析 (入力ベクタとそれに対応する出力結果から、不具合部分を予測する。) が主体になると考え、マイコンとテストヘッド間のマッチングを考慮して、マイコンの出力バッファを設計した。特に超低電圧時のマッチングに重点を置くことでテストでの不良解析を容易に実施することができた。

2.5 量産テスト技術

量産テスト方法を決定するに当たって前提としたのは、通常の電圧保証品と同じインハウステスタを用いてテストすることである。これは、マイコンのコスト面からも重要なポイントであった。これを実現するために、量産用テスタの精度に関して、スペックレベルだけではなく実力値のばらつきを定期的に調査してデータを収集した。そして、このデータに基づき、マイコンに持たせるべきマージンを決定した。マイコンの実力がテスタの誤差を吸収できない部分に関しては、前項で述べたように不良解析を行い、改訂を実施した。

また、一部のテスト項目に関しては、内蔵の ROM にテストベクタを記述しテスタの機能を補助することで、テスト精度を高めるように工夫した。現在は、量産での安定性に関する評価も完了しており、低電圧マイコン用の量産テスト技術を確立することができた。

2.6 信頼性評価技術

M34560M6-XXX FP は、低電圧化・高速化・低消費電力化を実現するために、専用のプロセスを開発した。このプロセスの

特長は、低電圧時の性能を上げるためにトランジスタのしきい値を下げ、消費電力を低減するためにゲート酸化膜厚の薄膜化を行っていることである。しかし、これらのプロセス変更によって、ホットキャリアの発生しやすい状況になっており、長期間使用した場合、トランジスタのしきい値の変動が心配された。そこで、従来の一般製品レベルでの信頼性評価に加えて、より故障検出感度を向上させるためにTEG (Test Element Group) を作成し、しきい値変動及びゲート酸化膜・膜質評価を単体トランジスタレベルで実施し、品質検証を行った。

表 1. M34560M6-xxxFP性能概要

項 目	性 能
基本命令数	114
命令実行時間	$V_{DD}=1.1\sim3.6V$ 6 μs (最短命令, 発振周波数 1 MHz時) $V_{DD}=0.9\sim3.6V$ 120 μs (最短命令, 発振周波数 50kHz時)
メモリ容量	ROM 6,144ワード×10ビット RAM 128ワード×4ビット
入出力端子	入力ポート 8本 出力ポート 10本 入出力ポート 39本
タイマ	8ビットタイマ×3
シリアルI/O	8ビット×1
割 込 み	要因 6要因 (外部×2, タイマ×3, シリアルI/O) ネスティング 1レベル
サブルーチンネスティング	8レベル
素子構造	CMOS高性能シリコンゲート
パッケージ	64ピンプラスチックモールドQFP (FP), ピンピッチ=0.5mm
動作周囲温度	-10~70°C
電源電圧	$f(X_{IN})=50kHz$ 時 0.9~3.6V $f(X_{IN})=1MHz$ 時 1.1~3.6V
電源電流	動作時 120 μA (発振周波数 1 MHz, $V_{DD}=1.2V$ 時の標準値) ストップ時 1 μA (常温, $V_{DD}=1.2V$, クロック停止時の標準値)

第1の TEG は単体トランジスタの各電極を端子に接続したものであり、加速試験の前後でトランジスタ特性 (しきい値、ブレイクダウン電圧など) を比較し確認した。第2の TEG は、ゲート酸化膜の膜質評価用にゲート容量を測定できるようにしたものである。容量をモニタすることで、酸化膜の長期信頼性を確認した。以上の信頼性評価により、このマイコンに採用する専用プロセスの信頼性を確認し、また、製品レベルにおいても製品の規格内では全く信頼性に問題のないことが確認できた。

3. 製品概要

M34560M6-xxx FP の性能概要を表 1 に、ブロック図、ピン配置図をそれぞれ図 6、図 7 に示す。以下に各機能モジュールの概要説明を行う。

3.1 C P U

4500 シリーズの 4 ビット CPU をコアとしている。この CPU は、4 ビット ALU (Arithmetic Logical Unit) をベースに三つの汎用レジスタで構成している。アーキテクチャは、ROM、RAM、及び I/O がそれぞれ別のアドレス空間に配置されるハーバードアーキテクチャを採用している。このため、各データバスは最短で配線することが可能になり、各データバスにぶら下がる配線容量が少なくなり、バスアクセス時の消費電流の低減に効果を上げている。

基本命令数は 114 で、基本命令の 92 % に関しては、最短命令実行時間 = 6 μs (発振周波数 = 1 MHz 時) で実行する。また、95 % の命令は 1 ワード命令であり、ROM 効率の優れた命令セットになっている。

プログラムカウンタは 8 レベルの専用スタックを内蔵しており、サブルーチンコール、ベクタ割込み時に

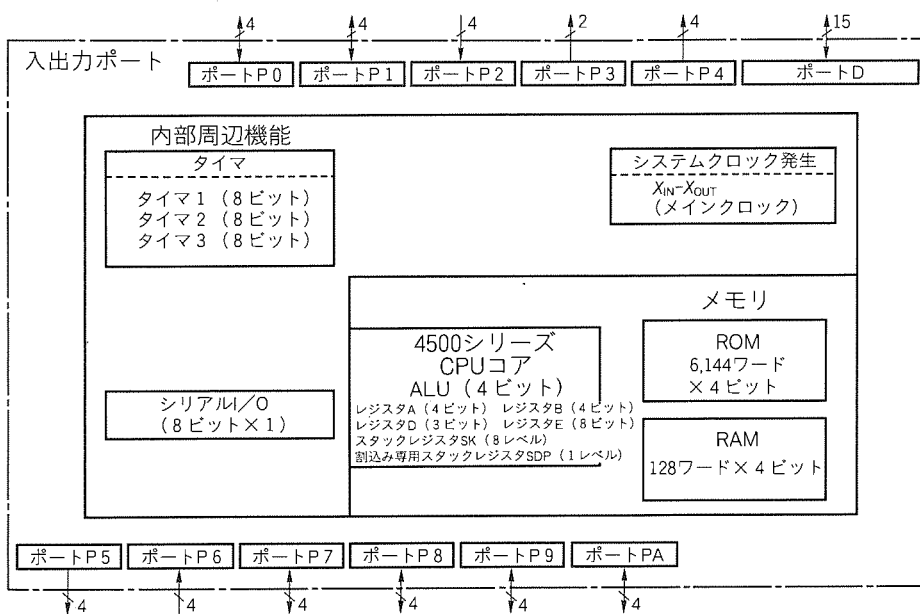


図 6. M34560M6-xxxFP のブロック図

1 命令サイクルで退避を完了する。スタックのレベルを越えないようにプログラムを作成する必要があるが、高速なタスク切換えを実現することが可能である。

3.2 周辺機能

M34560M6-XXX FP は、ROM：6 K ワード、RAM：128 ワード×4 ビットを搭載している。現在のところ、メモリ展開は計画していないが、アドレス空間としては、ROM：2～8 K ワード、RAM：128～1,024 ワード×4 ビットの範囲でのメモリ展開が可能である。

その他の周辺機能としては、8 ビットタイマ3本、シリアル I/O、ウォッチドグタイマなどを内蔵している。

3.3 低消費電力機能

低消費電力用の機能としては、システムクロックの供給を停止するウェイトモード（発振回路は動作している。）、及び、発振を停止するストップモードを持っている。低消費電力モードから通常モードへの復帰は、入力ポートのレベル変化を

検出して復帰するキーオンウェークアップ機能（最大9 端子）を持ち、アプリケーションの負荷を低減させている。また、ストップ状態から復帰する場合は、発振回路が安定するまでの待ち時間をとる必要がある。待ち時間に関しては、各システムの使用条件、使用環境などによって変動するが、M34560M6-XXX FP では、各ユーザの使用状態に合わせ、待ち時間をプログラマブルに設定できるようにした。この結果、発振安定時間のマージンをとり過ぎることなく、最適な待ち時間を設定することが可能になった。

3.4 動作電源電圧

M34560M6-XXX FP の動作電源電圧範囲は低電圧時の動作をターゲットにしているが、高電圧側に関しても 3.6V まで保証している。したがって、電池1本のアプリケーションだけでなく、電池2本のシステムでも動作が可能である。また、ポートに関しては17本の N チャネルオープンドレイン端子を持っている。この端子は電源電圧には関係なく、0～3.6V まで端子電圧を印加することが可能である。入力専用端子についても同様に、0～3.6V まで端子電圧を印加することができる。したがって、応用上、マイコンは1.2Vで動作させ、周辺機器（例えばモータ）を2.4Vで使用しているような場合でもレベル変換が不要であり、直接高電圧をポートに接続することが可能である。

3.5 パッケージ

M34560M6-XXX FP は小型の携帯用機器への応用を考慮したため、パッケージは0.5mm ピッチの64ピンプラスチックモールド QFP に収めた。このパッケージはボディ寸法＝10mm×10mmであり、実装面積の少ない小型携帯用機器に最適である。

4. 評価結果

M34560M6-XXX FP の評価結果から、標準的サンプルの特性を示す。発振周波数＝1 MHz 時の最低動作可能電圧と電源電流の評価結果をそれぞれ図8、図9に示す。

図8に低電圧マイコンの特長が表れているので補足する。通常品では、温度が上昇すると最低動作可能電圧は高くなる（特性が悪くなる。）が、低電圧マイコンでは逆の特性になっ

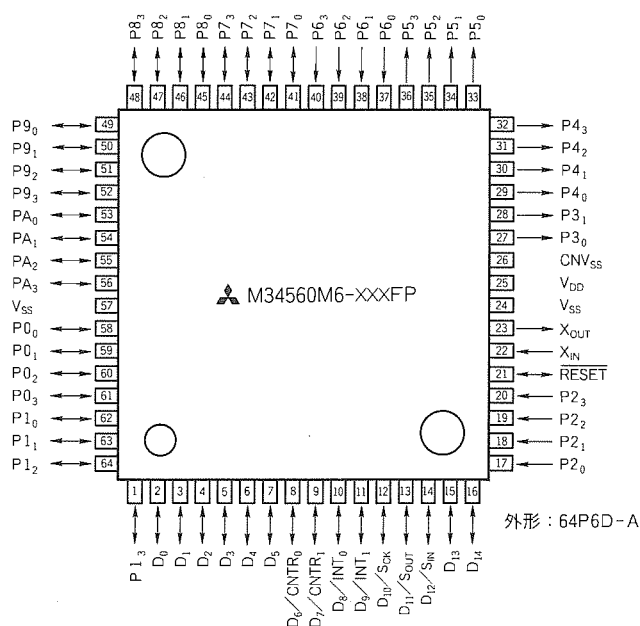


図7. ピン接続図（上面図）

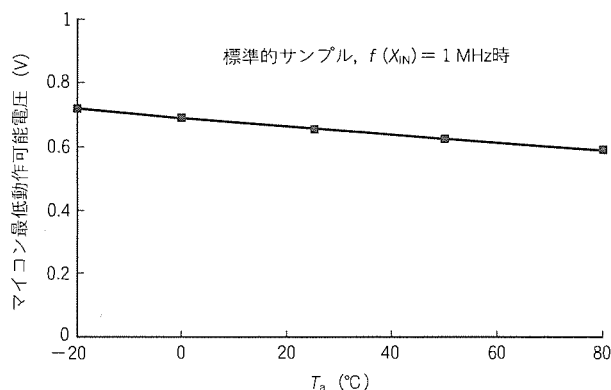


図8. M34560M6-XXXFP最低動作可能電圧の評価結果

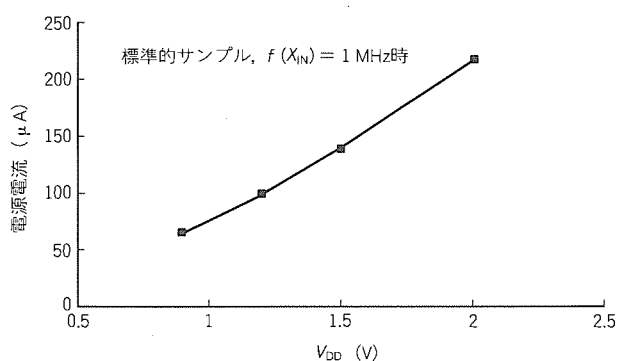


図9. M34560M6-XXXFP電源電流の評価結果

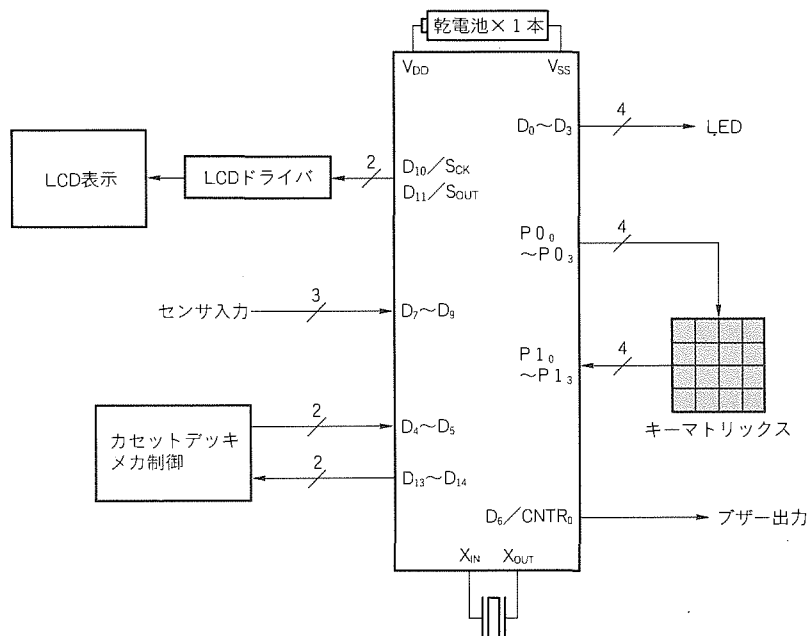


図10. M34560M6-xxxFPを使用した応用回路例

ている。これは低電圧領域では、電源電圧に対するトランジスタのしきい値の占める割合が大きくなり、移動度の温度特性(温度が上昇すると移動度が低下し、電流駆動能力が低下する。)よりも、しきい値の温度特性(温度が上昇するとしきい値が下がり、電流駆動能力が増加する。)が支配的になるためである。動作マージンだけでなく、出力バッファの駆動能力なども同様の特性を示す。したがって、マイコンとユーザ回路との間でインピーダンスの整合をとる場合など上記の特性を把握しておく必要がある。

5. ヘッドホンステレオへの応用

M34560M6-xxxFPは、バッテリー駆動の超小型携帯用機器(特に電池1本の用途)向けに開発した。図10にヘッドホンステレオに応用した例を示す。ヘッドホンステレオは一般的に電池1本で設計されるため、超低電圧マイコンが最適である。M34560M6-xxxFPは電池1本で最大1MHzでの動作が可能のため、メカ制御をしながら並列にシリアル通信を実行するなど、複雑な処理を高速に実行することが可能になる。

また、カメラなどは電源自体は2V以上で設計される場

合が多いが、ストロボ発光用のコンデンサのチャージ中は、かなり電圧降下して1V近辺まで電源が低下する場合がある。このような用途にも、低電圧マイコンは効果を発揮することができる。

今後、携帯用機器は一層小型化(バッテリー数の削減)の方向に発展しており、低電圧マイコンのニーズも更に高まりつつある。

6. む す び

最先端のプロセス技術を用い、超低電圧時に高速で動作する4ビットマイコンを開発した。特に、1.1V時の最大動作速度1MHzは、従来製品(M34211M4-xxxGP)と比較すると10倍以上の高速化を実現し、世界最高レベルの性能を達成することができた。

用途はバッテリーで動作させるアプリケーションに最適であるが、低電圧化・低消費電力化することは、地球環境・エネルギー消費の面からも重要なポイントであり、携帯機器に限らず民生用機器全般に適合するマイコンである。

今後ともこの開発で培った技術を基にして、より高性能・高機能な4ビットマイコンを開発していく予定である。

携帯機器制御用16ビットマイコン

M37734E8L/M8LXXXHP

本郷勝信* 巖名潤一** 笹原裕司** 沖 達哉* 松見治彦*

1. ま え が き

携帯電話を始めとする移動体通信分野の市場は、着実に拡大している。特に、1994年4月からの端末売り切り制導入とデジタル携帯電話のサービス開始により、市場が活性化し、大幅に契約者数を伸ばしている。今後もPHS(Personal Handy Phone System)などの新しい安価なサービスの開始により、飛躍的な市場拡大が期待される。

このような状況の中で三菱電機(株)16ビットマイコン7700シリーズは、低電圧動作、低消費電力、小型パッケージ、手ごろな性能と価格、C言語での開発環境などこの分野に適した特長を持っているため、制御用マイコンとして業界で最も実績のあるマイコンの一つとなっている。しかし、この7700シリーズは、本来、一般産業用として開発されたため、幾つかの改善すべき点が潜在的に存在していた。

今回、この移動体通信分野及び他の携帯機器分野からの要

求が強かった、より一層の低消費電力化(特に非動作時=スタンバイ時)、外付け回路の削減、マンマシンインタフェース性の向上等を図った新マイコンM37734E8L/M8LXXXHPを開発した。従来、7700シリーズは、他社の同等のマイコンに比べて動作時の消費電流が小さいというメリットを持っていた。今回はこの特長を継承するとともに、携帯電話の待受け時間の延長に大きく関連するスタンバイ時の低消費電力化を特に考慮した。また、機器の小型化に貢献する外付け回路の削減と、周辺装置の機能向上なども考慮した。

本稿では、M37734E8L/M8LXXXHPの製品概要、及び低消費電力化と外付け回路の削減に関連する追加機能につき紹介する。

2. M37734E8L/M8Lの概要

表1にM37734M8LXXXHPの性能概要を示す(表の注には、今回同時に開発した高速版M37734M8BXXXFPの性能も追記している)。また、図1にピン配置図を示す。

M37734M8LXXXHPの特長は、以下のとおりである。

(1) 時計用発振回路内蔵

メイン発振回路のほかに時計用発振回路(32kHz)を内蔵した。メイン発振を停止することが可能となり、ウェート状態での消費電流を数 μ Aに落とすことができる。また、時計用タイマを用いた時計機能も実現できる。

(2) 低消費電力

メイン発振回路サイズの小型化、新しいウェートモードの付加、後述する(4)項のA-D変換器の V_{REF} 入力遮断機能付加等により、特にウェート時の低消費電力化を図っている。また、動作時の消費電流も電源電圧3V、クロック入力周波数12MHz時で、6mAと従来どおり低く抑えている。

表2に動作条件と電源電流の関係を示す。

(3) 外部バス制御信号の直接出力

リード信号、ライト信号、チップセレクト信号等を出力し、必要とする外部回路を削減した。

表1. M37734M8LXXXHPの性能概要

項 目	性 能
基 本 命 令	103
最短命令実行時間	333ns (クロック入力周波数12MHz時)*
メモリ容量	ROM 60Kバイト RAM 2Kバイト
入出力ポート	66
入力ポート	2
多機能タイマ	16ビット×8
シリアルI/O	(UART又はクロック同期形)×2
A-D変換器	8ビット×1 (6チャンネル)
監視タイマ	12ビット×1
割 込 み	外部3要因、内部16要因 (割込み優先レベル0~7)
クロック発生回路	2回路内蔵(メイン、時計用) (セラミック共振子又は水晶共振子外付け)
電 源 電 圧	2.7~5.5V*
電 源 電 流 (電源電圧3V時、 標準値)	6mA ($f(X_{IN})=12\text{MHz}$ 方形波入力、動作時) 0.6mA ($f(X_{IN})=12\text{MHz}$ 方形波入力、ウェート時) 3 μ A ($f(X_{IN})$:停止, $f(X_{CIN})=32\text{kHz}$,ウェート時)
メモリ拡張	可能(最大1Mバイト)
動作周囲温度	-40~85℃*
素 子 構 造	CMOSシリコンゲート
パッケージ	80ピンプラスチックモールド ファインピッチQFP* (リードピッチ0.5mm)

注 * 高速版のM37734M8BXXXFPは、
最短命令実行時間: 160ns(25MHz時)、
電源電圧: 5V \pm 10%、動作周囲温度: -20~85℃、
パッケージ: 80ピンプラスチックモールドQFP(リードピッチ0.8mm)

(4) A-D変換器の V_{REF} 入力遮断機能

A-D変換器を使用しないときに、基準電圧入力端子(V_{REF})からラダー抵抗に流れ込む電流を遮断する機能を付加し、無駄な電流消費をなくした。

(5) キー入力割込み・ポートブルアップ機能

キーマトリックスとの直接接続、及びキー入力によるスタンバイ状態からの復帰を可能とし、マンマシンインタフェースの制御用としても使用できるようにした。

(6) 豊富な周辺装置

多機能16ビットタイマ×8本、シリアルI/O×2チャンネル、8ビットA-D変換器など、従来と同様に豊富な周辺装置を内蔵している。

(7) 大容量メモリ内蔵・小型パッケージ

ROM 60Kバイト、RAM 2Kバイトの大容量メモリを

内蔵していながら、実装基板の小型化に必ず(須)なりリードピッチ0.5mmの小型パッケージに収納した。

(8) 低電圧・高速動作

電源電圧2.7～5.5Vで、最短命令実行時間333ns(メインクロック周波数12MHz時)を実現した。

M37734M8LXXX HPは、このような特長を持っており、低消費電力と小型化が要求される電池駆動の携帯機器、特に携帯電話等の制御に適している。

2.1 発振回路

従来、7700シリーズは高速動作を重視して開発されたため、発振回路の低消費電力化については、まだ改善の余地があった。そこで、今回以下の低消費電力化の工夫を行った。

(a) 時計用発振回路の内蔵

(b) メイン発振回路のサイズ縮小

以下、これらの機能について説明する。

2.1.1 時計用発振回路

図2にクロック発生回路のブロック図を示す。この図に示すとおり、メイン発振回路のほかに時計用発振回路を内蔵した。この時計用発振回路の特長は、以下のとおりである。

表2. 動作条件と電源電流の関係

($T_a=25^{\circ}\text{C}$, シングルチップモード時)

電源電圧 V_{cc}	メイン クロック 周波数 $f(X_{IN})^*$	時計用 クロック 周波数 $f(X_{CIN})^*$	動作状態	電源電流 I_{cc} (標準値)
3V (低電圧版)	12MHz	32kHz	動作時	6mA
			ウェート時	0.6mA
	停止	停止	動作時	30 μA
			ウェート時	3 μA
5V (高速版)	25MHz	32kHz	動作時	19mA
			ウェート時	1.9mA
	停止	停止	動作時	50 μA
			ウェート時	5 μA
	停止	停止	ストップ時	数nA以下

注 * X_{in} に外部から方形波を入力したとき

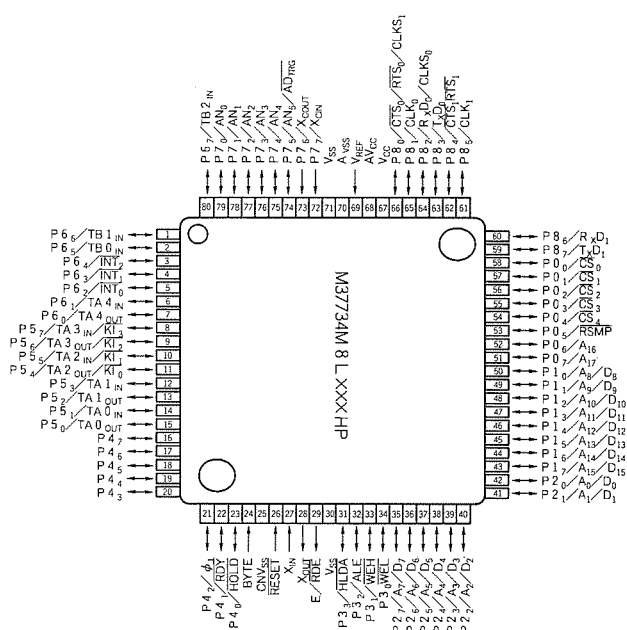


図1. M37734M8LXXX HPのピン配置

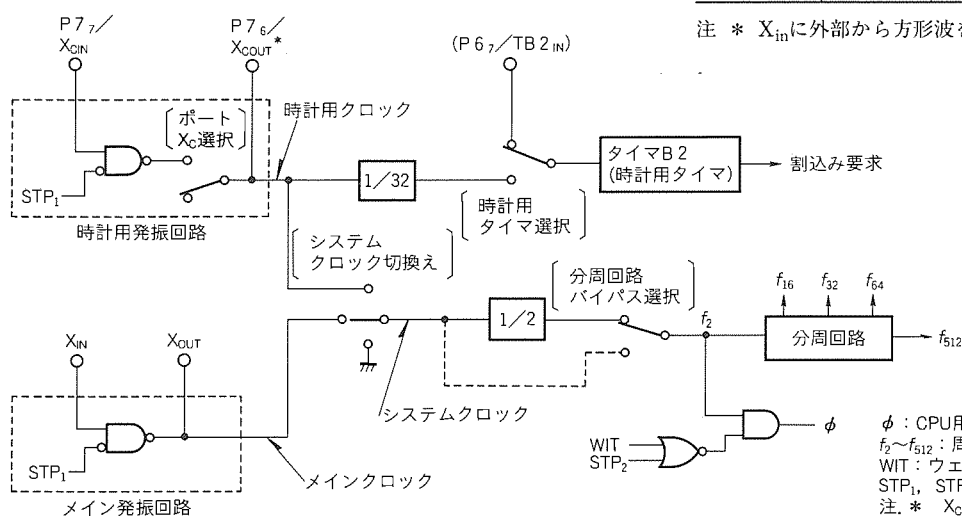


図2. クロック発生回路ブロック図

(1) 降圧レギュレータで降圧した電源電圧を使用し、発振回路で消費する電力を極力抑えている。電源電圧 3 V 時の消費電流は 3 μ A 程度 (標準) である。

(2) 発振素子を接続する端子 (X_{COUT}, X_{CIN}) を入力ポートと兼用にして、時計用発振回路を使用しない場合に端子が無駄にならないようにした。

(3) 時計用クロックをシステムクロックとして選択でき、また、この状態で、メインクロックを停止できる。図 3 にシステムクロックの状態遷移図を示す。図に示すとおり、状態 S1, S2 ではメインクロックで動作し、状態 S3, S4 では時計用クロックで動作する。また、状態 S4 ではメインクロックは停止する。さらに、状態 S4 で WIT (ウェイト) 命令を実行するとウェイト状態 S6 となり、CPU は停止する。この機能により、携帯電話での待受け時間など CPU 動作を極めて遅くしてもよい場合 (状態 S4) や、CPU を停止してもよい場合 (状態 S6) には、消費電流を数十～数 μ A に落とすことができる。

(4) 時計用タイマ

時計用発振回路を使用する場合には、タイマ B2 (汎用 16 ビットタイマのうちの 1 本) を、サブクロックを 32 分周したクロック信号をクロック源とする時計用タイマとして使用できる。タイマ B2 は 16 ビットタイマであるから、最大 1 分強の計時が可能である。この時計用タイマの割込みを使用することにより、一定時間ごとにウェイト状態 (例えば状態

S6) から復帰させることができる。

2.1.2 メイン発振回路サイズ縮小

従来高速での発振を考慮して比較的サイズが大きかったメイン発振回路のドライバサイズを約 2 / 3 に縮小した。この結果、セラミック共振子を接続した場合のメイン発振器での消費電流を約 15 % (電源電圧 5 V, クロック周波数 16 MHz 時で約 0.5 mA) 削減できた。ただし、外部から方形波を入力する場合には、消費電流の削減量はわずかである。なお、このようにサイズを縮小しても、電源電圧 5 V 時で 25 MHz までの発振については問題ないことを確認している。

図 4, 図 5 にウェイト時 (状態 S5) の電源電流実測値を示す。ウェイト状態では発振回路周辺しか動作しないので、これらのグラフから上記の効果を直接見ることができる。例えば、図 4 のセラミック共振子接続の場合、従来製品 M37710E8 の線と M37734E8 の最も上段の線の差異が、メイン発振回路サイズ縮小の効果である。

2.2 スタンバイモード

CPU のみ停止するウェイトモードと発振も停止するストップモードについて、より消費電力を抑えるため新しい選択モードを付加した。以下、これらの新モードについて説明する。

2.2.1 ウェイトモード

従来のウェイトモードでは、ウェイト状態でもタイマ等の周辺装置を使用可能とするため、内部クロック $f_2 \sim f_{512}$ (図

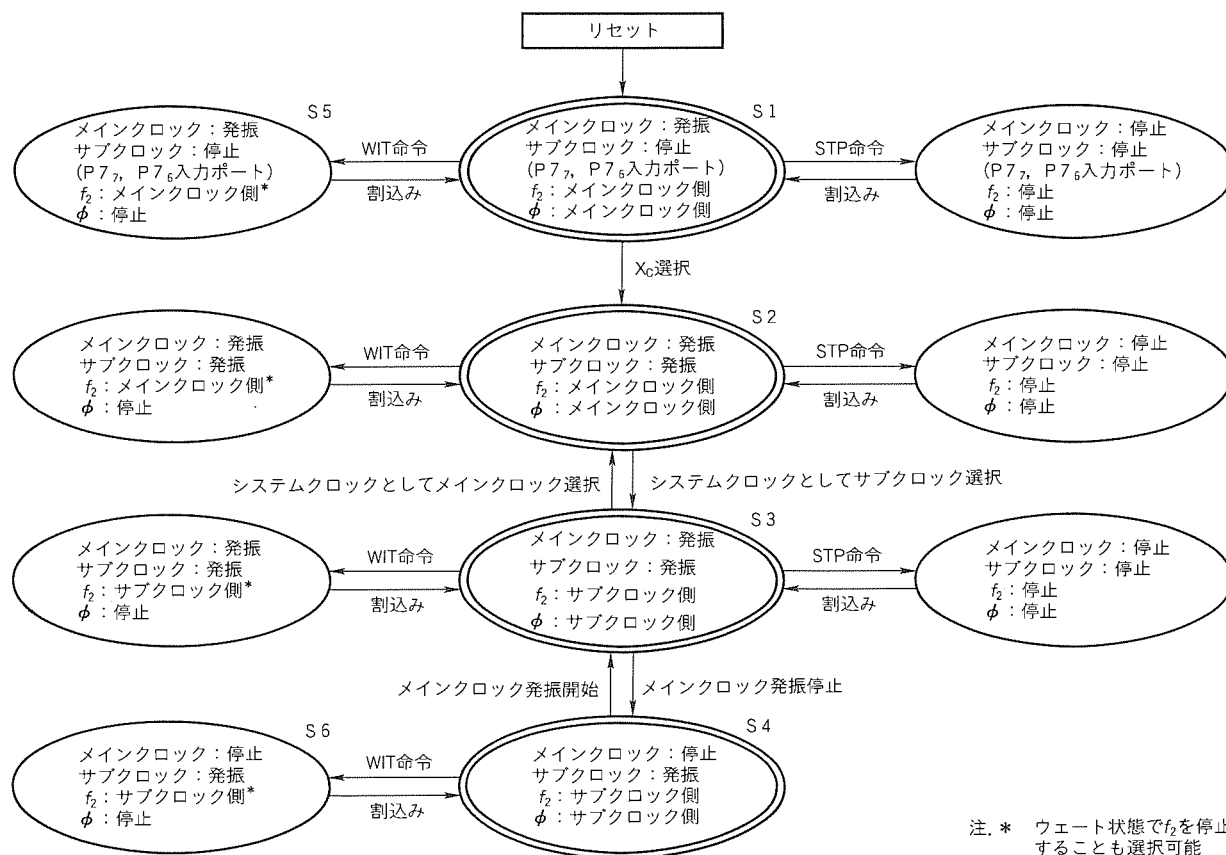


図 3. システムクロックの状態遷移

2 参照) を生成する分周回路を停止していなかった。しかし、通常ウェイト状態では周辺装置を使用しない場合が多いので、ウェイト状態でこの分周回路を停止するモードを新たに付加した。

図 5 に示すとおり、この新モードにより、メイン発振器での消費電流を約 38 % (電源電圧 5 V、クロック周波数 16 MHz 時で約 0.8 mA) 削減できた。また、時計用発振回路のみ使用している場合 (状態 S6) では、同じく電源電圧 5 V 時、消費電流を約 8 μ A から約 5 μ A に削減できた。

2.2.2 ストップモード

従来のストップモードに加えて、外部から安定したクロック供給が期待できる場合を考慮し、割込み要求後直ちに CPU 用内部クロック ϕ の供給を再開するモードを付加した。これにより、外部クロックを入力するシステムにおいては、割込み要求から CPU 動作再開までのレスポンスタイムを短縮でき、さらに、この待ち時間での電流消費をなくすことができるようになった。

2.3 外部バス制御信号

外部バスにメモリや専用 IC を接続する場合、従来の 7700

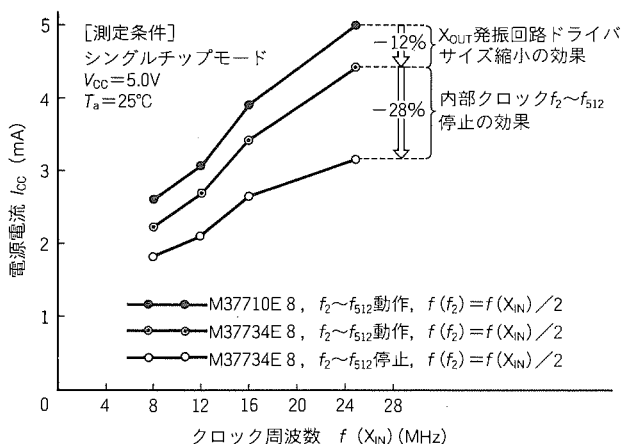


図 4. ウェイト時の電源電流特性 [1]
(セラミック共振子接続の場合)

シリーズの製品では、外部素子でチップセレクト信号、ライト信号、リード信号及び必要に応じてレディ信号を生成する必要があった。M37734E8L/M8L×××HP では、これらの信号を直接出力するようにして外部素子の削減を図った。ただし、チップセレクト信号出力のため上位アドレス出力を削ったので、拡張できるアドレス空間は 16M バイトから 1M バイトに減少した。以上の外部バス制御信号出力により、図 6 の外部バス接続図例に示すように、必要な外付け素子はアドレス/データのマルチプレックスバスからアドレスを分離するためのアドレスラッチのみとなった。

2.4 A-D変換器

A-D変換器は、被測定アナログ入力電圧との比較に用いる基準電圧群を生成するために、基準電圧入力端子 (V_{REF}) とグランド (AV_{SS}) 間にラダー抵抗を持っている。このラダー抵抗の抵抗値は、電源電圧 5 V 時で 17 k Ω 程度であり、定常的に 0.3 mA 弱の電流が $V_{REF}-AV_{SS}$ 間に流れる。この電流は、A-D 変換器を使用しない場合には全く無駄な電流であり、遮断できることが望ましい。そこで、図 7 に示すとおり V_{REF} とラダー抵抗間にスイッチ素子として p チャネル

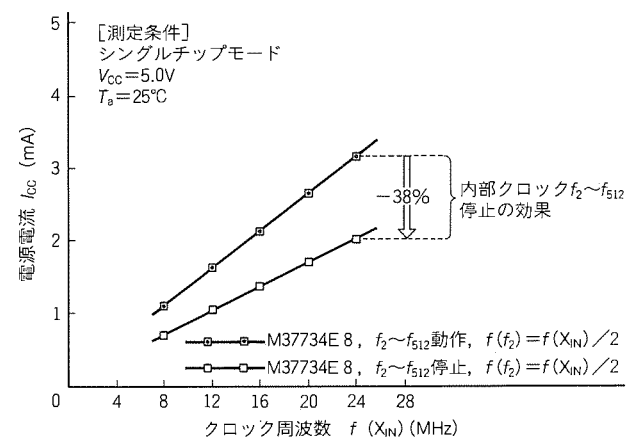


図 5. ウェイト時の電源電流特性 [2]
(外部方形波入力の場合)

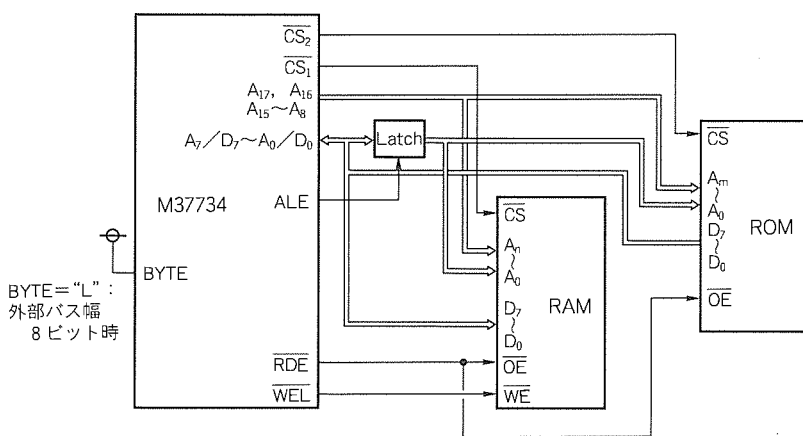


図 6. 外部バス接続図例
(メモリ外付けの場合)

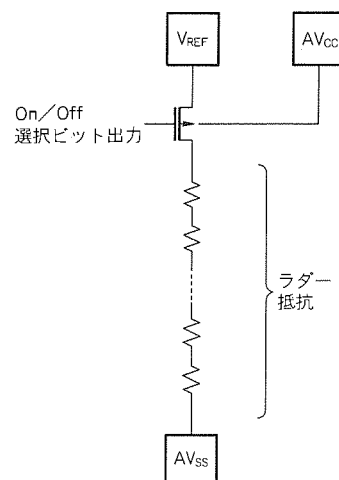
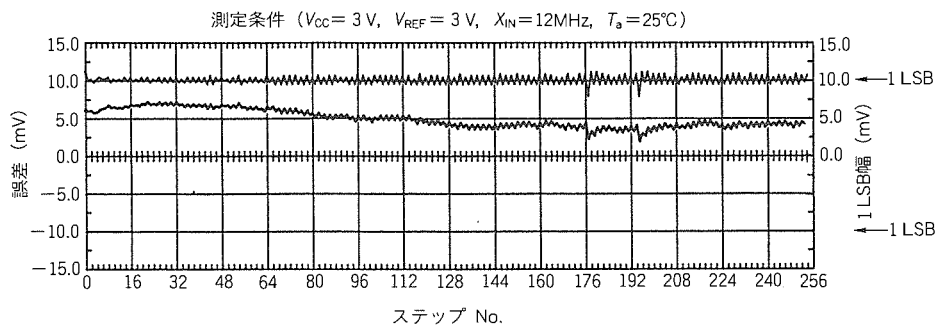


図 7. A-D変換器ラダー抵抗構成



グラフ下側のラインは、絶対精度誤差を示す。誤差は出力コードが変化する点の理想値からのずれで表示している。この図の場合の最大誤差は、30ステップ付近の7.2mV (0.72 LSB) である。一方グラフ上側のラインは、出力コードが同一である入力電圧の幅を示す。

図8. A-D変換精度測定結果

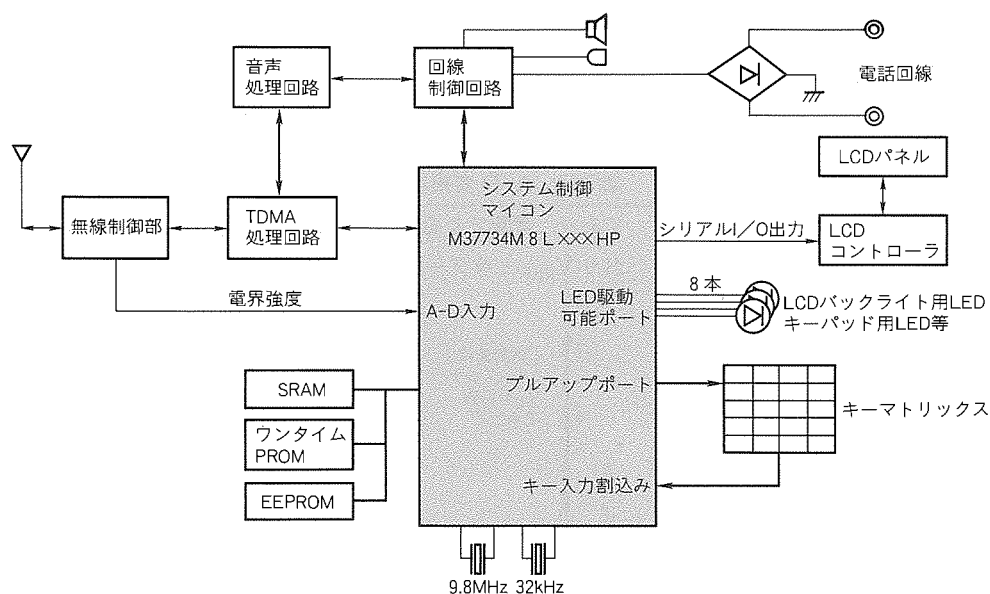


図9. PHSへの応用例

MOS トランジスタを付加し、選択ビット書込みにより On/Off の制御を可能とした。p チャンネル MOS トランジスタを Off した場合には、 $V_{REF}-AV_{SS}$ 間の電流をほとんどゼロとすることができた。したがって、従来必要とした外付けのスイッチ素子を削減することができる。

p チャンネル MOS トランジスタの付加に際しては、このトランジスタのオン抵抗を考慮し、A-D 変換精度に影響が出ないようにラダー抵抗の抵抗値の調整を行った。その結果、この8ビット A-D 変換器の絶対精度実測値は、 ± 2 LSB 以内に収めることができた。図8に A-D 変換精度の実測データを示す。この図の条件の場合、絶対精度誤差は0.72LSB である。

2.5 キー入力割込み・ポートプルアップ機能

マンマシンインタフェースの制御用としても使用できるように、複数の入力 (最大4本) のいずれかに“L”が入力されたときに割込みを発生するキー入力割込み機能と、出力ポート (最大4本) のプルアップ機能とを付加した。これにより、外部素子を用いることなくキーマトリックスと直接接続でき

るとともに、いずれかのキーの押下によってスタンバイ状態(ウェイト/ストップ状態)からの復帰が可能となった。

3. 応 用

図9に簡易型携帯電話 PHS S への応用例を示す。M37734E8L/M8LXXX HPは、低電圧・高速動作、低消費電力(動作時、スタンバイ時)、豊富な周辺装置、少ない外付け素子などの特長を持っており、PHS、携帯電話の制御用マイコンとして最適である。特に、時計用発振回路を内蔵しているため、通話を行わない待受け期間に必要な、動作(位置登録) - ウェイト - ウェイトからの復帰(時計用タイマ割込みによる) - 動作という一連のサイクルをこのマイコンのみの機能で行え、かつ、ウェイト中の消費電流が数 μA と非常に少ないというメリットがある。

また、キーマトリックスとの接続機能等を付加し、マンマシンインタフェースの制御用としても使用できるように考慮している。

4. む す び

携帯電話、PHS 等の移動体通信機器やその他の携帯機器制御用マイコンとして M37734E8L/M8LXXX HPを開発した。評価の結果、このマイコンの新機軸である消費電流削減対策は予想どおりの効果があったことが分かった。また、A-D 変換改造 (V_{REF} 入力遮断機能) に伴う変換精度の低下も許容値内に収めることができた。

今後は、市場からの要求が強い ROM の更なる大容量化等の製品展開を進めていくとともに、微細化ウェーブプロセスの採用による低消費電力化とコスト削減を予定している。また、更なる低消費電力化、CPU や周辺装置の強化、多ピン化、周辺回路の取込み、超小型パッケージの採用など市場から要求のある項目にも順次対応していきたい。

最後に、このマイコンの開発に当たって協力いただいた関係者の方々に感謝の意を表する。



特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
総合グループ Tel/(03) 3218-2137

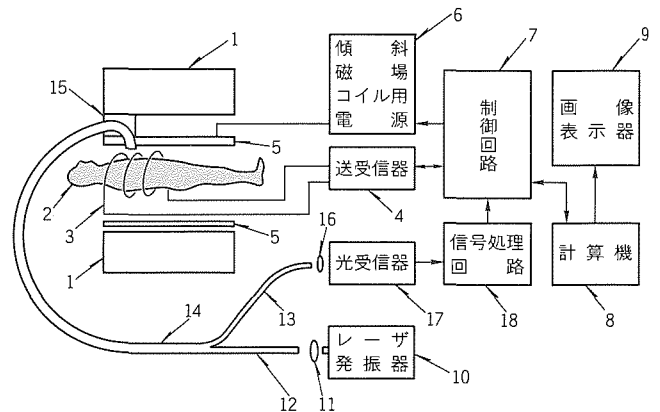
画像診断装置 (特許 第1614183号, 特公平2-37173号)

この発明は、画像診断装置に関し、特に被測定体の画像を表示するものに関するものである。

従来のこの種の装置は、変動する胸部や腹部を画像化するとき、呼吸のため人体の画像がひずんだり、空間分解能が低下してぼけが生じたりする欠点があった。

この発明はこのような欠点を除去するためになされたもので、実施例を図に示す。電磁波を人体(2)に照射し、放射された電磁波を送受信器(4)で検出して画像を表示する。これに加えて、レーザ発振器(10)からレンズ(11)を介し、送光用光ファイバ(12)を通して人体(2)の胸壁又は腹壁にレーザ光を照射し、その反射光を受光用光ファイバ(13)を通り、レンズ(16)を介して光受信器(17)に導く。反射信号は呼吸による人体(2)の動きに同期したもので、信号処理回路(18)で波形整形して呼吸周期と同期して同一の位相となる時点を検知し、この同期信号を制御回路(7)を介して送受信器(4)の送信部に入力する。この同期信号に基づいてパルス状に送受信器(4)

発明者 依田 潔, 板垣秀信, 坂本豪信
から人体(2)に電磁波を照射すると、胸部又は腹部が常に同一変位のときの画像が得られ、呼吸運動に影響した画像のひずみやぼけを除去できる画像診断装置が得られる。



微量イオン検出器 (特許 第1456666号, 特公昭63-2347号)

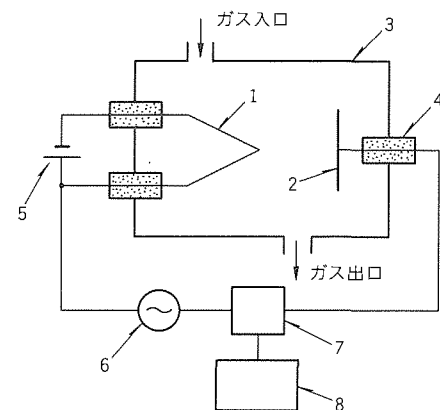
この発明は、気中の微量のナトリウム漏えい(洩)を検出する微量イオン検出器に関するものである。

従来の微量ナトリウムの漏洩検出器は、暗電流が絶縁物の温度、汚れ程度、水分の付着などで大きく変化するため、当初性能の維持が困難で、誤信号を生じやすい欠点があった。

この発明は、この点をかんがみてなされたもので、図に実施例を示す。被検体ガスに微量のナトリウムが含まれると、約1,000度に加熱されたフィラメント(1)を通過するとき、熱解離によってイオン化する。これをコレクタ電源(6)で付勢してコレクタ電極(2)に捕集し、電流信号として検出する。ここで、コレクタ電源(6)を交流にしたこの発明の場合、暗電流も検出信号も交流となるが、暗電流は正負極性依存はないので、後続回路の信号処理によって暗電流を著しく小さくできる。一方、検出信号は、ナトリウムの正イオンによってもたらされるので、フィラメント(1)が正電圧、コレクタ電極(2)が負電圧になった場合のみ出力が得られる。また、ナトリウムの正イオンは、フィラメント(1)が負電圧の場合はフィラメント(1)の表面から離れず、フィラメント(1)が正電圧にな

発明者 上田和宏
ったときに、一斉にコレクタ電極(2)に向けて発射され、漏洩検出信号がほぼ2倍になる。

以上のようにこの発明によれば、コレクタ電極に交番電圧を印加したので、リーク電流を除去することができ、SN比の改善された耐汚損性の強い微量イオン検出器を得ることができる。





特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
総合グループ Tel(03)3218-2137

超電導コイル (特許 第1395817号, 特公昭62-2444号)

この発明は超電導コイルの安定性の改善に関するものである。

従来の超電導コイルは図1のように、巻線(1)、スペーサ(4)、冷媒容器を兼用するチューブ(5)及び支持板(6)によって構成される。通電した場合、巻線(1)とスペーサ(4)の間に相対変位が生じ、巻線が摩擦発熱によって加熱され、巻線の温度が上昇する。この温度上昇により、巻線に使用している超電導体が臨界温度を越えると、その部分に超電導破壊が生じ、コイルに通電できなくなる。

この発明は、上記のような欠点を除去するためになされたもので、実施例を図2のスペーサ(4)部分の断面図によって説明する。図中、(a)が従来の超電導コイルの断面を示したもので、(b)がこの発明の一実施例を示したものである。スペーサ(4)と巻線(1)の間に低摩擦材(6)が挿入されており、低摩擦材(6)が介在するため、スペーサ(4)と巻線(1)の間の相対

発明者 山田忠利, 守田正夫, 地蔵吉洋, 坂本豪信
変位による発熱が軽減され、超電導破壊が生じにくくなる。

以上のように、この発明によれば巻線とスペーサの間に低摩擦材を挿入するように構成したので、超電導破壊が生じにくい超電導コイルを得られる効果がある。

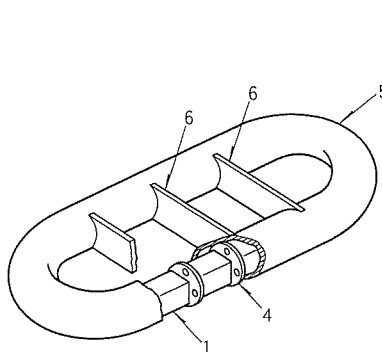
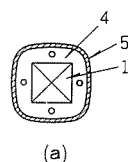
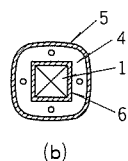


図1



(a)



(b)

図2

<次号予定> 三菱電機技報 Vol. 69 No.3 特集“半導体”

特集論文“半導体”

- 半導体特集に寄せて
- 半導体の現状と展望
- 国際標準高効率符号化方式(QM-Coder) LSI M65760FP
- MPEG-2 対応1/2画素精度動き検出 LSI
- アナログ/デジタル混載用, 10ビット, 20メガサンプル/秒 CMOS A/Dコンバータ
- I²Cバスコントロール マルチスタンダード TV 用 LSI
- サブミクロン大規模 ASIC 用設計システム
- 新16ビットマイコンM16シリーズ—低電圧・低消費電力シングルチップ版M16/12—
- 16ビットマイコン7700ファミリー—40MHz対応7751シリーズ—

- Phoenix ファームウェア搭載の新世代キーボードコントローラ M3880X
- 三次元グラフィックス用フレームバッファメモリ(3D-RAM)
- 3.3V 単一電源16MDINOR フラッシュメモリ
- 100MHz 動作2バンク構成16ビット シンクロナス DRAM
- 第三世代低消費電力1Mビット SRAM
- 世界最大容量の6kV, 6kA GTOサイリスタ
- トレンチ構造60V 耐圧パワー MOS FET
- 单相ハーフトーン位相シフトマスク
- アモルファスシリコン TFT 用回路/デバイスシミュレータ
- SRリソグラフィによる超微細パターン形成

三菱電機技報編集委員

委員長 田岡恒雄
委員 永田譲蔵 鈴木幹雄
都築 鎮 大井房武
尾関龍夫 江頭英隆
水野久隆 東條孝雄
畑谷正雄 才田敏和
中井良雄 鳥取 浩
幹事 長崎忠一
2月号特集担当 上田孝寿

三菱電機技報69巻2号

(無断転載を禁ず)

1995年2月22日 印刷
1995年2月25日 発行

編集兼発行人 長崎 忠一
印刷所 千葉県市川市塩浜三丁目12番地 (〒272-01)
菱電印刷株式会社
発行所 東京都港区新橋六丁目4番地9号
北海ビル新橋 (〒105)
三菱電機エンジニアリング株式会社内
「三菱電機技報社」 Tel.(03) 3437局2692
発売元 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 (〒101)
株式会社 オーム社
Tel.(03) 3233局0641代, 振替口座東京6-20018
定価 1部721円(本体700円) 送料別

スポットライト

重粒子線がん治療照射用 多葉コリメータ装置

重粒子線がん治療装置の重粒子線の広がりをごん患部の形状に整形する多葉コリメータ装置を製品化しました。この装置は、余分に広がった重粒子線をカットし、患部にのみ重粒子線を集中し、安全な照射を約束します。

写真左は、治療室の重粒子線(水平・垂直照射用ビームライン)出口と治療台を示したもので、多葉コリメータは重粒子線の出口に装着されています。主要諸元は表のとおりです。全体の大きさは、直径810 mm×340 mmであり、重さは約350 kgです。

写真右は多葉コリメータを下からのぞいたもので、重粒子の通路である開孔部を、三日月状の患部を想定してその形状に設定されています。重粒子線はこの開孔部のみを通して患部に照射されます。三日月形の輪郭は46枚の板状の遮へい(蔽)体(リーフ)の開き量を制御して形づくられます。各リーフは独立にステッピングモータで、ビーム軸に直線状に出し入れされ、その位置はロータリエンコーダでモニタされ、任意の位置に停止できます。

多葉コリメータ装置の駆動・制御はコリメータドライブユニット(MDU)で行います。照射部位に合うようにリーフ位置設定が必要で、MDUのCPUは各リーフのモータドライバであるリーフドライブコントロール(LDC)に各々のリーフ設定位置データを送っています。LDC 1個で対向リーフ2枚の位置設定・制御を行います。リーフの現在位置をモニタしながらモータを駆動します。対向するリーフ同士の衝突に対しては、衝突防止装置が働きます。

治療照射では、二次元照射と三次元照射とがあり、前者の場合、各リーフ位置の設定は照射中変更が不要ですが、後者の場合、患部の深さ方向の照射野に応じてリーフ位置を高速に変更する必要があります。設定予定の全リーフ設定値データをあらかじめ送って、線量モニタからのトリガ信号を直接にLCDへ入力して駆動制御しています。万一、リーフ設定にエラーが発生したときにはビーム停止の信号がインタロック回路に直接的に送られ、患者を保護します。



治療室の重粒子線出口部と治療台



多葉コリメータ開口部

多葉コリメータ装置の主要諸元

有効照射野	径220 mm
リーフ遮蔽領域	150×220 (mm)
リーフ移動範囲	-55~110 mm
リーフ配列ピッチ	6.5 mm
リーフ枚数	23×2枚
リーフ移動速度	80 mm/s
リーフ停止精度	±0.5 mm
リーフ材質	鉄
リーフ遮蔽厚さ	70 mm
リーフ厚さ	140 mm
リーフ断面構造	2 段階付き構造
リーフ間すきま	0.25 mm以下
質 量	350 kg
消 費 電 力	1 kW

今日、高度情報化社会の進展と配電制御システムの高度化・複雑化に伴い、電力供給の安定化に対する要求は厳しさを増しております。この要求におこたえするために、このたび発売以来ご好評をいただいております“MELVAC” VFシリーズをモデルチェンジし、安全性と使いやすさを追求するとともに、よりコンパクト化した遮断器VF-8 C/13C形VCBシリーズを発売いたしました。

特 長

(1) 安全性

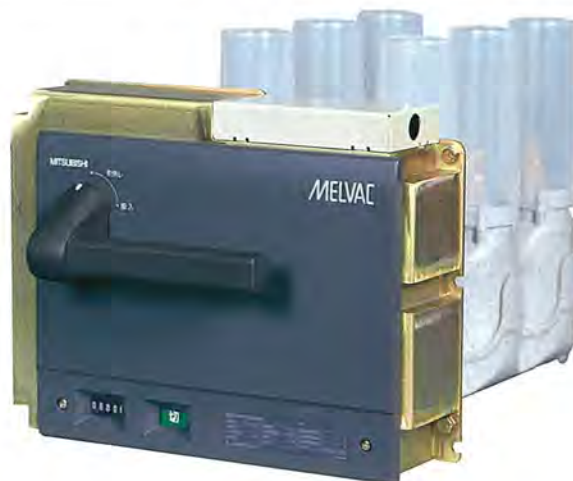
- 主回路絶縁物に耐トラッキング材料を採用し、耐環境性向上を図りました。
- 主回路充電部の透明カバー(熱可塑性)を主回路絶縁物(熱硬化性)と同じ材料に変更し、安全性をより高めました。
- 主回路と制御回路部を分離し、制御回路部の安全性をより高めました。

(2) 使いやすさ

- 操作電圧のAC/DC共用を図りました(電圧引外し装置を除く。)
- パネルカットは、全タイプ同一とするとともに、フェースプレートセンタと主回路端子センタを一致させました(固定形)。
- 固定枠を共用化しましたので、仕様変更にも容易に対応できます(引出形)。

(3) 小型・軽量化

- より一層のコンパクト化を図りました(固定形)。
容量比：従来の70%に小型化(当社比)
質量比：従来の90%に軽量化(当社比)
- 薄形化を更に進め、引出形で奥行き660mmから558mmに縮小することで、奥行き700mmの盤に収納可能となりました。



パネル取付形(Rタイプ)



引出形(CW級)

仕 様

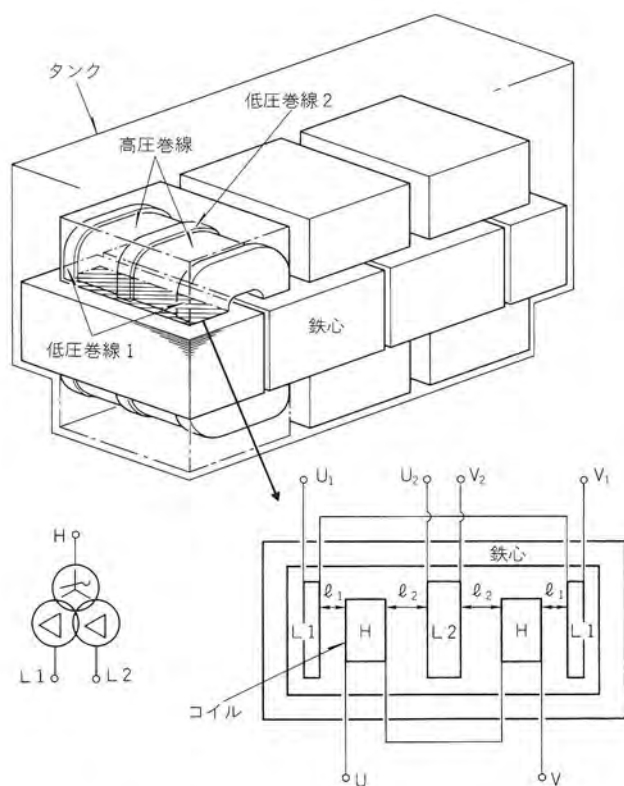
形 名*1	汎用品	VF-8□H-C		VF-13□H-C		VF-8□M-C		VF-13□M-C	
	低サージ品	VF-8□H-CG		VF-13□H-CG		VF-8□M-CG		VF-13□M-CG	
準 拠 規 格		JIS C 4603/JEC-2300				JEC-2300/IEC-pub 56			
定 格 電 圧 (kV)		3.6/7.2							
定 格 電 流 (A)		400		600		400		600	
定格周波数 (Hz)		50/60							
定格遮断電流 (kA)		8		12.5		8		12.5	
定格遮断時間 (サイクル)		3							
閉路操作方式		手動ばね操作				電動ばね操作			
標準引外し装置		過電流引外し装置 (OTC)				電圧引外し装置 (STC)			
補助スイッチ	固定形	2 a 2 b				5 a 5 b			
	引出形	2 a 2 b				5 a 5 b			
据 付 方 式	固定形	JEM1425 区分: CX							
	引出形	JEM1425 区分: CW				JEM1425 区分: CW, PW, MW			
質 量*2 (kg)		パネル取付形: 23				パネル取付形: 26			
		引出形 : 31				引出形 : 34			

注 *1 形名□内は据付方式の仕様であり、固定形はP, N, R, 引出形は, C(CW級), V(CW級薄形), D(PW級), G(MW級)の記号が入る。

*2 遮断器本体の質量

このたび三菱電機(株)では、一軸型コンバインドサイクルプラントである中国電力(株)柳井発電所（出力700MW×2系列=1,400MW）に、容量の異なる二つの低圧巻線を使用した“異容量スプリット巻線変圧器”を、平成元年3月から平成6年6月にかけて合計4台納入しました。

スプリット巻線変圧器は、2台の変圧器を複合一体化するとともに“2台別々に並列使用する場合と同様のインピーダンス特性”を持たせた変圧器で、通常の2巻線変圧器2台に比べて損失・質量の低減、省スペース化が可能であり、建設費低減、ランニングコスト低減に貢献することができました。特に1号系列の変圧器は、二つの低圧巻線の容量が2倍近く異なり、なおかつインピーダンス仕様は“各低圧巻線容量基準で同一”という仕様でしたが、設計自由度の大きい外鉄形変圧器の特長を生かして実現することができました。



異容量スプリット巻線変圧器の巻線配置

特 長

- 2台の変圧器を別々に並列使用する場合と同様のインピーダンス特性

このスプリット条件を満足させるために、低圧巻線1 (L1) と低圧巻線2 (L2) の間に高圧巻線 (H) をサンドイッチ状に配置させて、両低圧巻線間の磁氣的結合のない構造としました。この構造は、外鉄形変圧器の特長である交互配置巻線構造に合致しており、各巻線の周長を増すことなくスプリット条件を満足させることができました。

- 高圧-低圧間インピーダンスが各低圧巻線容量基準で同一

この仕様に対しては、高圧-低圧間の寸法調整 (図中 ℓ_1 , ℓ_2) により対処しました。外鉄形交互配置巻線構造であるため、この寸法調整によっても各巻線の周長は増すことがなく、合理的に仕様を満足させることができました。



220kV 410/271-139MVA異容量スプリット巻線変圧器

異容量スプリット巻線変圧器定格

項 目	1号系列 (2台)	2号系列 (2台)
形 式	屋外用 外鉄形 三相スプリット巻線変圧器	
定格容量 (MVA)	高圧	410
	低圧 1	271
	低圧 2	139
定格電圧 (kV)	高圧	220
	低圧 1	13.5
	低圧 2	13.5
インピーダンス電圧 (各低圧側容量基準)	H-L 1 間: 15%	H-L 1 間: 13%
	H-L 2 間: 15%	H-L 2 間: 13%
冷 却 方 式	送油風冷式	
騒 音	70 dB (A)	